

Optimalan pogon postrojenja na morske valove u mikromreži otoka Visa

Jozanović, Blaž

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:047303>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-21**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**OPTIMALAN POGON POSTROJENJA NA MORSKE
VALOVE U MIKROMREŽI OTOKA VISA**

Diplomski rad

Blaž Jozanović

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 15.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime Pristupnika:	Blaž Jozanović
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1406, 07.10.2021.
OIB studenta:	06357444182
Mentor:	prof. dr. sc. Damir Šljivac
Sumentor:	dr. sc. Matej Žnidarec
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Marinko Stojkov
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Damir Šljivac
Član Povjerenstva 2:	Marina Dubravac, mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Optimalan pogon postrojenja na morske valove u mikromreži otoka Visa
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Na primjeru distributivne mreže otoka Visa izvršiti proračun utjecaja pogona postrojenja na morske valove u mikromreži koja se sastoji još i od fotonaponskih i baterijskih sustava a s ciljem optimizacije troškova proizvodnje električne energije.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	15.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 26.10.2023.

Ime i prezime studenta:

Blaž Jozanović

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1406, 07.10.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Optimalan pogon postrojenja na morske valove u mikromreži otoka Visa**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Damir Šljivac

i sumentora dr. sc. Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Cilj diplomskog rada	2
2. DEFINIRANJE ENERGIJE VALOVA I POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE.....	3
2.1. Energija valova.....	3
2.2. Postrojenja na morske valove	4
2.2.1. Klasifikacija WEC-ova prema udaljenosti od obale	4
2.2.2. Klasifikacija WEC-ova prema smjeru upadnog vala.....	5
2.2.3. Klasifikacija WEC-ova prema načinu rada.....	7
2.3. Vrste priključka WPF-a s elektroenergetskim sustavom.....	8
2.4. Utjecaj WPF distribuirane generacije na elektroenergetski sustav	10
2.4.1. Promjene u tokovima snage.....	11
2.4.2. Varijacije napona i kvaliteta električne energije.....	11
2.4.3. Preopterećenja i gubici	14
2.5. Mikromreža otoka Visa.....	14
3. METHODOLOGIJA I MODELI.....	15
3.1. Klima i energetski potencijal valova oko otoka Visa	15
3.2. Modeliranje postrojenja na morske valove	20
3.2.1. Wavestar	21
3.2.2. Wavebob.....	23
3.3. Modeliranje mikromreže otoka Visa.....	24
3.3.1. Simulacija mreže bez integrirane distribuirane proizvodnje.....	28
3.3.2. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom	31
3.3.3. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om na lokaciji 1	34
3.3.4. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om na lokaciji 2	38
3.3.5. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om i priležećim baterijskim spremnikom na lokaciji 1.....	41
3.3.6. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om i priležećim baterijskim spremnikom na lokaciji 2.....	44
4. EKONOMSKA ISPLATIVOST INTEGRACIJE WPF-A U MIKROMREŽU OTOKA VISA	47

4.1. Wavestar	48
4.2. Wavebob	49
4.3. Usporedba s troškovima povezivanja otoka s glavnim energetskom mrežom	51
5. ZAKLJUČAK.....	55
LITERATURA	57
DODATAK	60
SAŽETAK.....	64
ABSTRACT	65
PRIZNANJA.....	66
ŽIVOTOPIS.....	67

1. UVOD

Europski energetska pejzaž je pod utjecajem novonastalih geopolitičkih događaja, uključujući kontinuirani sukob u Ukrajini, što je dovelo do energetske krize. Ovisnost o tradicionalnim izvorima energije, poput fosilnih goriva i uvoznog prirodnog plina, izložila je europske zemlje mogućim prekidima u opskrbi i nestabilnostima cijena. Stoga postoji sve veće priznavanje važnosti diversifikacije izvora energije i jačanja energetske sigurnosti, prije svega putem uvođenja obnovljivih izvora energije, poput energije vjetra, geotermalne energije, solarne energije i, što je najvažnije za ovaj rad, energije valova.

Pretvorba energije valova odnosi se na hvatanje i pretvaranje energije prisutne u morskim i oceanskim valovima u upotrebljiv oblik energije. Energija valova je obnovljiv oblik energije koji koristi kinetičku energiju generiranu valovima dok se šire površinom vode. Uređaji koji pretvaraju energiju valova u upotrebljive oblike energije nazivaju se postrojenja na morske valove (engl. Wave Energy Converters ili skraćeno WEC). Energija valova dugo se smatrala izuzetno obećavajućom obnovljivom tehnologijom. Ističe se ne samo zbog obilnog energetskeg resursa, već i zbog njegove izvanredne pouzdanosti u usporedbi s mnogim drugim obnovljivim izvorima energije. Energija valova može se iskorištavati na određenom mjestu do 90 posto vremena, dok su solarna i vjetroenergija dostupne samo 20-30 posto vremena [1]. Razvoj postrojenja na morske valove doživjelo je velik napredak u posljednjem desetljeću, a postoji mnogo koncepata za različita postrojenja za pretvaranje energije valova, pri čemu nekoliko njih pokazuje potencijal za ekonomski održivu proizvodnju električne energije, kao što je CorePower Oceans C4, njihov prvi komercijalni WEC. Kako je izjavio Patrik Möller, suosnivač i izvršni direktor: "CorePower C4, snage 300 kW, predstavlja najkompaktnije postrojenje na morske valove na svijetu s obzirom na izlaznu snagu. Snažna i lagana konstrukcija omogućuje brzu proizvodnju u velikim količinama." [2]. Također je izjavio da je modularno i može se koristiti za stvaranje farmi energije valova: "Tehnologija je dizajnirana i isporučuje se kao CorPack klasteri snage 10-20 MW, čineći temelj budućih velikih valnih farmi." [2]. Potencijal energije valova postoji uz svaku obalu, što ju čini posebno zanimljivim za izolirane zajednice, kao što su otočne zajednice. Primjerice, otok Vis je najudaljeniji značajnije naseljeni otok na hrvatskoj obali koji je povezan s glavnom električnom mrežom i velika je turistička atrakcija tijekom ljetnih razdoblja, što donosi visoku potrošnju energije u tom razdoblju. Te ga to čini izvedivom opcijom za integraciju valnih farmi.

Ovaj diplomski rad ima za cilj istražiti optimalno djelovanje postrojenja na morske valove u mikromreži otoka Visa, smještenog u vodama Jadranskog mora. Mikromreža, koja se sastoji od lokalnih sustava za proizvodnju energije, skladištenje i distribuciju, pruža priliku za integraciju energije valova u postojeću energetska infrastrukturu otoka, poboljšavajući njegovu energetska stabilnost i potičući veću energetska autonomiju.

Glavni cilj ovog istraživanja je razviti optimiziranu operativnu strategiju za postrojenja na morske valove u mikromreži, uzimajući u obzir različite čimbenike poput uvjeta na moru, obrasci potražnje energije, već postojeći distribuirani sustavi za proizvodnju energije i systemska ograničenja. Maksimalnim iskorištavanjem energije valova i osiguravanjem učinkovitog upravljanja energijom, predložena operativna strategija trebala bi ciljati na poboljšanje ukupne izvedbe, stabilnosti i pouzdanosti mikromreže te postizanje gotovo nulte razmjene energije s glavnom električnom mrežom na kopnu.

1.1. Cilj diplomskog rada

Cilj ove magistarske teze je istražiti optimalno djelovanje postrojenja na morske valove u mikromreži otoka Visa. Kroz multidisciplinarni pristup koji obuhvaća tehničke i ekonomske aspekte, istraživanje teži doprinijeti napretku prakse obnovljive energije i pružiti praktična rješenja za održivi razvoj otočnih zajednica.

Za postizanje ovih ciljeva, istraživanje će koristiti osnovne tehnike optimizacije, modeliranja sustava i alate za simulaciju. Analiza će obuhvatiti procjenu tehno-ekonomske isplativosti, ocjenu performansi sustava pod različitim operativnim scenarijima i razmatranje integracije tehnologija za pohranu energije kako bi se ublažila promjenjiva priroda energije valova. Nadalje, ekonomska održivost integracije energije valova procijenit će se kroz analizu troškova i koristi te usporedbu s drugim metodama proizvodnje obnovljive energije.

2. DEFINIRANJE ENERGIJE VALOVA I POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE

2.1. Energija valova

Klima morskih valova na bilo kojoj lokaciji sastoji se od različitih valnih polja, uključujući vjetrovne valove i dugotrajne valove (swells). Prosječna gustoća energije po jediničnoj horizontalnoj površini izračunava se koristeći formulu [3]:

$$E = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 \quad (2-1)$$

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

$$c_g = \frac{1}{4\pi} g T_e \quad (2-2)$$

Stoga se snaga valova po jedinici duljine valne fronte dobiva kao produkt prosječne gustoće energije i grupe brzine transporta energije i definira se kao:

$$P = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T_e \quad (2-3)$$

gdje ρ predstavlja gustoću morske vode, g je gravitacijsko ubrzanje, H_s je značajna visina valova, a T_e je energetska period vala. Iz jednadžbe (2-3), jasno je da visina i period valova koji propagiraju određuju dostupnu snagu valova na određenoj lokaciji. Karakteristike valova značajno su podložne promjenama u batimetriji od otvorenog mora do obalnih područja [3]. Kroz dodatnu formulaciju koju su razvili istraživači u [4] značajna valna visina i energetska period vala mogu se dobiti iz spektra snage valova $S(\omega)$ koristeći spektralne momente m_n

$$m_n = \int_0^\infty S(\omega) \omega^n d\omega \quad (2-4)$$

gdje je ω kutna valna frekvencija. Značajna valna visina i energetska period vala računaju se kao:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2-5)$$

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2-6)$$

Nadalje, duž hrvatske obale, potencijal snage valova procijenjen je prema [5], pri čemu je optimiziran JONSWAP spektar valova za Jadransko more na sljedeći način:

$$S(\omega) = 0.8626 \frac{5 H_s^2 \omega_m^4}{16 \omega^5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right] 1.78 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega - \omega_m}{\sigma \omega} \right)^2 \right] \quad (2-7)$$

gdje $\omega_m = 0.52 + \frac{1.4}{H_s + 0.7}$ predstavlja modalnu frekvenciju i $\sigma \left\{ \begin{array}{l} \sigma_a = 0.06 \text{ for } \omega \leq \omega_m \\ \sigma_b = 0.08 \text{ for } \omega > \omega_m \end{array} \right.$ je mjera spektralne širine od spektralnog vrha.

Uzimajući u obzir JONSWAP spektar valova za Jadransko more, T_e se može procijeniti na temelju vršnog perioda valova T_p kako slijedi:

$$T_e = \alpha T_p \quad (2-8)$$

gdje koeficijent α ovisi o obliku valnog spektra i za ovaj slučaj odgovara $\alpha = 0.8626$.

2.2. Postrojenja na morske valove

Kako je navedeno u odjeljku 2.1, kako bismo izvukli energiju iz valova i pretvorili je u električnu energiju, potrebni su posebni pretvarači nazvani postrojenja na morske valove (WECs). WEC-ovi se razlikuju ne samo po obliku i veličini, već i po vrsti materijala korištenih u njihovoj izgradnji, njihovom ekološkom utjecaju, učinkovitosti lanca pretvorbe i mnogim drugim karakteristikama. WEC-ovi se mogu kategorizirati prema metodi hvatanja valova ili načinu rada. Također se mogu klasificirati prema dubini vode, odnosno udaljenosti od obale na kojoj se nalaze.

2.2.1. Klasifikacija WEC-ova prema udaljenosti od obale

Ova podjela je najosnovnija klasifikacija postrojenja na morske valove u kojoj se WEC-ovi mogu podijeliti na obalna postrojenja (*eng. Onshore*), priobalna postrojenja (*eng. Nearshore*) i postrojenja na otvorenom moru (*eng. Offshore*). Glavne karakteristike obalnih postrojenja uključuju jednostavno održavanje i instalaciju jer im ne treba sidrenje. Obično se postavljaju na valobrane, brane i fiksne litice, koristeći pliće vode i nižu energiju valova blizu obale. Međutim, potencijalni utjecaj na obalni krajolik i geologiju mora se uzeti u obzir u dizajnu, što ograničava njihovu primjenu.

Priobalna postrojenja smještena su u plitkim vodama, obično na dubinama od 10 do 25 metara, što je obično manje od četvrtine valne duljine na toj lokaciji. Mogu biti pričvršćeni za morsko dno, ali moraju imati dovoljno čvrste strukture koje će izdržati udare valova. Plitke vode nameću ograničenja na iskorištavanje energije, ali postoji smanjen rizik od ekstremnih oštećenja uzrokovanih udarima valova na postrojenja.

Postrojenja na otvorenom moru nalaze se na dubinama od 40 metara ili više. Imaju veći potencijal za prikupljanje energije zbog većih valova i većeg energetskeg sadržaja u njima. Postrojenja moraju biti robusna kako bi izdržala ekstremne uvjete, što čini plutajuća postrojenja optimalnim izborom. Plutajuća postrojenja sidre se za morsko dno, dugački kablovi su potrebni za prijenos generirane električne energije do obalne mreže, i također, dinamički kablovi od uređaja do morskog dna, što je i dalje izazovan inženjerski zadatak. [1], [6].

2.2.2. Klasifikacija WEC-ova prema smjeru upadnog vala

Smjer upadnog vala odnosi se na smjer iz kojeg valovi prilaze ili propagiraju prema određenoj točki ili lokaciji, i na temelju toga postrojenja na morske valove klasificiramo kao prigušnike (*eng. attenuator*), točkaste upijače (*eng. point absorber*) i završnike (*eng. terminator*).



Slika 2.1 Pelamis P1 – primjer prigušnika. Reproducirano uz dopuštenje od [7]

Prigušnici rade kada incidentni valovi putuju duž pretvarača. Slika 2.1 prikazuje Pelamis kao primjer prigušnika. Val stvara relativno kretanje između sekcija, a hidraulička pumpa gura visokotlačno ulje kroz hidraulički motor, koji pokreće električni generator [7]. Koristi samo dio energije valova, što mu omogućava preživljavanje oluja.



Slika 2.2 CorePower Ocean C4 – primjer točkastog upijača. Reproducirano uz dopuštenje od [5]

Ako je postrojenje na morske valove manje od polovine duljine vala između dvaju uzastopnih valova naziva se točkasti upijač. Slika 2.2 ilustrira primjer točkastog upijača. Smjer incidentnih valova na postrojenje nije bitan zbog njegovog kompaktnog dizajna. Radi se o malim plutajućim bovama koje mogu ili plutati na površini vode ili biti potopljene, ovisno o razlikama u tlaku.

Završnici su suprotni od prigušnika jer leže okomito na upadne valove, čime zaustavljaju daljnje propagiranje tog vala ili njegovog dijela. Primjer završnika je WaveDragon (Slika 2.3). Djelomično potopljeno postrojenje na morske valove koje akumulira vodu u poluzatvorenu komoru kroz otvor koja se nalazi iznad razine vode. Kako se tlak vode povećava, gura vodu kroz turbinu na vrhu uređaja. Završnici mogu biti plutajuće ili fiksne instalacije.

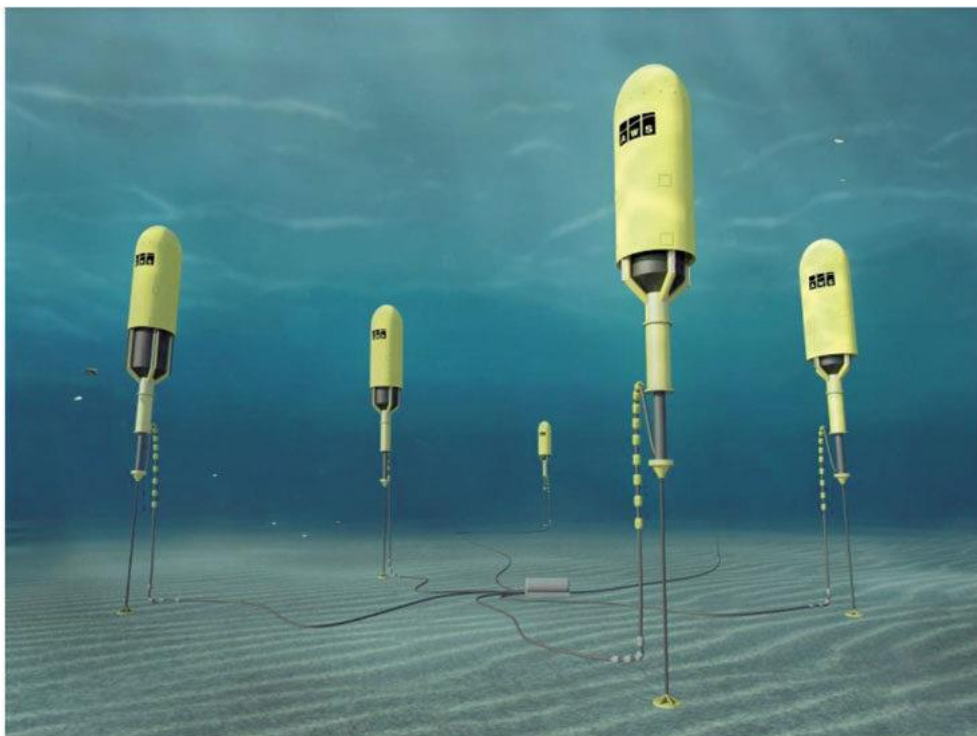


Slika 2.3 WaveDragon – primjer završnika. Reproducirano uz dopuštenje od [8]

2.2.3. Klasifikacija WEC-ova prema načinu rada

U predstojećem odjeljku opisani su najistaknutiji principi WEC-ova.

Način rada razlike tlakova (*eng. Pressure differential*): Postrojenja koja pripadaju ovoj kategoriji mogu se podijeliti na dvije podkategorije: Postrojenja koja rade na principu Arhimedovog zakona, kao što je Archimedes Wave Swing (AWS) (Slika 2.4), i postrojenja s oscilirajućim vodenim stupcem (*eng. Oscillating water column, OWC*)



Slika 2.4 AWS – primjer načina rada razlike tlakova. Reproducirano uz dopuštenje od [9]

AWS je potopljeni točkasti upijač tipično smješten u priobalju i pričvršćen za morsko dno. Koristi razliku tlakova generiranu između brijega i dola vala preko samog postrojenja. Kada brijeg vala prelazi preko postrojenja tlak vode komprimira zrak unutar postrojenja i pomiče ga prema dolje, ako je dol vala iznad postrojenja tlak vode se smanjuje i pretvornik se pomiče gore (Slika 2.4).

Oscilirajući vodeni stupac, obično smješten blizu obale, ali danas ih se može koristiti kao plutajuće strukture na otvorenim morima, radi na sličnom principu kao i AWS. Koristi polu-potopljenu komoru s otvorenim dnom, klipno gibanje valova raste i snižava razinu vode unutar komore, čime se pomiče unutarnji volumen zraka unutar komore. Taj protok zraka pogoni turbinu koja se okreće uvijek u istom smjeru iako je sam protok zraka dvosmjernan [10].

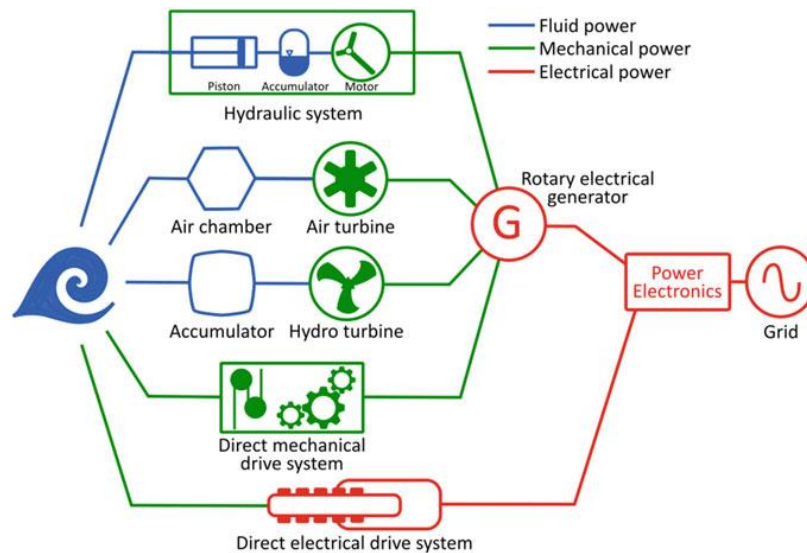
Način rada oscilirajućeg tijela (*eng. Oscillating bodies*): Ovi uređaji temelje se na principu plutajuće ili za dno fiksirane strukture koju pogone valovi. Iskoristive oscilatorne kretanje mogu biti vertikalne (uzdizanje), horizontalne (udari, *eng. surge*), pod nagibom (*eng. pitch*) ili kombinacija istih. Povrh toga, postrojenja su pogonjena apsolutnim kretanjem plutače u odnosu na vanjsku fiksnu referencu ili relativnim kretanjem dvaju ili više plutajućih tijela. [11].

Preljevni način rada (*eng. Overtopping*): Ovi uređaji dizajnirani su za iskorištavanje potencijalne, kinetičke ili obje vrste energije valova. Preljevници (*eng. Overtopping devices*) imaju rezervoar vode smješten iznad razine mora koji "tjera" vodu iz rezervoara kroz turbine natrag u more. [11].

Udarni način rada: Ovi uređaji su orijentirani okomito na smjer širenja valova i mogu biti zglobne (artikulirane) ili fleksibilne strukture [11]. Postrojenja na principu oscilirajućih valnih udara (*eng. Oscillating Surge Wave Energy Converters, OSWECs*) se također ubrajaju u ovu skupinu i rade na principu njihanja naprijed – nazad zbog udara vala.

2.3. Vrste priključka WPF-a s elektroenergetskim sustavom

Valovne farme (*eng. Wave power farms, WPF*) mogu se priključiti na mrežu na različite načine, postoji izravno povezivanje s mrežom, neizravno povezivanje koje se postiže putem energetske elektronike (to može biti potpuno ili djelomično povezivanje putem energetske elektronike) te modularno (distribuirano) elektroničko sučelje koje, u ovom kontekstu, povezuje nekoliko generatora koji su spojeni na istu lokalnu mrežu putem pretvarača električne energije. Ako takvi uređaji pripadaju istom vlasniku, njihov rad može biti usklađen na način koji omogućuje postizanje određenih koristi, na primjer, reguliranje lokalne razine napona.



Slika 2.5 Put pretvorbe energije kroz WEC i spoj na mrežu. Reproducirano uz dopuštenje od [12]

Slika 2.5, uz raspravu u potpoglavlju 2.2, ističe raznolikost tehnika dostupnih za iskorištavanje energije valova. Očituju se razlike u dizajnu generatora, pokrivajući i različite vrste turbina poput Wells-ove, impulsne te propelerne turbine. Izbor vrste turbine ovisi o faktorima kao što su snaga valova i potrebna brzina rotacije za optimalan rad generatora. Nadalje, uključivanje akumulacijskih bazena i rezervoara vode također je nešto što se treba uzeti u obzir kod odabira turbine.

Važno je napomenuti da se, u većini slučajeva, za povezivanje postrojenja na morske valove, s električnom mrežom koriste elektronički uređaji ili transformatori energije, po mogućnosti oboje. Njihova uloga je optimizacija učinkovitosti prijenosa energije na mrežu i kontrola prijenosa energije kako bi se zadovoljili uvjeti elektroenergetskih mreža.

Općenito, vrsta povezivanja valne elektrane ima utjecaj na:

- Tokove snage
- Kvalitetu energije

Električni uvjeti unutar mreže obuhvaćaju tokove snaga, strujna opterećenja, gubitke, naponske prilike, regulaciju, struje kratkog spoja i stabilnost sustava. Kvaliteta električne energije koja se generira (injektira u mrežu) iz elektrane (distribuirani izvor) uključuje zahtjev za određenim standardima kvalitete koje postavlja operator distribucijskog ili prijenosnog sustava, kako je definirano normom HRN EN 50160 u Hrvatskoj i EU normama (Tablica 2.1).

- Povratni utjecaj kvalitete električne energije iz mreže na valnu farmu i pouzdanost proizvodnje električne energije

Recipročni utjecaj kvalitete električne energije iz mreže na valnu farmu i pouzdanost proizvodnje električne energije otkriva različite tehničke osjetljivosti na događaje uzrokovane narušenom kvalitetom električne energije u mreži (varijacije napona, prelazne pojave, harmonijska distorzija, treperenje i druge).[13], [14].

- Učinkovitost proizvodnje električne energije

Učinkovitost proizvodnje električne energije utjecana ne samo tehnologijom priključenja i odabirom proizvođača, već i nominalnom snagom i upravljačkom tehnologijom (kao što su modularni elektronički pretvarači snage u sustavima koji rezultiraju većom učinkovitošću u usporedbi s pojedinačnim pretvaračima visoke snage).

- LCOE

Lokalizirani troškovi proizvodnje električne energije (LCOE) utjecani učinkovitošću proizvodnje i troškovima investicija, održavanja i operativnih troškova tijekom cijelog ciklusa životnog vijeka sustava, pri čemu tehnološka robusnost igra značajnu ulogu.

- Složenost i sposobnosti kontrole (regulacije) sustava WPF-ova.

Osim toga, složenost i potencijal kontrole (regulacije) elektrane (distribuirani izvor električne energije) ključni su aspekti. Na primjer, potpuna veza s elektroničkim pretvaračima omogućuje optimalno i neovisno upravljanje aktivnom i reaktivnom snagom injektiranom u mrežu [13], [14].

2.4. Utjecaj WPF distribuirane generacije na elektroenergetski sustav

Iako se distribuirana proizvodnja potiče i ima veliku važnost, ona nije bez izazova. Integracija distribuirane proizvodnje može potencijalno uvesti poremećaje u električni sustav, što zahtijeva dodatne financijske investicije kako bi se riješili ti problemi. Utjecaj ovisi o početnim uvjetima mreže i kapacitetu mreže za smještaj(*eng. Hosting capacity*), pri čemu se hosting capacity distribucijske mreže odnosi na njezinu sposobnost da primi određenu količinu energije iz distribuirane proizvodnje, a da ne premaši operativne granice ili ograničenja sustava. To se može definirati kao maksimalna količina energije koju distribucijska mreža može sigurno integrirati iz DG na točki zajedničkog spoja, a da ne uzrokuje povrede ili poremećaje u radu sustava.

Mogući utjecaji WPF generacije na elektroenergetski sustav su [14]:

- Promjene u tokovima snage tj. umjesto da je pasivna, mreža postaje aktivna
- Varijacije magnitude napona
- Preopterećenja i gubici
- Poremećaji kvalitete električne energije

2.4.1. Promjene u tokovima snage

Integracija WPF-a u elektroenergetsku mrežu rezultira promjenama u tokovima snage, što znači da mreža postaje aktivna umjesto pasivne. Pasivnu mrežu karakterizira unidirekcionalni tok energije koja potječe od izvora i usmjerava se prema potrošačima. S druge strane, aktivna mreža predstavlja dinamički sustav koji može mijenjati smjer protoka energije, povećavajući ili smanjujući količinu prenesene energije. Povećanje protoka energije događa se kada postoji povećanje lokalne proizvodnje energije dok potrošnja ostaje konstantna ili se smanjuje. Suprotno tome, smanjenje vrijednosti protoka energije može se dogoditi kada je distribuirana proizvodnja blizu potrošača. Na temelju toga, može se zaključiti da se protok energije određuje lokalnom razlikom između trenutne potražnje i trenutne opskrbe energijom. Na temelju ovog razumijevanja, možemo zaključiti da maksimalna proizvodnja energije iz WPF-a treba biti održana ispod zbroja minimalne potrošnje i najvećeg dopuštenog toka snage kroz distribucijsku mrežu. Time se osigurava da nema preopterećenja u „uzvodnom“ dijelu mreže.

2.4.2. Varijacije napona i kvaliteta električne energije

Potencijalni učinci integracije valnih farmi moraju se pažljivo razmotriti. Kao rezultat toga, postoje ograničenja za maksimalni broj distribuiranih izvora, posebno postrojenja na morske valove (WECs), i maksimalni kapacitet snage koji se može ugraditi u WPF. Ograničenja se nameću na integraciju obnovljivih izvora energije zbog promjena u naponima između komponenata mreže, osobito u slučajevima znatnog porasta napona. Vjerojatnost porasta napona ovisi o varijablama poput izlazne snage distribuiranog generatora ili izvora i njegove lokacije.

Prilikom povezivanja generatora na distribucijsku mrežu dolazi do povećanja napona na terminalima generatora. Proporcionalno povećanje napona može se procijeniti pomoću sljedećeg izraza:

$$\Delta u_{gen} = \begin{cases} L \cdot \frac{R \cdot P_{gen}}{U_{nom}^2}, & L \leq L_{gen} \\ L_{gen} \cdot \frac{R \cdot P_{gen}}{U_{nom}^2}, & L \geq L_{gen} \end{cases} \quad (2-8)$$

gdje R predstavlja otpor izvora na sabirnicama generatora, P_{gen} označava ubrizganu, tj. injektiranu, radnu snagu generatora, a U_{nom} označava nominalni napon. L_{gen} predstavlja relativnu udaljenost valovne farme (WPF) od glavnih terminala i vrijedi $0 < L_{gen} < 1$ pri čemu $L = 0$ predstavlja početak dovodnika (*eng. feeder*) i $L = 1$ predstavlja njegov kraj. Ova aproksimacija se primjenjuje u praktičnim scenarijima na razini distribucije.

Varijacije napona, posebno porasti napona, predstavljaju značajnije ograničenje za potencijalni nivo integracije nego tokovi snage. Zanimljivo je da se najizazovnije situacije pojavljuju tijekom razdoblja minimalne potrošnje, a ne tijekom vršne potražnje.

Da bi se povećao stupanj integracije, na varijacije napona može se utjecati sljedećim metodama [14]:

- Promjena preklopki transformatora s „Line-Drop“ kompenzacijom
- Izgradnja novih vodova/transformatora ili povećanje presjeka vodova/snage transformatora
- Regulacija aktivnom i reaktivnom snagom izlaza WPF-a
- Kombinacija više metoda

Valja napomenuti da su dopušteni limiti za povećanje ili smanjenje napona definirani europskim standardom EN 50160. Taj standard definira i opisuje bitne karakteristike opskrbnog napona na točki isporuke potrošačima u javnim niskonaponskim, sredjenaponskim (Tablica 2.1), i visokonaponskim mrežama u uvjetima normalnog rada. Također se definira što treba uzeti u obzir u vezi s kvalitetom napona prilikom implementacije WPF-a u distribucijsku mrežu.

Integracija WPF pruža benefite u vezi nekih smetnji kao što su as fluktuacije napona, padovi napona i harmonici. Naponski izvor u distribucijskom sustavu čini mrežu otpornijom i umanjuje smetnje. Aktivnim upravljanjem protokom reaktivne snage između farme i mreže moguće je regulirati napon na sabirnicama generatora. To je izvedivo kada se koriste sinkroni strojevi ili generatori posredno spojeni energetsom elektronikom. Osim toga, upravljanjem protokom aktivne snage mogu se prigušiti padovi i fluktuacije napona. Korištenjem naprednih kontrola na modernim pretvaračima elektronike snage, harmonička distorzija može se umanjiti

ili jednostavno kompenziranjem emitiranja harmonika nizvodno upotrebom otvorenog regulacijskog sustava, ili aktivnim korištenjem rezonantne frekvencije harmonika za njihovo umanjenje.[14].

Tablica 2.1 Granice definirane po EN 50160 (srednji napon)

Pojava u opskrbnom naponu	Dozvoljene granice	Mjerni intervali	Mjerni period	Dozvoljeni postotak				
Mrežna frekvencija	50 Hz \pm 1%	10 s	1 tjedan	99.5 %				
	50 Hz +4% / -6%			100%				
Spore promjene napona	$U_n \pm 10\%$	10 min	1 tjedan	99 %				
	$U_n \pm 15\%$			100%				
Brze promjene napona	5 %	10 ms	N/A	100 %				
	Max. 10 %							
Flicker	$Plt < 1$	2 h	1 tjedan	95 %				
Naponski propadi (sags) (<1 min)	10 do 1000 puta godišnje (90 % $> U_n > 1\%$)	10 ms	1 godina	100 %				
Kratki prekidi (< 3 min)	10 do 100 puta godišnje ($U_n < 1\%$)	10 ms	1 godina	100 %				
Slučajni, dugi prekidi (> 3 min)	10 do 50 puta godišnje ($U_n < 1\%$)	10 ms	1 godina	100 %				
Privremeni prenaponi (line-to-ground)	Uglavnom < 1.5 kV	10 ms	N/A	100 %				
Transientni prenaponi (line-to-ground)	Uglavnom < 6 kV	N/A	N/A	100 %				
Nesimetrija napona	0 - 2 %	10 min	1 tjedan	95 %				
Harmonici	8 % totalna harmonička distorzija (THD)		10 min	1 tjedan	95 %			
	Parni/ne višekratnici broja 3	Neparni višekratnici broja 3						
	5 6.0 %	2 2.0 %						
	7 5.0 %	3 5.0 %						
	11 3.5 %	4 1.0 %						
	13 3.0 %	9 1.5 %						
	17 2.0 %	Ostalo:						
	19 1.5 %	6–24 0.5 %						
	23 1.5 %							
	25 1.5 %							
	Interharmonici	$< 2\%$				10 min	N/A	N/A
	Signalni naponi	$< 10\% U_n$				3 s	1 dan	99 %

2.4.3. Preopterećenja i gubici

Pri dizajniranju elektroenergetske mreže, posebno elektroenergetskih vodova i zaštitnih elemenata, termička izdržljivost komponenti je ključni aspekt koji treba razmotriti. To ovisi ne samo o protocima snage kroz komponente i, posljedično, električnim strujama, već i o uvjetima u okolini, kao što su temperatura zraka, snijeg, kiša, vjetar, sunčeva zračenja itd. Stoga se posebna pažnja posvećuje prilikom integracije WEC-ova u elektroenergetsku mrežu jer se događaju određene promjene u mreži, kao što su promjene u vrijednosti struje i promjene u vrijednostima kratkog spoja [14]. Elektroenergetski vodovi i kablovi obično su predimenzionirani u pogledu termičkih granica, posebno u mrežama do 20 kV. Razlog tome je što su gubici snage značajno niži u vodovima i kablovima većeg presjeka, a kako bi se održao napon unutar granica za potrošače, naponski padovi moraju biti ograničeni, što zahtijeva veći presjek voda nego što termička granica zahtijeva.[13]. Kako bi se ograničilo preopterećenje i gubici na određenim elementima mreže i povećao kapacitet integracije WEC-ova, postoje metode za ublažavanje ovih problema [14]:

- Povećanje sposobnosti opterećenja elektroenergetskih vodova/kablova, dinamička sposobnost opterećenja i izgradnja novih elektroenergetskih vodova/kablova
- Dinamička longitudinalna i transversna kompenzacija
- Sistemi upravljanja energijom
- Sustavi za potražnju i pohranu energije
- Rekonfiguracija i poboljšanje sustava zaštite

2.5. Mikromreža otoka Visa

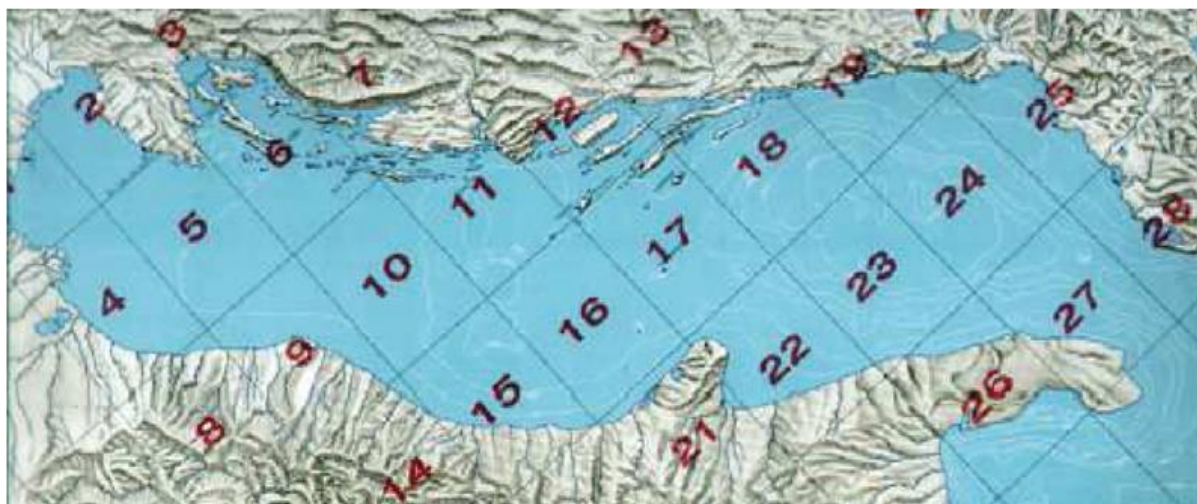
Mikromreža otoka Visa opskrbljuje se putem dva kabela, konkretno "KK Točila 35kV" i "KK Stenjalo 35kV," koji uspostavljaju vezu između trafostanica "TS Stari Grad 110/35kV" i "TS Hvar 35/10kV" smještenih na susjednom otoku Hvaru te trafostanice "TS Vis 35/10kV" na otoku Visu. Spomenuta trafostanica na otoku Visu služi kao središnje distribucijsko mjesto za isporučenu energiju. Unutar mikromreže energija se distribuira putem mreže međusobno povezanih dalekovoda, ukupno tri glavne rute i njihovih podružnica. Ovi dalekovodi zatim se povezuju s 54 transformatorske stanice koje povezuju mrežu srednjeg napona s mrežom niskog napona.

3. METODOLOGIJA I MODELI

Ovaj odjeljak pruža objašnjenje alata i pretpostavki korištenih za postizanje ciljeva ovog diplomskog rada. Prvo će lokacije i stanje mora biti razmotrene i raspravljene. Zatim, pruža se detaljno objašnjenje odabranih postrojenja i prilagodbe matrice snage, a na kraju će biti razmotrena modelirana mreža i studije slučaja.

3.1. Klima i energetski potencijal valova oko otoka Visa

Klima valova Jadranskog mora uglavnom je pod utjecajem njegove geografske lokacije i okolne topografije. Smješteno u sjevernom i središnjem dijelu Sredozemnog mora, povezano je s većim tijelom vode preko Otrantskih vrata na jugoistoku. Veći dio Jadranskog mora karakterizira mediteranski tip klime.



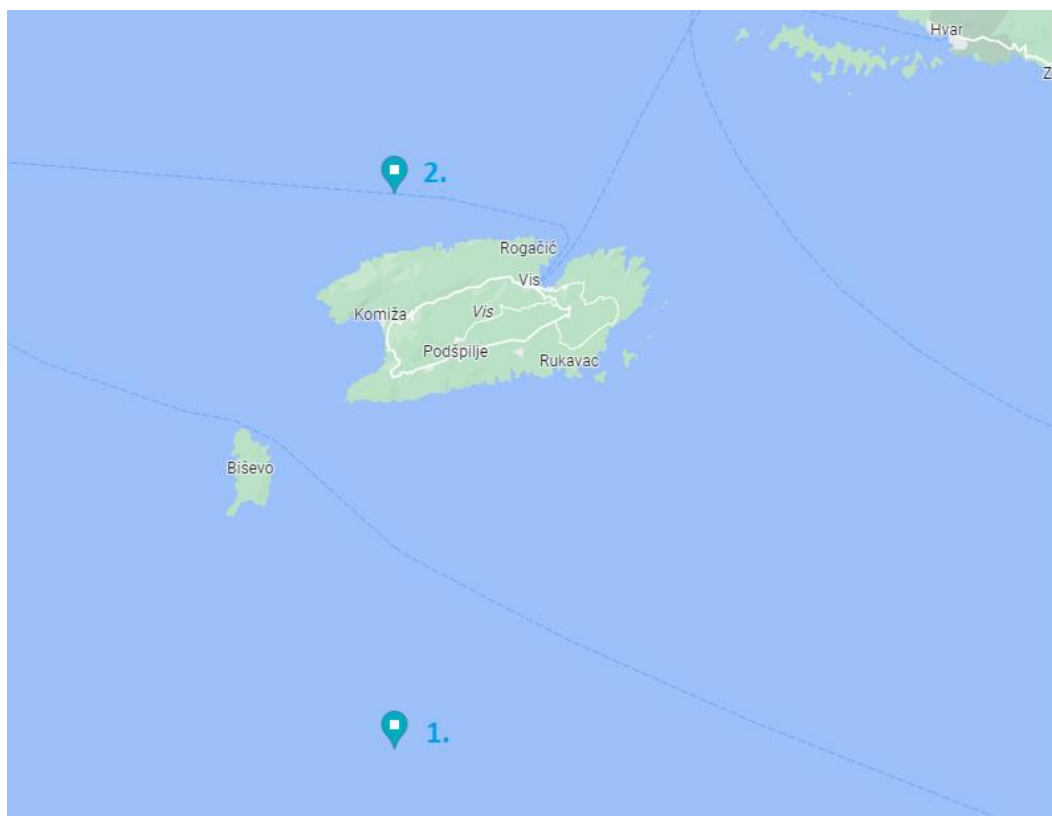
Slika 3.1 Prostorna podjela (1° sa 1°). Reproduciran uz dopuštenje od [15] i Hrvatski Hidrografski Institut © HHI

Jadransko more može se podijeliti na tri regije gledajući sa sjevera prema jugu: gornje Jadransko more, srednje i donje Jadransko more. Zatim se može podijeliti na 28 ćelija (Slika 3.1), pri čemu svaka ćelija predstavlja 1 stupanj geografske dužine i 1 stupanj geografske širine.

Otok Vis se nalazi u središnjem Jadranskom moru, smješten na raskrižju mrežnih ćelija 11, 12, 16 i 17. Koristeći podatke iz programa Copernicus Climate Data Store, točnije ERA5 satni podaci za pojedine varijable za godinu 2012. [16], dobivene su matrice veličine $7 \times 5 \times 8784$. U tim matricama prvi broj predstavlja geografsku dužinu, drugi predstavlja geografsku širinu, a treći odgovara broju sati u promatranoj godini.

Tijekom analize podataka, početni korak sastojao se od isključivanja lokacija koje su bile predaleko od otoka te uklanjanje lokacija s nedostajućim podacima (NaN vrijednosti). Nakon toga, ostale su dvije obližnje lokacije blizu otoka Visa za daljnju analizu (Slika 3.2 i Tablica 3.1).

Podaci izvučeni iz ERA5 satnih podataka o pojedinim varijablama, kao što je već spomenuto, strukturirani su u obliku matrica dimenzija $7 \times 5 \times 8784$. Ukupno su dobivene dvije takve matrice, pri čemu jedna obuhvaća detalje vezane uz značajnu visinu valova, izračunatu iz spektralnih momenata, a druga sadrži informacije o periodima vršnih valova.



Slika 3.2 Kartografski prikaz odabranih lokacija. Izvor: <https://www.google.hr>

Tablice su stvorene kako bi se organizirali događaji značajne visine valova i energetske periode valova u razrede za određenu lokaciju. Razredi značajne visine valova kategorizirani su u metrima, s povećanjem od 0,5 m po razredu u rasponu od 0 do 5,5 m. Slično tome, razredi energetske periode valova definirani su s povećanjem od 1 sekunde u rasponu od 0 do 9 sekundi.

Tablica 3.1 Geografske koordinate za odabrane lokacije u Jadranskom moru s odgovarajućom dubinom vode i udaljenošću od obale. Batimetrijski podatci preuzeti od [17]

Lokacija	Geografska širina	Geografska duljina	Dubina mora (m)	Udaljenost od obale [km]
1.	42.85	16.10	128	17.60
2.	43.10	16.10	102	3.5

Na temelju skupa podataka koji se sastoji od 8784 mjerenja, broj različitih morskih stanja prikazan je u tablicama, Tablica 3.2 i Tablica 3.3, predstavljajući morska stanja za lokaciju 1 i lokaciju 2. Posljednji red i stupac u svakoj tablici pružaju ukupan broj pojava u određenom razredu za značajne visine valova i periode valova energije.

Tablica 3.2 Tablica stanja mora na lokaciji 1

H_s/T_e	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	Σ
0-0,5	0	383	2188	901	197	10	19	13	0	0	0	3711
0,5 - 1	0	0	252	1907	793	168	11	11	9	5	0	3156
1 -1,5	0	0	0	176	667	163	41	17	0	2	5	1071
1,5 - 2	0	0	0	1	190	251	53	12	0	0	0	507
2 - 2,5	0	0	0	0	14	136	32	37	0	0	0	219
2,5 - 3	0	0	0	0	0	31	24	15	0	0	0	70
3 - 3,5	0	0	0	0	0	0	23	5	0	0	0	28
3,5 - 4	0	0	0	0	0	0	6	5	0	0	0	11
4 - 4,5	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	7
4,5 - 5	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4
5 - 5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	0	383	2440	2985	1861	759	210	125	9	7	5	8784

Iz informacija koje su navedene u Tablica 3.2 i Tablica 3.3 može se zaključiti da su odabrane lokacije oko otoka Visa karakterizirane uglavnom mirnim morskim stanjima. Stoga se ukazuje na potrebu za smanjenjem veličine postrojenja na morske valove kako bi odgovarali blažim uvjetima valova (vidi Odjeljak 3.2 Modeliranje postrojenja na morske valove). Podaci iz tablica

sugeriraju da postrojenja na morske valove treba optimizirati i prilagoditi kako bi učinkovito iskoristavala energiju iz relativno mirnih morskih stanja promotrenih na odabranim lokacijama.

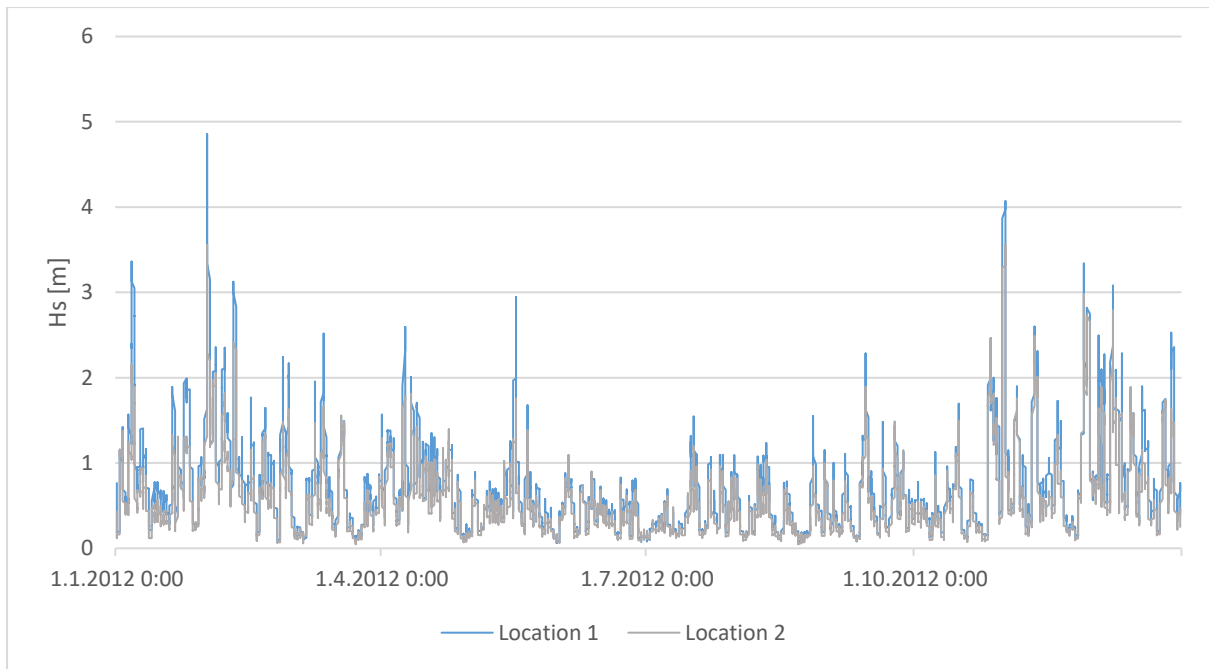
Tablica 3.3 Tablica stanja mora na lokaciji 2

H_s/T_e	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	Σ
0-0,5	0	544	2817	1090	388	64	14	5	2	1	0	4925
0,5 - 1	0	0	414	1277	606	263	16	13	6	7	5	2607
1 -1,5	0	0	0	151	436	185	27	17	0	0	0	816
1,5 - 2	0	0	0	4	114	130	27	21	0	0	0	296
2 - 2,5	0	0	0	0	10	55	14	15	0	0	0	94
2,5 - 3	0	0	0	0	0	10	16	4	0	0	0	30
3 - 3,5	0	0	0	0	0	0	8	5	0	0	0	13
3,5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
4 - 4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,5 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	0	544	3231	2522	1554	707	122	83	8	8	5	8784

Podaci prikazani u Tablici 3.4, zajedno s grafičkim prikazima na Slici 3.3 i Slici 3.4, zajedno ilustriraju značajno promatranje.

Tablica 3.4 Valovna klima odabranih lokacija. Podatci preuzeti sa [16]

Lokacija	$H_{s,max}$ [m]	$H_{s,mean}$ [m]	$T_{e,max}$ [s]	$T_{e,mean}$ [s]
1	4.8529	0.7250	10.2529	3.6585
2	3.5613	0.5761	10.3142	3.4121



Slika 3.3 Godišnje promjene u značajnoj visini valova

Konkretno, postaje očito, kako u brojčanim podacima tako i u vizualnim prikazima, da zbog geografskog položaja, lokacija 1 smještena na jugu otoka i udaljenija od obale, i lokacija 2 smještena na sjeveru otoka i bliža obali, pokazuju različite varijacije uvjeta valova.

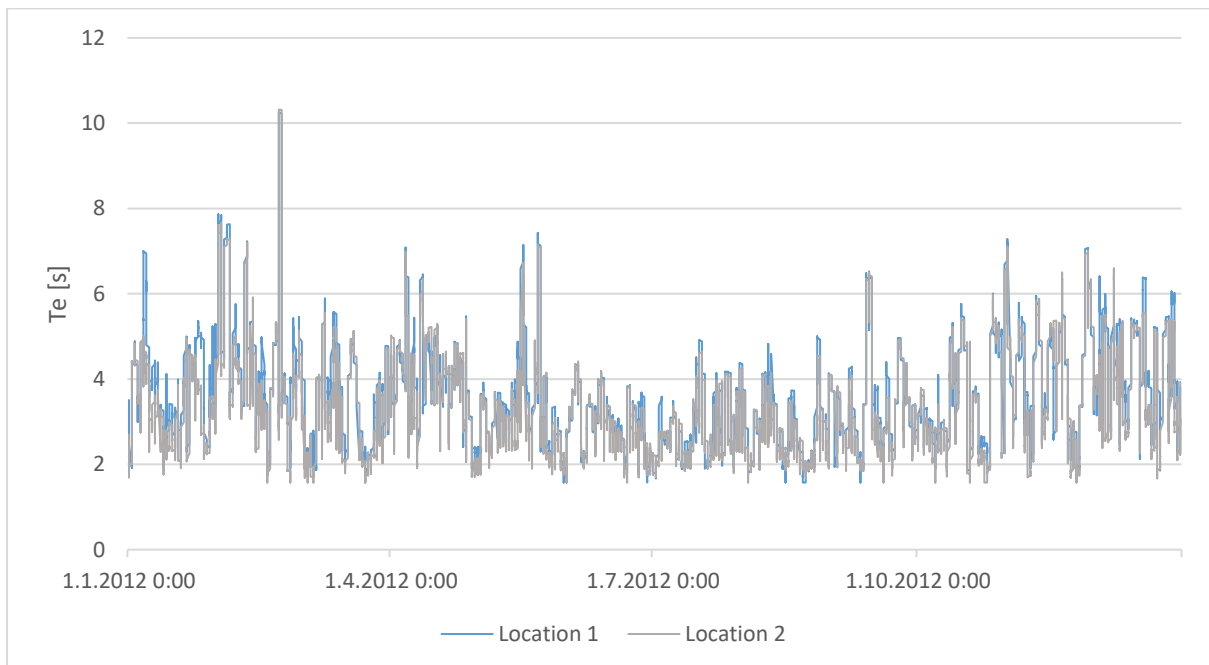


Figure 3.4 Godišnje promjene u energetsom period valova

3.2. Modeliranje postrojenja na morske valove

U okviru ovog rada, pažljivo su odabrana dva različita postrojenja na morske valove za analizu, uzimajući u obzir njihove karakteristike performansi i dubinu njihovih sidrenih instalacija, koja sežu do 100 metara. Nakon toga, matrice snage ovih pretvarača podvrgnute su Froudeovom skaliranju kako bi se uskladila njihova ponašanja s različitim morskim stanjima Jadranskog mora, kao što je objašnjeno u [18]. To je uključivalo, prije svega, fokusiranje na smanjenje parametra visine valova kako bi se uskladili s potrebnim kriterijima morskog stanja i sukladno tome smanjenje vremenskog i parametra izlazne snage postrojenja s njihovim odgovarajućim faktorima za pretvorbu prema Tablici 3.5. Zbog procesa smanjivanja razmjera, bilo je potrebno ukloniti višak redaka i stupaca jer bi neki redovi imali dvije ili više vrijednosti. Kako bi se to ispravilo, višak vrijednosti mora se ukloniti, ostavljajući samo jednu vrijednost. Za izvođenje ovog procesa koristi se tehnika interpolacije. Važno je imati na umu da su matrice snage prvobitno dizajnirane za 15000 kW za pretvarač Wavestar i 1000 kW za pretvarač Wavebob, te su stoga kasnije matrice dobivene korištenjem Froudeovog zakona možda utjecane ovom početnom optimizacijom, što može dovesti do potencijalnih promjena. Matrice snage za različite kapacitete postrojenja trebale bi se numerički dobiti za daljnja istraživanja.

Tablica 3.5 Froudeovi konverzijski faktori za skaliranje

Parametar	Faktor skaliranja
Kuti	λ^0
Kutno ubrzanje	λ^{-1}
Sila	λ^3
Linearno ubrzanje	λ^0
Masa	λ^3
Moment	λ^4
Duljina	λ
Snaga	$\lambda^{7/2}$
Pritisak	λ
Vrijeme	$\lambda^{1/2}$
Brzina	$\lambda^{1/2}$

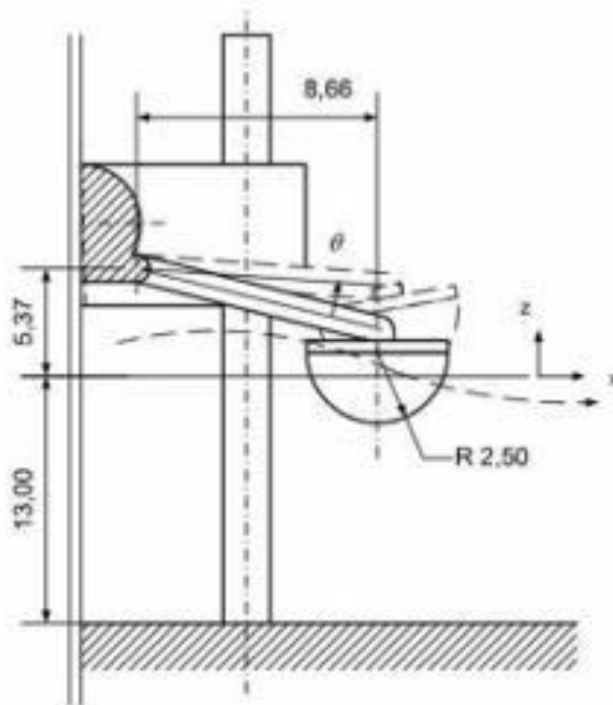
Važno je napomenuti da tijekom skaliranja pretvarača dubina sidrenja idealno bi trebala biti proporcionalno prilagođena. Međutim, u svrhu ovog istraživanja, dubina sidrenja ostaje nepromijenjena u odnosu na vrijednost prije skaliranja.

Također, s obzirom na specifičan fokus ovog rada, koji se temelji na utjecaju valovne energije na elektroenergetski sustav, posebice distribucijsku mrežu otoka, važno je napomenuti da trenutna analiza ne obuhvaća hidrodinamičke interakcije između WEC-ova.

3.2.1. Wavestar

Wavestar koristi hidraulični sustav za preuzimanje snage (*eng. Power Take-Off system, PTO*). Ovaj uređaj sastoji se od više plutajućih tijela povezanih s jednom strukturom smještenom na morskom dnu. Ova pojedinačna struktura služi kao stabilna referentna točka za sustav Wavestar. (Slika 3.5).

U kontekstu ovog istraživanja, Wavestar koncept C8-15000kW služio je kao početna referentna točka. Sastoji se od 60 plutajućih tijela, svako promjera 8 metara, zajedno s odgovarajućom matricom snage, kako je prikazano u Tablica 3.6 u kojoj je izlazna snaga prikazana u kilovatima, H_s je značajna visina valova izražena u metrima, a T_e je energetski period vala izražen u sekundama.

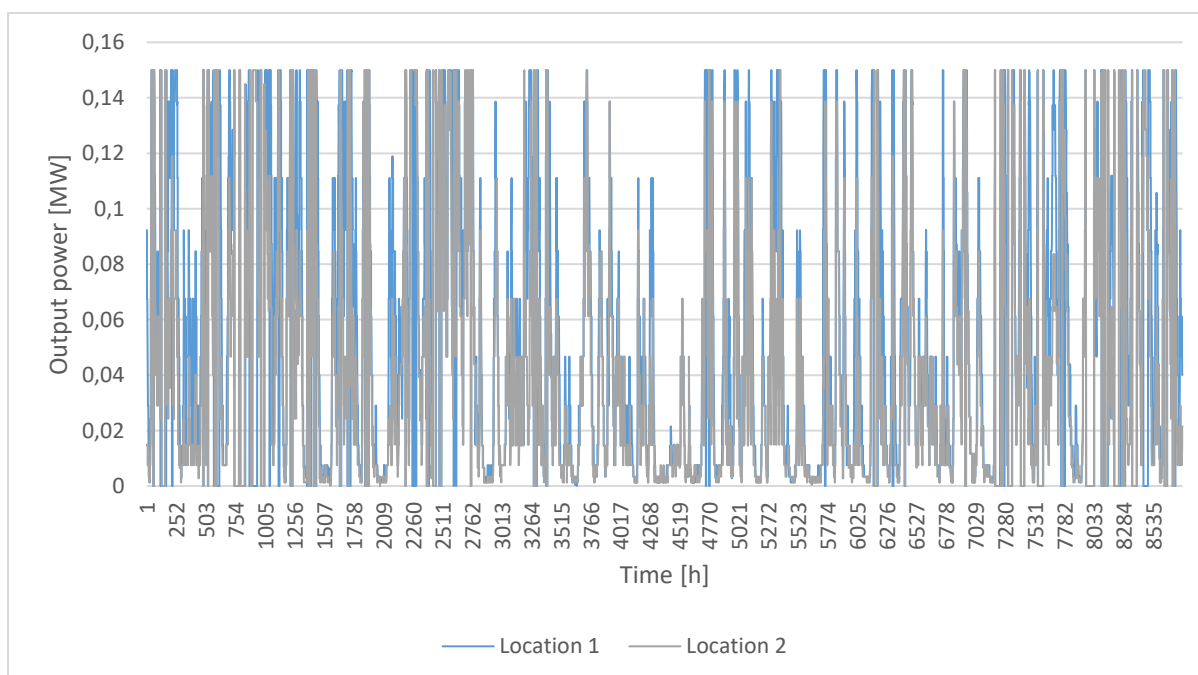


Slika 3.5 Wavestar shema. Reproducirano s dopuštenjem od [19]

Tablica 3.6 Matrica performansi Wavestara. Reproducirano uz dopuštenje od [19]

H_s/T_e	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9
0-0,5	0	0	0	51	141	238	308	308	352
0,5 - 1	0	0	124	336	658	982	1165	1242	1243
1 - 1,5	0	0	275	748	1459	2144	2490	2597	2549
1,5 - 2	0	89	551	1495	2899	4012	4386	4388	4196
2 - 2,5	0	145	895	2424	4665	6118	6461	6308	5935
2,5 - 3	0	212	1308	3535	6757	8462	8713	8358	7766
3 - 3,5	0	299	1846	4916	9230	11103	11189	10575	9729
3,5 - 4	0	395	2438	6425	11895	13860	13742	12850	11743
4 - 4,5	0	507	3126	8160	14913	15000	15000	15000	13838
4.5 - 5	0	634	3912	10072	15000	15000	15000	15000	15000

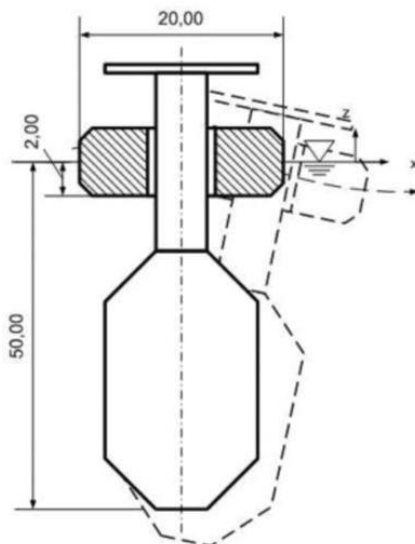
Nakon toga, primijenjena je Froudeova metoda skaliranja koristeći faktor skaliranja od 0,26827. Nakon skaliranja, rezultirajuća izlazna snaga spomenutog pretvarača izračunata je na satnoj osnovi za navedenu godinu, obuhvaćajući obje lokacije. Rezultat ove računalne obrade prikazan je grafički na Slika 3.6



Slika 3.6 Godišnja izlazna snaga Wavestara za obje lokacije

3.2.2. Wavebob

Wavebob se klasificira kao aksijalno simetrični WEC integriran s hidrauličkim sustavom za preuzimanje snage (PTO). Osim toga, Wavebob koristi sidreni sustav čvrsto ukopan na morsko dno, što doprinosi ukupnoj strukturalnoj stabilnosti (Slika 3.7).



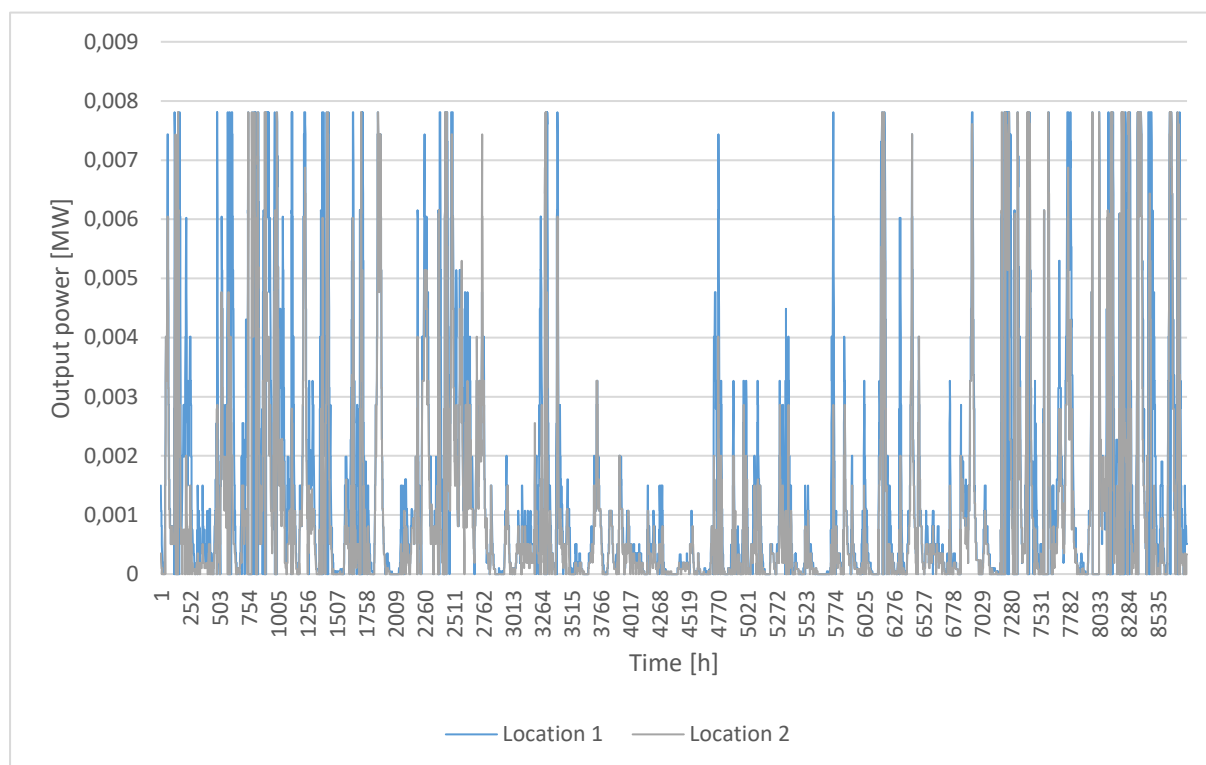
Slika 3.7 Wavebob shema. Reproducirano uz dopuštenje od [19]

Pripadajuća matrica snage ovog pretvarača prikazana je u Tablica 3.7, prikazujući izlaznu snagu izraženu u kilovatima, pri čemu H_s označava značajnu visinu valova u metrima, a T_p označava vršni period vala u sekundama.

Tablica 3.7 Matrica performansi Waveboba. Reproducirano uz dopuštenje od [19]

H_s/T_p	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6	11	19	25	30	44	50	53	44
1.5	13	25	43	55	68	90	102	92	91
2	24	45	65	100	121	153	175	151	122
2.5	0	65	104	141	191	179	243	255	190
3	0	96	137	205	244	357	293	353	260
3.5	0	0	192	254	291	431	385	424	314
4	0	0	256	366	403	551	536	531	473
4.5	0	0	327	418	574	678	708	665	509
5	0	0	358	514	658	824	828	618	638
5.5	0	0	0	610	774	880	936	905	805
6	0	0	0	771	952	974	1000	838	886
6.5	0	0	0	788	1000	1000	1000	979	1000
7	0	0	0	781	1000	1000	1000	1000	1000

Kao što je učinjeno s Wavestarom, ista primjena Froudeove metode skaliranja korištena je, koristeći faktor skaliranja od 0,25. Izlazna snaga pretvarača Waveboba za određenu godinu vizualno je prikazana je na Slika 3.8.



Slika 3.8 Godišnja izlazna snaga Waveboba za obje lokacije

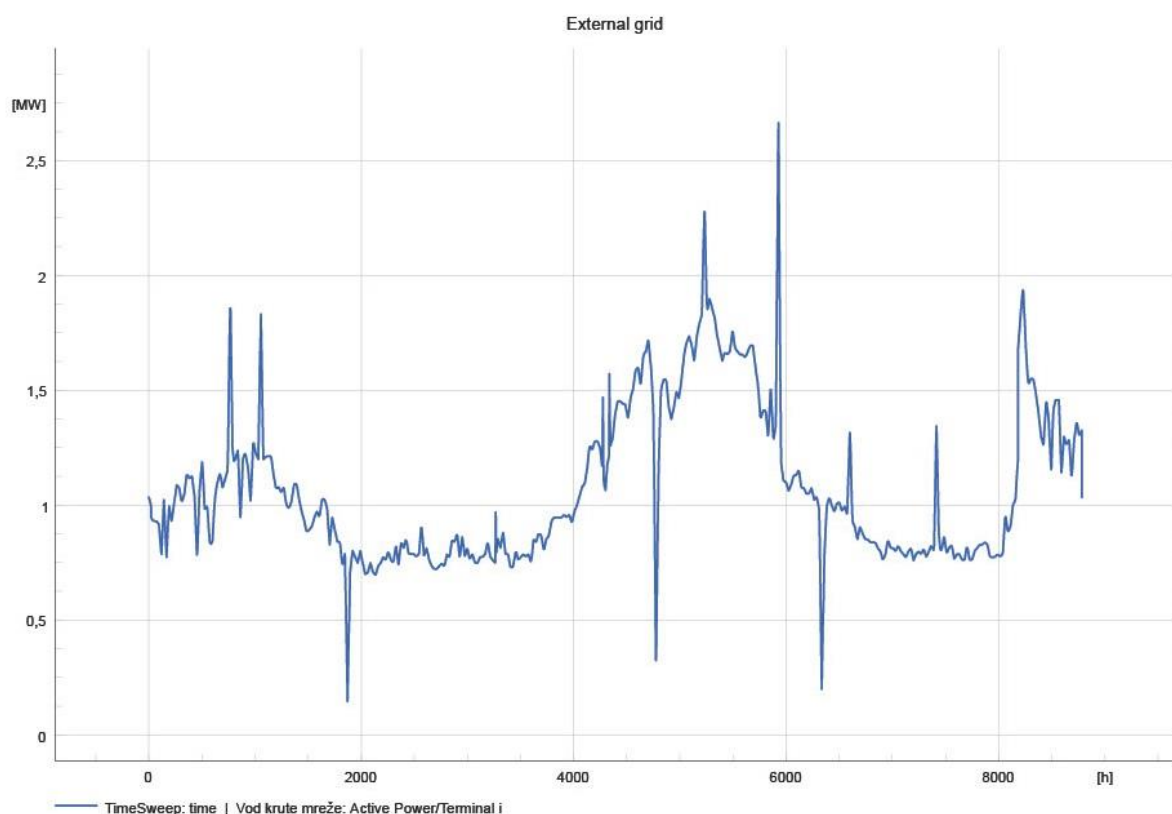
Promatrajući Slika 3.6 i Slika 3.8, jasno je da Wavestar ne samo da nudi veću izlaznu snagu već također održava stabilniji i pouzdaniji izlaz snage u usporedbi s Wavebodom. To postaje posebno značajno tijekom ljetnih mjeseci kada je potražnja za energijom na otoku najveća.

3.3. Modeliranje mikromreže otoka Visa

Modeliranje elektroenergetske mreže otoka je provedeno pomoću autentičnih podataka za godinu 2012. godine i shematskih prikaza dobivenih od Hrvatske elektroprivrede (HEP), Hrvatskog operatora distribucijskog sustava (ODS), kako je dokumentirano u magistarskom radu kolege Luke Prpića [20]. Mikromreža je simulirana pomoću naprednog softverskog alata za analizu elektroenergetskih sustava DIgSILENT PowerFactory. Ovaj softver pruža opsežne funkcionalnosti za analizu generacije, prijenosa, distribucije i industrijskih sustava. Uključuje različite značajke, uključujući integraciju vjetroelektrana, distribuirane generacije, stvarnu

simulaciju i praćenje performansi za testiranje i nadzor sustava. Međutim, zbog ograničenja softverske licence, model je morao biti smanjen u veličini.

Prema Prpiću [20], zamijenio je transformatorsku stanicu "TS Vis 35/10kV" i dio mreže otoka smješten na strani visokog napona (35kV) blokom "Vanjska mreža". Na strani niskog napona (10kV) trafostanice, modelirane su tri dalekovodne linije (DL): "Vinarija", "Komiža" i "Podstražje" s njihovim trafostanicama (Slika 3.10). Trafostanice su povezane različitim dalekovodima i kablovima izrađenim od različitih materijala, s različitim izolacijama, poprečnim presjecima i duljinama. Osim trafostanica, mreža uključuje fotonaponsku (FN) elektranu nominalne snage 3,5 MW (koja je izvorno modelirana kao 2 MW u Prpićevom radu [20]), spojenu na mrežu putem 5 invertera instalirane vršne snage 720 kWp i s baterijom od 1 MW. U FN elektrani nalazi se 11.200 FN modula snage 340 Wp. Statički generator za modeliranje pretvarača energije valova i pripadajući sustav za pohranu baterija. U ovom magistarskom radu promatrati će se utjecaj integracije postrojenja na morske valove na mrežu tijekom prijestupne godine.



Slika 3.9 Dijagram opterećenja "35/10 kV Vis" trafostanice. Izvor HEP za godinu 2012

Sa Slika 3.9 vidljivo je da potrošnja energije na otoku pokazuje značajne fluktuacije koje variraju u skladu s promjenama u godišnjim dobima. Važno je napomenuti da su najviše stope

potrošnje zabilježene tijekom ljetnih mjeseci, koji su ujedno podudaraju i s turističkom sezonom na otoku. Suprotno tome, najniža potrošnja energije bilježi se tijekom prijelaznih razdoblja prije i poslije turističke sezone, tj. u jesen i proljeće, kada je potreba za grijanjem ili klimatizacijom minimalna, a otok bilježi manji broj posjetitelja. Također, „spikeovi“ tijekom godine predstavljaju nepoznate anomalije i nije poznato jesu li uzrokovane problemima naviše u mreži ili se radi o greškama u mjerenjima.

Pristup modeliranju opterećenja mreže rekonstruiran je točno kako je opisano u [20] i neće se ponavljati u ovom kontekstu.

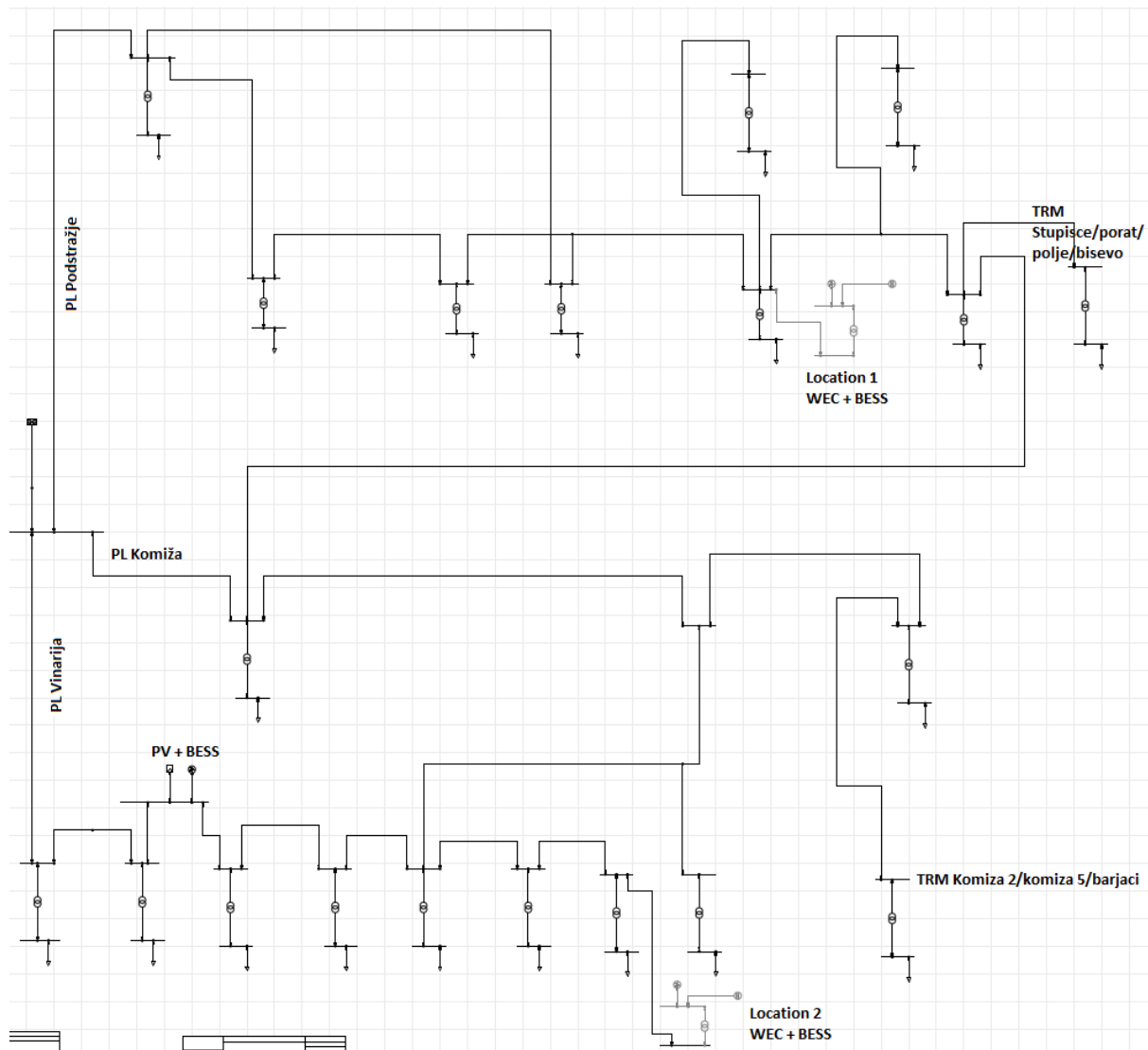
Što se tiče fotonaponske elektrane, njena izlazna snaga je izračunata kako je opisano u [21] formulom:

$$P_{array,t} = P_{mod,STC} * \frac{G_t}{G_{STC}} * \frac{\eta_{inv}}{100} * \left(1 - \frac{\gamma}{100} * (t_{mod,t} - t_{STC})\right) * N_{mod} \quad (3-1)$$

gdje je $P_{array,t}$ izlazna snaga AC niza fotonaponskih panela u kW, dok se sa $P_{mod,STC}$ označava vršna snaga jednog modula. G_t predstavlja izmjerenu vrijednost sunčevog zračenja u W/m², pri čemu je G_{STC} postavljen na vrijednost 1000 W/m². Ovdje, η_{inv} označava učinkovitost pretvarača, koja iznosi 97.5% u ovom slučaju. Simbol γ denotira temperaturni koeficijent snage, što odgovara -0.38 %/°C u ovom kontekstu, a N_{mod} označava broj modula u nizu. Također, $t_{mod,t}$ označava izračunatu temperaturu u °C prema formuli (3-2), pri čemu je t_{STC} 25°C. U ovoj formuli, (3-2), ambijentalna temperatura je predstavljena s t_{amb} [°C], a $NOCT$ označava Normalnu Radnu Temperaturu Čelija, postavljenu na 44°C.

$$t_{mod,t} = t_{amb} + \frac{NOCT - 20}{800} * G_t \quad (3-2)$$

Položaj WEC-a strateški je organiziran kako bi replicirao njihovo stvarno postavljanje, kako je prikazano na Slika 3.10, gdje je WPF povezan s mrežom otoka na lokaciji 1 ili lokaciji 2, ali nikada istovremeno. U kontekstu lokacije 1, WEC-ovi su povezani putem transformatora snage 1,6 MVA 0,4/10 kV, uspostavljajući vezu s terminalom (TRM) nazvanim "Podšpilje-Dračevo polje" putem podvodnog kabela 10 kV N2XSEY XLPE PVC 3x50rm. Odgovarajuće, WEC-ovi smješteni na lokaciji 2 prate sličan uzorak, povezani s terminalom nazvanim "Oključna 2".



Slika 3.10 Jednopolna shema modela korištena pri simuliranju

U PowerFactory, izvršena je analiza vremenskog koraka (*eng. Timesweep*) kako bi se dobile krivulje napona, radne snage, jalove snage i prividne snage u odnosu na vrijeme u godini. Ova simulacija je provedena u intervalima od jednog sata, usklađenim s jednosatnim koracima podataka ERA 5. Kao rezultat toga, krivulje distribuirane generacije za FN i WEC prikazane su s razlučivošću od jednog sata. Treba napomenuti da su zanemarene unutarsatne varijacije u korist dugoročnog (godišnjeg) rada. Krivulje za FN su izražene u kW, dok su krivulje za WEC izražene u MW. Slično tome, krivulje opterećenja transformatorske podstanice su prikazane u MVA i također izražene s razlučivošću od jednog sata.

Krivulje snage i profili napona pratili su se duž dalekovoda "Vinarija", "Komiža" i "Podstražje", kao i na terminalima "010kV TS Vis", "SE Vis", "Oključna 2", "Podšpilje-Dračevo polje", "Komiža 2-Komiža 5-Barjaci" i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1". Terminali "SE Vis", "Oključna 2" i "Podšpilje-Dračevo polje" odabrani su za praćenje distribuirane

generacije, dok su "Komiža 2–Komiža 5–Barjaci" i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1" odabrani zbog svoje električne udaljenosti od vanjske mreže.

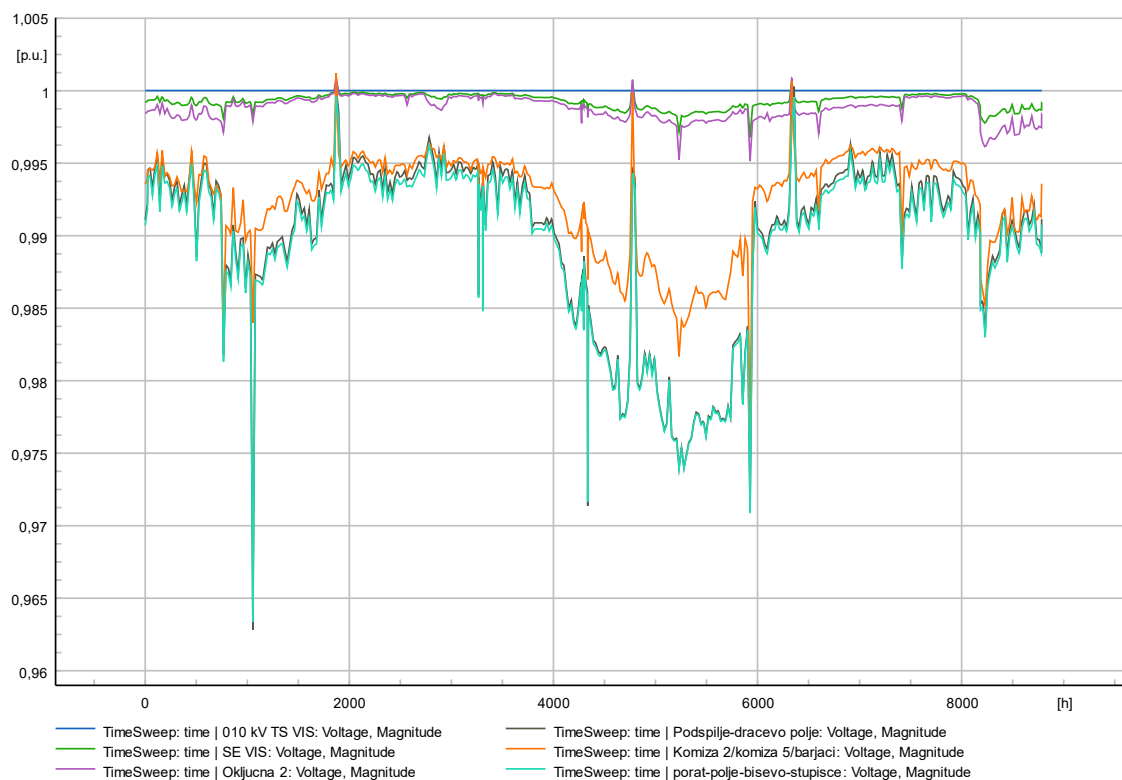
Ovaj diplomski rad istražuje sljedeće slučajeve:

- Mreža bez integrirane distributivne proizvodnje
- Mreža s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom
- Mreža s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s valovnom farmom za dvije različite lokacije i dva tipa WEC-ova
- Mreža s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s valovnom farmom za dvije različite lokacije i dva tipa WEC-ova i prilježnim baterijskim sustavom

Ukupno se razmatra 10 studijskih slučajeva u ovom radu.

3.3.1. Simulacija mreže bez integrirane distribuirane proizvodnje

U scenariju u kojem nema integrirane distribuirane proizvodnje, što rezultira pasivnom mrežom kako je prikazano na Slika 3.11 i Slika 3.12, postaje očigledno da mreža ima induktivnu prirodu. Interesantno je da se kako se krećemo dalje od primarnog terminala, tj. "010 kV TS Vis," napon postepeno smanjuje.

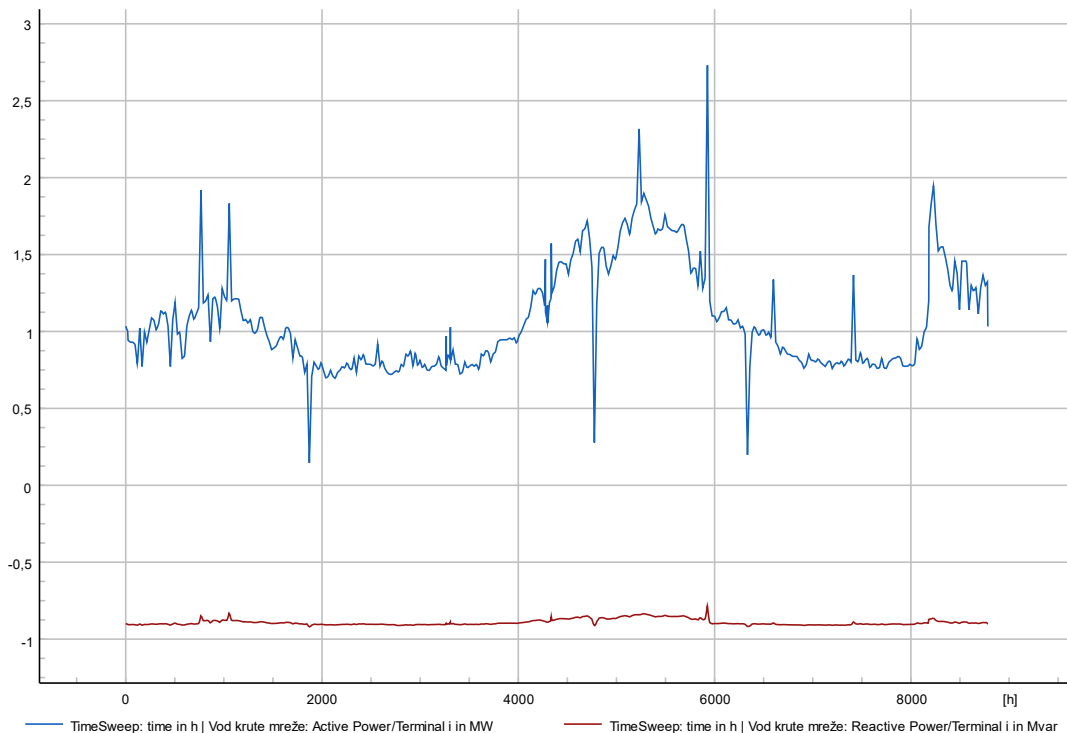


Slika 3.11 Razine napona na sabirnicama

Ovaj pad napona primjetan je na terminalima "Podšpilje - Dračevo polje," "Komiža 2-Komiža5-Barjaci," i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1." Posebno treba napomenuti da ovaj profil napona daje inverzan oblik od onoga što je prikazano na Slika 3.12.

Razina napona na terminalima "SE Vis" i "Oključna 2" ostaju unutar raspona od 1 p.u. do 0.99 p.u., dok "010 kV TS Vis" konstantno održava vrijednost od 1 p.u. S druge strane, na terminalima "Podšpilje - Dračevo polje," "Komiža 2-Komiža5-Barjaci," i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1", naponi se uglavnom kreću oko -10% odstupanja od nominalne razine napona. Međutim, tijekom ljetnog perioda i vršnih opterećenja, ovi naponi doživljavaju značajan pad, isključujući tranzijentne naponske propade.

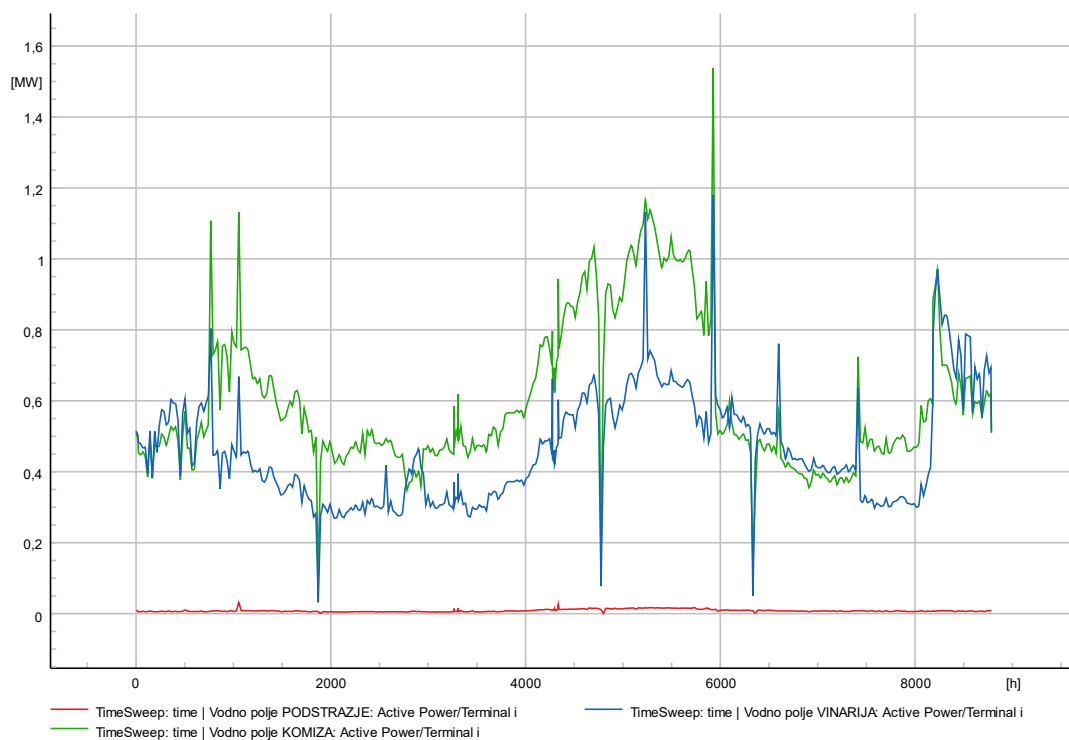
U ovom slučaju, ukupno uvezeno opterećenje na otok iznosi 9415.2163 MWh. Kako je prikazano na Slici 3.12, plava krivulja prikazuje profil uvezenog opterećenja na otoku. Posebno je važno napomenuti da krivulja opterećenja prikazuje vršne skokove, pri čemu je najveće zabilježeno opterećenje od 2.7297 MW. Ako zanemarimo ove naglo promjenjive skokove opterećenja, maksimalno opterećenje iznosi 1.8983 MW, a događa se tijekom 5279. sata godine. S druge strane, crvena krivulja prikazuje izlaznu reaktivnu snagu s otoka prema mreži naviše.



Slika 3.12 Tok snage između otoka i krute mreže

Slika 3.13 prikazuje raspodjelu radnih opterećenja duž glavnih dalekovoda. Vizualizacija otkriva da se najveće opterećenje koncentrira na dalekovodu označenom kao "Komiža", dok se najmanje opterećenje primjećuje na dalekovodu "Podstražje". Slično, na Slici 3.14 isti uzorak vrijedi i za raspodjelu jalovih opterećenja. Još jednom, najznačajnije jalovo opterećenje nalazi se na dalekovodu "Komiža", dok se najmanje opterećenje očituje na dalekovodu "Podstražje". Važno je napomenuti da dalekovod "Vinarija" pokazuje manju fluktuaciju u prijenosu reaktivnih opterećenja.

Iz ove analize jasno se vidi veza između opterećenja dalekovoda i potrošnje nizvodno. To implicira da veće razine potrošnje dovode do većeg opterećenja dalekovoda. Drugim riječima, kada na otoku nema integrirane proizvodnje, dalekovod "Komiža" ima najveće opterećenje, slijedi ga dalekovod "Vinarija", a zatim dalekovod "Podstražje"



Slika 3.13 Radno opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama

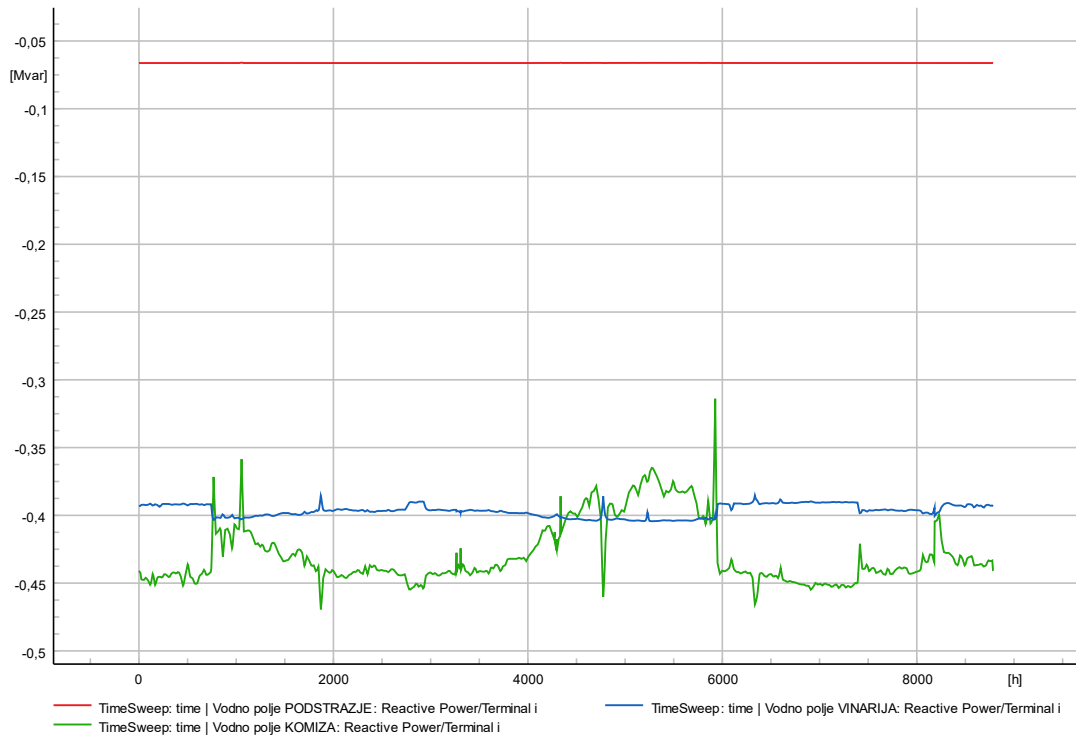
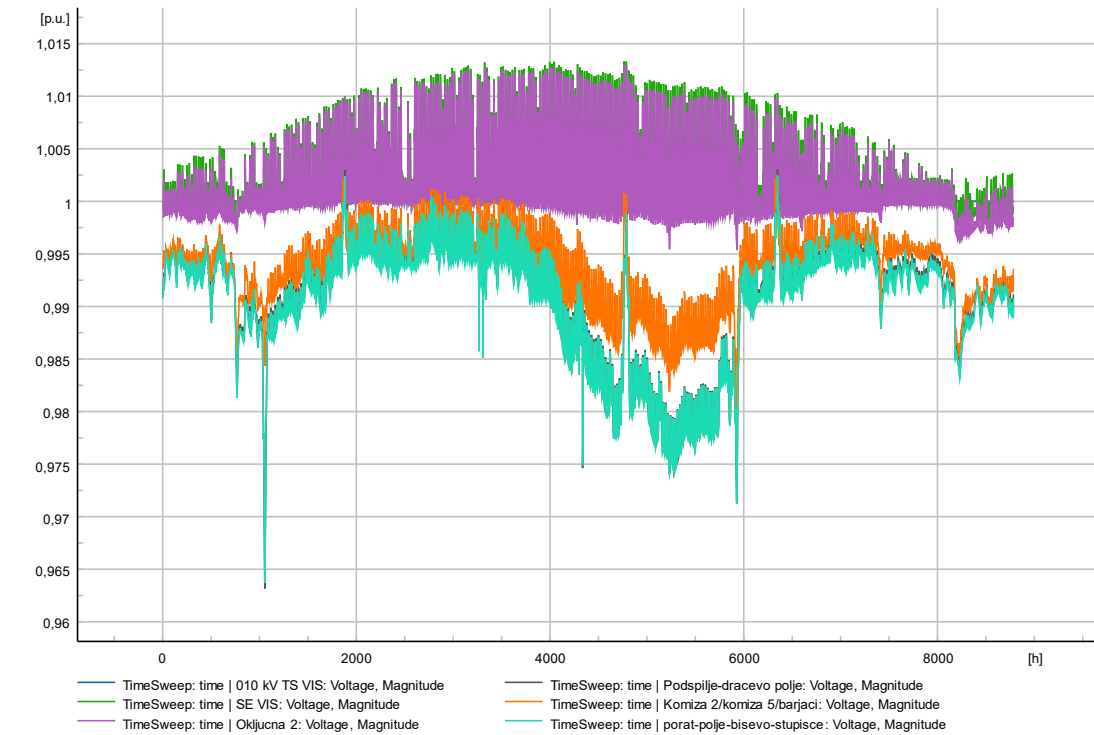


Figure 3.14 Jalovo opterećenje na glavnim dalekovodima

3.3.2. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom

U ovom konkretnom scenariju, baterijski sustav za pohranu energije (*eng. Battery Energy Storage System, BESS*) simuliran je korištenjem "statičkog generatora" u PowerFactoryju s vremensko ovisnom karakteristikom. Vremensko ovisna karakteristika razvijena je uz suradnju s kolegom Mazalicom iz Končar Grupe, koja također odgovara za održavanje i rad fotonaponske elektrane na otoku Visu.

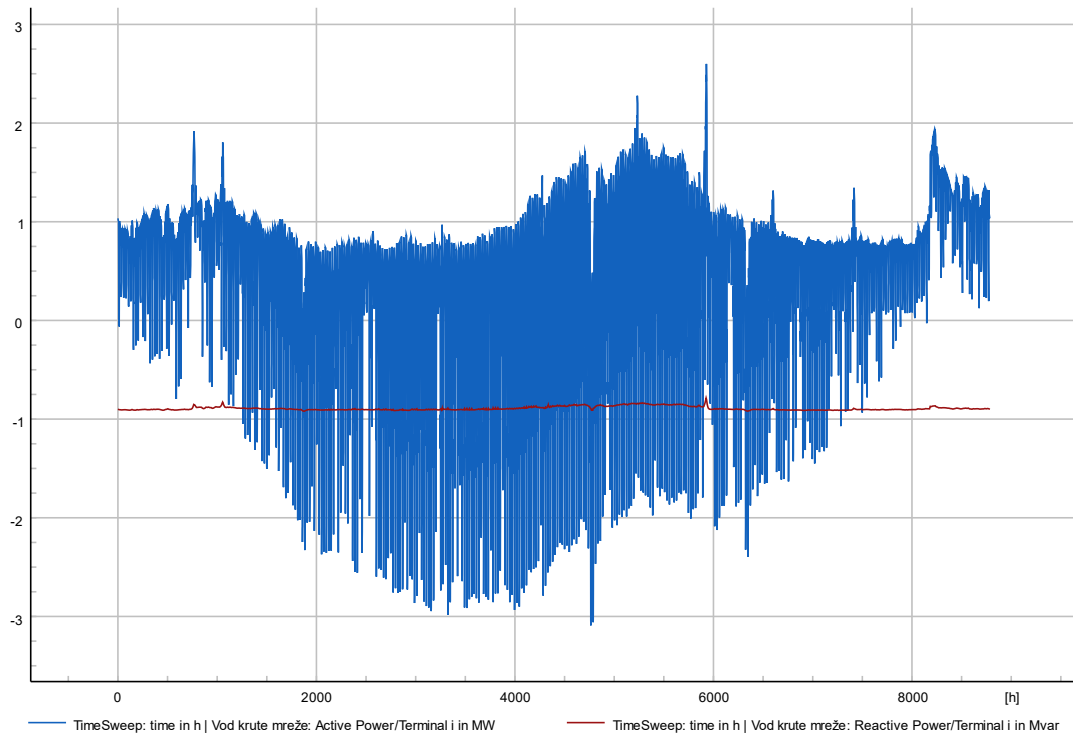
U ovom studijskom slučaju, gdje je uvedena integrirana fotonaponska elektrana, veličine napona i tokova prikazane su na Slika 3.15 i Slika 3.16. Razine napona na sabirnicama "SE Vis" i "Oključna 2" sada su u nešto širem rasponu nego što su bile prije integracije, ali i dalje su unutar dopuštenih granica kako je specificirano u EN 50160.



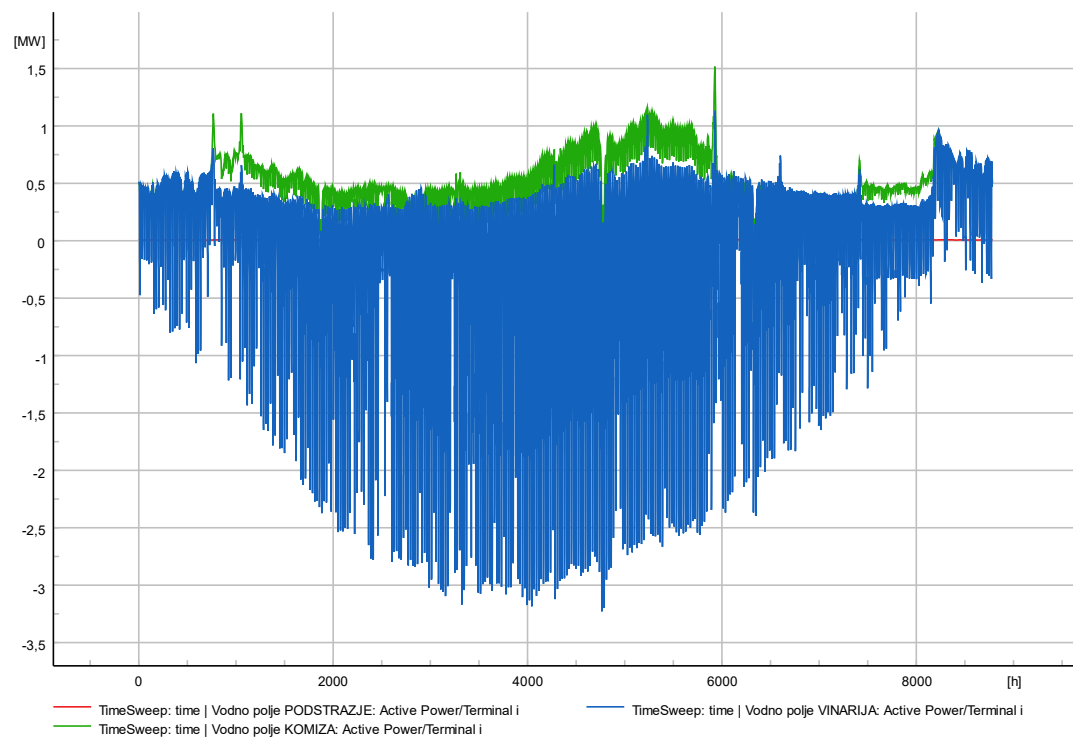
Slika 3.15 Naponske razine na sabirnicama nakon integriranja FN elektrane

Sabirnice "Podšpilje - Dračevo polje," "Komiža 2-Komiža5-Barjaci" i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1" bilježe određena poboljšanja u ovom scenariju, ali i dalje se kreću oko donje granice propisane standardom. Slično kao u prethodnom slučaju, ove sabirnice doživljavaju pad ispod specificiranog ograničenja tijekom ljetnih mjeseci. Najviša vrijednost napona na bilo kojoj sabirnici zabilježena je na sabirnici "SE Vis" gdje se nalazi integrirana fotonaponska elektrana. Osim toga, usporedbom Slika 3.16 sa Slika 3.12 iz prethodnog scenarija postaje očito da se sada događa dvosmjerna razmjena energije s mrežom naviše i također da se turistička sezona i proizvodnja fotonaponske elektrane ne poklapaju, budući da turistička sezona počinje nakon vršnog perioda proizvodnje fotonaponske elektrane. Također, ukupno uvezeno opterećenje značajno je smanjeno i iznosi otprilike trećinu onoga što je bila prije nego što je fotonaponska elektrana integrirana na otok, s točnom vrijednošću od 3079.9414 MWh.

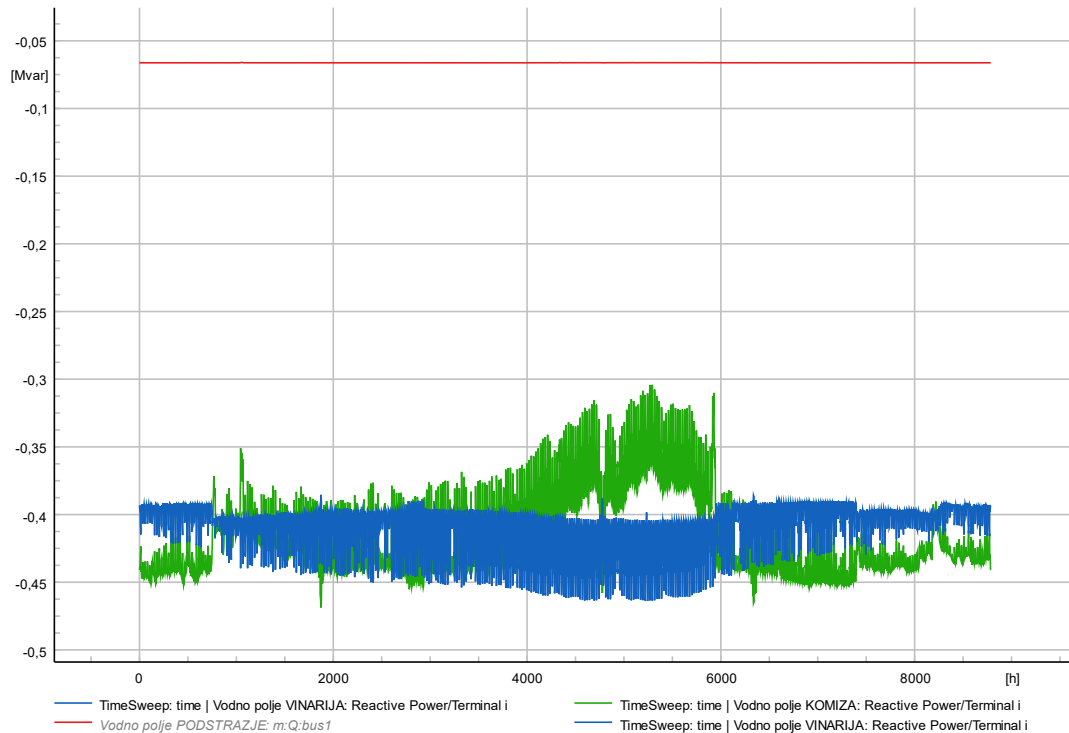
Slika 3.17 prikazuje opterećenje glavnih sabirnica, i iz nje je očito da, zbog integracije fotonaponske elektrane, dalekovod "Vinarija" sada ima dvosmjerni tok snage prikazan negativnim vrijednostima na slici. Osim toga, na Slika 3.18 dalekovod "Komiža" bilježi blagi pad isporučene jalove snage u usporedbi sa Slika 3.18 iz prethodnog scenarija.



Slika 3.16 Tok snage između otoka i krute mreže nakon integracije FN elektrane



Slika 3.17 Radno opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integracije FN elektrane



Slika 3.18 Jalovo opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integracije FN elektrane

Ukratko, integracija fotonaponske elektrane rezultirala je značajnim smanjenjem energetske ovisnosti o krutoj mreži, budući da je fotonaponska elektrana injektirala 6062.5592 MWh energije. Ova integracija također je rezultirala poboljšanjem profila napona i smanjenjem gubitaka u mreži na otoku..

3.3.3. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om na lokaciji 1

U ovom dijelu, proučiti će se mreža otoka s integriranom fotonaponskom elektranom i pohranom energije (BESS), zajedno s WPF-om na lokaciji 1, koja je dizajnirana za postizanje gotovo nulte razmjene energije s krutom mrežom. Koriste se dvije vrste postrojenja na morske valove (WEC), kako je detaljnije opisano u Odjeljku 3.2, a za postizanje neto nulte razmjene energije potrebno je 7 Wavestar WEC-a ili 196 Wavebob WEC-a na zadanoj lokaciji. WPF je povezan s mrežom na terminalu "Podšpilje-Dračevo polje".

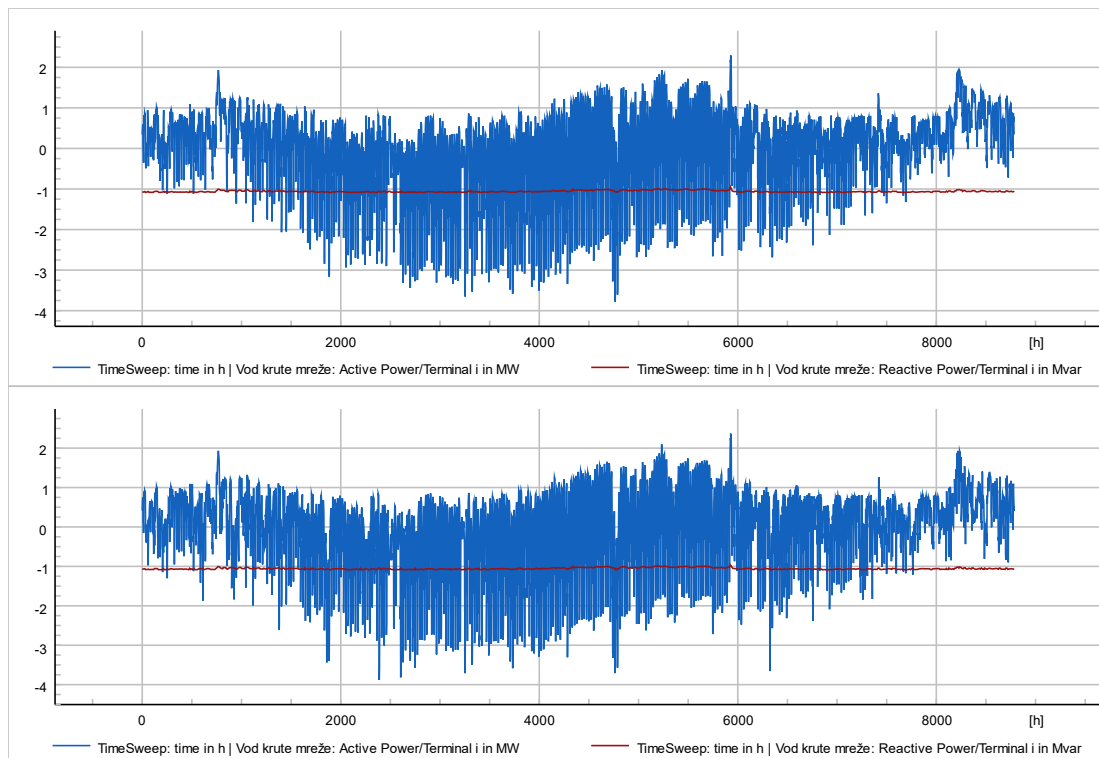


Slika 3.19 Naponske razine na sabirnicama nakon integriranja WPF-a na lokaciji 1

Za ovaj slučaj, u kojem je integrirana farma na energiju valova uz fotonaponsku elektranu, veličine napona i tokovi snage prikazani su na Slici 3.19 i Slici 3.20. Vrijednosti napona na terminalima "Podšpilje-Dračevo polje" i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1" značajno su promijenjene i sada su podignute s donjeg kraja normom definiranog spektra i nadoknađuju neprepoznate padove napona. Sve to uz cijenu iregularnih povećanja napona zbog ubrizgavanja snage WPF-a.

Na terminalu "Komiža 2-Komiža5-Barjaci", magnituda napona uspješno je stabilizirana i sada je blizu 1 p.u., dok je situacija na terminalima "SE Vis" i "Oključna 2" ista kao u prethodnom slučaju koji uključuje samo integraciju fotonaponske elektrane.

Osim toga, uspoređujući Sliku 3.20 sa Slikom 3.16 iz prethodnog scenarija, primjećuje se da su oblici krivulja slični, s razlikom da se sada cijelo opterećenje radnom snagom pomaknulo malo prema dolje. Također, ukupno uvezeno opterećenje ponovno je smanjeno i iznosi 18.0324MWh i 0.9736MWh za WPF Wavestar i WPF Wavebob, redom.



Slika 3.20 Tok snage između otoka i krute mreže nakon integriranja WPF-a na lokaciji 1

Slika 3.21 prikazuje raspodjelu aktivnih opterećenja duž glavnih dalekovoda. Vizualizacija otkriva da se najveće opterećenje nalazi na dalekovodu označenom kao "Vinarija" i to u oba smjera, dok je najmanje opterećenje vidljivo na dalekovodu "Podstražje". Slično, kako je prikazano na slici 3.22, obrazac vrijedi i za raspodjelu reaktivnih opterećenja. Najznačajnije reaktivno opterećenje koncentrirano je na dalekovodu "Komiža", dok je najmanje vidljivo na dalekovodu "Podstražje". Također, primjećuje se porast isporučene reaktivne snage na terminalima "Komiža" i "Vinarija" u usporedbi sa Slikom 3.18 iz prethodnog scenarija.

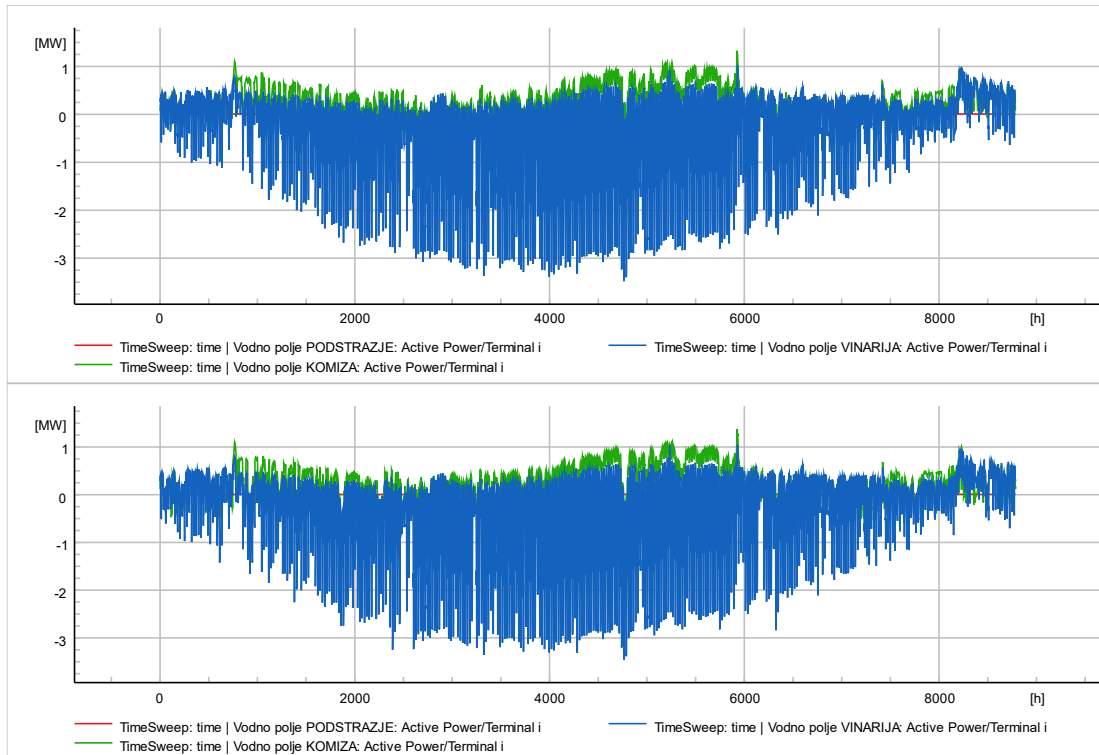


Figure 3.21 Radnog opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a na lokaciji 1



Figure 3.22 Jalovo opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a na lokaciji 1

Zaključno, integracija farme na energiju valova praktički je u potpunosti smanjila ovisnost o električnoj mreži naviše. Farma na energiju valova koja se sastoji od Wavestar WEC-ova

injektirala je 3329.025MWh energije s faktorom iskoristivosti od 36.0940% i 3357.347MWh energije s faktorom iskoristivosti od 24.9608% za Wavebob. Ova integracija također je rezultirala poboljšanim profilima napona i smanjenjem gubitaka u otočnoj mreži.

3.3.4. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om na lokaciji 2

U ovom odjeljku, slična stvar napravljena je kao i za lokaciju 1, ali na lokaciji 2. Za ovu svrhu potrebno je 7 Wavestar WEC-a ili 238 Wavebob WEC-a, a farma na energiju valova povezana je na mrežu na terminalu "Oključna 2".

Za ovaj slučaj, u kojem je integrirana farma na energiju valova uz postojeću fotonaponsku elektranu, prikazane su vrijednosti napona i toka električne energije na Figure 3.23 i Slika 3.24.

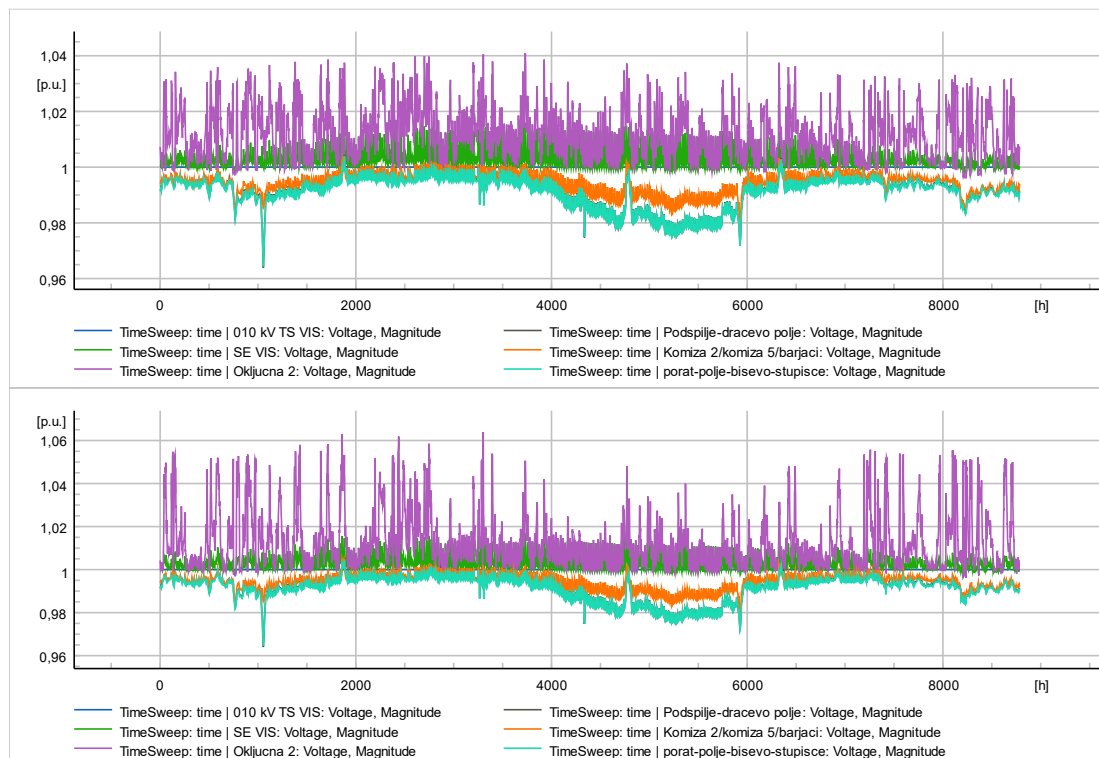


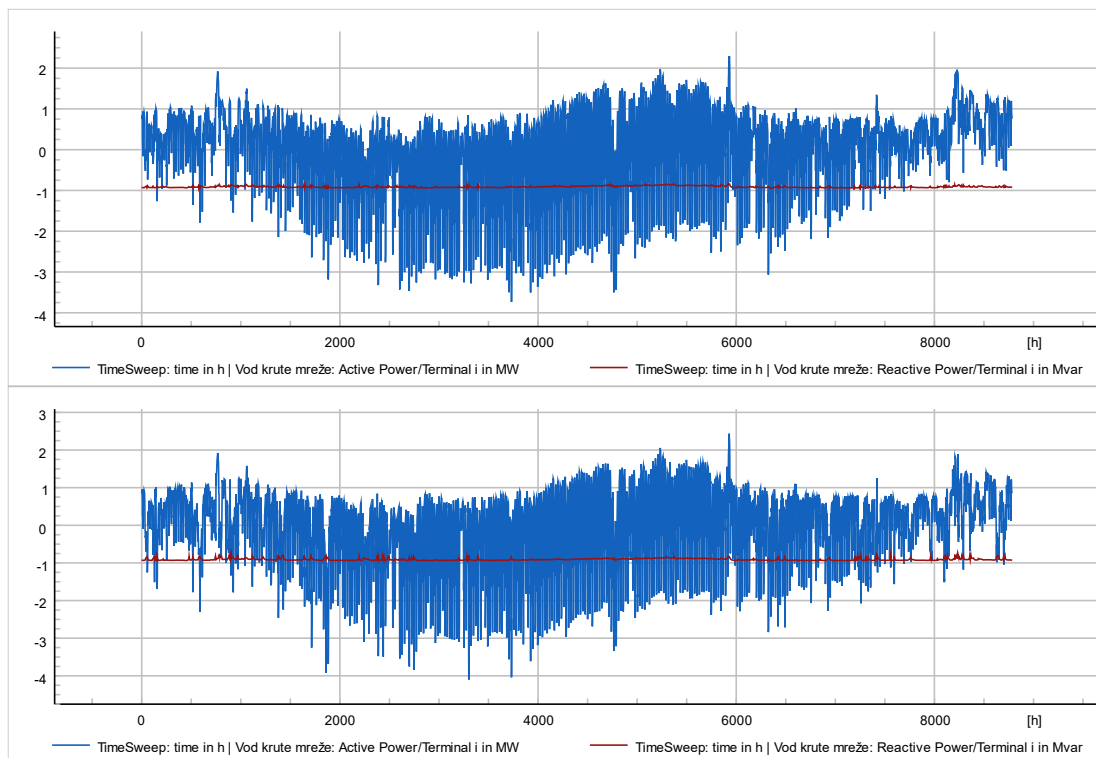
Figure 3.23 Naponske razine na sabircicama nakon integriranja WPF-a na lokaciji 2

Na terminalima "Komiža 2-Komiža5-Barjaci" i "Oključna 2" magnitude napona su promijenjene na isti način kao što je viđeno na terminalima "Podšpilje-Dračevo polje" i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1" na lokaciji 1. Drugim riječima, iregularni skokovi napona sada se događaju zbog ubrizgavanja električne energije iz farme na energiju valova. To sugerira da

integracija farme na energiju valova ima sličan utjecaj na magnitudu napona na terminalima na različitim lokacijama, ovisno o lokaciji integracije unutar mikromreže.

Razine napona na terminalima "Podšpilje-Dračevo polje" i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1" podignute su bliže 1 p.u. u usporedbi s njihovim stanjem viđenim ranije, ali ne toliko koliko su se povećale na lokaciji 1. Sve to po cijenu iregularne skokove napona zbog ubrizgavanja električne energije iz farme na energiju valova.

Slika 3.24 pokazuje da su oblici krivulja slični onima na lokaciji 1, s razlikom da je opterećenje aktivnom snagom malo manje i ukupno uvezeno opterećenje je smanjeno u usporedbi sa scenarijem bez distribuirane proizvodnje, pri čemu za WPF Wavestar razmjena je 326.0529 MWh dok je za WPF Wavebob 16.6205 MWh.



Slika 3.24 Tok snage između otoka i krute mreže nakon integriranja WPF-a na lokaciji 2

Raspodjela aktivnih opterećenja duž glavnih dalekovoda prikazana je na Slici 3.25. Grafikon pokazuje da dalekovod nazvan "Vinarija" ima najveće opterećenje, i kad se uspoređi sa Slikom 3.21 iz prethodnog scenarija, može se vidjeti da se opterećenje sada pomaknulo prema dolje. Stoga se može reći da ovaj dalekovod više opterećuje krutu mrežu, dok se na dalekovodu "Komiža" bilježi blagi porast opterećenja prema nizvodno.

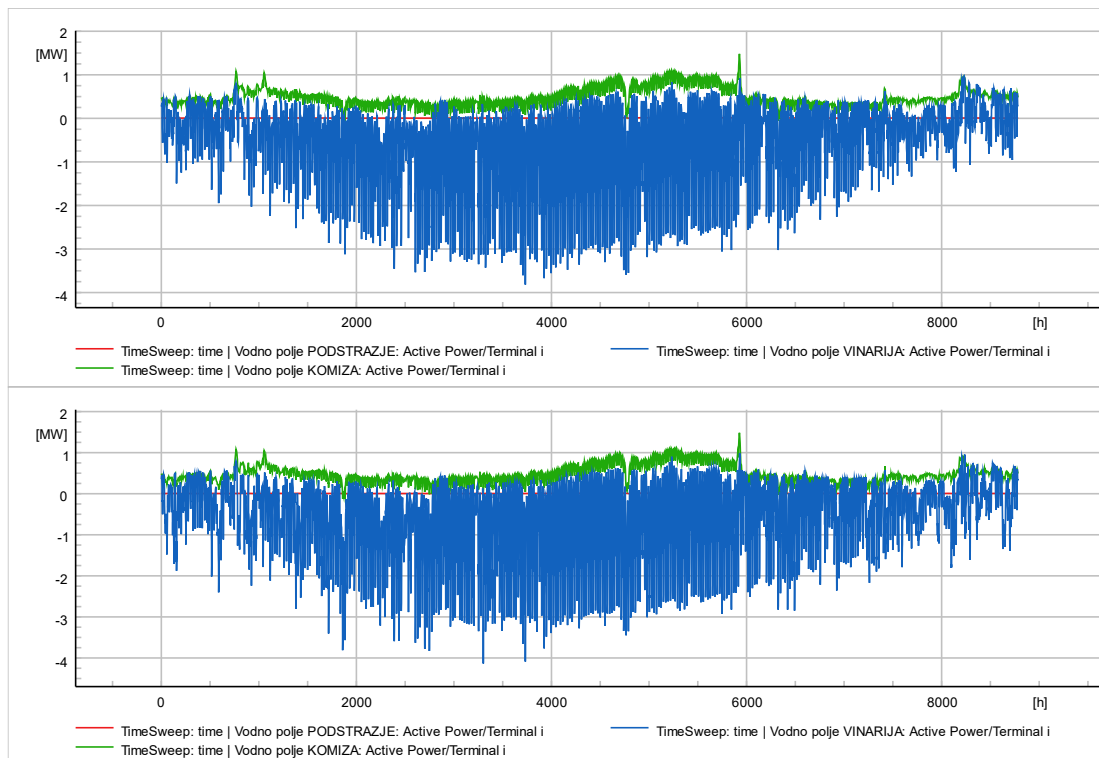


Figure 3.25 Radno opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a na lokaciji 2

Osim toga, može se primijetiti smanjenje isporučene reaktivne snage na terminalima "Komiža" i "Vinarija" u usporedbi s Slikom 3.22 iz prethodnog scenarija.

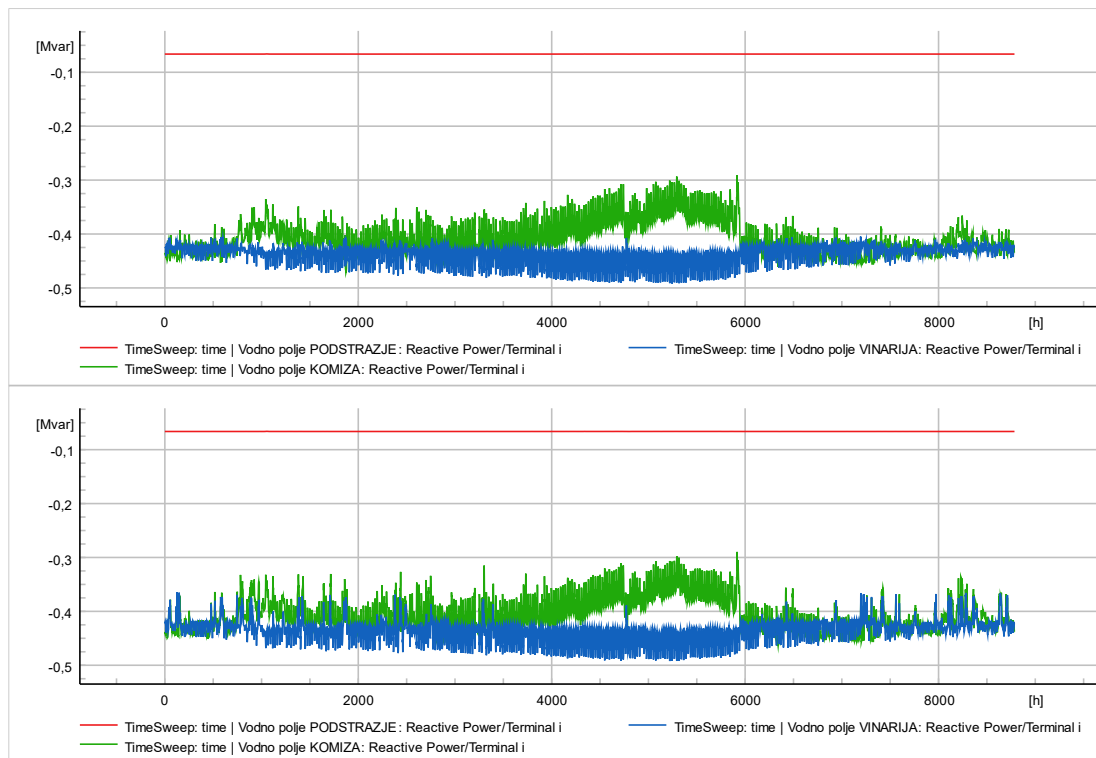
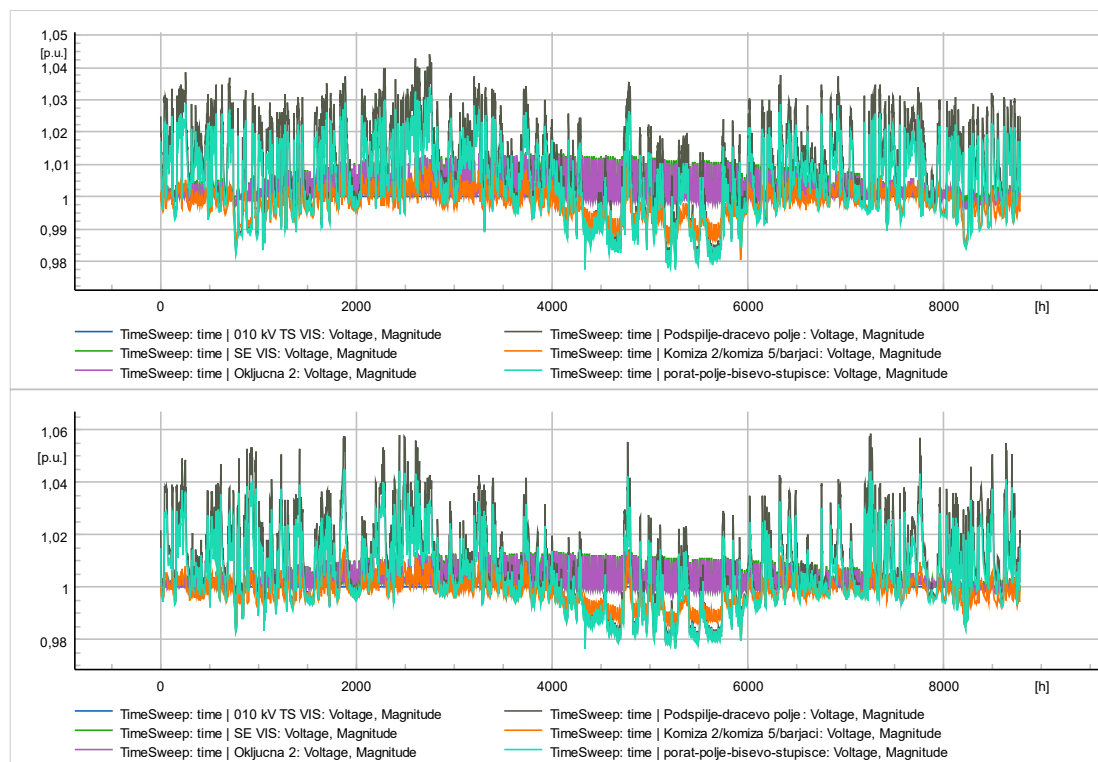


Figure 3.26 Jalovo opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a na lokaciji 2

Zaključno, integracija WEC-ova dovela je do praktički nulte ovisnosti o energiji iz krute mreže. Farma na energiju valova ubrizgava 2844.6480 MWh energije sa faktorom iskoristivosti od 30.8423% za Wavestar i 3222.5260 MWh energije sa faktorom iskoristivosti od 19.7305% za Wavebob. Ova integracija također rezultirala je poboljšanim profilima napona i smanjenjem gubitaka na mreži na otoku. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om na lokaciji 2

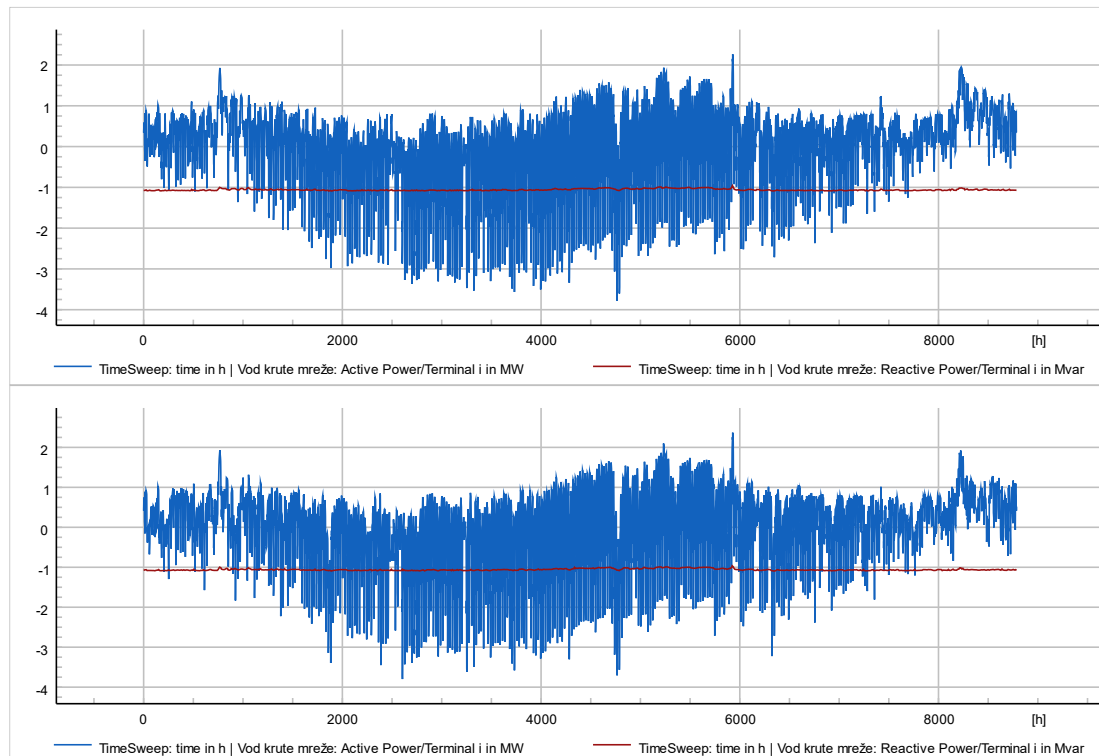
3.3.5. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om i priležćim baterijskim spremnikom na lokaciji 1

Za ovaj scenarij na lokaciji 1, uz postrojenje na morske valove, instaliran je baterijski sustav za pohranu energije (BESS) s nazivnim kapacitetom od 5,5 MWh i snagom od 1 MW. BESS je modeliran pomoću modela "baterijska pohrana" u programu PowerFactory, a opisan je vremenskim karakteristikama prikazanim u Dodatku na Slici A i Slici B. Spomenute vremenske karakteristike modelirane su usporedbom trenutne izlazne snage farme na energiju valova s gornjim limitiranim vrijednostima (0,8 MW za Wavestar i 1 MW za Wavebob). Kad izlazna snaga premaši tu granicu, BESS se puni za razliku između te dvije vrijednosti.

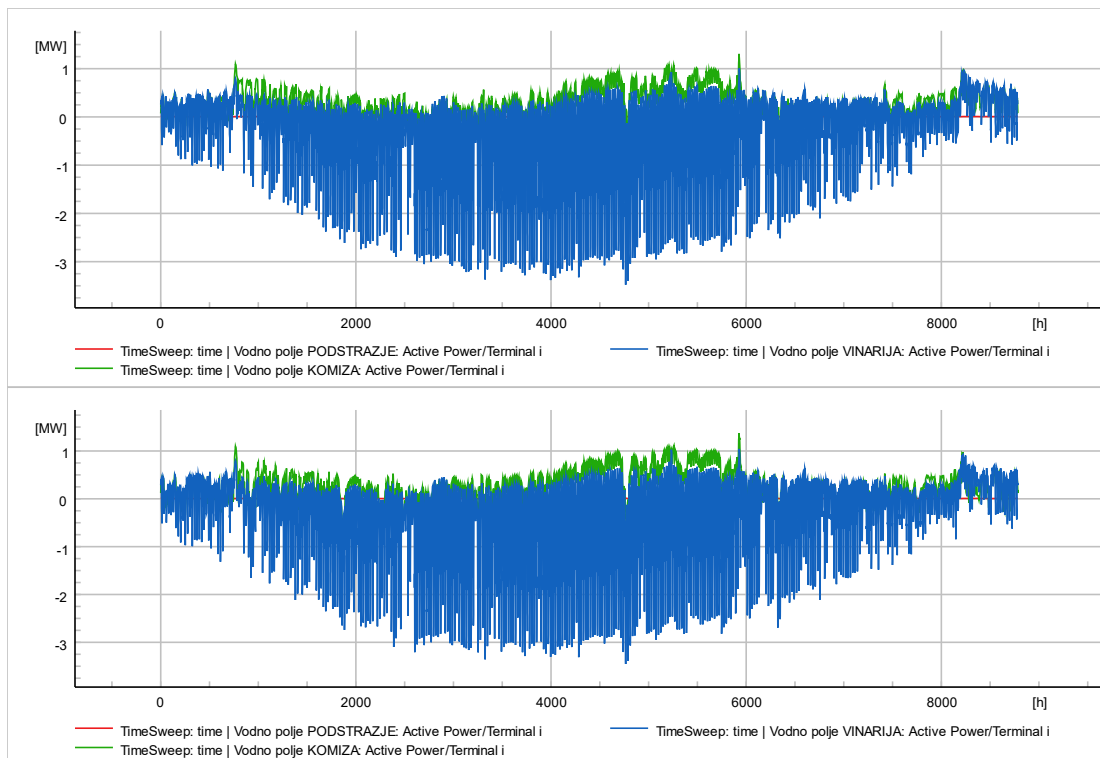


Slika 3.27 Naponske razine na sabirnicama nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 1

Ako izlazna snaga WPF-a padne ispod donje granice (0,4 MW za Wavestar i 0,5 MW za Wavebob), tada će BESS biti pražnjen za polovicu vrijednosti razlike između donje granice i trenutne izlazne snage WPF-a. Namjera je bila koristiti BESS za ublažavanje skokova u proizvodnji i postizanje trajne pozitivne izlazne snage iz kombiniranog postrojenja WEC-ova i BESS-a tijekom razdoblja smanjenog izlaza. Međutim, kako je prikazano na Slici A i B u Dodatku, za postizanje tog cilja bila bi potrebna značajno veći kapacitet baterije i/ili razrađeniji model upravljanja BESS-om.



Slika 3.28 Tok snage između otoka i krute mreže nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 1. Uspoređujući Slika 3.28 sa Slika 3.20 za lokaciju 1, gdje integrirani sustav baterija nije prisutan, očigledno je da uključivanje baterijskog sustava rezultira smanjenjem maksimalne izlazne snage WPF-a, kako je bilo namjeravano. To smanjenje dovelo je do smanjenja varijacija naponskih razina na terminalima "Podšpilje-Dračevo polje" i "Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1". Istovremeno je razmjena električne energije s krutom mrežom smanjena sa 18.0324 MWh na 6.1546 MWh za WPF Wavestar i sa 0.9736 MWh na -9.0049 MWh za WPF Wavebob.



Slika 3.29 Radno opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 1

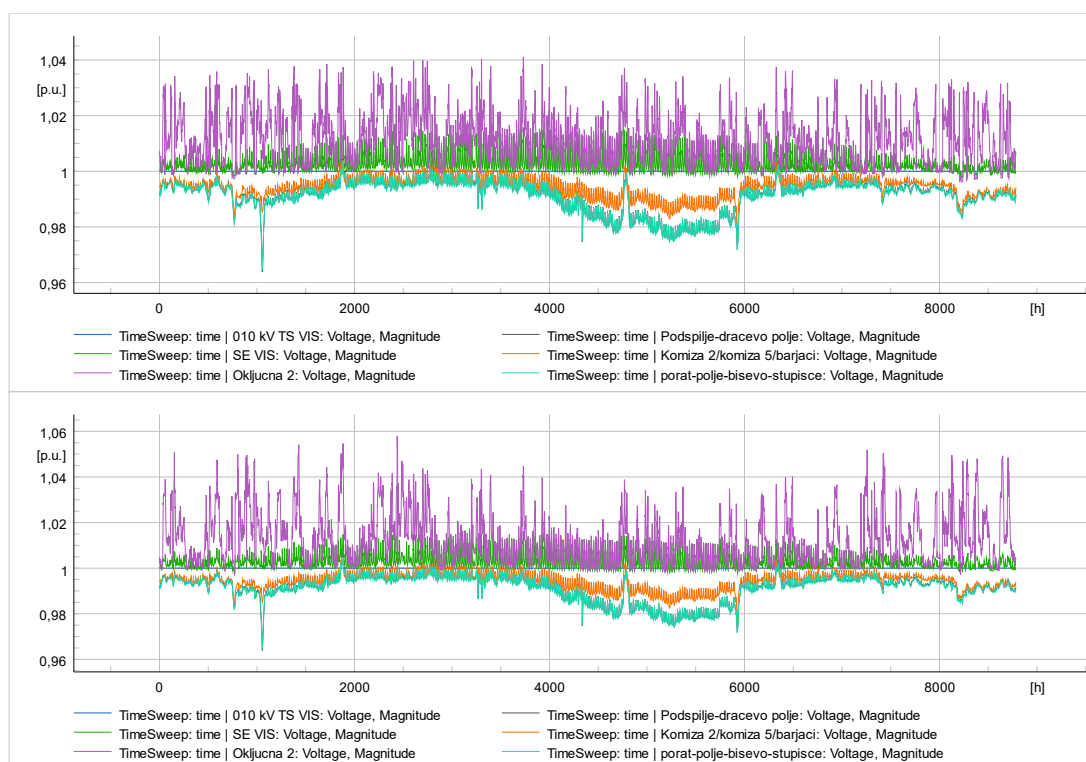


Slika 3.30 Jalovo opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 1

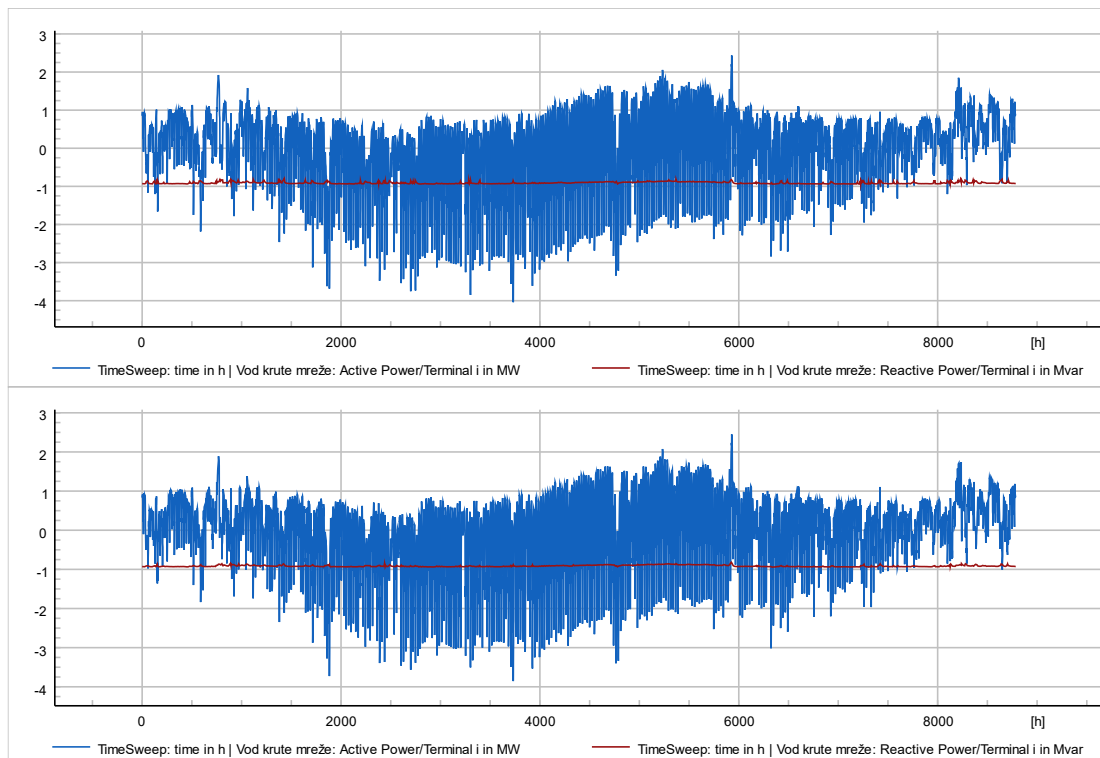
Slika 3.29 i Slika 3.30 prikazuju distribuciju aktivne i reaktivnih opterećenja duž glavnih dalekovoda.

3.3.6. Simulacija mreže s integriranom fotonaponskom elektranom i baterijskim spremnikom, zajedno s WPF-om i priležćim baterijskim spremnikom na lokaciji 2

U ovom scenariju, primijenjen je sličan pristup kao u prethodnom scenariju za modeliranje baterijskog sustava. Razlika leži u prilagodabama uvjetima za vremenske karakteristike BESS-a. Konkretno, gornje i donje granične vrijednosti za Wavebob tip postrojenja postavljene su na 1,25 MW odnosno 0,6 MW. I u ovom scenariju, kao i u prethodnom, namjera je bila koristiti BESS kako bi ublažili skokove u proizvodnji i imali održivu pozitivnu izlaznu snagu iz kombiniranog postrojenja WEC-a i BESS-a tijekom razdoblja smanjene proizvodnje. I ponovno, može se vidjeti na Slici C i D u Dodatku da bi to postigli, trebali bismo koristiti veći baterijski sustav i bolji kontrolni model.



Slika 3.31 Naponske razine na sabirnicama nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 2

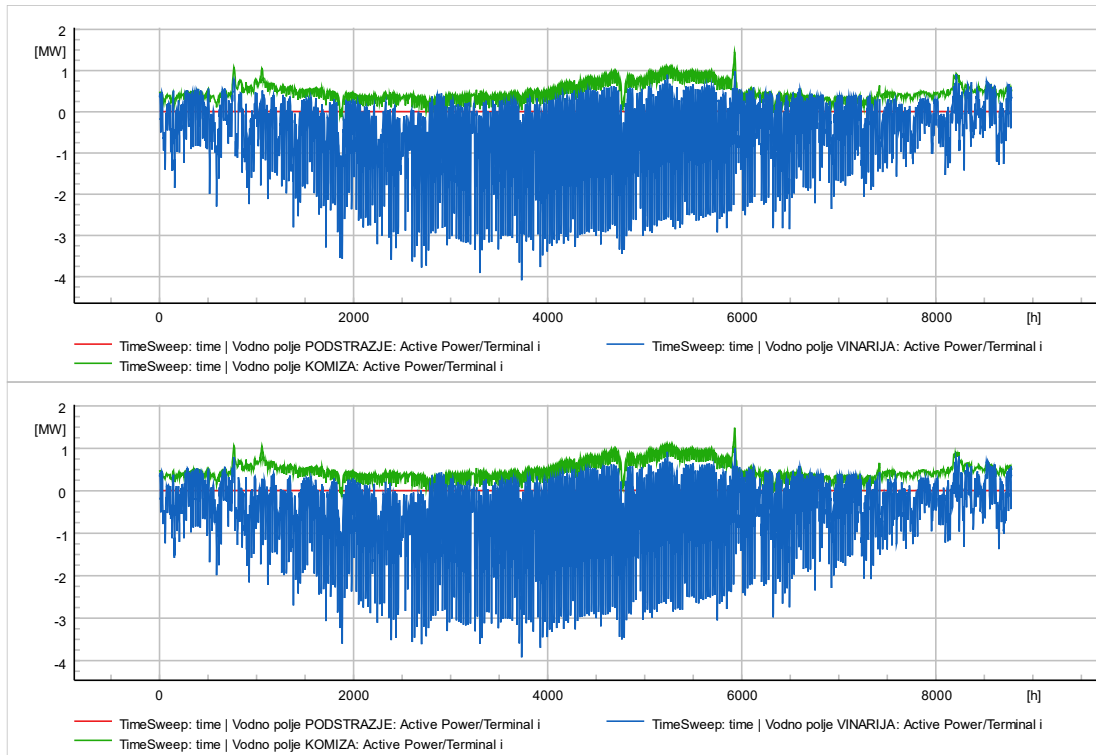


Slika 3.32 Tok snage između otoka i krute mreže nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 2

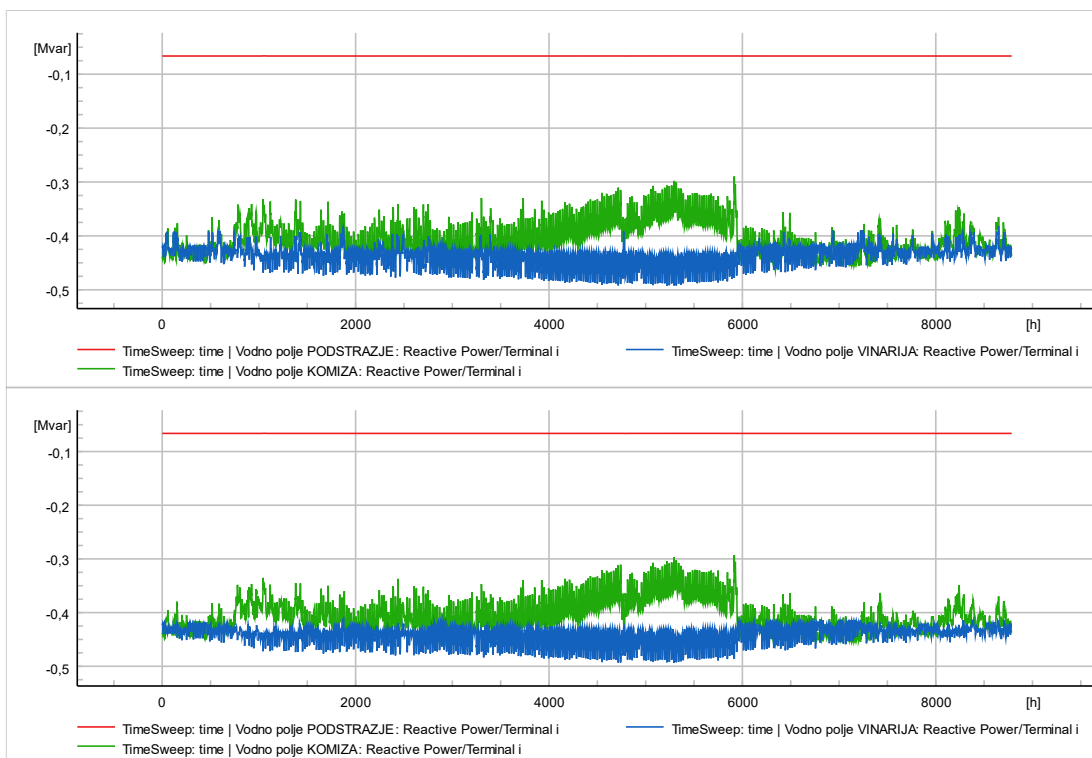
Magnituda naponskih razina na terminalima također je smanjena, slično kao u slučaju prikazanom na Slici 3.23 koji uključuje samo WEC elektranu na lokaciji 2. Ova posljedica proizlazi iz ograničenja izlazne snage elektrane, kao što je prikazano na Slici 3.32. Smanjenja su posebno primjetna na terminalima "SE Vis" i "Oključna 2", pri čemu terminal "Oključna 2" ima izravnu vezu s elektranom, a terminal "SE Vis" je u bliskoj blizini električne mreže.

Istodobno, došlo je i do smanjenja razmjene energije s mrežom naviše. Vrijednosti su smanjene s 326.0529 MWh na 12.1246 MWh za Wavestar elektranu i s 16.6205 MWh na 0.2111 MWh za Wavebob elektranu.

Podjela aktivnih i reaktivnih opterećenja duž glavnih dalekovoda prikazana je na Slici 3.33 i Slici 3.34.



Slika 3.33 Radno opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 2



Sliak 3.34 Jalovo opterećenje na glavnim dalekovodnim linijama nakon integriranja WPF-a i BESS-a na lokaciji 2

4. EKONOMSKA ISPLATIVOST INTEGRACIJE WPF-A U MIKROMREŽU OTOKA VISA

Glavni cilj ovog rada je odrediti optimalnu veličinu WPF-a kako bi se postigla gotovo nulta razmjena energije s krutom mrežom uz očuvanje kvalitete energije u mikromreži. Kapitalni troškovi (CapEx) i operativni troškovi (OpEx) odabrani su kao ključni pokazatelji za ocjenu ekonomske učinkovitosti WEC-ova u ovom istraživanju.

Kada se odredi optimalna veličina WEC-ova, usporedit će se s troškovima povezivanja otoka s glavnom elektroenergetskom mrežom. Cilj ove usporedne analize jest pružiti sveobuhvatnu ocjenu ekonomske isplativosti i potencijalnih koristi primjene WEC-ova kao alternativnog izvora energije za otok, uzimajući u obzir i kapitalne troškove (CapEx) i kontinuirane operativne troškove (OpEx), koji se pretpostavljaju kao postotak početne investicije [22] i uzima se kao 10%.

U ovom radu pretpostavljeno je da se troškovi (CapEx) postrojenja na morske valove mogu skalirati pomoću Froudeovih skalirajućih faktora i po masi i po snazi. Za razliku od [22], gdje su autori pojedinačno skalirali svaki modul postrojenja koristeći odgovarajući Froudeov skalirajući parametar, izračunavanje CapEx-a u ovom istraživanju provodilo se drugačije. Umjesto razmatranja vrijednosti CapEx-a za pojedinačne module, CapEx za izvorni WEC skaliran je prema masi i, radi usporedbe, prema snazi. Ovaj alternativni pristup prihvaćen je zbog nedostupnosti podataka o CapEx-u za pojedine module postrojenja.

Također se pretpostavilo da je dostupnost svakog pojedinog WEC-a 95% godišnje. Također se razmotrilo da nema popusta na količinu dostupnih za WEC-ove. Nadalje, pretpostavljeno je da je garantirana cijena otkupa energije za WEC-ove u Hrvatskoj ista kao i za proizvodnju iz energiju vjetra na moru [23]–[25]. Ova pretpostavka napravljena je zbog relativno nepoznate prirode WEC-ova u Hrvatskoj, a formulira se kao:

$$TCi_{VE} = k_{VE} * RTC_{VE}, \quad k_{VE} = 0,85 \quad (4-1)$$

$$RTC_{VE} = \frac{\sum_{i=1}^n (RSTC_i * VE_i)}{\sum_{i=1}^n VE_i} \quad (4-2)$$

$$RSTC_i = CROPEX_i \quad (4-3)$$

gdje je TCi_{VE} eferentna tržišna cijena za vjetroelektrane na moru, što vrijedi i za WEC-ove, k_{VE} je korekcijski faktor cijene, RTC_{VE} je referentna tržišna cijena za vjetroelektrane za

mjesečno razdoblje obračuna tržišnih premija, $RSTC_i$ su vrijednosti referentnih satnih tržišnih cijena električne energije i $CROPEX_i$ dan unaprijed satna cijena za razdoblje obračuna na Hrvatskoj burzi električne energije. Druga pretpostavka je da je vrijednost $CROPEX_i$ iznosila 116,67 €/MWh tijekom cijele godine. I, naposljetku, u ovom poglavlju nisu uzeti u obzir troškovi instalacije i rada, osim za kabele i dalekovode u odjeljku 4.3.

4.1. Wavestar

Za Wavestar, pretpostavljeni početni CapEx uzet je iz [26] i [27]. Važno je napomenuti da je cijena Wavestar-a procijenjena temeljem istih €/MW troškova kao i Pelamis WEC, koji je specificiran kao 8000 €/MW. Valja napomenuti da originalni Wavestar WEC prema [26] i [27] ima nominalnu snagu od 10 MW, dok je u ovom radu razmatran kao 15 MW. Kao rezultat toga, Froude faktor skaliranja λ prilagođen je sa 0.26827 na 0.3012 u ovom poglavlju kako bi se uskladile odgovarajuće vrijednosti CapEx za konfiguraciju od 150 kW.

Za lokaciju 1 i lokaciju 2, postavljeno je sedam Wavestar WEC postrojenja ovog tipa, i svaki od ovih postrojenja ima instaliranu snagu od 150 kW. Tablica 3.5 korištena je za dobivanje parametara konverzije Froudeovog skaliranja za skaliranje prema masi i snazi, a ovi parametri dostupni su u donjoj tablici, kao i parametri izlazne snage WPF za promatranu godinu.

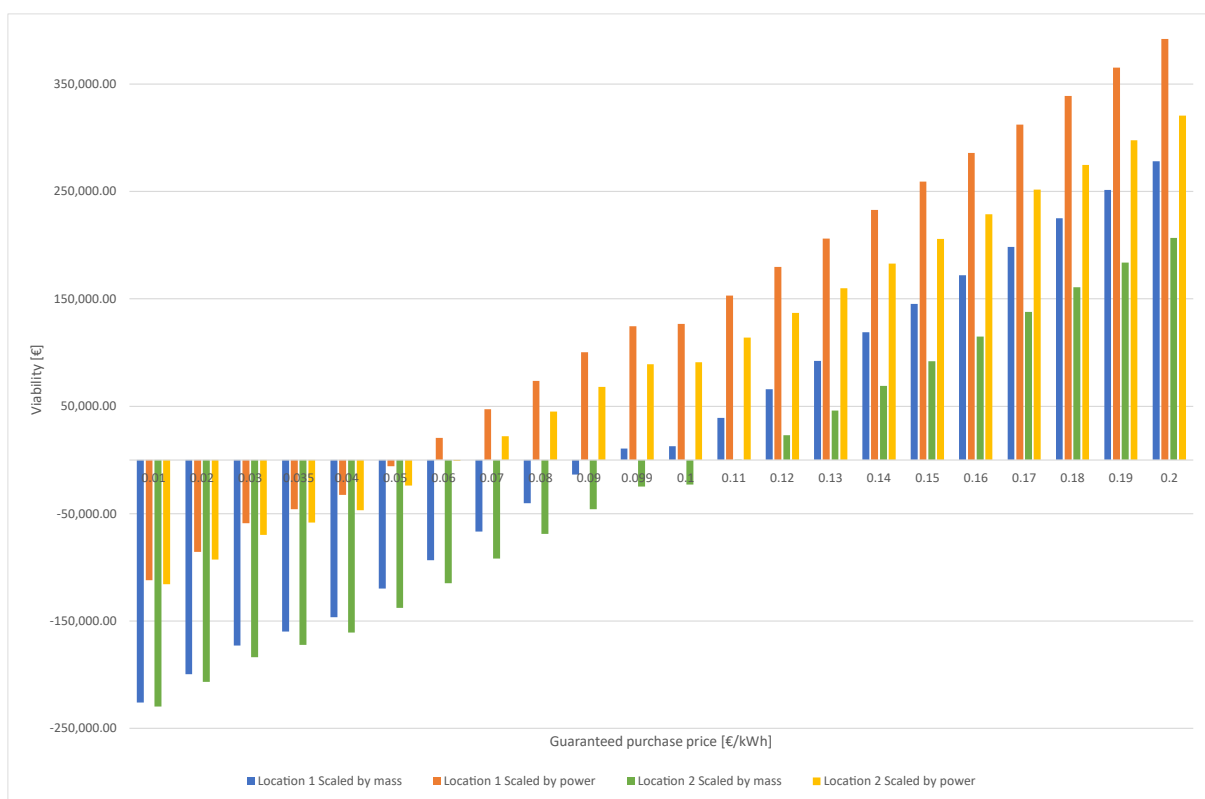
Tablica 4.1 Wavestar WPF parametri

	Lokacija 1		Lokacija 2	
	Po masi	Po snazi	Po masi	Po snazi
Godišnja proizvodnja energije [MWh]	3285.42		2844.65	
Godišnja srednja snaga [MW]	0.37		0.32	
Faktor iskoristivosti [%]	35.62		30.84	
Broj postrojenja	7		7	
Instalirana snaga po postrojenju [kW]	150		150	
Skalirani CapEX [€/kW]	218.645	120	218.645	120
Totalni CapEX [€]	229,578.56	126,000.69	229,578.56	126,000.69
Totalni OpEx [€]	22,957.56	12,600.07	22,957.56	12,600.07

Pri procjeni isplativosti WPF-ova u odnosu sa zagarantiranom cijenom otkupa, koja se računa kao Neto Generirana Vrijednost (NGV) za određenu godinu umanjena za CapEx i OpEx

investicije, postaje očito da izbor metode skaliranja ima značajan utjecaj na isplativost integracije WPF-ova (Slika 4.1). U slučaju hrvatske zagarantirane cijene otkupa, pretpostavljeno je da iznosi 0,099 €/kW, očito je da je, bez obzira na lokaciju, isplativost integracije više nego povoljna ako su WEC-ovi skalirani po snazi. Međutim, kada su skalirani po masi, lokacija ima značajnu ulogu u određivanju isplativosti.

Jednostavnije rečeno, način skaliranja Wavestar WEC-ova može znatno utjecati na to je li financijski isplativo integrirati WPF, posebno kada se uzima u obzir njihova lokacija i zagarantirana cijena otkupa u Hrvatskoj.



Slika 4.1 Isplativost Wavestar WPF-a za različite lokacije i Froudeov parametar skaliranja

4.2. Wavebob

Što se tiče Wavebob-a, isti pristup je primijenjen na financijsku isplativost Wavebob WPF-a. Pretpostavljeno je da je nominalni CapEx 3900 €/MW [26]. Ponovno je korištena tablica 3.5 kako bi se dobili Froude faktori za skaliranje po masi i snazi, kako je prikazano u Tablici 4.2.

Tablica 4.2 Wavbob WPF parametri

	Lokacija 1		Lokacija 2	
	Po masi	Po snazi	Po masi	Po snazi
Godišnja proizvodnja energije [MWh]	3357.35		3222.53	
Godišnja srednja snaga [MW]	0.37		0.32	
Faktor iskoristivosti [%]	24.96		19.73	
Broj postrojenja	196		238	
Instalirana snaga po postrojenju [kW]	7.8125		7.8125	
Skalirani CapEX [€/kW]	60.9375	30.46875	60.9375	30.46875
Totalni CapEX [€]	93,310.55	46,655.27	113,305.66	56,652.83
Totalni OpEx [€]	9,331.05	4,665.53	11,330.57	5,665.28

U slučaju Wavebob-a, situacija izgleda povoljnije zbog nižeg početnog CapEx-a. Slika 4.2 pokazuje da je financijska isplativost, uzimajući u obzir hrvatsku zagarantiranu cijenu otkupa na oba mjesta, ne samo povoljna, već i znatno veća nego kod Wavestar WPF-a (Slika 4.1).

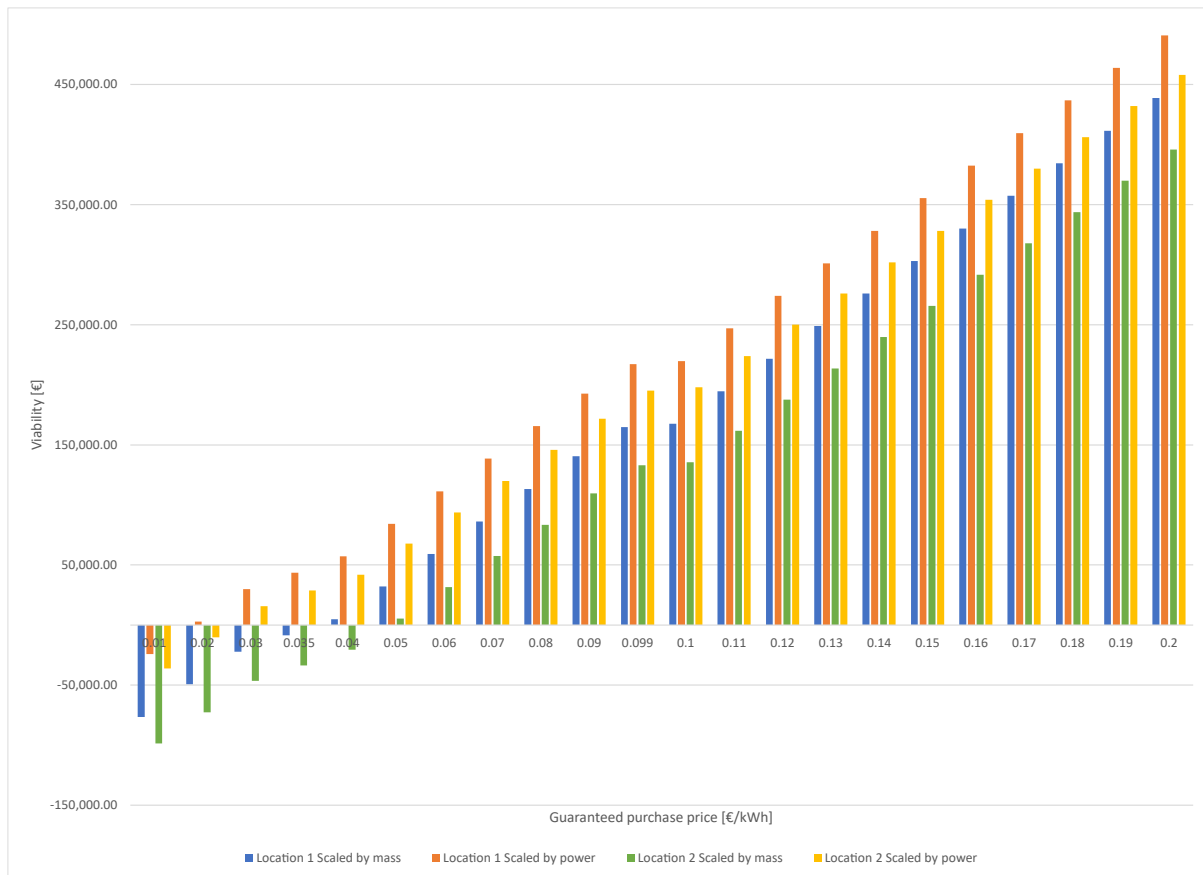


Figure 4.2 Isplativost Wavebob WPF-a za različite lokacije i Froudeov parametar skliranja

4.3. Usporedba s troškovima povezivanja otoka s glavnom energetsom mrežom

Izbor otoka Visa kao slučaja istraživanja izuzetno je relevantan za ovo istraživanje. Postojeća veza otoka s hrvatskom nacionalnom mrežom pruža nezamjenjiv temelj za procjenu troškova povezivanja drugih otoka s nacionalnom mrežom. Prvo će se u obzir uzeti svi troškovi povezani s WPF-ovima. Nakon toga, identičan postupak provest će se kako bi se procijenili troškovi povezani s povezivanjem otoka na primarnu elektroenergetsku mrežu.

Svi troškovi izračunati u ovom odjeljku temelje se na pretpostavkama utemeljenim na radovima [28]–[30]

Tri glavna faktora utječu na cijenu AC podmorskih kabela:

1. **Nazivna struja:** Ovim faktorom uglavnom određuje presjek kabela i povezan je s količinom bakra ili aluminija koji se koristi u kablu. Kablovi s većim nazivnim strujama zahtijevaju veće presjeke i više provodljivog materijala, što može povećati troškove.

2. **Nazivni napon:** Nazivni napon kabla određuje vrstu izolacijskog materijala potrebnog za taj kabel. Kablovi s višim nazivnim naponima zahtijevaju specijalizirane i često skuplje izolacijske materijale..
3. **Cijena instalacije kabela:** Ovaj faktor uvodi značajnu razinu nesigurnosti u ukupne troškove. On obuhvaća razne troškove povezane s instalacijom kabla, uključujući radnu snagu, opremu, logistiku i druge povezane troškove.

Funkcije troška investicije, izražene u €, za različite naponske nivoe kabla i snage su detaljno prikazane kao:

$$C_{ac,sub} = \frac{(A + B e^{C \cdot S} + D) \cdot (9n + 1)}{10} \cdot l_{sub} \quad (4-4)$$

gdje n predstavlja broj kabla, l_{sub} označava dužinu podmorskog kabla u kilometrima, a S predstavlja nominalnu prividnu snagu u MVA.

Koeficijenti (A, B, C i D) za različite naponske razine dostupni su u Tablici 4.3

Cijena investicije za izgradnju AC nadzemnih dalekovoda izračunavaju se pomoću jednadžbe (4-5) u k€/km. Ova jednadžba uzima u obzir nominalni napon U_{nom} u kilovoltima, poprečni presjek aluminijskih vodiča A_{Al} u mm² i broj žica po snopu n_b .

Ova jednadžba pruža procjenu investicijskih troškova za AC nadzemne dalekovode koji se koriste u različitim električnim prijenosnim i distribucijskim sustavima. Važno je napomenuti da ovi troškovi uključuju troškove instalacije.

$$C_{ohl} = 60 + 0.4 \cdot U_{nom} + 0.4 \cdot \sqrt[4]{n_b} \cdot A_{Al} \quad (4-5)$$

Detaljna saznanja o mrežnoj povezanosti na otoku potječe od hrvatskog ODS-a, otkrivajući mrežu koja se sastoji od različitih vrsta dalekovoda i kabla, od kojih se svaki razlikuje po duljini, dimenzijama i korištenim materijalima.

Tablica 4.3 Koeficijenti za različite naponske razine kod izračuna cijene kabla

	30 kV	70 kV	150 kV	220 kV	400 kV
A	0.411	0.688	1.971	3.181	5.8038
B	0.596	0.625	0.209	0.11	0.044525
C	0.041	0.0205	0.0166	0.0116	0.0072

D	$17 * 10^4$
E	8.16

Naknadno, trošak transformatora može se izračunati u M€ pomoću jednadžbe:

$$C_{tr} = 0.0432 \cdot S_{r,tr}^{0.7513} \quad (4-6)$$

gdje $S_{r,tr}$ je nazivna snaga transformatora u MVA. "Formula je izvedena iz prethodnih podataka o troškovima transformatora pri različitim nazivnim snagama." [30]

Na temelju ovih podataka, izračunati su i prikazani troškovi u Tablici 4.4. Troškovi plutajućeg čvorišta i baterija potječu iz [28] i [31]. Može se vidjeti da su početni troškovi u tim scenarijima uglavnom utjecani udaljenošću između WPF-a i obale, brojem WEC-ova koji se koriste u WPF-u i korištenom Froudeovom faktoru za skaliranje.

Tablica 4.4 Početni investicijski troškovi WPF-ova

	Lokacija 1 Wavestar	Lokacija 1 Wavebob	Lokacija 2 Wavstar	Lokacija 2 Wavebob
Cijena kabela [€/km]	58,333.68	58,333.72	58,333.72	58,333.72
Duljina kabela [km]	17.60	17.6	3.5	3.5
Potpuna cijena kabela [€]	1,026,672.75	1,026,673.39	204,168.00	204,168.00
Cijena Transformatora 1.6MVA [€]	60,213.75	60,213.75	60,213.75	60,213.75
Broj transformatora	1	1	1	1
Potpuna cijena transformatora [€]	60,213.75	60,213.75	60,213.75	60,213.75
Cijena čvorišta [€]	500,000.00	500,000.00	500,000.00	500,000.00
Broj čvorišta	1	1	1	1
Potpuna cijena čvorišta [€]	500,000.00	500,000.00	500,000.00	500,000.00
Cijena baterije [€]	508,017.40	508,017.40	508,017.40	508,017.40
Broj baterija	5	5	5	5
Potpuna cijena BESS [€]	2,540,087.00	2,540,087.00	2,540,087.00	2,540,087.00
Cijena Wavestara po masi [€]	229,578.56	-	229,578.56	-
Cijena Wavestara po snazi[€]	126,000.69	-	126,000.69	-
Cijena Wavboba po masi [€]	-	93,310.55	-	113,305.66
Cijena Wavboba po snazi [€]	-	46,655.27	-	56,652.83
Potpuna cijena po masi [€]	4,356,552.06	4,220,284.69	3,534,047.31	3,417,774.42
Potpuna cijena po snazi [€]	4,252,974.19	4,173,629.42	3,430,469.45	3,361,121.59

Nadalje, troškovi povezani s dalekovodima i kabelima su približno procijenjeni korištenjem formula (4-4) i (4-5), u kombinaciji sa shemama koje je pružio HEP (Hrvatski operator distribucijskog sustava).

Tablica 4.5 Početni investicijski troškovi povezivanja otoka s nacionalnom mrežom

Dalekovodi					
Dalekovod	70Al	50Cu	95Al		
Duljina [km]	4.55	5.6	14.6		
Nazivna struja [A]	-	-	-		
S [MVA]	-	-	-		
Cijena [€/km]	102,000.00	94,000.00	112,000.00		
Cijena [€]	464,100.00	526,400.00	1,635,200.00		
∑ Cijena Dalekovoda [€]	2,625,700.00				
Kablovi					
Kabel	3x1x185Al	3x1x35Cu	3x150CU	3x1x185Al	3x1x185Al
Duljina [km]	0.06	18.7	20.336	8.08	2.5
Nazivna struja [A]	375	237	375	375	375
S [MVA]	23	15	23	23	23
Cijena [€/km]	58,334.00	58,333.85	58,334.00	58,334.00	58,334.00
Cijena [€]	3,500.04	1,090,843.04	1,186,280.21	471,338.72	145,835.00
∑ Cijena kabela [€]	2,897,797.01				
Potpuna ∑ cijena [€]	5,523,497.01				

Kako je prikazanom Tablicom 4.4 i Tablicom 4.5, troškovi povezani s instalacijom farmi na energiju valova isplativiji su od izgradnje posebnih dalekovoda i kabela za povezivanje otoka Visa s nacionalnom elektroenergetskom mrežom.

5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavio je uspješnu mogućnost integracije postrojenja na morske valove u mikromrežu otoka Visa kao sredstvo za postizanje gotovo nulte neto razmijene električne energije s kopnenom mrežom, kao i prikazujući isplativost ovog pothvata kao „cost-effective“-niju opciju od povezivanja otoka s kopnenom mrežom putem kabela i dalekovoda.

Iako je sama mreža prilično stabilna bez integrirane distribucije, analizirajući rezultate u odjeljku 3.3, može se zaključiti da je u svim slučajevima poboljšana kvaliteta napona, posebno na električki udaljenijim terminalima. Što se tiče prenapona na "proizvodnim" terminalima na kojima su integrirani FN i WEC-ovi, to se može dalje ublažiti primjenom bolje kontrole BESS-a.

Kombiniranje obnovljivih izvora energije s BESS-om dodatno smanjuje intermitentnost tokova snage, što pogoduje mreži i smanjuje oslanjanje na priključke kopnene mreže. Takvi uređaji temeljeni na energetskej elektronici također se mogu upotrebljavati druge načine, na primjer, kao BESS na razini zajednice povezan na početku distribucijske mreže radi regulacije toka radne i jalove snage, pružajući potporu jalovom snagom za regulaciju napona. Buduća istraživanja trebala bi naglasiti ovaj aspekt, kao i njegov utjecaj na pokazatelje kvalitete energije, posebno treperenje i harmonijsku distorziju.

U dijelu ovog rada o ekonomskoj isplativosti prikazano je koliko bi koštalo integriranje optimalnog broja postrojenja na morske valove, s obzirom na lokaciju i vrstu WEC-ova, u usporedbi s troškovima vezanim uz spajanje otoka na glavnu elektroenergetsku mrežu. I ovdje se može vidjeti da su WEC-ovi isplativa opcija u tom smislu. No treba napomenuti da su se troškovi WEC-ova u pitanju skalirani pomoću Froudeove metode skaliranja, prvo po masi, a zatim radi usporedbe po snazi. Razlog tome bio je taj što se pojedinačni troškovi modula u određenom WEC-u nisu bili dostupni, pa je ova metoda korištena kao izvediva opcija. Stoga se nisu uzimali u obzir specifični troškovi modula i temeljili su se na materijalnim troškovima proizvodnje tih WEC-ova.

Naposljetku, proizvodnja električne energije pomoću WEC-ova općenito je ekološki prihvatljiva, stvara nove mogućnosti zapošljavanja i pokazuje se ekonomski učinkovitim,

budući da operativni troškovi i troškovi održavanja postaju niži i uskoro će biti usporedivi s proizvodnjom energije koja se temelji na fosilnim gorivima

LITERATURA

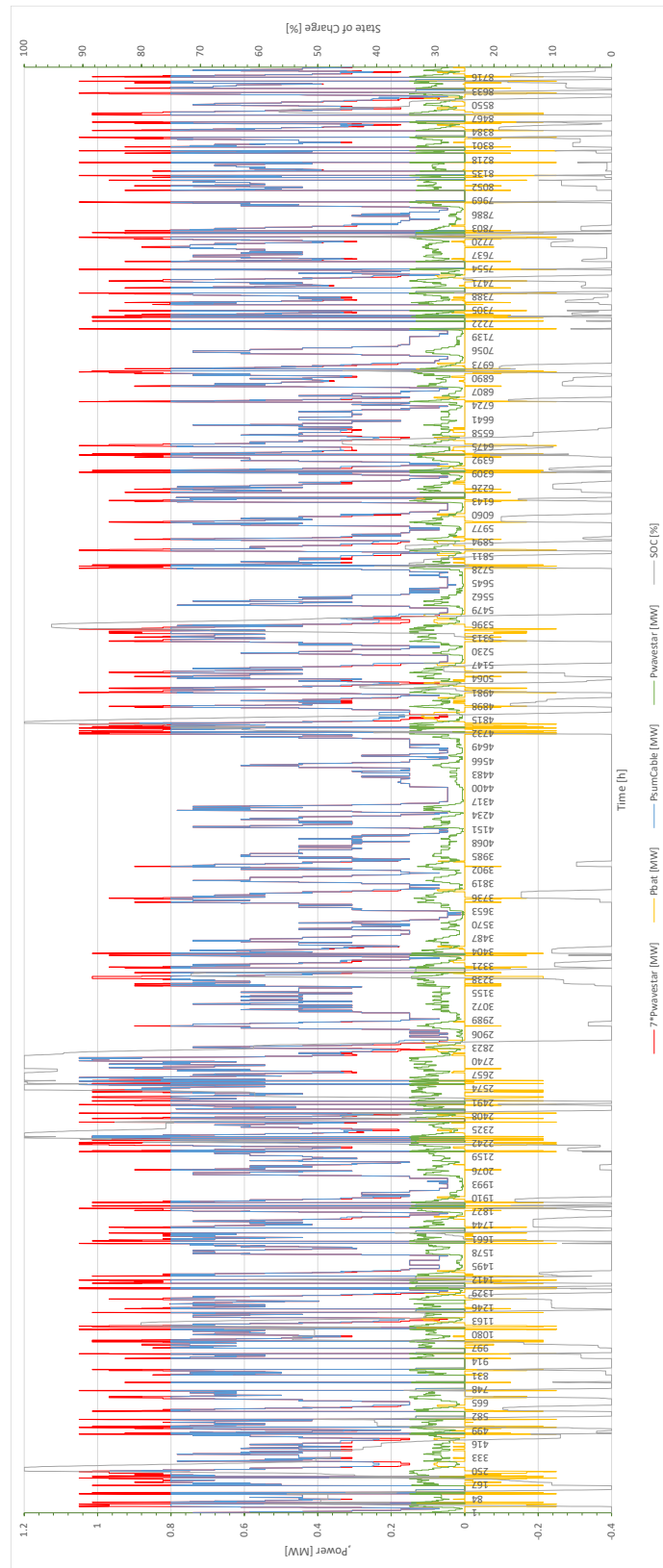
- [1] R. Pelc and R. M. Fujita, ‘Renewable energy from the ocean’, 2002.
- [2] ‘CorPower Ocean’, Jun. 15, 2022. <https://corpowersocean.com/corpower-ocean-unveils-commercial-scale-products-to-unleash-utility-scale-wave-farms/> (accessed May 20, 2023).
- [3] A. Pecher and J. P. Kofoed, *Handbook of Ocean Wave Energy*, Volume 7. SpringerOpen. doi: 10.1007/978-3-319-39889-1.
- [4] D. Ning and B. Ding, *Modelling and Optimization of Wave Energy Converters*, First edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press. doi: 10.1201/9781003198956.
- [5] M. Katalinić, ‘Modelling of Wind-Generated Waves in The Adriatic Sea for Applications in Naval Architecture and Maritime Transportation’, Doctoral Thesis, University of Zagreb, Zagreb, 2019.
- [6] N. J. Madassery, ‘Design and Layout of Power Conversion Chain for a Wave Energy Converter’, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2017.
- [7] R. Gobato, A. Gobato, and D. F. G. Fedrigo, ‘Study Pelamis system to capture energy of ocean wave’, Aug. 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1508.01106>
- [8] ‘Wave Dragon’. <http://www.wavedragon.net> (accessed Jun. 07, 2023).
- [9] ‘Archimedes Waveswing’.
- [10] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez de Alegría, and I. Kortabarria, ‘Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 413–434, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>.
- [11] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez de Alegría, and I. Kortabarria, ‘Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 413–434, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>.
- [12] A. Pecher and J. Kofoed, *Handbook of Ocean Wave Energy*. 2017. doi: 10.1007/978-3-319-39889-1.

- [13] N. Jenkins, D. Kirschen, G. Strbac, P. Crossley, and R. Allan, *Embedded Generation*. United Kingdom: IEE, 2000.
- [14] M. H. J. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Wiley-IEEE Press, 2011.
- [15] M. Katalinić, M. Čorak, and J. Parunov, ‘Analysis of wave heights and wind speeds in the Adriatic Sea’, London: Maritime Technology and Engineering – Guedes Soares & Santos (Eds), 2014.
- [16] ‘Copernicus Climate Data Store’. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (accessed May 20, 2023).
- [17] ‘GEBCO - The General Bathymetric Chart of the Oceans’. <https://www.gebco.net> (accessed May 25, 2023).
- [18] R. G. Coe and V. S. Neary, ‘Review of Methods for Modeling Wave Energy Converter Survival in Extreme Sea States’, Seattle, WA: Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium, Apr. 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/338374589>
- [19] A. Babarit, J. Hals, M. J. Muliawan, A. Kurniawan, T. Moan, and J. Krokstad, ‘Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters’, *Renew Energy*, vol. 41, pp. 44–63, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.10.002.
- [20] L. Prpić, ‘Integracija postrojenja na morske valove na Jadranskim otocima u okviru WECANet projekta’, University of J.J.Strossmayer of Osijek, Osijek, 2021.
- [21] M. Žnidarec, D. Šljivac, D. Dosen, and B. Nakomcic-Smaragdakis, *Performance evaluation of simple PV microgrid energy management system*. 2020. doi: 10.1109/SST49455.2020.9264129.
- [22] A. De Andres, J. Maillet, J. Hals Todalshaug, P. Möller, D. Bould, and H. Jeffrey, ‘Techno-Economic Related Metrics for a Wave Energy Converters Feasibility Assessment’, *Sustainability*, vol. 8, no. 11, 2016, doi: 10.3390/su8111109.
- [23] ‘Regulation on Incentives for the Production of Electricity from Renewable Energy Sources and High-Efficiency Cogeneration (Uredba o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i visokoučinkovitih kogeneracija)’, *Narodne*

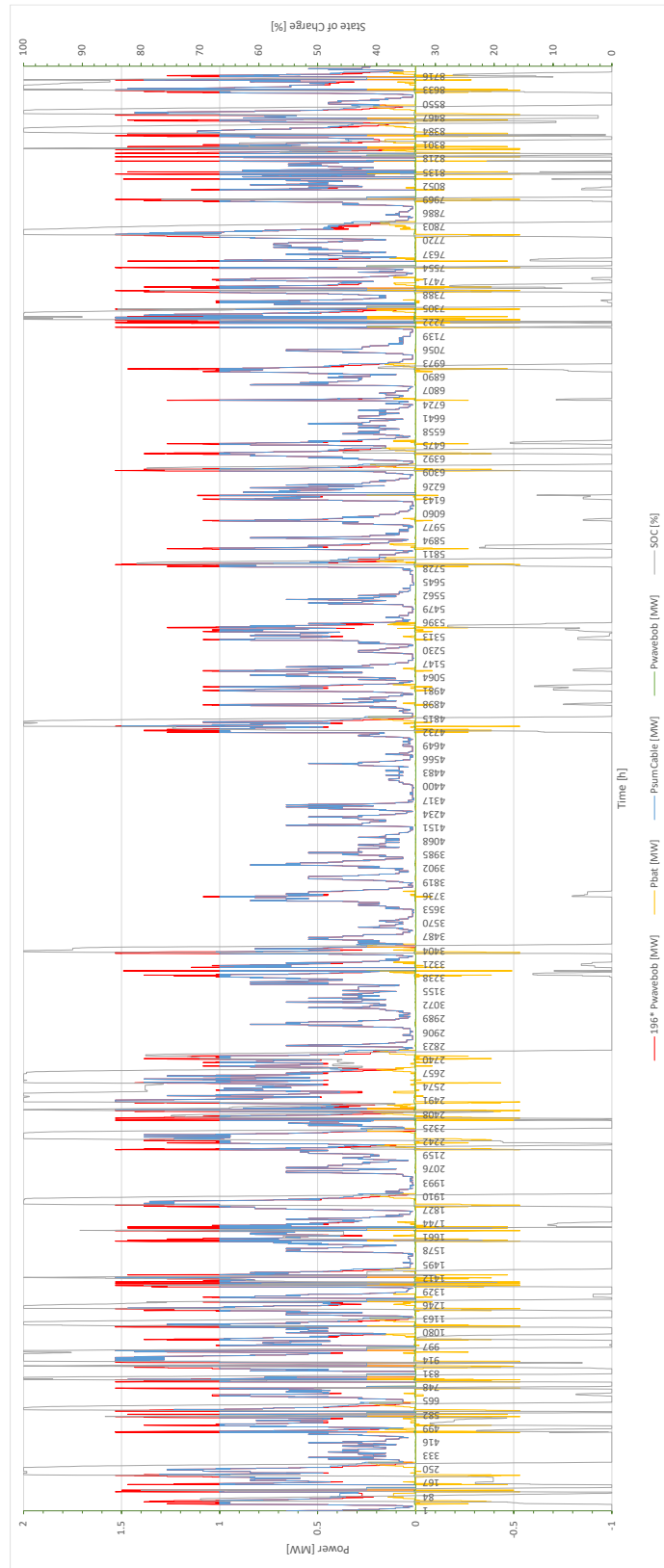
- Novine*’ *br.70/2023*. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2023_06_70_1164.html (accessed Aug. 28, 2023).
- [24] ‘Tariff System for the Production of Electricity from Renewable Energy Sources and Cogeneration (Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije)’, *‘Narodne Novine’ br.133/2013*. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_11_133_2888.html (accessed Aug. 28, 2023).
- [25] ‘CROPEX - Croatian Power Exchange’. <https://www.cropex.hr/en/market-data/day-ahead-market/day-ahead-market-results.html> (accessed Aug. 30, 2023).
- [26] O. Choupin, M. Henriksen, and R. Tomlinson, ‘Interrelationship between variables for wave direction-dependent WEC/site-configuration pairs using the CapEx method’, *Energy*, vol. 248, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123552.
- [27] M. O’Connor, T. Lewis, and G. Dalton, ‘Techno-economic performance of the Pelamis P1 and Wavestar at different ratings and various locations in Europe’, *Renew Energy*, vol. 50, pp. 889–900, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.009>.
- [28] N. R. K. Bharathi, ‘Electrical Networks of CorPower Wave Farms: Economic Assessment and Grid Integration Analysis of Voltage’, 2017. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208095572>
- [29] H. Ergun, D. Van Hertem, and R. Belmans, ‘Transmission system topology optimization for large-scale offshore wind integration’, *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 908–917, 2012, doi: 10.1109/TSTE.2012.2199341.
- [30] A. Nerby, ‘Optimal collection grid and transmission line topology for the grid connection of an offshore multi-source park’, 2020.
- [31] ‘Capture Energy - BESS PowerBox 1MW/1,1MWh’. <https://captureenergy.eu/eng/bess-powerbox-1mw-11mwh/> (accessed Aug. 25, 2023).

DODATAK

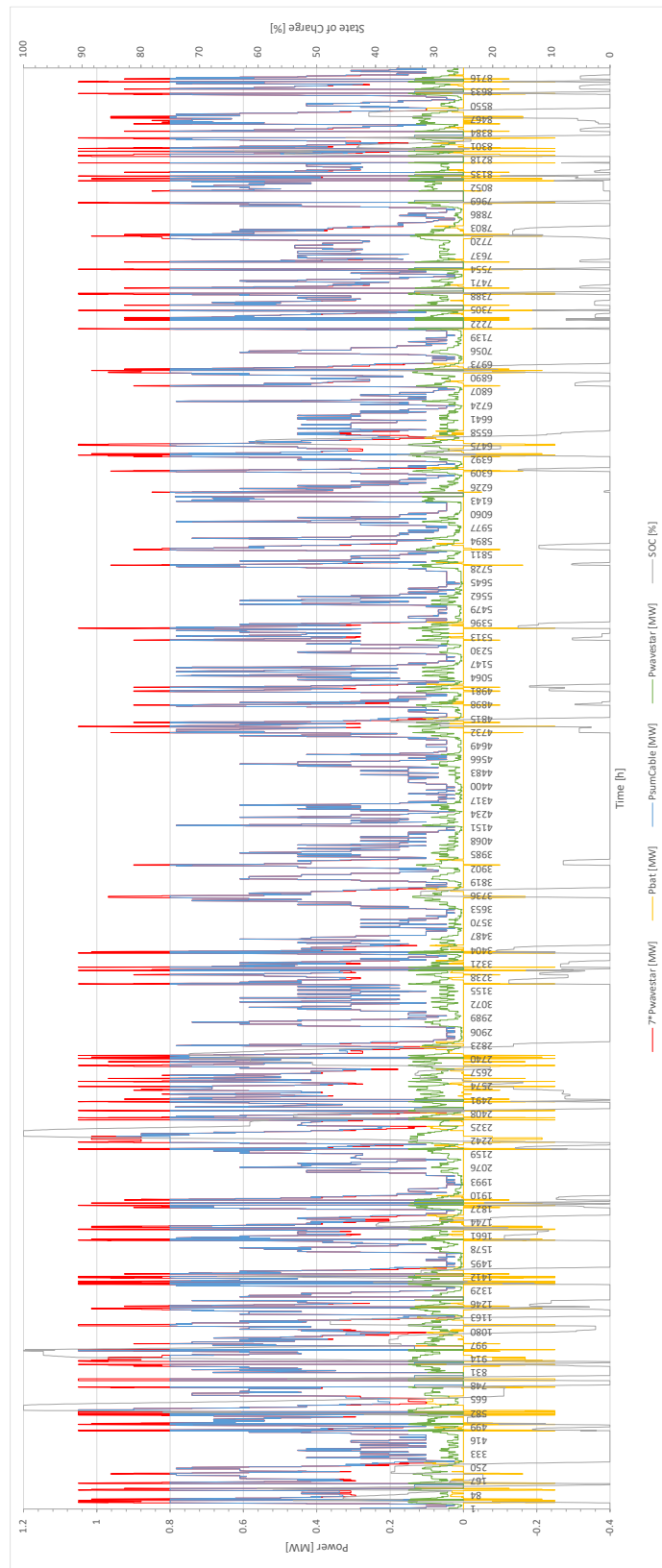
Slika A Wavestar WPF izlaz za lokaciju 1



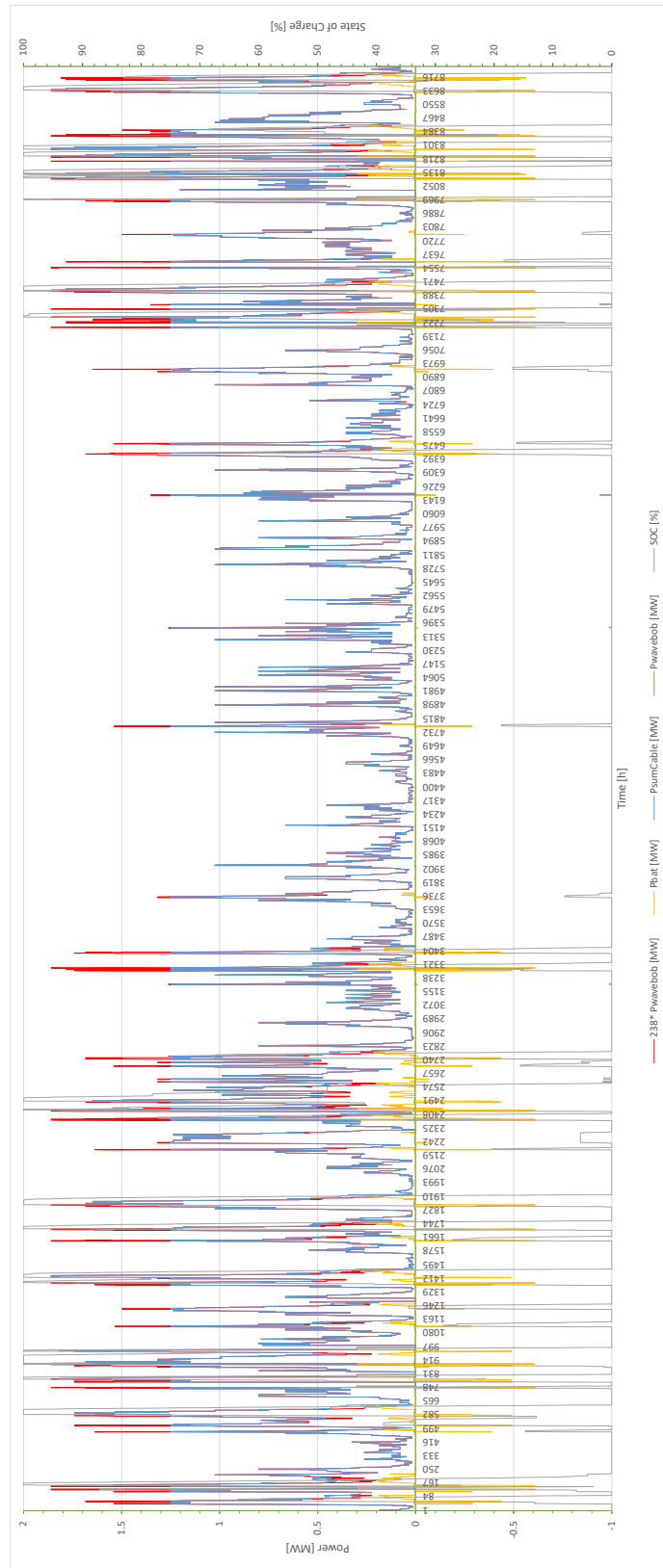
Slika B Wavebob WPF izlaz za lokaciju 1



Slika C Wavestar WPF izlaz za lokaciju 2



Slika D Wavebob WPF izlaz za lokaciju 2



SAŽETAK

Osnovni cilj ovog diplomskog rada bio je istražiti optimiziranu tehno-ekonomsku integraciju postrojenja na morske valove u električnu mrežu otoka, s posebnim naglaskom na otok Vis u Jadranskom moru.

U drugom poglavlju pružena je sveobuhvatna definicija energije valova i razmatrane su klasifikacije i tehnologije povezane s postrojenjima na morske valove. Dodatno, razmatrani su različiti tipovi sučelja između postrojenja na morske valove i mreže, kao i potencijalni utjecaj tih postrojenja na mrežu otoka i njegov električni sustav.

Treće poglavlje ovog rada usmjereno je na modeliranje energije valova koji okružuje otok Vis. Korištena je Froudeova metoda skaliranja za prilagodbu postrojenja Wavestar i Wavebob specifičnim morskim uvjetima oko Visa. Također je korišten softverski alat PowerFactory za modeliranje električne mreže otoka, provođenje simulacija i prikazivanje električnih parametara dobivenih iz stvarnih podataka prikupljenih na Visu. Ovo poglavlje uključivalo je simulacije različitih scenarija koji uključuju integraciju fotonaponskih elektrana i postrojenja na morske valove, a rezultati su prikazani vizualno i numerički.

Na kraju, četvrto poglavlje izvlači zaključke iz analize ovog rada, fokusirajući se na ekonomske aspekte integracije postrojenja na morske valove u mrežu u usporedbi s troškovima povezivanja otoka s glavnom elektroenergetskom mrežom. Rezultati pokazuju da su postrojenja na morske valove održiva i povoljna opcija u ovom kontekstu

Ključne riječi: energija valova, postrojenja na morske valove, WEC, Jadransko more, optimalna integracija

ABSTRACT

The primary objective of this thesis was to explore the optimized techno-economic integration of wave energy converters into an island's electrical grid, with a particular focus on the island of Vis in the Adriatic Sea.

In the second chapter, a comprehensive definition was provided of wave energy and classifications and technologies associated with wave energy converters were discussed. Additionally, different interface types between wave energy converters and the grid were discussed, as well as the potential impact of these converters on the island's grid and its electrical power system.

The third chapter of this thesis centred around modelling the wave energy potential surrounding the island of Vis. The Froude scaling method to adapt Wavestar and Wavebob wave energy converters to the specific sea conditions around Vis were utilised. Also, PowerFactory software tool was used to model the island's power grid, conduct simulations, and presented electrical parameter values derived from real-world data collected on Vis. This chapter included simulations of various scenarios involving the integration of photovoltaic power plants and wave energy converters, with the resulting data being both visually and numerically presented.

Finally, the fourth chapter draws conclusions from the findings of this thesis, focusing on the economic aspects of integrating wave energy converters into the grid compared to the costs associated with connecting the island to the main power grid. The results demonstrate that wave energy converters are a viable and advantageous option in this context.

Key words: wave energy, wave energy converter, WEC, Adriatic Sea, optimal integration

PRIZNANJA

Želim izraziti svoju najdublju zahvalnost svojim mentorima i nadzornicima, profesorima Irini Temiz i Damiru Šljivcu, bez čijeg vodstva ovaj rad nikada ne bi bio dovršen. Njihov uvid i nepokolebljiva podrška bili su neprocjenjivi. Posebno sam zahvalan dr. Mateju Žnidarecu na njegovom stručnom znanju korištenja softverskih alata, što je odigralo ključnu ulogu u prevođenju mojih ideja u praktična rješenja. Hvala i kolegi kolegi Alenu Mazalici iz Končar Grupe na njegovom unutarnjem znanju o fotonaponskoj farmi na otoku Visu.

Također izražavam zahvalnost profesoru Marcusu Bergu na našim pronicljivim raspravama tijekom odmora i njegovim neprocjenjivim savjetima. Moje vrijeme na Odjelu za električnu energiju Sveučilišta Uppsala obogatilo je zajedništvo doktoranada i istraživača, a posebno zahvaljujem Marini Mattos i Rini Yamazaki što su učinile da se osjećam kao kod kuće.

Cijenim velikodušnost priznatih autora koji su mi dopustili korištenje njihovih slika, što je dodalo dubinu i značenje ovom radu.

Konačno, svojoj obitelji i prijateljima, kako onima blizu tako i onima daleko od Kutine, vaša nepokolebljiva podrška i motivacija bili su mi vodilja tijekom ovog diplomskog putovanja. Duboko sam zahvalan na vašoj ljubavi i ohrabivanju, koje su omogućile ovo postignuće. Svakome od vas upućujem od srca iskrenu zahvalnost!

ŽIVOTOPIS

Autor ovog diplomskog rada, Blaž Jozanović, student je završne godine diplomskog studija na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera Osijek, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Rođen 17. rujna 1998. godine u Zagrebu, završio je osnovnu školu i tehničku srednju školu s naglaskom na Električnim strojevima s primijenjenim računalstvom u Kutini. Student je završio preddiplomski studij na spomenutom fakultetu, specijalizirajući se za elektrotehniku. Student je vješt u korištenju računala i odgovarajućih inženjerskih alata, tečan u hrvatskom i engleskom jeziku te posjeduje vozačku dozvolu B kategorije.

Potpis