

Usporedba utjecaja distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija OIE na prilike u elektroenergetskom sustavu

Živković, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:813868>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**USPOREDBA UTJECAJA DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE IZ
RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA OIE NA PRILIKE U EES**

Diplomski rad

Antonio Živković

Osijek, 2024.

Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Antonio Živković
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1479, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083752
Mentor:	prof. dr. sc. Damir Šljivac
Sumentor:	dr. sc. Matej Žnidarec
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Predrag Marić
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Damir Šljivac
Član Povjerenstva 2:	Marina Dubravac, univ. mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Usporedba utjecaja distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija OIE na prilike u elektroenergetskom sustavu
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Definirati utjecaj distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija OIE na prilike u EES i na primjeru odabranih tehnologija (FNE/VE/mHE i TE na OIE) i odabranog modela mreže i mikrolokacije usporediti i prikazati i usporediti te utjecaje). Sumentor. dr.sc. Matej Žnidarec
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	06.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	16.09.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	19.09.2024.

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

Osijek, 19.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Antonio Živković
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1479, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba utjecaja distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija OIE na prilike u elektroenergetskom sustavu**

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

i sumentora dr. sc. Matej Žnidarec

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

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

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	3
2.1. Priključak distribuiranih izvora na OIE na EES.....	5
2.2. Vrste priključka elektrana na OIE na mrežu	8
2.2.1. Izravni priključak generatora na OIE na mrežu.....	9
2.2.2. Potpuno neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetske pretvarača	9
2.2.3. Djelomično neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetske pretvarača	11
2.2.4. Modularni/distribuirani neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetske pretvarača	12
3. UTJECAJ INTEGRACIJE DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE NA PRILIKE U EES-u	13
3.1. Utjecaj integracije distribuirane proizvodnje na naponske prilike u distributivnoj mreži	14
3.1.1. Regulacija napona promjenom prijenosnog omjera transformatora	19
3.1.2. Regulacija napona regulacijom djelatne i jalove snage	21
3.1.3. Regulacija napona izgradnjom novih ili povećanjem presjeka postojećih vodova	23
3.1.4. Koordinacija više metoda	24
3.2. Utjecaj integracije distribuirane proizvodnje na strujne prilike u distributivnoj mreži.....	26
3.2.1. Povećanje sposobnosti opterećenja vodova, izgradnja novih veza i dinamička sposobnost opterećenja	27
3.2.2. Dinamička uzdužna i poprečna kompenzacija	28
3.2.3. Sustavi upravljanja energijom.....	29
3.2.4. Upravljanje potražnjom	30
4. SIMULACIJE I ANALIZA DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE IZ RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA OIE NA PRILIKE U EES.....	32
4.1. Modeliranje odabranog modela mreže.....	32
4.2. Simulacija 1.: Integracija fotonaponske elektrane na odabrani model mreže otoka Visa	34
4.3. Simulacija 2.: Integracija vjetroelektrane u odabrani model mreže otoka Visa.....	40
4.4. Simulacija 3.: Integracija male hidroelektrane u odabrani model mreže otoka Visa	46
4.5. Simulacija 4.: Integracija elektrane na morske valove u odabrani model mreže otoka Visa	52
4.6. Usporedba utjecaja distribuirane proizvodnje na prilike u EES-u.....	58
4.6.1. Pri minimalnom toku energije s integriranim elektranama na OIE bez priključenih baterijskih spremnika energije	58

4.6.2. Pri minimalnom toku energije s integriranim elektranama na OIE sa priključenim baterijskim spremnicima energije.....	63
5. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA	72
SAŽETAK	73
ABSTRACT	74
ŽIVOTOPIS	75

1. UVOD

Integracija distribuirane proizvodnje u elektroenergetski sustav jedna je od ključnih područja istraživanja i razvoja u elektroenergetici. U posljednjih dvadesetak godina, s procesom restrukturiranja elektroenergetske mreže, centralizirani izvori energije zamjenjuju se decentraliziranim. Takva pojava rezultirala je novom vrstom proizvodnje u elektroenergetskim sustavima, a posebno u distribucijskim sustavima zvanim distribuirana proizvodnja. Distribuirana proizvodnja odnosi se na proizvodnju električne energije iz manjih, lokaliziranih, obnovljivih izvora energije kao što su fotonaponske elektrane, manje vjetroelektrane, bioplinska postrojenja, male hidroelektrane, termoelektrane te kogeneracijska postrojenja. Ovaj pristup decentralizirane proizvodnje električne energije donosi prednosti, ali i izazove koje zahtijevaju pažljivo planiranje i integraciju.

U ovom diplomskom radu u fokusu će biti utjecaj različitih distribuiranih izvora na prilike u elektroenergetskom sustavu te njihova međusobna usporedba. Nakon prvog uvodnog poglavlja, drugo i treće poglavlje daje teorijsku osnovu potrebnu za simulacije i analizu potrebnu u četvrtom (posljednjem) poglavlju u kojemu je razrađena usporedba utjecaja distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija na OIE na prilike u EES-u.

U drugom dijelu rada opisana je nova vrsta proizvodnje koja se pojavila krajem 20. stoljeća nazvana distribuirana proizvodnja, njezin primarni zadatak, budući ciljevi i osnovni razlozi uvođenja takve nove vrste proizvodnje. Pozitivni i negativni utjecaj na priključenu mrežu te su navedene metode iz različitih istraživanja koje mogu povećati stabilnost elektroenergetskog sustava. Vrste elektrana koje se spajaju na distribucijsku/prijenosnu mrežu, utjecaj distribuiranih izvora na nadležnu mrežu na mjestu priključka i definiran je pojam razina integracije. Nadalje, definirano je mjesto priključka elektrana na OIE na mrežu, tehnologije priključka i kratko objašnjena svaka vrsta priključka kao i njihova praktična primjena.

Treće poglavlje ovog magisterijskog rada pruža nam podatke o utjecaju integriranja distribuirane na prilike u EES-u. Prvenstveno je prikazan prijelaz distribucijske mreže s pasivne na aktivnu integracijom distribuiranih izvora te dodatni prijelaz na pametnu (naprednu) mrežu koja će biti omogućena integracijom informacijsko – komunikacijskim tehnologijama. Utjecaj integracije distribuirane proizvodnje na naponske prilike u distributivnoj mreži sljedeći je pojam koji je detaljnije razrađen. U prvom podpoglavlju opisan je i osnovni koncept kontrole napona u distribucijskoj mreži, dopušteno odstupanje napona u prijenosnoj i distribucijskoj mreži te su dani matematički izrazi za približan porast napona na mjestu priključka distribuiranog izvora kao i

utjecaj na ostale elemente koji su spojeni na istu mrežu. Prema navedenim matematičkim izrazima zaključeno je o čemu sve ovisi razina integracije u distribucijskoj (prijenosnoj mreži). Uz to, navedene su i kratko objašnjene metode za povećanje razine integracije regulacijom napona. Drugo pod poglavlje dotiče se utjecaja integracije distribuirane proizvodnje na strujne prilike u distributivnoj mreži. Definirani su osnovni elementi pri projektiranju svake elektroenergetske (distribucijske) mreže te je objašnjeno zašto su vodovi i kabeli u NN mreži većinom predimenzionirani. Sljedeće su navedene metode za smanjenje strujnih opterećenja i povećanje razine integracije distribuiranih izvora te pojedinačno kratko pojašnjena svaka od njih.

U istraživačkom (četvrtom) dijelu rada opisan je odabrani model mreže otoka Visa. Odrađene su simulacija pri minimalnom i pri maksimalnom toku energije sa i bez baterijskih spremnika energije. Pri simulacijama mijenjala se vrsta distribuiranog izvora. Distribuirani izvori koji su se koristili su: fotonaponska elektrana, vjetroelektrana, mala hidroelektrana i elektrana na morske valove. U svakoj odrađenoj simulaciji pratio se utjecaj distribuiranog izvora na naponske prilike na električki najudaljenijoj sabirnici i na priključnoj sabirnici elektrane. Nadalje, pratilo se i strujno opterećenje voda elektrane na OIE prema ostatku mreže, strujno opterećenje vodnih polja i strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži. Posljednje pod poglavlje prikazuje usporedbu utjecaja distribuirane proizvodnje na prilike u EES-u i to pri minimalnom toku energije s integriranim elektranama na OIE bez i sa baterijskim spremnicima energije.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak ovog diplomskog rada je definirati utjecaj distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija OIE na prilike u EES i na primjeru odabranih tehnologija (FNE/VE/mHE i TE na OIE) i odabranog modela mreže i mikrolokacije usporediti i prikazati i usporediti te utjecaje.

2. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Elektroenergetski sustav sastoji se od jedinica za proizvodnju električne energije, uređaja koji koriste električnu energiju te elektroenergetske mreže koja ih povezuje. Primarni zadatak elektroenergetskog sustava je omogućiti prijenos i distribuciju električne energije od proizvodnje do krajnjih potrošača (pasivna mreža), uz održavanje prihvatljive razine pouzdanosti i kvalitete električne energije za sve korisnike (proizvodne i potrošačke jedinice) i sve to uz najnižu moguću cijenu. Mnoge tvrtke i organizacije koje sudjeluju u tome uspjele su i uspijevaju obaviti taj zadatak izvrsno: pouzdanost i kvaliteta napona su prihvatljivi ili čak i više od toga za većinu korisnika, a električna energija je općenito gledajući „jeftin“ energent. I dalje se provode mnoga istraživanja i druge slične aktivnosti (simulacije) kako bi se stvari još više poboljšale ili poboljšala situacija na određenim (ruralnim) područjima.

Jedan od razloga uvođenja novih vrsta proizvodnih jedinica u elektroenergetski sustav je otvaranje tržišta električne energije krajem 20. stoljeća što je olakšalo ulazak novih proizvodnih jedinica u elektroenergetski sustav. Drugi razlog prvenstveno se dodiruje okoliša. Konvencionalne elektrane rezultiraju emisijom ugljikovog dioksida te tako utječu na globalno zagrijavanje. Prelaskom s konvencionalnih izvora koji koriste fosilna goriva poput ugljena, plina, nafte, na nekonvencionalne (obnovljive) izvore poput vjetra, vode, sunca, smanjuje se emisije štetnih plinova. Iz navedenih razloga sve više dolazi u fokus distribuirana proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora. Pod pojmom distribuirana proizvodnja smatramo proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i to na mjestu potrošnje ili u blizini potrošnje električne energije. U distribuirane izvore u ovome radu ubrajati će se fotonaponske elektrane, vjetroelektrane, male hidroelektrane i termoelektrane. Navedene vrste elektrana povezuju se na distributivnu mrežu niskog ili srednjeg napona, od čega i dolazi pojam distribuirana proizvodnja [1].

Povezivanje distribuiranih izvora na distributivnu mrežu ima određene pozitivne utjecaje :

- Korištenjem elektrana na OIE smanjujemo emisiju ugljikovog dioksida kao i drugih štetnih plinova što će doprinijeti usporavanju klimatskih promjena
- Distribuirana proizvodnja smanjuje ovisnost lokalne zajednice o uvozu energije što povećava energetska stabilnost, sigurnost i neovisnost
- Proizvodnja električne energije vrši se u blizini same potrošnje, a time smanjujemo gubitke koji bi nastali pri transportu električne energije na velikim udaljenostima
- Poboljšanje naponskih prilika u mreži te moguće rasterećenje postojećih VN i SN transformatora i vodova

Uz pozitivne utjecaje, također imamo i elemente koji negativno utječu na distributivnu mrežu :

- Elektrane na OIE u potpunosti ovise u vremenskim uvjetima (količina vode, vjetra, sunca) i nisu uvijek predvidivi što može uzrokovati nestabilnost u opskrbi električnom energijom
- Iako je u posljednje vrijeme došlo do smanjenja cijene potrebne opreme još uvijek početni kapitalni troškovi su dosta visoki ukoliko gradimo vjetropark ili veliku sunčanu elektranu (stotinjak kW (MW))
- Instalacija velikih sunčanih elektrana ili vjetroparkova zahtijevaju veliku površnu
- Elektrane na OIE manje utječu na okoliš od elektrana na fosilna goriva, no vjetroturbine mogu utjecati na ptice i stvarati jako veliku buku, dok hidroelektrane mogu uništiti staništa vodenih organizama
- Integracija distribuiranih izvora s vremenom postaje sve zahtjevnija i zahtjeva integraciju napredne infrastrukture za upravljanje proizvedenom električnom energijom kao i mogućnosti skladištenja iste.

Nagla promjena bilo na strani proizvodnje ili na strani potrošnje mogla bi ugroziti situaciju na koju smo svi toliko navikli. Današnje moderno društvo u velikoj mjeri je ovisno o dostupnosti i pouzdanosti električne energije. Nekoliko kratkih prekida opskrbe i povećanje cijena to je jasno pokazalo. Bez obzira na sve postavljene argumente o uvođenja nove proizvodnje električne energije, ona će se morati integrirati u elektroenergetski sustav. Integracija velikih proizvodnih jedinica ili mnogih malih jedinica zahtijevat će investicije na različitim naponskim razinama. Povezivanje velikih proizvodnih jedinica s prijenosnim ili distribucijskim sustavom nije ništa novo i potrebne investicije su normalan dio planiranja prijenosnog i distribucijskog sustava. S novim vrstama proizvodnje pojavljuju se novi fenomeni koji zahtijevaju nove vrste rješenja. Manje proizvodne jedinice povezane su s niskonaponskom ili sredjenaponskom distribucijskom mrežom, gdje je tradicionalno bila povezana samo potrošnja. Uvođenje velikog broja distribuiranih izvora zahtijevat će investicije ne samo na naponskoj razini na kojoj su jedinice povezane, već i na višim naponskim razinama zbog promjene toka energije. Promjene u proizvodnji iz obnovljivih izvora uvode nove fenomene kvalitete snage, obično na nižim naponskim razinama. Pomak s velikih proizvodnih jedinica povezanih na višim naponskim razinama na male jedinice povezane na nižim naponskim razinama također će utjecati na dizajn i rad distribucijskih i prijenosnih mreža u budućnosti.

Kako bi osigurali stabilnost mreže, potrebno je integrirati različite napredne sustave za upravljanje, nadzor i skladištenje električne energije. Primjer takovog sustava možemo vidjeti u Njemačkoj

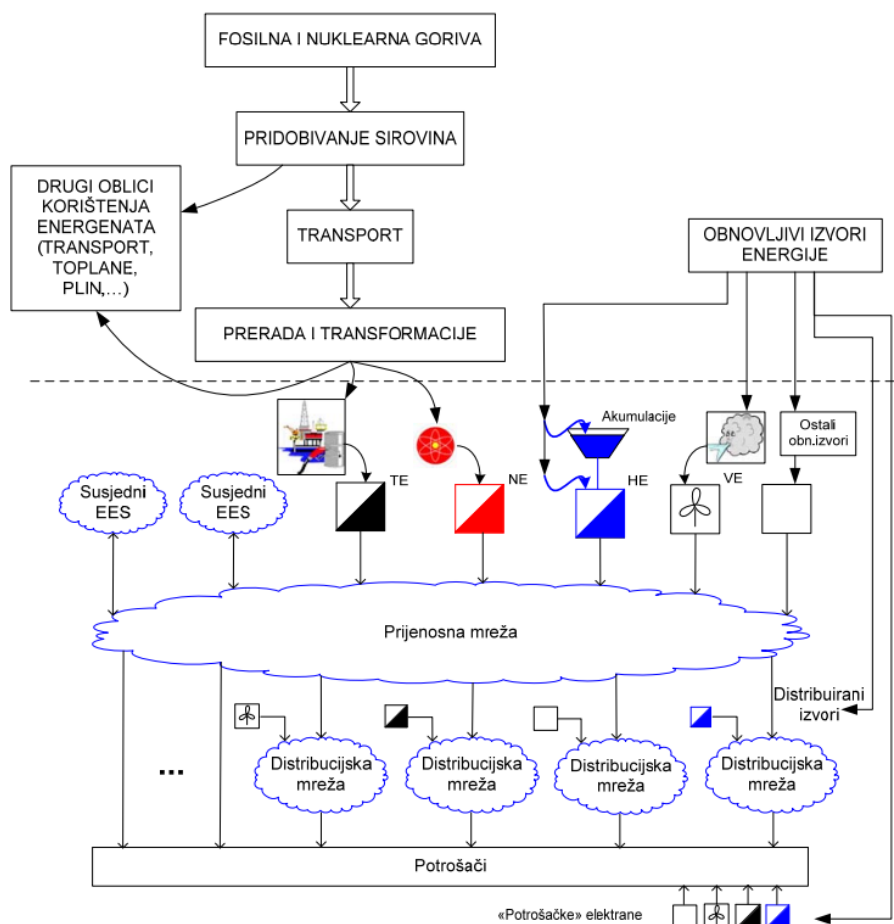
koja je lider u integraciji distribuirane proizvodnje, a posebno iz fotonaponskih elektrana. Njemačka potiče masovno postavljanje solarnih panela na krovove kuća i poslovnih objekata što je omogućilo smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima. Primjer uspješne integracije je povezivanje manjim fotonaponskih elektrana s lokalnim mrežama uz podršku naprednih sustava za upravljanje naponom i skladištenje energije [12]. Nadalje, Danska je poznata po jako visokoj integraciji vjetroelektrana u elektroenergetski sustav gdje više od 40% njihove električne energije dolazi iz vjetroparkova. Jedan od inovativnih pristupa koji se koristi u Danskoj je koncept virtualnih elektrana. Takve virtualne elektrane ujedinjuju male distribuirane izvore energije, kao što su solarni paneli i vjetroelektrane, s tehnologijama za pohranu energije i upravljanjem potrošnjom. Ovaj sustav omogućava koordinirano upravljanje različitim izvorima energije kako bi se osigurala stabilnost mreže i povećala fleksibilnost u odgovoru na promjene u potražnji i proizvodnji [11]. Još jedan dobar primjer je implementacija pametnih mreža kroz projekt „Grid4EU“ i različite pilot-projekte usmjerene na poboljšanje integracije obnovljivih izvora energije. Projekt „Grid4EU“ je inovativni projekt pametnih mreža koji su predložili operatori distribucijskih sustava iz Češke, Francuske, Njemačke, Italije, Španjolske i Švedske, u bliskom partnerstvu s nizom dobavljača električne energije, proizvođača i istraživačkih organizacija. Glavni smjernice projekata su pokazati utjecaj korištenja tehnologija poput automatizacije distribucijskih mreža, skladištenja energije i integracije električnih vozila u povećanju pouzdanosti, fleksibilnosti i otpornosti elektroenergetskog sustava [9].

2.1. Priključak distribuiranih izvora na OIE na EES

Primarni zadatak elektroenergetskog sustava je omogućiti prijenos i distribuciju električne energije od mjesta proizvodnje do krajnjih potrošača uz održavanje što bolje pouzdanosti i kvalitete električne energije. Priključivanjem distribuiranih izvora energije na distributivnu mrežu javljaju se utjecaji koji mogu smanjiti pouzdanost i kvalitetu pri isporuci električne energije. Pri određivanju tih utjecaja možemo razlikovati dvije vrste elektrana za proizvodnju električne energije iz OIE (Slika 2.1.):

1. Velike elektrane – hidroelektrane, termoelektrane na biomasu velikih instaliranih snaga i vjetroelektrane najčešće koje se priključuju na prijenosu mrežu na visokonaponskoj razini,
2. Distribuirana proizvodnja električne energije – fotonaponske elektrane, male hidroelektrane, geotermalne elektrane, vjetroelektrane manjih snaga te mala

kogeneracijska postrojenja na biomasu i bioplin obično se priključuju na distributivnu mrežu na srednjenaponskoj i niskonaponskoj razini



Slika 2.1. Priključenje elektrana/distribuirane proizvodnje na OIE na prijenosnu (distributivnu) mrežu [3]

Prema izvoru [1] distribuirani izvori (elektrane) na obnovljive izvore energije na mjestu priključka i u okolnoj mreži utječu na:

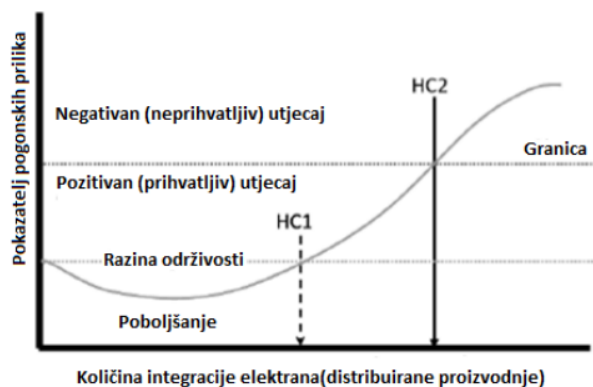
- Strujna opterećenja i gubitke kroz mrežu (vodovi i transformatori)
- Naponske prilike i regulaciju napona u čvorovima mreže (sabirnice postrojenja i potrošača)
- Tokove snaga
- Kvalitetu električne energije (napona) – naponski propadi, pouzdanost, flikeri, harmonijska distorzija i sl.
- Povećanje razine struja kratkih spojeva i moguć utjecaj na prekoračenje nazivnih (rasklopnih) veličina rasklopne opreme osobito prekidača i podešavanje sustava zaštite

Ukoliko gledamo utjecaj velikih distribuiranih izvora na OIE na cijeli EES, najveći utjecaj imaju vjetroelektrane (vjetroparkovi) koji stvaraju probleme u:

- regulaciju djelatne snage i frekvencije
- regulaciju jalove snage i napona sustava
- dinamičku stabilnost sustava (stabilnost napona, kuta i frekvencije)

Povezivanjem elektrana (distribuiranih izvora) na OIE jako je važna snaga kratkog spoja mreže na mjestu priključka jer u velikoj mjeri pokazuje koji je učinak generator. Učinak generatora elektrane/distribuirane proizvodnje na OIE na mreži direktno ovisi o snazi kratkog spoja na mjestu priključka, kao i veličina predloženog generatora [2].

Ovisno o količini integracije distribuiranih izvora i početnim uvjetima u mreži utjecaj može biti pozitivan ili negativan. Slika 2.2. prikazuje nam količinu integracije distribuiranih izvora s obzirom na pokazatelje pogonskih prilika. Razina integracije označava nam sposobnost sustava da prihvati određenu količinu energije iz elektrana na OIE (distribuirani izvor) bez da se utječe na kvalitetu i stabilnost promatranog sustava. Reguliranje napona u EES-u jedna je od ključnih metoda za održavanje i poboljšavanje naponskih prilika te predstavlja temelj za povećanje razine integracije i održavanje stabilnosti sustava.



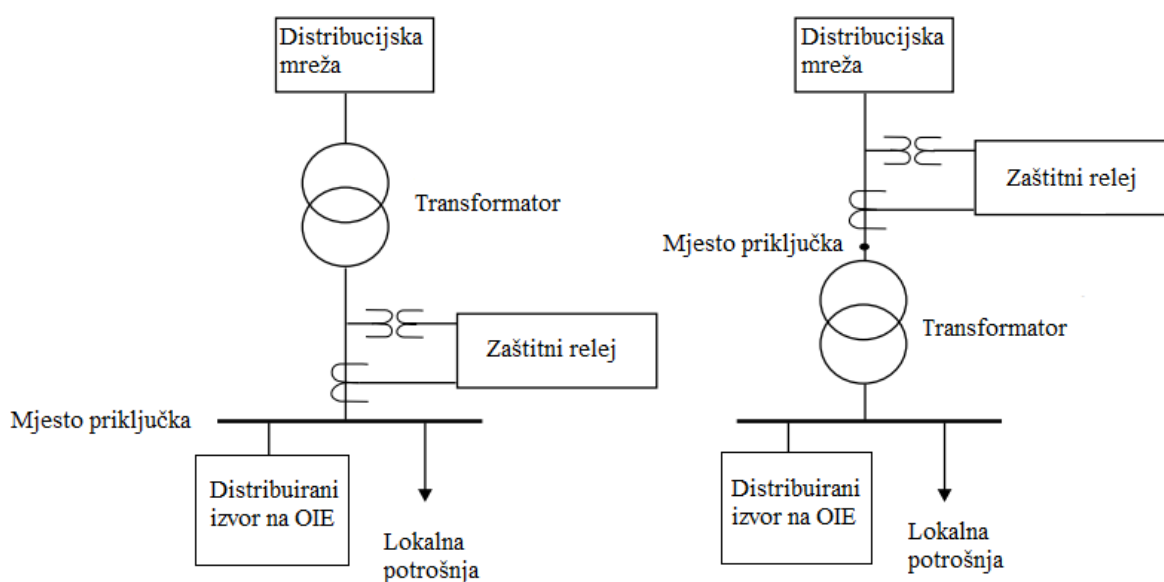
Slika 2.2. Razina integracije distribuirane proizvodnje [1]

Kako bi što bolje razumjeli sliku 2.2 uzeti ćemo određene naponske prilike u mreži. Ukoliko je napona na mjestu priključka bio niži od nazivnog napona priključenjem distribuiranog izvora na OIE dovesti će do povećanja napona do nazivne vrijednosti (što nam je točka HC1) što smatramo pozitivnim utjecajem. Daljnjom integracijom distribuiranih izvora dolazi do povišenja napona (od točke HC1 do točke HC2) koja se smatra granicom prihvatljivog utjecaja. Ukoliko prekoračimo granicu (krivulja nakon točke HC2) dolazi do negativnog utjecaja na okolnu mrežu na mjestu

priključka što će rezultirati ograničenjem daljnje integracije elektrana na OIE ili će se morati poduzeti dodatne tehničke mjere (regulacija u mreži, upravljanje potrošnjom, uvođenje naprednih mreža,...).

2.2. Vrste priključka elektrana na OIE na mrežu

Mjesto priključka distribuiranog izvora (engl. Point of Common Coupling, PCC) je čvor u distributivnoj (može biti i u prijenosnoj) mreži gdje distribuirani izvor ima najveći utjecaj na priključenu mrežu. Distribuirani izvor (generator) obično se na mrežu priključuje pomoću zaštitnih releja (lijeva shema na slici 2.3.), dok rjeđe preko transformatora (desna shema na slici 2.3.).



Slika 2.3. Dvije vrste priključka distribuiranog izvora [1]

Za priključivanje distribuiranih izvora koriste se različite tehnologije, no najčešće se koriste elektronički energetske pretvarači i generatori (sinkroni i asinkroni) kako bi se zadovoljili tehnički uvjeti prema mrežnim pravilima.

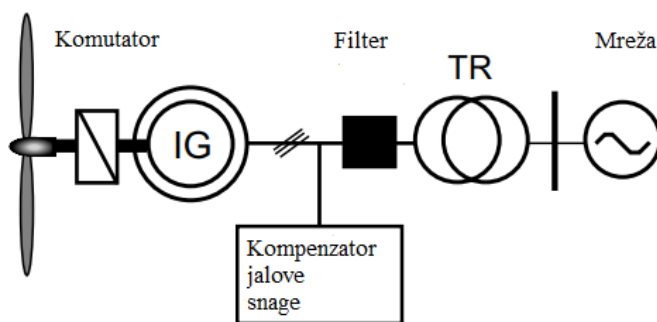
Osnovna podjela tehnologija priključka [1] :

1. Izravan priključak sinkronog ili asinkronog (indukcijskog) generatora
2. Potpuno neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetskih pretvarača
3. Djelomično neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetskih pretvarača
4. Modularni/distribuirani neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetskih pretvarača

2.2.1. Izravni priključak generatora na OIE na mrežu

Izvori kao što su: vjetroelektrana, termoelektrana, mala hidroelektrana, kogeneracijsko postrojenje na biomasu i bioplin su izvori koji se mogu izravno priključiti na mrežu jer izvorno proizvode mehaničku energiju što povećava učinkovitost sustava izbjegavajući dodatne gubitke (među pretvorbe). Odabir generatora u elektranama na OIE ovisi o prirodi mehaničke energije:

- Za stalnu brzinu vrtnje osovine agregata koriste se sinkroni generatori koji mogu proizvoditi i djelatnu i jalovu snagu ovisno o podešenom faznom pomaku. Pri spajanju sinkronih generatora s mrežom potrebna je dodatna oprema za sinkronizaciju paralelnog pogona s mrežom. Sinkroni generator koriste se za priključivanje termoelektrana na biomasu, geotermalnih elektrana, sunčanih termoelektrana te kod mogućeg otočnog pogona
- Za iznimno promjenjivu brzinu vrtnje osovine agregata primjereniji su asinkroni generatori koji daju mogućnost prigušenja oscilacija kroz razliku u kliznoj brzini između rotora i statora. Asinkroni generatori jeftiniji su od sinkronih generatora, ne zahtijevaju sinkronizaciju s mrežom, no uzrokuju povlačenje jalove snage iz mreže i veliku poteznu struju što može uzrokovati flikere na mjestu priključka. Zbog takvog utjecaja potrebna je i dodatna kompenzacija jalove snage (u osnovi može biti kondenzatorska baterija, Slika 2.4.). Obično se koriste u vjetroelektranama i malim hidroelektranama.

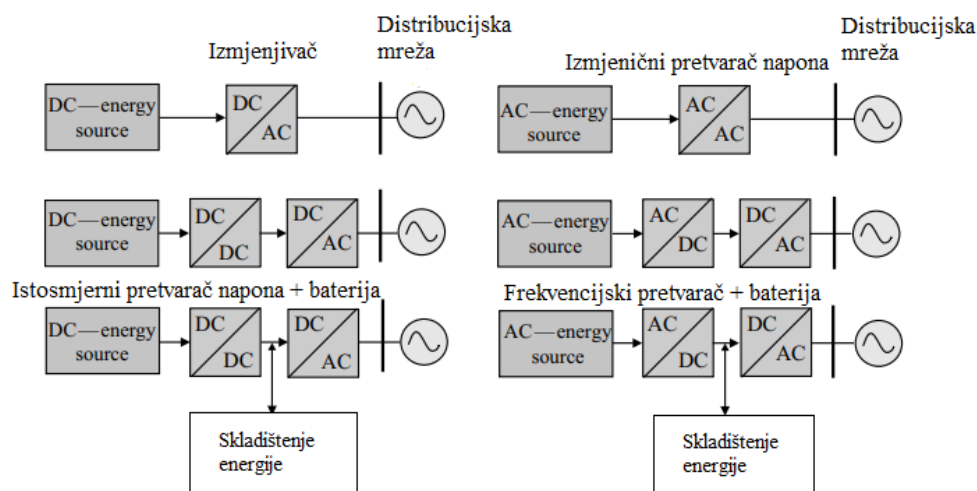


Slika 2.4. Izravni priključak vjetroturbine na mrežu preko asinkronog generatora i kompenzatora jalove snage [1]

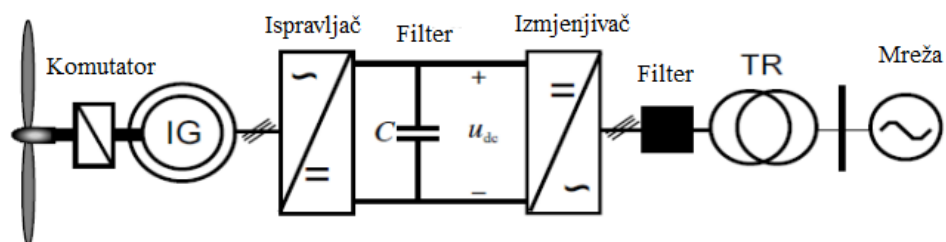
2.2.2. Potpuno neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetske pretvarača

Glavni zadatak priključka pomoću elektroničkih energetske pretvarača je kondicioniranje energije proizvedene iz distribuiranih izvora kako bi se proizvedena energija uskladila s mrežnim pravilima i povećala učinkovitost. Elektronički energetske pretvarači imaju sposobnost pretvorbe energije iz jednog oblika u drugi pomoću i to :

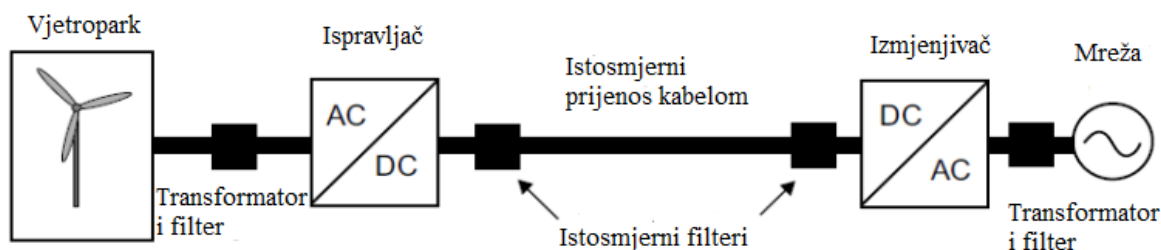
1. Pretvorba istosmjerne struje izvora u izmjeničnu tzv. izmjenjivači (DC/AC) obično se koriste za priključenje fotonaponskih sustava (Slika 2.5.)
2. Pretvorba istosmjerne struje izvora u istosmjernu tzv. istosmjerni pretvarač napona (DC/DC) tipično se koristi kao tragač maksimalne snage u fotonaponskim modulima (Slika 2.5.)
3. Pretvorba izmjenične struje izvora u izmjeničnu :
 - Izmjenični pretvarači napona (AC/AC) koriste se za usklađivanje napona prema mrežnim pravilima
 - Frekvencijski pretvarači (AC/DC-DC/AC) obično se koriste pri priključivanju vjetroelektrana na kopnu (Slika 2.6.) ili na pučini (Slika 2.7.)



Slika 2.5. Vrste konfiguracija potpuno neizravnog priključka pomoću elektroničkih energetskih pretvarača [1]



Slika 2.6. Potpuno neizravni priključak vjetroelektrane na kopnu pomoću frekvencijskog pretvarača[1]

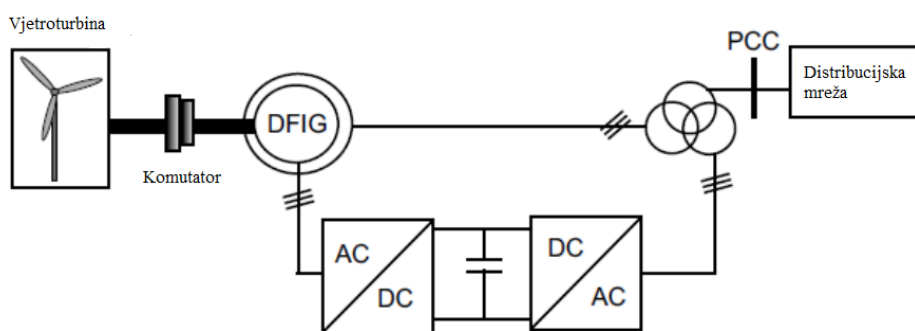


Slika 2.7. Potpuno neizravni priključak vjetroelektrane na pučini pomoću frekvencijskog pretvarača[1]

2.2.3. Djelomično neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetskih pretvarača

Zbog vrlo visoke cijene potpuno neizravnog priključka generatora pomoću elektroničkih energetskih pretvarača pune (nazivne) snage elektrane (distribuiranog izvora) koristi se kompromisno rješenje, a to je djelomičan priključak generatora pomoću elektroničkih energetskih pretvarača s određenim postotkom nazivne snage elektrane (poznatiji kao dvostruko napajanje ili dvostruki priključak na mrežu). Dva primjera takvog spoja su:

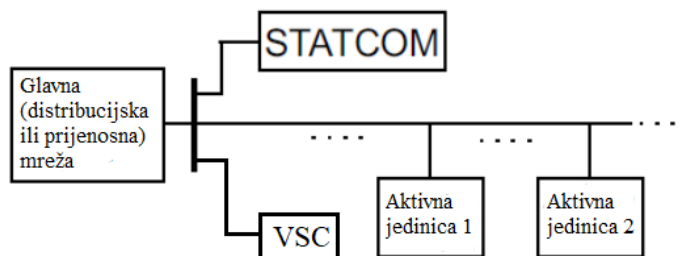
1. Vjetroelektrane u izvedbi s dvostruko napajanim asinkronim (induktivnim) generatorom (eng. *Double-Fed Induction Generator, DFIG*) – direktni priključak na mrežu preko statora te djelomični priključak preko rotora pomoću frekvencijskog pretvarača određene postotne snage generatora.



Slika 2.8. Vjetroturbina priključena na distribucijsku mrežu preko dvostruko napajanog asinkronog generatora [1]

2. Priključak vjetroelektrana ili drugog skupa distribuiranih izvora sa statičkim kompenzatorima jalove snage – tipično su to vjetroparkovi (ili drugi skupovi distribuiranih izvora) kojima je potreban središnji djelomični priključak zbog mogućeg prolaska kroz kvar u mreži i za pomoć pri regulaciji napona putem proizvodnje jalove

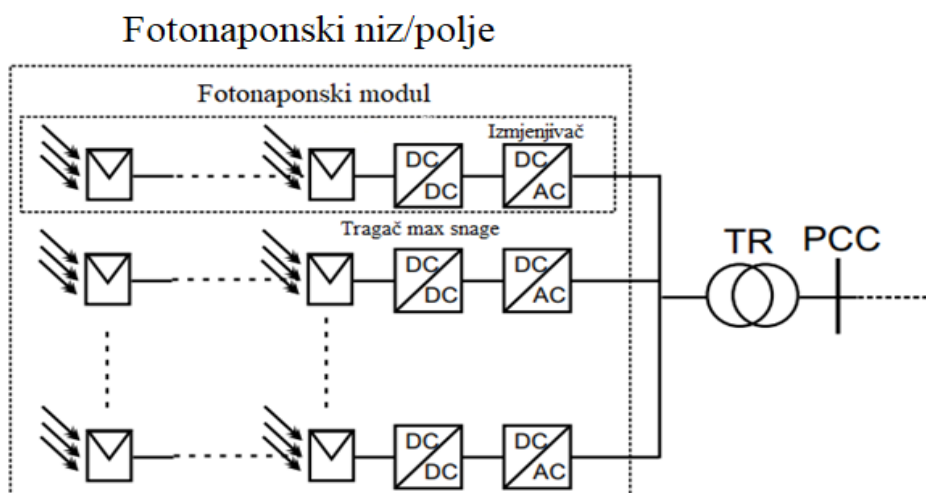
snage. U takvim slučajevima obično se koriste statički kompenzatori snage (engl. STATic Var COMpenastor, STATCOM) i naponski pretvarači (eng. *Voltage Source Converter*, VSC)



Slika 2.9. Priključak skupa distribuiranih izvora na glavnu mrežu [1]

2.2.4. Modularni/distribuirani neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetske pretvarača

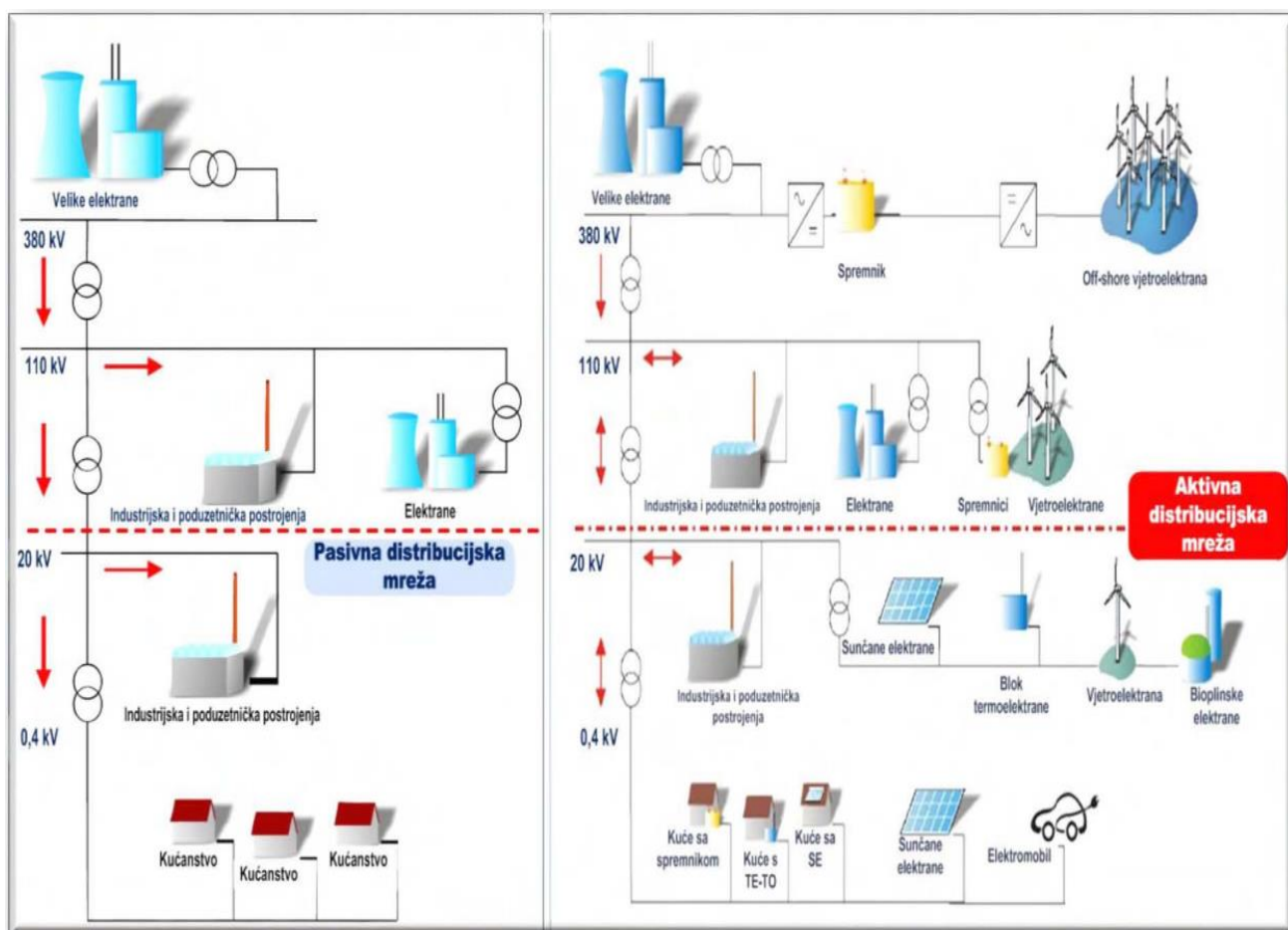
Modularni/distribuirani neizravni priključak generatora pomoću elektroničkih energetske pretvarača koriste se pri spajanju više distribuiranih izvora koji se priključuju na istom mjestu u nadležnu mrežu. Ukoliko jedan vlasnik posjeduje više distribuiranih izvora na istom mjestu priključka tada ima mogućnost regulacije napona u nadležnoj mreži. Ova vrsta priključka obično se koristi u fotonaponskim sustavima većih snaga s glavnim ciljem povećanja učinkovitosti, poboljšanja kvalitete električne energije i pouzdanosti napajanja. Česta primjena ovog priključka je i kod vjetroparkova s potpunim priključkom pomoću elektroničkih energetske pretvarača u kojima modularna konfiguracija priključka omogućuje bolje upravljanje što će rezultirati pouzdaniji sustav s mogućnošću rekonfiguracije i samo oporavka.



Slika 2.10. Fotonaponski niz/polje [1]

3. UTJECAJ INTEGRACIJE DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE NA PRILIKE U EES-u

Prije integriranja distribuirane proizvodnje glavna uloga prijenosne mreže je bila da se preko VN vodova i kabela (400 kV, 220 kV, 110 kV) električnu energiju proizvedenu iz konvencionalnih elektrana preko distribucijske mreže (35 kV, 20 kV, 10 kV i 0,4 kV) prenese krajnjim potrošačima. Dakle, imali smo jednosmjernan tok snage, od najviše naponske razine prema najnižoj (od generatora-proizvođača do potrošača) te nam se takav tip mreže naziva pasivna distribucijska mreža. Nakon spajanja obnovljivih izvora na distribucijsku mrežu mijenja se konfiguracija mreže te mreža postaje aktivna (Slika 3.1.) pri čemu dolazi do promjene naponskih prilika, strujnog opterećenja, gubitaka snage, kvalitete električne energije, podešenja zaštite i dr. Daljnji cilj je prelazak na naprednu (pametnu) mrežu koja omogućuje dvosmjernu razmjenu informacije i energije, između proizvođača i potrošača, pomoću ugrađenom inteligentnom komunikacijskom sustavu za nadzor i upravljanje, ključne značajke možemo vidjeti iz tablice 3.1.



Slika 3.1. Prelazak s pasivne na aktivnu distribucijsku mrežu [5]

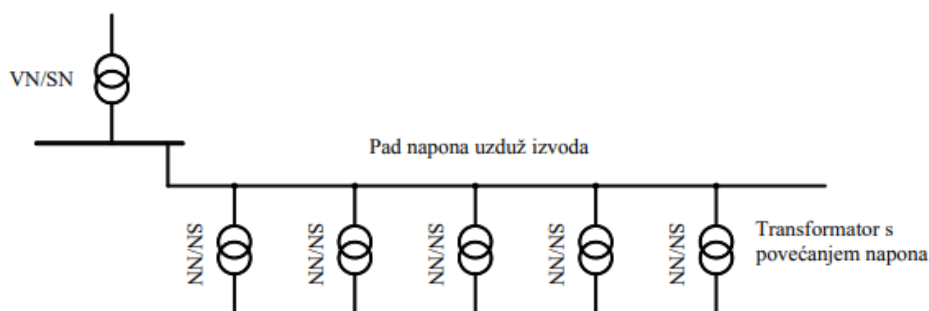
Tablica 3.1. Usporedbu ključnih značajki današnje distribucijske mreže i napredne mreže [7]

	Pasivna mreža	Pametna (napredna) mreža
Komunikacija	Jednosmjerna	Dvosmjerna
Interakcija s korisnicima	Ograničena	Proširena
Mjerenje	Elektro-mehaničko	Digitalno
Upravljanje	Ručno	Daljinsko
Održavanje	Periodično	Prema potrebi
Proizvodnja	Centralizirana	Centralizirana i distribuirana
Kontrola tokova snage	Ograničena	Sveobuhvatna
Pouzdanost	Sklona kvarovima i kaskadnim prekidima	Proaktivna, predviđanja u stvarnom vremenu
Ponovno uključenje	Ručno	Samostalno

3.1. Utjecaj integracije distribuirane proizvodnje na naponske prilike u distributivnoj mreži

Kako bi osigurali odgovarajuću naponsku stabilnost i kvalitetu, potrebno je napon održavati u dozvoljenim granicama. Republika Hrvatska preuzela je europske norme te prema HRN EN50160 srednji napon se mora održavati $\pm 10\%$ nazivne vrijednosti napona u 95% tjedna, dok niski napon mora biti $\pm 10\%$ nazivne vrijednosti napona u 95% tjedna, a $+10/-15\%$ nazivne vrijednosti napona u 5% tjedna. U suprotnom priključeni elementi (uređaji) neće raditi pravilo što će smanjiti životni vijek istih, a nakon određenom vremena doći će čak i do uništavanja uređaja [7]. Jedna od metoda koje se najčešće koriste za kontrolu napona u distribucijskoj mreži prikazana je slikom 3.2.. Napon na sekundarnoj strani VN/SN transformatora održava se u dozvoljenim granicama pomoću automatske preklopke. Potrošnja radne i jalove snage rezultirati će padom napona duž srednjenaponskog izvoda. Pad napona je najniži pri minimalnoj potrošnji, a najviši pri

maksimalnoj potrošnji. Što smo udaljeniji od glavne dovodne transformatorske stanice, napona na srednjenaponskom vodu biti će niži. Za kompenzaciju ovakvog utjecaja koriste se SN/NN transformatori s različitim prijenosnim omjerima (transformatori s odvojcima). Prijenosni omjeri na SN/NN transformatorima na početku voda biti veći (10,5/0,4 kV), dok će na kraju voda prijenosni omjer biti manji (9,5/0,4 kV).

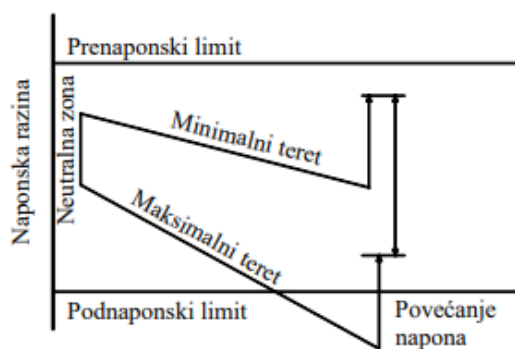


Slika 3.2. Osnovni princip kontrole napona u distribucijskoj mreži [1]

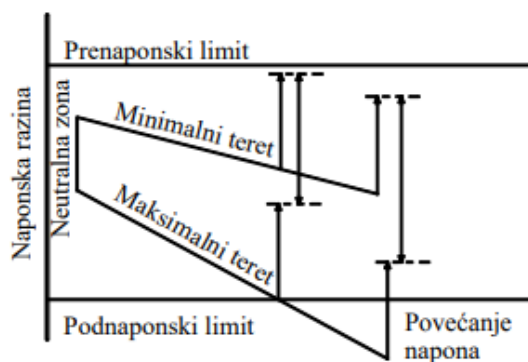
Kontrola napona treba biti takva da iznos napona ostane unutar dozvoljenih (postavljenih) granica koji je prema [8] prikazan tablicom 3.2. Takva kontrola napona prikazana je slikom 3.3. Neutralna zona (eng. *deadband*) obično se odabire nešto iznad nazivnog napona kako bi se nakon pada napona duž srednjenaponskih i niskonaponskih vodova napon održao u nazivnom području. Napon najudaljenijeg potrošača tijekom maksimalnog opterećenja treba biti iznad granice podnapona ($-10\%U_n$). Napon za udaljene potrošače može se povećati do 5% korištenjem distribucijskog transformatora s različitim omjerom zavoja. Istovremeno, napon tijekom najnižeg opterećenja ne smije premašiti granicu prenapona za bilo kojeg potrošača ($+10\%U_n$). Granični slučaj dakle nije najudaljeniji potrošač, već onaj koji je najbliži glavnoj dovodnoj transformatorskoj stanici, takav slučaj prikazan nam je slikom 3.4.. Uz neprekidno napajanje radnom snagom iz generatora, uvođenjem distribuirane proizvodnje smanjiti će se padovi napona na kraju vodova. Injektiranjem radne snage iz oba izvora vrlo izgledno je da će doći do prekoračenja dozvoljenih naponskih granica ($+10\%U_n$) te je potrebno napomenuti da će biti prekoračen dozvoljeni maksimalni kapacitet. Prenaponska margina (dozvoljena gornja granica napona) je upravo razlika između najvećeg iznosa napona za određenog potrošača i granice prenapona.

Tablica 3.2. Dopuštena odstupanja napona za prijenosnu i distributivnu mrežu [8]

	Nazivni napon [kV]	Dopušteno postotno odstupanje [%]	Dopušteno kretanje napona [kV]
Prijenosna mreža	400	+5, -10	360 – 420
	220	±10	198 – 242
	110	±10	99 - 121
Distribucijska mreža	35	±10	31,50 – 38,50
	20	±10	18 – 22
	10	±10	9 -11
	0,4	±10	0,36 – 0,44



Slika 3.3. Usklađivanje napona duž distributivnog voda; Apscisa prikazuje udaljenost od glavne SN trafostanice na sekundarnoj strani VN/SN transformatora, dok ordinata prikazuje napon na sekundarnoj strani SN/NN transformatora na ovom mjestu [1]



Slika 3.4. Koordinacija napona duž distributivnog voda za najgori slučaj pojave prenapona.[1]

Priključenjem generatora (invertera) na distribucijsku mrežu dovesti će do porasta napona na priključnom mjestu. Iznos porasta napona približno je jednak:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U} \sim \frac{R \times P_i}{U^2} + \frac{X \times Q_i}{U^2} [p. u.] \quad (3-1)$$

gdje je:

- R – djelatni otpor (rezistancija) izvora na mjestu priključka [Ω]
- X – induktivni otpor (reaktancija) izvora na mjestu priključka [Ω]
- P_i – djelatna neto snaga i-tog čvora ($P_i = P_{Gi} - P_{Li}$) [W]
- P_{Gi} – injektirana radna snaga u mrežu [W]
- P_{Li} – vlastita potrošnja elektrane i potrošnja ostalih potrošača priključenih na taj čvor [W]
- Q_i – jalova snaga i-tog čvora ($Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$) [VAr]
- Q_{Gi} – injektirana jalova snaga u mrežu [VAr]
- Q_{Li} – vlastita potrošnja jalove u elektrani i potrošnja ostalih potrošača priključenih na taj čvor [VAr]
- U – nazivni napon [V]

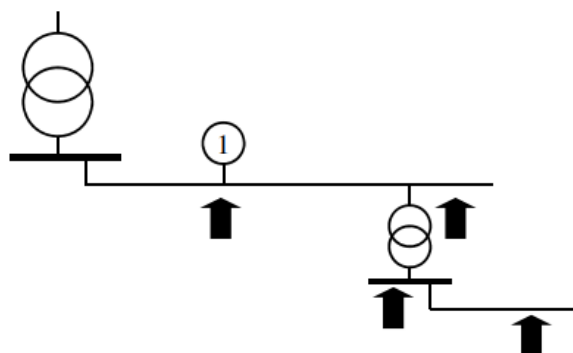
Radi pojednostavljenja, uz pretpostavku da generator injektira samo aktivnu snagu pri faktoru snage jednakom jedan uz zanemarivu vlastitu potrošnju (npr. realno kod fotonaponskih elektrana) možemo odrediti približan relativni porast napona kao prema jednadžbi (3-2)

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U} \sim \frac{R \times P_{gen}}{U^2} [p. u.] \quad (3-2)$$

gdje je:

- P_{gen} – injektirana radna snaga u mrežu [W]

Koji doživljavaju svi potrošači priključeni ispod generatora, kao što je prikazano na slici 3.5. gdje je generator priključen na srednjenaponski vod. Ukoliko na mjestu označenom brojem 1 na slici 3.5. spojimo generator doći će do porasta napona na svim mjestima označenim strelicom prema gore i to tako da će iznos porasta napona biti postotno jednak na mjestu spajanja generatora i na posljednjem mjestu.



Slika 3.5. Relativni porast napona priključenjem distribuiranog izvora [1]

Maksimalno dopušteno povećanje napona pri priključenju distribuiranog izvora je ono koje dovodi do toga da maksimalni iznos napona bude točno na granici prenapona. Razina integracije (uvedena u prijašnjem poglavlju u rad) je maksimalna količina proizvodnje koja se može integrirati bez negativnog utjecaja na kvalitetu ili pouzdanost. Iz toga slijedi da kada se razmatraju prenaponi, razina integracije je upravo količina distribuirane proizvodnje koja uzrokuje porast napona jednak margini prenapona. Svaki potrošač električne energije ima drugačiju marginu prenapona, no priključivanjem distribuiranog izvora (generatora) na elektroenergetsku mrežu daje isti postotni porast napona za svakog potrošača koji je spojen na istu mrežu.

Razina integracije može vrlo jednostavno izračunati iz izraza:

$$P_{max} = \frac{U^2}{R} \times \delta_{max} [W] \quad (3-3)$$

gdje je:

$$\delta_{max} = \frac{\Delta_{max}}{U} - \text{relativna margina napona } [\%],$$

Δ_{max} - apsolutna margina napona [V].

Kako bismo dobili uvid o tome što još utječe na razinu integracije koristimo izraz:

$$R = \rho \frac{l}{A} [\Omega] \quad (3-4)$$

gdje je:

- R – otpor žice [Ω]
- ρ – specifični otpor materijala [Ωm]
- A – površina presjeka [m^2]
- l – duljina voda [m]

Iz izraza (3-3) i (3-4) možemo zaključiti:

1. Razina integracije upravo je razmjerna kvadratu razine napona
2. Razina integracije upravo je proporcionalan s duljinom voda (kabela)
3. Razina integracije linearna je s dozvoljenom gornjom granicom napona
4. Razina integracije suprotno je razmjerna udaljenosti između generatora i transformatora
5. Promatrajući preciznije ovisi i o tokovima ne samo djelatne već i jalove snage

Moguće metode za povećanje razine integracije regulacijom napona prema referenci [1] :

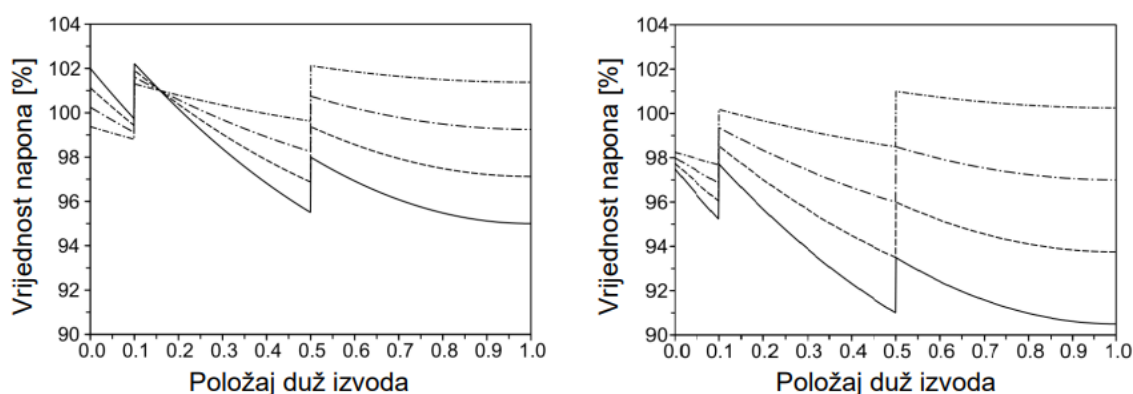
1. Regulacija napona promjenom prijenosnog omjera transformatora (na sabirnici, transformatoru ili duž voda)
2. Regulacija napona regulacijom djelatne i jalove snage (statičko i dinamičko upravljanje djelatnom snagom, upravljanje jalovom snagom)
3. Regulacija napona izgradnjom novih vodova ili povećanjem presjeka postojećih vodova
4. Koordinacijom više metoda
5. Dodatni sustavi: sustavi upravljanja energijom, upravljanje potrošnjom, korištenjem spremnika energije (baterije, skladištenje vode, gorive ćelije i sl.)

3.1.1. Regulacija napona promjenom prijenosnog omjera transformatora

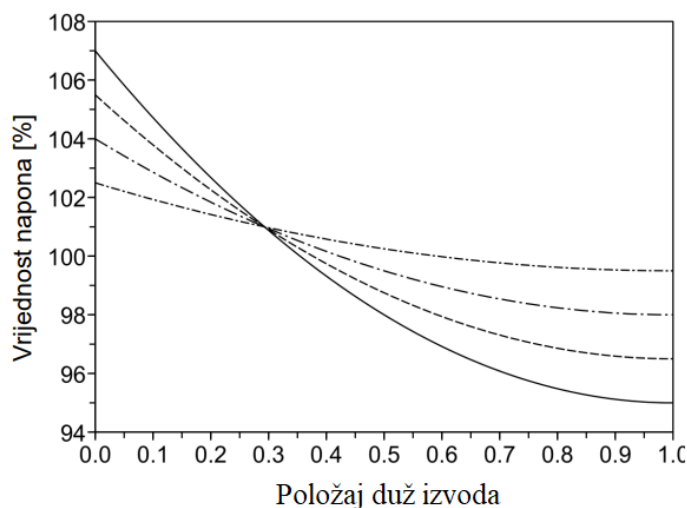
Jedna od metoda koja se učestalo koristi za regulaciju napona je promjena prijenosnog omjera transformatora. Za promjenu prijenosnog omjera obično se koriste ručne ili automatske preklopke transformatora koje se većinom postavljene na visokonaponsku (VN) stranu transformatora kako bi se izbjegle visoke struje. Ručnim preklopkama upravlja se u bez naponskom stanju te kada ih se postavi u željeni položaj tako ostaju do sljedećeg remonta transformatora ili u slučaju potrebe za poboljšavanjem naponskih prilika u tome dijelu mreže. Kod automatskih preklopki postojati regulator koji će pri određenim vrijednostima napona izvršiti preklapanje. Smanjenjem broja zavoja na VN namota povećava se napon na niskonaponskoj strani i suprotno.

Napon u niskonaponskoj mreži može se dodatno kontrolirati pomoću distribucijskih transformatora (SN/NN) s besteretrnim preklopkama. Transformatori blizu početka voda mogu imati omjer namotaja 10,25/0,4 kV, uslijed čega će doći do smanjenja napona od 2,5%, čime se smanjuje rizik od prenapona. Za transformatore blizu kraja voda, omjer namotaja 9,75/0,4 kV može se koristiti, što rezultira povećanjem napona od 2,5%, čime se smanjuje rizik od preniskog napona [1]. Naponi na niskonaponskoj strani distribucijskih transformatora prikazani su na slici 3.6. Ukoliko postoji mehanizam automatske kontrole napona (u praksi su to automatske

regulacijske preklopke podopterećenjem) u distribucijskoj mreži tada je situacija s naponskim prilikama puno složenija. Uređaji za automatsku kontrolu napona ne mogu sami održavati napon konstantnim jer distribuirani izvori stalnom promjenom faktora snage uzorkovane promjenjivom proizvodnjom narušavaju tako postavljenu konstantnu vrijednost napona. Kako bi unaprijedili regulaciju napona duž distribucijskog izvoda, uz regulator preklopke transformatora ugrađuje se i kompenzacija na vodu. Priključenjem takve kompenzacije doći će do višeg napona na stezaljkama transformatora za vrijeme velikih opterećenja, a sniženja napona za vrijeme niskih opterećenja (Slika 3.7.)



Slika 3.6. Profil napona na NN strani distribucijskog transformatora s besteretnim preklopkama (lijevo) i na udaljenim točkama NN mreže (desno) [1]



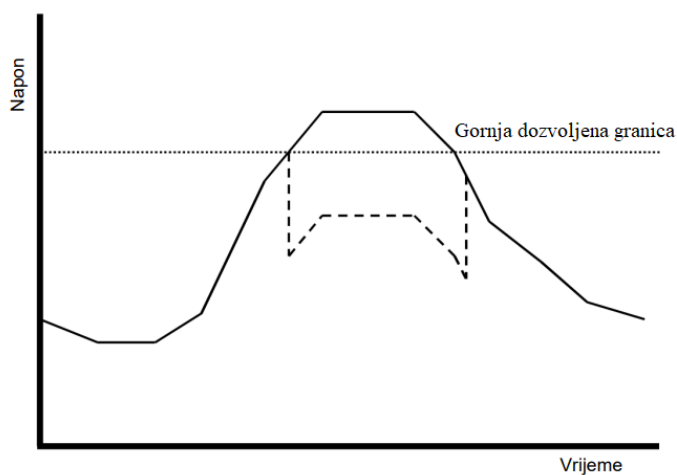
Slika 3.7. Profil napona duž izvoda s regulatorom i kompenzacijom; održavanje napona konstantnim na određenom položaju duž izvodu [1]

3.1.2. Regulacija napona regulacijom djelatne i jalove snage

Određivanju lokalnog upravljanja distribuiranom proizvodnjom – regulacija injektiranja djelatne i jalove snage vrlo je važna za integraciju distribuiranih izvora kao i za optimiziranje paralelnog rada s mrežom. Pri modeliranju tokova snaga u nekom od programskih paketa dolazimo do zaključka da će u nekoliko sati godišnje biti premašene prihvatljive granice napona (pri minimalnim opterećenjima). Kako bi to izbjegli takav utjecaj, u tim vremenskim intervalima smanjujemo proizvodnju djelatne snage generatora (promjena faktora snage). Naime, izgubljena sredstva (novac) pri takvom podešavanju puno su manja u usporedbi s troškovima potrebnim za izgradnju jače mrže.

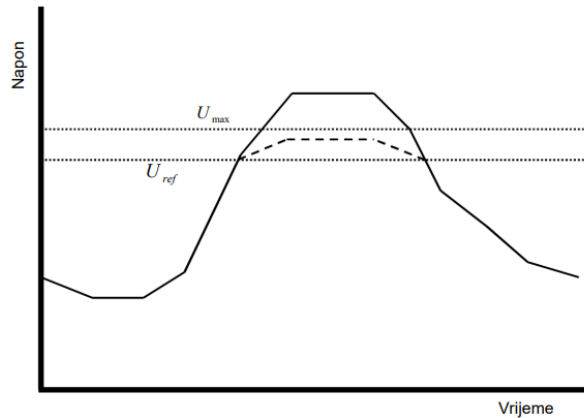
Za regulaciju napona regulacijom djelatne snage mogući su sljedećih postupci prema [1]:

- Izvlačenje maksimalne snage ($\cos \varphi = 1$), bez regulacije; najčešće se koristi u FNE i VE kako bi povećali učinkovitost proizvodnje
- Isključenje generatora u slučaju previsokog napona. Gornja dozvoljena granica postavlja se na maksimalni dozvoljeni napon prema mrežnim pravilima. U realnosti gotovo nikad ne dođe do isključivanja generatora. Sa slike 3.8. možemo vidjeti naponsku granicu (prikazana točkastom linijom) te moguću izgubljenu energiju (prikazana isprekidanom linijom) ukoliko dođe do isključenja generatora



Slika 3.8. Utjecaj pre naponskog isključenja na iznos napona –bez isključenja (puna linija) i sa isključenjem (isprekidana linija) [1]

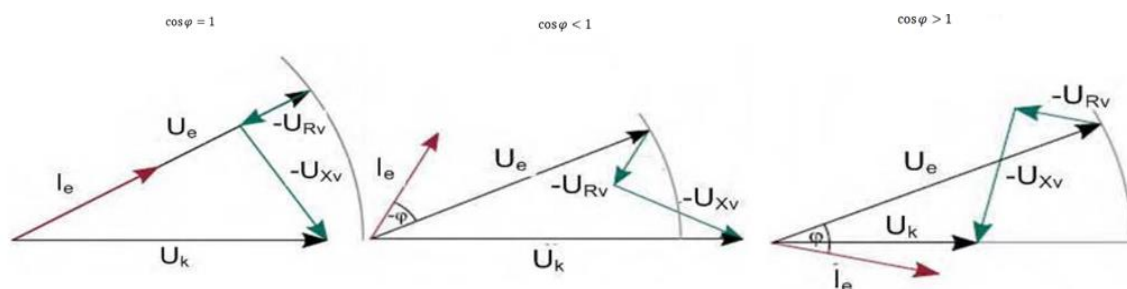
- Ograničenje maksimalne injektirane snage. Maksimalna injektirana snaga treba biti podešena na maksimalnu dozvoljenu vrijednost napona prema mrežnim pravilima.



Slika 3.9. Utjecaj pre naponskog ograničenja vrijednost na vrijednost napona - bez ograničenja (puna linija) i sa ograničenjem (isprekidana linija) [1]

- Zadržavanje snage na određenoj vrijednosti (niže od maksimalne); razlika se može upotrijebiti kao rotirajuća rezervom
- Postaviti profil proizvodnje prema zahtjevima za uravnoteženje energije

Porast napona na mjestu priključka distribuiranog izvora može se umanjiti (ili potpuno neutralizirati) oduzimanjem jalove snage (povećanje induktivne/smanjenje kapacitivne). Sa slike 3.10. gdje imamo vektorski prikaz generatora podešenog na $\cos \varphi = 1$ odnosno generator injektira samo djelatnu snagu u mrežu možemo vidjeti povećanje napona na mjestu priključka. Ukoliko želimo da generator proizvodi i djelatnu i jalovu i ima karakteristike induktiviteta tada postavljamo $\cos \varphi < 1$. U tome slučaju generator je poduzbuđen što će dovesti do smanjenja napona na mjestu priključka. Želimo li da generator proizvodi djelatnu i jalovu snagu i ima karakteristike kapaciteta tada postavljamo $\cos \varphi > 1$. Tada je generator naduzbuđen što dovodi do povećanja napona na mjestu priključka. Regulacija jalove snage kod asinkronih generatora (male HE) omogućuje se isklapanjem dijela ili svih kondenzatora za korekciju snage, dok se kod sinkronih generatora (HE i kogeneracijska postrojenja) regulacija postiže podešavanje uzbude.



Slika 3.10. Vektorski dijagram uz različiti faktor snage; gdje je: U_k – napon na početku voda, U_e – napon na kraju voda, U_{Rv} - napon na djelatnom dijelu voda, U_{Xv} - napon na jalovom dijelu voda

[5]

Kroz brojna istraživanja prema [5] potvrđene su mnoge koristi od upravljanja jalovom energijom u distribucijskoj mreži:

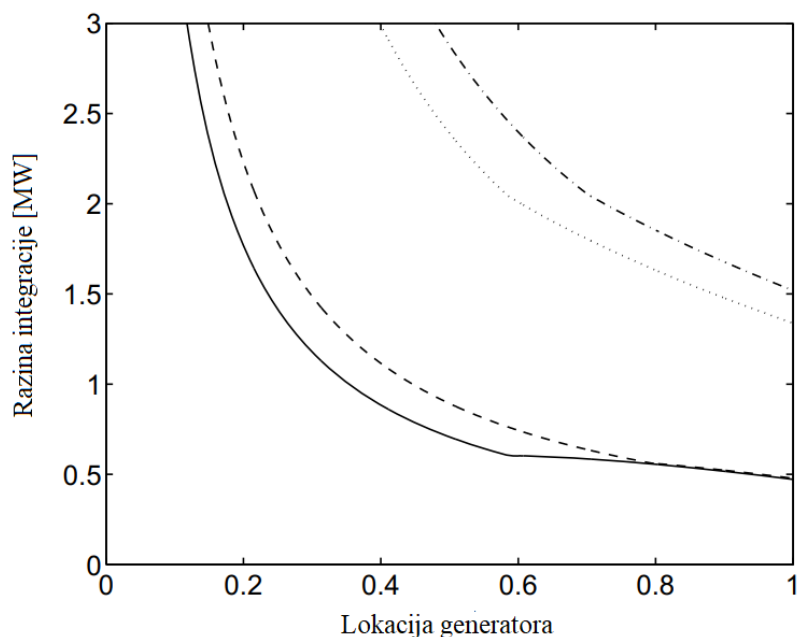
- Pобољшanje kakvoće opskrbe kroz statičku i dinamičku podršku kakvoći napona
- Povećanje sposobnosti objedinjenja distribuiranih izvora s postojećim stanjem distribucijske mreže
- Smanjenje gubitaka snage u distribucijskoj mreži i postupak opskrbe iz prijenosne mreže
- Smanjenje emisija CO₂

3.1.3. Regulacija napona izgradnjom novih ili povećanjem presjeka postojećih vodova

Povećanje prijenosne moći pomoću većeg broja vodova ili većeg presjeka voda svakako će rezultirati povećanjem razine integracije.

Izgradnja potpuno novog voda u mnogim je slučajevima puno jednostavnija nego li povećanje presjeka postojećeg voda. Prenapon se i dalje može dogoditi, ali budući da je to novi izvod, samo je jedinica generatora izložena prenaponu. Prednost novog izvora je što se može projektirati kako bi se spriječilo bilo kakvo buduće preopterećenje, no takvo rješenje u praksi je jedino moguće pri izgradnji velikih jedinica; u slučaju manjih jedinica izgradnja novog izvoda je preskupa u odnosu na ukupnu cijenu distribuirane proizvodnje. Također, troškovi novog izvoda bit će najveći kada je generator smješten dalje od glavne srednjenaponske trafostanice (one koje su opremljene regulacijom napona) što su upravo lokacije gdje je opasnost od prenapona najveća (u našoj terminologiji, lokacije s najmanjom razinom integracije).

Povećanje poprečnog presjeka postojećeg vodiča jeftinija je i puno je lakše dobiti dozvolu za postojeći vod nego za izgradnju novog. Radovi na postojećem izvodu mogu uzrokovati prilično duge planirane prekide za postojeće kupce. Sa slike 3.11. možemo vidjeti utjecaj presjeka voda na razinu integracije koji nije toliko velik kao što bi se isprva očekivalo. Manji poprečni presjek znači veći otpor što smanjuje moguću razinu integracije, no s manjim presjekom imamo manji naponski pad tijekom niskog opterećenja što kompenzira smanjenu integraciju.

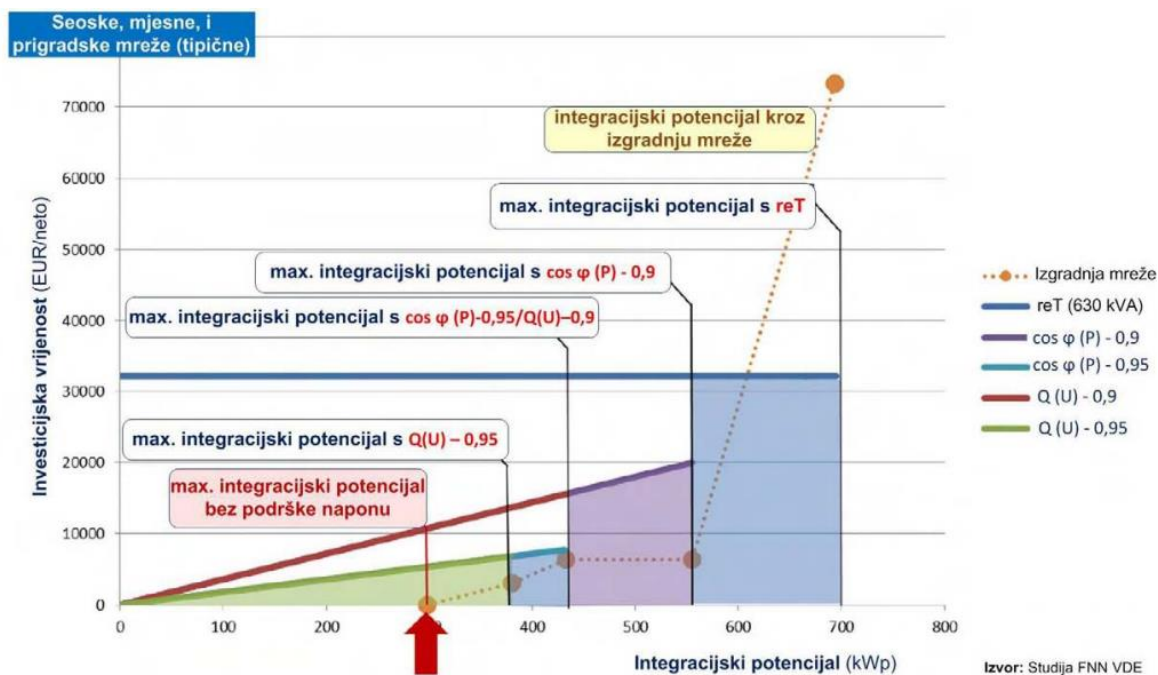


Slika 3.11. Razina integracije za generator priključen na izvod kao funkcija poprečnog presjeka voda: 95 mm² (puna linija), 120 mm² (isprekidana linija), 150 mm² (točkasta linija) i 180 mm² (isprekidano-točkasta linija) [1]

3.1.4. Koordinacija više metoda

S ciljem povećanja pouzdanosti, kvalitete i stabilnosti elektroenergetskog sustava potrebna je koordinacija prije navedenih metoda u prijenosnim i distribucijskim sustavima. Regulacija napona pomoću Q(U) proizvodnih jedinica u podršci napona niskonaponskoj mreži dodatno se oplemenjuje koordinacijom s aktivnom regulacijom napona na stezaljkama SN/NN transformatora i to uz posebne karakteristike [5]:

- Kod manjih elektrana (distribuiranih izvora) koji su priključeni na mrežu, Q(U) regulacija je dovoljno učinkovita te nije potrebna dodatna vrsta regulacije
- Učinkovitost regulacijskih transformatora (reT) izrazito se ističe u ruralnim područjima, a manje u gradskim područjima
- U područjima s visokom razinom integracije distribuiranih izvora regulacijski transformator (reT) zajedno s Q(U) regulacijom daje najbolje rješenje
- Najskuplja metoda povećanja razine integracije je upravo izgradnja novih vodova (kabela) i transformatora



Slika 3.12. Razina integracije ovisna o investicijskim troškovima (vrsti regulacije napona) u ruralnim područjima [5]

Koordinacija regulacije napona i jalove snage u distribucijskim (prijenosnim) mrežama daje novi korak prema naprednim mrežama. Automatizacijom treba dati potporu potencijalima postojeće mreže, a nakon što se iscrpe svi mogući potencijali automatizacije postojeće mreže krenuti u planiranja nove napredne mreže. Primjer automatizacije možemo vidjeti na slici 3.13. Kao glavni element ove koordinacije je središnji naponski regulator koji upravlja regulacijskim transformatorom i regulacijom elektrane. Regulacijom elektrane možemo regulirati iznos injektirane radne i jalove snage distribuiranog izvora (elektrane) s obzirom na napon na priključnim sabirnicama. Regulacija transformatora moguća je uz automatski regulator napona i teretnu preklopku transformatora pomoću koje se može mijenjati prijenosni omjer transformatora ovisno o naponu na priključenim sabirnicama. Komunikacijska infrastruktura (PLC, radio link, WiMax) upravo služi za razmjenu informacija između transformatora, elektrane i središnjeg naponskog regulatora.

Pri dimenzioniranju vodova i kabela prvenstveno se u obzir uzimaju presjek voda, duljina voda te prateći zaštitni uređaj, no također treba uzeti u obzir i dozvoljenu termičku struju odnosno najveći dopušteni iznos struje koji može teći kroz vod (kabel), a da ne dođe do oštećenja elementa. Temperatura je još jedan od utjecaja koje moramo uzeti u obzir pri dimenzioniranju vodova te ovisi o temperaturi okoline, brzini prijenosa topline na okolinu i o brzini vjetra ukoliko su vodovi nadzemni. U većini niskonaponskih mreža vodovi i kabeli su najčešće predimenzionirani (gledajući termičku marginu) te su dva glavna razloga tomu prema [2]:

- Napon kod potrošača treba biti u dozvoljenim granicama i naponski propadi trebaju biti ograničeni
- Gubici energije su puno manji u vodičima većeg poprečnog presjeka

Integracijom distribuiranih izvora iz OIE u distributivnu mrežu doći će do promjene smjera toka energije što će rezultirati dodatnim termičkim preopterećenjem vodova.

Termičku granicu kod transformatora je puno teže odrediti jer transformatori imaju jako duge vremenske toplinske konstante, a mogu biti i u kraćim vremenskim periodima u području preopterećenja bez zagrijavanja niti drugih štetnih posljedica. Transformatori su većinom projektirani da zadovolje maksimalnu potražnju i rade unutar dopuštenih granica termičkog opterećenja. Dakle, u pojedinim čvorovima u mreže gdje imamo veliku količinu integriranih distribuiranih izvora termička granica transformatora može ograničiti daljnju integraciju .

Kako bi smanjili strujna opterećenja u mreži i povećali razinu integraciju distribuiranih izvora prema [1] neke od metoda su:

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

3.2.1. Povećanje sposobnosti opterećenja vodova, izgradnja novih veza i dinamička sposobnost opterećenja

Opterećenje voda ili kabela gledajući s obzirom na temperaturu može se povećati korištenjem vodiča s većim poprečnim presjekom. Povećanjem poprečnom presjeka voda povećati će se i maksimalna snaga koja se može prenijeti promatranim vodom, a doći će i do smanjenja gubitaka.

Ovo rješenje jako je korisno no i skupo jer je sama cijena bakra (aluminija) relativno visoka. Zbog visoke cijene, pri priključenju elektrana (distribuiranih izvora) većih snaga na distribucijsku/prijenosnu mrežu, ukoliko je potrebno popravak (zamjenu) vodova, kabela, zaštite i ostale opreme snosi upravo vlasnik postrojenja koji se želi priključiti na mrežu.

Novi vodovi i kabele također mogu smanjiti postojeće opterećenje. Novi namjenski vodovi ili kabele obično se koriste pri instaliranju većih postrojenja te se povezuju na dijelove mreže koji imaju dovoljno kapaciteta prijenosa. Takva nova i veća postrojenja mogu se priključiti i na više naponske razine, u tome slučaju potreban je novi transformator što dodatno povećava troškove.

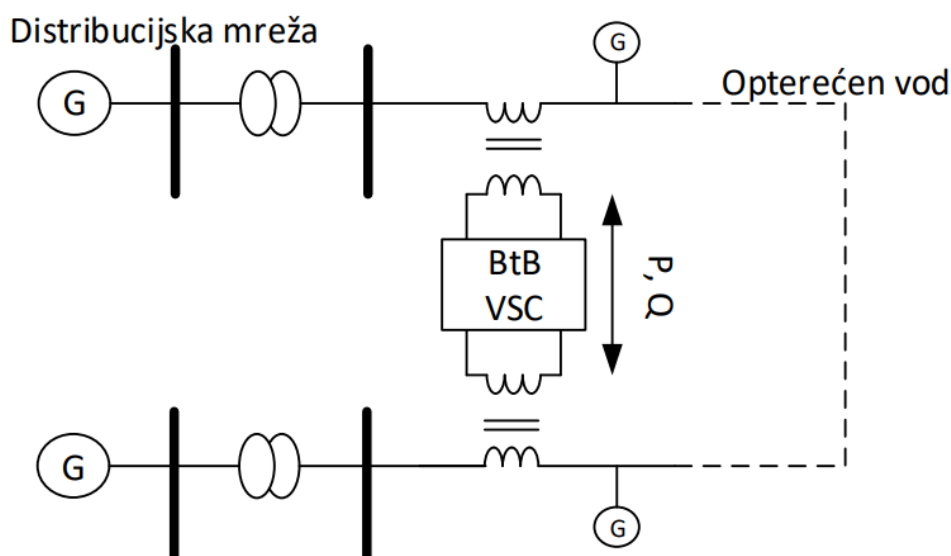
Dinamička opteretivost vodova (eng. *Dynamic line rating, DLR*) računski izražava prijenosnu moć vodova u stvarnom vremenu i uvjetima umjesto pretpostavke statične (fiksne) prijenosne moći (strujno-termička naprezanja u najgorem mogućem slučaju: slab vjetar, visoka temperatura i sunčevo zračenje). DLR daje mogućnost znatno većih tokova snage od statičkih očekivanja što operatoru sustava smanjuje troškove u vodovima. U praktičnom slučaju pri niskim temperaturama okoline prijenosna moć vodova je veća. Za vrijeme velike proizvodnje iz FNE (jako sunčevo zračenje) i VE (brzi vjetrovi) DLR ima mogućnost smanjenja preopterećenja.

3.2.2. Dinamička uzdužna i poprečna kompenzacija

Razina integracije distribuiranih izvora može se povećati pomoću tzv. serijskih FACTS (eng. *Flexible Alternating Current Transmission System*) uređaja. FACTS uređaji imaju mogućnost promjene uzdužne impedancije dovodnog voda što će omogućuje povećanje prijenosne snage, omogućuju upravljanje u realnom vremenu, djeluju brzo, fleksibilno povećavaju učinkovitost prijenosa i imaju mogućnost povećanja prijenosa snage u ključnim čvorovima u prijenosnoj mreži. Serijski FACTS uređaji mogu raditi u dva načina: načinu praćenja i načinu regulacije impedancije. Pri regulaciji impedancije (moguće samo u umreženim sustavima) uz promjene proizvodnje i potrošnje važno je pomoću impedancije održati tokove snage nepromijenjenim. U načinu praćenja impedancije se mijenjaju tokovi snage ovisno o proizvodnji i potrošnji.

Relativno nova tehnologija u serijskoj kompenzaciji je implementacija uzdužnog (serijskog) sinkronog naponskog kompenzatora – SS(V)SC (Series-connected Synchronous Voltage Source Compensator). VSC omogućuje neovisnu kontrolu djelatne i reaktivne snage koji teku kroz priključeni vod. SSSC može ujedno i apsorbirati i injektirati radnu i reaktivnu snagu, no za kontrolu protoka djelatne snage potreban je dodatni spremnik energije na DC strani. Kako bi se postiglo ravnotežno opterećenje distribuiranih vodova i omogućilo prilagodljivo upravljanje

tokovima djelatne i jalove snage koristi se pretvarač s vezom „leđa-u-leđa“ – BtB (eng. *Back-to-Back*). Glavna prednost takvog pretvarača je kontrola protoka aktivne i reaktivne snage u oba voda u isto vrijeme bez potrebe za komunikacijskim signalima.



Slika 3.14. Uravnoteženje transformatora pomoću Btb veze [1]

3.2.3. Sustavi upravljanja energijom

Upravljanje energijom proizvedenom iz distribuiranih izvora moguće je, implementiranjem informacijsko-komunikacijskim tehnologija (ICT) u elektroenergetski sustav (sustav upravljanja energijom). Uz ICT potrebni su nam i spremnici energije (najčešće baterije) za učinkovitije upravljanje tokovima snage u mreži. Kako bi imali uspješnu upravljanje nad sustavom potrebno je osigurati komunikaciju između proizvođača i spremnika energije, precizna mjerenja te prikupljanje i obradu prikupljenih podataka uz pomoć SCADA sustava.

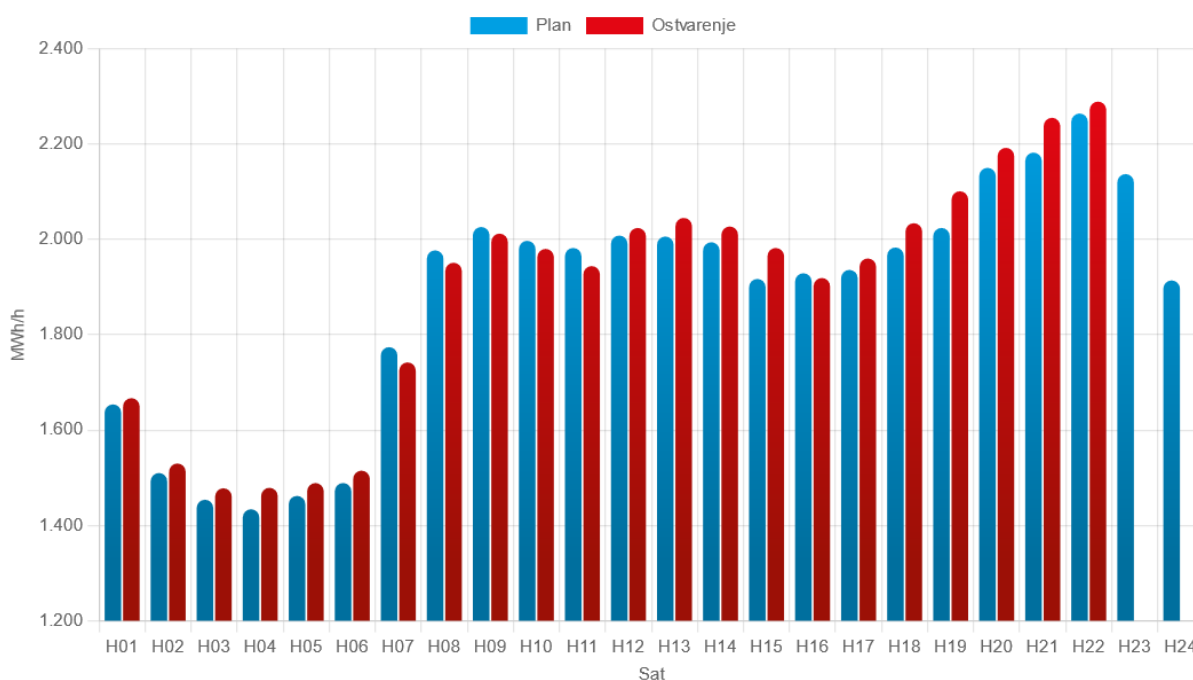
U mrežnoj identifikaciji potrebno je definirati kontrolno područje u kojem se, pomoću određenih postupaka i radnji, može povećati razina integracije distribuirane proizvodnje bez povećanja gubitaka ili rizika od preopterećenja distribuiranog pojenog voda. Važno je povećati učinkovitost upravljanja analizom elektroenergetskog sustava i primjenom različitih tehnologija u proizvodnji, prijenosu i skladištenju viška proizvedene energije (korištenjem baterijskih spremnika). Za odabrano kontrolno područje potrebno je proučiti sve operativne scenarije. Bitno je imati znanje o svim aktivnim uređajima i obrascima potrošnje, što omogućuje stvaranje određenih baza podataka koje se mogu integrirati u sustav upravljanja energijom.

Koordinacijom više različitih metoda u upravljanju sustava za upravljanje energijom dovesti će do bolje prilagodljivosti i kontroli distribuirane proizvodnje. Izbor za najoptimalnije rješenja za

različite probleme u promatranog sustavu moguće je naći u bazi podataka KSC (eng. *Knowledge Server for Controllers*) tj. metodom kontrole distribucije. Više distribuiranih izvora možemo priključiti na KSC modul kako bi se postiglo međusobno povezivanje te smanjili troškovi. Prema mrežnim pravilima električna energija proizvedena iz OIE (distribuirana proizvodnja) ima prioritet u odnosu na električnu energiju proizvedenu iz fosilnih goriva. Zbog takvog zakona operatori distribucijskog/prijenosnog sustava su primorani preuzeti sve energiju proizvedenu iz elektrana na OIE, ukoliko imamo višak u mreži tada smanjiti proizvodnju iz konvencionalnih elektrana.

3.2.4. Upravljanje potražnjom

Osigurati ravnotežno stanje između proizvodnje i potrošnje električne energije jedan je od osnovnih zadataka elektroenergetskog sustava. Obzirom da se potrošnja mijenja tijekom dana prema zahtjevima potrošača mrežni operatori imaju dužnost te zahtjeve ispuniti odnosno u svakom trenutku potrošač mora imati mogućnost iskorištenja zakupljene snage. Na temelju prijašnjih potrošnji mrežni operateri planiraju dnevni dijagram opterećenja (Slika 3.15.) i odlučuju koja elektrane će u kojem vremenskom intervalu raditi.



Slika 3.15. Dnevni dijagram opterećenja 06.06.2024. [13]

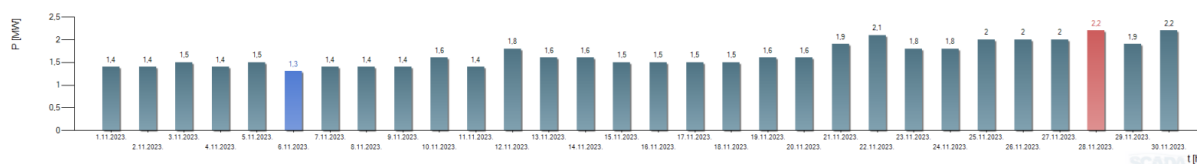
Proizvodnja električne energije iz distribuiranih izvora na OIE (realni primjer je FNE i VE) vrlo često se ne može predvidjeti (vanjski utjecaji - vremenske prilike) što otežava planiranje proizvodnje (iz drugih konvencionalnih elektrana) i vođenje takvog sustava. Distribuirani izvor na OIE može uzrokovati preopterećenja u dijelu mreže i to tako da imamo minimalnu potrošnju u

nadležnoj mreži što će dovesti do toga je proizvodnja veća od potrošnje. Kako bi izbjegli takav slučaj možemo smanjiti proizvodnju (ako elektrana ima tu mogućnost), povećati potrošnju ili pohraniti energiju u spremnike (obično u baterijske spremnike). Povećanje potrošnje dovesti će do smanjenja opterećenja tijekom povećane proizvodnje, no gledajući trenutnu situaciju potrošače nije moguće prisiliti da koriste energiju kada je potrebno povećanje potrošnje. Ideja koja može doprinijeti tomu je smanjenje cijene električne energije u vrijeme kada postoji potreba za povećanjem potrošnje. Kako bi se što bolje upravljalo potrošnjom, a i potražnjom za električnom energijom potrebna su dodatna ulaganja u postojeću mrežu te prelazak na napredne mreže. Prelaskom na napredne mreže mrežni operateri imali bi mogućnost kontrole potrošnje te za vrijeme preopterećenja mogućnost isključenja određenim električnih uređaja (npr. punjenje električnih vozila, upravljanje klima uređajima, punjenje baterijskih spremnika). U svrhu smanjenja preopterećenja i gubitaka u mreži mogu se koristiti spremnici energije za skladištenje viška energije.

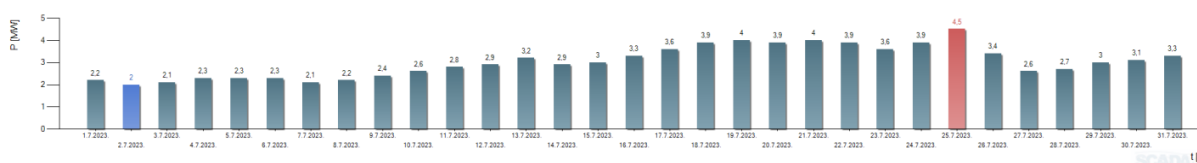
Pregledom rada [4] analiziran je utjecaj distribuirane proizvodnje na strujno naponske prilike u mreži u okolici elektrane Orlovnjak. Uočavamo pozitivan utjecaj priključenja distribuiranog izvora na OIE na distribucijsku mrežu odnosno strujno naponske prilike u tome dijelu mreže su se popravile nakon priključenja bioplinskog postrojenja. Također se u radu određivala razina integracije distribuiranih izvora gdje se došlo do zaključka da ograničenja postavljaju upravo vodovi i transformatori te da niti u jednom slučaju simulacija napon nije prelazio dozvoljene granice. Jedan od mogućih rješenja za povećanje razine integracije je postavljanje paralelnih vodova s čime se razina integracije povećala za čak četiri puta, no ograničenja tada stvara transformator. Analiziran je i slučaj izgradnje nove transformatorske stanice gdje se došlo do zaključka da će se razina integracije povećati, no ne u mjeri kojom se povećalo izgradnjom paralelnih vodova. Izgradnjom nove transformatorske stanice stvara se novi čvor u prstenastoj mreži što će najviše pridonijeti povećanju pouzdanost opskrbe.

4. SIMULACIJE I ANALIZA DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE IZ RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA OIE NA PRILIKE U EES

U praktičnom dijelu magisterijskog rada usporediti će se utjecaj distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija OIE na prilike u EES na odabranom modelu mreže na mikrolokaciji; prikazati će se naponske prilike i strujna opterećenja. Fotonaponska elektrana, vjetroelektrana, mala hidroelektrana, elektrana na morske valove su tehnologije na OIE koje će se koristiti u simulacijama. Obzirom da u stvarnoj mreži imamo baterijske spremnike energije, pri simulaciji u programskom paketu dodati će se baterijski spremnik i promatrati utjecaj istog na prilike u sustavu. Sve simulacije odraditi će se za slučajeve minimalnog (Slika 4.1.) i maksimalnog (Slika 4.2.) toka energije. Modeliranje i simulacija integracije distribuirane proizvodnje iz različitih tehnologija odraditi će se u programskom paketu DIGSILENT Power Factory. DIGSILENT Power Factory je softver za simulaciju i analizu elektroenergetskih sustava. Neke od ključnih funkcionalnosti i aktivnosti koje se mogu obavljati u tome programskom paketu su: analiza opterećenja, kratko spojne analize, statička i dinamička stabilnost sustava, optimalno upravljanje naponom i reaktivnom snagom, analiza harmonika, pouzdanost mreže, modeliranje obnovljivih izvora, optimizacija mreže, simulacija električnih pogona, planiranje, održavanje i druge.



Slika 4.1. Graf opterećenje TS Vis 35/10kV za slučaj minimalnog toka energije otoka Visa [14]



Slika 4.2. Graf opterećenje TS Vis 35/10kV za slučaj maksimalnog toka energije otoka Visa [14]

4.1. Modeliranje odabranog modela mreže

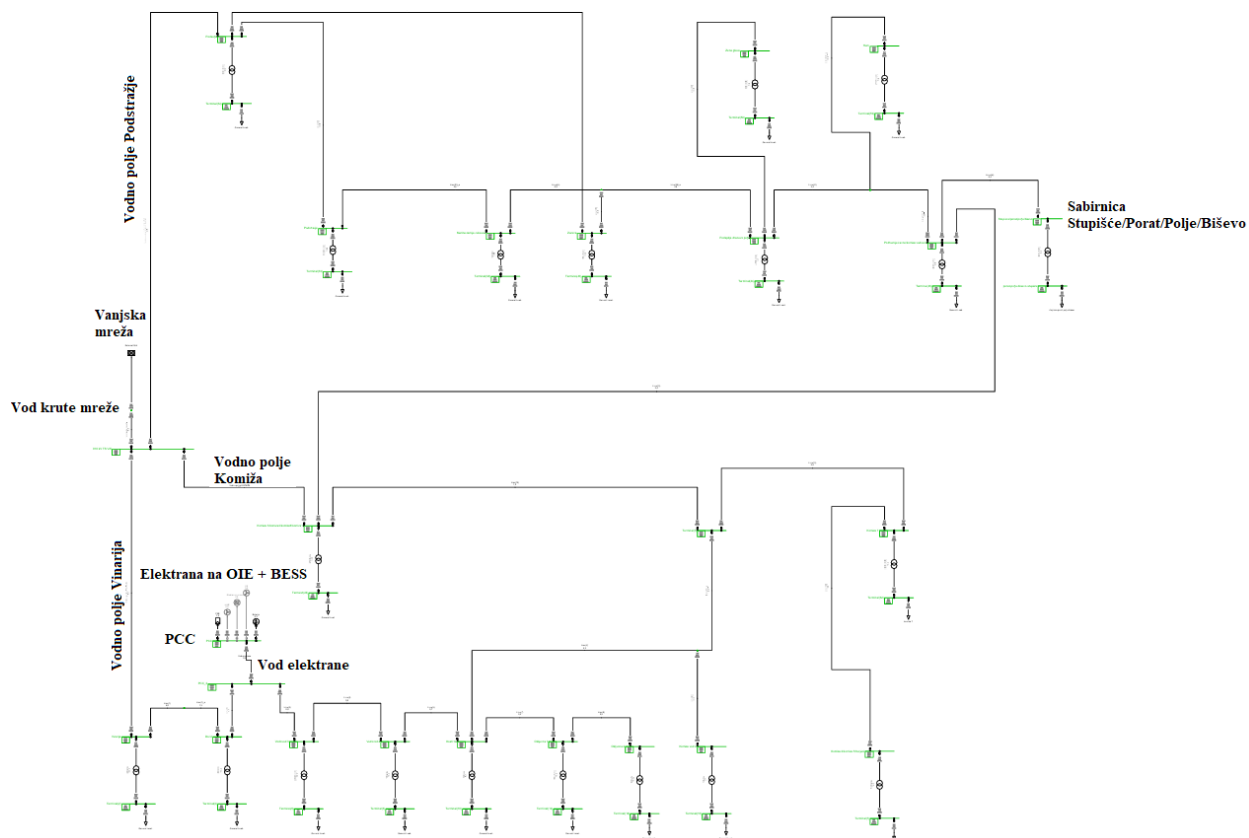
Za potrebe ovog diplomskog rada odabrana je mreža otoka Visa. Osnovno napajanje otok Visa ima preko dva podmorska 35kV kabela s otoka Hvara (KK Stenjalo i KK Točila). Grad Vis kao i sva ostala mjesta na otoku napajaju se iz glavne transformatorske stanice (TS) Vis 35/10kV. Transformatorska stanica opremljena je sa dva transformatora od 8MVA koji rade u paralelnom blok spoju. S niskonaponske strane transformatora (10kV) napajaju se vodna polja: „Komiža“,

„Podstražje“ i „Vinarija“. Vodna polja kao i sve ostale transformatorske stanice su prstenastom mrežom povezana vodovima i kabelima. Uz osnovno napajanje na niskonaponskoj strani TS Vis 35/10kV spojena je i fotonaponska elektrana (FNE) 3,5MW priključne snage. Uz FNE, na distribucijski sustav spojeni su i baterijski spremnici energije kapaciteta 1,44MWh za pružanje usluga uravnoteženja elektroenergetskog sustava kao i očuvanje stabilnosti mreže na otoku.

Modeliranje odabranog modela mreže izvedeno je tako da su dva dovodna kabela kao i TS 35/10kV zamijenjeni blokom „Vanjska mreža“ (eng. *External Grid*). Snaga kratkog spoja (krutost mreže) referentnog čvora iznosi 2,5981MVA, a struja kratkog spoja referentnog čvora je 0,15kA. Na niskonaponskoj strani (10kV) modelirana su tri vodna polja „Komiža“, „Podstražje“ i „Vinarija“, s njihovim transformatorskim stanicama. Transformatorske stanice kao i se ostale sporedne transformatorske stanice (10(20)/0,4kV) su međusobno povezane (Slika 4.3.). vodovima i kabelima različitih presjeka, materijala i duljina. FN elektrana koja je izvorno instalirane snage 3,5MW modelirana je kao 2MW, a baterijski spremnici izvornog kapaciteta 1,44MW modelirani su s 1MW. Model mreže otoka Visa, krivulje opterećenja za svaku pojedinu transformatorsku stanicu u određenom vodnom polju preuzete su iz diplomskog rada [15]. Obzirom da softver DIgSILENT Power Factory ima ograničenja, mreža otoka Visa je reducirana odnosno smanjen je broj sabirnica. Mreža je reducirana tako da su pojedine transformatorske stanice i njihova opterećenja zbrojena u jednu transformatorsku stanicu s zbrojenim njihovim pojedinim opterećenjima. Kako smo zbrojili opterećenja bilo je potrebno i povećati snagu priključenom transformatora, uz to pojedine duljine vodova/kabela su se zbrojile u jednu duljinu.

Prema radu [15] transformatorske stanice na kojima je bilo potrebno primijeniti redukciju su:

- Transformatorske stanice „Porat“, „Polje“, „Biševo 1“ i „Stupišće“ su spojene u jednu, s jednim pripadnim opterećenjem dobiveno zbrajanjem pojedinih opterećenja
- • Transformatorske stanice „Podhumlje“, „Ravno“ i „Komiža vodovod“ su spojene u jednu, s jednim pripadnim opterećenjem dobiveno zbrajanjem pojedinih opterećenja
- • Transformatorske stanice „Podšpilje“ i „Dračevo polje“ su spojene u jednu, s jednim pripadnim opterećenjem dobiveno zbrajanjem pojedinih opterećenja
- • Transformatorske stanice „Rukavac“ i „Marine zemlje“ su spojene u jednu, s jednim pripadnim opterećenjem dobiveno zbrajanjem pojedinih opterećenja
- • Transformatorske stanice „Komiža 3“, „Komiža 4“, „Komiža 6“ i „Komiža 1“ su spojene u jednu, s jednim pripadnim opterećenjem dobiveno zbrajanjem pojedinih opterećenja



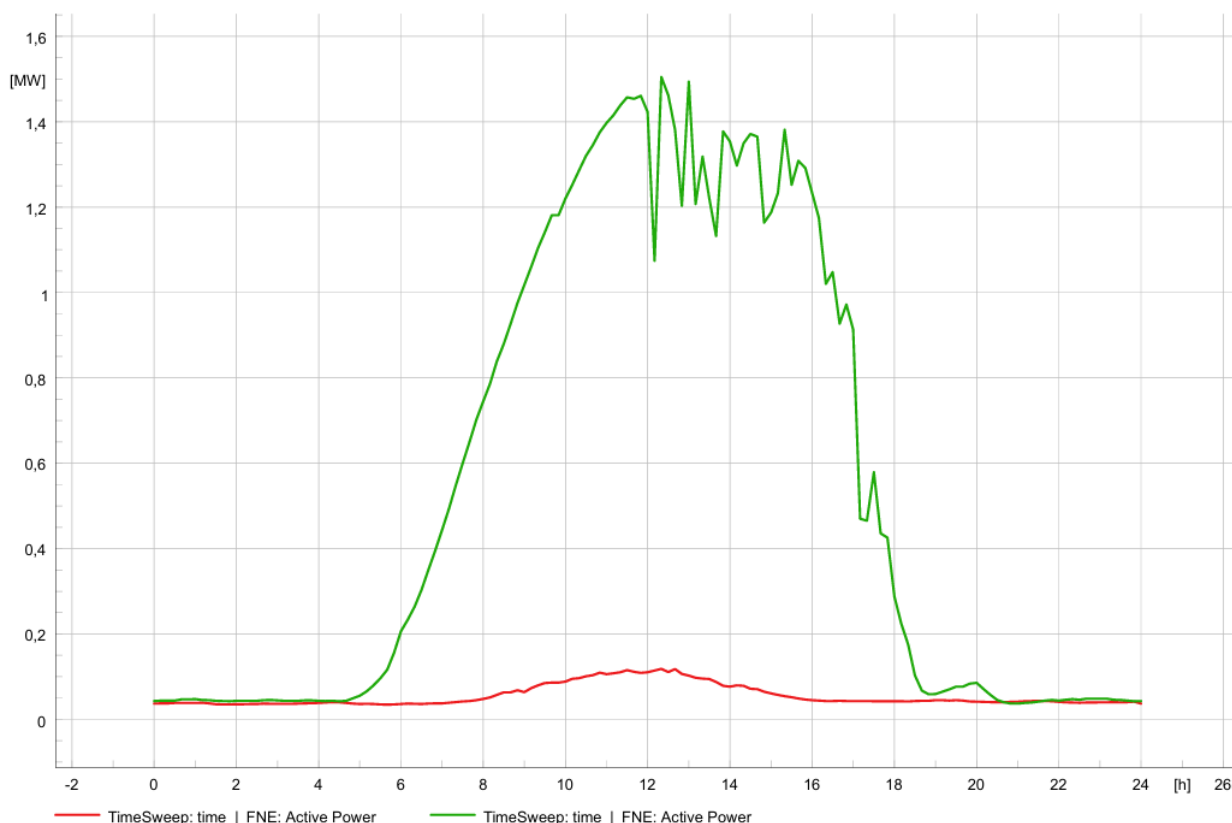
Slika 4.3. Jednopolna shema odabranog modela mreže otoka Visa korištena pri simulacijama

U programskom paketu DIGSILENT Power Factory, simulacija će biti izvršena pomoću vremenskog koraka (eng. *Time Sweep*) kako bi se dobio grafički prikaz napona i strujno opterećenje vodova u odnosu na jedan dan (minimalni ili maksimalni tok energije). Takva simulacija odrađena je u vremenskim intervalima s razlučivošću od jednog sata. Grafikonu strujnog (postotnog) opterećenja vodova pratili su se na sabirnicama „Vod elektrane“, „Vodno polje Vinarija“, „Vodno polje Komiža“ i „Vod krute mreže“, dok su se profili (kretanje) napona pratili na sabirnici „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“ i „PCC“. Sabirnica „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“ korištena je zbog svoje električke udaljenosti od vanjske mreže i elektrane na OIE. Sabirnica „PCC“ korištena je za praćenje utjecaja distribuirane proizvodnje na ostatak priključene mreže. Pri simulacijama promatrati će se utjecaj različitih vrsta elektrana na OIE na prilike na odabranom modelu mreže i to za slučaj minimalnog (zimski dan) i maksimalnog (ljetni dan) toka energije te za slučaj sa i bez baterijskih spremnika energije.

4.2. Simulacija 1.: Integracija fotonaponske elektrane na odabrani model mreže otoka Visa

U simulaciji 1. promatrati će se utjecaj integrirane FN elektrane na prilike na odabranom modelu mreže. Na slici 4.4. možemo vidjeti proizvodnju FN elektrane pri minimalnom toku energije

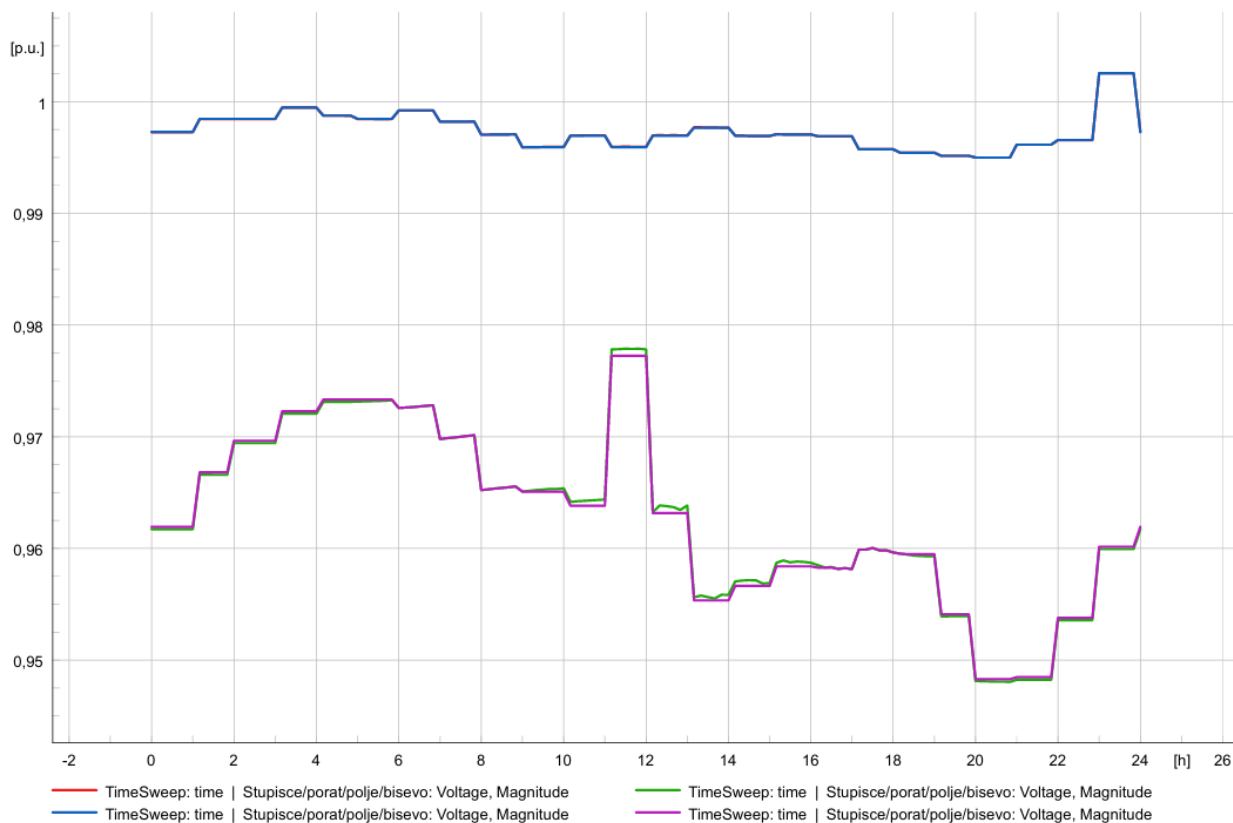
(zimski dan) koja je prikazana crvenom krivuljom te proizvodnju pri maksimalnom toku energije (ljetni dan) prikazanu zelenom krivuljom. Promatrani zimski dan bio je tmuran, oblačan i prilično neuspješan gledajući proizvodnju električne energije, proizvodnja je iznosila vrlo niskih 5-7% instalirane snage. Ljetni dan očekivano donosi jako veliku količinu sunčeva zračenja što dovodi do povećanja proizvodnje, u našem slučaju FN elektrana najviše proizvodi od 11 do 13 sati te radi s 80% instalirane snage (1,5MW).



Slika 4.4. Profil proizvodnje fotonaponske elektrane za ljetni (zeleno krivulja) i zimski dan (crvena krivulja)

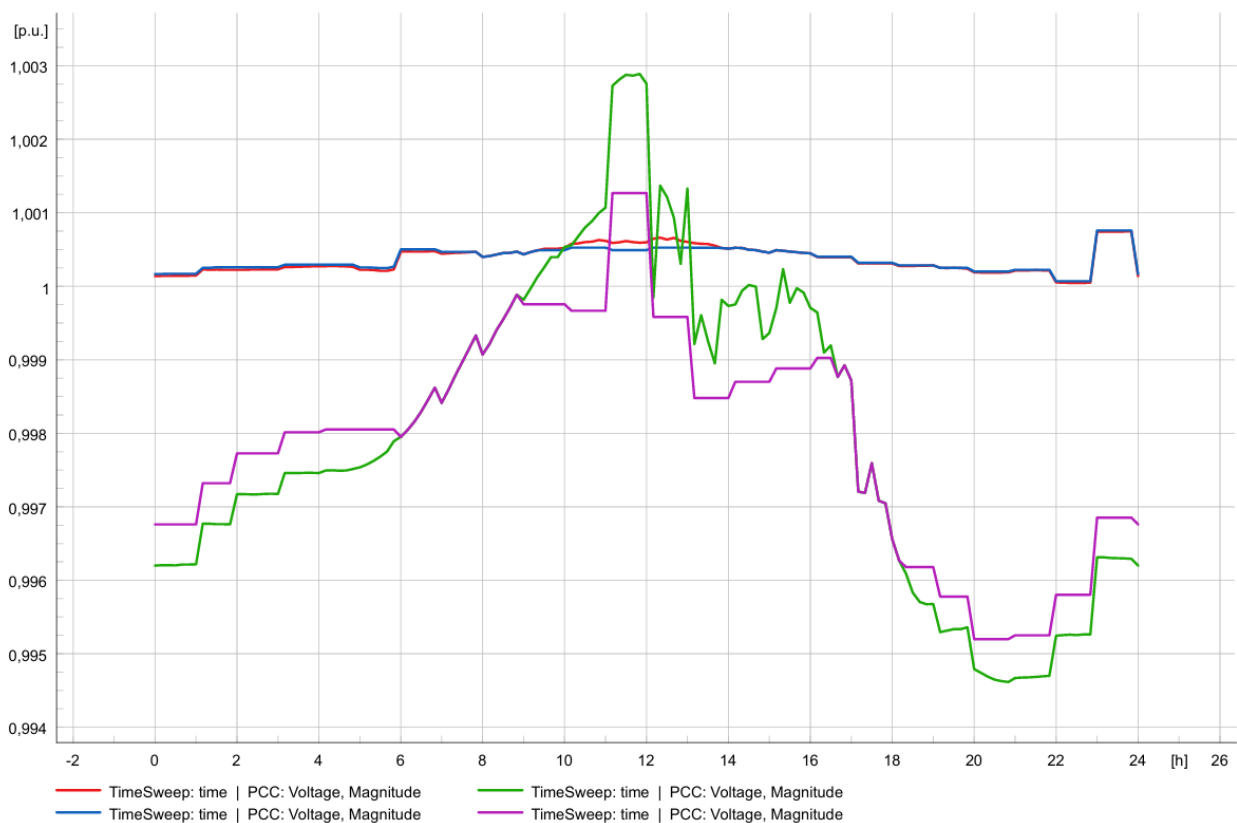
Na slici 4.5. krivulje prikazuju utjecaj integracije FN elektrane na električki najudaljeniju sabirnicu „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“. Možemo zaključiti kako integracija FN elektrane gotovo da ne utječe na plavu i crvenu krivulju (crvena krivulja prikazuje minimalni tok energije mreže bez integriranih baterijskih sustava pohrane, a plava krivulja prikazuje minimalno tok energije mreže sa integriranim baterijskim sustavom pohrane), spomenute krivulje kreću se ovisno o potrošnji te potrebnu energiju primaju iz nadređene (krute) mreže. Također možemo spomenuti kako baterijski spremnik energije ne utječe na kretanje napona pri minimalnom toku energije na električki najudaljenijoj sabirnici. Integracija FN elektrane pri maksimalnom toku energije (zeleno krivulja prikazuje maksimalni tok energije bez baterijskih spremnika energije, a ljubičasta krivulja

prikazuje maksimalni tok energije sa baterijskim spremnikom energije) također gotovo ne utječe na kretanje napona na sabirnici „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“. Napon se na spomenutoj sabirnici blago povisio od 11 do 12 sati jer je u to vrijeme opala potražnja za električnom energijom što dovodi do povećanja napona na sabirnici. Napon na električki najudaljenijoj sabirnici očekivano pada od 19 do 22 sata jer se tada potreba za električnom energijom povećava što slijedno dovodi do smanjenja napona. Rad baterijskog spremnika energije je praktički nevidljiv na električki najudaljenijoj sabirnici pri maksimalnom toku energije.



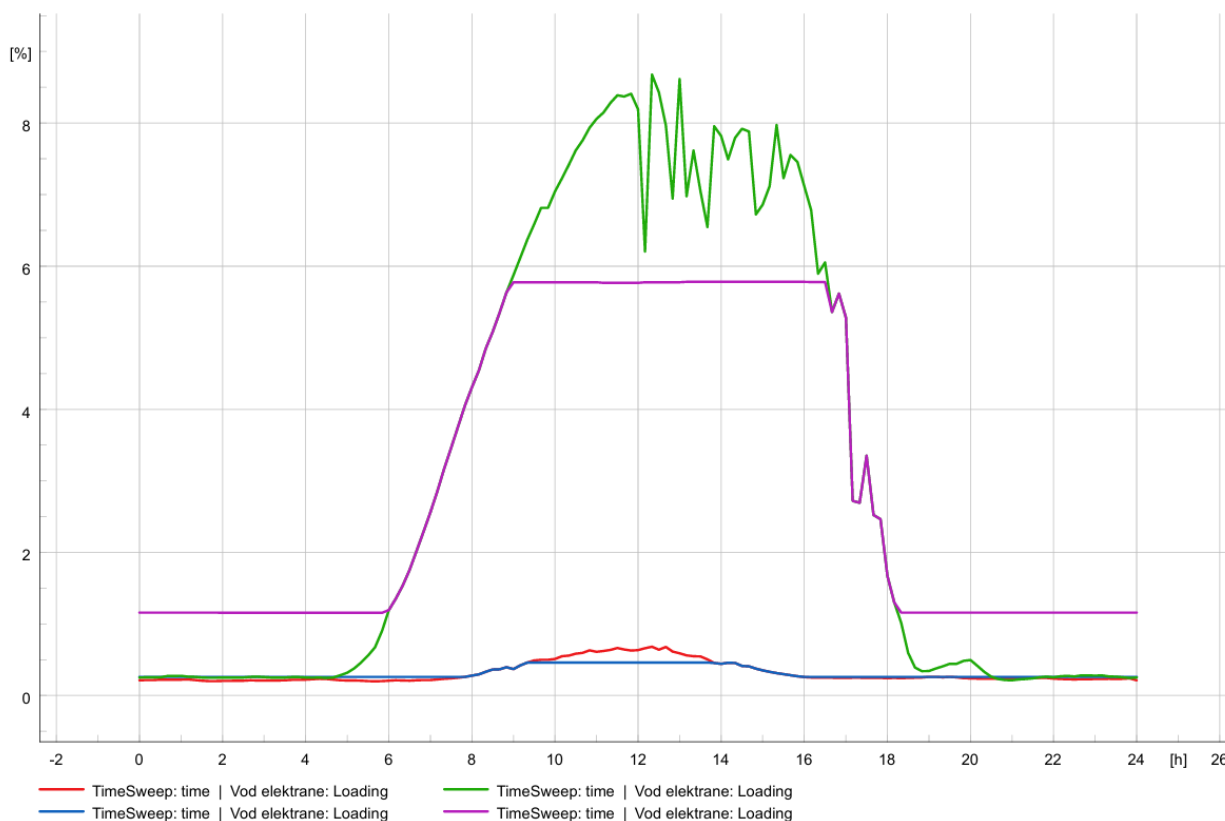
Slika 4.5. Utjecaj integracije FN elektrane na napon na električki najudaljeniju sabirnicu

Profil kretanja napona pratili smo i na priključnoj sabirnici elektrane prema ostatku mreže „PCC“ (Slika 4.6.). Pri minimalnom toku energije bez (crvena krivulja) i sa (plava krivulja) baterijskim spremnikom energije (BESS) napon na sabirnici „PCC“ se povećao, no jako malo (svega 0,5%, ~50V). Rad BESS je zanemariv jer je i proizvodnja vrlo mala. U slučaju maksimalnog toka energije bez (zelena krivulja) i sa (ljubičasta krivulja) BESS dolazi do povećanja napona. Napon pri maksimalnom toku energije s BESS (ljubičasta krivulja na slici 4.6.) prestaje rasti na 1,001 p.u. jer tada „višak“ električne energije se skladišti (minimalno) u BESS.



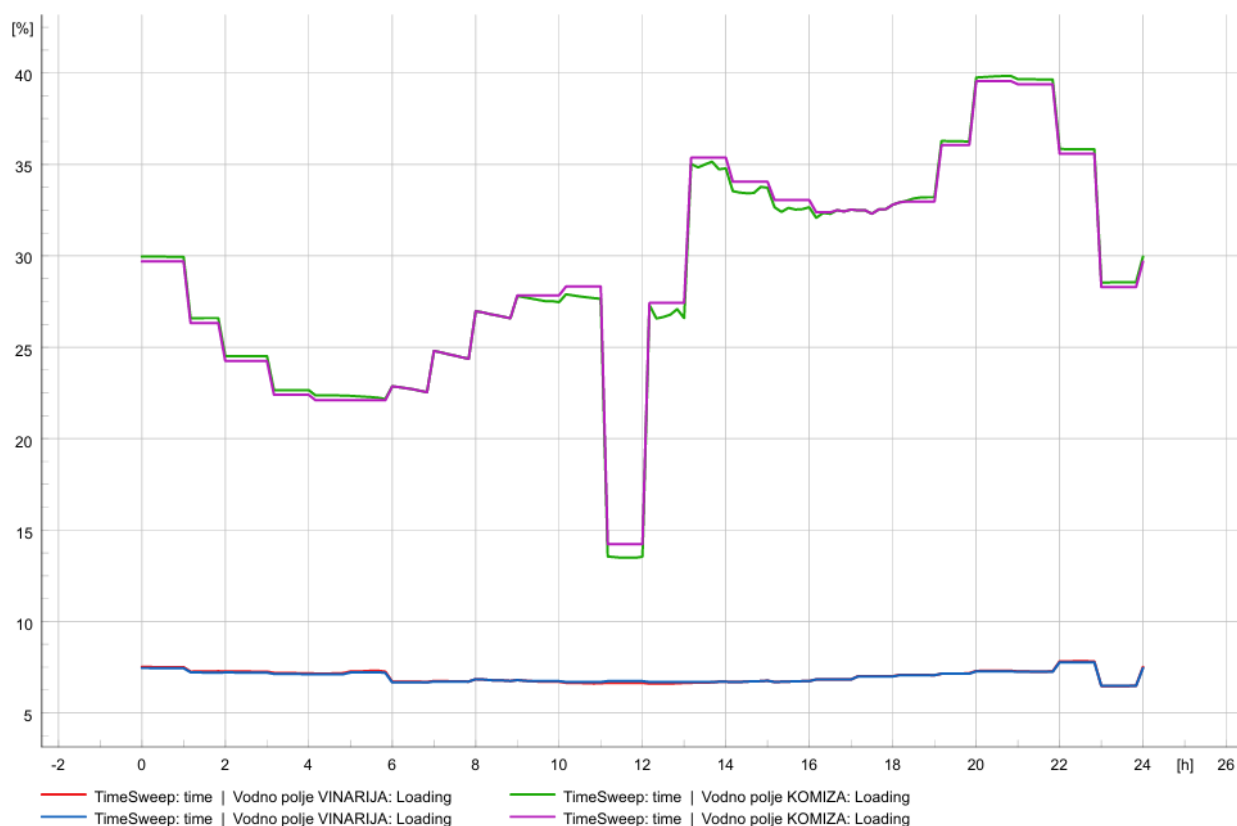
Slika 4.6. Utjecaj integracije FN elektrane na napon na priključnoj sabirnici elektrane

Slika 4.7. prikazuje nam strujno opterećenje voda FN elektrane. Kako je pri minimalnom toku energije manja i proizvodnja, manje je i strujno opterećenje voda elektrane. Crvena krivulja prikazuje minimalni tok energije bez BESS, a plava krivulja prikazuje minimalni tok energije sa BESS. Kao što je i očekivano, strujno opterećenje voda elektrane pri maksimalnom toku energije bez BESS (zelena krivulja) je veće 8 puta nego li pri minimalnom toku energije. Strujno opterećenje voda elektrane pri maksimalnom toku energije sa BESS je manje jer se za vrijeme maksimalne proizvodnje iz FN elektrane, energija skladišti u BESS te je zato smanjeno strujno opterećenje voda elektrane u intervalu od 10 do 14 sati. U intervalu od 0 do 6 sati i od 18 do 24 sata strujno opterećenje voda elektrane sa BESS je veće nego opterećenje voda bez BESS jer se tim intervalima baterijski spremnik energije prazni.



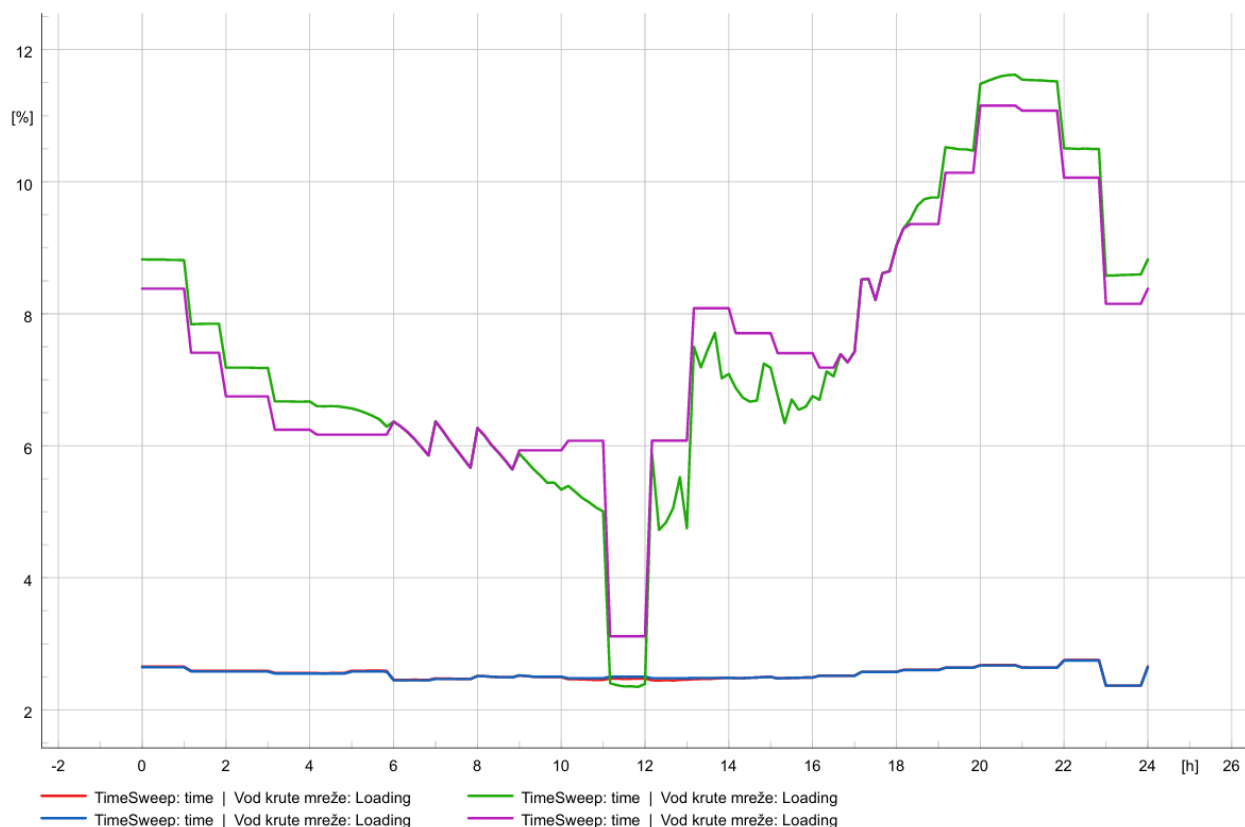
Slika 4.7. Utjecaj integracije FN elektrane na strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže

U slučaju strujnog opterećenja glavnih vodnih polja (Slika 4.8.), u simulacijama pri minimalnom toku energije korišteno je vodno polje „Vinarija“ jer je ono najviše strujno opterećeno. Dakle, pri minimalnom toku energije bez (crvena krivulja) i sa (plava krivulja) BESS strujno opterećenje je prosječno iznosilo 7% te se nije promijenilo pri integraciji FN elektrane. Rad BESS je zanemariv. Pri maksimalnom toku energije korišteno je vodno polje „Komiža“ jer je ono pri maksimalnom toku energije imalo najveće strujno opterećenje. Strujno opterećenje navedenog vodnog polja smanjilo se za 15% u vremenu od 11 do 12 sati jer se potreba za električnom energijom smanjila (zelena krivulja prikazuje maksimalni tok energije bez baterijskim spremnikom, a ljubičasta prikazuje maksimalni tok energije sa baterijskim spremnikom). Slijedno tomu dolazi do povećavanja strujnog opterećenja zbog povećanje potražnje za energijom. BESS kao i FN elektrana su relativno malih instaliranih snaga u odnosu na projektiranu nadređenu (krutu) mrežu. Kretanje strujnog opterećenja u navedenim vodnim poljima može se vidjeti na slici 4.8.



Slika 4.8. Utjecaj integracije FN elektrane na strujno opterećenje glavnih vodnih polja

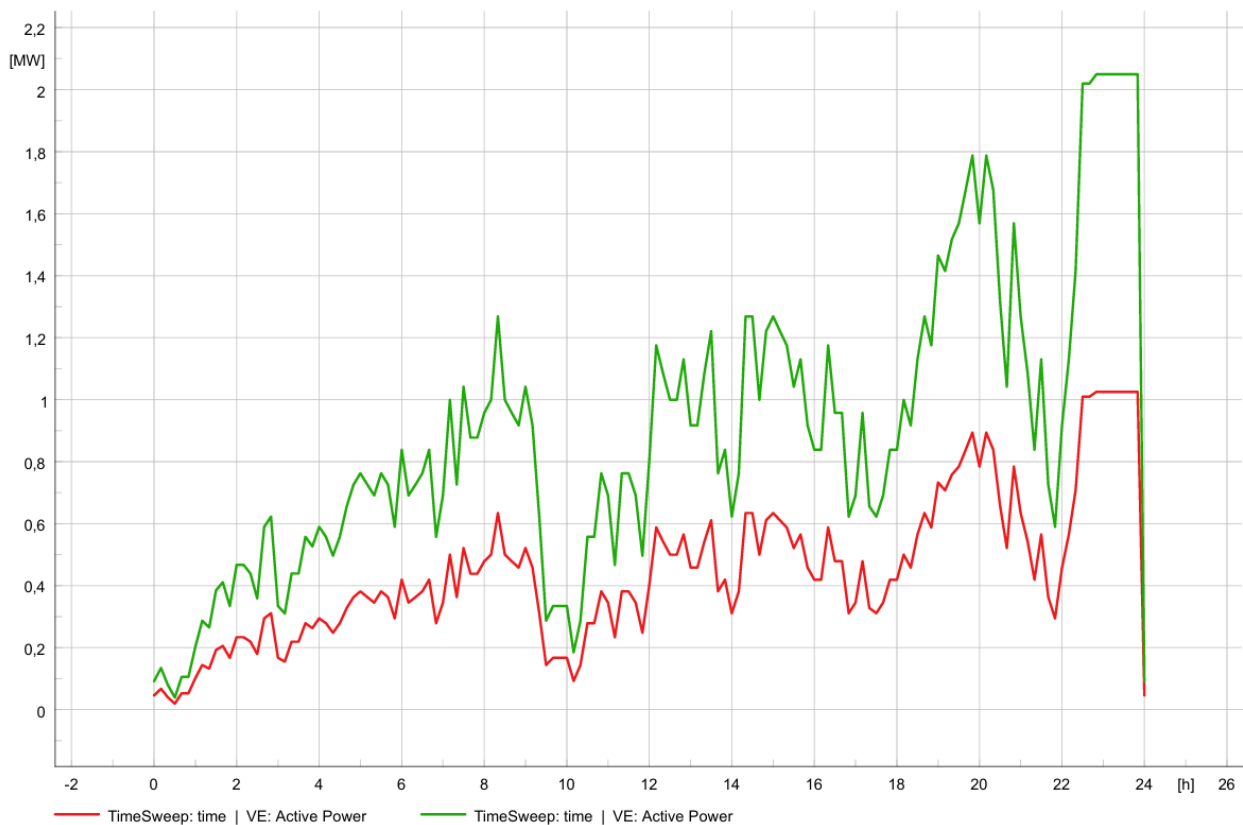
Pri minimalnom toku energije sa (plava krivulja) i bez (crvena krivulja) BESS strujno opterećenje referentnog čvora „Vod krute mreže“ je nepromjenjivo što je vidljivo na slici 4.9. Tijekom cijelog dana imamo jednako strujno opterećenje odnosno tijekom cijelog dana isti iznos energije preuzima se iz nadređene (krute) mreže. Kada imamo maksimalni tok energije bez BESS (zelena krivulja na slici 4.9.), strujno opterećenje referentnog čvora se smanjuje s povećanjem proizvodnje iz FN elektrane. Odnosno, s povećanjem proizvodnje iz FN elektrane, minimalno se smanjuje količina energije preuzete iz nadređene (krute) mreže. Smanjenjem proizvodnje slijedno dolazi do povećanja strujnog opterećenja voda krute mreže jer se tada povećava energija preuzeta iz nadređene (krute) mreže. Simulacija pri maksimalnom toku energije s BESS (ljubičasta krivulja na slici 4.9.) u određenim je trenucima ispod (iznad) simulacije bez BESS jer se u tim dijelovima koristi energije koja je uskladištena u BESS kako bi se smanjila ovisnost o krutoj mreži.



Slika 4.9. Utjecaj integracije FN elektrane na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži

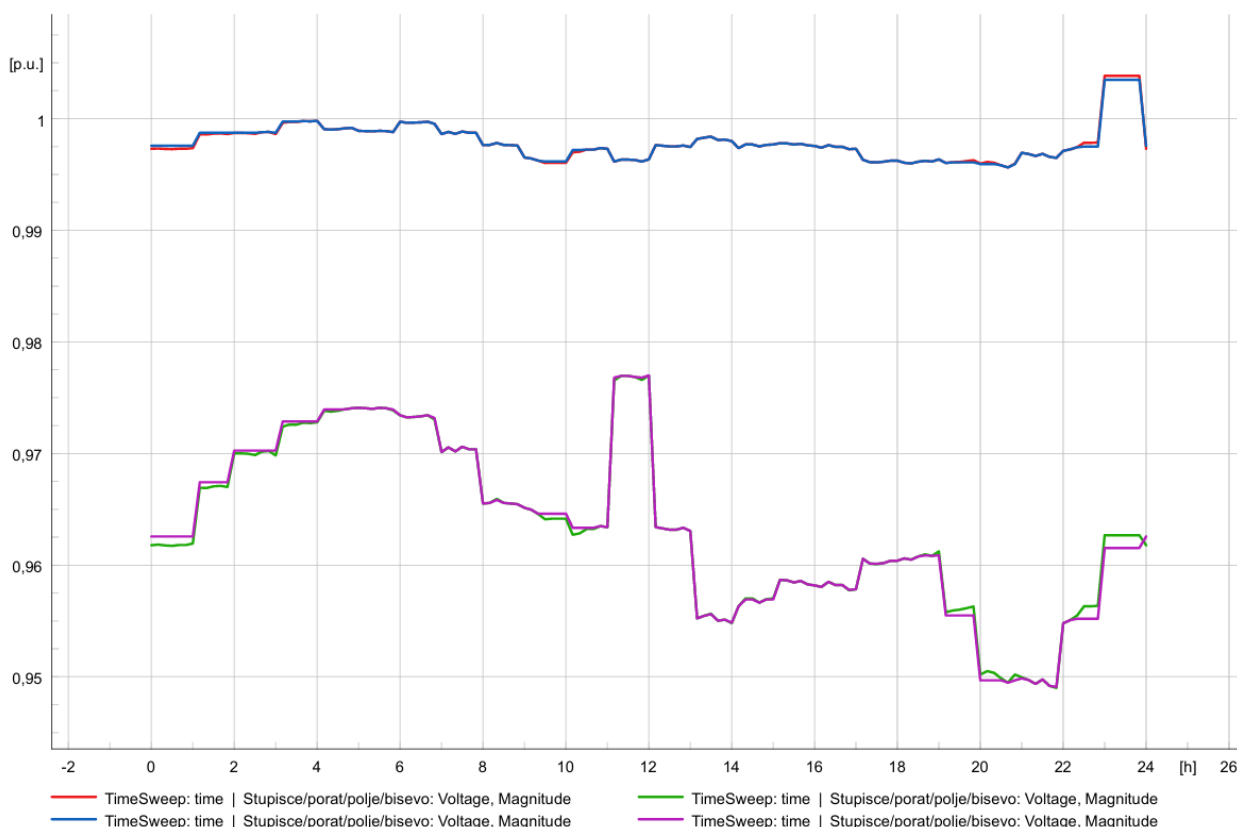
4.3. Simulacija 2.: Integracija vjetroelektrane u odabrani model mreže otoka Visa

U simulaciji 2. promatramo utjecaj integracije vjetroelektrane (VE) na prilike u odabranom modelu mreže. Na slici 4.10. može se vidjeti kretanje proizvodnje vjetroelektrane pri minimalnom (crvena krivulja) i maksimalnom (zelena krivulja) toku energije. Zaključujemo kako se brzina vjetra postupno povećavala, te od 22 od 24 sata radila s maksimalnom instaliranom snagom pri maksimalnom toku energije (zelena krivulja). Pri minimalnom toku energije (crvena krivulja) maksimalna proizvodnja vjetroelektrane iznosila je 50% instalirane snage. I pri minimalnom i pri maksimalnom toku energije imamo povremene propade u proizvodnji koji se najčešće događaju zbog turbulentnosti vjetra, a mogu biti i zbog gusto postavljenih vjetroturbina u vjetroparku koje mogu uzrokovati kumulativne gubitke brzine vjetra zbog međusobnog ometanja.



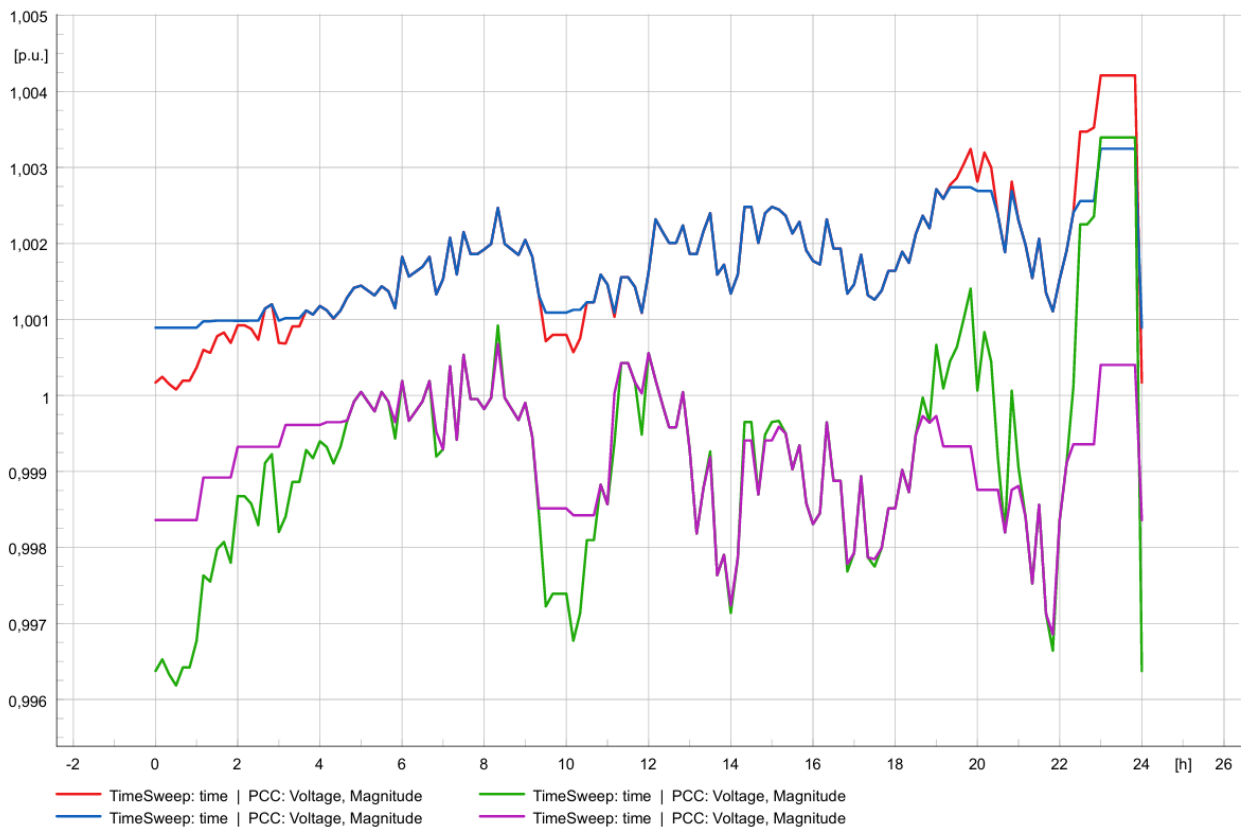
Slika 4.10. Profil proizvodnje vjetroelektrane za ljetni (zelena krivulja) i zimski (crvena krivulja) dan

Slika 4.11. prikazuje nam utjecaj integracije VE na električki najudaljeniju sabirnicu „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“ u promatranoj mreži. Pri minimalnom toku energije sa (plava krivulja) i bez (crvena krivulja) BESS imamo jako malu promjenu napona (0,1%) nakon integracije VE. Pri maksimalnom toku energije bez (zelena krivulja) i sa (ljubičasta krivulja) BESS integracija VE gotovo da nema utjecaj na napon u tome dijelu mreže već se napon kreće ovisno o potražnji električne energije. Rad BESS s integriranom VE na najudaljenijoj sabirnici u svim simulacijama je praktički nevidljiv što se može vidjeti na slici 4.11..



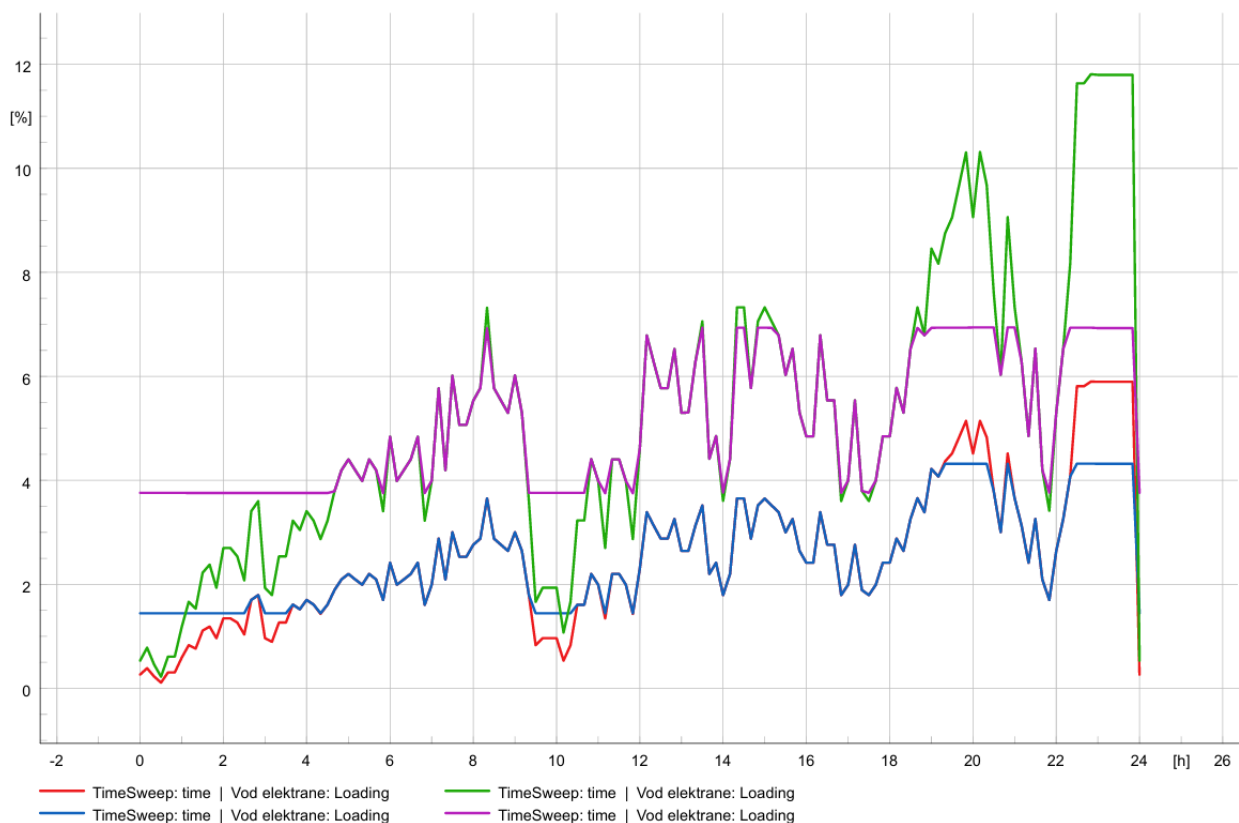
Slika 4.11. Utjecaj integracije VE na napon na električki najudaljenijoj sabirnici

Kada promatramo utjecaj integracije vjetroelektrane na priključnu sabirnicu elektrane prema ostatku mreže „PCC“ može se zaključiti kako se napon na „PCC“-u kreće upravo po krivulji proizvodnje sa slike 4.10.. Naime, pri minimalnoj proizvodnji bez (crvena krivulja na slici 4.12.) i sa (plava krivulja na slici 4.12.) BESS napon na spomenutoj sabirnici se postepeno povećao te dostigao maksimalno 1,004 p.u.. Kao i pri minimalnom toku energije tako i pri maksimalnom toku energije bez (zelena krivulja na slici 4.12.) i sa (ljubičasta krivulja na slici 4.12.) BESS s integracijom VE dolazi do povećanja napona na promatranoj sabirnici, kao što je i očekivano. Napon pri maksimalnom toku energije je u početnom trenutku ispod 1 p.u. što je očekivano zbog povećanja potražnje za električnom energijom. Napon na sabirnici „PCC“ je nešto niži pri minimalnom (plava krivulja na slici 4.12.) i pri maksimalnom (ljubičasta krivulja na slici 4.12.) toku energije s integriranom VE i BESS nego bez BESS jer se u tim vremenskim intervalima električna energija skladištila u BESS kako bi je mogli koristiti u vrijeme smanjene i potpuno isključene proizvodnje iz elektrane na OIE.



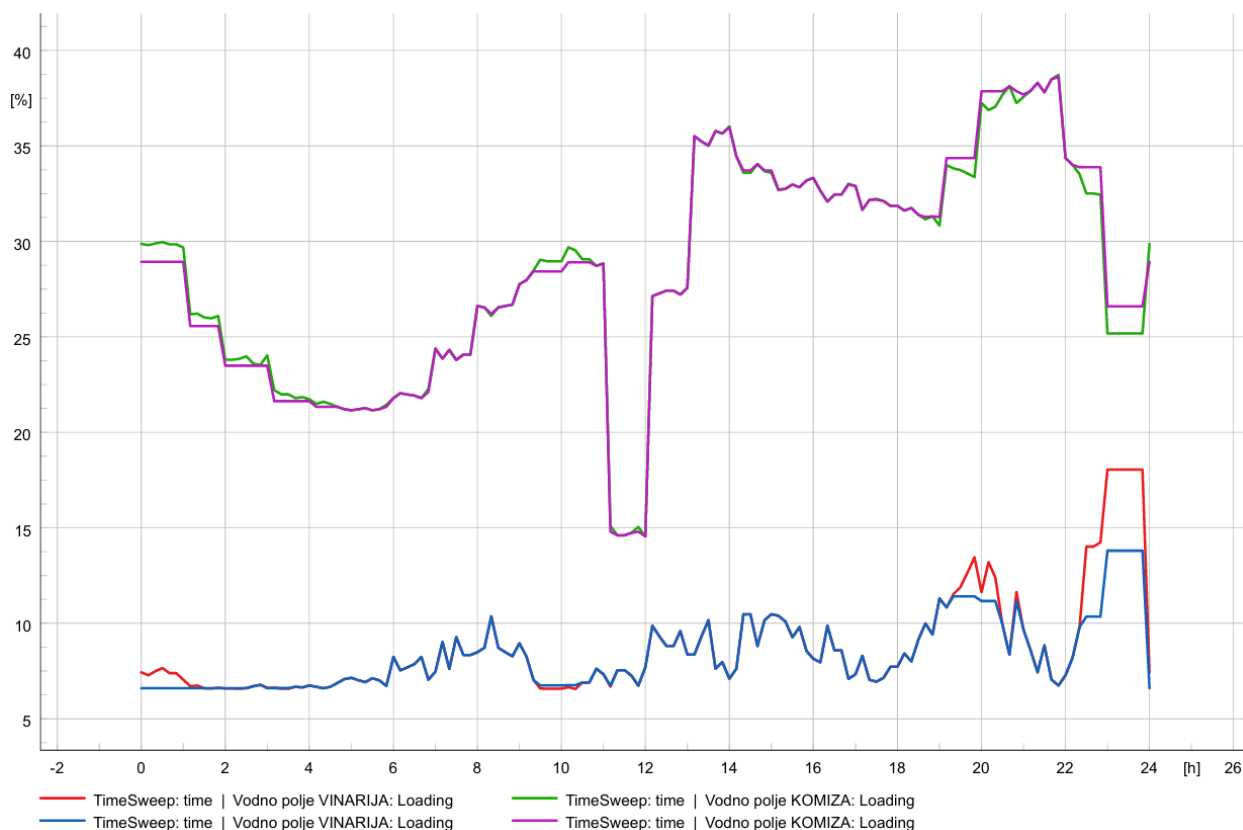
Slika 4.12. Utjecaj integracije VE na napon na priključnoj sabirnici elektrane

U ovoj simulaciji promatran je utjecaj integracija VE na strujno opterećenje voda koji vodi od elektrane prema ostatku mreže „Vod elektrane“. Kao i napon, tako se i strujno opterećenja voda „Vod elektrane“ kreće prema proizvodnji VE prema slici 5.10. Strujno opterećenje voda „Vod elektrane“ pri minimalnom toku energije bez (crvena krivulja na slici 4.13.) i sa (plava krivulja na slici 4.13.) BESS i pri maksimalnom toku energije bez (zelena krivulja na slici 37.) i sa (ljubičasta krivulja na slici 5.13.) BESS povećava (smanjuje) se s povećanjem (smanjenjem) proizvodnje što je i očekivano. Kada je proizvodnja elektrana na OIE veća nego li potražnja u tome slučaju se energija skladišti u BESS što se može vidjeti na slici 4.13. na plavoj i ljubičastoj krivulji. Odnosno, kada se energija skladišti u BESS tada nema protoka energije kroz vod elektrane što dovodi do smanjenja strujnog opterećenja promatranog voda „Vod elektrane“. Najveće strujno opterećenje je pri maksimalnom toku energije bez BESS (zelena krivulja na slici 4.13.) i iznosi 12%.



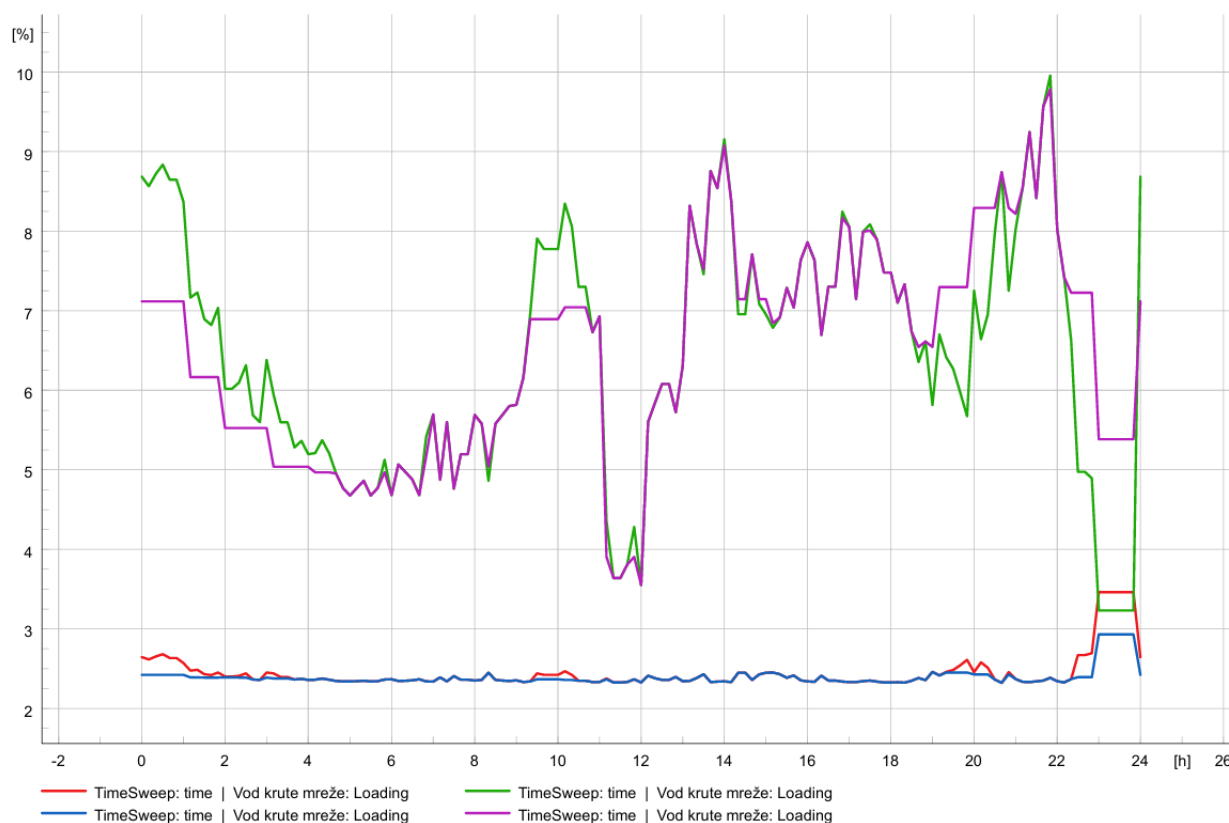
Slika 4.13. Utjecaj integracije VE na strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže

U slučaju strujnog opterećenja glavnih vodnih polja pri integraciji VE za minimalni tok energije korišteno je vodno polje „Vinarija“ jer je ono najviše strujno opterećeno pri minimalnom toku energije. Pri minimalnom toku energije bez (crvena krivulja na slici 4.14.) i sa (plava krivulja na slici 4.14.) BESS strujno opterećenje vodnog polja „Vinarija“ kretalo se 7-10% ovisno o proizvodnji, a pri maksimalnoj proizvodnji pri minimalnom toku energije povećalo se na 18% upravo zbog povećanja proizvodnje iz VE. Rad BESS je tijekom dana gotovo neprimjetan, dok se u vremenskom intervalu od 22 do 24 sata rad BESS očituje smanjenjem strujnog opterećenja za 4% zbog skladištenja viška energije. Pri maksimalnom toku energije korišteno je vodno polje „Komiža“ jer je ono pri maksimalnom toku energije imalo najveće strujno opterećenje. Strujno opterećenje promatranog vodnog polja smanjuje se za vrijeme manje potrebe za električnom energijom, a slijedno povećava za vrijeme povećane potrebe za električnom energijom kao i kod simulacije 1. s integriranom FN elektranom. BESS je gotovo neprimjetan u ovoj simulaciji. Zelena krivulja prikazuje maksimalno toku energije bez baterijskim spremnikom, a ljubičasta prikazuje maksimalno toku energije sa BESS na slici 4.14.



Slika 4.14. Utjecaj integracije VE na strujno opterećenje glavnih vodnih polja

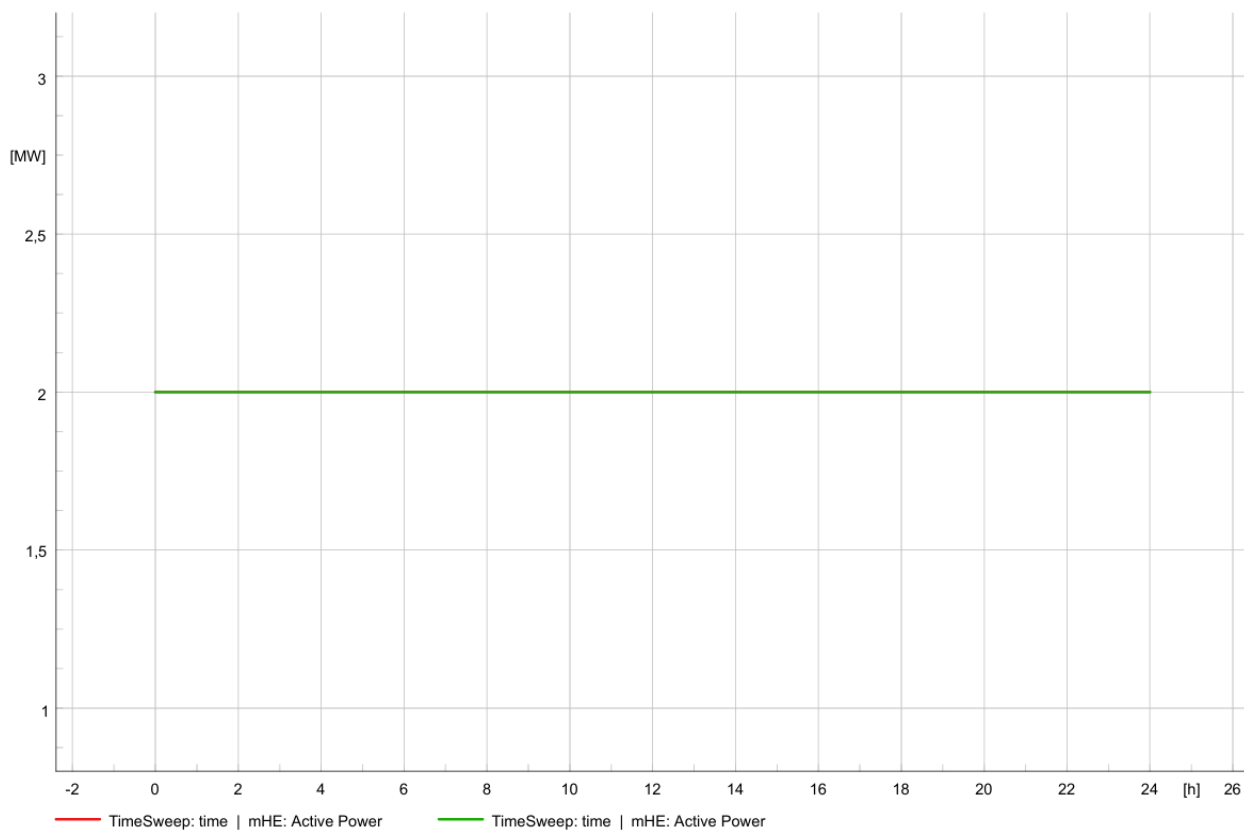
Neovisno o proizvodnji iz VE pri minimalnom toku energije bez (crvena krivulja na slici 4.15.) i sa (plava krivulja na slici 4.15.) BESS, strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži „Vod krute mreže“ se ne mijenja, odnosno tijekom cijelog dana je strujno opterećenje jednako, osim od 22 do 24 sata kada je proizvodnja najveća pri minimalnom toku energije kada dolazi do jako malog porasta strujnog opterećenja s 2,5% povećava se na 3,5%. Strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži „Vod krute mreže“ pri maksimalnom toku energije bez (zelena krivulja) i sa (ljubičasta krivulja) BESS očekivano je veće nego pri minimalnom toku energije što možemo vidjeti sa slike 4.15. U vremenskom intervalu od 0 do 13 sati integrirana VE bez BESS (zelena krivulja na slici 4.15.) ima jako malen utjecaj na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži, krivulja strujnog opterećenja kreće se sukladno potražnji električne energije. Od 14 do 19 sati dolazi do blagog smanjenja strujnog opterećenja dok do najvećeg smanjenja opterećenja dolazi od 22 do 24 sata kada VE radi s maksimalnom instaliranom snagom od 2MW što dovodi do smanjenja strujnog opterećenja s 10% na 3,5%. Strujno opterećenje referentnog čvora s integriranom VE i BESS (ljubičasta krivulja na slici 4.15.) nešto je manje nego li bez BESS jer se u tim vremenskim intervalima energija koristila iz BESS kako bi se izbjeglo dodatno strujno opterećenje.



Slika 4.15. Utjecaj integracije VE na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži

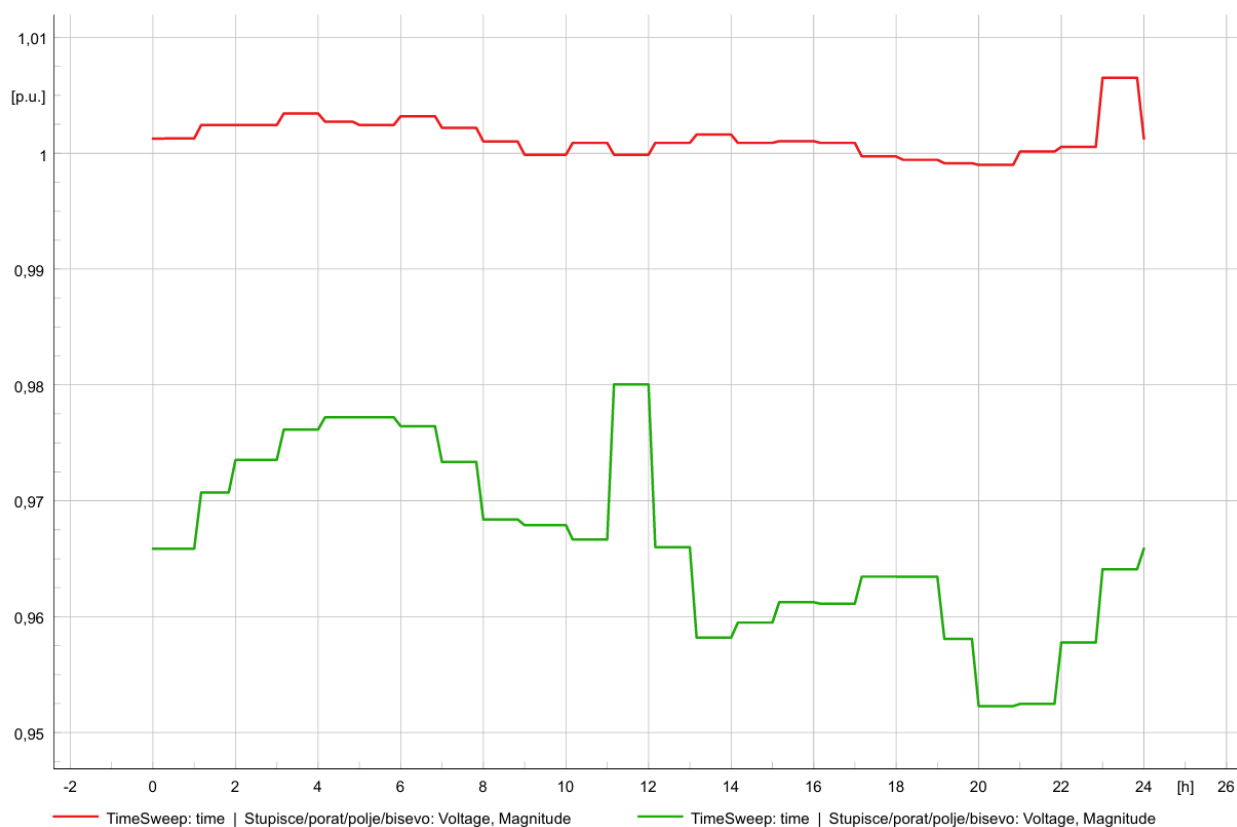
4.4. Simulacija 3.: Integracija male hidroelektrane u odabrani model mreže otoka Visa

Elektrane koje imaju konstantnu ulaznu sirovinu (energiju) poput hidroelektrana, termoelektrane na biomasu, geotermalnih i drugih sličnih elektrana na OIE imati će jednak utjecaj na ostatak mreže ukoliko imaju istu vrstu priključka (generator) na mrežu. U ovome pod poglavlju promatrati će se utjecaj integracije male hidroelektrane na priključenu mrežu. Instalirana snaga male hidroelektrane (mHE) je 2MW (Slika 4.16.) te je jednaka tijekom cijelog dana i pri minimalnom i pri maksimalnom toku energije; što nam omogućuje konstantan protok vode kroz vodne turbine generatora. Također, u simulacijama s integriranom mHE neće biti priključeni BESS jer tijekom jednog promatranog dana nema oscilacija u proizvodnji, odnosno, nema „viška“ energije koji bi se skladištio u BESS već se sva proizvedena energija upotrijebi.



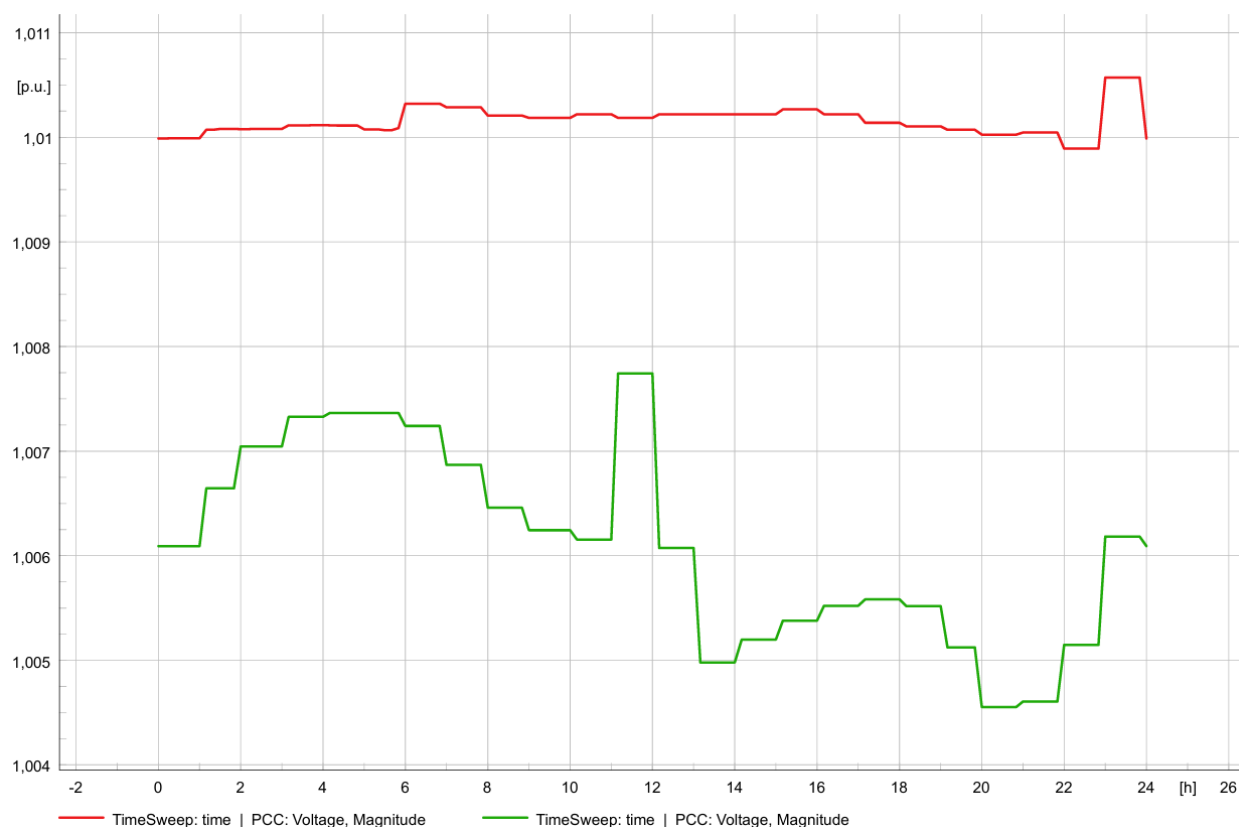
Slika 4.16. Profil proizvodnje male hidroelektrane za zimski (crvena krivulja) i ljetni (zelena krivulja) dan

Pri minimalnom toku energije (crvena krivulja na slici 4.17.) te s integriranom mHE napon na električki najudaljenijoj sabirnici „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“ je nešto preko 1 p.u. iz čega možemo zaključiti kako mHE instalirane snage 2MW ima utjecaj na najudaljeniju sabirnicu te povisuje napon za 0,07 p.u.. Pri maksimalnom toku energije (zelena krivulja na slici 4.17.) također mHE ima u utjecaj na razinu napona, podiže napon na navedenoj sabirnici za 0,05 p.u. što je približno 50V (vrlo mali utjecaj u 10kV mreži). Napon se tijekom dana kreće ovisno o potražnji električne energije.



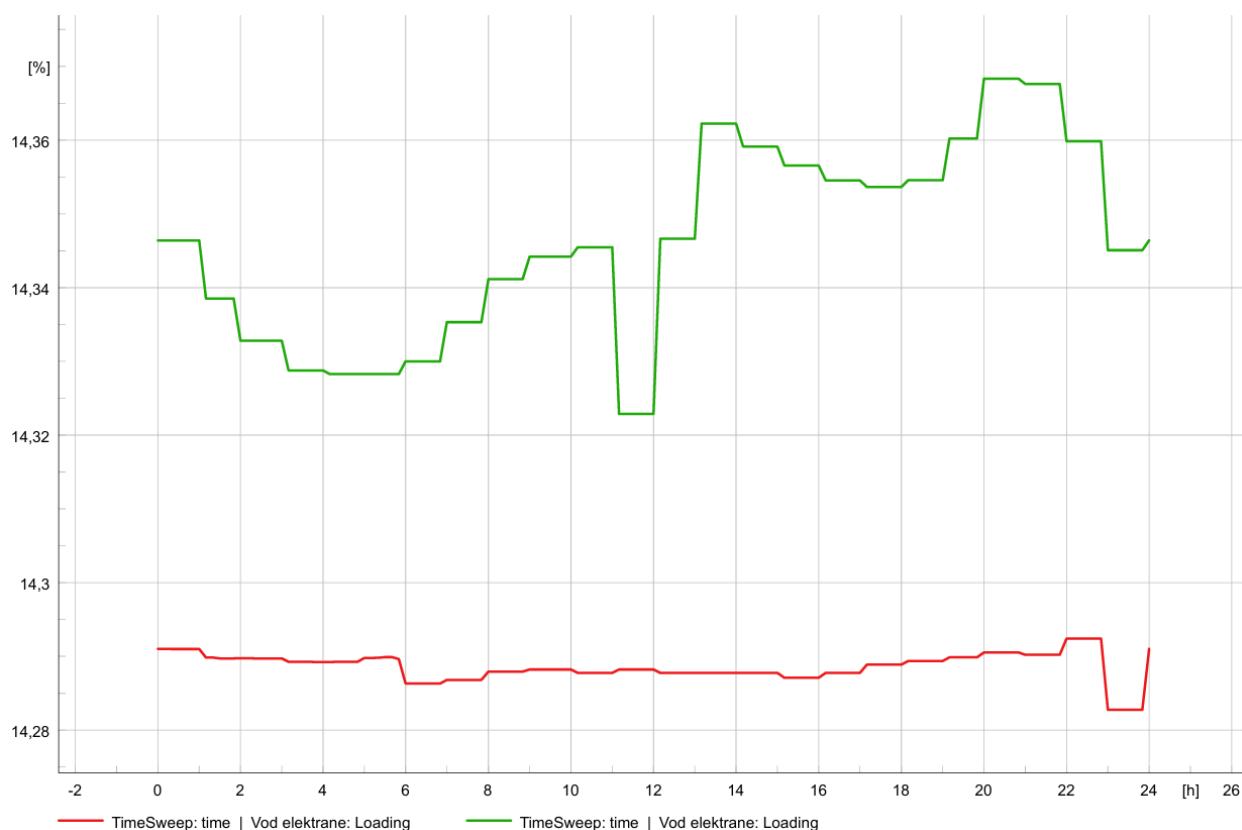
Slika 4.17. Utjecaj integracije male hidroelektrane na napon na električki najudaljenijoj sabirnici

Obzirom da mHE radi s konstantnom snagom (2MW), pri minimalnom i pri maksimalnom toku energije dolazi do povećanja napona na sabirnici „PCC“ na kojoj je spojena mHE. Sa slike 4.18. možemo uvidjeti kako je razina napona gotovo jednaka tijekom minimalnog toka energije (crvena krivulja), dok se pri maksimalnom toku energije (zelena krivulja) napon na najbližoj sabirnici mijenja sukladno potražnji; tijekom noćnih sati i oko podneva potražnja za električnom energijom je najmanja zbog čega dolazi do povećanja razine napona do 1,0077 p.u., najveća potražnja za električnom energijom je upravo od 19 do 23 sata kada napon slijedno pada što je vidljivo na slici 4.18.



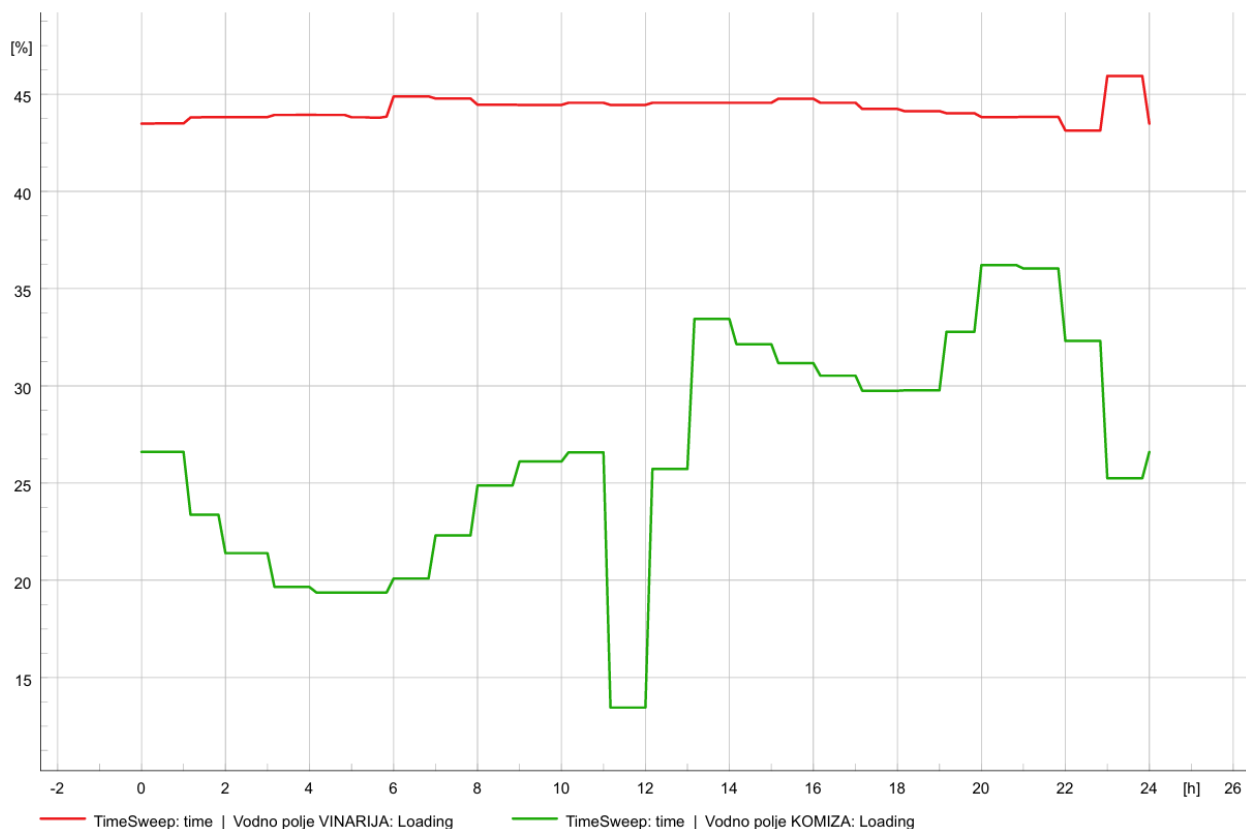
Slika 4.18. Utjecaj integracije mHE na napon na priključnoj sabirnici elektrane

Strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže „Vod elektrane“ pri minimalnom toku energije (crvena krivulja na slici 4.19.) je konstantno te se ne mijenja tijekom dana , dok se pri maksimalnom toku energije (zelena krivulja na slici 4.19.) strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže „Vod elektrane“ mijenja ovisno o potražnji te iznosi ~14,35%.



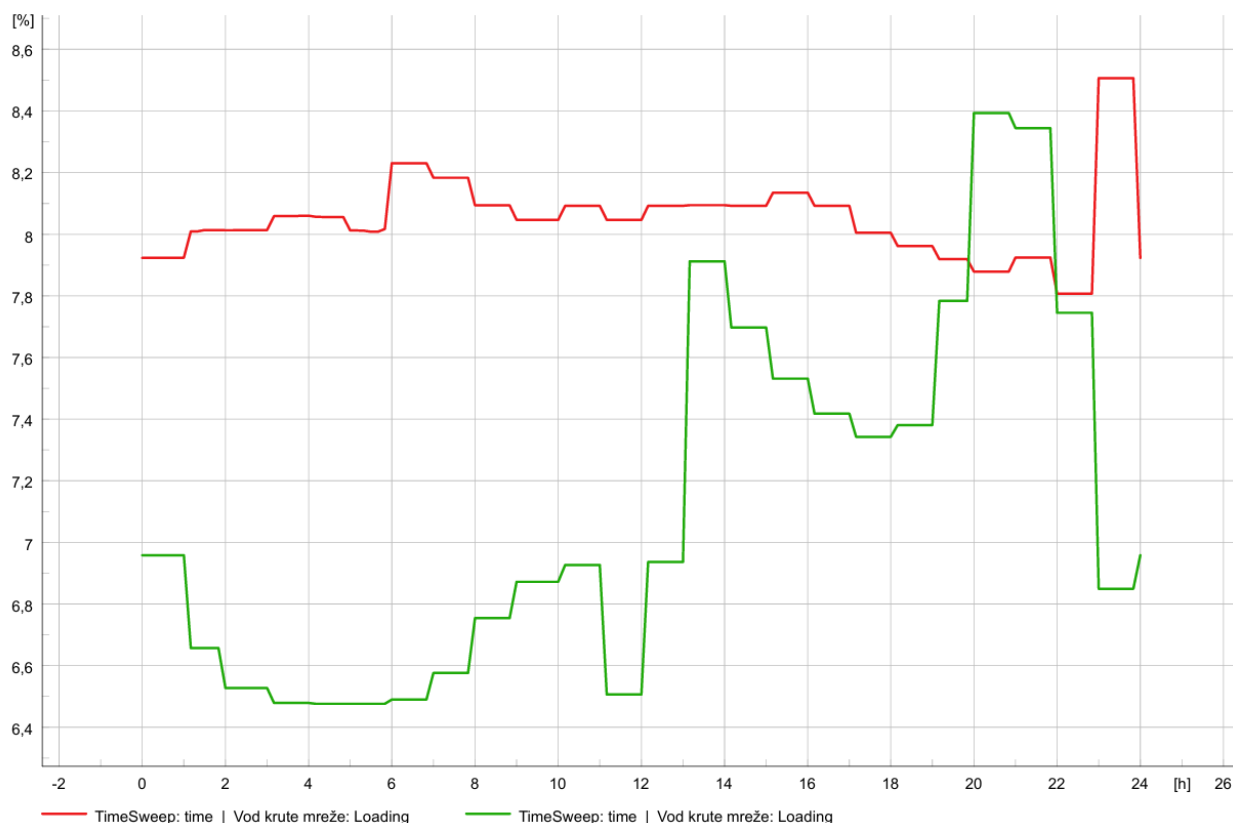
Slika 4.19. Utjecaj integracije mHE na strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže

Pri minimalnom toku energije (crvena krivulja na slici 4.20.) nakon integracije mHE najveće strujno opterećenje ima vodno polje „Vinarija“ i iznosi 44%. Upravo zbog proizvodnje mHE koja predaje energiju prema ostalim potrošačima preko vodnog polja „Vinarija“ kako bi se smanjila ovisnost o nadređenoj mreži. Pri maksimalnom toku energije (zelena krivulja na slici 4.20.) najveće strujno opterećenje ima vodno polje „Komiža“ jer preuzima najveću količinu potrebne energije iz nadređene mreže te se strujno opterećenje također kreće ovisno o potražnji za električnom energijom.



Slika 4.20. Utjecaj integracije mHE na strujno opterećenje vodnih polja

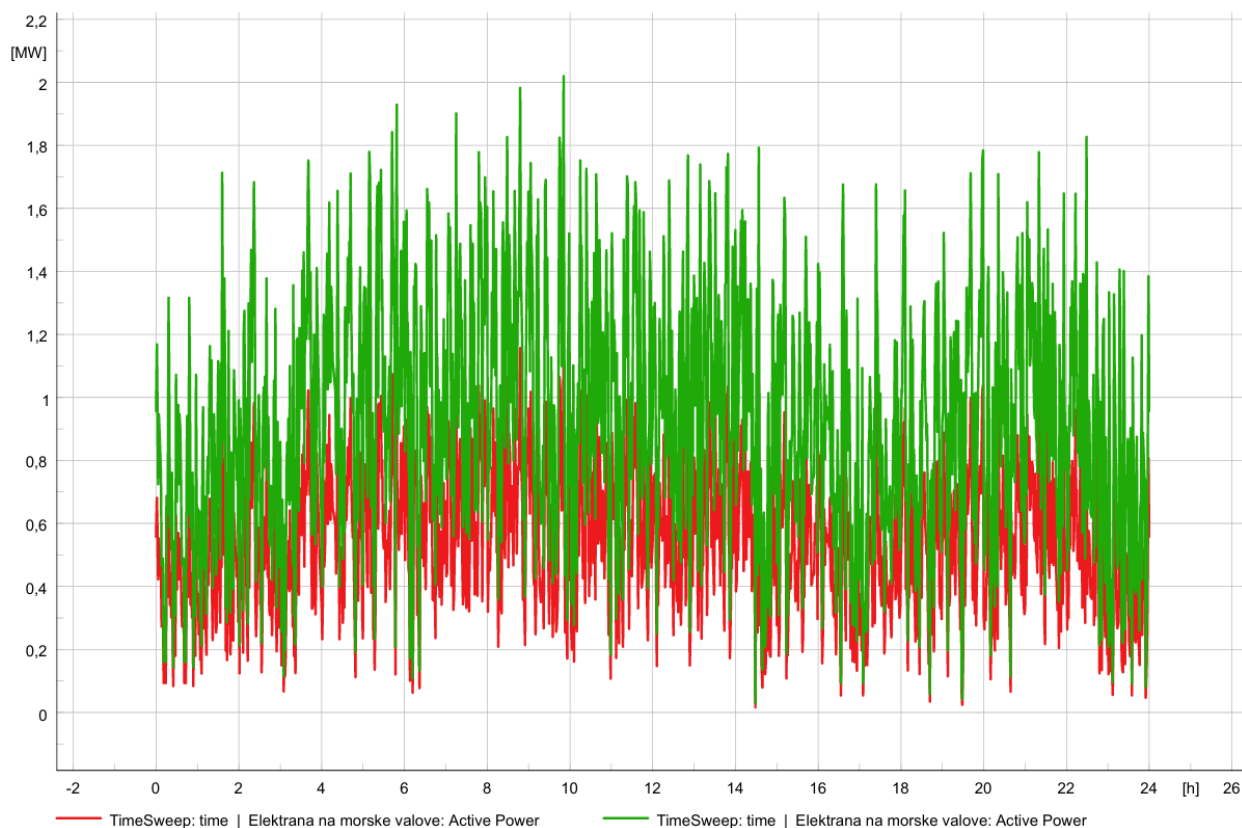
Integracijom mHE strujno opterećenje referentnog čvora „Vod krute mreže“ pri minimalnom toku energije se minimalno mijenja i prosječno iznosi 8% (crvena krivulja na slici 4.21.). Za slučaj maksimalnom toku energije (zelena krivulja na slici 4.21.) strujno opterećenje referentnog čvora mijenja se ovisno o potražnji, te najveće strujno opterećenje referentnog čvora je od 20 do 22 sata kada je potreba za električnom energijom očekivano najveća. Može se zaključiti kako mHE nije dostatna za potrošače te se za vrijeme najveće potražnje energija povlači iz nadređene (krute) mreže.



Slika 4.21. Utjecaj integracije mHE na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži

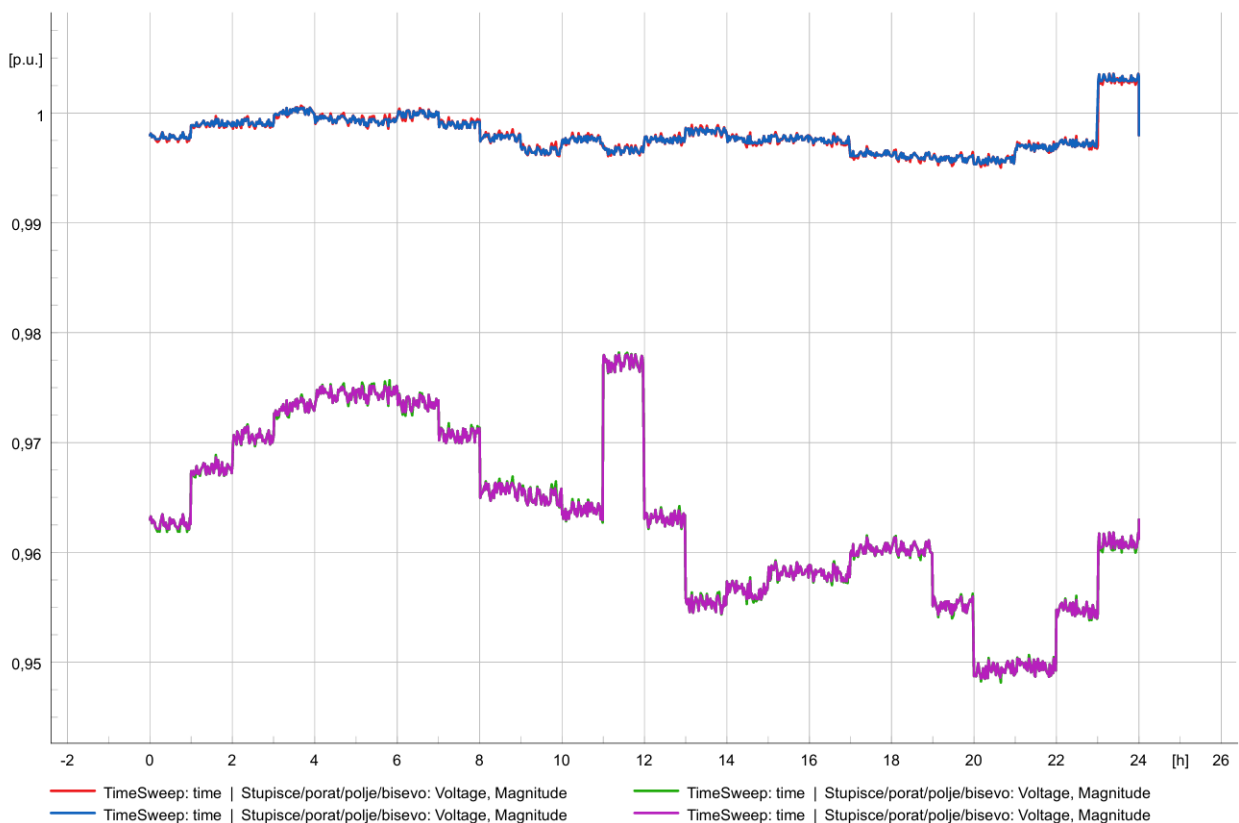
4.5. Simulacija 4.: Integracija elektrane na morske valove u odabrani model mreže otoka Visa

Simulacijom 4. prikazati će se utjecaj integracije elektrane na morske valove na prilike u odabranoj mreži. Kao što se može vidjeti na slici 4.22. simulacija je odrađena s jednogminutnim uzorkom kako bi se što bolje uvidjeo utjecaj elektrane na morske valove. Crvenom krivuljom prikazana je proizvodnja pri minimalnom toku energije te prosječno iznosi 0,7MW, zelenom krivuljom prikazana je proizvodnja elektrane na morske valove pri maksimalnom toku energije gdje je elektrana proizvodila 1,4MW, a maksimalno u određenim trenucima 2MW. Za takvu proizvodnju potrebna su nam područja s dugom obalnom linijom, otvorena prema otvorenom moru, dublja voda koja omogućuje formiranje većih valova što će dovesti do povećanja snage vala, te optimizirani pristup za prihvata energije vala što značajno povećava efikasnost proizvodnje.



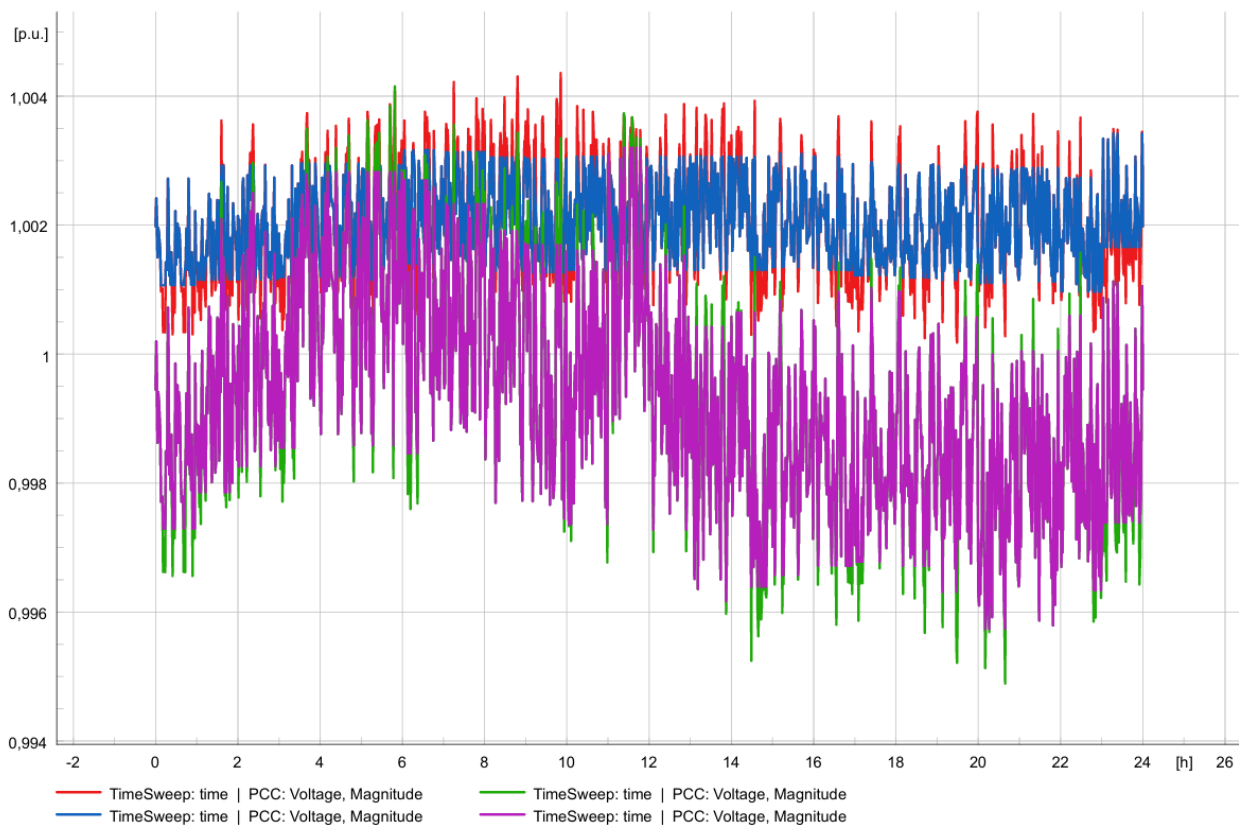
Slika 4.22. Profil proizvodnje elektrane na morske valove za zimski (zelena krivulja) i ljetni (crvena krivulja) dan

Integracijom elektrane na morske valove pri minimalnom toku energije bez (crvena krivulja na slici 4.23.) i sa (plava krivulja na slici 4.23.) BESS napon na najudaljenijoj sabirnici „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“ se minimalno povećao (0,04 p.u.) te tako minimalno doprinosi smanjenju ovisno o nadređenoj mreži. Pri maksimalnom toku energije bez (zelena krivulja na slici 4.23.) i sa (ljubičasta krivulja na slici 4.23.) BESS napon na električki najudaljenijoj sabirnici je ostao gotovo nepromijenjen te se napon kreće ovisno o potražnji električne energije. Rad baterijskih spremnika u ovom slučaju nema utjecaja na kretanje napona.



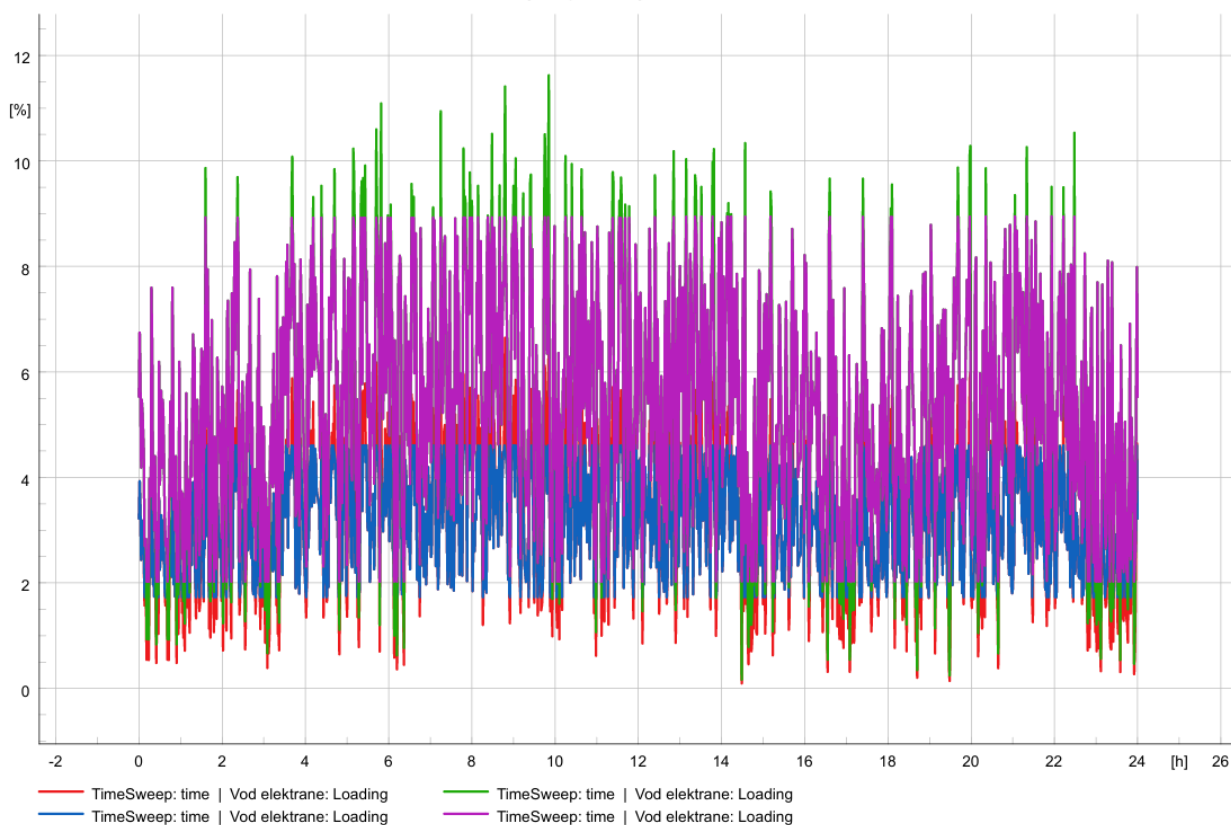
Slika 4.23. Utjecaj integracije elektrane na morske valove na napon na električki najudaljenijoj sabirnici

Napon na priključnoj sabirnici elektrane prema ostatku mreže „PCC“ najvećeg je iznosa pri minimalnom (crvena krivulja na slici 4.24.) i pri maksimalnom (zelena krivulja na slici 4.24.) toku energije bez BESS i iznosi maksimalno 1,004 p.u. Napon pri minimalnom (plava krivulja na slici 4.24.) i pri maksimalnom (ljubičasta krivulja na slici 4.24.) toku energije s BESS nešto je nižeg je iznosa jer se pri maksimalnoj proizvodnji „višak“ energije skladišti u BESS kako bi ga upotrijebili za vrijeme niže ili gotovo nikakve proizvodnje. U sva četiri slučaja napon na sabirnici „PCC“ kreće se upravo proporcionalno s profilom proizvodnje elektrane na morske valove (slika 4.22.).



Slika 5.24. Utjecaj integracije elektrane na morske valove na napon na priključnoj sabirnici elektrane

Najveće strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže „Vod elektrane“ ima pri maksimalnom toku energije bez BESS (zelena krivulja na slici 4.25.) upravo zbog najveće proizvodnje električne energije. Ljubičasta krivulja na slici 4.25. prikazuje nam maksimalni tok energije s BESS te se može zaključiti da je strujno opterećenje voda niže u trenucima najveće proizvodnje jer u tim trenucima električna energija se skladišti u BESS te nema toka energije prema ostatku mreže. Strujno opterećenje pri minimalnom toku energije bez BESS (crvena krivulja na slici 4.25.) prati krivulju proizvodnje, a u simulaciji pri minimalnom toku energije s BESS (plava krivulja na slici 4.25.) strujno opterećenje je niže jer se energija kao i pri maksimalnom toku energije skladišti u BESS. Skladištenjem energije u BESS smanjujemo strujno opterećenje približno 2%.



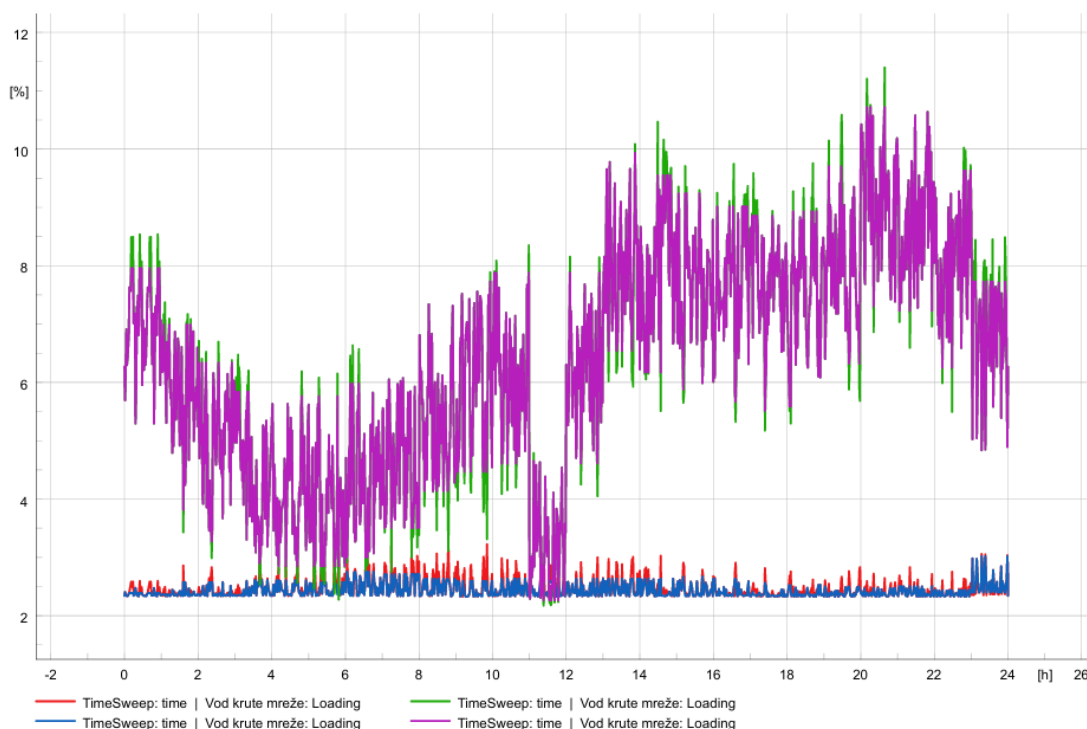
Slika 4.25. Utjecaj integracije elektrane na morske valove na strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže

Pri maksimalnom toku energije promatrano je vodno polje „Komiža“ jer ima upravo najveće strujno opterećenje. Kao što se može vidjeti na slici 4.26. pri maksimalnom toku energije bez (zelena krivulja) i sa (ljubičasta krivulja) BESS potražnja za električnom energijom ostaje gotovo ne promijenjena nakon integracije elektrane na morske valove, a tok energije ostaje isti kao i prije integracije. Pri minimalnom toku energije mijenja se vodno polje koje je najviše strujno opterećeno te je to sada vodno polje „Vinarija“. Naime, kako je elektrana na morske valove spojena upravo preko „Vodnog polja Vinarija“ s ostatkom mreže, tijekom minimalne potrošnje vodnim poljem „Vinarija“ se električna energija transportira prema ostatku mreže zbog čega je to vodno polje najviše opterećeno tijekom minimalne potrošnje.



Slika 4.26. Utjecaj integracije elektrane na morske valove na strujno opterećenje glavnih vodnih polja

Strujno opterećenje referentnog čvora „Vod krute mreže“ pri maksimalnom toku energije bez (zelena krivulja na slici 4.27.) i sa (ljubičasta krivulja na slici 4.27.) BESS kreće se ovisno o potražnji za električnom energijom iz čega možemo zaključiti kako instalirana elektrana na morske valove gotovo da nema utjecaj na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži pri maksimalnom toku energije. Pri minimalnom toku energije bez (crvena krivulja na slici 4.27.) i sa (plava krivulja na slici 4.27.) BESS strujno opterećenje voda „Vod krute mreže“ je gotovo ne promijenjen tijekom cijelog dana iz čega se može zaključiti kako elektrana na morske valove može napojiti mrežu za vrijeme minimalnog toka energije te nije potrebna dodatna snaga iz nadređene (krute) mreže. BESS nisu se koristili pri smanjenju strujnog opterećenja referentnog čvora.

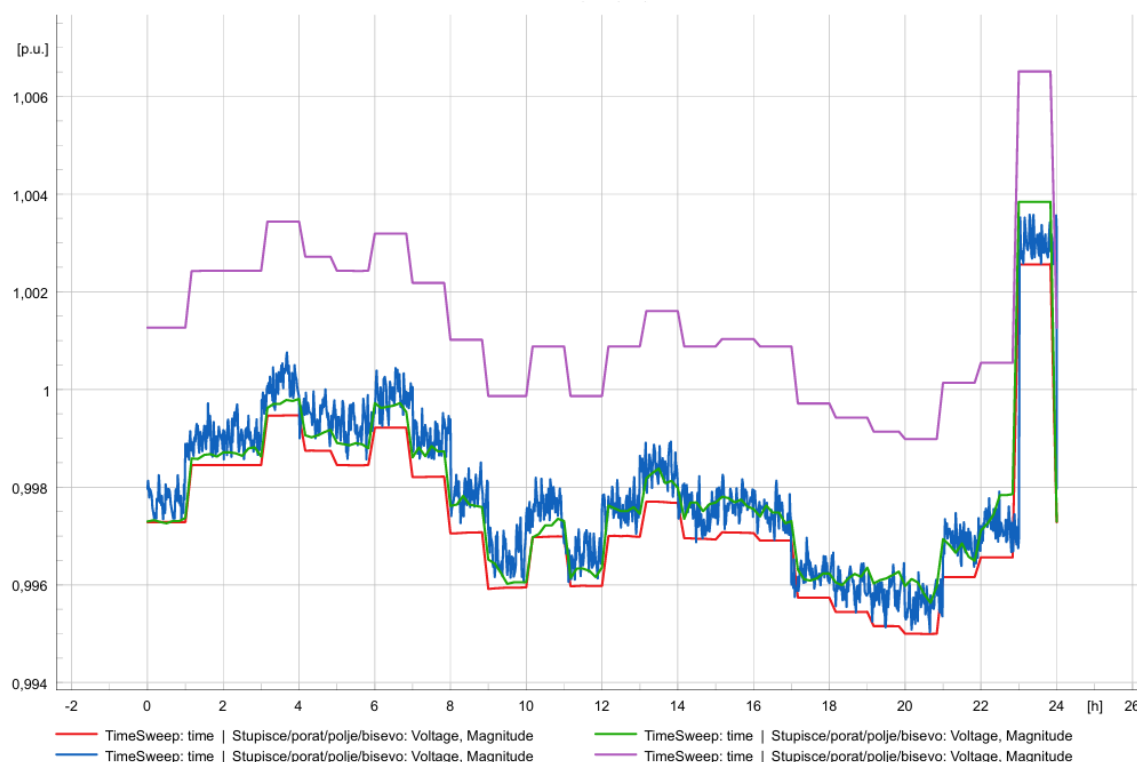


Slika 4.27. Utjecaj integracije elektrane na morske valove na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži

4.6. Usporedba utjecaja distribuirane proizvodnje na prilike u EES-u

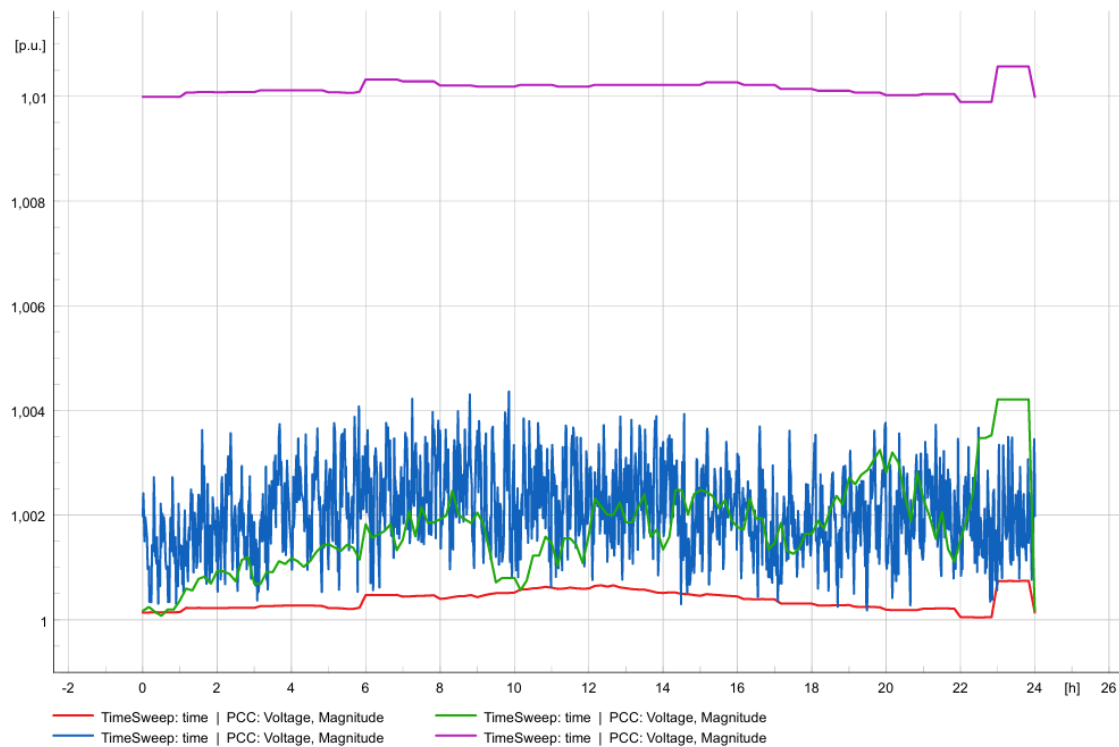
4.6.1. Pri minimalnom toku energije s integriranim elektranama na OIE bez priključenih baterijskih spremnika energije

Najveći porast napon na električki najudaljenijoj sabirnici „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“ pri integraciji elektrana na OIE možemo vidjeti da ima ljubičasta krivulja na slici 4.28. koja obilježava integraciju male hidroelektrane. Minimalni utjecaj na napon ima integracija FN elektrane (crvena krivulja na slici 4.28.). Integracija VE (zelena krivulja na slici 4.28.) i elektrane na morske valove (plava krivulja na slici 4.28.) imaju približno jednak mali utjecaj na razinu napona na električki najudaljenijoj sabirnici „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“, no ipak veći u odnosu na FN elektranu.



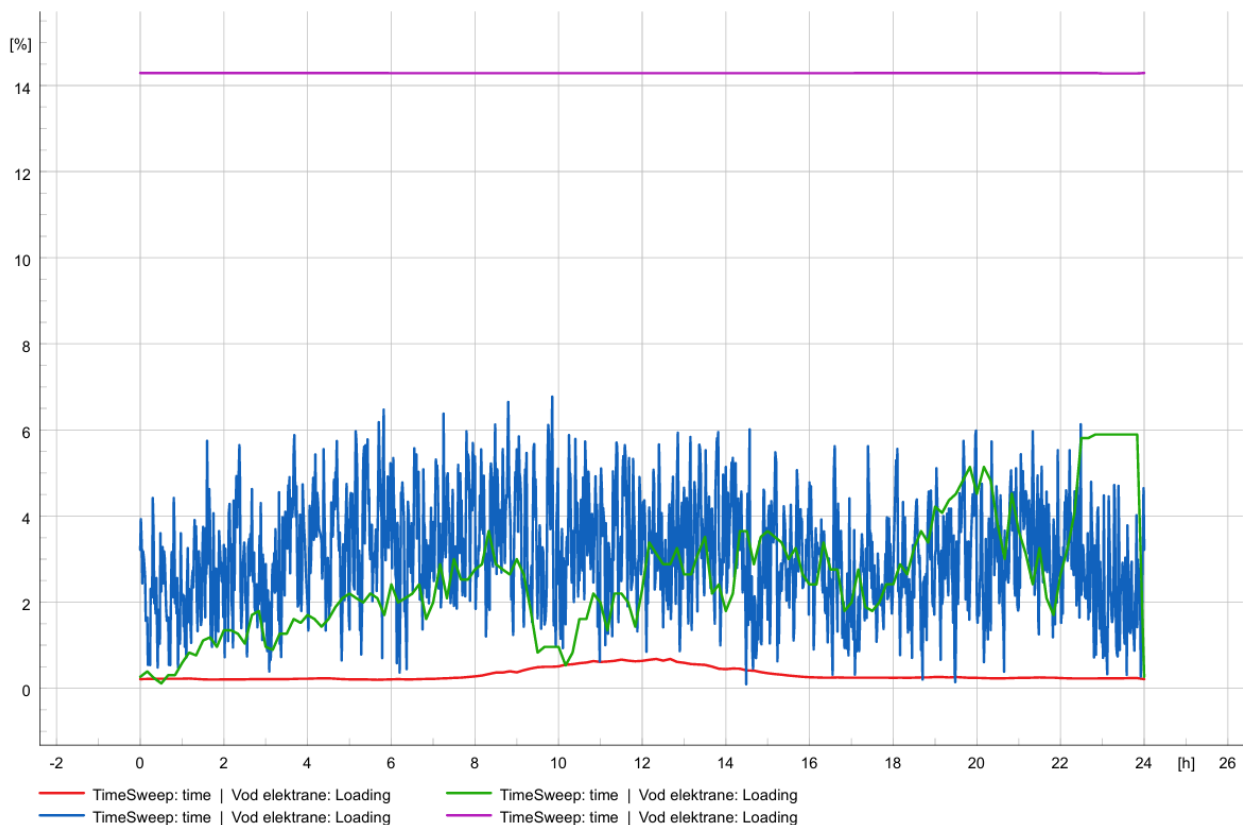
Slika 4.28. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na napon na električki najudaljenijoj sabirnici pri minimalnom toku energije bez BESS

Kako na najudaljeniju sabirnicu najveći utjecaj ima integracije mHE, slijedno i na mjestu priključka elektrane na mrežu na sabirnici „PCC“ najveći porast napona imamo pri integraciji mHE (ljubičasta krivulja na slici 4.29.). Najmanji porast napon uzorkuje integracije FN elektrane (crvena krivulja na slici 4.29.). Integracija VE (zelena krivulja na slici 4.29.) u odabranu mrežu uzrokuje veći porast napona nego li FN elektrana, a integracije elektrane na morske valove (plava krivulja na slici 4.29.) daje nešto veći porast napona u odnosu na VE.



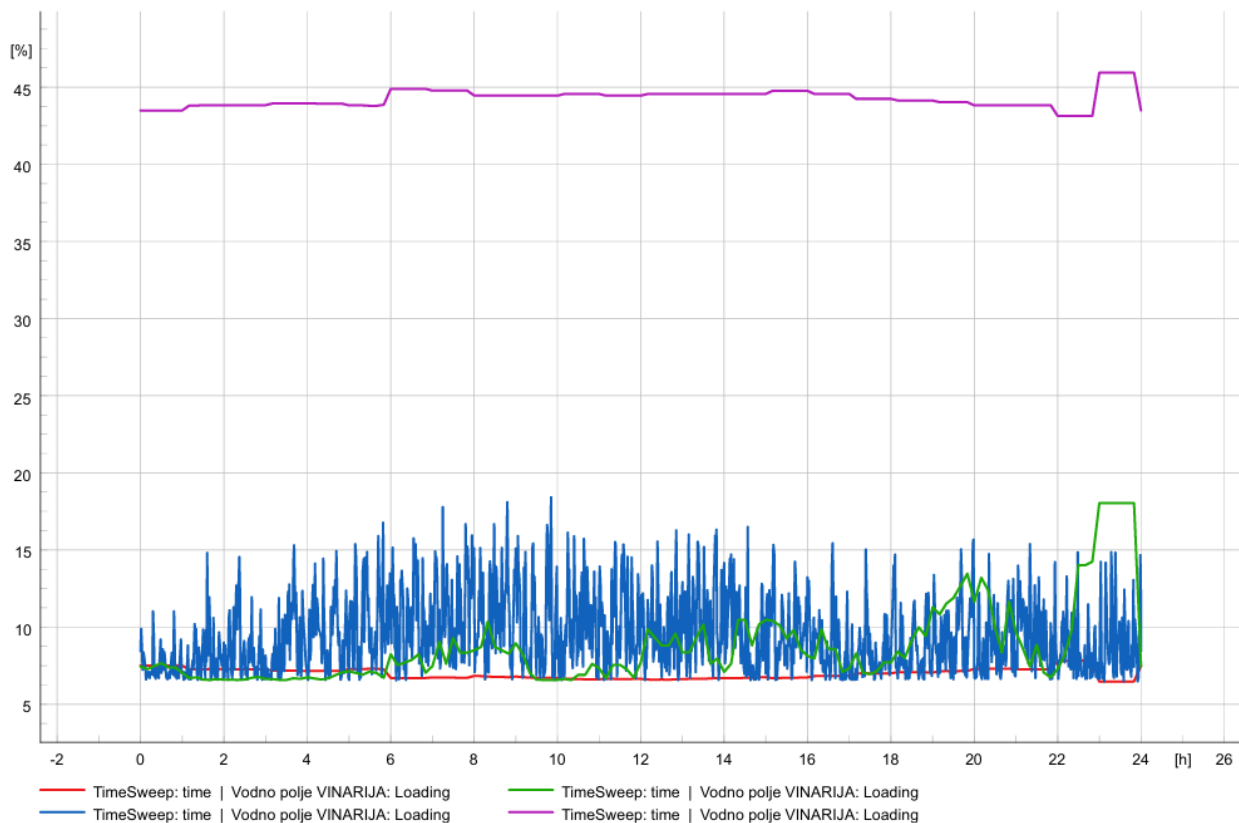
Slika 4.29. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na napona na priključnoj sabirnici elektrane pri minimalnom toku energije bez BESS

Obzirom da mala hidroelektrana uzrokuje najveći porast napona posljedično tomu strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže „Vod elektrane“ ima najveće strujno opterećenje i iznosi nešto iznad 14% (ljubičasta krivulja na slici 4.30.). Kako je proizvodnja FN elektrane (crvena krivulja na slici 4.30.) pri minimalnom toku energije minimalna slijedno tomu imamo minimalno strujno opterećenje voda „Vod elektrane“ i iznosi <1%. Strujno opterećenje voda „Vod elektrane“ pri integraciji VE (zelena krivulja na slici 4.30.) i elektrane na morske valove (plava krivulja na slici 4.30.) slijedi porast napona na sabirnici „PCC“ odnosno proizvodnju spomenutih elektrana. Strujno opterećenje voda „Vod elektrane“ pri integraciji VE prosječno iznosi 3% i maksimalno 6%. Pri integraciji elektrane na morske valove strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže je prosječno 4%



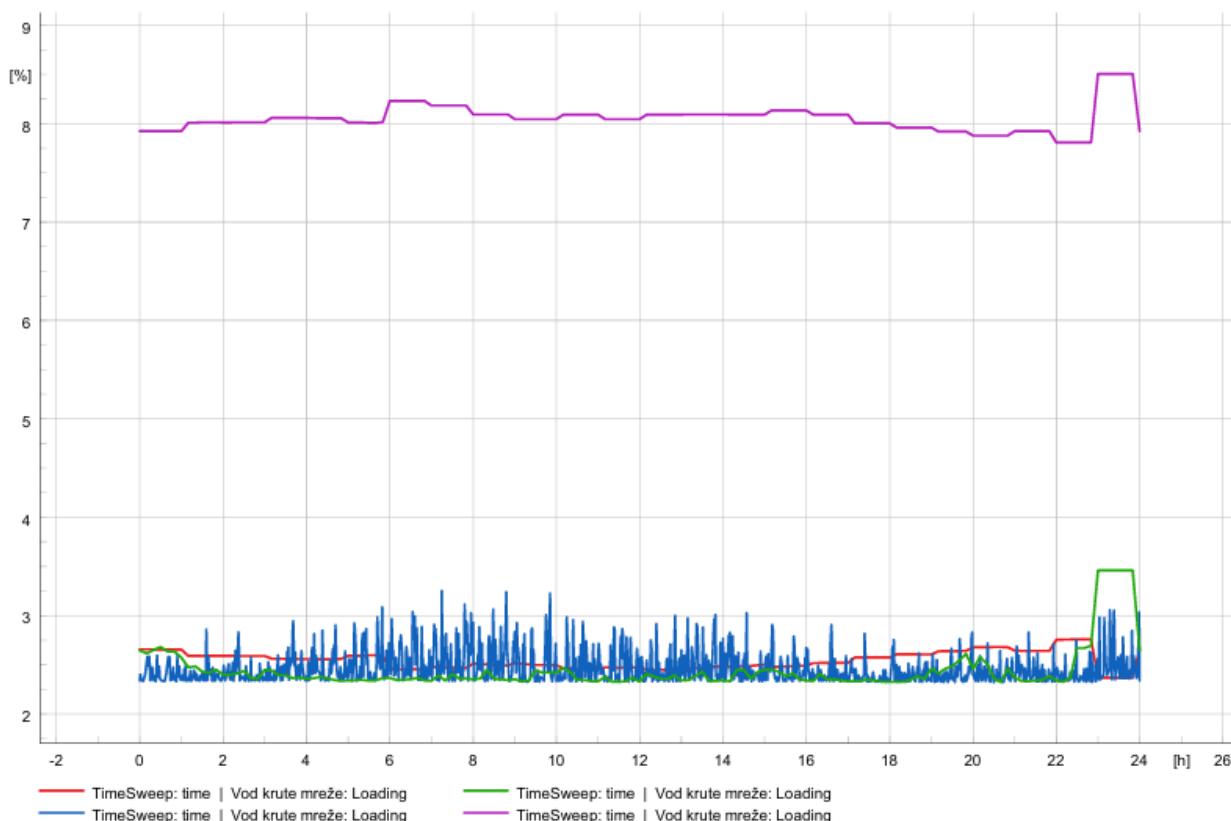
Slika 4.30. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže pri minimalnom toku energije bez BESS

Pri minimalnom toku energije najveće strujno opterećenje ima vodno polje „Vinarija“ pomoću kojeg se energija proizvedena u elektrana na OIE distribuira prema ostatku mreže. Očekivano, najveće strujno opterećenje vodnog polja „Vinarija“ je pri integraciji mHE (ljubičasta krivulja na slici 4.31.) i iznosi gotovo 45%. Najmanje strujno opterećenje je pri najmanjoj proizvodnji što je pri integraciji FN elektrane iznosi prosječno 7%. Nešto veće strujno opterećenje vodnog polja „Vinarija“ daje simulacija s integriranom VE i iznosi prosječno 10% (osim u intervalu 22 do 24 sata kada je ~17%). Strujno opterećenje vodnog polja pri integraciji elektrane na morske valove prosječno iznosi 13%.



Slika 4.31. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na strujno opterećenje vodnog polja pri minimalnom toku energije bez BESS

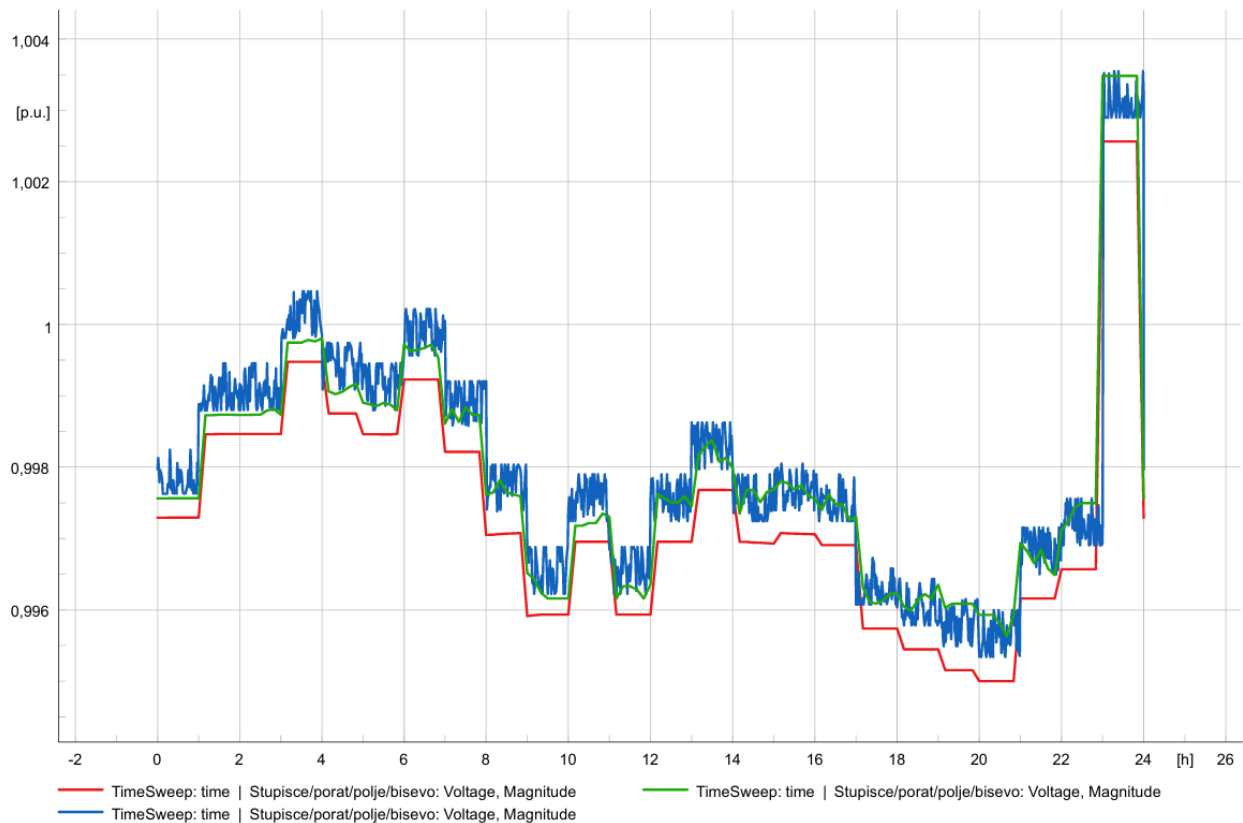
Strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži „Vod krute mreže“ upravo je najveće pri integraciji male hidroelektrane. Strujno opterećenje s integriranom mHE (ljubičasta krivulja na slici 4.32.) veće je za 5% u odnosu na ostale elektrane na OIE. Takvo veće strujno opterećenje rezultat je predaje električne energije prema nadređenoj mreži. Najmanje strujno opterećenje referentnog čvora „Vod krute mreže“ je pri integraciji VE (zeleni krivulja na slici 4.32.) čime se može zaključiti kako VE pri minimalnom toku energije „pokriva“ gotovu svu potražnju za električnom energijom toga dijela mreže. Minimalno veće strujno opterećenje referentnog voda je pri integraciji FN elektrane (crvena krivulja na slici 4.32.) i elektrane na morske (plava krivulja na slici 4.32.) valove što se može vidjeti na slici 4.32.



Slika 4.32. Usporedba utjecaja integracije elektran na OIE na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži pri minimalnom toku energije bez BESS

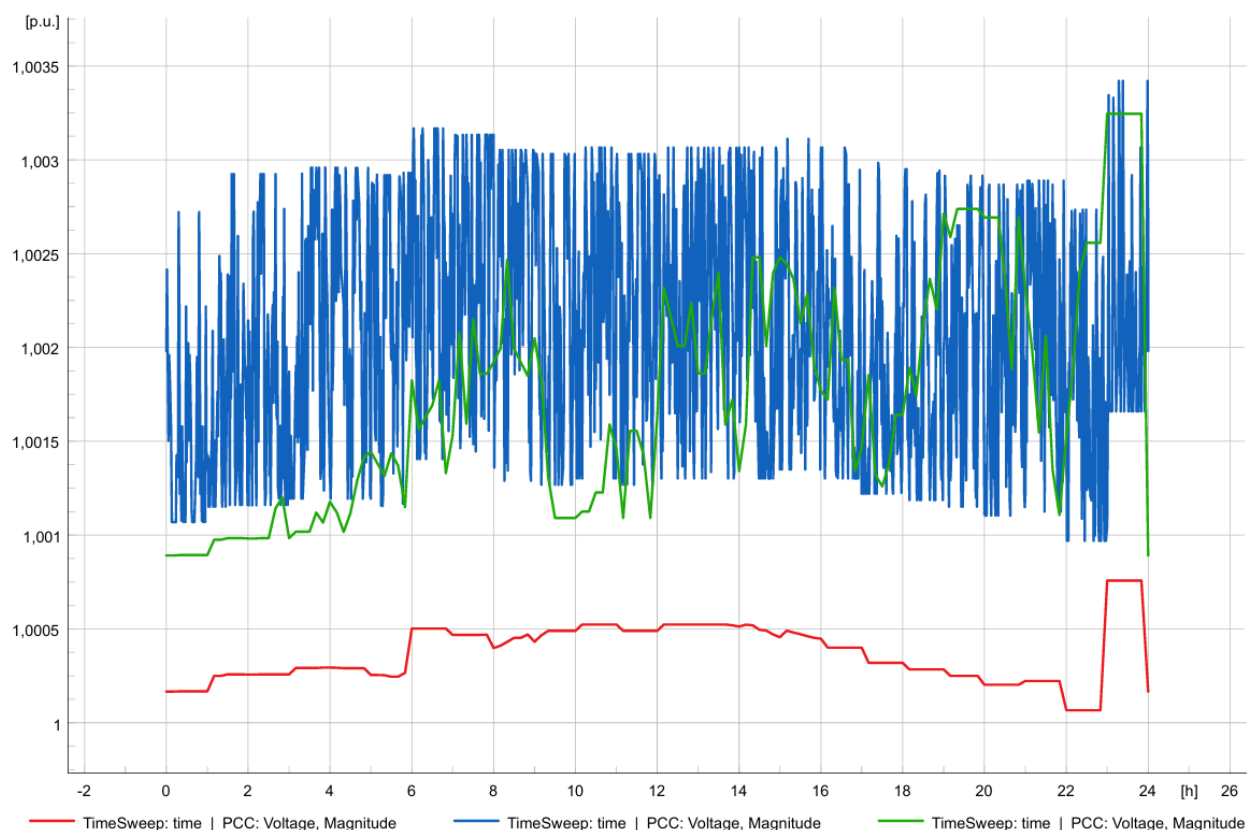
4.6.2. Pri minimalnom toku energije s integriranim elektranama na OIE sa priključenim baterijskim spremnicima energije

U slučaju minimalnog toka energije s integriranom elektranom na OIE i BESS, najveći porast napona na električki najudaljenijoj sabirnici događa se pri integraciji elektrane na morske valove (plava krivulja na slici 4.33.), nešto niži porast napona pri integraciji VE (zelena krivulja na slici 4.33.) te najmanji porast napona je pri integraciji FN elektrane (crvena krivulja na slici 4.33.). Porast napona s BESS gotovo je jednak simulacijama bez BESS gledajući električki najudaljeniju sabirnicu „Stupišće/Porat/Polje/Biševo“.



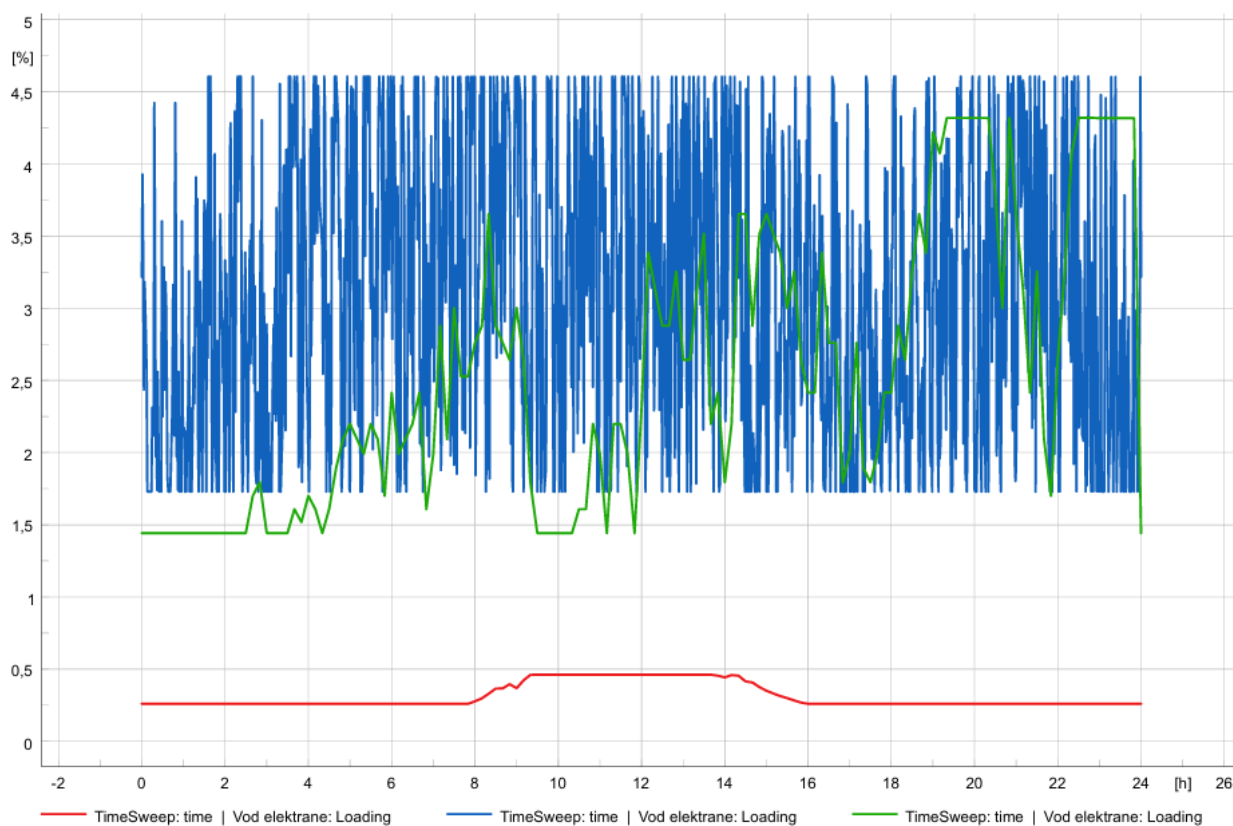
Slika 4.33. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na napon na električki najudaljenijoj sabirnici pri minimalnom toku energije sa BESS

Najveći porast napona na priključnoj sabirnici elektrane prema ostatku mreže „PCC“ događa se pri integraciji elektrane na morske valove (plava krivulja na slici 4.34.). Na plavoj krivulji također možemo vidjeti rad BESS. Napon se u određenim trenucima „sječe“ jer se za to vrijeme energija skladišti u BESS, odnosno predaje kada proizvodnja padne ispod postavljene granice. Porast napona pri integraciji VE niži je u odnosu na porast pri integraciji elektrane na morske valove te je rad BESS vidljiv na početku i na kraju dana. Najmanji porast napona na priključnoj sabirnici elektrane „PCC“ događa se pri integraciji FN elektrane, rad BESS gotovo nevidljiv zbog vrlo niske proizvodnje.



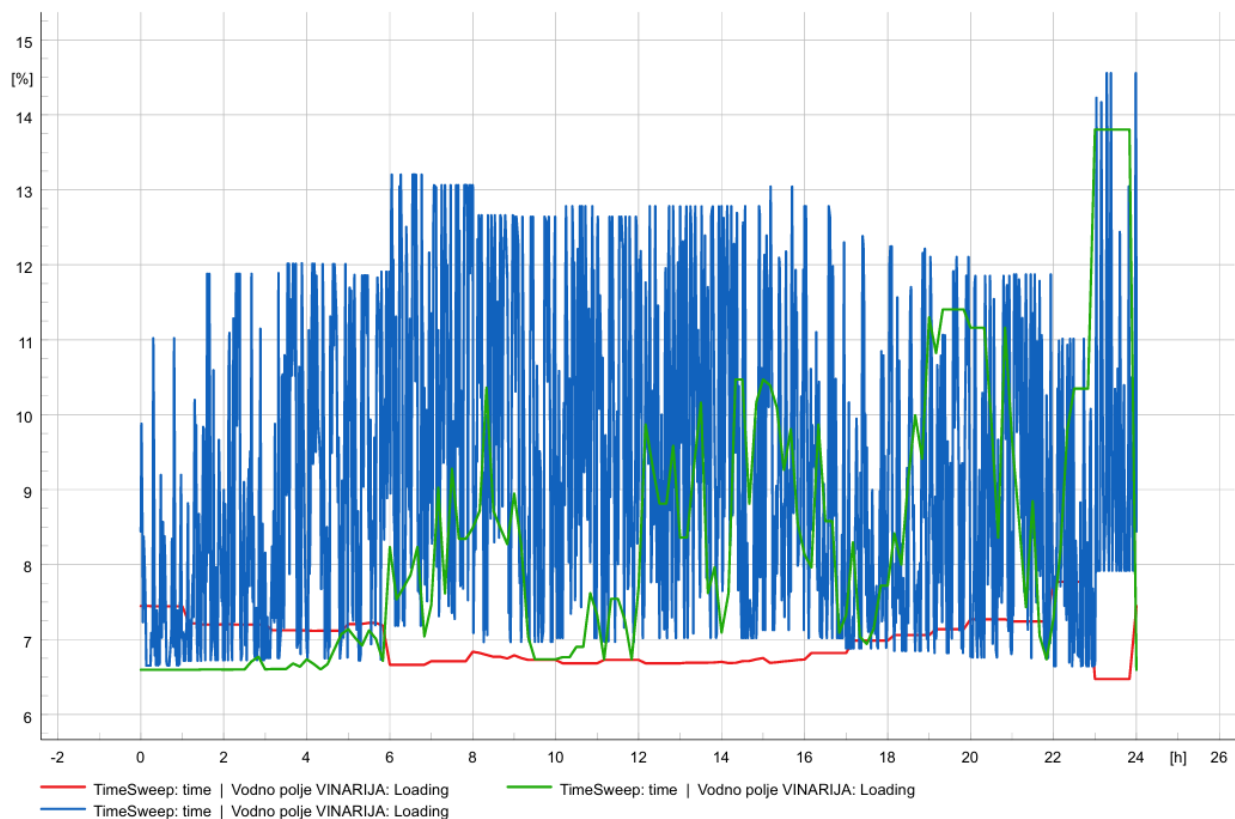
Slika 4.34. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na napona na priključnoj sabirnici elektrane pri minimalnom toku energije sa BESS

Strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže „Vod elektrane“ najmanje je pri integraciji FN elektrane (crvena krivulja na slici 4.35.). Takav minimalni tok energije rezultat je minimalne proizvodnje. Strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže pri integraciji VE (zeleni krivulja na slici 4.35.) slijedno prati proizvodnju iz VE i veće je za minimalno 1%, a maksimalno za 4% u odnosu na strujno opterećenje voda elektrane pri integriranoj FN elektrani. Najveće strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže je pri integraciji elektrane na morske valove. Za vrijeme vršnih proizvodnji električna energija skladišti se u BESS što se može vidjeti „režanjem vrhova“ na slici 4.35.



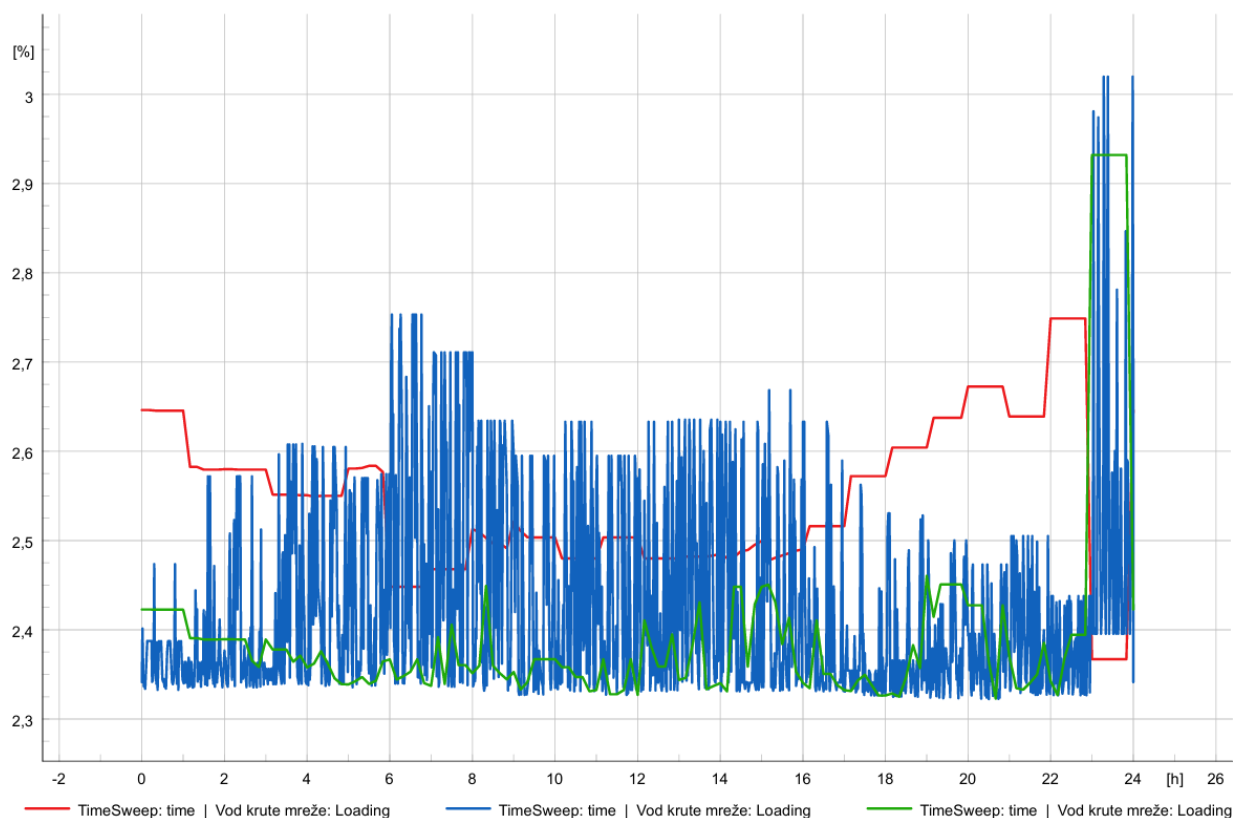
Slika 4.35. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže pri minimalnom toku energije sa BESS

Pri minimalnom toku energije korišteno je vodno polje „Vinarija“ jer ima najveće strujno opterećenje u odnosu na ostala vodna polja. Najveće strujno opterećenje bilo je upravo za vrijeme predaje električne energije proizvedene u nadređenu mrežu iz elektrane na morske valove i iznosi prosječno 11%. Tijekom dana najmanje strujno opterećenje vodnog polja „Vinarija“ je pri integraciji FN elektrane i iznosi prosječno 7% što se može vidjeti na slici 4.36..



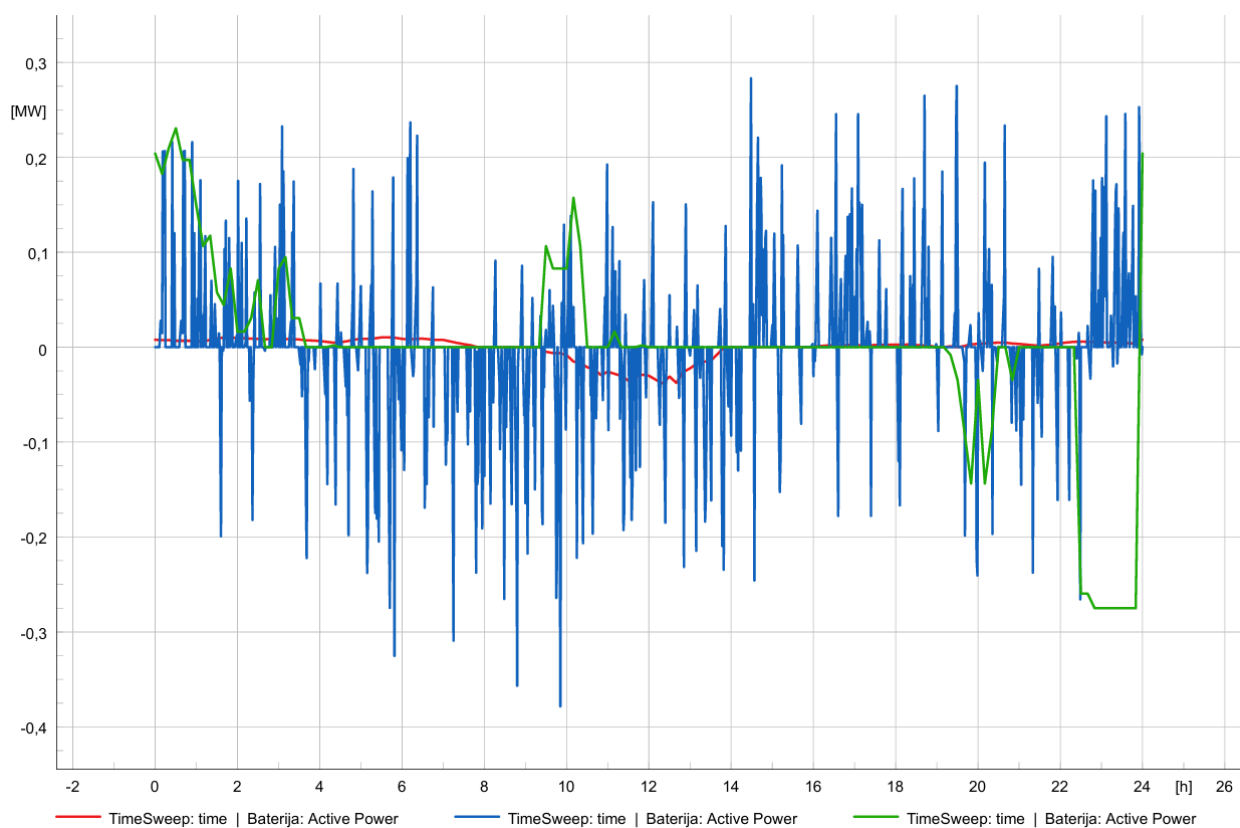
Slika 4.36. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na strujno opterećenje vodnog polja pri minimalnom toku energije sa BESS

Sa slike 4.37. se može zaključiti kako najveće strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži „Vod krute mreže“ je pri integraciji FN elektrane u vremenskom intervalu od 0 do 3 sata te od 17 do 23 sata. U spomenutim intervalima električna energija se prima iz nadređene mreže kako bi zadovoljili potražnju (električna energija koja je uskladištena u BESS nije dovoljna). U vremenskim intervalima od 3 do 17 sati i od 23 do 24 sata strujno opterećenje je najveće pri integraciji elektrane na morske valove, odnosno u tim vremenskim intervalima električna energija se predaje nadređenoj mreži. Strujno opterećenje „Vod krute mreže“ pri integriranoj VE je približno konstantno tijekom cijelog dana i iznosi 2,4%, iznimno od 23 do 24 sata kada poraste na 2,9% zbog smanjenja potražnje električne energije.



Slika 4.37. Usporedba utjecaja integracije elektrana na OIE na strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži pri minimalnom toku energije sa BESS

Rad BESS prikazan je na slici 4.38. Može se zaključiti kako su BESS najviše radili u slučaju integrirane elektrane na morske valove, dok su najmanje radili u slučaju integrirane FN elektrane. Ukupna količina energije koja je skladištena, a zatim i potrošena je ~20MWh pri radu elektrane na morske valove, dok je pri radu FN elektrane ukupna količina energije iznosila ~0,5MWh.



Slika 4.38. Usporedba utjecaja rada baterijskih spremnika energije pri minimalnom toku energije s BESS

5. ZAKLJUČAK

Tradicionalni model proizvodnje, gdje se električna energija proizvodi na nekoliko velikih centraliziranih postrojenja zamjenjuju se brojnim manjim postrojenjima, često temeljena na OIE i tako sudjeluju u opskrbi električnom energijom. Distribuirana proizvodnja, koja uključuje proizvodnju energije na različitim mjestima unutar elektroenergetskog sustava predstavlja značajan pomak u pogledu proizvodnje i distribucije energije. Takav prelazak prema distribuiranoj proizvodnji donosi značajne prednosti, ali i izazove. Korištenje distribuirane proizvodnje na OIE ima jako veliki potencijal smanjiti emisiju stakleničkih plinova, povećati energetske neovisnost te omogućiti bolje iskorištavanje lokalnih energetske resursa. No, integracija velikog broja distribuiranih izvora može izazvati probleme kao što su: nestabilnost napona, smanjenje kvalitete napona, poteškoće u upravljanju mrežom i druge slične.

Osnovni cilj rada odnosi se na simulacije provedene na modelu mreže otoka Visa projektiranom u programskom paketu DIGSILENT. Odrađene simulacije pružile su uvid u utjecaj elektrana na OIE (fotonaponska elektrana, vjetroelektrana, mala hidroelektrana, elektrana na morske valove) na elektroenergetski sustav, s posebnim naglaskom na naponske i strujne prilike te usporedbu istih. Simulacije su odrađene prema stvarnim (realnim) minimalnim i maksimalnim tokovima energija. Najveći utjecaj na strujne i naponske prilike promatrani model mreže doživljava integracijom elektrane na OIE pri minimalnom toku energije. Pri takvom minimalnom toku energije naponske prilike pratile su se na električki najudaljenijoj sabirnici te na sabirnici priključka elektrane na OIE na mrežu, dok su se strujne prilike pratile na vodu elektrane na OIE prema ostatku mreže, jednom od glavnih vodnih polja te na referentom čvoru prema nadređenoj (krutoj) mreži. Sve vrste integriranih elektrana na OIE bile su jednakih instaliranih snaga (2MW).

Rezultati su pokazali da najveći utjecaj na električki najudaljeniju sabirnicu ima integracije male hidroelektrane (mHE) odnosno, najveći porast napona na električki najudaljenijoj događa se pri integraciji mHE. Takav porast napona rezultat je konstantne proizvodnje instaliranom snagom (2MW) i to pri minimalnom toku energije. Najmanji utjecaj na električki najudaljeniju sabirnicu ima integracija fotonaponske (FN) elektrane upravo zbog jako niske proizvodnje za vrijeme minimalnog toka energije. Niska proizvodnja FN elektrane rezultat je minimalnog sunčevog zračenja, tmuran i oblačan dan. Kako mHE najviše utječe na električki najudaljeniju sabirnicu tako je i na sabirnici priključka elektrana na OIE na mrežu najveći porast napona integriranjem mHE zbog najveće proizvodnje, a najmanji integriranjem FN elektrane (minimalne proizvodnje).

Strujno opterećenje voda elektrane prema ostatku mreže, kao i strujno opterećenje vodnog polja najveće je pri integraciji mHE, a najmanje pri integraciji FN elektrane. Strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži također je najveće pri integraciji mHE što je rezultat predaje električne energije prema nadređenoj mreži. Najmanje strujno opterećenje referentnog čvora prema nadređenoj mreži događa se pri integraciji VE. S takvim minimalnim tokom energije može se zaključiti kako VE „pokriva“ gotovo svu potražnju za električnom energijom toga dijela mreže.

Jedan od važnijih zaključaka ovog rada je važnost implementacije baterijskih spremnika energije (BESS) kao stabilizacijskih mehanizama. BESS sustavi mogu ublažiti fluktuacije u opskrbi energijom koje su uzrokovane promjenjivom prirodom OIE. Oni omogućuju pohranjivanje viška energije tijekom razdoblja niske potrošnje i njeno kasnije korištenje, čime se osigurava stabilnija i pouzdanija opskrba električnom energijom. Naime, simulacije su odrađene sa integriranom elektranom na OIE i sa BESS pri minimalnom toku energije. U simulacijama s BESS nije integrirana mala hidroelektrana zato što ona nema „viška“ energije koji će se skladištiti već radi s konstantnom instaliranom snagom. Najveći utjecaj BESS vidljiv je integriranjem BESS zajedno s elektranom na morske valove i to na svim promatranim sabirnicama i vodovima te je uskladištena, a zatim upotrijebljena energija ukupno iznosila ~20MWh. Minimalni utjecaj događa se pri integraciji FN elektrane zajedno s BESS te je ukupna uskladištena-potrošena energija iznosila ~0,5MWh. BESS sustavi pokazali su se kao jedan od ključnih elemenata za stabilizaciju napona u mreži kao i za smanjenje ovisnosti o nadređenoj mreži. Nakon svih odrađenih simulacija sa BESS i bez njih; tijekom jednog dana napona na svim sabirnicama nalazio se unutar dozvoljenih granica $\pm 10\%$ prema normi EN50160.

Osim tehničkih segmenata, rad naglašava i potrebu za razvojem naprednih sustava upravljanja energijom. Takvi sustavi omogućili bi optimizaciju rada distribuiranih izvora uz integraciju različitih tehnologija na način da se maksimiziraju prednosti, a minimiziraju negativni učinci distribuirane proizvodnje na mrežu. Što uključuje bolje predviđanje proizvodnje iz OIE, prilagodbu potrošnje u realnom vremenu te korištenje pametnih (naprednih) algoritama za upravljanje mrežom.

LITERATURA

- [1] M. Bollen i F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power*, Wiley – IEEE, 2011.
- [2] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen i G. Strbac, *Embedded Generation*, London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [3] R. Goić, D. Jakus i I. Penović, *Distribucija električne energije*, Split: FESB, 2008.
- [4] A. Horvat, *Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na naponske prilike u mreži*, Diplomski rad, Osijek: FERIT, 2016.
- [5] D. Karavidović, *Aktivna distribucijska mreža kao izazov ustaljenim funkcijama vođenja, zaštite i automatizacije*, 2016.
- [6] M. Kurtušić, *Utjecaj distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora na regulaciju napona u mreži*, Diplomski rad, Osijek: FERIT, 2016.
- [7] Hrvatski zavod za norme, *Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža (EN 50160:2022)*, 2022.
- [8] HEP - Opetator distribucijskog sustava d.o.o., *Izmjene i dopune mrežnih pravila distribucijskog sustava*, Narodne novine, 2020.
- [9] R. G. Verdier, »European Commision,« [Mrežno]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/268206>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2024].
- [10] Ž. Tomšić i M. Pongrašić, *Ekonomska analiza dobiti i troškova implementacije naprednih mreža*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za visoki napon i energetiku, 2014.
- [11] J. Wang, Y. Zong, S. You i C. Træholt, *A review of Danish integrated multi-energy system flexibility options for high wind power penetration*, Copenhagen, Denmark: Oxford University, 2017.
- [12] C. I. Iweh, S. Gyamfi, E. Tanyi i E. Effah-Donjina, *Distributed Generation and Renewable Energy Integration into the Grid: Prerequisites, Push Factors, Practical Options, Issues and Merits*, Basel, Switzerland: MDPI, 2021.
- [13] »Hrvatski operator prijenosnog sustava (HOPS),« [Mrežno]. Available: <https://www.hops.hr/dijagram-opterecenja-dnevni>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2024].
- [14] »HEP ODS d.o.o. Elektrodalmacija Split,« 2023.
- [15] L. Prpić, *Integracija postrojenja na morske valove na jadranskim otocima u okviru WECANet projekta*, Diplomski rad, Osijek: FERIT, 2021.

SAŽETAK

Primarni zadatak ovo diplomskog rada je prikazani utjecaj različitih distribuiranih izvora na prilike u elektroenergetskom sustavu te njihova međusobna usporedba.

U drugom poglavlju ovog magisterijskim radu ukratko je opisana distribuirana proizvodnja, glavni razlozi uvođenja nove vrste proizvodnje, njezini pozitivni i negativni utjecaji te navedene metode koje mogu povećati stabilnost elektroenergetskog sustava. Definirano je mjesto priključenja ovisno o vrsti elektrane (instaliranoj snazi), tehnologije priključka i utjecaj na mrežu na mjestu priključka te je objašnjen pojam razina integracije.

Treće poglavlje daje teorijsku osnovu o utjecaju integracije distribuiranih izvora na prilike u EES-u i prikazuje prijelaz s pasivne na aktivnu distribucijsku mrežu te dodatni budući prijelaz na naprednu (pametnu) mrežu. Prvo pod poglavlja detaljnije opisuju utjecaj integracije distribuiranih izvora na naponske prilike. Osnovni koncept kontrole napona, dopušteno odstupanje napona u distribucijskoj i prijenosnoj mreži, matematički izraz za približni porast napona i metode povećanja razine integracije pojmovi su koji su objašnjeni u ovom dijelu rada. Drugo pod poglavlje detaljnije opisuje utjecaj integracije distribuiranih izvora na strujne prilike u distribucijskoj mreži. Definirani su glavni pojmovi pri projektiranju elektroenergetske mreže, prikazane metode za smanjenje strujnih opterećenja i povećanje razine integracije.

U posljednjem poglavlju modelirana je i opisana mreža otoka Visa koja će se koristiti pri simulacijama. Simulacije su odrađene pri minimalnom i maksimalnom toku energije te sa baterijskim spremnicima energije i bez njih. U simulacijama se mijenjao distribuirani izvor (fotonaponska elektrana, vjetroelektrana, mala hidroelektrana, elektrana na morske valove). Pri simulacijama pratile su se naponske i strujne prilike. Zadnje pod poglavlje prikazuje usporedbu utjecaja različitih distribuiranih izvora na prilike u promatranoj mreži pri minimalnom toku energije s baterijskim spremnicima i bez njih.

Ključne riječi: distribuirana proizvodnja, naponske prilike, strujne prilike, usporedba, DigSILENT Power Factory.

ABSTRACT

The primary objective of this thesis is to analyze the impact of various distributed energy sources on the electrical power system conditions and provide a comparative evaluation of their effects.

The second chapter of this master's thesis offers a concise overview of distributed generation, outlining the key motivations for the adoption of new generation technologies, their respective advantages and disadvantages, as well as the methodologies that can enhance the stability of the electrical power system. The chapter also defines the connection points based on the type of power plant (installed capacity), connection technologies, and the resultant impact on the grid at the point of connection, while introducing the concept of integration levels.

The third chapter establishes the theoretical framework regarding the effects of distributed energy source integration on the power system and elaborates on the transition from passive to active distribution networks, with a prospective shift towards advanced (smart) grids. The first subsection provides a detailed analysis of the impact of distributed generation integration on voltage conditions, explaining key concepts such as voltage regulation, permissible voltage deviations in distribution and transmission networks, the mathematical formulation for voltage rise, and methods for enhancing the level of integration. The second subsection focuses on the effects of distributed energy source integration on current conditions in the distribution network, defining essential design principles for power system planning and presenting strategies for mitigating current loads and improving integration levels.

In the final chapter, the power network of the island of Vis is modeled and described for use in simulations. The simulations were conducted under scenarios of both minimum and maximum power flow, with and without battery energy storage systems. Throughout the simulations, the distributed energy source was varied (photovoltaic plant, wind farm, small hydroelectric plant, wave power plant). Voltage and current conditions were monitored during these simulations. The final subsection presents a comparative analysis of the influence of different distributed energy sources on network conditions under minimum power flow, both with and without battery energy storage systems.

Key words: distributed generation, voltage conditions, current conditions, comparison, DIgSILENT Power Factory.

ŽIVOTOPIS

Antonio Živković rođen je 24.01.2001. godine u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu završava u Oprisavcima u osnovnoj školi „Stjepan Radić“. Školovanje nastavlja u Tehničkoj školi Slavonski Brod, gdje stječe zvanje elektrotehničar. Zatim se 2019. godine upisuje na Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike i informacijskih tehnologija u Osijeku. Godine 2022. završava sveučilišni prijediplomski studij i upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike; smjer elektroenergetika; modul održiva elektroenergetika.

Antonio Živković

(Potpis autora)