ENERGETSKE KARAKTERISTIKE POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE

Jozanović, Blaž

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:586025

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

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

Sveučilišni studij

ENERGETSKE KARAKTERISTIKE POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE

Završni rad

Blaž Jozanović

Osijek, 2021.

Sadržaj:

1. UVOD 1

1.1. Zadatak završnog rada 2

2. PROCJENA VALOVA KAO ENERGETSKOG RESURSA 3

2.1. Definicija vala 3

2.1.1. Nepravilni val, značajna visina vala i period vala 4

2.2. Energija i snaga morskih valova 8

3. PREGLED TEHNOLOGIJA 9

3.1. Podjela postrojenja na morske valove 9

3.1.1. Podjela postrojenja na morske valove prema udaljenosti od obale 9

3.1.2. Podjela postrojenja na morske valove prema smjeru upadnog vala 10

3.1.3. Podjela postrojenja na morske valove prema načinu rada 12

3.2. Lanac pretvorbe energije 15

3.3. Primarna faza pretvorbe 16

3.4. Sekundarna faza pretvorbe 16

3.4.1. Zračne turbine 16

3.4.2. Vodne turbine 18

3.4.3. Visokotlačni ili uljno-hidraulični cilindri 19

3.4.4. Električni generator 20

3.5. Direktna pretvorba 22

3.6. Tercijarna faza pretvorba 23

3.6.1. HVAC prijenos 24

3.6.2. HVDC prijenos 24

4. PRORAČUN OČEKIVANE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA ODABRANE TEHNOLOGIJE ZA JADRANSKO MORE 25

5. ZAKLJUČAK 32

LITERATURA 33

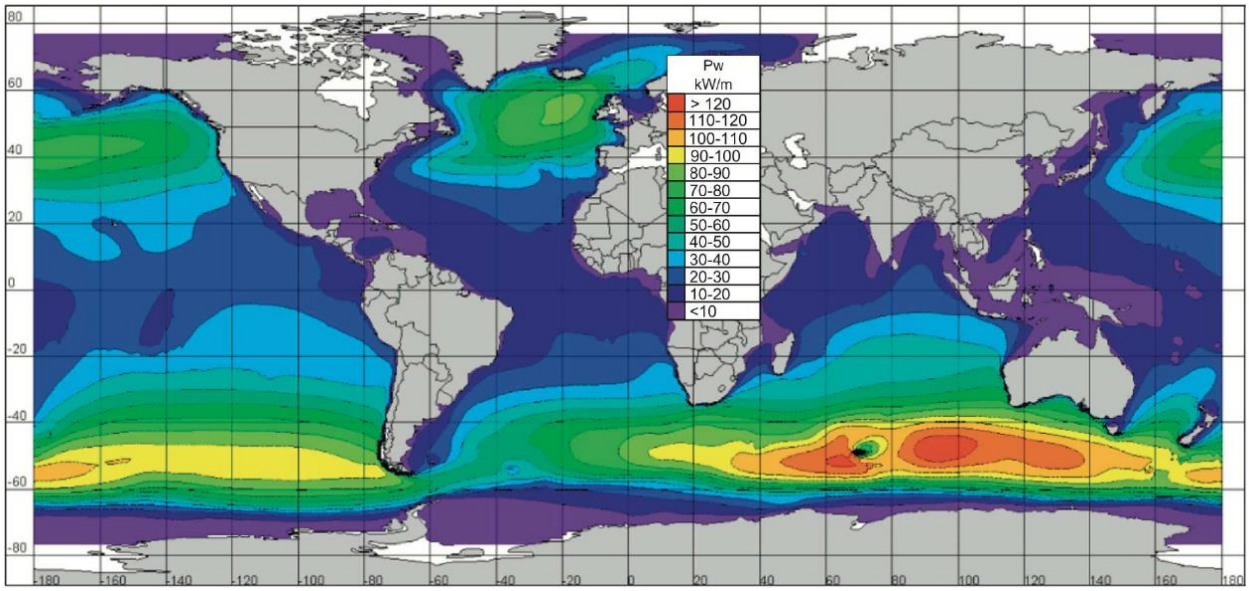
SAŽETAK 35

ABSTRACT 35

ŽIVOTOPIS 36

1. UVOD

U današnje doba obnovljivih izvora energije veliki je fokus na solarnoj energiji i energiji vjetra dok se nešto manje ulaže u izvore kao što je energija morskih valova. Obnovljivi izvori energije su atraktivna alternativa fosilnim gorivima zbog toga što su neiscrpan i čist izvor energije tijekom rada. Energija morskih valova je globalno raspoloživ resurs koji se smatra jednim od tehnologija s najvećim potencijalnim razvojem od obnovljivih izvora energije. Slika 1.1. prikazuje distribuciju globalne prosječne godišnje snage procijenjene u periodu od 10 godina [1]. Studija iz 2010 procjenjuje da je svjetska teoretska potencijalna energija valova otprilike 29,500 TWh/god [2]. U tablici 1.1. vidi se globalna raspodjela potencijalne energije valova. Iako je to mali udio svjetskog potencijala vjetra, koji je isto tako samo mali udio globalne solarne snage, morski valovi predstavljaju ogroman izvor obnovljive energije. Pretvorbom solarne energije u energiju vjetra, prosjek protoka je prostorno koncentriran i iznosi od 0.1-0.3 kW/m^2 horizontalno na površinu zemlje i oko 0.5 kW/m^2 na referentnoj površini okomito na smjer vjetra. Kako se energija vjetra pretvara u energiju valova dolazi do još veće prostorne koncentracije.



Slika 1.1: Distribucija globalne prosječne godišnje snage procijenjene u periodu od 10 godina [1]

Do 95% energije vala nalazi se između vrha vala i jednu četvrtinu ispod vrha vala. U tom rasponu je protok snage oko 2-3kW/m^2 na referentnoj površini okomitoj na smjer propagacije vala. Zbog ovog porasta u snazi i zbog toga što su promjene u valovima tromije od promjena u vjetru, snaga

valova je dostupna 90% vremena dok su solarna i snaga vjetra dostupne samo 20-30%, daje nam velike nade za razvitak ove vrste pretvorbene tehnologije na prosperitetnu i zrelu razinu [1,3,4]. Postoji više od 1000 patentiranih različitih pretvornika energije valova (*eng. Wave Energy Converters, WEC*) i nekoliko ih je pokazalo komercijalni potencijal proizvodnje električne energije [3]. Pretvorbeni procesi i tipovi pretvornika energije valova će biti razmatrani u sljedećim poglavljima.

Tablica 1.1. Teoretska potencijalna energija morskih valova u svijetu [2]

Područje	**Potencijalna energija valova (TWh/god)**
Mediteransko more i otoci Atlantskog oceana (Azorski, Zelenortski i Kanarski otoci)	1300
Srednja Amerika	1500
Zapadna i Sjeverna Europa	2800
Afrika	3500
Sjeverna Amerika i Grenland	4000
Južna Amerika	4600
Australia, Novi Zeland i Pacifički otoci	5600
Azija	6200
Ukupno	29,500

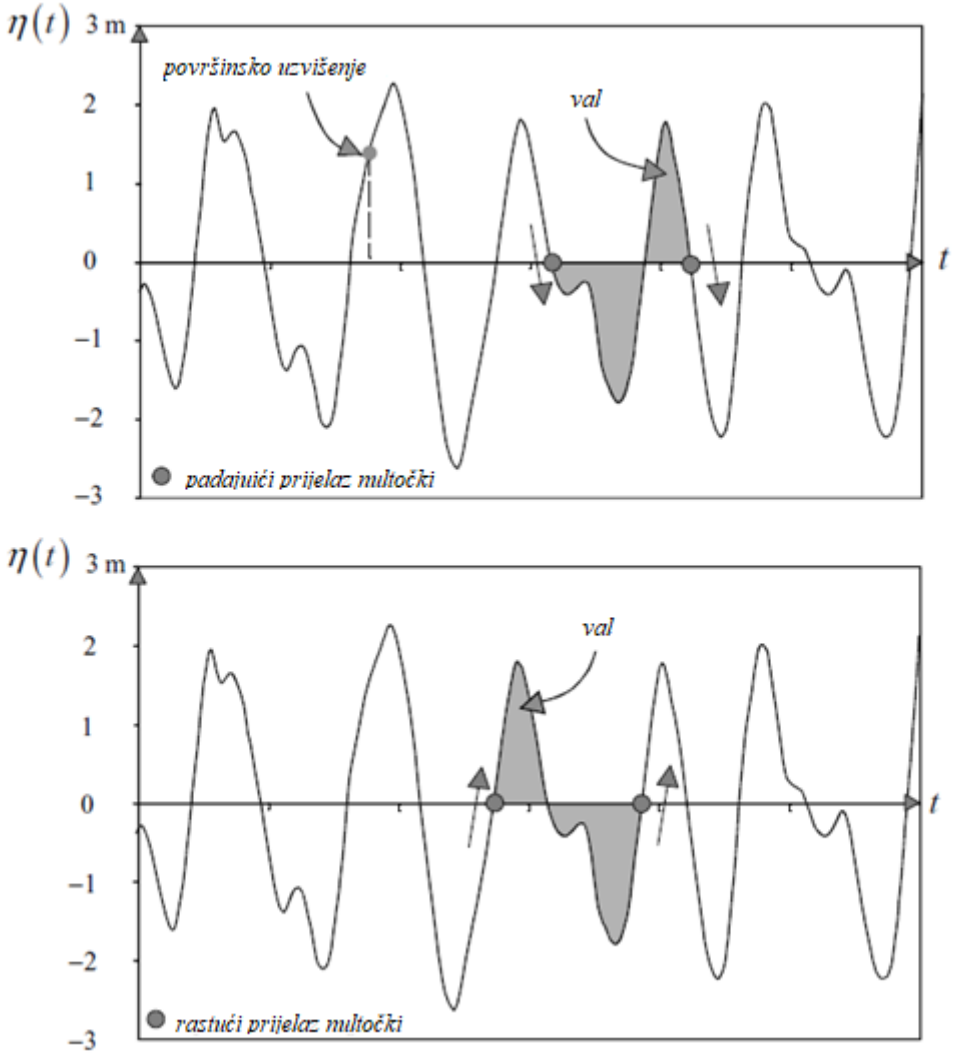
1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je pokušati procijeniti val kao energetski resurs, opisati tehnologije i načine 'hvatanja' energije iz valova. Te na osnovu toga odabrati će se najbolje tehnologije za uporabu na Jadranskom moru i proračunati očekivana proizvodnja električne energije za iste.

2. PROCJENA VALOVA KAO ENERGETSKOG RESURSA

2.1. Definicija vala

Prije nego što objektivno definiramo visinu vala i period, prvo moramo preciznije definirati što je to val. Čini se trivijalno, ali većina ljudi smatra bilo kakvo uzvišenje površine mora valom. U trenutnom kontekstu to nije točno, razlikuje se površinsko uzvišenje mora (*eng. surface elevation*) i val (*eng. wave*). U danom vremenu površinsko uzvišenje je trenutno uzdizanje morske površine (tj. u bilo kojem trenutku u vremenu) u odnosu na neku referentnu razinu. Stoga, val je površina ispod krivulje površinskog uzvišenja između dva uzastopna padajuća prijelaza nultočke referentne razine mora (vidi sliku 2.1.).



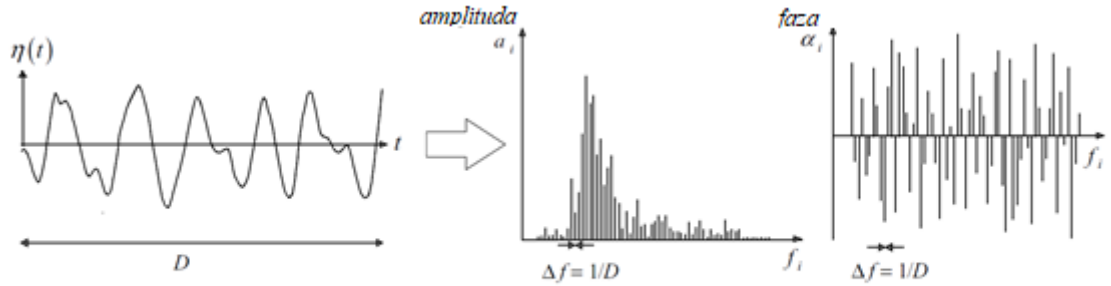
Slika 2.1. Definicija "vala" površinskim uzvišenjem u vremenskom intervalu s padajućim prijelazom nultočki (gornji dijagram) i rastućim prijelazom nultočki (donji dijagram) preko referentne razine [4]

Površinsko uzvišenje može biti negativno, dok val ne može. Moguće su alternative za definiranje vala, npr. površina između dva uzastopna rastuća prijelaza nultočke (vidi sliku 2.1.).

Ako se površinsko uzvišenje $\eta(t)$ smatra Gaussovim procesom, nevažno je hoće li se upotrebljavati definicija sa rastućim ili padajućim prijelazima nultočki, zbog toga što su statističke karakteristike u tom slučaju simetrične. Međutim, mnogi preferiraju definiciju s padajućim prijelazima jer se u vizualnim procjenama visina brijega, koji dolazi nakon dola, obično smatra visinom vala. Karakterizacija valova u valnom rasponu temelji se na prosjeku svih pojedinačnih visina valova i perioda u rasponu. Ovo zahtjeva da trajanje evidencije bude dovoljno kratko da raspon bude stacionaran, ali i dovoljno dugo da se dobiju razumno pouzdani prosjeci. Često korišteni kompromis na moru je 15 do 30 minuta.

2.1.1. Nepravilni val, značajna visina vala i period vala

Morski valovi nisu sinusoidni niti pravilni nego su uglavnom nasumični i nepravilni. Sa slike 2.2. vidljiv je mogući izgled površinskog uzvišenja mora h kao funkciju vremena trajanja D. Opisujući val kao spektar opisuje ga se kao stohastički proces, tj. da se pod uvjetima stvarnih zapažanja okarakteriziraju sva moguća zapažanja koja su se mogla dogoditi u danom vremenu.



Slika 2.2. Promatrano uzvišenje površine vode i njezini amplitudni i fazni spektar [4]

Uzme li se u obzir valni oblik kao sa slike 2.2. površinskog uzdizanja h(t) u nekom vremenu trajanja D, snimljenog na nekoj lokaciji, prikupljen na moru sa bove ili drugog instrumenta, može

se točno reproducirati taj valni zapis kao zbroj velikog broja harmonika komponenti vala, tj. razviti ga u Fourierov red:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \qquad (2\text{-}1)$$

gdje je a_i amplituda, a α_i faza svake frekvencije $f_i = i/D$ (i = 1,2,3,…,N; te je frekvencijski interval $\Delta f = 1/D$). Furierova analiza daje vrijednosti amplitude i faze za svaku pojedinu frekvenciju kao na dijagramima slike 2.2. Uvrštavanjem izračunatih vrijednosti faze i amplitude u jednadžbu (2-1) točno se reproducira dani valni oblik. Za većinu valnih oblika faza poprima vrijednost između 0 i 2p bez preferiranja bilo koje vrijednosti. S obzirom da ja to gotovo uvijek tako (osim za jako visoke valove), ignorirati će se fazni spektar. Tada ostaje samo amplitudni spektar za karakterizaciju valnog oblika. Kada bi ponavljali eksperiment mjerenja površinskog uzvišenja pod statistički identičnim uvjetima, vremenski raspon bio bi drugačiji, a s njim i amplitudni spektar. Ponavljanjem eksperimenta puno puta (M), rješavaju se problemi karakternog spektra, i uzima se srednja vrijednost sume eksperimenata kako bi se pronašla srednju vrijednost amplitude spektra:

$$\overline{a_i} = \sum_{m=1}^{M} a_{i,m} \qquad (2\text{-}3)$$

Za svaku frekvenciju f_i u eksperimentu gdje je $a_{i,m}$ vrijednost od a_i sa rednim brojem m. $\overline{a_i}$ konvergira, tj. približava se konstantnoj vrijednosti kako se povećava broj ponavljanja eksperimenta M. Premda, smislenije je distribuirati varijancu svake valne komponente $\frac{1}{2}\overline{a_i^2}$. Važan razlog je taj što je energija valova proporcionalna kvadratu amplitude vala. (jednadžba 2-4).

$$\bar{E} = \bar{E}_{potencijalna} + \bar{E}_{kinetička} = \frac{1}{2}\rho g\overline{a^2} \qquad (2\text{-}4)$$

Varijanca je relevantnija (statistička) kvantiteta nego amplituda. Na primjer, zbroj varijanci valnih komponenti jednak je varijanci zbroju valnih komponenti. Dok suma amplituda nije jednaka amplitudi zbroja (ne postoji amplituda nasumičnog površinskog uzvišenja mora). U moru prisutne

sve frekvencije, a spektar varijance $\frac{1}{2}\overline{a_i^2}$ je diskretan, što znači da su prisutne samo frekvencije $f_i = i/D$. To stvara problem kojeg rješavamo na način da distribuiramo varijancu $\frac{1}{2}\overline{a_i^2}$ po frekvencijskom intervalu $\Delta f = 1/D$, što daje gustoću varijance $\frac{1}{2}\overline{a_i^2}/\Delta f$ na svakoj frekvenciji. Na ovaj način će sve frekvencije biti zastupljene jer je svakoj dodijeljena gustoća varijance. Varijanca je sada distribuirana po cijelom frekvencijskom spektru, ali i dalje 'skače' sa jedne diskontinuirane vrijednosti na drugu. Ovo se rješava tako da se frekvencijski interval Δf 'pošalje' u nulu ($\Delta f \to 0$). Iz toga se dobiva definicija za spektar gustoće varijance:

$$E(f) = \lim_{\Delta f \to 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{2} \overline{a^2} \qquad (2\text{-}5)$$

Varijanca površinskog uzvišenja $\underline{\eta}(t)$je, po definiciji, srednja kvadratna površinsko uzvišenje $\overline{\underline{\eta}^2}$. Za harmonijski val amplitude a, varijanca je $\overline{\eta^2} = \frac{1}{2}a^2$. U modelu nasumične faze/amplitude za nasumični morski val, dodaje se veliki broj harmonijskih valova i varijanca sume, tj. nasumično površinsko uzvišenje, je jednako sumi zasebnih varijanci ('varijanca sume je suma varijanci'):

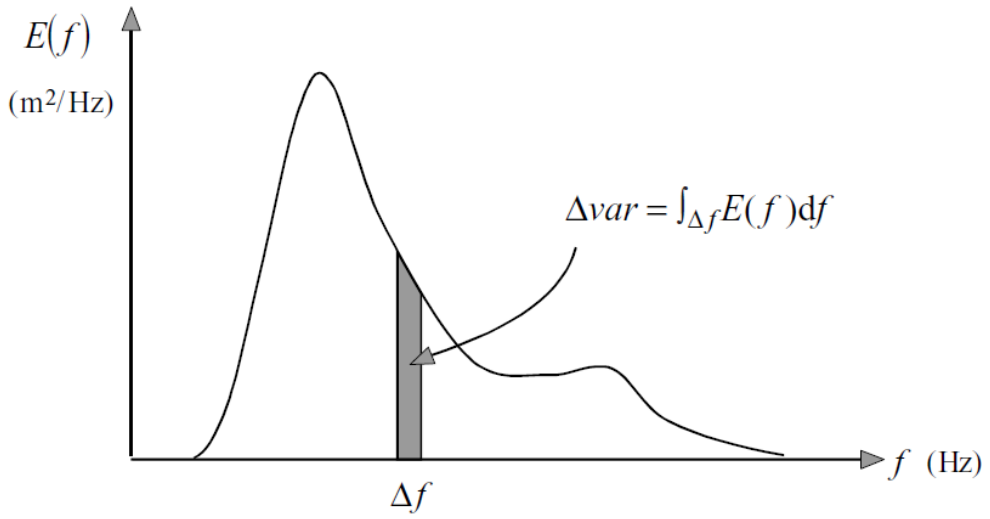
$$varijanca = \overline{\underline{\eta}^2} = E\left\{\underline{\eta}^2\right\} = \sum_{i=1}^{N} E\{\ \tfrac{1}{2}\underline{a}_i^2\}\ \text{ za } E\left\{\underline{\eta}\right\} = 0 \qquad (2\text{-}6)$$

Ovaj spektar pokazuje nam koliko $\Delta var - a$ frekvencijski opseg Δf doprinosi totalnom spektru (slika 2.3.) :

$$\Delta var = \int_{\Delta f} E(f)\, df \qquad (2\text{-}7)$$

Iz toga dolazi da je totalna varijanca $\overline{\underline{\eta}^2}$ površinskog uzvišenja mora suma varijanci svih frekvencijskih opsega Δf, ili, za kontinuirani spektar:

$$\overline{\underline{\eta}^2} = \int_0^{\infty} E(f)\, df \qquad (2\text{-}8)$$



Slika 2.3. Interpretacija spektra gustoće varijance kao distribucije totalne varijance površinskog uzvišenja mora kao funkcija frekvencije [4]

Kada se nasumičnu površinu uzvišenja mora tretira kao stacionarnu, Gaussov proces, onda su njezine statističke karakteristike određene spektrom varijance gustoće $E(f)$. Karakteristike će biti izražene preko trenutka tog spektra koji se definira kao:

$$m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df \quad za \;\; n = \ldots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \ldots \tag{2-9}$$

Taj trenutak m_n naziva se 'trenutak n-tog reda' od $E(f)$. Na primjer, varijanca površinskog uzvišenja $\overline{\underline{\eta}^2}$ jednaka je trenutku nultog reda:

$$varijanca = E\left\{\underline{\eta}^2\right\} = \int_0^\infty E(f) df = m_0 \tag{2-10}$$

Znajući jednadžbe za trenutak n-tog reda m_n i trenutak nultog reda m_0 onda se može definirati i energetski period T_e kao:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \tag{2-11}$$

Ako je funkcija $E(f)$ poznata za dano morsko stanje, onda se vršni period T_p i energetski period T_e mogu međusobno povezivati omjerom:

$$T_e \cong 0.9 * T_p \tag{2-12}$$

Sve statističke karakteristike nasumičnog vala $\underline{H}$ proizlaze iz Rayleighove distribucije,na primjer srednja vrijednost visine vala i efektivna vrijednost visine vala su:

$$\overline{H} = E\{\underline{H}\} = \sqrt{2\pi m_0} \tag{2-13}$$

$$H_{rms} = E\{\underline{H}^2\}^{\frac{1}{2}} = \sqrt{8m_0} \tag{2-14}$$

Te daljnjim formulacijama iz istraživanja [4] dolazi se do definicije za značajnu visinu vala H_s, koja je definirana kao srednja vrijednost najviše jedne trećine valnih visina u valnom intervalu. Približno dana izrazom:

$$H_s \cong H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \tag{2-15}$$

2.2. Energija i snaga morskih valova

Klima na moru na bilo kojoj lokaciji sastoji se od različitih valnih polja, koja uključuju i vjetrovne valove i nabujale valove (*eng. wind waves and swells*) Prosječna gustoća energije po jedinici horizontalne površine računa se po formuli:

$$E = \frac{1}{16}\rho g H_s^2 \tag{2-16}$$

Za duboku vodu, grupna brzina koja predstavlja brzinu transporta energije jednaka je:

$$c_g = \frac{1}{4\pi} g T_e \tag{2-17}$$

Naime, snaga valova po jedinici duljine valne fronte dobiva se kao produkt prosječne gustoće energije i grupne brzine i definira se kao:

$$P_w = \frac{1}{64\pi}\rho g^2 {H_s}^2 T_e \qquad (2\text{-}18)$$

gdje je ρ gustoća vode, g je gravitacijsko ubrzanje, H_s značajna visina vala i T_e je energetski period vala. Iz jednadžbe (2-18) vidljivo je da propagirajuća visina vala i period određuju dostupnu snagu vala na danoj lokaciji, te zbog toga karakteristike vala drastično ovise o promjeni batimetrije od otvorenog mora do obalnog područja [2, 4, 8].

3. PREGLED TEHNOLOGIJA

3.1. Podjela postrojenja na morske valove

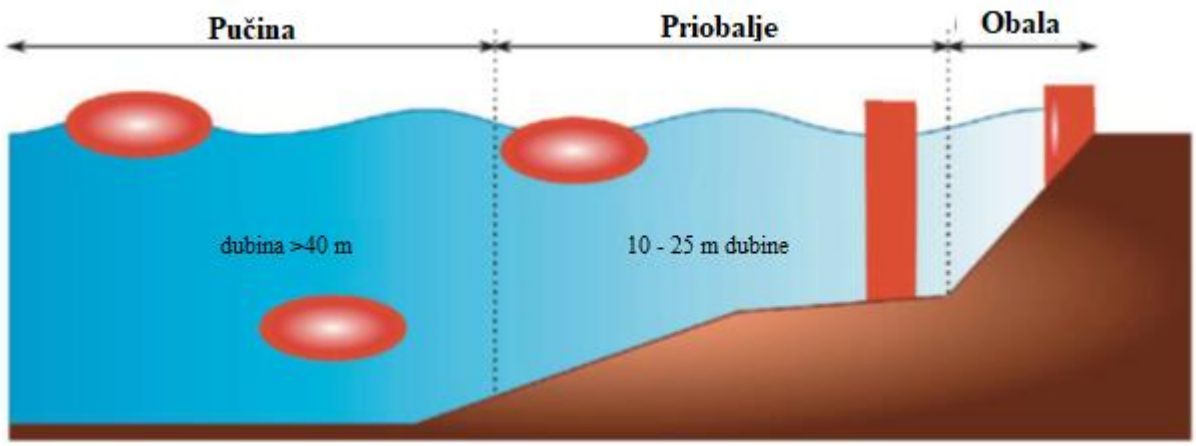
Postrojenja na morske valove mogu se podijeliti prema metodi 'hvatanja' (*eng. capture*) vala ili prema načinu rada. Također se mogu podijeliti prema dubini vode, tj., udaljenosti na kojoj se nalaze od obale.

3.1.1. Podjela postrojenja na morske valove prema udaljenosti od obale

Ova podjela je najosnovnija podjela postrojenja na morske valove. Glavne odlike obalnih postrojenja *(eng. Onshore*) su lako održavanje, instaliranje i nije ih potrebno usidriti. Obično se postavljaju na lukobrane, brane i nepomične litice (*eng. fixed cliffs*) i zbog toga što je voda uz obalu dosta plića i valovi sadrže manje energije. Međutim, oštećenja obalnog krajolika i geologije treba se uzeti u obzir pri projektiranju ovih postrojenja što limitira njihovu uporabu.

Priobalna postrojenja (*eng. Nearshore*) su postrojenja koja se nalaze u plitkim vodama sa dubinama obično manjim od četvrtine duljine morskog vala na toj lokaciji kao što se vidi na slici 3.1.. Mogu se fiksirati, na morsko dno, ali moraju biti dovoljno robusne strukture da mogu podnijeti nalete valova. Plitke vode sa sobom donose limitaciju prikupljanja energije, ali je manja mogućnost oštećenja postrojenja zbog ekstremnih valova.

Postrojenja na otvorenome moru ili pučinska postrojenja (*eng. Offshore*) nalaze se na dubinama od 40m i na više metara. Imaju veći potencijal prikupljanja energije zbog viših valova i većeg udjela energije u njima. Postrojenja moraju biti robusna i moraju moći podnijeti ekstremne uvjete te su zbog toga plutajuća postrojenja optimalna. Plutajuća postrojenja su usidrena za dno mora i potrebni su i dugački kablovi za prijenos električne energije u mrežu koja se nalazi na kopnu [1,3].



Slika 3.1. Podjela tehnologija po udaljenosti od obale [1]

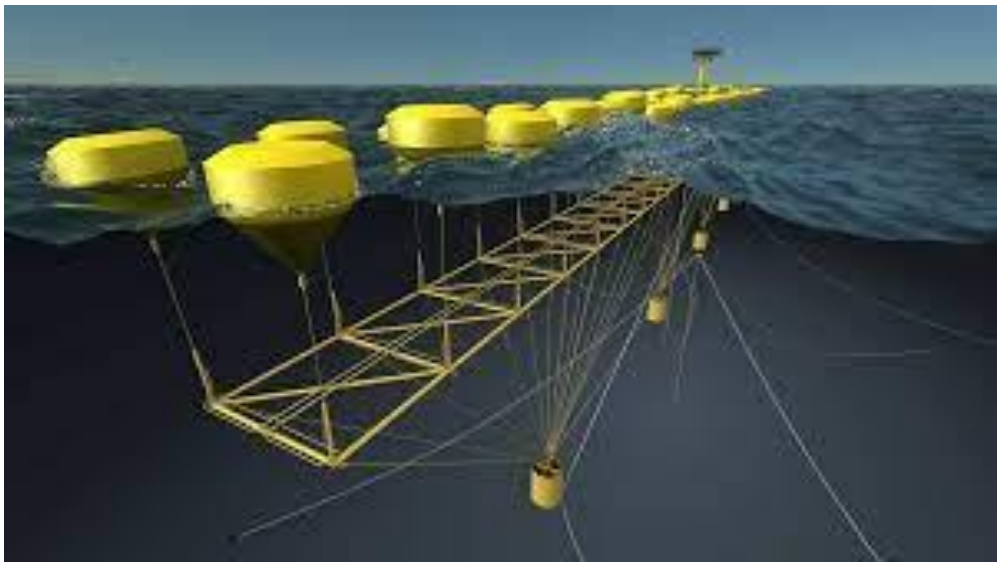
3.1.2. Podjela postrojenja na morske valove prema smjeru upadnog vala

Prema smjeru upadnog vala, postrojenja na morske valove mogu biti podijeljena na prigušnike (*eng*. atenuator), točkaste upijače (*eng. point absorber*) i završnike (*eng. terminator*).

Prigušnik radi na principu kada je upadni val paralelan s pretvornikom. Slika 3.2. Pelamis kao primjer prigušnika. Val stvara relativno gibanje sekcija, a hidraulična pumpa tjera visokotlačno ulje kroz hidraulični motor, koji pogoni električni generator. Koristi samo dio energije vala te tako preživljava oluje [1].

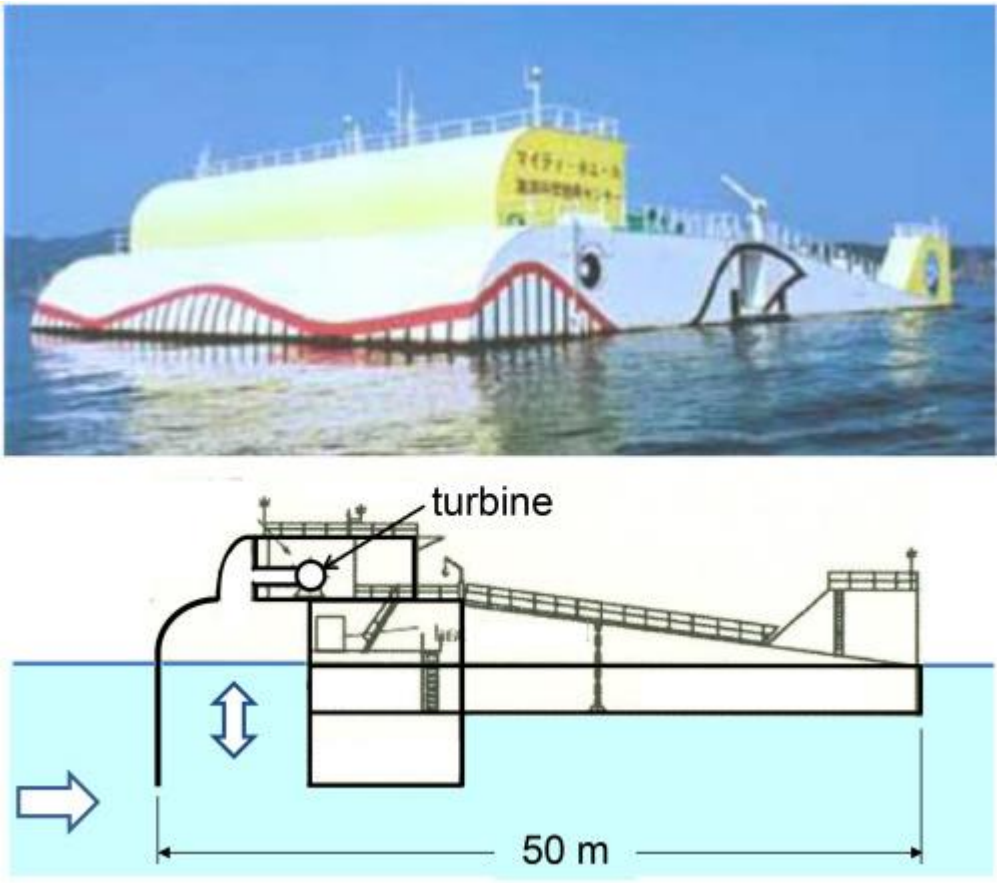
Slika 3.2. Pelamis – primjer prigušnika [1]

Ako je pretvornik na morske valove manji od razmaka između dva slijedna vala, onda se pretvornik naziva točkasti upijač. Slika 3.3. prikazuje primjer točkastog upijača. Smjer upadnog vala na postrojenje je nebitno zbog kompaktnog dizajna postrojenja. To su male plutajuće bove koje mogu plutati na površini vode ili biti potopljene ovisno o razlici tlakova [1].



Slika 3.3. Pontoon Power converter (PPC) – primjer točkastog upijača [5]

Djelomično potopljen pretvornik koji 'hvata' vodu u zatvoreni akumulacijski spremnik kroz otvor koji se nalazi ispod visine površne vode zove se završnik. Kako se tlak vode nakuplja, tjera zrak kroz turbinu na vrhu postrojenja. Završnici mogu biti plutajuća i fiksna postrojenja.

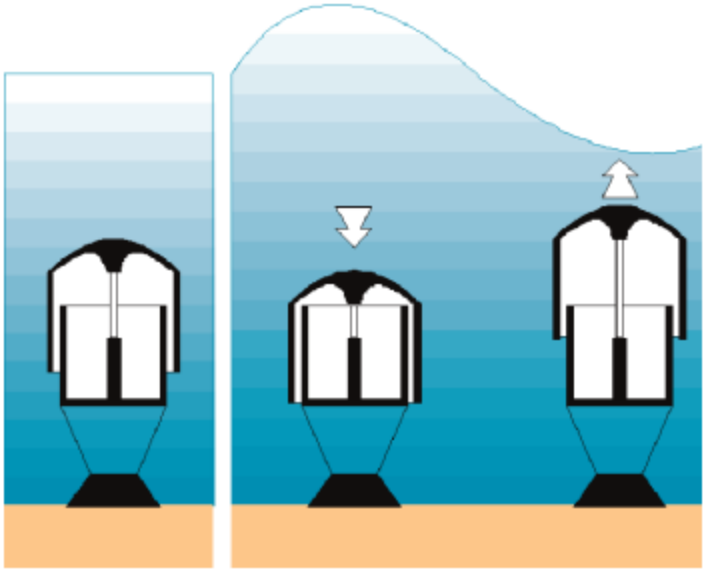


Slika 3.4. Mighty Whale kao primjer plutajućeg završnika [6]

3.1.3. Podjela postrojenja na morske valove prema načinu rada

Način rada razlike tlakova (*eng. Pressure differential*) : Pretvornici koji pripadaju u ovu kategoriju mogu se dalje podijeliti u dvije kategorije: Pretvornici koji funkcioniraju na principu Arhimedovog zakona (*eng. Archimeds wave system, AWS*) te pretvornici s oscilirajućim vodenim stupcem (*eng. Oscillating wave column, OWC*). AWS je potopljeni točkasti upijač tipično smješten blizu obale i fiksiran za morsko dno. Koristi razliku tlakova generiranu između brijega i dola vala preko samog pretvornika. Kada brijeg vala prelazi preko pretvornika tlak vode komprimira zrak unutar uređaja

i pomiče uređaj prema dolje. Ako je dol vala iznad pretvornika tlak vode se smanjuje i pretvornik se pomiče gore (slika 3.5.).

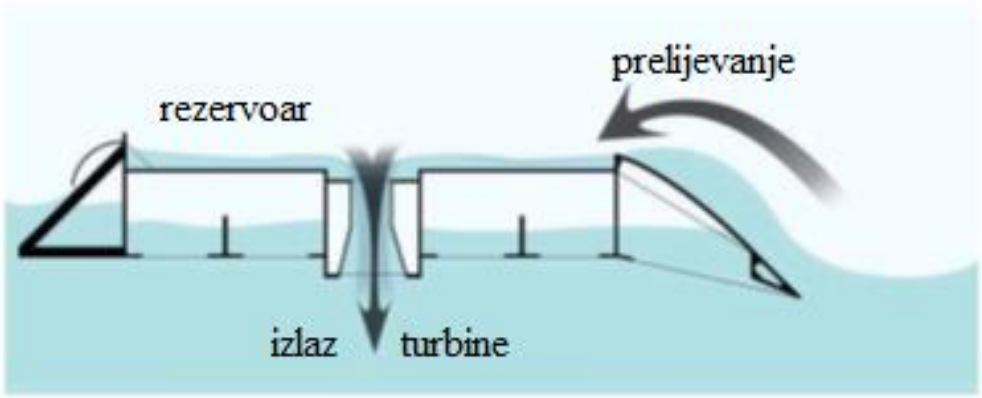


Slika 3.5. Način rada Arhimedovog valnog sistema (AWS) [8]

Oscilirajući vodeni stupac, obično se nalazi na priobalju, radi na istom principu kao i AWS. Koristi polu-potopljenu komoru s otvorenim dnom, klipno gibanje valova raste i snižava razinu vode unutar komore, pomičući unutarnji volumen zraka. Taj protok zraka pogoni turbinu koja se okreće uvijek u istom smjeru iako je protok zraka dvosmjeran (vidi sliku 3.4.) [7].

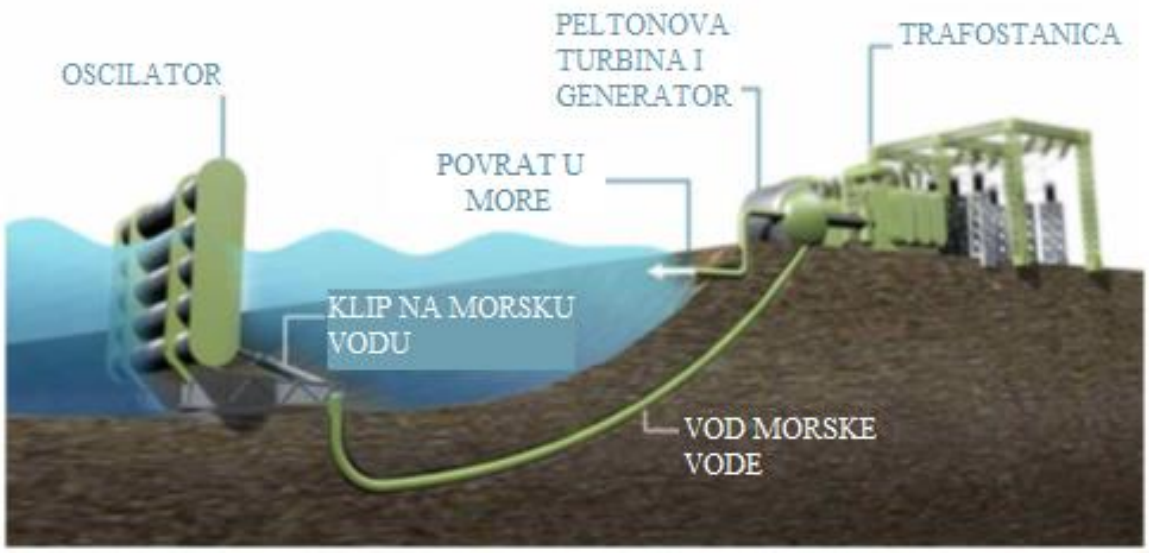
Plutajuće strukture (*eng. Floating structures*): Ova postrojenja baziraju se na principu plutajuće strukture koju pomiču valovi. Iskoristive oscilatorne kretnje mogu biti vertikalne (uzdizanje), horizontalne (udari, *eng. surge*), pod nagibom (*eng. pitch*) ili kombinacija istih. Povrh toga, postrojenja su pogonjena apsolutnim kretanjem plutače u odnosu na vanjsku fiksnu referencu ili relativnim kretanjem dvaju ili više plutajućih tijela. [2,7]

Prelijevni način rada (*eng. Overtopping*): To su postrojenja koja imaju strukturu za povećanje potencijalne energije, kinetičke ili i potencijalne i kinetičke energije vala. Prelijevnici (*eng. Overtopping devices*) imaju bazen za vodu koji se nalazi iznad razine mora i 'tjera' vodu iz bazena kroz turbine u more (slika 3.6.) [1,2,7].



Slika 3.6. Primjer prelijevnika : WaveDragon [1]

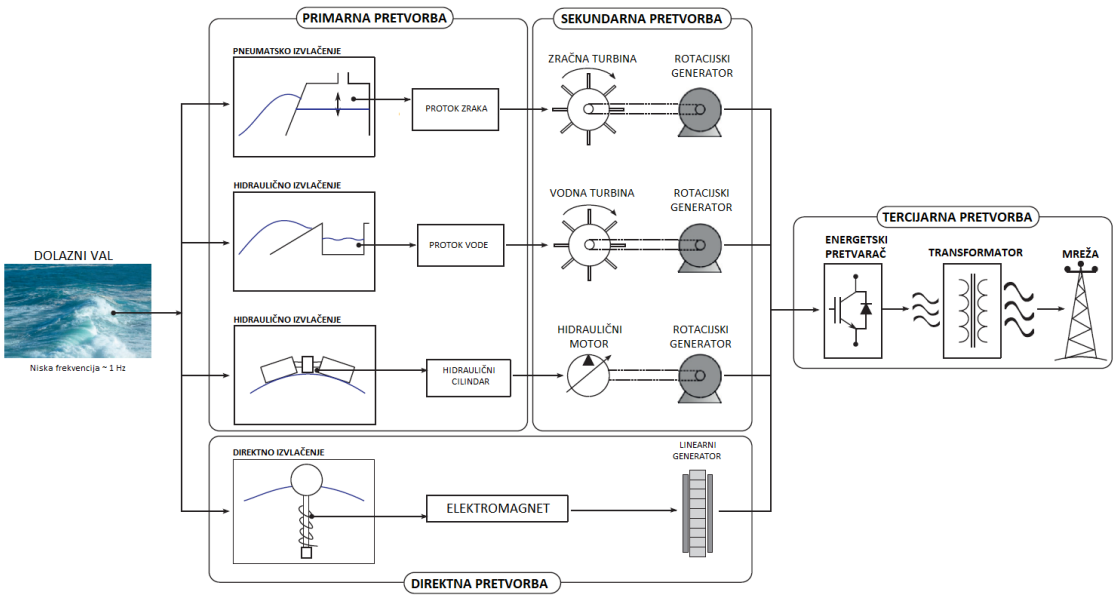
Udarni način rada (*eng. Impact*): Postrojenja su postavljena okomito na smjer propagiranja vala i mogu biti zglobne (artikulirane) ili fleksibilne strukture [2,7]. Pretvornici oscilirajućih valnih udara (eng. *Oscillating surge wave energy converter, OSWEC*) se također ubrajaju u ovu skupinu i rade na principu njihanja naprijed – nazad zbog udara vala (slika 3.7.).



Slika 3.7. Primjer OSWEC-a : Power Oyster 800 [1]

3.2. Lanac pretvorbe energije

Proces pretvorbe energije koji daje potrebnu električnu energiju za spajanje WEC-a u električnu mrežu naziva se lancem pretvorbe energije (*eng. Power Conversion Chain, PCC*). Lanac pretvorbe uzima mehaničku energiju vala kao izvor snage i pretvara ga u električnu energiju kroz proces energetske tranzicije. Proces izvlačenja (ekstrakcije) energije iz valova (tj. pogonski sustav), koji se uobičajeno kod WEC-a na engleskom zove *Power Take Off (PTO)*, slijedi različite faze mehanizma pretvorbe [9]. Prema [7] mogu se podijeliti u nekoliko faza, ovisno o različitim pretvorbama koje se događaju do dobivanja ispravnog signala za ubrizgavanje u mrežu (slika 3.8.). Te se faze definiraju kao primarna faza pretvorbe, sekundarna faza pretvorbe i tercijarna faza pretvorbe. U sljedećim pod poglavljima sve faze će biti opisane, uključujući i direktnu pretvorbu koja obično koristi linearne generatore umjesto rotacijskih generatora, i 'skače' odmah sa prve faze na treću fazu bez prolaska kroz sekundarnu fazu pretvorbe.



Slika 3.8. Različite faze lanca pretvorbe snage [1]

3.3. Primarna faza pretvorbe

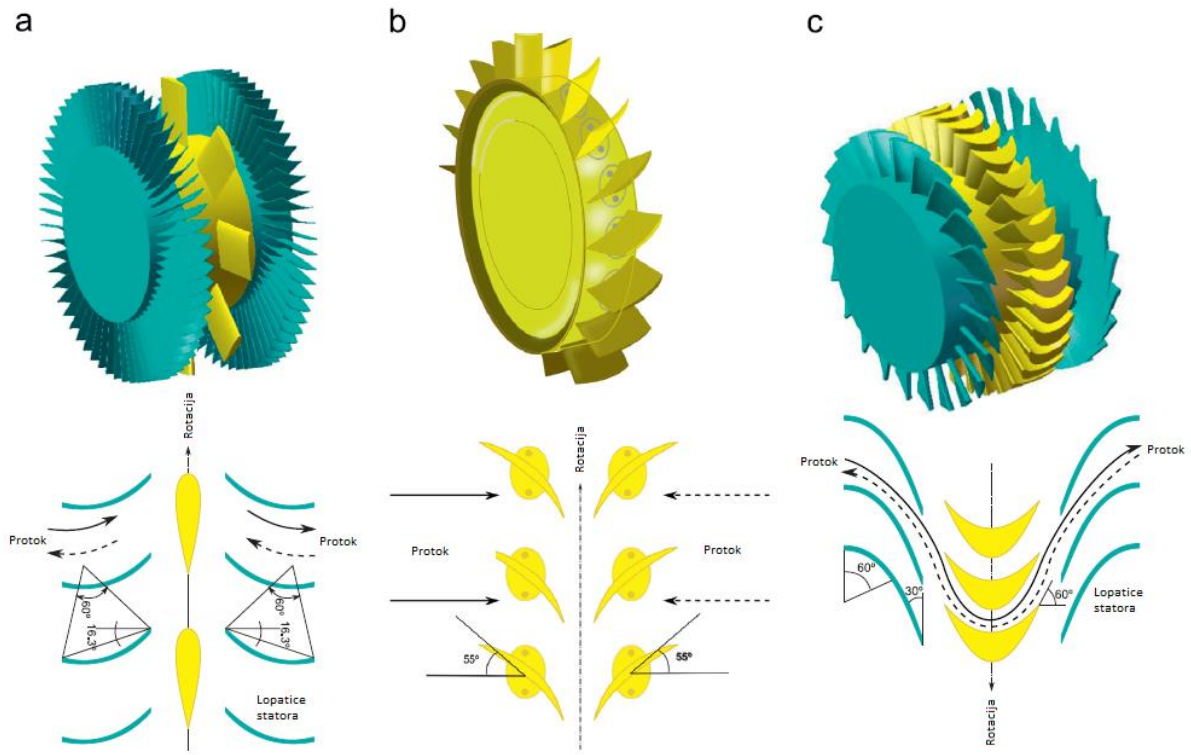
Ova faza sastoji se od pretvorbe gibanja vala u protok zraka ili protok vode kroz pneumatski, hidraulični ili mehanički sistem. Cilj je pretvorba niske frekvencije oscilatornog gibanja valova (~1 Hz) u brzo gibanje kako bi se izvukla maksimalna energija [7]. Horizontalno gibanje valova može se pretvoriti koristeći plutajuće ili fiksne strukture. Oscilacije mora zbog valova unutar polupotopljene strukture mogu se iskoristiti mehaničkim ili pneumatskim sistemima. Dok se varijacija tlakova, uzrokovana valovima, ispod površine mora može iskoristiti fiksnim strukturama koje imaju cijev, nižu od površine mora, obično Venturijevog tipa (orijentiranu u smjeru propagirajućeg vala), kako bi povećali brzinu radnog protoka.

3.4. Sekundarna faza pretvorbe

Sljedeća faza u procesu pretvorbe pretvara radni fluid (zrak ili voda), generiran u primarnoj fazi, u korisnu električnu energiju. Par primjera koji te pretvorbe čine mogućima su hidraulične i pneumatske turbine, hidraulični cilindri, hidraulični motori i električni generatori [9]. Kroz ove posredne elemente pretvara se niska rotacijska brzina ili recipročno gibanje u više okretaje po minuti (1500 okr/min).

3.4.1. Zračne turbine

U prošlosti, korištenjem jednosmjernih turbina za WEC-ove, bilo je potrebno ugrađivanje ispravljačkih ventila kao dodatne opreme. Danas se koriste samoispravljive zračne turbine kao što su Wellsova turbina, impulsna turbina i Dennis-Auldova turbina (slika 3.9.) [1].



Slika 3.9. Zračne turbine primjenjive u WEC-ovima: a) Wellsova turbina, b) Denniss–Auldova turbina i c) impulsna turbina [7]

1. Wellsova turbina:

   Turbina aksijalnog toka koja proizvodi okretni moment na koji ne utječe smjer protoka zraka. Neke od prednosti Wellsove turbine su niska cijena, relativno visoka brzina rotacije sa niskom brzinom protoka zraka i dobra vršna učinkovitost. Isto tako, nedostatci su joj što je bučna, relativno velika veličina za svoju snagu, niski ili negativni okretni moment za male protoke zraka i pad izlazne snage zbog aerodinamičnih gubitaka kod protoka koji prelaze kritične vrijednosti bez zastoja (*eng. stall-free*) [10]. Najzastupljenija među OWC-ima (neki od njih su i Limpet OWC, Mutriku OWC).

2. Impulsna turbina:

   Aksijalna rotacija turbina ovog tipa je orijentirana u smjeru protoka zraka. Prednosti i nedostatci ovih turbina u usporedbi s Wellsovim turbinama nisu jasne i ovise o verziji, modelu i osnovi usporedbe [11].

3. Dennis-Auldova turbina: Usporediva je s Wellsovom turbinom, lopatice se nalaze na obodu rotora u neutralnom položaju, paralelno aksijalnom smjeru protoka zraka, a ne tangencijalno kao kod Wellsove i impulsne turbine. Efikasnost ove turbine je viša nego efikasnost Wellsove turbine zbog većeg udjela površine lopatica naspram ukupne površine rotora [9]. Ovaj dizajn je razvila tvrtka Oceanlinx u Australiji i implementirala u svoj OWC, Oceanlinx OWC.

3.4.2. Vodne turbine

Tehnologija implementacije vodnih turbina potječe iz hidroelektrana i relativno je dobro utvrđena naspram zračnih turbina. Glavna podjela im je na reakcijske turbine i impulsne turbine.

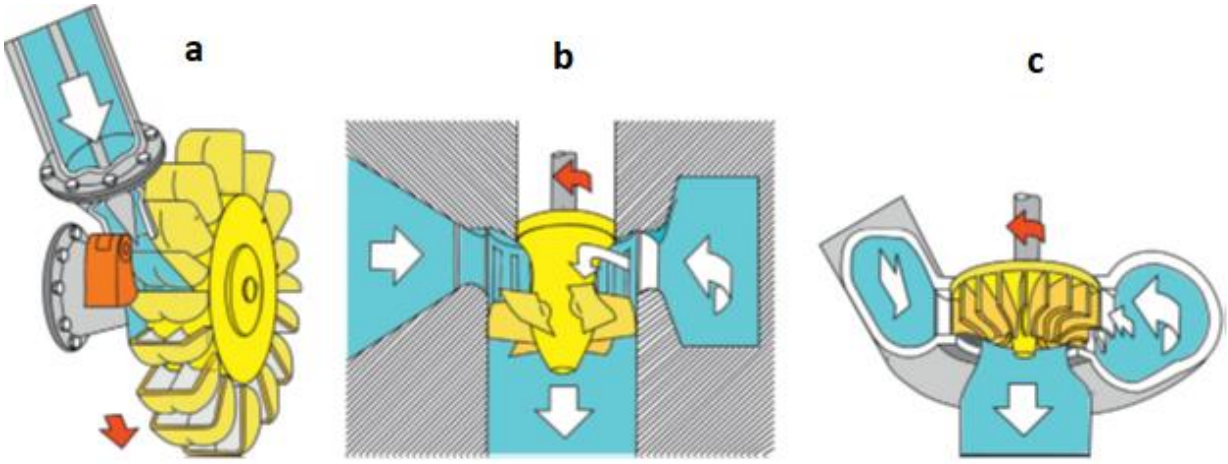
1. Reakcijske turbine:

   U reakcijskim turbinama, za razliku od impulsnih turbina, voda (radni fluid) se ispušta kroz mlaznice koje se nalaze na rotoru. Ubrzanje vode koja izlazi iz mlaznica stvara silu na obodu turbine što uzrokuje okretanje rotora u suprotnom smjeru od vode. Tlak vode se mijenja dok prolazi kroz lopatice rotora i zbog tog razloga turbina mora biti potpuno zatvorena kako bi se održao tlak vode, ili mora biti potpuno uronjena u vodeni tok [7,11]. Dva najčešća tipa reakcijskih turbina su Kaplanova i Francisova turbina (slika 3.10.). Kaplanova turbina je prikladnija u primjeni za WEC-ove zbog svoje mogućnosti proizvodnje visoke učinkovitosti za niske površinske razlike vode (manje od 5m). Učinkovitost ovisi o vrtložnom gibanju vode prije dolaska do turbine. Vrtlog nastaje kada prolazi kroz (privodne) lopatice statora (*eng. guide vanes*) koje se nalaze 'uzvodno' od rotora te turbina apsorbira taj vrtlog i usmjerava ga u odvod (eng. draft tube) stvarajući pri tome mali kutni moment. Druga metoda je upotrebljavanje 'puževe kučice'. Na taj način, voda ulazi tangencijalno na turbinu i prisiljena je vrtjeti se.

2. Impulsne turbine:

   Ove turbine pogonjene su mlazovima vode visoke brzine usmjerenih na nekoliko zakrivljenih lopatica montiranih na rotor što stvara rotacijsko gibanje turbine. Peltonova turbina je najprimjenjenija impulsna turbina za WEC-ove (slika 3.10). Sastoji se od rotora s 12 do 40 lopatica, a svaka je lopatica oštrim bridom podijeljena u dva jednaka ovalna dijela. Mlaz pogađa svaku lopaticu i dijeli se na dva dijela od koja svaka napušta lopaticu pod kutom od gotovo 180°. Peltonove turbine su vrlo prikladne za pretvornike oscilirajućih

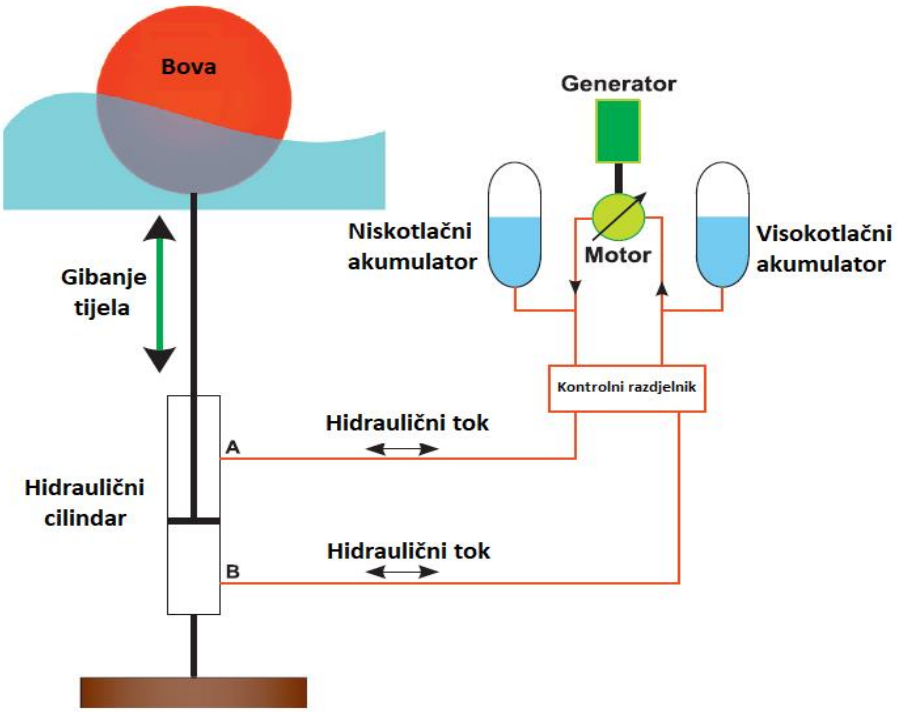
valnih udara (OSWEC) jer imaju visoku efikasnost pri niskom protoku i značajno višoj razlici površinskog uzvišenja mora [7].



Slika 3.10. Vodne turbine primjenjive u WEC-ovima: a) Peltonova turbina, b) Kaplanova turbina i c) Francisova turbina [7]

3.4.3. Visokotlačni ili uljno-hidraulični cilindri

Za ove pretvarače, mehaničko gibanje tijela WEC-a pretvara se u hidrauličnu energiju preko cilindara, ova vrsta sistema generalno se koristi na sporo oscilirajućim pretvaračima, npr. Aquabuoy, Pelamis ili PowerBuoy. Slijedno tome, hidraulična energija pretvara se u električnu energiju električnim generatorom pogonjenim brzim hidrauličnim motorom (slika. 3.11.).



Slika 3.11. Shematski prikaz hidrauličnog PTO-a [7]

Da bi dobili konstantnu izlaznu snagu, dodaju se plinski ili uljni akumulatori između cilindara i motora koji djeluju kao spremnici energije, tj. omogućuju konstantan tok prema motoru [1,7].

3.4.4. Električni generator

Proizvedenu mehaničku energiju treba pretvoriti u eklektičnu energiju, a je izvedivo električnim generatorima. Sinkroni generatori, linearni generatori i indukcijski generatori su tipovi eklektičnih generatora koji se uzimaju u obzir kod projektiranja WEC-ova. Napravljena je studija [12] koja je usporedila četiri različita električna generatora, a to su :

1. Indukcijski generator s kliznim kolutima (DFIG)
2. Kavezni indukcijski generator (SCIG)
3. Sinkroni generator s permanentnim magnetom (PMSG)
4. Sinkroni generator (SG)

Generatori su uspoređeni, prema efikasnosti, cijeni te podobnosti za rad na pučini [12,13].

Podobnost

Jedno od pitanja koje treba riješiti u takvom okruženju je izvedivost korištenja stroja s četkicama ili ne, one se moraju mijenjati barem dva puta godišnje i to postaje problem kod pučinskih pretvarača zbog ograničene pristupačnosti. DFIG i SG verzije generatora imaju četkice. S druge strane, visoki udio morske soli u morskoj vodi čini PMSG-ove podložnima koroziji jer su PMSG-ovi napravljeni od specifične slitine NdFeB (Neodimijski magnet) koji ima nisku toleranciju na koroziju. S pravilnom metodom brtvljenja i prateći industrijske standarde zaštite, PMSG-ovi mogu imati puno dulji životni vijek u usporedbi s SCIG-ovima.

Energetska učinkovitost

U ovom zadatku uzeta je srednja energija stanja mora. DFIG-ovi nisu uzeti u obzir jer se smatra da su neodrživi zbog teškoće održavanja. Simulacijskim testovima analizirano je prikupljanje snage ovih generatora za određenu valnu klimu u jednoj godini. Uzevši u obzir rezultate iz studije [13], izlazna snaga PMSG-a i SG-a su podjednake pa je stoga razlika u učinkovitost između njih zanemariva. Ali razlika između istih i IG-a u smislu izlazne snage je oko 6-7%.

Cijena

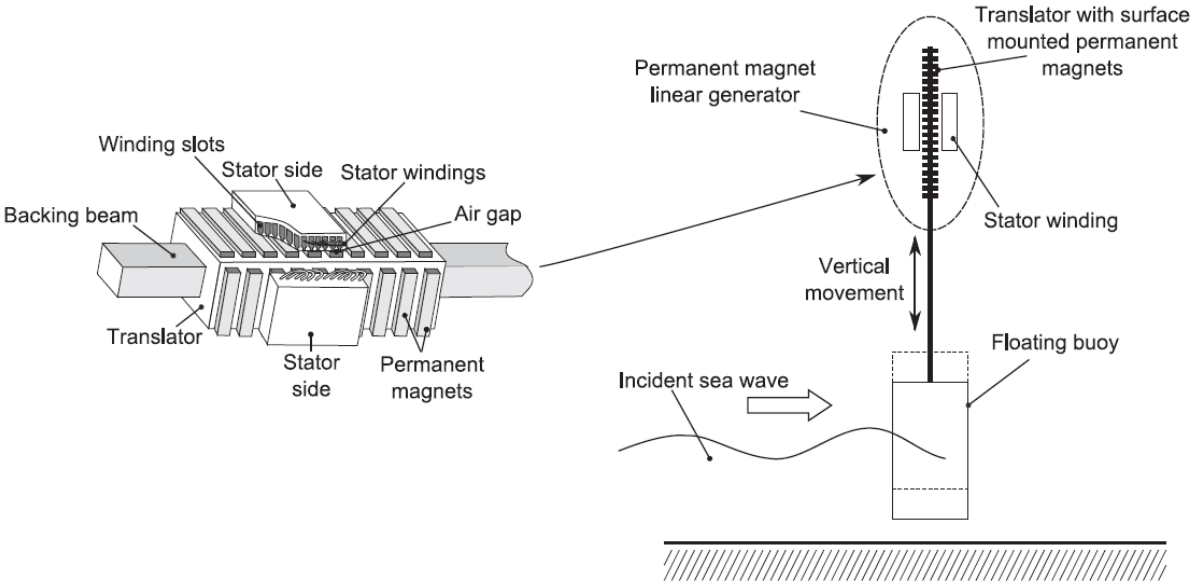
SG-ovi su skupi u usporedbi s IG-ovima nazivne snage ispod 800 kW [12]. Za nazivne snage iznad toga , IG-ovi postaju skuplji. Tijekom izvođenja studije usporedbe, PMSG-ovi nisu bili dostupni u rasponu snaga 100 kW – 1 MW te zbog toga i skuplji što ih čini nepogodnima kao izbor za WEC. S nedavnim razvojem tehnologija i ustaljivanjem cijena materijala, nekolicina proizvođača je osmislila PMSG-ove u rasponu od 250 kW i na više pri optimalnom rasponu cijena što je dovelo do uvrštavanja PMSG-ova u nekoliko WEC tehnologija [13].

Zbog toga, DFIG-ovi nisu najbolja opcija za WEC-ove. Što se tiče prikladnosti na pučini, između IG-ova, SG-ova i PMSG-ova, PMSG-ovi su najlošiji izbor, ali imaju najveću energetsku učinkovitost i cijena im ulazi u optimalnom rasponu cijena. IG-ovi i SG-ovi imaju slično ponašanje.

3.5. Direktna pretvorba

Linearni generator je izravno spojen na vertikalni cilindar koji se pomiče gore-dolje s upadnim morskim valom. Ova topologija ne zahtjeva nikakav posredni mehanički sistem stoga, u usporedbi s rotacijskim generatorom, nije kompleksan. Slika 3.12. prikazuje primjer jednog takvog pretvornika. Postoje tri osnovne topologije linearnih generatora :

1. Linearni generator s permanentnim magnetom uzdužnog (longitudinalni) toka
2. Linearni generator s permanentnim magnetom promjenjive (varijabilne) reluktancije
3. Cjevasti linearni generator s permanentnim magnetom i zračnom jezgrom

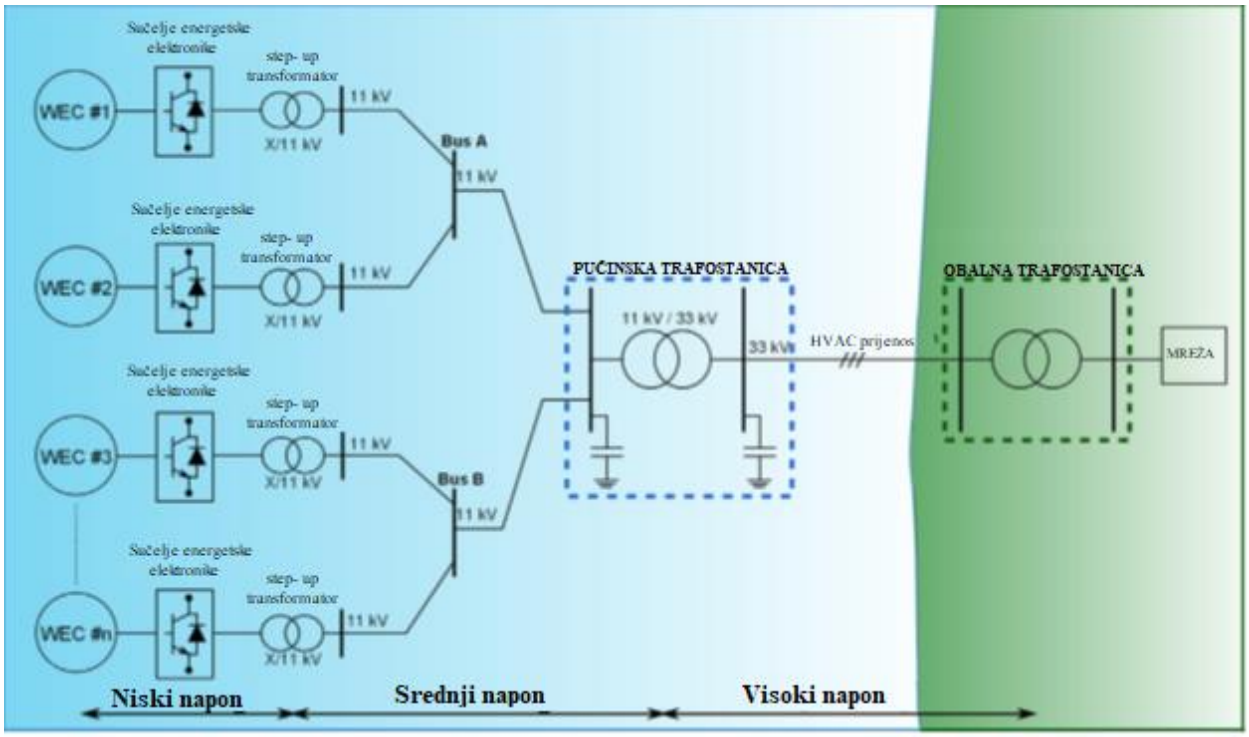


Slika 3.12. Konfiguracija linearnog generatora s permanentnim magnetom i mehanički sistem pretvorbe morskih valova u električnu snagu [7]

Spora brzina valova mora se translatirati u veliku snagu što zahtjeva veliku silu kako bi pretvornik reagirao. Ovo rezultira fizički velikim strukturama te zbog toga i velikom masom i visokim cijenama. Na primjer, da bi se pretvorio 30 kW snage, potrebno je najmanje 4 metričke tone sile generirane pretvornikom što rezultira u ogromnim veličinama WEC-ova.

3.6. Tercijarna faza pretvorba

Tercijarna faza je najbitnija faza PCC-a jer uključuje isporuku električne energije u mrežu. U postrojenjima na morske valove odvijaju se dvije razine pretvorbe napona, prikazano na slici 2.13. Energetski pretvarači upravljaju nepravilnostima koje uzrokuju valovi i nadoknađuju promjene brzine okretaja rotora generatora. Pretvorbe mogu biti DC/AC, DC/DC, AC/DC, AC/DC/AC i AC/AC, gdje AC stoji za izmjeničnu struju (*eng*. Alternateing Current),a DC za istosmjernu struju (*eng. Direct Current*), uz to je najčešća AC/DC/AC (back to back) pretvorba. Transformatori za povećanje napona (step-up transformatori) podižu razinu napona kako bi se postrojenja na morske valove spojila na pučinsku trafostanicu. Step-up transformatori, zajedno s energetskim pretvaračima čine osnovu tercijarne faze.



Slika 3.13. Jednolinijski dijagram HVAC farme [8]

U pučinskoj trafostanici, naponska razina se podiže kako bi se postrojenja spojila sa kopnenom trafostanicom uz što manje gubitke tijekom prijenosa. Moguća je primjena dva tipa prijenosa: Izmjeničnog (AC) visokog napona (*eng. High Voltage AC, HVAC*) i Istosmjernog (DC) visokog napona (*eng. High Voltage DC, HVDC*).

3.6.1. HVAC prijenos

To je najrasprostranjeniji pučinski prijenosni sistem. HVAC je poznata, stabilna i dokazana tehnologija kroz desetljeća. Transformatori nisu nužni ako su napon mreže i napon prijenosnog voda održavani na istoj razini, ovo se koristi kod malih postrojenja na morske valove u rasponu 30 – 36 kV [12,14]. HVAC koristi tri prijenosna podvodna kabela dok HVDC koristi dva. Stoga su gubitci veći u HVDC-u. Zbog svoje konstrukcije, prostorna (distribuirana) kapacitivnost HVAC-ovih podvodnih kabela je veća nego prostorna (distributivna) kapacitivnost nadzemnih kabela. Zbog ovoga i niže cijene za kraće udaljenosti (u usporedbi s HVDC prijenosom), duljina HVAC prijenosnih sustava za podvodne primjene smanjena je na do 50km. Prema [14], HVAC-ov maksimalni dostupni kapacitet na udaljenosti do 100km je oko 800MW za 400kV, 380MW za 220kV i 220MW za 132kV. To su loši slučajevi, zbog veličina trafostanica i cijene podvodnih kabela.

3.6.2. HVDC prijenos

Linijski komutirani pretvarači (*eng. Line comutated converters, LCC*) su tip HVDC-a koji koriste tiristore kao energetske ventile. Glavna prednost je što mogu prenositi na velike udaljenosti i također omogućavaju gotovo trenutnu kontrolu prijenosa. Zbog upravljačkog kuta tiristora struja je izvan faze s naponom. Ovi ispravljači imaju niski preklopni opseg frekvencija (50-60 Hz) i gubitke između 1 i 2%. To im je glavna mana. Ovaj prijenosni sustav uključuje i AC i DC filtere za umanjivanje velikog broja nižih harmonika koje generira LCC. Osim HVDC-LCC-a postoji još jedan tip HVDC prijenosa, a to je pretvarač napona izvora (*eng. Voltage Source Converter, VSC*) koji za preklapanje koristi IGBT (*eng. Insulated Gate Bipolar Tranzistor*) u frekvencijskom opsegu 1-2 kHz s puno manje distorzije nižih harmonika, u usporedi s LCC-om, ali s višim gubitcima (2-3%) u svakom pretvaraču. Ovo omogućuje potpunu aktivnu i reaktivnu kontrolu prijenosa električne energije na obje strane prijenosnog sustava. VSC pruža veću fleksibilnost u kontroli prijenosa u usporedbi s LCC-om te su njegove trafostanice jeftinije i manje od LCC-ovih. Te je sam VSC sustav popularniji izbor od LCC-a.

HVAC podvodni prijenos je ekonomično najbolja opcija za udaljenosti kraće od 50km, ali kada su prijenosne udaljenosti veće, HVDC-VSC sistem je najbolja alternativa.

4. PRORAČUN OČEKIVANE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA ODABRANE TEHNOLOGIJE ZA JADRANSKO MORE

Razvijeni su neki računalni programi za simuliranje i prognoziranje svojstava valova i za poboljšanje razlučivosti mreže kako bi se mogli primijeniti za specifične potrebe. Svakim prolaskom satelita, mjeri se visina vala, dok se brzina vjetra procjenjuje koristeći parametrički model. Dobiveni podatci provjeravaju se prema mjerenjima prikupljenim na vremenskim postajama i morskim bovama kako bi se adekvatno pribavili podatci visoke vremenske i sistemske razlučivost. Na primjer, koristeći softverski program WAVEWATCH III, razlučivosti 20 km sa 20 km, 10 km sa 10 km i 2 km sa 2 km su postignute za prognoziranje i simulaciju svojstava valova na Mediteranskom moru. Za Jadransko more, WorldWave atlasova (WWA) baza podataka sadrži podatke za 39 jednoliko raspoređenih lokacija. Za svaku lokaciju uzeto je deset parametara koji opisuju valove i dva parametra koja opisuju vjetar, danim u intervalima od šest sati (Tablica 4.1.).

Tablica 41. Parametri vala prema WWA [15].

Značajna visina vala	H_s [m]
Srednji smjer vala	ϑ[°]
Valni period, vrijeme između dva brijega istog vertikalnog dijela	T_p [s]
Srednji valni period / Energetski period	T_e [s]
Značajna visina vala vjetrovnog vala (wind wave)	H_{sw} [m]
Srednji smjer vjetrovnog vala	ϑ_w[°]
Srednji period vjetrovnog vala	T_{ew} [s]
Srednji period primarnog *swella*	T_{es} [s]
Značajna visina vala primarnog *swella*	H_{SS} [m]
Srednji smjer primarnog *swella*	ϑ_s [°]
Brzina vjetra na visini od 10m	V_{w10} [m/s]
Smjer vjetra na visini od 10m	ϑ_{w10} [°]

Dakle, svaka lokacija ima ukupno 34.460 izlaznih podataka. Kako bi se izračunao godišnji energetski potencijal na određenim lokacijama, potrebno je generirati dijagrame raspršenja valova. Dijagrami raspršenja valova predstavljaju matricu koja dijeli sva stanja mora na klase. Prema tome, svi izlazni podatci se trebaju organizirati i podijeliti u klase od H_s i T_e (klasu čini uređeni par H_s i T_e). Svaka klasa sadrži broj pojavljivanja te klase morskog stanja u razdoblju od 24 godine. Nadalje, za svako morsko stanje (*eng. sea state*), događaj p_{ij} izračunava se na temelju broja sati godišnje. Treba napomenuti da svaka klasa predstavlja određeni energetski spremnik. Svaki spremnik predstavlja gornju granicu specifične klase (npr. H_s od 1.5m predstavlja značajnu valnu visinu između 1 i 1.5m).

Tablica 4.2. . Dijagram raspršenja valova za razdoblje od rujna 1992 do siječnja 2016. na koordinatama 42.5°Sjever, 16.5°Istok [16].

Hs/Tp	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	∑
0.5	0	0	4934	3552	589	260	166	93	28	11	4	8	14	4	9663
1	0	0	1666	6815	3800	1114	326	103	68	29	8	3	0	1	13933
1.5	0	0	14	861	2616	1533	459	138	36	14	4	4	1	0	5680
2	0	0	0	20	666	1256	445	159	44	10	2	1	0	0	2603
2.5	0	0	0	0	36	500	393	128	54	13	0	0	0	0	1124
3	0	0	0	0	0	113	255	111	38	11	1	0	0	0	529
3.5	0	0	0	0	0	5	70	91	38	10	0	0	0	0	214
4	0	0	0	0	0	0	14	51	22	7	0	0	0	0	94
4.5	0	0	0	0	0	0	3	21	12	2	0	0	0	0	38
5	0	0	0	0	0	0	0	7	5	1	0	0	0	0	13
5.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	0	0	0	0	6
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
∑	0	0	6614	11248	7707	4781	2131	903	348	113	19	16	15	5	33900

Vidi se da za ovo razdoblje postoji ukupan broj mjerenja od 3390 i da je oko 70 % značajne visine vala manje od 1m, te iznosi 0,87 m.

Budući da proizvodnja energije određenih WEC-ova ovisi o distribuciji energije valova među morskim stanjima, procjena godišnje električne energije može se izračunati na sljedeći način:

$$P_e = \sum_{i=1}^{n_{T_e}} \sum_{j=1}^{n_{H_s}} p_{ij} P_{ij} \qquad (4\text{-}1)$$

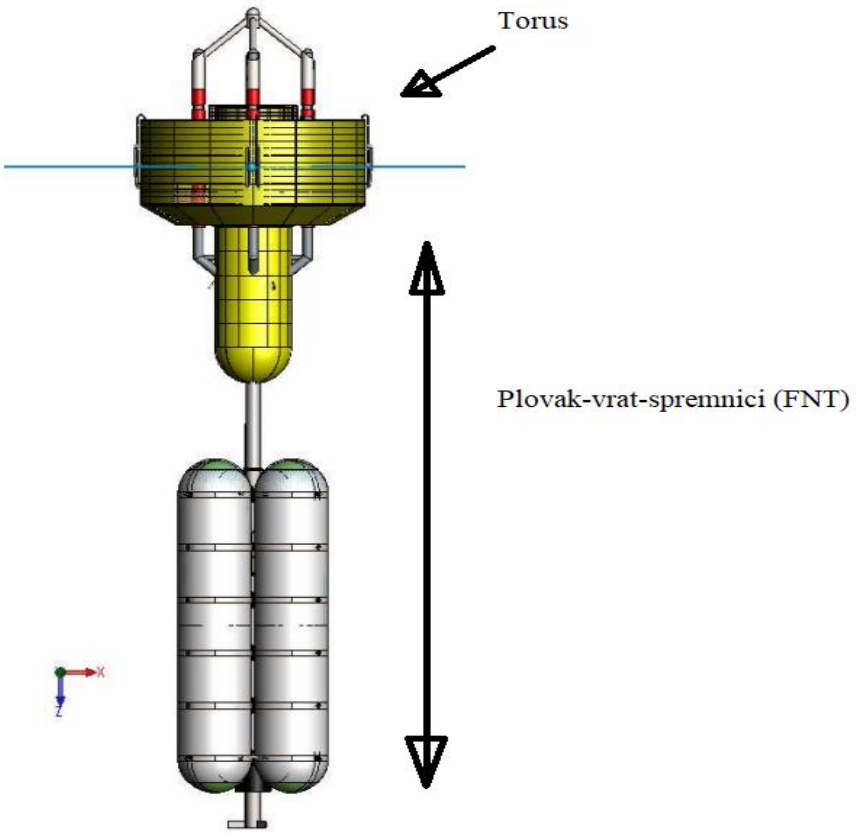
gdje je P_{ij} električna snaga određenog energetskog spremnika čije se vrijednosti nalaze u matricama snaga određenih WEC-ova.

Razmotrena su tri pučinska WEC-a za primjenu na Jadranskom moru, a to su Pontoon power converter (PPC) (slika 3.3.), Wavestar C6-15000 (slika 4.1) i Wavebob (slika 4.2.)

Slika 4.1. Izgled komercijalnog pretvornika Wavestar C6-1500 [17]

PPC je plutajući pretvarač koji se sastoji od hidrauličnih crpnih cilindara, turbine i generatora montiranih na balastiranu nosivu konstrukciju s opuštenim sidrištem pogodnim za širok raspon dubina vode i mnoge morske lokacije. Nazivna snaga PPC-a je 1,5-3,5 MW [5] . Wavestar C6-15000 ,nazivne snage 15 MW, opremljen je s 20 plutača, svaka je promjera 6 metara. Svaka individualna plutača montirana je na 12m dugačkoj čeličnoj ruci koja je spojena na glavnu cijev, sa svake strane glavne cijevi postavljeno je 10 ruku. Kada valovi podižu plutaču gore-dolje prenosi se snaga preko hidrauličnog cilindra do PTO-a koji prenosi energiju u električnu mrežu. Glavna cijev je spojena na dva podizača, svaki s jedne strane, koji održavaju stalnu visinu glavne cijevi kako bi ona ostala na produkcijskoj razini iznad površine mora i podižu glavnu strukturu i plutače na razinu olujne zaštite kada je to potrebno [18]. Wavebob je točkasti upijač, nazivne snage 1MW

, sastoji od dvije oscilirajuće strukture, torus i plovak-vrat-spremnik (*eng. Float-Neck-Tanks, FTN)*. Strukture kontrolira prigušni sistem koji reagira na predviđenu visinu vala, snagu vala i frekvenciju istog. Struktura spremnika (polupotopljeno tijelo) koristi 'uhvaćenu' morsku vodu kao većinu svoje inertne mase i to značajno smanjuje troškove pri izradi pretvornika. Linearno gibanje transformira se u rotacijsko preko zupčane letve koja je povezana sa reluktantnim sinkronim generatorom preko zupčastog prijenosa, koji služi za povećanje broja okretaja generatora [19].



Slika 4.2. shematski prikaz WaveBob pretvarača [19]

Njihove matrice snaga:

9

Hs [m]		Valni period Tp [s]															
Interval	Centar	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
0.0 - 0.5	0.25	0	0	0	51	141	238	308	308	352	370	367	355	355	349	330	316
0.5 - 1.0	0.75	0	0	124	336	658	982	1165	1242	1243	1210	1150	1090	1035	986	935	893
1.0 - 1.5	1.25	0	0	275	748	1459	2144	2490	2597	2549	2439	2293	2154	2029	1918	1814	1725
1.5 - 2.0	1.75	0	89	551	1495	2899	4012	4386	4388	4196	3930	3656	3411	3192	2998	2831	2684
2.0 - 2.5	2.25	0	145	895	2424	4665	6118	6461	6308	5935	5494	5082	4720	4404	4127	3886	3683
2.5 - 3.0	2.75	0	212	1308	3535	6757	8462	8713	8358	7766	7131	6572	6082	5663	5306	4980	4720
3.0 - 3.5	3.25	0	299	1846	4916	9230	11103	11189	10575	9729	8890	8165	7542	7008	6548	6139	5802
3.5 - 4.0	3.75	0	395	2438	6425	11895	13860	13742	12850	11743	10691	9793	9031	8377	7811	7316	6905
4.0 - 4.5	4.25	0	507	3126	8160	14913	15000	15000	15000	13838	12561	11476	10564	9783	9108	8521	8043
4.5 - 5.0	4.75	0	634	3912	10072	15000	15000	15000	15000	15000	14491	13217	12143	11228	10441	9760	9206

Slika 4.3. Matrica snage dana u kW pretvarača Wavestar C6-15000kW [20]

		Tp (s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs (m)	1	180	166	153	171	125	87	72	65	85	85	37	29	16
	1.5	223	195	157	148	261	192	223	139	155	155	74	67	46
	2	0	0	214	227	396	335	237	235	172	138	115	104	70
	2.5	0	0	0	440	598	514	379	342	204	169	142	128	95
	3	0	0	0	681	801	735	594	486	199	174	151	134	121
	3.5	0	0	0	904	1035	949	788	617	239	209	183	164	146
	4	0	0	0	1131	1269	1163	982	743	285	248	216	195	175
	4.5	0	0	0	1358	1488	1374	1187	869	330	287	250	225	201
	5	0	0	0	1585	1712	1585	1392	988	380	334	285	263	226
	5.5	0	0	0	1812	1937	1798	2138	1107	429	381	323	301	261
	6	0	0	0	2040	2162	2010	2884	1234	439	416	361	336	295
	6.5	0	0	0	2267	2386	2221	3143	1360	449	450	406	372	329
	7	0	0	0	2494	2611	2433	3619	1483	506	464	451	408	363

Slika 4.4. Matrica snage dana u kW pretvarača Pontoon power converter [6]

Hs (m) \ Tp (s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	6	11	19	25	30	44	50	53	44	34	22	20	17
1.5	13	25	43	55	68	90	102	92	91	66	65	45	37
2	24	45	65	100	121	153	175	151	122	126	87	61	58
2.5	0	65	104	141	191	179	243	255	190	181	135	99	83
3	0	96	137	205	244	357	293	353	260	248	184	137	120
3.5	0	0	192	254	291	431	385	424	314	285	239	222	172
4	0	0	256	366	403	551	536	531	473	420	289	268	179
4.5	0	0	327	418	574	678	708	665	509	415	386	244	249
5	0	0	358	514	658	824	828	618	638	512	452	384	333
5.5	0	0	0	610	774	880	936	905	805	603	456	397	311
6	0	0	0	711	952	974	1000	838	886	648	501	503	396
6.5	0	0	0	788	1000	1000	1000	979	1000	727	577	435	424
7	0	0	0	781	1000	1000	1000	1000	1000	959	748	574	472

Slika 4.5. Matrica snage dana u kW pretvarača Wavebob [6]

Povezivanjem dijagrama raspršenja valova (tablica 4.2.) i matrica snage pojedinih pretvarača (slika 4.2., slika 4.3. i slika 4.4.) dobiju se vrijednosti godišnje proizvodnje električne energije pa tako za PCC ona iznosi 4603 MWh, za Wavestar 82,33 GWh, a za Wavebob 894,25 MW.

Nakon izračuna vrijednosti godišnje električne energije P_e, prosječna snaga električne energije računa se kao:

$$P_{e,average} = \frac{P_e}{t} \tag{4-2}$$

gdje je t broj sati u godini, tj. 8760 sati.

Korisnost WEC-a obično se definira kroz faktor kapacitivnosti koji se definira kao:

$$C_f = \frac{P_{e,average}}{R_p} \times 100\% \tag{4-3}$$

gdje je R_p nazivna snaga pojedinih WEC-ova.

Primjenom formula (4-2) i (4-3) izrađuje se tablica dobivenih vrijednosti za oba pretvornika.

Tablica 4.2. Očekivane prosječne vrijednosti izlaznih snaga i faktora kapacitivnosti za pretvarače Pontoon power converter, Wavestar C6-2000 i Wavebob.

Tip pretvornika	$P_{e,average}$ [kW]	C_f [%]
PCC	525,45	14,51
Wavestar	9398,75	62,66
Wavebob	102,08	10,21

Iz tablice je vidljiva razlika između konceptualnih pretvarača (PCC i Wavebob) i komercijalnog (Wavestar). Te na temelju ove analize se može utvrditi da je Jadransko more, makar je zatvoreno s tri strane, pogodno za postrojenja na morske valove. S poboljšanjem postojeće ili inovacijom novih tehnologija pretvarača sa prilagodljivijim matricama snaga za ovakve uvjete dobit će se i veću učinkovitost.

5. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu prikazan je potencijal energije valova kao alternativa konvencijalnim tipovima energije pri pretvorbi u električnu energiju. Energija valova kao obnovljiv i ekološki prihvatljiv izvor energije ima teoretsku potencijalnu energiju od 29,500 TWh/godišnje. To zvuči vrlo obećavajuće, ali zbog niskih ulaganja i visokih troškova potrebno je privući privatne ulagače, infrastruktura na moru još nije dovoljno razvijena, te licenciranje i planiranje stvaraju dodatne administrativne troškove. Prema tome tehnologija postrojenja na morske valove nije toliko zastupljena kao ostali obnovljivi izvori električne energije. Nadalje pučinska postrojenja zahtijevaju podvodne podstanice (trafostanice) za povezivanje s kopnom što iziskuje dodatne troškove. Jedno od mogućih rješenja je simbioza, tj. zajednički rad sa solarnim postrojenjima i postrojenjima na vjetar na pučini s čime se dobiva integrirana mrežna infrastruktura na pučini što smanjuje troškove same infrastrukture. Isto tako, moguće je implementirati postrojenja na morske valove kao mikromreže za zajednice na nepristupačnim mjestima bez infrastrukture, te istovremeno mogu služiti i kao lukobrani (npr. Mighty Whale (OWC), zaljev Gokasho, na jugoistočnoj obali Japana).

Za Jadransko more, koje je zatvoreno kopnom sa tri strane, situacija je nepovoljnija zbog puno mirnijeg karaktera mora (tj. mali valovi). Tako su u radu uspoređena dva konceptualna pretvarača (PCC i Wavebob) i jedan komercijalni (Wavestar). Zaključeno je da konceptualni i dalje nisu isplativi, ali je tehnologija ipak uznapredovala i postoje već komercijalna postrojenja s dovoljno visokim stupnjem učinkovitost za Jadransko more. Već postoje planovi za integraciju vjetroelektrana na Wavestar postrojenja kao takva, što će dovesti do stabilnije i učinkovitije proizvodnje električne energije.

LITERATURA

[1] N. J. Madassery, „Design and layout of power conversion chain for a wave energy converter", 2017.

[2] T. Aderinto, H. Li, „Ocean Wave Energy Converters: Status and Challenges", MDPI, 2018.

[3] R. Pelc, R. M. Fujita, „Renewable energy from the ocean", Marine Policy, 26(6), str.471-479, 2002.

[4] L. H. Holthuijsen, „Waves in Oceanic and Coastal Waters", Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[5] Pontoon Power [online], dostupno na: https://www.pontoon.no [3.9.2021]

[6] S. Bozzi, G. Besio, G. Passoni, „Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis", Coastal Engineering, 136, str. 130-146, 2018.

[7] I. Lopez, J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez de Alegría, I. Kortabarria, „Rewview of wave energy technologies and necessary power-equipment", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013.

[8] Z. Liu, R. Zhang, H. Xiao, X. Wang, „A Survey of Power Take-off Systems of Ocean Wave Energy Converters", 2019. – not peer-reviewed

[9] B. Drew, A. R. Plummer, M. N. Sahinkaya, „A review of wave energy converter technology," , *IMechE Part A: J. Power and Energy*, sv. 223, 2009.

[10] M. Takao, T. Setoguchi, „Air turbines for wave energy conversion." , *Energy Conversion and Management*, sv. 47, stz. 1–10, 2012.

[11] D. O'Sullivan, D. Mollaghan, A. Blavette, R. Alcorn, „Dynamic characteristics of wave and tidal energy converters and a recommended structure for development of a generic model for grid connection.", *International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems*, 2010.

[12] R. Alcorn, D. O'Sullivan, „*Electrical Design for Ocean Wave and Tidal Energy Systems*", The Institution of Engineering and Technology, 2014.

[13] D. L. O'Sullivan, A. W. Lewis, „Generator selection and comparative performance in offshore oscillating water column ocean wave energy converters", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, sv. 26, br. 2, 2011.

[14] NB. Negra, J. Todorovic, T. Ackermann „Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms“ , Electric Power Systems Research, 2006
[15] A. Farkas, N. Degiuli, I. Martić, „Assessment of Offshore Wave Energy Potential in the Croatian Part of the Adriatic Sea and Comparison with Wind Energy Potential”, Energies an open access journal from MDPI, 2019.
[16] A.Farkas, J.Parunov, M. Katalinić. „Wave Statistics for the Middle Adriatic Sea“, 2016.
[17] http://www.faststuff.com/cleantech/wavestar-showing-way/3688 slika wavestara

[18] L. Marquis , M.M. Kramer, J. Kringelum, J.F. Chozas, N.E. Helstrup „Introduction of Wavestar Wave Energy Converters at the Danish offshore wind power plant Horns Rev 2” , 4th International Conference on Ocean Energy, Dublin, 2012.

[19] J. B. Frandsen, M. Doblaré, P. Rodriguez, „Preliminary technical assessment of the Wavebob energy converter concept“, 2012.

[20] Wavestar [online], dostupno na: http://wavestarenergy.com/projects [3.9.2021]

SAŽETAK

U današnje doba obnovljivih izvora energije veliki je fokus na solarnoj energiji i energiji vjetra dok se nešto manje ulaže u izvore kao što je energija morskih valova. Obnovljivi izvori energije su atraktivna alternativa fosilnim gorivima zbog toga što su neiscrpan i čist izvor energije tijekom rada. Energija morskih valova je globalno raspoloživ resurs koji se smatra jednim od tehnologija s najvećim potencijalnim razvojem od obnovljivih izvora energije. U završnom radu prikazana je podjela tehnologija za iskorištavanje energije valova. Za svaki tip pojedine tehnologije je navedeno jedan ili više primjera. Na kraju je izvršena usporedba učinkovitosti različitih tipova tehnologija valnih pretvarača

Ključne riječi: pretvarač, val, , energija, WEC

ABSTRACT

In this day and age of renewables, there is a big focus on solar and wind energy, while slightly less investment is made in sources such as sea wave energy. Renewables are an attractive alternative to fossil fuels because they are an inexhaustible and clean source of energy during operation. Marine wave energy is a globally available resource considered one of the technologies with the greatest potential development from renewable energy sources. The final paper presents the division of technologies for the exploitation of wave energy. For each type of individual technology, one or more examples are given. In the end, a comparison was made between the effectiveness of different types of wave converter technologies.

Key words: converter, wave, energy, WEC

ŽIVOTOPIS

Autor ovog završnog rada, Blaž Jozanović, je student Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Rođen 17.09.1998. u Zagrebu, osnovnu školu i srednju tehničku školu smjer Tehničar za električne strojeve s primijenjenim računalstvom završio je u Kutini. 2017. godine upisuje spomenuti fakultet, smjer elektrotehnika.

_____

Potpis autora