

TEHNIČKA RJEŠENJA PRIKLJUČENJA NA MREŽU VJETROELEKTRANA NA MORU

Beljan, Alan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:949180>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**TEHNIČKA RJEŠENJA PRIKLJUČENJA NA MREŽU
VJETROELEKTRANA NA MORU**

Rijeka, rujan 2024.

Alan Beljan

0069083437

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**TEHNIČKA RJEŠENJA PRIKLJUČENJA NA MREŽU
VJETROELEKTRANA NA MORU**

Mentor: prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, rujan 2024.

Alan Beljan

0069083437

Rijeka, 16.03.2024.

Zavod: Zavod za elektroenergetiku
Predmet: Prijenos i distribucija električne energije

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Alan Beljan (0069083437)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike (1300)
Modul: Elektroenergetika (1332)

Zadatak: **TEHNIČKA RJEŠENJA PRIKLJUČENJA NA MREŽU VJETROELEKTRANA NA MORU /
Technical solutions for connecting to the grid of offshore wind power plants**

Opis zadatka:

Koncepcija i tehnička rješenja vjetroelektrana na moru. Zahtjevi pri priključenju vjetroelektrana na moru na mrežu. Razrada tehničkih rješenja priključenja vjetroelektrana na moru na mrežu, te njihova usporedba i razrada kriterija za odabir. Razrada jednog primjera priključenja vjetroelektrane na moru na mrežu.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:
prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Prema članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod mentorstvom prof. dr. sc. Vitomira Komena poštujući načela akademske čestitosti i pravila za izradu diplomskog rada. Zadatak diplomskog rada glasi: „TEHNIČKA RJEŠENJA PRIKLJUČENJA NA MREŽU VJETROELEKTRANA NA MORU“.

Potpis: Alon Beljan

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. KORIŠTENJE ENERGIJE VJETRA.....	5
2.1. Povijest korištenja energije vjetra	5
2.2. Energija vjetra u Europi	7
2.3. Energija vjetra u RH.....	9
3. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE VJETROTURBINA.....	14
3.1. Rotor.....	14
3.2. Kućište vjetroturbine	15
3.3. Generator	16
3.4. Toranj	17
3.5. Temelji vjetroturbine	17
4. KORIŠTENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA MORU	20
4.1. Podjela morskih površina	20
4.2. Potencijal iskorištenja obnovljivih izvora energija na moru	21
4.3. Potencijal Republike Hrvatske za iskorištavanje energije vjetra	28
4.4. Potencijalno područje za izgradnju priobalne vjetroelektrane	33
5. TEHNIČKA RJEŠENJA PRIKLJUČENJA VJETROELEKTRANA NA MORU	37
5.1. Podmorski energetska kabel.....	37
5.2. Priobalna podstanica (Offshore Substation).....	42
5.3. Podstanica za pokrivanje jalovih gubitaka	43
5.4. Kopneno rasklopno postrojenje i transformator.....	44
5.5. Usporedba HVAC i HVDC	45
6. TEHNIČKA RJEŠENJA KOLEKTORSKOG SUSTAVA VJETROELEKTRANA NA MORU.....	51
6.1. Radijalni dizajn	51
6.2. Dizajn jednostranog prstena	52
6.3. Dizajn dvostranog prstena	53
6.4. Zvezdasti dizajn	54
6.5. Dizajn povratne veze	55
6.6. Dizajn dvostranog poluprstena	56
7. EKONOMSKA OSNOVA VJETROELEKTRANA NA MORU	57
7.1. Nivelirana cijena električne energije.....	57
7.2. Analiza troškova vjetroelektrana na moru	59
8. PRIMJER RJEŠENJA VJETROELEKTRANE NA MORU	63

8.1.	Projekt priobalna vjetroelektrana Hornsea	63
8.2.	Vjetroturbina Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD.....	68
9.	RAZRADA RJEŠENJA ZA VJETROELETRANE NA MORU U RH.....	70
10.	ZAKLJUČAK	76
	LITERATURA	78
	SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	81
	SUMMARY AND KEY WORDS.....	81
	POPIS SLIKA	82
	POPIS TABLICA	83

1. UVOD

U suvremeno doba visoke tehnologije i sve većeg broja stanovnika potražnja za električnom energijom sve je veća. Dodatno, globalno zatopljenje i emisija stakleničkih plinova u atmosferu otežavaju proizvodnju električne energije. Vlade i vrhovne svjetske organizacije okreću se obnovljivim izvorima energije i održivom razvoju. Vjetroelektrane su najveći obnovljivi izvor električne energije na svijetu. Ulaganjem u obnovljive izvore energije želimo smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima i smanjiti stvaranje emisija stakleničkih plinova, najviše ugljikova dioksida. Europska Unija želi do 2050. godine ostvariti nultu emisiju ugljikova dioksida, a prema studijama financiranim od strane Europske unije najveći potencijal za obnovljive izvore energije imaju vjetroelektrane i solarne elektrane. Stoga je EU u zadnjih 10 godina financirala studije za potencijal dobivanja električne energije iz obnovljivih izvora energije na moru.

Energija vjetra je do kraja 19. stoljeća korištena kao izvor energije za putovanje morskim putevima (jedrenjaci), preradu žitarica ili pumpanje pitke vode. Tijekom 20. stoljeća počinje korištenje energije vjetra za dobivanje električne energije, ali zbog nepredvidive prirode vjetra i promjenjive učestalosti vjetra nije znatnije korišten kao izvor električne energije do 70-ih godina prošlog stoljeća. U Republici Hrvatskoj korištenje energije vjetra za dobivanje električne energije započinje 2005. godine puštanjem u rad prve hrvatske vjetroelektrane „Ravne“ nazivne snage 5,95 MW.

Vjetroelektrana sastoji se od više zasebno postavljenih vjetroturbina koje su povezane kolektorskim sustavom u zasebno postrojenje u kojem se podiže napon transformatorskom stanicom i spaja se na elektroenergetski sustav. Postoje različiti kolektorski sustavi, ali još uvijek se koristi najjednostavniji radijalni dizajn zbog svoje jednostavne izvedbe niskih troškova. Vjetroturbina sastoji se od: rotora, kućišta vjetroturbine, generatora, tornja i temelja.

Za priključenje vjetroelektrane na moru potrebno je razraditi tehničko rješenje priključenja vjetroelektrane na moru na elektroenergetski sustav. Glavni dijelovi tehničkog rješenja priključenja vjetroelektrane na moru na elektroenergetski sustav su: podmorski energetski kabel, priobalna podstanica, podstanica za pokrivanje jalovih gubitaka i kopneno rasklopno postrojenje i transformator. Sve te komponentne utječu na konačnu cijenu priključenja vjetroelektrane na moru.

Potencijal obnovljivih izvora energije na moru puno je veći nego na kopnu. U Europi se nalazi Sjeverno more koje je trenutno najbolje iskorišteno područje za dobivanje električne energija iz obnovljivih izvora energije na moru. Sjeverno more nije jedino područje koje je povoljno za ulaganje u obnovljive izvore energije na moru u Europi. Postoje potencijali na

području Sredozemnog mora, Atlantskog oceana i Baltičkog područja. Projekt priobalna vjetroelektrana Hornsea je trenutno najveći projekt vjetroelektrana na moru u svijetu. Izgrađena je u Sjevernom moru i spojena na elektroenergetski sustav Velike Britanije. Upravo tu vjetroelektranu na moru uzeti ćemo kao primjer za razmatranje priključenja na mrežu.

U ovome radu razradit ćemo koncept i tehnička rješenja izgradnje vjetroelektrana na moru. Razmotrit ćemo i zahtjeve priključenja vjetroelektrana na moru na elektroenergetski sustav. Konkretno, razradit ćemo primjer vjetroelektrane na moru i njeno priključenje na mrežu u Hrvatskoj. Usporedit ćemo troškove priključenja takve vjetroelektrane s već izgrađenim vjetroelektranama u Sjevernom moru sličnih nazivnih snaga.

2. KORIŠTENJE ENERGIJE VJETRA

2.1. Povijest korištenja energije vjetra

U posljednjih nekoliko desetljeća energija vjetra postaje sve popularniji obnovljivi izvor energije. S pomoću vjetroturbine kinetička energija vjetra pretvara se u mehaničku energiju vrtnje koja je korištena u industrijske i ekonomske svrhe, na primjer za pumpanje vode ili mljevenje žitarica. Energija vjetra koristi se dulje od 1500 godina, te se korištenje energije vjetra može podijeliti na 4 razdoblja [1]:

- Klasično razdoblje
- Pojava električnih generatora
- Prva faza inovacija
- Druga faza inovacija i komercijalizacija

Klasično razdoblje (600.-1890.)

Vodeni mlinovi su korišteni za mljevenje žita u područjima gdje ima vode, ali mjesta koja se ne nalaze u blizini vode također moraju nekako prerađivati žitarice. Prvo su korištene životinje poput konja, magarca ili krava, ali taj je način iskorištavanja bio vremenski vrlo zahtjevan. Intenzivno korištenje energije vjetra u žitnim mlinovima trajalo je više od 1000 godina, a završava prvom industrijskom revolucijom otkrićem parnog stroja. Parni stroj je olakšao prijevoz hrane, a neko vrijeme se čak koristio kao izvor energije za prerađivanje žitarica. Kroz povijest izgrađeno je više od 100.000 vjetrenjača kojima je jedina uloga bila prerađivanje žitarica u prehrambene svrhe ili pumpanje vode.

Pojava električnih generatora (1890.-1930.)

Pojavom električnog generatora energija vjetra opet dobiva na važnosti, ali zbog svoje nepouzdanosti ne ulazi u širu upotrebu kao izvor energije. U ovom razdoblju počinje razvoj električnog motora, ali također razvija se i sustav prijenosa električne energije s mjesta gdje je imamo previše (proizvođači), do mjesta gdje nam je potrebna (potrošači). Tijekom ovog razdoblja

energija vjetra zbog svoje stohastičke prirode jako zaostaje za hidroelektranama i parnim turbinama (termoelektrane). Većinom vjetroturbine se razvijaju samo za pokuse i testiranja novih inovacija. 1920. godine Albert Betz, voditelj aerodinamičkog instituta u Göttingenu, matematičkom analizom rada dobiva maksimalni teoretski koeficijent dobivene mehaničke energije u vjetroturbini, koeficijent nazvan Betzova granica ($16/27$).

Prva faza inovacija (1930.-1970.)

Tijekom i odmah nakon Drugog svjetskog rata, do 1948. godine, nekoliko zemalja nastavlja s razvojem vjetroturbina zbog visokih cijena goriva za termoelektrane. Tijekom ovog razdoblja vjetroturbine su značajno unaprijeđene. Najveća upotreba vjetroturbina za proizvodnju električne energije odvija se u Danskoj koja zbog nedostatka fosilnih izvora energije sve više ulaže u dobivanje električne energije iz kinetičke energije vjetra. Vjetroturbine koji se koriste su većinom s 2 lopatice, a promjer turbine je između 10 i 15 metara. Početkom 50-ih godina 20. stoljeća padaju cijene fosilnih goriva, te se drastično smanjuju ulaganja za dobivanje električne energije iz energije vjetra. Fosilna goriva kao izvor energije postaju toliko jeftina da se počinje s uklanjanjem vjetroturbina izgrađenih nakon Drugog svjetskog rata zbog iskorištenja čelika koji se nalazio u konstrukciji vjetroturbina.

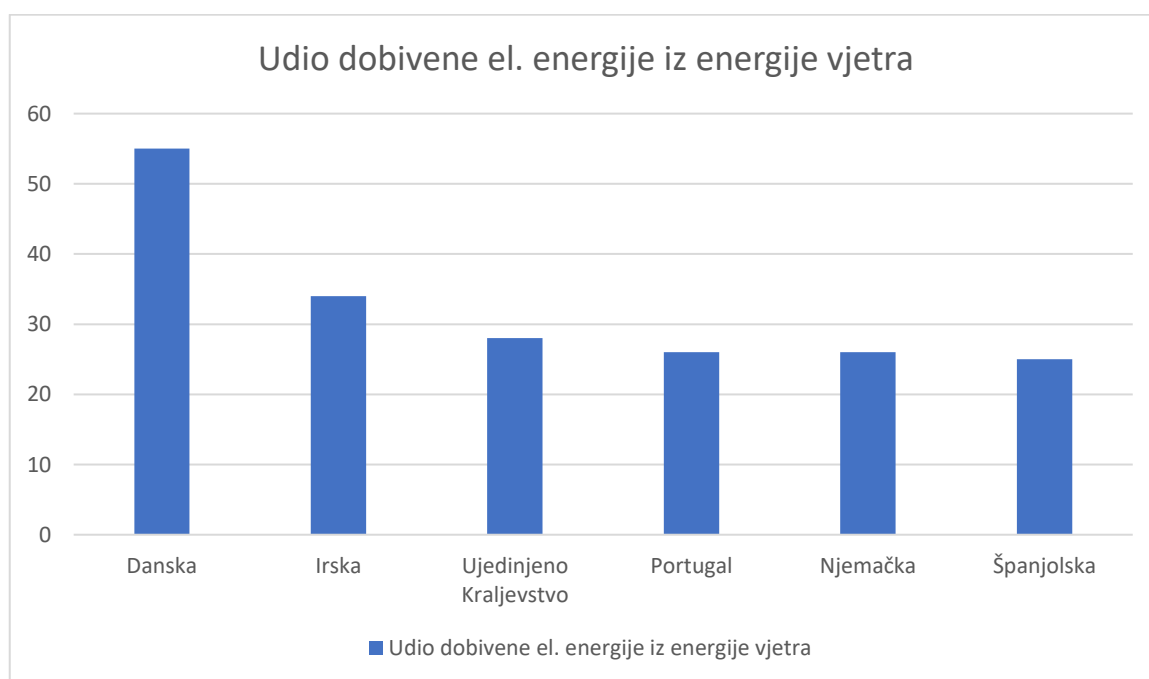
Druga faza inovacija i komercijalizacija (1970.- danas)

Početkom 70-ih godina 20. stoljeća dolazi do porasta cijena fosilnih goriva i počinje traženje drugih izvora energije. Ulaganje u vjetroelektrane naglo postaje popularno porastom cijena fosilnih goriva 1974. godine, a do kraja 80-ih cijena nafte i plina se udeseterostručila. S porastom cijena fosilnih goriva ponovno počinje značajno ulaganje u vjetroelektrane koje dodatno dobivaju na važnosti jer znanstvenici počinju otkrivati problem uzrokovan masovnim iskorištavanjem fosilnih goriva i utjecaj izgaranja na planet Zemlju. Od početka 80-ih pa do kraja 20. stoljeća pokreće se preko 50 probnih vjetroelektrana, od kojih samo 5 ostaje u funkciji. Pokretanjem probnih vjetroelektrana uviđaju se problemi s nepredvidljivošću vjetra, ali također javljaju se i problemi same konstrukcije vjetroturbina. Kreće se u ulaganje u nosive stupove više visine i povećava se promjer samih vjetroturbina. Povećanjem visine dobiva se veća iskoristivost

vjetroturbine jer je strujanje zraka na višim visinama učestalije, a povećanjem turbine dobiva se veća nazivna snaga same vjetroturbine.

2.2. Energija vjetra u Europi

U ovome trenutku u svijetu su izgrađene vjetroelektrane snage oko 800 GW, a Europa posjeduje 255 GW nazivne snage vjetroelektrana. Sredinom 2023. godine električna energija dobivena iz vjetroelektrana predstavlja 17% potrebne energije za područje Europe, pri čemu ovu listu predvode: Danska koja je proizvela 55% potrebne električne energije iz vjetroelektrana, Irska 34%, te Ujedinjeno Kraljevstvo 28%. Na slici 2.1 prikazane su zemlje u Europi s najvećim udjelom dobivene električne energije iz vjetroelektrana. [3]



Slika 2.1. Udio dobivene električne energije iz energije vjetra [3]

Međunarodna agencija za energiju predviđa da će dobivena električna energije iz energije vjetra u 2027. godini postati broj jedan opskrbljivač električne energije u Europi. Plan Europske unije je postizanje stope nulte emisije ugljikova dioksida do 2050., a za postizanje toga cilja predviđa se da će potrebna instalirana snaga vjetroelektrana u Europi biti 1300 GW. Većinom vjetroelektrane izgrađene su na kopnu, ali istraživanja izrađena u posljednjih desetak godina

prikazuju da se gotovo 95 % energije vjetra koja se može iskoristiti za dobivanje energije nalazi na moru. 99,9 % instalirane snage vjetroelektrana na moru u 2023. nalazi se u sjevernoj Europi pri čemu UK, Irska, Danska, Njemačka i Nizozemska imaju oko 30 GW, a preostali jedan promil vjetroelektrana na moru nalazi se u Sredozemno moru (Italija ima 2 vjetroelektrane na moru instalirane snage 35 MW). Većina vjetroelektrana na moru u Europi su priobalne vjetroelektrane. U tablici 2.1 mogu se vidjeti trenutno 10 najvećih izgrađenih vjetroelektrana na moru u Europi. [3]

Tablica 2.1. Popis 10 najvećih vjetroelektrana na moru [23]-[26]

Vjetroelektrana	Lokacija	Nazivna snaga [MW]	Broj turbina	Model turbine	Puštena u rad [god.]
<i>Hollandse Kust Zuid</i>	Nizozemska	1500	139	Siemens Gamesa SG 11.0-200 DD	2023.
<i>Hornsea Project Two</i>	Ujedinjeno Kraljevstvo	1320	165	Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD	2022.
<i>Hornsea Project One</i>	Ujedinjeno Kraljevstvo	1218	174	Siemens Gamesa SG 7.0-154 DD	2019.
<i>Seagren</i>	Ujedinjeno Kraljevstvo	1140	114	MHI Vestas V164- 10.0 MW	2023.
<i>Morey East</i>	Ujedinjeno Kraljevstvo	950	100	MHI Vestas V164-9.5 MW	2022.
<i>Triton Knoll</i>	Ujedinjeno Kraljevstvo	857	90	MHI Vestas V164-9.5 MW	2021.
<i>Hollandse Kust Noord</i>	Nizozemska	759	69	Siemens Gamesa SG 11.0-200 DD	2023.
<i>Borssele I & II</i>	Nizozemska	752	94	Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD	2020.
<i>Borssele III & IV</i>	Nizozemska	732	77	MHI Vestas V164-9.5 MW	2020.
<i>East Anglia One</i>	Ujedinjeno Kraljevstvo	714	102	Siemens Gamesa SG 7.0-154 DD	2020.

2.3. Energija vjetra u RH

U 2023. godini na teritoriju Republike Hrvatske u redovnom pogonu je 25 vjetroelektrana s ukupnom snagom 834,15 MW. Vjetroelektrana se dijele na dvije skupine: vjetroelektrane u redovnom pogonu i pokusnom pogonu. U probnom pogonu (izgradnji) su tri vjetroelektrane nazivne snage 326 MW. 16 vjetroelektrana je spojeno na prijesnu mrežu (110 i 220 kV), dok su preostale spojene na srednjenaponsku distribucijsku mrežu (10, 20, 35 kV). Prva vjetroelektrana puštena u rad 2005. godine je vjetroelektrana Ravne nazivne snage 5,95 MW. Prvih 5 godina ulaganja u vjetroelektrane su tekla usporena, te su do 2009. godine u pogon puštene još 3 vjetroelektrane ukupne snage 64 MW. Napredovanjem tehnologije i pomoću sufinanciranja obnovljivih izvor iz fondova Europske unije u zadnjih 5 godina počinju sve intenzivnija ulaganja u vjetroelektrane na teritoriju Republike Hrvatske. U tablici 2.2. može se vidjeti popis svih vjetroelektrana u pogonu na teritoriju Republike Hrvatske. Ukupne instalirane snaga vjetroelektrana u pokusnom radu pod brojem 26, 27 i 28 u tablici 2.2. iznosi 326 MW, a njihova ukupna odobrena snaga priključenja iznosi 312 MW. [5]

Tablica 2.2. Popis vjetroelektrana s osnovnim parametrima u pogonu na teritoriju RH [5]

Br.	Naziv VE	Lokacija	Ukupna instalirana snaga (MW)	Ukupna odobrena snaga priključenja (MW)	Napon priključenja [kV]	U redovnom pogonu od [god.]
1	Ravne	Zadarska/Pag	5,95	5,95	10	2005
2	Trtar Krtolin	Šib-Knin/Šibenik	11,2	11,2	30	2007
3	Orlice	Šib-Knin/Šibenik	9,6	9,6	30	2009
4	Vrataruša	Lič-Senj/Senj	42	42	110	2010
5	Zadar 6&6P	Zadarska/Gračac	53,4	54	110	2011/2017
6	Pometeno Brdo	Split-Dalm/Split	20	20	110	2010/2011 /2012/2015
7	Crno Brdo	Šib-Knin/Šibenik	10,5	10	10	2011
8	Bruška	Zadarska/Benkovac, Obrovac	36,8	36	110	2011
9	Ponikve	Dub-Neret/Ston	36,8	34	110	2012
10	Jelinak	Šib-Knin/Marina, Seget	30	30	110	2013
11	Voštane	Split-Dalm/Trilj	42	40	110	2013
12	Zadar4	Zadarska/Benkovac	9,2	9,2	10	2013
13	Velika Glava	Šib-Knin/Drniš, Šibenik, Unešić	43,7	43	110	2014
14	Zelengrad	Zadarska/Obrovac	42	42	110	2014
15	Ogorje	Split-Dalm/Muč	42	44	110	2015
16	Rudine	Dub-Neret/Dubrovačko primorje	34,2	35	110	2015
17	Glunča	Šib-Knin/Šibenik	20,7	22	110	2016
18	Katuni	Split-Dalm/Šestanovac	34,2	39	110	2016
19	Lukovac	Split-Dalm/Cista Provo	48,75	48	110	2018
20	Kom-Orjak-Greda	Split-Dalm/Blato na Cetini	10,25	10	35	2020
21	Jasenice	Zadarska/Jasenice	11,5	10	35	2020
22	Krš Pađene	Šib-Knin/Ervenik	144	142	220	2021
23	Korlat	Zadarska/Korlat	63	58	110	2021
24	Ljubač	Šib-Knin/Vrbnik	21,6	20	35	2022
25	Ljubač II	Šib-Knin/Vrbnik	10,8	9,9	35	2022
26	Senj	Lič-Senj/Senj	156	156	220	Pokusni rad
27	ZD2P&3P	Zadarska/Benkovac, Obrovac	125	111	110	Pokusni rad
28	Bruvno	Zadarska/Gračac	45	45	110	Pokusni rad
UKUPNO¹			834,15	824,85		

¹ Ukupne vrijednosti instalirane snage, odnosno ukupne odobrene snage VE u redovnom pogonu (1-25)

Na slici 2.2. mogu se vidjeti mjesta na kojima se izgrađene vjetroelektrane navedene u tablici 2.2. Ako se pogledaju snage navedene u tablici i mjesta gdje su izgrađene vjetroelektrane može se primijetiti koncentriranost oko 80% nazivne snage vjetroelektrana na području od svega 8000 km², a proizvodnja energije na tako malenom području predstavlja poteškoće u vođenju elektroenergetskog sustava. Ispadom dalekovoda Melina-Velebit ili Velebit-Konjsko u trenutku maksimalne proizvodnje vjetroelektrana teško je izvući proizvedenu električnu energiju pomoću 220 kV i 110 kV vodova prema sjeveru Republike Hrvatske.



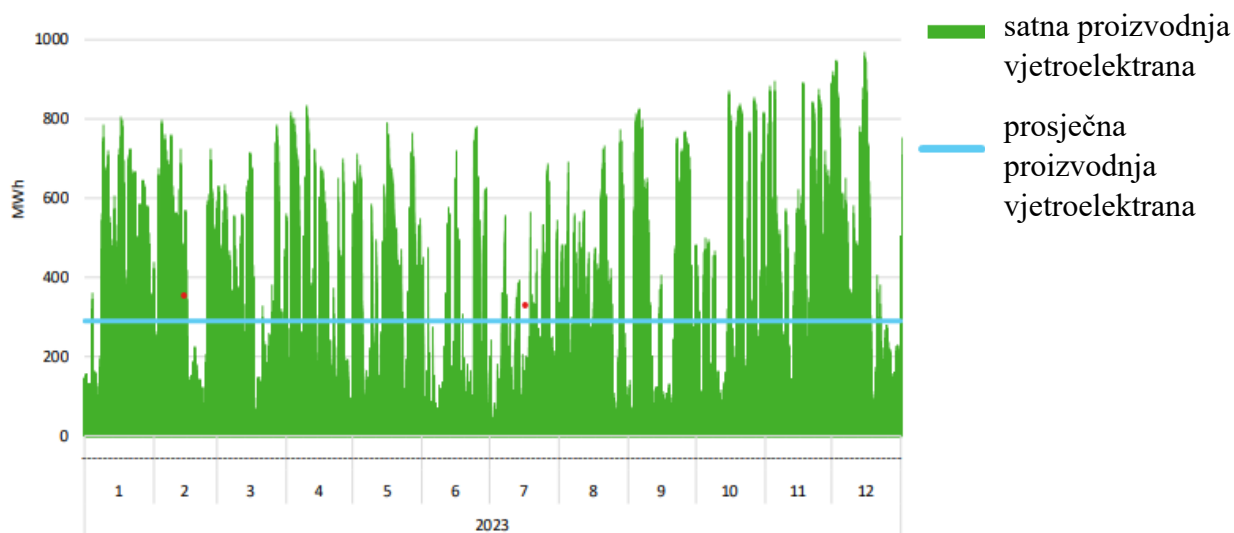
Slika 2.2. Prikaz lokacija vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj [5]

Dodatni problem predstavlja uzimanje energije s tako malenog područja, te se zbog izgradnje dodatnih obnovljivih izvora energije u sljedećih 10-ak godina prema Desetogodišnjem planu razvoj prijenosne mreže HOPS-a planirana je izgradnja dvostrukog 400 kV nadzemnog voda Konjsko-Lika. TS Lika će biti nova 400 kV stanica za daljnje povezivanje južne i središnje hrvatske prema Kvarneru (TS Melina) i središnjoj Hrvatskoj (TS Veleševac). U sljedeće tri godine, kratkoročno razdoblje, očekuje se priključenje 523,4 MW, a do 2033. godine očekuje se priključenje još dodatnih 1229,2 MW na prijenosnu mrežu. Na slici 2.3 može se vidjeti planirani izgled prijenosne mreže Republike Hrvatske prema Desetogodišnjem planu razvoja prijenosne mreže iz 2023. godine. [9]



Slika 2.3. Prikaz konfiguracije prijenosne mreže krajem 2032. godine [9]

Proizvodnja svih vjetroelektrana u 2023. godini iznosi 2532,5 GWh, a dnevna proizvedena energija je prikazana na slici 6.3. Najveća ostvarena satna proizvodnja dogodila se 15.12.2023. god. u 12 sati, te je iznosila 969,15 MWh. Najmanja proizvodnja iznosila je 0,02 MWh. Prosječna satna proizvodnja, prikazana na slici 2.4. plavom linijom, tijekom 12 mjeseci 2023. godine iznosila je 289,13 MWh. [5]



Slika 2.4. Prosječna proizvodnja vjetroelektrana u RH [5]

3. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE VJETROTURBINA

Danas se najviše koristi vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje, to jest os vrtnje turbine je paralelna s tlom. Postoje još vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje, ali puno manje se koriste od horizontalnih. Vjetroturbina se sastoji od:

- Rotor
- Kućišta vjetroturbine
- Generatora
- Tornja
- Temelja

3.1. Rotor

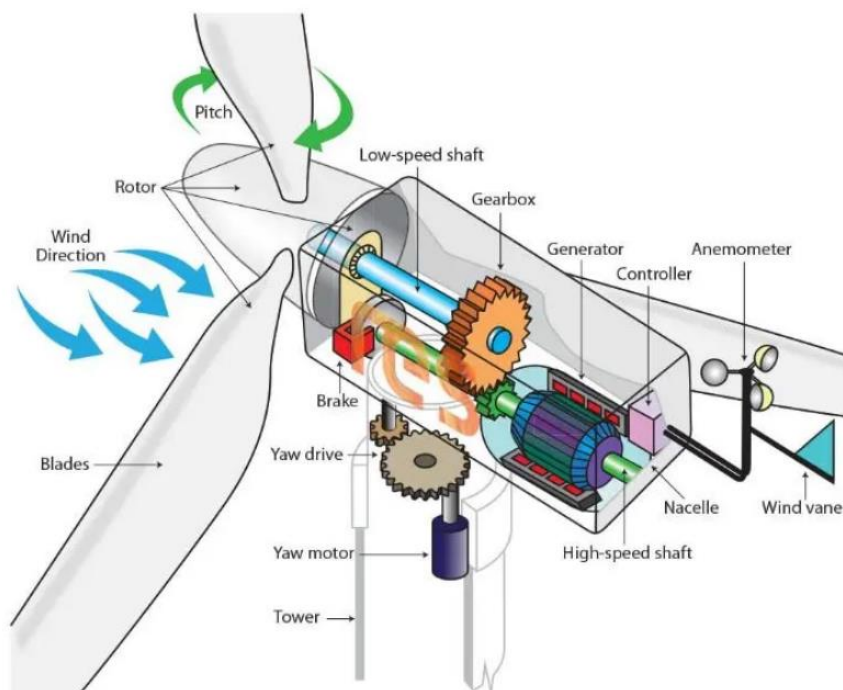
Rotor vjetroturbine se sastoji od lopatica i glavčine za koju su pričvršćene lopatice. Lopatice rotora predstavljaju najvažniji dio vjetroturbine jer se na njima odvija pretvorba kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju vrtnje. Ulaganje u rotor predstavlja najveće ulaganje prilikom izgradnje vjetroturbine, ali također o pravilnom postavljanju rotora i veličini najviše ovisi iskoristivost same vjetroturbine.[1] Većina današnjih vjetroturbina ima 3 lopatice rotora s orijentacijom uz vjetar, također postoje rotor s orijentacijom niz vjetar, ali su puno rjeđi. Povećanje lopatica rotora zbog veće iskoristivosti vjetra ne može ići u nedogled, a taj problem najlakše je objasniti na principu kocke koja je geometrijsko tijelo sa svim bridovima jednake duljine. Prilikom udvostručenja svih bridova kocke za četverostruko veće oplošje, dobili smo 8 puta veći volumen, a time i masu samih lopatica.

Vjetroturbine manjih nazivnih snaga koriste čvrstu vezu s glavčinom, dok se kod vjetroturbina većih snaga koriste pomični mehanizmi za zakretanje lopatica zbog veće iskoristivosti, ali također zbog zaštite same vjetroturbine. Ako se zakretanjem lopatica ne može smanjiti opterećenje uzrokovano vjetrom koriste se kočnice rotora. Kočnice rotora služe kao osiguranje od ozbiljnijih kvarova vjetroturbine jer su osmišljene s ciljem brzog zaustavljanja vrtnje rotora, ali također koriste se kod zaustavljanja rotora prilikom održavanja. Prilikom projektiranja rotora vjetroturbine potrebno je paziti na opterećenja uzrokovana gravitacijskom silom, aerodinamička opterećenja uzrokovana vjetrom i rotacijom, opterećenje zbog toplinskog širenja materijala rotora, te opterećenja zbog promjene brzine vrtnje rotora. Materijali se u lopaticama rotora slažu poput „sendviča“ jer je potrebno zadovoljiti kriterij čvrstoće, ali u isto vrijeme lopatica

ne smije imati veliku masu. Središnji dio lopatice sastoji se od laganih, ali čvrstih materijala koji podnose savijanje u slučaju jakih udara vjetra. Materijali su: polivinil klorid (PVC), polietilen tereftalat (PET) pjena i polimeri ojačani vlaknima (FRP – Fibre Reinforced Polymers). Vanjski dio lopatice postavlja se s ciljem zaštite lopatice od utjecaja kiše, UV zračenja, leda i soli. Korištenjem polimera ojačanih vlaknima umjesto metala znatno se smanjuje masa samih lopatica, ali javlja se problem lagane zapaljivosti lopatica. Zbog toga se kroz sredinu lopaticu ili na vanjskoj strani postavi vodič, najčešće bakar, za uzemljenje vrhova lopatica rotora. Vrhovi lopatica moraju se uzemljiti jer je najveća vjerojatnost udara groma u trenutku kad je lopatica okrenuta u vis, te paralelna s tornjem vjetroturbine.

3.2. Kućište vjetroturbine

Gondola ili kućište je dio vjetroturbine za elemente koji moraju imati zaštitu od vanjskih utjecaja poput kiše ili korozije koja je posebno izražena zbog utjecaja soli kod priobalnih ili plutajućih vjetroturbina. Unutar gondole se nalazi: generator, vratila, sustav za kočenje i sustav upravljanja. Na slici 3.1. mogu se vidjeti komponente unutar gondole vjetroturbine.



Slika 3.1. Dijelovi vjetroturbine [6]

Brzina vrtnje lopatica vjetroturbine prenosi se direktno na sporohodno vratilo s kojega se brzina prenosi prijenosnikom na brzohodno vratilo. Prijenosnik se koristi zbog potrebe za povećanjem brzine rotora s 30 – 60 o/min na 1200 – 1500 o/min zbog spajanja na generator električne energije. Čelik se najviše koristi pri izradi kućišta, ali zbog smanjenja ukupne mase danas sve više u upotrebu ulaze lakši metali (aluminij) ili polimeri ojačani vlaknima. Vratila i prijenosnik izrađuju se od nehrđajućeg čelika, aluminija ili lijevanog željeza. Donji dio kućišta zupčanicima je povezan na sustav zakretanja s pomoću kojega se cijelo kućište i rotor zakreću u smjeru optimalne proizvodnje. Sustav zakretanja vjetroturbine vrši se pomoću motora.

3.3. Generator

Generator smješten u kućište vjetroturbine služi za pretvaranje mehaničke energije vrtnje u električnu energiju koja se predaje u elektroenergetski sustav. Generator mora imati visoku energetska iskoristivost za različite brzine vrtnje rotora. Generatori koji se koriste u vjetroturbinama su sljedeći:

- Asinkroni generatori – kavezni asinkroni generator i asinkroni generator s namotanim rotorom i kliznim prstenovima
- Sinkroni generatori – generatori s permanentnom uzбудom i generatori s namotanim rotorom
- Ostali generatori – generatori s poprečnim tokom i generatori s sklopnom reluktancijom

Asinkroni generator je najčešće korišten generator za proizvodnju električne energije iz vjetroelektrana. Najveća prednost je niska cijena zbog masovne proizvodnje, ali u isto vrijeme mehanička jednostavnost. Nedostatak je stalna potreba za reaktivnom strujom magnetiziranja, a to znači da motor stalno mora imati izvor jalove snage, na primjer priključak na mrežu. Sinkroni generator je mehanički složeniji i skuplji, ali kod njega nije potrebna reaktivna struja magnetiziranja. Magnetsko polje može stvoriti pomoću permanentnih magneta ili pak klasično pomoću namota. U budućnosti se očekuje razvoj noviji generatora koji bi povećali učinkovitost dobivanja energije iz vjetroturbina, ali nažalost još uvijek nisu ekonomski dovoljno prihvatljivi.

3.4. Toranj

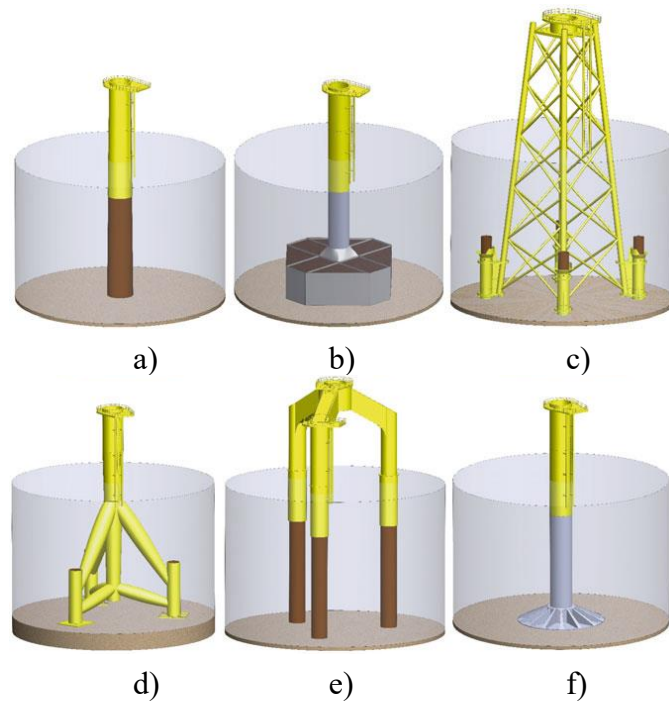
Toranj vjetroturbine se izvodi kao rešetkasti, cjevasti ili konusni. Moderne vjetroturbine najčešće koriste cjevastu izvedbu zbog visoke čvrstoće i otpornosti na vibracije. Rešetkasti stup u prošlosti predstavljao je jeftiniju varijantu stupa za manje vjetroturbine na nepristupačnom području zbog jednostavnije izrade i montiranja, ali zbog lošijih mehaničkih karakteristika od cjevastih stupova više se ne koristi. Najčešće su stupovi betonski ili čelični, a stup vjetroturbine je 1,5 puta veći od polumjera rotora zbog potrebe za izbjegavanjem turbulentnih vjetrova na malim visinama od tla.

3.5. Temelji vjetroturbine

Temelji vjetroturbine pružaju stabilnost cijeloj konstrukciji, te se kod kopnenih vjetroelektrana najčešće izrađuje od armiranog betona. Prepoznamo nekoliko tipova vjetroelektrana prema mjestu gradnje. To su kopnene, priobalne, plutajuće te visinske vjetroelektrane.

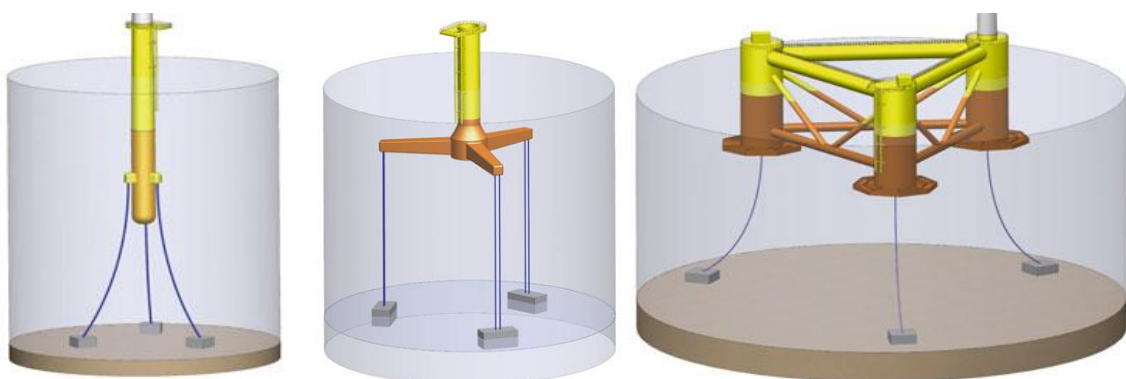
Kopnene vjetroelektrane se grade na kopnu i u ovome trenutku najveći su izvor električne energije dobivene iz energije vjetra. Grade se na vrhovima brda ili padinama zbog najboljeg iskorištavanja vjetra. Izgradnjom uništavaju krajolik i stvaraju bučno onečišćenje.

Priobalna vjetroelektrana se gradi na moru na udaljenosti manjoj od 50 km od kopna. Postavljaju se većinom na mjestu gdje dubina mora ne prelazi 60 m, a mogu se graditi i na jezerima ako postoje uvjeti. Priobalne elektrane zahtijevaju veća ulaganja od kopnenih zbog postavljanja temelja pod vodom, ali također potrebno je uzeti u obzir dodatnu zaštitu cijelog nosivog dijela od korozije (posebni premaz). Bolji faktor opterećenja nego kod kopnenih elektrana. Na slici 3.2 mogu se vidjeti izvedbe temelja priobalnih vjetroturbina od kojih se najčešće koriste cjevasti (a) i jacket piloti (c).



Slika 3.2 Prikaz vrsta temelja priobalnih vjetroturbinaa; a) Cjevasti (monopile) pilot, b) Gravitacijski pilot, c) „Jacket“ pilot, d) „Tripod“ pilot, e) 3 cjevasta (tripile) pilota, f) „Suction-bucket“ pilot [1]

Plutajuće vjetroelektrane postavljaju se na plutajuću strukturu koja se povezuje na dno mora čeličnim užetom. Postavljaju se na morske površine gdje je dubina mora između 50 metara i 1000 metara. Zahtijevaju još veća ulaganja prilikom izgradnje od priobalnih vjetroelektrana, ali mogu se u potpunosti izgraditi u blizini kopna i odvući plovilima do mjesta gdje će se usidriti. Velika prednost plutajućih vjetroelektrana je postavljanje daleko od obale pa postavljanjem ne zagađuju krajolik.



Slika 3.3. Prikaz vrsta temelja(sidrenja) plutajućih vjetroagregata [1]

Visinske vjetroelektrane koriste energiju vjetra u višim dijelovima atmosfere. Postavljaju se na visine između 100 i 800 m, ali ova vrsta vjetroelektrana još uvijek nije dovoljno istražena za širu upotrebu. Prednost je iskorištavanje energije vjetra u višim dijelovima atmosfere gdje nam je energija vjetra dostupna 90% vremena, dok kopnene i priobalne vjetroelektrane energiju proizvode samo 35-40% vremena. U 2023. godini Europska unija počela je financiranje 2 istraživačka projekta o iskorištavanju energije vjetra u višim dijelovima atmosfere i postavljanju visinskih vjetroelektrana.

4. KORIŠTENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA MORU

4.1. Podjela morskih površina

Međunarodnom konvencijom Ujedinjenih naroda o pravu mora definirani su pravni režimi o podjeli dijela mora i o razgraničenju između susjednih država. Podjela mora se sastoji od morskih pojasa: obalno more, teritorijalno more, vanjsko more, isključivi gospodarski pojas i otvoreno more. Obalno more je dio mora koji je usko vezan na kopneno područje, te država ima potpunu suverenost nad obalnim područjem, pojas također poznat pod imenom unutarnje more. Teritorijalno more je pojas širok 12 morskih milja od granice s obalnim morem, te prema međunarodnom zakonu svi brodovi imaju pravo prolaska kroz teritorijalno more. Vanjski gospodarski pojas je pojas širok 12 milja od granice s teritorijalnim more, a unutar vanjskog pojasa i dalje vrijede državni zakoni. Republika Hrvatska nije proglasila vanjski gospodarski pojas. Isključivi gospodarski pojas je pojas do 200 nautičkih milja od granice obalnog mora te država koje je proglasila isključivi gospodarski pojas ima pravo na iskorištavanje resursa unutar tog pojasa. Epikontinentalni pojas predstavlja pojas nad kojim država ima pravo iskorištavanje resursa, to jest pojas udaljenosti od granice teritorijalnog mora do otvorenog mora. Ako je udaljenost manja od 350 nautičkih milja granica epikontinentalnog pojasa predstavlja morsku granicu sa susjednom državom. Otvoreno more je područje udaljeno više od 350 nautičkih milja od najbližeg kopna i nijedna država nema pravo proglasiti suverenitet nad tim područjem. Na slici 4.1 može se vidjeti podjela pojasa koji su prema međunarodnom pravu u vlasništvu Republike Hrvatske.



Slika 4.1. Prikaz Hrvatskog obalnog mora s prikazanim linijama granica između pojasa [8]

4.2. Potencijal iskorištenja obnovljivih izvora energija na moru

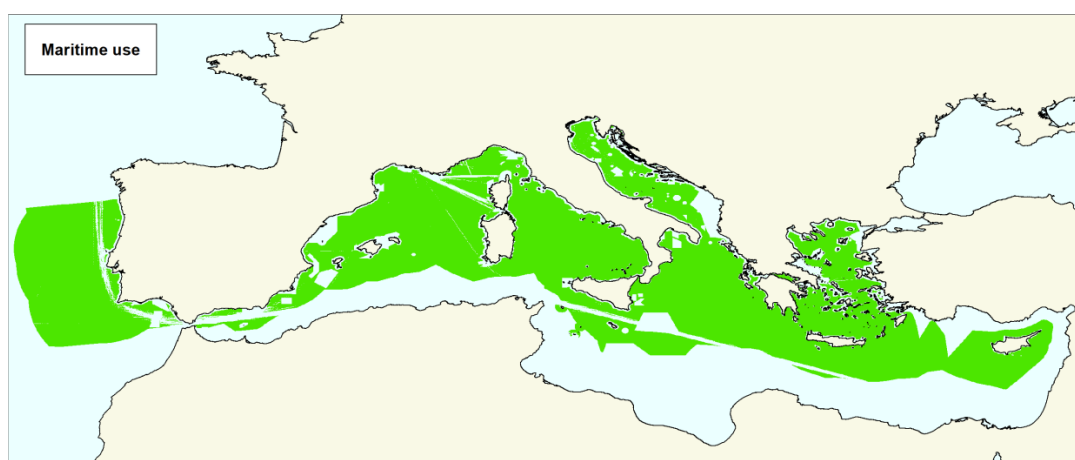
Obnovljivi izvori energije na moru dijele se na:

- energija vjetroelektrana na moru
- energija oceana (energija valova, strujanje plime i oseke i raspon plime i oseke)
- plutajuće fotonaponske sunčane elektrane
- energija iz geotermalnih izvora
- bioenergija dobivena iz morskih alga

Kao što je već ranije navedeno ulaganje u obnovljive izvore energije na moru je jedini način dobivanja dovoljne količine električne energije za postizanje nulte emisije ugljikova dioksida do 2050. godine. S trenutnom tehnologijom najisplativije je ulaganje u vjetroelektrane na moru, ali s razvojem tehnologije očekuje se smanjenje cijene ulaganja u plutajuće fotonaponske elektrane i postrojenja za iskorištavanje energije oceana.

Sredozemno područje

Potencijal obnovljivih izvora energije na moru na Sredozemnom području većinom je temeljen na plutajućim vjetroelektranama, plutajućim fotonaponskim elektranama i energijom valova. Na slici 4.2. mogu se vidjeti mjesta povoljna za izgradnju obnovljivih izvora energije na moru u Sredozemnom području.



Slika 4.2. Prikaz područja za iskorištavanje obnovljivih izvora na moru [10]

Slika je izvađena iz studije o potencijalu dobivanja energije iz morskih elektrana, s time da je potrebno uzeti u obzir sljedeće stavke koje nisu uzete u obzir na slici 4.1:

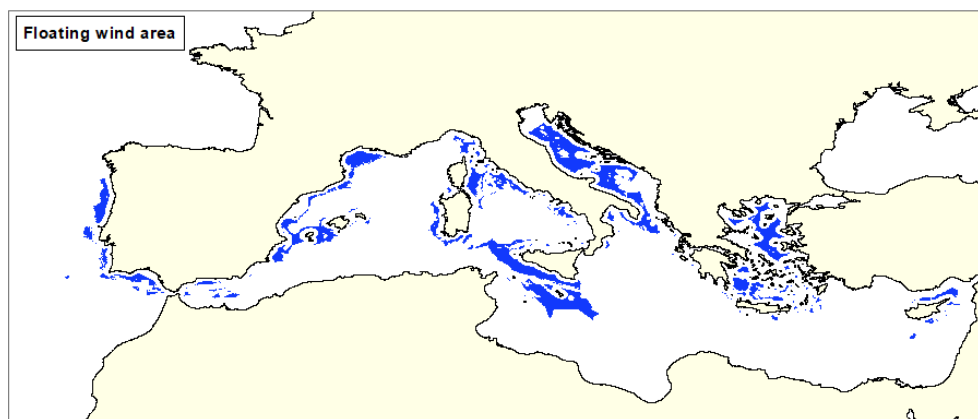
- elektrane se ne smiju graditi na mjestima slobodnog prolaza brodova (gotovo 15% svjetskog pomorskog prometa odvija se u Sredozemnom moru)
- potrebno je uzeti u obzir mjesta na kojima su izbačene neiskorištene bombe iz 2. Svjetskog rata (postoje poznata mjesta na zapadnoj obali Italije za koja se zna da su na dnu mora bombe, ali su na dubini većoj od 200m i jako skupo bi bilo njihovo uklanjanje) ili u Jadranskom moru (ostaci od Domovinskog rata i izbačene bomba nakon bombardiranja NATO saveza Srbije)
- 500 metara sigurne zone oko priobalne proizvodne jedinice (platforma za vađenje plina ili nafte)
- Udaljenost od 12 nautičkih milja, to jest 22,2 km, od kopna spada u teritorijalno more, te se ne preporučuje izgradnja zbog vizualnog zagađenja [10]

Područja za priobalne vjetroelektrane na Sredozemnom području većinom su moguća samo na sjevernom Jadranu zbog velike dubine mora, detaljnije će priobalne vjetroelektrane biti objašnjene na primjeru Republike Hrvatske. Slika 4.3. prikazuje dubinu mora sredozemnog područja, te se na slici može primijetiti dubina mora na značajnom području Sredozemlja veća od 1000 m, a to znači da nije moguća izgradnja plutajućih vjetroelektrana s trenutnom tehnologijom.



Slika 4.3. Prikaz batimetrije mora Sredozemnog područja [11]

Ako na određenom području barem četvrtinu godine nemamo prosječnu brzinu vjetra veću od 8 m/s izgradnja vjetroelektrane većinom nije isplativa. Također ako uzmemo u obzir dubinu mora sredozemnog područja dolazimo do činjenice da je na samo 7% površine moguća i isplativa izgradnja vjetroelektrana (slika 4.4.). 7% površine svih mora sredozemnog područja predstavlja površinu od 230.000 km², ali ako bi do 2050. godine bio iskorišten cijeli potencijal vjetra na ovom području dobili bi 3 puta više energije nego što je cilj za ostvarivanje nulte emisije ugljikova dioksida za cijelu Europu. Studija iz koje su izvađeni podaci ne uključuje Crnu goru i Albaniju. [10]



Slika 4.4. Prikaz potencijalnih područja za izgradnju plutajućih vjetroelektrana [10]

Potencijal energije vjetra članica Europske unije s obalom na Sredozemlju prikazan je u tablici 4.1. Možemo primijetiti najveći potencijal plutajućih vjetroelektrana u isključivim ekonomskim zonama Italije, Grčke i Španjolske.

Tablica 4.1. Popis članica Europske unije s potencijalom izgradnje vjetroelektrana na moru [10]

Članica EU	Površina priobalne VE [km ²]	Električna energija dobivena iz priobalnih VE [TWh/god]	Površina plutajuće VE [km ²]	Električna energija dobivena iz plutajuće VE [TWh/god]
Hrvatska	1.468	22,9	18.414	325,3
Cipar	0	0	7.824	128,1
Francuska	0	0	10.474	276,5
Grčka	0	0	37.702	858,4
Italija	1.935	31,9	84.917	1662,9
Malta	76	1,4	22.652	440,4
Portugal	79	1,9	18.383	887,9
Španjolska	48	1,1	31.204	660,8
Ukupno	3.606	59,2	231.570	4.498,3

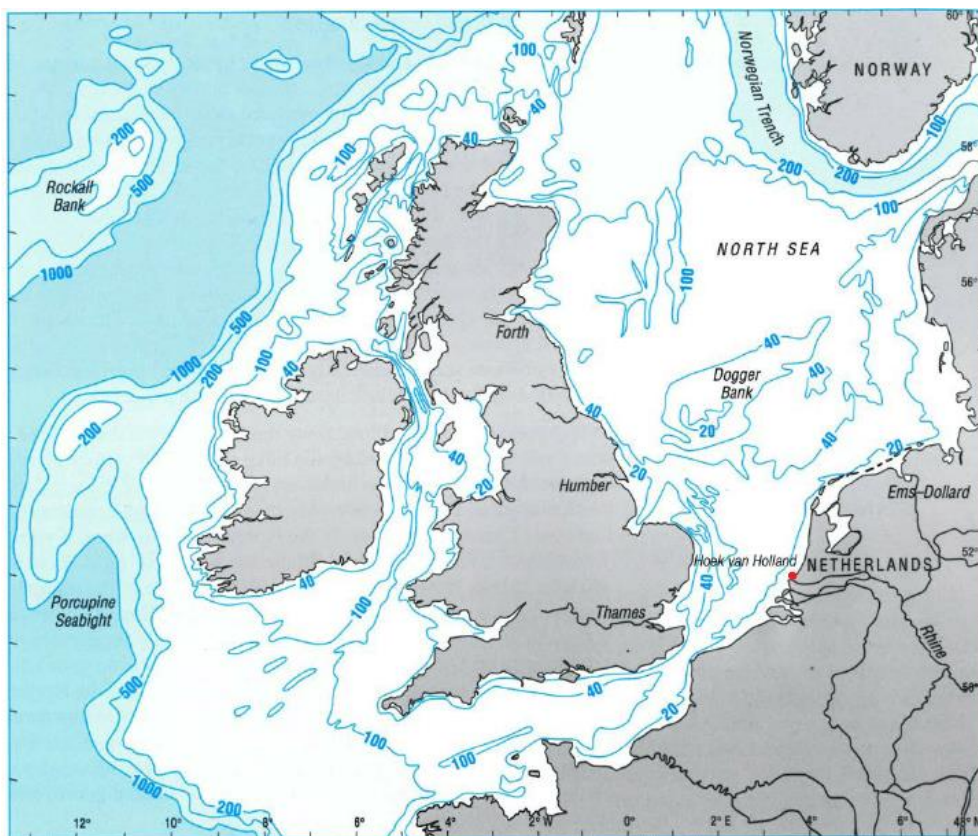
Energija dobivena iz preostalih načina proizvodnje energije iz postrojenja postavljenih na moru predstavljaju manji dio potrebne proizvedene energije za područje Mediterana prema predviđanjima za 2050. godinu. Najveći dio preostale energije dobivene iz elektrana na moru predstavljaju plutajuće fotonaponske elektrane. Do sada plutajuće fotonaponske elektrane većinom su se gradile na umjetnim jezerima stvorenima za proizvodnju električne energije iz hidroelektrana, te su se preko zajedničkog priključka spajale na elektroenergetsku mrežu. Najbolja upotreba plutajućih fotonaponskih elektrana bi bila korištenje hibridnog sustava iskorištavanja vjetra i sunca na istome području s zajedničkim sidrenjem. Do 2050. godine Francuska, Italija i Španjolska planiraju izgraditi nekoliko fotonaponskih elektrana na Sredozemnom području. Potencijal iskorištavanja preostalih izvora energije na Sredozemnom području je vrlo nizak i zahtjeva gotovo duplo više ulaganja za proizvodnju jednake količine energije kao iz dvaju ranije navedenih izvora. Potencijal iskorištavanja energije valova postaji na jugu Španjolske, Francuske, cijeloj obali Grčke, te u Italiji na južnom dijelu otoka Sardinije i Sicilije. [10]

Sjeverna i zapadna Europa

Potencijal sjeverne Europe većinom se temelji na izgradnji vjetroelektrana i iskorištavanju energije mora zbog utjecaja golfske struje koja većim dijelom godine održava strujanje zraka na području sjeverne Europe. Sjeverna Europa ima manji potencijal iskorištavanja energije sunca u fotonaponskim elektranama od Mediteranske Europe. Zbog različitih potencijala na moru područje sjeverne i zapadne Europe podijelit ćemo na tri područja: Baltičko područje, područje Sjevernog mora i područje Atlantskog oceana.

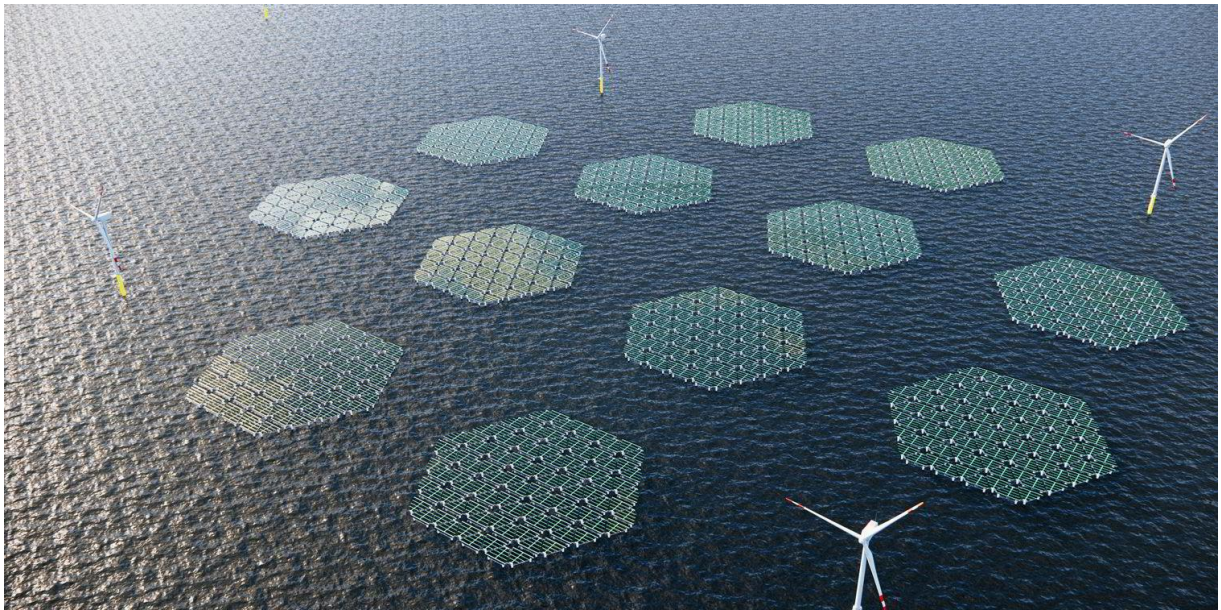
Baltičko područje za dobivanje energije na moru ima potencijal dobivanja energije u vjetroelektranama, dok su drugi izvori maleni i neisplativi za ulaganje. Studijom financiranom od strane Europske Unije iz 2019. godine utvrđen je potencijal od 93,5 GW nazivne snage vjetroturbina postavljenih u Baltičkom moru s potencijalnom godišnjom proizvodnjom 326 TWh energije. Najdublja točka Baltičkom mora nalazi se na dubini od 459 m, a to znači da je cijeli površina Baltičkog mora pogodna za postavljanje vjetroelektrana na moru ako gledamo tehničke uvjete postavljanja vjetroelektrana zbog dubine mora. Ako uzmemo u obzir već ranije navedena ograničenja zbog zaštićenih područja, slobodnih morskih puteva i nepreporučene gradnje vjetroelektrana u teritorijalnom moru dolazimo do brojke od oko 30.000 km² iskoristive površine za izgradnju vjetroelektrana na moru. [16]

Područje Sjevernog mora ima najveći potencijal za iskorištavanje vjetra, a posebno zbog vrlo plitkog Sjevernog mora, na slici 4.5. može se vidjeti batimetrija Sjevernog mora. U Sjevernom moru su izgrađene sve vjetroelektrane na moru prikazane u tablici 2.1.



Slika 4.5. Prikaz batimetrije Sjevernog mora [12]

Zbog malene dubine Sjevernog mora više od 50% površine pogodno je za postavljanje priobalnih vjetroelektrana, ali zbog morskih puteva, zaštićenih područja, te posebno zbog eksploatacije nafte i plina na većini površine nije dozvoljena gradnja vjetroelektrana na moru. Do 2030. godine očekuje se pet puta veća proizvodnja energije iz vjetroelektrana na moru na području Sjevernog mora. Plutajuće fotonaponske elektrane imaju duplo manji potencijal zbog duplo manje prosječne iradijacije na površinu sjeverne Europe od na primjer Sredozemnog područja, ali zbog plitkog Sjevernog mora početno ulaganje u plutajuće fotonaponske elektrane isplativije je nego u ostatku Europe. Hibridna elektrana nastala zajedničkim postavljanjem i sidrenjem vjetroelektrane i solarne fotonaponske elektrane planira se izgraditi do 2027. godine u Nizozemskim obalnim vodama. Na sjeveru Ujedinjenog Kraljevstva postoje veliki potencijali iskorištavanja energije valova. [15]



Slika 4.6. Hibridna elektrana za iskorištavanje energije vjetra i sunca [13]

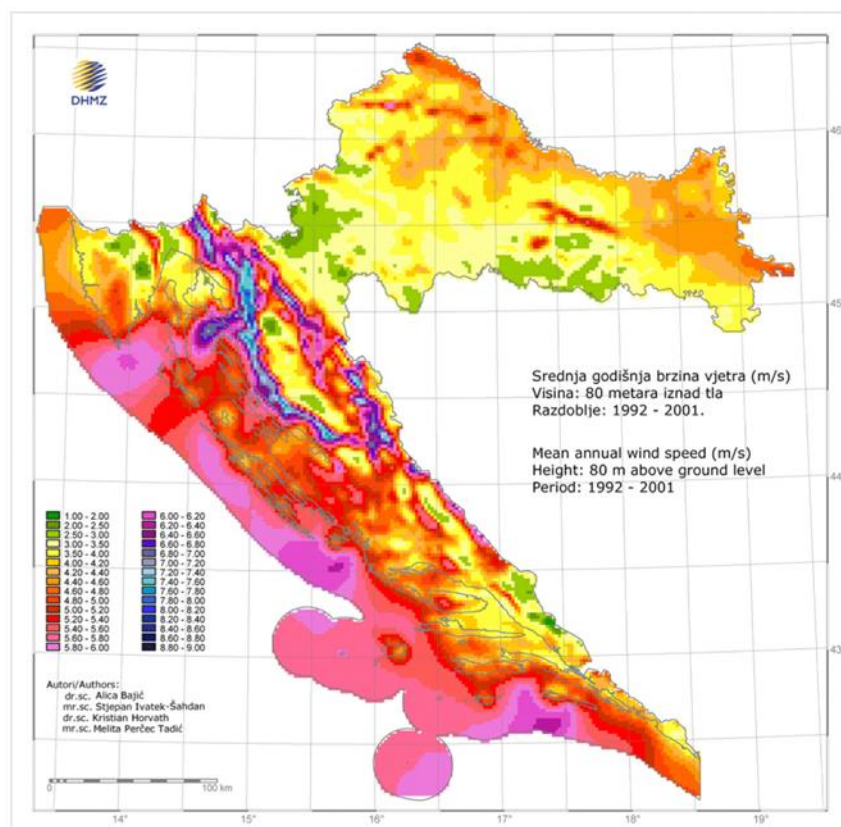
Na području Atlantskog oceana trenutno su izgrađeni kapaciteti od 535 MW obnovljivih izvora energije na moru. Ovo područje ima visoki potencijal za iskorištavanje energije mora zbog visokih valova i razlike u plimi i oseci na obalama Atlantskog oceana. Najveći potencijal je na obalama Irske, sjeverozapadne Francuske oko poluotoka Bretanje i cijele sjeverne obale Španjolske. Potencijal iskorištavanja energije mora na području Atlantskog oceana prema podacima iz studije objavljene u lipnju 2023. godine iznosi 60 GW. Postavljanje plutajućih fotonaponskih elektrana na obalama Atlantskog oceana nema značajan potencijal i prema trenutnim studijama puno više se isplati ulaganje u vjetroelektrane na moru. Najveći potencijal za plutajuće fotonaponske elektrane na području Atlantskog oceana imaju Portugal i Španjolska, ali veći potencijal iskorištavanja energije sunca se nalazi na obalama Sredozemnog mora i prema studijama Europske unije očekuje se ulaganje na obalama Sredozemnog mora. Zbog utjecaja tople Golske struje većinu godine na obalama Atlantskog oceana postoje vjetrovi koji se mogu koristiti za dobivanje električne energije iz vjetroelektrana. Nažalost područje koje se nalazi u isključivom gospodarskom pojasu zemalja koje imaju obalu na Atlantskom oceanu s udaljavanjem od kopna vrlo brzo postaje dublje od 1000 m, pa je površina za postavljanje obnovljivih izvora energije na moru ograničena zbog dubine Atlantskog oceana. U tablici 4.2. može se vidjeti potencijal energije vjetra za područje Atlantskog oceana. Može se primijetiti veća potencijalna površina priobalnih vjetroelektrana nego u Mediteranskom području. [15]

Tablica 4.2. *Popis članica Europske unije s potencijalom izgradnje vjetroelektrana na moru [15]*

Članica EU	Površina priobalne VE [km ²]	Električna energija dobivena iz priobalnih VE [TWh/god]	Površina plutajuće VE [km ²]	Električna energija dobivena iz plutajuće VE [TWh/god]
Irska	3.226	90,3	55.094	1635,55
Francuska	2.933	63,73	40.252	921,5
Španjolska	2.207	45,41	8.204	187,51
Portugal	1.355	27,83	11.758	263,12
Ukupno	9.721	227,24	115.309	3007,7

4.3. Potencijal Republike Hrvatske za iskorištavanje energije vjetra

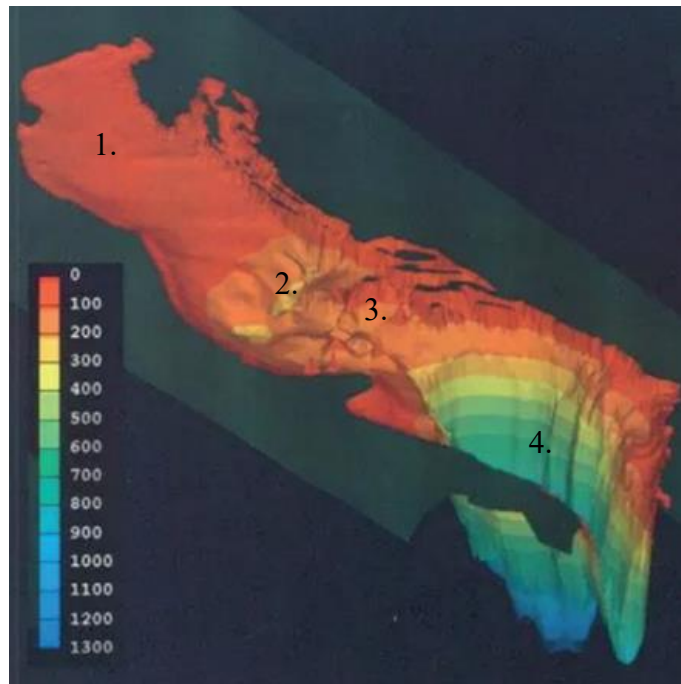
U tablici 4.1 može se vidjeti potencijal Republike Hrvatske za izgradnju priobalnih i plutajućih vjetroelektrana. Jadransko more je jedino more u južnom dijelu Europe na kojem se mogu graditi priobalne vjetroelektrane. Naravno za isplativost izgradnje vjetroelektrane na mjestu gradnje potrebno je imati dovoljno vjetra tijekom godine. Na području Jadrana prevladavaju dva vjetra: bura i jugo. Bura je suh, hladan, jak vjetar koji puše s visokih planina poput Velebita ili Biokova, ali veliki nedostatak bure je brzina na udare preko 60 m/s. Većina današnjih vjetroturbina ne može izdržati brzine vjetra preko 50 m/s. Jugo je topli i vlažan vjetar s prosječnom brzinom između 10 i 30 m/s, a najjači je na otvorenom moru. Jugo najčešće puše nekoliko dana za redom, svake zime se dogodi u nekoliko navrata da jugo na otvorenom moru puše konstantnom brzinom dulje od tjedan dana, a vjetar koji puše konstantom brzinom je savršen za iskorištavanje na vjetroturbinama. Državni hidrometeorološki zavod izradio je studiju vezanu za srednju brzinu i gustoću vjetra na teritoriju Republike Hrvatske. Studija je izrađena za brzine (gustoću) vjetra na visinama od 10 i 80 m, moderne vjetroelektrane na moru su visine između 80 i 120 m, pa su nam zanimljivije brzine vjetra na visini od 80 m (slika 4.7.).



Slika 4.7. Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za teritorij RH [17]

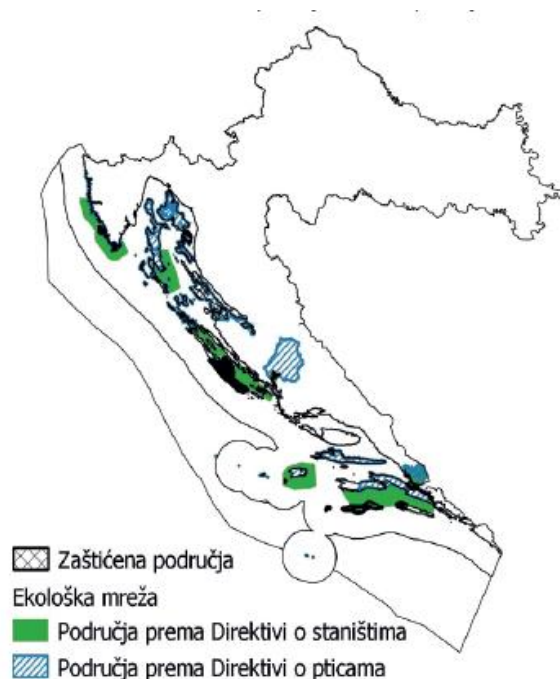
Morsko dno i dubina Jadranskog mora može se podijeliti na četiri dijela kao što je prikazano na slici 4.8.

1. Sjeverni dio Jadrana je vrlo plitak (Sjeverozapadni pličak) dubine manje od 100 m,
2. Jabučka morska udolina dubine do 250 m
3. Palagruški poprečni prag dubine do 130 m
4. Duboka južno jadranska zavala, najdublji dio Jadranskog mora je na dubini od 1233 m.



Slika 4.8. *Batimetrijska karta Jadranskog mora [18]*

Prema planu Europske unije o ostvarenju nulte emisije ugljičnoga dioksida do 2050. godine od Republike Hrvatske se očekuje izgradnja vjetroelektrana nazivne snage oko 3 GW. Prilikom odabira mjesta izgradnje vjetroelektrane u Jadranskom moru treba obratiti pozornost na zaštićena područja koja su prikazana na slici 4.9. Direktiva o zaštićenim staništima Europske Unije naziva se Natura 2000., te je osmišljena s ciljem očuvanja ugroženih vrsta i staništa na teritoriju Europske Unije. [18]



Slika 4.9. Zaštićena područja na moru u RH [18]

Obnovljivi izvori energije na moru mogu imati negativan utjecaj na ekosustav Jadranskog mora. Prema smjernicama o projektima iskorištavanja energije vjetra i zakonodavstvu Europske unije o prirodi utjecaj projekta vjetroelektrana na mora mogu se podijeliti na 4 glavne faze:

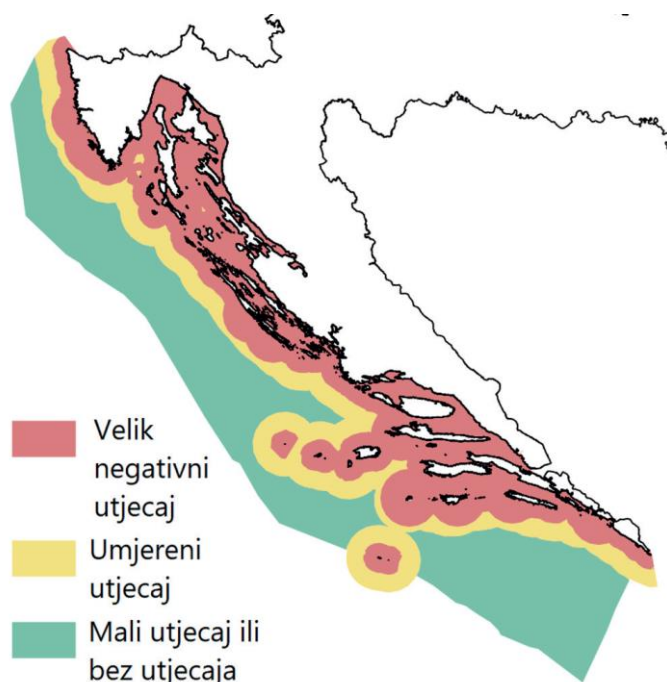
- Faza prije gradnje – ispitivanje potencijala vjetra, sedimenta i vrsta živih organizama koja prebivaju u blizini područja planirane gradnje
- Faza gradnje – izgradnja temelja, prijevoz materijala plovilima, izgradnja mrežnog priključka (postrojenja) i podvodnog kabela do kopna
- Faza održavanja – održavanje vjetroturbin i sprečavanje kvarova
- Faza uklanjanja – na kraju životnog vijeka uklanjanje vjetroturbin (zamjena novom)

Prenošenjem električne energije kroz podmorski energetska kabel u blizini kabela stvaraju se elektromagnetska polja koja mogu ograničiti slobodno kretanje riba i drugim morskih organizama. Utjecaj elektromagnetskog polja može se smanjiti postavljanjem zaštitnog omotača na kabel, ali koristi se i dodatno ukopavanje kabela na dubinu od minimalno jednog metra ispod površine morskog dna. Ukopavanjem kabela rješava se i utjecaj zračenja topline na morsko dno, ali nažalost da bi ukopali kabel mora se uništiti dio morskog dna, a s time i sve organizme koji tamo obitavaju. Toplinsko zračenje kabela predstavlja problem povišenih temperatura u blizini kabela, te naseljavanje netipičnih vrsta organizama. Najveći utjecaj izgradnje vjetroelektrane na morski ekosustav ima postavljanje temelja vjetroturbin jer je potrebno bušiti u morsko dno

(priobalne) ili usidriti (plutajuće) vjetroelektrane. Također potrebno je paziti na kojim mjestima gradimo vjetroelektrane zbog ptica selica i staništa ptica (morskih i grabljivica), kao što možemo vidjeti na slici 4.9. poznata su područja leta ptica.

Vizualno zagađenje obnovljivim izvorima energije najviše ovisi o udaljenosti vjetroturbine od obale. U prosjeku vjetroturbina visine između 100 i 150 metara može se vidjeti na udaljenosti od 20 do 30 kilometara. Kod vedrog ljetnog vremena vjetroturbina može se vidjeti na udaljenosti do 60 kilometara. Utjecaj vizualnog onečišćenja na obalu Republike Hrvatske izgradnjom vjetroelektrane na Jadranskom moru mogao bi biti poguban za turizam, koji je u zadnjem desetljeću bio glavni sektor hrvatskog gospodarstva. Na slici 4.10. može se vidjeti karta vizualnog utjecaja vjetroelektrana na moru, te se utjecaj može podijeliti na sljedeće zone:

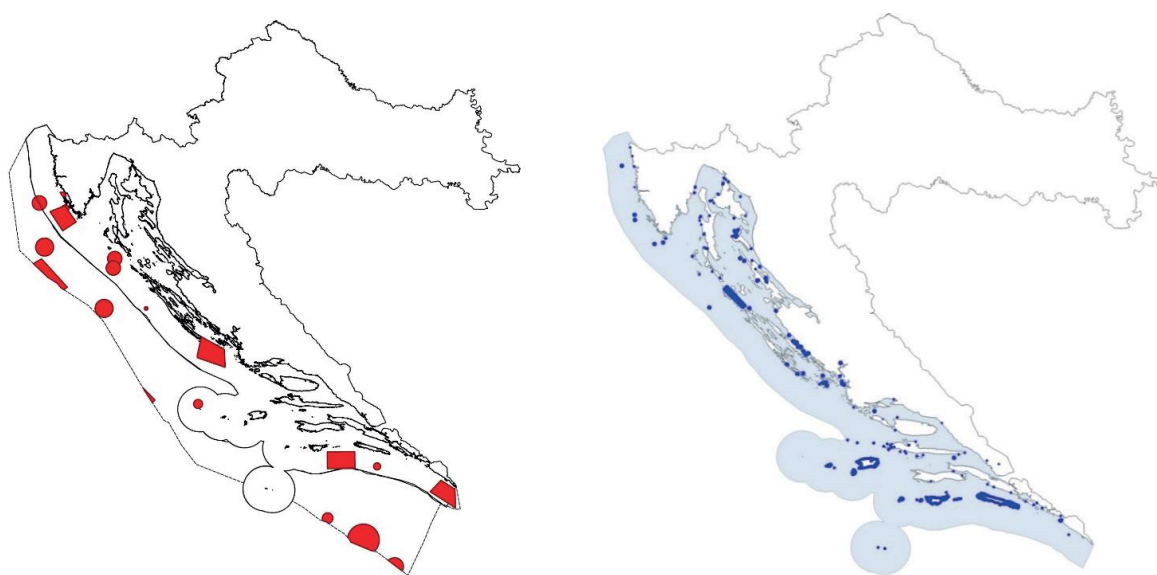
- Zona najvećeg utjecaja – udaljenost manja od 10 kilometara od obale i do 20 kilometara od zaštićenih područja (nacionalni parkovi i parkovi prirode) ili gradova na obali (Dubrovnik, Pula, Rovinj, Split)
- Zone umjerenog utjecaja – udaljenost do 12 nautičkih milja (22,22 kilometra) od obale (izgradnja u teritorijalnom moru), Vjetroturbine su vidljive, ali nisu lako uočljive s obale
- Zona niskog utjecaja – Udaljenost veća od 12 nautičkih milja pa sve do granice epikontinentalnog pojasa



Slika 4.10. Prikaz zona vizualnog utjecaja vjetroelektrana na moru u RH [18]

Područje izgradnje vjetroelektrane ovisi o obližnjem zračnom prometu, današnje najveće vjetroturbine imaju visinu od gotovo 250 m, a napredovanjem tehnologije očekuje se visina od preko 300 m. Zbog visine vjetroturbina nije dozvoljena izgradnja vjetroelektrana u blizini sljedećih zračnih luka na hrvatskoj obali: Pula, Mali Lošinj i Dubrovnik. Vjetroturbine moraju imati svjetleću signalizaciju, te se oko njih moraju nalaziti zakonom propisane pomorske oznake.

Postoje zabranjena područja na kojima se ne smiju graditi vjetroelektrana zbog arheoloških nalazišta ili pak zbog sumnji na zaostale bombe iz ratova 20. stoljeća. Na slici 4.11. lijevo mogu se vidjeti područja na kojima se sumnja na zaostale bombe, a desno mogu se vidjeti arheološka nalazišta. Ne postoje javno dostupni podaci o svom zaostalom oružju i streljivu u Jadranskom moru, ali je Europska mreža za promatranje i podatke o moru u svom izvještaju o zaostalim oružju iz 2023. godine navela 21 poznatu lokaciju površine oko 400 000 hektara. Podvodna kulturna baština u Republici Hrvatskoj zaštićena je Zakonom o zaštiti i očuvanju kulturnih dobra na nacionalnoj, ali i međunarodnoj razini. [18]

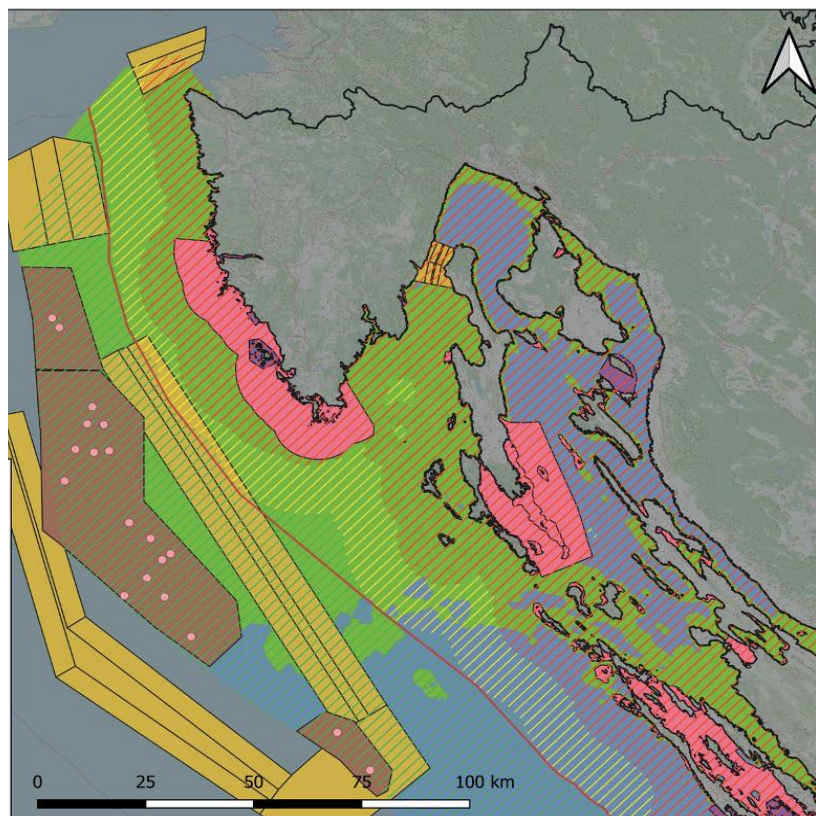













Slika 4.11. Područja odbačenog oružja i streljiva u Jadranskom moru (lijevo) i arheološke zone u Jadranskom moru (desno) [18]

4.4. Potencijalno područje za izgradnju priobalne vjetroelektrane

Priobalne vjetroelektrane mogu se izgraditi samo na sjevernom Jadranu jer je samo na sjevernom Jadranu dubina Jadranskog mora manja od 60 m. Na slici 4.12. može se vidjeti prikaz ranije navedenih zabranjenih područja izgradnje vjetroelektrana objedinjenih na jednoj zajedničkoj slici. Na slici je prikazano područje usmjerene plovidbe na kojem se ne mogu graditi

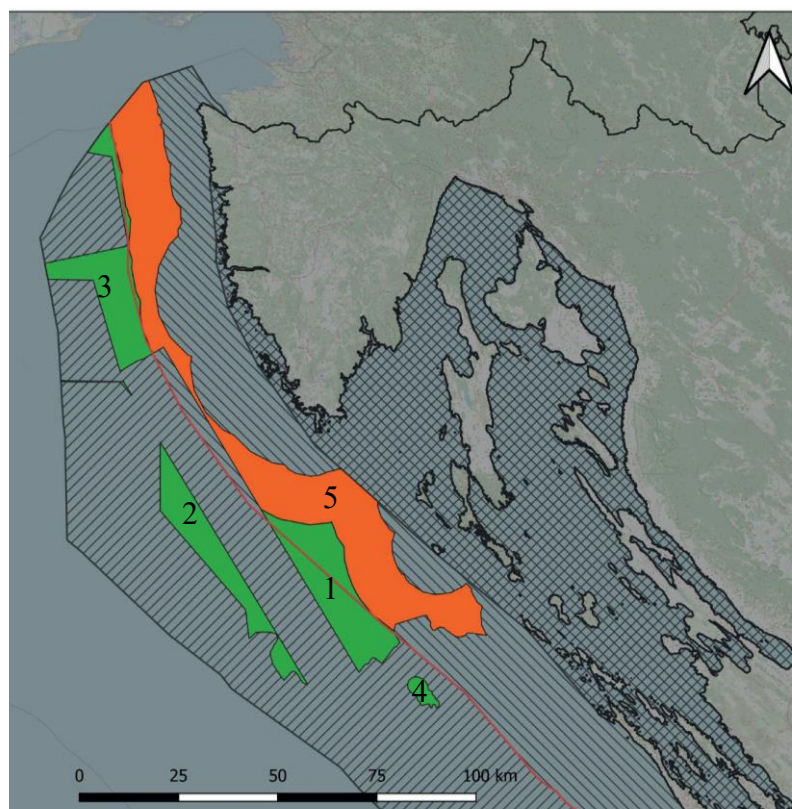
vjetroelektrane zbog slobodnog prolaza brodova. Pomorske luke na sjevernom Jadranu su jedne od najbitnijih luka u Europi jer se preko njih s teretnih brodova najlakše mogu dopremiti potrebne sirovine do središnje Europe. Jadransko more je najsjeverniji „rukavac“ Sredozemnog područja, te je od ključnog značaja za pomorsku razmjenu središnje Europe s ostatkom svijeta.



-  - dubina mora manja od 60 m
-  - dubina mora veća od 60 m
-  - granica epikontinentalnog pojasa
-  - zaštićena područja u moru
-  - NATURA 2000 područje
-  - koncesijska polja za eksploataciju ugljikovodika
-  - platforme za eksploataciju nafte i plina
-  - sheme usmjerene plovidbe
-  - zona visokog utjecaja na vizualno zagađenje
-  - zona umjerenog utjecaja na vizualno zagađenje
-  - zona niskog utjecaja na vizualno zagađenje

Slika 4.12. Prikaz analize sjevernog Jadrana za izgradnju vjetroelektrana s pripadajućom legendom [18]

Ako sa slike 4.12. uklonimo sva područja na kojima se ne mogu graditi vjetroelektrane dolazi se do slike 4.13. na kojoj možemo vidjeti zone obojene zeleno i narančasto. Zelena boja predstavlja područja niskog utjecaja na vizualno zagađenje, a narančasta područje umjerenog vizualnog zagađenja. Puno je veća isplativost izgradnje vjetroelektrana u zelenim područjima zbog veće visine same vjetroturbine jer ograničenje visine uopće ne postoji, dok kod vjetroelektrana izgrađenih u narančastim područjima postoji ograničenje visine zbog smanjenja vizualnog zagađenja. Ukupna površina područja na kojima se mogu graditi vjetroelektrane u sjevernom Jadranu je oko 2850 km², ali najveće područje na kojem se mogu graditi priobalne vjetroelektrane je područje obojeno smeđom bojom na slici 4.12. U budućnosti kada INA završi s eksplantacijom nafte i plina pojavljuje se područje veće od 2000 km² pogodno za izgradnju priobalnih vjetroelektrana.



Slika 4.13. Prikaz 5 potencijalnih zona za izgradnju vjetroelektrana na moru [18]

Na slici 4.13. pogodna područja za izgradnju priobalnih vjetroelektrana podijeljena su na 5 zona. Može se primijetiti da gotovo 90% potencijalnih priobalnih vjetroelektrana unutar teritorijalnog mora nalazi u području umjerenog vizualnog zagađenja, što je u skladu s ranije navedenim podacima iz studije o potencijalu iskorištavanja energije vjetera na Mediteranu. Prema

toj studiji ne preporučuje se izgradnja vjetroelektrana u teritorijalnom moru zbog vizualnog zagađenja [18]. U tablici 4.3. prikazane su približne površine svake od 5 potencijalnih zona i udio u kojem pojasu se nalaze. Zona 5 vrlo vjerojatno nikada neće doći u obzir za izgradnju priobalnih vjetroelektrana zbog vizualnog zagađenja i potencijalno štetnog utjecaja na turizam Istre i Kvarnerskih otoka, a poznato je da gotovo 50% ukupnih noćenja u Hrvatskoj odvija u Istarskoj i Primorsko-goranskoj županiji.

Tablica 4.3. *Površine potencijalnih zona za izgradnju vjetroelektrana [18]*

Potencijalna zona za izgradnju priobalne vjetroelektrane	Ukupno područje [km²]	Unutar teritorijalnog mora [km²]	Unutar isključivog gospodarskog pojasa [km²]	Vrsta utjecaja
1	471	178	293	niska
2	348	0	348	niska
3	403	29	374	niska
4	33	0	33	niska
5	1602	1602	0	umjerena
Ukupno	2862	1807	1055	/

5. TEHNIČKA RJEŠENJA PRIKLJUČENJA VJETROELEKTRANA NA MORU

5.1. Podmorski energetska kabel

Podmorski kabel predstavlja zasebnu kategoriju kabela koji su dimenzionirani za polaganje na morsko dno. Podmorskim kabelima uspostavlja se veza između otoka i kopna ili se koriste kao veze između dvaju elektroenergetskih sustava morskim putem (npr. HVDC veza između Italije i Crne Gore).

Podmorski energetska kabeli postoje već više od stoljeća, a njihova glavna svrha mijenjala se tijekom 20. stoljeća. U početku su se koristili za opskrbu izoliranih priobalnih objekata poput svjetionika. Kasnije je glavni cilj bio opskrba obalnih otoka električnom energijom i povezivanje autonomnih energetskih mreža radi bolje stabilnosti. U moderno doba fokus je na povezivanju priobalnih objekata poput naftnih i plinskih postrojenja ili velikih proizvođača obnovljivih izvora električne energije poput vjetroelektrana na moru.

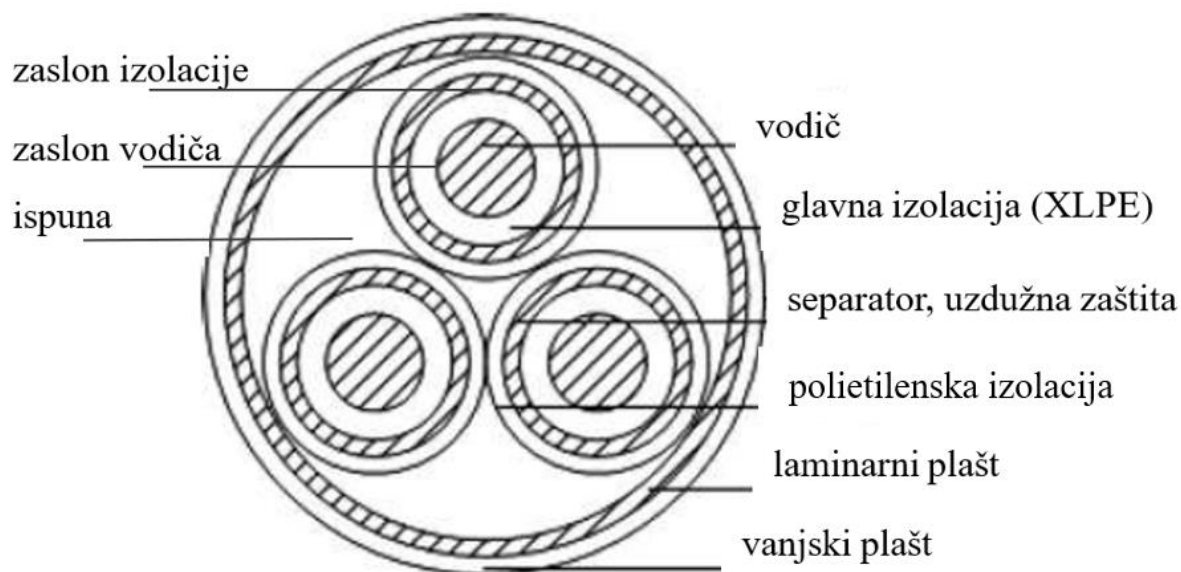
Podmorske energetske kabele može se podijeliti:

- prema vrsti električnog prijenosa: istosmjerni i izmjenični
- prema broju vodiču u konstrukciji kabela: jednožilni i trožilni
- prema vrsti izolacije vodiča: izolirani umreženi polietilen (XLPE kabel) i impregniranim papirom (MI kabel)

Podmorski kabeli najčešće se proizvode na što je moguće veće duljine zbog smanjenja broja spajanja krajeva kabela. Svaki spoj među dva kabela kod podmorskih energetskih kabela predstavlja rizik za mogući proboj vode tijekom životnog vijeka kabela. Maksimalna duljina kabela koja se može proizvesti u jednom komadu određena je maksimalnom nosivošću broda kojim se polažu kabeli.

Na slici 5.1. može se vidjeti prikaz pojednostavljenog presjeka trožilnog XLPE HVAC podmorskog kabela. HVAC podmorski kabel sastoji se od vodiča, zaslona vodiča, glavne izolacije vodiča (umreženi polietilen), zaslona XLPE izolacije, uzdužne vodene zaštite, polietilenske izolacije, laminarnog plašta, ispune kabela i plašta kabela. Vodene zaštite, poput separatora i laminarnog plašta, koriste se za sprječavanje prodora vode u podmorske kabele, kada dođu u doticaj s vodom one nabubre te sprječavaju daljnju štetu na kabelu prouzrokovanu prodorom vode

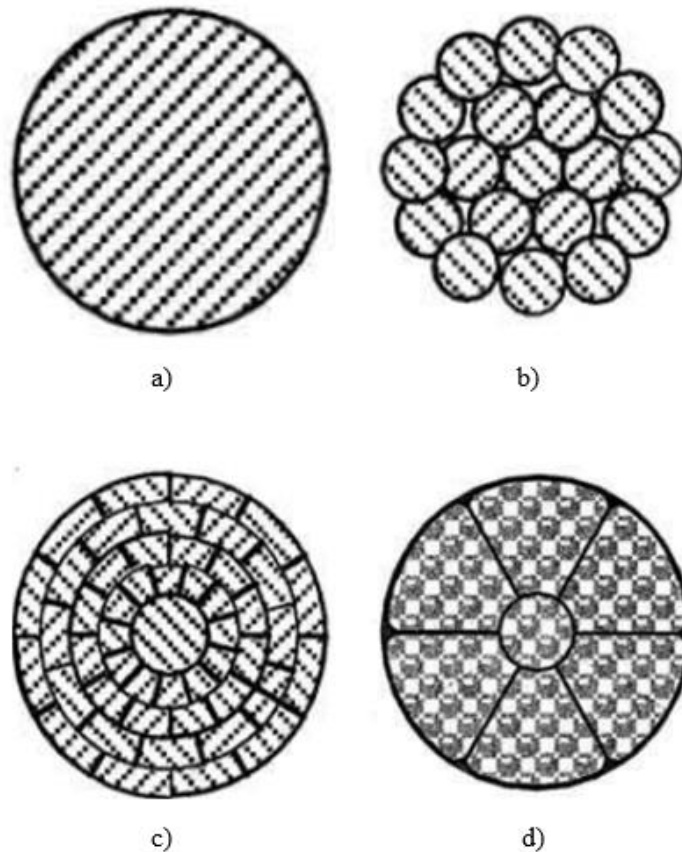
u kabel. Moderni kabeli imaju dodana optička vlakna koja se dodaju u prostor ispune prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1. Pojednostavljeni presjek trožilnog HVAC podmorskog kabela [21]

Vodič

U podmorskim energetske kablama kao vodič koristi se bakar ili aluminij. Bakar ima bolju vodljivost električne energije od aluminija, pa se bakar češće koristi za podmorske kabele jer je potreban manji presjek vodiča. Manji presjek predstavlja manju potrebnu količinu izolacije oko vodiča, a to znači da je manji presjek cijelog kabela. Poprečni presjek kabela ovisi o zahtjevu za potrebnim kapacitetom prijenosa električne energije. Prilikom dimenzioniranja kabela vrlo je važno uzeti u obzir mehaničke aspekte kabela. Puni presjek vodiča, prikazan na slici 5.2 pod a), u podmorskim energetske kablama koristi se samo kod presjeka manjeg od 400 mm^2 zbog negativnog utjecaja skin efekta na vodiče kabela. Skin efekt je pojava uzrokovana strujama visokih frekvencija što uzrokuje tok struje rubom vodiča, odnosno tankim površinskim slojem. Iz tog razloga za presjeke od 400 mm^2 do 1200 mm^2 koriste se kabeli gdje je vodič konstruiran pomoću više tanjih, međusobno isprepletenih, žica (slika 5.2. b)). Za presjek vodiča u kabelu veći od 1200 mm^2 koriste se vodiči sa sektorskim presjekom, takozvani Milikenov vodič. Kod trožilnih kabela pri većim strujnim opterećenjima dolazi do zagrijavanja vodiča, a prijenosna moć vodiča definirana je strujom koja teče kroz vodič, to jest zagrijavanjem vodiča. Upravo zbog zagrijavanja vodiča važno je koristiti materijale koji dobro odvedu toplinu u okolinu.



Slika 5.2. Presjek vodiča – a) okrugli (puni) vodič, b) isprepleteni, c) sektorski vodič, d) sektorski (Milikenov vodič) [19]

Zaslon vodiča i izolacije

Zaslon vodiča i izolacije je tanki sloj poluvodičkog materijala debljine između 1 i 2 mm. Važno je precizno nanijeti zaslone vodiča i izolacije kako bi se spriječile nečistoće na površini koje mogu uzrokovati mjehuriće zraka koji ubrzavaju starenje kabela na mjestu nečistoće. Na mjestima na kojima se javljaju nečistoće može doći do velike jakosti električnog polja koje može uzrokovati električni proboj kabela. Zaslon se izrađuje od poluvodičkog umreženog polietilena.

Izolacija

Izolacija kabela predstavlja učinkovitu prepreku (barijeru) između potencijala površine vodiča i okoline. Izuzetno je važno da je izolacijski sustav potpuno čist i ravnomjeran. Do proboja izolacije najčešće dolazi na mjestima kod kojih se dogodila greška prilikom proizvodnje (na primjer mjehurić zraka unutar izolacije). Zatim, zid izolacije mora biti mehanički čvrst i otporan na temperaturu i starenje. Korištenjem podmorskih električnih kabela (telekomunikacijskih i

energetskih) kroz 20. stoljeće isprobano je mnogo različitih izolacijskih materijala, ali danas se koriste samo polietilen (PE) i umreženi polietilen (XLPE).

Termoplastični polietilen je termoplastični materijal koji nastaje polimerizacijom etilena. Za električne kabele koristi se polietilen različitih gustoća:

- Polietilen male gustoće (LDPE)
- Polietilen srednje gustoće (MDPE)
- Polietilen velike gustoće (HDPE)

Umreženi polietilen (XLPE) se proizvodi križanjem dugih molekularnih lanaca polietilena male gustoće kako bi se stvorila trodimenzionalna mreža. Križanje je nepovratno i sprječava polimer da se topi pri višim temperaturama. Termoplastični polietilen (PE) postaje mekan i na kraju se tali pri temperaturama između 80°C i 110°C, ovisno o gustoći. XLPE je stabilan na znatno višim temperaturama. Za pokretanje procesa križanja koriste se organski peroksidi, a oni se dodaju sirovini prilikom proizvodnje. Sirovina se istiskuje oko vodiča, a križanje se neposredno odvija u cijevi pod inertnom atmosferom pri visokim tlakom i temperaturom. Prilikom istiskivanja obično se stvaraju mjehurići unutar nepotpuno ohlađenog umreženog polietilena. Kako bi se suzbilo stvaranje plinskih mjehurića, kabel se mora dalje transportirati u cijevi pod visokim tlakom dok se hlađenjem umreženi polietilen potpuno ne ohladi. Hlađenje se mora odraditi polagano kako bi se smanjio unutarnji stres.

Umreženi polietilen je najčešće korišteni izolacijski materijal za podmorske energetske kabele. U počecima razvoja i proizvodnje kabela izoliranih umreženim polietilenom, materijal je stekao lošu reputaciju zbog osjetljivosti izolacije na vodu. Pod utjecajem vode, električnog polja i nečistoća, moglo bi doći do stvaranja “vodene strukture”, fenomen koji uzrokuje oštećenja nalik stablu unutar izolacije. Problemi s vodenom strukturom danas su vrlo rijetki, a umreženi polietilen se razvio kao najbolji izolacijski materijal za kopnene i podmorske energetske kabele.

Separator – uzdužna vodena zaštita

Uzdužna vodena zaštita često je potrebna kod podmorskih energetskih kabela kako bi se spriječilo prodiranje vode u kabel nakon oštećenja vanjskog plašta. Kao zaštita od prodiranja vode koriste se „bubriva“ sredstva u obliku praha, traka ili niti koje se postavljaju u podmorski energetski kabel. Kada dođu u kontakt s vodom, ta sredstva značajno nabubre i blokiraju prolaz vode po dužini kabela. Većina sredstava za „bubrenje“ bolje djeluje u kontaktu sa slatkom vodom

nego s morskom vodom. Kao zaštita energetskog kabela od prodora vode koriste se hidrofobni spojevi poput vazeline i drugih hidrofobnih spojeva.

Laminarna zaštita

Uloga ovog tipa zaštite je sprječavanje poprečnog prodora vode u podmorski energetski kabel. Izolacija dielektričnog materijala mora biti zaštićena od prodiranja vode kako bi se održala dielektrična čvrstoća. Ranije je navedeno kako je umreženi polietilen jako osjetljiv na vodu pa je izrazito važno spriječiti prodor vode u unutrašnjost kabela. Većina podmorskih energetskih kabela visokog napona ima metalni sloj koja pruža zaštitu od prodiranja vode. Metali koji se koriste kao laminarna zaštita kabela su: aluminij, olovo i bakar. Za podmorske energetske kabele najčešće se koristi olovni plašt jer je najotporniji na koroziju u slanoj morskoj vodi. Ugradnja laminarne zaštite unutar podmorskog energetskog kabela povećava pouzdanost i životni vijek kabela jer se smanjuje rizik oštećenja kabela zbog prodora vode u kabel.

Plašt kabela

Najvažniji konstrukcijski element podmorskih energetskih kabela je plašt (oplata) kabela, koji pruža stabilnost i mehaničku zaštitu. Plašt kabela mora osigurati mehaničku zaštitu od udaraca i abrazije u okolno kamenje uzrokovano morskim strujama. Oklop također mora pružiti dovoljnu mehaničku zaštitu protiv očekivanih vanjskih udaraca uzrokovanih od alata za instalaciju, ribolovne opreme i brodskih sidara. Iako, jedan od najčešćih kvarova na podmorskim energetskim kabelima je slučajno spuštanje broskog sidra na podmorski kabel. Oklop podvodnih energetskih kabela izrađen je od metalnih žica namotanih oko kabela povrh kojega se još dodatno nanosi polietilen velike gustoće (HDPE). Debljina žice koja se mota oko kabela je između 2 i 8 mm².

5.2. Priobalna podstanica (Offshore Substation)

Priobalna podstanica (eng. *Offshore Substation*) povezuje kolektorski sustav kabela kojima su povezane vjetroturbine s prijenosnim podmorskim kabelima. Sastoji se od glavnog kolektorskog sustava, transformatorske stanice, pomoćnih sustava, konstrukcije za smještaj sustava, prostorija za privremeni smještaj osoblja (prilikom održavanja) i temelja. Često se na vrh priobalnih podstanica postavlja heliodrom za slijetanje helikoptera kojim se dovodi tim za održavanje. Heliodrom se najčešće izrađuje od aluminijske jer ima najbolju otpornost na koroziju pri visokoj vlazi. Priobalna podstanica sadrži transformator za dizanje napona s naponske razine kolektorskih kabela (tipično 33 kV ili 66 kV) na naponsku razinu za prijenos električne energije do obale (tipično 220kV) i opremu za kompenzaciju jalovih gubitaka snage kako bi se smanjili gubici. Za vjetroelektrane koje su izgrađene na većim udaljenostima od obale, priobalna podstanica može također imati postrojenje za ispravljanje izmjenične električne struje (AC) u istosmjernu (DC) kako bi se smanjili gubici. Na priobalnim podstanicama također se nalazi i rasklopno postrojenje koje se sastoji od sklopne i zaštitne opreme za zaštitu u slučaju kvarova. [33]

Priobalna podstanica zbog visoke cijene postavljanja i ugrađivanja skupocjene opreme mora imati sustav za vatrodojavu i glavni protupožarni sustav koji se automatski aktivira prilikom požara. Većina današnjih priobalnih podstanica koristi protupožarne sustave koji koriste ugljikov dioksid za gašenje požara. Najveći rizik predstavljaju transformatorske stanice koje mogu prilikom požara i visokih temperatura eksplodirati.

Na priobalnoj podstancici nalazimo i pomoćne sustave koji će osigurati napajanje prilikom velikih kvarova na kolektorskom sustavu ili prijenosnom kabelu prema obali. Danas se većinom koriste baterijski sustavi ili dizel generatori za pomoćno napajanje. Temelji priobalne podstanice su izrađuju isto kao i temelji za vjetroturbine koji su objašnjeni u poglavlju 3.5.

5.3. Podstanica za pokrivanje jalovih gubitaka

Podstanica za pokrivanje jalovih gubitaka služi nam kako bi kompenzirali izraziti kapacitivni karakter energetskog kabela. Ukoliko ne bi kompenzirali jalovu snagu koja prolazi kroz kabela stvarali bi se veliki gubitci u prijenosu električne energije za veće udaljenosti do obale. Pokrivanje jalovih gubitaka odrađuje se pomoću elemenata:

- Sinkroni generator – na kopnu predstavlja najveći izvor napajanja i pokrivanja potreba za reaktivnom snagom. Ovisno o uzbudu sinkroni generator proizvodi ili apsorbira reaktivnu snagu.
- Kondenzatorska baterija – najčešće korišteni uređaj za kompenzaciju jalove snage, kako bi pokrili jalove gubitke, kondenzatorske baterije se postavljaju paralelno.
- Prigušnica – paralelne i poprečne prigušnice služe za kompenzaciju kapacitivne jalove snage vodova visokog napona ili dugih neopterećenih vodova
- Sinkroni kompenzator – sinkroni stroj kojim se upravlja promjenom uzbudne struje, može raditi u kapacitivnom i induktivnom području
- FACTS (Flexible AC Transmission Systems) uređaji – uređaji koji upotrebom energetske tehnologije (bez rotirajućih dijelova) upravljaju jalovom snagom u mreži

5.4. Kopneno rasklopno postrojenje i transformator

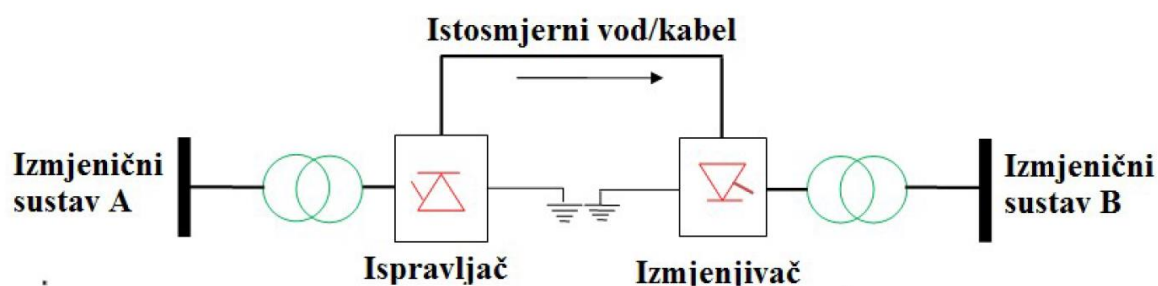
Kopneno rasklopno postrojenje nije znatno različito od priobalne podstanice, a zadaća mu je prenijeti električnu energiju dobivenu iz vjetroelektrane do potrošača na kopnu. Razlika je što postrojenje na obali nije ograničeno dimenzijama platforme pa je površina koju približno zauzima od 5 ha, za HVAC sustave, do 7,5 ha za HVDC sustave. Idealno mjesto za izgradnju rasklopnog postrojenja je uz obalu kako bi se uštedjelo na duljini kabela između priobalne podstanice i rasklopnog postrojenja. Rasklopno postrojenje sadrži transformatore te, kao i priobalna podstanica, podiže napon za daljnju distribuciju električne energije. Ukoliko je dovodni kabel HVDC kabel, rasklopno postrojenje sadržava i izmjenjivačku jedinicu kojom se mijenja istosmjerna struja u izmjeničnu te naponska razina kako bi se sustav mogao spojiti na mrežu. Primjerice, za vjetroelektrane većih nazivnih snaga rasklopno postrojenje ima zadaću podići napon s 220 kV na napon od 400 kV, poput vjetroelektrane *Hornsea Project One*. [33]

Od opreme u električnom sustavu, rasklopno postrojenje mora sadržavati visokonaponske prekidače, rastavljače, transformatore, pretvarače, kompenzatore jalove snage i uzemljenje. Ukoliko je dovodni napon iz vjetroelektrane izmjenični tada postrojenje sadrži samo transformatore. Ako je napon istosmjerni tada postrojenje mora sadržavati i pretvarače koji prethode transformatorima. Dodatno, svako postrojenje sastoji se od zgrada u kojima se nalazi električna oprema, skladišta za zamjenske dijelove, prostora za osoblje koji računalima nadziru sustav, parkinga za vozila itd.

Troškovi izgradnje obalnih rasklopnih postrojenja mogu iznositi i do 37 milijuna funti za priobalne vjetroelektrane nazivne snage 450 MW. Od ukupnih troškova, približno 26 milijuna funti potrebno je za nabavu i instalaciju električnog sustava i opreme ukoliko se radi o HVAC sustavu. [33]

5.5. Usporedba HVAC i HVDC

Većina elektroenergetskih sustava za prijenos električne energije koristi AC sustav jer transformatori lako mogu mijenjati naponske razine. Prijenos električne energije HVDC sustavom zahtijeva pretvaračke stanice na oba kraja istosmjernog voda kako bi se povezao s AC elektroenergetskim sustavom. Pojednostavljeni princip spajanja DC kabela na postojeću AC infrastrukturu prikazan je na slici 5.3. Elektroenergetski sustav koji koristi HVDC podmorske kabele stvara manje gubitke prilikom prijenosa, ali zahtijeva veću početnu investiciju prilikom izgradnje.

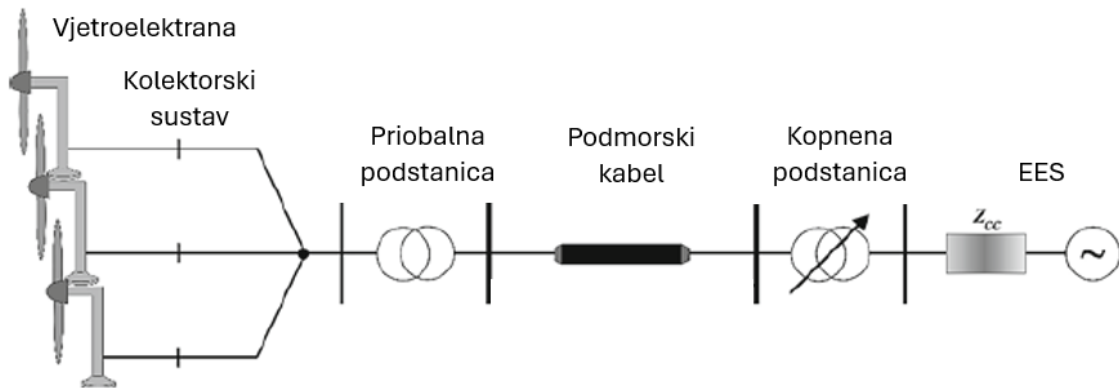


Slika 5.3. Pojednostavljeni princip spajanja DC kabela na postojeću AC infrastrukturu [22]

HVAC prijenos električne energije

HVAC podmorski kabelski koriste se za prijenos električne energije na manje udaljenosti. Ukoliko nam nije potrebna velika prijenosna moć kabela koristi se trožilni HVAC podmorski kabel kod kojega su tri vodiča (žile) smještene unutar kabla. Za prijenos veće količine električne energije HVAC podmorskim kabelom sustavi koriste tri odvojena jednožilna podvodna kabla, pri čemu svaki kabel sadrži samo jedan izolirani vodič koji prenosi jednu fazu trofazne struje. Često se dodaje i četvrti identičan kabel paralelno s druga tri, kao rezervni kabel u slučaju da je jedan od tri primarna kabela oštećen i potrebno ga je zamijeniti. Povezivanje vjetroelektrane na moru HVAC kabelom je najjednostavniji način jer se u transformatorskoj stanici samo mijenja naponska razina zbog smanjenja gubitaka. HVAC prijenosni sustav električne energije sastoji se od 4 glavna dijela koja su prikazana na slici 5.4.:

- Srednjenaponski kolektorski sustav
- Priobalna podstanica
- HVAC podmorski energetska kabel
- Kopnena podstanica



Slika 5.4. Dijelovi HVAC povezivanja vjetroelektrane na moru [28]

Prednosti HVAC nad HVDC prijenosnim sustavom:

- Dokazana i jeftinija tehnologija,
- Lagano spajanje na postojeći AC sustav,
- Maleni gubitci na kraćim udaljenostima

Nedostaci HVAC nad HVDC prijenosnim sustavom:

- HVAC podmorski kabeli stvaraju velike količine jalove snage,
- Povećanjem duljine kabela povećava se njegova kapacitivnosti (gubitci zbog jalove snage), dolazi do pada prijenose moći podmorskog kabela,
- Potreban je sustava za kompenzaciju jalove snage na krajevima kabela,
- Veći gubici veće udaljenosti,
- Za velike vjetroelektrane potrebno je više kabela, veći ukupni gubici. [28]

HVDC prijenos električne energije

HVDC sustav prijenosa električne energije koristi se kada postoji potreba za prijenosom velike količine električne energije na vrlo velike udaljenosti ili ako je elektroenergetska mreža na koju se vjetroelektrana povezuje slabo razvijena. U tim sustavima, priobalna podstanica prije prijenosa električne energije u pretvaračkoj stanici ispravlja u istosmjernu struju. Na kopnenoj pretvaračkoj stanici izmjenjuje se nazad u izmjeničnu struju. U istosmjernom prijenosnom sustavu nema jalove snage, stoga se cijela prijenosna moć kabela može koristiti za prijenos električne energije. HVDC sustavi u pretvaračkim stanicama najčešće koriste dvije vrste pretvarača:

- LCC pretvarači (eng. *Current-Line Commutated Converters*)
- VSC pretvarači (eng. *Voltage Source Converter*)

LCC pretvarači temelje se na tiristorima koji mogu raditi pri visokim naponom i strujom. Ova vrsta pretvarača poznata je također pod imenom klasični ili konvencionalni HVDC pretvarači. Princip rada LCC pretvarača je 6-pulsni spoj kojim se ispravlja ili izmjenjuje napon koji teče kroz njih. Korištenje LCC pretvarača HVDC tehnologiji daje ograničeno upravljanje jer je najveći nedostatak tiristora ne mogućnost isključivanja tiristora upravljačkim signalom što rezultira lošim faktorom snage i izobličenjem valnog oblika.

HVDC prijenosni sustav vjetroelektrane na moru temeljen na LCC pretvaračima sastoji se od:

- Srednjenaponski kolektorski sustav
- Priobalne podstanice (s transformatorom i LCC pretvaračem)
- AC i DC filteri
- DC podmorski kabel
- Kopnena podstanica (s transformatorom i LCC pretvaračem) [28]

Prednosti HVDC nad HVAC prijenosnim sustavom:

- Mogućnost povezivanja elektroenergetskih sustava različite frekvencije (na primjer povezivanje EES-a koji imaju frekvencije 50 Hz i 60 Hz)
- Veća udaljenost zbog prijenosa samo radne snage kroz kabel
- Maleni gubici kabela
- Veća prijenosna moć po kabelu
- HVDC prijenosni sustav ne prenosi struju kratkog spoja [28]

Nedostaci LCC HVDC sustava nad HVAC prijenosnim sustavom:

- Proizvodnja viših harmonika u pretvaraču (obavezna upotreba filtera),
- Pretvarači na svakom kraju kabela su trebaju jalovu snagu za rad [28]

VSC pretvarači temelje se na tranzistorima (IGBT), a drugi naziv ove vrste pretvarača su HVDC plus pretvarači. Prednost ove vrste pretvarača je što se vođenje može uključiti i isključiti, dok se kod LCC pretvarač može samo uključiti. U tablici 5.1. prikazane su razlike između LCC pretvarača i VSC pretvarača.

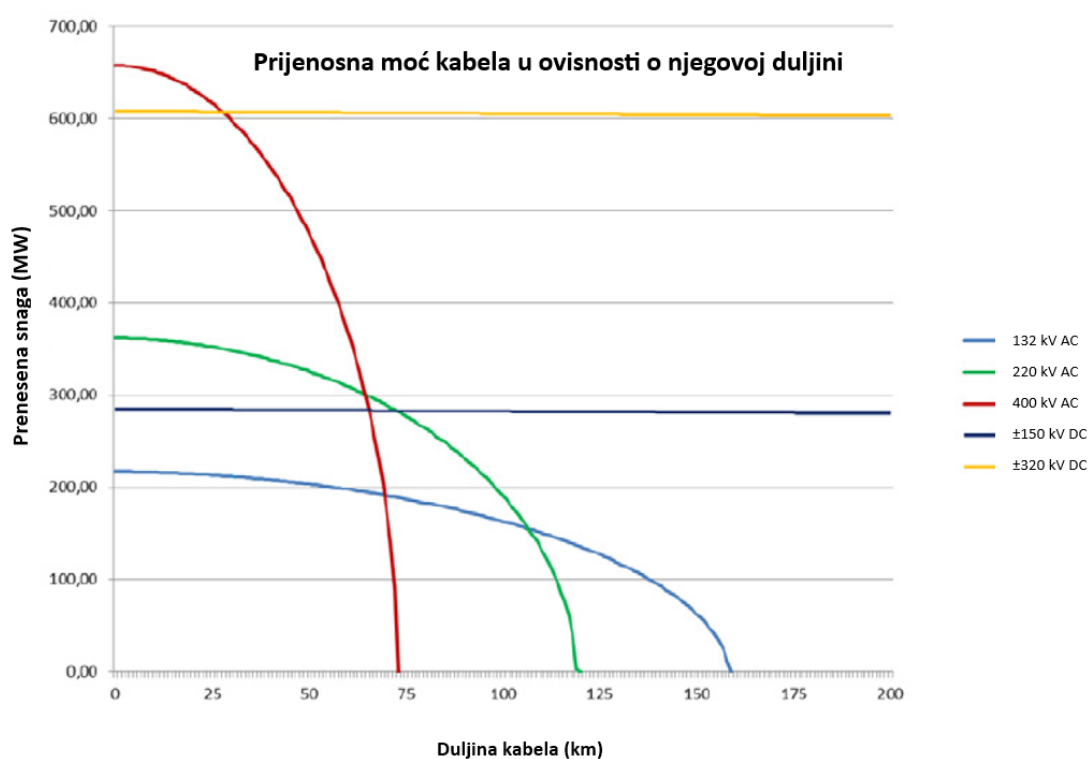
Tablica 5.1. Razlike između LCC i VSC pretvarača [36]

	LCC pretvarači	VSC pretvarači
Upravljanje	Potrošnja jalove snage	Upravljanje djelatnom i jalovom snagom
Harmonici	Niži harmonici	Viši harmonici
Prostor	Veliki	Mali
Snaga i napon pretvarača	Do 8000 MW, do 800 kV	Do 1200 MW, do 500 kV
Gubici pretvorbe	0,7 %	1-1,5 %
Komunikacijski zahtjevi	Visoki, potrebna koordinacija	Nije potrebna koordinacija
Promjena smjera snage	Promjena polariteta napona	Promjena smjera struje
Izmjenična mreža	Potrebna je jaka mreža za sklapanje ventila	Mogu djelovati u slaboj, pa i u pasivnoj mreži

Dva osnovna načina povezivanja pretvaračkih stanica su: leđa- leđa i točka-točka. Leđa-leđa (*back to back*) HVDC prijenosni sustav povezuje dva pretvarača koji između sebe imaju izrazito kratki prijenosni vod ili su postavljeni jedan do drugoga. Uloga ovoga načina povezivanja je spoj između dvaju elektroenergetskih sustava različitih frekvencija. Ovaj sustav HVDC prijenosa električne energije najčešće se radi s pomoću LCC pretvarača jer imaju manju gubitke prilikom pretvorbe.

Točka-točka (*point to point*) HVDC prijenosni sustav povezuje dvije pretvaračke stanice pomoću prijenosnog voda. Ovaj sustav koristi se kod povezivanja dvaju udaljenih mjesta pomoću HVDC kabela, ali također se koristi za povezivanje udaljenih elektrana na elektroenergetski sustav (na primjer vjetroelektrane na moru).

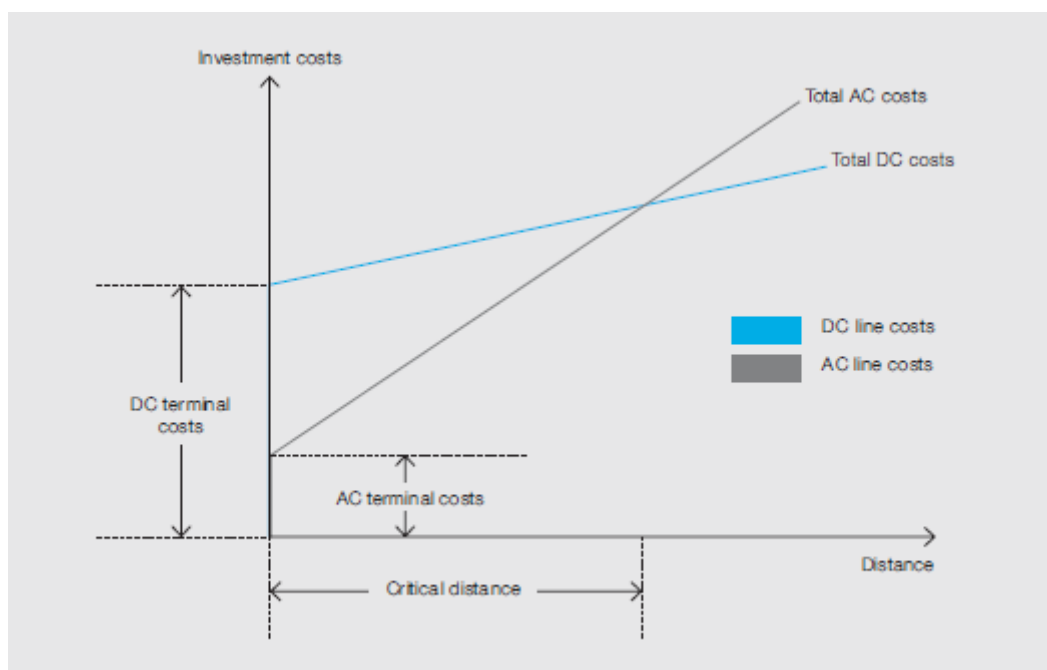
Za povezivanje vjetroelektrana na moru koriste se sustavi visokonaponskog izmjeničnog prijenosa električne energije (HVAC) i sustavi visokonaponskog istosmjernog prijenosa električne energije (HVDC). Danas se HVAC bira u većini projekata koji se nalaze na relativno kratkoj udaljenosti od obale za vjetroelektrane na moru i većinu kopnenih vjetroelektrana. HVAC prijenosni sustav ima veliki nedostatak zbog velike kapacitivne komponente kabela uzrokovane promjenom polariteta napona 50 ili 60 puta u sekundi. Do posebnog izražaja dolazi kod dužih kabela koji stvaraju velike gubitke prilikom prijenosa električne energije. Na slici 5.5. može se vidjeti usporedba pada prijenosne moći HVAC i HVDC kabela. Prijenosna moć HVAC kabela koji ima viši nazivni napon brže pada nego HVAC kabel s manjim nazivnim naponom.



Slika 5.5. Grafički prikaz ovisnosti prijenosne moći kabela o njegovoj duljini za različite vrste napona [20]

Zbog ograničenja uzorkovanog stvaranjem jalove komponente struje punjenja kabela i smanjenja prijenosne moći HVAC kabela naprema HVDC kabelu granica isplativosti je između 40 km i 80 km ovisno o korištenoj tehnologiji. Na slici 5.6. možemo vidjeti usporedbu troškova za HVAC i HVDC prijenosni sustav. Možemo primijetiti da su troškovi ulaganja za HVDC sustav puno veći od ulaganja u HVAC sustav zbog pretvaračkih stanica. Zbog već ranije objašnjenog stvaranja jalove snage u HVAC kabelima s udaljenošću stvaraju su sve veći gubici. Ukoliko

želimo koristiti HVAC kabele na većim udaljenostima moramo kompenzirati jalovu snagu što dodatno povećava troškove HVAC kabela.



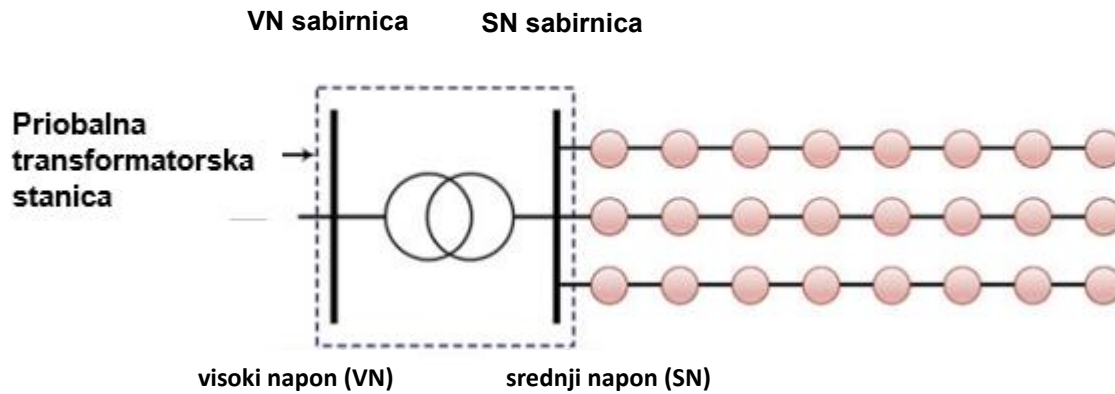
Slika 5.6. Prikaz grafičke usporedbe isplativosti HVAC i HVDC prijenosnog sustava [37]

6. TEHNIČKA RJEŠENJA KOLEKTORSKOG SUSTAVA VJETROELEKTRANA NA MORU

Kolektorski sustav služi kako bi se električnu energiju dobivenu iz vjetroelektrana doveli do transformatorske stanice kojom podižemo napon kako bi energiju doveli rasklopnom postrojenju kojim ga kasnije raspoređujemo potrošačima. Pri korištenju vjetroelektrana manjih nazivnih snaga dizajn kolektorskog sustava nije predstavljao prepreku pri financiranju i izgradnji vjetroelektrana. Međutim, napretkom tehnologije i dizajna vjetroturbina, one postižu snagu nekoliko stotina megavata. Primarna uloga kolektorskog sustava je smanjenje troškova kvarova i održavanje što je više moguće vjetroturbina u pogonu za vrijeme ispada pojedine vjetroturbine ili za vrijeme kvara podmorskog kabela. Poznajemo 4 vrste dizajna kolektorskog sustava koje koristimo zbog različitih oblika i efektivnih površina vjetroelektrana; radijalni dizajn, dizajn jednostranog ili dvostranog prstena te dizajn zvijezde. Dodatno, moguće je upotrijebiti i dva suvremena dizajna koja su ekonomičnija i pouzdanija; dizajn povratne veze i dizajn dvostranog poluprstena.[28]

6.1. Radijalni dizajn

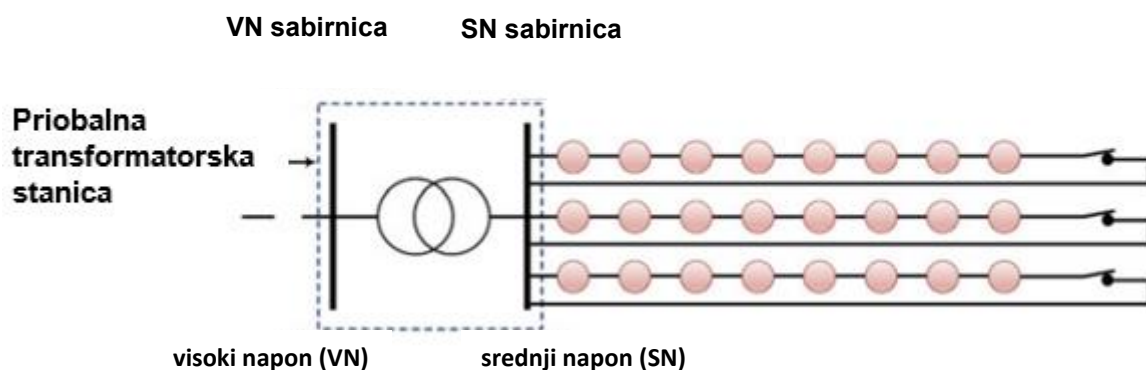
Radijalni dizajn (eng. *radial design*) kolektorskog sustava jedan je od najčešće korištenih. Shemu takvog dizajna možemo vidjeti na slici 6.1. Na toj slici možemo vidjeti kako u radijalnom dizajnu vjetroturbine povezujemo u niz kabelima kolektorskog sustava. Broj vjetroturbina koje možemo povezati na jedan dovod kabela do priobalne transformatorske stanice ovisi o nazivnoj snazi vjetroturbina. Vjetroturbine povezane su na način da je posljednja vjetroturbina povezana kabelom koji može prenijeti nazivnu snagu jedne vjetroturbine. Nakon svake sljedeće vjetroturbine debljina vodiča kabela mora biti veća kako bi prenijela dodatnu snagu priključene vjetroturbine. Nedostatak takvog dizajna je taj što kvar na vjetroturbini ili kabelu neposredno nakon priobalne transformatorske stanice uzrokuje ispad cijelog niza vjetroturbina na tom dovodnom kabelu.



Slika 6.1. Radijani dizajn (eng. radial design) kolektorskog sustava [28]

6.2. Dizajn jednostranog prstena

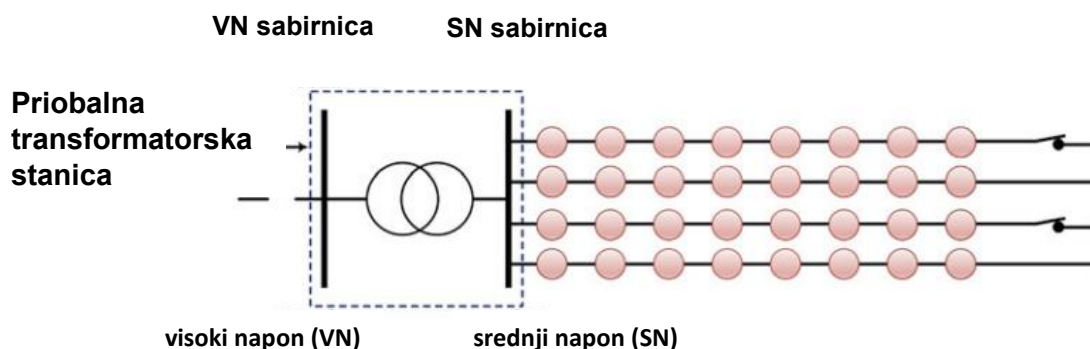
Dizajn jednostranog prstena (eng. *single-sided ring design*) predstavlja rješenje problema na koji nailazimo radijalnim dizajnom kolektorskog sustava. Spajanjem posljednje vjetroturbine u nizu kod radijalnog dizajna s transformatorskom stanicom dobivamo dizajn jednostranog prstena (Slika 6.2.). Na taj način povećavamo pouzdanost kolektorskog sustava jer, ukoliko dođe do kvara vjetroturbine, ostale vjetroturbine u jednom prstenu ostaju umrežene. Takav dizajn povećava trošak instalacije podmorskog kabela zato što kabel cijelom svojom duljinom mora biti sposoban prenijeti snagu svih preostalih vjetroturbina, ali potrebno je i dvostruko više kabela.



Slika 6.2. Dizajn jednostranog prstena (eng. *single-sided ring design*) kolektorskog sustava [28]

6.3. Dizajn dvostranog prstena

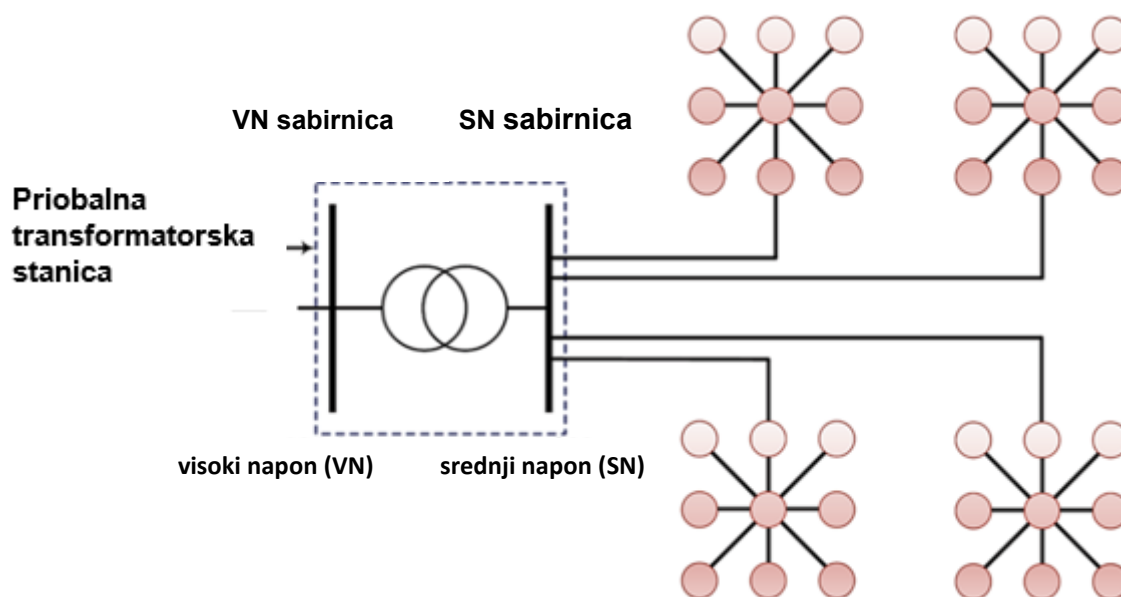
Kako bi smanjili troškove izgradnje kolektorskog sustava, a zadržali pouzdanost dizajna jednostranog prstena koristi se dizajn dvostranog prstena (eng. *double-sided ring design*). Shema takvog dizajna prikazana je na slici 6.3. gdje možemo vidjeti kako ovdje povezujemo posljednje vjetroturbine u nizu radijalnog dizajna u prsten s drugim takvim nizom. Na taj način smanji se potrebna količina kabela, samim time i cijena izgradnje, a ostaje pouzdanost. Pri izgradnji mora se voditi računa o tome da kabel neposredno uz transformatorsku stanicu mora biti sposoban prenositi dvostruko veću snagu od onog kabela korištenog u radijalnom dizajnu. Ovakav dizajn kolektorskog sustava nije pogodan za vjetroelektrane manje snage. Kod takvih vjetroelektrana mogućnost kvara je vrlo mala te nije isplativo ulagati u ovakav dizajn. Dizajn dvostranog prstena je zato pogodan za vjetroelektrane većih snaga koje je zahtjevnije popravljati, što financijski što vremenski pa je vrijednost uloženog i dobivenog puno veća.



Slika 6.3. Dizajn dvostranog prstena (eng. *double-sided ring design*) kolektorskog sustava [28]

6.4. Zvezdasti dizajn

Kako bi smanjili debljinu kabela i pružili visoku pouzdanost sustava može se koristiti zvezdasti dizajn kolektorskog sustava (eng. *star design*) (Slika 6.4.). Kod takvog dizajna jedino dovodni kabel koji povezuje transformatorsku stanicu i središnju vjetroturbinu mora biti sposoban prenositi ukupnu snagu svih vjetroturbina u jednoj „zvijezdi“. Na taj način se uštedi na prosječnoj debljini kabela u sustavu, ali nedostatak je taj što središnja vjetroturbina u „zvijezdi“ mora sadržavati složeniju zaštitnu opremu, tj. prekidače.

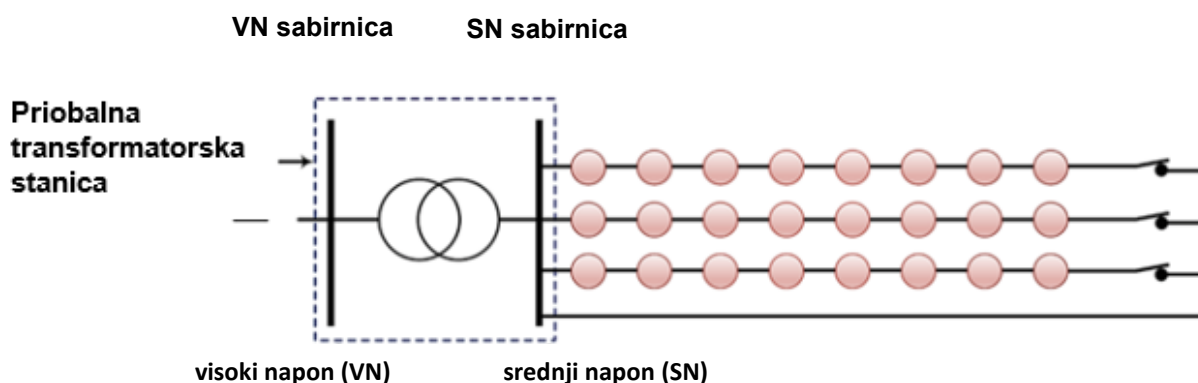


Slika 6.4. Zvezdasti dizajn (eng. *star design*) kolektorskog sustava [28]

6.5. Dizajn povratne veze

Dizajn povratne veze (eng. *single return design*) prikazan na slici 6.5., kao i dizajn dvostranog poluprstena (eng. *double-sided half ring design*) prikazan na slici 6.6., dizajni su novijih tehnologija koje nastoje smanjiti troškove prstenastog dizajna. Dodatno, navedena dva dizajna imaju ulogu povećanja performansi u stabilnom stanju sustava.

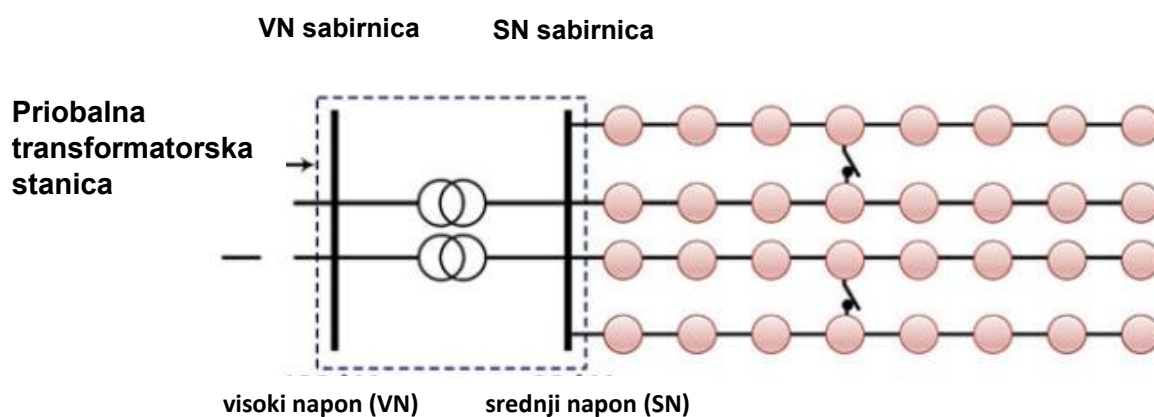
Dizajn povratne veze, za razliku od dizajna jednostranog prstena, povezuje sve nizove vjetroturbina s jednim dodatnim, povratnim, kabelom na transformatorsku stanicu, kako je prikazano na slici 6.5. Na taj način je manji trošak dizajna od dizajna jednostranog prstena, a dovoljno je pouzdan kao i radijalni dizajn. Povratni kabel je dovoljan kako bi prenio snagu cijelo niza vjetroturbina do transformatorske stanice u slučaju kvara. Nedostatak je taj što takvim kabelom ne možemo povezati dva ili više nizova vjetroturbina u slučaju njihovog istovremenog ispada.



Slika 6.5. Dizajn povratne veze (eng. *single return design*) kolektorskog sustava [28]

6.6. Dizajn dvostranog poluprstena

Dizajn dvostranog poluprstena jedna je od inačica dizajna dvostranog prstena. Povratni kabel povezuje vjetroturbine u sredini susjednih nizova (Slika 6.6.). Ovakav dizajn mora sadržavati prekidače u svakome nizu te u povratnim kabelima između nizova vjetroturbina. Na taj način se, u slučaju kvara, iz sustava izbacuje samo polovina vjetroturbina u nizu. Dizajn dvostranog poluprstena potražuje vrlo male promjene radijalnog dizajna kolektorskog sustava, a uspoređujući ga s dizajnom dvostranog prstena znatno je jeftinija investicija.



Slika 6.6. Dizajn dvostranog poluprstena (eng. double-sided half ring design) kolektorskog sustava [28]

7. EKONOMSKA OSNOVA VJETROELEKTRANA NA MORU

7.1. Nivelirana cijena električne energije

Isplativost ulaganja u elektrane za dobivanje električne energije najbolje je prikazati pomoću niveliranog troška električne energije (LCOE). LCOE metoda je mjera prosječnog neto troška u eurima po megavatsatu proizvedene električne energije tijekom životnog vijeka elektrane. Pojednostavljeni izračun niveliranog troška električne energije sastoji se od sume 4 komponente: investicijski troškovi (CAPEX), troškovi pogona i održavanja (OPEX), troškovi goriva i emisijski troškovi (plaćanje emisija stakleničkih plinova).

Investicijski troškovi predstavljaju: kapitalne troškove, troškove nastale zbog nepredviđenog događaja i troškove financiranja (kamata zbog vraćanja dijela duga tijekom trajanja izgradnje elektrane). Investicijski troškovi (C_i) mogu se odrediti koristeći izraz:

$$C_i = \frac{I \cdot a}{1 - (1 + a)^{-t}} \cdot \frac{1}{P} \quad (7.1)$$

gdje je: I – investicija (M€)
 a – ponderirani prosječni trošak kapitala, WACC (%)
 t – vrijeme otplate investicije (godine)
 P – godišnja proizvodnja (GWh)

Troškovi pogona i održavanja mogu se podijeliti na dvije komponente: fiksni troškovi koji su neovisni o količini proizvodnje i varijabilni troškovi koji su ovisni o količini proizvedene električne energije. Većina troškova koji spadaju pod ovu kategoriju su: plaće osoblja koje održava i nadzire proizvodnu jedinicu, održavanje proizvodne jedinice, opći i administrativni troškovi, unos sredstava (npr. troškovi zbog pumpe za uzimanje vode kojom se hladi proizvodna jedinica) i zbrinjavanje otpada. Troškovi pogona i održavanja (C_{om}) mogu se odrediti koristeći sljedeći izraz:

$$C_{om} = I \cdot c_{om} \cdot \frac{1}{P} \quad (7.2)$$

gdje je: I – investicija (M€)
 P – godišnja proizvodnja (GWh)
 c_{om} – specifični troškovi pogona i održavanja (%)

Troškovi goriva predstavljaju troškove uzrokovane nabavom potrebnog goriva za proizvodnu jedinicu (npr. ugljen i plin). Količina potrebnog goriva dobiva prema procjeni faktora opterećenja proizvodne jedinice u jednoj godini (8760 sati). Troškovi goriva (C_f) mogu se odrediti koristeći sljedeći izraz:

$$C_f = s_f \cdot c_f \quad (7.3)$$

gdje je: s_f – specifična potrošnja goriva (t/MWh)

c_f – specifična cijena goriva (€/t)

Ukoliko termoelektrana nazivne snage 200 MW radi 7884 sati u godini (faktor opterećenja 0.9) proizvede 1577 GWh električne energije. Da bi termoelektrana proizvela tu količinu električne energije potrebno je utrošiti 537 tisuća tona ugljena ($s_f=0,36$).

Emisijski troškovi uzrokovani plaćanjem emisija štetnih plinova prilikom izgaranja goriva. Ovi troškovi većinom ovise samo o emisijama ugljikova dioksida u okoliš. Emisijski troškovi (C_e) mogu se odrediti koristeći sljedeći izraz:

$$C_e = s_e \cdot c_e \quad (7.4)$$

gdje je: s_e – specifična emisija CO₂ (tCO₂/MWh)

c_e – specifična cijena emisija (€/tCO₂)

7.2. Analiza troškova vjetroelektrana na moru

Kod obnovljivih izvora energije, ako izuzmemo bio goriva, nije nam potrebno gorivo za proizvodnju električne energije i nemamo emisija ugljikova dioksida. Najvažniji čimbenik prilikom projektiranja vjetroelektrana na moru je prosječna brzina vjetra i potencijalni faktor opterećenja vjetroelektrana na moru. Ranije objašnjeni princip niveliranog troška električne energije ne vrijedi u potpunosti jer nemamo troškove goriva i troškove emisija ugljikova dioksida, ali dodaje se trošak razgradnje vjetroelektrane na moru (DECEX). Kod vjetroelektrana na moru najveći trošak je početna investicija i izgradnja same vjetroelektrane na moru. Napredovanjem tehnologije troškovi investicije vjetroelektrana na moru drastično padaju tijekom posljednjeg desetljeća. Prosječni trošak instalacije vjetroelektrane na moru u Europi pao je s 4159 €/kW u 2010. godini na 2364 €/kW u 2021. godini. Cijena po državama prikazana je u tablici 7.1., te se može primijetiti velika razlika u cijeni između država prilikom investicija u vjetroelektrane na moru. Može se primijetiti najniža cijena u Danskoj koja ima najbolji princip natječaja za ulaganje i gradnju vjetroelektrana na moru. [18]

Tablica 7.1 . Ponderirani prosječni ukupni instalirani troškovi za vjetar na moru [18]

Godina	Trošak (€/kW)	
	2010.	2021.
Europa	4159	2364
Belgija	5395	3019
Danska	2915	1950
Njemačka	5740	3185
Nizozemska	3662	2128
Ujedinjeno Kraljevstvo	4048	2604

Izdavanje dozvola za izgradnju obnovljivih izvora energije na moru izrazito je složen proces jer je potrebna zajednička suradnja između različitih upravnih tijela. U Europi postoje dva modela izdavanja dozvola za obnovljive izvore energije na moru:

Koncesija za morsko područje: Centralizirani model – Vlada određuje morska područja za razvoj obnovljivih izvora energije na moru

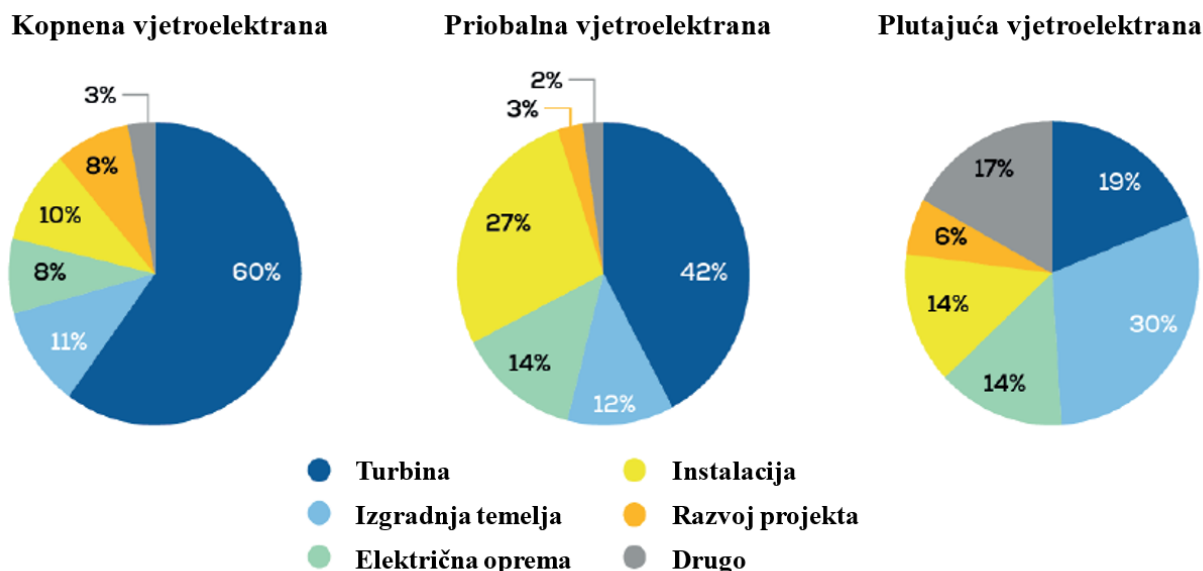
Decentralizirani model – nositelji projekata utvrđuju morska područja

Odgovornost za gradnju mreže (priklučenje OIE na elektroenergetski sustav) može biti na operatoru prijenosnog sustava, nositelju projekta ili mješovita odgovornost. U tablici 7.2. može se vidjeti podjela odgovornosti za razvoj vjetroelektrana na moru za 4 države koje imaju najveće proizvodne kapacitete u Europi. Može se primijetiti da države u kojima najveći dio odgovornosti snose državne kompanije imaju najnižu niveliranu cijenu električne energije za vjetroelektrane na moru.

Tablica 7.2. *Odgovornosti za razvoj vjetroelektrana na moru u Europi [18]*

	Pronalazak zone	Odabir potencijalnog mjesta	Provjera potencijalnog mjesta	Dozvola za gradnju	Izgradnja	Priključak na mrežu
Danska	Green	Green	Yellow	Green	Red	Yellow
Njemačka	Green	Green	Green	Red	Red	Yellow
Nizozemska	Green	Green	Green	Green	Red	Yellow
UK	Green	Red	Red	Red	Red	Red
Državna odgovornost			Green			
Odgovornost operatora prijenosnog sustava			Yellow			
Odgovornost privatnog izvođača			Red			

Investicijski troškovi instalacije vjetroelektrana na moru znatno su veći od instalacije vjetroelektrana na kopnu. Na slici 7.1. prikazani su grafovi koji prikazuju raspodjelu investicijskih troškova za kopnene vjetroelektrane, priobalne vjetroelektrane i vjetroelektrane na moru. Može se primijetiti kod kopnenih i priobalnih vjetroelektrana da su najveći dio investicije same vjetroturbine, dok kod vjetroelektrana na moru najveći dio investicije izgradnja i postavljanje temelja vjetroturbine.



Slika 7.1. Grafički prikaz raspodjele investicijskih troškova u vjetroelektrane [18]

Očekuje se dodatno smanjenje investicijskih troškova za priobalne vjetroelektrane i vjetroelektrane na moru, iako se dogodilo da je između 2021. i 2022. godine zbog pandemije koronavirusa došlo do porasta cijena vjetroelektrana na moru za 0,7%. U Republici Hrvatskoj prema „Akcijском planu za obnovljive izvore energije na moru u Hrvatskoj“ očekuje se da bi trošak investicije mogao iznositi između 2364 €/kW i 3185€/kW. [18]

Operativni troškovi vjetroelektrana na moru prema studiji međunarodne agencije za obnovljive izvore energije čine između 16% i 25% ukupnih troškova, to jest između 14,5 €/MWh i 25,5 €/MWh. Ovi troškovi se mogu dodatno smanjiti ukoliko bi održavanje na manjem području (na primjer vjetroelektrane u Sjevernom moru) obavljao jedan posebno obučeni tim od 100-ak ljudi. Prilikom razvoja vjetroelektrana na moru potrebno je planirati uklanjanje vjetroelektrane na kraju životnog vijeka koje predstavlja oko 1,8% ukupnih troškova ili 365 000 €/MW instalirane snage. [18]

Nivelirani trošak električne energije za obnovljive izvore energije na moru u stalnom je padu u zadnjih 15-ak godina. U tablici 7.3. može se vidjeti nivelirani trošak električne energije po proizvedenom megavatsatu. Vrijednost LCOE-a za Nizozemsku za 2010. godinu ne postoji jer je Nizozemska svoju prvu vjetroelektranu na moru pustila u rad 2015. godine.

Tablica 7.3. Nivelirani trošak električne energije nekih europskih država [18]

Godina	LCOE (€/MWh)	
	2010.	2021.
Europa	139	55
Belgija	193	71
Danska	92	35
Njemačka	153	69
Nizozemska	/	50
Ujedinjeno Kraljevstvo	179	46

Prosječni LCOE u Europi je između 2010. i 2021. godine pao za 60%, te se očekuje dodatni pad zbog napredovanja tehnologije do 2050. godine. Očekuje se da će se LCOE spustiti na iznos od oko 35 €/MWh. [18]

8. PRIMJER RJEŠENJA VJETROELEKTRANE NA MORU

8.1. Projekt priobalna vjetroelektrana Hornsea

Projekt *Hornsea* jer trenutno najveći projekt obnovljivih izvora na moru s površinom 2057 kilometara kvadratnih. Sastoji se od 4 manjih projekta kojima se dobiva „jedna“ velika priobalna vjetroelektrana nazivne snage od 6 GW u Sjevernom moru. Do sada su izgrađene i spojene prve dvije vjetroelektrane na moru (*Hornsea Project One* i *Hornsea Project Two*) na elektroenergetski sustav Velike Britanije. Na slici 8.1. može se vidjeti raspored *Hornsea* priobalnih vjetroelektrana u Sjevernom moru. Priobalna vjetroelektrana *Hornsea Project One*, obojana tamo plavom bojom na slici, izgrađena je 120 kilometara istočno od obale Velike Britanije. [29]



Slika 8.1. Shema priključenja *Hornsea Project One* [29]

Hornsea Project One je priobalna vjetroelektrana površine 407 kilometara kvadratnih i nazivne snage 1218 MW koja je podijeljena na još tri manja područja od 400 MW. Puštena je u pogon 2019. godine i sastoji se od 174 vjetroturbine nazivne snage 7 MW. Tip postavljenih vjetroturbina je Siemens Gamesa SWT-7.0., a visina svake vjetroturbine je 190 metara. Izgradnja je započela u siječnju 2018. godine s postavljanjem prvih cjevastih (monopile) temelja. Priobalna vjetroelektrana *Hornsea Project One* povezana je pomoću tri HVAC kabela nazivnog napona 220

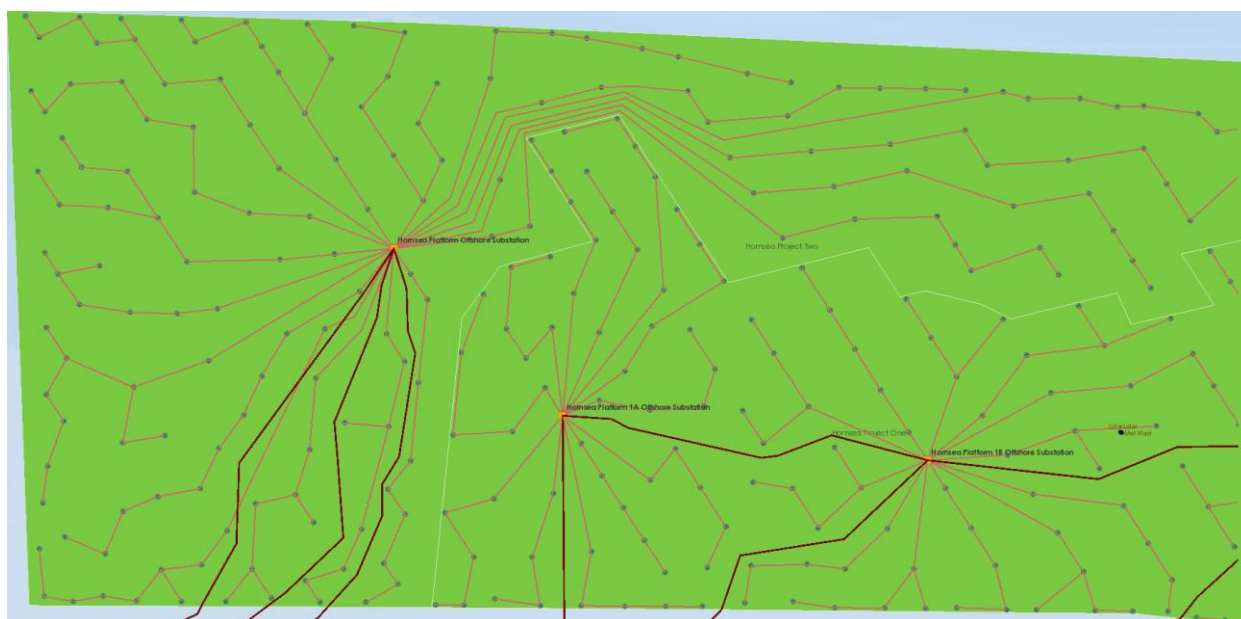
kV na elektroenergetski sustav Velike Britanije preko 400 kV transformatorske stanice u sjevernom Killingholmu, na slici 8.1. 220 kV podmorski kabeli označeni su isprekidanom linijom. Vjetroturbine su međusobno povezane u 3 kolektorske podstanice AC kablovima nazivnog napona 33 kV. U svakoj od 3 kolektorske podstanice transformatorom se diže napon s 33 kV na 220 kV naponsku razinu kojom se električna energija dovodi do kopna.

Hornsea Project Two je priobalna vjetroelektrana površine 462 kilometara kvadratna nazivne snage 1320 MW čije je područje označeno na slici 8.2. Puštena je u pogon 2022. godine i sastoji se od 165 vjetroturbina nazivne snage 8 MW. Tip korištenih vjetroturbina je Siemens Gamesa SG 8.0. *Hornsea Project Two* napravljen je vrlo slično prvom projektu jer je povezivanje na elektroenergetsku mrežu Velike Britanije napravljeno pomoću 220 kV podmorskih HVAC kabela. Jedina razlika je korištenje kolektorskih kabela više naponske razine (66 kV) pa je cijeli sustav priobalne vjetroelektrane povezan na samo jednu podstanicu kojom se, također, napon podiže na 220 kV.

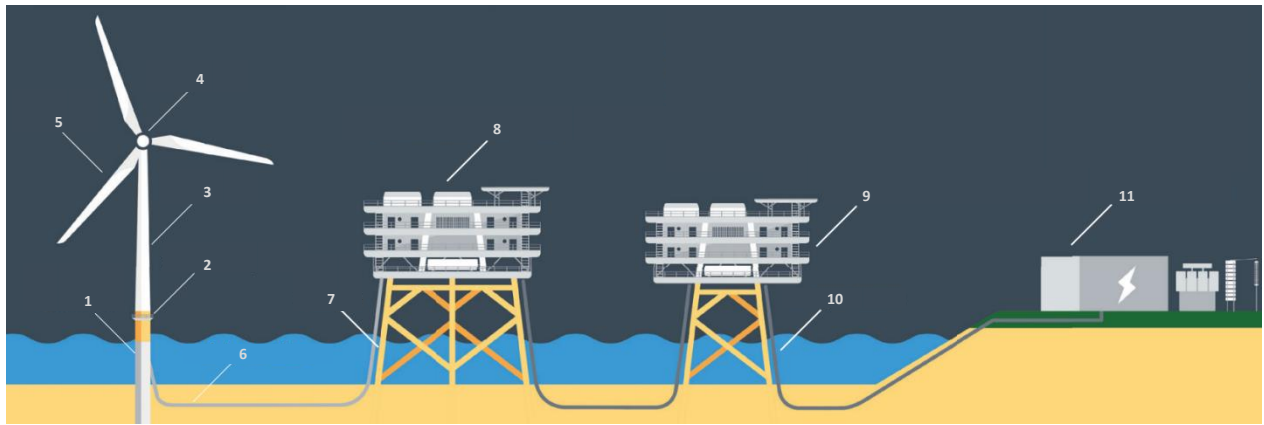


Slika 8.2. Shema priključenja *Hornsea Project Two* [27]

Kolektorski sustav obje priobalne vjetroelektrane je radijalnog tipa. Na slici 8.3. može se vidjeti način povezivanja vjetroturbina u nizove kod priobalnih vjetroelektrana *Hornsea Project One* i *Hornsea Project Two*. Možemo primijetiti da je kod priobalne vjetroelektrane *Hornsea Project One* 4 ili 5 vjetroturbina povezano u jedan niz, dok je kod priobalne vjetroelektrane *Hornsea Project Two* 9 ili 10 vjetroturbina povezano u niz. Razlika kod broja vjetroturbina povezanih u niz je zbog nazivnog napona kabela kolektorskog sustava i upravo zbog broja vjetroturbina povezanih u jedan niz kod priobalne vjetroelektrane *Hornsea Project Three* razmatra se uzimanje kabela kolektorskog sustava nazivnog napona od 132 kV.



Slika 8.3. Prikaz kolektorskog sustava *Hornsea* priobalnih vjetroelektrana [30]



Slika 8.4. Shematski prikaz spajanja priobalne vjetroelektrane s kopnom [27]

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1 – čelični monopiloti | 7 – temelji priobalne podstanice |
| 2 – prijelazni (pristupni) dio | 8 – priobalna podstanica (66/220 kV) i rasklopno postrojenje |
| 3 – toranj (visine 93 m) | 9 – podstanica za pokrivanje jalovih gubitaka |
| 4 – kućište vjetroturbine | 10 – HVAC kabel (220 kV) |
| 5 – lopatice | 11 – kopnena transformatorska stanica (220/400 kV) i rasklopno postrojenje (400 kV) |
| 6 – kabeli kolektorskog sustava | |

- 1) Temelji čeličnih monopilota postavljeni su 26 metara duboko u morsko dno. Svaki pilot ima masu između 730 i 1220 tona
- 2) Prijelazni dio nalazi se između monopilota i tornja vjetroturbine. To je mjesto do kojega dolaze tehničari prilikom izgradnje i održavanja same vjetroturbine.
- 3) Toranj vjetroturbine visok je 93 metara i mase 479 tona. Sastoji se od dizala, ljestva, dizalice i kabela kojim se odvodi električna energija do kolektorskog sustava.
- 4) Kućište vjetroturbine ili gondola služi za pretvaranje rotacijske energije u električnu energiju. Također se koristi kao upravljački sustav.
- 5) Lopatice vjetroturbine duge su 81 metar. U najvišoj točki dosežu visinu od 200 metara.
- 6) Nazivni napon kabela kolektorskog sustava je 66 kV. Kolektorski kabeli zakopani su u morsko dno.
- 7) Temelji priobalne podstanice učvršćuju se u morsko dno pomoću *jacket* pilota. Ovi temelji koriste se kao sidrišne točke za kabele kolektorskog sustava i HVAC kabele.
- 8) Pomoću priobalne podstanice odrađuje se povezivanje svih kabela kolektorskog sustava u jedno mjesto na kojem se transformatorskom stanicom nazivni napon diže s 66 kV na 220 kV. Unutar ovog objekta nalazi se dio s zaštitnom opremom (rasklopno postrojenje) koje je napravljeno u GIS izvedbi zbog potrebne što manje površine.

- 9) Podstanica za pokrivanje jalovih gubitaka postavljena je 66 kilometra od obale i služi za smanjenje gubitaka prilikom prijenosa električne energije pomoću HVAC podmorskog kabela
- 10) Pomoću 3 HVAC podmorska kabela duljine 130 kilometara prenosi se električne energija do mjesta *Horseshoe Point*. Nakon toga postavljena su 3 HVAC podzemna kabela duljine 39 kilometara do obalnog rasklopnog postrojenja *North Killinghome*.
- 11) U obalnoj transformatorskoj stanici odrađuje se ponovno dizanje napona s 220 kV na 400 kV naponsku razinu preko koje je cijela priobalna vjetroelektrana povezana na elektroenergetski sustav Velike Britanije.

8.2. Vjetroturbina Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD

Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD je vjetroturbina namijenjena za postavljanje na priobalna područja s nazivnom snagom od 8 MW. U tablici 8.1. nalaze se osnovne informacije o vjetroturbini *Siemens Gamesa SG 8.0*. Rotor vjetroturbine sastoji se od 3 lopatice duljine 81,4 metara, a promjer rotora iznosi 167 metara. Površina rotora iznosi 21900 metara kvadratnih. Ova vjetroturbina ima 20% veću godišnju proizvodnju električne energije od *Siemens Gamesa SG 7.0*. Serijska proizvodnja započela je 2019. godine. U 2024. godini *Siemens Gamesa* pustila je u serijsku proizvodnju novu vjetroturbinu nazivne snage 14 MW koja je 30% učinkovitija zbog boljeg iskorištavanja manjih brzina vjetra. [29]

Tablica 8.1. Osnovni podaci o *Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD* vjetroturbini [29]

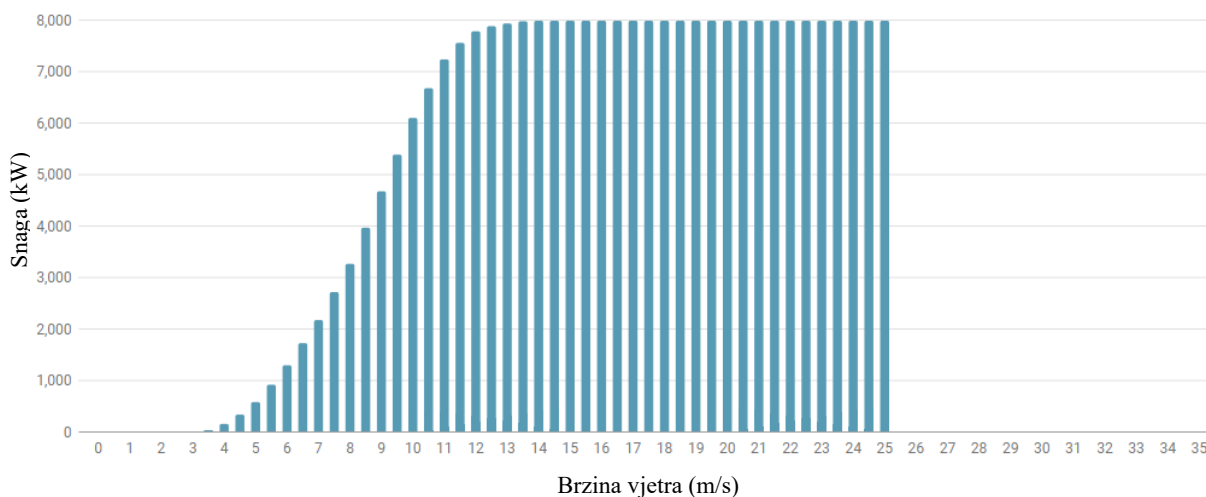
IEC klasa	S/IB
Nazivna snaga	8000 kW
Promjer rotora	167 m
Duljina lopatice	81,4 m
Površina rotora	21 900 m ²
Visina gondole	Ovisno o lokaciji
Regulacija snage	Promjenjiva

Životni vijek *Siemens Gamesa SG 8.0* vjetroturbine je oko 25 godina, a prosječna godišnja proizvodnja vjetroturbine je oko 34 tisuće MWh. Prosječna godišnja proizvodnja ovisi o prosječnoj brzini vjetra na lokaciji gdje je postavljena i faktoru opterećenja. Procijenjena proizvedena električna energije za životnog vijeka vjetroturbine je oko 68 TWh. U tablici 8.2. prikazani su dijelovi vjetroturbine i materijali od kojih su napravljeni. [32]

Tablica 8.2. *Popis materijala od kojih su izrađeni dijelovi vjetroturbine [32]*

Dio vjetroturbine	Materijal
Kućište vjetroturbine	Čelik, željezo i bakar
Lopaticice	Stakloplastika i <i>epoxy</i>
Toranj	Čelik
Temelji	Čelik
Stanica	Beton i čelik

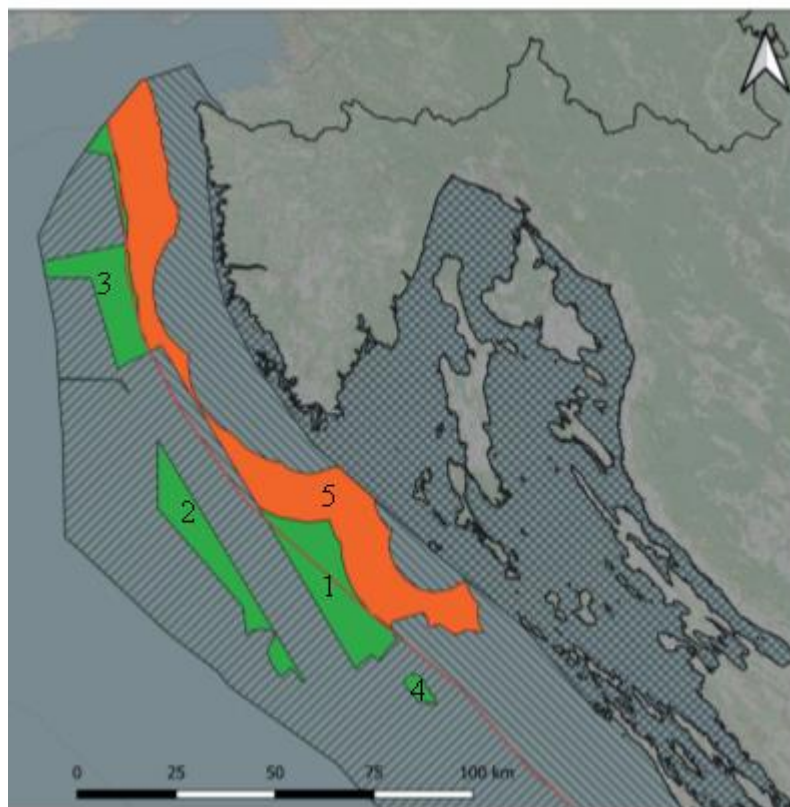
Vjetroturbina počinje proizvoditi pri brzini vjetra od 3 m/s, a isključuje se pri brzinama od 25 m/s. Nazivna brzina vjetra je 12 m/s. Na slici 8.5. može se vidjeti krivulja snage za *Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD* vjetroturbinu.



Slika 8.5. *Grafički prikaz ovisnosti snage o brzini vjetra za vjetroturbine Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD [31]*

9. RAZRADA RJEŠENJA ZA VJETROELETRANE NA MORU U RH

Potencijal priobalnih vjetroelektrana i vjetroelektrana na moru u Republici Hrvatskoj već je objašnjen kroz poglavlje 4.3. Na slici 9.1. prikazanu su potencijalna područja za izgradnju priobalnih vjetroelektrana u sjevernom Jadranu.



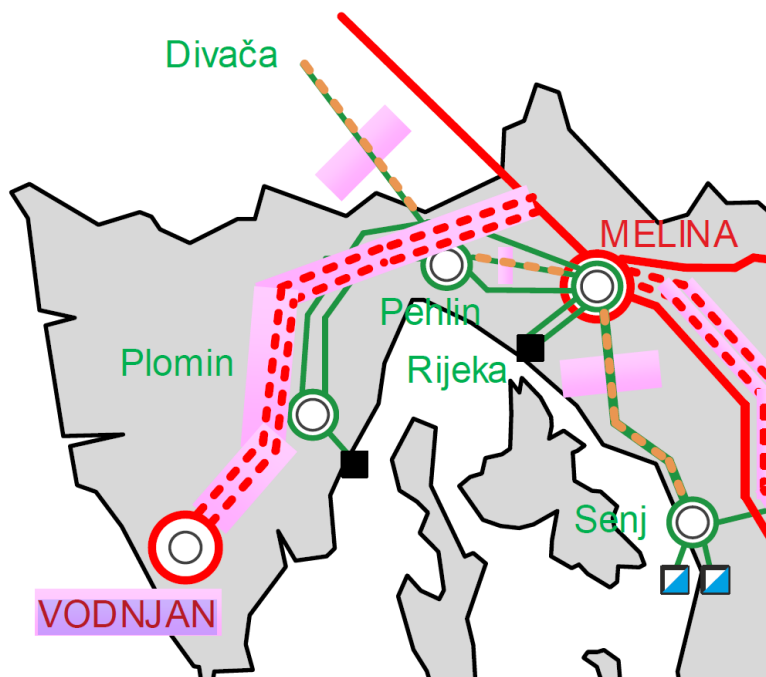
Slika 9.1. Prikaz 5 potencijalnih zona za izgradnju vjetroelektrana na moru [18]

Prema dostupnim podacima izgradnja priobalne vjetroelektrane mogla bi početi 2026. godine, a završetak izgradnje mogao bi biti 2029. godine ako se na razini države donese prostorni plan za izgradnju priobalnih vjetroelektrana na moru. Nažalost u ovome trenutku ne postoji prostorni plan i strateški dokumenti za izgradnju priobalnih vjetroelektrana. INA je 2022. godine postavila uređaje za mjerenje brzine vjetra na svojim platformama (prikazane na slici 4.11.) u Sjevernom Jadranu. INA-ine naftne bušotine nalaze se na mjestima s velikim potencijalom za iskorištavanje energije vjetra, te INA pokušava istražiti potencijal izgradnje priobalnih vjetroelektrana na mjestima gdje se trenutno nalaze platforme za crpljenje prirodnog plina. Naravno, kao što je već objašnjeno isplativost izgradnje priobalne vjetroelektrane ne ovisi samo o

potencijalu proizvodnje električne energije, već i o sastavu morskog dna i zaštićenim zonama gdje bi se gradila vjetroelektrana.

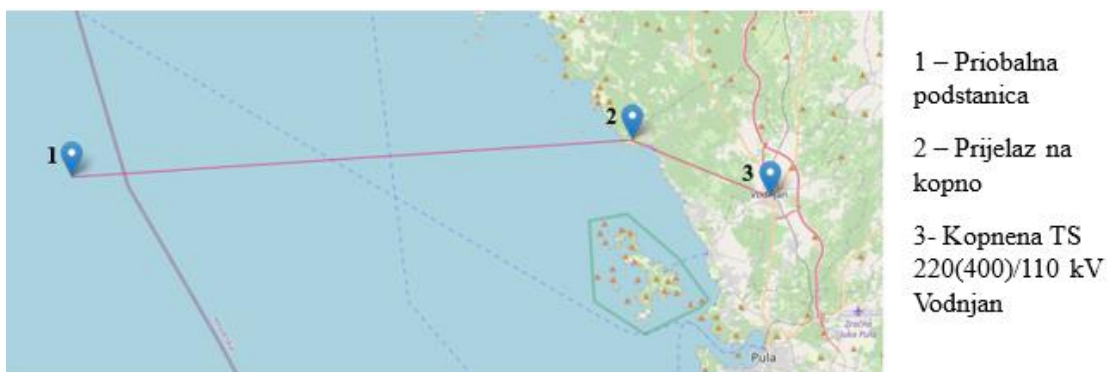
Kao primjer mjesta izgradnje priobalne vjetroelektrane u sjevernom Jadranu možemo uzeti zonu 3 prikazanu na slici 9.1. Ukupna površina potencijalne zone je 200 kilometra kvadratna, preporučeno je da priobalna vjetroelektrana nalazi u zoni malog ili nikakvog vizualnog zagađenja. Površina potencijalne zone približno je dvostruko manja od površine priobalne vjetroelektrane Hornsea Project One. Jedna od mogućih vjetroturbina koja bi se iskoristila je Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD korištena u priobalnoj vjetroelektrani Hornsea Project Two. Taj model vjetroturbine možemo promatrati kako bismo usporedili faktor opterećenja priobalne vjetroelektrane u zoni 3 u sjevernom Jadranu s, već poznatim, faktorom opterećenja Hornsea Project Two. U ovom trenutku nema dovoljno podataka o stvarnim prosječnim brzinama vjetra na potencijalnom području pa je uzeta prosječna srednja brzina vjetra na sjevernom Jadranu od 7 m/s. Ukoliko, se napravi usporedba prosječnih brzina vjetra možemo zaključiti da je puno isplativija vjetroelektrana Hornsea Project Two od potencijalne priobalne vjetroelektrane u sjevernom Jadranu zbog prosječne brzine vjetra u Sjevernom moru od 12 m/s. Faktor opterećenja Hornsea Project Two u 2023. godini iznosio je 54% [29], očekivani faktor opterećenja potencijalne priobalne vjetroelektrane iznosi bi oko 30% [18]. Priobalna vjetroelektrana sastoji se od 50 vjetroturbina Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD ukupne nazivne snage 400 MW. Uzeta površina za potpuno iskorištavanje vjetra na moru po jednoj vjetroturbini je oko 4 kvadratnih kilometara. Vjetroturbine u priobalnoj vjetroelektrani povezane su u 6 niza, dva niza od 9 vjetroturbina i četiri niza od 8 vjetroturbina. Nazivni napon kabela kolektorskog sustava je 66 kV, a dizajn spajanja kolektorskog sustava je radijalni dizajn.

Kako bi se potencijalna priobalna vjetroelektrana mogla povezati na elektroenergetski sustav Republike Hrvatske potrebno je pronaći pogodno mjesto na obali Istre. Prema 10-godišnjem planu Hrvatskog operatora prijenosnog sustava do 2032. godine na Istarskom poluotoku trebala bi se izgraditi transformatorska stanica 220 (400)/110 kV Vodnjan koja je planirana zbog očekivanog naglog porasta obnovljivih izvora električne energije. Na slici 9.2 možemo vidjeti izgled 220 kV i 400 kV planirane elektroenergetske mreže za 2032. godinu.



Slika 9.2. Prikaz planirane 220 kV i 400 kV elektroenergetske mreže za 2032. godinu [9]

Na slici 9.3. mogu se vidjeti približne trase polaganja kabela za povezivanje potencijalne priobalne vjetroelektrane u sjevernom Jadranu. Između priobalne podstanice i prijelaza na kopno potrebno je položiti podmorski kabel duljine 37 kilometara (zračna udaljenost prema uzetim GPS koordinatama). A između prijelaza na kopno i kopnene transformatorske stanice TS 220(400)/110 kV Vodnjan potrebno je položiti kopneni kabel duljine 8 kilometara. Zbog nemogućnosti savršenog polaganja kabela uzete se povećane duljine kabela, 40 kilometara za podmorski i 10 kilometara za kopneni kabel.



Slika 9.3. Prikaz približnih trasa polaganja kabela za priključenje potencijalne priobalne vjetroelektrane [38]

Vjetroturbine *Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD* možemo postaviti s međusobnom udaljenošću od minimalno 2 km. Ukupna duljina kabela kolektorskog sustava iznosi 120 kilometara. U priobalnoj podstanici označenoj brojem jedan na slici 9.3. najvažnije je postaviti glavni kolektorski sustav, transformatorsku stanicu, kompenzatore jalove snage i zaštitnu opremu, a ukoliko će se priključak potencijalne priobalne vjetroelektrane napraviti HVDC sustavom potrebne su pretvaračke stanice u priobalnoj podstanici i kopненоj transformatorskoj stanici TS 220(400)/110 kV Vodnjan. Za prijenos električne energije prema literaturi [32] za kabele duljine do 80 kilometara nije potrebno postaviti stanicu za kompenzaciju jalovih gubitaka. Prema istoj studiji gubitci za kabele (podmorski i kopneni zajedno) duljine 50 kilometara potrebna kompenzacija jalove snage iznosi 85 MVar-a. Kabel koji ćemo upotrijebiti za priključenje priobalne vjetroelektrane je XLPE trožilni 220 kV. U tablici 9.1. prikazani su nazivni podaci XLPE trožilnog 220 kV kabela presjeka 1400 mm² s bakrenim vodičem. Procjena prijenosne moći kabela iznosi 412 MVA.

Tablica 9.1. Podaci 220 kV HVAC kabel [34]

Tip	Trožilni, oklopljeni
Izolacija	Umreženi polietilen (XLPE)
Vodič	Bakar
Nazivni napon	220 kV
Promjer	1400 mm ²
Maksimalna struja	1086 A
AC otpornost (90 °C)	22 mΩ/km
Induktivitet	0,35 mH/km
Kapacitet	0,2 μF/km
Dielektrični gubitci	0,007
Frekvencija	50 Hz

Zbog ukupne udaljenosti od 50 kilometara možemo pretpostaviti da će HVDC prijenosni sustav biti puno skuplji od HVAC prijenosnog sustava jer neće doći do zasićenja HVAC kabela i smanjenja prijenosne moći. Prema studiji iz literature [34] napravljena je okvirna procjena cijena svih potrebnih elemenata za priključenje priobalne vjetroelektrane i vjetroelektrane na moru. U tablicama 9.2. i 9.3. su prikazani investicijski troškovi elementa potrebnih za priključenje vjetroelektrana. U tablicama nisu navedeni troškovi kolektorskog sustava i kabela kolektorskog sustava jer su investicijski troškovi jednaki za obje opcije. Korišten je isti podmorski i kopneni kabel.

Tablica 9.2. Približni troškovi priključenja potencijalne priobalne vjetroelektrane HVAC prijenosnim sustavom [34]

Element	Troškovi po jedinici	Ukupni troškovi elementa
Priobalna podstanica	185 000 €/MW	74 M€
Trožilni XLPE 1400 mm ² cu kabel	1000 €/m	50 M€
Kopnena stanica	50 000 €/MW	20 M€
Kompenzacija jalovih gubitaka	24 000 €/MVar	2 M€
Ukupno	/	146 M€

Tablica 9.3. Približni troškovi priključenja potencijalne priobalne vjetroelektrane HVDC prijenosnim sustavom [34]

Element	Troškovi po jedinici	Ukupni troškovi elementa
Priobalna podstanica	185 000 €/MW	74 M€
Pretvaračka stanica (ispravljač)	145 000 €/MW	58 M€
Jednožilni HVDC 1000 mm ² cu kabel	1000 €/m	50 M€
Kopnena stanica	50 000 €/MW	20 M€
Pretvaračka stanica (izmjenjivač)	145 000 €/MW	58 M€
Ukupno	/	262 M€

Možemo primijetiti veliku razliku u cijeni između HVAC i HVDC sustava zbog vrlo kratke udaljenosti potencijalne priobalne vjetroelektrane. Podaci iz tablica 9.2. i 9.3. su približne cijene elemenata tehničkog rješenja priključenja vjetroelektrana na moru za Sjeverno more. Navedene cijene se nikako ne smiju uzeti za proračun troškova tehničkog rješenja priključenja vjetroelektrana na moru u sjevernom Jadranu već su navedene kao okvirne cijene za usporedbu i odabir jeftinijeg prijenosnog sustava. Na obalnom području Sjevernog mora postoji preko 20 tvornica i postrojenja koji izrađuju dijelove vjetroturbina, priobalne podstanice i kabele (na primjer Siemens i NKT), stoga možemo očekivati da će troškovi tehničkog priključenja vjetroelektrane na moru biti puno niži nego u sjevernom Jadranu. Kao što je već ranije navedeno prema studiji [34] nema potrebe za izgradnjom zasebne podstanice za kompenzaciju jalove snage za udaljenosti kraće od 80 kilometara. Kada bi bila potrebna zasebna podstanica za kompenzaciju jalove snage razlika u cijeni bi se drastično smanjila jer je procijenjena cijena izgradnje zasebne podstanice i kompenzacije jalove snage za udaljenost od 80 kilometara oko 35 milijuna eura. Ukoliko se pogledaju potencijalne zone za izgradnji priobalnih vjetroelektrana u sjevernom Jadranu sa slike 9.1. i korištenjem približnih udaljenosti prema GPS koordinatama najveća udaljenost potencijalne zone iznosi 60-ak kilometara od obale. Stoga možemo zaključiti da je sve priobalne vjetroelektrane u sjevernom Jadranu isplativije povezati HVAC kabelima.

10. ZAKLJUČAK

Ukratko smo pružili pregled povijesti korištenja energije vjetra do kraja 19. stoljeća za prijevoz, preradu žitarica i pumpanje pitke vode. Tijekom 20. stoljeća počinje iskorištavanje energije vjetra za dobivanje električne energije. Kratko je opisano i trenutno stanje korištenja energije vjetra u Europi i Republici Hrvatskoj. Trenutno je 10 najvećih vjetroelektrane na moru izgrađeno u Sjevernom moru zbog vrlo velikog potencijala iskorištavanja energije vjetra, a u Republici Hrvatskoj je na elektroenergetski sustav spojeno 25 kopnenih vjetroelektrana u redovnom pogonu i 3 kopnene vjetroelektrane u pokusnom radu.

U radu su objašnjeni glavni dijelovi vjetroturbine: rotor, kućište vjetroturbine, generator, toranj i temelji. U ovisnosti o dubini mora postoje dvije vrste vjetroelektrana na moru: plutajuće i priobalne vjetroelektrane. Napredovanjem tehnologije izrađuju se vjetroturbine većih nazivnih snaga koje mogu iskorištavati energiju vjetra pri manjim brzinama vjetra. U 2024. godini najveće vjetroturbine su nazivne snage oko 15 MW, a kroz sljedećih 10 godina očekuje se povećanje vjetroturbina do nazivnih snaga od 25 MW. Za priključenje vjetroelektrane na moru na elektroenergetski sustav potrebno je položiti podmorski energetski kabel, izgraditi priobalnu podstanicu i kopneno postrojenje. Možemo zaključiti kako je najbolje koristiti podmorski kabel nazivnog napona 220 kV zbog najboljeg odnosa prijenosne moći kabela i stvaranje kapacitivnih jalovih gubitaka. Vjetroelektrane se sastoje od više vjetroturbina koje su povezane kolektorskim sustavom na podstanicu u kojoj se nalazi transformatorska stanica kojim se diže napon zbog smanjenja gubitaka tijekom prijenosa električne energije do potrošača. Za priključenje vjetroelektrana na moru za udaljenosti veće od 80 kilometara potrebno je izgraditi zasebnu podstanicu za kompenzaciju jalovih gubitaka te se ta udaljenost smatra kritičnom udaljenošću za prijelaz s HVAC priključenja na HVDC priključenje vjetroelektrana na moru za snage veće od 1000 MW.

Dizajn kolektorskog sustava vjetroelektrana na moru važan je dio tehničkog rješenja priključenja na mrežu vjetroelektrana na moru. Tipovi dizajna kolektorskog sustava vjetroelektrana na moru obrađeni u ovom radu su: radijalni dizajn, dizajn jednostranog ili dvostranog prstena, dizajn zvijezde, dizajn povratne veze i dizajn dvostranog poluprstena. Najviše se koristi radijalni dizajn zbog jednostavnosti i vrlo niske cijene u usporedbi s ostalim dizajnima kolektorskog sustava. Za manje vjetroelektrane nazivni napon kolektorskog sustava iznosi 33 kV, za veće vjetroelektrane koristi se nazivni napon 66 kV. U budućnosti se očekuje da će nazivni napon kolektorskog sustava za vjetroelektrane veće nazivne snage (više od 2 GW) iznositi 132 kV.

Zbog postizanja nulte emisije ugljikova dioksida do 2050. godine u Europi potrebna su velika ulaganja u obnovljive izvore energije. Najveći dio energije može se dobiti iz vjetroelektrana i fotonaponskih sunčanih elektrana, ali nažalost na kopnu nemamo dovoljno veliki potencijal za financijski prihvatljiva ulaganja u područja za izgradnju obnovljivih izvora energije na kopnu. Stoga, prema studijama Europske Unije do 2050. godine očekuje se ulaganje u obnovljive izvore električne energije na moru poput: vjetroelektrana na moru, plutajućih fotonaponskih sunčanih elektrana i elektrana za iskorištavanje energije oceana. U Republici Hrvatskoj situacija je vrlo slična kao i u ostatku Europe, potencijalna područja za izgradnju obnovljivih izvora energije na kopnu nisu dovoljna za ostvarivanje nulte emisije ugljikova dioksida do 2050. godine. Prema studijama Europske unije RH će morati izgraditi obnovljive izvore energije na moru nazivne snage 3 GW. U sjevernom Jadranu postoji potencijal za izgradnju priobalnih vjetroelektrana, a u južnom Jadranu za izgradnju plutajućih vjetroelektrana i plutajućih fotonaponskih sunčanih elektrane.

Projekt priobalne vjetroelektrane *Hornsea* trenutno je najveći projekt obnovljivih izvora na moru s potencijalnom nazivnom snagom od 6 GW. Sastoji se od četiri manja projekta, trenutno su dovršena dva, a preostala dva će tek biti izgrađena i priključena na elektroenergetski sustav Velike Britanije. *Hornsea Project One* i *Hornsea Project Two* priključene su na elektroenergetski sustav pomoću tri podmorska kabela nazivnog napona 220 kV.

Potencijalnu priobalnu vjetroelektranu u sjevernom Jadranu nazivne snage 400 MW jeftinije je povezati HVAC prijenosnim sustavom zbog kratke udaljenosti do zapadne obale Istre. Unutar ovog rada razmatrani su samo investicijski troškovi priključenja priobalne vjetroelektrane na elektroenergetski sustav RH, ali vjerojatno ne bi došlo do velike razlike u cijeni ukoliko bi se usporedili nivelirani troškovi električne energije (LCOE). Troškovi priključenje potencijalne vjetroelektrane na moru u sjevernom Jadranu obrađeno unutar ovog rada može se značajno razlikovati ukoliko se prije izgradnje i priključenja priobalne vjetroelektrane ne izgradi transformatorska stanica TS 220(400)/110 kV Vodnjan.

LITERATURA

- [1] Schaffarczyk, A. P.: *Wind power technology an introduction (Second Edition)*, Springer, Cham, Švicarska, 2022., ISSN 1865-3529
- [2] Web sjedište američke administracije za energiju (*U.S. Energy Information Administration*); <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>, preuzeto: 3.7.2024.
- [3] Web sjedište europske organizacije za iskorištavanje energije vjetra (*Wind Europe*); <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today/>, preuzeto: 15.2.2024.
- [4] Web sjedište međunarodne organizacije za obnovljivu energiju i održivi razvoj (*International Energy Agency*); <https://www.iea.org/>, preuzeto: 15.2.2024.
- [5] Web sjedište HOPS-a, HOPS - Godišnji izvještaj o proizvodnji VE u HR za 2023; <https://www.hops.hr/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh>, preuzeto: 15.2.2024.
- [6] Web sjedište organizacije za promociju i edukaciju o održivom razvoju; <https://windmillstech.com/wind-turbine-components/>, preuzeto: 15.2.2024.
- [7] Web sjedište *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/pravo-mora>, preuzeto: 16.2.2024.
- [8] Web sjedište repozitorija obrazovnih sadržaja Edutorij, <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/2251040/upoznajmo-hrvatsku.html>, preuzeto: 16.2.2024.
- [9] *Desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže 2023.-2032.*, HOPS, Zagreb, prosinac 2022. https://www.hera.hr/hr/docs/2023/Prijedlog_2023-01-30.pdf
- [10] Staschug, K. i dr.; *Study on the offshore grid potential in the Mediterranean region – Final Report*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020., ISBN 978-92-76-25336-5
- [11] Web sjedište za publikaciju znanstvenih članaka *ResearchGate*; https://www.researchgate.net/figure/The-Mediterranean-Sea-with-depth-contours-and-submarine-features-Encyclopedia_fig1_323014522, preuzeto: 17.2.2024.
- [12] Web sjedište za publikaciju znanstvenih članaka *ResearchGate*; https://www.researchgate.net/figure/North-Sea-basin-with-contour-lines-of-depths-below-MSL_fig2_276311657, preuzeto: 17.2.2024.
- [13] Web sjedište novinske agencije za obnovljive izvore energije *Recharge*; https://www.rechargenews.com/energy-transition/floating-pv-power-ready-for-north-sea-big-time-with-wind-as-solar-duck-fits-the-bill/2-1-1352882?zephrosso_ott=lyzN0H, preuzeto: 17.2.2024.

- [14] Web sjedište *North Sea Energy Atlas*, interaktivne aplikacije za pregled aktivnosti u Sjevernom moru;
<https://northseaenergy.projectatlas.app/atlas/page/home?map=54.02730,4.06700,5.21,0,0>, preuzeto: 15.2.2024.
- [15] Dubranna, J., i dr.; *Study on the Offshore Energy Potential in the Atlantic Ocean – Final Report*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023., ISBN 978-92-68-07808-2
- [16] Europska Komisija, Glavna uprava za energetiku; *Study on Baltic offshore wind energy cooperation under BEMIP – Final report*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-09690-0
- [17] Web sjedište DHMZ-a;
https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_8, preuzeto: 14.2.2024.
- [18] Duić, Neven i dr.; *Akcijski plan za obnovljive izvore energije na moru u Hrvatskoj, Akcijski-plan-za-obnovljive-izvore-web71.pdf (oie.hr)*, 2023., (preuzeto: kolovoz 2023.)
- [19] Worzyk, T.: *Submarine Power Cables - Design, Installation, Repair, Environmental Aspects*, Springer, Berlin, 2009.
- [20] Vrana, T. K.; Mo, O.: *Optimal Operation Voltage for Maximal Power Transfer Capability on Very Long HVAC Cables*, Elsevier, Trondheim, 2016.
- [21] Guiping, Z.; Xiaowei, D.; Chen, Z.: *Optimisation of reactive power compensation of HVAC cable in off-shore wind power plant*, IET Journal, Peking, 2015., ISSN 1752-1416
- [22] Levačić, G.; Ištvanfi, I.; Lasić, M.: *Usporedba visokonaponskih sustava za prijenos istosmjernom i izmjeničnom strujom*, 16. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 05. – 08. studenoga 2023.
- [23] *WFO Global Offshore Wind Report 2020*, s Interneta (preuzeto: 1.8.2024.)
[Reports - WFO-Global](#), 1.2.2021.
- [24] *WFO Global Offshore Wind Report 2021*, s Interneta (preuzeto: 1.8.2024.)
[Reports - WFO-Global](#), 17.2.2022.
- [25] *WFO Global Offshore Wind Report 2022*, s Interneta (preuzeto: 1.8.2024.)
[Reports - WFO-Global](#), 20.2.2023.
- [26] *WFO Global Offshore Wind Report 2023*, s Interneta (preuzeto: 1.8.2024.)
[Reports - WFO-Global](#), 23.4.2024.
- [27] *Ørsted Hornsea 2 - Photography exhibition guidebook*, Ørsted, London, 2022.;
[Hornsea 2 Photography Exhibition Download.pdf](#) (preuzeto: 1.8.2024.)
- [28] Castro, R.: *Electricity Production from Renewables* (e-Book), Springer, Switzerland, 2022., ISBN 978-3-030-82415-0

- [29] Web sjedište tvrtke za projektiranje vjetroelektrana *Ørsted*, <https://hornseaprojects.co.uk/>, preuzeto: 2.8.2024.
- [30] Web sjedište konzultantske tvrtke za razvoj i informacije o obnovljivim izvorima energije TGS; <https://map.4coffshore.com/offshorewind/>, preuzeto: 6.8.2024.
- [31] Web sjedište međunarodne baze podataka za energiju vjetra *The Wind Power*; https://www.thewindpower.net/turbine_en_1558_siemens-gamesa_sg-8.0-167-dd.php, preuzeto 16.8.2024.
- [32] Web sjedište tvrtke za proizvodnju vjetroturbina *Siemens Gamesa*, <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-8-0-167-dd.html>, preuzeto: 16.8.2024.
- [33] Web sjedište konzultantske udruge za obnovljivu energiju *BVG Associates*; <https://guidetofloatingoffshorewind.com/>, preuzeto: 18.8.2024.
- [34] Larsson, J.; *Transmission Systems for Grid Connection of Offshore Wind Farms - HVAC vs HVDC Breaking Point*, Upsala Universitet, Upsala, 2021., ISSN: 1650-8300, UPTEC ES 21010
- [35] Das, K., Antonios Cutululis, N.: *Offshore Wind Power Plant Technology Catalogue - Components of wind power plants, AC collection systems and HVDC systems*, Baltic InteGrid, Danska, 2017, [Technology_Catalogue_final.pdf \(dtu.dk\)](#), preuzeto: 18.8.2024.
- [36] Grdenić, G.: *Analiza stabilnosti slaboga signala visokonaponskih istosmjernih sustava s pretvaračima s naponskim ulazom*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2019.
- [37] Rytøft, G., Callavik, M., Johansson, H., ...& Moglestue, A.: *Special Report 60 years of HVDC*, The Corporate Technical Journal. Zurich, 2014.; *ABB Review Special Report: 60 Years of HVDC - DocsLib*, preuzeto: 20.8.2024.
- [38] Web sjedište stranice Daft Logic za izračun udaljenosti pomoću aplikacije Google Maps, *Distance Calculator (daftlogic.com)*, preuzeto: 19.8.2024.

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Ulaganja u obnovljive izvore energije su jedini način smanjenja emisija ugljikova dioksida u atmosferu. Kroz ovaj diplomski rad ukratko su objašnjeni dijelovi klasične vjetroturbine i načini temeljenja vjetroturbina u morsko dno. Ukratko je napisan pregled trenutnog stanja korištenja obnovljivih izvora energije koji iskorištavaju energiju vjetra u zasebnom poglavlju za Europu i Republiku Hrvatsku. Obrađeni su podaci o potencijalu obnovljivih izvora energije na moru na području Europe i Republike Hrvatske. Razrađeni su elementi tehničkog rješenja priključenja na mrežu vjetroelektrane na moru, primjer jedne postojeće vjetroelektrane na moru (*Hornsea Project Two*) i razrada tehničkog priključenja potencijalne priobalne vjetroelektrane u sjevernom Jadranu.

Ključne riječi: vjetroelektrana na moru, obnovljivi izvori energije na moru, potencijal EU za OIE, potencijal RH za OIE

SUMMARY AND KEY WORDS

Investments in renewable energy sources are the only way to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere. This thesis briefly explains the parts of a conventional wind turbine and the methods of anchoring wind turbines to the seabed. A brief overview of the current state of the use of renewable energy sources that harness wind energy is provided in a separate chapter for Europe and the Republic of Croatia. Data on the potential of offshore renewable energy sources in Europe and the Republic of Croatia are processed. The technical elements of connecting offshore wind farms to the grid are elaborated, including an example of an existing offshore wind farm (Hornsea Project Two) and the technical connection of an offshore wind farm in the northern Adriatic.

Keywords: offshore wind farm, offshore renewable energy sources, EU potential for renewable energy sources, Croatia's potential for renewable energy sources.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Udio dobivene električne energije iz energije vjetra [3].....	7
Slika 2.2. Prikaz lokacija vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj [5]	11
Slika 2.3. Prikaz konfiguracije prijenosne mreže krajem 2032. godine [9].....	12
Slika 2.4. Prosječna proizvodnja vjetroelektrana u RH [5]	13
Slika 3.1. Dijelovi vjetroturbine [6].....	15
Slika 3.2 <i>Prikaz vrsta temelja priobalnih vjetroturbinaa; a) Cjevasti (monopile) pilot, b) Gravitacijski pilot, c) „Jacket“ pilot, d) „Tripod“ pilot, e) 3 cjevasta (tripile) pilota, f) „Suction-bucket“ pilot [1]</i>	18
Slika 3.3. Prikaz vrsta temelja(sidrenja) plutajućih vjetroagregata [1].....	18
Slika 4.1. Prikaz Hrvatskog obalnog mora s prikazanim linijama granica između pojasa [8]	20
Slika 4.2. Prikaz područja za iskorištavanje obnovljivih izvora na moru [10].....	21
Slika 4.3. Prikaz batimetrije mora Sredozemnog područja [11].....	22
Slika 4.4. Prikaz potencijalnih područja za izgradnju plutajućih vjetroelektrana [10].....	23
Slika 4.5. Prikaz batimetrije Sjevernog mora [12].....	26
Slika 4.6. Hibridna elektrana za iskorištavanje energije vjetra i sunca [13].....	27
Slika 4.7. Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za teritorij RH [17]	29
Slika 4.8. Batimetrijska karta Jadranskog mora [18].....	30
Slika 4.9. Zaštićena područja na moru u RH [18]	31
Slika 4.10. Prikaz zona vizualnog utjecaja vjetroelektrana na moru u RH [18].....	32
Slika 4.11. Područja odbačenog oružja i streljiva u Jadranskom moru (lijevo) i arheološke zone u Jadranskom moru (desno) [18].....	33
Slika 4.12. Prikaz analize sjevernog Jadrana za izgradnju vjetroelektrana s pripadajućom legendom [18]	34
Slika 4.13. Prikaz 5 potencijalnih zona za izgradnju vjetroelektrana na moru [18]	35
Slika 5.1. Pojednostavljeni presjek trožilnog HVAC podmorskog kabela [21].....	38
Slika 5.2. Presjek vodiča – a) okrugli (puni) vodič, b) isprepleteni, c)sektorski vodič , d) sektorski (Milikenov vodič) [19].....	39
Slika 5.3. Pojednostavljeni princip spajanja DC kabela na postojeću AC infrastrukturu [22]	45
Slika 5.4. Dijelovi HVAC povezivanja vjetroelektrane na moru [28]	46
Slika 5.5. Grafički prikaz ovisnosti prijenosne moći kabela o njegovoj duljini za različite vrste napona [20].....	49
Slika 5.6. Prikaz grafičke usporedbe isplativosti HVAC i HVDC prijenosnog sustava [37]	50
Slika 6.1. Radijani dizajn (eng. radial design) kolektorskog sustava [28].....	52
Slika 6.2. Dizajn jednostranog prstena (eng. single-sided ring design) kolektorskog sustava [28]	52
Slika 6.3. Dizajn dvostranog prstena (eng. double-sided ring design) kolektorskog sustava [28]	53
Slika 6.4. Zvezdasti dizajn (eng. star design) kolektorskog sustava [28].....	54
Slika 6.5. Dizajn povratne veze (eng. single return design) kolektorskog sustava [28]	55
Slika 6.6. Dizajn dvostranog poluprstena (eng. double-sided half ring design) kolektorskog sustava [28]	56
Slika 7.1. Grafički prikaz raspodjele investicijskih troškova u vjetroelektrane [18].....	61
Slika 8.1. Shema priključenja Hornsea Project One [29]	63
Slika 8.2. Shema priključenja Hornsea Project Two [27].....	64
Slika 8.3. Prikaz kolektorskog sustava Hornsea priobalnih vjetroelektrana [30].....	65
Slika 8.4. Shematski prikaz spajanja priobalne vjetroelektrane s kopnom [27].....	66

Slika 8.5. Grafički prikaz ovisnosti snage o brzini vjetra za vjetroturbine Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD [31]	69
Slika 9.1. Prikaz 5 potencijalnih zona za izgradnju vjetroelektrana na moru [18]	70
Slika 9.2. Prikaz planirane 220 kV i 400 kV elektroenergetske mreže za 2032. godinu [9]	72
Slika 9.3. Prikaz približnih trasa polaganja kabela za priključenje potencijalne priobalne vjetroelektrane [38]	72

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Popis 10 najvećih vjetroelektrana na moru [23]-[26]	8
Tablica 2.2. Popis vjetroelektrana s osnovnim parametrima u pogonu na teritoriju RH [5]	10
Tablica 4.1. Popis članica Europske unije s potencijalom izgradnje vjetroelektrana na moru [10]	24
Tablica 4.2. Popis članica Europske unije s potencijalom izgradnje vjetroelektrana na moru [15]	28
Tablica 4.3. Površine potencijalnih zona za izgradnju vjetroelektrana [18]	36
Tablica 5.1. Razlike između LCC i VSC pretvarača [36]	48
Tablica 7.1 . Ponderirani prosječni ukupni instalirani troškovi za vjetar na moru [18]	59
Tablica 7.2. Odgovornosti za razvoj vjetroelektrana na moru u Europi [18]	60
Tablica 7.3. Nivelirani trošak električne energije nekih europskih država [18]	62
Tablica 8.1. Osnovni podaci o Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD vjetroturbini [29]	68
Tablica 8.2. Popis materijala od kojih su izrađeni dijelovi vjetroturbine [32]	69
Tablica 9.1. Podaci 220 kV HVAC kabel [34]	73
Tablica 9.2. Približni troškovi priključenja potencijalne priobalne vjetroelektrane HVAC prijenosnim sustavom [34]	74
Tablica 9.3. Približni troškovi priključenja potencijalne priobalne vjetroelektrane HVDC prijenosnim sustavom [34]	74