Utjecaj postrojenja na morske valove na elektroenergetsku mrežu

Mišković, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:096131

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

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

Sveučilišni studij

UTJECAJ POSTROJENJA NA MORSKE VALOVE NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

Diplomski rad

Mario Mišković

Osijek, 2020

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 13.10.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Ime i prezime studenta:	Mario Mišković
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1189, 29.09.2020.
OIB studenta:	22646745739
Mentor:	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
Sumentor:	Matej Žnidarec
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof. dr. sc. Denis Pelin
Član Povjerenstva 1:	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
Član Povjerenstva 2:	Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Naslov diplomskog rada:	Utjecaj postrojenja na morske valove na elektroenergetsku mrežu
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	Opisati utjecaj postrojenja na morske valove na elektroenergetske prilike u mreži uključujući i kvalitetu električne energije. U praktičnom dijelu rada u programskom paketu DigSilent napraviti procjenu utjecaja postrojenja na morske valove na strujno-naponske prilike i kvalitetu električne energije na mjestu priključka i predložiti mjere za povećanje razine integracije uključujući i rad u mikromreži. Sumentor: Izv. prof.dr.sc. Zvonimir Klaić
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Dovoljan (2)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 1 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 1 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	13.10.2020.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

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

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 26.10.2020.

Ime i prezime studenta:	Mario Mišković
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1189, 29.09.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Utjecaj postrojenja na morske valove na elektroenergetsku mrežu**

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

i sumentora Matej Žnidarec

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

Potpis studenta:

SADRŽAJ:

1. UVOD 1
1.1. Diplomski zadatak 1
2. ENERGIJA VALOVA I TEHNOLOGIJE ZA NJENO ISKORIŠTENJE 2
2.1. Energija valova 2
2.2. Nepravilni valovi 3
2.3. Pretvarači energije valova 6
3. POSTROJENJE (ELEKTRANA) NA MORSKE VALOVE NA SVEUČILIŠTU UPPSALA 11
3.1. Priključak na mrežu postrojenja s mjernom stanicom 13
4. UTJECAJ NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU 17
4.1. Tokovi snaga 17
4.2. Naponske prilike 19
4.3. Strujne prilike 20
4.4. Gubitci 22
4.5. Kvaliteta električne energije 23
4.5.1. Odstupanje napona 24
4.5.2. Regulacija frekvencije 26
4.5.3. Flikeri 26
4.5.4. Harmonici 27
4.6. Zaštita 29
5. PRAKTIČNI DIO RADA 33
5.1. OpenDSS programski paket 33
5.2. IEEE niskonaponski testni izvod 34
5.3. Vremenska simulacija distribucijskog sustava s postrojenjem na morske valove, fotonaponskim sustavima i baterijskim sustavom pohrane energije 36
5.3.1. Prvi studijski slučaj -pasivna mreža 36
5.3.2. Drugi studijski slučaj- integracija postrojenja na morske valove 40
5.3.3. Treći studijski slučaj- integracija postrojenja na morske valove i fotonaponskih sustava 46
5.3.4. Četvrti studijski slučaj- integracija postrojenja na morske valove i fotonaponskih sustava te pohrane električne energije u bateriji 54
5.3.5. Usporedba rezultata 62
ZAKLJUČAK 69

LITERATURA 70
SAŽETAK 71
ABSTRACT 71
ŽIVOTOPIS 72

1. UVOD

Tema diplomskog rada je prikazati utjecaj postrojenja na morske valove na elektroenergetsku mrežu. Strukturno je rad sastavljen od pet poglavlja. U drugom poglavlju je opisana energija valova, potencijal energije valova u svijetu te zemlje s najvećim potencijalom za njihovo iskorištenje. Naposljetku su nabrojane u ukratko pojašnjene različite tehnologije za iskorištenje energije valova. U trećem poglavlju je dan opis postrojenja (elektrane) na morske valove na sveučilištu Uppsala, kako samog postrojenja tako i njenog priključka na elektroenergetsku mrežu. U četvrtom dijelu su razrađene sve relevantne električne veličine te utjecaj distribuiranih izvora na iste. Tako su obrađeni tokovi snaga, naponske i strujne prilike te gubitci u mreži. Posebno je pažnja posvećena i parametrima kvalitete električne enrgije koji se odnose na odstupanje napona, regulaciju frekvencije, flikere i harmonike. Na kraju poglavlja ali sigurno nikako manje važnim dijelom je opisana zaštita. U posljednjem petom poglavlju se radi o praktičnom dijelu rada. Tu je korišten modificirani IEEE niskonaponski izvod distribucijske mreže nad kojim su sprovedene 4 različite simulacije kako bi se vidjelo ponašanje elektroenergetskog sustava. U prvom slučaju je mreža pasivna, u drugom je na nju priključeno postrojenje na morske valove, u trećem su dodani još i fotonaponski sustavi da bi u finalnom četvrtom slučaju dodali još i pohranu električne energije. Na samom kraju poglavlja su analizirane naponske prilike pojedinih slučaja kako na početku tako i na kraju voda, tokovi radne i jalove snage te gubitci elektroenergetskog sustava.

1.1. Diplomski zadatak

Opisati utjecaj postrojenja na morske valove na elektroenergetske prilike u mreži uključujući i kvalitetu električne energije. U praktičnom dijelu rada u programskom paketu DigSilent napraviti procjenu utjecaja postrojenja na morske valove na strujno-naponske prilike i kvalitetu električne energije na mjestu priključka i predložiti mjere za povećanje razine integracije uključujući i rad u mikromreži.

2. ENERGIJA VALOVA I TEHNOLOGIJE ZA NJENO ISKORIŠTENJE

Potreba za energijom je u konstantnom porastu, a prema procjeni međunarodne agencije za energiju, do 2040.godine će potreba za energijom narasti za 25%. Energetski sektor intenzivira potragu za obnovljivim izvorima energije (OIE) kako bi zadovoljili svjetsku potražnju za energijom. Interes za proizvodnjom zelene i održive energije dodatno povećava efekt staklenika. Vjetroelektrane, fotonaponske elektrane i hidroelektrane su među najrazvijenijim tehnologijama koje bez zagađivanja okoliša proizvode električnu energiju. Tehnologije za iskorištavanje morskih valova se smatraju budućom karikom u proizvodnji čiste energije, koje su zadnjih godina dobile mnogo na pozornosti.

2.1. Energija valova

Zbog visoke energetske gustoće, veće nego kod drugih OIE kao što su energija vjetra i fotonapon, te zbog ograničenog utjecaja na okoliš, energija valova bi mogla imati ključnu ulogu u budućnosti energetskog sektora. U pogledu pretvorbe energije valova, snaga po jedinici duljine vala je definirana izrazom (2-1).

$$J = \frac{1}{64}\rho g^2 {H_s}^2 T_e \tag{2-1}$$

Gdje je:

ρ – gustoća vode

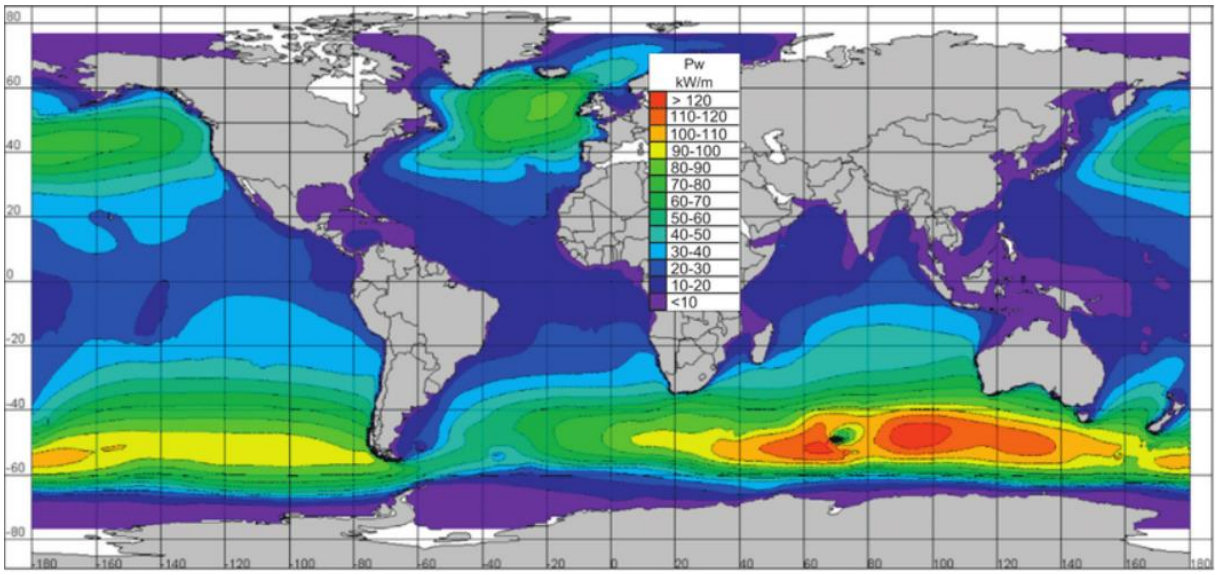
g – gravitacijsko ubrzanje

H_s – visina značajnog vala

T_e – period valne energije

Energija oceana je ne iskorišten održivi izvor energije koji je dostupan kako danju tako i noću. Studija iz 2010. godine procjenjuje da je ukupni svjetski teoretski potencijal energije oceana oko 29 500 TWh/god. Iako se mišljenja razlikuju o količini energije koju je tehnički moguće iskoristiti, prema različitim studijama taj broj varira između 10 i 20 posto ukupnog potencijala energije oceana. Kako bi se razvile tehnologije za iskorištavanje energije valova i odabrala pogode lokacije za njihovu izgradnju, neophodno je znati procijenjenu snagu mjesta. Brojne su studije koje sumiraju i procjenjuju trenutni svjetski scenarij snage valova. Slika 2.1. prikazuje podatke valnog modela koji koriste visoko preciznu satelitsku altimetriju s izmjerenim podacima s plutača za razdoblje od 10 godina. Zapadna obala Velike Britanije,

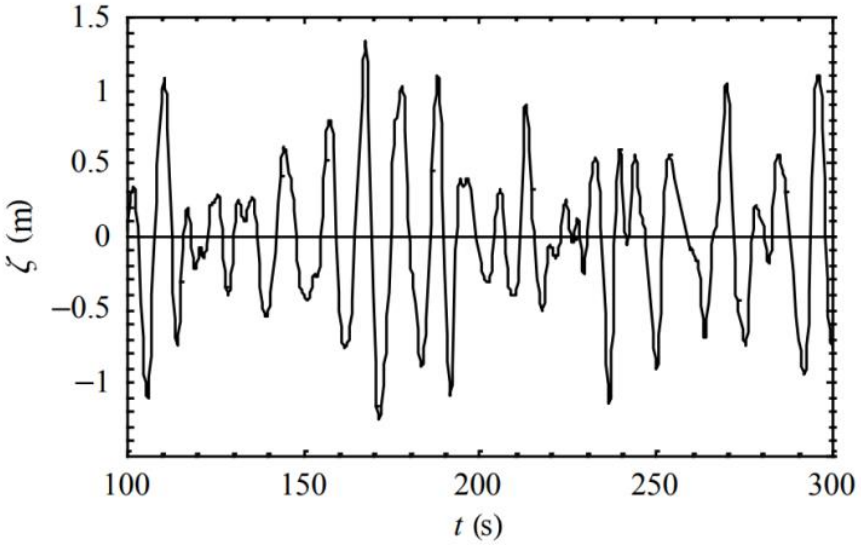
Grenland te Island imaju najveću godišnju valnu snagu. Ukupna snaga vala, europske obale varira od 120GW na obali Ujedinjenog Kraljevstva do 1 GW na Švedskoj obali [1].



Slika 2.1. *Globalna godišnja procjena srednje valne snage u kW / m u razdoblju od 10 godina. [1]*

2.2. Nepravilni valovi

Valovi koji su zaslužni za kretanje plutače kod postrojenja na morske valove su nepravilni valovi, te ćemo stoga samo njih razmatrati. Na slici 2.2. je prikazano tipično ponašanje površinske elevacije mora ζ kao funkcije vremena na nekoj lokaciji. Ti mjerni podaci se najčešće dobivaju pomoću mjernih plutača.



Slika 2.2. *Površinska elevacija mora ζ ka funkcija vremena na nekoj lokaciji*. [2]

Svrha ovakvog opisivanja morskih valova nije u tome da detaljno opiše zapažanja na nekom određenom dijelu morske površine kao na slici 2.2., nego je više usmjerena ka tome da opiše morsku površinu kao stohastički proces. Kada se uzme u obzir valni zapis kao na slici 2.2 sa vremenom trajanja *D*, taj se valni zapis može točno reproducirati kao suma velikoga (teorijski beskonačno) broja harmonijskih valnih komponenti (Fourierov red):

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

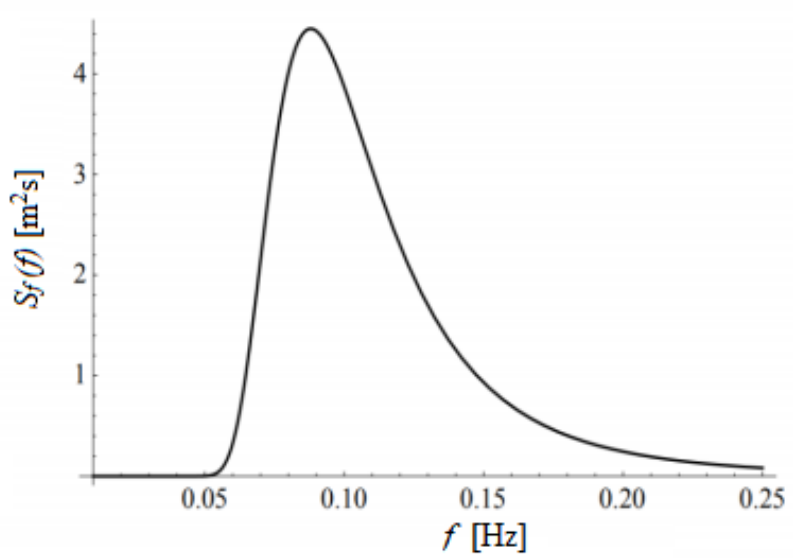
gdje su a_i i α_i amplituda i faza svake frekvencije $f_i=i/D$ (i=1,2,3,...;interval frekvencije je stoga $\Delta f=1/D$). Pomoću Fourierove analize moguće je odrediti iznos amplitude i faze za svaku frekvenciju što će rezultirati amplitudnim i faznim spektrom za ovaj zapis. Za najveći dio valnih zapisa, proizlazi da faze poprimaju bilo koju vrijednost između 0 i 2π bez ikakve veće vjerojatnosti da poprime neku određenu vrijednost. Kako je ovo gotovo uvijek slučaj u dubokim vodama (ne i kod jako strmih valova), fazni spektar će se zanemariti. Tako preostaje samo amplitudni spektar za karakterizaciju valnoga zapisa. Kada bi se eksperiment iznova ponavljao, odnosno kada bi se ispočetka mjerila površinska elevacija pod statistički jednakim uvjetima. Rezultat vremenskog zapis, a samim time i amplitudnog zapisa bi bio drugačiji. Kako bi se uklonio karakterni uzorak spektra, nužno je ponoviti eksperiment veliki broj puta (*M*) te uzeti srednju vrijednost svih eksperimenata, i tako dobiti prosječni amplitudni spektar:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} a_{i,m} \tag{2-3}$$

za sve frekvencije f_i, gdje je $a_{i,m}$ vrijednost od a_i u eksperimentu s rednim brojem *m*. Za velike vrijednosti *M*, vrijednost a_i konvergira (približava se konstantnoj vrijednosti s povećanjem *M*) tako da rješava problem uzrokovanja. Smisleno je distribuirati varijancu svake komponente valova $\frac{1}{2}\bar{a}_i^{\,2}$, ona je diskretna, to jest samo su prisutne $f_i=i/D$ frekvencije, dok su u moru zapravo prisutne sve frekvencije. Taj problem se rješava tako da se frekvencijski interval približi nuli. Tako definicija spektra gustoće varijance postaje:

$$S_f(f) = \lim_{\Delta f \to 0} \frac{1}{\Delta f}\frac{1}{2}\bar{a}_i^{\,2} \tag{2-4}$$

Dimenzije i SI jedinice gustoće varijance $S_f(f)$ slijede izravno iz jednadžbe (1-4) i jesu [L^2T] i [m^2s] ili [m^2/Hz]. Tipični spektar gustoće varijance je prikazan na slici 2.3.



Slika 2.3. *Spektar gustoće varijance.* [2]

Spektar gustoće varijance daje cjeloviti opis površinske elevacije morskih valova u statističkom smislu, te pokazuje da se površinska elevacija može promatrati kao stacionarni Gaussov proces. Kako bi se ovaj pristup primijenio na morske uvjete, koji nikada nisu stacionarni, valni zapis je potrebno podijeliti u segmente koji se smatraju približno stacionarnim (uobičajenog su trajanja od 30 minuta). Treba napomenuti kako komponente valova na moru nisu stvarno nezavisne jedna o drugoj, naime one u određenom stupnju djeluju međusobno. No ako valovi nisu suviše strmi te se ne nalaze u veoma plitkim vodama, međusobne interakcije valova su slabe te ih može zanemariti. Površinska elevacija mora je slučajna funkcija vremena, i njena ukupna varijanca je:

$$\bar{\zeta}^2 = \int_0^\infty S_f(f)df \tag{2-5}$$

Spektar gustoće $S_f(f)$, prikazuje kako je varijanca površinske elevacije mora podijeljena na frekvencije. Ako se spektar gustoće pomnoži s ρg dobije se spektar gustoće energije:

$$E_f(f) = \rho g S_f(f) = \frac{1}{2}\rho g \lim_{\Delta f \to 0} \frac{1}{\Delta f} \bar{a}_i^{\,2} \tag{2-6}$$

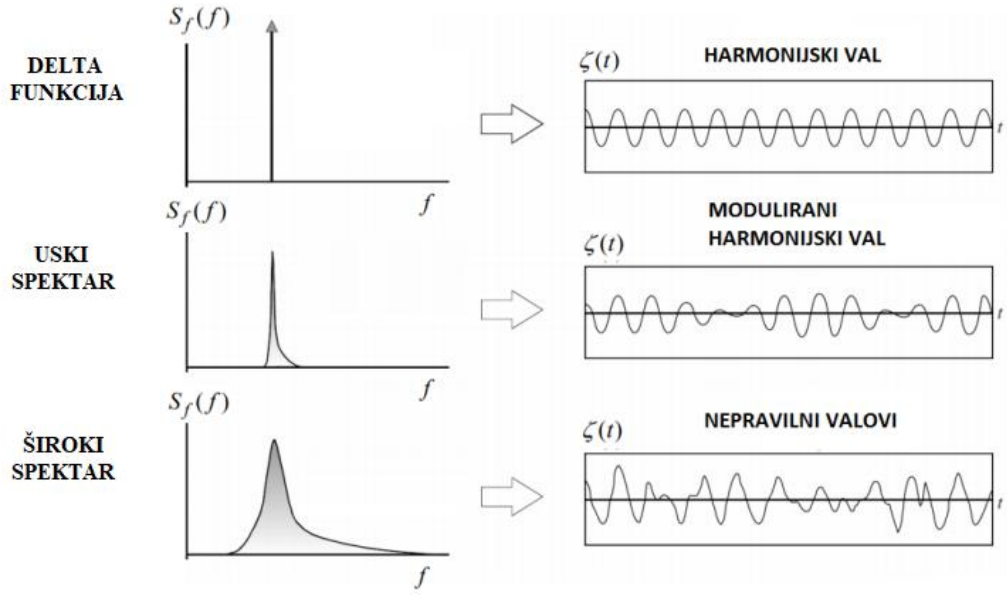
Gustoća varijance $S_f(f)$ je definirana iznad frekvencije $f=1/T$ (gdje T predstavlja period harmonijskih valova), ali isto tako može se formulirati kao $S_\omega(\omega)$ preko radijalne frekvencije koja iznosi $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$. Iz jednadžbe (1-5) se može zapisati:

$$\bar{\zeta}^2 = \int_0^\infty S_f(f)df = \int_0^\infty S_\omega(\omega)d\omega \tag{2-7}$$

Kako je $d\omega=2\pi df$, dobije se:

$$S_\omega(\omega) = \frac{1}{2\pi} S_f(f) \tag{2-8}$$

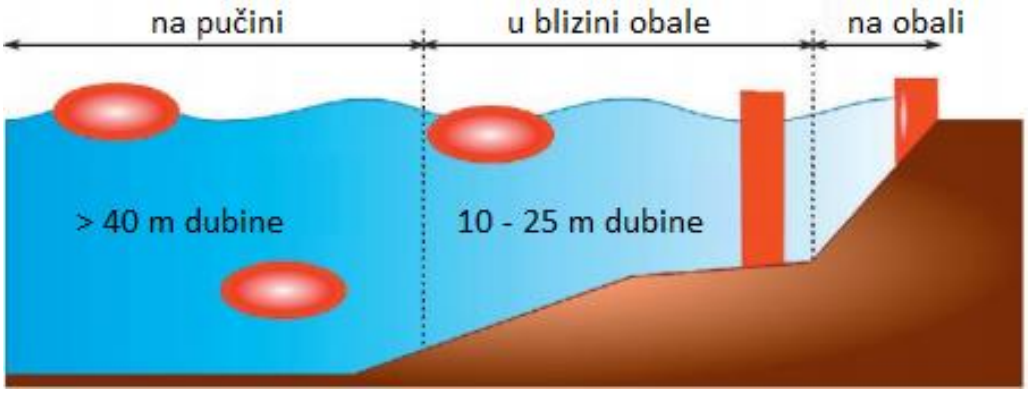
Iz oblika spektra se može zaključiti ukupni izgled valova, što je spektar uži to su valovi pravilniji. Na slici 2.4. je to prikazano za tri različita uvjeta vala. Najuži spektar odgovara harmonijskom valu (pravilni val s jednom frekvencijom) te spektar tada degenerira do delta funkcije na jednoj frekvenciji. Modulirano harmonijski val je rezultat raspodjele varijance preko malo šireg frekvencijskog područja, a stvoreno valno polje je prilično pravilno. Pri raspodjeli varijance vala preko širokog frekvencijskog pojasa se dobiva kaotično valno polje (nepravilni valovi), zato što komponente u vremenu veoma brzo izlaze iz faze jedna s drugom.



Slika 2.4. *Nepravilni oblici valova za tri različite širine spektra.* [2]

2.3. Pretvarači energije valova

Posljednjih desetljeća pretvarači energije valova su intenzivno razvijani i testirani. Cilj je bolja iskoristivost energije valova, kako na pučini tako i na obali. Kategoriziraju se po lokaciji primjene postrojenja na: postrojenja na obali, postrojenja u blizini obale i postrojenja na pučini što je prikazano na slici 2.5. kao i po principu rada postrojenja na morske valove prikazano na slici 2.9.

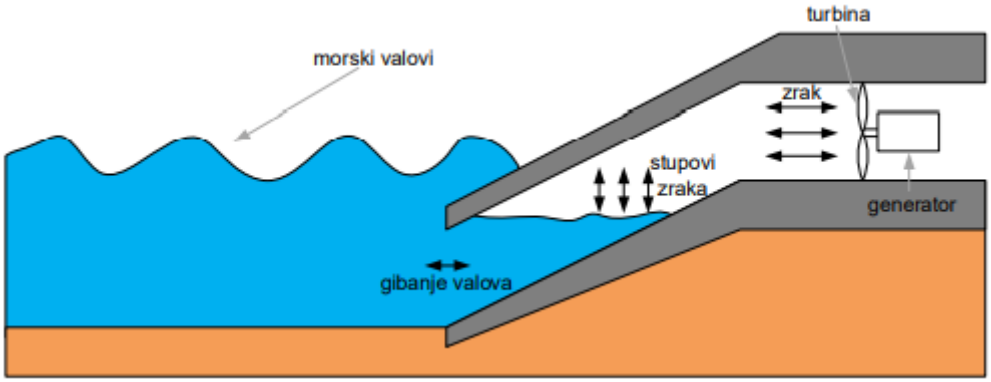


Slika 2.5. *Klasifikacija postrojenja na morske valove prema njihovoj lokaciji.* [3]

Glavna prednost postrojenja na obali je laka instalacija i lako održavanje postrojenja. Mana je što valovi sadrže manje energije u plićim vodama gdje se takva postrojenja instaliraju. Postrojenja u blizini obale se pričvršćuju na morsko dno, no moraju biti dovoljna robusna kako bi izdržala stalne udarce valova. Postrojenja na pučini su obično nalaze u vodi dubljoj od 40 metara. Sastoje od plutajuće bove i potopljenog tijela koje je pričvršćeno za morsko dno. Ova postrojenja mogu iskoristit najviše energije, no mana im je pouzdanost te kompleksno i skupo održavanje, kao i potreba za dugim i skupim podvodnim kabelom za prijenos generirane električne energije do mreže. Postrojenje na morske valove se kreću s gibanjem morskih valova, koje može biti translacijsko (uglavnom gore-dolje) ili rotacijsko (uglavnom naginjanje). Može biti plutajuće ili pak uronjeno u more. Ovisno o konceptu hvatanja energije valova, postoji više načina postizanja oscilacija, podizanjem / spuštanjem, naginjanjem kao i pomicanje naprijed i nazad uslijed udara valova [1].

- Postrojenja s oscilirajućim vodenim stupcem

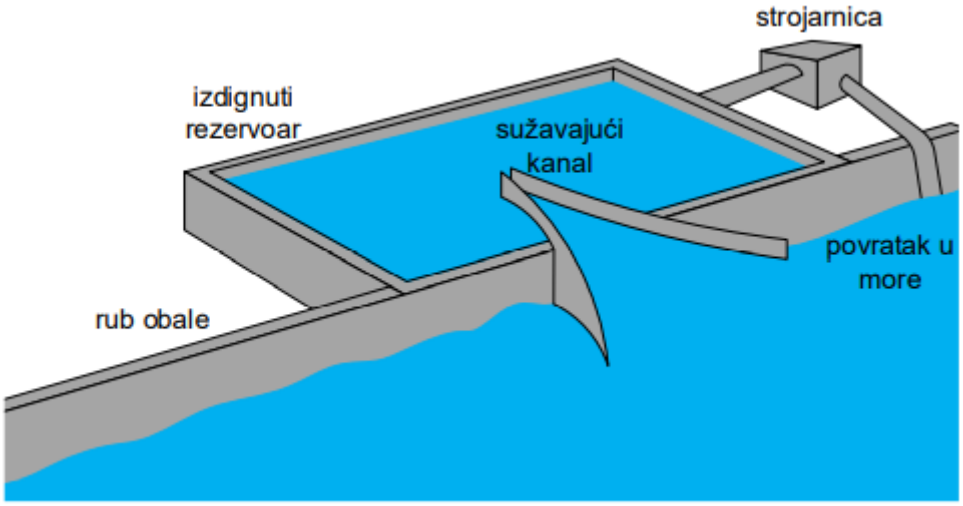
Ova postrojenja su najvjerojatnije najšire testirani tip postrojenja na morske valove kako na obali tako i na priobalju. Postrojenje se sastoji od cijevi čiji je jedan kraj uronjen u more a drugi pričvrššćen na obali. Kako se morski valovi gibaju tako se i površina vode unutar cijevi mijenja. To gibanje vode gore dolje unutar cijevi prouzrokuje gibanje zraka unutar nje, postavljanjem zračne turbine s generatorom unutar cijevi je moguće kinetičku energiju gibanja zraka pretvoriti u električnu energiju. Na slici 2.6. je prikazan ovakav tip postrojenja na morske valove [4].



Slika 2.6. *Postrojenje s oscilirajućim vodenim stupcem.* [4]

- Postrojenje sa sužavajućim kanalom

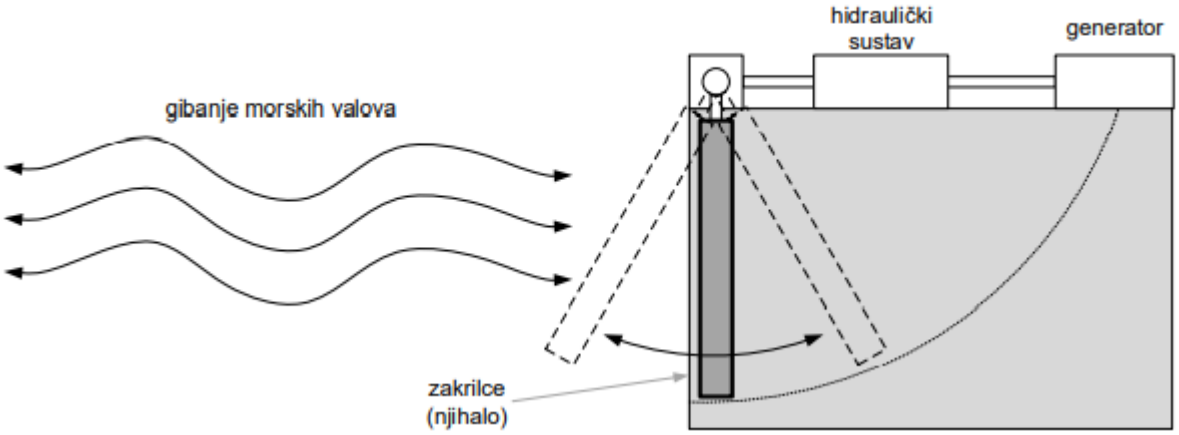
Ovaj tip postrojenja iskorištava energiju morskih valova na način da valove koji nadolaze na sužavajući kanal, i čija se razina vode tako podiže te naposljetku preljeva preko ruba kanala spremi u povišeni rezervoar. Tako se energija valova pohranjuje u vidi potencijalne energije vodu unutar rezervoara. Akumulirana voda se propušta kroz vodenu turbinu koja pogoni električni generator te naposljetku se dobija električna energija. Na slici 2.7. je prikazan ovakv tip postrojenja [4].



Slika 2.7. *Postrojenje sa sužavajućim kanalom.* [4]

- Postrojenja s oscilirajućim zakrilcima

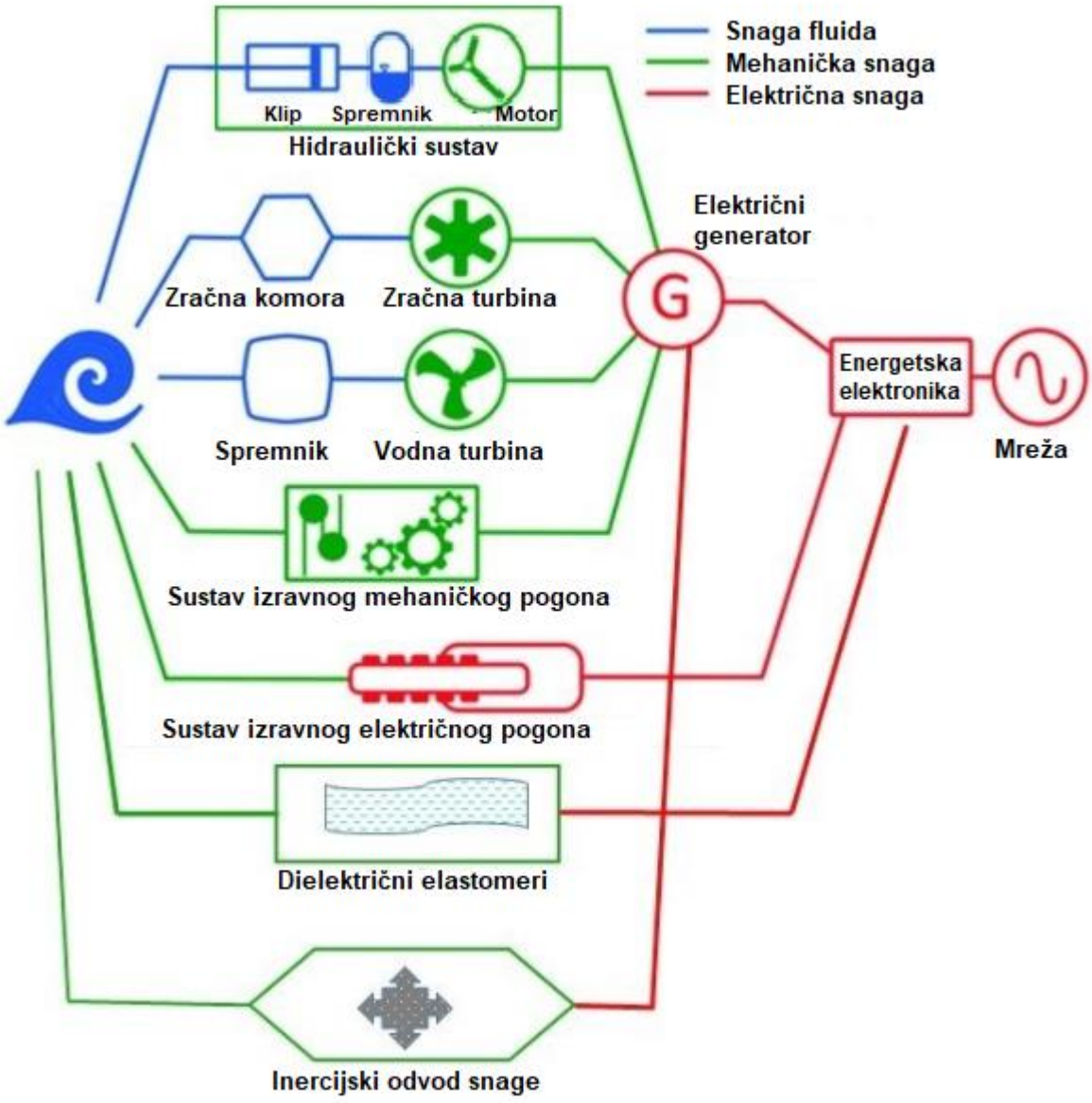
Ova postrojenja iskorištavaju morske valove za gibanje zakrilaca ili njihala naprijed-nazad. Njihalo je spojeno na visokotlačni hidraulički sustav te hidraulički fluid naposljetku pogoni hidraulički motor na kojega je spojen električni generator za proizvodnju električne energije. Na slici 2.8. je prikazan ovakav tip postrojenja na morske valove [4].



Slika 2.8. *Postrojenje s oscilirajućim zakrilcem.* [4]

- Postrojenja s plutajućom bovom

Postrojenja s plutajućom bovom su sustavi gdje se bova uzdizanjem i spuštanjem na morskoj površini giba relativno u odnosu na fiksirani okvir ili referentnu točku. Moguće su izvedbe i s uronjenim tijelom u morskoj vodi, no princip ostaje isti da ga morski valovi pomjeraju gore dolje. To relativno gibanje između oscilirajućeg i fiksnog dijela obično pokreće turbinu ili neki drugi sustav za oduzimanje energije kao što je linearni generator . Za oduzimanje energije se mogu koristiti različite hidrauličke tekućine koje poslije pogone hidraulički motor koji pokreće električni generatot, a najbolja su biorazgradiva ulja kao hidraulički fluid zato što uvijek postoji opasnost da hidraulička tekućina dospije u ocean. Većina je ovakvih sistema ipak spojena direktno na linearni generator kao što je prikazano na slici 3.1. i takvo postrojenje tj. elekrana je na sveučilištu Uppsala [1].

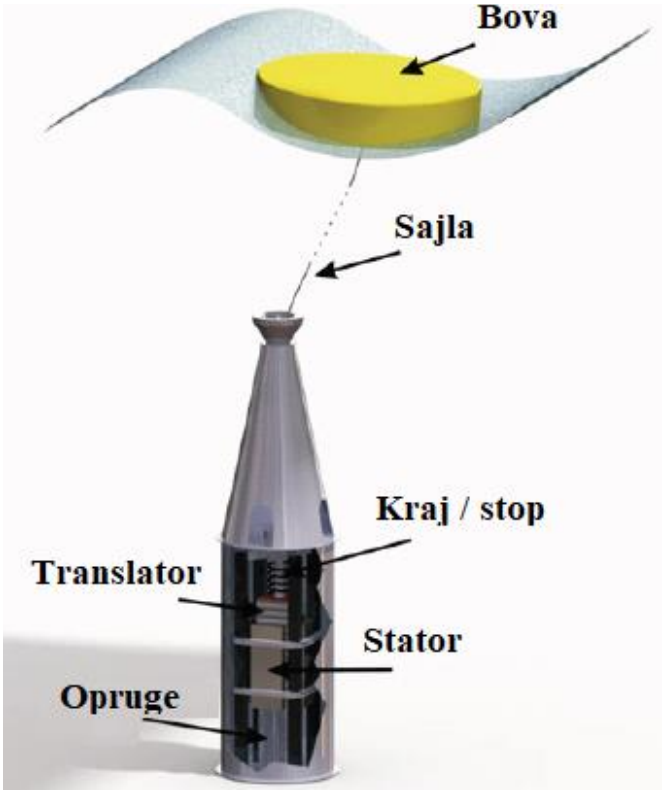


Slika 2.9. *Podjela postrojenja na morske valove po principu rada* [5]

Prema slici 2.9. je vidljivo kako postoje postrojenja na morske valove koja koriste izravno mehaničku energiju valova. To su sustavi s inercijskim odvodom snage i sustavi izravnog mehaničkog pogona koji se spajaju na električni generator te nakon generatora na energetsku elektroniku i mrežu, te sustavi izravnog električnog pogona i dielektrični elastomeri koji se izravno spajaju na energetsku elektroniku pa potom na mrežu. Sustavi sa zračnom i vodnom turbinom koriste snagu fluida (zraka odnosno vode) i spajaju se na električni generator, a zatim na energetsku elektroniku i mrežu. Hidraulički sustavi koriste energiju valova za stlačivanje hidrauličke tekućine, koja pogoni motor spojen na generator, a zatim energetsku elektroniku i mrežu.

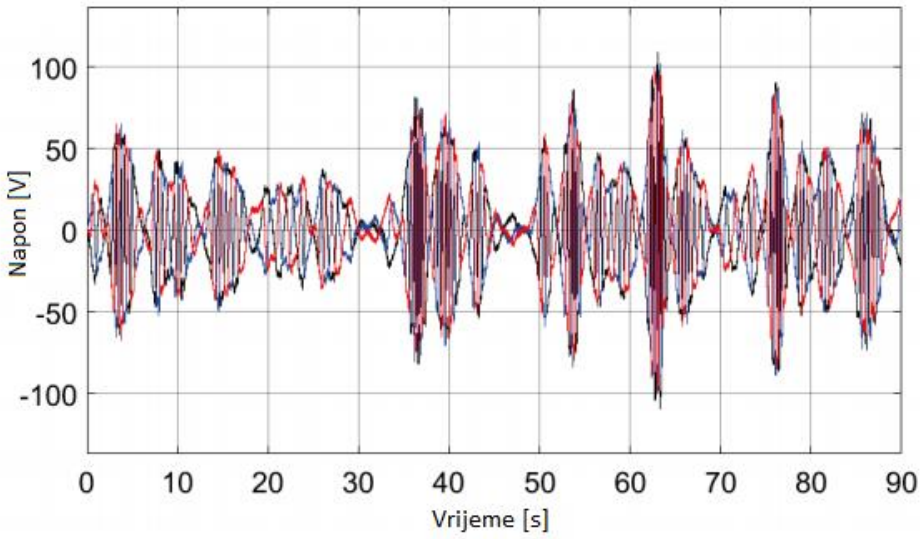
3. POSTROJENJE (ELEKTRANA) NA MORSKE VALOVE NA SVEUČILIŠTU UPPSALA

Koncept postrojenja na morske valove koji je razvijen i testiran na Sveučilištu Uppsala je dan u ovome odlomku, a riječ je o postrojenju s plutajućom bovom prikazano na slici 3.1. Ova metoda hvatanja energije valova je pogodnija za područja s većim dubinama mora, zbog jačih valova, a prednost je što plutajuće tijelo neće nanijeti štetu na morskome dnu uslijed gibanja. Kada bi plutajuće tijelo bilo u rezonanciji s morskim valovima ova metoda bi omogućila maksimalnu iskoristivost energije valova [1].



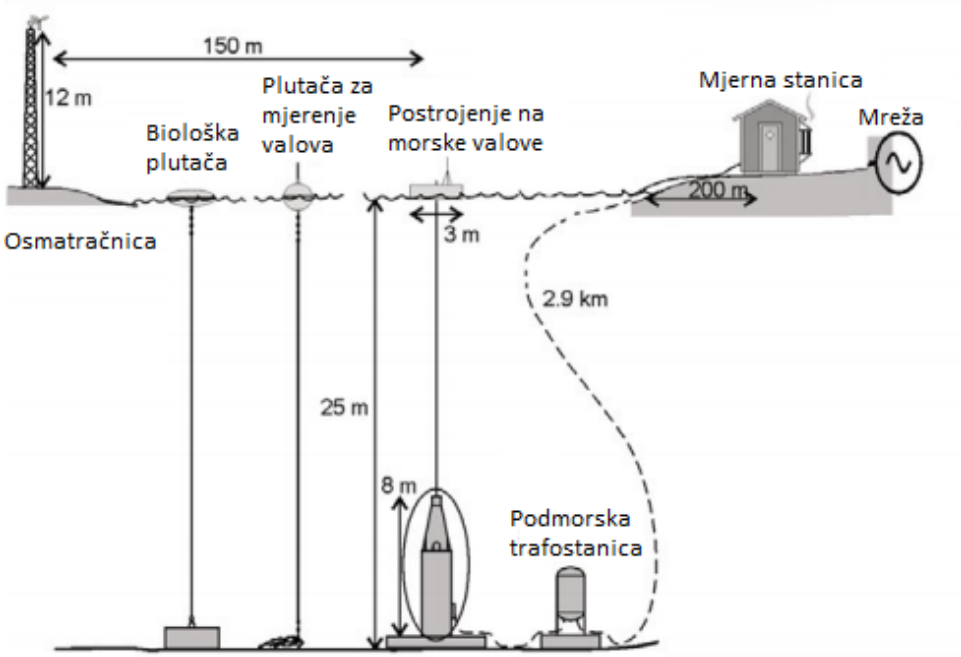
Slika 3.1. *Osnovne komponente izravno pogonjenog linearnog generatora s permanentnim magnetom (PMLG).* [1]

Na sveučilištu je katedra za elektrotehniku opsežno proučavala svaki aspekt tehnologije sakupljanja energije valova. Od 2006. godine su pokrili sve korake od pretvorbe energije pa do priključka na mrežu. Postrojenje se sastoji od linearnog generatora s permanentnim magnetom (PMLG) sajlom spojenim za plutajuću bovu na površini mora kao na slici 3.1. Translator se unutar PMLG-a giba u ritmu plutače, to gibanje za posljedicu ima promjenjivi magnetski tok koji presijeca statorski namot u kojem se onda generira električna energija [1]. Izlazni napon PMLG-a je promjenjiv po iznosu i frekvenciji te prikazan na slici 3.2.



Slika 3.2. Izlazni trofazni napon PMLG-a za slučaj opterećenja od 4,9 Ω [1].

Cilj je grupirati više postrojenja na morske valove u farmu kako bi se povećala i izgladila izlazna snaga. Kako bi se prikupila snaga iz pojedinih postrojenja na morske valove potrebna je i dodatna podmorska trafostanica. Razvijene su i instalirane dvije trafostanice. Prva je postavljena 2009. i na nju se moglo spojiti 3 postrojenja na morske valove, opremljena je sa sustavom mjerenja i upravljanja. Druga trafostanica je opremljena automatskom kontrolom spoja na mrežu te omogućuje spajanje do sedam postrojenja na morske valove na nju. Preko prijenosnog voda je povezana s mjernom stanicom koja je dalje spojena s lokalnom mrežom. Obje su trafostanice opremljene sa svim potrebnim pretvaračkim elementima, kao što su ispravljač, transformator, filterom izlaznog napona. Važno je da trafostanice budu opremljene u skladu s normom kako bi se smjele spojiti na mrežu [1].



Slika 3.3. *Pregled komponenata instaliranih na mjestu istraživanja Lysekil* [1].

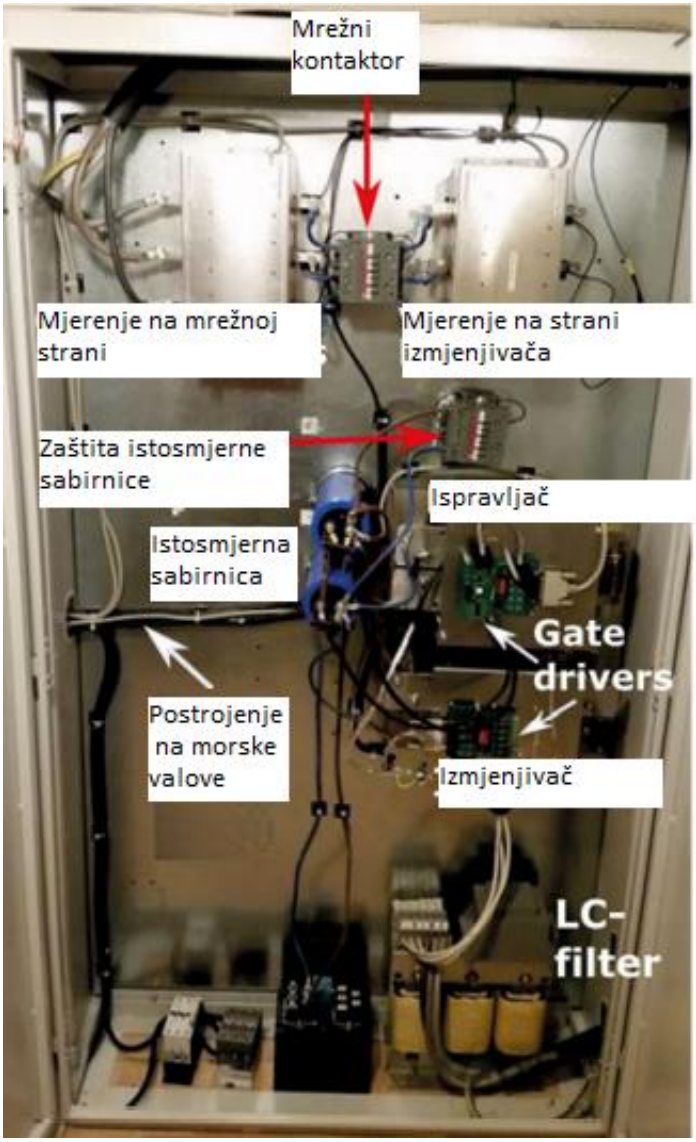
Na slici 3.3. su prikazane priobalne komponente postrojenja na morske valove kao i mjerna stanica na kopnu koja je spojena na mrežu. Prate se meteorološki podaci koji se preko osmatračnice bežično šalju u mjernu stanicu. Osmatračnica se nalazi na priobalju na stijeni u blizini biološke i mjerne plutače. Linearni generator s permanentnim magnetom je preko 30 m dugog kabela spojen na podmorsku trafostanicu koja je s 2,9 km dugim vodom spojena na mjernu stanicu [1].

3.1. Priključak na mrežu postrojenja s mjernom stanicom

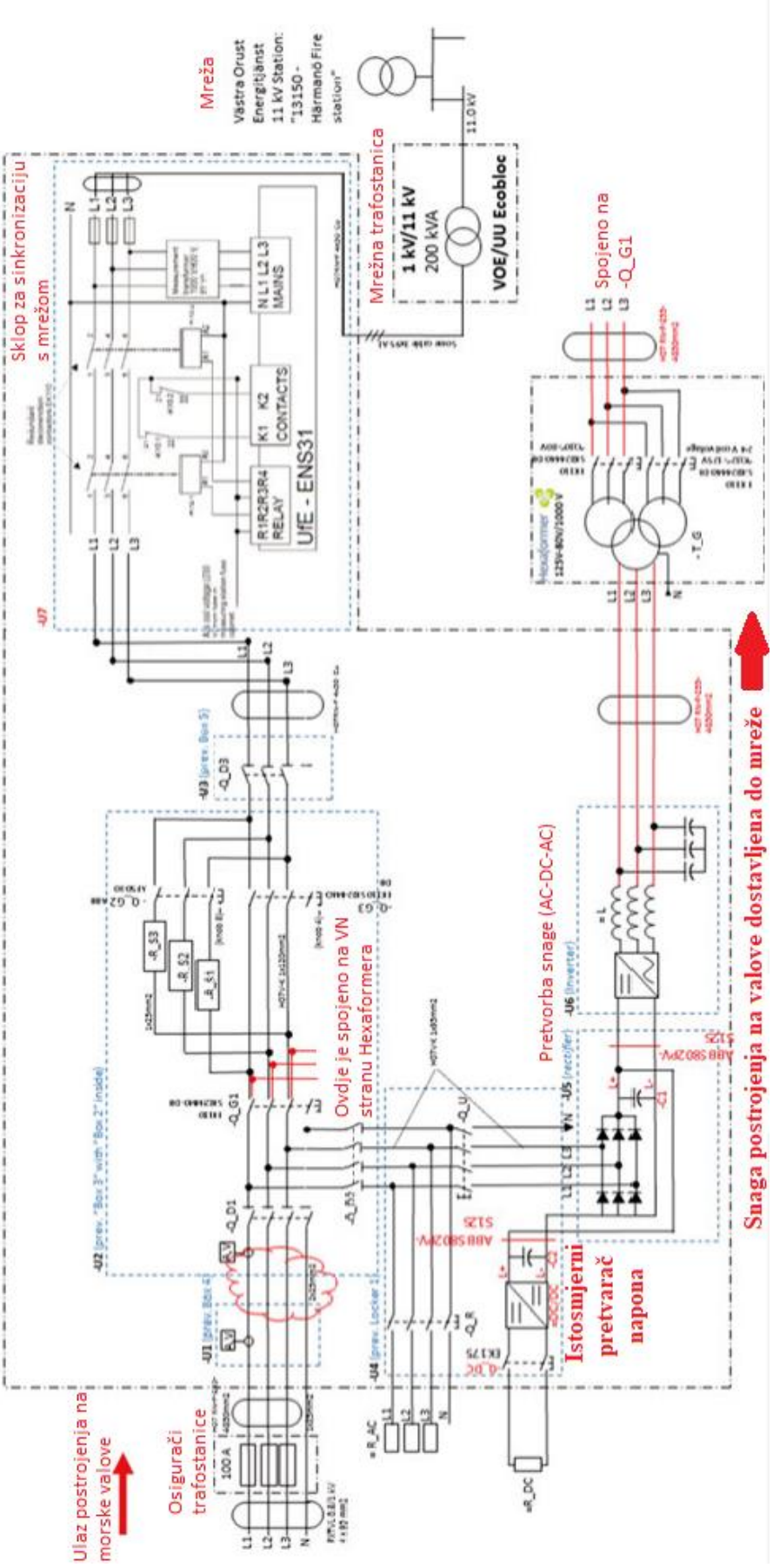
Mjerna stanica je središnja točka spoja postrojenja na morske valove s trafostanicom i smještena je na najbližem otoku, Härmanö. Od 2006. godine mjerna se stanica kontinuirano nadograđuje sa sustavima za pretvorbu i upravljanje energijom. Između 2015. i 2017. godine, uspostavljena je i osigurana autonomna mrežna veza uključujući i potrebnu zaštitu za mrežni priključak. Heksaformer (više stupanjski transformator) prijenosnog omjera 125/1000 V je instaliran pored mjerne stanice, nakon kojega slijedi glavni mrežni transformator ECOLBLOC 1/11 kV što se vidi na slici 3.4. [1].

Slika 3.4. *Mjerna stanica spojena na glavni mrežni transformator ECOBLOC (1/11 kV) kroz Hexaformer (0,125/1 kV) u Härmanöu u Lysekilu* [1].

Ograđeno kućište električnog sustava prikazanog na slici 3.5. je opremljeno trofaznim ispravljačem gdje se izlazna snaga postrojenja na morske valove ispravlja te napaja istosmjernu sabirnicu. Izmjenjivač je spojen s istosmjernom sabirnicom te injektira aktivnu snagu u mrežu. Injektirana aktivna snaga ovisi o generiranoj referentnoj struji koja predstavlja razliku izmjerenoga i referentnoga napona istosmjerne sabirnice. Kao sigurnosna mjera za istosmjernu sabirnicu se koristi neovisni upravljač takozvani *"chopper"* tj. istosmjerni pretvarač napona. Tako se može kontrolirati struju koja premašuje granice, na način da se snaga disipira na otpornik što je vidljivo na slici 3.6. LC-filtar spojen na mrežu preko Hexaformera se koristi za smanjenje harmonika koje prouzrokuje izmjenjivač. Slika 3.6. predstavlja cjeloviti prikaz električnog sustava instaliranoga unutar mjerne stanice. Prikazuje povezivanje postrojenja na morske valove s ispravljačem, istosmjernim pretvaračem napona na istosmjernoj strani kao i visokonaponsku stranu kontakata Hexaformera, Q_G1. Sklop za sinkronizaciju s mrežom, kao i otpornici za ograničenje snage su prikazani na vrhu slike 3.6. Također je prikazan spoj Hexaformera i glavnog mrežnog transformatora ECOBLOC s odgovarajućim kontaktima [1].



Slika 3.5. *Električni sustav spojen s mrežom* [1].



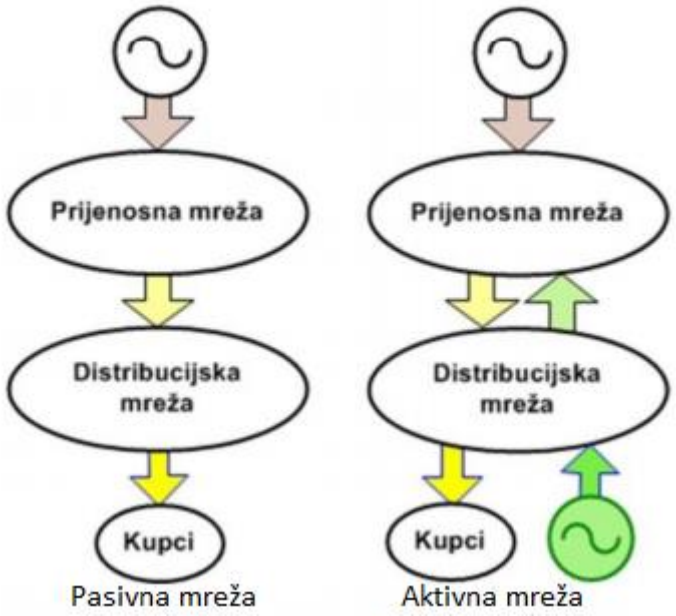
Slika 3.6. *Tropolna shema električnog sustava instaliranog u mjernoj stanici* [1].

4. UTJECAJ NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

Integracija postrojenja na morske valova na elektroenergetsku mrežu je još uvijek u fazi razvoja. Mnogi projekti se fokusiraju na sustave spojene s mrežom te rade na izazovima kao što su fluktuacija napona na mjestu priključka, flikeri, harmonici kao i inercija sustava. Snaga kratkog spoja, impedancija mreže kao i ukupna snaga postrojenja na morske valove su ključni faktori u analizi utjecaja postrojenja na morske valove na elektroenergetsku mrežu.

4.1. Tokovi snaga

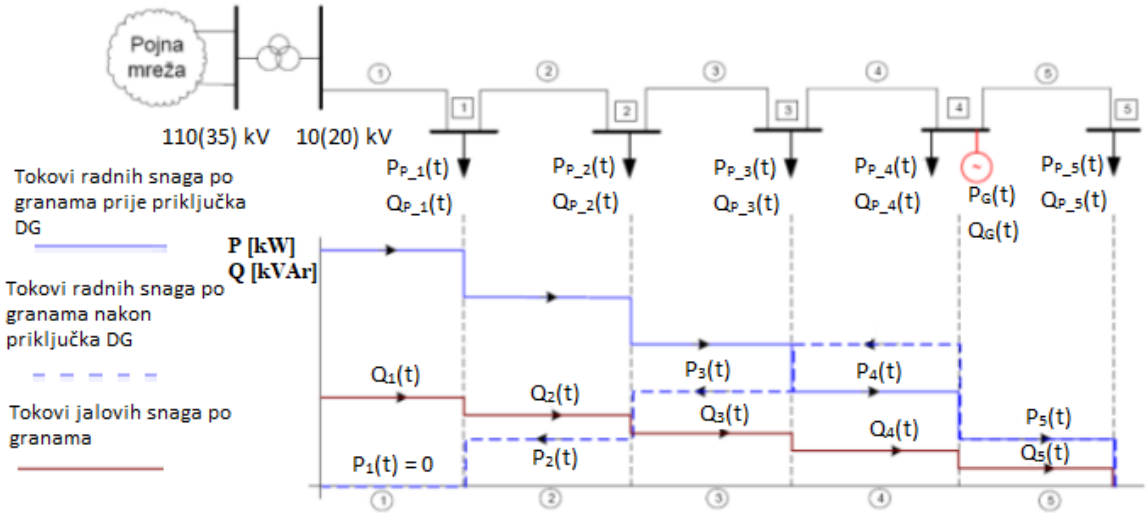
Kako i svi distribuirani izvori tako i postrojenja na morske valove imaju veliki utjecaj na tokove snaga, to jest na njene smjerove. Ovisno o izlaznoj snazi distribuiranog izvora, promjenjivom opterećenju i vremenskim uvjetima, tijekom dana je moguće da dođe do višestrukih promjena smjera toka snage na nekom promatranom distributivnom pojnom vodu, a shodno tome i u ostatku mreže. Na slici 4.1. je prikazano kako se pasivna mreža s priključkom distribuiranoga izvora mijenja u akrivnu mrežu.



Slika 4.1. *Promjena pasivne mreže u aktivnu mrežu dodavanjem distribuiranog izvora* [6].

Shodno tome je moguće da dođe do višestrukih promjena smjera toka snage na nekome pojnom vodu kao i na ostatku mreže tijekom dana. Zbog toga je potrebno konstantno promatranje, analiziranje kao i kontroliranje tokova snaga s ciljem efikasnog reagiranja na nastale promjene. Kako ne bi došlo do preopterećenja prouzrokovanim uzlaznim tokom snage kroz izvod, proizvodnja iz distribuiranoga izvora se ograničava. Ona mora biti manja od sume maksimalno dozvoljene snage (toka snage kroz izvode) i snage minimalne potrošnje.

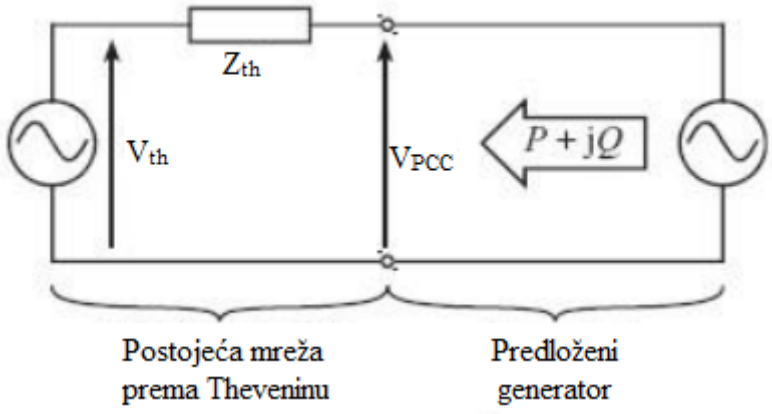
Razina integracije (engl. hosting capacity), odnosno maksimalna snaga koju je na nekoj lokaciji moguće priključiti na distribucijsku mrežu je ovisna upravo o minimalnoj potrošnji na tome izvodu. Prije se uzimala samo maksimalna potrošnja prilikom dizajniranja i odabira ogovarajučih komponenti za elektroenergetski sustav ali i pri vođenju i upravljanju EE-skog sustava je također bila bitna samo maksimalna potrošnja dok se minimalnu potrošnju zanemarivalo. S pojavom distribuiranih izvora se važnost minimalne potrošnje izjednačila s važnošću maksimalne potrošnje. Iznimno je bitan odnos minimalne potrošnje tijekom maksimalne proizvodnje iz distribuiranog izvora. Ovaj slučaj sastavni je dio u elaboratima utjecaja elektrana na obnovljive izvore energije na mrežu. S obzirom da mrežni operator (voditelj EE-skog sustava) u pravilu nema podatke o minimalnoj potrošnji, nužno je izvršiti veliki broj mjerenja kako bi se mogli uočiti i odrediti neki karakteristični obrasi potrošnje električne energije. S obzirom da mjerenja zahtjevaju vrijeme i iziskuju dodatne troškove, trenutno se minimalna potrošnja samo procjenjuje. Bitno je uzeti i naponsku razinu same mreže kada se donosi procjena minimalne potrošnje. Tokovi snaga (i gubitci) u pojedinim granama mogu biti smanjeni ako se ta snaga iz distribuiranog izvora troši kod električki bliskih potrošača što rezultira smanjenjem toka snage kroz izvod ukoliko je potrošnja veća od proizvodnje. Moguće je i da tokovi snaga promjene smjer ukoliko je proizvodnja veća od potrošnje, te je moguće i da se tok snage dodatno poveća u slučaju smanjenja potrošnje ili dodatnim povećanjem proizvdonje [6]. Na slici 4.2. je prikazano smanjenje toka radne snage kroz početak izvoda na 0, jer se sva lokalna potrošnja podmiruje iz dristribuiranog izvora.



Slika 4.2. *Smanjenje toka radne snage integracijom distribuiranog izvora* [6].

4.2. Naponske prilike

Priključivanje distribuiranih izvora uobičajeno ima efekt podizanja vrijednosti napona na mjestu priključka, što može rezultirati pojavom prenapona kod obližnjih potrošača. Na slici 4.3. je prikazan nadomjesni strujni krug za procjenu povećanja napona.



Slika 4.3. *Nadomjesni krug za procjenu povećanja napona* [6].

Prema slici 4.3. cijela mreža sve do zajedničkog spoja se može prikazati kao ekvivalentna Théveninova mreža s Théveninovom impedancijom Z_{th} procijenjenom iz snage kratkog spoja S_k i omjera X/R na mjestu priključka takozvanom PCC (engl. Point of Common Coupling).

$$Z_{th} = \frac{V^2}{S_k} \tag{4-1}$$

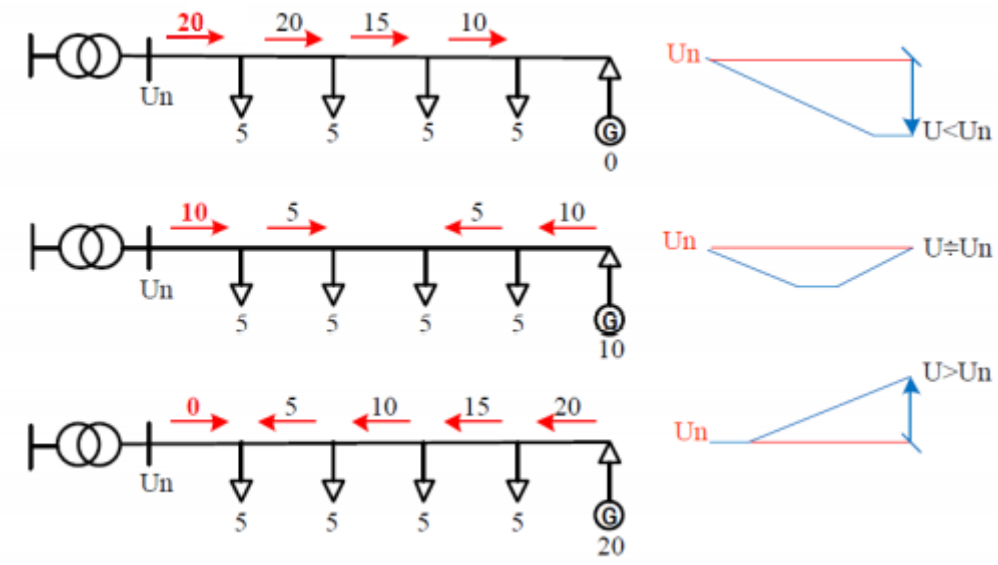
Gdje je V nazivni fazni napon, nakon toga se omjer X/R koristi za dobivanje otpora i reaktancije Z_{th}

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} \tag{4-2}$$

Porast napona ΔV se može odrediti iz sljedećeg izraza:

$$\Delta V \approx \frac{P_R + Q_x}{V} \tag{4-3}$$

Gdje su Q i P pozitivni ako su i jalova i djelatna snaga pozitivne to jest ako su im smjerovi kao na slici 4.3. Upravo potreba za ograničavanjem porasta napona u većini slučajeva određuje veličinu generatora kojega je moguće instalirati na nekoj lokaciji, a ne termičko naprezanje voda prouzrokovano prolaskom struje kroz vod. Dopušteni porast napona ovisi o tome koliko je trenutna razina napona udaljena od maksimalno dozvoljenog napona [6]. Na slici 4.4. je prikazano kako distribuirana proizvodnjamože utjecati na naponske prilike.



Slika 4.4. *Utjecaj distribuirane proizvodnje na naponske prilike* [6].

Prema slici 4.4. se lijepo vidi kako distribuirana proizvodnja može utjecati na naponske prilike unutar distribucijske mreže. U prvom slučaju je nema, te imamo pad napona, u drugom slučaju je distribuirana proizvodnja jednaka polovini potrošnje te su se naponske prilike poboljšale, dok su u trećem slučaju, kada je proizvodnja jednaka potrošnji naponske prilike najviše. Daljnjim povećanjem distribuirane proizvdonje, napon bi samo rastao sve dok se ne dostigne gornja dozvoljena granica napona. U tom slučaju daljnje povećanje proizvodnje električne energije, tj priključak novih distribuiranih potrošača nije moguća te prvi sljedeći investitor koji zatraži priključak, mora sam snositi troškove daljeg povećanja integracije mreže. Razina integracije dakako ovisi o naponskoj razini kao i o mjestu priključka, te je tako moguće veće proizvodne jedinice priključiti na sabirnice trafostanice negoli na mrežu, a isto tako što je viša naponska razina moguće je i veća postrojenja na nju priključiti. Za povećanje razine integracije postoji više metoda, a to su: regulacija napona promjenom prijenosnog omjera transformatora, regulacija napona izgradnjom novih izvoda ili povećanjem presjeka postojećih vodova, regulacija napona regulacijom djelatne i jalove snage, te koordinacijom više metoda [6].

4.3. Strujne prilike

Prilikom dimenzioniranja komponenti elektroenergetske mreže treba obratiti posebnu pažnju na termičku izdržljivost komponenti. Termička izdržljivost komponenti ne ovisi nužno samo o snazi to jest struji kroz komponentu nego i o atmosferskim uvjetima okoline. Prema tome odabir kabela i vodova, te pripadajućih zaštitnih komponenti ovisi o dozvoljenoj termičkoj struji, to jest o maksimalnoj dozvoljenoj struji koja neće načini štetu na komponenti kroz koju

prolazi (termičko ograničenje). Na temperaturu na koju će se izolacijski materijal odnosno sami vodič zagrijati utječu brzina prijenosa topline na okolinu, brzina vjetra te temperatura same okoline. Obično su mrežama do 20 kV kabeli i vodovi predimenzionirani u pogledu njihovih termičkih granica, za to postoje dva razloga. Prvi razlog je održavanje napona kod potrošača unutar granica, što često rezultira uporabom vodiča većega presjeka nego što je zahtijevano za ispunjenje termičkih granica. Drugi razlog je što su gubici energije u vodičima s većim presjekom znatno manji. Uzimajući u obzir dugi životni vijek vodova, analize troškova gubitaka su pokazale da je ekonomičnije predimenzionirati vod koji u početku iziskuje više novca no dugoročno je isplativiji. S povećanjem integracije obnovljivih izvora energije u mrežu može doći do promjene smjera struje u mreži što u konačnici može dovesti do strujnih i termičkih preopterećenja. Na višim naponskim razinama, to jest na 35 i 110 kV, kontrola napona je manje zahtjevna te stoga termička ograničenja vodova i kabela mogu biti ograničavajući faktor. Kod vjetroelektrana je povoljna situacija u pogledu strujnih opterećenja, tj. termičkih ograničenja ta što za vrijeme njihove maksimalne proizvodnje, puše jak vjetar koji dodatno hladi nadzemne vodove, te iz tog razloga presijek vodova može biti relativno manji negoli u odnosu na projektantski naputak. Transformatori također mogu predstavljati usko grlo za povećanje integracije ako su na granici termičkog ograničenja, ali pošto imaju duge vremenske toplinske konstante mogu kraće periode biti i preopterećeni, a da ne dođe do pregrijavanja ili značajnijih oštećenja. Štoviše je poželjno da transformatori budu poprilično termički opterećeni, ali unutar granica dopuštenoga, jer su im gubitci praznog hoda značajni. Većina ih se može prilagoditi za uzlazne tokove snaga koje visoka razina integracije nosi sa sobom [6].

Metode kojima se povećava razina integracije s obzirom na strujna opterećenja su:

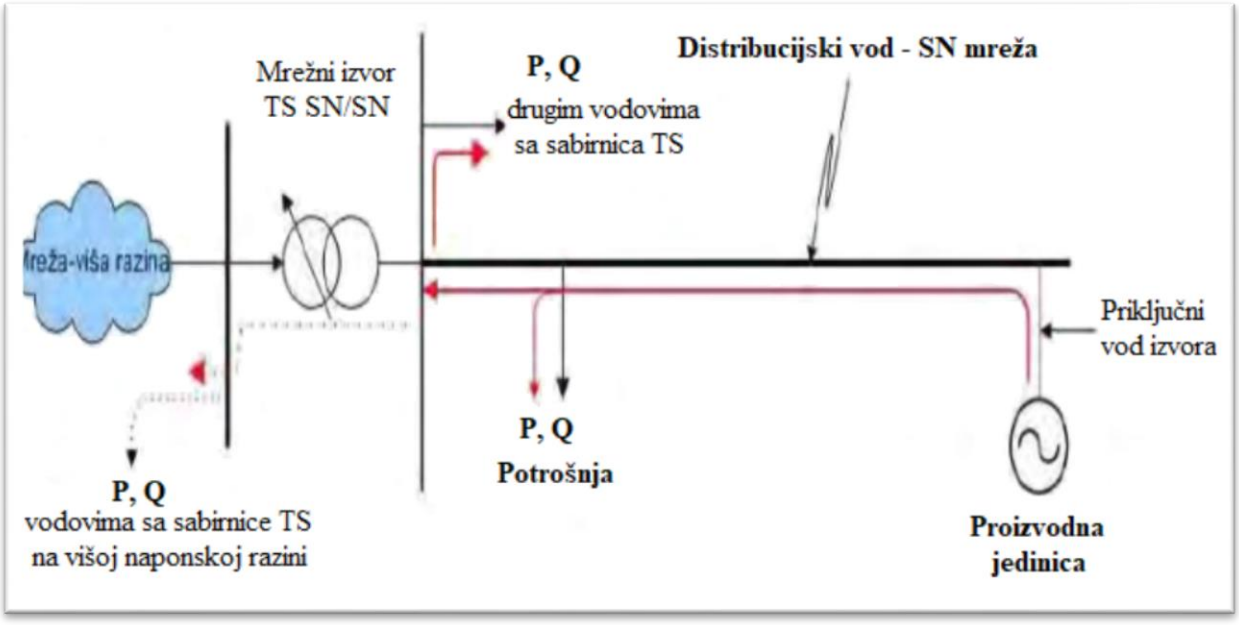
1. Povećanje sposobnosti opterećenja vodova, dinamička sposobnost opterećenja i izgradnja novih veza,
2. Dinamička uzdužna i poprečna kompenzacija (regulacija tokova snaga),
3. Sustavi za upravljanje energijom (engl. Energy Management System, EMS),
4. Upravljanje potražnjom (engl. load management) i skladištenje energije,
5. Prespajanje i napredna zaštita.

U petom poglavlju će se koristiti metoda pod točkom 4, to jest skladištenje energije u bateriji i trošenje energije iz baterije kada izlazna snaga distribuiranog izvora bude ispod definirane

vrijednosti. Temelj upravljanja spreminicima energije i ukupnog sustava za upravljanje energijom čine informacijsko komunikacijska tehnologija (ICT) [6].

4.4. Gubitci

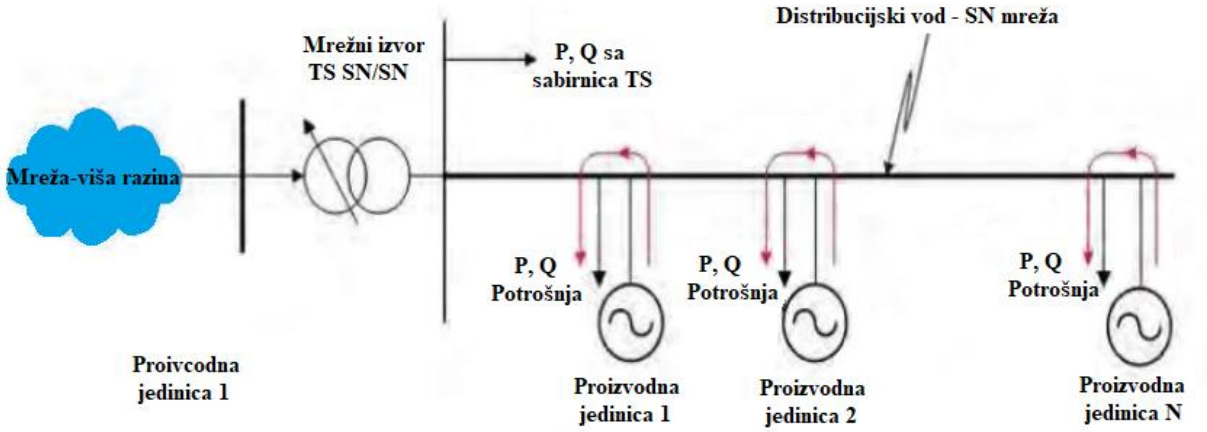
Načelno gledano bi se gubici trebali smanjiti s distribuiranom (decentraliziranom) proizvodnjom koja je bliže potrošačima, ali to nije uvijek slučaj. Oni ovise o mnogo faktora, a ponajviše o lokacije samoga distribuiranoga izvora te promjeni smjera snage to jest struje kroz vodove. Distribuirani izvori nemaju značajan utjecaj na smanjenje gubitaka u visokonaponskim mrežama koje su obično jako učinkovite, ali zato mogu značajno smanjiti gubitke u distribucijskim mrežama. Distribuirana proizvodnja bi se trebala nalaziti u neposrednoj blizini odgovarajućih opterećenja, te da njena raspoloživost proizvodnje u vremenu odgovara lokalnoj potrošnji. Razlikujemo dva granična slučaja utjecaja distribuiranih izvora na gubitke. Prvi granični slučaj se odnosi na najveći porast gubitaka u promatranoj mreži prikazano na slici 4.5. Do njega se dolazi kada je distribuirana proizvodnja znatno veća od potrošnje i dosta udaljena od nje, te tada uzlazni tokovi snage prema više naponskoj razini prouzrokuju te gubitke [6].



Slika 4.5. *Prvi granični slučaj, najveći porast gubitaka u promatranoj mreži* [6].

Drugi granični slučaj se odnosi na najveće smanjenje gubitaka u promatranoj mreži prikazano na slici 4.6. Do njega se dolazi kada je snaga distribuirane proizvodnje jednaka (slična) potrošnji i nalazi se u neposrednoj električnoj blizini potrošnje. Tada dolazi do smanjenja

tokova snage kroz izvod jer je dio potrošnje podmiren iz lokalne proizvodnje te se ne mora sva snaga od mreže više razine preko vodova prenijeti do potrošača [6].



Slika 4.6. *Drugi granični slučaj, najveće smanjenje gubitaka u promatranoj mreži* [6].

Prema [7] gubitke prije integracije distribuirane proizvodnje je moguće izračunati pmoću:

$$F_0 = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T [L_s(t)]^2 dt \tag{4-4}$$

Nakon priključka distribuiranog generatora ukupni gubitci su:

$$F_{DG} = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T [L_s(t) - G_s(t)]^2 dt \tag{4-5}$$

odnosno smanjenje zbog integracije proizvodnje je:

$$\Delta F = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T G_s(t)[2L_s(t) - G_s(t)]^2 dt \tag{4-6}$$

Gdje je N_s broj dijelova pojnog voda, L_s opterećenje (teret) nizvodno od dijela pojnog voda, a G_s proizvodnja nizvodno od dijela pojnog voda.

Ako je prema izrazu (4-6) promjena u gubitcima pozitivna, i dokle vrijedi: $2\ L_s(t) - G_s(t) > 0$, distribuirana proizvodnja će za posljedicu imati smanjenje gubitaka, to jest ako je prosječna proizvodnja manja od dvostruke vrijednosti opterećenja gubitci neće bitno rasti.

4.5. Kvaliteta električne energije

Kvaliteta napajanja električnom energijom je funkcija prikladnosti toga napajanja kao energetskog izvora električne opreme koja je kreirana za spajanje na opskrbnu mrežu [8].

Dvije temeljne komponente kvalitete napajanja su:

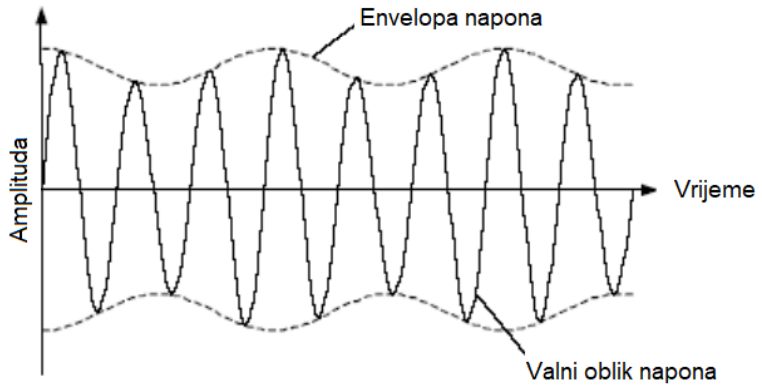
- neprekinutost: stupanj raspoloživosti električne energije krajnjem korisniku tijekom vremena (u svakom trenutku),
- razina napona: specificirani opseg unutar kojega se održava napon tijekom vremena (u svakom trenutku) [8].

Električna energija se isporučuje pomoću napona koji se dobiva s jednofaznih ili trofaznih sinusnih sustava, a ima slijedeće glavne parametre: amplitudu, frekvenciju, valni oblik i simetriju napona [8].

Analiza kvalitete električne energije obično obuhvaća sljedeće osobine napona: naponske propade i prekide, kolebanja napona, harmonike i međuharmonike, prijelazne prenapone, valovitost, tranzijentne prenapone, naponsku nesimetriju, promjene osnovne frekvencije mreže, prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom te prisutnost signalnih napona [8].

4.5.1. Odstupanje napona

Učestala promjena napona može za posljedicu imati pogoršanje kvalitete i prouzročiti određeni stupanj nestabilnosti u energetskom sustavu. Odstupanja napona se mogu svrstati u tri skupine, prenapone, propade napona i naponske prekide na mjestu priključka. Odstupanja se dalje mogu podijeliti i prema vremenu trajanja, na trenutna, prolazna i privremena. Prolazni i privremeni prenaponi odnosno propadi napona su posebno važni u određivanju kvalitete električne energije. Osim toga, distribucijska mreža mora biti u mogućnosti održati nazivnu operativnu frekvenciju i napon u skladu s normom EN 50160-2009. Maksimalno odstupanje napona je ±10 posto od nazivnog napona [8]. Na slici 4.7. je prikazano koleganje napona.

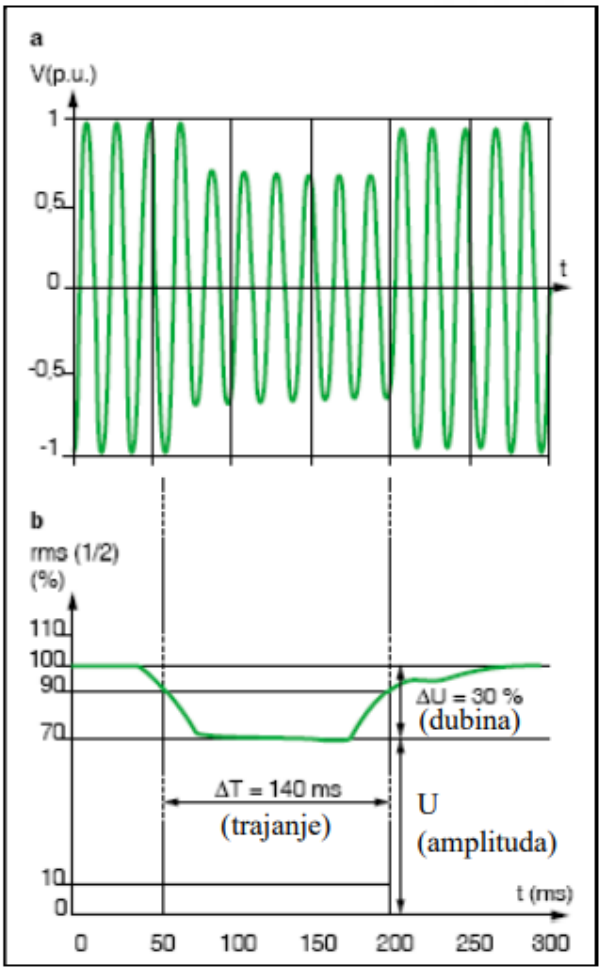


Slika 4.7. *Valni oblik napona na promjenjivom opterećenju.* [8].

Kolebanje napona je serija naponskih promjena ili periodična promjena envelope napona. Amplituda tih iznenadnih promjena uobičajeno ne prelazi 6 – 8 % nazivnog napona. Pri

normalnim pogonskim uvjetima: -tijekom bilo kojeg razdoblja od jednog tjedna, 95 % 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona mora biti u opsegu: Un ± 10 %, a sve 10-minutne srednje vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona moraju biti u opsegu: Un + 10 % / -15 % kako bi bio unutar norme EN 50160-2009 [8].

Naponski propad je dvodimenzionalni elektromagnetski poremećaj definiran vremenskim trajanjem i razinom napona, a prikazan je na slici 4.8. To je naglo, kratkotrajno sniženje efektivne vrijednosti opskrbnoga napon. Većinom su prouzročeni kratkim spojevima ali i pokretanjima velikih motora. Naponski propadi i prekidi se prostiru na niže naponske razine putem transformatora, te ih se zog toga nazivaju „globalni“ problem. Na mrežama s nadzemnim vodovima koji su izloženi lošim vremenskim prilikama, se događa veći broj kako naponskih propada tako i prekida negoli kod podzemnih vodova. Naponski prekid je definiran kao stanje pri kojem je opskrbni napon na mjestu isporuke niži od 1 % nazivnog napona. Oni mogu biti, planirani i neplanirani: dugotrajni (dulji od 3 min) i kratkotrajni (3 min ili kraći) [8].



Slika 4.8. *Naponski propad* [8].

Previsoki naponi su događaji kada gornja granična vrijednost nazivnog napona (Un + 10 %, prema normi EN 50160) biva prekoračena. Naziv "prenapon" primjenjiv je samo za prijelazne pojave, kakve su atmosferska pražnjenja (izvanjski prenaponi) te prenaponi kod uklapanja, isklapanja i kratkih spojeva u elektroenergetskoj mreži (unutrašnji prenaponi) [8].

4.5.2. Regulacija frekvencije

Tradicionalni elektroenergetski sustavi oslanjaju se na udaljene jedinice za proizvodnju električne energije, uključujući i rotirajuće sinkrone generatore s pohranjenom (kinetičkom) energijom. Važno svojstvo kako frekvencijske tako i dinamičke stabilnosti je rotirajuća inercija, poznata još kao i rotirajuća masa, koju pružaju sinkroni generatori zbog svoje elektro- mehaničke veze. Rastući udio OIE spojenih preko energetske elektronike na mrežu, prouzrokuje smanjenje rotacijske inercije elektroenergetskog sustava. Fluktuirajuće ponašanje frekvencije na mjestu spoja s mrežom može prouzročiti ozbiljne posljedice u smislu kvara u sustavu a isto tako i kao dodatno opterećenje za obližnje sinkrone generatore. To se izravno odražava na kvalitetu električne energije na mjestu priključka. Norma EN 50160 jasno navodi maksimalna odstupanja frekvencije za mjesto priključka. Za niskonaponske (NN) i srednjenaponske (SN) mreže, srednja vrijednost za vrijeme mjerenja od 10 sekundi, je definirana na ±1 posto (49.5 – 50.5 Hz) tijekom 99.5% tjedna [8].

4.5.3. Flikeri

Treperenje napona (engl. flicker) je vidom primjetno prekidanje izazvano svjetlosnim podražajem s vremenskim kolebanjem svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe. Treperenje je posljedica naponskih kolebanja, a utječe na rasvjetu. Treperenje se definira na sljedeći način: ako u prostoriji boravi 100 ljudi pod jednakim uvjetima i ako se intenzitet svjetla mijenja toliko da to opazi 50 od 100 nazočnih ljudi, kaže se da treperenje ima intenzitet 1. Vrijednost treperenja 1 granična je prema normi EN 50160 i sve vrijednosti veće od 1 smatraju se neprihvatljivim za ljude i uređaje. Kratkotrajno treperenje P_{st} (engl. short time, mjeri se unutar intervala od 10 minuta) osnovni je parametar mjerenog treperenja. Dugotrajno treperenje P_{lt} (engl. long time) računa se na temelju 12 uzastopnih vrijednosti P_{st} prema sljedećoj jednadžbi:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{{P_{sti}}^3}{12}} \tag{4-7}$$

Napon se može kolebati tijekom dana zbog normalnoga ponašanja potrošača kao što je start-stop motora, promjene opterećenja itd ali su i dalje glavni uzrok kolebanja napona industrijski

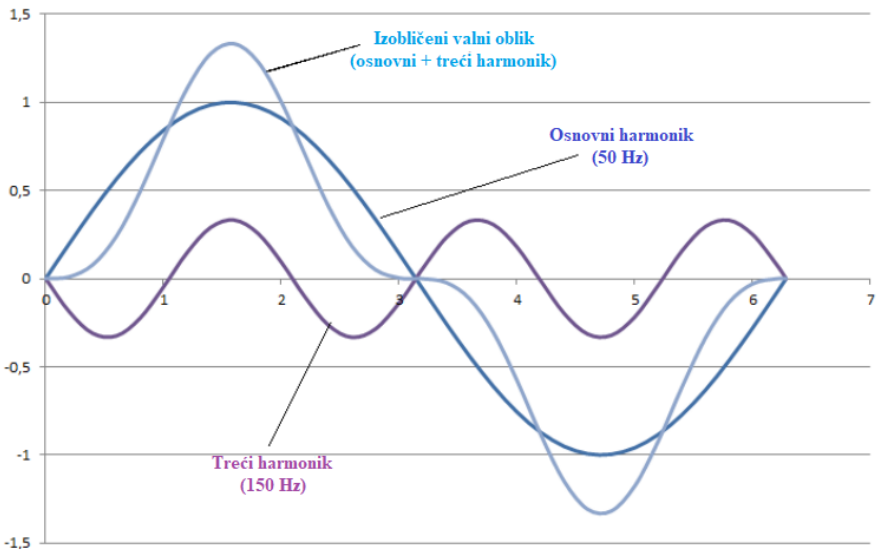
potrošači s velikim elektromotornim pogonima, lučnim pećima, grijačima velikih snaga itd. Naponska kolebanja velikih industrijskih trošila negativno utječu na veliki broj drugih potrošača spojenih na istu električnu mrežu. Da bi potrošač bio osiguran naponom bez smetnji, presudno je smanjiti utjecaj tih kolebanja. U najvećem broju slučaja naponsko kolebanje je ispod 10 % nazivnog napona, te većina eektričnih uređaja nisu osjetljivi na takve promjene napona. Glavni problem koje brze naponske promjene nose sa sobom su treperenje svjetla, kolebanje osvjetljenja električnog izvora svjetla. Ta pojava uzrokuje psihološki učinak koji ovisi o amplitudi, učestalosti ponavljanja kolebanja, o spektre te o duljini trajanja smetnje. U najgorem slučaju treperenje može stvarati probleme ljudima koji boluju od epilepsije. Ove varijacije mogu utjecati i na rotacijske strojeve, ponajviše utječu na dodatno zagrijavanje strojeva kao i na preopterećenje stroja. Budući da postrojenje na morske valove proizvodi napon s velikim razlikama u amplitudi, procjena jačine treperenja je presudna prije uspostavljanja veze između postrojenja i električne mreže [8].

4.5.4. Harmonici

U idealnom slučaju, valni oblici kako napona tako i struje su savršene sinusoide, zbog sve većeg korištenja energetske elektronike i ostalih nelinearnih tereta, dolazi do izobličenja valnih oblika što je i prikazano na primjeru na slici 4.4. Pulsiranje snage postrojenja na morske valove i promjenljiva amplituda kolebanja napona izazivaju u točki zajedničkog spoja (PCC) izobličenje napona mreže. Uz to, radi uporabe mnogo uređaja energetske elektronike imamo i pojavu harmonika. Harmonicima se predstavljaju odstupanja od savršenog sinusnog vala. Oni su sinusoidalne komponente čiji je iznos frekvencije cijeli višekratnik frekvencije osnovnog harmonika. Strujni i naponski savršeni sinusoidalni valovi nemaju izobličenja, a oni valni oblici koji nemaju čisti sinusoidalni valni oblik imaju harmonike koji rezultiraju izobličenjem valnog oblika. Sve periodičke funkcije frekvencije f mogu se rastaviti na zbroj sinusnih valnih oblika frekvencije $h*f$. Slovo h označava red harmonika, cijeli je broj i veći je od 1. Komponenta prvog reda tj. nazivna frekvencija mreže je osnovna i najveća komponenta harmoničkog spektra. Za određivanje stupnja izobličenja, izračunava se koeficijent harmonijskoga izobličenja THD (engl. Total Harmonic Distortion):

$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{40}(U_h)^2}\ \frac{100\ \%}{U_1} \tag{4-8}$$

THD daje zbroj efektivnih vrijednosti napona svih harmoničkih frekvencija, a prikazuje se relativno u odnosu na osnovni naponski harmonik.



Slika 4.4. *Izobličeni valni oblik koji je jednak zbroju osnovnog i trećeg harmonika.*

Prema normi EN 50160 Pri normalnim pogonskim uvjetima 95 % 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona svakog pojedinog višeg harmonika ne smije ni u jednom tjednom intervalu prelaziti vrijednost prikazane u tablici 4.1. Osim toga, ukupni sadržaj viših harmonika (THD) opskrbnog napona, koji se izračunava uz uzimanje u obzir svih viših harmonika do 40. višeg harmonika, ne smije prelaziti vrijednost 8 % Un [8]. Ako harmonici ne zadovoljavaju normu, moguće ih je svesti unutar dozvoljenih granica uporabom odgovarajućih filtera.

Tablica 4.1. *Vrijednosti pojedinih viših harmonika napona na mjestu predaje, u % Un.*

Neparni viši harmonici				Parni viši hramonici	
Koji nisu višekratnik od 3		Koji su višekratnik od 3			
Redni broj harmonika	U_h u % U_n	Redni broj harmonika	U_h u % U_n	Redni broj harmonika	U_h u % U_n
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6-24	0,5
13	3,0	21	0,5	-	-
17	2,0	-	-	-	-
19	1,5	-	-	-	-
23	1,5	-	-	-	-
25	1,5	-	-	-	-

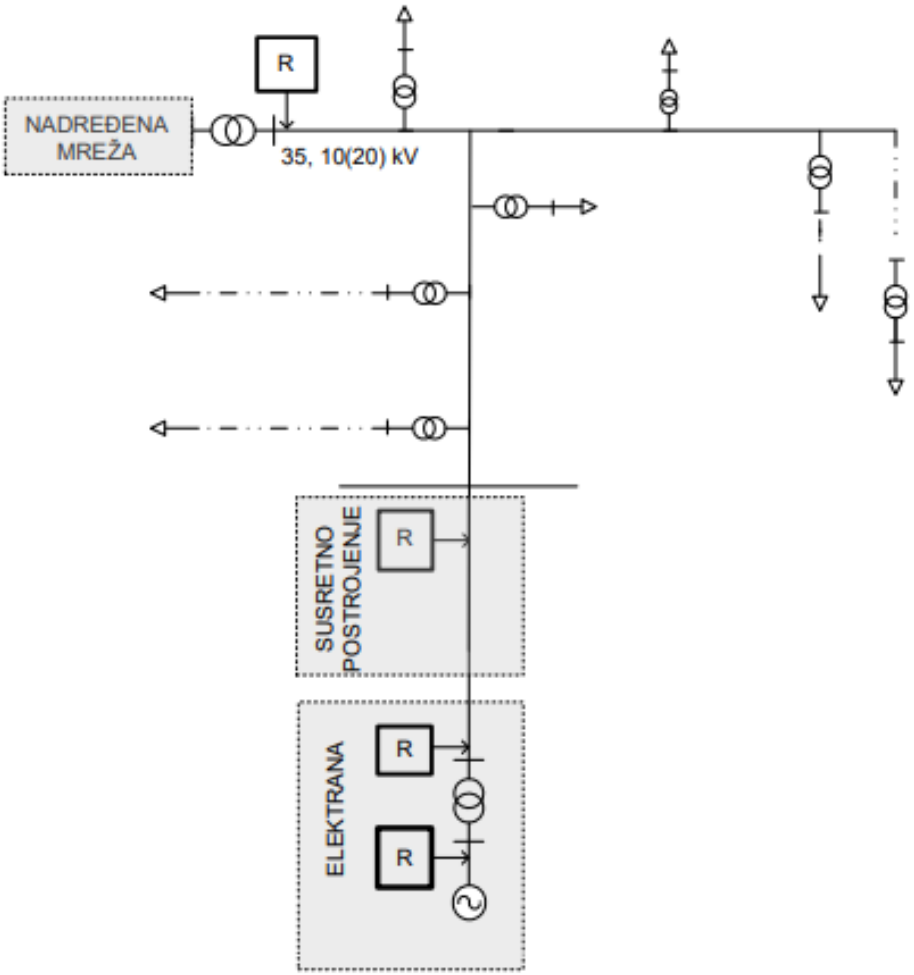
4.6. Zaštita

Obnovljivi izvori s priključkom na distribucijsku mrežu mijenjaju radijalni pogon distribucijske mreže u dvostrano napajani te na taj način znatno utječu na postojeće postavke zaštite. Priključkom OIE s doprinosom struji kratkog spoja dolazi i do promjene veličina kratkog spoja u mreži. Razlog tome je što elektrana i mreža mogu napajati mjesto kvara s istim ili suprotnim smjerom udjela u ukupnoj struji kvara. Prema mrežnim pravilima uvjete paralelnog pogona elektrane i mreže osiguravaju međusobno usklađene zaštite elektrane i mreže na koju je elektrana priključena – (mrežna pravila NN 36/2006- 5.3.5.2. Paralelni pogon s mrežom), a prema istim pravilima u slučaju odstupanja od propisanih uvjeta za paralelni pogon, zaštita mora odvojiti elektranu iz paralelnog pogona [9].

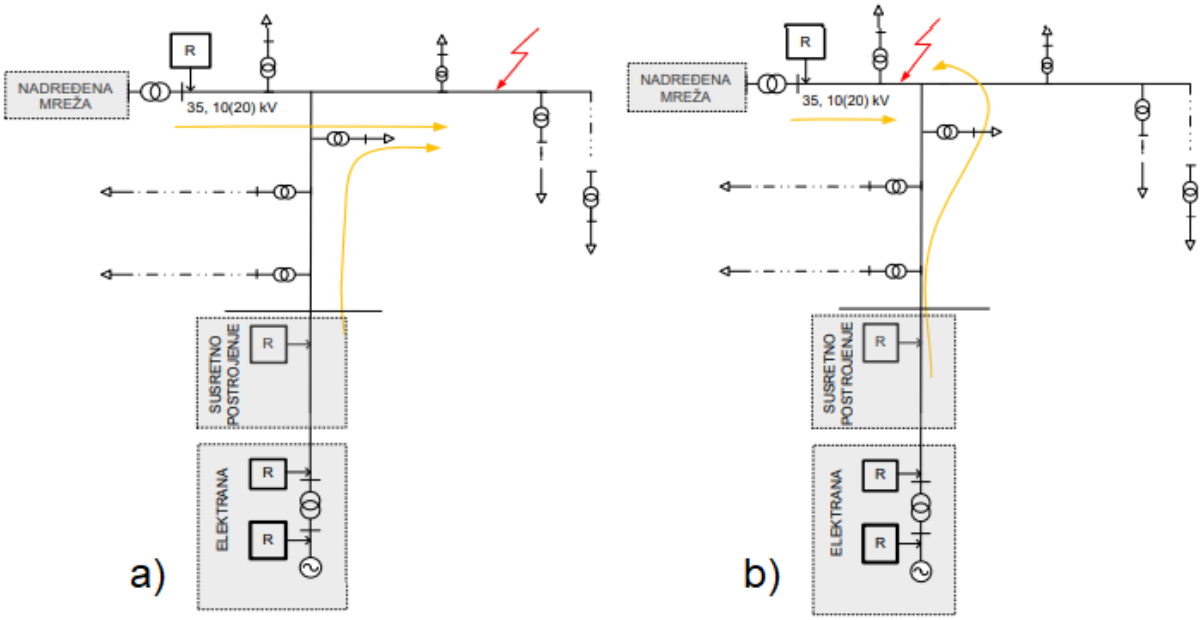
Prema mrežnim pravilima elektrana na OIE mora biti opremljena adekvatnom zaštitom koja osigurava uvjete paralelnog rada s mrežom, a te zaštite su:

- Nadstrujna zaštita:
  zaštita od preopterećenja: neusmjerena I> ; usmjerena I_>
  zaštita od kratkog spoja i zemljospoja: neusmjerena I>>(Io); usmjerena I_>>(Io>)
- Naponska zaštita:
  spora: nadnaponska U> (V>); podnaponska U< (V<)
  brza: nadnaponska U>> (V>>); podnaponska U<< (V<<)
- Frekvencijska zaštita:
  spora: nadfrekvencijska f> ; podfrekvencijska f<
  brza: nadfrekvencijska f>>; podfrekvencijska f<<
- Zaštita od otočnog pogona:
  df/dt (ROCOF); zaštita od pomaka kuta napona $\Delta\theta$; U> (V>) i U< (V<); f> i f< . [9]

Distribucijska mreža i elektrana OIE se spajaju preko takozvanog „susretnog postrojenja“, to je mjesto odvajanja elektrane od mreže, sučelja elektrane i mreže (PCC) te je na slici 4.7. prikazan primjer podešenja zaštite susretnog postrojenja. Ono je opremljeno prekidačem i zaštitama (nadstrujnom i zemljospojnom kao i naponskim i frekvencijskim zaštitama),a na slici 4.5. je i prikazan spoje OIE s mrežom. Priključenjem elektrane s doprinosom struji kratkog spoja dolazi do promjene veličina kratkog spoja u mreži budući da elektrana i mreža mogu napajati mjesto kratkog spoja sa istim smjerom ili suprotnim smjerom udjela u ukupnoj struji, a to je prikazano na slici 4.6.



Slika 4.5. *Načelna shema priključka elektrane OIE na postojeću distribucijsku mrežu.* [9]



Slika 4.6. *Doprinos OIE struji kratkog spoja.* [9]

Na slici 4.6. pod a) je prikazano kako elektrana OIE i mreža napajaju mjesto kratkog spoja sa istim smjerom udjela u ukupnoj struji kratkog spoja (potiskivanje struje kratkog spoja mreže), a pod b) je prikazano kako elektrana OIE i mreža napajaju mjesto kratkog spoja sa suprotnim smjerom udjela u ukupnoj struji kratkog spoja.

Nadstrujna zaštita, (ANSI 50)

I> [In]	t> [s]	I>> [In]	t>> [s]
1,1	5,0	1,25	0,05

Zemljospojna zaštita (ANSI 50N)

I_E> [In]	t_E> [s]
1,25	0,20

Naponske i frekvencijske zaštite

Funkcija	PODEŠENJE	VRIJEME DJELOVANJA
Podnaponska spora U<	90 %	10 s
Podnaponska brzaU<<	85 %	0,1 s
Nadnaponska spora U>	110 %	10 s
Nadnaponska brza U>>	115 %	0,1 s
Podfrekvencijska f<<	47,5 Hz	0,1 s
Nadfrekvencijska f>>	51,5 Hz	0,1 s

Slika 4.7. *Primjer podešenja zaštite susretnog postrojenja.* [10]

Prema slici 4.7. je vidljivo kako sve zaštite nisu jednako brze, a brzina reagiranja zaštite je veća što je odstupanje od nazivne vrijednosti veće. Tako nadstrujna zaštita za vrijednoti 1,1 I_n reagira za 5 sekundi dok u slučaju kada je struja 1,25 I_n reagira za 0,05 sekundi dakle sto puta brže. U slučaju zemljospoja za vrijednost od 1,25 I_n zaptita reagira za 0,2 sekunde. Podnaponska spora zaštita reagira kada napon opadne na 90 % nazivne vrijednosti i odreagira za 10 sekundi, dok brza podnaponska reagira za 0,1 sekundu kada napon opadne na 85 % nazivne vrijednosti. Nadnaponska spora zaštita reagira kada napon poraste na 110 % nazivne vrijednosti i odreagira za 10 sekundi, dok brza nadnaponska reagira za 0,1 sekundu kada napon poraste na 115 % nazivne vrijednosti. Podfrekvencijska zaštita reagira za 0,1 sekundu kada frekvencija padne na 47,5 Hz a isto vrijeme prorade je i za nadfrekvencijsku zaštitu kada frekvencija poraste na 51,5 Hz.

Prema naputcima HEP Tima za elektrane, elaborat podešenja zaštite treba sadržavati: temeljne podatke korisnika mreže, sastavnica elektrane i sučelja s mrežom te kratke spojeve i karakteristične veličine istraživanja a to su:

- Kratki spoj na stezaljkama generatora u elektrani,

• Kratki spoj na 0,4 kV odlaznom vodu vlastite potrošnje elektrane,

• Kratki spoj na SN stezaljkama blok transformatora na sučelju elektrane i mreže,

• Kratki spoj na vodu prema elektrani,

• Kratki spoj na VN sabirnici TS najbližoj elektrani prema nadređenoj mreži,

• Bliski trofazni i dvofazni kratki spoj na niskonaponskoj sabirnici (izvodu) TS najbližoj elektrani prema nadređenoj mreži,

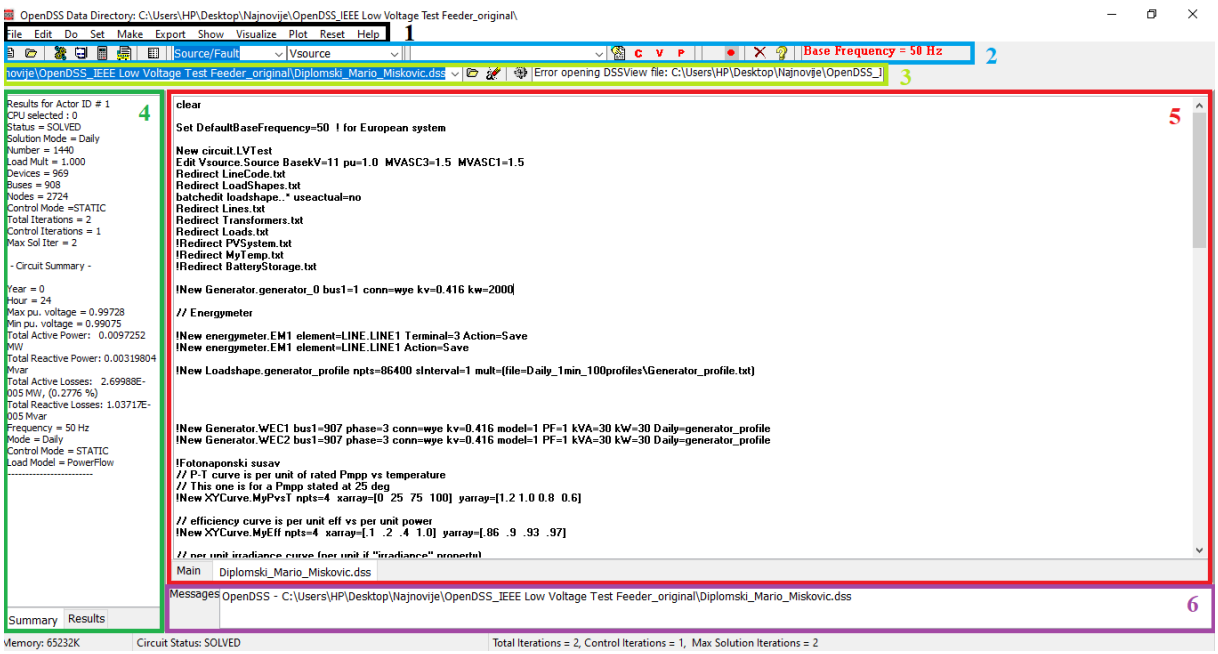
• Udaljeni trofazni i dvofazni kratki spoj na niskonaponskoj sabirnici (izvodu) TS najbližoj elektrani prema nadređenoj mreži,

• Bliski trofazni i dvofazni kratki spoj na vodu –izvodu iz TS nadređene mreže [9].

5. PRAKTIČNI DIO RADA

5.1. OpenDSS programski paket

OpenDSS je skraćenica za (Open Distribution System Simulator). Program je razvijen od strane Electric Power Research Institute, Inc. te služi kao alat za razne simulacije unutar električne distribucijske mreže. Prva riječ imena programa već govori da se radi o programu otvorenoga koda (open-source), te je stoga omogućeno mijenjanje sadržaja po vlastitoj želji i potrebi. Napravljen je tako da se može koristiti kao samostalni izvršni program, te je kao takav dostatan za izvršavanje raznih poslova, ali je također i kompatibilan s drugim programima kao što su C++, Python ili MATLAB. Prvobitno je napravljen za izvršavanje raznih planiranja, analiza i proračuna distribuiranih izvora unutar distribucijske mreže, no kako se program nastavio dalje razvijati tako mu se i proširio spektar primjene, te je danas pogodan i za napredne tehnologije, primjerice pametne mreže. Ponajviše se koristi za planiranje i analizu distribucijske mreže, simulacije fotonaponskih sustava, simulacije vjetroturbina, analizu harmonijskih izobličenja, simulaciju godišnjeg opterećenja, modeliranje spremnika energije i još mnoge druge primjene. Dobivene podatke je moguće izvesti u Excel, gdje je lakša daljnja obrada podataka. Na slici 5.1. je prikazano korisničko sučelje nakon pokretanja programa OpenDSS.



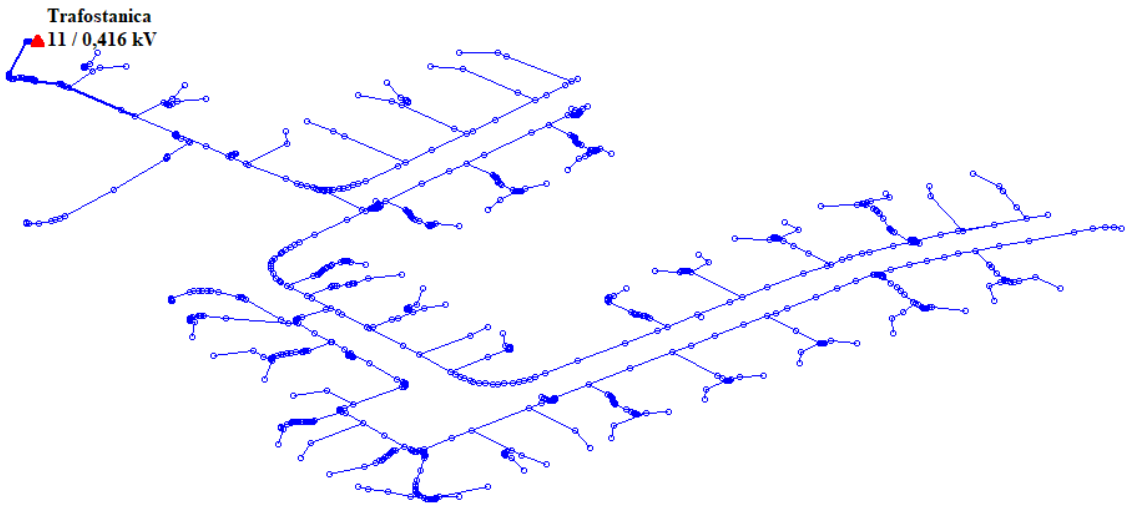
Slika 5.1. *Korisničko sučelje programskog paketa OpenDSS.*

Pod brojem 1 u crnome pravokutniku se nalazi glavni izbornik s naredbama kao što su *File, Edit, Show, Plot* te nam one služe za otvaranje, spremanje, obrađivanje i prikaz elemenata

skripte. Naredbe New Script Window, Open a script file, Do Command, Solve se nalaze u plavom pravokutniku pod brojem 2 i služe za izvršavanje skripte kao i za iščitavanje rezultata. Naredbe koje se nalaze u pravokutniku pod brojem 3 su tu za brzo učitavanje nekih drugih skripti kao i za prikaz zadnje pogreške. Pod brojevima 4 i 6 su prostori koji služe za poruke, rezultate te sažetke samoga programa, također u njih nije moguć unos nikakvih podataka. U crvenom pravokutniku pod brojem 5 se nalazi najvažniji dio, a to je tekstualno sučelje. U njemu se pomoću linija koda unose elementi zajedno s njihovim parametrima. U programu je moguće raditi analize tokova snage, harmonijsku analizu, analizu učinkovitosti itd.

5.2. IEEE niskonaponski testni izvod

Modificirani IEEE niskonaponski testni izvod (engl. IEEE Low Voltage Test Feeder) je naziv gotovog modela koji će se koristiti u daljnjem dijelu rada za simulaciju raznih testnih slučajeva. Kod proučavanja i planiranja distribucijskih mreža sve je očiglednije da statičke simulacije protoka snage nisu dostatne za razumijevanje dinamičkoga ponašanja mreže te je stoga nužno izvršiti dinamičke, to jest vremenski ovisne simulacije. Kako bi se istinski razumjelo ponašanje koordiniranih regulatora, kompenzacija, pohrana električne energije i fotonaponskih elemenata, nužno je u simulacije uvesti element vremena. Testni model je definiran s nazivnim naponom od 416 V (linijski) koji je tipičan u niskonaponskoj distribucijskoj mreži u Europi, s nazivnom frekvencijom od 50 Hz. Riječ je o radijalnoj mreži koja je spojena sa srednjim naponom (SN) preko transformatora u transformatorskoj stanici koji spušta napon s 11 kV na 416 V. Jednopolna shema je prikazana na slici 5.2. koja se dobije plotanjem *Buscoords.txt* datoteke u programu OpenDSS.



Slika 5.2. *Jednopolna shema IEEE niskonaponskog testnog izvoda.*

Srednjenaponski sustav je modeliran kao naponski izvor s impedancijom, čiji su podaci zadani u *Generators.txt* datoteci ali su za potrebe simulacije izmijenjeni, na slijedeće vrijednosti:

Edit Vsource.Source BasekV=11 pu=1.0 MVASC3=1.5 MVASC1=1.5

Edit Vsouce je je naredba za uređivanje naponskog izvora to jest krute mreže, nakon čega slijedi (bez razmaka) točka i ime mreže koja se želi uređivati. Obavezno je stavljanje minimalno jednog razmaka između svake pojedine naredbe ili parametra, a stavljanjem više razmaka nema utjecaja na kod, ali može uveliko pridonijeti boljem pregledu koda.

BasekV=11 je ostao isti a odnosi se na bazni napon referentnog čvora, dok je vrijednost napona u odnosu na bazni napon stavljena na *pu=1.0* dok je prije iznosila 1.05 p.u. Isto tako je promijenjena snaga trofaznog kratkog spoja *MVASC3=1.5* odnosno jednofaznoga kratkog spoja *MVASC1=1.5* s početnih 2 MVA na krajnji 1,5 MVA za obadva parametra.

Trofazni transformator koji se nalazi u trafostanici je nazivne snage 0,8 MVA s nazivnim naponima 11/0,416 kV u spoju trokut/uzemljena zvijezda, a podaci su dani u *Transformer.csv* datoteci.

Vodovi su definirani u dvije datoteke, *LinesCode.txt* i *Lines.txt* ,a ukupan broj vodova je 905.

New LineCode.2c_.007 nphases=3 R1=3.97 X1=0.099 R0=3.97 X0=0.099 C1=0 C0=0 Units=km

U prvoj datoteci je dodijeljeno ime za parametriranje novoga voda *LineCode.2c_.007* zatim su dani podatci o broju faza *nphases*, vrijednosti jediničnog djelatnog otpora *R1,* jedinične induktivne reaktancije *X1,* te mjerna jedinica duljine *Units=km*

New Line.LINE1 Bus1=1 Bus2=2 phases=3 Linecode=4c_70 Length=1.098 Units=m

U drugoj datoteci je dodijeljeno ime voda *New Line.LINE1,* zatim sabirnice na koje je spojen *Bus1=1 Bus2=2* , ime na koje se parametre voda poziva *Linecode=4c_70*, kao i duljina *Length*.

Opterećenja su modelirana kao konstantna PQ trošila i također su poput vodova definirana pomoću dvije datoteke *Loads.txt* i *LoadShapes.txt*.

New Load.LOAD1 Phases=1 Bus1=34.1 kV=0.23 kW=1 PF=0.95 Daily=Shape_1

U prvoj datoteci mu je definirano ime, broj faza, kao i *Bus1=34.1* što označava sabirnicu na koju je spojen i točno na koju fazu, u ovom slučaju na prvu fazu. Definiran je nazivni fazni napon u *kV*, nazivna snaga opterećenja *kW*, faktor snage *PF* te dnevni profil opterećenja *Daily=Shape_1*. Svako je opterećenje povezano sa svojim jedinstvenim profilom dnevnog opterećenja pomoću naredbe *LoadShape*.

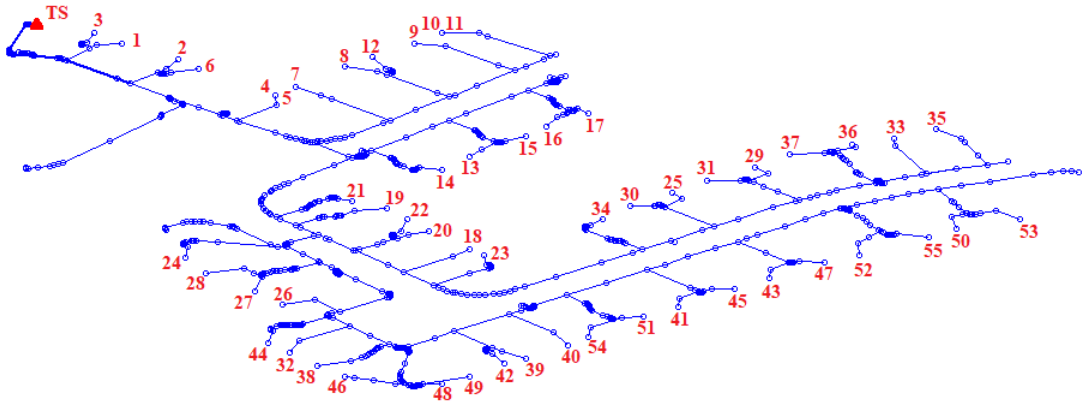
New Loadshape.Shape_1 npts=1440 minterval=1 mult=(file=Daily_1min_100profiles\Load_profile_1.txt) useactual=true

U drugoj datoteci je definirano ime profila opterećenja, *npts=1440* predstavlja broj uzoraka, *minterval=1* interval uzrokovanja koji je podešen na jednu minutu, *mult* je naredba koja će vrijednosti u rasponu od 0 do 1 iz datoteke *Daily_1min_100profiles\Load_profile_1.txt* množiti s nazivnom snagom pripadajućeg opterećenja, kako bi se dobilo promjenjivo opterećenje tijekom simulacije.

5.3. Vremenska simulacija distribucijskog sustava s postrojenjem na morske valove, fotonaponskim sustavima i baterijskim sustavom pohrane energije

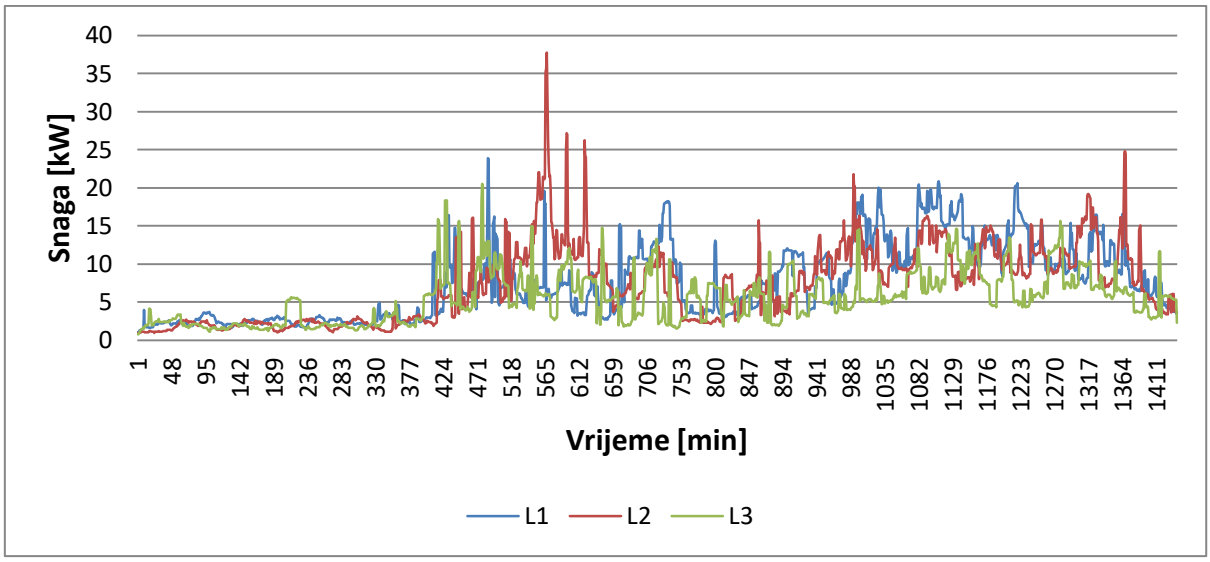
5.3.1. Prvi studijski slučaj -pasivna mreža

U prvom studijskom slučaju je provedena jednodnevna dinamička simulacija nad modelom IEEE niskonaponskog testnog izvoda koji se sastoji od potrošača s različitim vremenski promjenjivim profilima potrošnje bez distribuiranih izvora. Promatrati će se tokovi radne i jalove snage na početku izvoda kao i razina napona na već spomenutom mjestu. Uz to će se pratiti i naponske prilike na kraju izvoda iz razloga što je najudaljeniji od točke napajanja i za očekivati su najveći padovi napona baš na tome mjestu. Na slici 5.3. je prikazana raspodjela potrošača unutar IEEE niskonaponskog testnog izvoda.



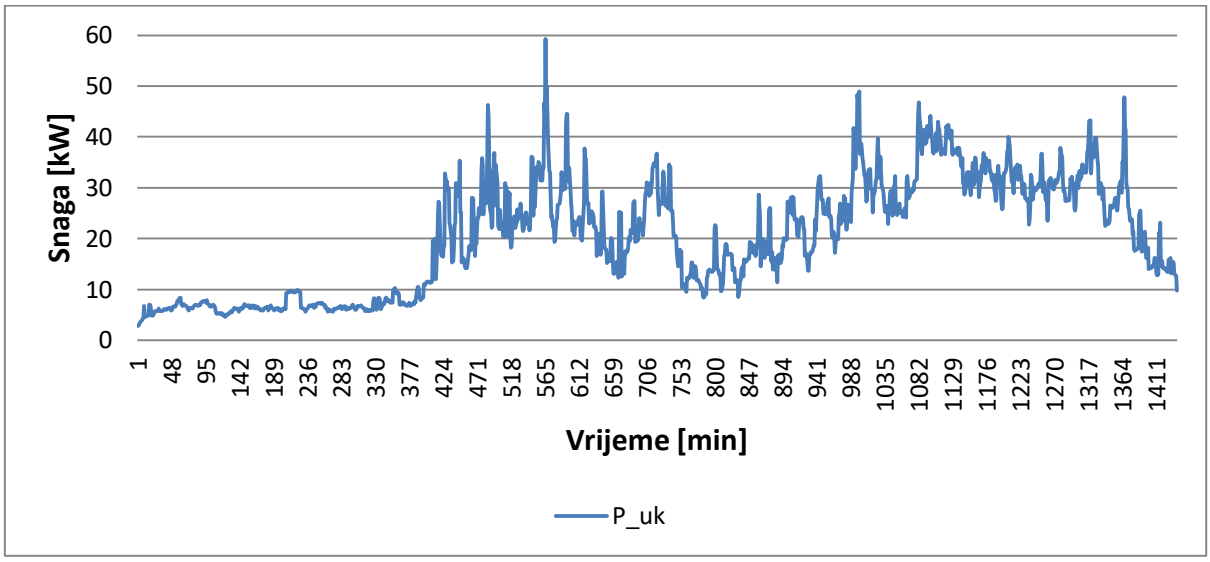
Slika 5.3. *Raspodjela 55 potrošača unutar distribucijske mreže.*

Na slici 5.4. je prikazan tok radne snage po fazama na početku izvoda za prvi slučaj.



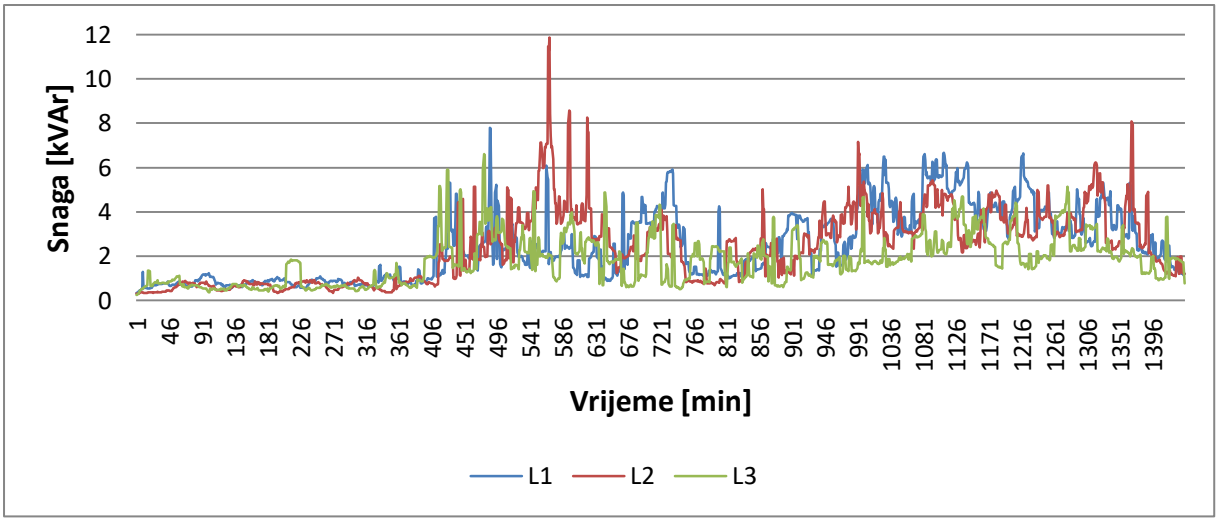
Slika 5.4. *Tok radne snage po fazama na početku izvoda.*

Prema slici 5.4. je jasno vidljiva nesimetrija u distribucijskoj mreži, kao i to da je L2 faza najviše opterećena. Vršno opterećenje faze L2 iznosi 37,7 kW, faze L1 23,9 kW a faze L3 20,5 kW. Na slici 5.5. je prikazan tok ukupne radne snage na početku izvoda za prvi slučaj.



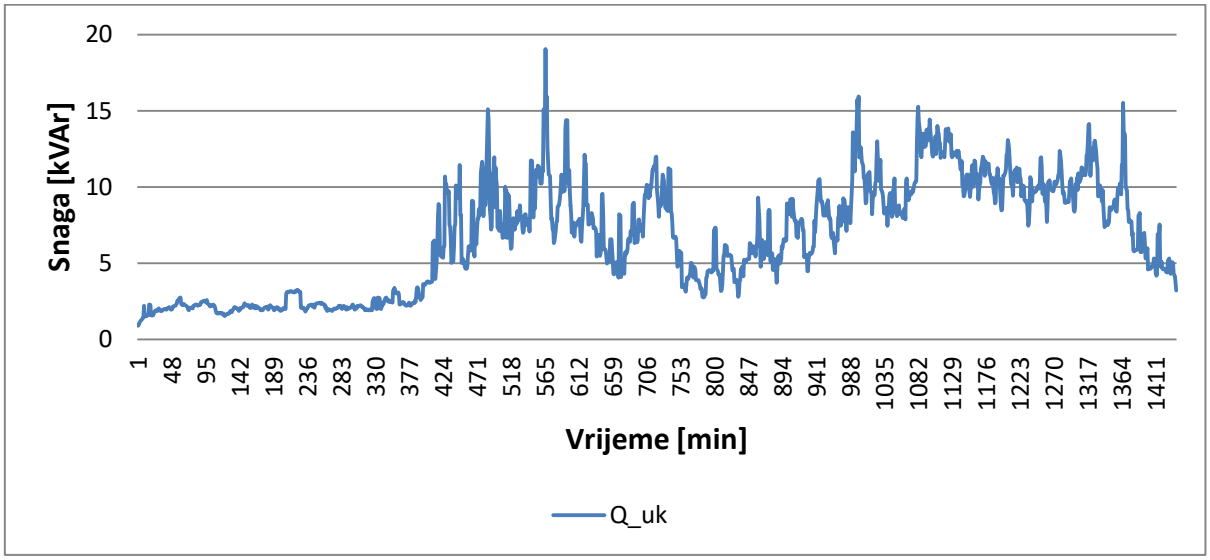
Slika 4.5. *Tok ukupne radne snage na početku izvoda.*

Prema slici 5.5. iz ukupnog toka radne snage se lijepo vidi promjenjivost opterećenja tijekom dana to jest vidi se dnevni dijagram opterećenja. Do nekih 6h ujutro opterećenje ne prelazi vrijednost od 10 kW, da bi zatim krenulo rasti i jako oscilirati te postiglo svoj maksimum u 9:26 h koji iznosi 59,3 kW. Na slici 5.6. je prikazan tok jalove snage po fazama na početku izvoda za prvi slučaj.



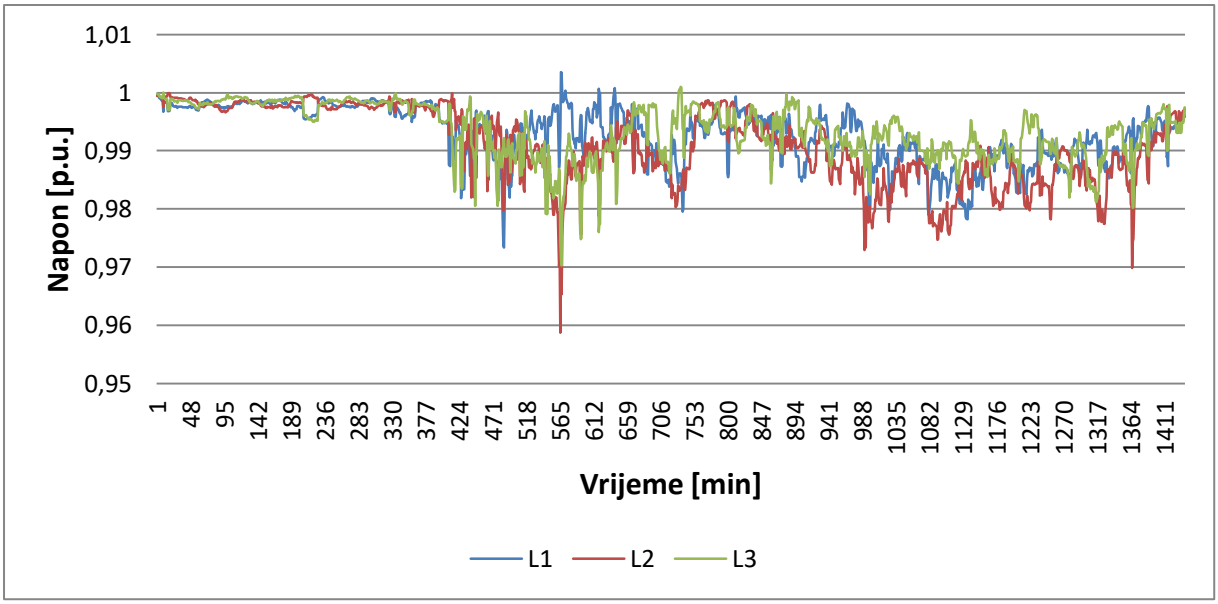
Slika 5.6. *Tok jalove snage po fazama na početku izvoda.*

Kako kod radne tako je i kod jalove snage vidljiva nesimetrija. Vršna jalova snaga koju trošila faze L1 zahtijevaju iznosi 7,8 kVAr, faze L2 11,9 kVAr, a faze L3 6,6 kVAr . Na slici 5.7. je prikazan tok ukupne jalove snage na početku izvoda za prvi slučaj.



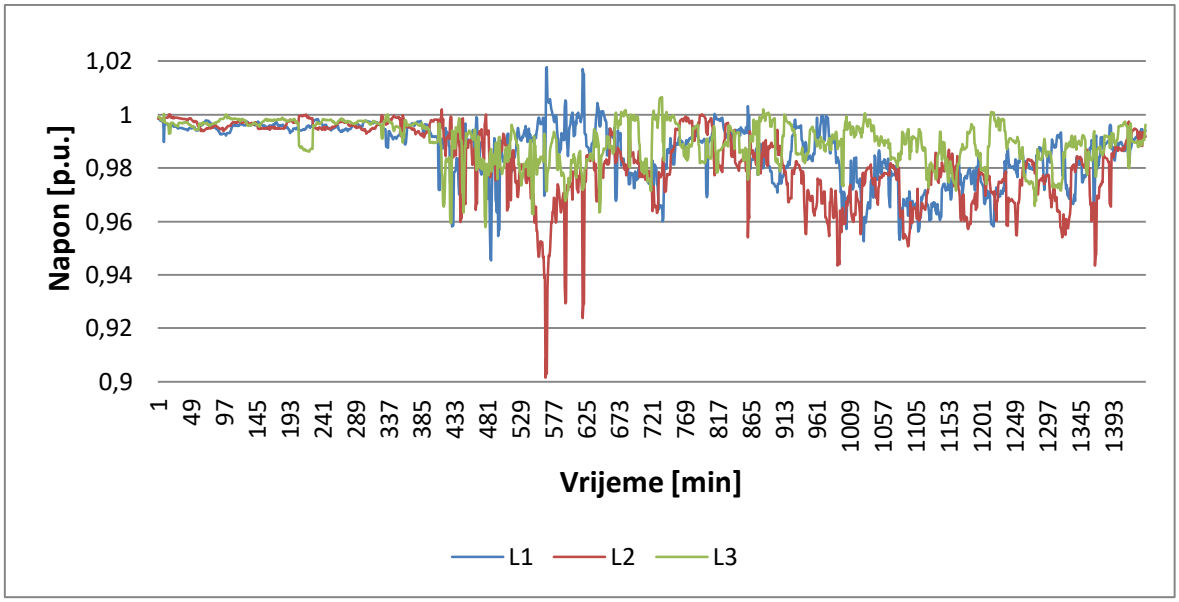
Slika 5.7. *Tok ukupne jalove snage na početku izvoda.*

Prema slici 5.7. maksimalna jalova snaga koju kruta mreža mora isporučiti da bi zadovoljila potrebe trošila na niskonaponskoj strani iznosi 19 kVAr. Kao i što je bilo za očekivati, maksimalna jalova snaga je postignuta u istom trenutku kada je i maksimalna radna snaga, a to je u 9:26 h. Tok jalove snage je posljedica konstantnog faktora snage potrošača od 0,95 ind. Na slici 5.8. su prikazane naponske prilike za svaku fazu na početku izvoda za prvi slučaj.



Slika 5.8. *Napon na početku izvoda.*

Prema slici 5.8. napon na početku izvoda je jako stabilan iz razloga što je električki najbliži krutoj mreži koja nastoji održati napon na vrijednosti od 1 p.u. U najgorem slučaju je napon u fazi L2 pao na 0.958 p.u. u trenutku kada je najveće opterećenje u fazi L2 od 37,7 kW. Na slici 5.9. su prikazane naponske prilike za svaku fazu na kraju izvoda za prvi slučaj.



Slika 5.9. *Napon na kraju izvoda.*

Prema slici 5.9. napon na kraju izvoda je na samoj granici dozvoljenoga jer je u trenutku najvećeg opterećenja u fazi L2 vrijednost napona samo 0.9 p.u. što znači na donjoj granici ispod koje ne smije ići. I za očekivati je da će na kraju izvoda napona biti nešto niži jer je električki najudaljeniji od krute mreže koja održava napon stabilnim.

5.3.2. Drugi studijski slučaj- integracija postrojenja na morske valove

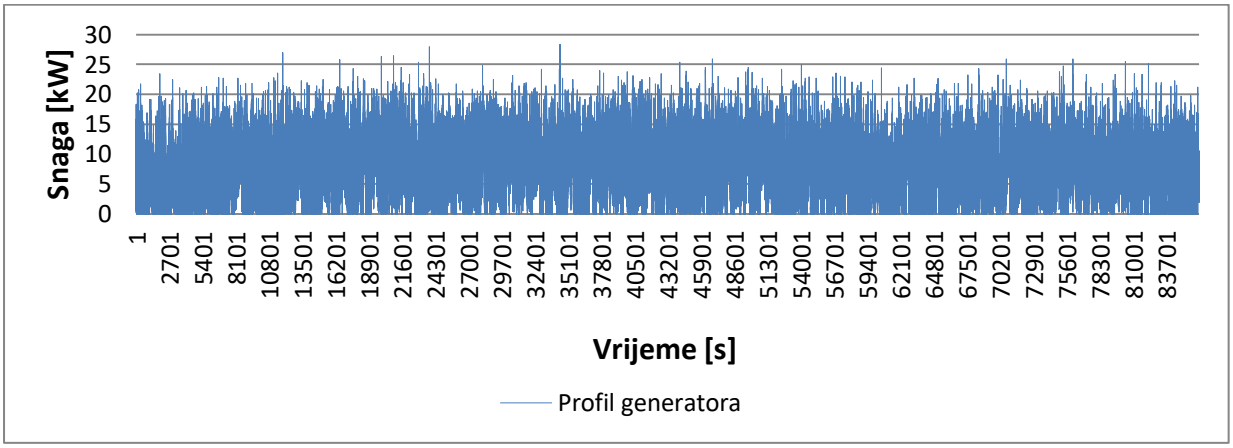
U drugom testnom slučaju su u modificirani model IEEE niskonaponskog testnog izvoda distribucijske mreže integrirana dva postrojenja na morske valove takozvana WEC-a (engl. Wave energy converter), koja nisu kao pravo postrojenje sa sveučilišta Uppsala spojena na 11 kV. Spojeni su na kraju niskonaponskog izvoda preko dodatnog voda od 100 m kojega je trebalo dodati u skriptu s vodovima zajedno sa dodatnom sabirnicom na koju će se priključiti dva WEC-a, što je učinjeno korištenjem naredbe: *New Line.LINE906 Bus1=881 Bus2=907 phases=3 Linecode=4c_.06 Length=100 Units=m*

New Generator.WEC1 bus1=907 phase=3 conn=wye kv=0.416 model=1 PF=1 kVA=30 kW=30 Daily=generator_profile

New Generator je naredba za definiranje novog generatora, *WEC1* i *WEC2* su imena dva postrojenja na morske valove koji imaju identične parametre, *bus1=907* označava sabirnicu na koju su spojeni, *phase=3* broj faza, *conn=wye vrstu* spoja namota (trokut/uzemljena zvijezda), *kv=0.416* nazivni napon, *model=1* označava da generator injektira konstantnu radnu snagu pri određenom faktoru snage, koji u ovo slučaju iznosi jedan *PF=1*, *kVA=30* je nazivna prividna snaga dok je *kW=30* nazivna radna snaga. *Daily=generator_profile* predstavlja dnevni profil proizvodnje koji je definiran u *LoadShape.txt* datoteci:

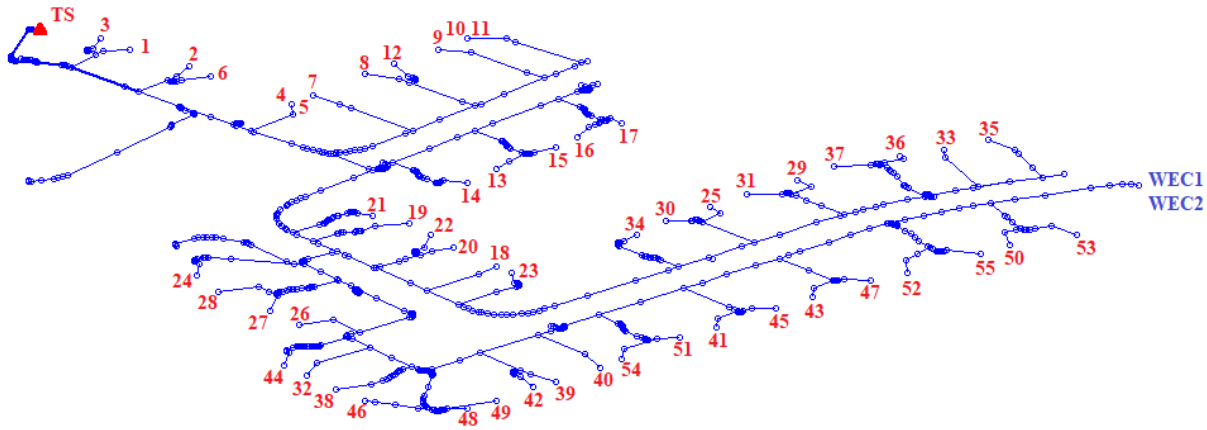
New Loadshape.generator_profile npts=86400 sInterval=1 mult=(file=Daily_1min_100profiles\Generator_profile.txt) useactual=true

Na slici 5.10. je prikazan stvarni profil ukupne izlazne snage postrojenja na morske valove s lokacije Lysekil (Švedska). Radi se o sekundnim mjerenjima te je iz grafa vidljivo da se radi o izrazito vremenski promjenjivoj proizvodnji.



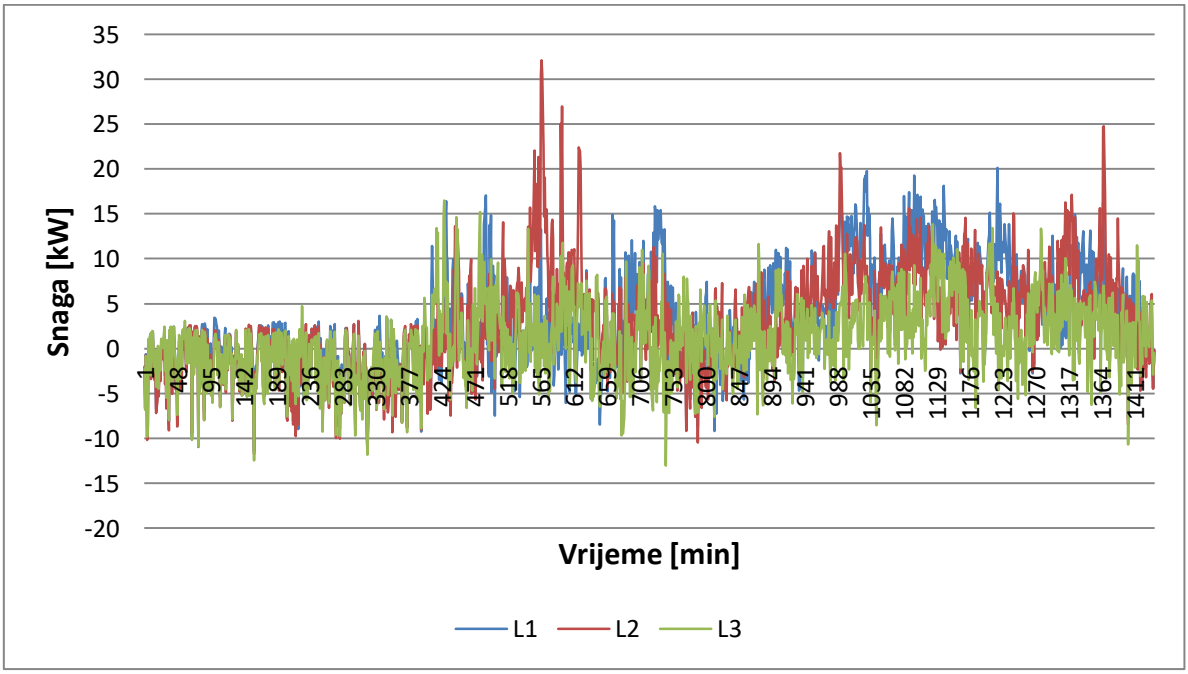
Slika 5.10. *Profil generatora.*

Sastoji se od 86400 sekundnih uzoraka *npts=86400* dok je interval uzrokovanja podešen na jednu sekundu *sInterval=1*, *mult=* povlači podatke iz *Generator_profile.txt* datoteke čije se vrijednosti kreću između 0 i 1 te ih potom množi s nazivnom snagom generatora kako bi se dobila vrijednost izlazne snage WEC-a u svakom trenutku. Na slici 5.11. je prikazana raspodjela potrošača unutar IEEE niskonaponskog testnog izvoda s dodatna dva integrirana WEC-a.



Slika 5.11. *Raspodjela 55 potrošača unutar distribucijske mreže s 2 integrirana WEC-a.*

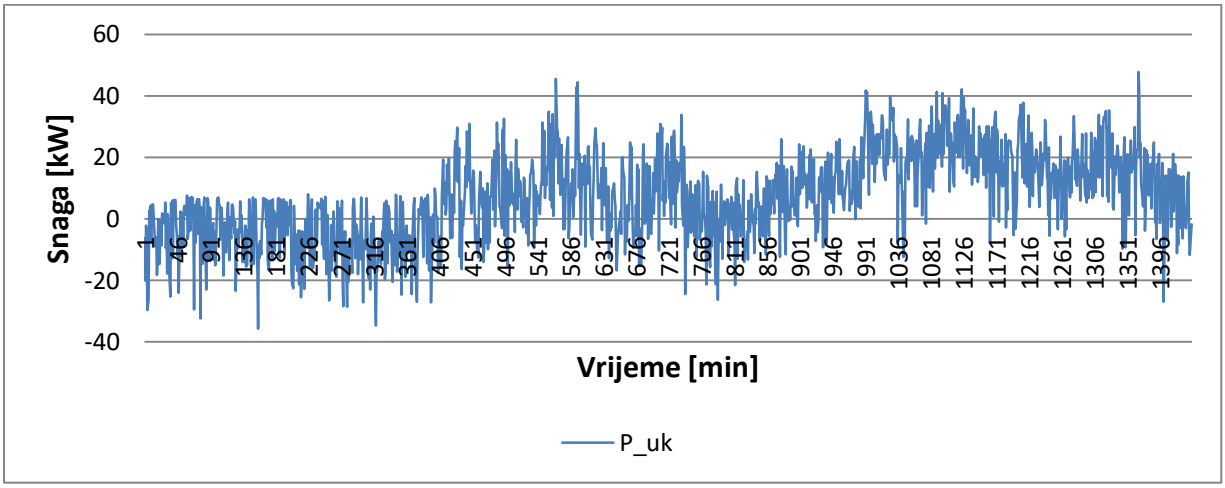
Na slici 5.12. je prikazan tok radne snage po fazama na početku izvoda za drugi slučaj.



. **Slika 5.12.** *Tok radne snage po fazama na početku izvoda.*

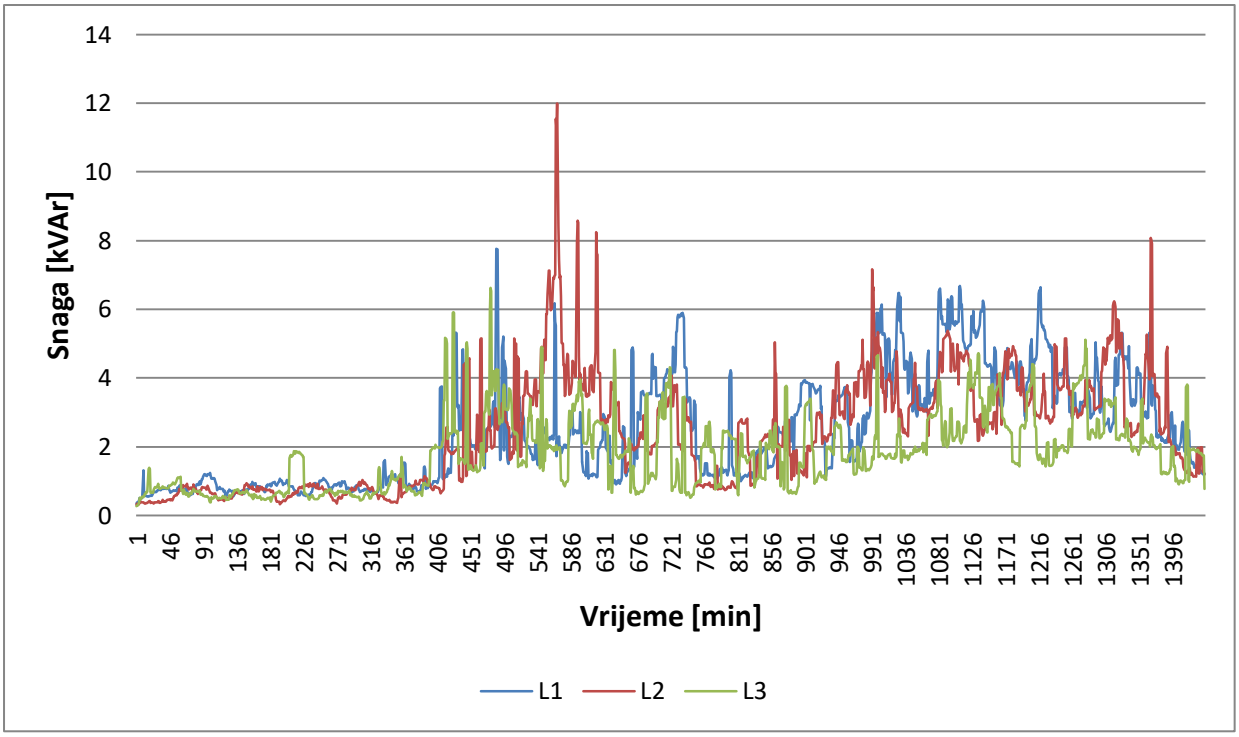
Prema slici 5.12. je evidentno da su se tokovi snage iz krute mreže prema distribucijskoj mreži smanjili, štoviše u nekim periodima su se tokovi snage promijenili te sada imamo i uzlazne tokove snaga, iz distribucijske mreže prema krutoj mreži. Integracijom dva

postrojenja na morske valove je IEEE niskonaponski testni izvod distribucijske mreže prešao iz pasivne u aktivnu mrežu. Predznak minus, govori da se radi o uzlaznom toku, i njegova maksimalna vrijednost iznosi 13 kW, dok se maksimalno opterećenje po fazi smanjilo s 37,7 kW na 32 kW u fazi L2. Na slici 5.13. je prikazan ukupni tok radne snage na početku izvoda za drugi slučaj.



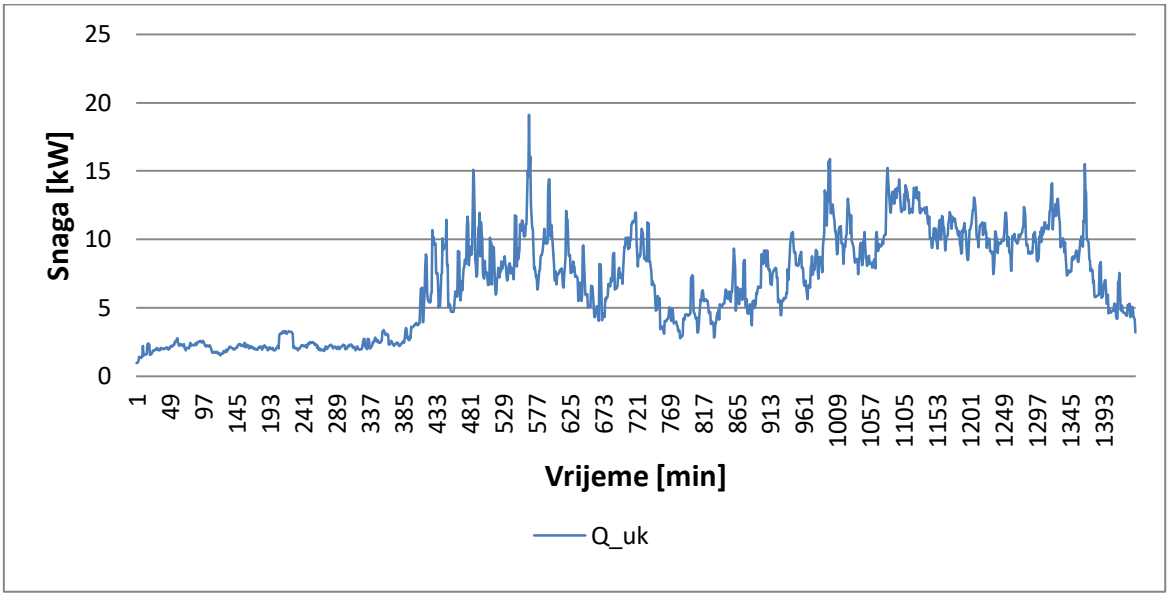
Slika 5.13. *Tok ukupne radne snage na početku izvoda.*

Prema slici 5.13. integracijom distribuirane proizvodnje je došlo do pomicanja cijelog grafa ukupne radne snage prema dolje, te je sada vrijednost maksimalnog opterećenja na početku izvoda 47,8 kW. Pomicanjem grafa prema dolje su se pojavili i uzlazni tokovi snaga, čiji je maksimalni iznos 35,6 kW, znači da sada distribucijska mreža injektira snagu u nadređenu mrežu. Na slici 5.14. je prikazan tok jalove snage po fazama na početku izvoda za drugi slučaj.



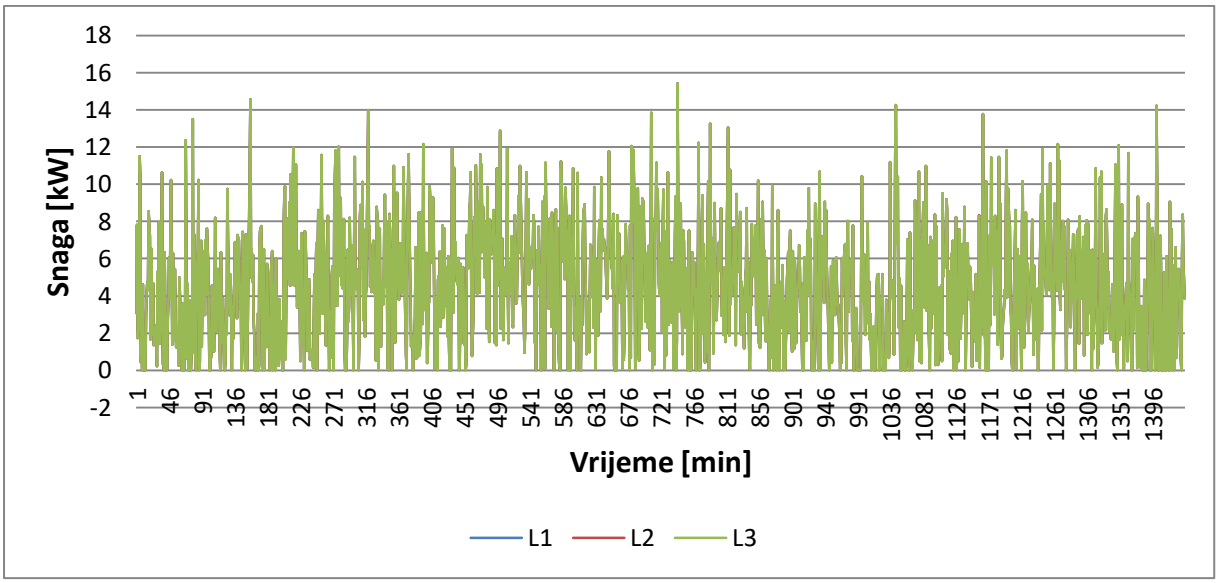
Slika 5.14. *Tok jalove snage po fazama na početku izvoda.*

Prema slici 5.14. tok jalove snage na početku izvoda se nije nimalo promijenio te je istog iznosa kao za prvi testni slučaj. Razlog tomu je što postrojenja na morske valove rade s faktorom snage 1, te proizvode samo radnu snagu, te tako sva potrebna jalova energija za potrošače i dalje mora doći iz krute mreže preko početka izvoda do njih. Kako se nisu promijenili tokovi jalove snage po fazama, tako je i ukupan tok jalove snage na početku izvoda ostao identičan kao u prvom testnom slučaju, što se na slici 5.15. jasno i vidi.



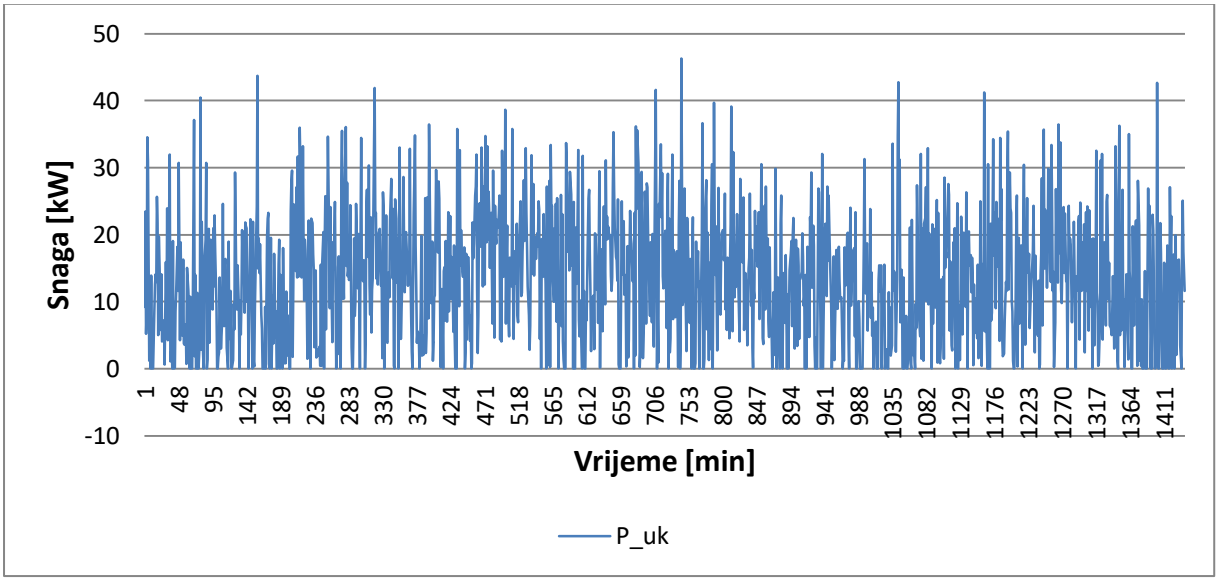
Slika 5.15. *Tok ukupne jalove snage na početku izvoda.*

Na slici 5.16. je prikazan tok radne snage po fazama na kraju izvoda za drugi slučaj.



Slika 4.16. *Tok radne snage po fazama na kraju izvoda.*

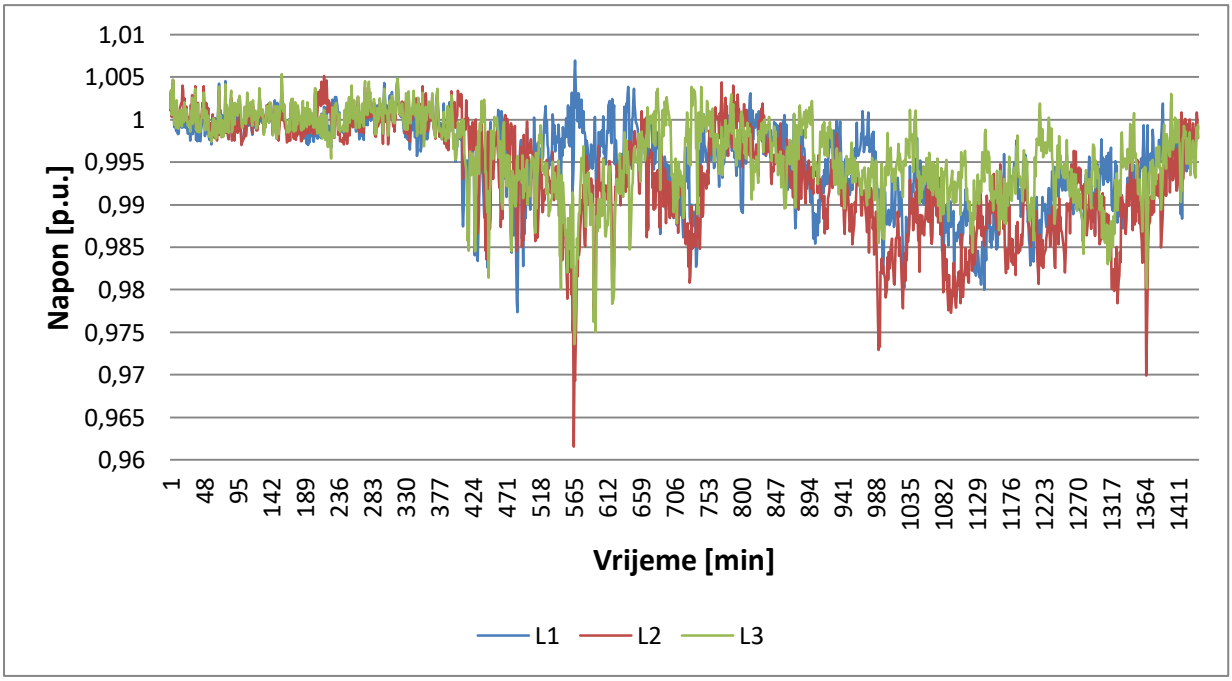
Prema slici 5.16. na kraju izvoda su snage simetrične, i jednake su izlaznim snagama pojedinih faza postrojenja na morske valove. Maksimalna izlazna snaga je 15,4 kW, a iz grafa je vidljivo kako se radi o jako promjenjivoj proizvodnji, koja varira od 0 do 15,4 kW po fazi. Na slici 5.17. je prikazan ukupni tok radne snage na kraju izvoda.



Slika 5.17. *Tok ukupne radne snage na kraju izvoda.*

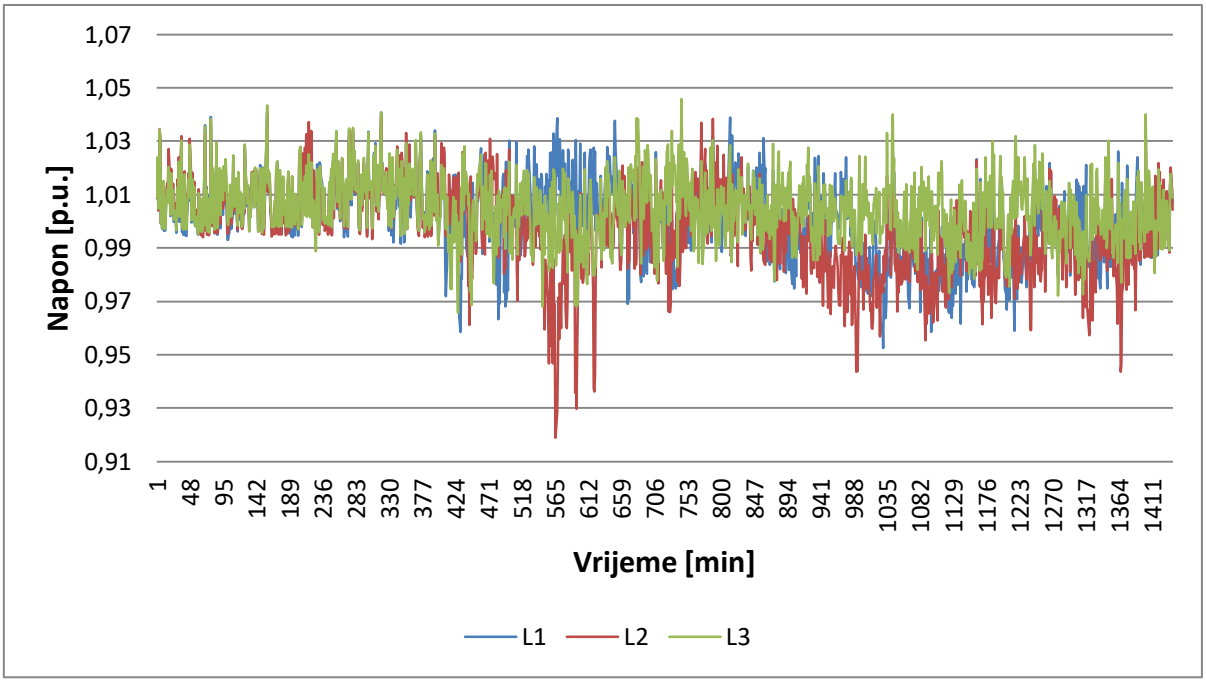
Kako se tok ukupne radne snage dobije zbrojem tokova snaga pojedinih faza, čiji iznosi su izrazito promjenjivi tako je i ukupni tok radne snage izrazito promjenjiv. Najviša vrijednost ukupnog toka radne snage na kraju izvoda je 46,3 kW dok je srednja vrijednost tijekom 1440

minute simulacije iznosila 13,4 kW. Na slici 5.18. su prikazane naponske prilike za svaku fazu na početku izvoda za drugi slučaj.



Slika 5.18. *Napon na početku izvoda.*

Prema slici 5.18. napon na početku izvoda je nešto izdignutiji nego u slučaju pasivne mreže, ali ne previše jer kruta mreža ga nastoji držati na 1 p.u. Naponi su nešto izdignutiji iz razloga što dva WEC-a injektiraju radnu snagu u mrežu te samim time podižu razinu napona unutar distribucijske mreže. Na slici 5.19. su prikazane naponske prilike za svaku fazu na kraju izvoda za drugi slučaj.

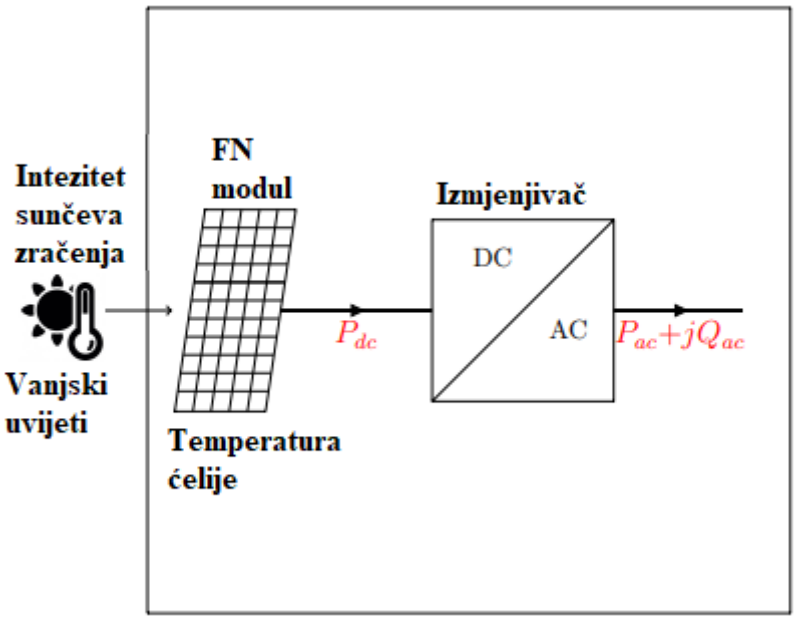


Slika 5.19. *Napon na kraju izvoda.*

Prema slici 5.19. napon na kraju izvoda to jest na PCC-u postrojenja na morske valove je značajno povišen u odnosu na stanje prije integracije distribuiranog izvora. Sada je vrijednost minimalnog napona približno 0.92 p.u. dok je prije bila na granici dopuštenoga od 0.9 p.u. Integracijom ova dva WEC-a na kraj izvoda su naponi u svim fazama pomaknuti za približno 0.02 p.u. prema gore po y-osi, no to ovisi o istovremenosti proizvodnje i potrošnje.

5.3.3. Treći studijski slučaj- integracija postrojenja na morske valove i fotonaponskih sustava

U trećem testnom slučaju je uz 2 WEC-a dodano i 12 fotonaponskih sustava na IEEE niskonaponski testni izvod distribucijske mreže. Da bi se u programu OpenDSS koristili fotonaponski sustavi, iste je potrebno najprije u *PVSystem.txt* datoteci definirati. Na slici 5.20. je prikazana pojednostavljena skica FN sustava, s ulaznim podacima intenziteta sunčeva zračenja te temperaturom ćelije.



Slika 5.20. *Skica FN sustava.*

New PVSystem.PV11 phases=1 Bus1=289.1 kV=0.24 irrad=1 Pmpp=3.6 kVA=3.6 temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1 effcurve=Myeff P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad TDaily=MyTemp

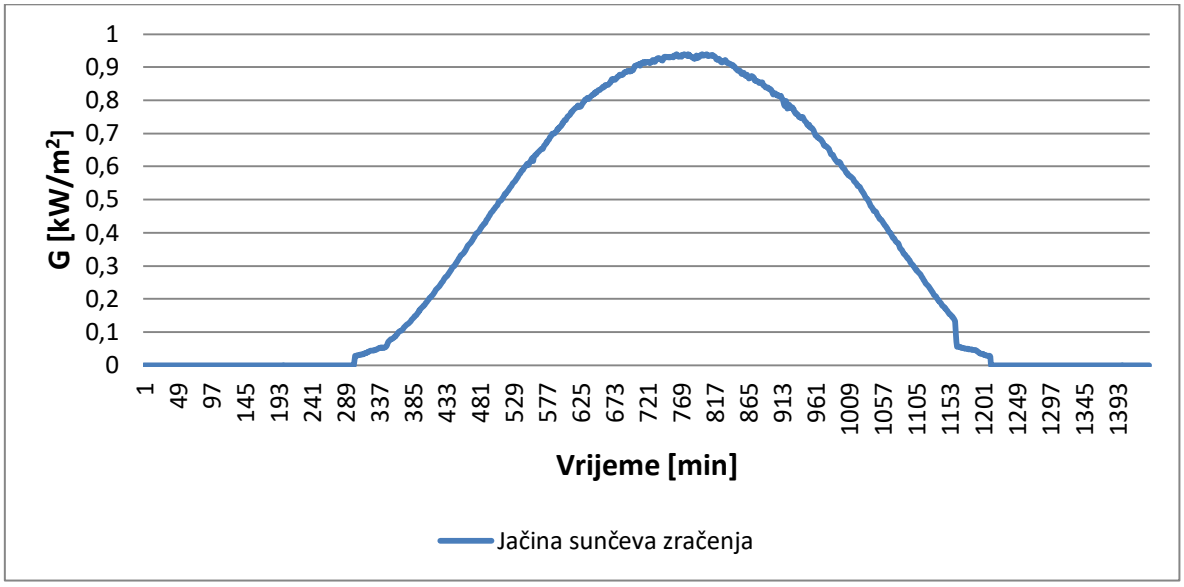
New PVSystem je naredba za definiranje novog fotonaponskog sustava, *phases=1* je oznaka da se radi o jednofaznom sustavu, *Bus1=289.1* označuje na koju sabirnicu i na koju točno fazu je spojen, *kV=0.24* označava nazivni fazni napon, *irrad=1* da su parametri dani za jačinu sunčeva zračenja od 1 kW/m^2, *Pmpp=3.6* instalirana snaga fotonaponskog polja, *kVA=3.6* nazivna izlazna snaga pretvarača, *temperature=25* da su parametri dani za temperaturu ćelije od 25 °C, *PF=1* faktor snage iznosi 1, *%cutin=0.1* postotak nazivne snage izmjenjivača u kVA potrebna na istosmjernoj strani da bi izmjenjivač bio u pogonu, *%cutout=0.1* postotak nazivne snage izmjenjivača u kVA na istosmjernoj strani ispod kojeg izmjenjivač više nije u pogonu, *effcurve=Myeff* se odnosi na učinkovitost invertera u odnosu na snagu istosmjerne strane, te ga je također nužno definirati, *P-TCurve=MyPvsT* predstavlja korekcijski faktor snage istosmjerne strane FN polja po jedinici Pmpp kao funkciju temperature FN polja, također ga je nužno prvo definirati, *Daily=MyIrrad* se poziva na dnevnu jakost sunčeva zračenja, a *TDaily=MyTemp* na dnevnu temperaturu ćelije.

U datoteci *LoadShapes.txt* se definiraju sljedeća dva parametra:

New Loadshape.MyIrrad npts=1440 minterval=1 mult=(file=MyIrrad.txt) useactual=true

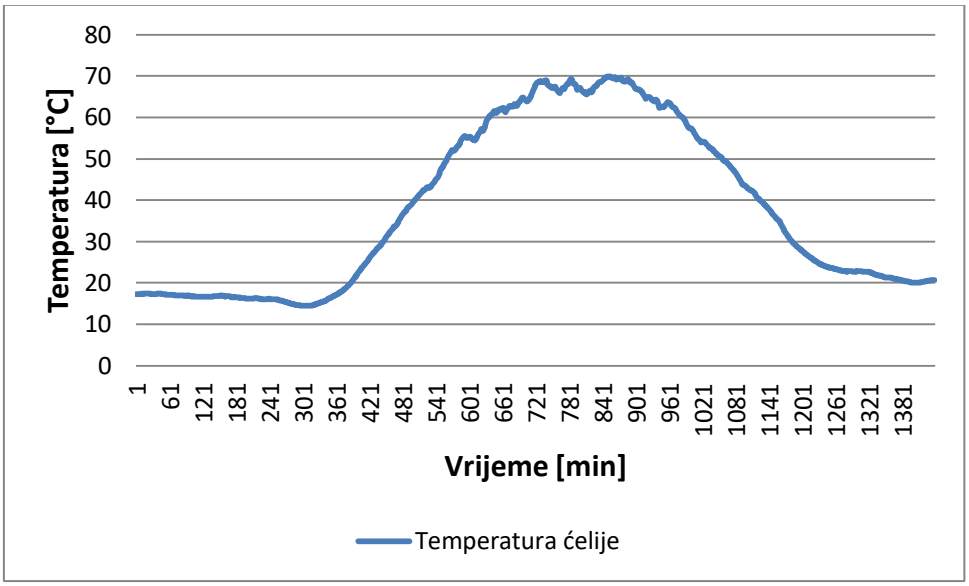
New Tshape.MyTemp npts=1440 minterval=1 temp=(file=Temperature.txt)

MyIrrad.txt se sastoji od niza mjerenja čiji iznosi se nalaze između 0 i 1, koji se pomoću *mult* množe s referentnom jakosti sunčeva zračenja od 1 kW/m^2, te se te vrijednosti dodjeljuju *New Loadshape.MyIrrad* kako bi se dobio dnevni dijagram sunčeva zračenja prikazan na slici 5.21.



Slika 5.21. *Jačina sunčeva zračenja tijekom dana.*

Temperature.txt se sastoji od niza mjerenja temperature čije se vrijednosti dodjeljuju *NewTShape* te se tako dobije dnevni dijagram temperature ćelije prikazan na slici 5.22.



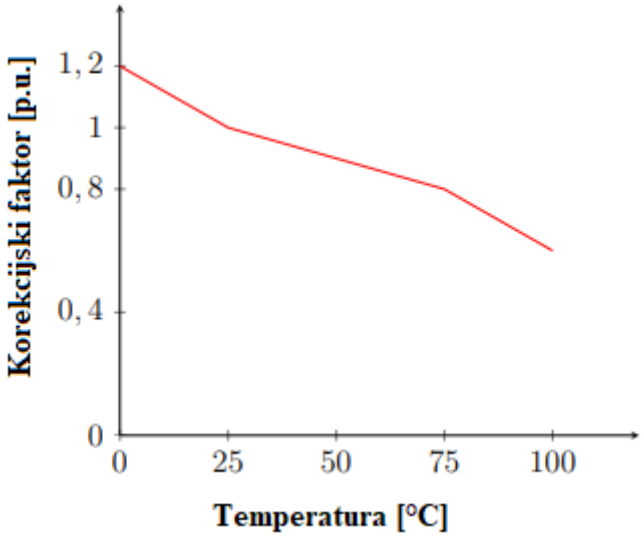
Slika 5.22. *Temperatura ćelije tijekom dana.*

U datoteci *XYcurves.txt* se definiraju dva parametra koja su važna za učinkovitost pretvarača u ovisnosti o snazi kojom radi u odnosu na nazivnu snagu prikazano na slici 5.24. te

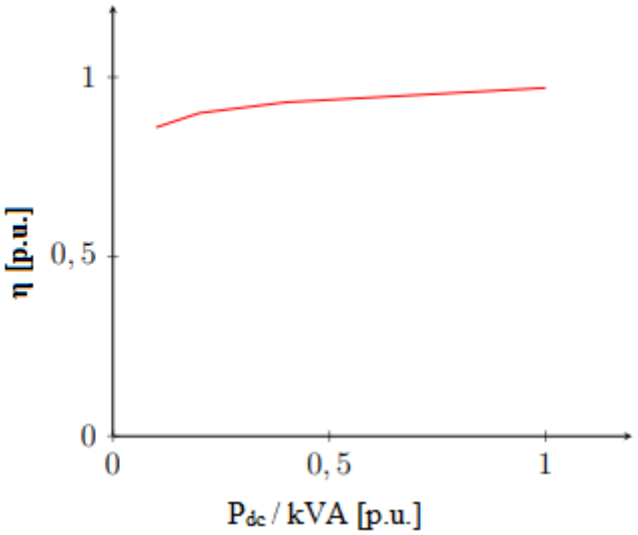
učinkovitost samog FN polja u odnosu na temperaturu ćelije prikazano na slici 5.23. Tako je primjerice učinkovitost izmjenjivača 86 % ako radi s 10 % nazivne snage, a ako radi s 100 % nazivne snage učinkovitost mu je 97 %. Fotonaponsko polje na 0 °C može isporučiti 120 % nazivne instalirane snage, a ako je temperatura ćelije 100°C tada FN polje može isporučiti samo 60 % nazivne instalirane snage.

New XYCurve.MyEff npts=4 xarray=[.1 .2 .4 1.0] yarray=[.86 .9 .93 .97]

New XYCurve.MyPvsT npts=4 xarray=[0 25 75 100] yarray=[1.2 1.0 0.8 0.6]

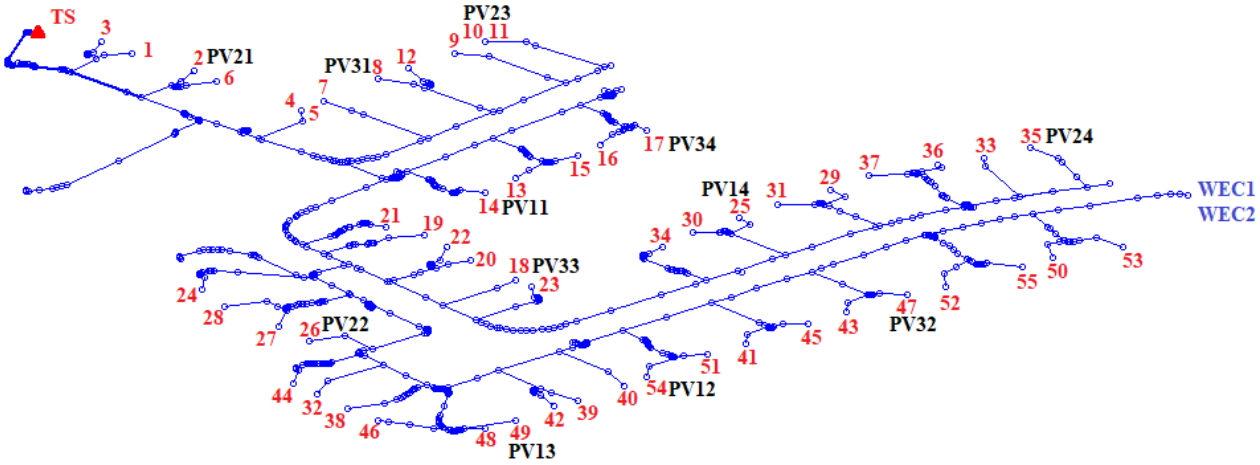


Slika 5.23. *MyPvsT krivulja korekcijskog faktora u odnosu na temperaturu ćelije.*



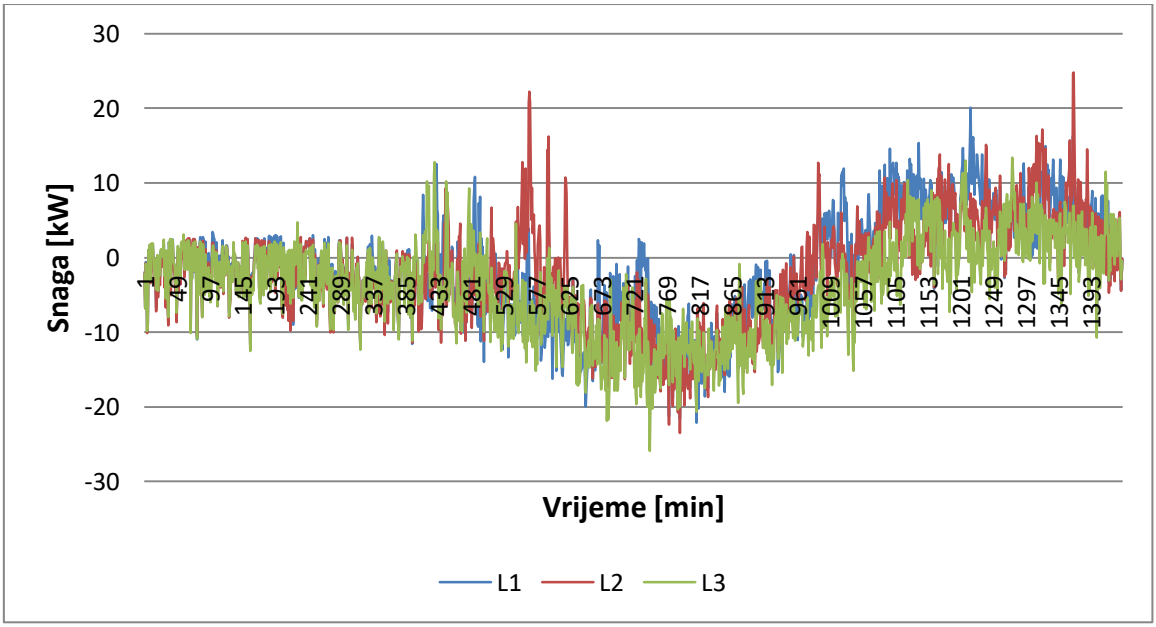
Slika 5.24. *Myeff krivulja učinkovitosti izmjenjivača u ovisnosti o istosmjernoj snazi FN polja.*

Na slici 5.25. je prikazana raspodjela potrošača unutar IEEE niskonaponskog testnog izvoda s dva integrirana WEC-a te dodanih 12 fotonaponskih sustava.



Slika 5.25. *Raspodjela 55 potrošača unutar distribucijske mreže s 2 integrirana WEC-a i 12 fotonaponskih sustava.*

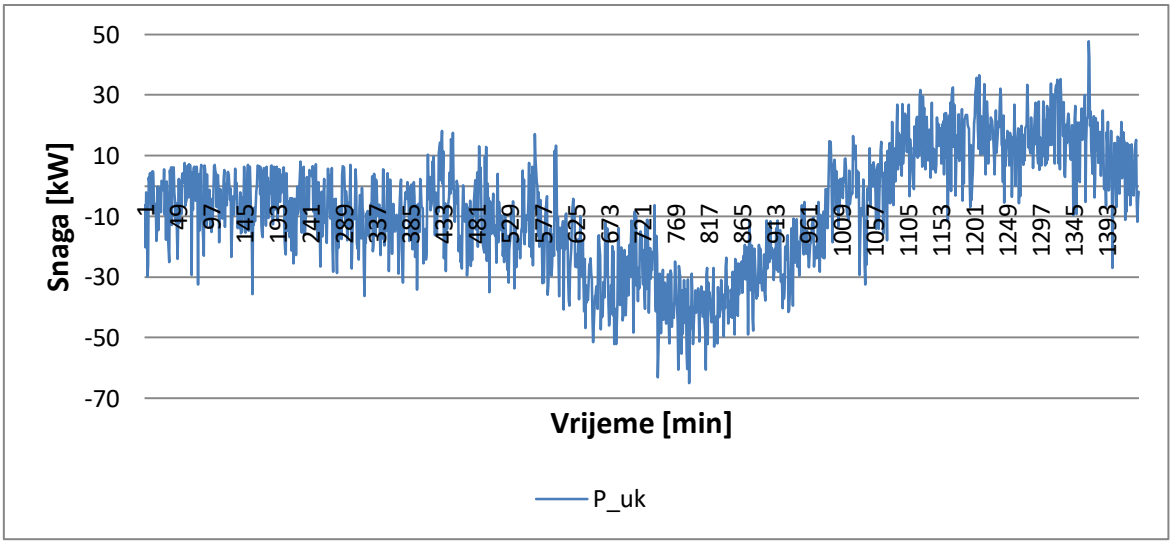
Fotonaponski sustavi su što je više moguće ravnomjerno raspoređeni unutar distribucijske mreže, te su postavljena 4 na svaku fazu, kako ne bi dodatno povećali nesimetriju u sustavu. Spojeni su izravno na sabirnice gdje i sami potrošači, te su potrošači transformirani u kupce s vlastitom proizvodnjom. Na slici 5.26. je prikazan tok radne snage po fazama na početku izvoda za treći slučaj.



Slika 5.26. *Tok radne snage po fazama na početku izvoda.*

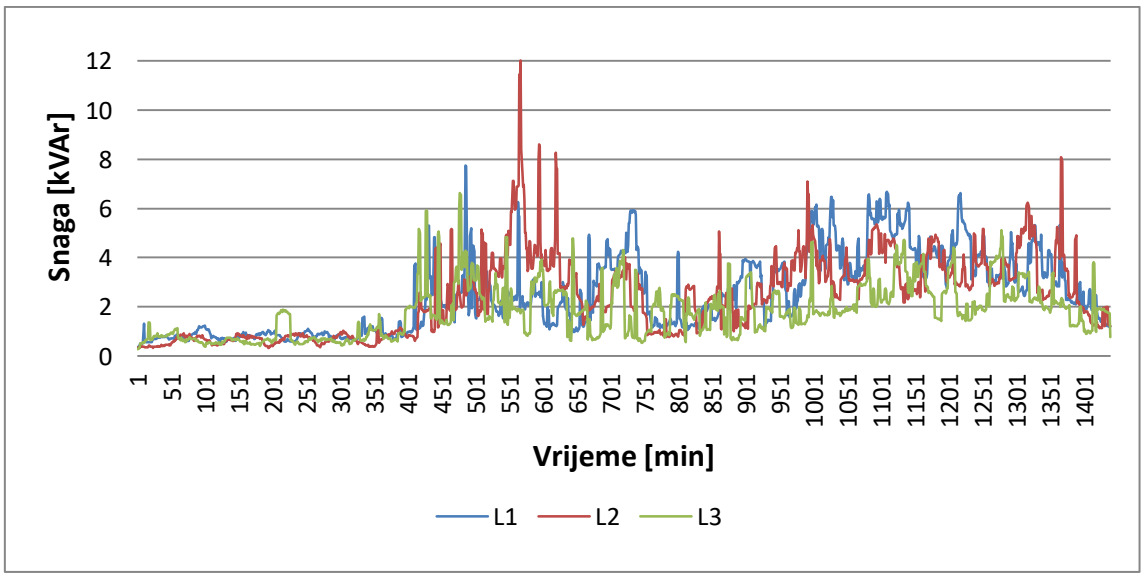
Prema slici 5.26. je jasno vidljivo kako su fotonaponske elektrane smanjile vrijednosti opterećenja po y-osi, te sada u periodu maksimalne proizvodnje električne energije iz

fotonaponskih sustava imamo samo uzlazne tokove snaga, iz distribucijske mreže prema nadređenoj mreži i to u maksimalnom iznosu od 25,8 kW. Na smanjenje vršne snage od 24,7 kW fotonaponski sustavi nisu mogli utjecati jer se to opterećenje zbiva u periodu kada je Sunce zašlo, te je jakost sunčeva zračenja tada 0 shodno tome je i proizvodnja iz fotonaponskih sustava jednaka nuli. Na slici 5.27. je prikazan ukupni tok radne snage na početku izvoda za treći slučaj.



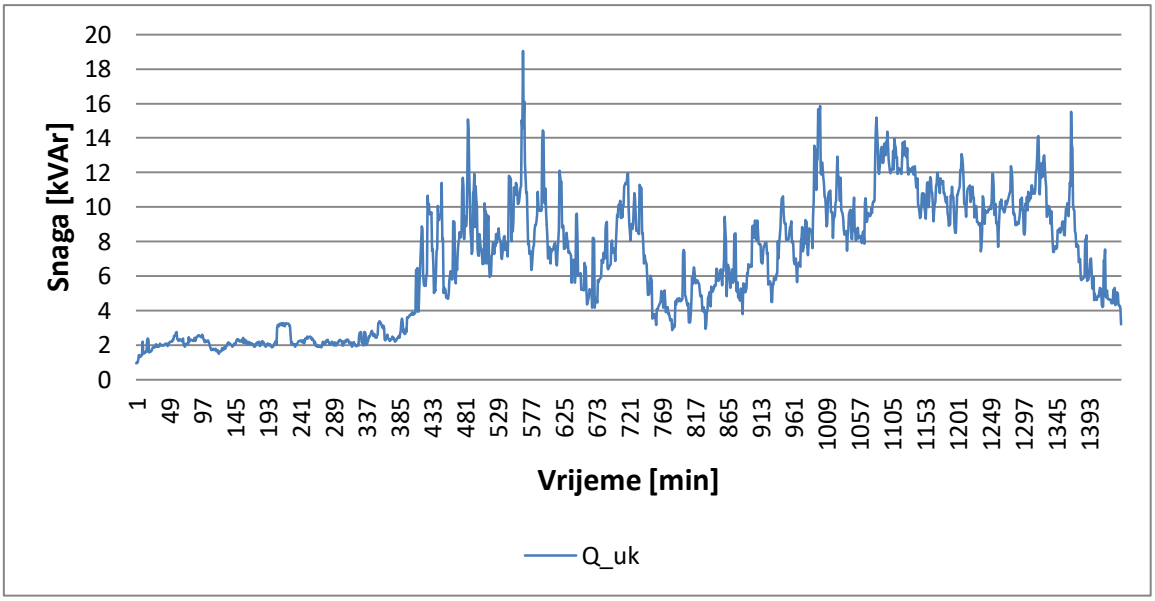
Slika 5.27. *Tok ukupne radne snage na početku izvoda.*

Prema slici 5.27. je vidljivo kako je integracija fotonaponskih sustava utjecala na tokove snaga, tako što u periodu maksimalne proizvodnje uzlazni tok snage iznosi 65,1 kW što je više nego maksimalni silazni tok od 59,3 kW iz prvog studijskog slučaja. Na slici 5.28. je prikazan tok jalove snage po fazama na početku izvoda za treći slučaj.



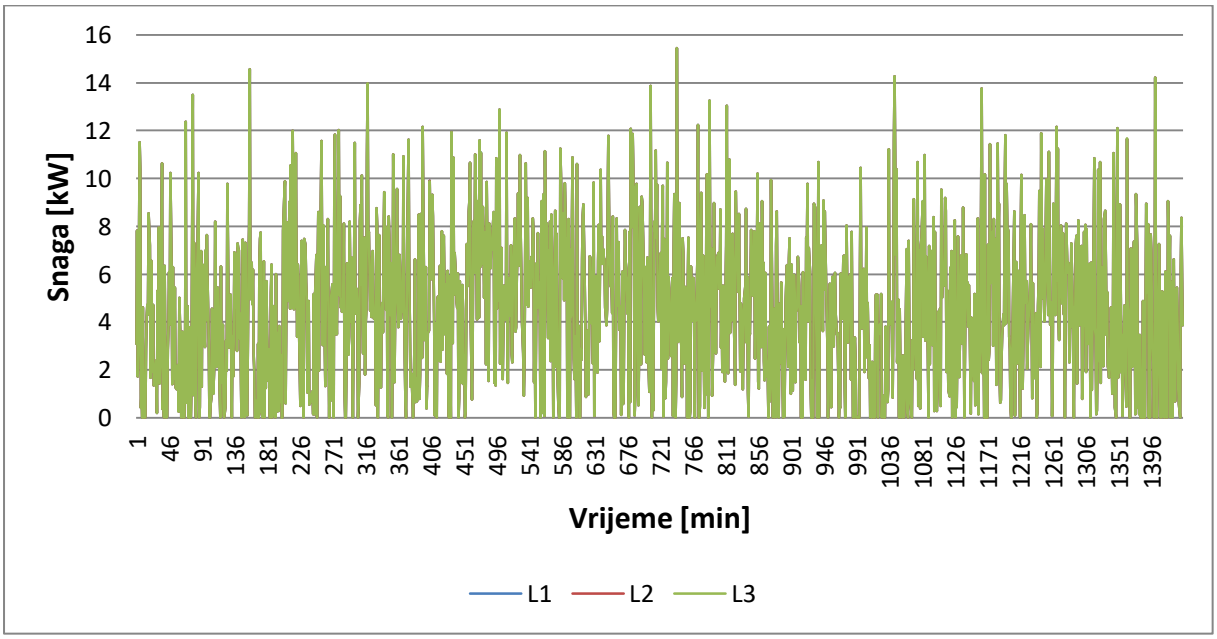
Slika 5.28. *Tok jalove snage po fazama na početku izvoda.*

Prema slici 5.28 tok jalove snage po fazama je ostao nepromijenjen, a shodno tome je ostao i ukupni tok jalove snage ma početku izvona prikazan na slici 5.29. nepromijenjen.



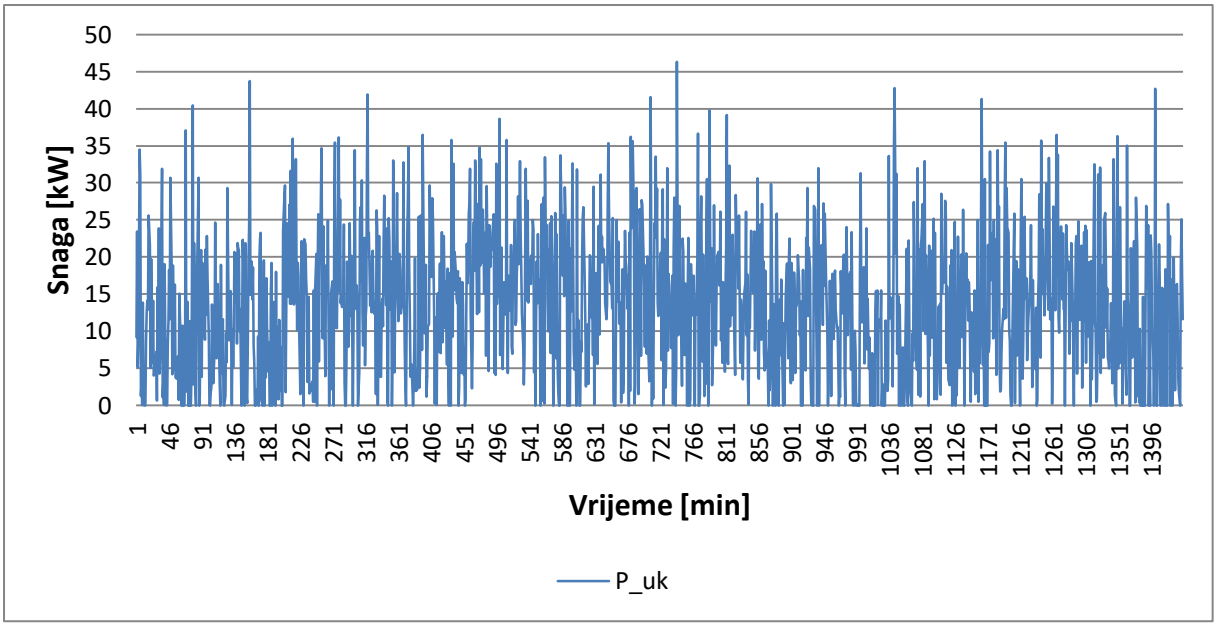
Slika 5.29. *Tok ukupne jalove snage na početku izvoda.*

Na slici 5.30. je prikazan tok radne snage po fazama na kraju izvoda za treći slučaj.



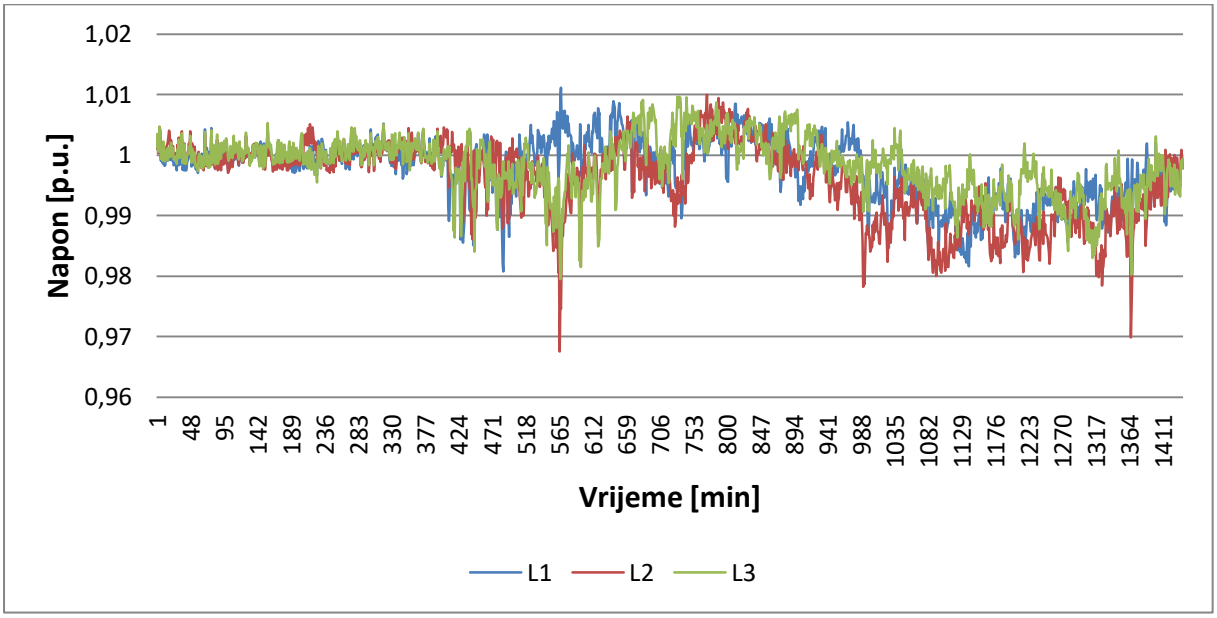
Slika 5.30. *Tok radne snage po fazama na kraju izvoda.*

Prema slici 5.30. tok radne snage po fazama na kraju izvoda je ostao nepromijenjen te je shodno tome ostao i ukupni tok radne snage na kraju izvoda prikazan na slici 5.31. nepromijenjen.



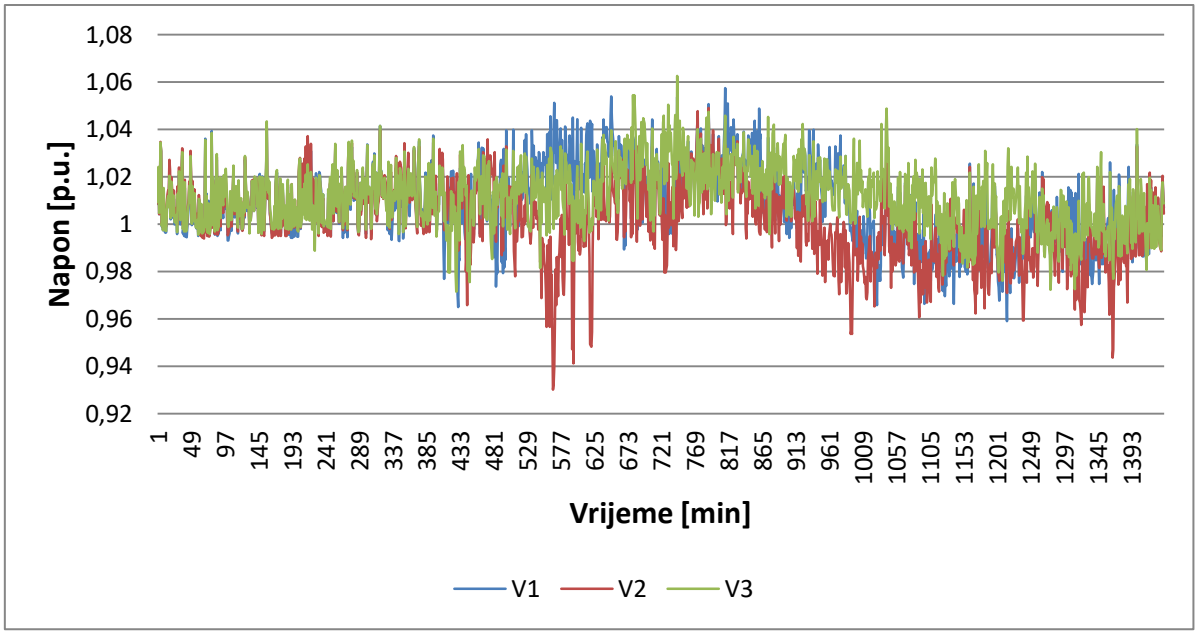
Slika 5.31. *Tok ukupne radne snage na kraju izvoda.*

Na slici 5.32. su prikazana naponske prilike za svaku fazu na početku izvoda za treći slučaj.



Slika 5.32. *Napon na početku izvoda.*

Prema slici 5.32. naponske prilike na početku izvoda su slične onima iz prethodnog slučaja, osim što je u vremenskom periodu kada je intenzitet sunčeva zračenja najveći ,a shodno tome i proizvodnja fotonaponskih postrojenja najveća, naponi nešto povišeniji. Na slici 5.33. su prikazana naponske prilike za svaku fazu na kraju izvoda za treći slučaj.

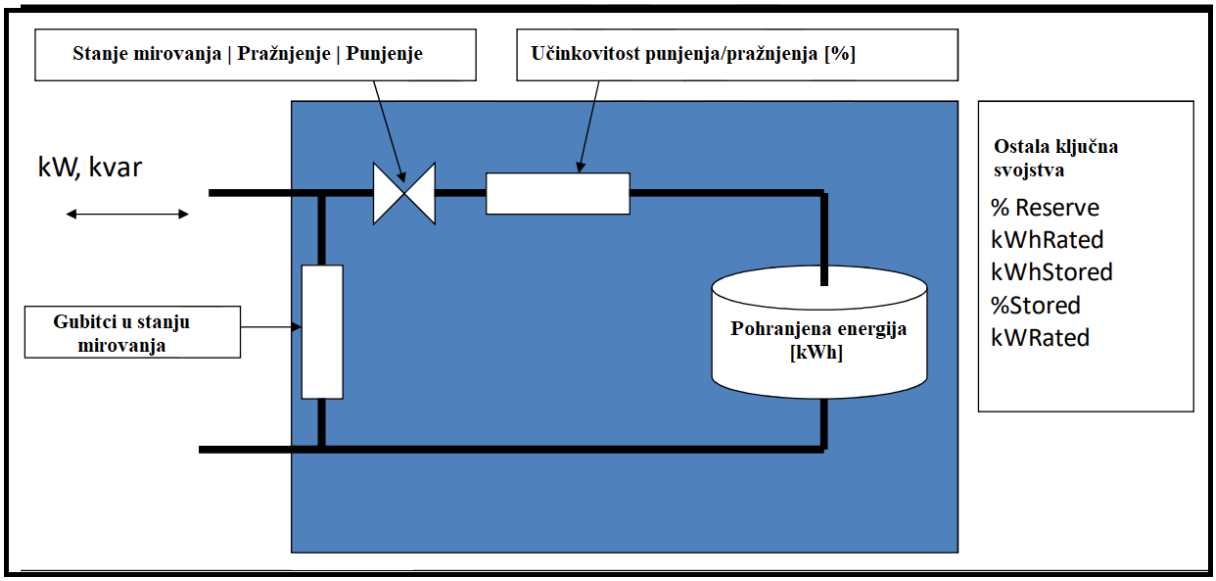


Slika 5.33. *Napon na kraju izvoda.*

Prema slici 5.33. izdizanje napona je izraženije na kraju izvoda, jer je on električni naj udaljeniji od krute mreže koja bi ga pokušavala održati na 1,0 p.u. Gledajući grafove napona na kraju izvoda se može uočiti blaga krivulja izdizanja napona u popodnevnim satima koja je posljedica proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava. U ruku tome ide i činjenica da su podaci za fotonaponske sustave izrazito povoljni, tj. podatci razine intenziteta sunčeva zračenja su dani za jedan izrazito sunčan dan bez naoblake.

5.3.4. Četvrti studijski slučaj- integracija postrojenja na morske valove i fotonaponskih sustava te pohrane električne energije u bateriji

U četvrtom testnom slučaju je unutar IEEE niskonaponskog testnog izvoda distribucijske mreže, pored već integrirana dva WEC-a i 12 FN sustava integrirana još i jedna baterija, tj. spremnik električne energije. Instalirana je na istu sabirnicu kao i postojeća postrojenja na morske valove, s ciljem da izregulira njihovu izlaznu snagu na približno konstantnu vrijednost, kako ne bismo imali tolike oscilacije u proizvodnji. Da bi se baterija koristila u OpenDSS programu potrebno ju je najprije definirati u datoteci *BateryStorage.txt*. Baterijski spremnik energije ima nekoliko osnovnih načina rada, a to su: *DEFAULT, FOLLOW, EXTERNAL, LOADLEVEL* i *PRICE*. U *DEFAULT* načinu rada je spremnik pobuđen *LoadShape* krivuljom da se pune ili prazni određenom brzinom, *FOLLOW* način prati aktivni *LoadShape* sve dok se spremnik potpuno ne napuni ili potpuno isprazni, *EXTERNAL* način rada je upravljan vanjskim kontrolerom, dok su *LOADLEVEL* i *PRICE* upravljani ili razinom opterećenja ili cijenom. Na slici 5.34. je prikazana skica modela baterijskog spremnika.



Slika 5.34. *Skica modela baterijskog spremnika energije.*

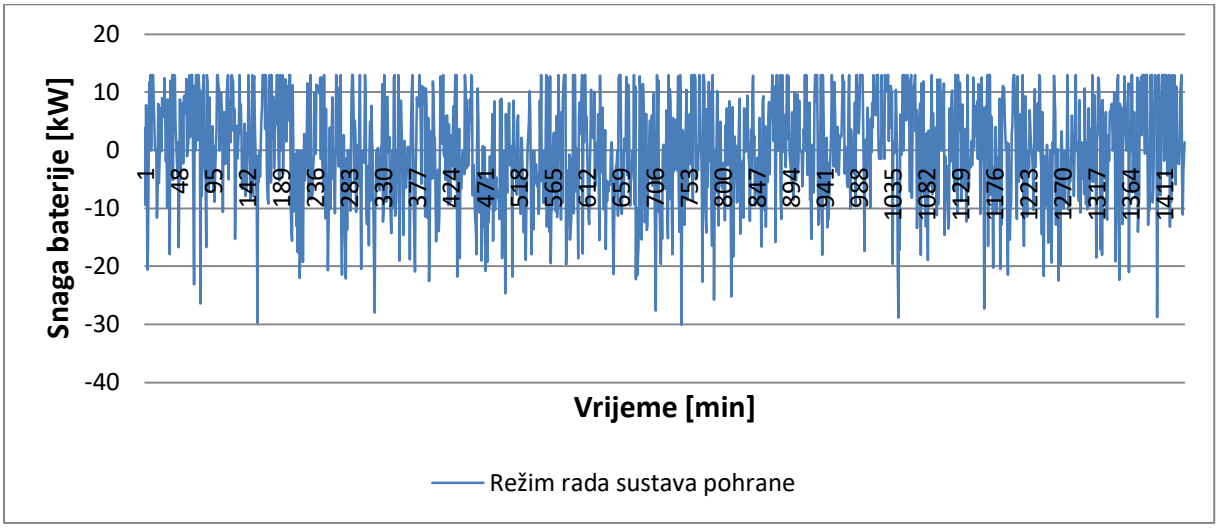
New Storage.BatteryWEC12 phases=3 Bus1=907 kV=0.416 kWrated=30 kWhrated=90 kWhStored=63 %IdlingkW=0.1 State=IDLING dispmode=follow Daily=BaterijaWEC12 %effdischarge=95 %effcharge=95

New Storage služi za definiranje novog spremnika koji se u ovom slučaju naziva *BatteryWEC12*, *phases=3* se odnosi na broj faza, *Bus1=907* na sabirnicu na koju je priključen, *kWrated=30* je nazivna snaga pretvarača, *kWhrated=90* je nazivni kapacitet spremnika, *kWhStored=63* je količina spremljene energije, *%IdlingkW=0.1* je potrošnje u stanju mirovanja izražena u postocima nazivne snage spremnika, *State=IDLING* je stanje mirovanja, *dispmode=follow* predstavlja način rada u kojem izlazna snaga spremnika bilo u kW ili kVAr prati aktivni *LoadShape* sve dok se spremnik potpuno ne napuni ili potpuno isprazni. Spremnik se prazni za pozitivne vrijednosti ,a pune za negativne vrijednosti. *Daily=BaterijaWEC12* se poziva na dnevni dijagram ponašanja baterije, *%effdischarge=95* označava učinkovitost pražnjenja, a *%effcharge=95* označava učinkovitost punjenja. U datoteci *LoadShapes.txt* je potrebno također definirati novi oblik dnevnog dijagrama za bateriju.

New Loadshape.BaterijaWEC12 npts=1440 minterval=1 mult=(file=battery_profile\charge_discharge.txt) useactual=true

New Loadshape služi za definiranje novoga profila potrošnje, u ovom slučaju se ono zove *BaterijaWEC12*, *npts=1440* sastoji se od 1440 uzoraka, *minterval=1* s intervalom uzrokovanja od 1 minute , *mult* množi vrijednosti iz raspona od -1 do 1 iz datoteke

charge_discharge.txt te ih množi s nazivnom snagom spremnika. Kada su vrijednosti pozitivne spremnik se prazni, a kada su negativne onda se pune. Na slici 5.35. je prikazan režim rada sustava pohrane.



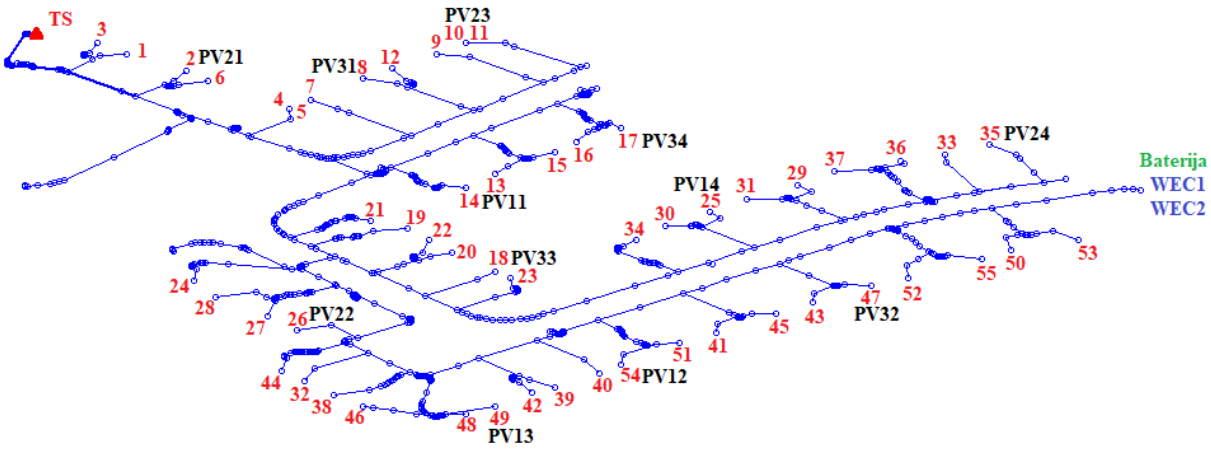
Slika 5.35. *Režim punjenja/pražnjenja baterije.*

Ovakav tok izlazne snage nije slučajan, on je definiran na temelju izlazne snage WEC-a, čija je prosječna snaga tijekom dana 13,4 kW, te je shodno tome baterija parametrirana da se u slučaju proizvodnje WEC-a veće od 14 kW baterija pune onom snagom koja prelazi 14 kW, a kada je proizvodnja WEC-a manja od 13 kW baterija se prazni onolikom snagom koja je potrebna da bi ukupna izlazna snaga na kraju izvoda bila 13 kW. U slučaju kada je proizvodnja WEC-a između 13 i 14 kW baterija se prebacuje u režim mirovanja. Maksimalna snaga kojom se praznila je 13 kW i to u slučaju kada je izlazna snaga WEC-a 0 kW, dok se samo jednom punila svojom nazivnom snagom od 30 kW u trenutku najveće proizvodnje WEC-a od 46,33 kW.

U datoteci *Monitors.txt* je definiran novi monitor čija je zadaća praćenje ponašanja punjenja pražnjenja baterije.

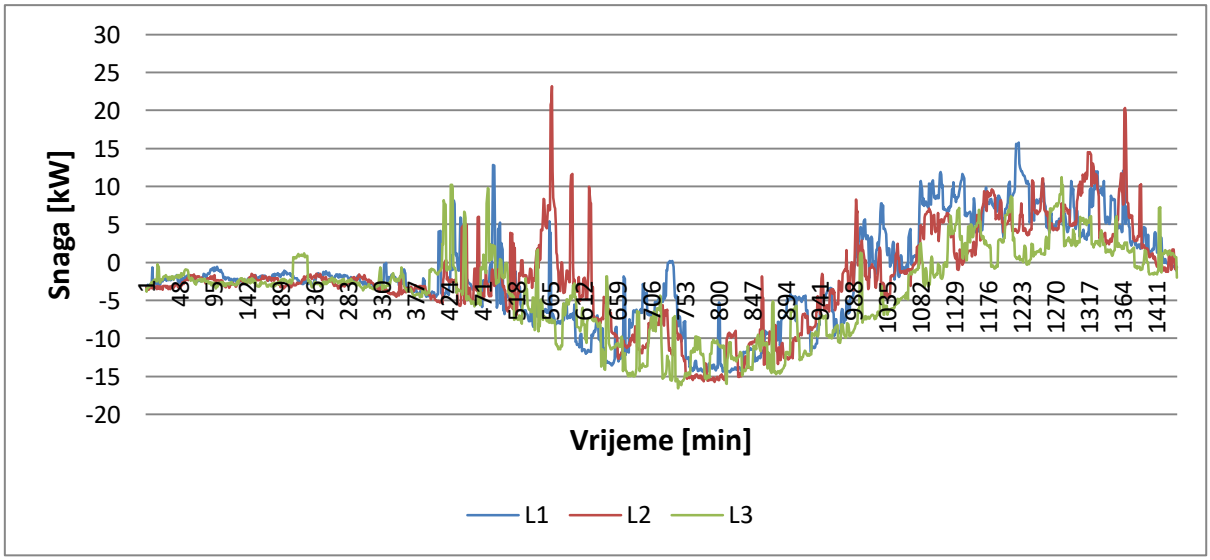
New Monitor.BatteryWEC12_PQ_vs_Time Storage.BatteryWEC12 Mode=3 ppolar=0

Na slici 5.36. je prikazana raspodjela potrošača unutar IEEE niskonaponskog testnog izvoda s integriranih 12 fotonaponskih sustava te 2 WEC-a koja su kao i spremnik energije integrirana na kraju izvoda na zajedničku sabirnicu.



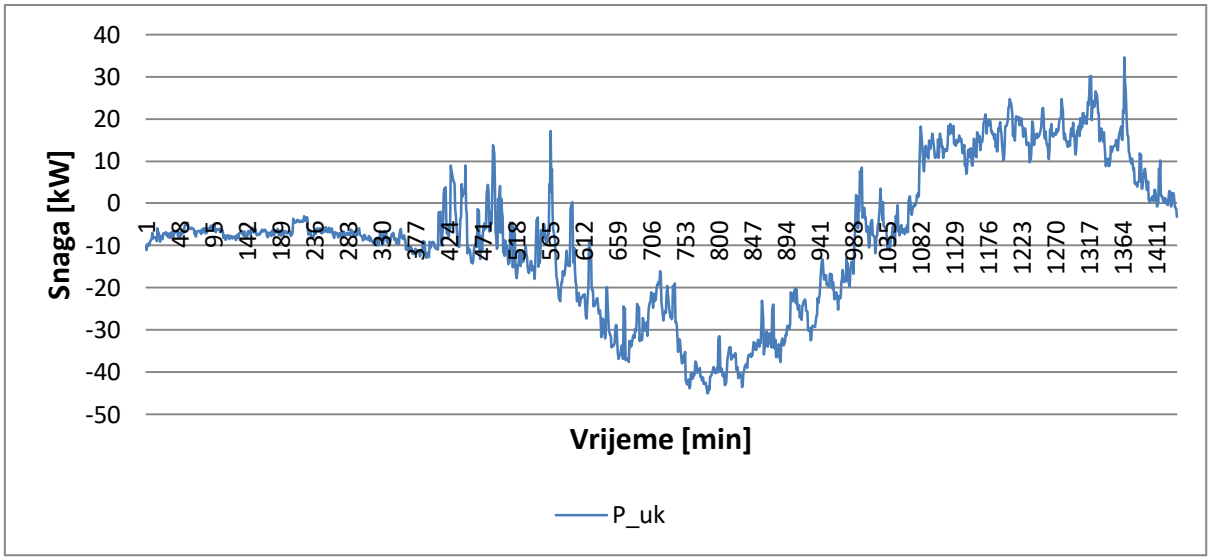
Slika 5.36. *Raspodjela 55 potrošača unutar distribucijske mreže s 2 integrirana WEC-a i 12 fotonaponskih sustava te baterijom na kraju izvoda.*

Na slici 5.37. je prikazan tok radne snage po fazama na početku izvoda za četvrti slučaj.



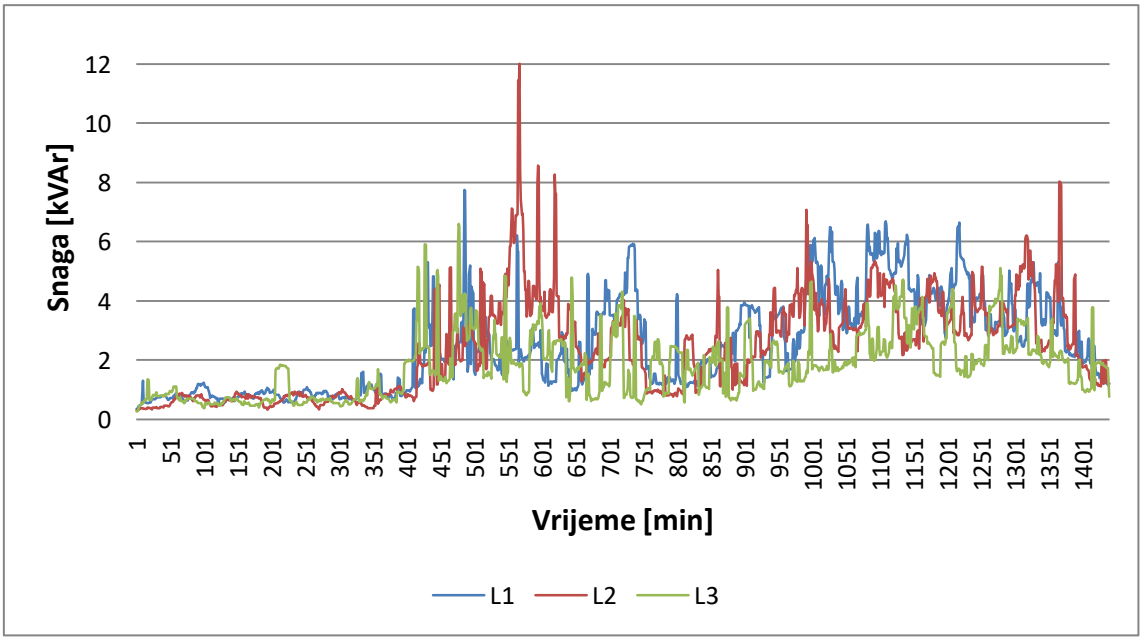
Slika 5.37. *Tok radne snage po fazama na početku izvoda.*

Prema slici 5.37. tok radne snage na početku izvoda je značajno smanjen, te je u prvoj trećini dana gotovo samo uzlazan tok snage. Vršni tok snage je u fazi L2 i iznosi 23,2 kW dok je u slučaju pasivne mreže iznosio 37,7 kW što predstavlja smanjenje za 38,46 %. Maksimalni uzlazni tok snage je u periodu kada uz bateriju koja regulira izlaznu snagu postrojenja na morske valove, rade i fotonaponski sustavi punom snagom te iznosi 15,5 kW. Na slici 5.38. je prikazan ukupni tok radne snage na početku izvoda za četvrti slučaj.

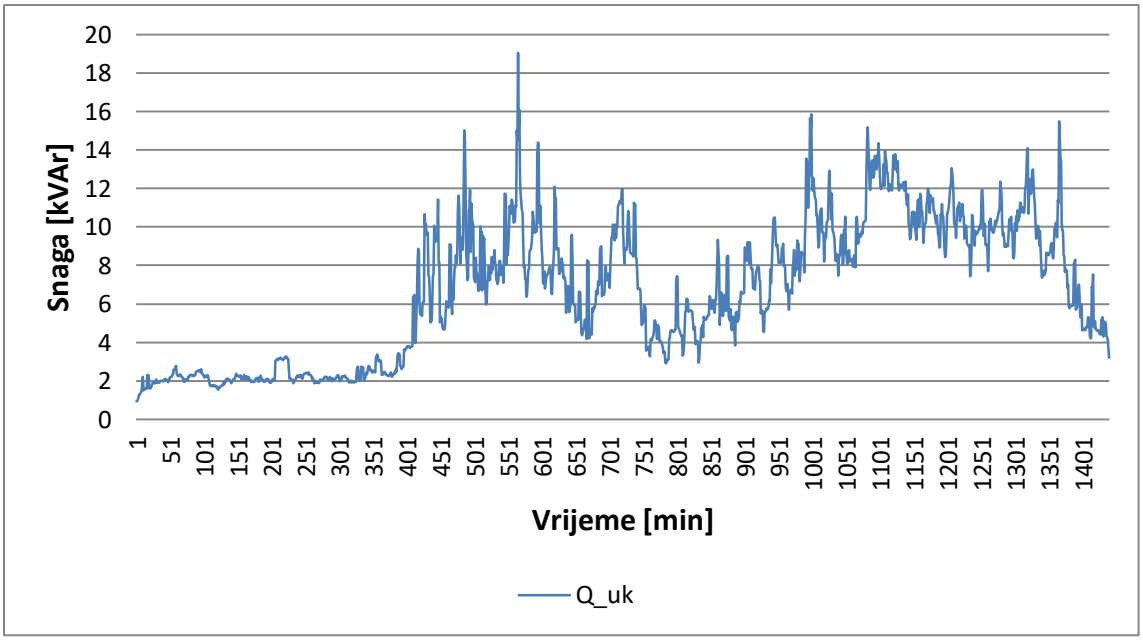


Slika 5.38. *Tok ukupne radne snage na početku izvoda.*

Prema slici 5.38. je vidljivo kako su ukupni tokovi radne snage za preko 60 % vremena uzlazni, s maksimalnim uzlaznim tokom od 43,4 kW, a maksimalni silazni tok iznosi 34,6 kW. Na slici 5.39. je prikazan tok jalove snage po fazama na početku izvoda za četvrti slučaj koji je identičan kao i u prethodna tri slučaja, a na slici 5.40. je prikazan ukupni tok jalove snage na početku izvoda za četvrti slučaj.

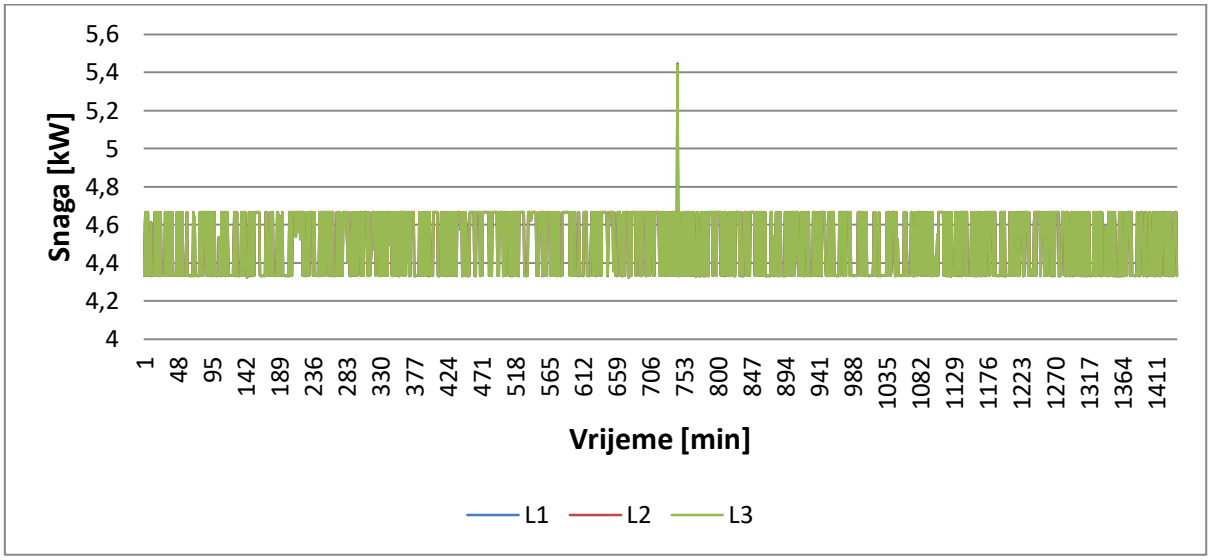


Slika 5.39. *Tok jalove snage po fazama na početku izvoda.*



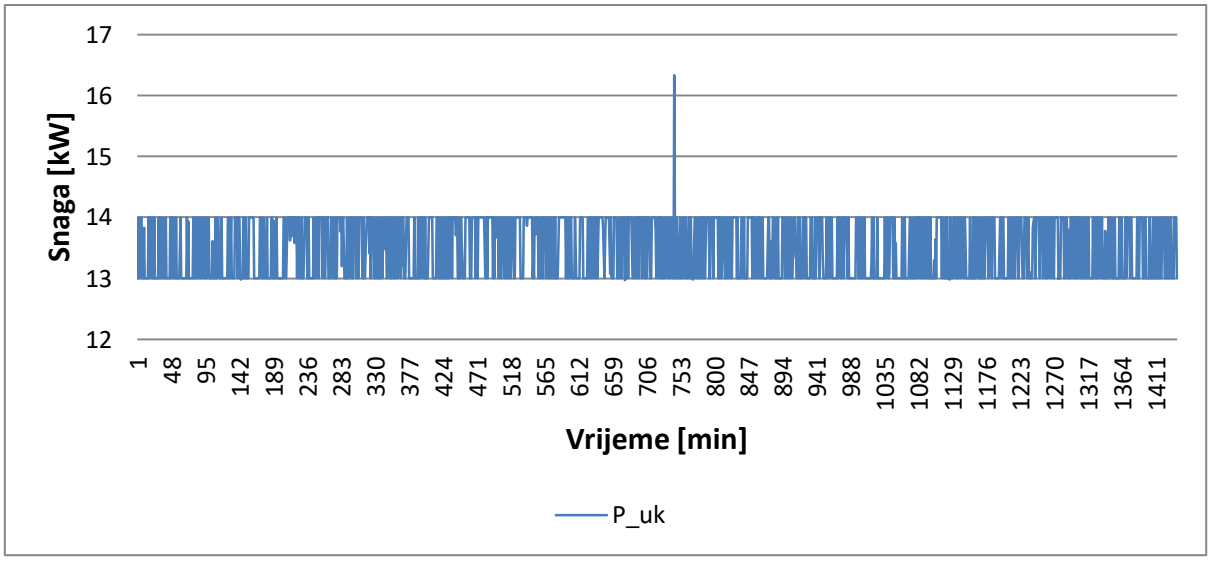
Slika 5.40. *Tok ukupne jalove snage na početku izvoda.*

Prema slici 5.40. ukupni tok jalove snage je i u ovom slučaju identični kao i u prethodna tri slučaja. Na slici 5.41. je prikazan tok radne snage po fazama na kraju izvoda za četvrti slučaj.



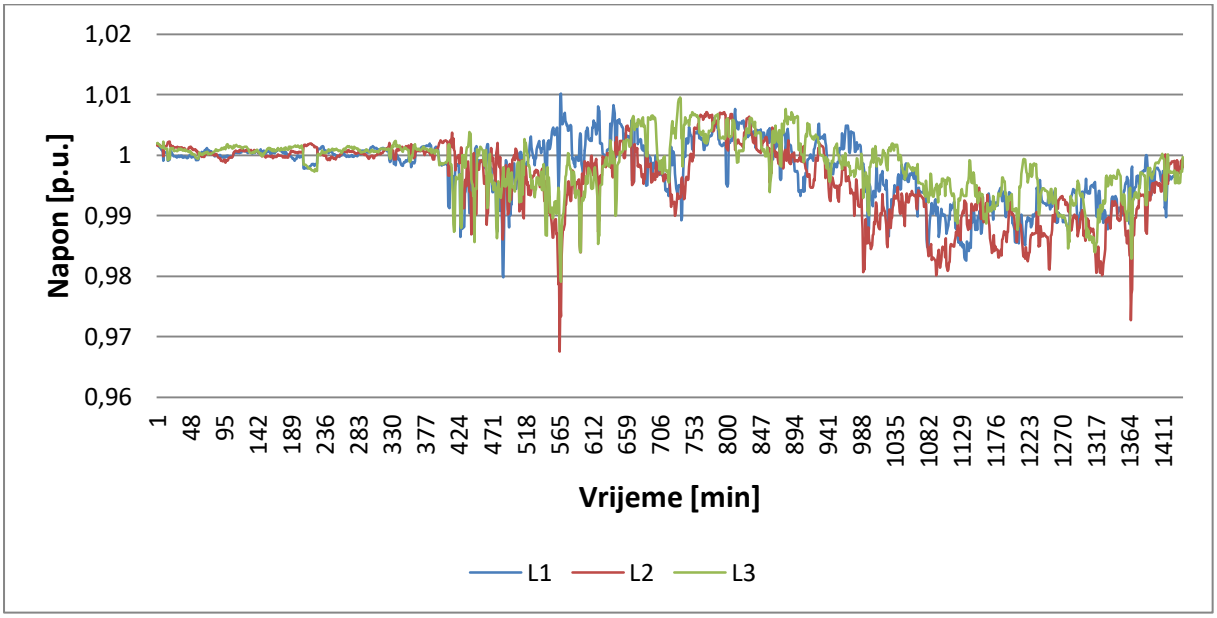
Slika 5.41. *Tok radne snage po fazama na kraju izvoda.*

Prema slici 5.41. se vidi kako je izlazna snaga po fazama na kraju izvoda konstantno između 4,33 i 4,66 kW, osim u jednoj minuti kada skoči na 5,44 kW. Razlog ovog vrha je taj da je u tome trenutku proizvodnja WEC-a bila veća od snage kojom se baterija može puniti, te se taj maksimum nije mogao izregulirati. Na slici 5.42. je prikazan ukupni tok radne snage na kraju izvoda za četvrti slučaj.



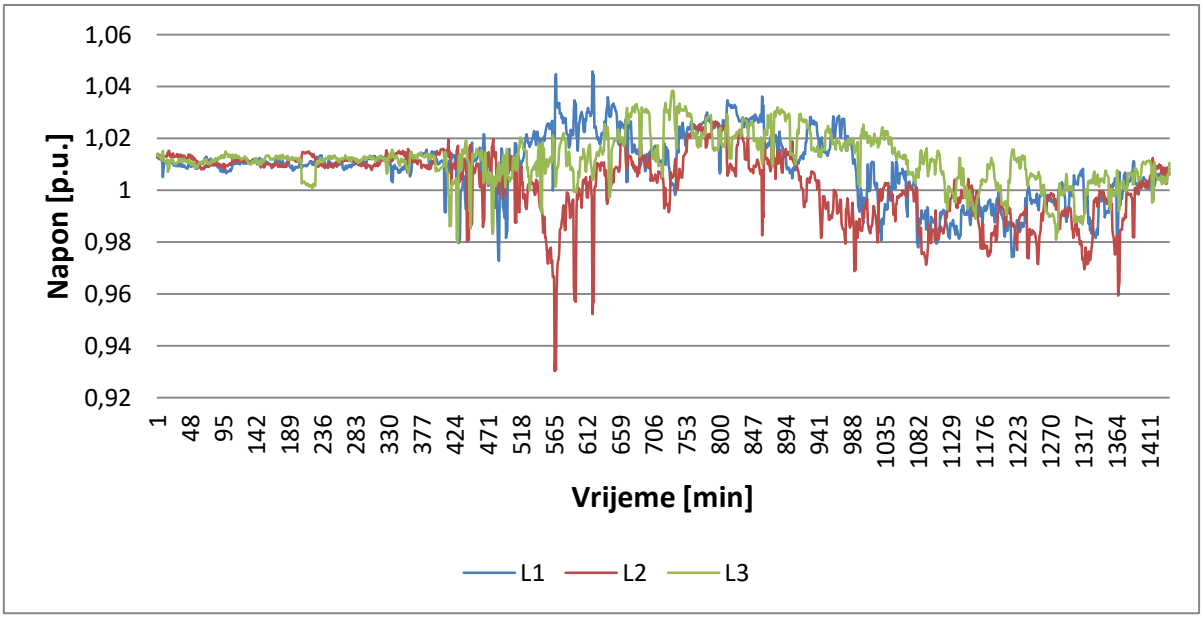
Slika 5.42. *Tok ukupne radne snage na kraju izvoda.*

Prema slici 5.42. na ukupnom toku radne snage na kraju izvoda se lijepo vidi kako se izlazna snaga kreće u području od 13 do 14 kW, osim za jedan vrh koji se pojavljuje u 744. minuti u iznosu od 16,33 kW. Taj maksimum se nije mogao izregulirati jer je tada izlazna snaga WEC-a bila 46,3 kW ,a baterija se mogla puniti samo s 30 kW koja joj je i nazivna snaga te je tako na kraju izvoda dospjela ta izlazna snaga od 16,33 kW. Na slici 5.43. su prikazane naponske prilike za svaku fazu na početku izvoda za četvrti slučaj.



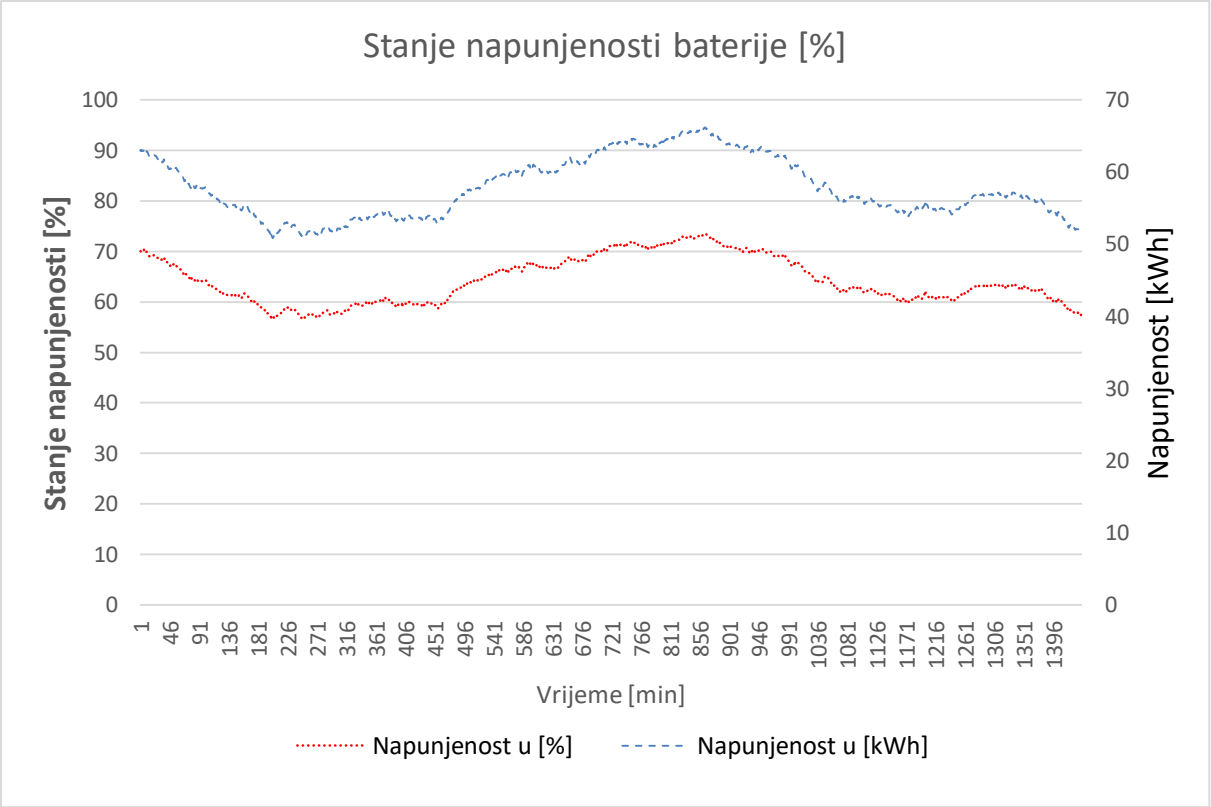
Slika 5.43. *Napon po fazama na početku izvoda.*

Na slici 5.44. su prikazane naponske prilike za svaku fazu na kraju izvoda za četvrti slučaj.



Slika 5.44. *Napon po fazama na kraju izvoda.*

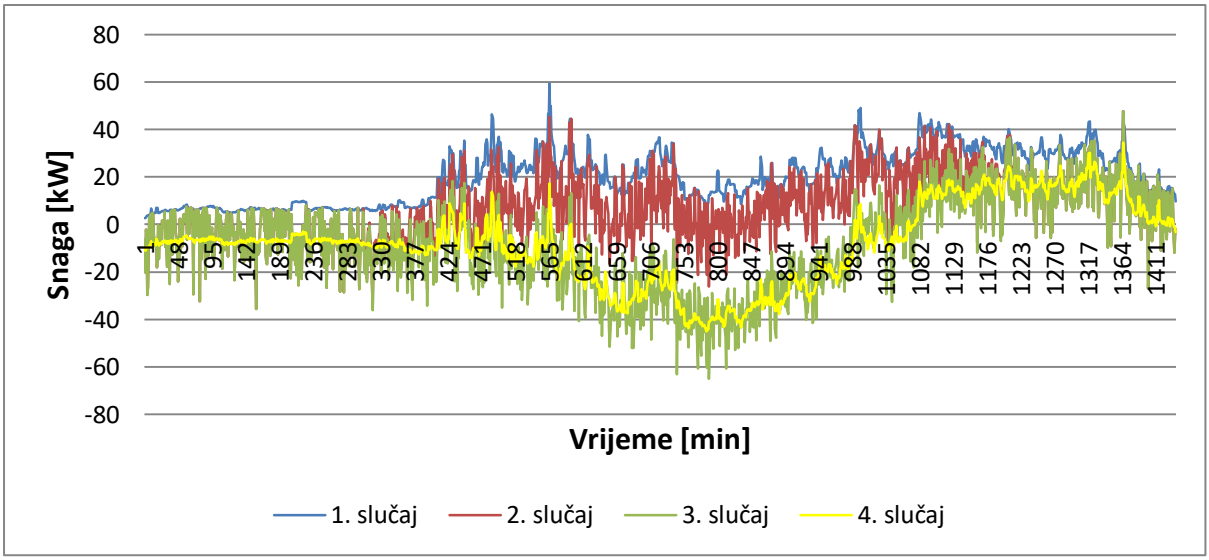
Prema slikama 5.43. i 5.44. naponski profili kako na početku tako i na kraju izvoda su mnogo stabilniji, i kreću se u dosta užem rasponu. Razlog tomu je što više nemamo izrazito promjenjive proizvodnje iz WEC-a nego kontinuiranu izlaznu snagu od 13 do 14 kW, koja ne stvara udare na mrežu kao primjerice iznenadna proizvodnja od 40 kW koja je već u idućem trenutku 0 kW. Na slici 5.45. je prikazano kako se razina napunjenosti baterije mijenjala tijekom dana u četvrtom slučaju. Početno stanje napunjenosti baterije je bilo definirano na napunjenosti od 70 % nazivnog kapaciteta što iznosi 63 kWh. Na kraju dana je baterija ostala na 57,5 % napunjenosti što iznosi 51,76 kWh.



Slika 5.45. *Razina napunjenosti baterije.*

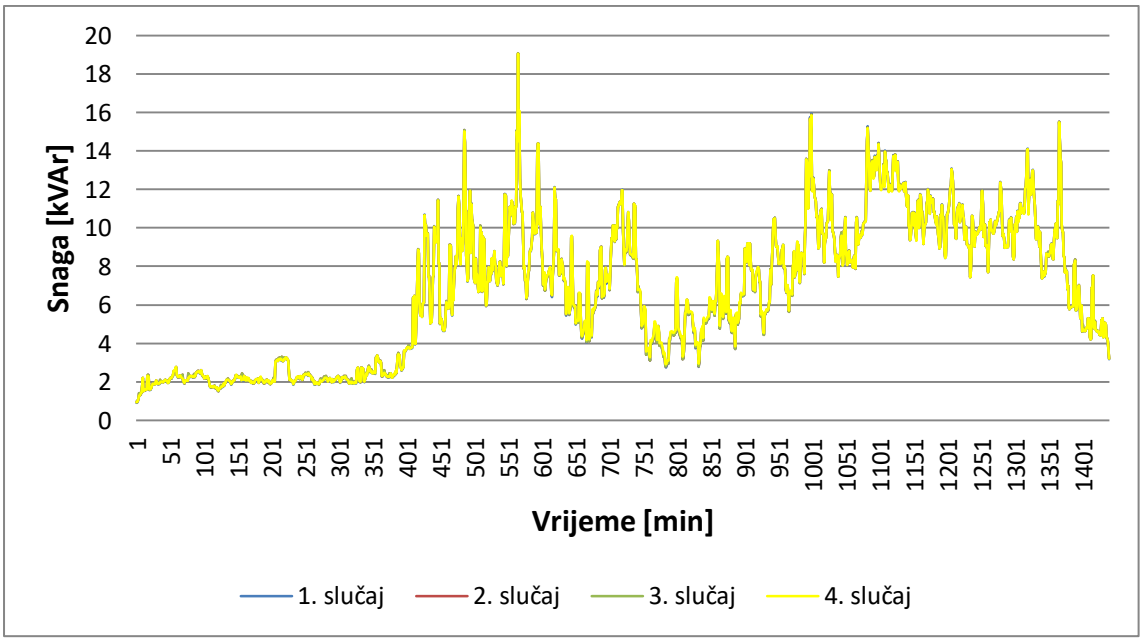
5.3.5. Usporedba rezultata

U ovome poglavlju će se na jedan graf staviti ista veličina iz sva 4 testna slučaja, kako bi se mogli lakše usporediti rezultati i doći do nekih zaključaka. Tako će se na jednom grafu naći ukupni tokovi radne snage na početku izvoda za sva 4 testna slučaja, a na drugom grafu ukupni tokovi radne snage na kraju izvoda. Isto će se učiniti i s ukupnim tokom jalove snage ali samo za početak izvoda. Usporediti će se također i naponi na početku izvoda za sva 4 slučaja posebno za svaku od 3 faze, te identično sve samo za naponske prilike na kraju izvoda. Naposljetku će se usporediti gubitci za sva 4 testna slučaja. Na slici 5.46. je prikazan tok ukupne radne snage na početku izvoda za sva 4 slučaja, dok je na slici 5.47. prikazan tok ukupne jalove snage na početku izvoda za sva 4 slučaja.



Slika 5.46. *Tok ukupne radne snage na početku izvoda za sva 4 slučaja.*

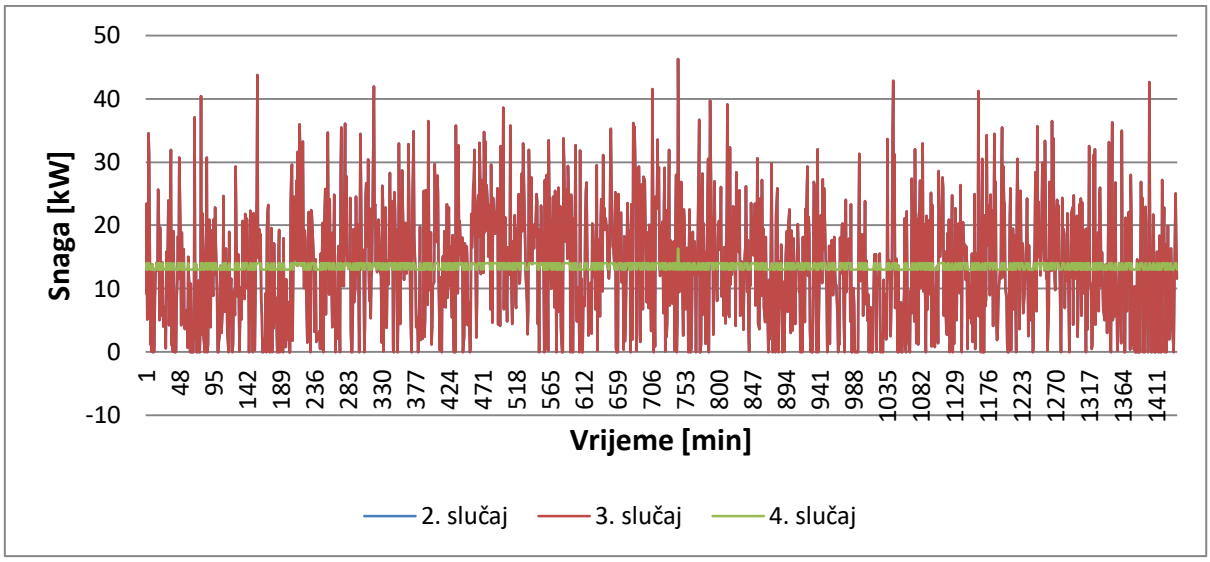
Na slici 5.46. je vidljivo kako je sa svakom novom integracijom u mreži, tok ukupne radne snage prema mreži smanjivan te se mijenjao sa silaznog u uzlazni tok. Najbolja situacija je u 4. slučaju iz razloga što je tok radne snage tada najmanje promjenjiv, a i po iznosu ne tako veliki kao recimo u 3. slučaju kada uzlazni tok ide do čak 65 kW.



Slika 5.47. *Tok ukupne jalove snage na početku izvoda za sva 4 slučaja.*

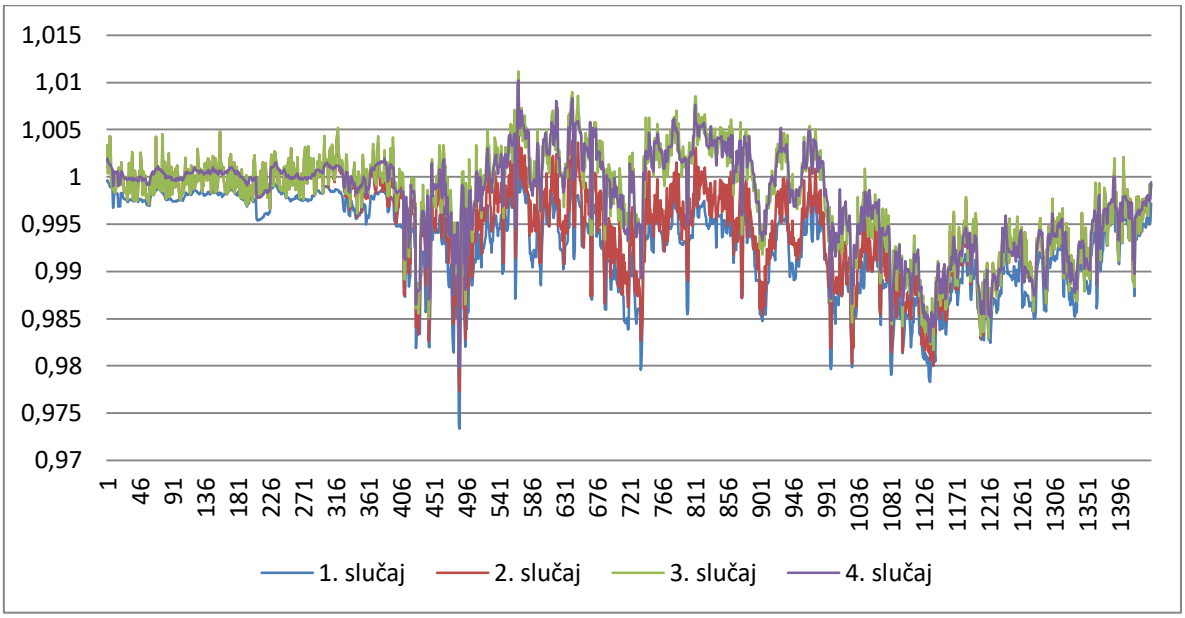
Na slici 5.47. se savršeno vidi kako je tok jalove snage za sva 4 slučaja jednak. Razlog tomu je što sva integrirana distribuirana proizvodnja u ovoj distribucijskoj mreži radi s faktorom snage 1, što znači da injektiraju samo radnu snagu u mrežu. Stoga sva jalova snaga za potrebe 55 potrošača uvijek mora doći iz nadređene mreže preko početka izvoda.

Na slici 5.48. je prikazan tok ukupne radne snage na kraju izvoda za 3 testna slučaja.



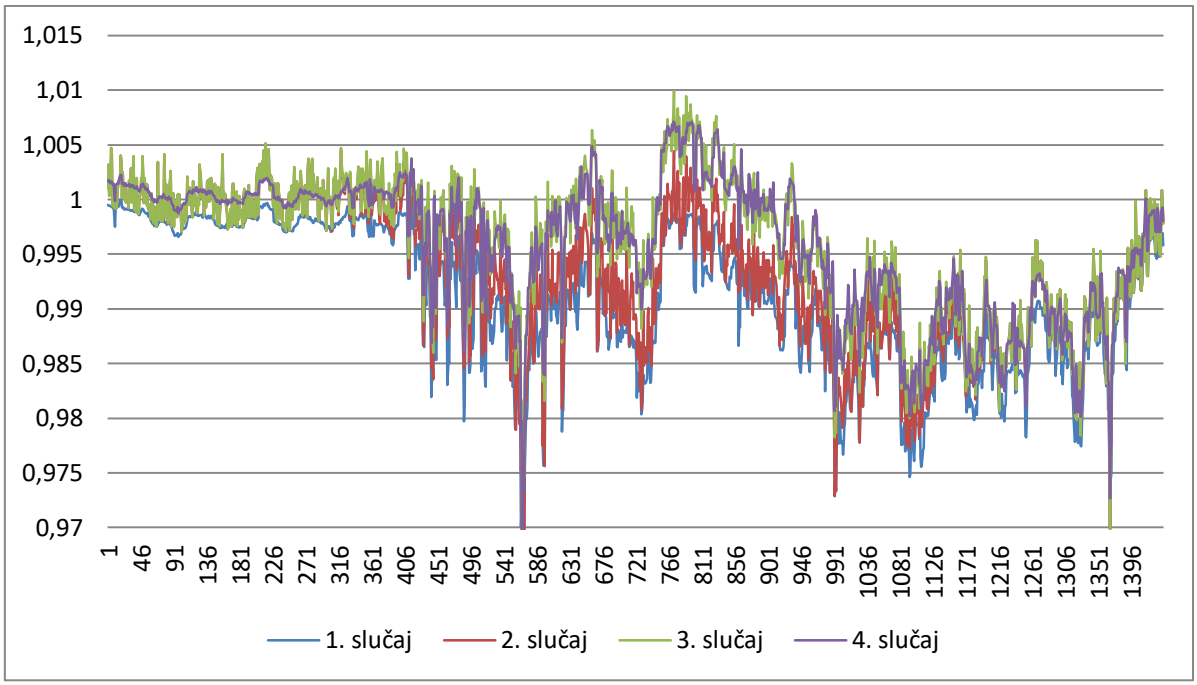
Slika 5.48. *Tok ukupne radne snage na kraju izvoda za 3 slučaja.*

U prvom slučaju nema uopće toka snage na kraju izvoda jer na njemu nema potrošača niti proizvodnje te se stoga niti ne nalazi na grafu. Drugi i treći slučaj su identični, prikazuju izrazito promjenjivu izlaznu snagu postrojenja na morske valove koja u jednom trenutku iznosi 46 kW da bi već u idućem trenutku bila 0 kW. U četvrtom slučaju je pomoću baterije, izlazna snaga izregulirana tako da se nalazi u rasponu od 13 do 14 kW. Na slici 5.49. je prikazan napon na početku izvoda na fazi L1 za sva 4 slučaja.



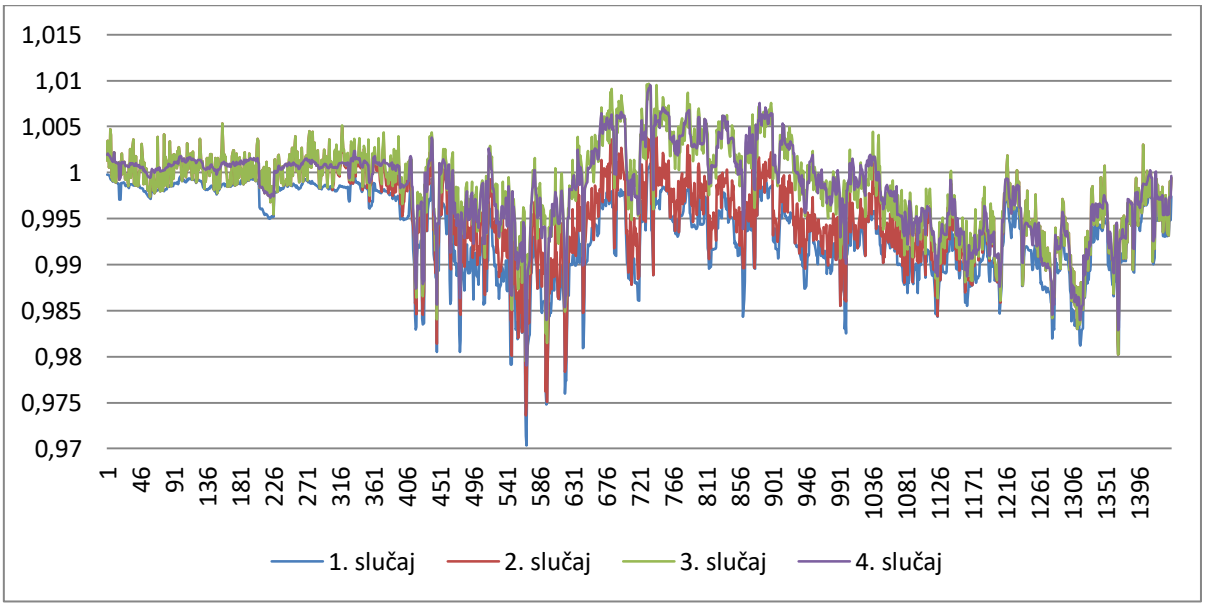
Slika 5.49. *Napon na početku izvoda na fazi L1.*

Na slici 5.50. je prikazan napon na početku izvoda na fazi L2 za sva 4 slučaja.



Slika 5.50. *Napon na početku izvoda na fazi L2.*

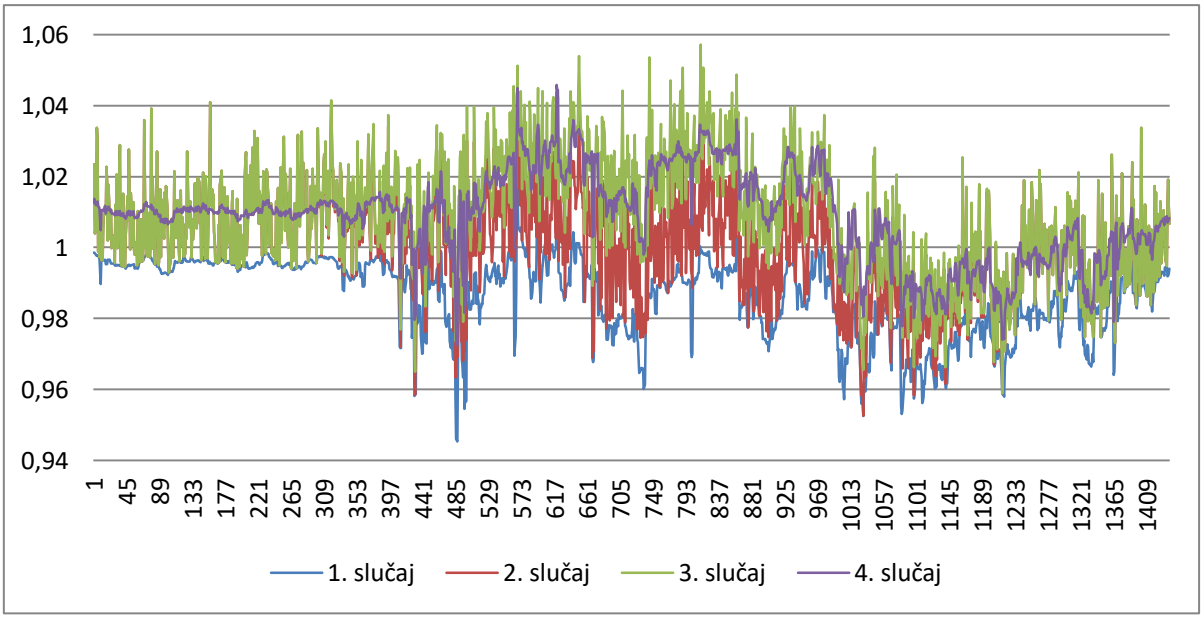
Na slici 5.51. je prikazan napon na početku izvoda na fazi L3 za sva 4 slučaja.



Slika 5.51. *Napon na početku izvoda na fazi L3.*

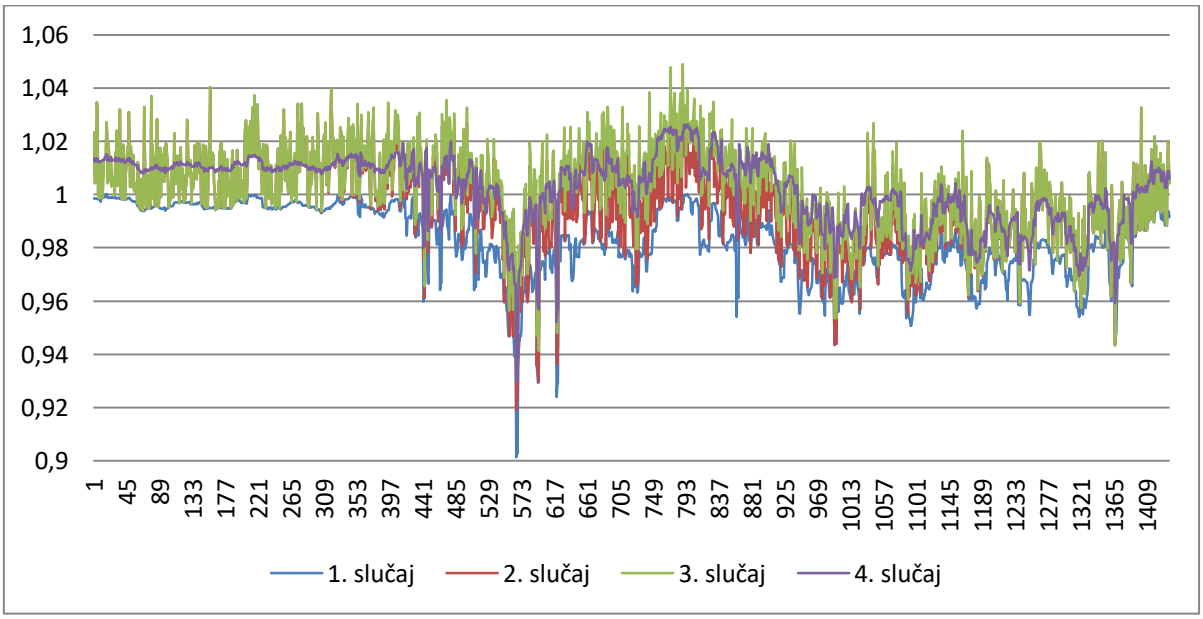
Prema slikama 5.49., 5.50. i 5.51. kada se pogledaju 3 grafa, vidi se da su naponske prilike svaki puta najbolje u 4. slučaj, kada je u IEEE niskonaponski testni izvod integrirano 12 FN sustava te 2 postrojenja na morske valove i spremnik električne energije na kraju izvoda. Kruta mreža nastoji napon držati na 1,0 p.u. ,a maksimalno odstupanje napona je u iznosu od

0,03 p.u. u 1. slučaju kada napon iznosi 0,97 p.u. Na slici 5.52. je prikazan napon na kraju izvoda na fazi L1 za sva 4 slučaja.



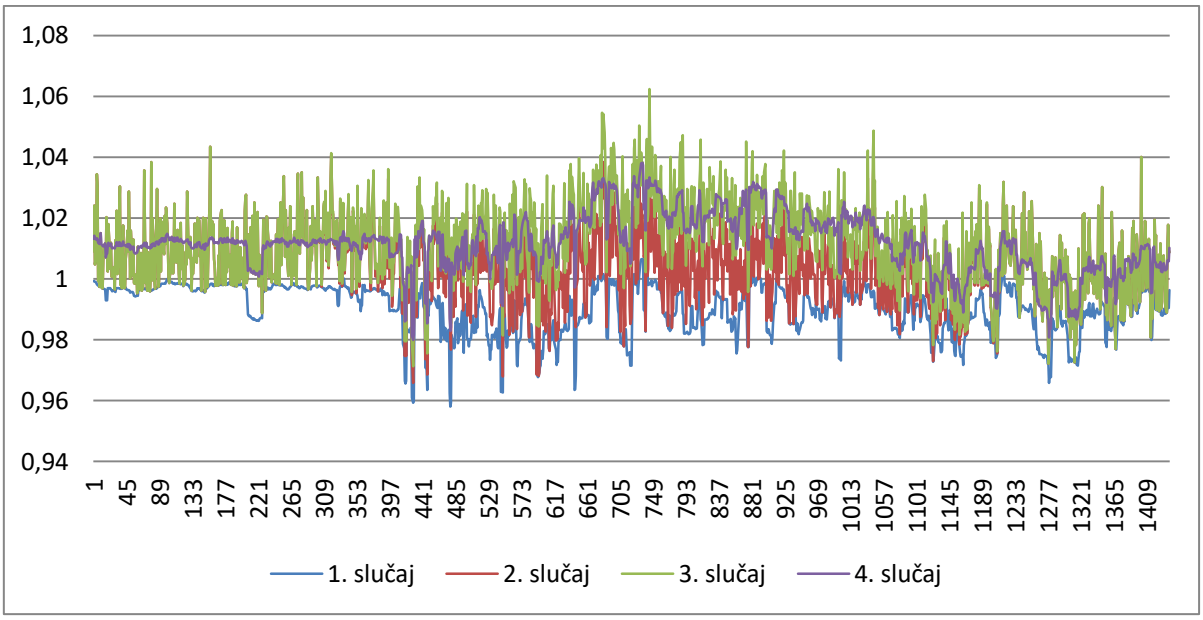
Slika 5.52. *Napon na kraju izvoda na fazi L1.*

Na slici 5.53. je prikazan napon na kraju izvoda na fazi L2 za sva 4 slučaja.



Slika 5.53. *Napon na kraju izvoda na fazi L2.*

Na slici 5.54. je prikazan napon na kraju izvoda na fazi L3 za sva 4 slučaja.



Slika 5.54. *Napon na kraju izvoda na fazi L3.*

Prema slikama 5.52., 5.53. i 5.54. kada se pogledaju naponi na kraju izvoda, vidi se da oni imaju mnogo veće oscilacije negoli naponi na početku izvoda, zato što je kraj izvoda električki najudaljeniji od krute mreže koja naponsku razinu nastoji održati na zadanoj vrijednosti koja iznosi 1,0 p.u. Najveće odstupanje je u fazi L2 u prvom slučaju, kada napon pada dolje do granice dozvoljenoga od 0,9 p.u.

U tablici 5.1. su prikazani gubitci za sva 4 testna slučaja.

Tablica 5.1. *Gubitci za sva 4 slučaja.*

Slučaj	Distribucijska mreža	Gubitci u [kWh]	Gubitci u [kVArh]
1.	Pasivna mreža	5	1
2.	Integrirana 2 WEC-a	7	1
3.	Integrirana 2 WEC-a i 12 FN sustava	9	1
4.	Integrirana 2 WEC-a, 12 FN sustava i sustav pohrane	7	1

Kako je bilo za očekivati, gubitci jalove snage su uvijek isti, zato što je i tok jalove snage za sva 4 slučaja identičan. Radni gubitci se mijenjaju za različite slučajeve, tako su najmanji za 1. Slučaj kada je mreža pasivna dok su gotovo dvostruki veći kada su integrirana postrojenja

na morske valove zajedno s 12 fotonaponskih postrojenja. Ti gubitci nastaju zbog uzlaznog toka radne snage koji je u 3. Slučaju gotovo dvostruko veći negoli silazni tok radne snage u prvom slučaju. U 2. I 4. Slučaju gubitci su jednaki, to je najvjerojatnije iz razloga što su mjerni podatci dobiveni pomoću *New energymeter.EM1 element=LINE.LINE1* jako grubi, te pokazuju samo cjeli broj bez decimalnog zareza.

ZAKLJUČAK

Nakon što je IEEE niskonaponski testni izvod modificiran, na njemu je izvršena 24-satna simulacija u programskom paketu OpenDSS koji je prethodno u radu i opisan. Rezultati analize su pokazali početno stanje pasivne mreže, njene naponske prilike, tokove radne snage te tokove jalove snage. Sljedeći korak je bio prvo definirati novi generator postrojenja na morske valove te ga potom integrirati u već analiziranu mrežu, i ponovno sprovesti analizu. Isti postupak se ponavljao još dva puta, prvo za definiranje i integraciju fotonaponskog sustava te izvršenje analize, a potom za definiranje i integraciju spremnika električne energije i izvršenje analize. Sve te analize su rezultirale velikim brojem podataka koje je trebalo obraditi, kako bi se iz njih mogli uočiti neki obrasci koji se ponavljaju te naposljetku izvesti neki zaključak. S integracijom distribuiranih izvora su se naponske prilike znatno popravile, dodatna injektirana radna snaga je povisila iznose napona u cijeloj mreži, ponajviše na mjestima koja su električki udaljenija od krute mreže. No promatrajući tokove radne snage, se može uočiti i jedna negativna strana, koju distribuirani izvori nose sa sobom, a to je da su izrazito promjenjivi, te se ne može utjecati na njih da rade onda kada je to stvarno potrebno. To se najbolje vidi u 3. slučaju kada se preklope proizvodnja iz WEC-a i FN sustava s jako malim opterećenjem, što rezultira uzlaznim tokom snage koji je veći negoli maksimalna potrošnja u pasivnoj mreži iz 1. Slučaja. Takve situacije dovode do toga da se unatoč integriranim distribuiranim izvorima u mreži gubitci povećaju i tako pogorša stanje mreže. Rješenje za ovaj problem se može naći upravo u 4. testnom slučaju, kada se integrira pravilno dimenzionirana pohrana u sustav. Baterija ograničava nagle udare promjene proizvodnje radne snage WEC-a tako što se u mrežu propušta samo unaprijed definirana snaga dok se ostatak pohrani u bateriji, te se ona prazni u situacijama kada WEC ne može isporučiti unaprijed definiranu snagu. Kada se sve razmotri, dolazi se do zaključka da se s pravom kombinacijom različitih obnovljivih izvora, uz dodatak spremnika energije dovoljnog kapaciteta i snage mogu napraviti mikro mreže koje bi i bez spoja na krutu mrežu mogle samostalno funkcionirati u otočnome pogonu.

LITERATURA

[1] Arvind Parval: Grid Integration and Impact of Wave Power System, Doktorska disertacija, Uppsala Sveučilište, Švedska, 2019.

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

[3] López, I., Andreu, J., Ceballos, S., de Alegría, I.M. and Kortabarria, I., 2013. Review of 586 wave energy technologies and the necessary power-equipment. Renewable and sustainable 587 energy reviews, 27, pp.413-434.

[4] D. Šljivac, D. Topić, udžbenik Obnovljivi izvori električne energije, FERIT Osijek, 2018.

[5] Magagna et al, JRC Workshop report , 2018.

[6] D. Šljivac, skripta Integracija OIE, FERIT Osijek, 2020.

[7] M. Bollen, F. Hassan: „Integration of distributed generation in the power system", IEEE PRESS John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

[8] Z. Klaić, skripta Integracija OIE, FERIT Osijek, 2020.

[9] P. Marić, skripta Integracija OIE, FERIT Osijek, 2020.

[10] Elaborat podešenja zaštite elektrane na biomasu BE-TO „Sava" na mrežu HEP-ODS, FERIT Osijek, 2016.

SAŽETAK

U diplomskom radu je opisan utjecaj postrojenja na morske valove na elektroenergetsku mrežu. Najprije je sprovedena analiza početnog stanja distribucijske mreže, koja je u tom trenutku još pasivna mreža. U drugom slučaju je priključeno postrojenje na morske valove na elektroenergetsku mrežu promijenivši je iz pasivne u aktivnu mrežu. Potom je analiziran njegov utjecaj na naponske prilike u elektroenergetskoj mreži kao i utjecaj na tokove snaga. Isti postupak je ponovljen i nakon integracije fotonaponskih sustava i spremnika električne energije. U posljednjem dijelu rada se rezultati pojedinih slučajeva uspoređuju i donose zaključci o utjecaju pojedinih distribuiranih izvora na prilike u elektroenergetskoj mreži.

ABSTRACT

Impact of the wave energy converter on the electricity grid

The thesis describes the impact of the wave energy converter on the electricity grid. First, an analysis of the initial state of the distribution network was done, which is still a passive network at that time. In the second case, the wave energy converter was connected to the power grid, changing it from a passive to an active network. Then, its influence on voltage conditions in the electric power network as well as the influence on power flows were analyzed. The same procedure was repeated after the integration of photovoltaic systems and an electricity storage system. In the last part of the paper, the results of individual cases are compared and conclusions are drawn about the impact of individual distributed sources on the opportunities in the electricity network.

ŽIVOTOPIS

Mario Mišković rođen je u Vinkovcima 23. siječnja 1995. godine. Osnovnu školu je završio u Tolisi. Pohađao je Srednju školu fra Martina Nedića u Orašju, smjer Elektrotehnika, te po završetku dobiva zvanje elektrotehničar. Nakon završene srednje škole upisao je preddiplomski stručni studij elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Godine 2017. završava preddiplomski stručni studij elektroenergetike te stječe akademski stupanj stručnog prvostupnika inženjera elektrotehnike. Iste godine upisuje razlikovnu godine, te po njenom uspješnom završetku 2018. godine upisuje diplomski studij elektroenergetike, smjer Održiva elektroenergetika.