

# Analiza rada mikromreže FERIT 1 i utjecaja na mrežu na mjestu priključka u okviru RESCUE projekta

---

**Zečević, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:495938>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**Analiza rada mikromreže FERIT 1 i utjecaj na mrežu na  
mjestu priključka u okviru RESCUE projekta**

**Diplomski rad**

**Ivan Zečević**

**Osijek, 2021.**

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
2. MIKROMREŽE .....	4
2.1. Mikromreža FERIT 1 .....	4
3. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA .....	8
3.1. Prednosti i nedostaci distribuirane proizvodnje.....	9
3.2. Utjecaji distribuirane proizvodnje na mrežu .....	9
3.2.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje na naponske prilike u mreži.....	9
3.2.2. Utjecaj distribuirane proizvodnje na strujne prilike u mreži.....	10
3.2.3. Utjecaj distribuirane proizvodnje na kvalitetu električne energije.....	11
3.2.4. Utjecaj distribuirane proizvodnje na stabilnost .....	12
3.2.5. Utjecaj distribuirane proizvodnje na gubitke .....	14
3.3. Vrste distribuiranih izvora .....	16
3.3.1. Vjetroelektrane .....	17
3.3.2. Fotonaponske elektrane .....	22
3.4. Pohrana električne energije .....	27
4. MODELIRANJE U DIGSILENT-U .....	29
4.1. Modeliranje potrošača .....	31
4.2. Modeliranje proizvodnje.....	35
4.2.1. Proizvodnja iz fotonaponske elektrane .....	35
4.2.2. Proizvodnja iz vjetroagregata.....	38
4.3. Modeliranje pohrane električne energije .....	40
5. SIMULACIJSKI DIO .....	42
5.1. Usporedba utjecaja referentnog stanja mikromreže i mikromreže s integriranim elektranama na okolnu mrežu .....	42
5.1.1. Ljetni radni dan .....	43

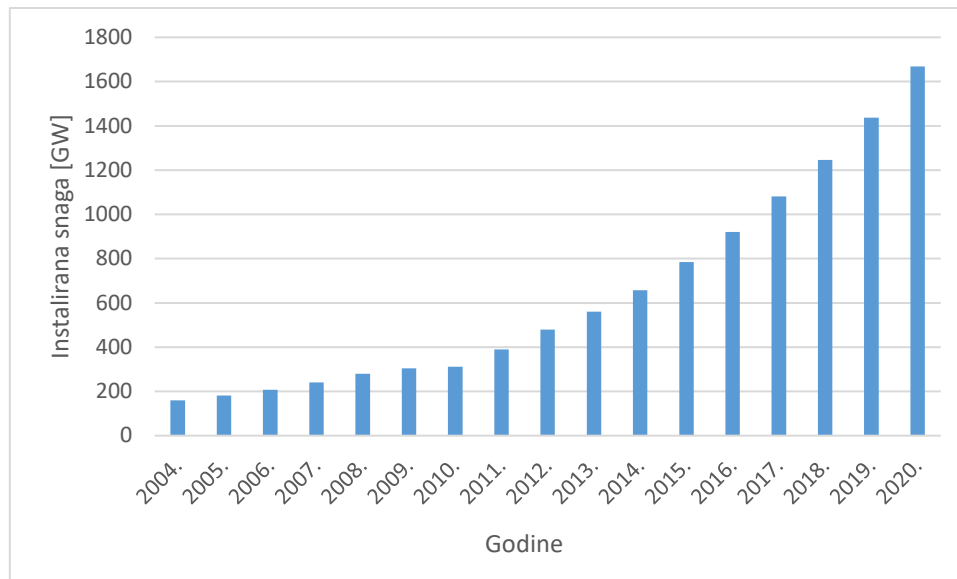
5.1.2.	Ljetni vikend dan.....	45
5.1.3.	Proljećni radni dan .....	48
5.1.4.	Proljećni vikend dan .....	50
5.1.5.	Zimski radni dan.....	53
5.1.6.	Zimski vikend dan.....	55
5.2.	Usporedba utjecaja na mrežu sa i bez sustava za pohranu energije .....	58
5.2.1.	Ljetni radni dan .....	59
5.2.2.	Ljetni vikend dan.....	63
5.3.	Povećavanje integracije distribuiranih izvora.....	66
5.3.1.	Povećavanje integracije generatora na najudaljenijoj sabirnici .....	67
5.3.2.	Povećanje integracije fotonaponske elektrane .....	70
6.	ZAKLJUČAK .....	73
	LITERATURA.....	76
	SAŽETAK.....	77
	ABSTRACT .....	78
	ŽIVOTOPIS .....	79

## 1. UVOD

Električna energija još od početka prošloga stoljeća predstavlja neophodnu vrstu energije za svijet oko nas. Ona omogućuje beskonačan broj primjena kako u industriji tako i u kućanstvima. Međutim kako bismo dobili takav oblik energije potrebno je neki drugi oblik energije transformirati u električni. U samim počecima proizvodnje električne energije se koristio generator pogonjen parnom turbinom, kasnije plinskom. Takav, konvencionalan, način proizvodnje električne energije koristi unutarnje izgaranje nekih od prirodnih goriva, kao što su nafta, ugljen, zemni plin i sl.

Zbog svoje funkcionalnosti i svojih mogućnosti, potreba za električnom energijom je naglo porasla. To je dovelo do naglog povećavanja proizvodnog kapaciteta, što je za sobom dovelo i neke negativne posljedice najviše na prirodu. Konvencionalni izvori energije svojim izgaranjem ispuštaju velike količine ugljičnog dioksida i štetnih plinova što za posljedicu ima stvaranje ozonskih rupa, kiselih kiša i stakleničkih plinova. Porastom stakleničkih plinova se povećava i efekt staklenika što za sobom nosi i zagrijavanje Zemlje. Upravo ti razlozi, kao i neobnovljivost ovih izvora je dovelo do razvijanja i korištenja obnovljivih izvora energije, najviše energije Sunca i vjetra.

Upotreba nekonvencionalnih izvora električne energije je naglo skočila unazad nekoliko godina. Dovoljno govori činjenica da je u 2010. godini proizvodni kapacitet iz obnovljivih izvora energije, bio nešto veći od 300 GW, dok je u 2020. skočila iznad 1600 GW, što je porast od više od 500%. Godišnji porast instalirane snage iz obnovljivih izvora električne energije je prikazan na slici 1.1. Treba napomenuti i kako je prošle godine udio nove instalirane snage iz nekonvencionalnih izvora bio 83% u odnosu na ukupnu instaliranu snagu u svijetu. [1]



*Slika 1.1. Godišnja promjena instalirane snage iz obnovljivih izvora električne energije [1]*

Razlog sve većeg udjela obnovljivih izvora električne energije nije samo zbog manjeg utjecaja na prirodu, nego i dostupnost sve boljih tehnologija obnovljivih izvora i mogućnost distribuirane proizvodnje. Ovakva vrsta proizvodnje omogućuje priključenje na distribucijsku mrežu kako bi ona bila bliža i dostupnija potrošaču. Za takvu proizvodnju se najčešće koriste fotonaponska proizvodnja električne energije. 2010. godine instalirana snaga FN sustava je iznosila 40 GW, a 2020. 760 GW. Razlog sve većeg porasta korištenja FN sustava je njezin ogromni potencijal i sve veća dostupnost, niža cijena, te veća učinkovitost. [1]

Tako je i Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek nastojao pratiti trend pa je u okviru IPA projekta REGPHOSYS 2014. godine na zgradu postavljena elektrana ETFOS 1 snage 10 kW, koja pokriva dio potrošnje FERIT-a, ali služi i kao dio istraživačkog laboratorija za OIE. [2]

2021. godine u okviru RESCUE projekta na zgradu fakulteta je postavljena 80 kW fotonaponska elektrana, uz sustav pohrane ukupnog kapaciteta 38.4 kWh. Tako će instalirana mikromreža FERIT 1 zajedno s prethodnom postavljenom elektranom ETFOS 1 služiti za pokrivanje temeljnih i vršnih opterećenja. Također u sklopu ovog projekta će mikromreži fakulteta biti dodan i vjetroagregat snage 6 kW. [2]

## **1.1. Zadatak diplomskog rada**

Kako bi odredili analizu rada i utjecaj mikromreže FERIT 1 na mjestu priključka u ovom radu će se prvo izraditi simulacijski model u programskom paketu DigSilent. Na temelju tog modela

će se izvršiti simulacije različitih stanja, odnosno različitih proizvodnja i potrošnja. U simulaciji će biti dodana opterećenja i proizvodnje za ljetne, zimske i proljetne radne dane i vikende. Za svaki će se napraviti TimeSweep analiza pomoću koje će se odrediti promjena snage i napona kroz 10-minutne intervale. Na taj način će se usporediti naponi na glavnim sabirnicama i opterećenja za slučaj s integriranom i bez integrirane elektrane. Odredit će se utjecaj na priključno mjesto mikromreže, kao i utjecaj na vanjsku mrežu. Osim toga bit će potrebno odrediti i analizirati utjecaj baterija koje će služiti kao spremnik električne energije. Za kraj će se odraditi pokus u kojem će se odrediti koliko se još elektrana može dodati a da ne dođe do prenapona ili preopterećenja.



*Slika 1.2. Fotonaponska elektrana u mikromreži FERIT 1*



*Slika 1.3. Izmjenjivači u mikromreži FERIT 1*

## **2. MIKROMREŽE**

Mikromreže predstavljaju grupaciju opterećenja i izvora električne energije. One mogu djelovati samostalno u obliku otočnoga pogona pri kojem se sva potrošnja opskrbljiva iz izvora električne energije. Također mogu biti sinkronizirane s električnom mrežom tzv. makromrežom. Većina mikromreža imaju mogućnost odvajanja od električne mreže na koju su spojeni ovisno o tome kako uvjeti u mreži diktiraju. Sve mikromreže moraju biti sposobne raditi jednako dobro dok su spojene na mrežu kao i u slučaju kvarova i ostalih poremećaja. Mikromreže su najčešće mreže niskoga ili srednjeg napona iako se mogu spajati na visokonaponsku mrežu zbog potreba interkonekcije. Kao izvor energije mogu služiti konvencionalni i nekonvencionalni izvori električne energije. Međutim zbog svoje lake integracije i velike dostupnosti češće se koriste nekonvencionalni, posebice fotonaponski sustavi. Također u nekim mikromrežama se mogu naći i vjetroagregati. Kao konvencionalni se najčešće koriste dizel agregati.

Potrošači u mikromrežama su svi elementi u mreži koje koriste električnu energiju u bilo koju svrhu kao što su grijanje, hlađenje, rasvjeta i dr. Potrošači u mikromrežama ovise i o samoj vrsti mikromreže. U novije vrijeme sve češći potrošači u modernim mikromrežama jesu punionice električnih automobila.

Osim proizvodnje i potrošnje u mikromrežama se koriste još i sustav za pohranu električne energije najčešće u obliku baterija, ali se mogu pronaći i u drugom oblicima kao što su toplinski spremnici, zamašnjaci i ostali. Kod mikromreža s otočnim pogonom sustav za pohranu energije omogućuje dugotrajniji rad, dok kod mikromreža koje su spojene na mrežu omogućuje veću samostalnost i neovisnost o mreži. Također to smanjuje i potrebu za električnom energijom iz vanjske mreže.

### **2.1. Mikromreža FERIT 1**

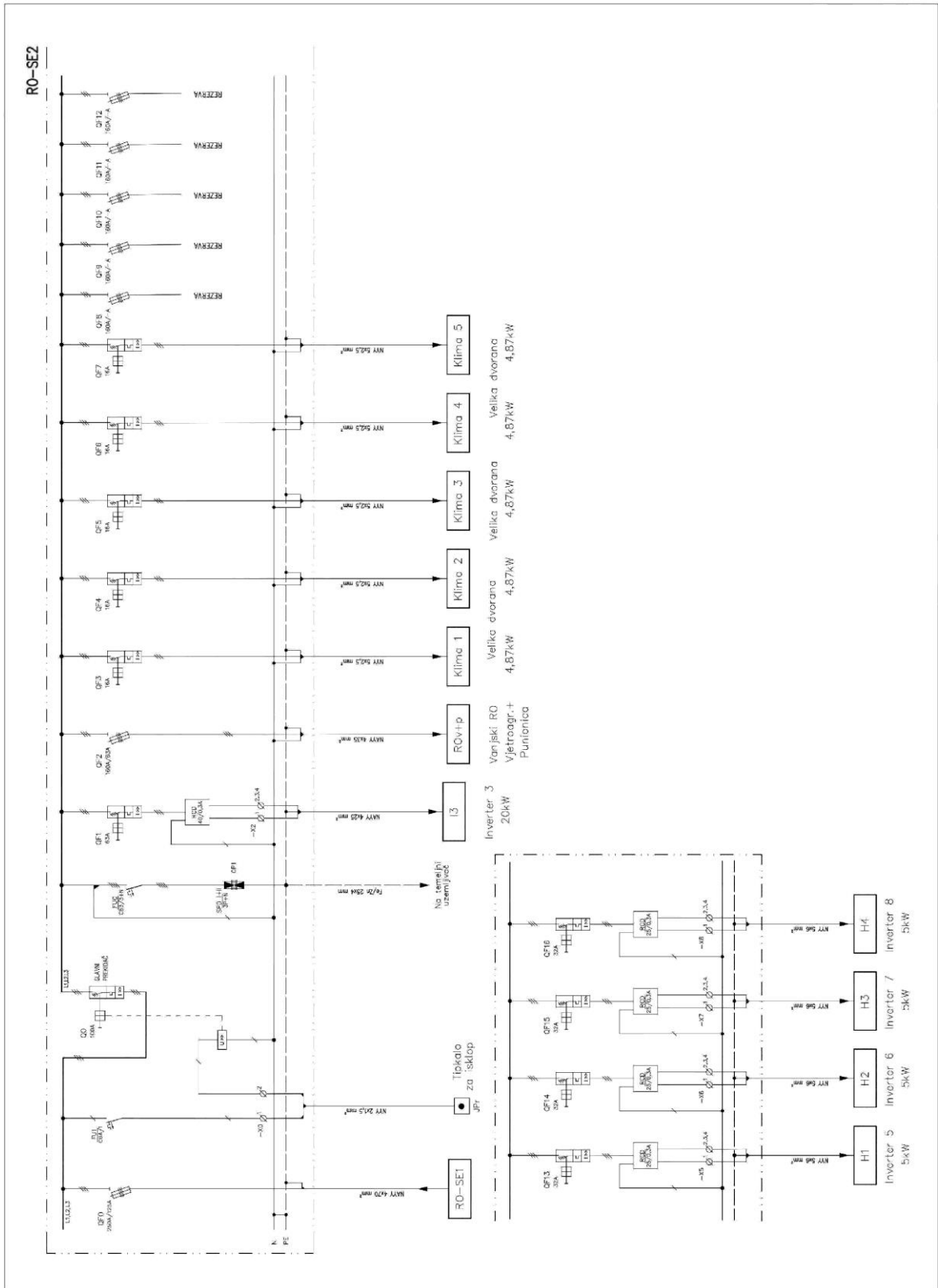
Kao što je u uvodu rečeno, mikromreža FERIT 1 je mikromreža koja se koristi na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Fakultet je uz pomoć dva projekta 2014. i 2021. godine integrirao dvije fotonaponske elektrane. Prva je snage 10 kW koja se sastoji od 2 fotonaponska niza sa po 20 fotonaponskih modula, spojenih na jedan izmjenjivač. Drugim projektom je dodano još 80 kW s ukupno 270 modula, podijeljenih na 8 izmjenjivača. Dva izmjenjivača su snage 20 kW AC, dva su 10 kW AC, a preostala četiri su hibridni ispravljača snage 5 kW AC. Hibridni ispravljači imaju mogućnost pohrane električne energije



u baterije kapaciteta 9.6 kWh. Ukupna predviđena proizvodnja iznosi 120 365 kWh/god. Osim fotonaponskih elektrana, FERIT 1 mikromreža se također sastoji i od vjetroagregata ukupne snage 6 kW. Kao što je već rečeno, svaka mikromreža osim proizvodnje ima i potrošnju. Glavni potrošači u ovoj mikromreži jest punionica električnih bicikala nazivne snage 1 kW, pet klima uređaja snage 4.87 kW svaki, te ostala potrošnja zgrade fakulteta. Ukupna zakupljena snaga za FERIT 1 mikromrežu iznosi 120 kW. [2]

Ova mikromreža je na elektroenergetski sustav spojena preko SPMO-a (samostojećeg priključnog mjernog ormara) koji se nalazi u dvorištu fakulteta. Uz već prethodno postavljeni razvodni ormar RO-SE1, postavljeni su još ormari RO-SE2 te vanjski razvodni ormar na kojem će biti spojena punionica i vjetroagregat. Prikaz spajanja razvodnih ormara se mogu vidjeti na jednopolnim shemama prikazanih na slikama 2.1. i 2.2.





Slika 2.2. Jednopolna shema mikromreže FERIT 1 II. dio

### 3. DISTRIBUIRANA PROIZVODNJA

Distribuirana proizvodnja predstavlja proizvodnju električne energije blizu potrošača ili na mjestu same potrošnje. Naziv distribuirana proizvodnja su dobile upravo po tome kako su one priključene na distribucijsku mrežu niskog ili srednjeg napona. Kao distribuirani izvori najčešće se koriste obnovljivi izvori električne energije, ponajviše zbog njihove jednostavne izgradnje i integracije na mrežu, ali i zbog svoje obnovljivosti, boljim utjecajem na okoliš i dr. Ovakva vrsta proizvodnje je naglo porasla unazad dvadeset godina sve bržim razvojem tehnologija i otvaranjem tržišta električne energije.

Prije dodavanja distribuiranih izvora elektroenergetska mreža je bila hijerarhijski nastrojena, odnosno tokovi snaga su se kretali od centraliziranih elektrana prema krajnjim potrošačima. U tom slučaju mreža je bila pasivna. Međutim dodavanjem distribuiranih izvora javlja se proizvodnja u najnižim dijelovima mreže pa ona postaje aktivna, jer ona počinje sudjelovati u proizvodnji. Zbog toga će ona utjecati na tokove snaga u lokalnoj mreži. Ti tokovi snaga ovise o trenutnoj potrošnji i proizvodnji iz tih izvora. Također ovise i o mjestu priključka tih izvora, odnosno njihovoj udaljenosti od potrošača. Ovisno o tome tokovi snaga mogu biti:[3]

- Smanjeni – potrošnja energije bliskih potrošača smanjuje opterećenje
- Suprotnog smjera – ukoliko je proizvodnja veća od potrošnje
- Povećani – ukoliko proizvodnja dalje raste ili se potrošnja smanjuje

Ovisno o vrsti izvora, ali i vremenskim uvjetima, tijekom dana na promatranom dijelu mreže tokovi snaga mogu više puta promijeniti svoj smjer. Zbog toga je potrebno stalno praćenje, analiza i kontrola tokova snage kako ne bi došlo do neželjenog preopterećenja u mreži. Zbog toga proizlazi uvjet da maksimalna proizvodnja iz distribuiranih izvora mora biti manja ili jednaka od zbroja minimalne potrošnje u tom dijelu mreže, te mora biti manja od maksimalne dozvoljene snage vodova.

Prije uvođenja distribuiranih izvora za dizajniranje komponenti elektroenergetske mreže, kao i njezinu analizu i kontrolu u obzir se uzimala samo maksimalna potrošnja mreže, dok se minimalna zanemarivala. Međutim uvođenjem izvora u distribucijsku mrežu minimalna potrošnja dobiva na značaju te postaje jednako bitna kao i maksimalna potrošnja.

### **3.1. Prednosti i nedostaci distribuirane proizvodnje**

Distribuirana proizvodnja nudi neke prednosti u odnosu na centraliziranu proizvodnju. Jedna od najvećih prednosti jest smanjenje gubitaka, a razlog tome što je proizvodnja postavljena električki bliže potrošaču. Također doprinosi povećanju sigurnosti opskrbe električne energije, jer sigurnost opskrbe iz više izvora je veća nego samo iz jednog centraliziranog izvora. Osim toga ovakva vrsta izvora nudi i niže investicijske troškove i manje emisije štetnih plinova.

Međutim, distribuirani izvori osim navedenih prednosti donose i neke nedostatke. Budući da se vozni red elektrana u elektroenergetskom sustavu određuje na temelju dnevnog dijagrama opterećenja, dodavanje distribuiranih izvora taj posao otežava. Razlog tome je taj što zbog nepredvidljivosti proizvodnje često nije moguće točno odrediti ukupnu količinu proizvodnje, te ona često nije u skladu s potrebama. Zbog toga se često javlja slučaj kod kojeg je proizvodnja veća od potrošnje. Tada se javlja obrnuti tok snage, odnosno uzvodni tok. Međutim sustav ponekad nije u stanju prihvatiti svu energiju pa zbog toga može doći zagušenja i preopterećenja u mreži. To dovodi do nastanka viših napona. Također jedan od problema s kojim se susreće integracija distribuiranih izvora jest i problem smještaja istih. Mora se voditi računa o utjecaju na okoliš i na ljude. Isto tako je potrebno gledati i na troškove transporta goriva. Tako se elektrane na biogoriva postavljaju u blizini samog izvora, npr. u blizini farmi. Osim toga potrebno je paziti i na energetske potencijale na mjestima na kojim će se postavljati elektrane, posebice vjetroelektrane i fotonaponske elektrane.

### **3.2. Utjecaji distribuirane proizvodnje na mrežu**

#### **3.2.1. Utjecaj distribuirane proizvodnje na naponske prilike u mreži**

Spajanje distribuiranih izvora u mrežu obično ima efekt povećanja napona na mjestu priključka, što zna dovesti do pojave prenapona kod obližnjih potrošača. Često taj porast napona može diktirati razinu integracije distribuirane proizvodnje.

Razina integracije neke elektrane predstavlja količinu proizvodnje koja se može priključiti, a da pri tome ne dođe do naponskih nestabilnosti. Kako bi se odredila razina integracije moraju se poznavati naponske prilike u mreži, te naponske razine i njihova dopuštena odstupanja. Te vrijednosti su prikazane u tablici 3.1. [3]

Tablica 3.1. Naponske razine i dopušteno odstupanje [3]

Nazivni napon [kV]	Dopušteno postotno odstupanje [%]	Dopušteni naponski raspon [kV]
0.4	$\pm 10$	0.36 – 0.44
10	$\pm 10$	9 – 11
20	$\pm 10$	18 – 22
35	$\pm 10$	31.5 – 38.5
110	$\pm 10$	99 – 121
220	$\pm 10$	198 – 242
400	- 10, + 5	360 – 420

Kako je proizvodnja iz obnovljivih izvora jako nepredvidljiva često može doći do pojave prevelikih odstupanja napona od nazivne vrijednosti. Zbog toga se često provode metode regulacije napona: [3]

1. Regulacija napona promjenom prienosnog omjera transformatora
2. Regulacija napona nadogradnjom vodova
3. Regulacija napona regulacijom djelatne i jalove snage
4. Koordinacija više metoda

### 3.2.2. Utjecaj distribuirane proizvodnje na strujne prilike u mreži

Dodavanje distribuirane proizvodnje u mrežu može dovesti do strujnog preopterećenja u mreži. Takvo preopterećenje se dešava u trenucima kada je proizvodnja velika, a potrošnja mala. To se često dešava u ljetnim neradnim danima kada je proizvodnja iz FN elektrana velika. Zbog toga se javljaju veliki tokovi snaga koji dovode do preopterećenja pa tako i do termičkih naprezanja u vodovima. Zbog toga je potrebno provesti detaljnu analizu stanja mreže kako bi se odredila termička struja, odnosno najveća struja koja neće oštetiti element u mreži kroz koji teče.

Osim preopterećenja vodova, može doći i do preopterećenja transformatora. Odabir transformatora u elektroenergetskom sustavu se vrši pomoću maksimalnog opterećenja sustava. Razlog tome je taj što učinkovitost transformatora dosta ovisi o trenutnom opterećenju, odnosno, najučinkovitiji je pri maksimalnim opterećenjima, te se dimenzionira tako da on tokom većeg dijela dana bude znatno opterećen. Još jedan od razloga je taj što su gubici praznog hoda veliki.

Kao i kod napona, tako i kod struje postoje metode za regulaciju opterećenja. Neke od najbitnijih su: [3]

1. Povećanje sposobnosti opterećenja
2. Dinamička uzdužna i poprečna kompenzacija
3. Sustavi za upravljanje energijom
4. Upravljanje potražnjom
5. Prespajanje mreže

### **3.2.3. Utjecaj distribuirane proizvodnje na kvalitetu električne energije**

Posljednjih nekoliko godina kvaliteta električne energije je postala jako bitna. Pojavom energetske elektronike i nelinearnih potrošača stvorile su se sve veće i nepredvidljivije smetnje u mreži. Upravo iz tog razloga bilo je neophodno uvesti normu kojom će se utvrditi i opisivati obilježja napona u mreži glede: [4]

- Frekvencije
- Veličine
- Oblika krivulje
- Simetrije

Prihvaćena europska norma za kvalitetu električne energije je EN 50160. Njome su opisane nazivne vrijednosti pokazatelja kvalitete, te tolerirajuća odstupanja. Te vrijednosti su prikazane u tablici 3.2. Kako bi se utvrdio utjecaj integracije na kvalitetu električne energije potrebno je izvršiti mjerenja u trajanju od 7 dana prije same integracije i 7 dana nakon integracije. Nakon toga se analiziraju dobivene vrijednosti, te se izrađuje elaborat kvalitete električne energije.

Tablica 3.2. Pokazatelji kvalitete električne energije [4]

Parametar	Osnovna veličina	Promatrano razdoblje	Vremensko razdoblje	Granične vrijednosti
Frekvencija	Pojedinačna vrijednost	1 godina	99.5%	$\pm 1\%$
			100%	+ 4%/- 6%
Kolebanje napona	Efektivna vrijednost	1 tjedan	95%	$\pm 10\%$
			100%	+ 10%/- 15%
Treperenje (Flickeri)	Izračunata vrijednost	1 tjedan	95%	$P_{ST} < 1.2$
				$P_{LT} < 1$
THD	Efektivna vrijednost	1 tjedan	95%	$< 8\%$
Nesimetričnost	Efektivna vrijednost	1 tjedan	95%	$< 2\%$

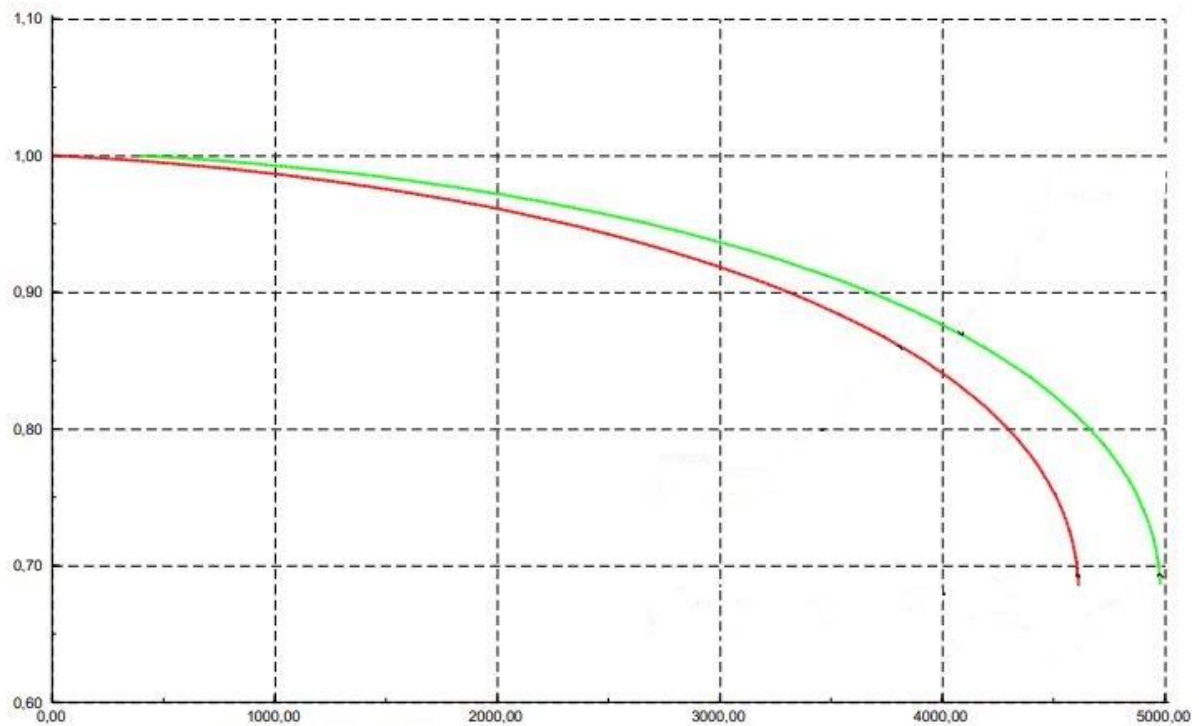
### 3.2.4. Utjecaj distribuirane proizvodnje na stabilnost

Frekvencijska stabilnost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sustava da održi svoju stabilnost u zadanim granicama bez obzira na poremećaje. Promjena frekvencije se javlja u trenucima kada je proizvodnja veća od potrošnje i obratno, što nije pogodno, jer je glavni zadatak elektroenergetskog sustava da proizvedena količina električne energije uvećana za gubitke bude jednaka potrebnoj količini električne energije u svakom trenutku. Integriranjem elektrana na obnovljive izvore, čija proizvodnja ne može biti točno određena, jer se mijenja iz trenutka u trenutak, znatno otežava planiranje proizvodnje pa se tako često javljaju frekvencijska kolebanja. [5]

Naponska stabilnost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sustava da održi svoju stabilnost u zadanim granicama bez obzira na poremećaje. Ona ovisi o mogućnosti da održi ili ponovno uspostavi ravnotežu između proizvodnje i potrošnje.

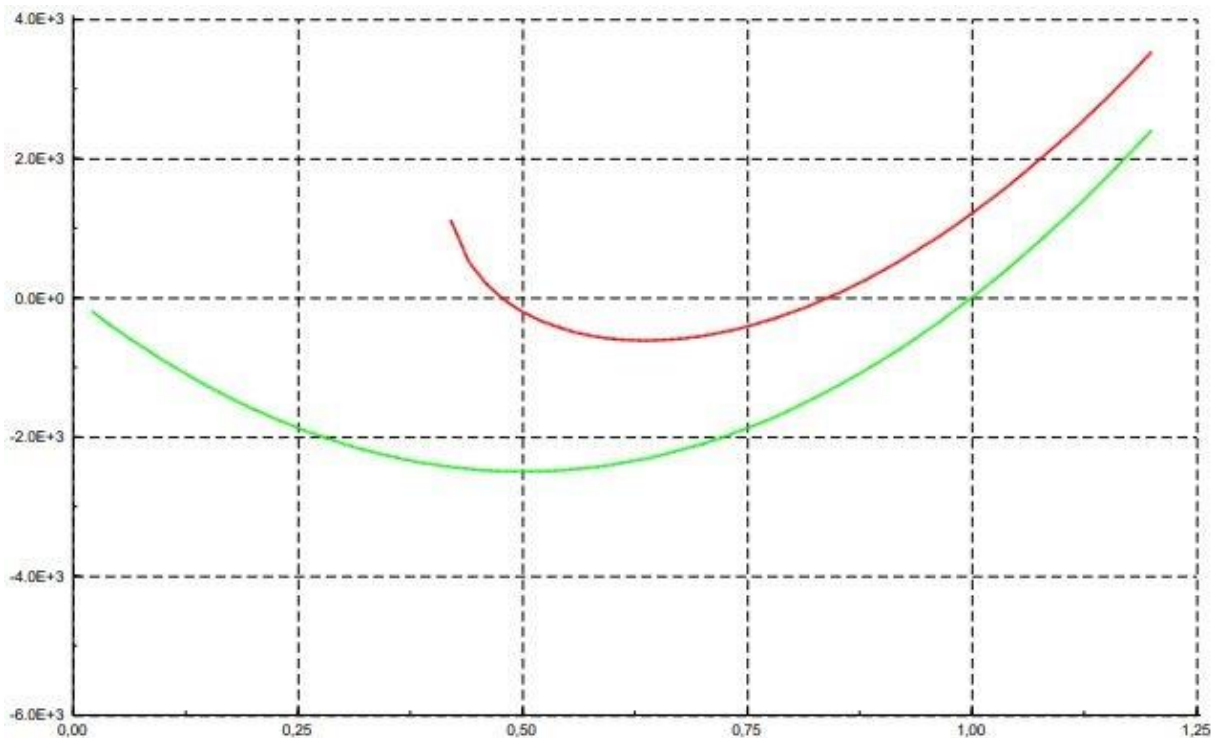


Jedan od najznačajnijih metoda za provjeru naponske stabilnosti jest PV krivulja, koja pokazuje ovisnost prenesene djelatne snage o naponu. PV analizom se može uvidjeti kako napon opada povećanjem prenesene snage, dok ne dođe do točke prijeloma kada više nije moguć prijenos snage. Stoga se ova analiza koristi za određivanje margine naponskoga kolapsa. Osim toga valja napomenuti kako integracijom elektrane na sabirnicu potrošača povećavamo prijenosnu moć mreže, što se može vidjeti na slici 3.1. [5]



*Slika 3.1. Primjer PV krivulje (c-prije integracije, z-nakon integracije) [5]*

Druga metoda jest QV krivulja kojom se prikazuje osjetljivost i varijacije napona s obzirom na jalovu snagu. One se također koriste za određivanje margina naponske stabilnosti. Dno QV krivulje predstavlja granicu stabilnosti, jer vrijedi da je  $dQ/dV = 0$ . Kako je za naponsku stabilnost potreban uvjet  $dQ/dV > 0$ , tada proizlazi da desni dio krivulje predstavlja naponsku stabilnost. Integriranjem elektrane točka granične stabilnosti se pomiče prema lijevo, pri čemu će granični napon iznositi 0.5 p.u. Primjer QV krivulje je prikazan na slici 3.2. [5]



Slika 3.2. Primjer QV krivulje (c-prije integracije, z-nakon integracije) [5]

### 3.2.5. Utjecaj distribuirane proizvodnje na gubitke

Gubici u distribucijskom sustavu predstavljaju svu snagu, odnosno energiju, koja ulazi u distribucijski sustav, a pri tome ne bude iskorištena za koristan rad. Ukupni gubici u nekom sustavu se mogu odrediti sljedećom formulom:

$$P_g = P_u - P_k \quad (3-1)$$

Gdje su:

$P_g$  – gubici u distribucijskom sustavu [W]

$P_u$  – ulazna snaga u distribucijski sustav [W]

$P_k$  – korisna snaga [W]

Osim toga, gubici u distribucijskom sustavu se mogu prikazati i u relativnom odnosu, tj. mogu biti prikazani kao omjer ukupnih gubitaka i ukupne ulazne snage, pa se tako relativni gubici  $P_{gr}$  određuju sljedećim izrazom. [6]

$$P_{gr} = \frac{P_g}{P_u} \cdot 100 \quad (3-2)$$

Elementi u distribucijskim mrežama koji najviše utječu na gubitke su transformatori i vodovi. Transformatori svojim radom utječu na stvaranje gubitaka u bakru koji se nalaze u namotima transformatora. Osim toga javljaju se i gubici u željezu koji nastaju zbog stvaranja izmjeničnih magnetskih polja.

Gubici u vodovima nastaju zbog protjecanja struje. Ti gubici u vodovima ovise o kvadratu jakosti struje  $I$  koja protječe kroz iste i njihovom otporu  $R$ .

$$P_g = I^2 \cdot R \quad (3-3)$$

Kako se distribuirana proizvodnja priključuje u mrežu bliže potrošačima, tokovi snaga kroz mrežu će biti manji pa će zbog toga i sami gubici biti manji. Međutim, implementacijom proizvodnje na jednom mjestu gubici mogu biti manji, dok na drugom mjestu u mreži povezivanje novih proizvodnih jedinica rezultira povećanjem gubitaka. Osim toga, utjecaj integracije distribuirane proizvodnje ovisi o više čimbenika, a to su:

- Lokacija, odnosno mjesto na kojem se priključuje proizvodna jedinica
- Usklađenost proizvodnje iz distribuiranog izvora i trenutnom opterećenju u distribucijskoj mreži

Kako bi se odredio utjecaj na gubitke integracijom novih proizvodnih jedinica u distribucijskom sustavu, prvo je potrebno odrediti gubitke prije priključenja distribuiranih izvora, a ona se određuje sljedećim izrazom:

$$F_0 = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T [L_s(t)]^2 \cdot dt \quad (3-4)$$

Nakon spajanja distribuiranih izvora ukupni gubici se određuju sljedećim izrazom:

$$F_{DG} = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T [L_s(t) - G_s(t)]^2 \cdot dt \quad (3-5)$$

Iz formula 3-4 i 3-5 se može odrediti promjena gubitaka zbog integracije proizvodnje pa tako vrijedi:

$$\Delta F = F_0 - F_{DG} = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T G_s(t) \cdot [2L_s(t) - G_s(t)] \cdot dt \quad (3-6)$$

Gdje su:

$N_s$  – broj dijelova pojnog voda

$F_0$  – opterećenje nizvodno od dijela pojnog voda

$F_{DG}$  – proizvodnja nizvodno od dijela pojnog voda

Ako je promjena gubitaka prema gornjem izrazu pozitivna, te ako vrijedi da je:

$$2L_s(t) - G_s(t) > 0 \quad (3-7)$$

distribuirana proizvodnja će rezultirati smanjenjem gubitaka, odnosno ako je proizvodnja manja od dvostruke vrijednosti opterećenja, gubici neće značajno rasti.

Povećanje gubitaka od 10% nije zabrinjavajuće, niti sa stajališta ekologije, niti sa stajališta troškova. [7]

### **3.3. Vrste distribuiranih izvora**

Kao što je već rečeno, distribuirani izvori se postavljaju u električnoj blizini potrošača pa su zbog toga izbor vrste izvora i veličina izvora jako bitni. Potrebno je prije samog odabira uvidjeti trenutno stanje mreže, naponske prilike, dnevna opterećenja i sl. Tek nakon toga se vrši odabir vrste izvora. Kako su ti izvori blizu potrošača mora se voditi računa o prostoru na kojem će se oni nalaziti. Osim toga određuje se i energetska potencijal na tom prostoru. Tek nakon toga se radi plan integracije elektrane u mrežu. Napomenuto je već da se kao distribuirani izvori najčešće koriste obnovljivi izvori električne energije, posebice:

- Vjetroelektrane
- Fotonaponske elektrane
- Elektrane na biogoriva
- Male hidroelektrane

Budući da se u FERIT 1 mikromreži pojavljuju samo prve dvije vrste distribuirani izvora, samo će one biti opisane u sljedećim poglavljima.

### 3.3.1. Vjetroelektrane

Vjetroelektrane su postrojenja koja kinetičku energiju vjetra pretvaraju u mehaničku na svojim elisama. Okretna mehanička energija se vratilom prenosi na generator u kojem se stvara električna energija. Kinetička energija vjetra se može prikazati pomoću sljedećeg izraza:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3-8)$$

Gdje je:

- $E_k$  - kinetička energija vjetra [J]
- $m$  - masa vjetra [m]
- $v$  - brzina vjetra [m/s]

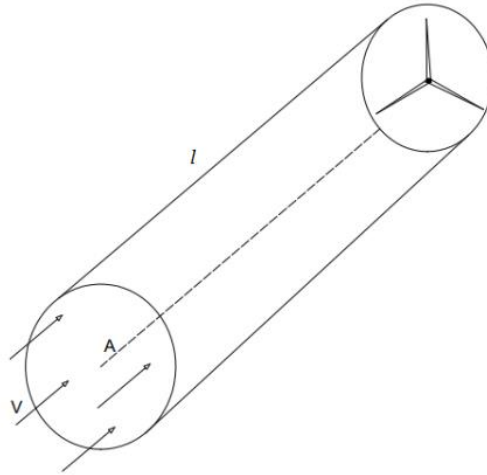
Masu vjetra možemo prikazati kao umnožak volumena vjetra  $V$  i njegove gustoće  $\rho$  pa tako vrijedi:

$$m = \rho \cdot V \quad (3-9)$$

Uvrštavanjem formule 3-9 u 3-8 se dobiva izraz:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (3-10)$$

Količina vjetra zahvaćena elisama rotora vjetroagregata se može prikazati pomoću cilindra koji je prikazan na slici 3.3. Volumen tog cilindra jednak umnošku površine baze cilindra  $A$  i duljini tog istog  $l$ .



Slika 3.3. Cilindar vjetra koji čine elise turbine vjetroagregata

Tako vrijedi:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot l \quad (3-11)$$

Iz dobivenog izraza možemo odrediti ukupnu snagu vjetra. Znamo da se snaga može opisati kao promjena energije u jedinici vremena pa tako vrijedi:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \frac{dl}{dt} \quad (3-12)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot v \quad (3-13)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3-14)$$

Iz izraza 3-14 se može vidjeti kako maksimalna ili teorijska snaga ovisi o gustoći vjetra, površini kruga koji stvaraju elise rotora, ali najviše o njezinoj brzini, odnosno ovisna je o trećoj potenciji brzine vjetra. Osim toga valja napomenuti kako nadmorska visina na kojoj se vjetar nalazi utječe na snagu. To se može opisati sljedećim izrazom:

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (3-15)$$

pri čemu su:

$v_0$  - mjerena brzina vjetra [m/s]

$H_0$  – visina na kojoj je mjerena brzina vjetra  $v_0$

$H$  - visina [m]

$v$  - brzina vjetra na visini  $H$  [m/s]

$\alpha$  - koeficijent smicanja tla

Izraz 3-14 za snagu predstavlja teorijsku snagu, odnosno maksimalnu snagu vjetra. Ona prikazuje idealan slučaj kod kojeg bi vjetar pri prolasku kroz turbine u potpunosti stao, tj. elise bi preuzele svu snagu. Međutim u praksi to nije moguće. Kinetičku energiju nije moguće u potpunosti iskoristiti, jer vjetar nakon prolaska kroz turbine mora i dalje strujati. Zbog toga se uvodi pojam stvarne snage vjetra, odnosno realne snage vjetra kakva se pojavljuje u praksi. Takva snaga se može opisati razlikom kvadrata brzine vjetra na ulazu u rotor  $v$  i kvadrata brzine vjetra na izlazu iz rotora  $v_0$ , pa tako vrijedi:

$$P = \frac{1}{2} \cdot q \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (3-16)$$

Kako brzina vjetra nije konstantna tokom promatranog razdoblja, protok  $q$  je izveden kao umnožak gustoće vjetra, površine i srednje vrijednosti brzine vjetra.

$$q = \rho \cdot A \cdot \frac{v + v_0}{2} \quad (3-17)$$

Uvrštavanjem protoka u jednadžbu 3-16 dobiva se sljedeći izraz:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \left(\rho \cdot A \cdot \frac{v + v_0}{2}\right) \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (3-18)$$

Izraz 3-18 se može pojednostaviti, pa se dobije:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2} \quad (3-19)$$

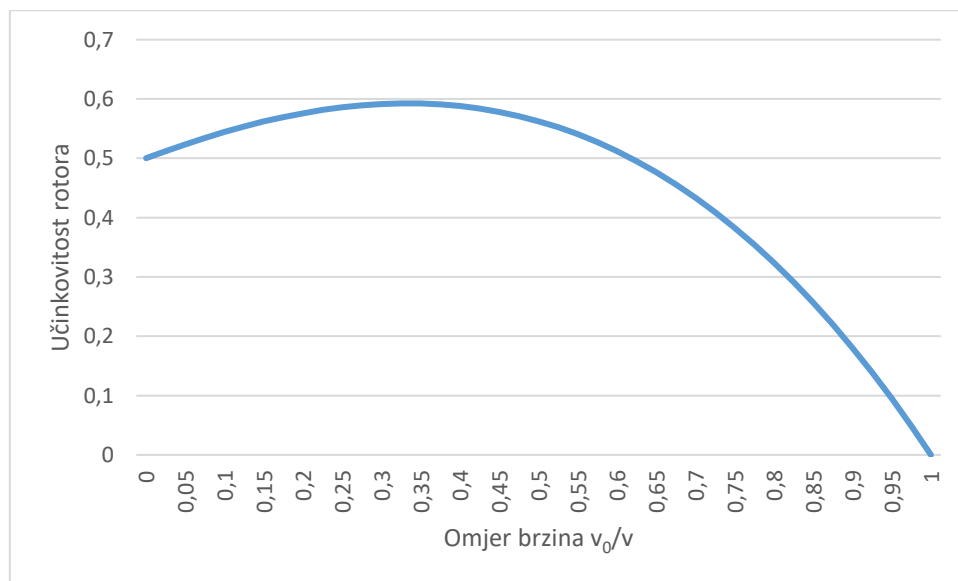
Gdje je:

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2} \quad (3-20)$$

Izraz za snagu je onda jednak:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (3-21)$$

$C_p$  se naziva koeficijent snage rotora (*engl. Power Coefficient*). On pokazuje koliki se udio ulazne snage vjetra iskorištava, dok se ostali udio troši ili na trenje ili prolazi kroz elise. Taj koeficijent varira, te on ovisi o omjeru ulazne i izlazne brzine vjetra. Maksimalan omjer, odnosno maksimalno iskorištavanje vjetra iznosi 16/27, odnosno 0.59259. Taj omjer se naziva Betzov limit. Ovisnost učinkovitosti rotora o omjeru brzina je prikazan na slici 3.4. Vidi se kako samo pri jednom omjeru brzina ono doseže maksimalnu učinkovitost.

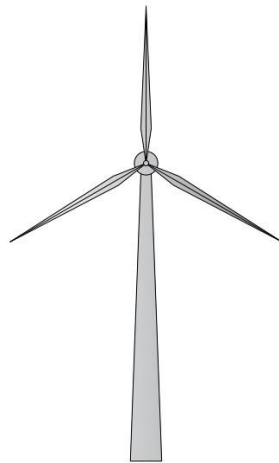


Slika 3.4. Ovisnost učinkovitosti rotora o omjeru  $v_0/v$

Za pretvorbu kinetičke energije vjetra u mehaničku zaduženi su vjetroagregati, koji svojim okretanjem preko generatora stvaraju električnu energiju. Ti vjetroagregati osim što mogu biti podijeljeni prema broju lopatica, nazivnoj snazi, vrsti generatora, oni mogu biti podijeljeni prema osi vrtnje, što predstavlja najznačajniju podjelu vjetroagregata. Postoje dvije vrste vjetroagregata s obzirom na smjer vrtnje.

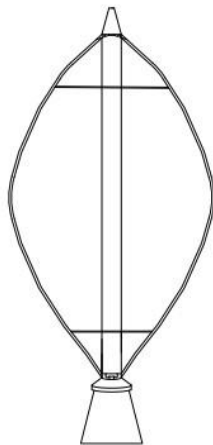


Prva vrsta je vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje (*engl. HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine*). Kod takvih je os vrtnje paralelna sa smjerom vjetra i paralelna s tlom. Ovakav tip vjetroagregata je najčešći s tri lopatice. Prednost ovakve izvedbe jest mogućnost postavljanja istih na visoke stupove kako bi se iskoristavala veća brzina vjetra na višim nadmorskim visinama. Osim toga ona omogućuje zakretanje lopatica kako bi se iskoristila što veća snaga vjetra što može znatno povećati učinkovitost. Nedostaci ovakvih izvedbi jest utjecaj na okoliš, odnosno stvaranje velike buke prilikom okretanja. Osim toga, ako se radi o većim vjetroelektranama one zahtijevaju veću površinu najviše zbog efekta zavjetrine. Također jedan od većih problema jest i njihov transport što može povećati investicijske troškove. Izgled vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje je prikazan na slici 3.5.



*Slika 3.5. Vjetroagregat s horizontalnom osi vrtnje*

Sljedeća vrsta vjetroagregata je ona s vertikalnom osi vrtnje (*engl. VAWT – Vertical Axis Wind Turbine*) kod kojih je os vrtnje okomita na tlo i na smjer kretanja vjetra. Kod ovih nisu potrebni visoki tornjevi za iskorištavanje vjetra. Prednost ovakvih je taj što se svi bitni dijelovi nalaze na tlu što nije slučaj kod onih s horizontalnom osi vrtnje. Također stvaraju manje buke i zauzimaju manje prostora zbog čega se mogu postaviti u urbanijim sredinama. Osim toga oni iskorištavaju vjetar iz svih smjerova zbog čega nije potrebna oprema za zakretanje vjetroagregata. Najveći nedostaci jesu nemogućnost iskorištavanja brzih vjetrova na većim nadmorskim visinama. Također zbog većih turbulencija vjetra pri manjim visinama potrebno je dodatno učvrstiti cijelu konstrukciju sa zateznim užima. Postoje više izvedbi ovakvih vjetroagregata, a najznačajnije su Darrieusova (vidi sliku 3.6) i Savoniusova izvedba.



Slika 3.6. Vjetroagregat s vertikalnom osi vrtnje (Darrieusova)

Bez obzira o kakvoj se vrsti vjetroagregata radi, svaki vjetroagregat posjeduje određene karakteristike. Najznačajnije karakteristike jesu brzina uključenja  $v_{ci}$  (*engl. cut – in speed*), nazivna brzina  $v_r$  (*engl. rated speed*) i brzina isključenja  $v_{co}$  (*engl. cut – out speed*). Kao što sami nazivi govore, brzina uključenja predstavlja brzinu kod koje se VA počinje vrtjeti. Ona se kreće između 2 i 5 km/h, a ona najviše ovisi o izvedbi i veličini turbine. Zbog toga proizlazi da je snaga VA pri nižim brzinama jednaka nuli. Kod nazivne brzine izlazna snaga VA dolazi do maksimuma. Ta brzina varira od izvedbe do izvedbe. Kod manjih vjetroagregata je najčešće oko 10 km/h, dok kod većih može doseći i brzine iznad 15 km/h. Brzina isključenja je brzina pri kojoj se vjetroagregat prestaje vrtjeti, zbog prevelikih sila koje djeluju na turbine. Ta brzina je najčešće iznad 20 km/h. Iz tih karakterističnih vrijednosti proizlazi:

$$P = \begin{cases} 0 & v_i < v_{ci} \\ 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_i^3 \cdot C_p & v_{ci} \leq v_i < v_r \\ P_r & v_r \leq v_i < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v_i \end{cases} \quad (3-22)$$

Iz izraza 3-22 vidimo kako se izlazna snaga vjetroagregata, nakon što se isti pokrene, povećava po trećoj potenciji brzine sve do nazivne brzine, kada snaga postaje konstantna.

### 3.3.2. Fotonaponske elektrane

Fotonaponske elektrane služe za provođenje fotonaponske pretvorbe. Fotonaponska pretvorba je izravna pretvorba Sunčeve energije u električnu. To je moguće uz korištenje poluvodičkih materijala. Kada se Sunčeva energija u obliku fotona sudari s valentnim atomom dovoljnom energijom za prekidanje atomske veze nastaju slobodni elektroni koji se skupljaju na jednoj

strani ćelije. Na taj način nastaje neravnoteža naboja između prednje i stražnje strane ćelije pri čemu nastaje razlika potencijala koji rezultira nastankom napona.

Za postizanje fotonaponske pretvorbe zaslužne su fotonaponske ćelije. One su osnovni gradivni blok fotonaponskog sustava. Njihova veličina je između 1 i 10 cm. Snaga svake ćelije je između 1 i 2 W uz napon od oko 0.6 V. Budući da je to premalo za primjenu, te se ćelije spajaju u serijsko – paralelne spojeve kako bi se dobila cjelina koja se naziva fotonaponski modul. Dalje se oni spajaju u serijski, paralelni ili serijsko – paralelni niz kako bi se dobila željena karakteristika fotonaponskog sustava.

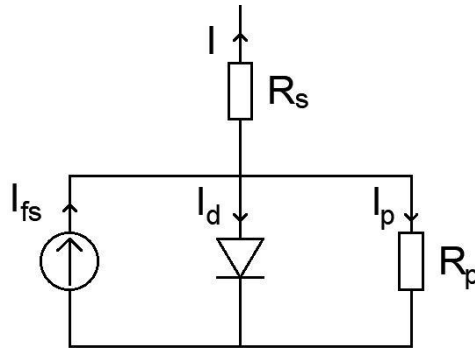
Svaki od fotonaponskog modula ima svoje nazivne vrijednosti koje su dobivene prilikom testiranja u standardnim testnim uvjetima (STC) za koje se podrazumijeva:

- Sunčevo zračenje od  $1 \text{ kW/m}^2$
- Temperatura fotonaponskog modula od  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Postoje razne izvedbe fotonaponskih ćelija. Sve se zasnivaju na poluvodičkim materijalima. Svaku karakterizira njezina složenost pri proizvodnji, cijena, učinkovitost i ostalo. Najčešće izvedbe su:

- Monokristalni Silicij
- Polikristalni Silicij
- Amorfni Silicij
- Višeslojne ćelije

Nadomjesna shema fotonaponske ćelije se sastoji od serijskog otpora  $R_s$ , paralelnog otpora (šanta)  $R_p$ , bypass diode i strujnog izvora i prikazana je na slici 3.7. Takva shema zapravo predstavlja realan strujni izvor, jer je struja koja protječe (fotostruja) je proporcionalna sunčevom zračenju. Serijski otpor  $R_s$  predstavlja omski otpor na koji nailazi struja koja prolazi kroz ćeliju, sve do priključka s vanjskim krugom. Paralelni otpor  $R_p$  je otpor uzrokovan defektima u poluvodičkim spojevima. U idealnim slučajima serijski otpor iznosi  $0 \text{ } \Omega$ , dok je paralelni otpor beskonačan. Osim ta dva otpora, svaka ćelija ima bypass diodu, kroz koju proizvedena struja teče kako u slučaju kvara ćelije ili njezinog zasjenjenja ne bi dovelo do prekida strujnog kruga. [8]



Slika 3.7. Nadomjesna shema fotonaponske ćelije

Ukupna izlazna struja neke fotonaponske ćelije jest fotostruja umanjena za struju kroz diodu i struju kroz paralelni otpor. Pa će vrijediti:

$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{e \cdot (U + I \cdot R_s)}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_p} \quad (3-23)$$

Kako je otpor šanta velik, struju kroz isti možemo zanemariti pa vrijedi:

$$I = I_{fs} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{e \cdot (U + I \cdot R_s)}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3-24)$$

Gdje su:

$U$  – napon [V]

$R_p$  – paralelni otpor fotonaponske ćelije [ $\Omega$ ]

$e$  – elementarni naboj,  $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  As

$I_{fs}$  – fotostruja [A]

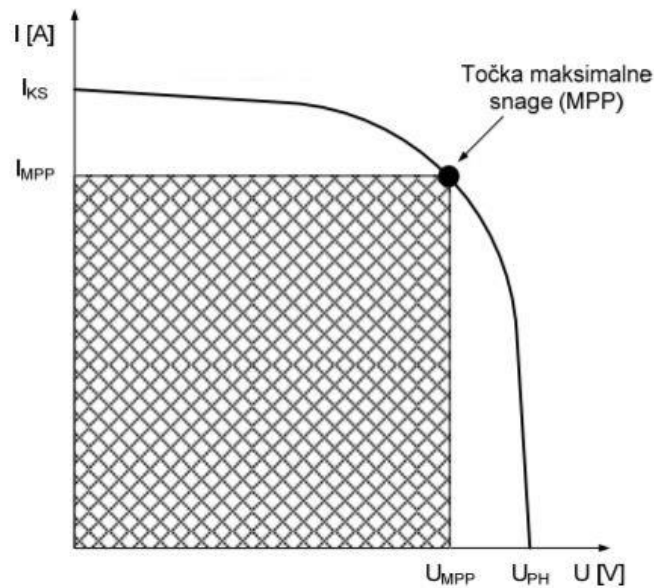
$I_0$  – struja zasićenja [A]

$m$  – parametar fotonaponske ćelije,  $m=1$

$k$  – Boltzmanova konstanta,  $k = 1.3806 \cdot 10^{-23}$  J/K

$T$  – apsolutna temperatura [K]

Svaka fotonaponska ćelija, ovisno o njezinoj vrsti i veličini ima pripadajuću strujno naponsku karakteristiku. Primjer strujno naponska karakteristika fotonaponske ćelije prikazana je na slici 3.8.



Slika 3.8. I-U karakteristika fotonaponske ćelije [8]

U lijevom prigušenom području fotonaponska ćelija djeluje kao konstantan izvor struje, koji stvara napon koji odgovara otporu opterećenja. U desnom prigušenom području, struja naglo opada s porastom napona. U ovome području fotonaponska ćelija radi kao konstantni izvor napona.

Na strujno naponskoj karakteristici se mogu izdvojiti tri karakteristične točke, a to su:

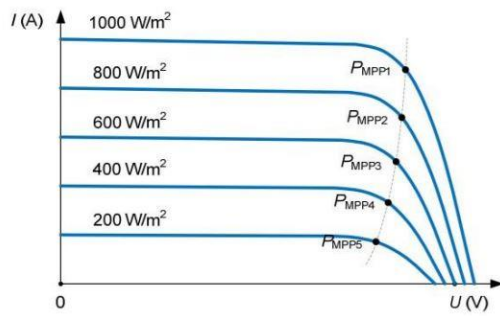
1. Struja kratkoga spoja:

$$I_{ks} = I_{fs} \quad (3-25)$$

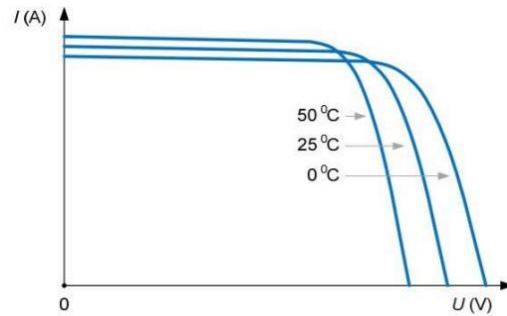
2. Točka maksimalne snage (MPP)
3. Napon praznog hoda:

$$U_{PH} = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{ks}}{I_0} + 1\right) \quad (3-26)$$

Na izgled strujno naponske karakteristike ne utječu samo unutarnji otpori, izvedba ćelije, nego i vanjski utjecaji (temperatura, jakost zračenja). Jakost zračenja na U-I karakteristiku djeluje tako što ona lijevo prigušno područje podiže po y-osi. Razlog tome je taj što je fotostruja proporcionalna intenzitetu zračenja. Samim time i struja kratkog spoja se proporcionalno povećava. Povećanje temperature modula utječe na smanjenje napona praznog hoda, odnosno karakteristika se kreće prema lijevo duž x-osi. Utjecaji intenziteta zračenja i temperature su prikazani na slikama 3.9 i 3.10.



Slika 3.9. Utjecaj povećanja intenziteta zračenja na I-U karakteristiku [8]



Slika 3.10. Utjecaj povećanja temperature modula na I-U karakteristiku [8]

Osim što ovi faktori djeluju na U-I karakteristiku, oni također djeluju i na ukupnu učinkovitost fotonaponske ćelije. Učinkovitost ćelije se može izraziti kao omjer maksimalne snage  $P_{MPP}$  i snage sunčevog zračenja  $G$  na površinu  $A$ .

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A} \cdot 100 = F \cdot \frac{U_{PH} \cdot I_{KS}}{G} \cdot 100 \quad (3-27)$$

Faktor punjenja  $F$  pokazuje koliko je fotonaponska ćelija daleko od idealne. Ona je zapravo omjer pravokutnika koje čine stranice  $U_{MPP}$  i  $I_{MPP}$ , te pravokutnika stranica  $U_{PH}$  i  $I_{KS}$ . Taj faktor se kreće između 0.7 i 0.9.

$$F = \frac{P_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} \quad (3-28)$$

Dosadašnja razmatranja o U-I karakteristikama su se odnosila samo za fotonaponske ćelije. Spajanjem tih ćelija u seriju i/ili paralele U-I karakteristike se mijenjaju. Dodavanjem ćelija u seriju povećava se napon praznog hoda, a struja kratkog spoja ostaje nepromijenjena. Dodavanjem ćelija u paralelu se dešava obrnuta situacija, napon praznog hoda ostaje isti, a struja kratkog spoja se povećava.

Budući da se fotonaponskom pretvorbom stvara istosmjerna struja, a u elektroenergetskom sustavu se koristi izmjenična, važno je proizvedenu struju izmijeniti. Za tu izmjenu je zadužen izmjenični pretvarač, te tako on predstavlja jako bitan element u cijelom FN sustavu. Međutim izmjenjivači nisu uvijek potrebni kod FN sustava. Kod manjih sustava koji su namijenjeni za opskrbu samo istosmjernih potrošača su nepotrebni.

### 3.4. Pohrana električne energije

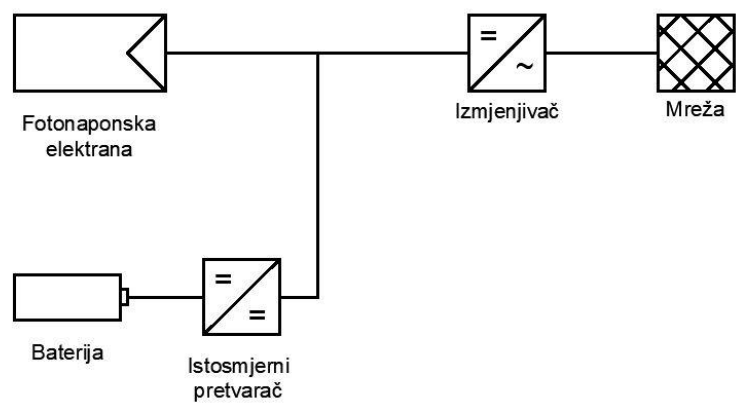
Kao što je već rečeno u drugom poglavlju, mikromreža osim svoje proizvodnje i potrošnje se može sastojati i od sustava za pohranu energije. Najčešći sustav pohrane u manjim mikromrežama koje koriste distribuiranu proizvodnju jesu baterijski sustavi. Najvažniji element tog sustava jest sama baterija, odnosno akumulator. Oni rade na principu da se u trenutku punjenja električna energija pretvara u kemijsku energiju te se kao takva pohranjuje u bateriji, a u trenutku pražnjenja se ta ista pretvara nazad u električnu energiju. Najčešće vrste baterija su litij-ionske, natrij-sumporne, olovne, nikal-kadmij i druge. Osim baterije, baterijski sustavi mogu sadržavati usmjerivače (ispravljača i izmjenjivača), te sustav za upravljanje, kontrolu i nadzor.

Svaki baterijski sustav karakteriziraju različite tehničke značajke, koje ovise o vrsti baterija koje se koriste. Najvažnije značajke baterija su:

- Dugotrajnost, koja se kreće od 10 do 20 godina
- Broj ciklusa, od nekoliko stotina do nekoliko tisuća punjenja i pražnjenja
- Korisnost, kreću se od 70% pa na više. Najučinkovitije su Li-ion i NaS s iznad 90%
- Vrijeme odziva, reda milisekunde
- Vrijeme pražnjenja, između nekoliko minuta i nekoliko sati

Sustavi za upravljanje sustavima pohrane služe za upravljanje njihovim punjenjem, odnosno pražnjenjem. Kao što je već napisano, u elektroenergetskom sustavu se nastoji proizvesti onoliko količine električne energije, uvećanu za gubitke, koja je dovoljna za opskrbu trenutnog opterećenja. Ta ujednačenost proizvodnje i potrošnje je potrebna za održavanje stabilnosti unutar elektroenergetskog sustava. Budući da je proizvodnja iz obnovljivih izvora električne energije sama po sebi nepredvidljiva, često dolazi do pojave viška električne energije u sustavu. U mikromrežama u kojima se nalaze fotonaponske elektrane koriste se često hibridni izmjenjivači, kod kojih osim što služe za pretvorbu istosmjerne u izmjeničnu struju, imaju mogućnost pohranjivanja te energije u baterije. Sustavima za upravljanje se određuje kada će se iz tih hibridnih izmjenjivača predavati struja sustavu, a kada će ići u pohranu.

Primjer sustava za pohranu električne energije je prikazan na slici 3.11. Kod tog sustava se vidi kako proizvodnja iz fotonaponske elektrane može ići direktno na izmjenjivač pa dalje u vanjsku mrežu, a također se može preko istosmjernog pretvarača pohraniti u bateriju, odakle bi u trenutku kad bude potrebno preko izmjenjivača išla u mrežu.



*Slika 3.11. Primjer sustava s pohranom električne energije*



*Slika 3.12. Hibridni izmjenjivači s pohranom*

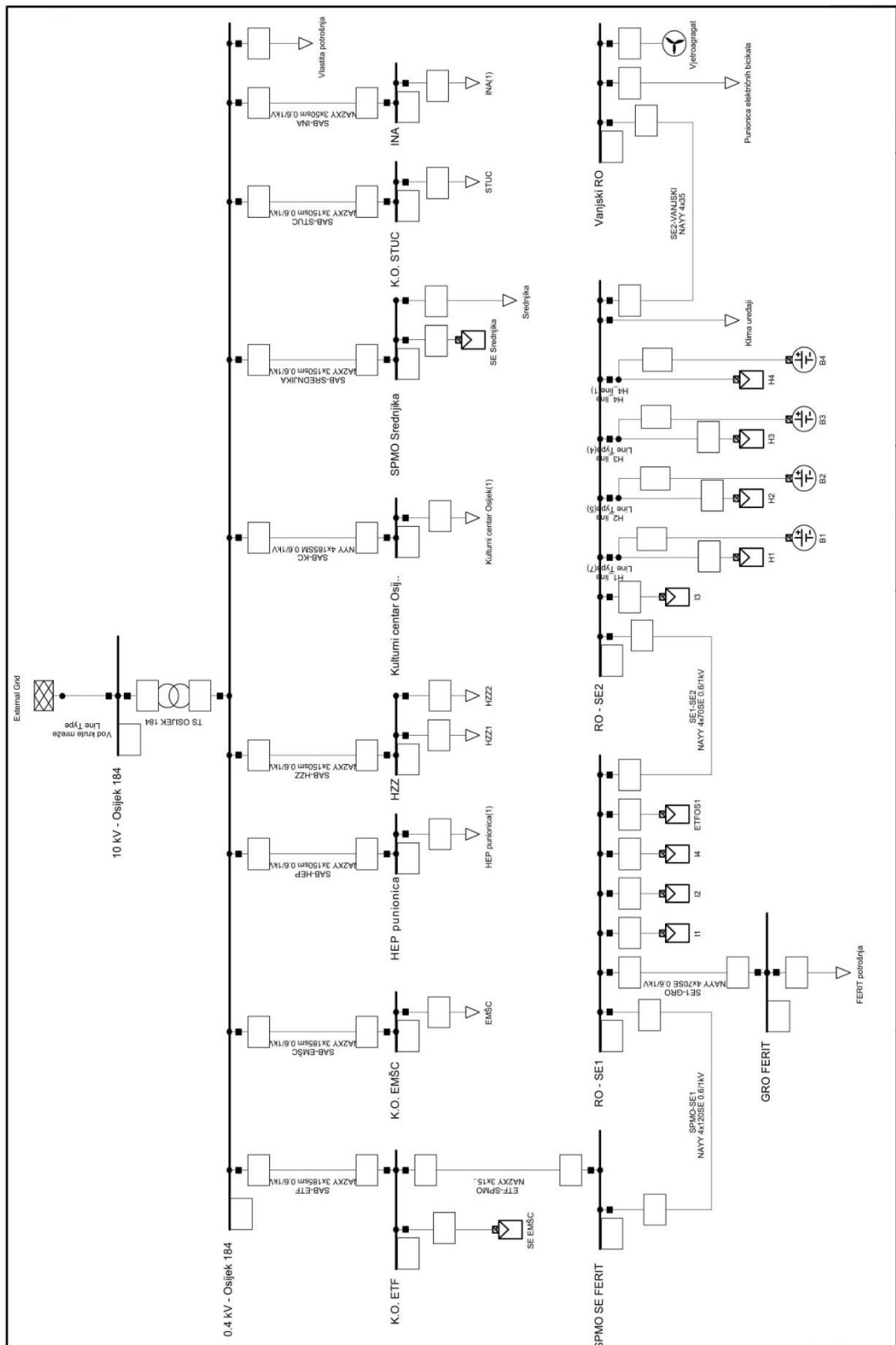


*Slika 3.13. Baterijski sustav*



#### **4. MODELIRANJE U DIGSILENT-U**

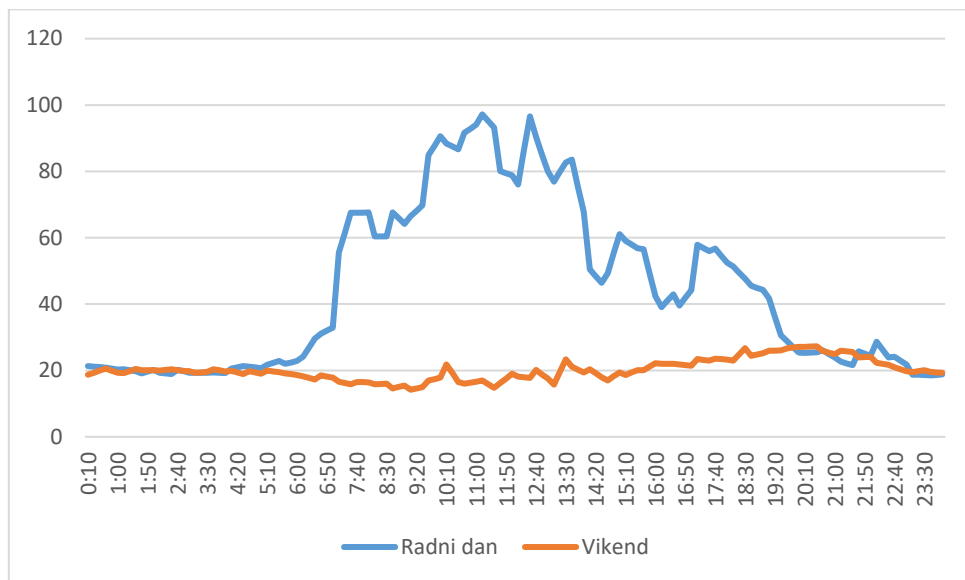
Kako bi se ustanovio utjecaj rada mikromreže FERIT 1 na okolnu mrežu, potrebno je iščitati jednopolne sheme mikromreže, koje su prikazane na slikama 2.1. i 2.2., te ih precrtati u simulacijski program DigSilent. Mikromreža FERIT 1, kao i okolni potrošači su spojeni na TS Osijek 184 koji se nalazi pokraj Eurodoma u Osijeku. Na trafostanicu 10/0.4 kV su osim zgrade FERIT-a spojeni i ostali potrošači, kao što su: Hrvatski zavod za zapošljavanje, igralište Srednjika, Studentski centar Osijek, Kulturni centar Osijek i drugi. U distribucijskoj mreži Osijek 184 osim proizvodnje u mikromreži FERIT 1 postoje još dvije fotonaponske elektrane. Jedna na igralištu Srednjika snage 93 kW, te na zgradi EMŠE snage 30 kW. Simulacijski model u DigSilent-u je prikazan na slici 4.1.



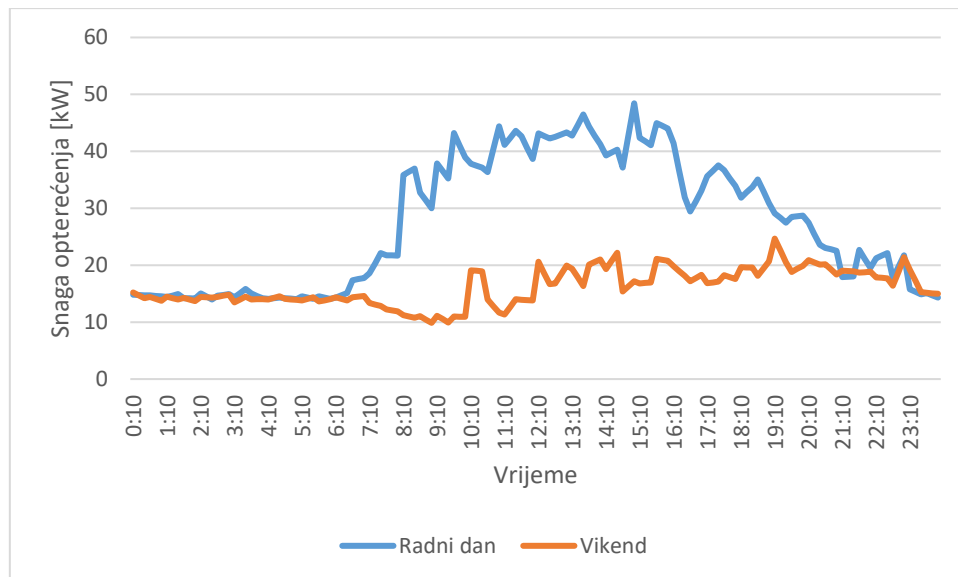
Slika 4.1. Simulacijski model okolne mreže i mikromreže FERIT 1

## 4.1. Modeliranje potrošača

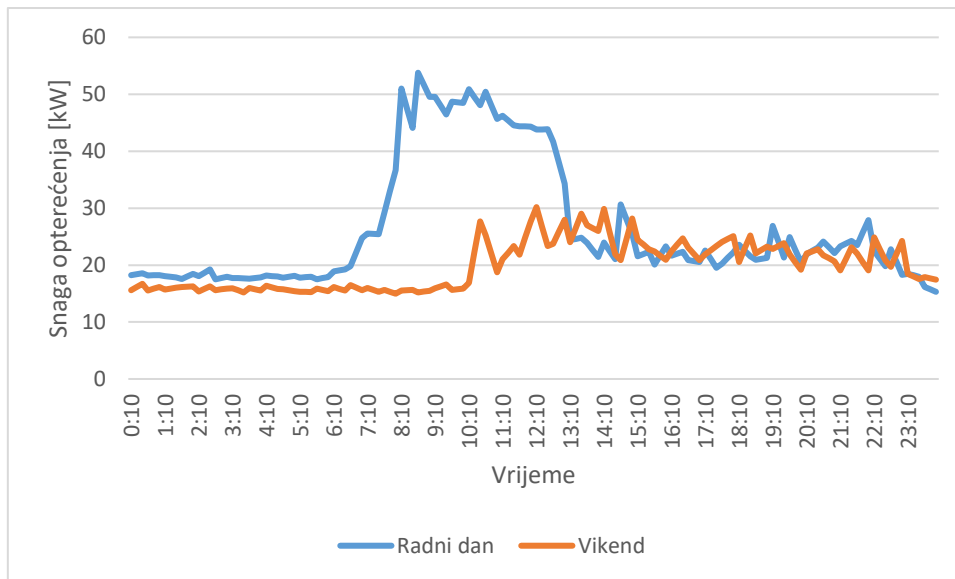
Kako je zadatak diplomskog rada u DigSilent-u odraditi TimeSweep analizu, prvo potrebno je odrediti dnevne dijagrame opterećenja svakoga potrošača za ljetni, proljetni i zimski radni dan i vikend. Potrošnja mikromreže FERIT 1, odnosno dnevni dijagrami opterećenja su poznati i mogu se vidjeti na sljedećim slikama. [9]



Slika 4.2. Ljetni dnevni dijagram opterećenja



Slika 4.3. Proljetni dnevni dijagram opterećenja



Slika 4.4. Zimski dnevni dijagram opterećenja

Iz gornjih slika se da vidjeti kako radnim danima opterećenje počinje rasti u jutarnjim satima, što ukazuje da tada djelatnici fakulteta dolaze na svoja radna mjesta, uključuju računala, klima uređaje u kabinetima pa zbog toga dolazi do naglog porasta opterećenja. Vidi se kako je u podnevnim satima opterećenje najveće. Razlog toga jest dolazak studenata u zgradu fakulteta, te oni također uključuju računala u učionicama, u laboratorijima se pokreću strojevi i slično. Kod ljetnog i proljetnog dijagrama opterećenja je prisutna promjena opterećenja sve do 21:00 h, kada ona opada na konstantnu vrijednost. Kod zimskog dijagrama se vidi kako kao i kod ostala dva dijagrama, opterećenje raste u ranim jutarnjim satima, međutim snaga naglo opada na konstantnu vrijednost već u 13:00 h. Razlog tomu je taj što je se za zimski dan uzet dan u periodu božićnih blagdana pa na fakultetu nema predavanja, zbog čega nema niti studenata.

Usporedbom slika 4.2, 4.3 i 4.4. se da vidjeti kako je najveća potrošnja zapravo ljeti. Razlog tome jest što se u ljetnim razdobljima koriste klima uređaji, te ako pretpostavimo da su svi uključeni, doći će do porasta snage opterećenja za približno 25 kW.

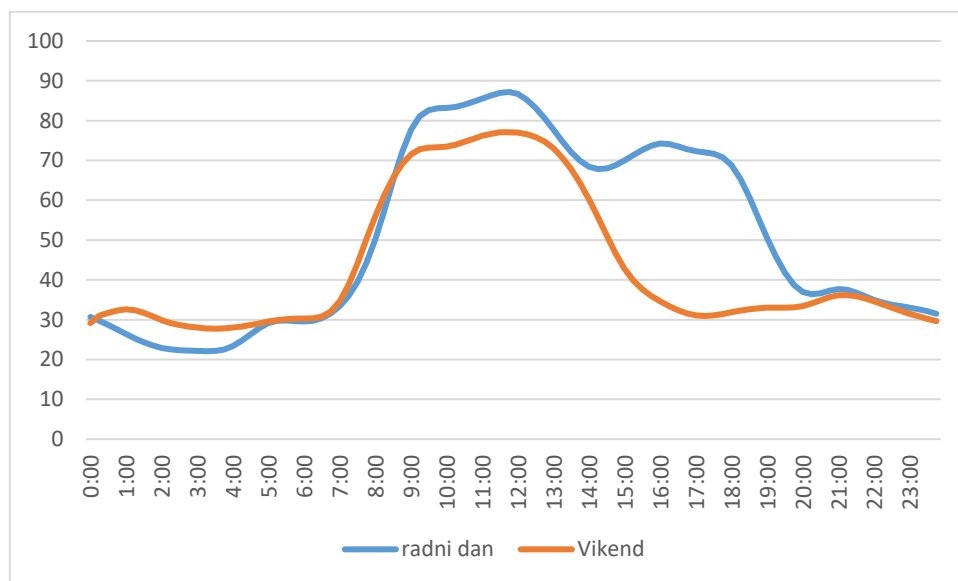
Tijekom vikenda se vidi kako je opterećenje za svako godišnje doba približno jednako, te kako su opterećenja konstantna, odnosno nema velikih oscilacija u opterećenju, što ukazuje na to da u zgradu fakulteta ne dolaze djelatnici te se ne uključuju trošila. Također se vidi kako ta opterećenja nisu jednaka nuli, nego se kreću oko 20 kW kroz cijeli vikend. To ukazuje na to da su pojedini potrošači u zgradi fakulteta u radu kroz cijeli tjedan, odnosno rade bez prestanka.

Dnevni dijagrami ostalih potrošača u okolnoj mreži fakulteta nisu poznati, kao što je to bio slučaj kod dnevnih dijagrama opterećenja za sam fakultet. Kod njih je poznata samo zakupljena

snaga pa je za takve potrebno odabrati pravilan profil potrošnje. Programski paket DigSilent nudi korištenje standardnih profila potrošnje. Ti profili su:

### 1. Profil G0

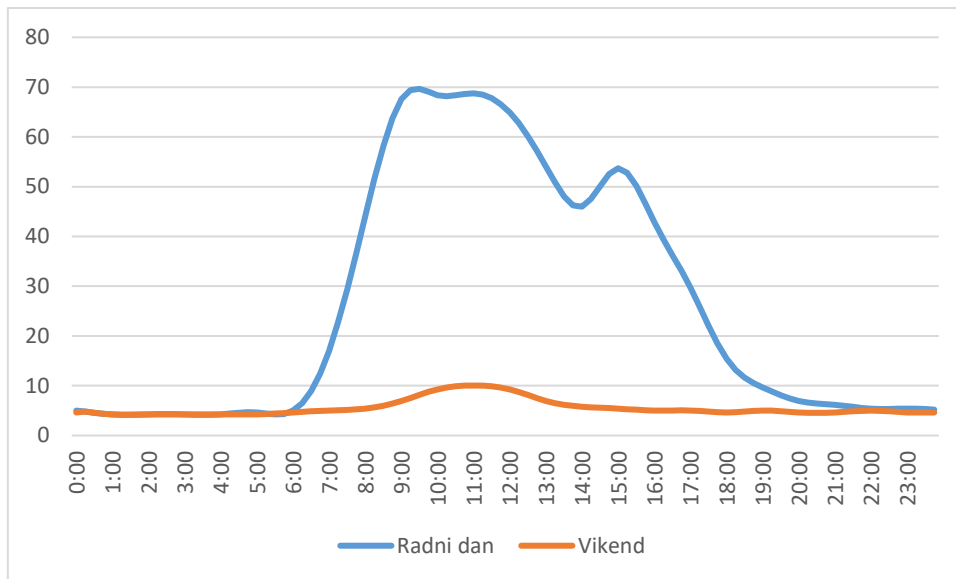
Ovaj profil predstavlja najuobičajeniji tip potrošnje u industriji. Kod takvih dnevni dijagrami opterećenja u radnim danima imaju isti oblik kao i klasični dnevni dijagrami opterećenja nekog elektroenergetskog sustava. Kod takvih potrošnja se naglo povećava u ranim jutarnjim satima kada postrojenje kreće sa svojim radom, te se ona povećava sve do maksimuma koji nastupa u podnevnim satima. Tada se ta potrošnja blago smanjuje, sve do kraja radnog vremena u večernjim satima kada naglo pada na minimum. Potrošnja subotom je slična kao i u radnim danima, međutim radno vrijeme kod industrije s ovakvim profilom je kraće, te se pad opterećenja očekuje oko 14:00 h. Ovakav profil u okolnoj mreži fakulteta ima Hrvatski zavod za zapošljavanje (HZZ) i Studentski centar Osijek (STUC).



Slika 4.5. Dnevni dijagram opterećenja za profil G0

### 2. Profil G1

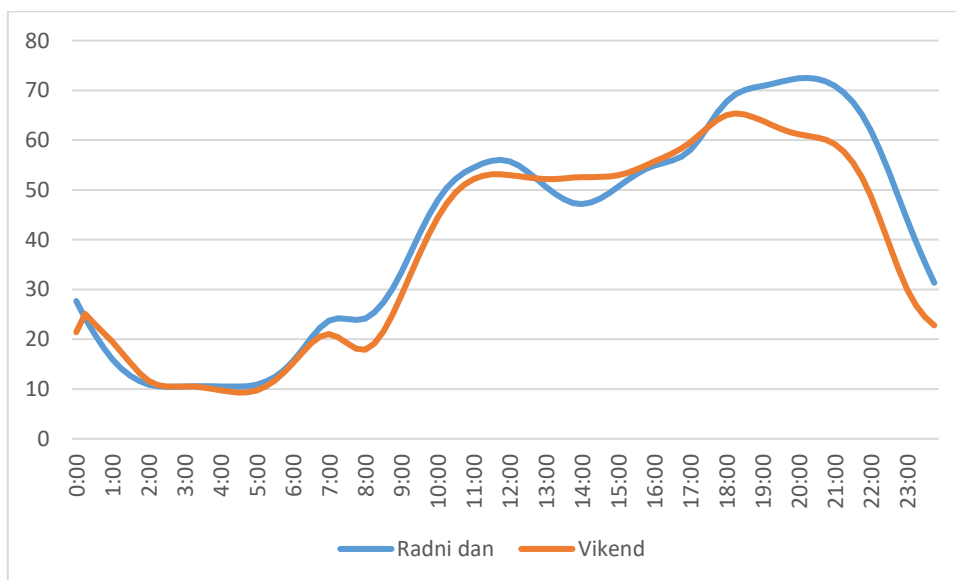
Dnevni dijagram za radni dan ovog profila je sličan prethodnom, međutim dijagram za vikend dan se znatno razlikuje od prethodnog. Kod postrojenja s ovim profilom, potrošnja vikendom je gotovo jednaka nuli. Ovakav tip potrošnje u okolnoj mreži fakulteta ima Srednja elektrotehnička i prometna škola (EMŠC).



Slika 4.6. Dnevni dijagram opterećenja za profil G1

### 3. Profil G2

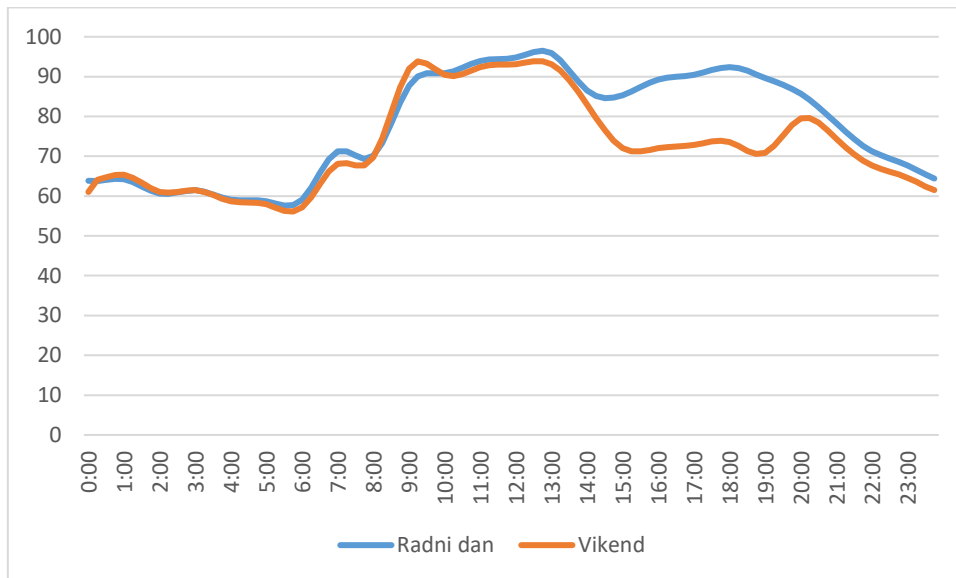
Ovaj profil je karakterističan kod potrošača koji imaju pojačanu potrošnju u večernjim satima kroz sve dane u tjednu. Najčešći potrošači s ovakvim profilom su igrališta, restorani, kafići i drugi. U okolnoj mreži FERIT-a ovakav tip potrošnje ima igralište Srednjika, te Kulturni centar Osijek.



Slika 4.7. Dnevni dijagram opterećenja za profil G2

#### 4. Profil G3

Ovakav profil karakterizira potrošače čija se opterećenja nikada ne prekidaju. To su potrošači koji rade 0 – 24 h svaki dan u godini. Najčešći potrošači ovakvog tipa su bolnice, benzinske postaje i sl. U okolnoj mreži fakulteta s ovakvim tipom su INA benzinska postaja i HEP punionica električnih automobila.



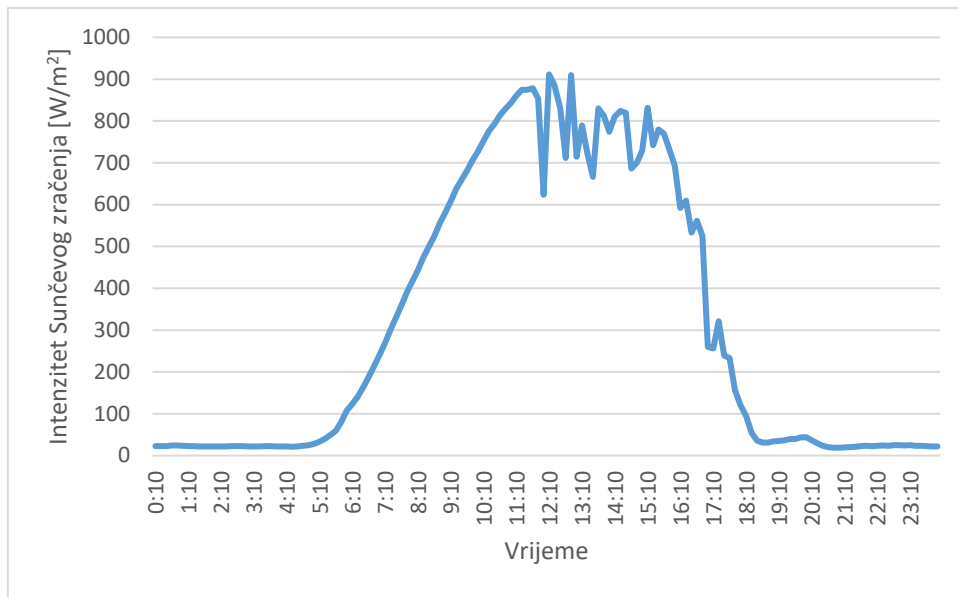
Slika 4.8. Dnevni dijagram opterećenja za profil G3

### 4.2. Modeliranje proizvodnje

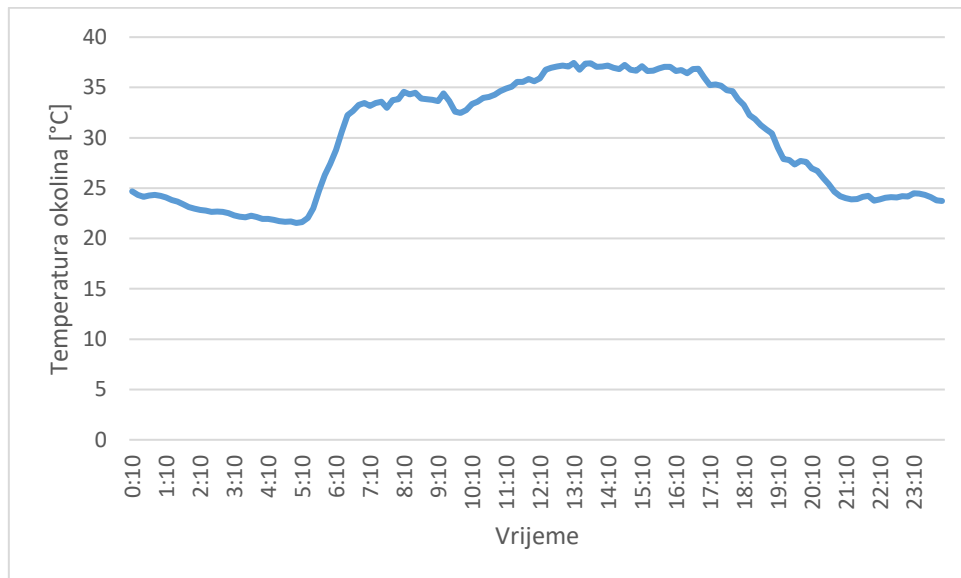
Kako bi se TimeSweep analizom ustanovilo ponašanje mikromreže potrebno je odrediti i trenutne proizvodnje iz proizvodnih jedinica u mikromreži. U programskom paketu DigSilent-u je potrebno unijeti 10-minutne vrijednosti proizvodnje iz fotonaponskih elektrana i vjetroagregata. [9]

#### 4.2.1. Proizvodnja iz fotonaponske elektrane

Za izračun snage iz FNE potrebna su dva parametra, temperatura ambijenta  $T_{amb}$  i intenzitet sunčevog zračenja  $G$ . Prikaz dnevne promjene ta dva ulazna parametra su prikazani na slikama 4.9. i 4.10.



Slika 4.9. Dnevna promjena intenziteta Sunčevog zračenja



Slika 4.10. Dnevna promjena temperature okoline

Na temelju sljedeće formule se određuje temperatura modula  $T_{mod}$ :

$$t_{mod,t} = t_{amb,t} + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G_t \quad (4-1)$$

gdje je  $NOCT$  nominalna radna temperatura ćelije koja u ovom slučaju iznosi 45 °C.

Pomoću temperature modula se lako da izračunati izlazna snaga iz izmjenjivača pomoću sljedeće formule:



$$P_{inv} = P_{string} \cdot \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot \frac{\eta_{inv}}{100} \cdot \left( 1 - \frac{\gamma}{100} \cdot (t_{mod,t} - t_{STC}) \right) \quad (4-2)$$

gdje su:

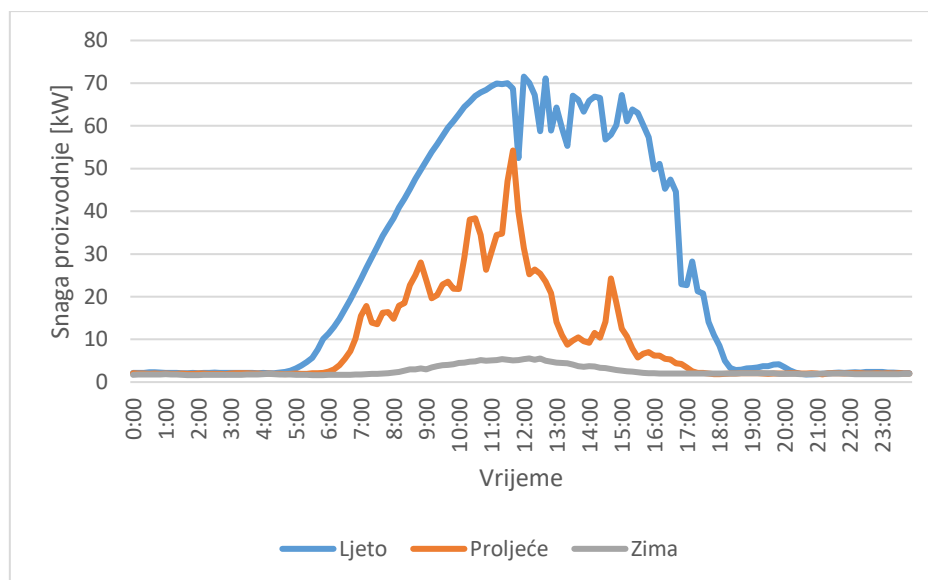
$P_{string}$  – snaga niza modula koji ulazi u izmjenjivač [W]

$G_{TC}$  – intenzitet sunčevog zračenja pri standardnim testnim uvjetima, a iznosi 1000 W/m<sup>2</sup>

$\eta_{inv}$  – učinkovitost izmjenjivača koja iznosi 95%

$\gamma$  – temperaturni koeficijent snage koji iznosi 0.4 %/°C

$t_{STC}$  – temperatura pri standardnim testnim uvjetima koja iznosi 25 °C



Slika 4.11. Usporedba ukupnih proizvodnje iz fotonaponske elektrane za tri godišnja doba

Na slici 4.11. su prikazane dnevne proizvodnje iz fotonaponske elektrane za tri godišnja doba. Očekivano najveća proizvodnja je tokom ljeta. Vidi se kako dijagram kreće s rastom već u 5:00 h, odnosno samim izlaskom Sunca, te se snaga proizvodnje penje do maksimuma u podnevnim satima. Vidi se također kako je do 12:00 h proizvodnja gotovo pa idealna, odnosno nema nikakvih oscilacija, dok se nakon toga počinju pojavljivati nepredvidljive promjene u proizvodnji. Razlog takvih promjena je najčešće pojava oblaka koji zaklanjaju Sunce ili pojava sjene na fotonaponskim modulima. Proljetni dan nudi dosta manju i isprekidaniju proizvodnju nego što je to slučaj za ljeto. Osim toga vidi se kako dan postaje kraći, odnosno interval u kojem dolazi do proizvodnje je dosta manji. Sivim dijagramom je označena proizvodnja u zimskom periodu, koja je gotovo pa jednaka nuli.

#### 4.2.2. Proizvodnja iz vjetroagregata

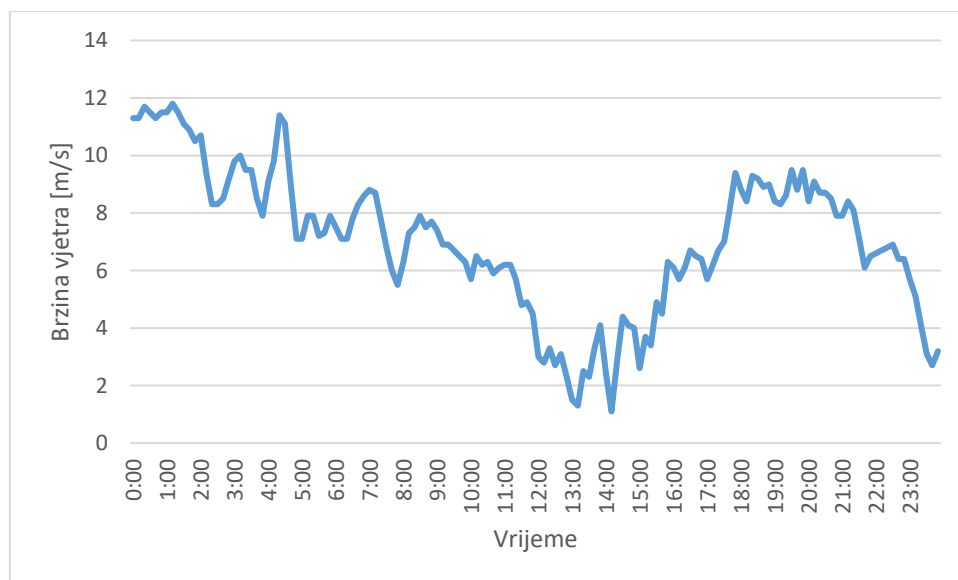
U poglavlju 3.3.1. opisano je kako se izlazna snaga vjetroagregata mijenja s trećom potencijom brzine vjetra. Korištenjem formula koje su u tom poglavlju objašnjene može se odrediti očekivana proizvodnja iz vjetroagregata u mikromreži FERIT 1. Taj vjetroagregat nazivne snage 6 kW ima promjer od 7 m. Nazivna brzina mu iznosi 9 m/s, a brzina uključanja (eng. *cut-in speed*) 3.5 m/s. Budući da se radi o malom vjetroagregatu koji je postavljen na području gdje brzine vjetra nisu velike, brzina isključenja (eng. *cut-out speed*) ne postoji. Pomoću tih podataka te korištenjem formule za određivanje površine kruga se dobije sljedeće.

$$A = r^2 \cdot \pi = \left(\frac{7}{2}\right)^2 \cdot \pi = 38.465 \text{ m}^2 \quad (4-3)$$

Nakon dobivene površine koju čine elise rotora vjetroagregata moguće je odrediti koeficijent snage sljedećom formulom.

$$C_p = \frac{2 \cdot P_n}{\rho \cdot A \cdot v_n^3 \cdot \eta_{VA}} = \frac{2 \cdot 6000}{1.225 \cdot 38.465 \cdot 9^3 \cdot 0.95} = 0.3677 \quad (4-4)$$

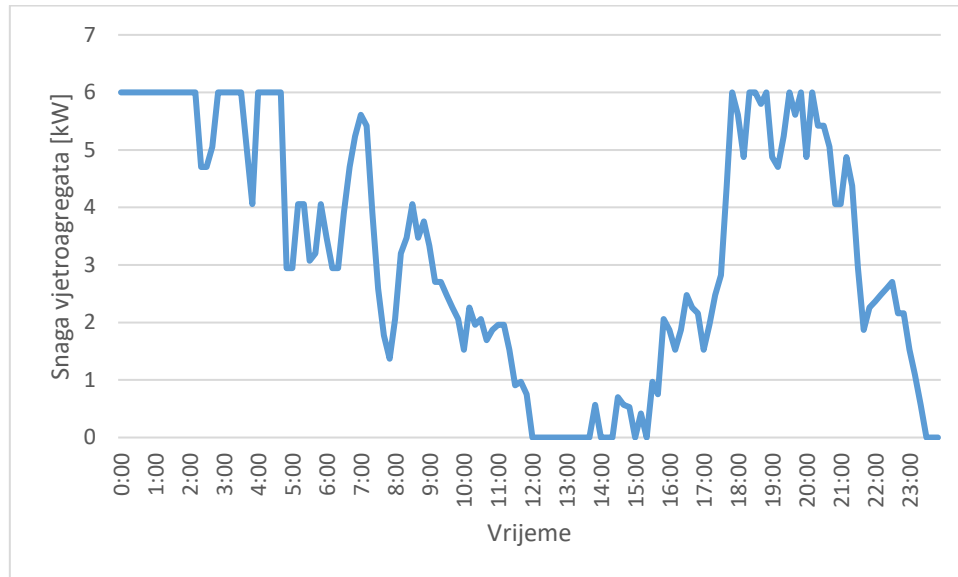
Iz rezultata izraza 4-4 se vidi kako koeficijent snage iznosi 0.3677, što znači da će vjetroagregat iskoristiti samo trećinu ukupne snage vjetra za proizvodnju električne energije.



Slika 4.12. Profil brzine vjetra

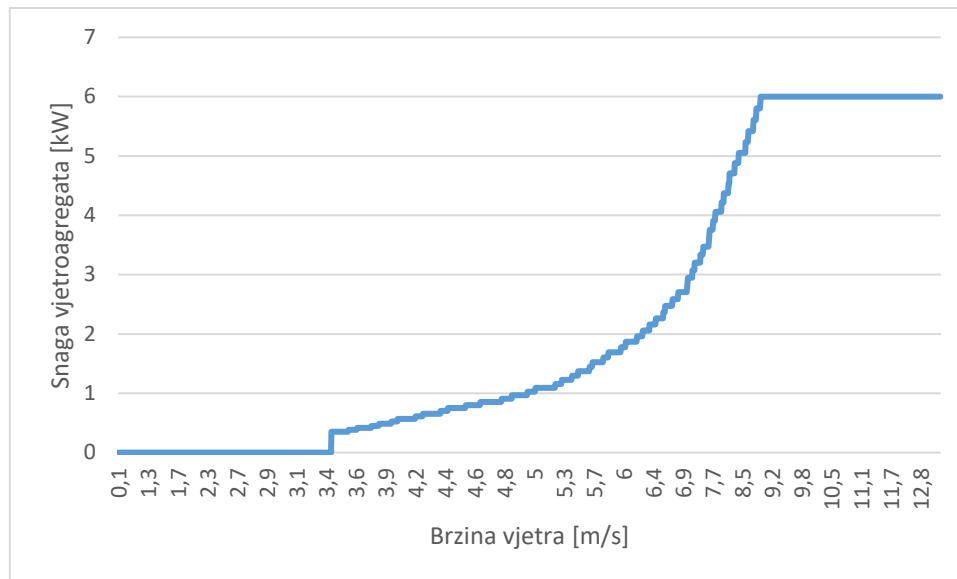
Na slici 4.17. je prikazan profil brzine vjetra koji će se koristiti za proračun izlazne snage vjetroagregata u mikromreži FERIT 1. Za proračun te snage će se koristiti izrazi iz 3-22. Pomoću tih uvjeta i formula dobivaju se vrijednosti koji su prikazani na slici 4.13. Ona

prikazuje vremensku promjenu snage kroz jedan dan. Vidi se kako je u noćnim i večernjim satima snaga maksimalna, odnosno kako je brzina vjetra iznad nazivne, dok je dnevna brzina vjetra niža. Također se vidi kako je u podnevnim satima brzina vjetra pala ispod brzine uključenja što rezultira izlaznoj snazi jednakoj nuli.



*Slika 4.13. Promjena izlazne snage vjetroagregata*

Ako te dobivene snage poredamo po veličini, od najniže snage do najviše, te ako im pridružimo pripadajuće brzine vjetra dobiva se sljedeći graf.



Slika 4.14. Krivulja snage vjetroagregata

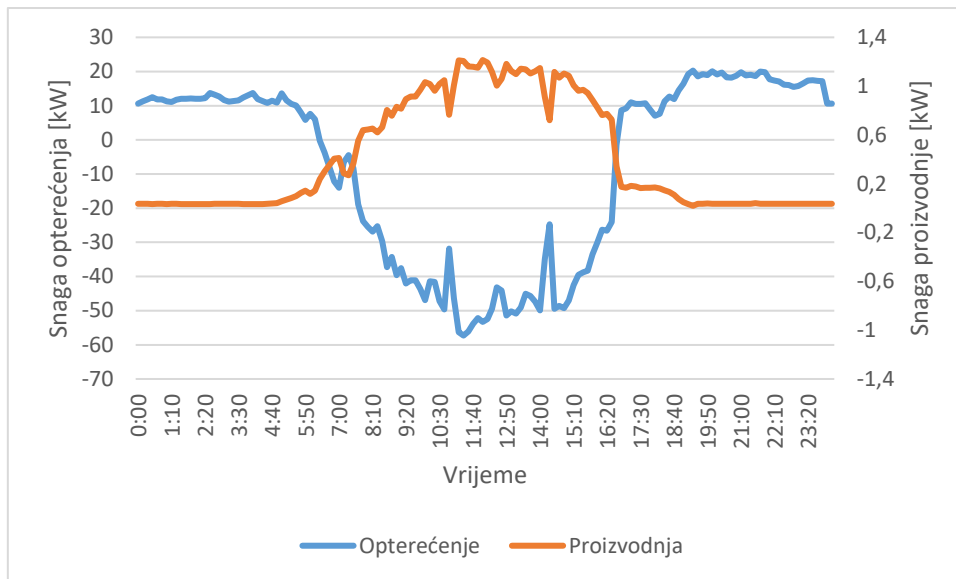
Slika 4.14. predstavlja krivulju snage vjetroagregata u FERIT 1 mikromreži. Ona pokazuje koliku snagu vjetroagregat daje u ovisnosti o njezinoj brzini. Iz te krivulje se lako da vidjeti karakteristične vrijednosti vjetroagregata, odnosno karakteristične brzine.

### 4.3. Modeliranje pohrane električne energije

Kao što je to objašnjeno u poglavlju 3.4. u mikromreži FERIT 1 se koriste hibridni izmjenjivači koji osim što imaju mogućnost pretvorbe istosmjerne struje u izmjeničnu, te kao takvu ju predaju u mrežu, imaju mogućnost i pohraniti tu energiju. Kako bi se što veća količina električne energije iskoristila u samoj mikromreži potrebno je što bolje upravljati samim punjenjem i pražnjenjem tih baterija. Kako bi se povećala učinkovitost cijele mikromreže, nastoji se pohraniti što veća količina električne energije u trenucima kada mikromreža ima višak energije, odnosno kada je proizvodnja u mikromreži veća od potrošnje. Ta pohranjena energija bi se onda trošila u trenucima kada je ona potrebna.

U mikromreži FERIT 1 su postavljena četiri hibridna izmjenjivača svaki s baterijom od 9.6 kWh. Snaga tih izmjenjivača iznosi 5 kW, što znači da u svakom trenutku hibridni izmjenjivač ima mogućnost predati najviše 5 kW u mrežu ili isto toliko pohraniti u baterije.

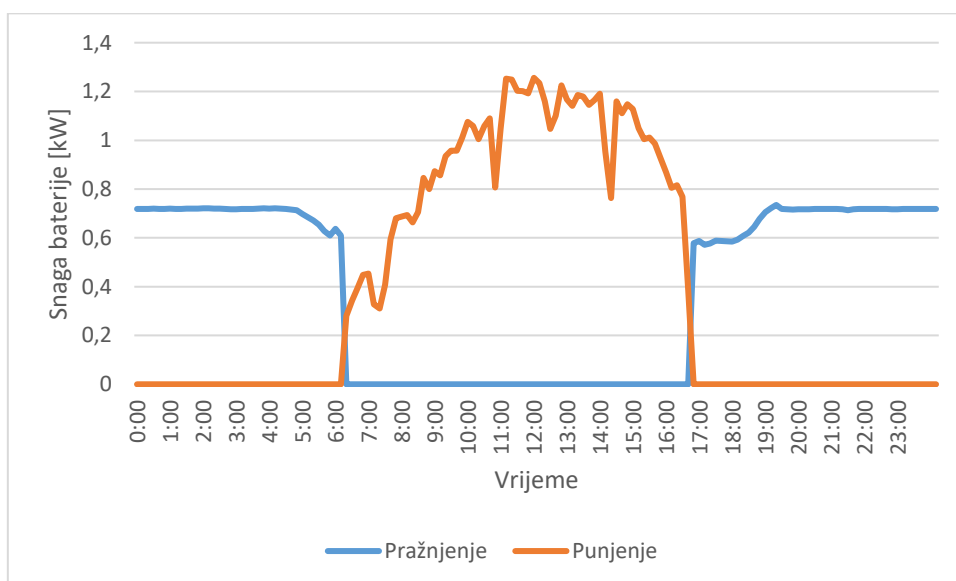
Kako bi se pravilno upravljalo sustavom pohrane, potrebno je prvo poznavati opterećenje kroz priključni vod, odnosno potrebno je znati kada će mikromreža predavati, a kada preuzimati električnu energiju iz vanjske mreže. Osim toga potrebno je znati i proizvodnju iz fotonaponskih modula koji su priključeni na hibridni izmjenjivač.



Slika 4.15. Usporedba proizvodnje i potrošnje

Na slici 4.15. narančastom krivuljom je prikazana proizvodnja iz hibridnog izmjenjivača H1, dok je plavom linijom prikazana promjena toka snage kroz priključni vod. Vidi se kako se javlja povrat električne energije kada je prisutna proizvodnja iz fotonaponske elektrane. Stoga, se može zaključiti kako će se sva proizvodnja iz ovog hibridnog izmjenjivača nastojati pohraniti u baterije, dok će se u trenucima kada nema proizvodnje ta pohranjena energija trošiti.

Na slici 4.16. se vidi snage punjenja i pražnjenja baterije. Iz nje se lakše da uočiti kada je prisutan povrat električne energije u mrežu.



Slika 4.16. Usporedba snage punjenja i snage pražnjenja

## **5. SIMULACIJSKI DIO**

### **5.1. Usporedba utjecaja referentnog stanja mikromreže i mikromreže s integriranim elektranama na okolnu mrežu**

U simulacijskom dijelu će se prvo simulirati i analizirati referentno stanje sustava, odnosno stanje kod kojeg u mikromreži neće biti priključen niti jedan proizvođač. Ta mikromreža će se sastojati samo od potrošača, tj. bit će pasivna. TimeSweep analizom će se odrediti utjecaj samih potrošača na naponske prilike, te će se odrediti kolika količina energije u svakom trenutku ulazi u mikromrežu.

Dodavanjem proizvodnih jedinica mreža postaje aktivna, te će se za takvu odrediti utjecaj integracije, odnosno odredit će se promjena naponskih stanja u mreži, te promjena tokova snaga.

Za oba slučaja bit će odrađeni pokusi za zimski, ljetni i proljetni period, te će za svaki biti odrađen radni i vikend dan. Najviše će se promatrati promjena napona na priključku mikromreže, odnosno napon na sabirnici SPMO, te utjecaj na niskonaponsku sabirnicu distribucijske mreže kako bi se odredio utjecaj na cjelokupnu vanjsku mrežu. Opterećenje će se promatrati na priključnom vodu kako bi se odredili tokovi snaga, odnosno kako bi se ustanovilo kada i koliko električne energije mikromreža predaje u distribucijski sustav i obratno.

### 5.1.1. Ljetni radni dan



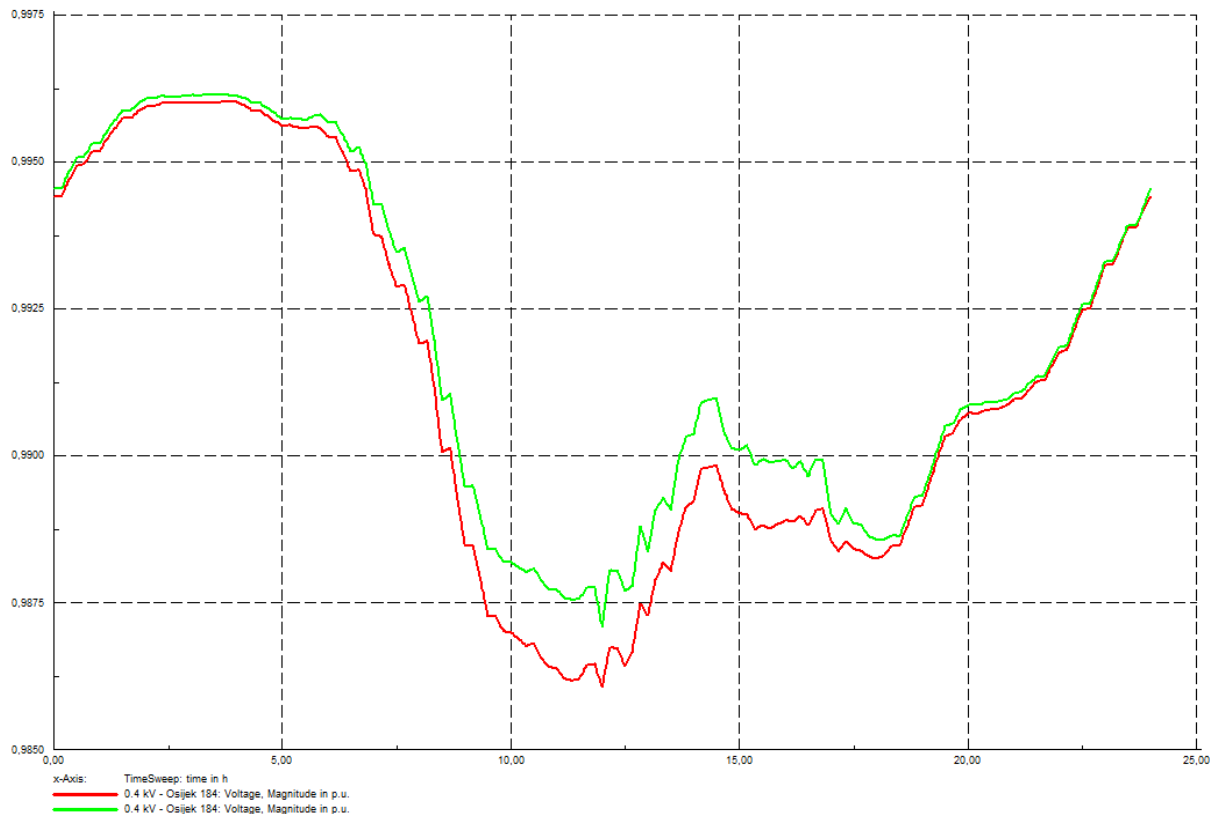
*Slika 5.1. Promjena napona na sabirnici SPMO (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

Na slici 5.1. je prikazana promjena napona tijekom ljetnog radnog dana na priključnoj točki mikromreže, sabirnici SPMO. Crvenom bojom je označen referentni slučaj. Da se primijetiti kako je napon najviši u trenucima kada je opterećenje minimalno, a iznosi približno 0.99 p.u. Najniži napon je očekivano u trenutku najvećeg opterećenja u podnevnim satima, gdje se on spušta na 0.97 p.u.

Kao što je objašnjeno u poglavlju 3.2.1. integracijom distribuirane proizvodnje dolazi do povećanja napona. To povećanje napona je prikazano zelenom krivuljom. Ta krivulja više ne prati potrošnju u mreži nego je ona najviše određena proizvodnjom iz fotonaponske elektrane i vjetroagregata. Vidi se kako se napon stabilizira, te kako se dnevne promjene napona smanjile. Najveća razlika napona je očekivano u razdoblju u kojem je prisutna velika proizvodnja iz fotonaponske elektrane. U razdobljima kada nema proizvodnje iz FNE, napon je nešto veći od napona referentnog stanja, a razlog tome je taj što je proizvodnja iz vjetroagregata prisutna tokom cijelog dana.

Na slici 5.2. je prikazana promjena napona na 0.4 kV sabirnici distribucijske mreže. Primjećuje se kako je proizvodnja u mikromreži podigla napon, međutim gotovo neznačajno. Najveća

promjena napona iznosi tek 0.006 p.u. Razlog tako male promjene napona je taj što je mikromreža priključena na krutu mrežu. Kruta mreža je ona mreža koja je električni dovoljno jaka, te samim time ima konstantan (čvrst) napon i frekvenciju, Pa se dodavanjem proizvodnje kod takvih mreža ne djeluje pretjerano na njih.



*Slika 5.2. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

Osim na napon, integracija distribuiranih izvora utječe i na opterećenje, odnosno na tokove snaga unutar same mreže. U prethodnim poglavljima je objašnjeno da se tokovi snaga dodavanjem distribuirane proizvodnje mogu smanjiti ili promijeniti smjer.

Na slici 5.3. su prikazani tokovi snaga u priključnom vodu mikromreže. Iz nje se vidi kako se integracijom (zeleno krivulja) smanjuje potreba za korištenjem električne energije iz vanjske mreže, odnosno vidi se kako je proizvodnja u mikromreži gotovo i dovoljna za opskrbu potrošnje u istoj. Osim toga se vidi kako se u razdoblju oko 15:00 h, kada se opterećenje smanjuje, a i dalje je prisutna sunčeva energija, pojavljuje uzlazni tok snage, odnosno mikromreža predaje električnu energiju vanjskoj mreži.





*Slika 5.3. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

Analizom prethodnih slika za ljetni radni dan se vidi kako integracija elektrana pozitivno utječe na naponske prilike i tokove snaga. Naponi niti u jednom trenutku ne premašuju dozvoljenu granicu od 1.1 p.u., štoviše napon se stabilizirao te se približio nazivnoj vrijednosti od 1 p.u. Osim toga ostvarena je proizvodnja koja gotovo da može opskrbiti cijelu potrebu za električnom energijom.

### **5.1.2. Ljetni vikend dan**

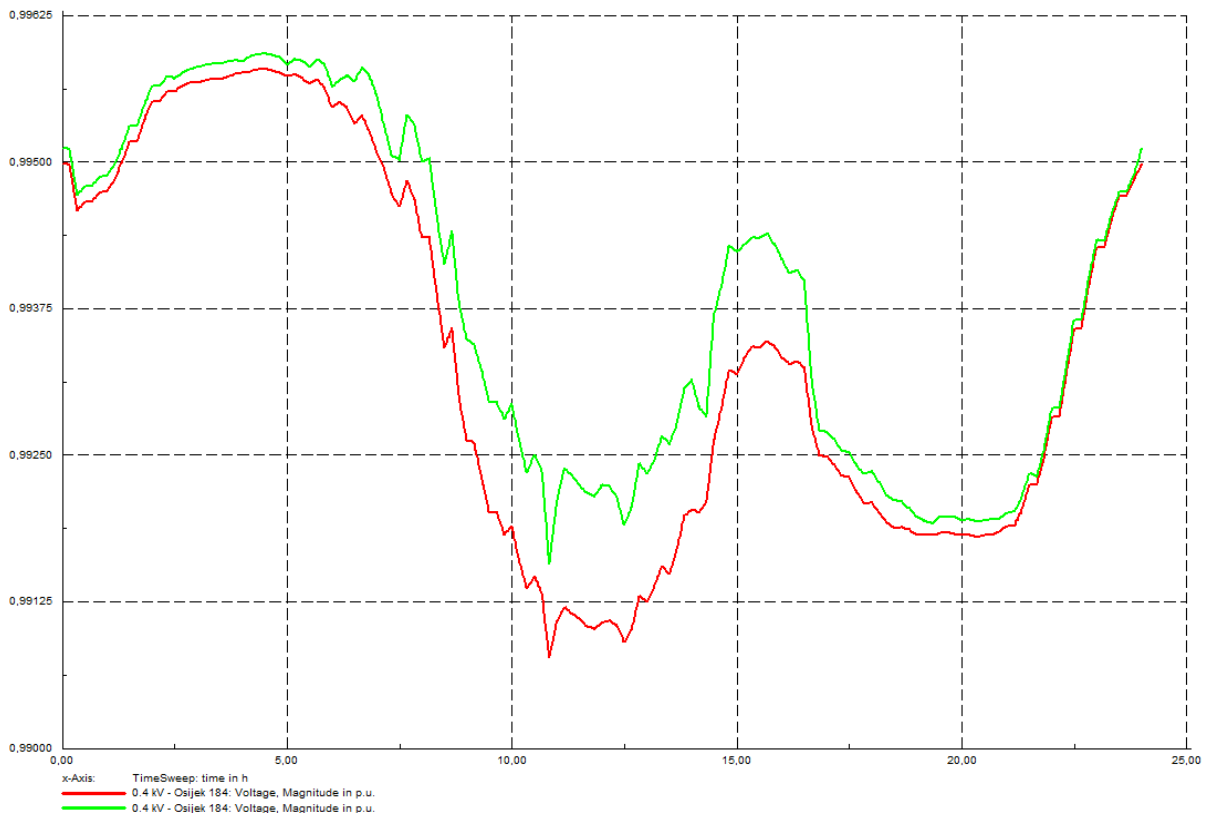
Ljetni vikend dan karakterizira velika proizvodnja iz fotonaponske elektrane i niska potrošnja u mikromreži. Kod takvog slučaja se može očekivati jako velik porast napona na sabirnicama elektrane i priključnoj sabirnici SPMO. Osim toga za očekivati je i uzlazni tok snage u trenucima kada je sunčeva energija prisutna. Naponske prilike za referentni slučaj (crvena krivulja) i za slučaj s integriranom elektranom (zelena krivulja) na priključnoj sabirnici su prikazane na slici 5.4.



*Slika 5.4. Promjena napona na sabirnici SPMO (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

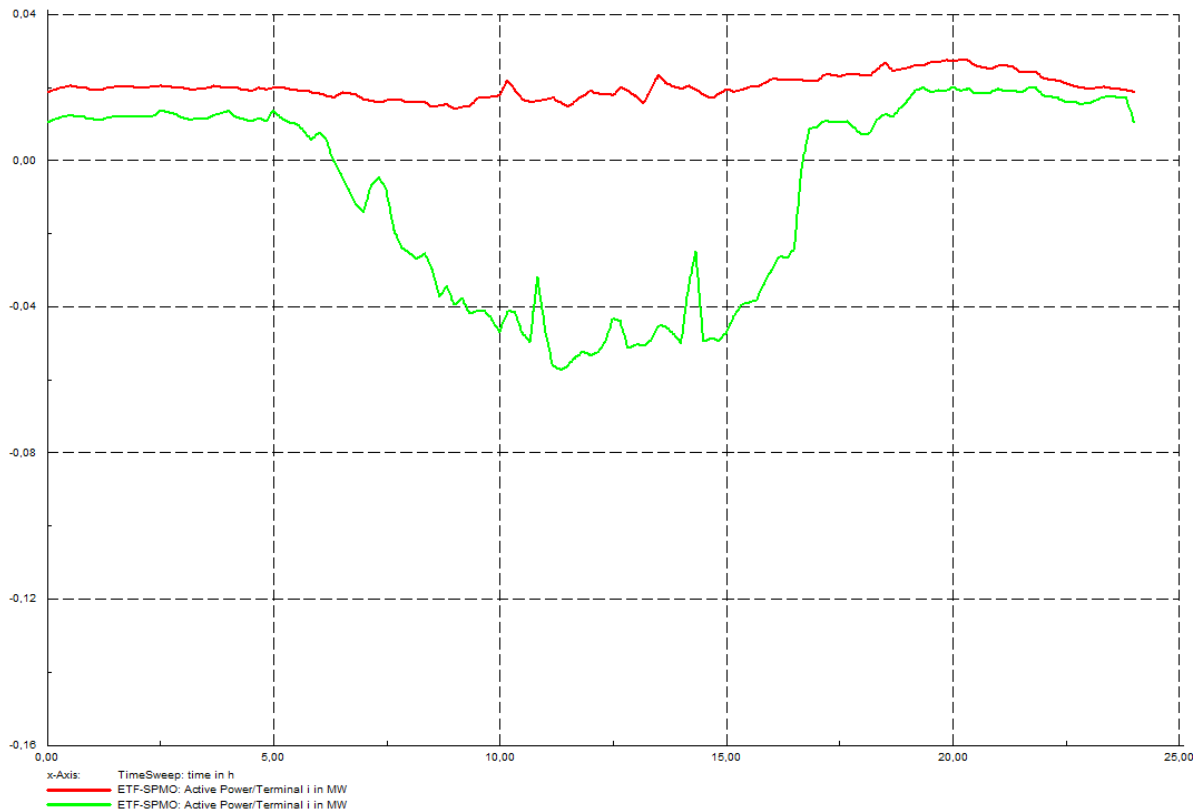
Napon se na priključnoj sabirnici prije integracije gotovo pa ne mijenja. Razlog tomu je taj što se i samo opterećenje ne mijenja. Međutim, integracijom elektrane napon naglo skače u trenutku kada postoji dovoljna količina sunčeve energije za fotonaponsku pretvorbu. U trenucima najveće sunčeve ozračenosti napon se kreće oko 1.005 p.u.

Osim na naponske prilike na priključnoj sabirnici, integracija elektrane kao i kod prethodnog slučaja utječe i na naponske prilike u vanjskoj mreži. Budući da se radi o vikendu, te manjem opterećenju ne samo u zgradi fakulteta nego i kod okolnih potrošača, mogu se očekivati viši naponi i veće razlike napona nego u slučaju bez integrirane elektrane. Međutim ta promjena napona neće biti pretjerano velika zbog spoja mikromreže na krutu mrežu. Te naponske promjene se mogu vidjeti na slici 5.5. Najveća razlika napona se dogodila u podne, a iznosi 0,00125 p.u.



Slika 5.5. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-prije integracije, z-nakon integracije)

Na slici 5.6. je prikazana dnevna promjena snage za oba slučaja. Kao što je već objašnjeno, zbog visoke proizvodnje i niskoga opterećenja u mikromreži, za očekivati je predaju jako velike količine snage u vanjsku mrežu. Vidi se kako je u razdoblju od 06:00 h i 16:00 h prisutna stalna predaja viška električne energije vanjskoj mreži.

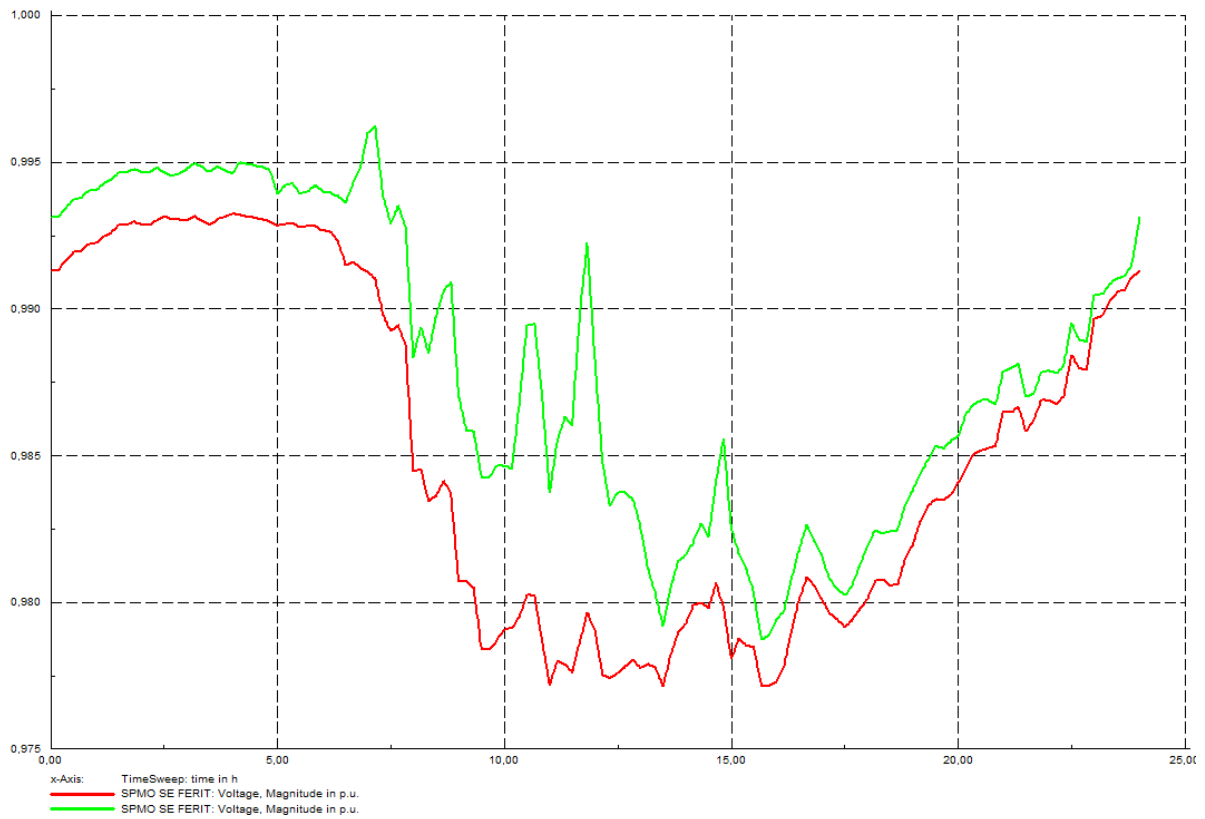


Slika 5.6. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-prije integracije, z-nakon integracije)

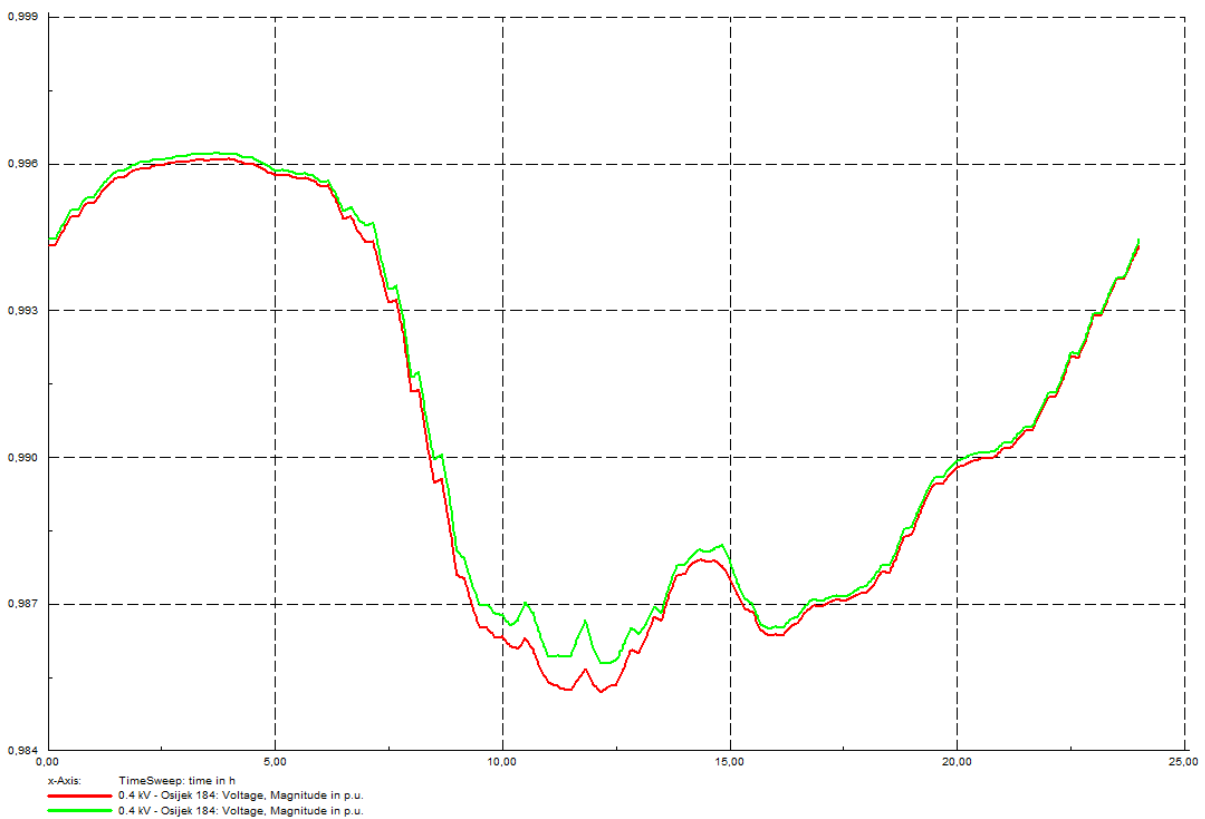
### 5.1.3. Proljetni radni dan

Kao što se vidi na slici 4.11., proljetna proizvodnja iz fotonaponske elektrane je daleko manja od ljetne proizvodnje. Osim toga ona nije konstantna, javljaju se jako velike oscilacije u proizvodnji što će znatno utjecati na oscilacije napona unutar mikromreže. Također se primjećuje kako je vrijeme proizvodnje dosta kraće u odnosu na ljetno vrijeme, jer je dan postao dosta kraći. Osim smanjenja proizvodnje, smanjuje se i opterećenje u mikromreži u odnosu na ljetno opterećenje.

Iz slike 5.7. se vidi kako se integriranjem elektrana povećava napon, međutim taj napon je dosta nepredvidljiv uzrokovan nepredvidljivom proizvodnjom. Najveća promjena napona iznosi 0.015 p.u., a ona se događa u podne, kada proizvodnja doseže svoj vrhunac.

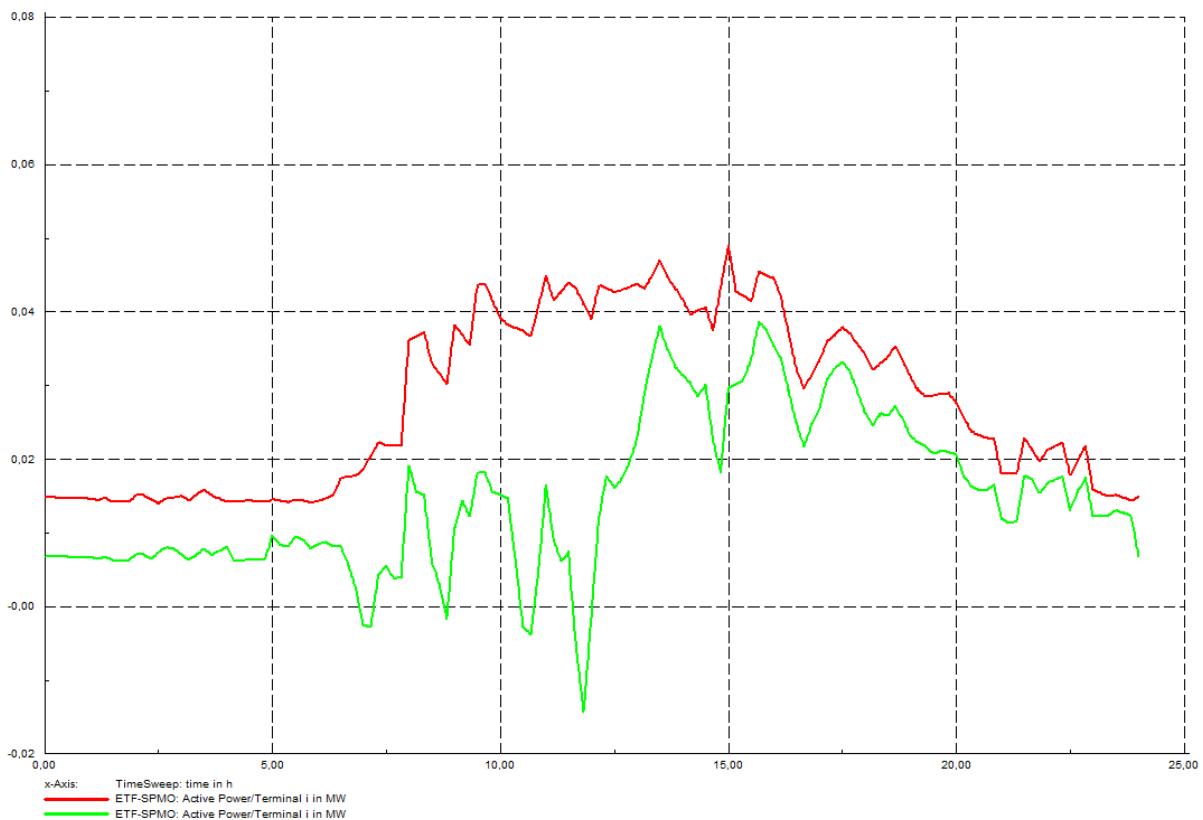


Slika 5.7. Promjena napona na sabirnici SPMO (c-prije integracije, z-nakon integracije)



Slika 5.8. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-prije integracije, z-nakon integracije)

Iz slike 5.8. se vidi kako je utjecaj na napon vanjske mreže gotovo nikakav. Javlja se mala promjena napona uzrokovana kratkotrajnim vrhuncem proizvodnje koji se desio u podne. U svim ostalim trenucima napon ostaje nepromijenjen.



Slika 5.9. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-prije integracije, z-nakon integracije)

Iz slike 5.9. se da vidjeti kako i uz malu proizvodnju iz fotonaponske elektrane moguće zadovoljiti potrebe opterećenja za proljetni radni dan. Vidi se kako i vjetroagregat u razdoblju od ponoći do 06:00 h gotovo da i proizvodi dovoljnu količinu električne energije potrebnu za opskrbu trenutnog opterećenja. Osim toga javlja se i jako kratkotrajan uzlazni tok električne energije. Međutim odmah nakon toga se javlja manjak proizvodnje pa je potrebno uzeti veliku količinu električne energije iz mreže.

#### 5.1.4. Proljetni vikend dan

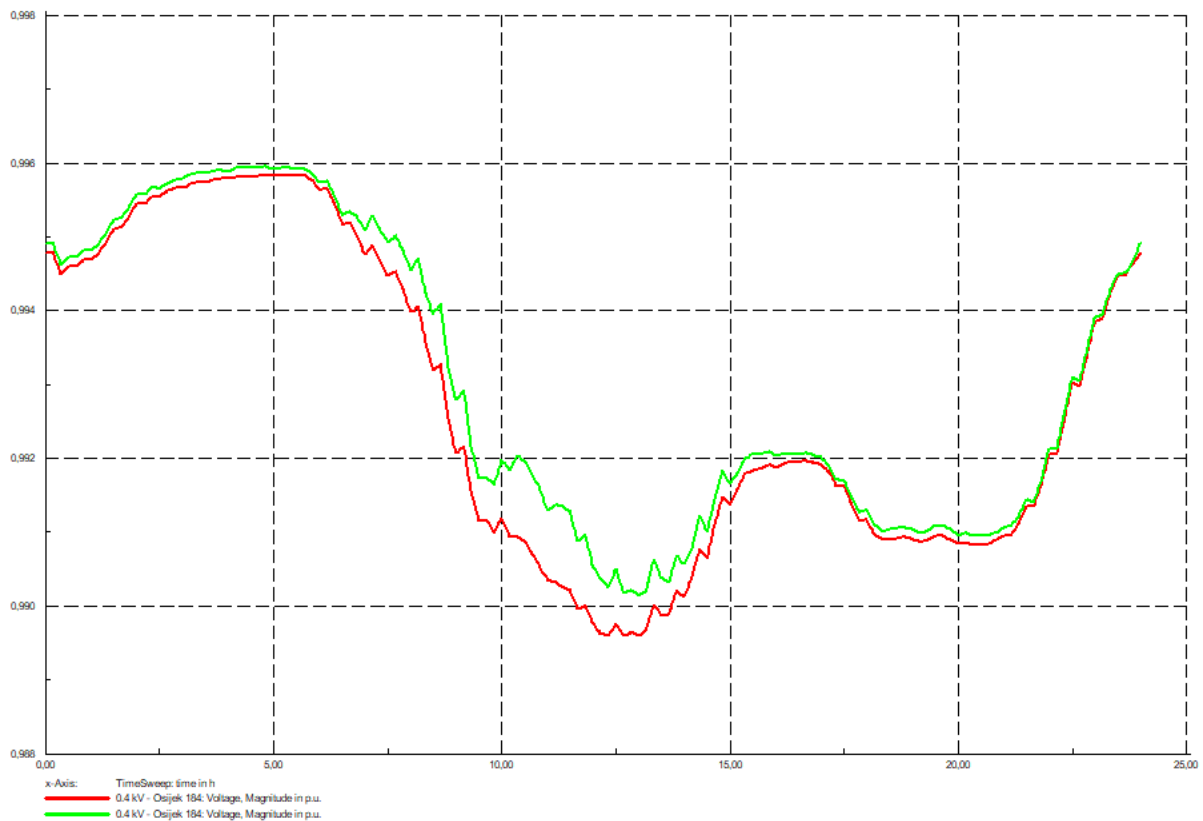
Proljetni vikend dan kao i svaki drugi vikend dan u mikromreži FERIT 1 karakterizira niska i gotovo nepromjenjiva potrošnja. Budući da tijekom proljeća postoji određena količina sunčeve energije koja se može koristiti za očekivati je određen porast napona prilikom integracije fotonaponske elektrane. Osim toga, doći će i do predaje električne energije u mrežu, ali ne u tolikim razmjerima kao kod ljetnog vikend dana.

Na slici 5.10. je prikazana promjena napona na priključnoj sabirnici. Vidi se kako je napon prije integracije gotovo i nepromjenjiv zbog nepromjenjivog opterećenja. Dodavanjem integracije napon u trenucima visoke proizvodnje se povećava na vrijednosti iznad 1 p.u. Najveća promjena napona se desila u podne, a iznosi gotovo 0.1 p.u.



*Slika 5.10. Promjena napona na sabirnici SPMO (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

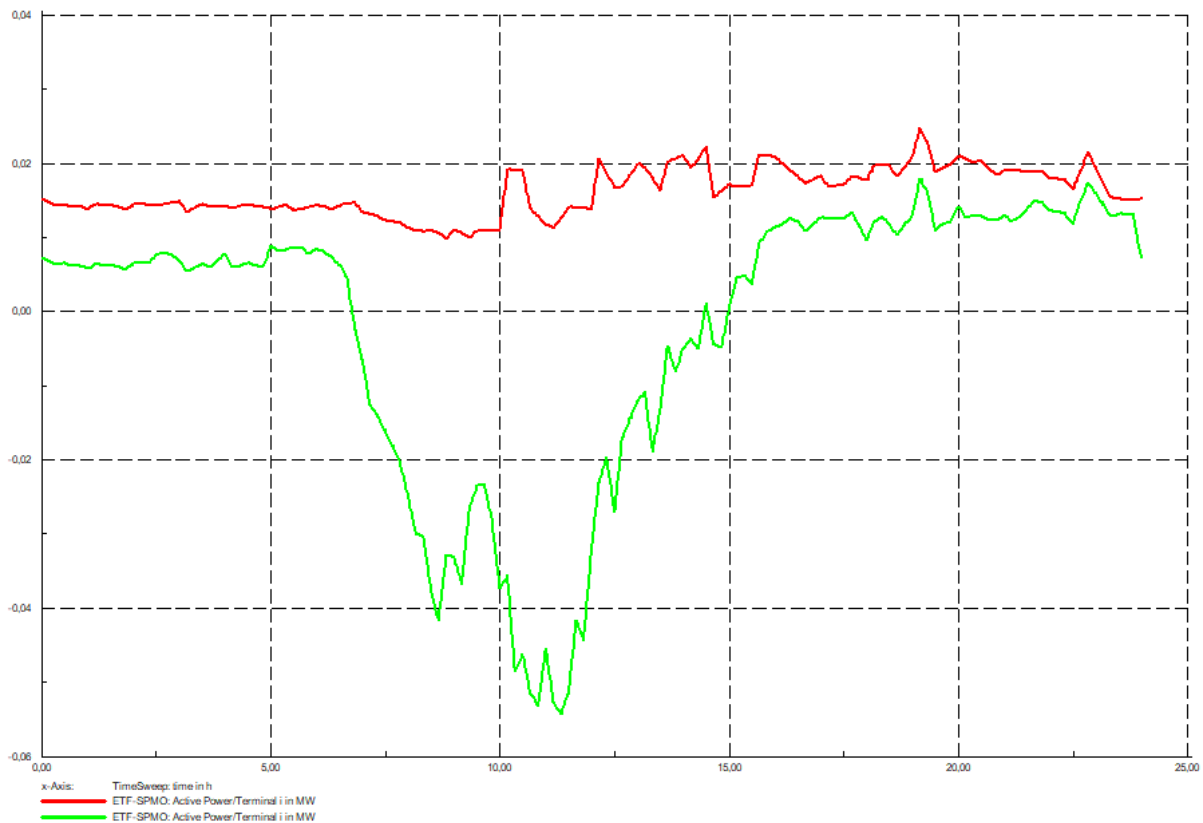
Kako je utjecaj na priključnu sabirnicu dosta velik, za očekivati je barem mali utjecaj i na napon vanjske mreže. Tako se na slici 5.11. može vidjeti kako je napon na niskonaponskoj sabirnici distribucijske mreže nakon integracije porastao u trenucima kada je prisutna velika proizvodnja. Najveća razlika napona iznosi otprilike 0.001 p.u, što je i dalje gotovo pa neznčajno.



*Slika 5.11. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

Na slici 5.12. se može uočiti kako je od 06:00 h do 15:00 h stalno prisutna predaja električne energije iz mikromreže u vanjsku. Iz toga se da zaključiti kako je fotonaponska elektrana dimenzionirana da i tokom proljetnih vikend dana bude gotovo i neovisna o vanjskoj mreži. Osim toga, vidi se kako je proizvodnja iz vjetroagregata u noćnim satima također dimenzionirana da pokrije gotovo cijelu potrošnju.

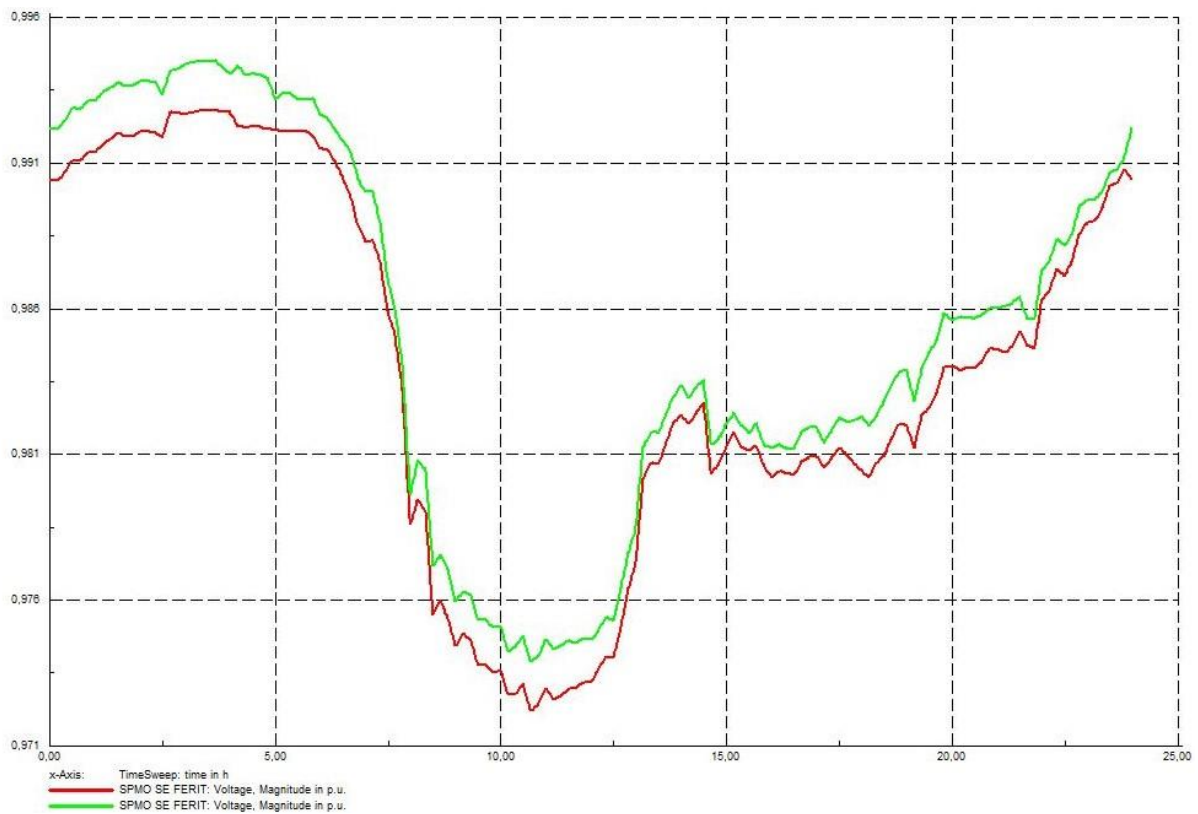




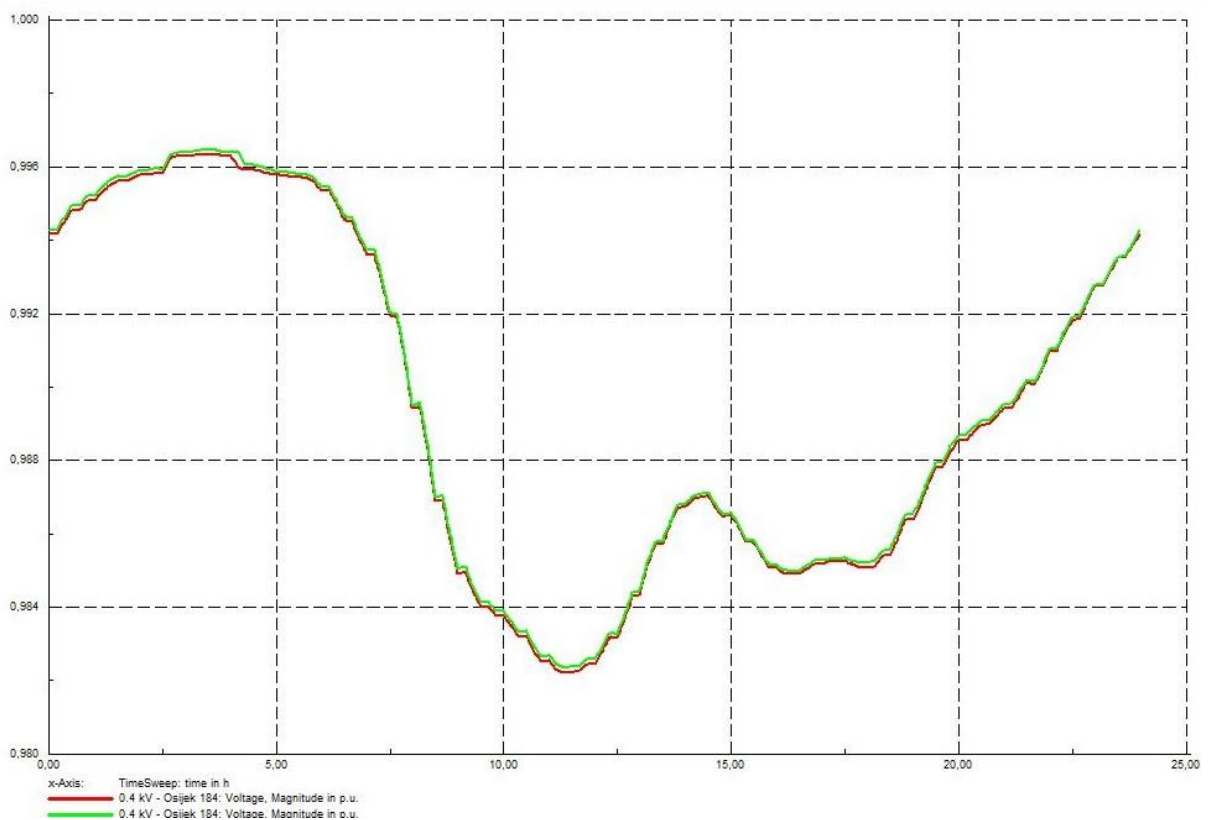
Slika 5.12. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-prije integracije, z-nakon integracije)

### 5.1.5. Zimski radni dan

Zimske dane karakterizira jako niska, gotovo nikakva proizvodnja iz fotonaponske elektrane pa će zbog toga utjecaj integracije biti dosta nizak. Napon će se neznatno povećati, najviše zbog prisustva vjetroagregata. To se može vidjeti na slici 5.13. Vidi se kako je napon kao i u prethodnim slučajevima najviši u noćnim satima iza ponoći, te kako on opada povećanjem opterećenja. Međutim kao što se vidi na slici 4.4., opterećenje na fakultetu opada na minimum već nakon 13:00 h pri čemu se napon povećava. Vidi se kako se napon integracijom neznatno promijenio, najveća promjena nastaje oko 10:00 h u iznosu od 0.001 p.u.

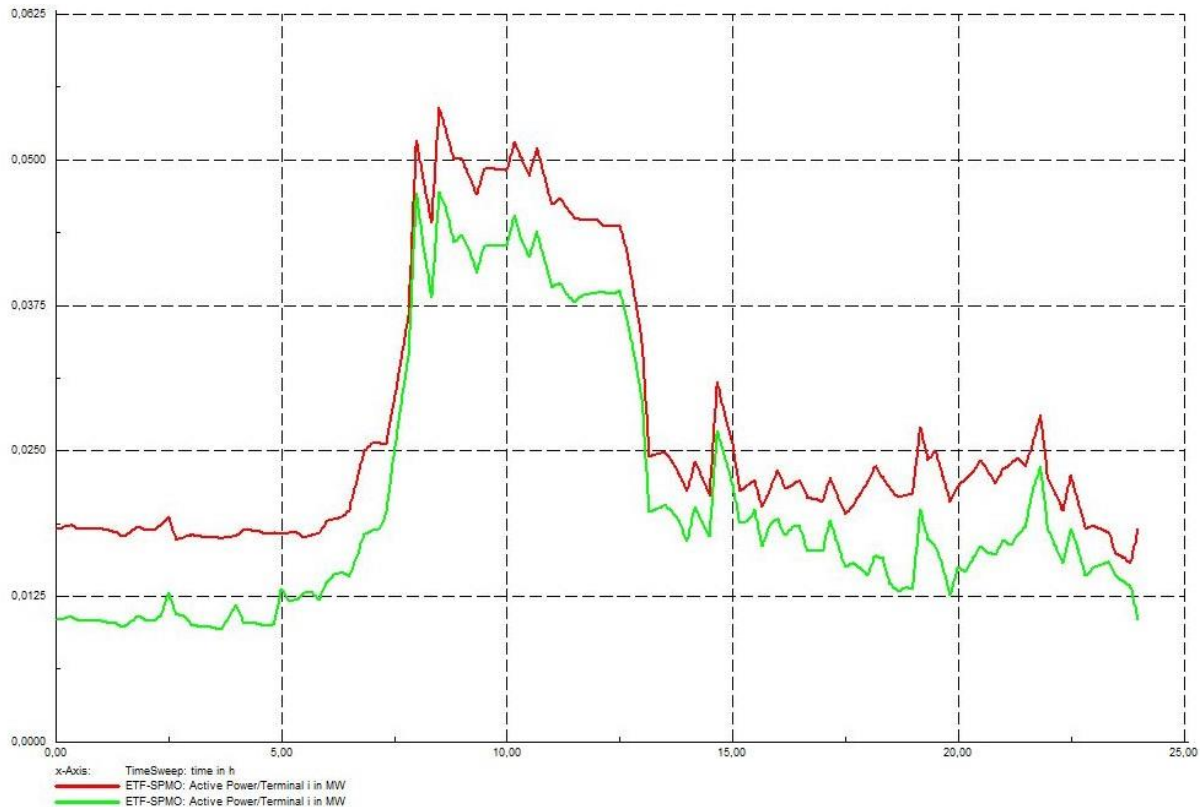


Slika 5.13. Promjena napona na sabirnici SPMO (c-prije integracije, z-nakon integracije)



Slika 5.14. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-prije integracije, z-nakon integracije)

Na slici 5.14 je prikazana promjena napona na niskonaponskoj sabirnici distribucijske mreže. Na njoj se može vidjeti kako napon ostaje gotovo ne promijenjen, odnosno integracija fotonaponske elektrane nema utjecaja na napon vanjske mreže, jer nema nikakve proizvodnje.

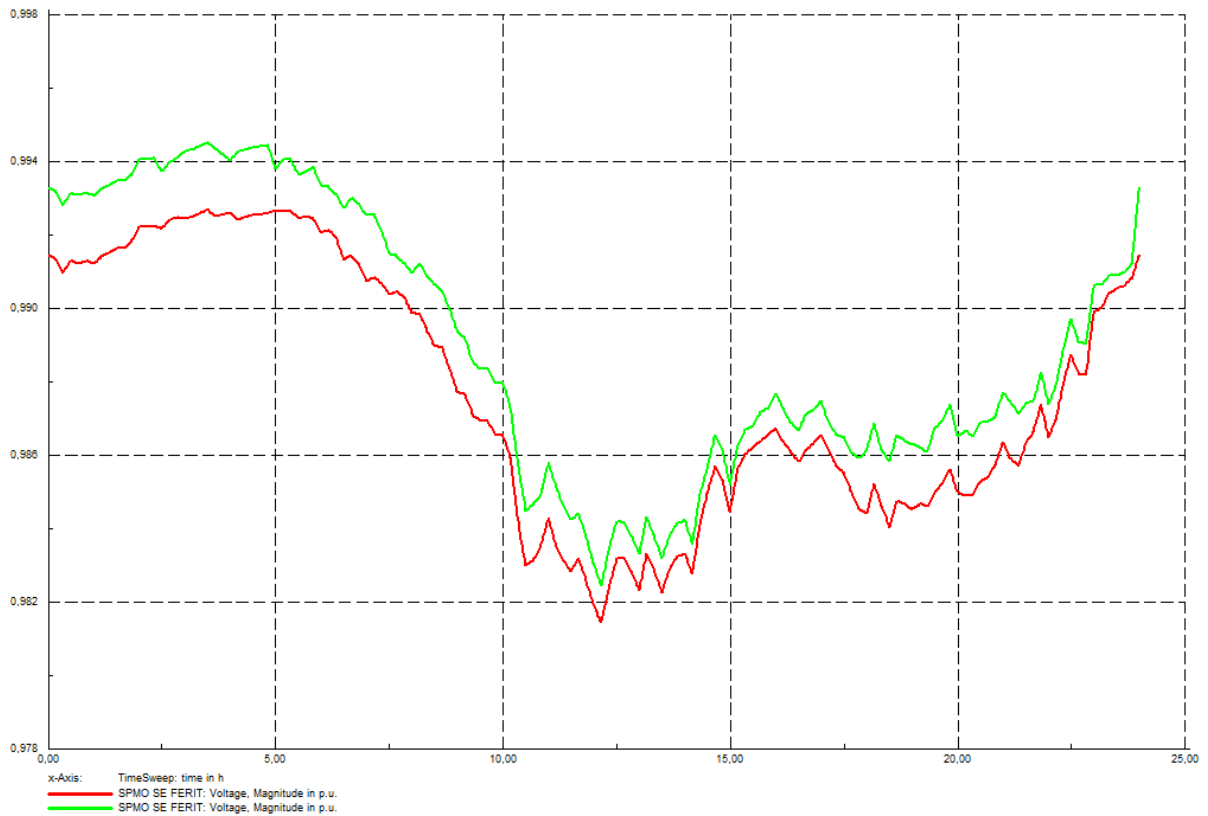


Slika 5.15. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-prije integracije, z-nakon integracije)

Slika 5.15. pokazuje tokove snaga kroz priključni vod. Vidi se smanjenje tokova snaga, odnosno dio opterećenja se opskrbljiva iz distribuiranih izvora, međutim to smanjenje je jako malo. Najveće smanjenje toka snage iznosi 6 kW, što odgovara snazi vjetroagregata.

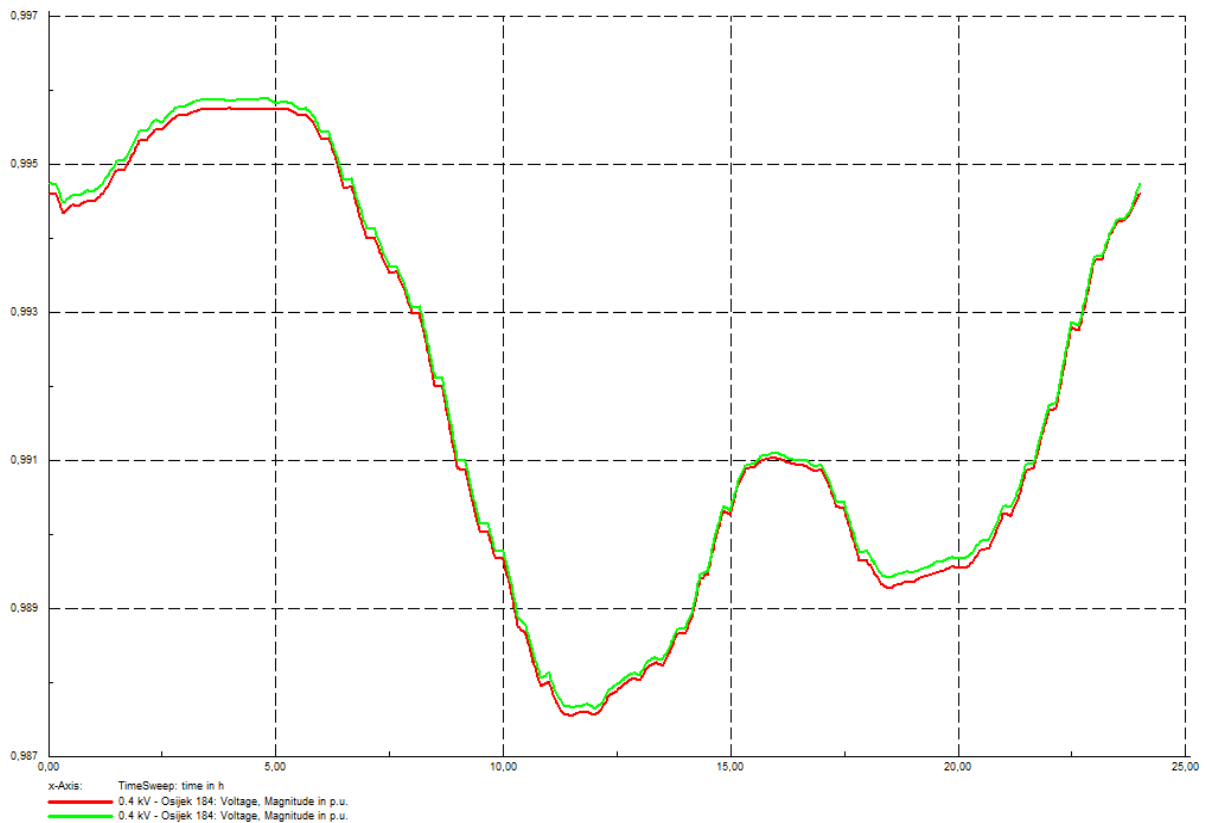
### 5.1.6. Zimski vikend dan

Utjecaj rada mikromreže na vanjsku mrežu za zimski vikend dan bi trebao biti sličan kao i radni dan, budući da u oba slučaja nije bilo proizvodnje. Razlika će bit samo u opterećenju na priključnom vodu, zbog manje potrošnje mikromreže za vikend, što bi trebalo dovesti do nešto većeg napona. Utjecaj napona na priključnoj sabirnici SPMO je prikazan na slici 5.16. Vidi se kako je utjecaj prisutan, ali promjena napona jako malo, najveća promjena iznosi 0.002 p.u.



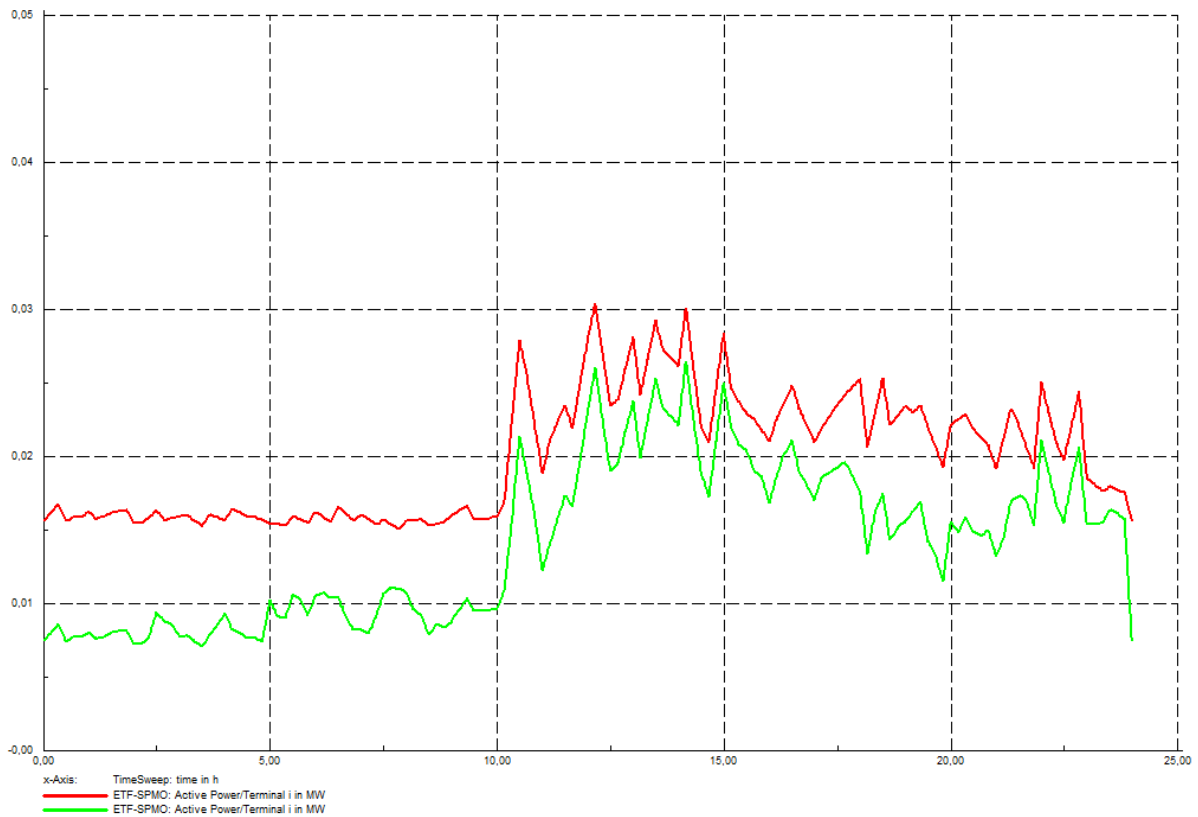
*Slika 5.16. Promjena napona na sabirnici SPMO (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

Budući da je utjecaj integracije elektrana na napon priključne sabirnice dosta malen, može se očekivati i još manji utjecaj na napon cijele distribucijske mreže. To se da vidjeti na slici 5.16. Napon i prije i poslije integracije ostaje gotovo nepromijenjen.



*Slika 5.17. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-prije integracije, z-nakon integracije)*

Isto tako, promjena opterećenja će biti neznatna. Na slici 5.18. se vidi kako proizvedena snaga nije ni približno dovoljna za zadovoljenje potreba zgrade fakulteta, iako je opterećenje kroz cijeli dan veoma nisko. Međutim vidi se kako se u trenucima niske potrošnje u ranim jutarnjim satima, opterećenje kroz priključni vod smanjilo za 50%, odnosno s 0.015 MW se smanjilo na 0.0075 MW. Za to smanjenje je zaslužan vjetroagregat.

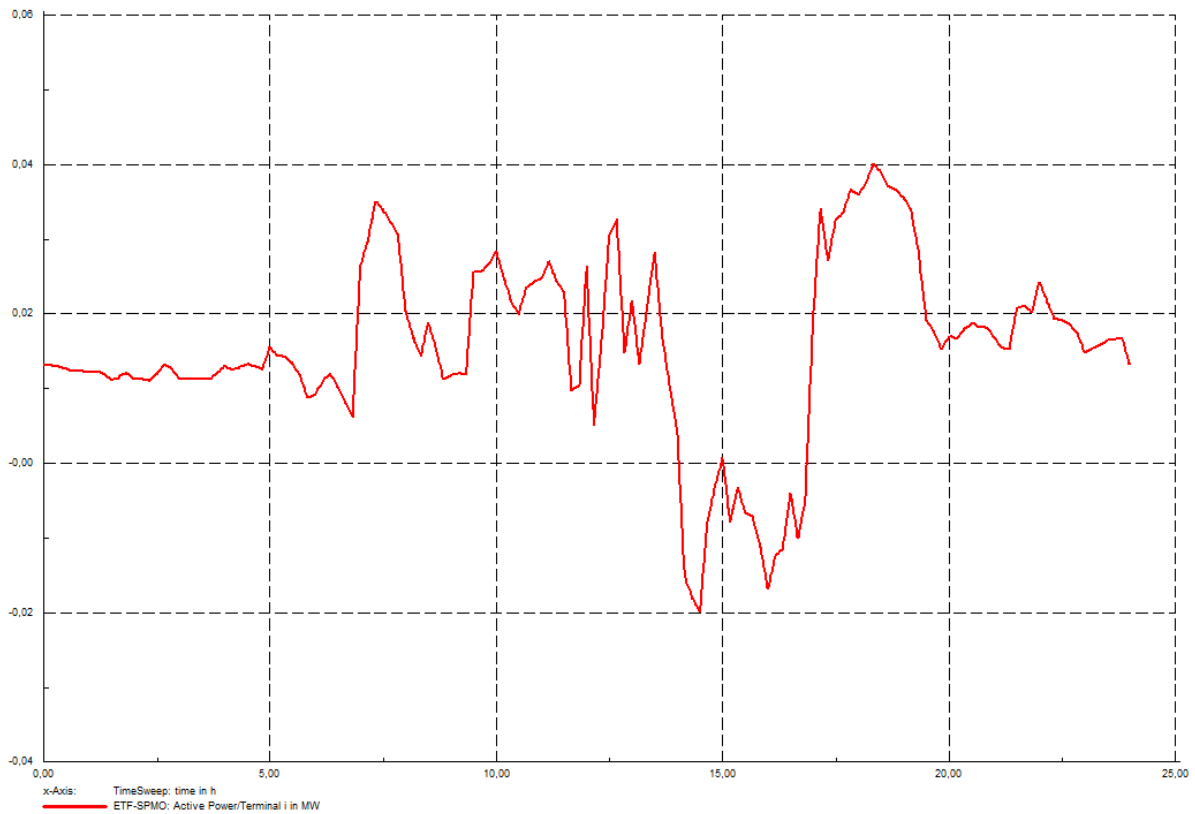


Slika 5.18. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-prije integracije, z-nakon integracije)

## 5.2. Usporedba utjecaja na mrežu sa i bez sustava za pohranu energije

Kao što je već objašnjeno, sustav za pohranu energije u mikromrežama ima smisla samo u trenucima kada je proizvodnja veća od potrošnje, odnosno samo onda kada baterija ima što pohraniti. Takav slučaj u mikromreži FERIT 1 se najčešće dešava u ljetnom razdoblju, jer tada imamo najviše Sunca, odnosno najviše proizvedene električne energije. Zbog toga će se u ovom poglavlju razmatrati utjecaj na mrežu sa i bez baterije samo za ljetni radni i vikend dan.

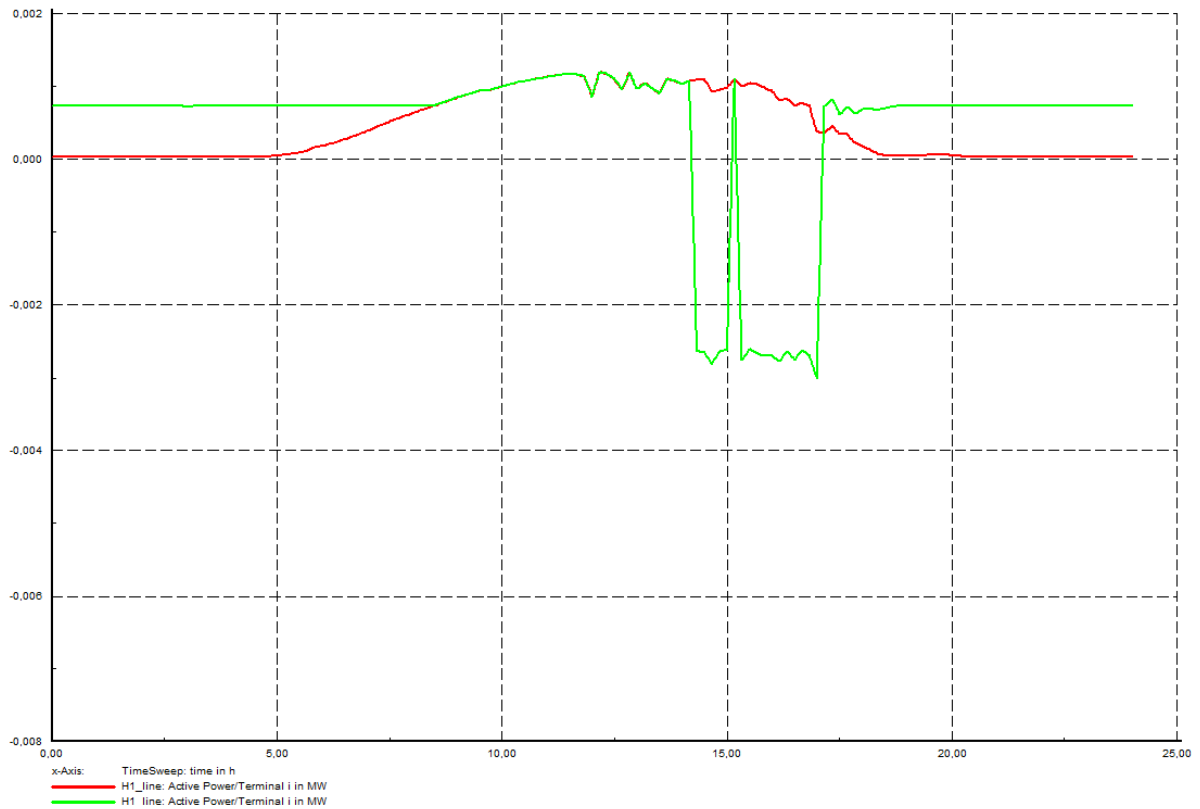
### 5.2.1. Ljetni radni dan



*Slika 5.19. Promjena opterećenja kroz priključni vod za slučaj bez baterije*

Na slici 5.19. je prikazano opterećenje priključnog voda prije dodavanja sustava za pohranu električne energije. Vidi se kako povrat električne energije u sustav postoji u vremenu oko 15:00 h. U tom intervalu će baterija nastojati pohraniti svu električnu energiju, te ju iskoristiti u trenucima većeg opterećenja.

Prije dodavanja sustava za pohranu električne energije, izmjenjivači su svu svoju proizvedenu energiju u istom trenutku predavali u sustav. Međutim dodavanjem sustava za pohranu, ta električna energija se ne predaje trenutno u sustav, nego se ona prvo pohranjuje pa se troši kada je to potrebno. Na slici 5.20. su prikazane predaje proizvedene električne energije u mikromrežu za slučaj bez sustava za pohranu, te za slučaj sa sustavom za pohranu. Na crvenom dijagramu se vidi kako cijela proizvodnja fotonaponskih panela koji su povezani na taj izmjenjivač predaje u sustav, dok se na zelenom vidi kako u vrijeme oko 15:00 h dolazi do pohranjivanja električne energije koja se troši u trenucima kada nema proizvodnje. Pohranjena električna energija se troši sve dok se baterija ne isprazni. U ovom slučaju baterija se ispraznila nešto prije 10:00 h, kada crveni i zeleni dijagram postaju isti.



*Slika 5.20. Tokovi snage hibridnog izmjenjivača (c-bez baterije, z-s baterijom)*

Dodavanje sustava za pohranu električne energije utječe na promjene unutar mikromreže, posebice na napon i opterećenje vodova. Utjecaj na napon je prikazan na slici 5.21.

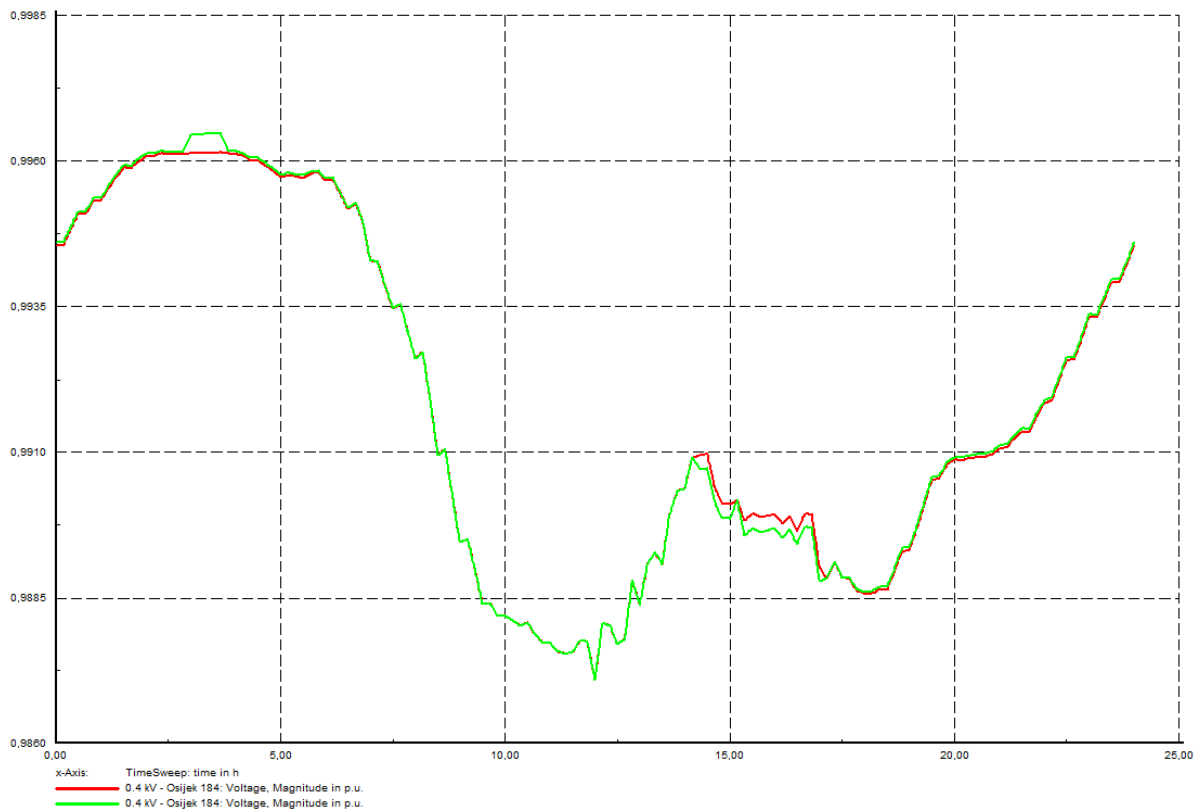




*Slika 5.21. Promjena napona na sabirnici SPMO (c-bez baterije, z-s baterijom)*

Na slici 5.21. se da primijetiti kako se opskrbom opterećenja iz sustava za pohranu energije napon još dodatno podiže. Razlog tome je taj što se za opskrbu tog opterećenja koristi električna energija iz mikromreže, a ne iz distribucijskog sustava. Međutim, u trenucima pohranjivanja električne energije, napon opada, zbog manjih tokova snage unutar same mikromreže.

Osim što dodavanje baterija utječe na mikromrežu, tako i ono utječe i na vanjsku mrežu, iako je utjecaj jako malen zbog priključka na krutu mrežu. Taj utjecaj se može vidjeti na slici 5.21. Na njoj se vidi jednako ponašanje napona kao i na slici 5.20, međutim manjih razmjera.



*Slika 5.22. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-bez baterije, z-s baterijom)*

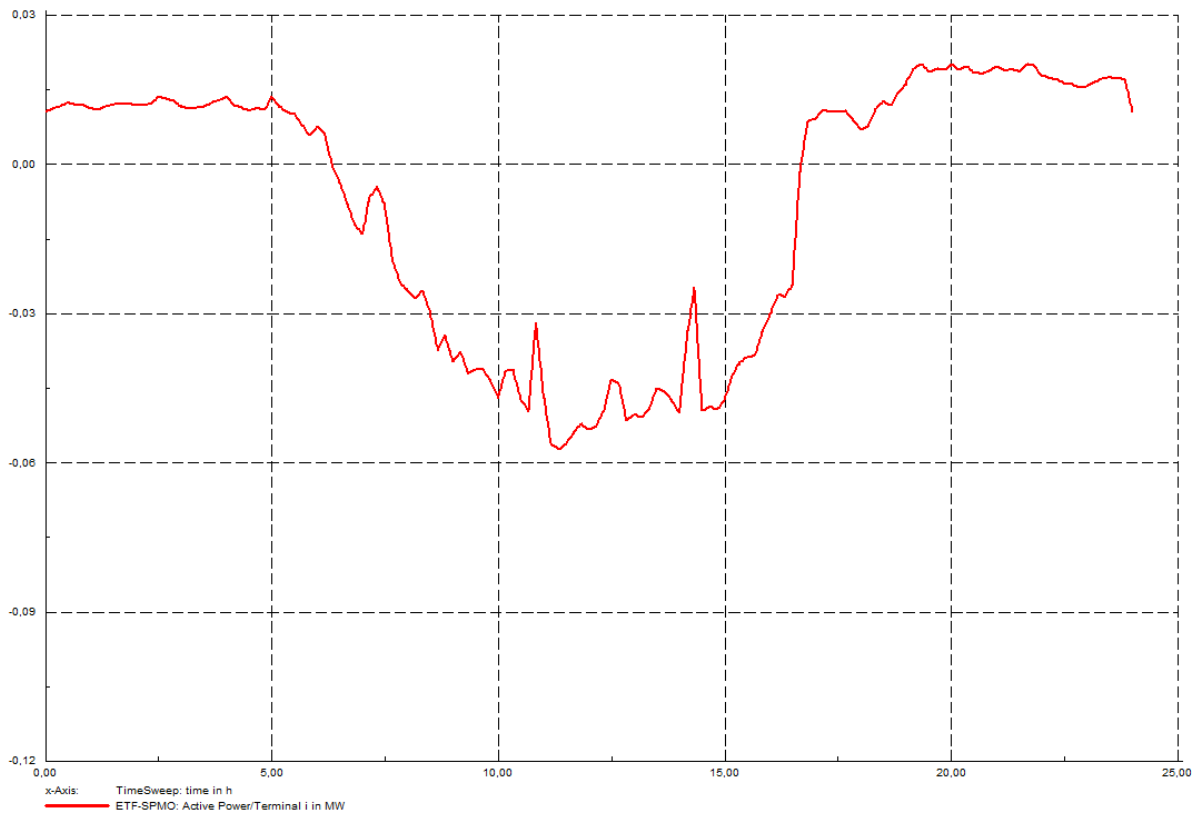
Na slici 5.23. se vidi kako se dodavanjem baterija dnevni dijagram opterećenja nastoji koliko toliko izravnati, odnosno postići konstantnu vrijednost. Međutim za postizanje konstantne vrijednosti potrebne su veće dimenzije baterija. Vidi se kako je potreba za električnom energijom u trenucima kada nema proizvodnje manja, te se vidi kako uzlazni tok električne energije minimalan. Javlja se samo u trenutku kada je baterija potpuno prazna.



*Slika 5.23. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-bez baterije, z-s baterijom)*

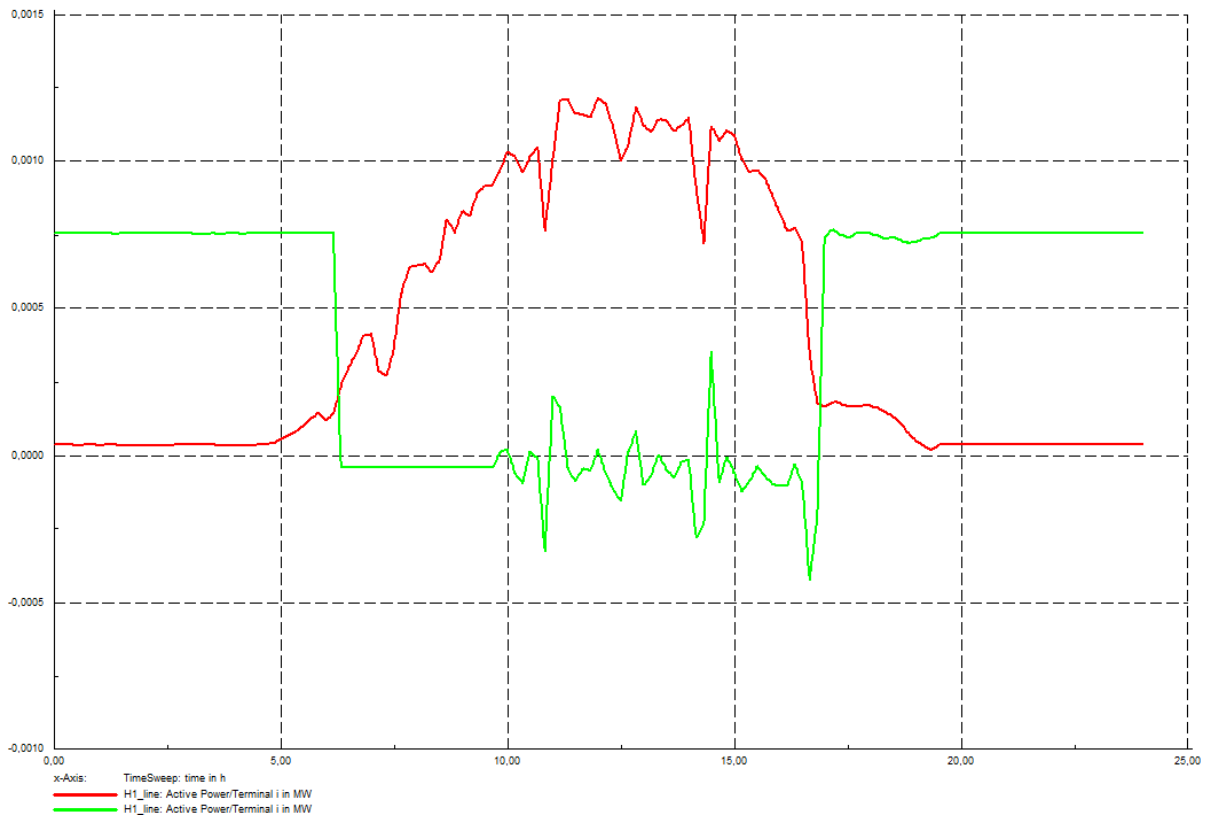
### **5.2.2. Ljetni vikend dan**

Kao što je prethodno objašnjeno, ljetni vikend dan karakterizira velika proizvodnja, a jako mala potrošnja, što znači da će se jako velika količina električne energije predavati u distribucijski sustav. Taj slučaj je prikazan na slici 5.24. Vidi se kako dolazi do predaje električne energije čim se pojavi proizvodnja iz fotonaponskog sustava. Dodavanjem sustava pohrane, vršit će se punjenje u intervalu između 6:00 h i 16:00 h, dok će se u preostalom vremenu ta baterija prazniti.

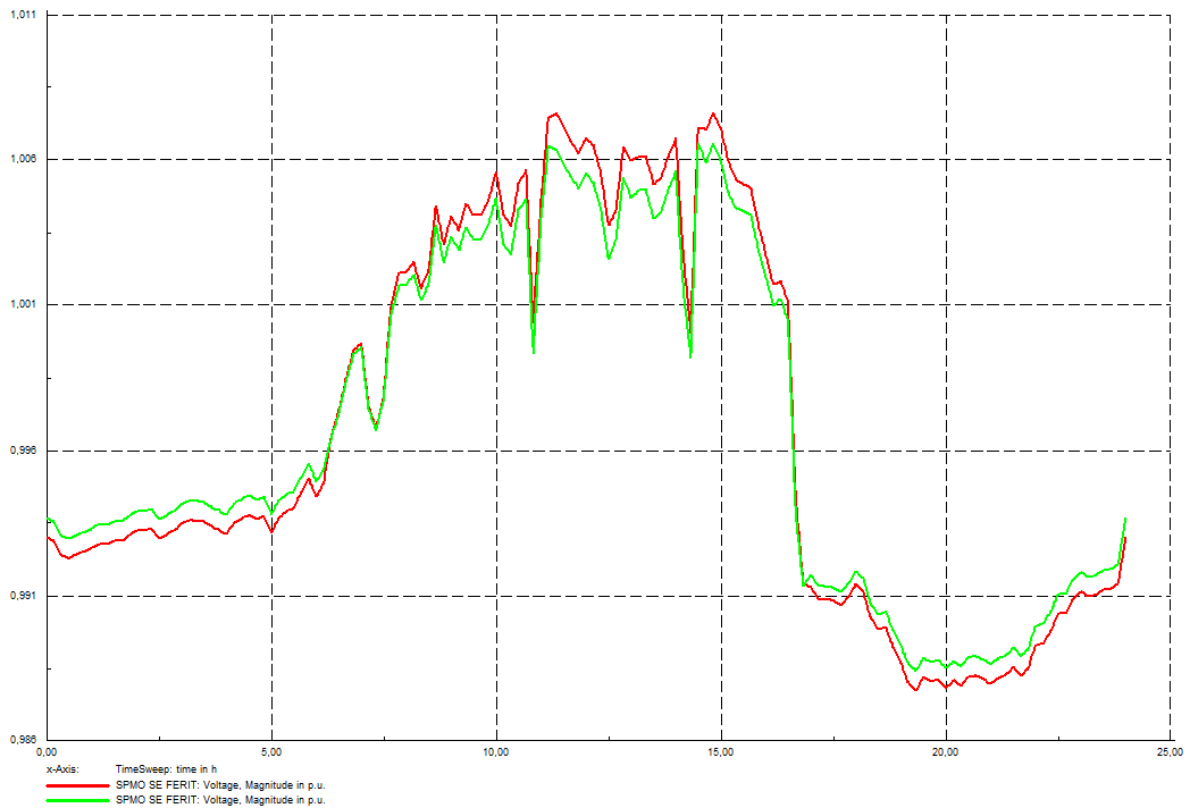


*Slika 5.24. Promjena opterećenja kroz priključni vod za slučaj bez baterije*

Na slici 5.25. crvenim dijagramom je prikazana proizvodnja iz jednog izmjenjivača u slučaju bez sustava pohrane, tako da se sva proizvedena električna energija predaje u mrežu. Zelenim dijagramom je prikazan izlaz iz izmjenjivača kada postoji pohrana električne energije. Vidi se kako se pohranjena električna energija između 06:00h i 16:00 h troši u trenucima kada nema proizvodnje iz fotonaponske elektrane.

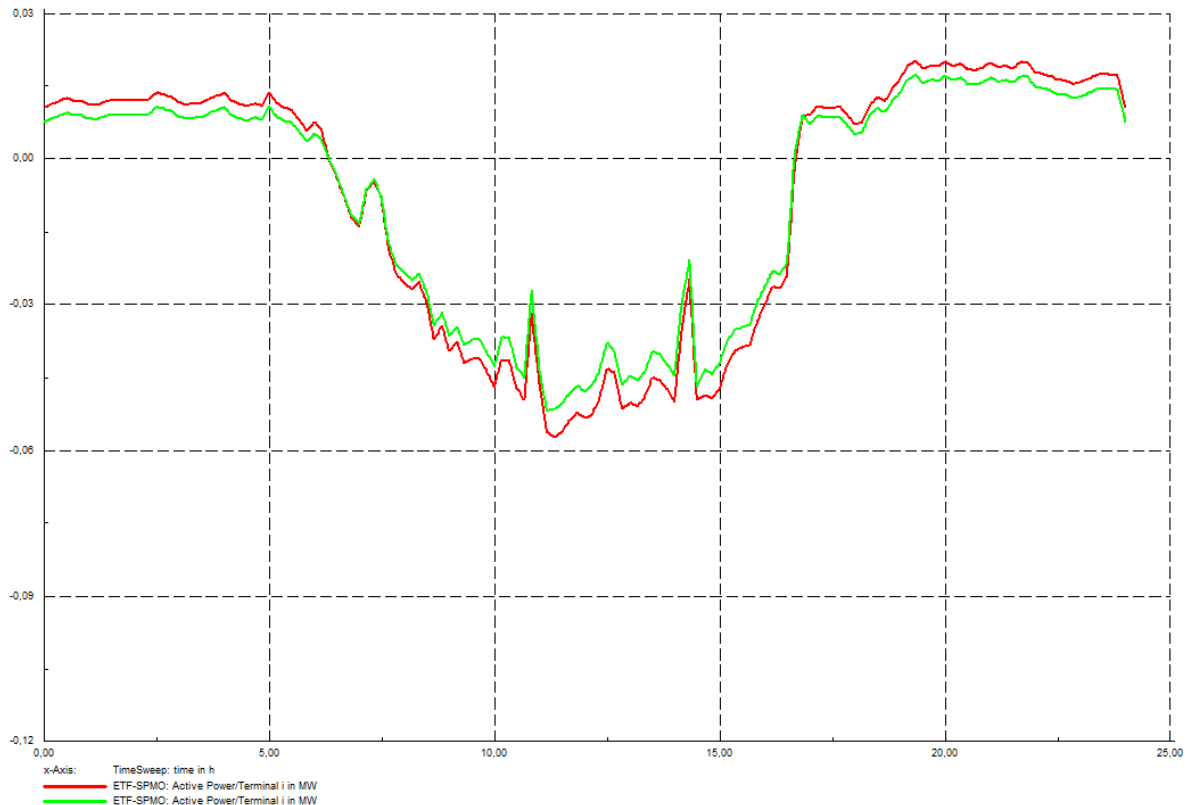


Slika 5.25. Tokovi snage hibridnog izmjenjivača (c-bez baterije, z-s baterijom)



Slika 5.26. Promjena napona na 0.4 kV sabirnici (c-bez baterije, z-s baterijom)

Na slici 5.26. se vidi isti utjecaj na napon kao i u prethodnom slučaju za ljetni radni dan. Napon se smanjuje u intervalima kada se baterija puni, a razlog jest manji tok snage unutar mikromreže, dok se napon povećava kada se baterije prazne.



*Slika 5.27. Promjena opterećenja kroz priključni vod (c-bez baterije, z-s baterijom)*

Na slici 5.27. se da vidjeti kako je i dalje prisutna predaja električne energije vanjskoj mreži, odnosno da se zaključiti kako baterije nisu dimenzionirane kako bi pohranile cijelu proizvodnju iz fotonaponske elektrane.

### **5.3. Povećavanje integracije distribuiranih izvora**

Još jedan od zadataka ovog diplomskog rada jest odrediti ukupnu veličinu integracije, odnosno koliku još snagu iz obnovljivih izvora možemo dodati u mikromrežu prije nego što se prekorače dozvoljene vrijednosti napona i opterećenja vodova. Ovaj pokus će se vršiti samo za jedan slučaj, a to je slučaj s velikom proizvodnjom i niskom potrošnjom unutar mikromreže. Razlog tomu je već poznat iz prethodnih poglavlja, a to je da je u tom slučaju napon najviši. Zbog složenosti, ovaj pokus će se izvoditi iz dva dijela. Prvo je povećanje snage proizvodnje iz fotonaponske elektrane, dok je generatora na najudaljenijoj sabirnici isključen. A drugi pokus je povećanje snage generatora na najudaljenijoj sabirnici, dok je fotonaponska elektrana isključena.

Kao što je već objašnjeno, povećanjem integracije će najviše utjecati na napon i opterećenje. Opterećenje na vodovima prilikom povećanja ne smije preći iznad 100%. Svakim prelaskom investitor mora dodati paralelni vod kako bi se opterećenje preraspodijelilo na svaki od njih. Isto vrijedi i za napon. U trenutku kada napon pređe 1.1 p.u. integracija više nije moguća. Ukoliko dođe do prekoračenja izvan mikromreže, investitor ne smije vršiti dodavanje vodova izvan iste, te tako dodatna integracija elektrana nije više moguća.

### **5.3.1. Povećavanje integracije generatora na najudaljenijoj sabirnici**

Budući da je instalirana snaga generatora relativno mala u odnosu na snagu mikromreže, utjecaj na napone, opterećenja i gubitke će biti dosta malen. Stoga će svako povećanje integracije biti za deset puta nazivne snage. Promatrat će se naponi na sabirnicama unutar mikromreže, te napon na 0.4 kV sabirnici. U tablici 5.1. su prikazane promjene napona povećanjem integracije.

Tablica 5.1. Promjena napona na glavnim sabirnicama povećanjem integracije u p.u.

Snaga generatora [kW]	SPMO	RO-SE1	RO-SE2	GRO	Vanjski RO	0,4 kV
0	0.986	0.985	0.985	0.983	0.985	0.990
6	0.988	0.987	0.987	0.985	0.989	0.990
60	1.000	1.003	1.004	0.991	1.026	0.991
120	1.012	1.019	1.022	1.017	1.044	0.992
180	1.024	1.035	1.038	1.033	1.059	0.993
240	1.036	1.050	1.053	1.048	1.081	0.993
300	1.047	1.066	1.068	1.064	1.094	0.994
360	1.058	1.080	1.083	1.078	1.113	0.995
420	1.070	1.083	1.085	1.081	1.114	0.995
500	1.080	1.095	1.098	1.093	1.125	0.996
540	1.090	1.107	1.110	1.105	1.140	0.996
600	1.100	1.119	1.121	1.117	1.150	0.997

Iz tablice 5.1. se vidi kako se najveća promjena napona dešava na sabirnici *Vanjski RO*. Razlog tomu je taj što je na njega spojen generator kojemu povećavamo snagu. Vidi se kako je moguće dodati generator snage 300 kW prije nego što napon na toj sabirnici ne prekorači dozvoljenu vrijednost od 1.1 p.u., što je gotovo 3 puta više od potrebe fakulteta. To znači da bi mikromreža tokom cijele godine predavala električnu energiju u vanjsku mrežu. Valja napomenuti kako napon na mjestu priključka tek s integriranim generatorom snage 600 kW prelazi dopuštenu granicu. Osim toga, dodavanje velikog broja vjetroagregata ne utječe znatno na 0.4 kV sabirnicu distribucijske mreže, zbog priključka na krutu mrežu. Ukupna promjena napona iznosi tek 0.007 p.u.



Međutim, u ovom slučaju nije napon taj koji ograničava razinu integracije vjetroagregata, nego opterećenje priključnog voda. Tablica 5.2. prikazuje promjene opterećenja priključnog voda. Iz nje se vidi kako je zapravo moguće integrirati generator snage 240 kW. Iz te tablice se vidi kako pri minimalnom opterećenju potreban generator snage 18 kW kako bi se zadovoljile potrebe mikromreže FERIT 1, odnosno kako bi tokovi snage kroz priključni vod bile jednake nuli. Daljnjim integriranjem tokovi snage se počinju kretati prema distribucijskoj mreži.

Treba dodati još kako prilikom povećavanja integracije opterećenja u vodovima unutar mikromreže prelaze dopuštene granice. Najveće opterećenje prenosi vod koji Vanjski RO spaja sa sabirnicom RO-SE1. Taj vod je dimenzija 35 mm<sup>2</sup>, te on nije dimenzioniran za prijenos velike snage. Rješenje za ovaj problem je postavljanje novog paralelnog voda istih dimenzija ili postavljanje novog voda većih dimenzija i veće prijenosne snage.

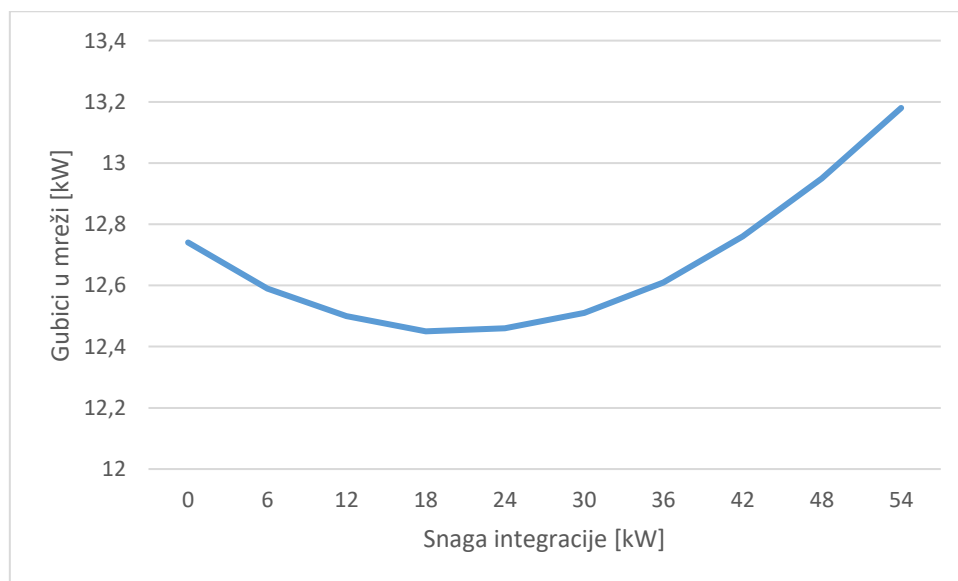
Tablica 5.2. Promjena opterećenja priključnog voda povećanjem integracije

Snaga generatora [kW]	0	6	12	18	24	60	120	180	240
Opterećenje [%]	8.1	5.2	2.3	0.6	3.5	20.2	47.5	74.1	99.2
Opterećenje [kW]	16.7	10.7	4.7	-1.2	-7.1	-41.8	-99.3	-156.5	-211.4

U tablici 5.3. je prikazana promjena gubitaka u mreži prilikom povećanja integracije. Gubici u referentnom stanju iznose 12.74 kW, te kako se integracija povećava, oni bivaju sve manji. Vidi se kako su gubici najmanji kada je integrirana snaga generatora od 18 kW. Na slici 5.28. se može primijetiti kako je minimalnu potrošnju moguće postići samo u jednoj točki. Razlog tome je taj što tada nema potrebe za preuzimanjem električne energije iz distribucijske mreže, odnosno manji su tokovi snage u mikromreži, jer se tada sva proizvodnja iz generatora koristi za opskrbu opterećenja unutar mikromreže. Daljnjim dodavanjem novih generatora, gubici nastavljaju rasti iz razloga što se povećavaju tokovi snage.

Tablica 5.3. Promjena gubitaka u mreži povećanjem integracije

Snaga generatora [kW]	0	6	12	18	24	30	36	42	48	56
Djelatni gubici [kW]	12.74	12.59	12.5	12.45	12.46	12.51	12.61	12.76	12.95	13.18
Relativni gubici [%]	0	-1.18	-1.88	-2.28	-2.19	-1.81	-1.02	0.16	1.65	3.45



Slika 5.28. Promjena gubitaka u mreži

### 5.3.2. Povećanje integracije fotonaponske elektrane

Budući da ukupna snaga fotonaponske elektrane u mikromreži iznosi 90 kW, te kako je ta vrijednost mnogo veća od nazivne snage generatora iz prethodnog pokusa, za očekivati je kako će povećanjem integracije fotonaponske elektrane brže doći do prekoračenja napona i opterećenja.

Tablica 5.4. Promjena napona na glavnim sabirnicama povećanjem integracije

Snaga FNE [kW]	SPMO	RO-SE1	RO-SE2	GRO	Vanjski RO	0,4 kV
0	0.986	0.985	0.985	0.983	0.985	0.990
90	1.013	1.018	1.019	1.016	1.019	0.993
180	1.031	1.043	1.045	1.040	1.045	0.995
270	1.049	1.066	1.069	1.064	1.069	0.996
360	1.066	1.088	1.090	1.086	1.090	0.997
450	1.083	1.097	1.100	1.095	1.100	0.998
540	1.099	1.116	1.119	1.114	1.118	0.998

Iz tablice 5.4. se da vidjeti kako napon dolazi do graničnih vrijednosti nakon dodavanja pete elektrane. Vidi se kako opet najprije dolazi do prekoračenja na onim sabirnicama na kojima su spojeni izvori, sabirnicama RO-SE1 i RO-SE2. Tek nakon dodavanja šeste elektrane napon na priključnoj sabirnici dolazi do nedopuštene vrijednosti. Naponske prilike tako dopuštaju priključenje 450 kW fotonaponske elektrane, što je za 150 kW više nego što je to bilo moguće kod generatora. Razlog tome je taj što je taj generator bio priključen na najudaljenijoj točki u mikromreži, ali i taj što je ukupna proizvodnja iz fotonaponske elektrane podijeljena na dvije sabirnice.

Tablica 5.5. Promjena opterećenja kroz priključni vod povećanjem integracije

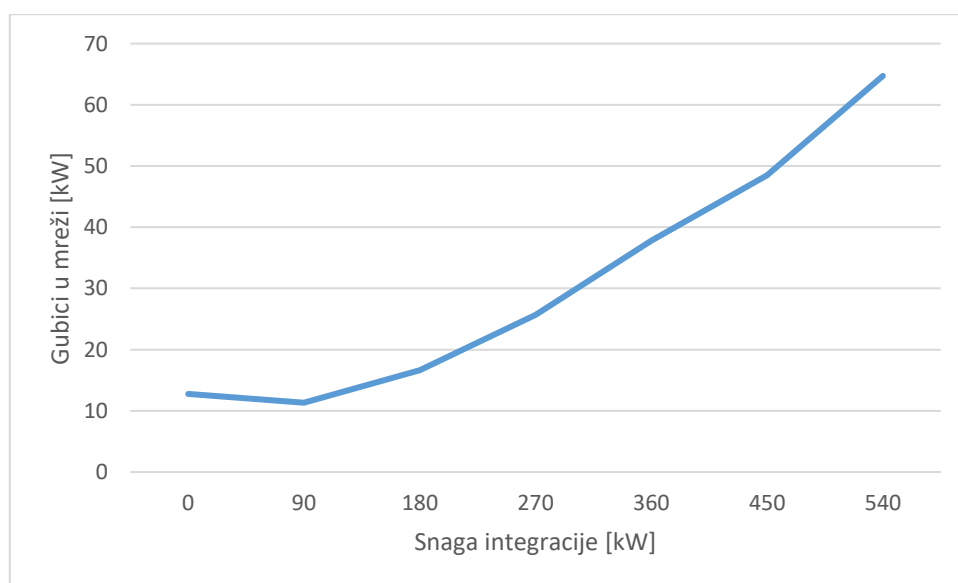
Snaga FNE [kW]	0	90	180	270	360	450	540
Opterećenje [%]	8.1	34.7	75.3	114.3	151.8	190.1	225.8
Opterećenje [kW]	16.700	-72.696	-160.220	-264.182	-331.086	-419.728	-504.379

U tablici 5.5. je prikazano opterećenje priključnog voda mikromreže FERIT 1. Iz te tablice se može vidjeti kako već nakon dodavanja prve fotonaponske elektrane dolazi do povrata električne energije u distribucijsku mrežu, a već nakon treće integracije dolazi do preopterećenja voda. Tako je i u ovom slučaju, kao i u prethodnom, razina integracije određena opterećenjem na priključnom vodu. Osim preopterećenja na tom vodu, javlja se i preopterećenje na vodu između sabirnice RO-SE1 i RO-SE2. Na razliku od prethodnog slučaja, vod koji spaja vanjski RO, niti u jednom trenutku ne prelazi dopušteno opterećenje, štoviše, kod njega je prisutno konstantno opterećenje koje je potrebno za opskrbu punionice električnih bicikala.

Iz tablice 5.6. se vidi kako samo prvom integracijom smanjujemo gubitke i to za 11%. Svakim daljnjim integriranjem se povećavaju tokovi snaga što dovodi do sve većih gubitaka u mreži.

Tablica 5.6. Promjena gubitaka u mreži povećanjem integracije

Snaga FNE [kW]	0	90	180	270	360	450	540
Djelatni gubici [kW]	12.74	11.32	16.62	25.68	37.81	48.46	64.72
Relativni gubici [%]	0	-11.15	30.46	101.57	196.78	280.38	508



Slika 5.29. Promjena gubitaka u mreži

## 6. ZAKLJUČAK

Pojava distribuirane proizvodnje unazad nekoliko godina je postala uobičajena pojava u elektroenergetskom sustavu. Ona je omogućila proizvodnju na najnižim nivoima elektroenergetskog sustava. Donijela je mnoge prednosti, smanjuju se gubici u sustavu, povećava se prijenosna moć sustava, omogućuje bolju sigurnost opskrbe, te mogućnost otočnog rada mikromreže. Međutim njihovom pojavom elektroenergetski sustav više nije hijerarhijski nastrojen, tokovi snaga ne idu više u jednom smjeru od centraliziranih elektrana do krajnjih potrošača. Mreža više nije pasivna, nego je aktivna, jer krajnji korisnici počinju sudjelovati u proizvodnji, zbog čega se javlja promjena toka snage. Takav način rada mreže može stvoriti određene probleme. Međutim, najveći utjecaj dodavanja distribuirane proizvodnje se može vidjeti na naponu. Svi ovi utjecaji rada mikromreže na vanjsku mrežu su opisani u teorijskom dijelu ovog diplomskog rada.

Nakon teorijskog opisa rada mikromreže, te njezinih dijelova, prednosti, nedostataka i ostalog, pristupilo se matematičkom dijelu diplomskog rada, u kojem su opisani matematički izrazi za određivanje proizvodnje iz fotonaponskih sustava i vjetroagregata. Iz dobivenih rezultata se moglo vidjeti kako je ljetna proizvodnja iz fotonaponskog sustava daleko najveća, te kako je ona najpravičnija, odnosno ima najmanje oscilacija i promjena tijekom dana. Po veličini proizvodnje slijedi proljetno razdoblje. U tom razdoblju proizvodnja je i dalje uvelike prisutna, međutim razdoblje proizvodnje je dosta kraće u odnosu na ljetnu proizvodnju zbog kraćeg trajanja dana. Osim toga, ovu proizvodnju su karakterizirale velike oscilacije. Očekivano, najniža proizvodnja je tijekom zimskog perioda kada proizvodnje gotovo i nema.

Osim proizvodnje, u matematičkom dijelu ovog diplomskog rada je bilo opisano određivanje potrošnje u mikromreži. Kod potrošnje u mikromreži, osim podijele na godišnja doba, bilo je bitno podijeliti istu i na radni i vikend dan. Radne dane su karakterizirale velike i promjenjive potrošnje, dok je vikende karakterizirala niska i konstantna potrošnja. Potrošnja za vikend dane za sva tri godišnja doba se nisu previše razlikovala. Međutim, potrošnja radnih dana za sva tri godišnja doba se jako razlikuju. Najveća potrošnja je bila prisutna u ljetnom razdoblju, a najniža u proljetnom.

Nakon određenih profila proizvodnje i potrošnje pristupilo se simulacijskom dijelu diplomskog rada. U tom dijelu su analizirani utjecaji rada mikromreže na napone u sustavu, te su analizirani tokovi snaga na priključnom vodu za šest slučajeva. Samim uspoređivanjem proizvodnje i

potrošnje u mikromreži, moglo se pretpostaviti kako će koji slučaj djelovati na tokove snaga u mikromreži. Najveći utjecaj na promjenu tokova snage je imao ljetni vikend dan, iz razloga što je tada bila prisutna jako velika proizvodnja, a mala potrošnja. Također analizom ljetnog radnog dana se može vidjeti kako su elektrane dimenzionirane tako da se zadovolji gotovo cijela potražnja u tom danu. Također, proljetni radni i vikend dan su donijeli zadovoljavajuće rezultate. Tijekom proljetnog radnog dana, proizvodnja je bila dovoljno velika kako bi se zadovoljila većina potreba za električnom energijom, dok je proljetni vikend dan imao jednak višak električne energije kao i ljetni vikend dan, međutim taj višak nije bio dugotrajan kao ljetni. Kod zimskog perioda nije bilo proizvodnje pa samim time, nije bilo utjecaja na tokove snaga.

Kao što je to bilo objašnjeno u teorijskom dijelu, naponi prilikom integracije distribuiranih izvora rastu. To je bio slučaj i u ovoj mikromreži. Analizom dobivenih rezultata se može vidjeti kako su najveći utjecaji na napon u mikromreži u onim slučajevima kada imamo veliku razliku između proizvodnje i potrošnje, odnosno kada se javljaju veliki viškovi električne energije. To se najbolje moglo vidjeti na primjeru ljetnog i proljetnog vikend dana. Međutim, tako veliki utjecaj na napon je prisutan samo na sabirnicama mikromreže. Integracija distribuiranih izvora ne utječe na sabirnicu cijeloga sustava. Razlog ovome je taj što je ova distribucijska mreža zapravo kruta. To znači da je ona dovoljno jaka, odnosno da ima konstantan (čvrst) napon i frekvenciju. Pojedinačni generatori koji se priključuju u tu mrežu praktički ne utječu na napon, niti na frekvenciju bez obzira u kakvom se stanju nalaze. [10]

Sljedeći pokus za ovaj diplomski rad je bio određivanje utjecaja priključivanja baterija. Analizom dobivenih rezultata se vidjelo da se dodavanjem baterija u mikromrežu dobiva bolja naponska stabilnost, te se u slučajevima velikih viškova električne energije, kada napon može biti veoma visok, napon snižava. Osim toga, dodavanje baterije dovodi i do poravnanja dnevnog dijagrama opterećenja.

Posljednji pokus je bilo povećavanje snage integracije kako bi se odredila granica do koje mikromreža može doći. Prvo su se povećavale snage generatora na najudaljenijoj sabirnici. Povećavajući njihovu snagu je ustanovljeno da je najkritičnija točka u mikromreži upravo ta sabirnica na kojoj je spojen generator. Napon prelazi dopuštenu vrijednost nakon integriranih 300 kW. Osim napona te sabirnice, promatrala se i niskonaponska sabirnica distribucijske mreže. Iz dobivenih rezultata se vidi da i nakon novih 300 kW napon na toj sabirnici ostaje gotovo nepromijenjen. Razlog tomu je taj što je mikromreža FERIT 1 spojena na krutu mrežu. Međutim veličina integracije u ovom slučaju nije određena naponom, nego opterećenjem.

Nakon integriranih 260 kW dolazi do preopterećenja priključnog voda mikromreže. Osim promjene opterećenja i napona, mijenjaju se i gubici u mreži. Iz dobivenih rezultata se vidi kako se gubici smanjuju sve do određene snage proizvodnje, nakon koje se ti gubici ponovno povećavaju. Ta snaga proizvodnje pri kojoj su gubici najmanji jest ona koja odgovara trenutnoj potražnji za električnom energijom.

Osim povećavanja snage generatora na najudaljenijoj sabirnici, povećavala se još i snaga fotonaponske elektrane. Povećanje ove elektrane, kao i prethodno jednako utječe na napone unutar mikromreže, dok na napon mreže ne utječe. Razina integracije, kao i za prethodni slučaj, je određena preopterećenjem.

## LITERATURA

- [1] Renewables Global Status Report – REN21, <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>, pristupio srpanj 2021
- [2] Renewable Energy Lab Osijek, <https://reslab.ferit.hr/?news&id=77#m>, pristupio srpanj 2021
- [3] D. Šljivac, Predavanje „Integracija obnovljivih izvora energije“, dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4669354/mod\\_resource/content/9/Integracija%20OIE%20i%20na%20predne%20mre%20C5%BEe%202020\\_21\\_2poglavlje1dio.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4669354/mod_resource/content/9/Integracija%20OIE%20i%20na%20predne%20mre%20C5%BEe%202020_21_2poglavlje1dio.pdf), pristupio srpanj 2021
- [4] Z. Klaić, Predavanje „Integracija obnovljivih izvora energije“, dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4717223/mod\\_resource/content/1/IntegrOIE2020KvalitetaPredavanja.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4717223/mod_resource/content/1/IntegrOIE2020KvalitetaPredavanja.pdf), pristupio srpanj 2021
- [5] P. Marić, Predavanje „Integracija obnovljivih izvora energije“, dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4669364/mod\\_resource/content/1/UTJECAJ%20INTEGRACIJE%20OBNOVLJIVIH%20IZVORA%20NA%20STABILNOST%20I%20ZASTITU.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4669364/mod_resource/content/1/UTJECAJ%20INTEGRACIJE%20OBNOVLJIVIH%20IZVORA%20NA%20STABILNOST%20I%20ZASTITU.pdf), pristupio srpanj 2021
- [6] A. Pavić, K. Trupinić, „Gubici električne energije u distribucijskoj mreži“, dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/13154>, pristupio srpanj 2021
- [7] H. J. Bollen, F. Hassan, „Integration of Distributed Generation in the Power System“, 2011
- [8] D. Šljivac, Predavanje „Obnovljivi izvori električne energije“, pristupio srpanj 2021
- [9] Renewable Energy Lab Osijek, <https://reslab.ferit.hr/?powerplant#m>, pristupio srpanj 2021.
- [10] I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, „Sinkroni i asinkroni strojevi“, dostupno na: <https://www.bib.irb.hr/629238/download/629238.SinAsin.pdf>, pristupio rujanj 2021



## **SAŽETAK**

U ovo diplomskom radu bit će objašnjen pojam mikromreže, njezini načini rada, te glavni dijelovi. Nakon teorijskog dijela rada bit će odrađena analiza rada mikromreže FERIT 1, te će se odrediti njezin utjecaj na vanjsku mrežu. Cilj rada je analizirati na koji način različite potrošnje fakulteta i proizvodnje iz fotonaponske elektrane i vjetroagregata djeluju na naponske prilike, te da li će posljedice biti pozitivne ili negativne. Osim toga bit će odrađeni i pokusi povećanja razine integracije kako bi se odredilo do koje mjere se može integrirati distribuirana proizvodnja, a da ne dođe do nastanka problema u mreži.

**KLJUČNE RIJEČI:** fotonaponski sustav, integracija, mikromreža, napon, utjecaj na mrežu

## **ABSTRACT**

### **Analysis of the FERIT 1 micro-network operation and the impact on the network at the connection point within the RESCUE project**

In this thesis, the concept of micro-network, methods of work, and its parts will be explained. After the theoretical part, an analysis of the work of the FERIT 1 micronetwork will be performed, and the impact of this work on the external network will be determined. The aim of this paper is to analyze how different consumption and production from photovoltaic power plants and wind turbines affect voltage conditions, and whether the consequences will be positive or negative. In addition, attempts will be made to increase the level of integration in order to determine the extent to which distributed generation can be integrated without causing network problems.

**KEY WORDS:** integration, micronetwork, network impact, photovoltaic system, voltage

## **ŽIVOTOPIS**

Ivan Zečević, rođen je 13.11.1997. u Osijeku. Osnovnoškolsko obrazovanje je stekao u Osnovnoj školi Vladimira Nazora Odžak. Nakon završene osnovne škole upisuje gimnaziju u Srednjoj školi Pere Zečevića Odžak koju završava 2016. godine. Odmah zatim upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer elektrotehnika. Nakon završene prve godine preddiplomskog studija opredjeljuje se na blok Elektroenergetika. 2019. godine, nakon završene treće godine preddiplomskog studija, stječe zvanje Sveučilišnog prvostupnika, inženjera elektrotehnike. U listopadu iste godine upisuje diplomski studij, izborni blok Održiva elektroenergetika. Trenutno pohađa drugu, završnu godinu diplomskog studija. Tokom fakultativnog školovanja je odrađivao poslove elektrotehničara kako bi stekao što više znanja i vještina u području elektrotehnike.