

Modeliranje postrojenja na morske valove za optimalan rad mreže

Glogoški, Rene

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:872432>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**

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

MODELIRANJE POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE
ZA OPTIMALAN RAD MREŽE

Diplomski rad

Rene Glogoški

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Rene Glogoški
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1445, 07.10.2022.
JMBAG:	0165082900
Mentor:	prof. dr. sc. Damir Šljivac
Sumentor:	prof. dr. sc. Predrag Marić
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Predrag Marić
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Modeliranje postrojenja na morske valove za optimalan rad mreže
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Cilj ovoga diplomskog rada je pokazati način modeliranja postrojenja na morske valove pomoću poznatih parametara. Također, postrojenje će se integrirati u mikromrežu grada Visa za koju će se promatrati promjene koje unosi postrojenje na morske valove ispod različitih scenarija u mreži. Tijekom analize djelovanja modela postrojenja na morske valove koristit će se tehnike modeliranja postrojenja, napredni alati za simulaciju, osnovne tehnike optimizacije i sl. Optimalno stanje u mreži postizat će se integracijom ostalih komponenata kao što su baterije i
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	18.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	7.10.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	14.10.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 14.10.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Rene Glogoški

Studij:

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika

Mat. br. Pristupnika, godina upisa:

D-1445, 07.10.2022.

Turnitin podudaranje [%]:

6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Modeliranje postrojenja na morske valove za optimalan rad mreže**

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

i sumentora prof. dr. sc. Predrag Marić

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

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

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Cilj diplomskog rada.....	1
2. ENERGIJA VALOVA I POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE.....	2
2.1. Energija valova.....	4
2.2. Klasifikacija postrojenja na morske valove.....	7
2.3. Tipovi priključaka valovnih farmi s elektroenergetskim sustavom.....	17
2.4. Utjecaj integracije valovnih farmi na elektroenergetski sustav.....	19
3. INTEGRACIJA POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE U MREŽU OTOKA VISA.....	25
3.1. Modeliranje linearnog generatora s permanentnim magnetima.....	26
3.2. Modeliranje mikromreže otoka Visa.....	33
3.2.1. Mikromreža otoka Visa bez integrirane FN elektrane i postrojenja na morske valove.....	36
3.2.2. Mikromreža otoka Visa s integriranom FN elektranom i postrojenjem na morske valove za dvije odabrane lokacije u mreži.....	43
3.2.3. Mikromreža otoka Visa s integriranim postrojenjem na morske valove, FN elektranom i baterijskim spremnikom za dvije odabrane lokacije u mreži.....	63
4. ZAKLJUČAK.....	68
LITERATURA.....	70
SAŽETAK.....	75
ABSTRACT.....	76
PRIZNANJA.....	77
ŽIVOTOPIS.....	78

1. UVOD

Svrha i glavni zadatak ovoga diplomskoga rada je opisati energiju valova kao jedan od obnovljivih izvora energije kao i pokazati utjecaj modeliranog postrojenja na morske valove na prilike u mreži.

U teorijskom dijelu ovoga rada, opisan će se i objasniti energija valova. Također, napravit će se pregled tehnologija postrojenja na morske valove. Nadalje, opisan će se i objasniti utjecaj postrojenja na morske valove iz aspekata kvalitete električne energije, stabilnosti, tokova snaga, promjenama napona te radne i jalove snage.

U praktičnom dijelu ovoga rada, objasnit će se proces modeliranja postrojenja na morske valove uzimajući u obzir uvjete na moru po ljeti i po zimi. Također, pokazat će se i utjecaj modeliranog postrojenja na mikromrežu otoka Visa uz dodanu fotonaponsku elektranu i pohranu električne energije. Praktični dio ovoga rada baziran je na simulacijama u DIgSILENT PowerFactory-u. To je program koji može simulirati tokove snaga, vršiti analizu stabilnosti kao i vršiti analizu prijenosa, distribucije i ostalih složenijih inženjerskih zadataka. Model postrojenja na morske valove je integriran u mikromrežu grada Visa, a razlikujemo dva slučaja za koje su simulacije rađene: ljetni dan s maksimalnom proizvodnjom iz fotonaponske elektrane i s maksimalnim opterećenjem i zimski dan s minimalnom proizvodnjom iz fotonaponske elektrane i minimalnim opterećenjem. Spomenute simulacije su detaljnije objašnjenje u trećem poglavlju ovoga rada zajedno s rezultatima provedenih simulacija. Zaključak ove teze je iznesen u četvrtom poglavlju ovoga rada.

1.1. Cilj diplomskog rada

Cilj ovoga diplomskog rada je pokazati način modeliranja postrojenja na morske valove pomoću poznatih parametara. Također, postrojenje će se integrirati u mikromrežu grada Visa za koju će se promatrati promjene koje unosi postrojenje na morske valove ispod različitih scenarija u mreži. Tijekom analize djelovanja modela postrojenja na morske valove koristit će se tehnike modeliranja postrojenja, napredni alati za simulaciju, osnovne tehnike optimizacije i sl. Optimalno stanje u mreži postizat će se integracijom ostalih komponenata kao što su baterije i fotonaponska elektrana.

2. ENERGIJA VALOVA I POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE

Ovaj izvor energije ima poprilično velik potencijal za iskorištavanje. Tijekom 2022. godine pa sve do danas, glavni razlog za veliku svjetsku krizu su ratovi u Ukrajini i na Bliskom istoku. Ti ratovi su doveli do povećanja cijena na svjetskom tržištu energije i ostalih dobara. Mnoge države u Europi su idalje ovisne o konvencionalnim izvorima energije kao što su nafta, ugljen zemni plin i ostali. To sa sobom nosi velike rizike u pogledu snabdijevanja energijom jer u svako doba može nestati dovod opskrbe energijom. Ukoliko se to dogodi, obnovljivi izvori energije mogu biti dobra zamjena ili nadopuna neobnovljivim izvorima energije jer su čisti, pouzdani, ne zagađuju okoliš i mnogi od njih su vrlo jeftini za razliku od konvencionalnih načina dobivanja električne energije. Stoga, sve više i više raste potreba za instalacijom elektrana na obnovljive izvore energije kao što su elektrane na morske valove, vjetroelektrane, solarne elektrane, geotermalne elektrane itd.

Pretvorba energije valova u električnu energiju počiva na kinetičkim i hidrodinamičkim načelima. Odnosno, energija valova je energija oscilirajućih valova koji prenose velike količine energije. Takva energija se može pretvoriti u korisnu energiju za pokrivanje ljudskih potreba za energijom. Naprave koje pretvaraju energiju valova u električnu nazivaju se postrojenja na morske valove (engl. *Wave Energy Converters (WECs)*). Postoji niz različitih tipova postrojenja na morske valove koji se mogu koristiti u svrhu pretvorbe energije morskih valova u koristan oblik energije (električnu energiju).

Kao što je prije rečeno, obnovljivi izvori energije imaju svojih prednosti, ali imaju i određene mane. Ponekad zna biti vrlo teško predvidjeti vremenske uvjete i trebamo toga biti vrlo svjesni jer to zna biti presudno prilikom odabira mjesta instaliranja postrojenja. Ta činjenica dovodi do toga da elektroenergetski sustav treba bolje nadzirati i kontrolirati. Kod integriranja distribuirane proizvodnje, mreža prelazi iz pasivne u aktivnu. To predstavlja glavni izazov kod integriranja takvih postrojenja u mrežu.

Iz godine u godinu, iskorištavanja energije valova idalje raste. Kakogod, nuklearna energija, hidroenergija i geotermalna energija idalje predstavljaju izvore energije iz kojih se dobiva najviše energije. Glavni razlog njihove široke primjene je taj da su jeftini, vrlo su dostupni i nerijetko jednostavni za korištenje. [1]

U ovome poglavlju su opisani razlozi korištenja obnovljivih izvora energije u slučaju proizvodnje električne energije pomoću postrojenja na morske valove. Definiranje energije valova pomoću formula i izraza je neophodno za razumijevanje njezinih osnovnih načela. Energija valova spada u oblike izvora energije s iznimno velikim energetske potencijalom za iskorištavanje. To je vrlo bitno znati za daljnja razmatranja. Postoji puno ideja o iskorištavanju energije valova shodno njezinoj pouzdanosti, održivosti kao i učinkovitosti. Jedan od glavnih razloga iskorištavanja i korištenja obnovljivih izvora energije je njihov mali utjecaj na okoliš što aludira na smanjenje koncentracije stakleničnih plinova u atmosferi kako bi se smanjilo globalno zagrijavanje. Međutim, obnovljivi izvori energije imaju nekoliko ozbiljnih mana kao što je nemogućnost skladištenja energije, nedostupnost tijekom cijeloga vremena, mala gustoća energije kao i radna sredina koja vrlo često donosi velike ekonomske, tehnološke i socijalne zahtjeve. U usporedbi s konvencionalnim izvorima energije, može se reći da obnovljivi izvori energije će zauzeti vodeće mjesto u znanosti i primijeni u budućnosti.

Prema podacima iz [2], Švedska je vrlo napredna u ovome području i pokriva oko 66 % svoga konzuma energije iz obnovljivih izvora energije. Osim toga, korištenje obnovljivih izvora energije može podići životni standard i kvalitetu života građana. Isto tako, može podići i razinu energetske neovisnosti.

U radu [3], autori su naveli da se postrojenje na morske valove modeliralo kao linearni generator s permanentnim magnetima s izravnim pogonom. Pomicanje pomičnog dijela generatora uzrokuje promjenu magnetskog toka unutar namota statora i na takav se način dobiva izlazni napon svakoga WEC-a. Svaki WEC je spojen preko ispravljača na trafostanicu koja se nalazi ispod površine mora. U ovome slučaju se energija prenosi putem istosmjernog prijenosa kako bi se smanjili gubici.

U radu [4], autori navode osnovne principe rada i izvedbe postrojenja na morske valove. Osnovni principi rada uključuju oscilirajuća tijela, postrojenja koja rade na principu razlike tlakova, prelijevanja i dr. U radu je naznačeno da postrojenje *CorPower* radi na principu oscilirajućih bova (plutača) koje su spojene s linearnim generatorom koji proizvodi električnu energiju. Prednost ovoga postrojenja je što nije bitan smjer nadolazećeg vala.

U radu [5], korištena je tzv. *PHIL* simulacija koja oponaša realne uvjete rada. Ta simulacije također daje stvaran pristup funkcionalnosti i pouzdanosti fizičkih dijelova postrojenja. U ovim simulacijama potrebni su podaci o linearnom generatoru jer je *PHIL* simulacija indirektna i oslanja se na rotacijske strojeve. Ponašanje linearnog generatora dobiveno je rastom i smanjivanjem broja okretaja sinkronog

generatora. Cijeli simulator sastoji se od elektromotora, sinkronog generatora, mjenjačke kutije i zamašnjaka.

U radu [6], autor navodi da se postrojenje na morske valove *Wave Dragon* može izvesti s vodnom turbinom i hidrogeneratorom. Na taj se način ostvaruje korisnost pretvorbe energije i do 90%. Prednost ovakve izvedbe WEC-a je ta što takvo postrojenje nema prevelike zahtjeve za održavanjem.

2.1. Energija valova

Kao što je naznačeno u uvodu, energija morskih valova je obnovljivi izvor energije koji ima poprilično velik energetske potencijal. Valovi na površini oceana ili mora mogu biti uzrokovani raznim čimbenicima i razlozima. Bez obzira na sve, najznačajniji razlog za nastajanje morskih valova na površini mora je vjetar. Isto tako, potresi i tsunamiji mogu uzrokovati valove na površini oceana, ali ih je jako teško predvidjeti i iskorištavati. [7]

Postoje dva osnovna tipa valova na površini mora. Prvi tip podrazumijeva valove uzrokovane vjetrom i oni su kratkoročni (engl. *short-term*). Vrlo često su generirani u blizini obale mora. Drugi tip predstavljaju dugoročni valovi uzrokovani olujama iznad oceana i mora, a glavna im je karakteristika velika amplituda dok se njihova valna duljina smanjuje kako val propagira u plitkoj vodi. [8]

Energija valova po jedinici duljine valnoga brijega se može izraziti pomoću formule (2-1)[3]:

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

gdje je g ubrzanje Zemljine sile teže (gravitacijsko ubrzanje), ρ je gustoća morske vode, H_s je značajna visina valova i T_s predstavlja period energije valova. Značajna visina valova i energetska period može se izraziti preko spektra valova $S(\omega)$ tj. preko spektralnih momenata m_n :

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

gdje je ω kutna valna frekvencija, dok se značajna visina valova može izraziti kao:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2-3)$$

a period valova je izražen kao :

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2-4)$$

Iz formule (2-1) može se zaključiti da gustoća snage ovisi o kvadratu gravitacijskog ubrzanja kao i o kvadratu značajne visine valova. Također, proporcionalno ovisi i o gustoći morske vode. [3]

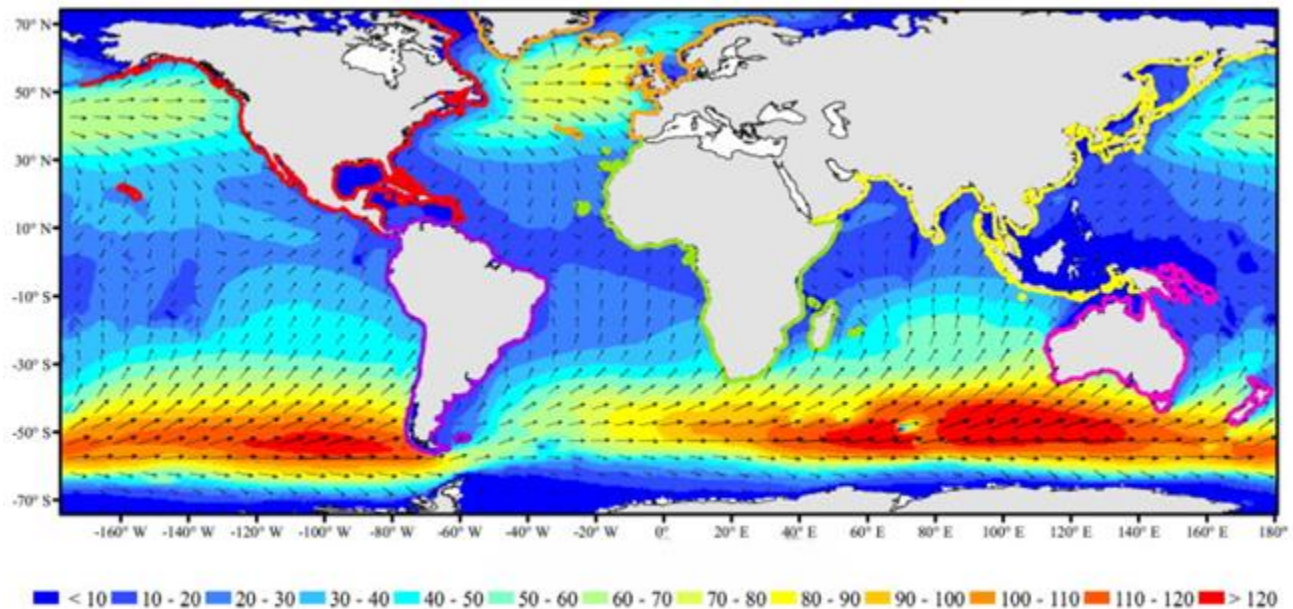
Spektar valova $S(\omega)$ može se dobiti iz formule koja je dana u modificiranom jednoparametarskom JONSWAP valnom spektru:

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

gdje je $p = \exp \left[\frac{-(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2} \right]$, $\omega_m = 0.52 + \frac{1.4}{H_s + 0.7}$ je modalna frekvencija, $\sigma = 0.06$ ako je $\omega \leq \omega_m$ i $\sigma = 0.08$ ako je $\omega > \omega_m$.

Mjera σ je mjera spektralne širine of vrha spektra. [3]

Važno je spomenuti da je glavna veličina za odluku gdje će se postrojenje na morske valove instalirati izražena u kW/m. Različita mjesta na svijetu imaju različitu gustoću snage valova. Treba napomenuti da je gustoća snage valova na području Europe manja u odnosu na gustoću valovne snage diljem Azije. Međutim, gustoća snage valova na području Europe pokazuje da je prikladna za daljnja istraživanja postavljanja postrojenja na morske valove u europskim morima kao što je prikazano na Slika 2.1. [3] Također, vrlo je povoljna za proizvodnju električne energije u tim morskim područjima.



Slika 2.1. Godišnja prosječna gustoća energije (kW/m). [3]

Crveno istaknuta područja na karti na Slici 2.1. su područja sa najvećom vjerojatnosti valova koji imaju više od 120 kW/m prosječne godišnje gustoće snage valova. To obuhvaća područja oko Južne Amerike i između Australije i Antarktike. Glavni razlog takve razdiobe su velike vodene oceanske mase kao i oceanske struje. Suprotno tomu, plavo naznačena područja su područja male vjerojatnosti da valovi imaju godišnju prosječnu gustoću snage manju od 10 kW/m, ali oni su također prikladni za proizvodnju električne energije pomoću postrojenja na morske valove. Takva područja se prostiru Atlantskim oceanom između Južne Amerike i Afrike kao i u velikim zaljevima.

Osim toga, grupa istraživača u [3] provodila je istraživanje o gustoći snage valova u različitim područjima na svijetu. Rezultati njihovog istraživanja se nalaze u Tablici 2.1. [3]

Tablica 2.1. Gustoća snage valova u različitim područjima diljem svijeta. [3]

Regija	Značajna gustoća valovne energije valova [kW/m]
Italija	1.7-4.3
Litvanija	manje od 2.4
Švedska	2.1-5.3
Crveno more	manje od 3
Malta	manje od 6.5
Maldivi	8.46-12.75
Kaspijsko jezero	5-14
Kina	6-16

2.2. Klasifikacija postrojenja na morske valove

Kako bi bilo moguće pretvoriti energiju morskih valova u električnu energiju, potrebna su specifična postrojenja koja se nazivaju postrojenja na morske valove (engl. *Wave Energy Converters*). Ona se mogu podijeliti u nekoliko skupina npr. prema obliku, mjestu njihova instaliranja, načelima rada, utjecaju na okoliš itd. Osim toga, mogu se klasificirati prema metodama njihove izgradnje i prema njihovoj veličini. Prema studiji [4], istraženo je da točno 64 % postrojenja na morske valove radi na velikoj udaljenosti od obale mora. Takva postrojenja se uobičajeno nazivaju postrojenja na pučini odnosno na otvorenome moru (engl. *Offshore*). Općenito se postavljaju na udaljenosti koje su veće od 5 kilometara od obale mora. Suprotno ovakvom tipu postrojenja, postoje i postrojenja blizu obale mora tj. priobalna postrojenja (engl. *Nearshore*) koja se postavljaju u krugu od 5 kilometara od obale mora. Treći tip postrojenja su obalna postrojenja (engl. *Onshore*) koja se instaliraju blizu obale mora. Ovakva postrojenja mogu imati značajnija ograničenja u pogledu instaliranja jer njihova gradnja poprilično ovisi o karakteristikama krajolika u kojima se postavljaju. Ovakva postrojenja obično ne zahtijevaju sidrenje što je velika prednost.

U ovome poglavlju detaljno će se objasniti klasifikacija postrojenja na morske valove prema nekoliko kriterija.

2.2.1. Klasifikacija postrojenja na morske valove obzirom na udaljenost od obale

Ovo je osnovna klasifikacija postrojenja na morske valove koja uključuje postrojenja na pučini (engl. *Offshore plants*), priobalna postrojenja (engl. *Nearshore plants*) i obalna postrojenja (engl. *Onshore plants*). [9] Ovo je vrlo uobičajena klasifikacija u mnogim literaturama.

Glavna odlika obalnih postrojenja je ta što oni obično nemaju velike zahtjeve za održavanje i izgradnju. To je zbog toga što nisu usidreni na morskom dnu. Takva postrojenja se vrlo često mogu instalirati u plitkoj vodi, uz litice ili u područjima niskog potencijala energije valova pored obale mora. Kakogod, izvedbe obalnih postrojenja pretežito ovisi o geološkim i političkim zahtjevima što može značajno ograničiti njihovu primjenu. Najbolji primjer obalnog postrojenja je Limpet postrojenje koje je dizajnirao i instalirao Wavegen u Škotskoj. Zapravo, to postrojenje je izgrađeno u Islay-u i energiju šalje u mrežu. Ima kapacitet proizvodnje od 500 kW i zahtijeva dubinu vode od oko 15 metara. Međutim, takvo postrojenje ima vrlo velik utjecaj na okoliš jer zauzima cijelu plažu. To može biti teško izvodivo u državama s velikim turističkim potencijalom kao što je npr. Hrvatska ili neke druge mediteranske zemlje. Umjesto toga, postrojenje može biti izvedeno s lukobranom što znatno pojeftinjuje izvedbu samoga postrojenja. Velika prednost ovakvoga postrojenja je ta što su generator i turbina postavljeni na vidljivo i lako dostupno mjesto. To može biti odlučujuće za pronalaženje i rješavanje kvara. [10] Postrojenje Limpet je prikazano na Slici 2.2.1. [11]



Slika 2.2.1. Postrojenje na morske valove Limpet u Škotskoj. [11]

S druge strane, priobalna postrojenja na morske valove pojavljuju se u više izvedba. Općenito, to su postrojenja sa manjim utjecajem na okoliš u usporedbi s obalnim postrojenjima. Priobalna kao i obalna postrojenja na morske valove najčešće koriste načela oscilirajućeg stupca vode kako bi proizvodila električnu energiju. Jedan primjer takvog postrojenja se zove Oceanlix, kao što je prikazano na Slici 2.2.2., instalirano u Južnoj Australiji. Načelo njegova rada temelji se na turbini koja pomoću strujanja zraka proizvodi električnu energiju. Strujanje zraka je uzrokovano podizanjem i spuštanjem stupca vode unutar vodne komore. Ovakav tip izvedbe priobalnog postrojenja ima srednji utjecaj na okoliš koji može biti uzrokovan paraboloidnim zidom čiji je glavni zadatak fokusirati valove u istu točku. Kakogod, ovakav tip postrojenja ne zahtijeva često održavanje jer su svi kritični dijelovi postrojenja u vodi, stoga serviseri lako mogu riješiti problem ukoliko zatreba. Oceanlix je razvio postrojenje Oceanlix. [10]



Slika 2.2.2. Postrojenje na morske valove Oceanlix. [12]

Sljedeći primjer je WavePlane koji je izveden kao linijski apsorber koji je prikazan na Slici 2.2.3. To je plutajuće postrojenje na morske valove koje je usidreno za morsko dno pomoću užeta. Ovo postrojenje ima veliki spremnik za vodu koji su puni nadolazećim valovima. Voda pada iz gornjeg spremnika u donji, a pritom prolazi kroz turbinu koja pokreće generator koji proizvodi električnu energiju. Ovakva postrojenja obično imaju malen utjecaj na okoliš, ali mogu ometati navigacijske sustave brodova. [10]



Slika 2.2.3. Postrojenje WavePlane. [13]

Postrojenja na morskoj pučini su postrojenja smještena barem 5 kilometara od obale mora. Dubina mora koju zahtijevaju je barem 40 metara. U usporedbi s obalnim i priobalnim postrojenjima, postrojenja na morskoj pučini imaju veći potencijal za proizvodnju električne energije jer oni iskorištavaju energiju iz silnijih valova na moru. Postrojenja moraju moći izdržati ekstremne uvjete iznad mora i naravno, moraju biti vrlo robusna. U tom slučaju, dobar izbor je postaviti plutajuće objekte tzv. bove. Također, postoje postrojenja čiji se princip rada temelji na razlici tlakova kao npr. Archimedes Wave Swing prikazan na Slici 2.2.4. Sastoji se od dva cilindra. Gornji cilindar se smije kretati dok je donji cilindar pričvrćen za morsko dno. U gornjem cilindru se nalazi zrak koji se komprimira i dekomprimira dok se valovi šire kroz postrojenje. Linearni generator proizvodi električnu energiju i šalje ju u mrežu. Ovakva izvedba je jako robusna i vrlo često teško izvediva. Ima velik utjecaj na okoliš i može pokvariti vizualni dojam pučine. [10]



Slika 2.2.4. Archimedes Wave Swing kojeg je razvila tvrtka AWS Ocean Energy Ltd. [10]

2.2.2. Klasifikacija postrojenja na morske valove s obzirom na smjer upadnog vala

Smjer upadnog vala je drugi kriterij po kojemu se postrojenja na morske valove mogu klasificirati. To se odnosi na smjer nadolazećih valova u neku točku ili lokaciju. Shodno tome: postrojenja na morske valove mogu se klasificirati u tri grupe: atenuatori, point apsorberi i terminatori. [9]

Atenuatori su pogodni kada je nadolazeći val usporedan s njihovom konstrukcijom. Najbolji primjer takvoga postrojenja je Pelamis, prikazan na Slici 2.2.5. On se također naziva i zglobni plutajući atenuator. Izrađen je za dubine mora od oko 50 metara i više, a sastoji se od serija polupotopljenih valjaka koji su zglobno povezani. Prolazeći val stvara savijajuće gibanje unutar zglobova što iskorištavaju hidraulične pumpe. Električna energija se proizvodi uz pomoć visokotlačnoga ulja koje teče kroz hidraulični motor koji je povezan s generatorom. Više modula može se povezati u jednu elektranu i spojiti s jednokabelskim sustavom. Pelamis je razvila tvrtka Pelamis Wave Power koja je osnovana 1998. godine u Ujedinjenom Kraljevstvu. [10]

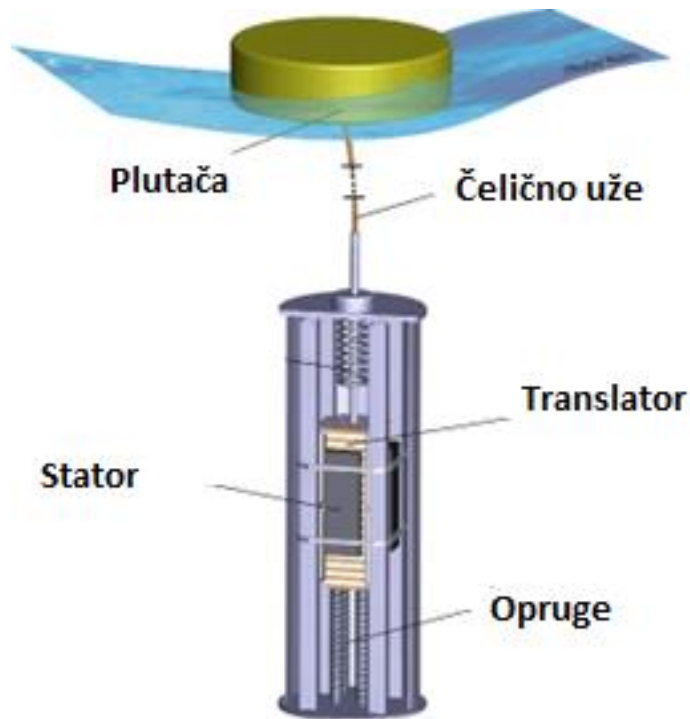


Slika 2.2.5. Postrojenje na morske valove Pelamis. [14]

Point apsorberi (točkasti upijači) imaju vrlo jednostavnu izvedbu i poprilično su pouzdani, jednostavno napravljeni i dobra su ekonomska investicija. Shodno inovacijama, postoji čitav niz ideja kako razvijati nove modele. Najznačajniji modeli točkastih upijača su *Seabased device* i *The CorPower device*.

Seabased device se sastoji od bove koja je zapravo plutajući cilindar koji prikuplja energiju morskih valova za proizvodnju električne energije, kao što je prikazano na Slici 2.2.6. Kako val propagira, bova se pomiče gore-dolje i to pomicanje pogoni linearni generator koji je postavljen na dno mora i povezan s bovom pomoću užeta. Točnije, linearni generator sadrži permanentne magnete i ima snagu od 10 kW. Svaka bova ima promjer od 3 metra i visoka je 0,8 metara. Smjer nadolazećeg vala nije

bitan jer bove dohvaćaju valove iz svih smjerova. Glavni razlog njihovog korištenja je njihov kompaktni dizajn. Bove mogu biti potopljene i to ovisi o razlici tlakova. Ovaj tip je razvilo Sveučilište u Uppsali u Švedskoj i valovna farma je postavljena blizu grada Lysekil-a na zapadnoj strani Švedske [15, 16, 17]



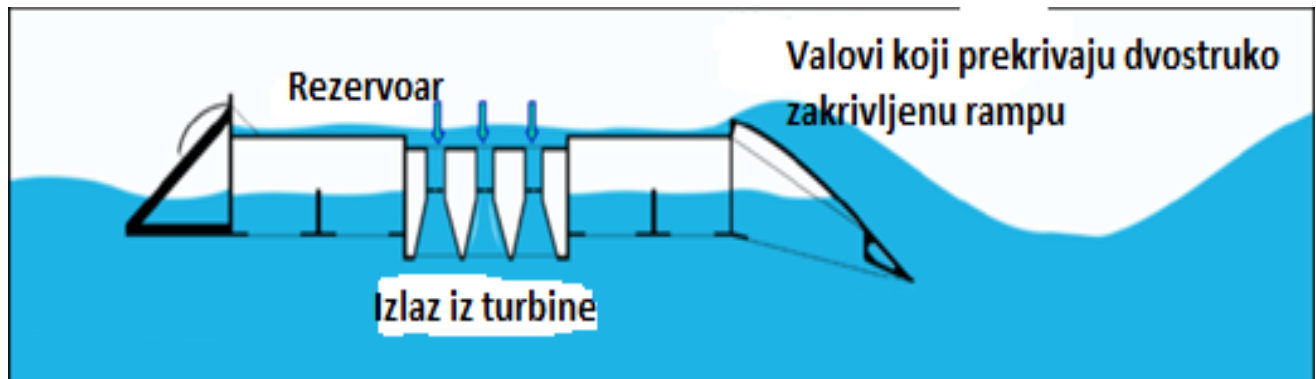
2.2.6. Model sa Sveučilišta u Uppsali. [17]

The CorPower koristi napravu koja se može podizati i spuštati za dohvaćanje dolazećih valova. Nategnuto uže za sidrenje se koriti za povezivanje bove za morsko dno. Na Slici 2.2.7. prikazuje primjer *The CorPower* naprave. Mjenjačka kutija je smještena unutar bove i koristi se za pretvaranje gibanja bove u kružno kretanje za konvencionalni generator. Promjer konstrukcije je 9 metara, a visina joj je 18 metara. Cijela konstrukcija teži i do 70 tona. Postrojenje ima nominalnu snagu od 300 kW i koristi negativnu opružnu tehnologiju nazvanu „*WaveSpring*“ koja može povećati apsorpciju snage. Takva postrojenja imaju mali utjecaj na okoliš i imaju male zahtjeve za održavanjem. Napravljeni su od izdržljivog materijala koji može izdržati i ekstremne uvjete na moru. [16]



Slika 2.2.7. The CorPower Ocean C4. [18]

U usporedbi s atenuatorima, terminatori su suprotne naprave jer rade na drugačijem principu. Terminatori su postavljeni okomito na smjer upadnih valova i oni zapravo zaustavljaju propagiranje dolazećih valova. Najpopularniji primjer terminatora je *Wave Dragon* (Slika 2.2.8.) To je postrojenje na morske valove koje koristi osnovne principe hidroelektrana kako bi proizvelo električnu energiju. Dva reflektora usmjeravaju valove preko rampe. Zatim, voda se sakuplja i skladišti u spremniku koji je postavljen iznad razine mora. Kaplanova turbina se pogoni vodom koja pada iz spremnika natrag u more. Turbina je povezana s generatorom koji proizvodi električnu energiju. [10]



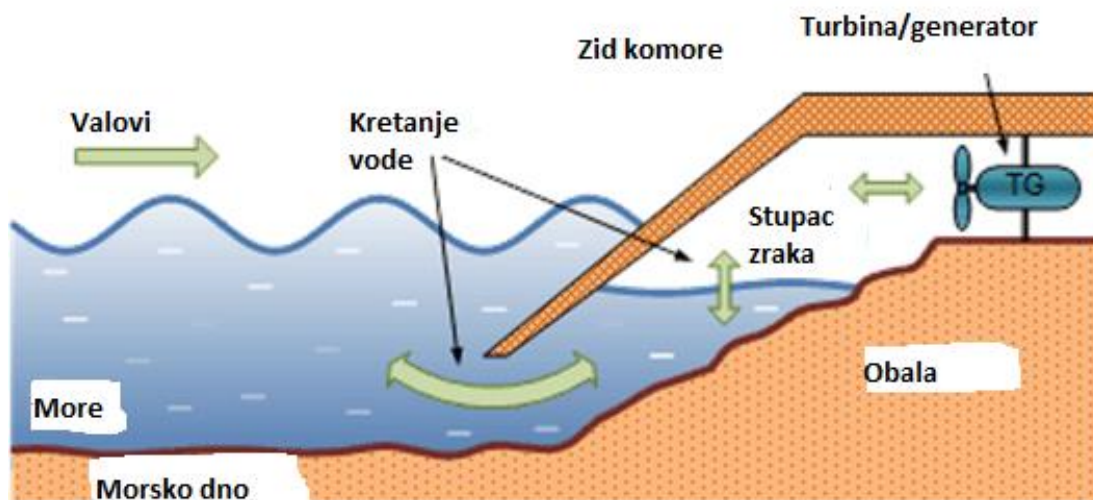
Slika 2.2.8. Wave Dragon- načelo djelovanja. [6]

2.2.3. Klasifikacija postrojenja na morske valove prema načelu rada

Načelo rada opisuje kako postrojenje na morske valove apsorbira energiju nadolazećih morskih valova. U tome slučaju, skupina istraživača iz Kine i Singapura [4] opisala je postrojenja na morske valove prema načelu njihova rada.

Preljevanje (engl. *Overtopping*): Naprave koje rade na principu prelijevanja vode su sačinjeni od velikog rezervoara za vodu koji ne postavljen iznad razine mora. Nadolazeći val se prelijeva preko rampe i puni rezervoar. Rotacijsko kretanje turbine se postiže pomoću padajuće vode iz rezervoara. Turbina pokreće generator koji proizvodi električnu energiju. Zapravo, princip djelovanja je jako sličan hidroelektranama. Prethodno spomenuti *Wave Dragon* je primjer takvih postrojenja. Unatoč tome, *Wave Dragon* ima postiže maksimalnu snagu i vrlo ga je lagano održavati. Ali, ima velike dimenzije i cijenu, što mu je glavni nedostatak. Također, ima vrlo lijepo konstrukciju koju je katkad teško instalirati i prenositi. [4]

Oscilirajući stupac vode (engl. *Oscillating water column*): Ovakva postrojenja su temeljena na učvršćenoj ili plutajućoj napravi koja ima komoru u kojoj se zrak komprimira i dekomprimira kako voda oscilira unutar komore. Oscilirajuća kretanja vode uzrokuje razliku tlakova unutar komore i na takav način se volumen zraka mijenja (Slika 2.2.9.) Strujanje zraka pokreće turbinu koja se spojena na generator koji proizvodi električnu energiju. Iako je smjer zraka varijabilan, smjer rotacije turbine je uvijek isti. [4]



Slika 2.2.9. Princip oscilirajućeg vodenog stupca. [19]

Oscilirajuća tijela (engl. *Oscillating bodies*): Općenito, naziv oscilirajuće tijelo se odnosi na napravu koja može iskorištavati energiju oscilirajućih valova. To mogu biti potopljene ili plutajuće naprave koje su konstruirane kao i plutajuće bove. Pokreti tih naprava mogu biti vertikalni, horizontalni, nagnuti ili kombinirani. Najbolji primjeri takvih naprava su: *CorPower*, *CETO sustav*, *Seabased* postrojenje na morske valove, ali isto tako i *Power buoy* prikazan na slici 2.2.10. [4]



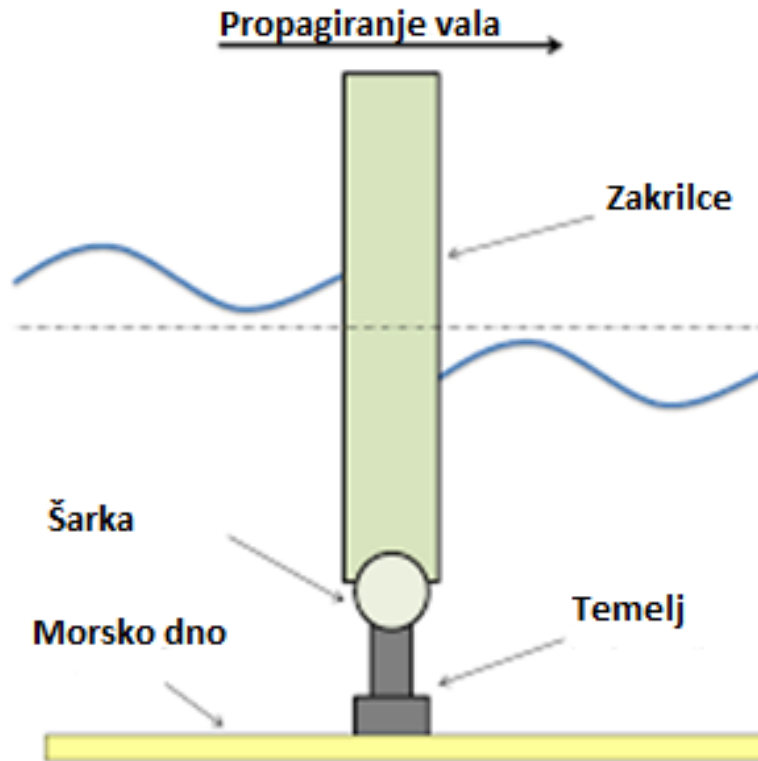
Slika 2.2.10. *Power buoy* oscilirajuće tijelo. [4]

Princip rada pomoću razlike tlakova: Ovaj način iskorištavanja energije morskih valova se temelji na Arhimedovom načelu. Potopljena naprava je postavljena u blizini obale. Ona je usidrena i učvršćena za morsko dno. Svaki dio postrojenja je sačinjen od komora ispunjene zrakom, a razlike u tlakovima su uzrokovane nadolazećim valnim fazama. Taj tok zraka je osnovan na razlici tlakova u deformabilnim komorama i u konačnici pretvoren u električnu energiju. Svaka komora se sastoji od rotacijskih dijelova i jednog statičnog dijela. Kretanje rotacijskih dijelova je uzrokovano razlikom tlakova. Kada se rotacijski dio komora giba gore-dolje, električna energija se proizvodi pomoću linearnog generatora. To načelo rada je primijenjeno u *Archimedes Wave Swing*-u (Slika 2.2.11.) [4]



Slika 2.2.11. *Archimedes Wave Swing* postrojenje. [4]

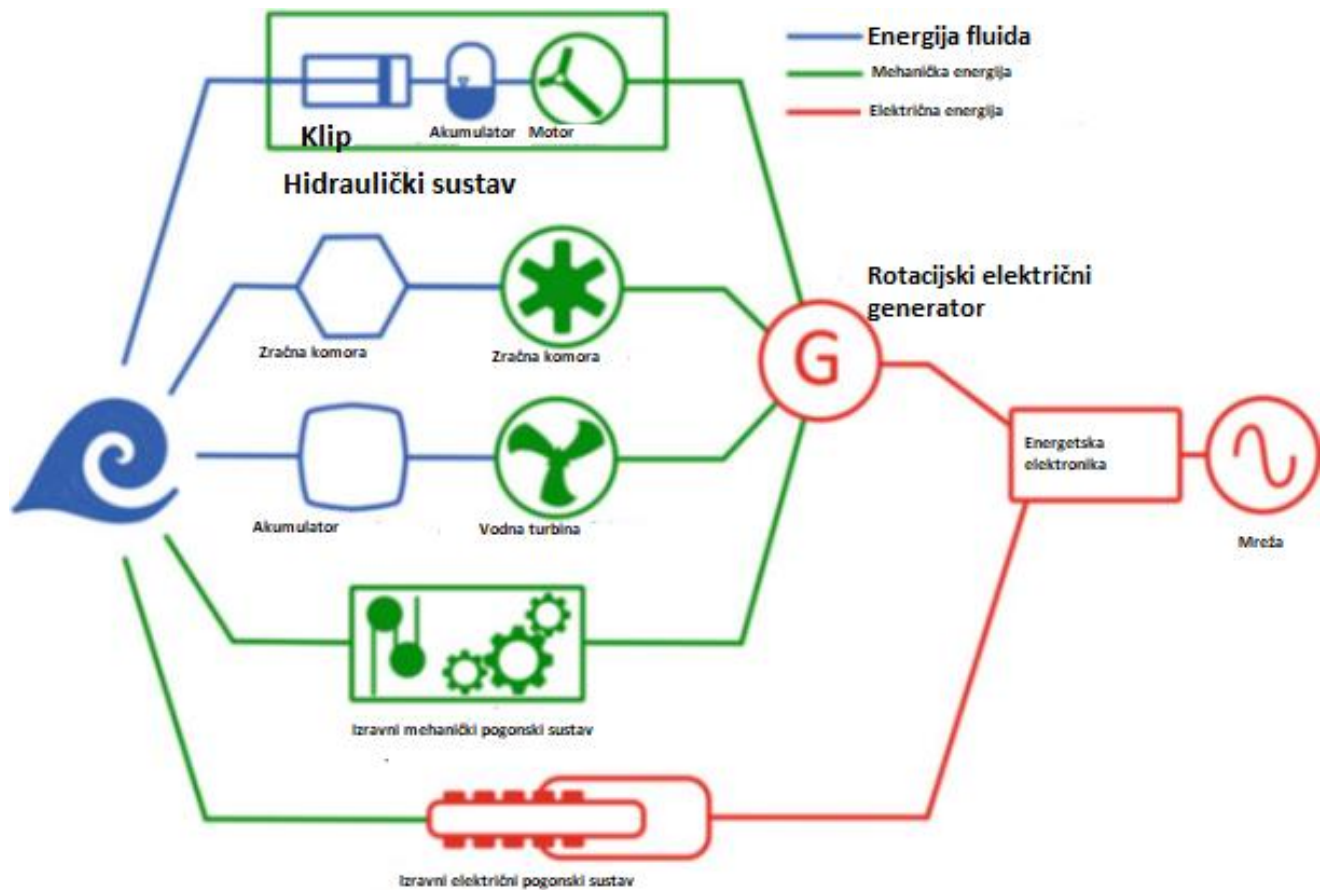
Postrojenja na principu oscilirajućih valnih udara (engl. *Oscillating wave surges*): Zapravo, ovo je posve novi koncept, kako je prikazano na slici 2.2.12., koji se treba podvrgnuti daljnim istraživanjima. Princip rada se bazira na mlatarajućoj strukturi, sličnoj tanjuru, koja je usidrena i učvršćena za morsko dno. Kako val propagira, struktura se mlata i stvara oscilirajuće gibanje koje pokreće agregate koji proizvode električnu energiju. Tipični primjeri takvih postrojenja su *Oyster*, *Langlee* i *BioWare*. [4]



Slika 2.2.12. Koncept postrojenja na principu oscilirajućih valnih udara. [20]

2.3. Tipovi priključaka valovnih farmi s elektroenergetskim sustavom

Valovne farme (engl. *Wave Power Farms*) sastoje se od međusobno povezanih pretvarača energije valova. Kako bi bila moguća isporuka električne energije iz takvih postrojenja, ona se moraju spojiti na elektroenergetski sustav. U tu svrhu, postoje PTO sustavi koji pretvaraju apsorbiranu energiju morskih valova u koristan tip energije. PTO sustavi mogu biti izvedeni direktno, indirektno preko sklopova energetske elektronike i modularno. Odabir PTO sustava je uvijek određeno tipom pretvarača. (Slika 2.3.1.)



Slika 2.3.1. Tipovi spojeva valovnih farmi s elektroenergetskim sustavom. [21]

Hidraulički sustavi (engl. *Hydraulic systems*): Točkasti upijači, atenuatori, terminatori i ostali tipovi postrojenja na morske valove čiji se rad temelji na pokretima njihovog tijela ne mogu se izravno povezati pomoću konvencionalnih rotacijski strojeva na elektroenergetski sustav. U tom slučaju se koriste hidraulički sustavi koji se sastoje od bova koje se pomiču gore-dolje koje su povezane sa klipom koji forsira fluid kroz kontrolirane cjevovode do hidrauličkog motora koji pokreće generator za proizvodnju električne energije. Ovaj se koncept često koristi za velike sile na niskim frekvencijama. Velika mana ovakvih sustava je niska učinkovitost i pouzdanost. [21]

Zračne turbine (engl. *Air turbines*): Zračne turbine se uglavnom koriste kod oscilirajućim vodenih stupaca. Kao što je prije spomenuto, kod takvih se postrojenja pojavljuje bidirekcionalno strujanje zraka. To može biti riješeno korištenjem samoispravljujućih turbina kao što je Wellsova turbina, Impulsna turbina i Denniss- Auld-ova turbina. Odgovarajuća turbina se odabire pomoću kriterija brzine vrtnje i snage valova na nekom području kako bi se dobio optimalan rad generatora. [21]

Hidroturbine (engl. *Hydro turbines*): Hidroturbine se koriste za pokretanje generatora za proizvodnju električne energije kod npr. *Wave Dragon*-a koji je prije spomenut u ovome radu. U osnovi, njihov princip rada se temelji na starim tehnologijama. Najučestaliji tip turbine je Kaplan turbina koja se koristi kod *Wave Dragon*-a kao i kod Danish Wave Power sustava. Korisnost ovakvih turbina zna biti i do 90 % što je velika prednost ovakvoga tipa povezivanja na elektroenergetski sustav. [21]

Izravni mehanički pogonski sustav (engl. *Direct mechanical drive system*): Ovaj princip djelovanja se temelji na prenošenju mehaničke energije s npr. bove koja je povezana s generatorom. Ovo može uključivati i mjenjačku kutiju koja povećava ili smanjuje brzinu rotacije, kablove i koloturnike. Također, može sadržavati i zamašnjake koji akumuliraju, odnosno predaju energije ukoliko zatreba. Ovakav tip povezivanja ima vrlo visoku učinkovitost. [21]

Izravni električni pogonski sustav (engl. *Direct electrical drive system*): Ovakva postava se temelji na translatoru koji je uparen s tijelom koje se kreće. Translator se sastoji od naizmjeničnih permanentnih magneta dok je stator sačinjen od zavojnica čiji je glavni zadatak inducirati električnu struju u statoru. Kada morski valovi pomiču bovu, električna struja se istovremeno inducira unutar zavojnica. Ovaj koncept se više razvija u hodu s razvojem sklopova energetske elektronike. Korištenje ispravljачa je nužno jer se energija valova pretvara direktno u električnu energiju. Vrlo je važno redovito održavati ovakvu konfiguraciju jer joj se povećava učinkovitost ako su zračni raspori između zavojnica statora i permanentnih magneta čisti. [21]

2.4. Utjecaj integracije valovnih farmi na elektroenergetski sustav

Pretvarači energije morskih valova u električnu (engl. *Wave Energy Converters*) su jedan od najobčavajućih koncepata i tehnologija proizvodnje električne energije. Međutim, njihova integracija u mrežu može donijeti neke probleme koji mogu zahtijevati dodatna ulaganja. Stupanj utjecaja integracije *WEC*-a ovisi o stanju mreže kao i o prijenosnom kapacitetu mreže. Prijenosni kapacitet odnosi se na količinu energije koja se može predati u distributivnu mrežu bez prekoračenja radnog kapaciteta ili ograničenja. Najznačajniji utjecaji integracije *WEC*-a u mreži su [22]:

- Promjene napona na sabirnicama
- Preopterećenja ili povećani gubici u mreži
- Mreža postaje aktivna umjesto pasivne

- Promjene u kvaliteti električne energije
- Promjena stabilnosti sustava

2.4.1. Promjene napona na sabirnicama u sustavu

Spajanje valovnih farmi na elektroenergetsku mrežu treba se izvoditi pažljivo. U tom slučaju, mogu postojati ograničenja s obzirom na broj paralelnih jedinica postrojenja koje se spajaju na mrežu. Promjene napona u mreži su blisko povezane sa izlaznom snagom svakog *WEC*-a ili s mjestom instaliranja pojedinog *WEC*-a u mreži.

Napon može biti povišen na mjestu gdje je generator spojen na mrežu. Razlika napona može se izraziti pomoću formule [5]:

$$\Delta u_{gen} = \begin{cases} L \cdot \frac{R \cdot P_{gen}}{U_{nom}^2}, & L \leq L_{gen} \\ L_{gen} \cdot \frac{R \cdot P_{gen}}{U_{nom}^2}, & L > L_{gen} \end{cases} \quad (2-6)$$

gdje R predstavlja otpor na terminalima generatora, P_{gen} je djelatna snaga generatora koju generator injektira u mrežu, U_{nom} je nominalan napon generatora i L predstavlja odabranu lokaciju na dovodniku. Faktor L je broj između 0 i 1. kada je $L=0$, to označava početak dovodnika, ali kada je $L=1$, to označava kraj dovodnika. Ovi izrazi mogu se koristiti u cijelom spektru praktičnih zadataka u distribucijskoj mreži.

Varijacije napona mogu biti odlučujući kriterij za ograničavanje razine integracija, posebno u slučaju povećanog napona na sabirnicama. Suprotno intuiciji, vrlo je interesantno da problem uobičajeno nastaje u uvjetima niskih opterećenja.

Postoje određene metode pomoću kojih se može utjecati na napon, a samim time i na razinu integracije [23]:

- Regulacija/promjena prijenosnog omjera transformatora
- Nadogradnja mreže
- Upravljanje energijom
- Izgradnja novih izvoda već postojeće mreže

- Korištenje novih tehnologija kao što su baterije
- Kombinacija više metoda

Svaka od ovih tehnologija ima svoja ograničenja koja se trebaju uzeti u obzir, ali uporaba ovih metoda može regulirati ili povećati razinu integracije. Ponekad nije moguće koristiti svaku metodu jer to može biti vrlo komplicirano za već postojeću mrežu.

Nadalje, jalova snaga isto tako se može regulirati ako se previsok napon pojavljuje negdje u mreži. U tom slučaju jalova snaga generatora trebala bi biti reducirana. Korištenje više metoda dovodi do stabilnijeg sustava. Regulacija napona je idalje jedan od najvećih problema kod povišenja razine integracije, pogotovo u ruralnim sredinama gdje ima puno potrošača. Operator prijenosnog sustava je dužan održavati napon u točno definiranim intervalima u skladu s europskom normom EN 50160 (Tablica 2.4.1.). [24]

Tablica 2.2. Nominalna ograničenja napona u skladu s normom EN 50160. [24]

	Nominalni napon [kV]	Dopušteno odstupanje izraženo u postotku [%]	Dopušten interval napona [kV]
Napon prijenosnog voda (Visoki napon)	400	-10/+5	360 - 420
	220	+/-10	198 - 242
	110	+/-10	99 – 121
Napon distribucijskog voda (Srednji napon)	35	+/-10	31.5 – 38.5
	20	+/-10	18 – 22
	10	+/-10	9 – 11
	0.4	+/-10	0.36 – 0.44

2.4.2 Promjene u tokovima snaga

Tok snage u jednome smjeru je karakteristika pasivne mreže što znači da energija teče samo od izvora do potrošača. To se može zamisliti kao izvor energije koji je spojen na potrošača preko prijenosnog voda. Integracija postrojenja na morske valove ili bilo kojeg drugog distribuiranog izvora može promijeniti pasivnu mrežu u aktivnu. Aktivna mreža ima bidirekcionalan tok snage što znači da energija može teći od izvora prema potrošaču kao i od potrošača prema izvoru. U tome slučaju potrošač postaje izvor, a izvor potrošač tj. potrošač predaje energiju izvoru. Kakogod, količina energije isto tako može biti promijenjena u bilo kojem dijelu mreže. Stoga, količina toka energije može biti povećana ili smanjena u promatranom dijelu mreže. Akom je količina energije povećana, to znači da je proizvodnja energije veća nego potrošnja ili je potrošnja konstantna. U drugu ruku, ako je količina toka energije smanjena, razlog može biti taj da je izvor energije spojen vrlo blizu potrošačima. Može se zaključiti da je ravnoteža između proizvodnje i potrošnje energije određena trenutnom proizvodnjom i trenutnom potrošnjom. Kako bi se održala ravnoteža frekvencije, mora postojati ravnoteža između proizvodnje i potrošnje u stvarnom vremenu. Odnosno, glavno pravilo ravnoteže frekvencije glasi „Proizvodnja električne energije mora biti jednaka potrošnji u svakom trenutku“.

[22]

2.2.3. Kvaliteta električne energije

Električna energija je opisana amplitudom, frekvencijom, valnim oblikom i simetrijom. Te veličine su potrebne za određivanje kvalitete električne energije na nekom mjestu u elektroenergetskom sustavu. Po europskoj normi EN 50160 [24], vrlo važne karakteristike napajanja za niski i srednji napon na nekom mjestu u mreži su opisani i definirani, kao što je prikazano u Tablici 2.3. Ta norma također uključuje zahtjeve za visokonaponske mreže u normalnim uvjetima rada.

Integracija valovnih farmi može poboljšati kvalitetu električne energije što se tiče harmonika, naponskih propada i naponskih fluktuacija. Sinkroni strojevi kao i generatori koji su indirektno spojeni na mrežu preko elemenata energetske elektronike mogu načiniti mrežu robusnijom i otpornijom. To svojstvo je karakteristika naponskog izvora. Regulacija napona generatora zahtjeva aktivno regulirani tok jalove snage između mreže i generatora. Aktivna regulacija toka snage može

smanjiti naponske propade i distorziju. Korištenjem modernih tehnologija kao što su novi sklopovi energetske elektronike, moguće je značajno smanjiti harmonijsku distorziju. [22]

Tablica 2.3. Norma EN 50160. [24]

EN 50160			
Parametar	Mjerna jedinica	Karakteristike niskog napona	Karakteristike srednjeg napona
Promjene napona	V	$\pm 10\% U_n$ for 95% tjedna	$\pm 10\% U_n$ for 95% tjedna
		$-15/+10\% U_n$ for 5% tjedna	
Kratki prekidi	Broj	< 3 min – nekoliko desetina i stotina godišnje	
Dugi prekidi	Broj	≥ 3 min, <10 – 15 godišnje	
Padovi napona	Broj	nekoliko desetina i stotina godišnje	
THDV	% U_n	< 8 % U_n	
Flikeri	P_{lt}	$P_{lt} \leq 1$, for 95% tjedna	
Asimetrija	% U_n	< 2 % U_n	
Frekvencija	Hz	$\pm 1\% U_n$ za 99.5 % godišnje	
		$-6/+4\% U_n$ za 100 % vremena	

2.2.4. Preopterećenja i gubici u mreži

Projektiranje dijelova elektroenergetskog sustava može biti poprilično izazovno jer se puno parametara treba predvidjeti. Preopterećenja su vrlo ozbiljan problem u mreži jer oni mogu uzrokovati veće troškove rada mreže. Oni su uobičajeni npr. ljeti kada je najveća potražnja za električnom energijom naročito u primorju kada je turistička sezona. Prije projektiranja same mreže, treba se uzeti u obzir termička izdržljivost materijala za vodove i ostale komponente. Električna struja nije jedini razlog termičkog stresa, tu postoji cijeli niz razloga kao što su temperatura zraka, vlaga, kiša, snijeg, solarna radijacija itd. Stoga, postrojenja na morske valove trebaju se integrirati u mrežu vrlo pažljivo kako njihova integracija ne bi dovela do velikih promjena struja, pogotovo struja kratkoga spoja. [21]

Što se tiče gubitaka energije, integracija distribuiranih izvora može uzrokovati povoljne mrežne uvjete. Distribuirana proizvodnja je uobičajeno povezana vrlo blizu sa potrošačima. Posljedično, javljaju se smanjeni gubici u mreži jer je mala udaljenost između izvora energije i potrošača. Općenito, gubici energije bez distribuiranih izvora mogu se izraziti pomoću formule (2-7) [22]:

$$E_0 = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T \{L_s(t)\}^2 dt \quad (2-7)$$

gdje N_n predstavlja sekciju na dovodniku, L_s je opterećenje nizvodno od napojne sekcije s . Poslije povezivanja distribuiranih izvora s mrežom, ukupni gubici mogu se izraziti pomoću formule (2-8):

$$E_{DG} = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T \{L_s(t) - G_s(t)\}^2 dt \quad (2-8)$$

gdje G_s proizvodnja nizvodno od napojne sekcije s .

Gubici se dobiju iz razlike (2-7) i (2-8). Konačno, mogu se izraziti pomoću formule (2-9):

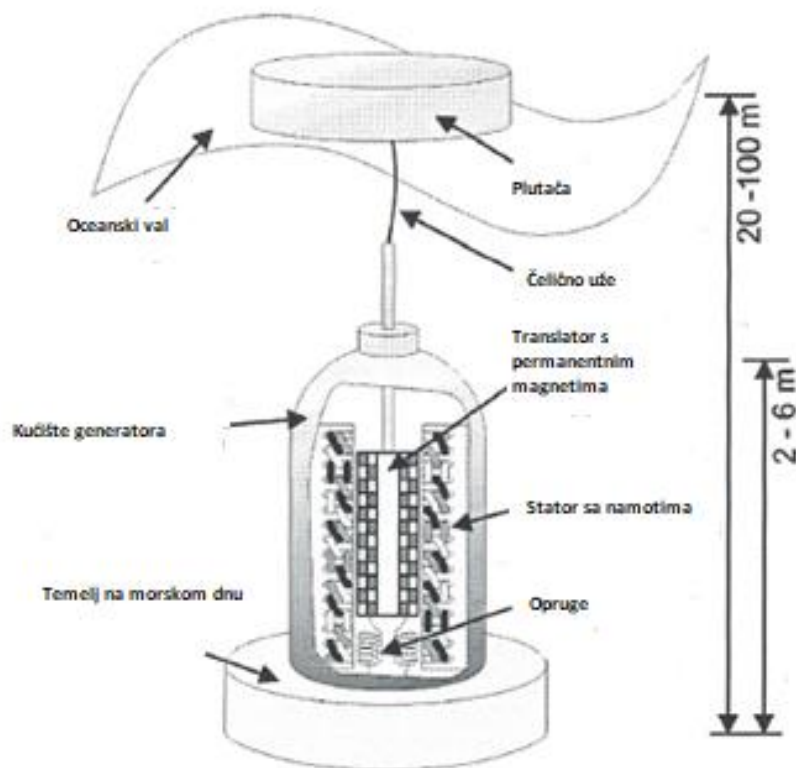
$$\Delta E_{loss} = \sum_{s=1}^N \int_0^T G_s(t) \cdot [2L_s(t) - G_s(t)] dt \quad (2-9)$$

gdje s označava dio pojnog voda „s“ dok N označava broj pojnih vodova. Slovo G označava proizvodnju energije dok slovo L označava opterećenje. Kada je izraz (2-9) manji od nule, gubici u mreži se povećavaju. U drugu ruku, kada je isti izraz veći od nule, gubici u mreži se smanjuju.

3. INTEGRACIJA POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE U MREŽU OTOKA VISA

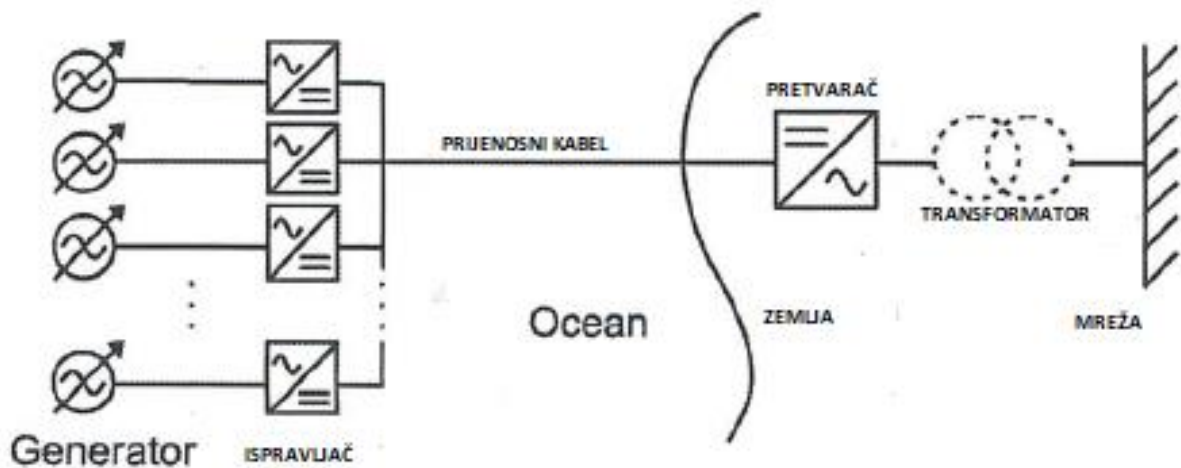
U ovome diplomskom radu modelirat će se postrojenje na morske valove koje je razvijeno na Sveučilištu u Uppsali u Švedskoj. Nakon što se postrojenje izmodelira, promatrat će se njegov utjecaj na mikromrežu otoka Visa.

Prema [25], postrojenje, čiji će se utjecaj promatrati u mikromreži otoka Visa, modelirano je kao trofazni linearni generator s permanentnim magnetima čiji pomični dio (engl. Translator) je povezan čeličnim užetom s plutajućom napravom tzv. bovom (engl. Buoy). Plutajuća bova nalazi se točno iznad linearnog generatora koji pretvara kinetičku energiju valova u električnu energiju. Pretvorba energije se odvija na način da pomicanje plutajuće bove gore-dolje uzrokuje pomicanje translatora s permanentnim magnetima unutar generatora. Na takav način dolazi do promjene magnetskog toka unutar namota statora (engl. Stator with cable windings) i inducira se elektromotorna sila $e(t)$. Prikaz jedne jedinice postrojenja na morske valove prikazan je na slici 3.1. [25]



Slika 3.1. Presjek WEC-a s linearnim generatorom. [25]

Nazivna radna snaga ovakvih jedinica je vrlo mala (oko 10 do 100 kW), stoga se najčešće takve jedinice povezuju u takozvane valovne farme, odnosno parkove. Ovakvo udruženje valovnih jedinica moguće je samo uz korak ispravljanja napona uz pomoć ispravljača (engl. Rectifier) kao na Slici 3.2. Kako bi se očuvala kvaliteta električne energije i učinkovitost procesa prijenosa energije, izmjenični napon i struja se prije svega ispravljaju u istosmjernu, a zatim ponovno pretvaraju pomoću pretvarača (engl. Converter) u izmjeničnu. [25]



Slika 3.2. Način povezivanja više generatora na morske valove na mrežu. [25]

U idealnom slučaju, fluktuacije snage postaju fluktuacije struje ako je niski istosmjerni napon spojen na ispravljač linearnog generatora. Nadalje, ukoliko se teret, gledan s generatorskih stezaljki, smatra radnim otporom, naponi i struje generatora su direktno povezani s Ohmovim zakonom. Ukupan iznos snage paralelnog spoja valovnih jedinica dobije se zbrajanjem pojedine snage svake valovne jedinice.

3.1. Modeliranje linearnog generatora s permanentnim magnetima

Pretpostavimo da su permanentni magneti u linearnom generatoru postavljeni s naizmjeničnim polaritetom. Translator se u tom slučaju giba vertikalno i sinusoidalno što daje sinusni valni oblik napona i struje. Amplituda pridružena s gibanjem translatora se označava s h , dok se kutna brzina translatora označava s ω . Tada, pozicija translatora može se označiti s x i, konačno, može se napisati:

$$x(t) = h \sin(\omega t) \quad (3-1)$$

Kako se translator giba vertikalno unutar generatora, posljedično tomu javlja se promjena magnetskog toka u namotima statora generatora koja se može opisati formulom (3-2):

$$\Phi(t) = \varphi_0 \cos(kx + \sigma) \quad (3-2)$$

gdje k predstavlja broj morskih valova, φ_0 označava amplitudu funkcije dok σ predstavlja fazu. [25]

Ukoliko pretpostavimo da je σ jednak nuli, što znači da teret nije spojen na stezaljke generatora, tada je napon na stezaljkama generatora jednak induciranoj elektromotornoj sili $e(t)$. Amplituda magnetskog toka $\Phi(t)$ se definira kao (3-3):

$$\Phi_t = B_t \cdot \omega_t \cdot d \quad (3-3)$$

gdje je B_t magnetsko polje u zubu statora, ω_t je širina zuba statora dok d predstavlja širinu statorskog stoga. [25]

Nadalje, ako kažemo da je p ukupni broj polova generatora, q broj utora po polu i po fazi i da c predstavlja broj kabela u utoru, ukupan broj zavoja N se definira pomoću formule (3-4):

$$N = p \cdot q \cdot c \quad (3-4)$$

Zadnji korak kod dobivanja funkcije inducirane elektromotorne sile $e(t)$ je deriviranje izraza (3-2):

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi_t \cdot h \cdot \omega}{\omega_p} \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\omega_p} \sin(\omega t)\right] \quad (3-5)$$

gdje je ω_p širina para pola (od jednog sjevernog pola do drugog). [25]

Odabir parametara visine valova i perioda za simulacije koje će se provoditi u ovome radu se nalaze u Tablici 3.1., dok se parametri linearnog generatora nalaze u Tablici 3.2. U ovome će se radu promatrati 2 osnovna slučaja utjecaja postrojenja na morske valove na mikromrežu otoka Visa: ljetni dan i zimski dan. Razlika u ta dva dana su drugačije značajne visine valova i periodi istih. Primjerice, značajna visina valova ljeti je manja nego tijekom zimskih mjeseci. Glavni razlog za takvo stanje mora je vjetar koji je ujedno i glavni uzročnik valova na površini mora. Ljeti obično pušu vjetrovi koji nemaju velike brzine i ne stvaraju puno valova na morskoj površini. Zimi je situacija drugačija. Tada pušu vjetrovi koji uobičajeno uzrokuju valove koji imaju veće amplitude i periode. Prema [26], promatranjem stanja mora oko otoka Visa ljeti i zimi, odabrani su iznosi amplituda (značajnih visina valova) i perioda valova koji se mogu vidjeti u Tablici 3.1.

Tablica 3.1. Amplituda i period valova u ljetnim i zimskim mjesecima za područje otoka Visa. [26]

	LJETNI DAN	ZIMSKI DAN
h [m]	1	2
T [s]	6	9

Tablica 3.2. Parametri linearnog generatora. [25]

Parametar	Vrijednost u simulacijama
ω_t	8 mm
ω_p	100 mm
d	400 mm
p	100
q	6/5
c	6
B_t	1,55 T

Nakon što imamo sve potrebne podatke za izračunavanje elektromotorne sile $e(t)$ za ljetni dan, podatke iz tablice 3.1. i tablice 3.2. uvrštavamo u izraze (3-3), (3-4) i (3-5):

$$\Phi_t = B_t \cdot \omega_t \cdot d = 1,55 \cdot 0,008 \cdot 0,4 = 4,96 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$N = p \cdot q \cdot c = 720 \text{ okretaja}$$

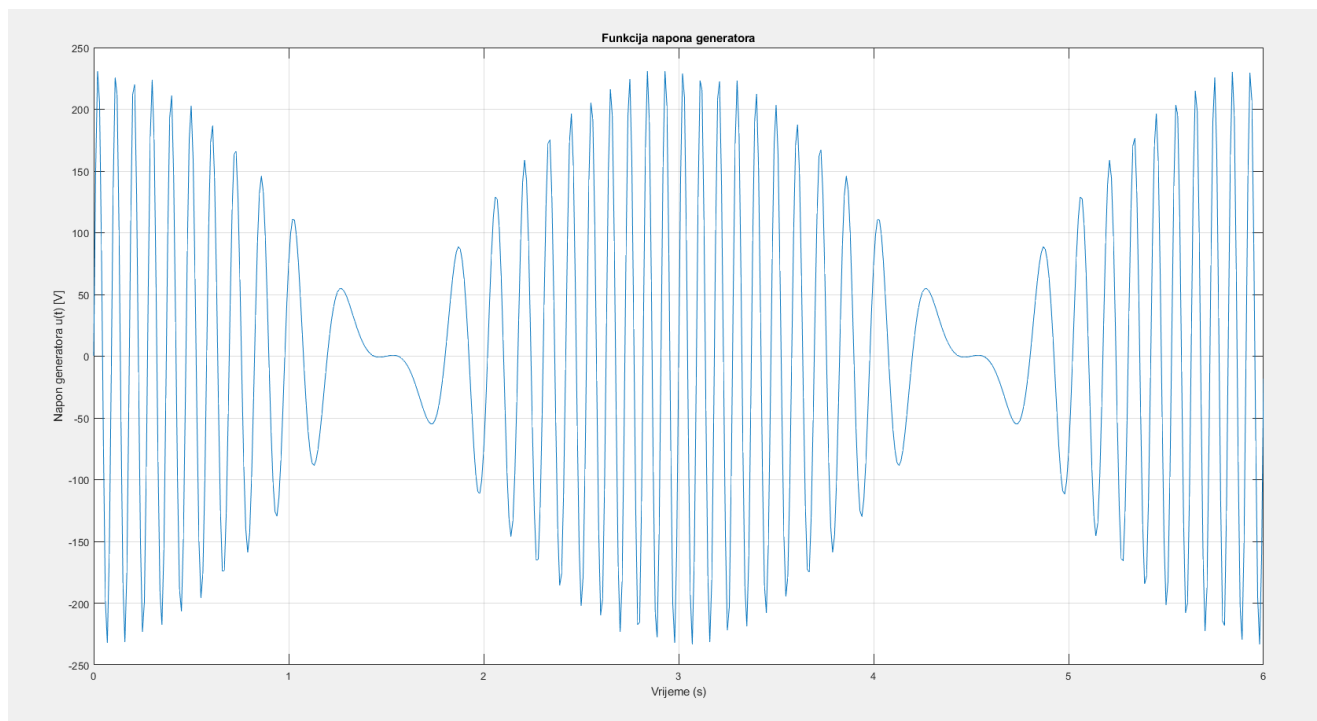
$$e_1(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi_t \cdot h \cdot \omega}{\omega_p} \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\omega_p} \sin(\omega t)\right] =$$

$$= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 720 \cdot (4,96 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 \cdot 1,047}{0,1} \cdot \cos(1,047t) \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1}{0,1} \cdot \sin(1,047t)\right] =$$

$$e_1(t) = 234,81 \cdot \cos(1,047t) \cdot \sin[62,8 \cdot \sin(1,047t)] \text{ V}$$

Za ilustriranje funkcije napona, struje i izlazne snage generatora korišten je program MATLAB. Nakon upisivanja funkcije $e_1(t)$ u MATLAB-u, izgled funkcije napona jedne faze trofaznog

generatora prikazan je na Slici 3.3. Funkcija je prikazana u vremenskom intervalu od 0 do 6 sekundi s vremenskim korakom od 0,01 sekunda.



Slika 3.3. Funkcija napona jedne faze trofaznog generatora (vrem. interval od 0 do 6 sekundi, vrem. korak 0,01 sekunda).

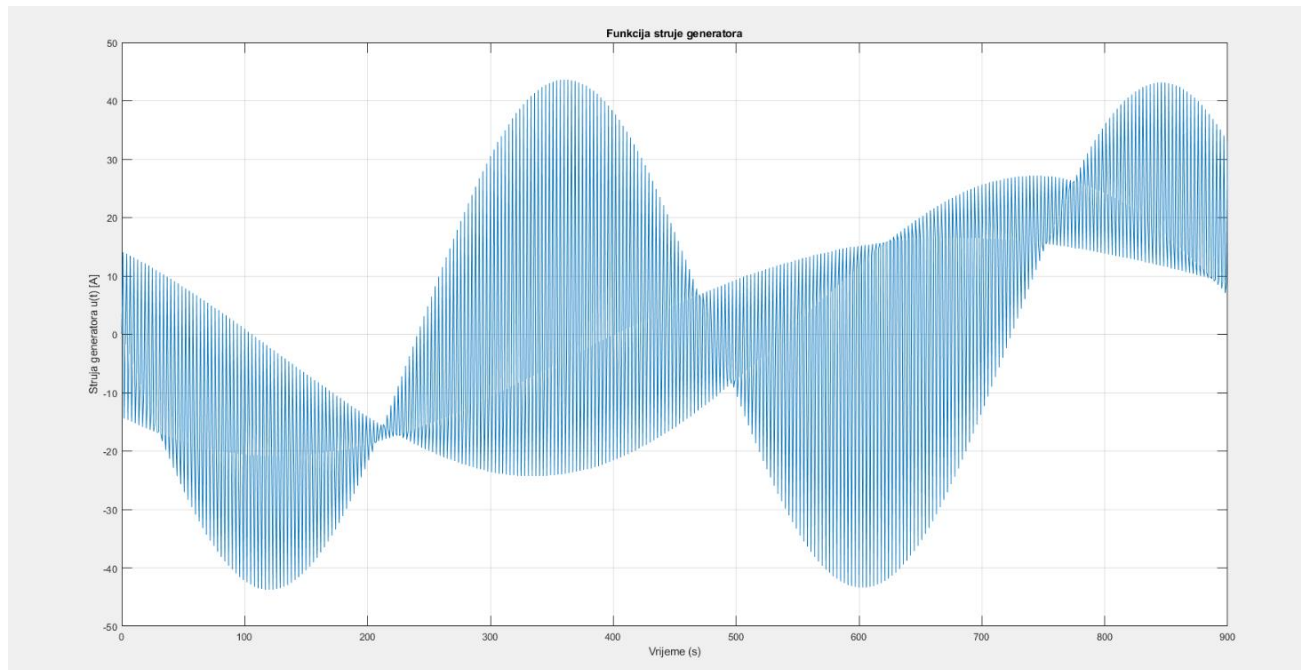
Pretpostavimo da je teret generatora čisti radni teret (otpor) koji iznosi $5,37 \Omega$. Prema Ohmovom zakonu tada vrijedi za struju generatora:

$$I = \frac{U}{R} \quad (3-6)$$

Slijedi:

$$i_1(t) = \frac{234,81}{5,37} \cdot \cos(1,047t) \cdot \sin[62,8 \cdot \sin(1,047t)] = 43,73 \cdot \cos(1,047t) \cdot \sin[62,8 \cdot \sin(1,047t)] \text{ A}$$

Nakon uvrštavanja jednadžbe struje generatora u MATLAB, funkcija struje generatora je prikazana na Slici 3.4.

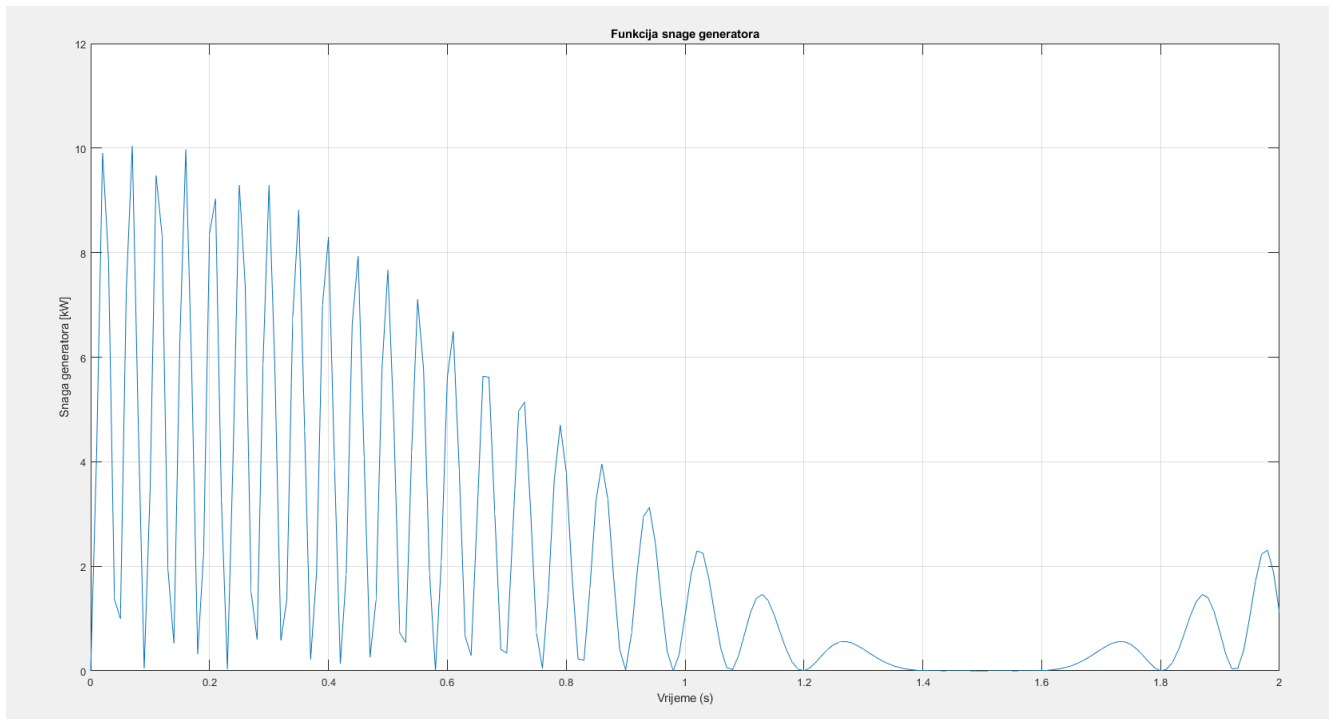


Slika 3.4. Funkcija struje jedne faze trofaznog generatora (u vrem. intervalu od 0 do 900 sekundi, s vrem. korakom od 1 sekunde).

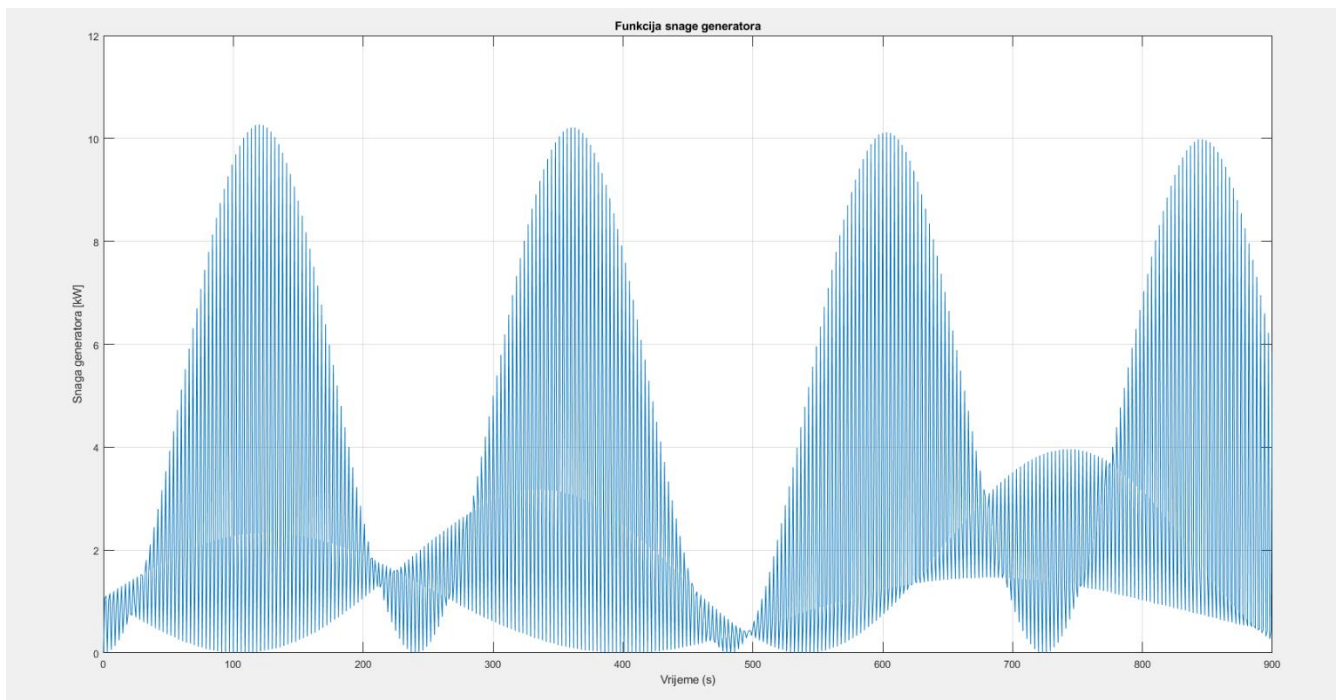
I konačno, kako bismo dobili izlaznu snagu generatora, funkcije napona $e_1(t)$ i $i_1(t)$ trebaju se pomnožiti, dakle, njihov umnožak je izražen pomoću formule (3-7):

$$p_1(t) = e_1(t) \cdot i_1(t) \quad (3-7)$$

Nakon uvrštavanja vrijednosti u MATLAB, izlazna snaga $p_1(t)$ generatora je prikazana na Slici 3.5. počevši od vrijednosti 0 do 2 sekunde s vremenskim korakom od 0,01 sekunde, dok je na Slici 3.6. prikazana izlazna snaga generatora $p_1(t)$ počevši od vrijednosti 0 do 900 sekundi s vremenskim korakom od 1 sekunde.



Slika 3.5. Izlazna snaga generatora (u vrem. intervalu od 0 do 2 sekunde s vrem. korakom od 0,01 sekunde).



Slika 3.6. Izlazna snaga generatora (u vrem. intervalu od 0 do 900 sekundi s vrem. korakom od 1 sekunde).

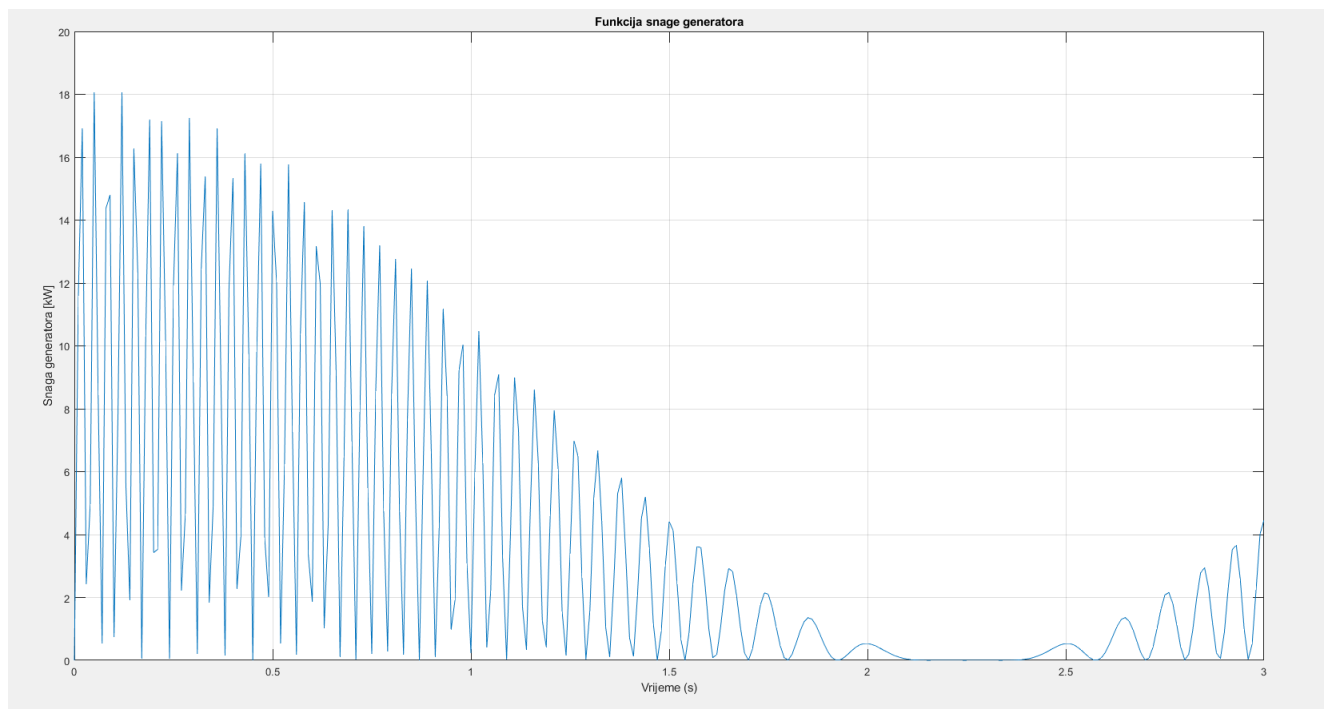
Analogno proračunu za ljetni dan, radi se proračun za zimski dan, stoga funkcija napona generatora za zimski dan će biti:

$$e_2(t) = 313,083 \cdot \cos(0,698t) \cdot \sin[132,21 \cdot \sin(0,698t)] \text{ V}$$

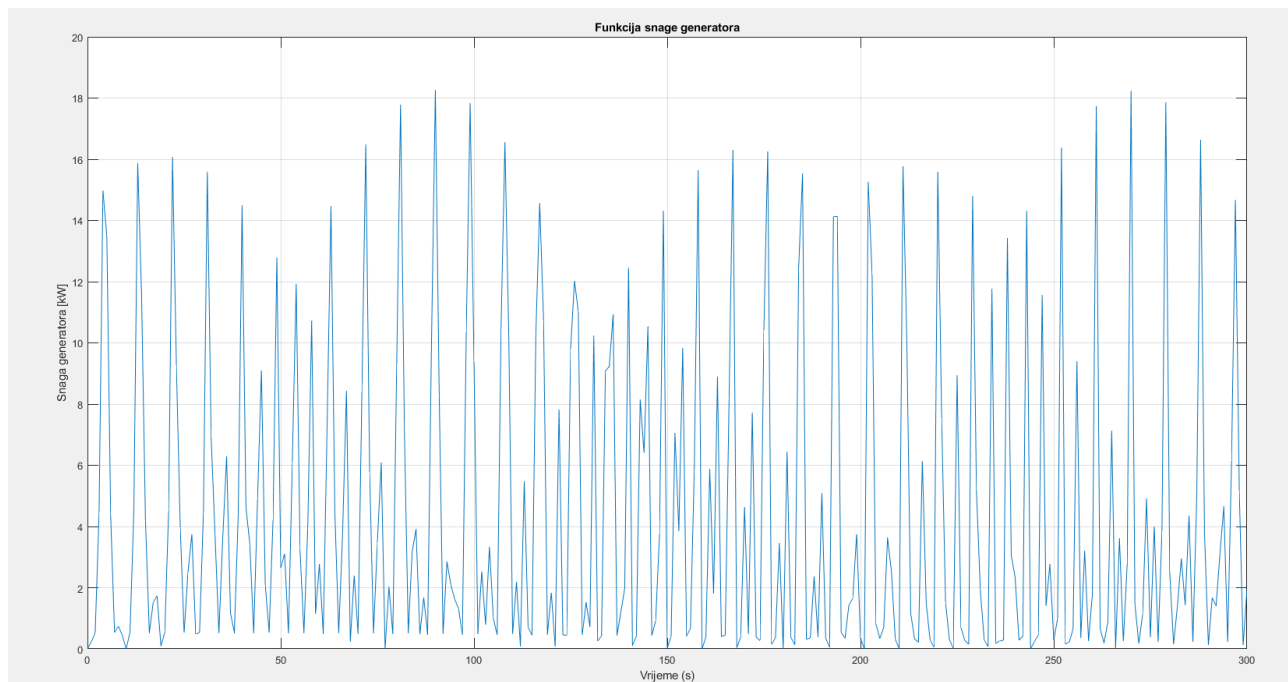
Nakon dijeljenja s otporom iznosa $5,37 \Omega$, struja generatora iznosi:

$$i_2(t) = \frac{313,083}{5,37} \cdot \cos(0,698t) \cdot \sin[132,21 \cdot \sin(0,698t)] = 58,3 \cdot \cos(0,698t) \cdot \sin[132,21 \cdot \sin(0,698t)] \text{ A}$$

Nakon provedenog postupka množenja napona $e_2(t)$ i struje $i_2(t)$ generatora, izlazna snaga prikazana je na Slici 3.7. od vrijednosti 0 do 3 sekunde s vremenskim korakom od 0,01 sekunda, dok je na Slici 3.8. prikazana izlazna snaga generatora od 0 do 300 sekundi s vremenskim korakom od 1 sekunde.



Slika 3.7. Izlazna snaga generatora (u vrem. intervalu od 0 do 3 sekunde s vrem. korakom 0,01 sekunde).



Slika 3.8. Izlazna snaga generatora (u vrem. intervalu od 0 do 300 sekundi s vrem. Korakom od 1 sekunde).

U proračunima izlazne snage generatora za dva dana u godini pretpostavljamo da valovi, koje generira vjetar koji puše na pučini, imaju jednake amplitude i periode tijekom cijelog promatranog dana. To možemo pretpostaviti zbog toga što su odabrana dva tipična ljetna i zimska dana gdje nema prevelikih odstupanja u značajnoj visini valova kao ni u njihovom periodu.

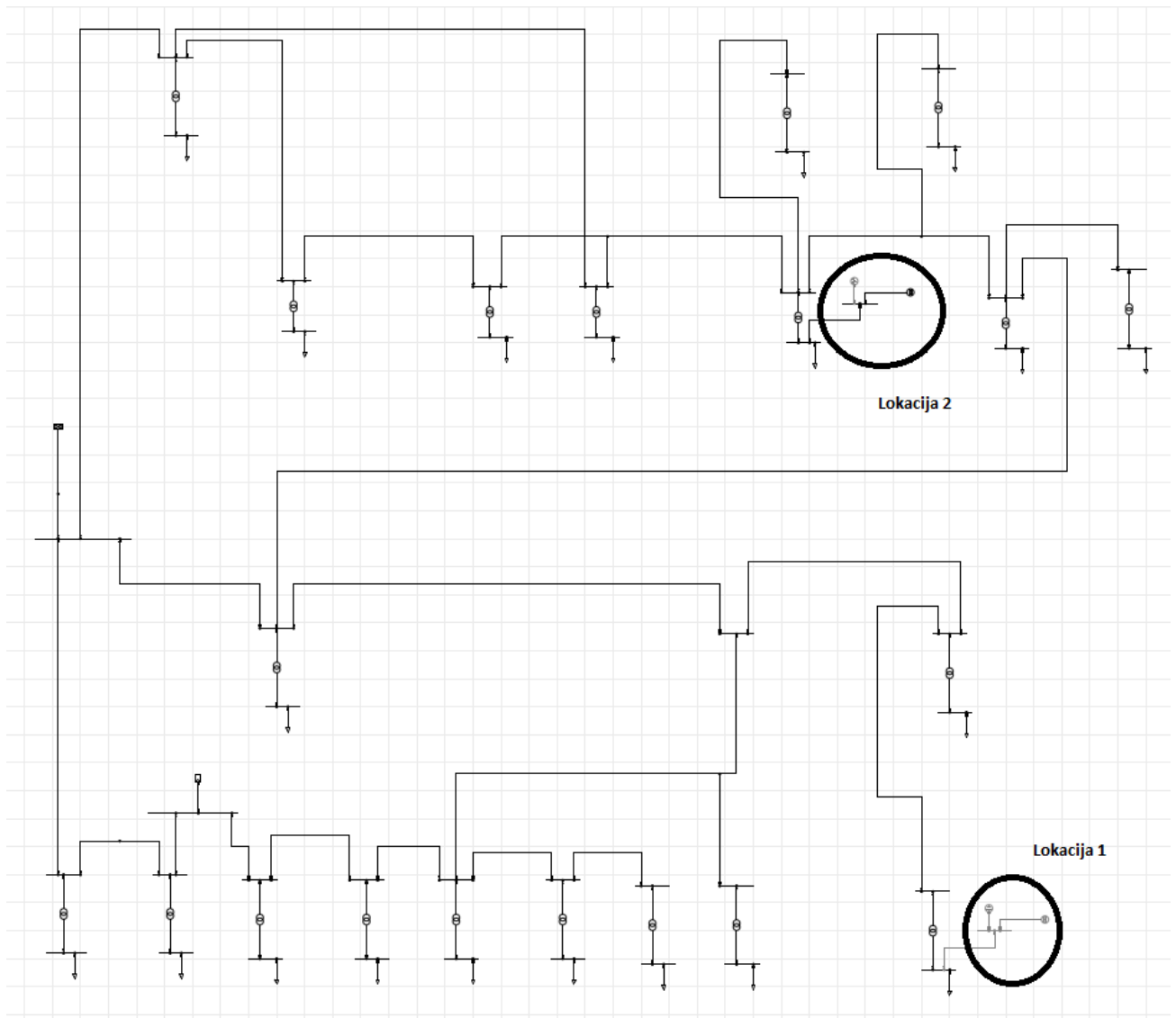
3.2. Modeliranje mikromreže otoka Visa

U ovom diplomskom radu, postrojenje na morske valove integrirat će se u mikromrežu otoka Visa. Ova mreža je modelirana uz pomoć realnih podataka za 2012. godinu od Hrvatske elektroprivrede (HEP-a) i Hrvatskog operatora distribucijskog sustava (ODS-a). Cijeli koncept mikromreže otoka Visa je detaljno opisan u diplomskom radu kolege Luke Prpića. [27] Utjecaj postrojenja na morske valove koje je modelirano u ovome diplomskom radu simulirano je u programskom paketu DiGSILENT PowerFactory. To je vrlo „moćan“ alat za simulaciju elektroenergetskih postrojenja, od proizvođača električne energije (elektrana) pa sve do prijenosa i distribucije električne energije. Ovaj

program omogućuje analizu tokova snaga, analizu stabilnosti i ima još mnoge druge mogućnosti koje su od izuzetnog značaja za inženjerske poslove i pothvate.

Prije svega, model mikromreže otoka Visa morao je biti smanjen tj. reduciran broj elemenata i sabirnica zbog ograničenja licence.

Kao što je naznačeno u diplomskom radu kolege Prpića [27], transformatorska stanica „TS Vis 35/10kV“ kao i jedan dio mreže otoka Visa zamijenjena je s blokom „Vanjska mreža“. Na niskonaponskoj strani (10 kV) transformatorske stanice izvedene su tri linije dalekovoda: „Komiža“, „Vinarija“ i „Podstražje“ s njihovim pripadajućim transformatorskim stanicama (Slika 3.9.). Bitno je reći da su transformatorske stanice povezane s kablovima i dalekovodima različitog presjeka, izolacije, materijala i duljina. Mikromreža otoka Visa uključuje još i model fotonaponske elektrane snage 3,5 MW koja je spojena na mrežu putem pet frekvencijskih pretvarača nazivne snage 720 kW. Mikromreža sadrži i baterijski spremnik radne snage od 1 MW. Sustav za pohranu energije kao i postrojenje na morske valove je modelirano pomoću statičkog generatora. U ovome diplomskom radu promatrat će se utjecaj prethodno modeliranog postrojenja na morske valove na mikromrežu otoka Visa tijekom dva dana u godini. Prvo će se provoditi simulacije za ljetni dan kada su opterećenja izvoda trafostanica najveća zbog značajnog broja turista tijekom turističke sezone na otoku Visu tj. kada je proizvodnja FN elektrane najveća. Simulacije će se za drugi slučaj provoditi za zimski dan izvan turističke sezone na otoku Visu kada je proizvodnja FN elektrane značajno manja nego ljeti, tj. kada su opterećenja izvoda transformatorskih stanica najmanja tijekom jedne godine. Detaljnije proučavanje mreže kao i njezinih elemenata neće se razmatrati u ovome radu. Na Slici 3.9. prikazana je cjelokupna shema mikromreže otoka Visa s naznačenim lokacijama na koje će biti integrirano postrojenje na morske valove kao i baterijski spremnik energije.



Slika 3.9. Mikromreža otoka Visa koja je korištena u simulacijama.

U DIgSILENT PowerFactory-u korištena je analiza vremenskog koraka (engl. Timesweep) kako bi se dobile krivulje napona na sabirnicama te krivulje radne, jalove i prividne snage na ključnim vodovima u mreži. Krivulje snage i napona pratili su se duž vodnih polja „Podstražje“, „Vinarija“ i „Komiža“ kao i na sabirnicama „010 kV TS Vis“, „Oključna 2“, „Komiža 2-Komiža 5-Barjaci“, „Podšpilje-Dračevo polje“, „SE VIS“ i „Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1“. Sabirnice „Oključna 2“, „SE Vis“ i „Podšpilje-Dračevo polje“ odabrane su za promatranje utjecaja distribuiranih izvora dok su „Stupišće-Porat-Polje-Biševo 1“ i „Komiža 2-Komiža 5-Barjaci“ odabrani zbog velike električke razdaljine od vanjske mreže.

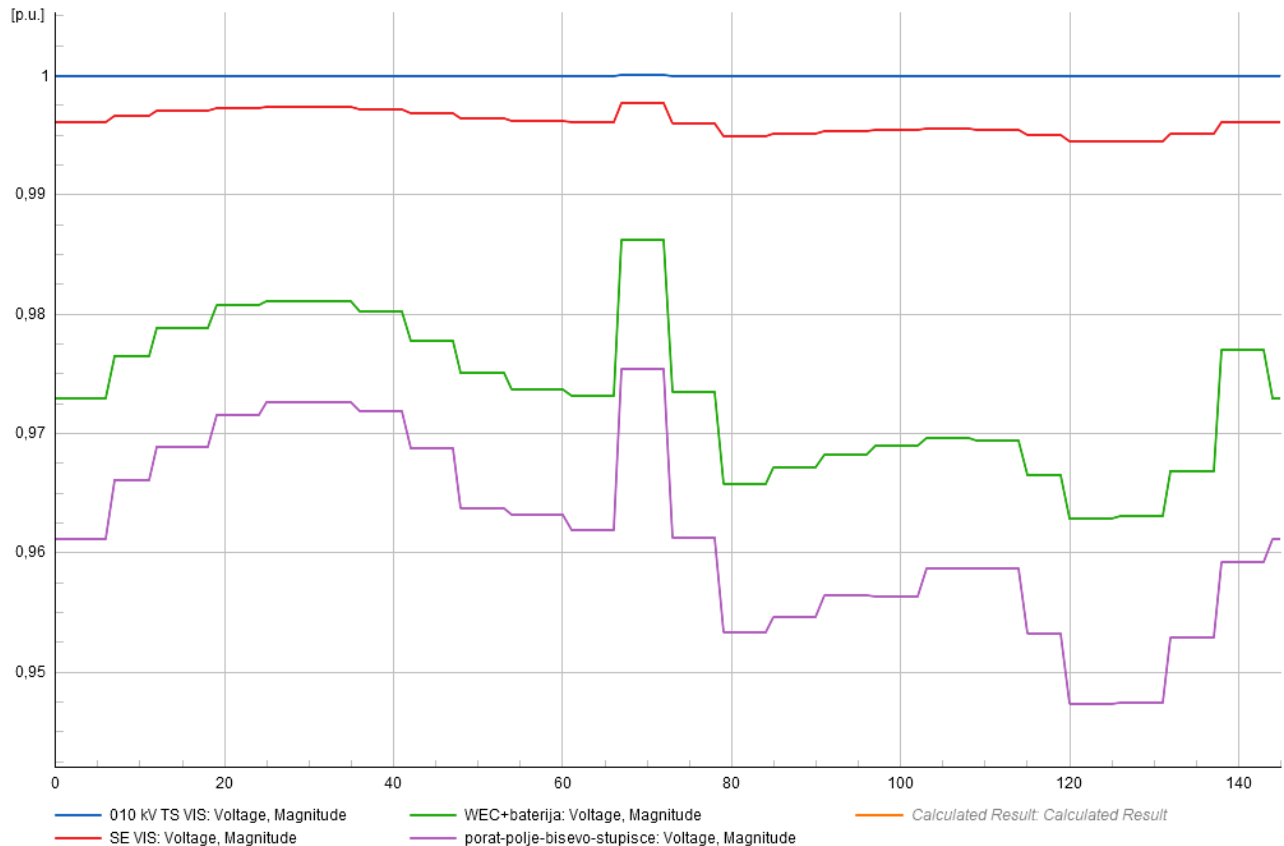
U ovom diplomskom radu simulacije će se provoditi za dva dana u godini, odnosno za ljetni dan (s maksimalnim opterećenjima) i za zimski dan (s minimalnim opterećenjima). Također, promatrat će se sljedeći scenariji u mreži:

- Mikromreža otoka Visa bez integrirane FN elektrane i postrojenja na morske valove
- Mikromreža otoka Visa s integriranom FN elektranom i postrojenjem na morske valove za dvije odabrane lokacije u mreži
- Mikromreža otoka Visa s integriranim postrojenjem na morske valove, FN elektranom i baterijskim spremnikom za dvije odabrane lokacije u mreži

3.2.1. Mikromreža otoka Visa bez integrirane FN elektrane i postrojenja na morske valove

U ovome scenariju provodit će se simulacija vremenskog koraka na mikromreži otoka Visa. Kada nema integrirane distribuirane proizvodnje (FN elektrane i postrojenja na morske valove) tada je ta mreža pasivna što znači da se tokovi snage odvijaju samo u jednome smjeru (od proizvođača do potrošača). Prikaz krivulja napona na sabirnicama može se vidjeti na Slici 3.10. Analiza vremenskog koraka u ovome slučaju se odvijala u vremenskom razmaku od 24 sata s vremenskim korakom od 1/6 sata.

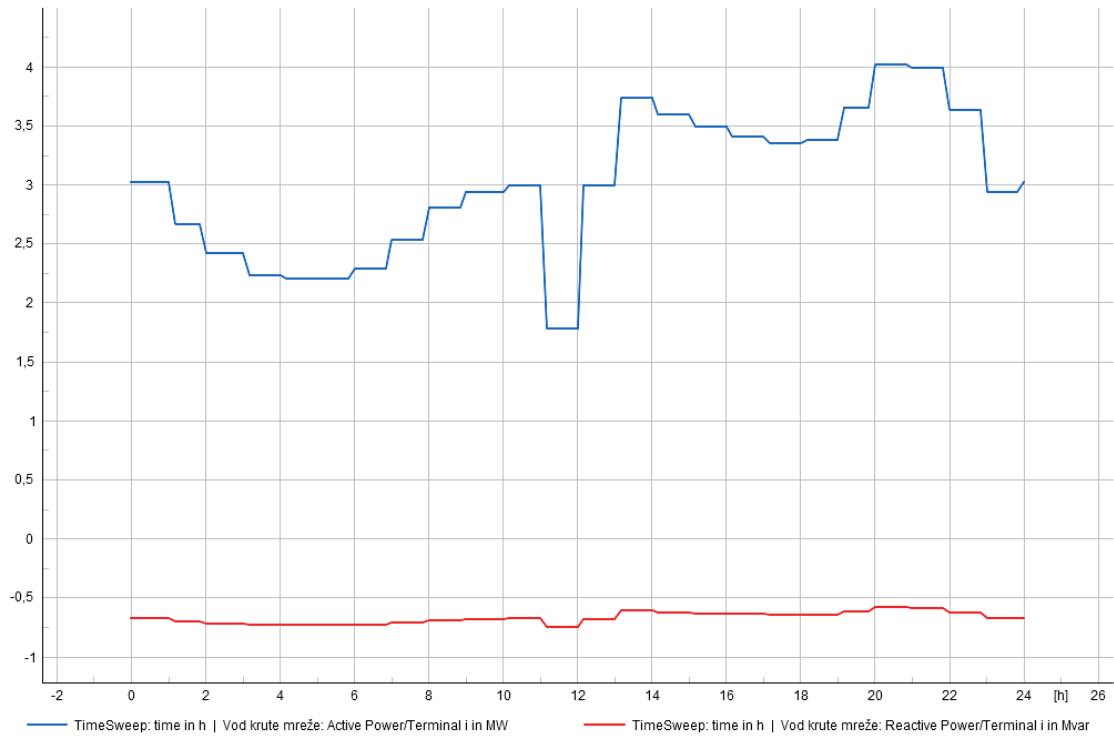
Simulacija za ljetni dan:



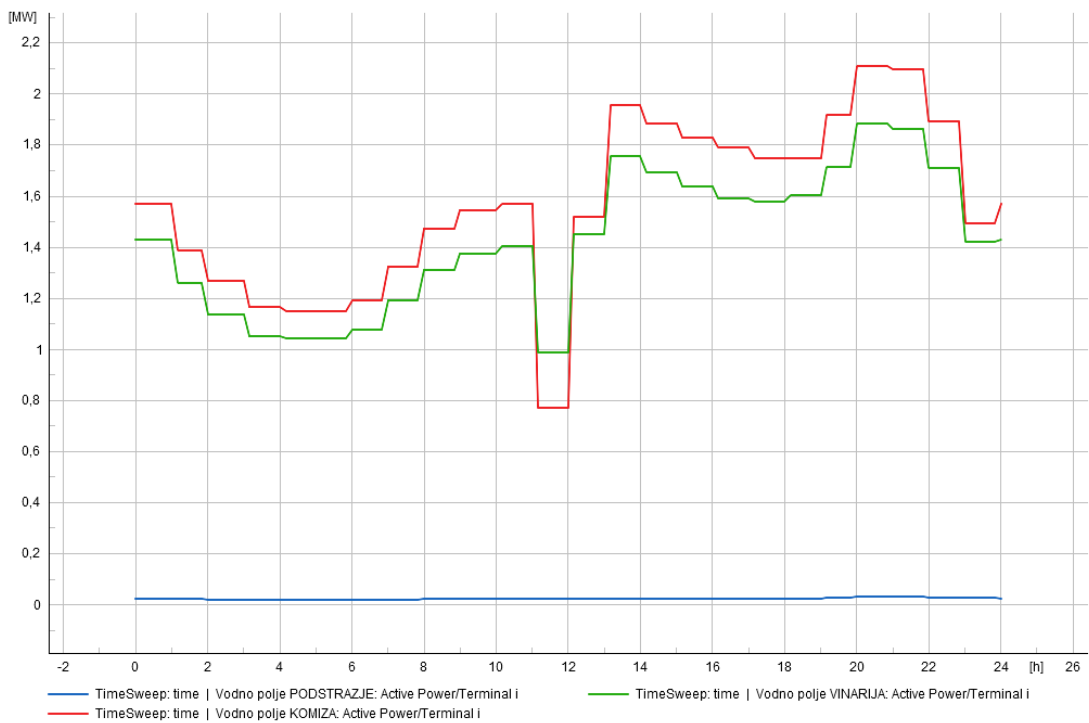
Slika 3.10. Krivulje napona na sabirnicama za ljetni dan bez distribuiranih izvora.

Iz krivulja napona na sabirnicama na slici 3.10. može se primijetiti da mreža ima induktivni karakter što nam pokazuju nešto niže vrijednosti napona na sabirnicama. Naponi na sabirnicama „010 kV TS Vis“ i na „SE Vis“ su u granicama između 0,99 p.u. do 1 p.u., dok naponi na sabirnicama „WEC+baterija“ i „Porat-Biševo-Stupišće“ variraju u granicama od 0,94 p.u. do 0,99 p.u. što je idalje prema normi EN 50160 u granicama dopuštenih vrijednosti jer ta norma propisuje da naponi smiju se kretati od $-10\% U_n$ do $+10\% U_n$. Padovi napona na sabirnicama u sustavu se povećavaju zbog izuzetne potražnje za električnom energijom posebno u poslijepodnevним satima kada su u mreži opterećenja vršna.

U ovome slučaju može se vidjeti da je maksimalna uvezena snaga jednaka 4 MW što se može vidjeti na Slici 3.11. Taj period vršne potražnje snage se događa oko 20 sati kao što je moguće vidjeti na grafu. Također, period najniže potražnje snage koja iznosi oko 1,75 MW događa se između 11 i 12 sati prijepodne.



Slika 3.11. Radna i jalova snaga na vodu krute mreže.

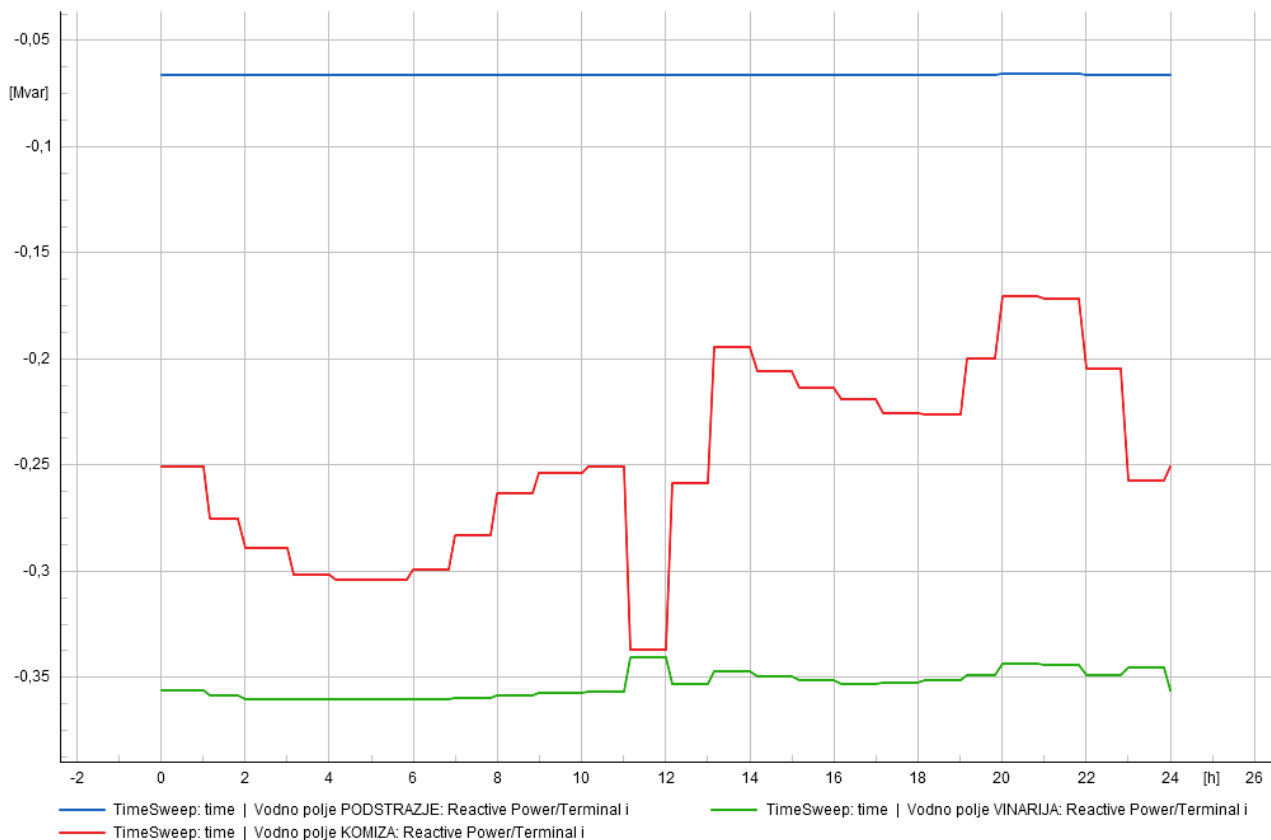


Slika 3.12. Krivulje radnih snaga na pojedinim vodnim poljima.

Na Slici 3.12. mogu se vidjeti krivulje radnih snaga vodnih polja tj. dalekovoda u mikromreži otoka Visa. Može se primijetiti da je najveća radna snaga razvijena na vodnom polju „Komiža“ , a maksimalna radna snaga na tom vodnom polju iznosi oko 2,1 MW. Ta se radna snaga razvija od 20 do 22 sata kada je potražnja za električnom energijom najveća. Najmanje opterećenje je na vodnom polju „Podstražje“ na kojem je radna snaga gotovo pa jednaka nuli cijeli promatrani period.

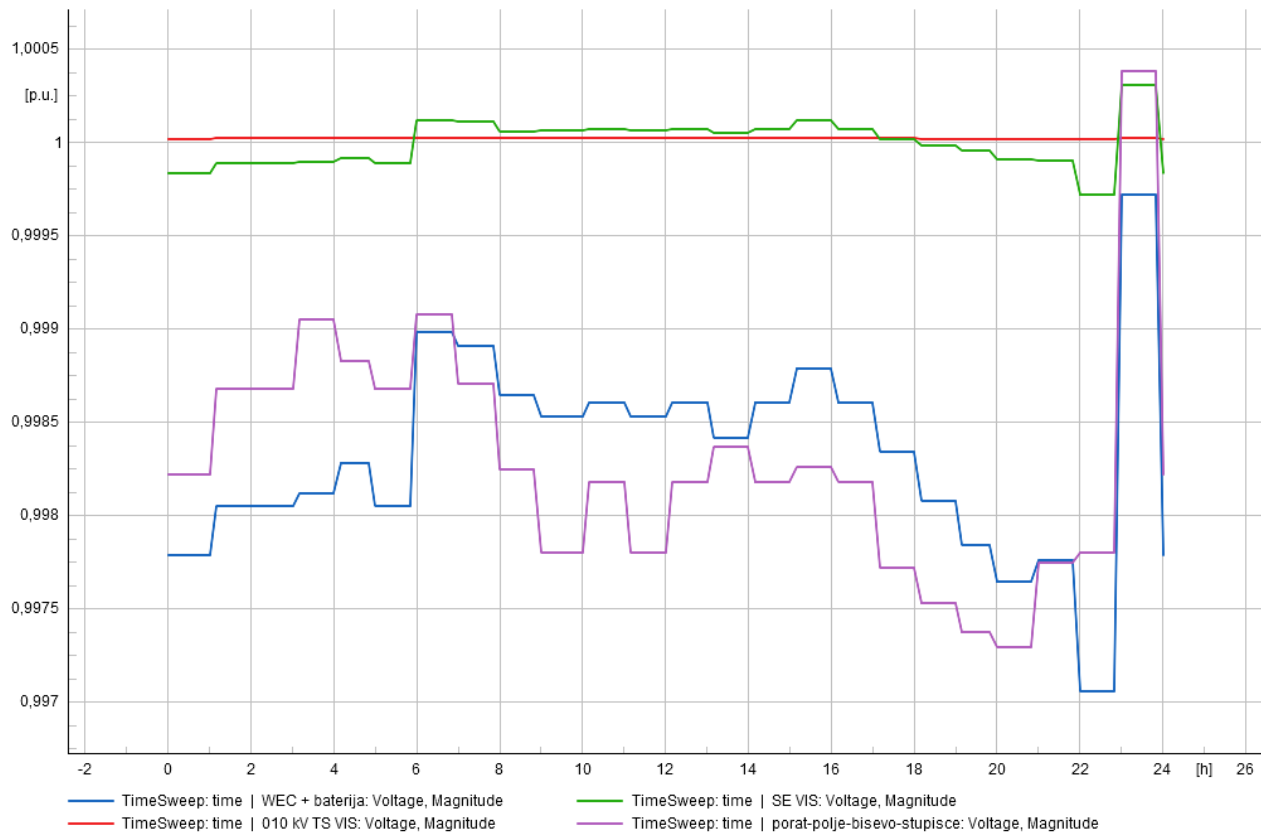
Krivulje jalovih snaga vodnih polja mogu se vidjeti na Slici 3.13. Na tom se grafu može vidjeti da najznačajnije jalovo opterećenje se može vidjeti na vodnom polju „Vinarija“ gdje gotovo pa cijelo promatrano razdoblje jalovo opterećenje je konstantnog iznosa. Najmanje jalovo opterećenje je na vodnom polju „Podstražje“ i cijelo promatrano razdoblje je približno jednakog iznosa.

Zaključak ovoga slučaja je da veća razina potrošnje električne energije dovodi do većih opterećenja na pojedinim dalekovodima u mreži, a naponi na sabirnicama se smanjuju te mreža poprima induktivan karakter.



Slika 3.13. Krivulje jalovih snaga na pojedinim vodnim poljima.

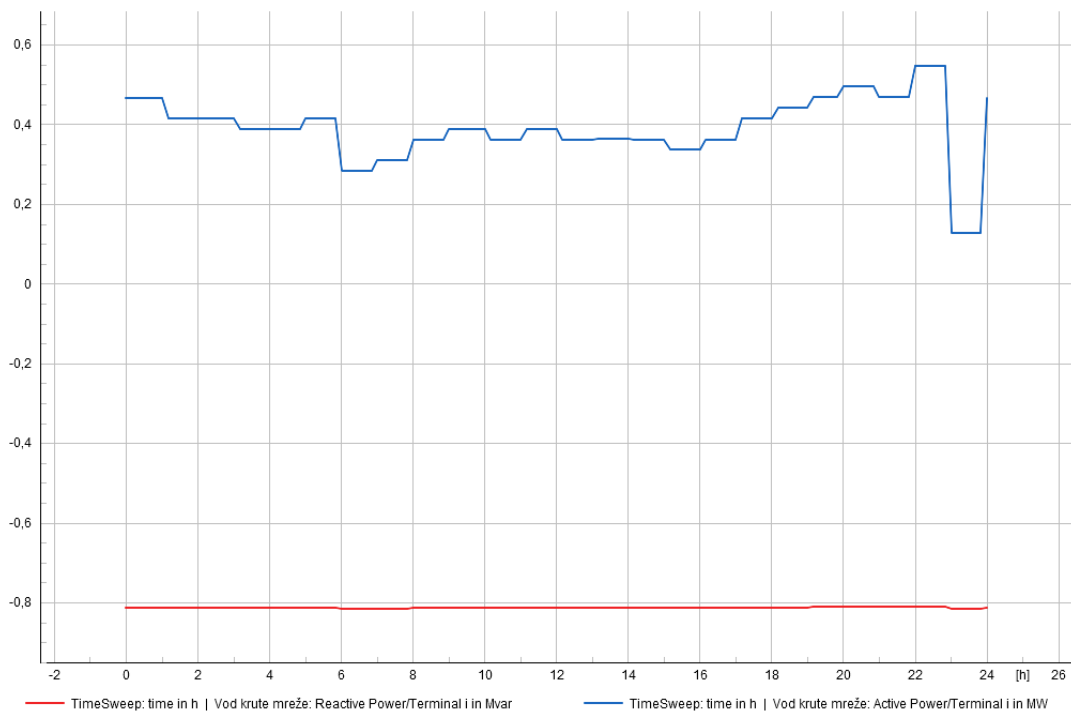
Simulacija za zimski dan:



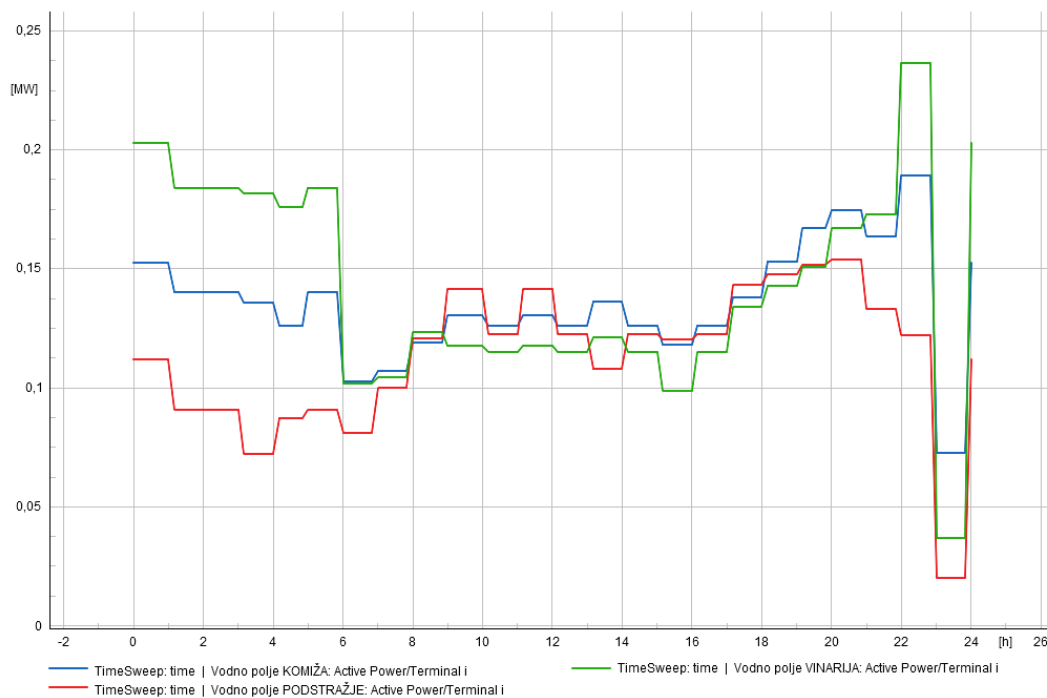
Slika 3.14. Naponi na sabirnicama za zimski dan bez distribuiranih izvora.

Na Slici 3.14. prikazane su krivulje napona za odabrani zimski dan za slučaj kada na mrežu nisu spojeni baterijski spremnici, FN elektrana niti postrojenje na morske valove koje smo prethodno modelirali. Može se primijetiti da mreža u ovome slučaju poprima kapacitivni karakter u razdoblju od 23 od 24 sata kada naponi na sabirnicama „Porat-polje-Biševo-Stupišće“, „SE Vis“ i „010 kV TS Vis“ prelaze vrijednost 1 p.u. Razlog kapacitivnog karaktera mreže su niska opterećenja mreže u tom periodu. Međutim, to povećanje napona je gotovo pa nezamjetno. Naponi na sabirnicama „WEC+baterija“ i „Porat-Polje-Biševo-Stupišće“ skloni su velikim fluktuacijama tijekom dana te njihovi iznosi prvenstveno ovise od varijabilnim opterećenjima tijekom dana. Svi se naponi nalaze u intervalu od +10 % U_n do -10 % U_n što još uvijek zadovoljava kriterije prema normi EN 50160.

Na Slici 3.15. može se vidjeti da je jalova snaga na vodu krute mreže gotovo pa jednaka cijelo promatrano vrijeme, dok je radna snaga podložna fluktuacijama i najmanja je u razdoblju od 23 do 24 sata kada je najmanja potražnja za električnom energijom.

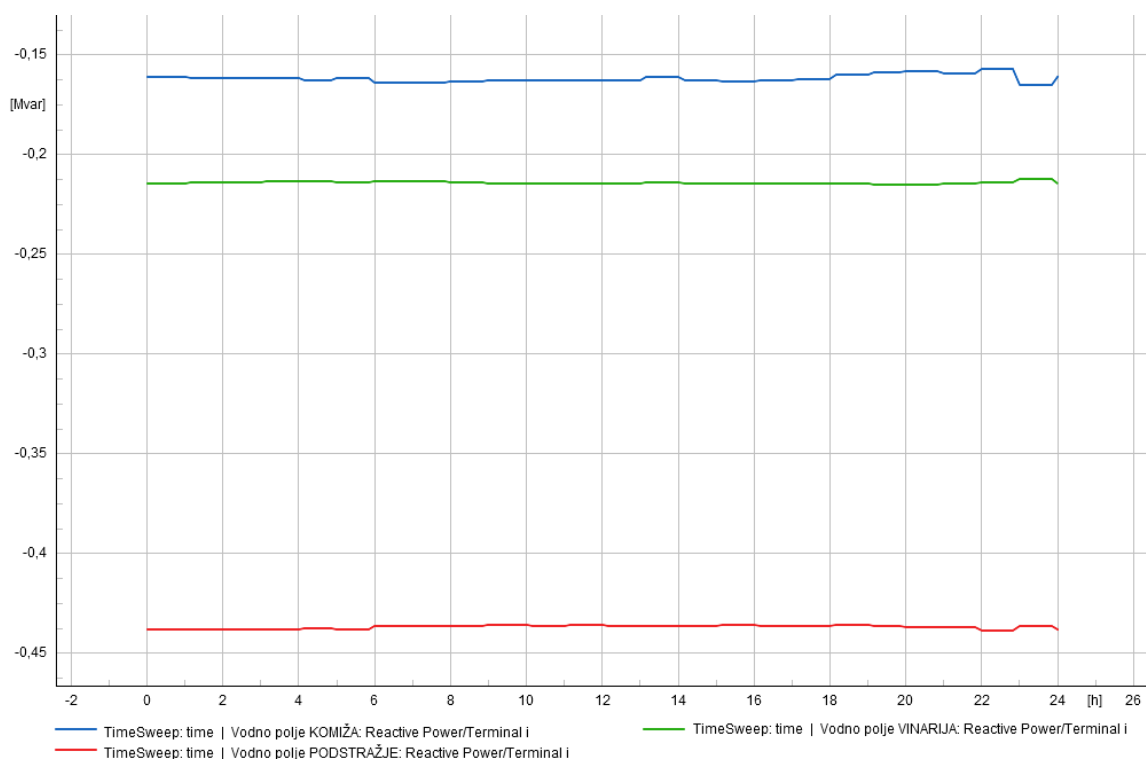


Slika 3.15. Radna i jalova snaga na vodu krute mreže.



Slika 3.16. Krivulje radnih snaga na pojedinim vodnim poljima.

Na Slici 3.16. može se primijetiti da je radno opterećenje pojedinih vodnih polja u mreži vrlo varijabilno tijekom dana. U prvom dijelu dana, najmanje opterećenje ima vodno polje „Podstražje“, a najveće vodno polje „Vinarija“. U srednjem dijelu dana tj. kako se opterećenje mreže povećava, tada vodno polje „Podstražje“ ima najveće radno opterećenje, a najmanje vodno polje „Vinarija“. Vrhunac radnog opterećenja tijekom dana iznosi oko 0,24 MW i događa se na vodnom polju „Vinarija“ u vremenu oko 22 sata. Nakon 23 sata dolazi do značajnog smanjenja radnog opterećenja u svim vodnim poljima, a najmanje tada opterećeno vodno polje je „Podstražje“.



Slika 3.17. Krivulje jalovih snaga na pojedinim vodnim poljima.

Na Slici 3.17. prikazane su krivulje jalovih snaga na pojedinim vodnim poljima u mreži. Može se primijetiti da je jalova snaga vodnog polja „Podstražje“ cijeli promatrani period gotovo pa konstantna i ona je najznačajnijeg iznosa. Slična situacija je i kod ostalih vodnih polja kod kojih su cijeli promatrani period jalove snage gotovo pa konstantnog iznosa.

3.2.2. Mikromreža otoka Visa s integriranom FN elektranom i postrojenjem na morske valove za dvije odabrane lokacije u mreži

U ovome slučaju se u mreži uključuje (integrira) fotonaponska elektrana na sabirnicu „SE VIS“ i postrojenje na morske valove na Lokaciju 1 (Komiža 2-Komiža 5-Barjaci) i na Lokaciju 2 (Podšpilje-Dračevo polje). Prije svega, potrebno je modelirati fotonaponsku elektranu, tj. njezinu izlaznu snagu koja je varijabilna tijekom dana.

Izlazna snaga FN elektrane se računala prema formuli (3-8) [28]:

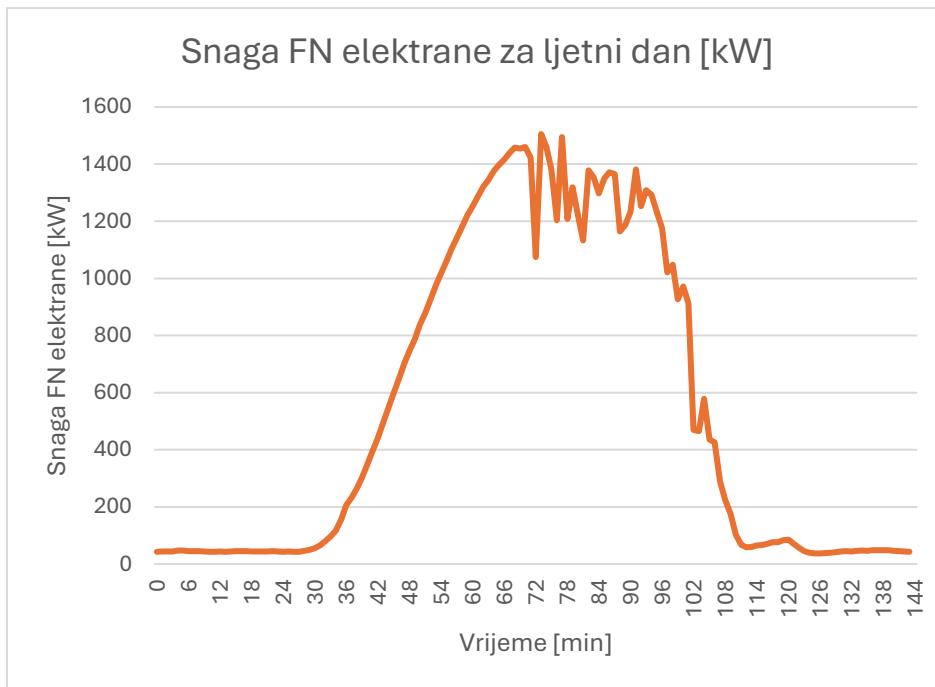
$$P_{PV,t} = P_{array,STC} \cdot \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot \frac{\eta_{inv}}{100} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100} (t_{mod,t} - t_{STC}) \right) \quad (3-8)$$

Gdje je $P_{PV,t}$ izmjenična snaga FN elektrane koju elektrana predaje u mrežu tj. njezina stvarna snaga izražena u [kW], $P_{array,STC}$ predstavlja nazivnu snagu FN elektrane tj. instaliranu snagu. G_t predstavlja izmjerenu jakost Sunčevog zračenja izraženu u [W/m^2]. Za vrijednost G_{STC} uzima se 100, ona je također izražena u [W/m^2]. Učinkovitost izmjenjivača se označava s η_{inv} i u ovome slučaju je uzeta vrijednost 98%. Temperaturni koeficijent je označen s γ , a izražava se u [$\%/^{\circ}C$]. Izračunata vrijednost temperature je označena s $t_{mod,t}$ i računata prema formuli (3-9) [28], dok t_{STC} predstavlja temperaturu od 25 $^{\circ}C$.

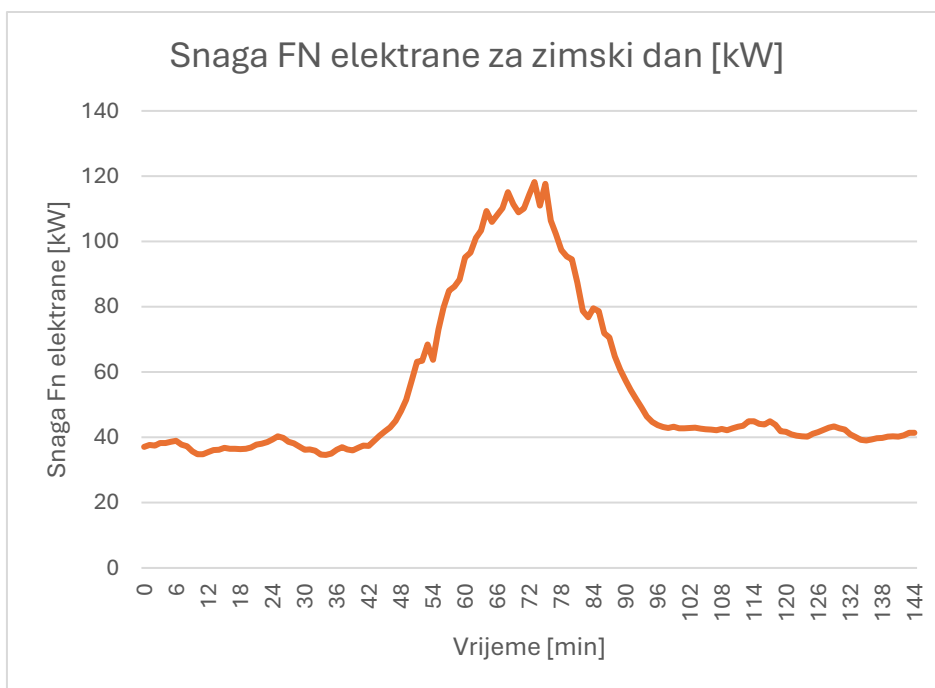
$$t_{mod,t} = t_{amb,t} + \frac{NOCT-20}{800} \cdot G_t \quad (3-9)$$

U formuli (3-9), $t_{amb,t}$ označava temperaturu okoliša, odnosno ambijenta i izražava se u [$^{\circ}C$], a $NOCT$ je nazivna temperatura ćelije [28].

Karakteristika radne snage FN elektrane za ljetni dan prikazana je na slici 3.18., dok je karakteristika FN elektrane za zimski dan prikazana na slici 3.19. Uzorci snage uzeti su tijekom jednoga cijeloga dana u razmaku od 10 minuta. Sa slike 3.18. može se vidjeti kako je izlazna snaga FN elektrane puno veća nego na slici 3.19. To se događa zbog toga što ljeti ima puno više Sunčevog zračenja, stoga je i izlazna snaga elektrane veća. Elektrana najviše snage, a potom i energije predaje u mrežu oko podneva kada je i Sunčevo zračenje najjače.

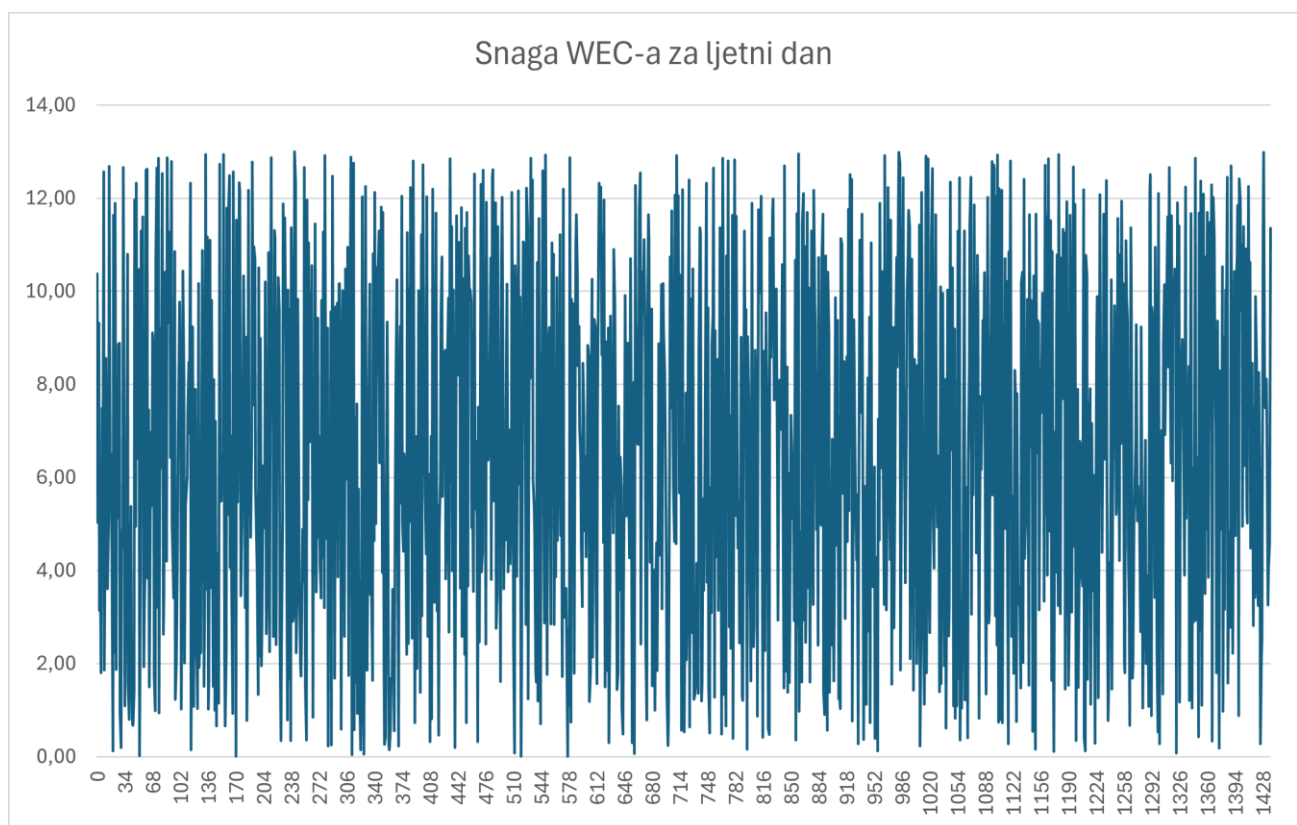


Slika 3.18. Karakteristika radne snage FN elektrane za ljetni dan.

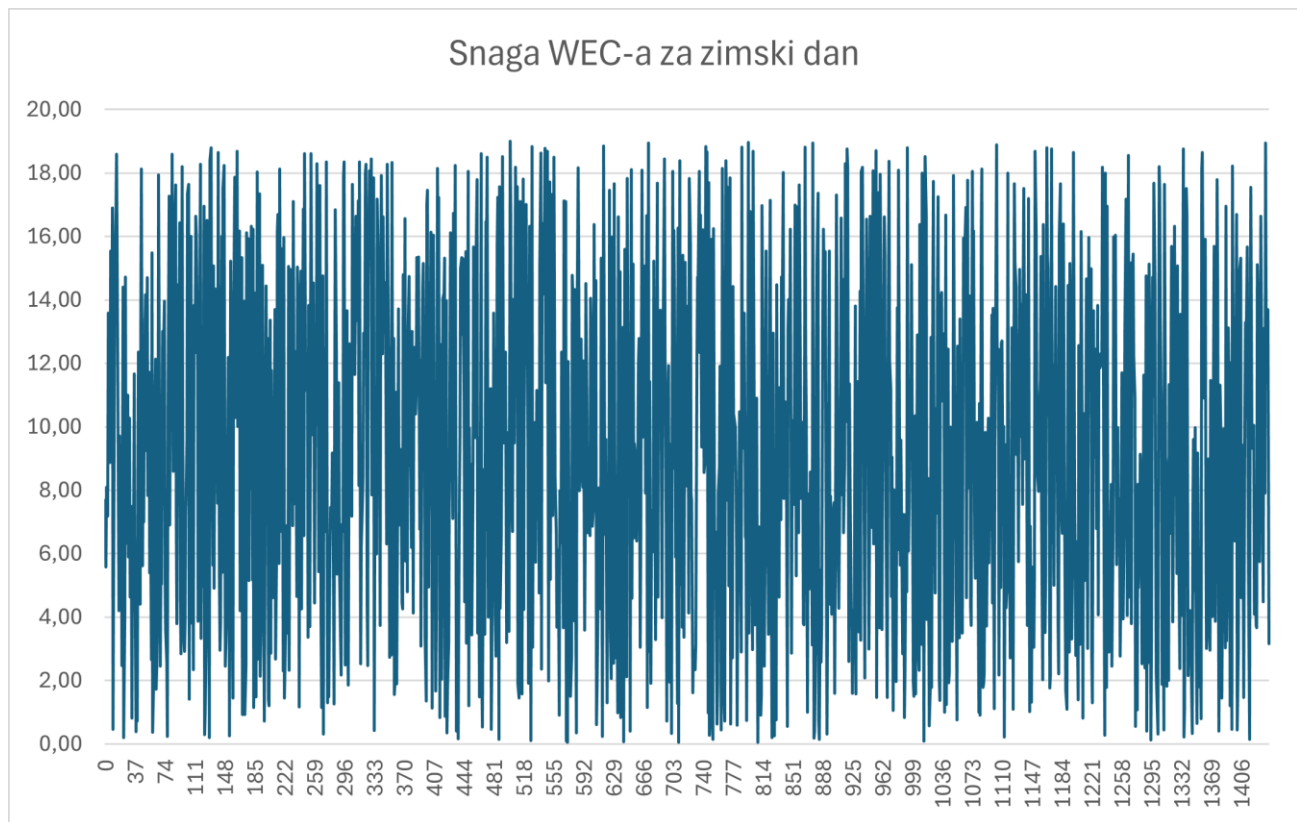


Slika 3.19. Karakteristika radne snage FN elektrane za zimski dan.

Generator na morske valove modeliran je kao statički generator s ulaznim podacima radne snage za svaku minutu u danu, a ulazni podaci radne snage dobiveni su kao aritmetičke sredine vrijednosti radne snage za svaku sekundu u pojedinoj minuti. Profil snage svakoga generatora izražen je u kilovatima. Postrojenje na morske valove koje se sastoji od skupine generatora na morske valove modelira se paralelnim spajanjem generatora na morske valove. Podaci o radnoj snazi u sekundama dobiveni su pomoću programa MATLAB kako je i spomenuto u potpoglavlju 3.1. Nakon uvrštavanja svih srednjih vrijednosti u program Excel, na slici 3.20. i 3.21. mogu se vidjeti tipični profili radne snage jednog generatora na morske valove za dva godišnja doba.

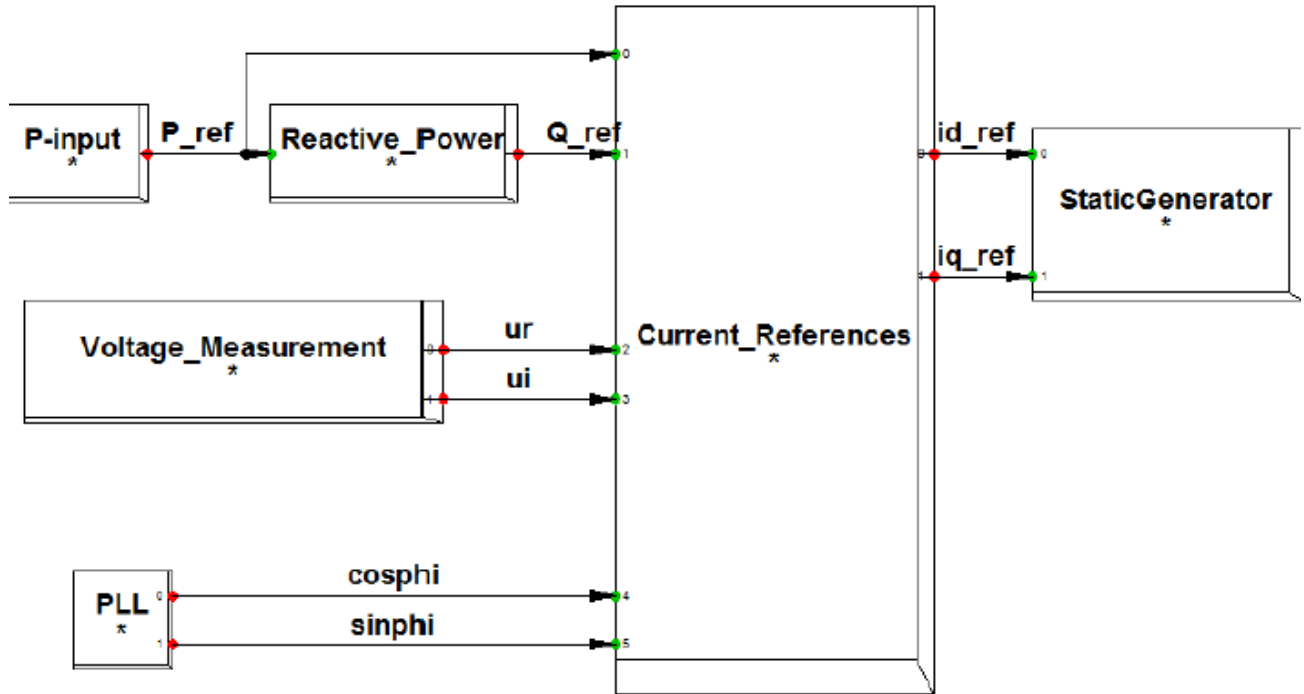


Slika 3.20. Profil snage generatora na morske valove za ljetni dan.



Slika 3.21. Profil snage generatora na morske valove za zimski dan.

Prema [29], generatori na morske valove simulirani su kao statički generatori u programu DIgSILENT PowerFactory i ekvivalentni su kontroliranom strujnom izvoru. Blokovski prikaz koji je razvijen za regulaciju izlazne radne snage svakog generatora uključen je u svaki model generatora i prikazan je na slici 3.22. [29] Blok ulazne radne snage (engl. *P-input*) daje referentnu djelatnu snagu P_{ref} statičkog generatora iz kojega se izračunava referentna jalova snaga pomoću bloka ulazne jalove snage (engl. *Reactive_Power*). Generatori rade s fiksnim faktorima snage čija je vrijednost održavana konstantnom tijekom svih simulacija. Ovaj način rada generatora omogućuje manje gubitke energije u podmorskim kabelima i smanjuje potrebu za VAR kompenzatorima za opskrbu jalove energije cijele valovne farme.



Slika 3.22. Blokvska shema linearnog generatora u DIgSILENT-u. [28]

(Gdje je „*P-input*“ blok ulazne radne snage, „*Reactive_Power*“ predstavlja blok ulazne jalove snage, „*Voltage_Measurement*“ blok mjerenog napona, „*PLL*“ fazno zatvorena pelja za mjerenje faktora snage $\cos\phi$, „*Current_References*“ referentne vrijednosti struje, „*StaticGenerator*“ predstavlja statički generator kojim je modeliran svaki generator u postrojenju na morske valove)

Obzirom na to da postoji blok koji mjeri realnu i imaginarnu komponentu napona, navedene kao u_r i u_i , prije svega se moraju definirati realna i imaginarna komponenta struje i_r i i_i . Te komponente su povezane s referentnom radnom snagom P_{ref} i referentnom jalovom snagom Q_{ref} prema formuli

(3-10) [29]:

$$\begin{aligned}
 S &= P_{ref} + jQ_{ref} = u \cdot i^* \\
 &= (u_r + ju_i) \cdot (i_r - ji_i) = u_r \cdot i_r + u_i \cdot i_i + j(u_i \cdot i_r - u_r \cdot i_i)
 \end{aligned}
 \tag{3-10}$$

Shodno tome, realna i imaginarna komponenta struje i_r i i_i mogu se definirati prema izrazima (3-11) i (3-12) [29]:

$$i_r = \frac{P_{ref}}{u_r} - \frac{u_i}{u_r^2 + u_i^2} (u_i \cdot P_{ref} - Q_{ref})
 \tag{3-11}$$

$$i_i = \frac{u_r}{u_r^2 + u_i^2} \left(\frac{u_i}{u_r} \cdot P_{ref} - Q_{ref} \right) \quad (3-12)$$

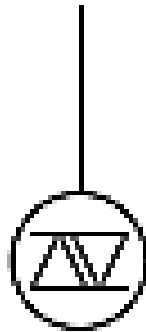
Konačno, kvadratne komponente struje i_d i i_q mogu se izraziti preko formula (3-13) i (3-14) [29]:

$$i_d = i_d \cdot \cos(\varphi) + i_i \cdot \sin(\varphi) \quad (3-13)$$

$$i_q = -i_r \cdot \sin(\varphi) + i_i \cdot \cos(\varphi) \quad (3-14)$$

Fazni pomak φ mjereno je pomoću fazno zatvorene petlje u programu DIgSILENT PowerFactory koja odgovara bloku „PLL“ na slici 3.22.

Svaki statički generator koji je spojen na mikromrežu otoka Visa ima simbol koji je prikazan na slici 3.23. Postrojenje na morske valove je sačinjeno od niza paralelno spojenih generatora na morske valove.



Elektrana na morske valove

Slika 3.23. Simbol statičkog generatora u programu DIgSILENT PowerFactory od kojih je sačinjeno postrojenje na morske valove. [29]

- **Simulacija za ljetni dan:**

U Tablici 3.3. prikazani su rezultati dobiveni simulacijom za ukupno opterećenje mreže, gubitke, količinu energije dobivenu iz distribuirane proizvodnje (iz obnovljivih izvora energije) i količinu energije uvezenu iz mreže na Lokaciji 1, a u Tablici 3.4. na Lokaciji 2. Navedeni podaci su izraženi u megavatsatima. Odabran je tipičan ljetni dan s najvećim opterećenjima u mreži.

Tablica 3.3. Tokovi snaga nakon integriranja FN elektrane i postrojenja na morske valove u mrežu na „Lokaciji 1“.

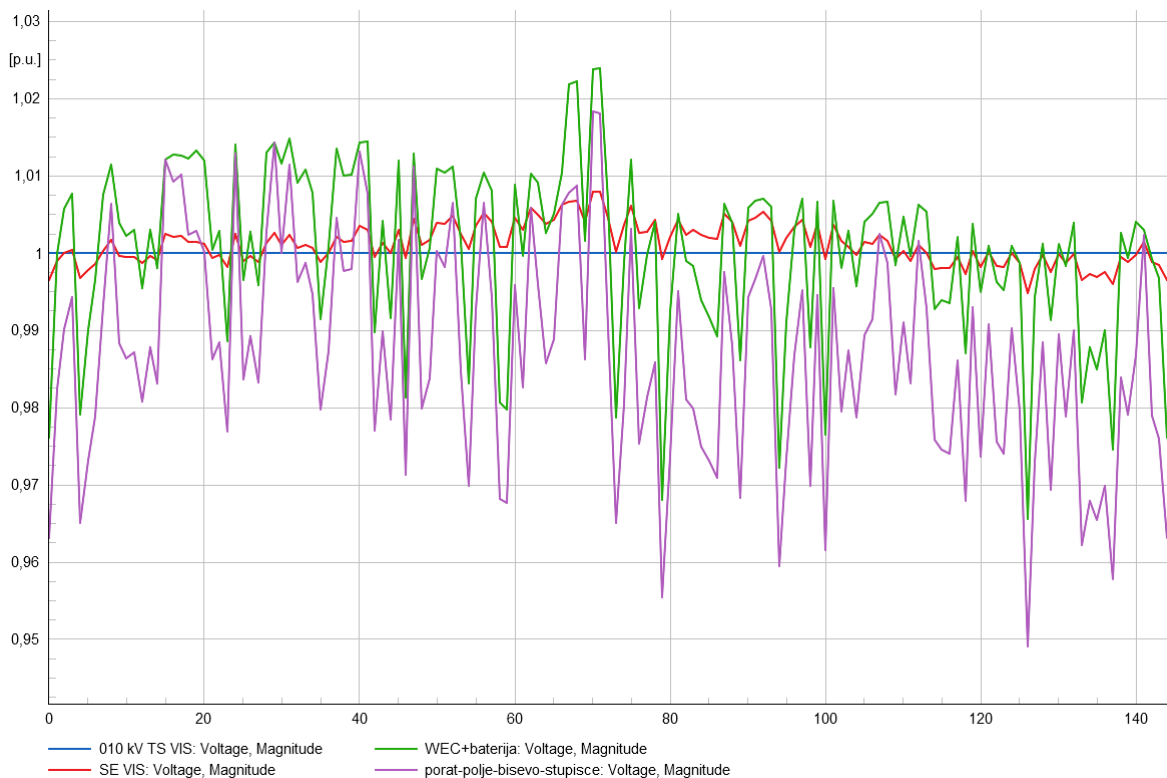
Broj generatora:	1	50	100	150	355
Ukupno opterećenje [MWh]	70,122	70,122	70,122	70,122	70,122
Iz krute mreže [MWh]	58,942	50,418	41,839	33,376	-0,146
Gubici [MWh]	2,132	1,728	1,436	1,260	1,713
Distribuirana proizvodnja [MWh]	13,306	21,427	29,714	38,001	71,979

Tablica 3.4. Tokovi snaga nakon integriranja FN elektrane i postrojenja na morske valove u mrežu na „Lokaciji 2“.

Broj generatora:	1	50	100	150	225
Ukupno opterećenje [MWh]	70,122	70,122	70,122	70,122	70,122
Iz krute mreže [MWh]	58,935	50,290	41,928	33,993	22,976
Gubici [MWh]	2,126	1,601	1,525	1,876	4,574
Distribuirana proizvodnja [MWh]	13,306	21,427	29,714	38,001	51,717

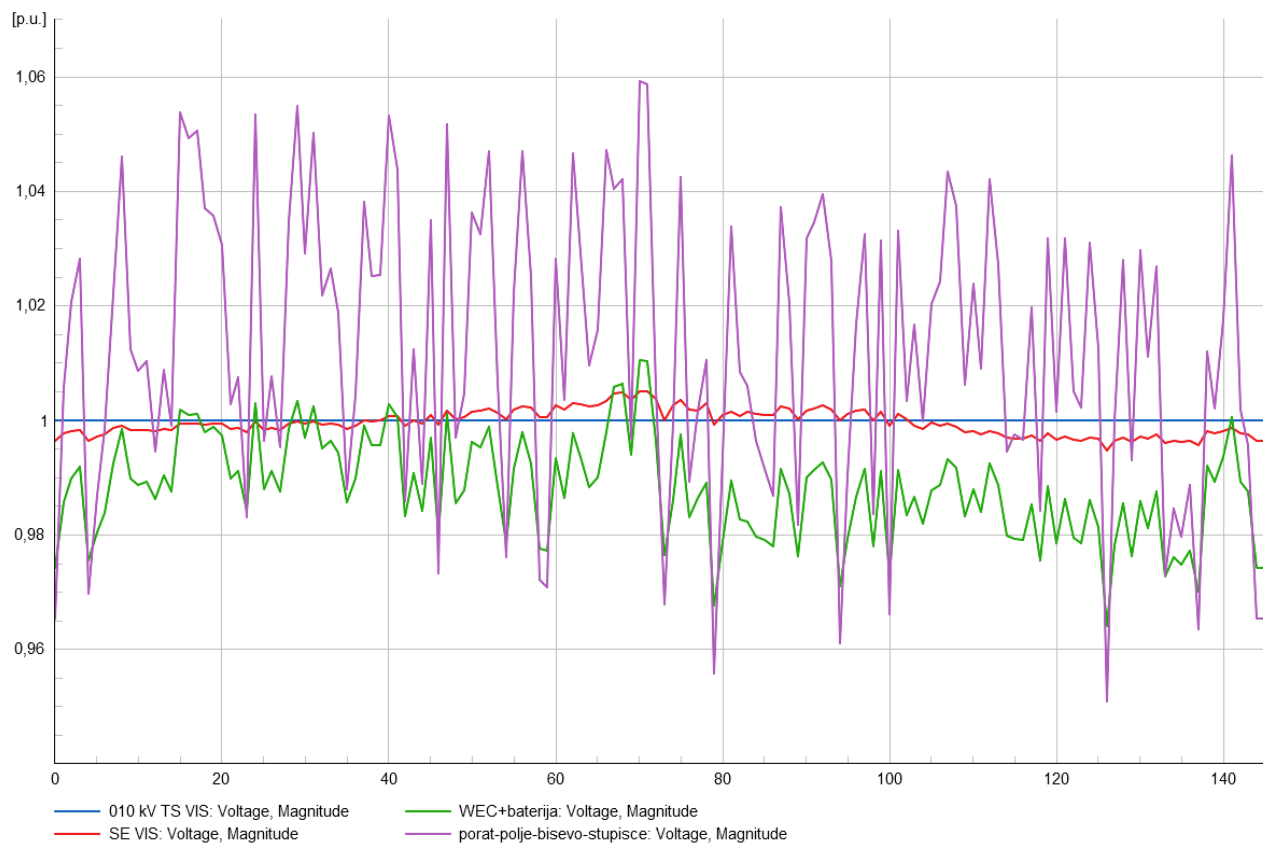
Za scenarij iz Tablice 3.3., prema rezultatima simulacije, potrebno je integrirati 355 generatora na morske valove kako bi se ukupna potrošnja pokrila proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora. Može se primijetiti kako s povećanjem generatora od kojih je sačinjeno postrojenje na morske valove smanjuje se i uvoz energije iz mreže. U slučaju kada je integrirano 355 generatora na morske valove dolazi do blagog predavanja energije u mrežu što nam kazuje negativan predznak energije. Odnosno, može se reći da se u tom slučaju 0,146 MWh energije predaje u mrežu. Bitno je napomenuti da u ovome slučaju ne treba pojačavati mrežu, tj. niti jedan element mreže nije preopterećen.

Za slučaj u Tablici 3.4. važno je reći da se simulacija izvodila do granice isplativosti tj. sve dok se nije trebala mreža pojačavati kao npr. dodavati paralelne vodove i transformatore. Stoga, simulacijom nije dobiven broj generatora koje treba integrirati kako bi se pokrila ukupna potrošnja energijom iz obnovljivih izvora. Međutim, može se primijetiti da se ipak većina energije za pokriće ukupne potrošnje dobavlja iz obnovljivih izvora, a manji dio iz mreže što je isplativije nego da se mreža pojačava. To bi moglo uzrokovati povećanje troškova i gubitaka u mreži.



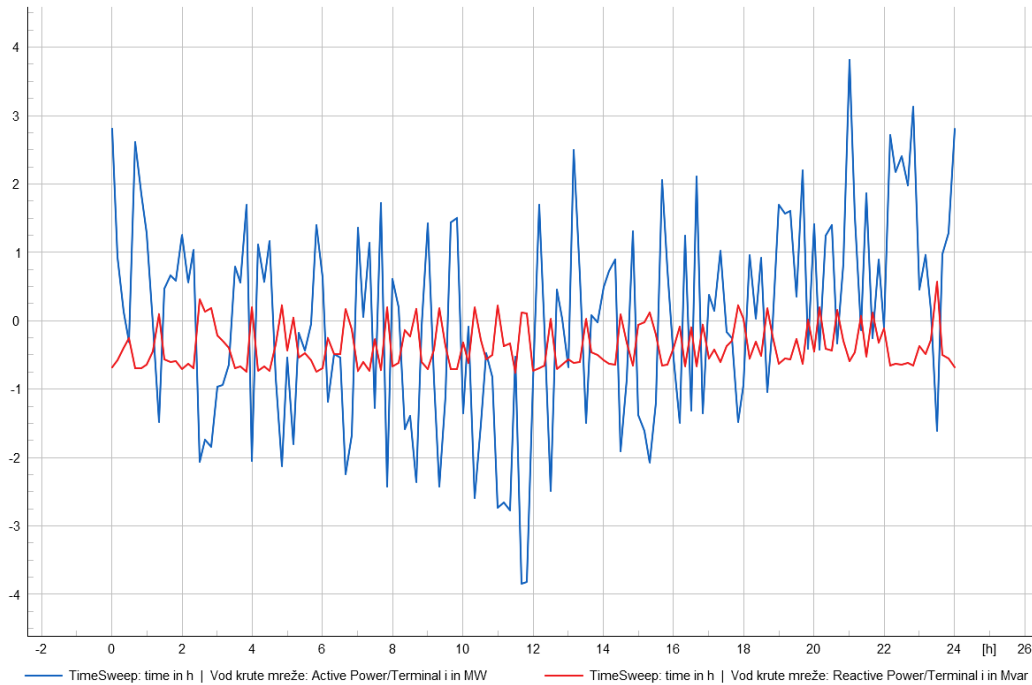
Slika 3.24. Naponi na sabirnicama nakon integriranja 355 generatora na „Lokaciju 1“ u mreži.

Na Slici 3.24. mogu se vidjeti krivulje napona na sabirnicama u vremenu od jednog dana. Najviše oscilacije napona se događaju na sabirnici „Porat-Polje-Biševo-Stupišće“, odnosno dolazi do blagog pada napona na toj sabirnici jer je ta sabirnica najudaljenija od mjesta (gledano električki) gdje je spojeno postrojenje na morske valove. No, taj pad napona je idalje u granicama normale za niski napon, prema normi EN 50160. Najveći porast napona očituje se na sabirnici „WEC+baterija“ jer je postrojenje električki spojeno na tu sabirnicu preko kabela, stoga se osjeti najveći utjecaj postrojenja na morske valove upravo na toj sabirnici. Napon na sabirnici „WEC+baterija“ je također unutar propisanih granica prema normi EN 50160.

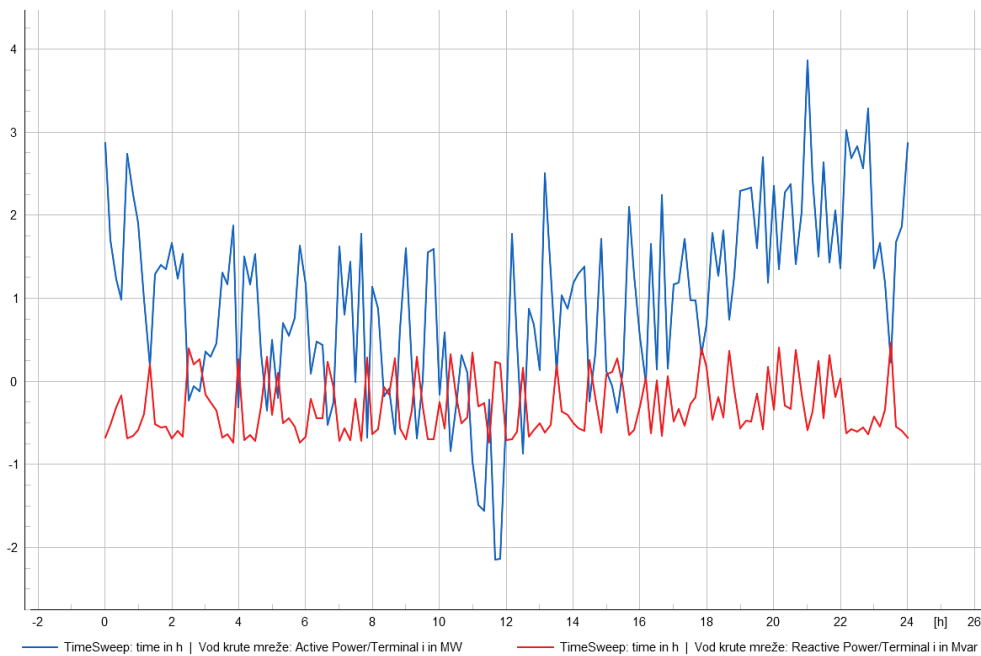


Slika 3.25. Naponi na sabirnicama nakon integriranja 225 generatora na „Lokaciju 2“ u mreži.

Na Slici 3.25. može se vidjeti da nakon integracije postrojenja na morske valove koje se sastoji od 225 generatora najveći porast napona događa se na sabirnici „Porat-Polje-Biševo-Stupišće“. To se događa zbog toga što je ta sabirnica električki najbliža mjestu električkog priključka postrojenja na mrežu, ali je napon na toj sabirnici idalje u granicama normale prema normi EN 50160. Napon na ostalim sabirnicama je bez značajnih oscilacija tijekom promatranoga vremena.

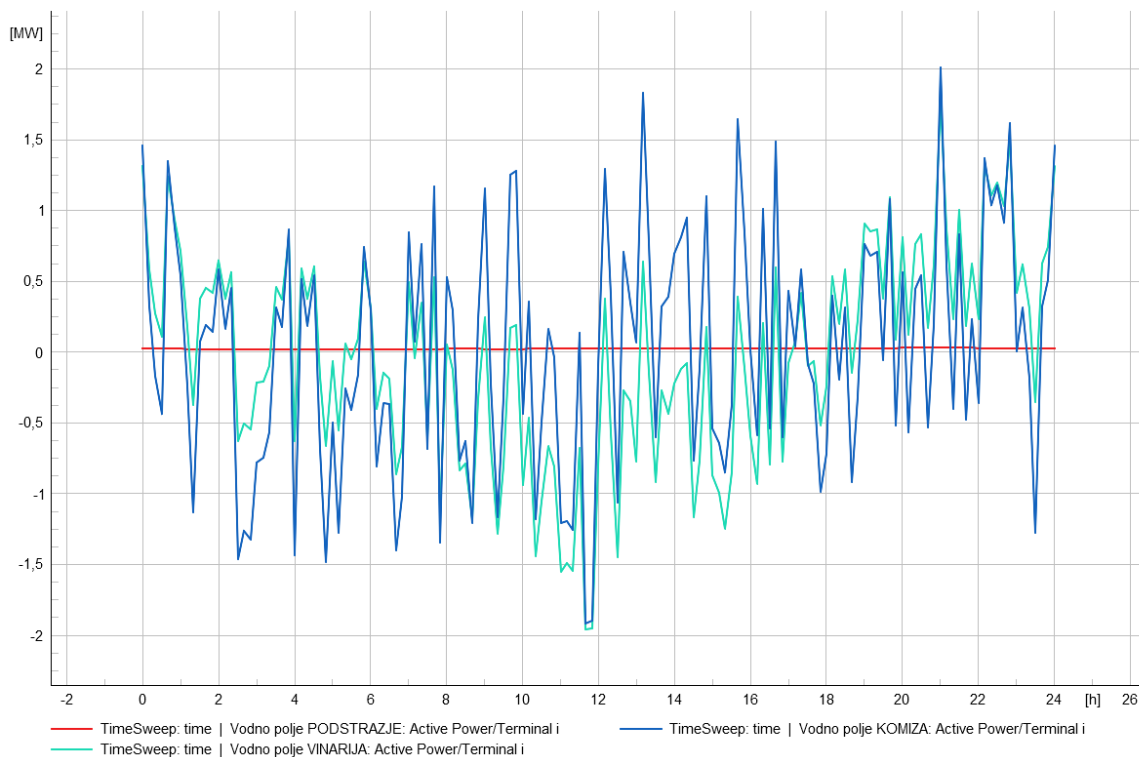


Slika 3.26. Radna i jalova snaga na vodu krute mreže nakon integriranja 355 generatora na morske valove na „Lokaciji 1“.

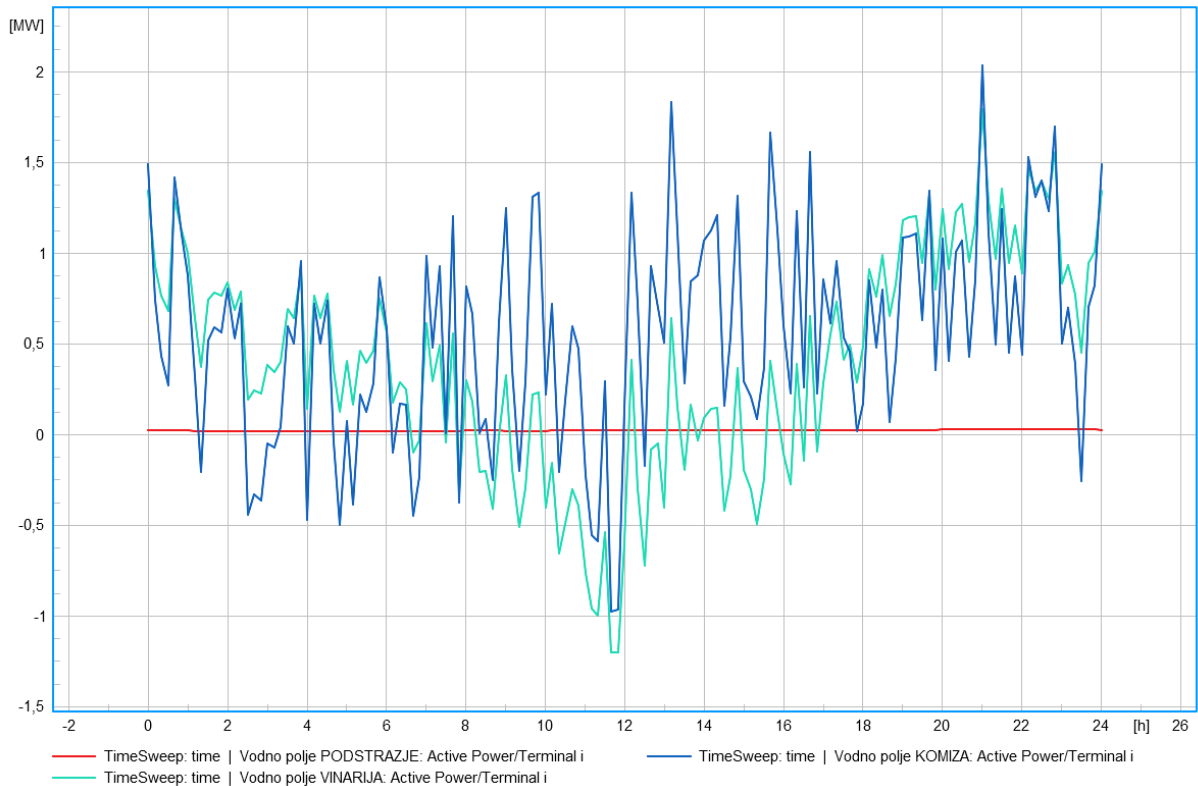


Slika 3.27. Radna i jalova snaga na vodu krute mreže nakon integriranja 225 generatora na morske valove na „Lokaciji 2“.

Usporedbom krivulja na Slici 3.26. i 3.27. može se doći do zaključka kako je u slučaju integriranja 355 generatora na morske valove veća injekcija radne energije u mrežu jer ima i više generatora. Injektiranje radne energije u mrežu je najveće oko 12 sati jer tada ima najviše Sunčevog zračenja, stoga FN elektrana predaje najviše energije u mrežu u tom periodu što se vidi na plavoj krivulji na Slici 3.24. Ako se energija uvozi iz mreže, tada se krivulja snage nalazi u I. kvadrantu. No, ako se energija injektira u mrežu, tada se krivulja snage nalazi u IV. kvadrantu.

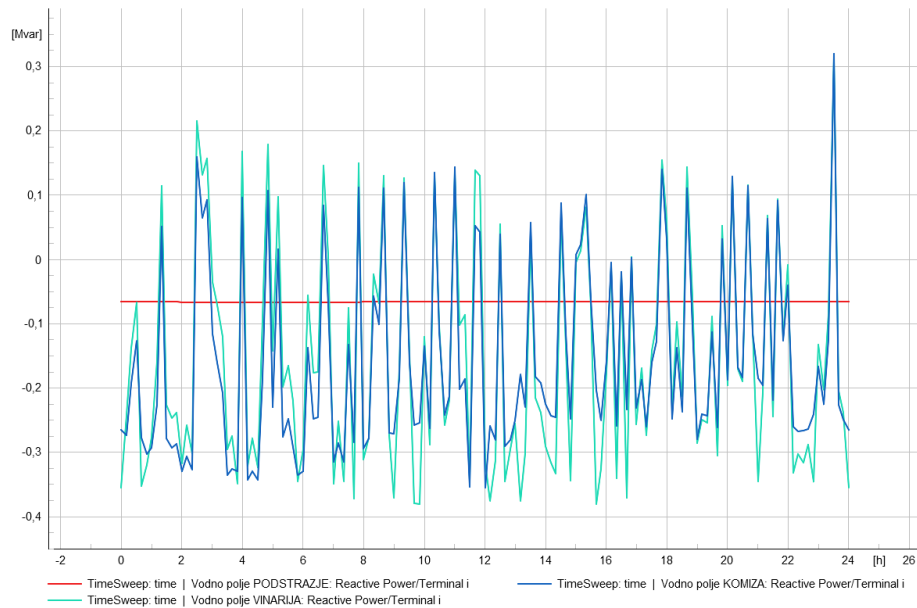


Slika 3.28. Radna snaga na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 355 generatora na morske valove na „Lokaciji 1“.

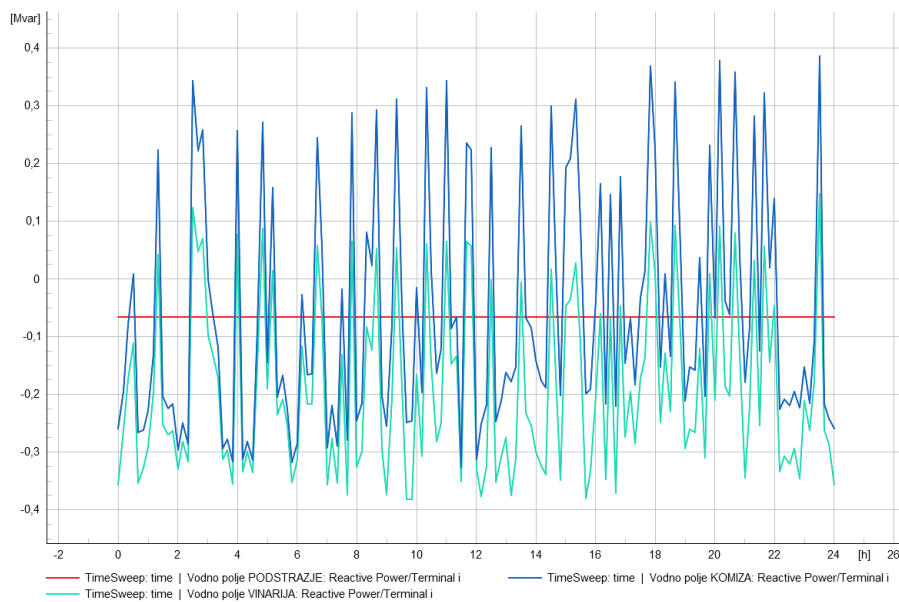


Slika 3.29. Radna snaga na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 225 generatora na morske valove na „Lokaciji 2“.

Usporedbom krivulja na Slici 3.28. i Slici 3.29. može se doći do zaključka da se najveće oscilacije radne snage događaju upravo na vodnom polju „Vinarija“ zbog električke blizine tog vodnog polja i postrojenja na morske valove. Obje slike prikazuju kako nema oscilacija radne snage na vodnom polju „Podstražje“. U oba slučaja postoji dvosmjerni tok energije na vodnim poljima „Vinarija“ i „Komiža“ zbog toga što se krivulje radne snage nalaze i u I. i u IV. kvadrantu, ali se najviše radne snage preda u mrežu u razdoblju oko 12 sati za slučaj 355 generatora i FN elektrana jer je tada Sunčevo zračenje najveće tijekom dana. Važno je reći da radna snaga ima pozitivan predznak ako energija teče iz mreže preko vodnog polja do potrošača, a negativan predznak ima ako energija teče od potrošača vodnim poljem u mrežu.



Slika 3.30. Jalova snaga na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 355 generatora na morske valove na „Lokaciji 1“.



Slika 3.31. Jalova snaga na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 225 generatora na morske valove na „Lokaciji 2“.

Usporedbom krivulja na Slici 3.30. i Slici 3.31. može se zaključiti da nema značajnijih oscilacija jalove snage na vodnim poljima „Podstrazje“ i „Vinarija“, ali dolazi do blage promjene jalove snage na vodnom polju „Komiža“.

- **Simulacija za zimski dan:**

U Tablici 3.5. prikazani su rezultati dobiveni simulacijom za ukupno opterećenje mreže, gubitke, količinu energije dobivenu iz distribuirane proizvodnje (iz obnovljivih izvora energije) i količinu energije uvezenu iz mreže na Lokaciji 1, a u Tablici 3.6. na Lokaciji 2. Navedeni podaci su izraženi u megavatsatima. Odabran je tipičan zimski dan s najmanjim opterećenjima u mreži.

Tablica 3.5. Tokovi snaga nakon integriranja FN elektrane i postrojenja na morske valove u mrežu na „Lokaciji 1“.

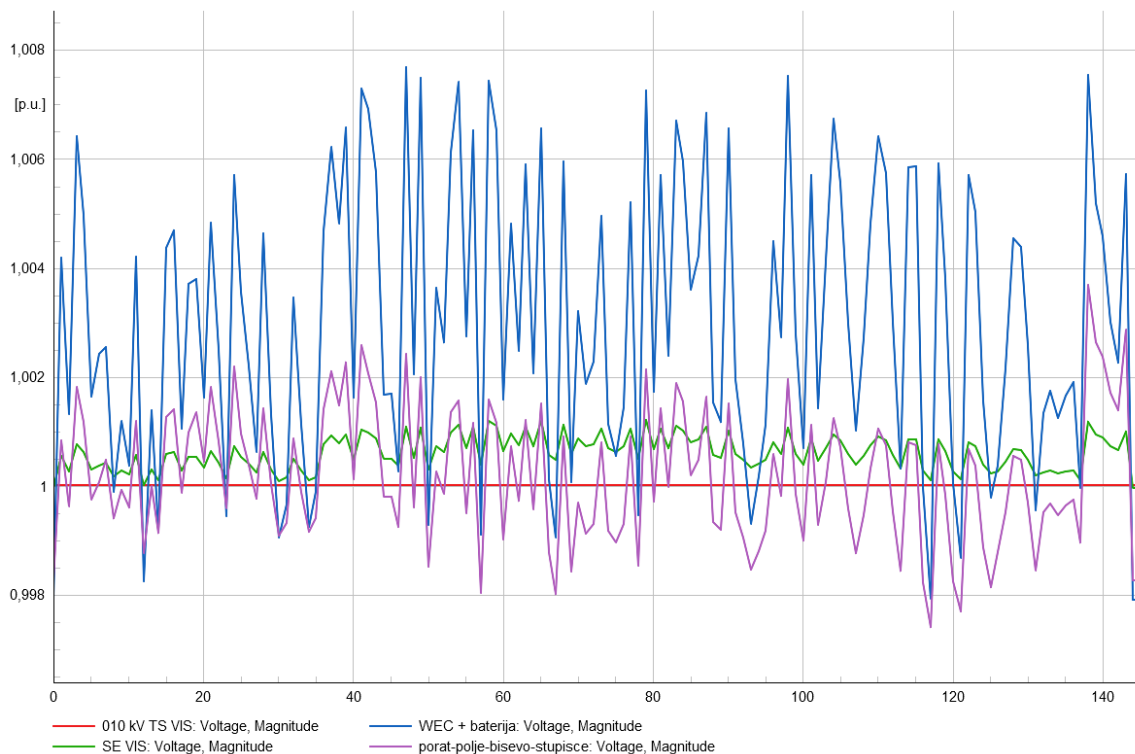
Broj generatora:	1	10	20	30	37
Ukupno opterećenje [MWh]	9,349	9,349	9,349	9,349	9,349
Iz krute mreže [MWh]	7,822	5,812	3,593	1,376	-0,172
Gubici [MWh]	0,042	0,036	0,036	0,044	0,054
Distribuirana proizvodnja [MWh]	1,539	3,546	5,777	8,007	9,569

Tablica 3.6. Tokovi snaga nakon integriranja FN elektrane i postrojenja na morske valove u mrežu na „Lokaciji 2“.

Broj generatora:	1	10	20	30	37
Ukupno opterećenje [MWh]	9,349	9,349	9,349	9,349	9,349
Iz krute mreže [MWh]	7,822	5,829	3,621	1,420	-0,114
Gubici [MWh]	0,042	0,043	0,056	0,083	0,110
Distribuirana proizvodnja [MWh]	1,539	3,546	5,777	8,007	9,569

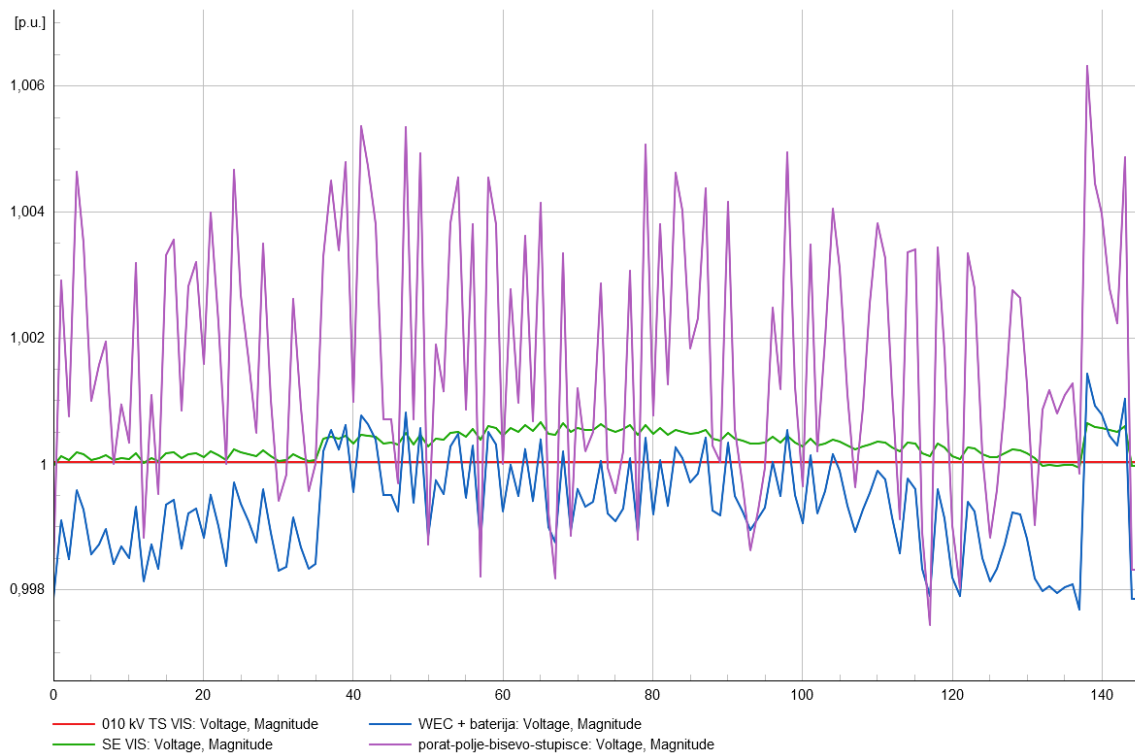
Prema scenariju iz Tablice 3.5., prema rezultatima simulacija, potrebno je integrirati 37 generatora na morske valove, dakle postrojenje se treba sastojati od 37 jedinica kako bi se ukupna potrošnja pokrila ukupnom proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije. S porastom broja generatora u simulacijama može se primijetiti da se smanjuje uvoz energije iz mreže. U krajnjem slučaju kada je integrirano 37 generatora, dolazi do blagog predavanja energije u mrežu što nam pokazuje negativan predznak energije u tom slučaju tj. energija mijenja svoj smjer. U tom se slučaju 0,172 MWh energije predaje u mrežu. Bitno je reći kako u ovome slučaju ne treba pojačavati mrežu, odnosno niti jedan element mreže nije preopterećen.

Za slučaj u Tablici 3.6., simulacijom je dobiveno da je optimalan broj generatora, koji sačinjavaju postrojenje na morske valove, također 37. Može se primijetiti da su gubici malo veći, u usporedbi s gubicima u Tablici 3.5. U ovome se slučaju predaje 0,058 MWh energije manje nego u prvom slučaju, tj. na „Lokaciji 1“. Također, u ovome slučaju nije potrebno pojačavati mrežu, tj. elementi mreže nisu preopterećeni.



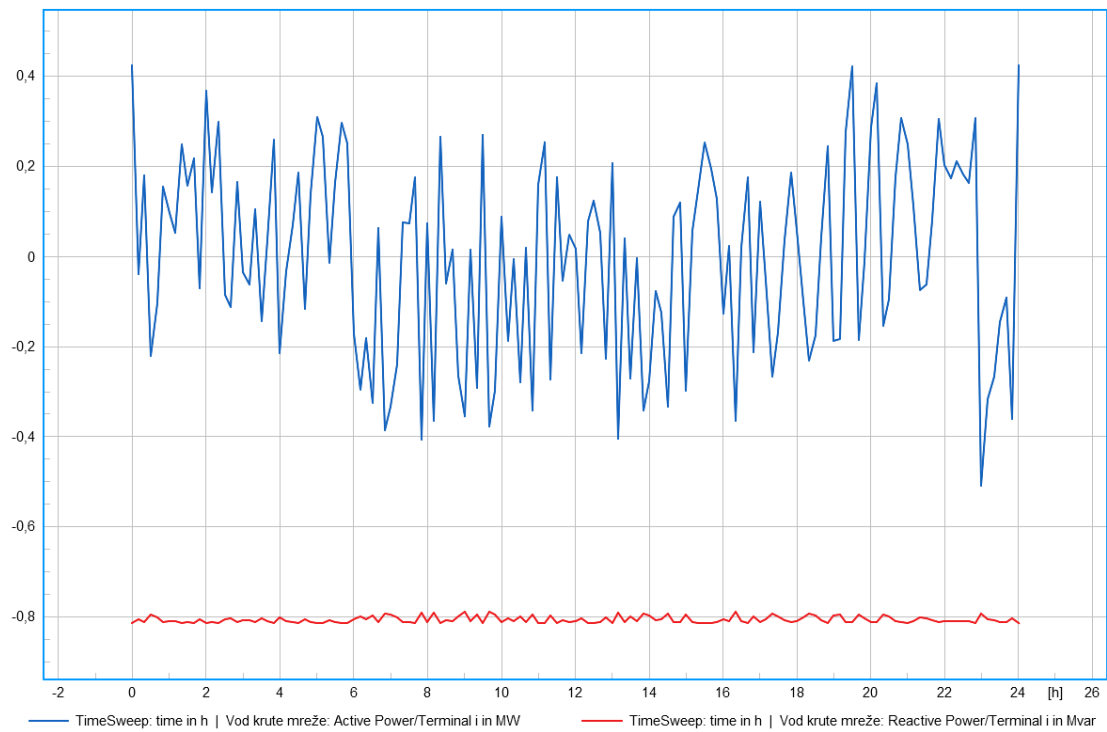
Slika 3.32. . Naponi na sabirnicama nakon integriranja 37 generatora na „Lokaciju 1“ u mreži.

Na Slici 3.32. krivulje napona na promatranim sabirnicama tijekom jednoga dana. Nakon integriranja 37 generatora, može se primijetiti da najveći porast napona se dogodio na sabirnici „WEC+baterija“. Ovo stanje je očekivano jer je postrojenje spojeno na ostatak mreže upravo preko te sabirnice. Iako se na toj sabirnici očituje najveći porast napona u odnosu na ostale sabirnice, vrijednosti napona su idalje u granicama propisane normom EN 50160. Može se primijetiti da na sabirnici „10 kV TS VIS“ gotovo pa i nema promjene u vrijednosti napona, a to se događa zbog toga što se ta sabirnica nalazi na naponu gotovo pa 10 puta većem od napona na ostalim sabirnicama.

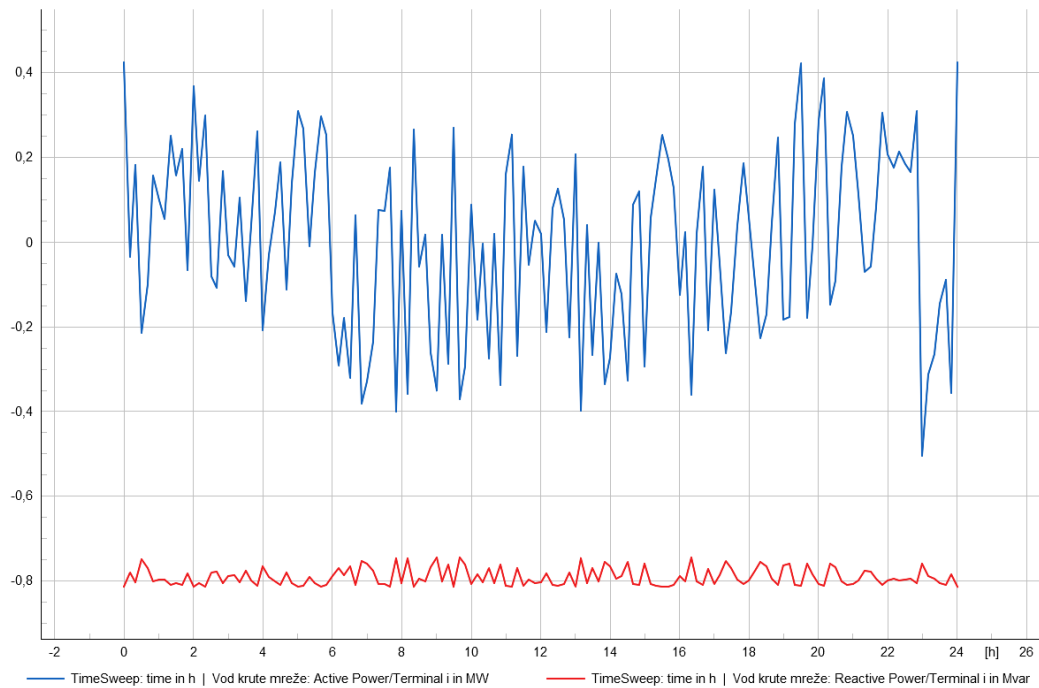


Slika 3.33. . Naponi na sabirnicama nakon integriranja 37 generatora na „Lokaciju 2“ u mreži.

Slika 3.33. prikazuje napone na pojedinim sabirnicama nakon integriranja 37 generatora na „Lokaciju 2“ u mreži. Može se primijetiti da u ovome slučaju dolazi do najvećih oscilacija napona na sabirnici „Porat-Polje-Biševo-Stupišće“. No, oscilacije napona su idalje u granicama dopuštenih vrijednosti prema normi EN 50160. Može se primijetiti da na pola promatranog intervala dolazi do blagog povećanja napona na sabirnici „SE VIS“. Razlog tome je utjecaj FN elektrane na napone tj. dolazi do povećavanja napona na toj sabirnici jer je tada najveća vrijednost Sunčeva zračenja u danu.

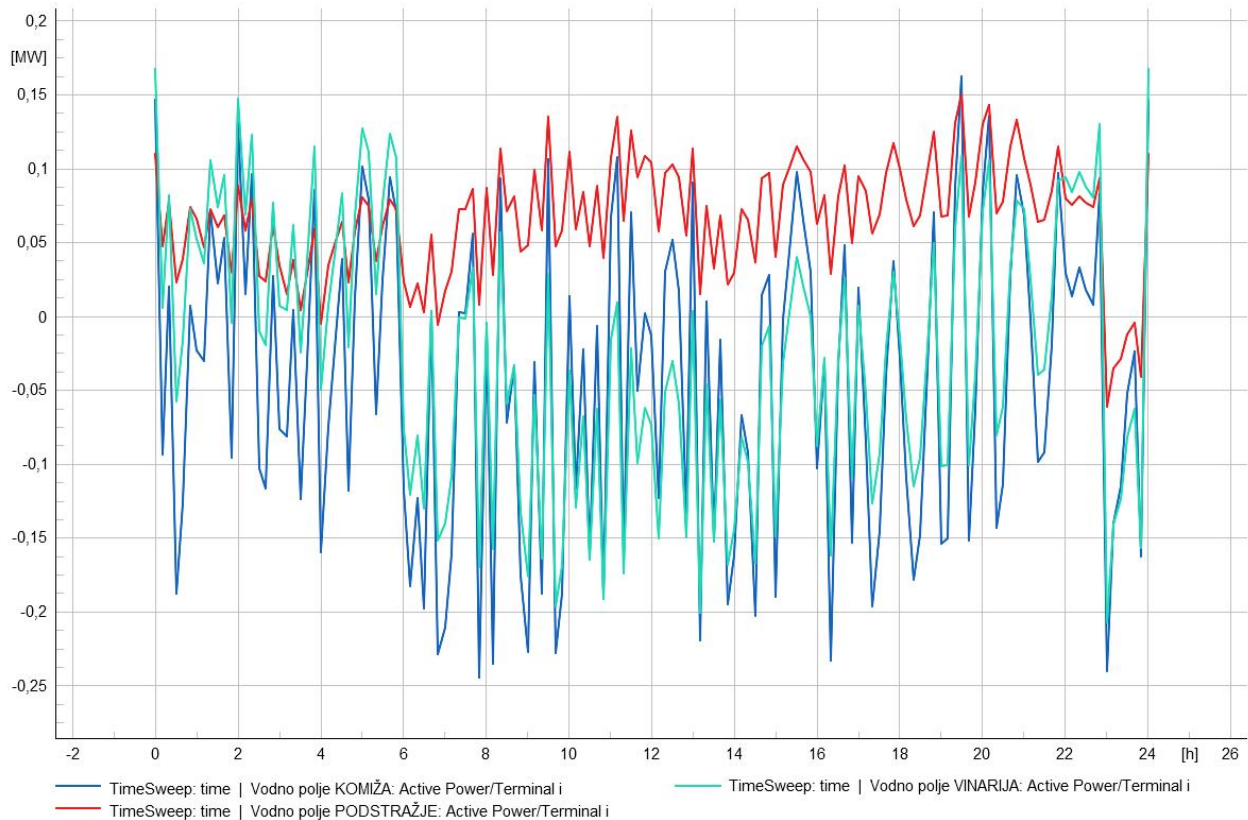


Slika 3.34. Radna i jalova snaga na vodu krute mreže nakon integriranja 37 generatora na morske valove na „Lokaciji 1“.

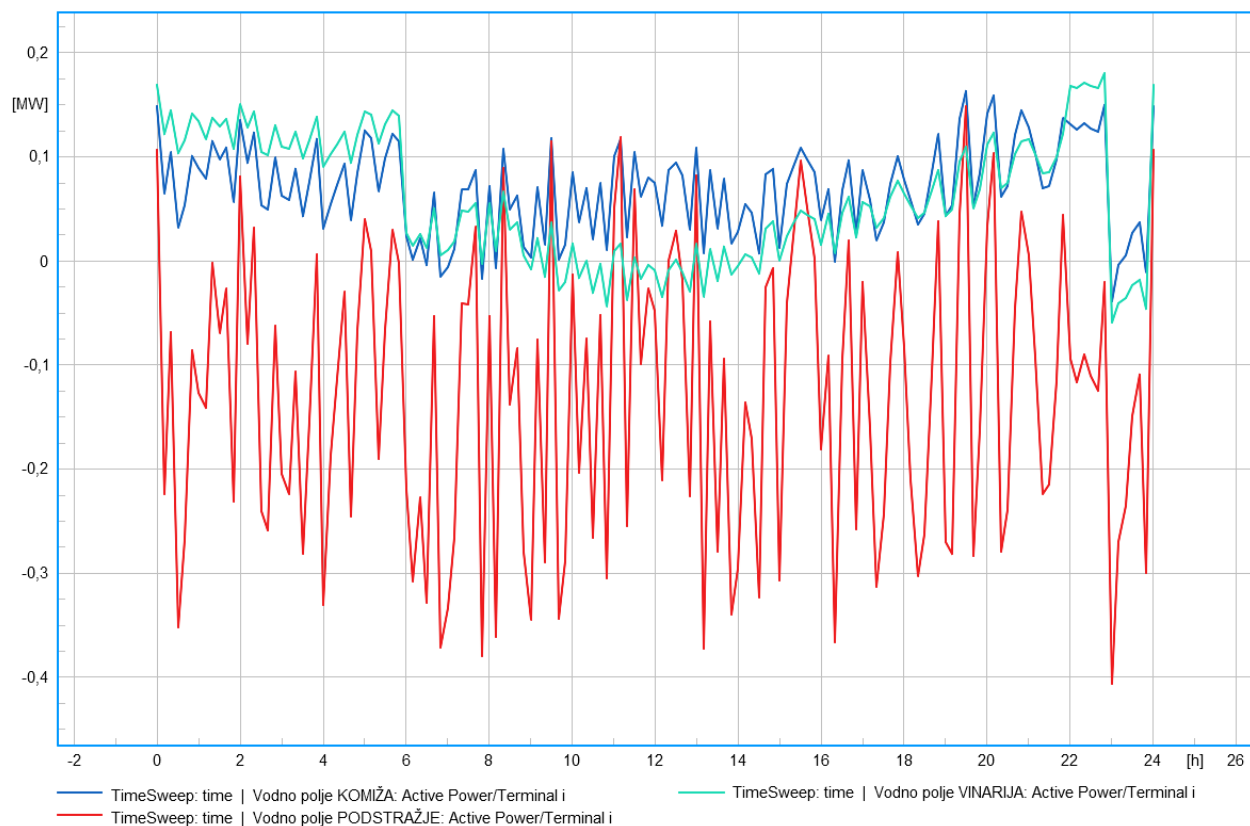


Slika 3.34. Radna i jalova snaga na vodu krute mreže nakon integriranja 37 generatora na morske valove na „Lokaciji 2“.

Usporedbom krivulja radne i jalove snage na vodu krute mreže na Slici 3.33. i Slici 3.34. može se zaključiti kako nema značajnijih promjena prilikom promjene lokacije postrojenja na morske valove. Međutim, u drugom slučaju tj. kada je postrojenje spojeno na Lokaciju 2, mogu se zapaziti blage promjene jalove snage na vodu krute mreže. Mogući uzrok ove pojave je to što je Lokacija 2 električki bliža vodu krute mreže, stoga će se utjecaj postrojenja manifestirati kroz promjenu napona na sabirnicama koje su bliže postrojenju kao i kroz promjenu jalove snage.



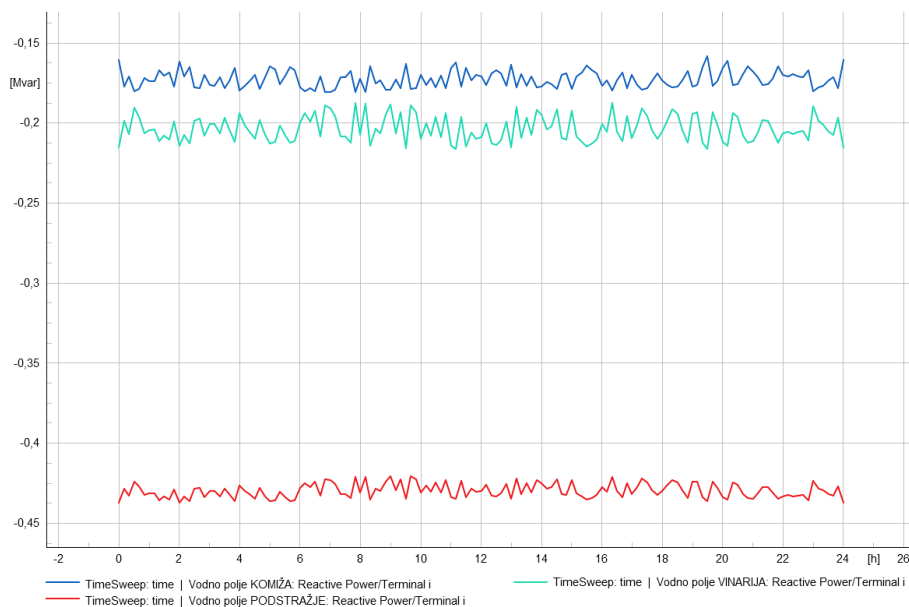
Slika 3.36. Radne snage na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 37 generatora na morske valove na „Lokaciji 1“ u mreži.



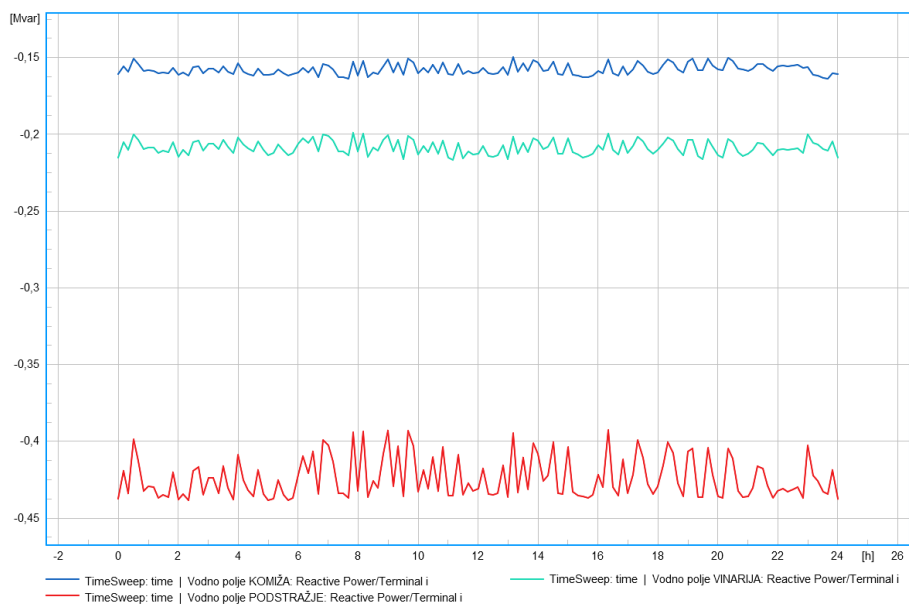
Slika 3.37. Radne snage na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 37 generatora na morske valove na „Lokaciji 2“ u mreži.

Prema prikazu krivulja na Slici 3.36. može se doći do zaključka kako je najveća oscilacija radne snage na vodnom polju „Komiza“ gdje su vrijednosti radne snage gotovo pa cijeli promatrani interval negativne, što znači da energija putuje od potrošača prema krutoj mreži. Slična situacija se odvija i na vodnom polju „Vinarija“. Najmanje oscilacije radne snage se događaju na vodnom polju „Podstražje“ na kojem gotovo pa cijeli promatrani interval radna snaga poprima pozitivan predznak što znači da energija ide većinu vremena u smjeru od krute mreže do potrošača. Također, najmanje oscilacije na radnu snagu vodnog polja „Podstražje“ događaju se jer je postrojenje integrirano električki poprilično daleko od tog vodnog polja.

Za razliku od krivulja na Slici 3.36, krivulje na Slici 3.37. značajno se razlikuju. Kada je postrojenje integrirano na Lokaciji 2 u mreži, radna snaga na vodnom polju „Podstražje“ gotovo pa cijeli interval ima negativan predznak što znači da energija ima suprotan smjer od referentnog. Na vodnim poljima „Komiza“ i „Vinarija“ nema značajnijih promjena u radnim snagama, osim što je utjecaj FN elektrane uočljiviji na vodnom polju „Vinarija“ na kojem radna snaga poprima blago negativan predznak.



Slika 3.38. Jalove snage na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 37 generatora na morske valove na „Lokaciji 1“ u mreži.



Slika 3.39. Jalove snage na pojedinim vodnim poljima nakon integriranja 37 generatora na morske valove na „Lokaciji 2“ u mreži.

Usporedbom prikaza krivulja sa Slike 3.38. i Slike 3.39. može se doći do zaključka kako nema značajnijih promjena kod promjene lokacije postrojenja na morske valove na jalove snage vodnih polja.

3.2.3. Mikromreža otoka Visa s integriranim postrojenjem na morske valove, FN elektranom i baterijskim spremnikom za dvije odabrane lokacije u mreži

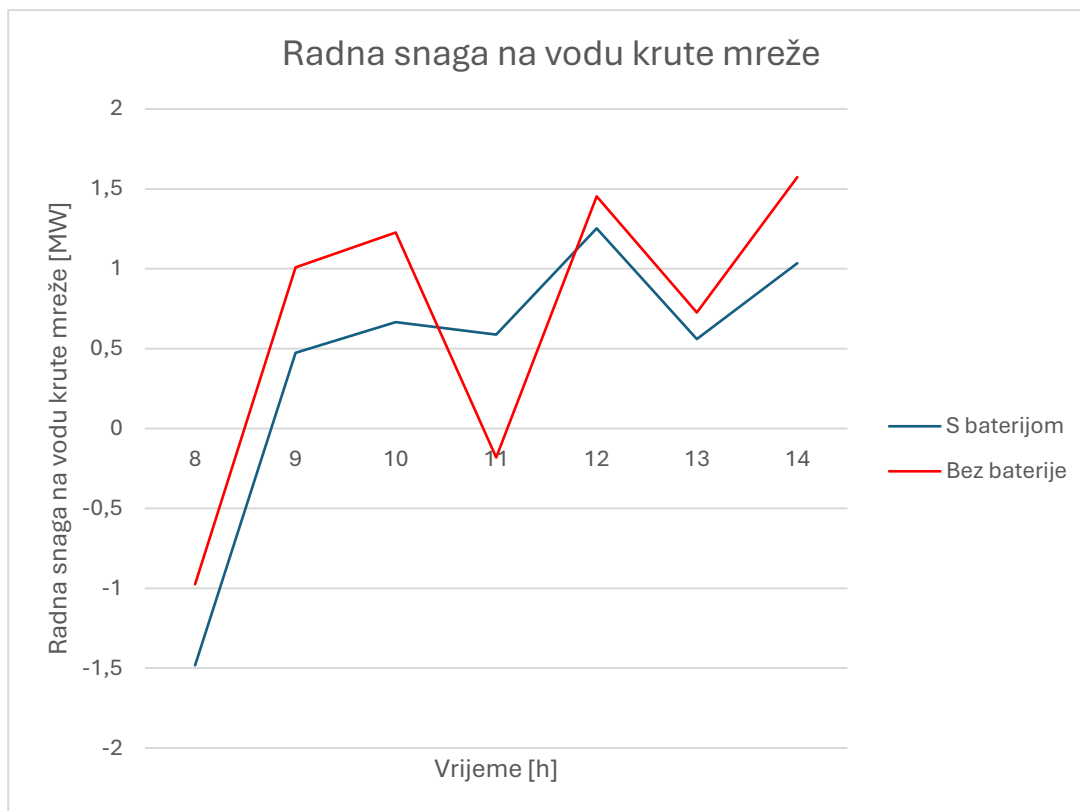
Baterijski spremnici energije koriste se u razne svhe kao što je: izravnjanje vršnog opterećenja, spremanje energije za slučaj nestanka energije i dr. U simulacijama koje slijede promatrat će se nekoliko slučajeva:

- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 1 u slučaju maksimalnog ljetnog opterećenja
- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 2 u slučaju maksimalnog ljetnog opterećenja
- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 1 u slučaju minimalnog zimskog opterećenja
- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 2 u slučaju minimalnog zimskog opterećenja

U svakom od spomenutih slučajeva, baterijski spremnik energije se modelirao modelom „battery storage“ unutar DIgSILENT PowerFactory programa. Prema Prpiću [27], postrojenje na morske valove i baterijski spremnik spojeni su na zasebnu sabirnicu udaljenu 1 metar od sabirnice „Komiža2-Komiža5-Barjaci“. Sabirnice su međusobno povezane vodom „WEC+baterija“ koji ima duljinu 1 metar i nema impedanciju. Taj vod je spojen upravo iz razloga da bi baterijski spremnik funkcionirao na ispravan način tj. da bi se mogla dobiti njegova karakteristika. U slučaju maksimalnog ljetnog opterećenja, kao i u slučaju minimalnog zimskog opterećenja, karakteristika baterijskog spremnika se dobila na način da se izračunala srednja vrijednost snage na vodu dok su se trenutne vrijednosti snage koje su se prenosile tim vodom uspoređivale sa srednjom vrijednosti snage. Ako je razlika trenutne i srednje vrijednosti snage na vodu pozitivna, baterija se puni. No, ako je razlika negativna, baterija se prazni. Zbog ograničenja programa DIgSILENT simulacije su se odvijale samo za određen broj sati u danu. [26] U svim slučajevima, promatrat će se krivulje radne snage na vodu krute mreže. Dublje proučavanje i promatranje baterijskih spremnika neće biti razmatrano u ovome radu.

- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 1 u slučaju maksimalnog ljetnog opterećenja

U ovome slučaju promatrat će se scenarij u kojemu je integrirano postrojenje na morske valove koje se sastoji od 355 generatora, odnosno slučaj u kojem je ukupni konzum energije pokriven energijom iz obnovljivih izvora. Vrijeme promatranja u ovome scenariju je između 8 i 14 sati.

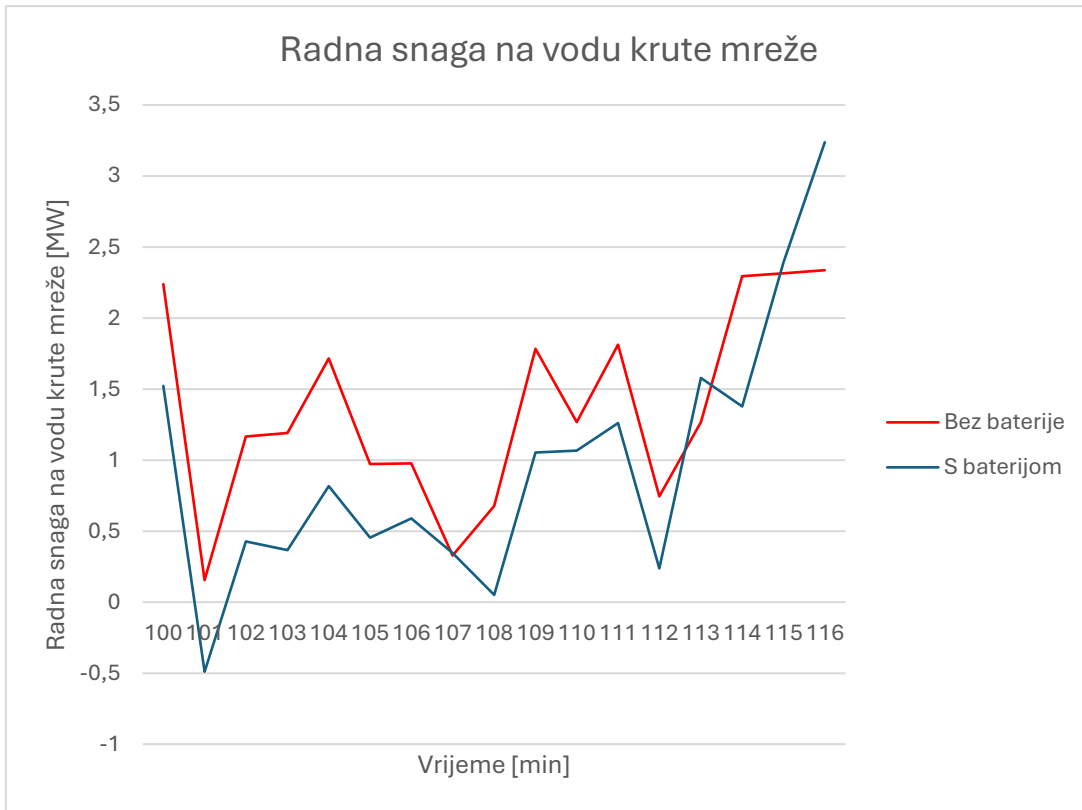


Slika 3.40. Radna snaga na vodu krute mreže (s i bez priključenog baterijskog spremnika energije).

Slika 3.40. prikazuje krivulje radne snage na vodu krute mreže s priključenim baterijskih spremnikom i bez priključenog baterijskog spremnika. Može se primijetiti kako korištenjem baterijskog spremnika energije, radna snaga na vodu krute mreže poprima manje vrijednosti. Također, mogu se primijetiti i manje oscilacije maksimalne i minimalne vrijednosti radne snage.

- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 2 u slučaju maksimalnog ljetnog opterećenja

U ovome slučaju promatrat će se scenarij u kojemu je integrirano postrojenje na morske valove koje se sastoji od 225 generatora tj., promatrat će se scenarij u kojem su se integrirali generatori do granice isplativosti. Vrijeme promatranja u ovome scenariju je između 16 i 20 sati uz napomenu da je simulacija rađena s vremenskim korakom od 10 minuta, dakle u svakom satu ima 6 uzoraka.

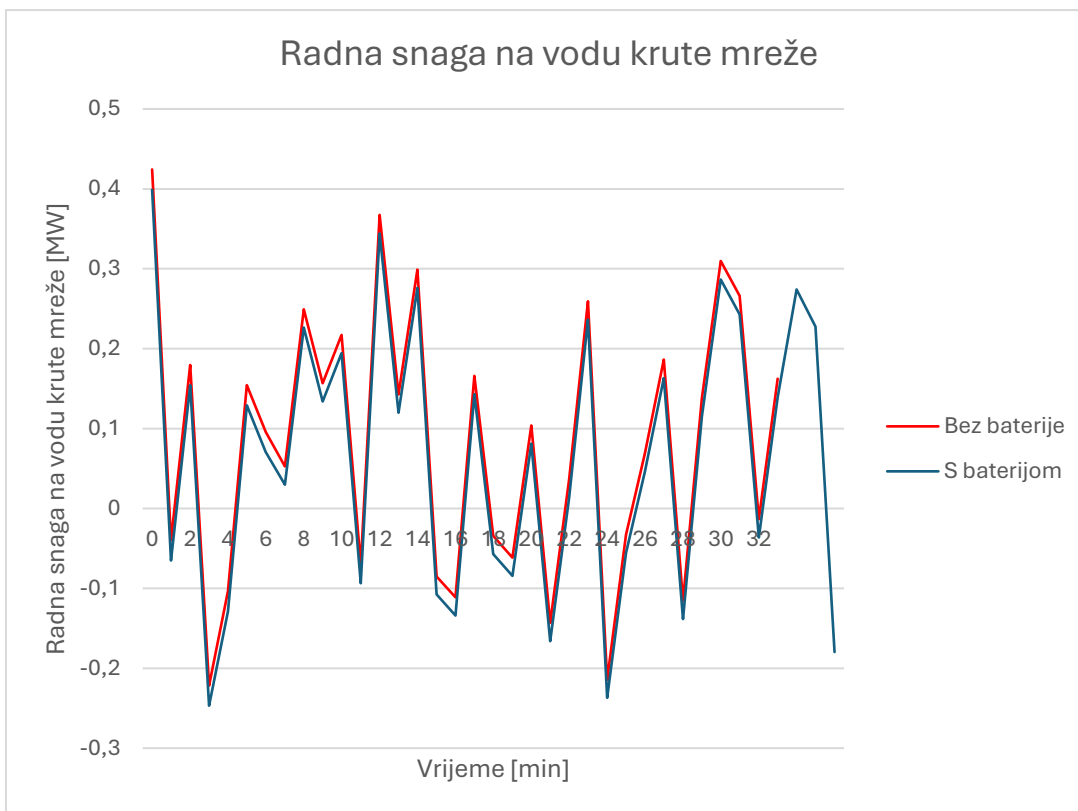


Slika 3.41. Radna snaga na vodu krute mreže (s i bez priključenog baterijskog spremnika energije).

Slika 3.41. prikazuje krivulje radne snage na vodu krute mreže s priključenim baterijskih spremnikom i bez priključenog baterijskog spremnika. Kao i u prethodnom slučaju, s priključenom baterijom, radna snaga na vodu krute mreže poprima manje vrijednosti i na takav se način reducira vršno opterećenje u danim trenucima.

- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 1 u slučaju minimalnog zimskog opterećenja

U ovome slučaju promatrat će se scenarij u kojemu je integrirano postrojenje na morske valove koje se sastoji od 37 generatora, dakle slučaj u kojemu je ukupna potražnja za električnom energijom pokrivena iz obnovljivih izvora energije. Vrijeme promatranja u ovome scenariju je između 0 i 5:30 sati. Vremenski korak uzorkovanja podataka je svakih 10 minuta, dakle u jednom punom satu ima 6 uzoraka.

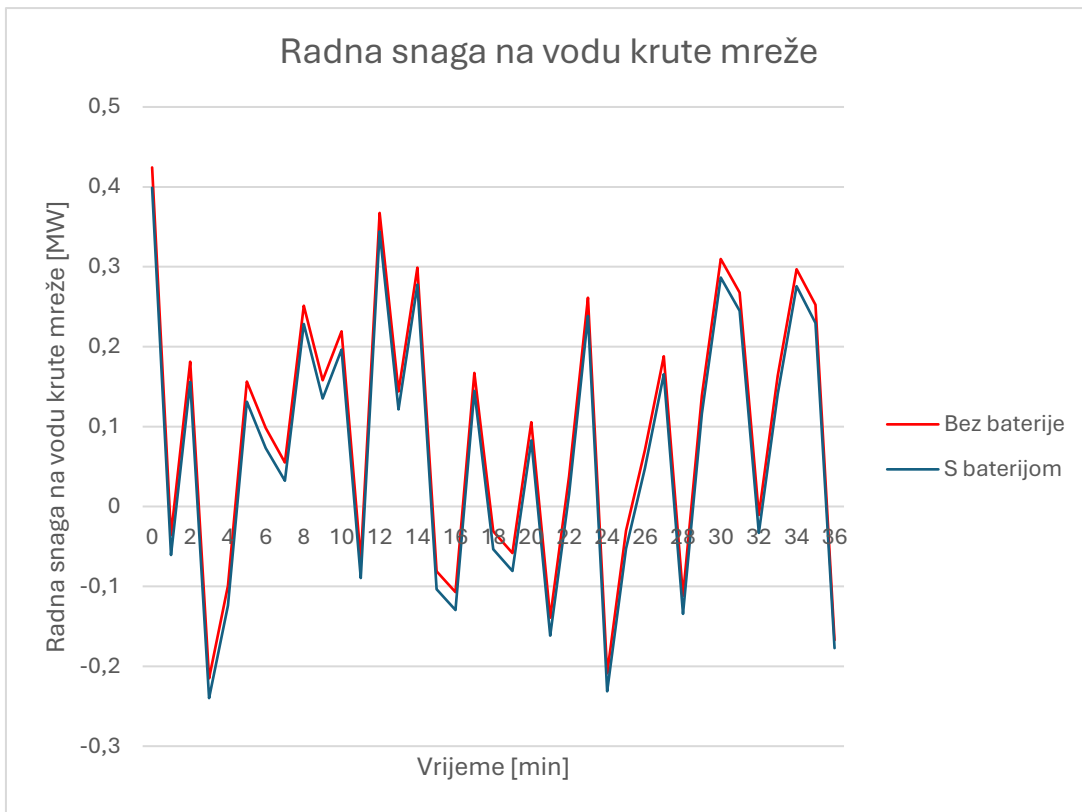


Slika 3.42. Radna snaga na vodu krute mreže (s i bez priključenog baterijskog spremnika energije).

Kao i u ranijim slučajevima, na Slici 3.42. prikazane su krivulje radne snage na vodu krute mreže s i bez spojenog baterijskog spremnika energije. U slučaju kada je spojen baterijski spremnik energije, radna snaga na vodu krute mreže je reducirana.

- Korištenje baterijskog spremnika na Lokaciji 2 u slučaju minimalnog zimskog opterećenja

U ovome slučaju promatrat će se scenarij u kojemu je integrirano postrojenje na morske valove koje se sastoji od 37 generatora, dakle slučaj u kojemu je ukupna potražnja za električnom energijom pokrivena iz obnovljivih izvora energije. Vrijeme promatranja u ovome scenariju je između 0 i 5:30 sati. Vremenski korak uzorkovanja podataka je svakih 10 minuta, dakle u jednom punom satu ima 6 uzoraka.



Slika 3.43. Radna snaga na vodu krute mreže (s i bez priključenog baterijskog spremnika energije).

Kao i u ranijim slučajevima, na Slici 3.43. prikazane su krivulje radne snage na vodu krute mreže s i bez spojenog baterijskog spremnika energije. U slučaju kada je spojen baterijski spremnik energije, radna snaga na vodu krute mreže je reducirana što znači da se na talav način rasterećuje vod krute mreže.

4. ZAKLJUČAK

Ovim je radom napravljen teorijski pregled i uvod u energiju morskih valova. Napravljen je osnovni pregled tehnologija i klasifikacija postrojenja na morske valove. Također, opisan je utjecaj postrojenja na morske valove na napon u mreži, promjene koje nastupaju integriranjem takvih postrojenja u mreži, zahtjevi za kvalitetu električne energije itd.

Također, kao glavni dio ovoga rada, predstavljeno je modeliranje linearnog generatora na morske valove. Kako bi se napravile što kvalitetnije simulacije, potrebno je uzeti što preciznije parametre kao što su period i amplituda valova koji se pojavljuju na nekom području, u ovome slučaju oko otoka Visa. Ti parametri izravno utječu na izlaznu snagu generatora. Što je veća amplituda i period nadolazećeg vala, to će i izlazna snaga svakog generatora biti veća. Pokazano je da je izlazna snaga generatora veća zimi nego ljeti zbog toga što je tada i more uzburkanije i vrijeme je tipično vjetrovitije. Naravno, pretpostavljeno je da su amplitude i periodi valova tijekom cijeloga dana jednaki.

Premda je mreža stabilna bez priključenih distribuiranih izvora, u simulacijskom dijelu rada može se zaključiti da distribuirani izvori povoljno utječu na rad mreže. Pogotovo, ako se tu uključe i baterijski spremnici energije. Opterećenja su veća tijekom ljetnog perioda zbog turističke sezone. U tom je slučaju pokazano da nije moguće integrirati postrojenje na morske valove na Lokaciju 2 u mreži, a da pri tome se mreža ne pojačava kupnjom dodatnih transformatora i vodova što će uzrokovati dodatne troškove. Simulacijama je prikazano da je moguće pokriti ukupnu potrošnju proizvodnjom iz distribuiranih izvora energije za zimski dan. To je moguće zbog toga što su zimi manja opterećenja u mreži, stoga treba integrirati i manje generatora na morske valove. Uz to, karakteristika FN elektrane se bitno razlikuje po zimi nego po ljeti. U ljetnom periodu, izlazna snaga FN elektrane je viša nego po zimi. Integriranje obnovljivih izvora energije pogoduje električkoj mreži tako što se smanjuje potreba za uvozom energije iz mreže. Postrojenje je moguće integrirati na više lokacija u mreži. Simulacijama je prikazano da mjesto priključka postrojenja na morske valove uvelike utječe na potreban broj generatora od kojih se postrojenje sastoji, pogotovo u ljetnom periodu. Osim toga, mjesto priključka postrojenja uvelike utječe i na vrijednosti napona na sabirnicama. Što je postrojenje električki bliže integrirano promatranoj sabirnici, to je veći utjecaj na naponske prilike na toj sabirnici.

U zadnjem dijelu simulacijskog dijela rada, simuliran je slučaj s priključenim baterijskim spremnikom energije. Simulacijama je prikazano da baterijski spremnici vrlo povoljno utječu na radnu snagu koja

se prenosi vodom krute mreže. Baterijski spremnici doprinose smanjivanju oscilacija snage koja se prenosi što povoljno utječe na gubitke u mreži kao i na električka i toplinska naprežanja vodova i transformatora u mreži.

Sve u svemu, velika prednost proizvodnje električne energije iz postrojenja na morske valove otvara mnoga vrata istraživačima i potpuno je ekološki prihvatljiva. Također, doprinosi otvaranju novih radnih mjesta u svijetu energetike jer je ovo područje još prilično neistraženo, a k tome pridonosi razvoju društvenog komfora, osviještenosti i ekologiji.

LITERATURA

- [1] Wave Power, Why Wave Power?, Technology and Environment, Dostupno na: <https://25waves.weebly.com/why-wave-power.html> [21.3.2024.]
- [2] Europski parlament, Kako EU potiče korištenje energije iz obnovljivih izvora, Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hr/article/20221128STO58001/kako-eu-potice-koristenje-energije-iz-obnovljivih-izvora> [21.3.2024]
- [3] D. Šljivac, I. Temiz, B. Nakomčić-Smaragdakis and M. Žnidarec, *Integration of Wave Power Farms into Power Systems of the Adriatic Islands: Technical Possibilities and Cross-Cutting Aspects*, 2020, pp. 3 of 26., dostupno na: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/1/13> [21.3.2024]
- [4] D. Qiao , R. Haider, J. Yan , D. Ning and B. Li; *Review of Wave Energy Converter and Design of Mooring System* pp. 1-8 . dostupno na: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/8251> [21.3.2024.]
- [5] T. Potapenko, Wave Energy Converter, hydrodynamics and control, Uppsala Universitet, 2021., dostupno na: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1569774/FULLTEXT01.pdf [21.3.2024.]
- [6] J. P. Kofoed, Working principle of Wave Dragon energy converter, Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-the-Wave-Dragon-wave-energy-converter_fig6_274444733 [4.4.2024.]
- [7] A. Pecher and J.P. Kofoed, *Handbook of Ocean Wave Energy*, Volume 7, Springer Open, pp. 44-43. [27.3.2024.]

- [8] Lanzasurf News. (2023, Jan. 31). Dostupno na: <https://lanzasurf.com/what-is-a-swell/> [21.3.2024.]
- [9] N. J.Madaserry, „ Design and Layout of Power Conversion Chain for a Wave Energy Converter“ , Degree Project, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Stockholm, Sweden 2017., dostupno na: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1076681/FULLTEXT01.pdf [21.3.2024.]
- [10] J. R. Joubert, J. L. van Niekerk, J.Reinecke and I. Meyer, Wave energy Converters (WECs), Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, pp. 6., October 2013., dostupno na : chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.crses.sun.ac.za/files/technologies/ocean/WECs_2013_list.pdf [21.3.2024.]
- [11] J.A.Hitz, State of the Planet, Limpet: Land Installed Marine Powered Energy Transformer, dostupno na: <https://news.climate.columbia.edu/2010/05/19/limpet-land-installed-marine-powered-energy-transformer/> [4.4.2024.]
- [12] N. Owano, Oceanlix celebrates wave power unit launch in Australia,2013, dostupno na: <https://phys.org/news/2013-11-oceanlinx-celebrates-wave-power-australia.html> [4.4.2024.]
- [13] WavePlane Production, Dostupno na: <https://www.waveplane.com/> [4.4.2024.]
- [14] The European Marine Energy Centre LTD, Pelamis Wave Power, dostupno na: <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/> [4.4.2024.]

- [15] R. Gobato, A. Gobato, D. F. Gobato Fedrigo, Study Pelamis system to capture energy of ocean wave, pp. 5., August 6, 2015, dostupno na : [https://www.researchgate.net/publication/280773107_Study_Pelamis_system_to_capture_energ_y_of_ocean_wave](https://www.researchgate.net/publication/280773107_Study_Pelamis_system_to_capture_energy_of_ocean_wave) [4.4.2024]
- [16] B. Guo, T. Wang, S. Jin, S. Duan, K, Yang, Y. Zhao, A Rewiev of Point Absorber Convertors,Kina 2022. dostupno na: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/10/1534> [4.4.2024.]
- [17] Uppsala Universitet, Department of Electrical Engineering, Dostupno na: <https://www.elektroteknik.uu.se/research/electricity/research-areas/wave-power/wave-power-concept> [4.4.2024.]
- [18] L. Blain, New Atlas, Wave Amplifying Generator bounces twice as high as the swells, dostupno na: <https://newatlas.com/energy/corpower-wavespring/> [4.4.2024.]
- [19] Alternative Energy Tutorials, Wave Energy Devices, Devices that Harness the Energy of the Waves, dostupno na: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html> [4.4.2024.]
- [20] D. Pelosi, Schematic wiew of oscillating wave surge converter, dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-an-oscillating-wave-surge-converter_fig1_357205476 [4.4.2024.]
- [21] A. Tetu, *Handbook of Ocean Wave Energy, Power Take-Off Systems for WECs*, Chapter 8, pp. 206 – 214, Jaunary 2017, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/312081886_Power_Take-Off_Systems_for_WECs [10.4.2024.]

- [22] M. H. J. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Wiley-IEEE Press, pp. , 2011 dostupno na: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.iqytechnicalcollege.com/BAE%20664-Distributed%20Generation%20in%20Power%20System.pdf> [10.4.2024.]
- [23] Predavanja Prof.dr.sc. Damir Šljivac – kolegij :Integracija distribuirane proizvodnje u EES, FERIT Osijek [10.4.2024.]
- [24] Power Quality Application Guide, Voltage Disturbances, Standard EN 50160, H. Markiewicz, A. Klajn, Sveučilište u Wrocławu, Srpanj 2004. godina, dostupno na linku: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.evm.ua/image/catalog/uslugi/standard-en-50160.pdf?srsltid=AfmBOoooRQmOo0bg0Vaxj85_Eza-jVdzyerHMm-ACMldRfVe6eJxw8u7 [11.4.2024]
- [25] Doktorska disertacija, K. Thorburn i M. Leijon, Ideal analytical expression for linear generator flux at no load voltage, Swedish for Renewable Electric Energy Conversion, Division for Electricity and Lighting Research, Department of Engineering Science, Uppsala University. dostupno na linku: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A168640&dswid=2297> [29.6.2024.]
- [26] Službene stranice Državnog hidrometeorološkog zavoda, dostupno na linku: https://meteo.hr/prognoze.php?section=prognoze_model¶m=prog_nauticari&el=val_w. [29.6.2024.]
- [27] Integracija postrojenja na morske valove na Jadranskim otocima u okviru WECANet projekta, Luka Prpić, Diplomski rad, 2021., dostupno na linku: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:3275> [29.6.2024.]

- [28] Matej Žnidarec, Damir Šljivac, Dario Došen, Branka Nakomčić: Performance evaluation of simple PV microgrid energy management system (3. poglavlje), dostupno na linku: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/695840> [1.9.2024.]
- [29] Anne Blavette, Grid integration of wave energy & generic modelling of ocean devices for power system studies, PhD Thesis, University College Cork, 2013., dostupno na linku: <https://hdl.handle.net/10468/1129> [16.9.2024.]

SAŽETAK

Temeljni zadatak i cilj ovoga diplomskoga rada bio je modelirati linearni generator na morske valove od kojih će se sastojati postrojenje na morske valove.

U drugome poglavlju ovoga rada promatrani su teorijski aspekti energije valova kao i osnovni tipovi i klasifikacija postrojenja na morske valove. Osim toga, promatrani su teorijski aspekti postrojenja na morske valove u smislu utjecaja na elektroenergetski sustav tj. na njegovu stabilnost, kvalitetu električne energije, utjecaje na promjene tokova snaga i ostale.

Treće poglavlje ovoga rada posvećeno je modeliranju linearnog generatora s permanentnim magnetima na morske valove. Prikazane su krivulje napona, struje i snage generatora u različitim vremenskim intervalima i s različitim koracima uzorkovanja. U svrhu prikazivanja spomenutih krivulja korišten je alat MATLAB dok je u svrhu modeliranja mikromreže otoka Visa i provođenja simulacija korišten program DIgSILENT PowerFactory.

Četvrto poglavlje donosi rezime cijeloga rada; teorijskog i praktičnog (simulacijskog dijela). Posebno se osvrće na rezultate dobivenih iz simulacija. Rezultati pokazuju da je ovakav model generatora od kojih će se sastojati postrojenje na morske valove moguće integrirati u mikromrežu otoka Visa, s ili bez dodatnih ulaganja u pojačavanje mreže.

Ključne riječi: energija morskih valova, postrojenja na morske valove, linearni generator s permanentnim magnetima, mikromreža otoka Visa, ljetni i zimski dan

ABSTRACT

The basic task and goal of this thesis was to model a linear generator for sea waves, which will consist of a sea wave plant.

In the second chapter of this work, the theoretical aspects of energy waves as well as the basic types and classification of sea wave installations were observed. In addition, theoretical aspects of sea wave plants were observed in terms of impact on the power system, i.e. on its stability, quality of electricity, effects on changes in power flows and others.

The third chapter of this work is dedicated to the modeling of a linear generator with permanent magnets on sea waves. The voltage, current and power curves of the generator are shown in different time intervals and with different sampling steps. For the purpose of displaying the mentioned curves, the MATLAB tool was used, while the DIGSILENT PowerFactory program was used for the purpose of modeling the microgrid of the island of Visa and conducting the simulation.

The fourth chapter brings the regime of the entire work; theoretical and practical (simulation part). Special attention is paid to the results obtained from the simulation. The results show that this type of generator model, which will consist of generators built on sea waves, can be integrated into the microgrid of the island of Vis, with or without additional investments in strengthening the network.

Keywords: wave energy, sea wave plants, linear generator with permanent magnets, Vis island microgrid, summer and winter day

PRIZNANJA

Ovim putem bih se želio zahvaliti svojoj mentorici, profesorici Irini Temiz iz Ångströmlaboratoriet-a Sveučilišta u Uppsali na vrlo predanoj i toploj suradnji tijekom mog višemjesečnog boravka u Švedskoj. Iskustvo koje sam dobio neupitno je proširilo moje vidike kako u profesionalnom, tako i u privatnom životu.

Zahvaljujem se profesoru Damiru Šljivcu za suradnju tijekom mog fakultetskom obrazovanja i suradnji na mome završnom kao i na diplomskom radu. Vaša podrška i angažiranost za mene je neprocjenjiva.

Zahvaljujem se sumentoru, profesoru Predragu Mariću na pomoći oko DIgSILENT-a i modeliranja, kao i profesoru Mateju Žnidarecu i asistentu Zvonimiru Šimiću na predivnoj suradnji.

Moj boravak u Uppsali u Švedskoj bio je kao kruna moga (fakultetskog) obrazovanja i suradnje s profesoricom Irinom Temiz iz koje je proizašao ovaj rad koji je dovršen i obranjen u Osijeku.

Zahvaljujem se svim studentima Odjela za električnu energiju iz Uppsale, a posebno Marini Mattos, Martini Tibaldi, Rini Yamazaki, Bruni Nicolausu, Victoru Aitmanu, Andreasu Ridderu, Kristini Bergstrom i mnogim drugim. Čast mi je što sam se družio s ljudima iz svih dijelova svijeta i stekao brojna poznanstva.

Zahvaljujem se kolegama s FERIT-a na nezaboravnim trenucima koje ću pamti cijeli život.

Zahvaljujem se svojim pravim prijateljima koji su uvijek bili tu da me ohrabre i duhovno podignu za nove izazove u životu.

Najviše od svega se zahvaljujem svojoj obitelji. Njihova neupitna podrška je to što mi je davalo snage da nakon padova ponovno ustanem i krenem dalje. Bez njih, moja priča bi bila drugačija!

Ovaj rad u potpunosti posvećujem svome voljenom ocu Mariju, majci Ivani i sestri Eni. Također, ovaj rad posvećujem svojim dragim djedovima i bakama koji više nisu s nama fizički, ali su duhovno vrlo prisutni u svakom aspektu moga života.

ŽIVOTOPIS

Rene Glogoški rođen je 18.9.2000. godine u Osijeku. Pohađao je Osnovnu školu Antunovac, a nakon nje upisuje srednju Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer Elektrotehničar, u kojoj biva odličan učenik. Godine 2018. odrađuje stručnu praksu u okviru Erasmus+ mobilnosti u gradu Torquay u Ujedinjenom Kraljevstvu. Zbog odličnog uspjeha tijekom sve 4 godine, dobiva pravo na izravan upis na FERIT u Osijeku. Upisuje prijediplomski studij Elektrotehnika, a zatim se odlučuje na smjer Elektroenergetika. Godine 2022. odlučuje se za diplomski studij Elektrotehnika, izborni blok Održiva elektroenergetika. Diplomski rad piše u suradnji s profesoricom Irinom Temiz sa Sveučilišta u Uppsali u Švedskoj. Rad je dovršen i obranjen na osječkom FERIT-u kod mentora, profesora Damira Šljivca. Student posjeduje vozačku dozvolu B kategorije.