

# Integracija fotonaponskog sustava FERIT 1 u distributivnu mrežu

---

**Grbavica, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:899904>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**INTEGRACIJA FOTONAPONSKOG SUSTAVA FERIT 1  
U DISTRIBUTIVNU MREŽU**

**Diplomski rad**

**Josip Grbavica**

**Osijek, 2023.**

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

Osijek, 14.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Josip Grbavica
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1403, 07.10.2021.
<b>OIB studenta:</b>	18209436081
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Damir Šljivac
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Zvonimir Šimić, mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Integracija fotonaponskog sustava FERIT 1 u distributivnu mrežu
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Opisato probleme i tehnička rješenja za povećanje razine integracije fotonaponskih sustava u distributivnu mrežu. U praktičnom dijelu u skladu s mrežnim pravilima distributivnog sustava na primjeru jednog distributivnog izvoda dati proračune strujnih i naponskih prilika i scenarije s prijedlozima rješenja.. Sumentor: dr.sc. Matej Žnidarec
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	14.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 29.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Josip Grbavica

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1403, 07.10.2021.

**Turnitin podudaranje [%]:**

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Integracija fotonaponskog sustava FERIT 1 u distributivnu mrežu**

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

i sumentora dr. sc. Matej Žnidarec

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

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Opis zadatka .....</b>	<b>3</b>
<b>2. OPIS LITERATURE .....</b>	<b>4</b>
<b>3. FOTONAPONSKE ELEKTRANE U DISTRIBUTIVNOJ PROIZVODNJI.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. Fotonaponska pretvorba, ćelije i moduli .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Fotonaponske elektrane.....</b>	<b>9</b>
<b>3.3. Utjecaj fotonaponske elektrane na tokove snaga u distributivnoj mreži.....</b>	<b>14</b>
<b>3.4. Utjecaj fotonaponske elektrane na naponske prilike u distributivnoj mreži .....</b>	<b>16</b>
<b>3.5. Utjecaj fotonaponske elektrane na strujne prilike u distributivnoj mreži .....</b>	<b>18</b>
<b>3.6. Utjecaj fotonaponske elektrane na kvalitetu električne energije.....</b>	<b>20</b>
<b>3.7. Utjecaj fotonaponske elektrane na stabilnost u sustavu.....</b>	<b>20</b>
<b>3.8. Utjecaj fotonaponske elektrane na gubitke u sustavu .....</b>	<b>24</b>
<b>4. DNEVNA SIMULACIJA MIKROMREŽE FERIT1 U DIGSILENT-U.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1. Modeliranje potrošnje .....</b>	<b>29</b>
4.1.1. Mjereni profili potrošnje za mikromrežu FERIT 1 .....	29
4.1.2. Standardni profili potrošnje za ostale potrošače u okolini mikromreže programskog paketa DigSilent .	31
<b>4.2. Modeliranje proizvodnje .....</b>	<b>34</b>
4.2.1. Proizvodnja iz fotonaponske elektrane FERIT 1 .....	35
<b>4.3. Simulacija mikromreže FERIT1 u programskom paketu DigSilent.....</b>	<b>38</b>
4.3.1. Slučaj 1: 15. lipanj .....	38
4.3.2. Slučaj 2: 1. kolovoz .....	45
4.3.3. Slučaj 3: 15. prosinac.....	49
<b>4.4. Povećanje integracije fotonaponskih elektrana.....</b>	<b>52</b>
4.4.1. Smanjenje snage trofaznog kratkog spoja do granice stabilnosti.....	53
4.4.2. Regulacija prijenosnog omjera transformatora .....	55
4.4.3. Promjena faktora snage ( $\cos\phi$ ) .....	59
4.4.4. Izgradnja novog voda ili dodavanje istih u paralelu .....	63
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>67</b>
<b>6. SAŽETAK.....</b>	<b>68</b>

<b>7. SUMMARY.....</b>	<b>68</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>69</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>71</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>72</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>74</b>

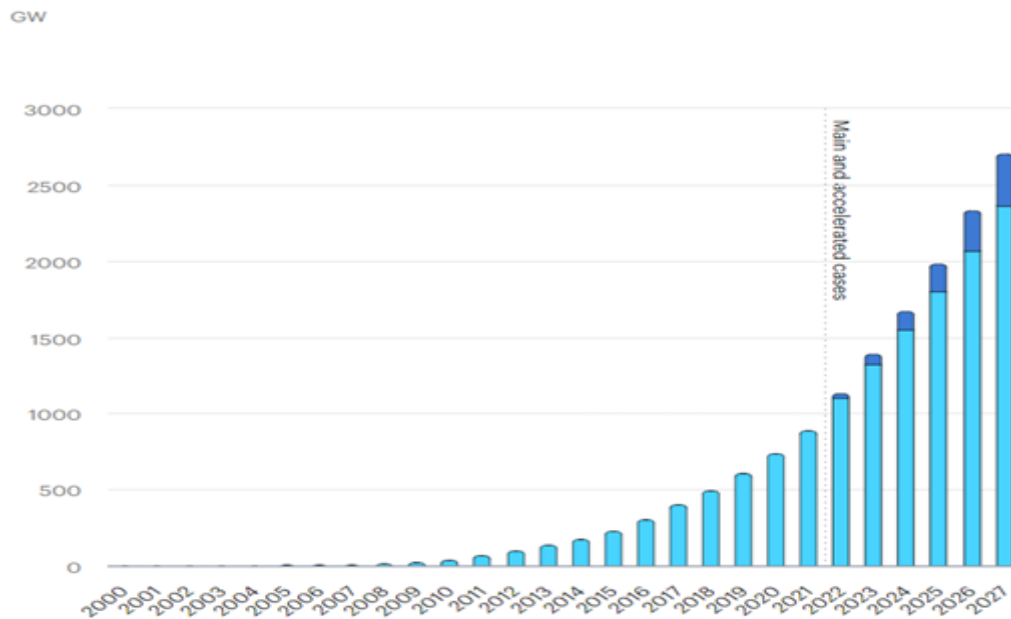
## 1. UVOD

Svakim danom u svijetu zbog raznolikosti u primjeni, raste potražnja za električnom energijom, kako u kućanstvima tako i u industriji. Možemo reći da je električna energija prijeko potrebna za funkcioniranje svijeta kakvog poznajemo. Otkriće električne struje, kao pouzdanog oblika energije nas je uvelo u drugu industrijsku revoluciju i stvorilo svijet kakvog danas poznajemo.

Tradicionalno su konvencionalni izvori energije, poput fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin) dominirali proizvodnju električne energije. U posljednje vrijeme smo postali svjesni svih nedostataka takvog načina proizvodnje, kao što su neobnovljivost takvih izvora energije, emisije stakleničkih plinova i zagađenje okoliša. Sve to nas dovodi do nužne promjene načina dosadašnje proizvodnje i prelazak na nekonvencionalne ili obnovljive izvore energije.

Prednosti upotrebe nekonvencionalnih izvora energije, kao što su fotonaponski sustavi, postaju sve jasnije. Nekonvencionalni izvori energije nam omogućuju decentralizaciju proizvodnje električne energije, što zauzvrat pozitivno utječe na energetska sigurnost i smanjuje potrebu za uvozom energije. Fotonaponski sustavi pretvaraju neiscrpu i gotovo svima dostupnu energiju Sunca u električnu energiju, putem fotoelektričnog efekta. Povećanjem instalirane snage iz fotonaponskih izvora, u posljednjim godinama značajno smanjujemo upotrebu fosilnih goriva i time pridonosimo smanjenju emisija stakleničkih plinova. Porast instalirane snage iz fotonaponskih sustava je u porastu iz godine u godinu, te to možemo vidjeti na Slika 1.1.

Osim gore navedenih prednosti fotonaponskog sustava, oni mogu imati i pozitivan utjecaj na gospodarstvo i lokalne zajednice. Daljnji razvoj i integracija ovih sustava nam otvara nove poslovne prilike, te stvara radna mjesta u sektoru za obnovljive izvore energije, što je pozitivno za lokalne zajednice ali i gospodarstvo. Također, fotonaponski sustavi su fleksibilni i prilagodljivi na veličinu, te se osim integracije u lokalne (distributivne) mreže, mogu instalirati i na prijenosnu mrežu, u obliku velikih solarnih elektrana.



Slika 1.1. Porast instalirane snage iz FN elektrana [1]

Uvođenjem nekonvencionalnih ili obnovljivih izvora energije u elektroenergetsku mrežu, možemo primijetiti pozitivne ali i negativne učinke ovakvih izvora. Baš zbog njihove promjenjivosti i nepredvidljivosti samih promjena, upravljanje elektroenergetske mreže je otežano i zahtijeva bolji nadzor. Možemo reći kako je mreža prešla iz pasivnog stanja, gdje je energija imala jedan smjer, od elektrane preko prijenosne mreže, na distribucijsku mrežu i potom do krajnjeg potrošača u aktivnu mrežu, gdje imamo i male elektrane u distribucijskoj mreži.

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija ,Osijek, prateći najnovije trendove u proizvodnji električne energije, 2021. godine u okviru projekta RESCUE, na zgradu fakulteta postavio 80 kW fotonaponsku elektranu, na već postojeću fotonaponsku elektranu (ETFOS 1) od 10 kW, i još dodatnih 20 kW s sustavom pohrane, od 38.4 kWh. Mikromreža FERIT 1 ima namjeru osigurati napajanje zgrade fakulteta, neovisno o opterećenju.[2]



## 1.1. Opis zadatka

U diplomskom radu se istražuje problem povećanja razine integracije fotonaponskog sustava, u ovom slučaju fotonaponskog sustava FERIT 1, u distributivnu mrežu. Također se nude i tehnička rješenja kako bi proveli maksimalnu razinu integracije.

U prvom dijelu rada, ukratko se opisuju fotonaponski sustavi, te se analiziraju problemi u distributivnoj mreži prilikom integracije. To obuhvaća faktore kao što su promjena generirane snage, upravljanje naponom, upravljanje tokovima snaga i problemi sigurnosti.

U praktičnom dijelu rada, u programskom paketu DigSilent, koristi se simulacijski model mikromreže FERIT 1, kako bi smo dobili uvid u tokove snaga, i strujne i naponske prilike u mikromreži FERIT 1, i u okolnoj mreži. To uključuje promjene opterećenja mreže, promjena proizvedene snage iz fotonaponskog sustava i druge relevantne čimbenike. Na temelju proračuna i analize, predlažu se rješenja nastalih problema s ciljem osiguravanja stabilne razine integracije u distributivnu mrežu. To može uključivati primjenu naprednih regulacijskih tehnika, poboljšanja sustava za praćenje i upravljanje fotonaponskim sustavom.



Slika 1.2 Fotonaponska elektrana u mikromreži FERIT 1 [2]

## 2. OPIS LITERATURE

Fotonaponski sustavi se temelje na tehnologiji fotoefekta, gdje se energija Sunca pretvara u električnu energiju pomoću fotonaponske ćelije. Fotonaponski sustavi nam predstavljaju alternativu u proizvodnji električne energije, te nam omogućava prelazak s konvencionalnih izvora energije koji su neobnovljivi, uzrokuju ekološko zagađenje i ispuštaju stakleničke plinove, na nekonvencionalne izvore energije.

Porast i projekcija porasta instalirane snage iz fotonaponskih elektrana je vidljiva iz [1]. Slike fotonaponske elektrane FERIT 1 snimljene dronom i informacije o programu RESCUE možemo naći u [2]. Fotonaponske ćelije su temeljni dio fotonaponskog sustava. Osnovne informacije o fotonaponskoj ćeliji ili modulu, kao i strujno-naponsku karakteristiku te nadomjesnu shemu spoja, nalaze se u [3]. Fotonaponske elektrane predstavljaju integriran skup fotonaponskih modula, koji služi za proizvodnju električne energije. Osnovne dijelove fotonaponske elektrane, kao i podjelu na način rada te osnovne informacije možemo također pronaći u [3]. Fotonaponske elektrane su većinom niskih nazivnih snaga i integriraju se u distributivnu mrežu. Kao distributivni izvor, mijenjaju sam koncept mreže, te distributivna mreža iz pasivne prelazi u aktivnu. Iznos energije proizvedene iz fotonaponskih sustava nam određuje kakve utjecaje će imati na distributivnu mrežu. Fotonaponska elektrana može utjecati na naponske i strujne prilike u distributivnoj mreži, na tokove snaga te na gubitke i razinu integracije. Sve potrebne informacije se nalaze u [4]. Kvaliteta električne energije je od velikog značaja za same potrošače ali i za Operatora distribucijskog sustava (HEP). Kako u sadašnje vrijeme, posljedice za lošu kvalitetu energije može snositi i HEP, prije integracije svakog fotonaponskog sustava radi se elaborat utjecaja fotonaponskog sustava na distributivnu mrežu. Informacije o kvaliteti električne energije nalaze se u [5]. Stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sustava je imperativ, te utjecaj fotonaponskih sustava na njih pomno prati. Utjecaji na stabilnost ovise o iznosu energije proizvedene iz fotonaponskih sustava, te mogu biti pozitivni ili negativni. Kako pravilno procijeniti utjecaj fotonaponske elektrane na stabilnost sustava možemo vidjeti iz [6]. Pokazatelji stabilnost elektroenergetskog sustava su vidljivi iz [7]. Gubici u distributivnoj mreži neizbježna pojava te predstavljaju ekonomski problem za HEP. Integracijom fotonaponskih sustava u distributivnu mrežu, možemo pomoću matematičkih izraza iz [8] odrediti hoće li utjecaj fotonaponskih sustava biti pozitivan ili negativan.

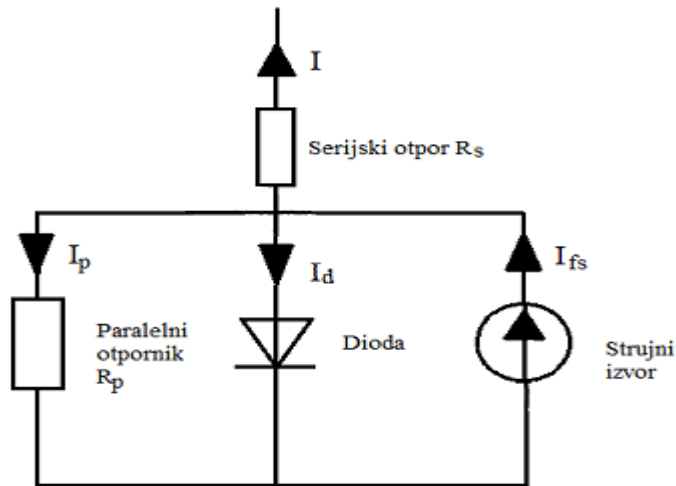
### **3. FOTONAPONSKE ELEKTRANE U DISTRIBUTIVNOJ PROIZVODNJI**

Fotonaponski sustavi služe za preobrazbu sunčeve energije u električnu energiju. Fotonaponski sustavi se sastoje od solarnih panela koji pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju putem fotonskog efekta. Fotonaponski sustavi su ekološki prihvatljivi i obnovljivi izvori električne energije, koji smanjuju ovisnost o fosilnim gorivima i doprinose smanjenju emisije stakleničkih plinova. Također su veoma fleksibilni, te mogu biti integrirani u distributivnu mrežu (na kuće, zgrade...) ili u prijenosnu mrežu kao velike elektrane.

#### **3.1. Fotonaponska pretvorba, ćelije i moduli**

Fotonaponska pretvorba je proces izravne pretvorbe sunčeve svjetlosti u električnu energiju pomoću fotonaponskih ćelija, koje su najčešće napravljene od poluvodičkih materijala poput silicija. Fotonaponska pretvorba je tehnologija koja se temelji na fotoelektričnom efektu, tj. kada sunčeva zraka koja u sebi posjeduje fotone, pogodi fotonaponsku ćeliju, prenosi energiju koju sadrže fotoni i prenosi ju na materijal, što potom oslobađa elektrone i stvara električni napon. Važno je napomenuti kako fotoni koji pogode fotonaponsku ćeliju mogu biti reflektirani, mogu proći direktno kroz ćeliju ili biti apsorbirani, te samo apsorbirani fotoni dovode do oslobađanja elektrona i proizvodnju električne energije [3].

Fotonaponska ćelija ili solarna ćelija je temeljna jedinica fotonaponskog sustava. Služi za direktno pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju. Fotonaponska ćelija se sastoji od dva tanka sloja (zone) poluvodičkog materijala, od kojih je jedna P-zona (pozitivna) i N-zona (negativna). Kada ćelija apsorbira foton, taj foton prenosi energiju na elektrone u P-zoni, što dovodi do oslobađanja elektrona koji se potom kreću prema N-zoni i tako stvaraju električni napon. Veličina ćelije se kreće od 1 cm, do 10 cm. Napon fotonaponske ćelije je približno 0.6 V, dok se snaga kreće od 1 do 3 W. Nadomjesnu shemu fotonaponske ćelije sa svim njezinim dijelovima možemo vidjeti na Slika 3.1.



Slika 3.1. Nadomjesna shema fotonaponske ćelije

Nadomjesna shema se sastoji od strujnog izvora ( $I_{fs}$ ), bypass diode, paralelnog otpora iliti šanta ( $R_p$ ), i serijskog otpora ( $R_s$ ). Ova nadomjesna shema na ustvari predstavlja realni strujni krug, jer je jakost izlazne struje ( $I$ ) proporcionalna struji strujnog izvora ili fotostruji ( $I_{fs}$ ). Iz izraza 3-21, možemo primijetiti da je izlazna struja fotonaponske ćelije jednaka fotostruji, umanjenoj za struju kroz diodu i paralelni otpornik [3]:

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

Paralelni otpor je neusporedivo veći u usporedbi s otporom ostatka fotonaponske ćelije, pa struju kroz taj otpornik možemo zanemariti, što nas dovodi do krajnjeg izraza [3]:

$$I = I_{fs} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{e \cdot (U + I \cdot R_s)}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3-2)$$

Gdje je:

$U$  – napon [V]

$R_s$  – serijski otpor ćelije [ $\Omega$ ]

$e$  – elementarni naboj,  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  [As]

$I_{fs}$  – fotostruja [A]

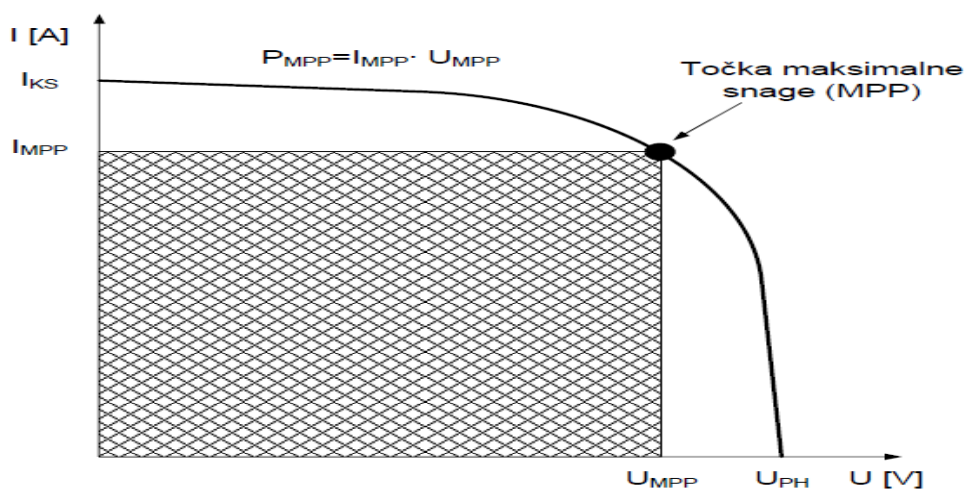
$I_0$  – struja zasićenja [A]

$m$  – faktor idealnosti fotonaponske ćelije

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

$T$  – apsolutna temperatura [K]

Za svaku fotonaponsku ćeliju postoji pripadajuća strujno-naponska karakteristika, koja je ovisna o vrsti fotonaponske ćelije i njezinoj veličini. Na slici Slika 3.2[3] je prikazan jedan primjer strujno-naponske karakteristike.



Slika 3.2 Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije

Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije opisuje odnos između struje koja teče kroz ćeliju i napona koji se nalazi na njoj. U lijevom prigušenom području, fotonaponska ćelija se ponaša kao konstantan izvor struje, dok se u krajnjem desnom području ponaša kao konstantan izvor napona sa unutarnjim otporom [3]. Između ta dva prigušena dijela, primjećujemo pregibnu točku ili točku maksimalne snage (MPP).

Sa karakteristike možemo prepoznati tri karakteristične točke:

- 1) Struja kratkog spoja:

$$I_{ks} = I_{fs} ; U=0 \text{ V} \quad (3-3)$$

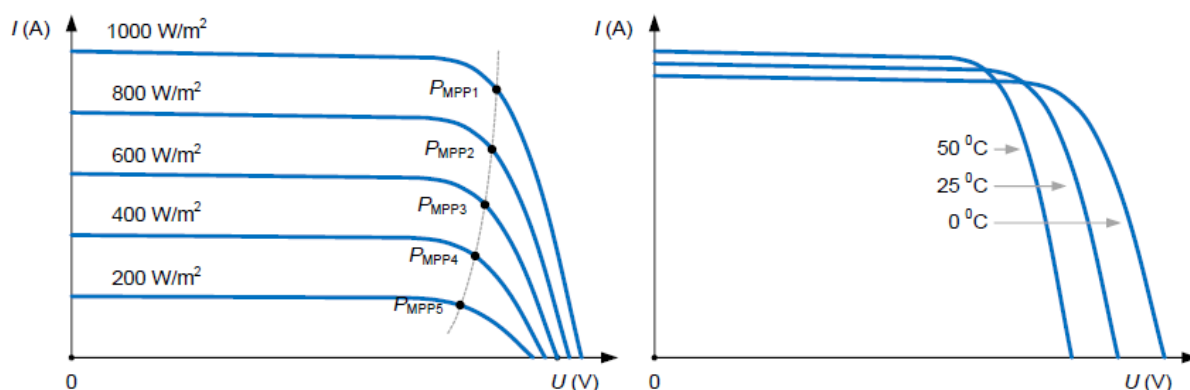
- 2) Napon praznog hoda:

$$U_{PH} = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln \left( \frac{I_{KS}}{I_0} + 1 \right) \quad (3-4)$$

### 3) Točka maksimalne snage (MPP)

Kako je točka maksimalne snage nalazi samo u jednoj točki pregiba, ona nije fiksna tokom cijeloga dana zbog promjena opterećenja ili različite razine Sunčeva zračenja, pa se za praćenje maksimalne snage koristi tragač maksimalne snage (MPPT).

Snaga koju dobivamo iz fotonaponske ćelije ne ovisi samo o jakosti Sunčeva zračenja i unutarnjim otporima ćelije, nego i o radnoj temperaturi okoline i radne temperature ćelije, što možemo primijetiti na sljedećim karakteristikama:



Slika 3.3. Strujno-naponska karakteristika FN ćelija u ovisnosti o jakosti Sunčeva zračenja (lijevo)

i u ovisnosti o radnoj temperaturi (desno)

Iz gore priloženih slika možemo zaključiti kako je struja proporcionalna jakosti Sunčeva zračenja, te većim intenzitetom zračenja dobivamo podizanje lijevog prigušenog područja na y-osi. Povećanjem radne temperature FN ćelije smanjujemo napon praznog hoda, tj. karakteristika se pomiče ulijevo po x-osi.

Svi ovi faktori su bitni i za učinkovitost fotonaponske ćelije, koju možemo izračunati kao omjer maksimalne snage  $P_{MPP}$  i intenzitetu Sunčeva zračenja  $G$ , po površini ćelije  $A$  [3]:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A} \cdot 100 = F \cdot \frac{U_{PH} \cdot J_{KS}}{G} \cdot 100 \quad (3-5)$$

Gdje je:

$F$  - faktor popunjena obično između  $0.7 < F < 0.9$

$U_{PH}$  - napon praznog hoda [V]

$J_{KS}$  – struja kratkog spoja [A]

Kako fotonaponske ćelije imaju mali napon, a samim time i malu izlaznu snagu, te kao takve nisu podobne za primjenu, potrebno ih je spojiti u serijsko-paralelni spoj. Serijsko-paralelnim spajanjem više fotonaponskih ćelije dobivamo fotonaponski modul, koje također možemo spajati serijski ili paralelno kako bi smo niz modula koji zadovoljavaju uvjetima željene primjene. Tehničke karakteristike modula se pretjerano ne razlikuju od karakteristike ćelije [3].

Karakteristike fotonaponskih modula dobivamo mjerenjima pri STC uvjetima, a osnovne karakteristike FN modula su:

- nazivna vršna snaga  $P_{MPP}$  [kW]
- učinkovitost  $\eta$  [%]
- struja kratkog spoja  $I_{KS}$  [A], napon praznog hoda  $U_{PH}$  [V]
- struja vršne snage  $I_{MPP}$  [A], napon vršne snage  $U_{MPP}$  [V]
- smanjenje snage uzrokovano povećanjem temperature ćelije  $\beta$  [V/°C] ili u [%/°C]
- smanjenje napona zbog povećanja temperature  $\alpha$  [%/°C]
- duljina, širina i visina modula [mm x mm x mm]
- masa modula [kg]

Za STC uvijete se uzima: Sunčevo zračenje od 1 [kW/m<sup>2</sup>] i temperatura fotonaponskog modula 25 [°C].

### 3.2. Fotonaponske elektrane

Fotonaponske elektrane (sustavi) su integriran skup FN modula i ostalih elemenata, koji su projektirani da izravno pretvaraju Sunčevo zračenje u električnu energiju. Fotonaponska elektrana proizvodi istosmjernu električnu struju za opskrbu istosmjernih potrošača ili koristi uređaj zvan izmjenjivač kako bi pretvorili istosmjernu električnu struju u izmjeničnu za opskrbu izmjeničnih potrošača.

Osnovni elementi fotonaponske elektrane su:

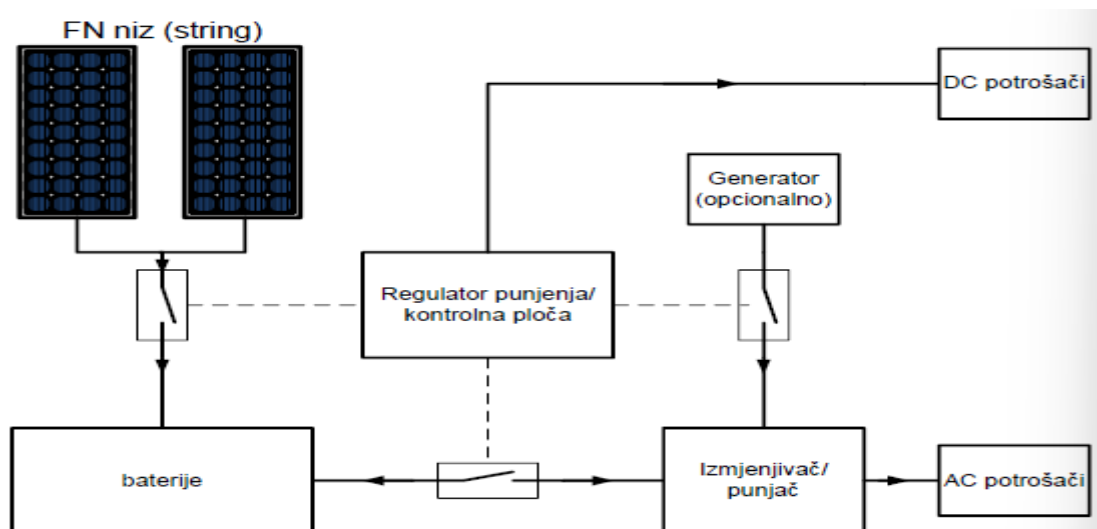
- Struktura za postavljanje (po mogućnosti s pogledom na Sunce)
- MPPT ili tragač maksimalne snage i uređaji za regulaciju
- Komponente koji mogu prihvaćati izmjeničnu struju (baterije, punjač..)
- Inverter, ako je sustav spojen na mrežu
- Potencijalne dodatne izvore (kod hibridnih sustava)

Ovisno o željenom načinu rada, fotonaponske sustave možemo podijeliti na:

1. Samostojeći ili autonomni fotonaponski sustavi (engl. *Off grid*)
2. Mrežni fotonaponski sustavi (engl. *On grid*)

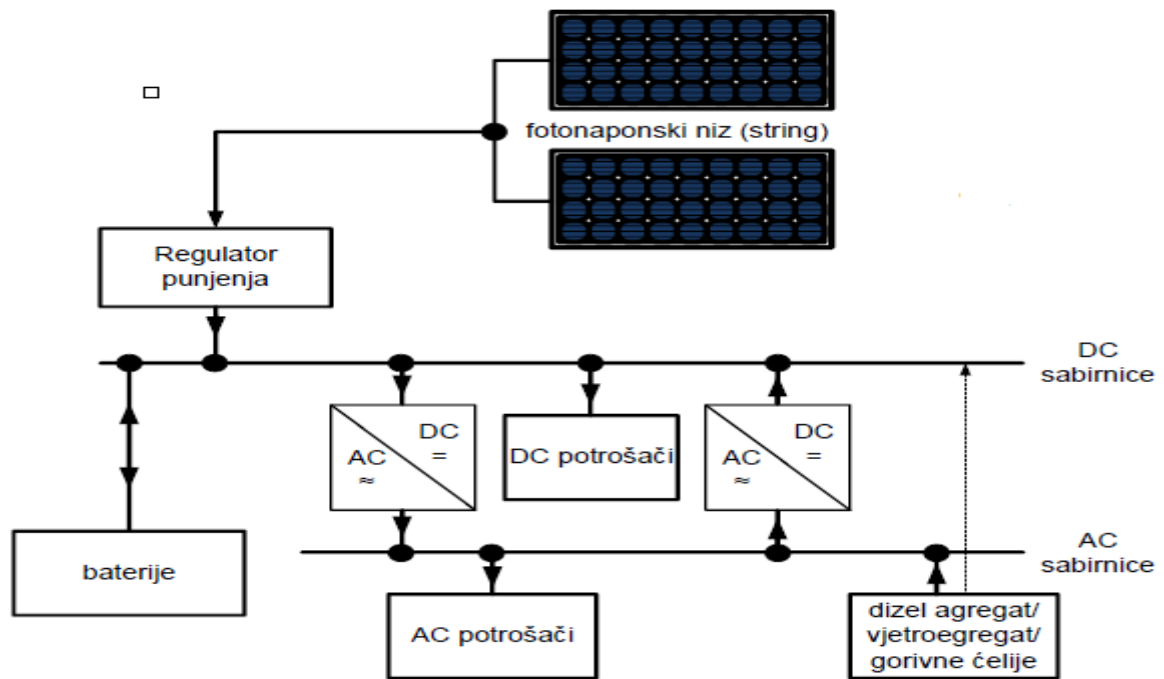
Samostojeće fotonaponske elektrane nisu spojene da elektroenergetsku mrežu i dizajnirane su tako da pokriju čitavu potrebu potrošača za električnom energijom. Kako je Sunčeva energija promjenjiv izvor energije, te kako bi potrošači bili u mogućnosti koristiti električnu energiju po potrebi, a ne samo kada su u mogućnosti, potrebni su i spremnici energije ili baterije. Samostojeći fotonaponski sustav s pohranom energije je prikazan na slici Slika 3.4.

Među samostojeće fotonaponske sustave ubrajamo i hibridni fotonaponski sustav. Hibridni fotonaponski sustav, uz mogućnost posjedovanja baterija, u svojoj izvedbi može imati i dodatni izvor energije, kao što su vjetroagregati, gorive ćelije ili dizel agregati [3]. Dodatni izvori energije nam služe kako bi smo za vrijeme kada nema Sunčevog zračenja, imali proizvodnju iz drugog izvora energije (pretežito noću). Hibridni fotonaponski sustav je prikazan na slici Slika 3.5.



Slika 3.4. Samostojeći fotonaponski sustav s pohranom energije [3]



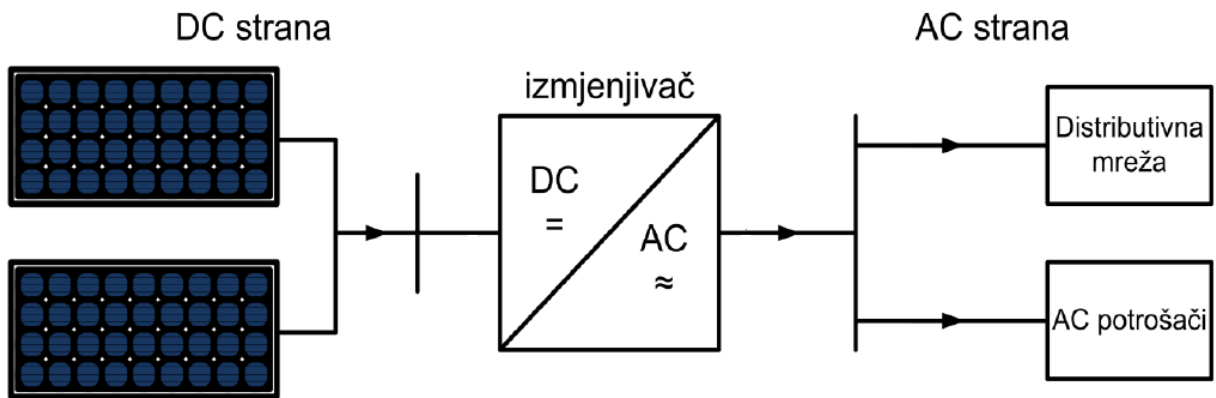


Slika 3.5. Hibridni fotonaponski sustav [3]

Fotonaponske elektrane spojene izravno na elektroenergetsku mrežu nazivamo mrežnim fotonaponskim elektranama. Kako imamo izravan spoj na mrežu, inverter je obavezan dio ovakvog sustava, a potrebe za baterijama ili dodatnim izvorima energije nisu prijeko potrebni, te se izvode samo po želji kod manjih potrošača, ako su ovakve fotonaponske elektrane instalirane na krov kuće. Postoji više izvedbi ovakvog fotonaponskog sustava, a to su:

- Izvedba sa centralnim izmjenjivačem (end. central inverter): svi fotonaponski nizovi su spojeni na jedan izmjenjivač i moraju biti jednaki. Prednosti su manji troškovi održavanja i izgradnje, dok je mana potpuno isključenje cijele elektrane ako dođe do kvara invertera.
- Izvedba sa po jednim izmjenjivačem po fotonaponskom nizu: samo ime izvedbe nam govori da postoji inverter za svaki fotonaponski niz. Prednost je da nizovi ne moraju biti jednakih karakteristika i ne moraju biti jednako izloženi Sunčevom zračenju, te kvarom jednog invertera dolazi do isključenja samo tog odgovarajućeg niza, dok je mana skuplja izvedba i održavanje
- Izvedba sa većim brojem izmjenjivača (end. multi-inverter): u većini slučajeva predstavlja najpogodnije rješenje. Fotonaponski sustav je podijeljen u više podolja, gdje svatko podolje ima svoj izmjenjivač na koji paralelno spajamo više nizova. Glavna prednost je ta da u slučaju kvara jednog izmjenjivača neće doći do isključenja cijelog fotonaponskog sustava, a i izgradnja je jeftinija nego u slučaju gdje imamo po jedan izmjenjivač za svaki

niz. Glavna mana sustava ekonomske prirode a to je skuplje održavanje sustava. Prikaz mrežne fotonaponske elektrane možemo vidjeti na slici Slika 3.6.



Slika 3.6. Model mrežne fotonaponske elektrane [3]

Pri izgradnji fotonaponskog sustava, ključno je pravilno dimenzionirati fotonaponsku elektranu. Prije dimenzioniranja nužno je analizirati količinu potrošnje za koju se elektrana gradi, dostupnost Sunčeva zračenja i postoji li potreba za sustavom za pohranu energije, što ovisi o vrsti fotonaponske elektrane. Nakon toga slijedi dimenzioniranje elektrane, koja mora udovoljavati svim gore navedenim faktorima. Koraci dimenzioniranje fotonaponske elektrane su:

- 1) Odabir broja modula: kako bi smo zadovoljili željenu snagu, potreban je odabir ispravne količine modula. Potrebnu količinu modula dobijemo tako da se podjeli vršna instalirana snaga fotonaponske elektrane ( $P_i$ ), sa vršnom snagom fotonaponskog modula ( $P_{MPP}$ ) [3]:

$$n' = \frac{P_i}{P_{MPP}} \quad (3-6)$$

Kada odredimo potreban broj modula, s već poznatom veličinom svakog modula dobijemo potrebnu površinu fotonaponske elektrane [3]:

$$A_{FN} = A_{mod} \cdot n' \quad (3-7)$$

Gdje je:

$A_{FN}$  – površina fotonaponske elektrane

$A_{mod}$  – površina modula

Ako je površina  $A_{FN}$  veća od dostupne površine za instalaciju, potrebno je smanjiti broj modula ili koristiti učinkovitije module.

2) Definiranje karakteristika niza: određujemo vrijednosti napona vršne snage i praznog hoda, te

se izračunava minimalni i maksimalni napon vršne snage fotonaponskog niza, i maksimalni napon praznog hoda, prema sljedećim izrazima:

- maksimalni napon praznog hoda:

$$U_{PH,n,maks} = m \cdot U_{m,maks} \quad (3-8)$$

- maksimalni napon vršne snage:

$$U_{MPP,n,maks} = m \cdot U_{MPP,maks} \quad (3-9)$$

- minimalni napon vršne snage:

$$U_{MPP,n,min} = m \cdot U_{MPP,min} \quad (3-10)$$

Gdje je:

$m$  – broj modula

$U_{m,maks}$  – maksimalni napon praznog hoda na modulu

$U_{MPP,maks}$  – maksimalni napon vršne snage, na maksimalnoj temperaturi modula od 70 °C

$U_{MPP,min}$  – minimalni napon vršne snage, na minimalnoj temperaturi modula od -10 °C

3) Sljedeće je odabir odgovarajućeg izmjenjivača. Izmjenjivač se odabire prema karakteristikama fotonaponskog niza, kao što su: ulazna nazivna snaga, izlazna nazivna snaga, nazivni napon istosmjerne (DC) strane, nazivna frekvencija, učinkovitost, itd. [3].

4) Odabir voda: vod na DC strani odabire se tako da mora izdržati utjecaj struje kratkog spoja, te je potrebno uračunati način instalacije i utjecaj temperature na mjerodavnu struju. Maksimalnu struju voda, koju vod mora izdržati računamo prema izrazima [3]:

$$I_{z,DC} > 1.25 \cdot I_{KS} \quad (3-11)$$

$$i \quad I_{z,DC} = k_1 \cdot k_2 \cdot I_n \quad (3-12)$$

Gdje je:

$k_1$  – korekcijski faktor kod temperature  $T_{maks} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

$k_2$  – korekcijski faktor zbog postavljenih kanalica ili voda unutar cijevi

$I_n$  – nazivna struja

Dok struja AC strane mora zadovoljiti sljedeći uvjet [3]:

$$I_{z,DC} > \frac{P_i}{U_{AC} \cdot \cos \varphi}$$

Gdje je:

$P_i$  – instalirana snaga [W]

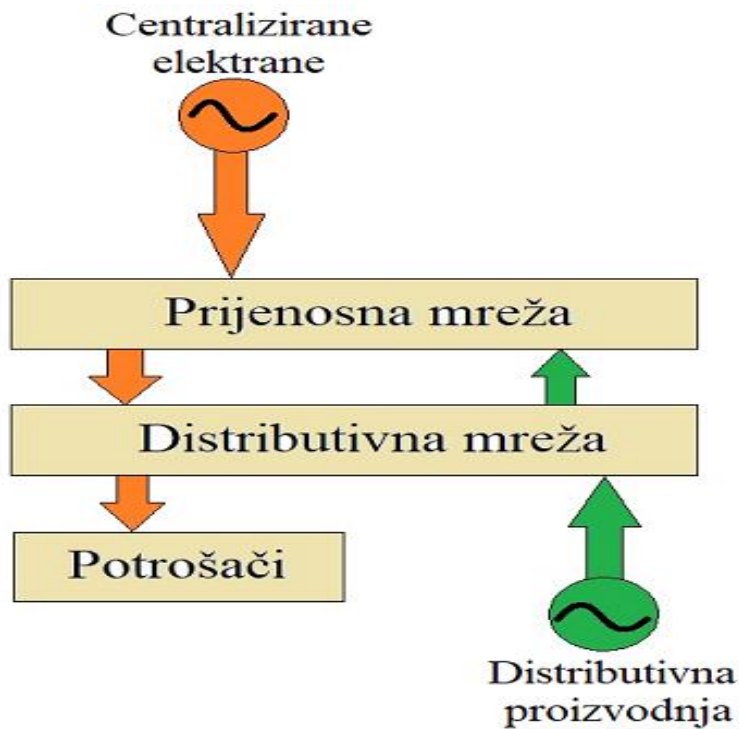
$U_{AC}$  – napon na AC strani [V]

$\cos \varphi$  – faktor snage

### 3.3. Utjecaj fotonaponske elektrane na tokove snaga u distributivnoj mreži

U posljednjih desetak godina, zbog povećanog interesa za prelazak sa konvencionalnih na nekonvencionalne ili obnovljive izvore energije, pojavio se koncept distribuirane proizvodnje. Distribuirana proizvodnja je dobila ime po tome što su elektrane priključene na distributivnu mrežu srednjeg ili niskog napona, tj. predstavlja proizvodnju u manjim lokalnim ili regionalnim razinama. Implementacijom distributivne proizvodnje se promijenio i koncept elektroenergetskog sustava kakvog poznajemo, a utjecaju na distribucijsku mrežu će biti opisani u daljnjem tekstu diplomskog rada.

Implementacijom fotonaponskih elektrana u distributivnu mrežu smo postigli to da je mreža postala aktivna, tj. tok snage više nije samo silazni od prijenosne mreže, na distributivnu pa do krajnjeg potrošača, nego sada imamo i uzlazni tok snaga uzrokovan proizvodnjom od strane samog potrošača koji sada sudjeluje u proizvodnji. Grafički prikaz možemo vidjeti na slici Slika 3.7.



Slika 3.7. Prikaz elektroenergetskog sustava

Ovisno o proizvodnji, koja je promjenjiva, tokovi snaga duž voda se mijenjaju tijekom dana. Tokovi snaga (ali i gubici) u pojedinim granama mreže mogu biti smanjeni, mogu promijeniti smjer ili ih povećati [4].

Smanjeni su kada je proizvodnja manja od potrošnje, tj. ako potrošač potroši svu proizvedenu snagu iz obližnje fotonaponske elektrane. Smjer snage mijenja smjer ako je proizvodnja veća od potrošnje, a daljnje povećanje proizvodnja rezultira povećanim tokovima snaga.

Za uspješno vođenje elektroenergetskog sustava, od iznimne je važnosti proračun tokova snaga. Tok snage  $\overline{S}_{ij}$  kroz granu mreže koja povezuje čvorove "i" i "j" računamo prema osnovi  $\pi$  sheme prema sljedećem izrazu [4]:

$$\begin{aligned}\overline{S}_{ij} &= P_{ij} + jQ_{ij} = \overline{V}_i \cdot \overline{I}_{ij}^* = \overline{V}_i \cdot [(\overline{V}_i - \overline{V}_j) \cdot \overline{Y}_{ij} + \overline{V}_i \cdot \overline{Y}_{i0}] \\ &= \overline{V}_i \cdot (\overline{V}_i^* - \overline{V}_j^*) \cdot \overline{Y}_{ij}^* + V_i^2 \cdot \overline{Y}_{i0}^*\end{aligned}\quad (3-13)$$

Tok snage u suprotnom smjeru računamo preko izraza [4]:

$$\overline{S}_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = \overline{V}_j \cdot \overline{I}_{ji}^* = \overline{V}_j \cdot [(\overline{V}_j - \overline{V}_i) \cdot \overline{Y}_{ji} + \overline{V}_j \cdot \overline{Y}_{j0}] = \overline{V}_j \cdot (\overline{V}_j^* - \overline{V}_i^*) \cdot \overline{Y}_{ji}^* + V_j^2 \cdot \overline{Y}_{j0}^* \quad (3-14)$$

Gdje je:

$\overline{S}_{ij}$  – tok kompleksne snage od čvora “i” do čvora “j”

$\overline{S}_j$  – tok kompleksna snage od čvora “j” do čvora “i”

$P_{ij}, P_{ji}$  – djelatna snaga od čvora “i” do čvora “j”

$jQ_{ij}, jQ_{ji}$  – jalova snaga od čvora “i” do čvora “j”

$\overline{V}_i, \overline{V}_j$  – fazor napona odgovarajućeg čvora

$\overline{I}_{ij}^*, \overline{I}_{ji}^*$  - kompleksno konjugirana struja “i” do čvora “j”, i obratno

$\overline{Y}_{ij}$  – admitancija grane od “i” do čvora “j”

$\overline{Y}_j$  – admitancija grane od čvora “j” do čvora “i”

$\overline{Y}_{i0}$  – admitancija čvora “i”

$\overline{Y}_j$  – admitancija čvora “j”

Gubitke prijenosa potom računamo pomoću izraza [4]:

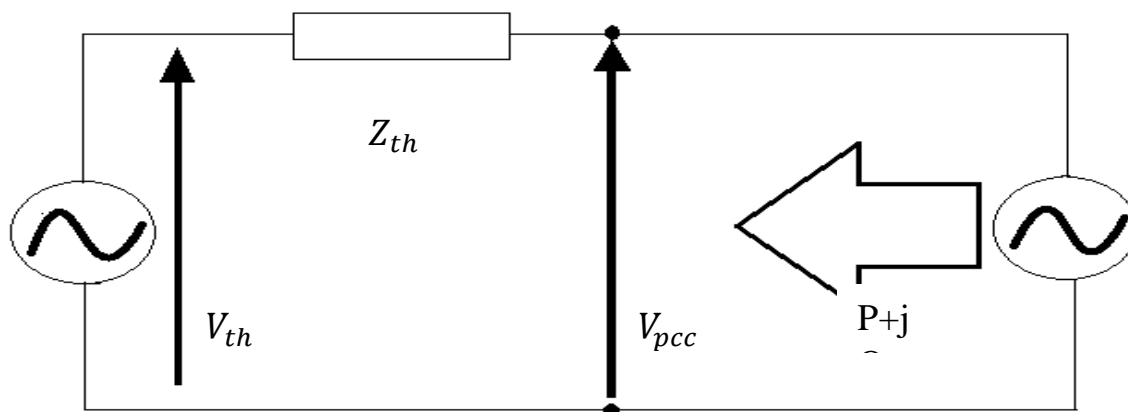
$$\overline{S}_g = \overline{S}_{ij} + \overline{S}_j \quad (3-15)$$

Iz gore priloženih izraza je vidljivo kako su gubici u prijenosu ovisno na naponima na čvorovima “i” i “j”. Tokovi snaga kroz grane su zapravo tokovi struja, a preveliki tokovi snaga uzrokuju zagrijavanje u transformatorima, kabelima i vodovima, što nam povećava gubitke i povećava naprezanje ovih elemenata mreže. Stoga je bitno odrediti tokove snaga kako bi smo znali koja razina integracije fotonaponskih elektrana je moguća, a da izbjegnemo preopterećenja.

Kako bi smo izbjegli termička preopterećenja, maksimalna proizvodnja iz fotonaponske elektrane mora biti manja od minimalne snage potrošnje. Tako ćemo izbjeći moguće uzlazne tokove snaga.

### **3.4. Utjecaj fotonaponske elektrane na naponske prilike u distributivnoj mreži**

Priključenje fotonaponske elektrane ili nekog drugog distributivnog generatora rezultira porastom napona na mjestu priključka, te može rezultirati i povećanjem napona kod obližnjih potrošača. Kako su ograničenja napona veće važnosti od ograničenja tokova snaga, ograničenja napona određuju veličinu fotonaponske elektrane koja smije biti priključena na lokaciju. Inicijalno predviđanje porasta napona možemo dobiti preko Theveninove mreže kako je prikazano na slici Slika 3.8.



Slika 3.8. Theveninova mreža

Mrežu lijevo od priključka možemo prikazati kao Theveninovu mrežu, i gdje možemo preko snage kratkog spoja ( $S_k$ ) i omjera  $X/R$  na mjestu priključka (PCC) izračunato Theveninovu impedanciju  $Z_{th}$  [4]. Porast napona možemo dobiti preko izraza [4]:

$$\Delta V \approx \frac{(P_R + Q_X)}{V} \quad (3-16)$$

Gdje je:

$\Delta V$  – porast napona

$P_R$  – djelatna snaga izvora

$Q_X$  – jalova snaga izvora

$V$  – nazivni fazni napon

Dozvoljeni porast napona zavisi od trenutnog stanja mreže, tj. koliko je trenutni napon blizu maksimalno dozvoljenom.

Četiri su osnovne metode za povećanje razine integracije pomoću regulacije napona, a to su:

- 1) Regulacija napona promjenom prijenosnog omjera transformatora: vjerojatno najučestalija metoda gdje pomoću ručne ili automatske preklopke transformatora povećavamo broj zavoja VN strane i time snižavamo napon na NN strani. S ručnom preklupkom radimo regulaciju samo u beznaponskom stanju, te tada preklopke u određenom položaju ostaju duže vrijeme. Kod automatskih preklopki imamo regulator koji može mijenjati broj zavoja i pod naponom. Ova metoda je pouzdanija i pruža nam upravljanje u stvarnom vremenu.

- 2) Regulacija napona povećanjem presjeka odgovarajućih vodova i povećanjem snage transformatora, ili izgradnjom novih izvoda (vodovi, transformatori): povećanjem snage transformatora i postavljanjem novih vodova ili s većim presjekom povećavamo prijenosnu moć, što rezultira povećanjem razine integracije. Povećanjem presjeka voda dobivamo veću prijenosnu moć ali su nam padovi napona za vrijeme minimalnog opterećenja veći, a ugradnja novog izvoda je najjednostavnija i omogućuje da ako se prenaponi i pojave, njemu izložena samo generatorska jedinica. Glavni nedostatak ove metode je velika investicija i neisplativost kod proizvodnje manjih snaga.
- 3) Regulacija napona djelatnom i jalovom snagom: ove metode većinom koristimo kada imamo prenapon samo nekoliko sati godišnje. Kod regulacije djelatnom snagom ( $P(U)$ ), najjednostavnije rješenje je ograničiti ili isključiti proizvodnju tijekom tih sati. Kad kažemo ograničiti proizvodnju, tad mislimo da nam je konstantna proizvodnja iznosom niža od maksimalne, te tu razliku nazivamo rotirajućom rezervom. Kod regulacije jalovom snagom ( $Q(U)$ ), mijenjanjem faktora snage sa  $\cos \varphi = 1$  na niži faktor snage, možemo oduzimanjem induktivne jalove snage iz mreže na mjestu priključka smanjiti porast napona.
- 4) Kombinacijom gore navedenih metoda: ovisno o veličini fotonaponske elektrane, određujemo najpovoljnije i tehnički najispravnije rješenje.

### **3.5. Utjecaj fotonaponske elektrane na strujne prilike u distributivnoj mreži**

Fotonaponske elektrane u distributivnoj proizvodnji mogu prouzrokovati strujno preopterećenje mreže. Strujna preopterećenja se većinom događaju kada je potrošnja minimalna, a to su popodnevi sati u ljetnim danima kada imamo maksimalnu proizvodnju fotonaponskih elektrana. Glavni negativni utjecaji strujnog preopterećenja su termička opterećenja vodova i transformatora, što povećava gubitke a može dovesti i do kvara uređaja.



Kao i u prijašnjim slučajevima postoje razne metode za reduciranje strujnih opterećenja što će rezultirati povećanjem razine integracije:

- 1) Povećanje opterećenja voda - najučestalija metoda korištena do sada je bila povećanje presjeka voda ili izgradnja dodatnih vodova, zbog omogućavanja prijenosa većih struja a samim time i snaga u sustavu. U današnje vrijeme se koristi DLR metoda (dinamička opteretivost voda), koja u stvarnom vremenu prema vanjskim utjecajima i trenutnoj potrošnji u sustavu računa prijenosnu moć sustava.
- 2) Dinamička poprečna i uzdužna kompenzacija – Pri poprečnoj regulaciji koristimo transformatore za upravljanje smjerom i iznosom tokova snaga u pojedinim granama [5]. Kod uzdužne kompenzacije za upravljanje reaktivnim i djelatnim tokovima snaga koristimo sinkrone kompenzatore i FACTS uređaje energetske elektronike. Također za uzdužnu kompenzaciju koristimo dvije primjene:
  - a) Regularni način rada – moguć je samo u umreženim sustavima, koji bez obzira na potrošnju ili proizvodnju nastoji tokove snaga održati stalnima
  - b) Metoda praćenja – mijenja se impedancija praćenjem proizvodnje i potrošnje, te je moguće mijenjanje tokova snaga
- 3) Sustavi za upravljanje energijom (EMS) – Koristi se implementiranjem ICT tehnologije u postojeći sustav upravljanje energijom. Ostvaruje komunikaciju između proizvodnje, potrošnje i sustava za pohranu električne energije. Ukratko, za vrijeme strujne preopterećenosti potrebno je pohraniti višak električne energije u spremnike električne energije ili smanjiti proizvodnju iz konvencionalnih elektrana
- 4) Upravljanje potražnjom – Nastoji se smanjiti maksimalna (vršna) proizvodnja (peak shaving). To zahtjeva daljnji razvoj elektroenergetskog sustava ka naprednim mrežama. Tada će operatori elektroenergetskog sustava moći daljinski uključiti određene uređaje tijekom minimalne potrošnje kako bi se smanjilo strujno opterećenje a i iznos vršne snage.

Važno je napomenuti i utjecaj fotonaponske elektrane na iznos struje kratkog spoja. Postoje dva slučaja, a ovise o vrsti izmjenjivača:

- a) Izmjenjivač vođen mrežom – pri kratkom spoju u mrežu daje istosmjernu struju, koja ima zanemarivo mali utjecaj na iznos struje kratkog spoja

- b) Samovođeni izmjenjivač – pro kratkom spoju u mrežu daje izmjeničnu struju koja doprinosi iznosu početne i udarne struje kratkog spoja.

### **3.6. Utjecaj fotonaponske elektrane na kvalitetu električne energije**

Utjecaj fotonaponske elektrane na kvalitetu ne ovisi samo o elektrani nego i o parametrima mreže na koju je spojena. To znači ako spojimo elektranu na krutu mrežu, fotonaponska elektrana će imati zanemariv utjecaj na kvalitetu električne energije. Mjerenja se vrše sedam dana prije priključenja i sedam dana nakon priključenja fotonaponske elektrane, nakon čega se izrađuje elaborat utjecaja fotonaponske elektrane na kvalitetu električne energije. Norma EN 50160 propisuje vrijednosti i odstupanja mjerodavnih veličina na kvalitetu električne energije, poput: frekvencije, simetrije, flikera, itd. Fotonaponske elektrane se spajaju na mrežu preko izmjenjivača, koji u mrežu uvode struje viših harmonika, ali u posljednje vrijeme pomoću pulsno-širinske modulacije taj utjecaj se znatno smanjio. Struje viših harmonika se uglavnom najviše injektiraju u jutarnjim i večernjim satima, te u razdobljima naglih promjena proizvodnje.

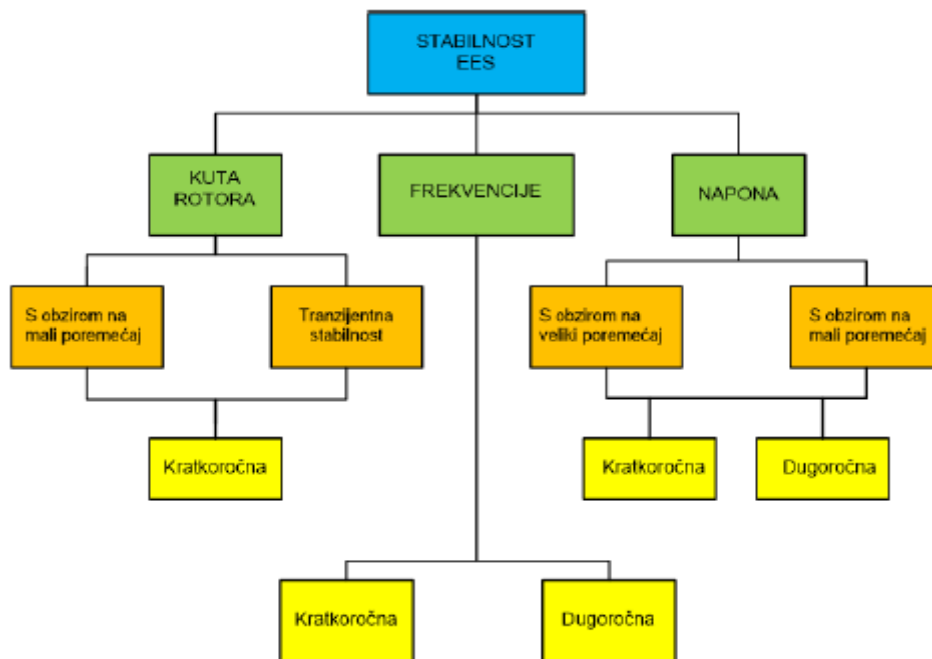
### **3.7. Utjecaj fotonaponske elektrane na stabilnost u sustavu**

Stabilnost elektroenergetskog sustava je sposobnost da se nakon poremećaja, sustav vrati u stabilno stanje. Stabilnost sustava se iskazuje pomoću nekolicine pokazatelja, koji su prikazani na slici Slika 3.9.

Fotonaponske elektrane ne daju doprinos inerciji sustava, što nepovoljno utječe na stabilnost u sustavu. Ukupnu inercijsku konstantu sustava računamo prema izrazu 3-17, a računa se kao omjer ukupne kinetičke energije sustava i ukupne instalirane snage sustava [6]:

$$H_{tot} = \frac{\varepsilon_{tot}}{S_{tot}} = \frac{\sum H_i \cdot S_i}{S_{tot}} \quad (3-17)$$

Sve većom zamjenom konvencionalnih izvora energije s FN elektranama doprinosimo smanjenju inercije u sustavu, čime negativno utječemo na stabilnost u sustavu i time većim promjenama frekvencije pri normalnom radu. Većim promjenama frekvencije osjetljivost sustava na disbalans između proizvodnje i potrošnje je veća [6].



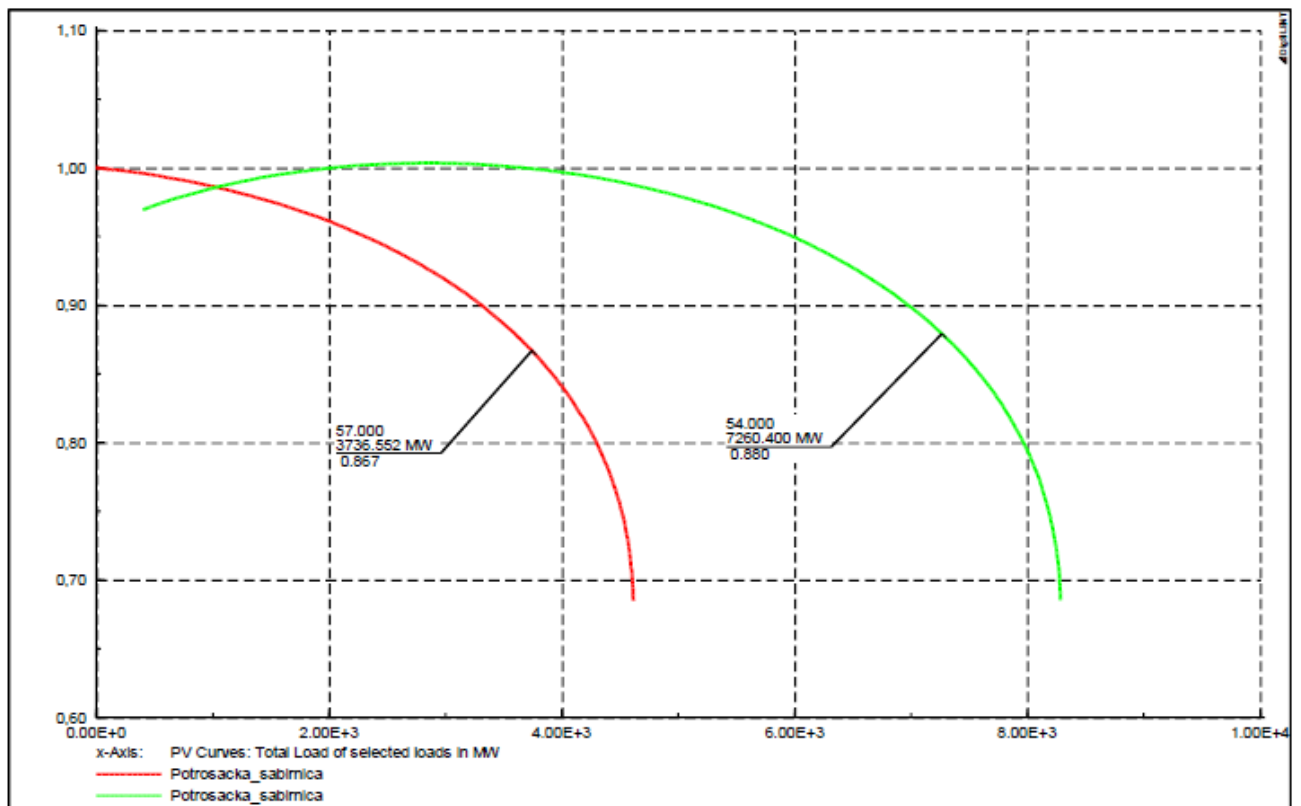
Slika 3.9. Pokazatelji stabilnosti elektroenergetskog sustava [7]

Kako bi smo smanjili taj utjecaj, potrebna je primjena tzv. emulacije inercije. Emulacija inercije je zapravo ne dopušta stalna maksimalna proizvodnja fotonaponske elektrane, nego samo u slučajevima potrebe. Ovako stvaramo rezervu koja nam pomaže održati sustav stabilnim. Veće promjene frekvencije mogu aktivirati zaštitu u sustavu, te dovesti do isklapanja dijela mreže.

Fotonaponske elektrane imaju utjecaj i na naponsku stabilnost. Glavni pokazatelji naponske stabilnosti su PV i QV krivulje.

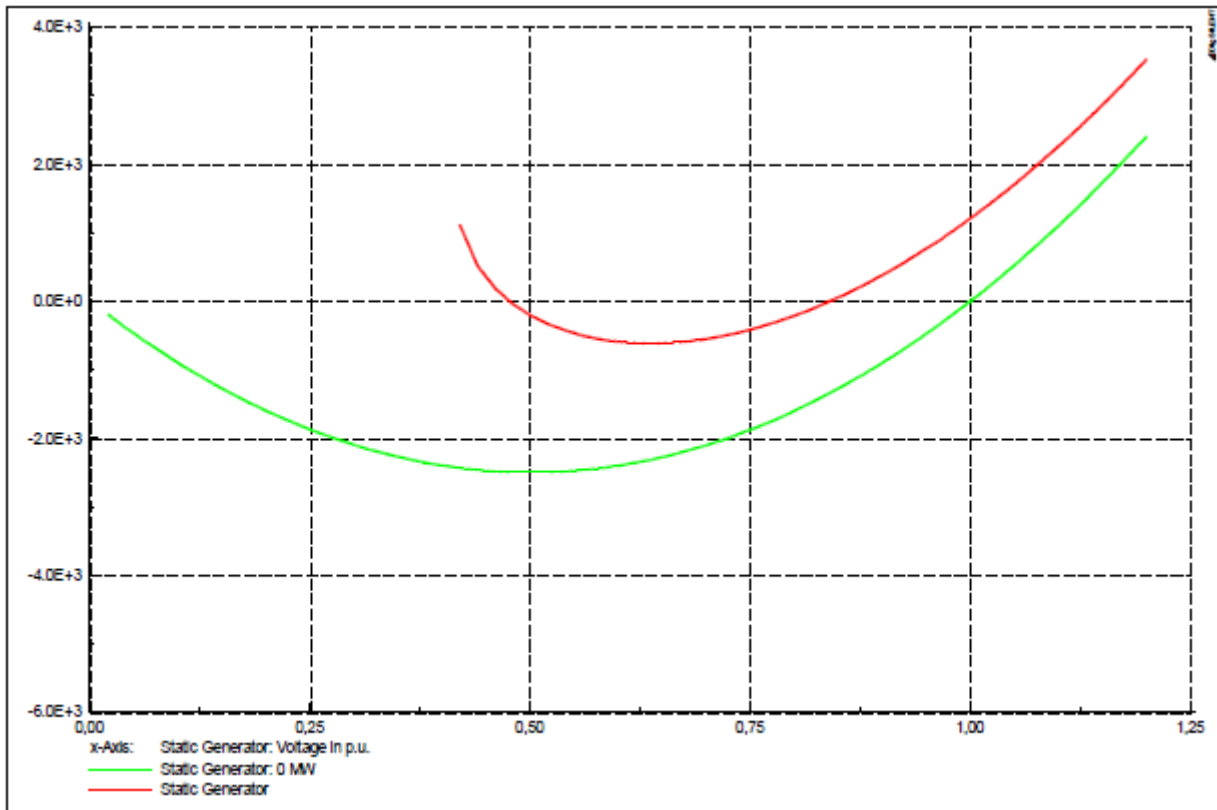
PV krivulja nam prikazuje ovisnost prenesene djelatne snage o naponu [6]. PV analizom analiziramo utjecaj povećanja djelatne snage na napon na sabirnicama potrošača. Povećanjem toka djelatne snage, povećavamo pad napona duž voda, sve do naponskog sloma. Pomoću PV krivulje možemo odrediti iznos napona pri kojem dolazi do naponskog sloma, slika **Error! Reference source not found.**

Sa slike Slika 3.11 možemo primijetiti na zelenoj krivulji kako dodavanjem proizvodnje u samoj blizini potrošača možemo prenijeti znatno veću djelatnu snagu, a da ne dođe do naponskog sloma.



Slika 3.10. PV krivulja[6]0

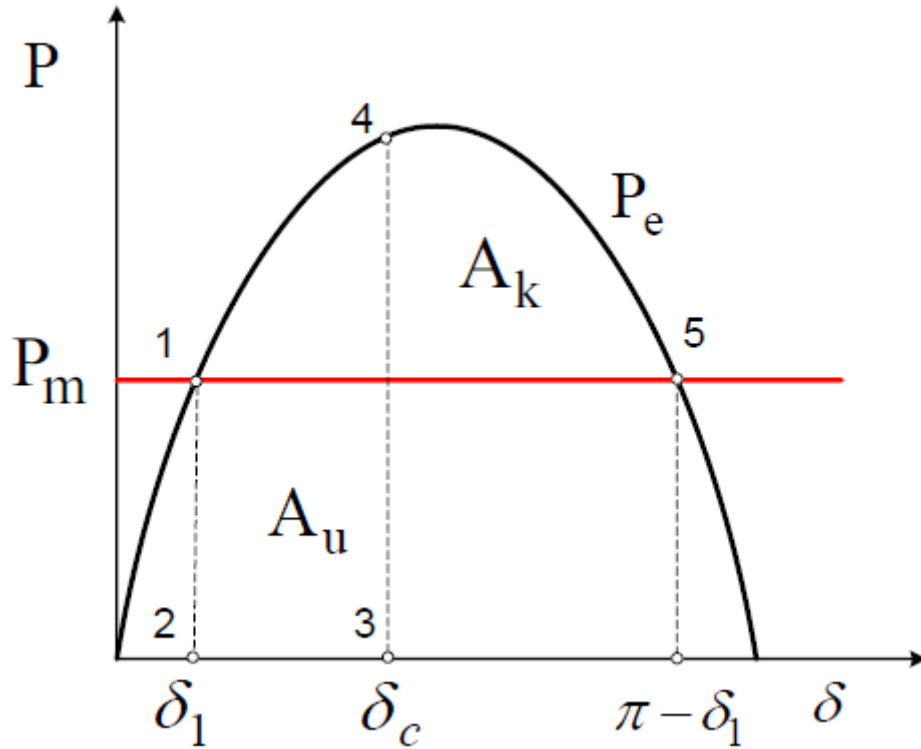
QV krivulje nam prikazuju promjenu napona u ovisnosti o apsorbiranoj ili injektiranoj jalovoj snazi. Pomoću QV krivulje očitavamo minimalnu potrebnu jalovu snagu za održiv pogon. Na dnu QV krivulje vrijedi da je  $dQ/dV=0$ , što nam predstavlja granicu stabilnosti. Za održiv rad sustava je potreban uvjet  $dQ/dV>0$ , što opisuje desni dio krivulje. U lijevom dijelu krivulje održiv rad sustava nije moguć. Integracijom fotonaponske elektrane ili nekog drugog distributivnog izvora podižemo napon na mjestu priključka, što znači da se granica stabilnosti pomiče u desno. QV krivulju možemo vidjeti na slici Slika 3.11. Crvena krivulja nam predstavlja sustav gdje nemamo distributivnu proizvodnju, a zelena gdje je distributivna proizvodnja jednaka 0.85 p.u. potrošnje.



Slika 3.11. QV krivulja [6]

Integriranjem fotonaponskih sustava utječemo i na tranzijentnu stabilnost sustava. Kako je već navedeno u prijašnjem tekstu, integriranjem fotonaponskih sustava povećavamo snagu prijenosa  $P_e$  i povećavamo napon na mjestu priključka, sve to negativnu utječe na tranzijentnu stabilnost. Posebno je negativan utjecaj ako fotonaponskim elektranama zamjenjujemo proizvodnju iz konvencionalnih elektrana, jer tada aktivnu doprinosimo i manjenju inercije, što dovodi do brže promjene kuta i veće površine ubrzavanja ( $A_u$ ) rotirajućih generatora. Krivulja tranzijentne stabilnosti prikaza je na slici 3.12.

Tranzijentna stabilnost je održava sve dok su površina kočenja ( $A_k$ ) i površina ubrzavanja ( $A_u$ ) jednake, što možemo vidjeti i na krivulji. Pri tom uvjetu računamo vrijednost kritičnog kuta isključenja ( $\delta_c$ ), i nakon toga kritično vrijeme isključenja ( $t_c$ ).



3.12. P- $\delta$  krivulja sustava [6]

### 3.8. Utjecaj fotonaponske elektrane na gubitke u sustavu

Gubitke u mreži opisujemo kao razliku proizvedene i potrošene energije, što je prikazano izrazom:

$$P_g = P_p - P_k \quad (3-18)$$

Gdje je:

$P_g$  – snaga gubitaka [W]

$P_p$  – proizvedena snaga [W]

$P_k$  – iskorištena ili potrošena snaga [W]

Kako djelatni gubici (Joul-ovi gubici) ovise o iznosu struje, možemo zaključiti kako su oni najveći u distribucijskoj mreži, pa stoga integracijom fotonaponskih elektrana većinom pozitivno utječemo na smanjenje gubitaka. Joulove gubitke računamo prema izrazu:

$$P_g = I^2 \cdot R \quad (3-19)$$

Joul-ovi su najveći gubici tijekom prijenosa električne energije i javljaju se u vodovima i u transformatoru kao gubici u bakru, no postoje i gubici u željezu koji se javljaju pri izmjeničnim magnetskih poljima.

Fotonaponske elektrane pozitivno utječu na smanjenje gubitaka ako je proizvodnja manja od potrošnje koju opskrbljuje, jer se tada smanjuju tokovi snaga. Međutim, ako je proizvodnja veća, dolazi do povećanih tokova snaga, tj. imamo i uzlazni tok snage, te se gubici povećavaju. Proračun tokova snaga prikazan je u poglavlju 3.3. Za određivanje utjecaja integracije fotonaponskih sustava na gubitke u mreži, koristimo matematičke izraze. Prvi korak je odrediti gubitke za referentno stanje mreže, tj. bez distributivne proizvodnje, prema izrazu: [8]

$$F_0 = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T [L_s(t)]^2 \cdot dt \quad (3-20)$$

Nakon toga je potrebno izračunati gubitke kad priključimo distributivnu proizvodnju [8]:

$$F_{DG} = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T [L_s(t) - G_s(t)]^2 \cdot dt \quad (2-21)$$

Utjecaj distributivne proizvodnje na gubitke u mreži dobijemo preko izraza [8]:

$$\Delta F = \sum_{s=1}^{N_s} \int_0^T G_s(t) \cdot [2L_s(t) - G_s(t)] \cdot dt \quad (3-22)$$

Gdje je:

$N_s$  – broj dijelova pojnog voda

$L_s$  – opterećenje nizvodno od dijela pojnog voda

$G_s$  – proizvodnja nizvodno od dijela pojnog voda

Iz gornjeg izraza možemo primijetiti ako je:

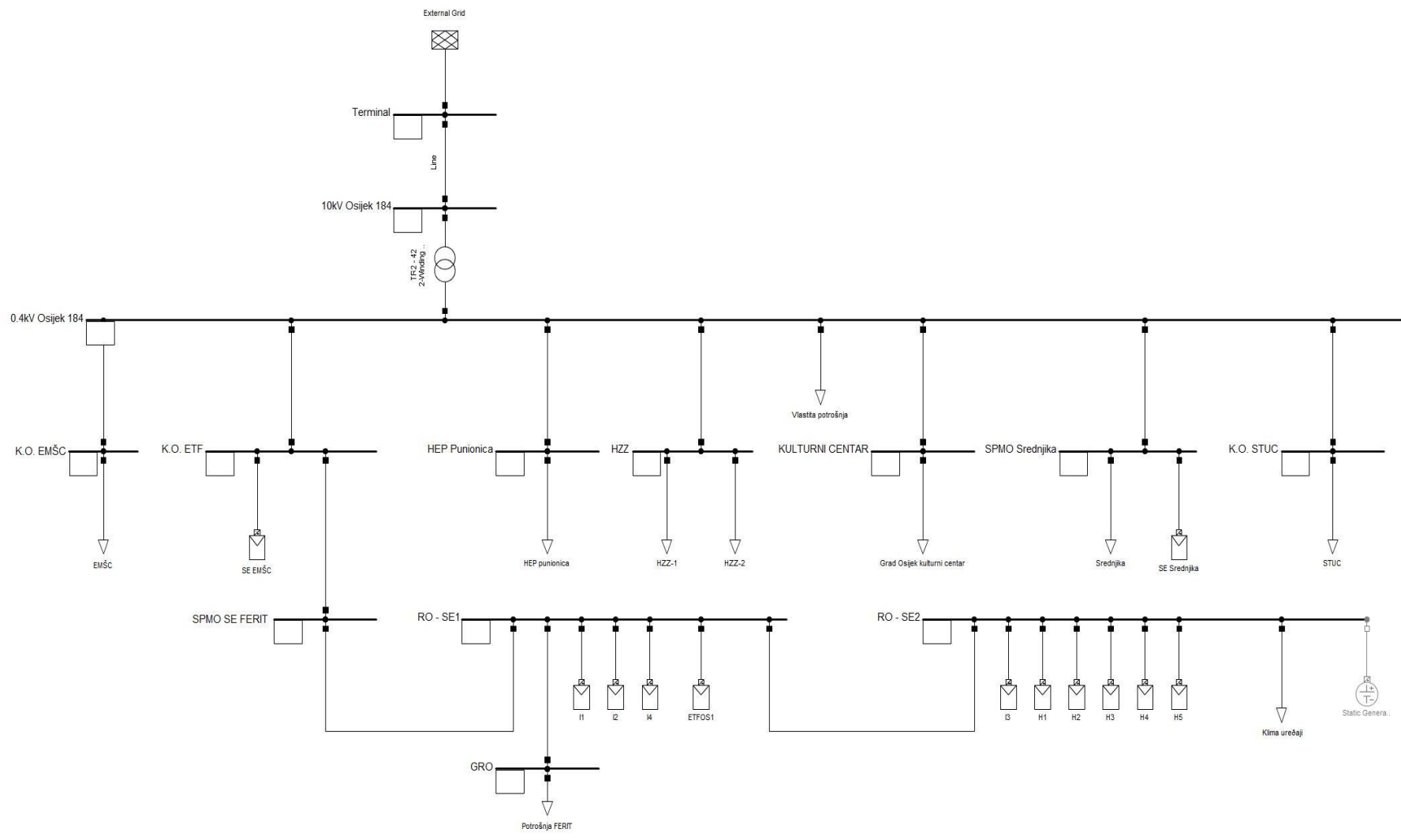
$$2L_s(t) - G_s(t) > 0$$

Utjecaj distribuirane proizvodnje je pozitivan, i doći će do smanjenja gubitaka.



#### **4. DNEVNA SIMULACIJA MIKROMREŽE FERIT1 U DIGSILENT-U**

U ovom poglavlju će se modelirati potrošnja i proizvodnja u mikromreži FERIT 1, te će se provesti simulacije tri slučaja (dana) za određivanje referentnog slučaja. Maksimalna instalirana snaga na izvod od 0,4kV, kao što su RO-SE2 i -RO-SE1 je 100kW prema mrežnim pravilima za distributivnu mrežu[11]. U simulacijama će se povećavati snaga na izvodu preko 100kW kako bi se jasnije prikazale promjene u mikromreži. Povećanjem instalirane snage fotonaponske elektrane promatrati će se povećanje napona u mikromreži FERIT 1, posebno na sabirnicama najbližim fotonaponskoj elektrani. Također će se promatrati i promjena tokova snaga, te što su posljedice tih promjena. U analizi će se osim porast napona na sabirnicama i tokova snaga promatrati i opterećenje vodova u mikromreži te opterećenje transformatora TR-42, koji spaja mikromrežu i krutu mrežu. Potom će se smanjivanjem trofazne snage kratkog spoja krute mreže do granice stabilnosti primijeniti metode za povećanje integracije. Smanjenjem trofazne snage krute mreže ćemo moći prikazati kako se određenim metodama povećava stupanj integracije za slabije (ruralne) mreže. Shema mikromreže FERIT1 prikazana je na slici 4.1.



4.1. Shema mikromreže FERIT1 u DIGSILENT PowerFactory-u

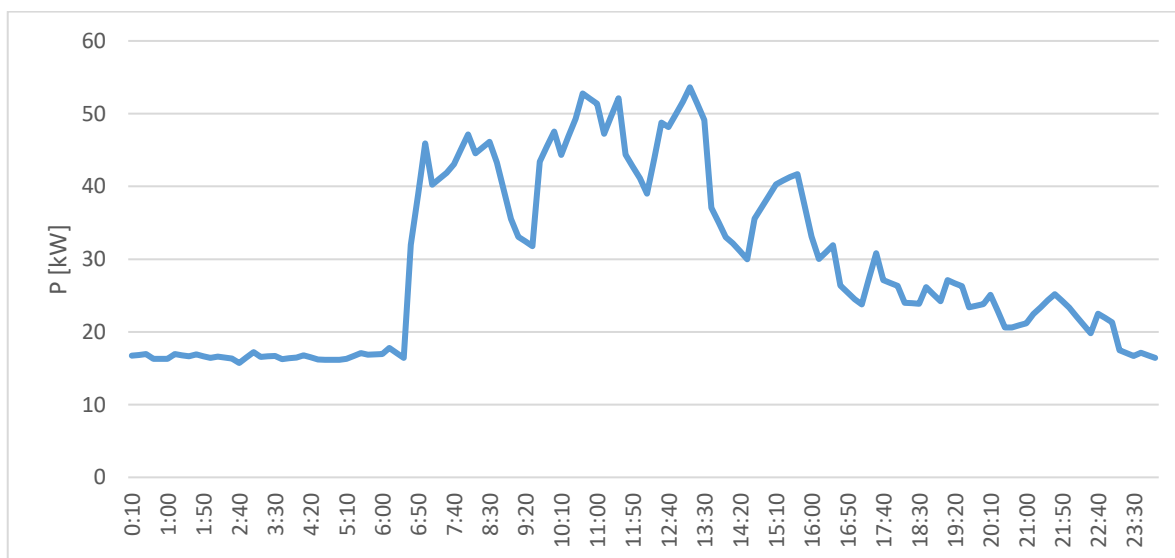
## 4.1. Modeliranje potrošnje

Zadatak diplomskog rada je odraditi *TimeSweep* analizu pomoću programskog paketa DIgSILENT, kako bi smo imali uvid u 10-minutne promjene snage i napona u mikromreži FERIT1 i okolnoj mreži. Zadatkom su zadana tri dana za koje je potrebno odraditi analizu:

- Slučaj 1: 15.lipanj kao slučaj s najdužim danom i uobičajenom potrošnjom zgrade FERIT-a u Trpimirovoj ulici,
- Slučaj 2: 1. kolovoz kao slučaj s najmanjom potrošnjom zgrade a najvećom proizvodnjom (ljetni raspust) i
- Slučaj 3: 15. prosinac kao suprotni slučaj najkraćeg dana s najvećom potrošnjom.

### 4.1.1. Mjereni profili potrošnje za mikromrežu FERIT 1

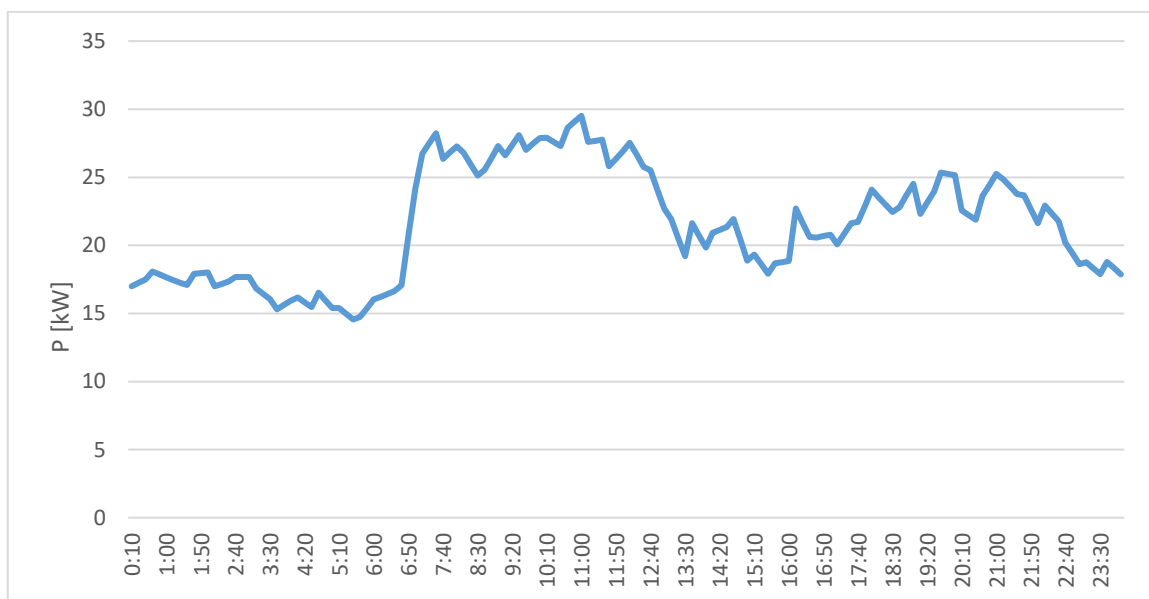
Početni korak za izradu *TimeSweep* analize je odrediti potrošnju, a nju ćemo prikazati pomoću dnevnog dijagrama opterećenja, gdje također imamo 10-minutne promjene opterećenja. Dnevni dijagram opterećenja za mikromrežu FERIT1 je poznat za sva tri dana, dok nam dnevni dijagrami opterećenja ostalih potrošača spojenih na Transformatorsku stanicu (TS) OSIJEK 184 nisu poznati, i njih je moguće predstaviti pomoću standardnih profila potrošnje koje nudi programski paket DIgSILENT. Dnevni dijagram opterećenja za 15.lipanj, prikazan je na slici 4.2.



4.2. Dnevni dijagram opterećenja za 15. lipanj

Na slici 4.2 možemo primjetiti kako se mijenja potrošnja zgrade FERIT-a tijekom dana. Od 00:10 h do 6:30 imamo samo temeljnu potrošnju zgrade, otprilike 17 kW. Nakon 6:30 h snaga potrošnje znatno raste, a razlog tomu je dolazak zaposlenika fakulteta i uključivanje uređaja (računala, klima uređaja, itd.). U vremenu od 8:00 h do 16:00h vidimo najveću potrošnju, s maksimumom u 13:00. U tom vremenu je zgrada fakulteta puna studenata i radnika, te su uključeni skoro svi uređaji u kabinetima i učionicama. Nakon 16:00 h možemo primjetiti stalno smanjenje snage potrošnje, koje ponovno u kasnim noćnim satima dolazi do konstantne potrošnje zgrade fakulteta.

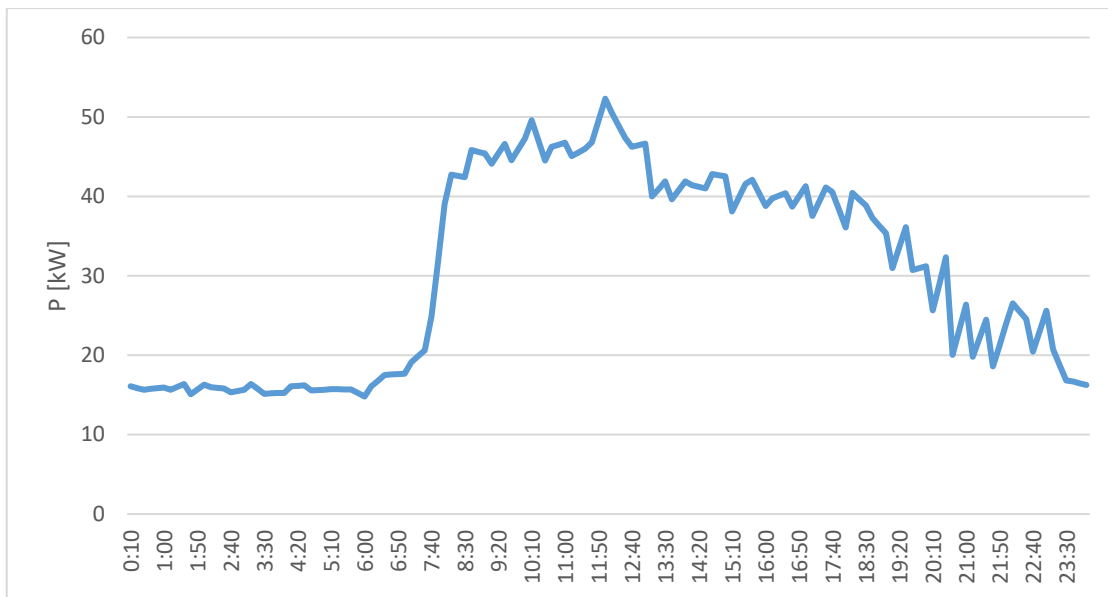
Dnevni dijagram opterećenja za 1.kolovoz, prikazan je na slici 4.3 **Error! Reference source not found.**



4.3. Dnevni dijagram opterećenja za 1. kolovoz

Na dijagramu dnevnog opterećenja možemo ponovno primijetiti kako u vremenu od 00:10 h do do 6:30 h imamo male oscilacije u potrošnji, tj. imamo temeljnu potrošnju zgrade. Nakon 6:30 h potrošnja naglo raste, zbog dolazaka zaposlenika fakulteta i uključivanja uređaja potrebnih za rad. U razdoblju od 7:00 h do 13:00 h imamo maksimalnu potrošnju s malim oscilacijama, te nakon toga dolazi do smanjenja potrošnje do vremena 15:00. Nakon 15:00 h imamo ponovan rast, te oscilacije potrošnje oko 23 kW, sve do 22:00 h. Nakon 22:00 h imamo ponovno opadanje potrošnje sve do temeljne koja se javlja u 00:00 h.

I dnevni dijagram opterećenja za 15.prosinac, prikazan je na slici 4.4.



4.4. Dnevni dijagram opterećenja za 15. prosinac

Kao i u prijašnjim dijagramima dnevnog opterećenja, primjećujemo male oscilacije u potrošnji u vremenu od 00:10 h do 6:30 h. Od 6:30 h dolazi do naglog rasta potrošnje zbog dolaska zaposlenika. U vremenu u 8:00 h do 13:00 h vidimo da je potrošnja zgrade fakulteta najveća, s maksimumom od 52,292 kW u 12:00 h. Nakon 13:00 h vidimo trend polaganog opadanja potrošnje sve dok ne postigne vrijednost temeljne potrošnje.

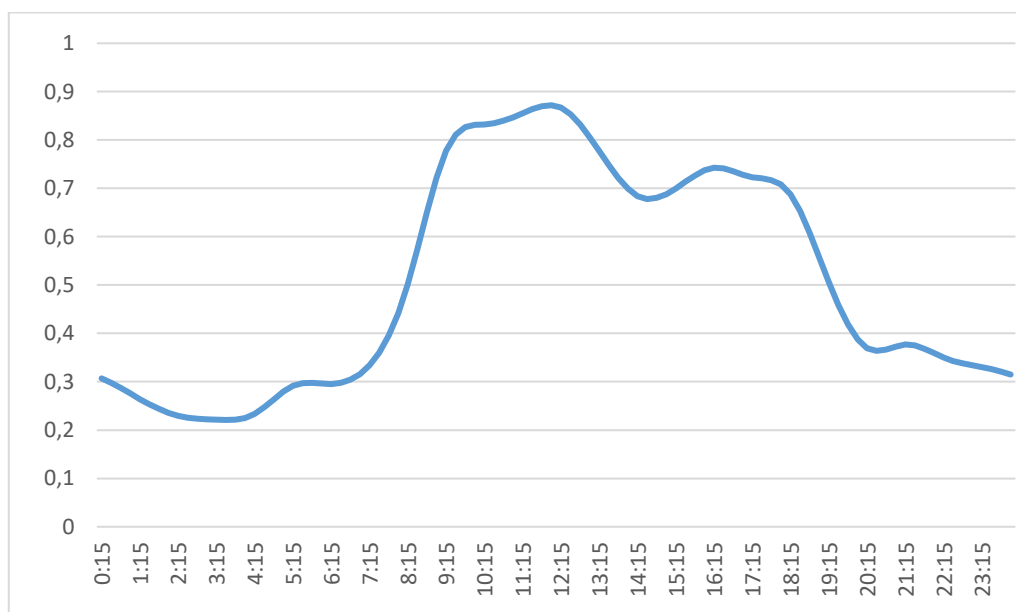
#### 4.1.2. Standardni profili potrošnje za ostale potrošače u okolini mikromreže programskog paketa DIGSilent

Kako je već prije napomenuto, potrošnja ostalih potrošača spojenih na TS OSIJEK 184 nam nisu poznati. Profile ćemo odabrati prema namjeni zgrada, kako bi smo dobili što točnije rezultate. Snaga je izražena u kW. Profili potrošnje koje nudi programski paket DIGSILENT su sljedeći:

##### 1. G0 profil

Profil G0 prikazuje najučestaliji tip potrošnje u elektroenergetskom sustavu. Dnevni dijagram potrošnje tijekom radnih dana je jednak kao i dnevni dijagram potrošnje cjelokupnog

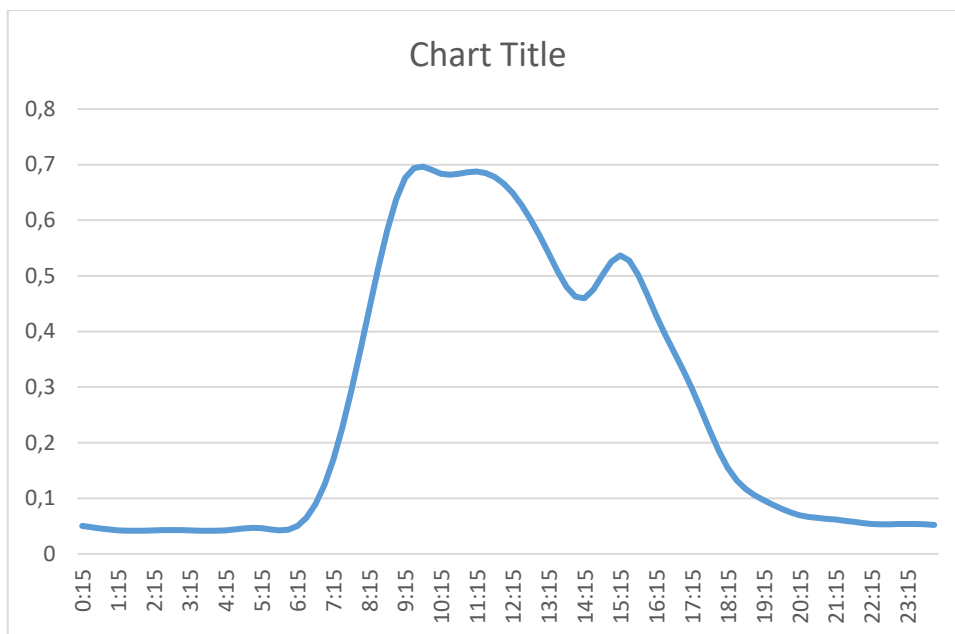
elektroenergetskog sustava. Tijekom vikenda krivulja opterećenja raste od 7 sati ujutro sve do otprilike 13 sati popodne, nakon čega počinje blago opadati do 16 sati, i nakon toga imamo opterećenje temeljno opterećenje tog potrošača. Na dnevnom dijagramu opterećenja profila G0 tijekom radnog tjedna, od ponedjeljka do petka, također možemo primijetiti kako potrošnja naglo raste u jutarnjim satima, s maksimum potrošnje oko 12 sati popodne. Krivulja nakon blago opada sve do 15 sati, nakon čega se ponovno penje i ponovno opada iza 18 sati, i nakon toga stagnira, tj. imamo temeljnu potrošnju sustava. Profil G0 možemo koristiti kao nadomjesni tip potrošnje zgrade Studentskog centra Osijek (STUC), jer on radi svaki dan u jednakom režimu.



4.5. Profil G0

## 2. G1 profil

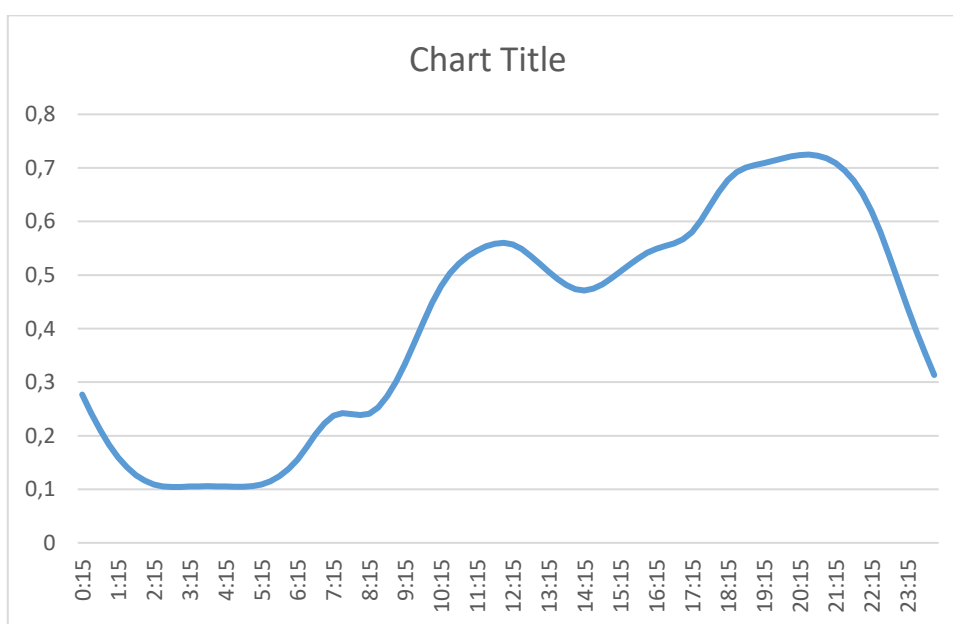
Profil G1 ima vrlo sličan dnevni dijagram opterećenja kao i G0 tijekom radnog tjedna. Najveća razlika se događa tijekom vikenda, kada u pravilu ovakav tip potrošača nije aktivan, te imamo samo njegovu temeljnu potrošnju. G1 profil možemo koristiti kao nadomjesni tip potrošnje Hrvatskog zavoda za zdravstvo Osijek (HZZ) i Srednje elektrotehničke i prometne škole Osijek (EMŠC).



4.6. Profil G1

### 3. G2 profil

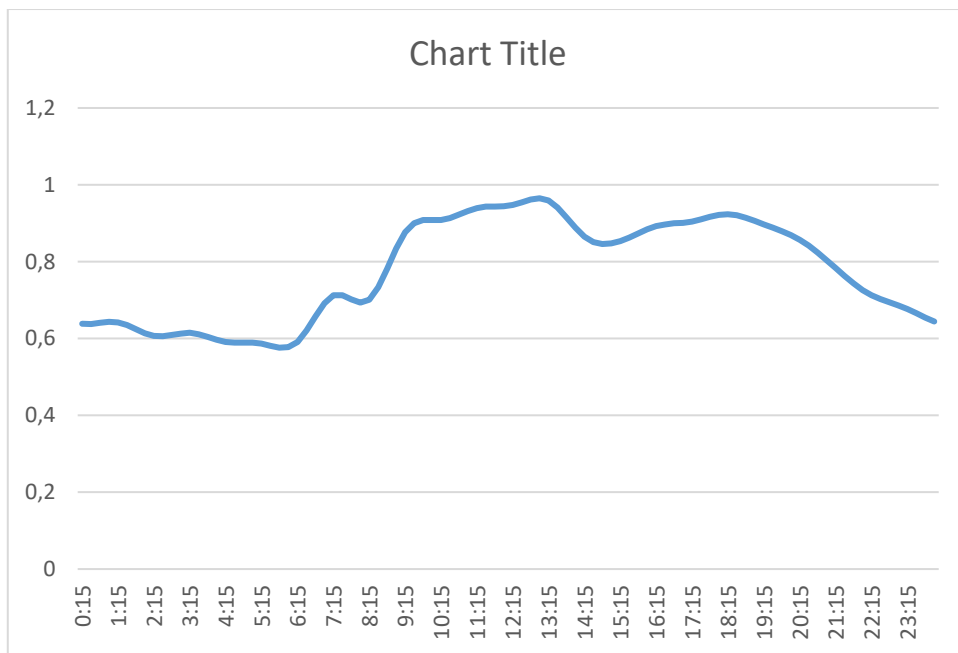
Profil G2 se najčešće upotrebljava kad je potrebno nadomjestiti tip potrošnje kod potrošača kod kojih se javlja povećana potrošnja prilikom noćnih sati. Za naš slučaj, ovim profilom možemo adekvatno nadomjestiti potrošnju srednjoškolskog igrališta Srednjika, gdje se za vrijeme noći javlja povećana potrošnja zbog upaljenih svjetala i reflektora, i Kulturnog Centra Osijek, gdje su izvedbe i izložbe većinom u kasnijim satima dana.



4.7. Profil G2

#### 4. G3 profil

Profil G3 predstavlja potrošače koji su aktivni od 0 – 24 sata, tijekom cijele godine. I na ovom dijagramu kao i kod profila G2 možemo primijetiti porast opterećenja u večernjim satima zbog potrebe za osvjetljenjem, najveći porast je od 20 sati. Ovim profilom možemo nadomjestiti potrošnju HEP punionice električnih automobila (ELEN punionica) i benzinske postaje INA.



4.8. Profil G3

### 4.2. Modeliranje proizvodnje

Nakon oblikovanja trenutne potrošnje, sljedeći korak za provođenje *TimeSweep* analize je odrediti i trenutnu proizvodnju fotonaponske elektrane FERIT1. 10-minutne vrijednosti proizvodnje iz fotonaponske elektrane FERIT1 je potrebno unijeti u DIGSILENT. Nakon uvođenja podataka, ćemo pomoću *TimeSweep* analize dobiti potrebne tokove snaga i naponske prilike koje su nam



potrebne kako bi smo mogli odrediti utjecaj fotonaponske elektrane na mikromrežu FERIT1 i okolne potrošače.

#### 4.2.1. Proizvodnja iz fotonaponske elektrane FERIT 1

Kako bi smo izračunali izlaznu snagu fotonaponske elektrane, koristimo formulu [3]:

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

Gdje je:

$P_{inv}$  – izlazna AC snaga izmjenjivača

$G_t$  – dnevna promjena intenziteta Sunčeva zračenja

$P_{string}$  – DC snaga niza modula

$G_{STC}$  – intenzitet sunčeva zračenja pri STC (standardnim testnim) uvjetima, iznosi 1000 W/m<sup>2</sup>

$\eta_{inv}$  – učinkovitost invertera

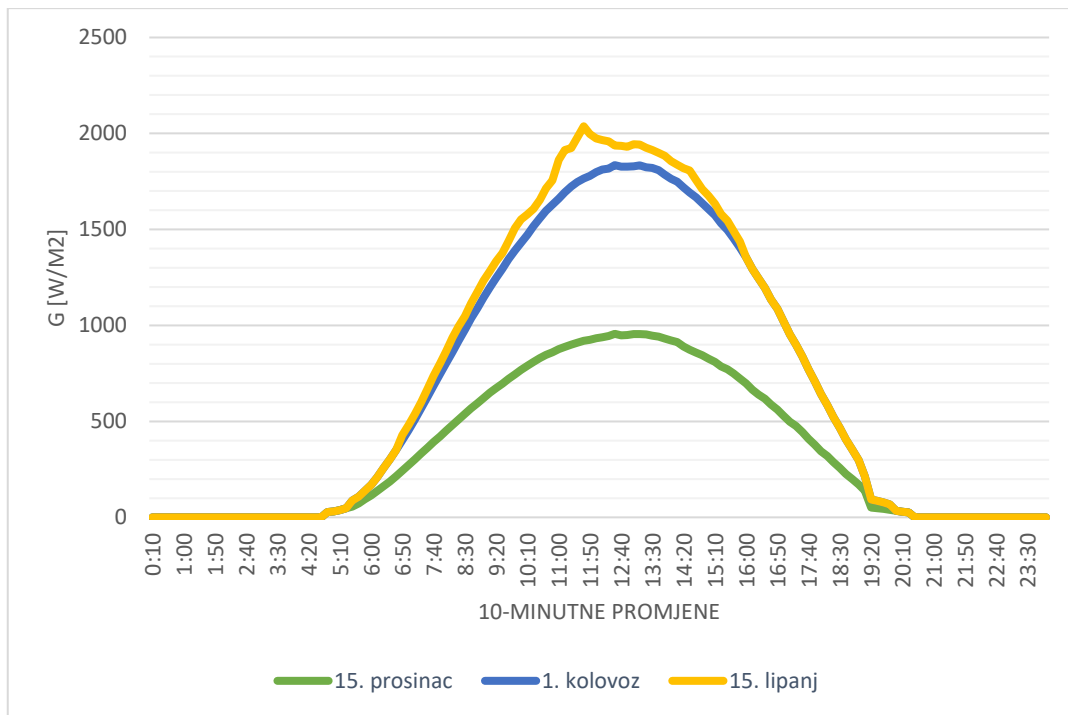
$\gamma$  – temperaturni koeficijent snage

$t_{mod,t}$  – temperatura modula pri dnevnim promjenama temperature

$t_{STC}$  – temperatura pri STC uvjetima, iznosi 25°C

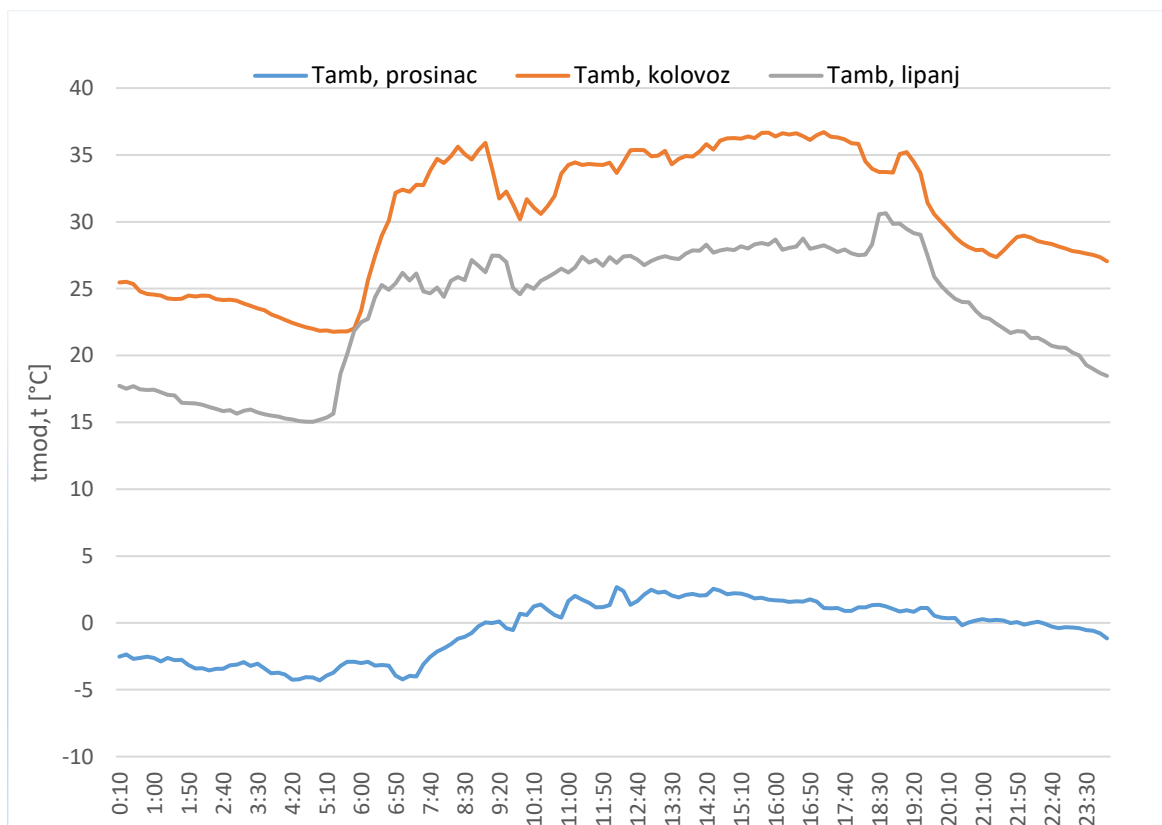
Od gore navedenih parametara poznati su nam  $G_{STC}$ ,  $t_{STC}$ ,  $\eta_{inv}$  koja iznosi 95%,  $\gamma$  koji iznosi 0,4 %/°C, i također nam je poznata DC izlazna snaga svakog niza modula ( $P_{string}$ ). Od navedenih parametara potrebnih za izračun izlazne snage izmjenjivača, nepoznata su nam samo dva parametra: dnevna promjena intenziteta sunčeva zračenja ( $G_t$ ) i temperatura modula pri dnevnim promjenama temperature ( $t_{mod,t}$ ).

Prema izmjerenim podacima, dnevna promjena intenziteta sunčevog zračenja je prikazana na slici 4.9.



4.9. Dnevni dijagram intenziteta Sunčevog zračenja

Kako bi smo izračunali temperaturu modula pri dnevnim promjenama temperature ( $t_{mod,t}$ ), prvo je potrebno odrediti dnevnu promjenu temperature okoline ( $T_{amb}$ ), koja je prikazana na slici 4.10.



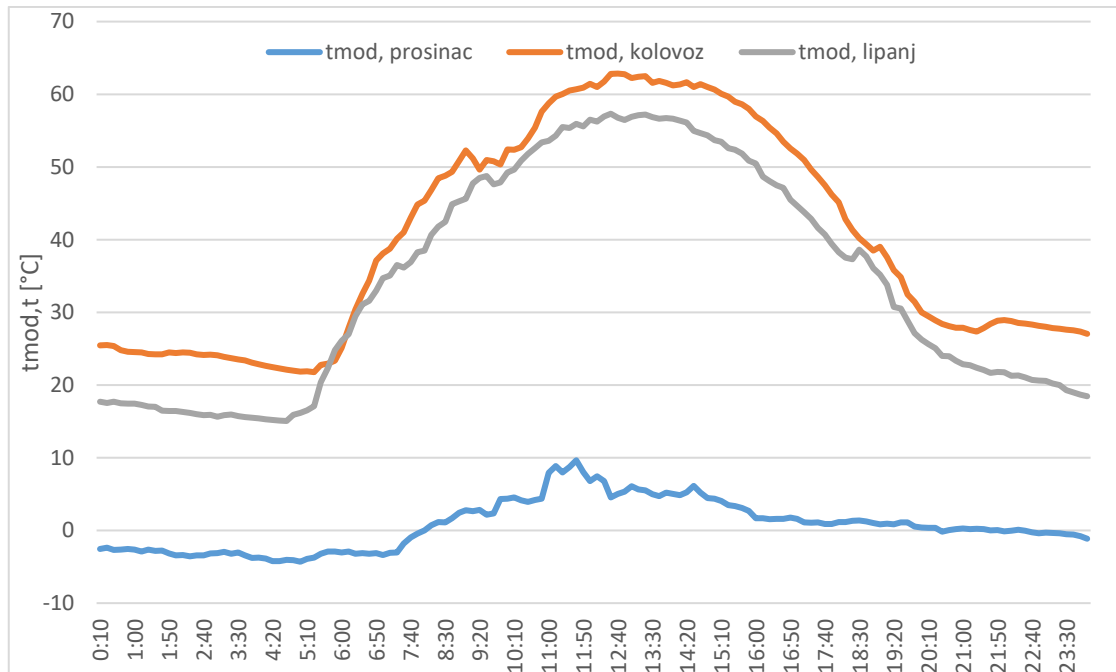
4.10. Dnevna promjena temperature okoline ( $T_{amb}$ )

Nakon što smo odredili  $T_{amb}$ , koristeći sljedeću formulu možemo odrediti  $t_{mod,t}$  [3]:

$$t_{mod,t} = T_{amb,t} + \frac{NOCT-20}{800} \cdot G_t \quad (4-2)$$

Gdje NOCT predstavlja nominalnu radnu temperaturu ćelije, i za vrstu ćelije instaliranih u fotonaponskoj elektrani FERIT1 iznosi 45 °C.

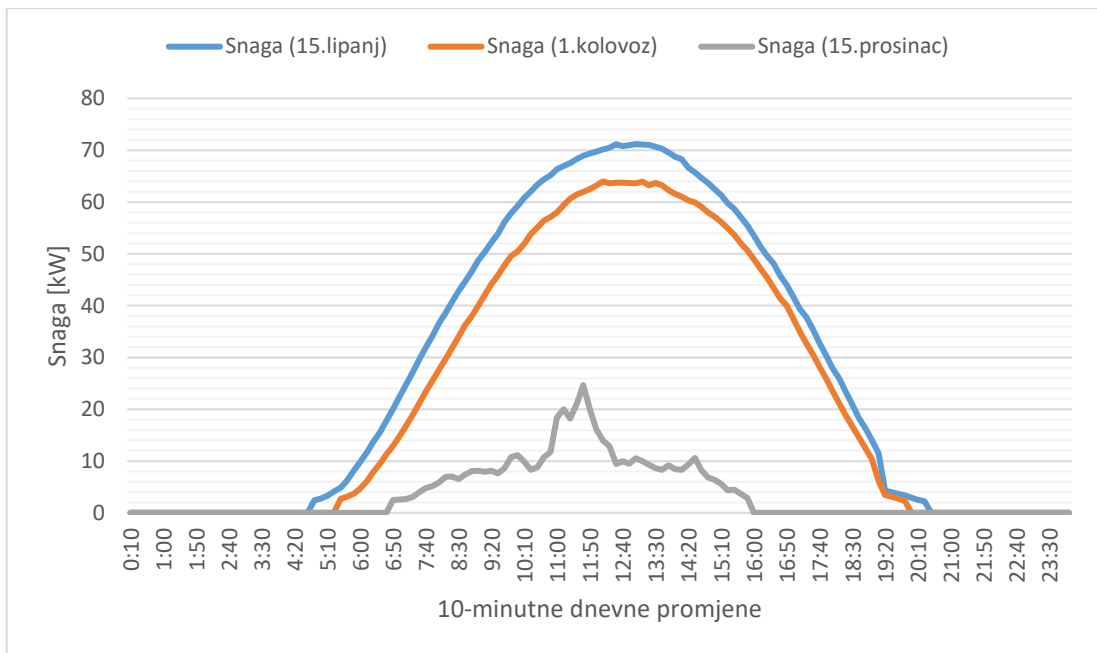
Dnevni dijagram temperature modula, na slici 4.11.



4.11. Dnevna promjena temperature modula

Vidimo kako temperatura modula raste s jačanjem intenziteta Sunčeva zračenja, a maksimum postiže oko 12:00h. Nakon toga počinje polagano opadati, sve dok ne nestane Sunčeve svjetlosti, nakon čega je temperatura modula približno jednaka temperaturi okoline.

Nakon izračuna parametara koji su nedostajali, potrebno je izračunati izlaznu AC snagu izmjenjivača. Dnevni dijagram proizvodnje fotonaponske elektrane FERIT1 prikazan je na slici 4.12, za sva tri dana.



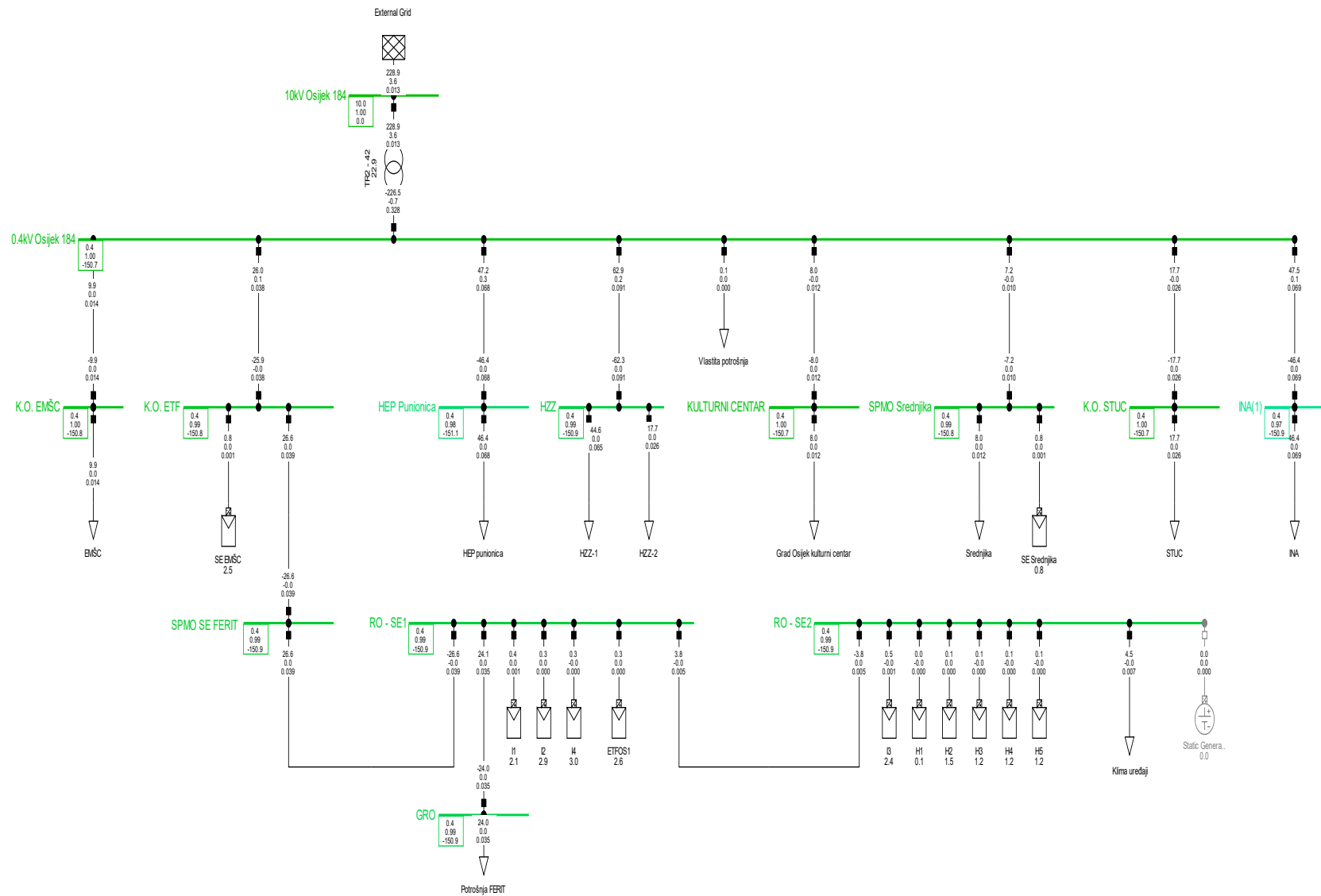
4.12. Snaga proizvodnje iz FN elektrane FERIT 1

Na slici 4.12 možemo primijetiti kako je najveća proizvodnja fotonaponske elektrane na dan 15. lipanj, a najmanja na 15. prosinac. Za 15. lipanj, krivulja snage počinje rasti s izlaskom Sunca, oko 4:30 h, s maksimumom u 13:00h. Nakon toga polagano opada sve do 20:30h kada više nemamo Sunčeva zračenja. Proizvodnja za dan 1. kolovoz, prema krivulji, počinje oko 5.30 h, s maksimumom oko 12:00, nakon čega polako opada sve do 20:00h. Za datum 15. prosinac, proizvodnja je jako promjenjiva, vjerojatno zbog vanjskih utjecaja (naoblaka, snijeg,...). Proizvodnja kreće dosta kasnije, oko 7:00h ujutro, s maksimumom u 12:00h, nakon čega značajno opada sve do 16:00h nakon čega je proizvodnja jednaka nuli.

### 4.3. Simulacija mikromreže FERIT1 u programskom paketu DigSilent

#### 4.3.1. Slučaj 1: 15. lipanj

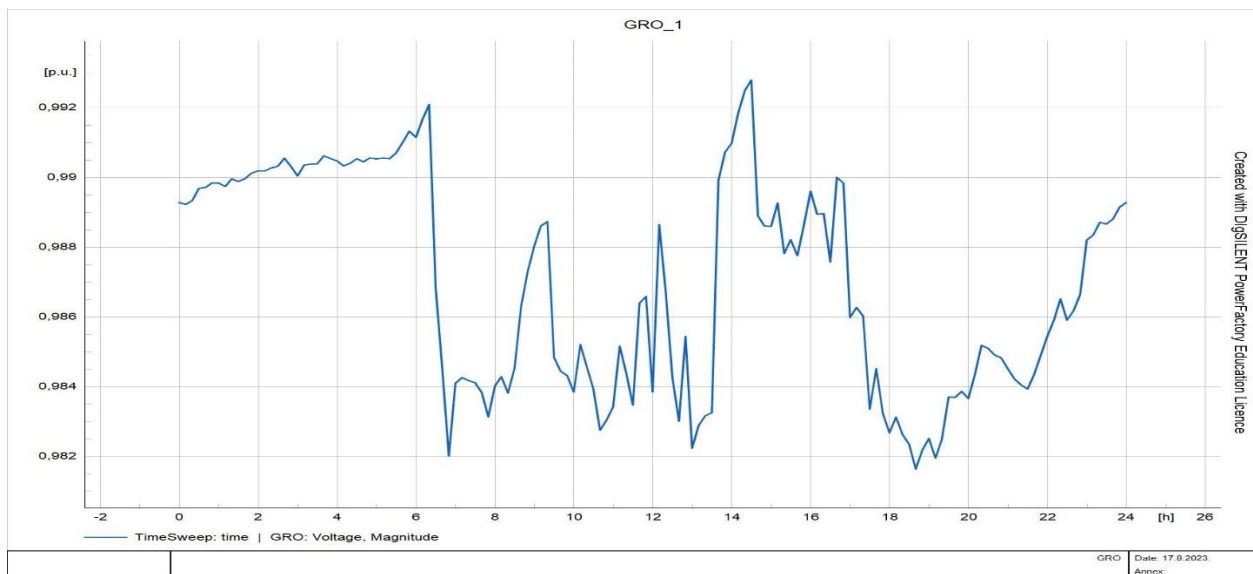
Referentno stanje bez proizvodnje iz fotonaponske elektrane FERIT 1 za slučaj 1, prikazan pomoću tokova snaga možemo vidjeti na slici 4.13. Povećanje instalirane snage se izvršilo u 4 koraka: 0kW,95kW,190kW,285kW i 380kW. Sabirnica 10kV Osijek nam predstavlja referentni čvor i definiran je kao SL čvor. U modelu sabirnice su definirane: u prvom redu iznos napona (u kV), drugi red nam predstavlja iznos napona u p.u., a u trećem redu je prikazan kut napona. Na linijskim elementima imamo u prvom redu radnu snagu, u drugom jalovu snagu, iznos struje kroz vod.



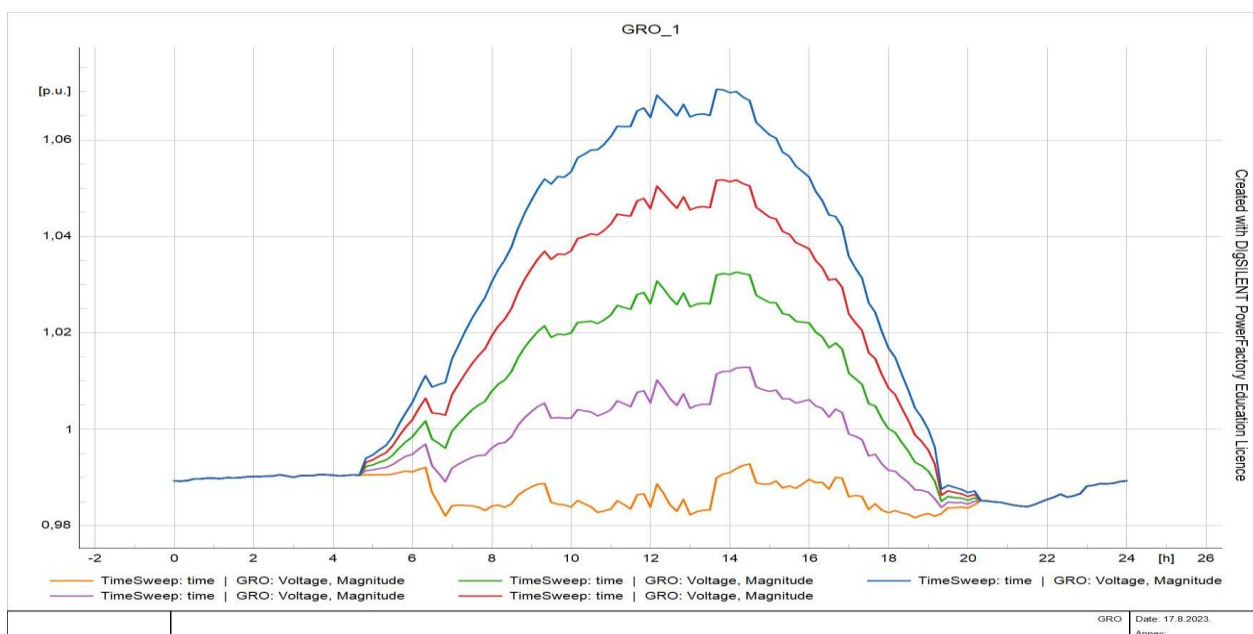
4.13. Referentno stanje mikromreže FERIT 1 za slučaj 1

Iz gore prikazanog stanja mikromreže FERIT 1 vidimo kako je sustav stabilan, te su naponi u granicama i kreću se između 0.97 do 1.0 p.u. Uključenjem proizvodnje od 95kW iz fotonaponske elektrane FERIT 1, napon na sabirnicama raste, a najveći porast je na sabirnicama koje su najbliže elektrani FERIT 1. Za promatranje učinka elektrane, odabrane se promjene napona na sabirnicama koje se nalaze u neposrednoj blizini proizvodnje: GRO i RO-SE2, i promjena napona na SPMO Srednjika, koja je nešto udaljenija od elektrane.

Dijagram napona na sabirnicama za referentno stanje i stanje nakon priključenja proizvodnje prikazani su na slikama 4.14, 4.16 i 4.18:



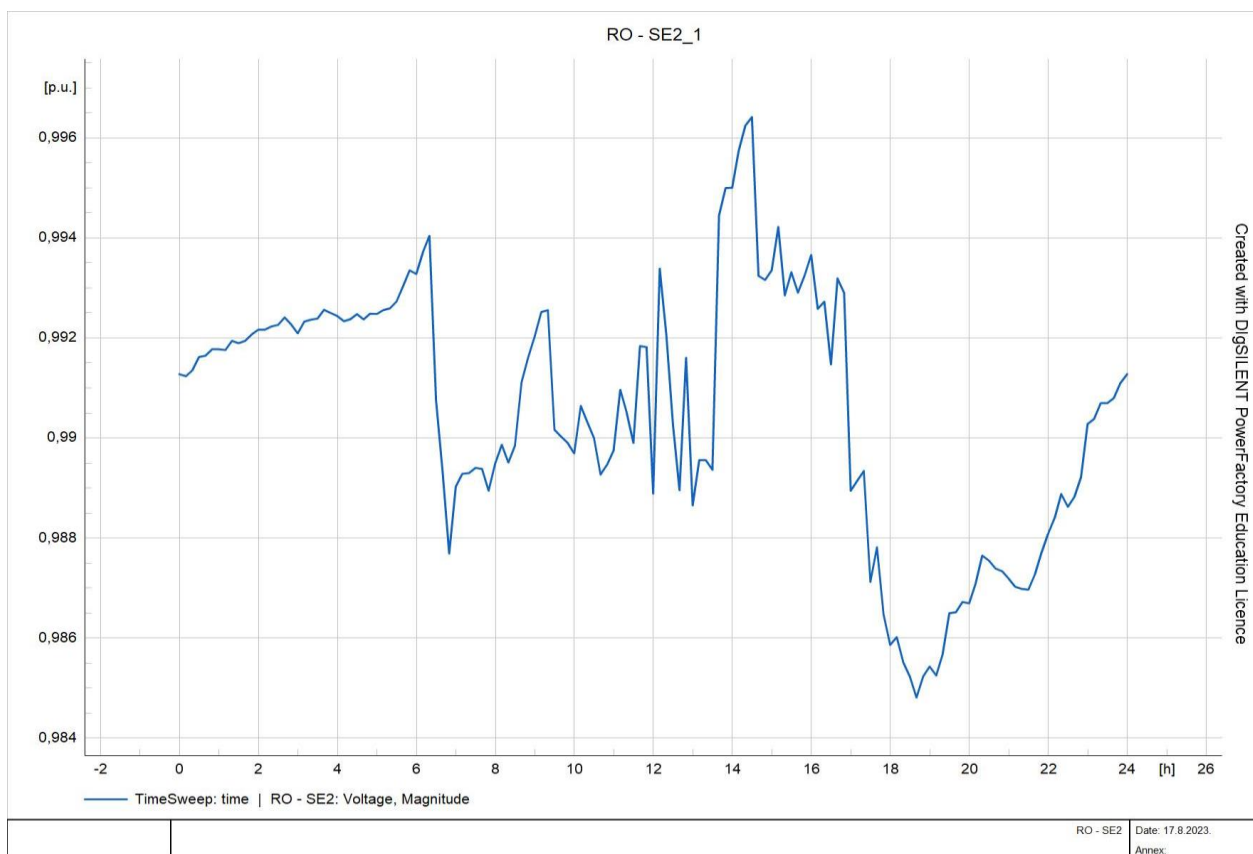
4.14. Dijagram napona sabirnice GRO bez integrirane elektrane FERIT 1



4.15. Dijagram napona sabirnice GRO za 15.lipanj nakon integracije elektrane FERIT 1

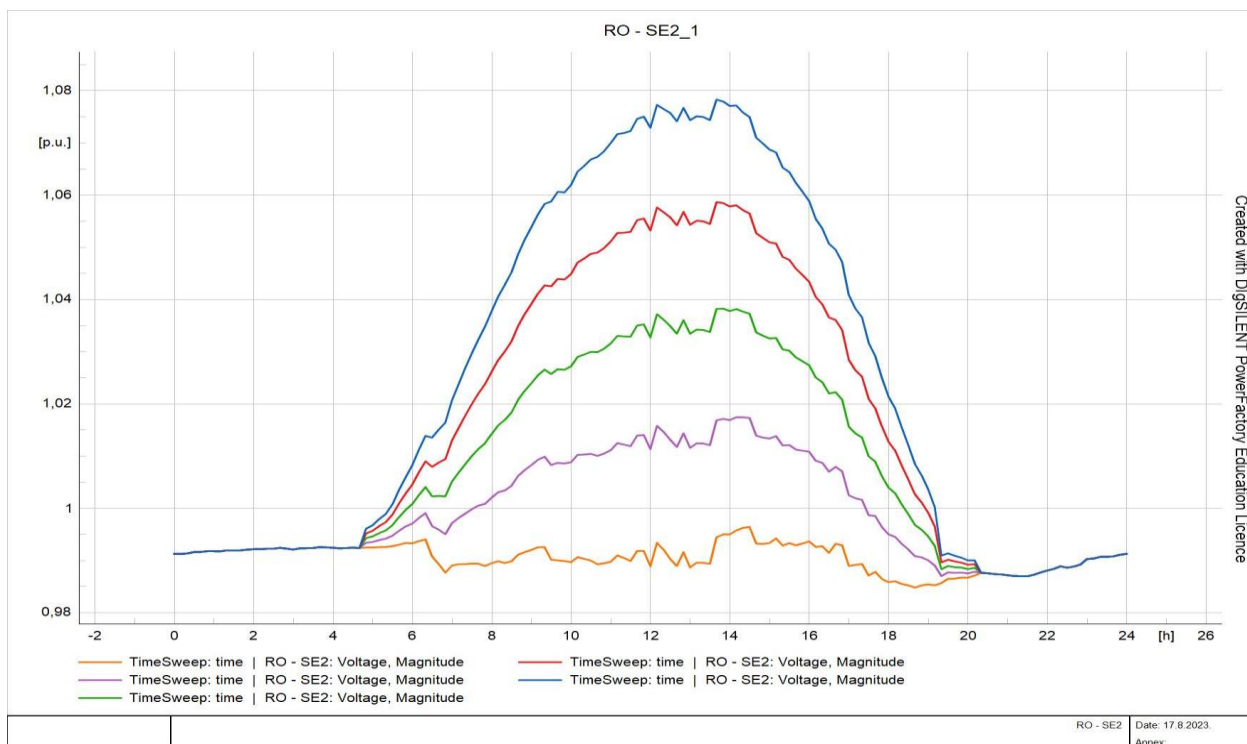
Na slici 4.14 je vidljiv pad napona od 06:30, a razlog tomu je početak radnog dana. Kako se početkom radnog dana povećava potrošnja zgrade FERIT-a, tako i napon na krajnjim sabirnicama poput GRO ima najprimjetniji pad napona. Dodavanjem fotonaponske elektrane FERIT 1 napon na sabirnici GRO raste, ali ostaje u granicama. Na slici 4.15 možemo primijetiti kako povećanjem instalirane snage povećavamo i iznose na sabirnici GRO. Žuta krivulja nam predstavlja iznos napona za referentni slučaj, odnosno kada nemamo proizvodnju iz fotonaponske elektrane FERIT 1, te vidimo da napon opada s porastom potrošnje. Ljubičasta krivulja je prikazuje krivulju napona za instaliranu snagu od 95kW, zelena za snagu od 180 kW, crvena za maksimalnu moguću instaliranu snagu od 285kW, a plava krivulja za snagu od 380kW.

Na slikama 4.16 i 4.17 **Error! Reference source not found.** možemo primijetiti istu situaciju kao na prijašnja dva dijagrama. Napon na sabirnici raste dodavanjem proizvodnje, čak i u malo većoj mjeri u odnosu na porast napona na sabirnici GRO. Napon sabirnice RO-SE2 za referentni, bez proizvodnje, iznosio je 0,9964 p.u.



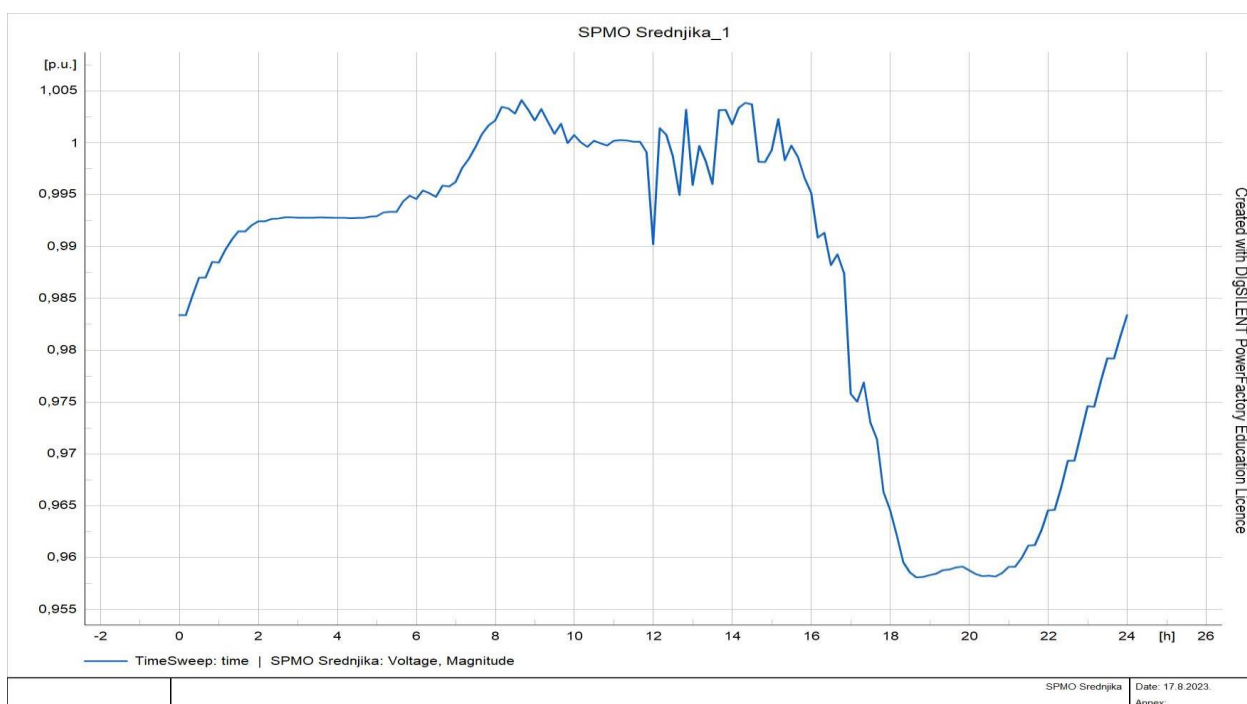
4.16. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15.lipanj bez integrirane elektrane FERIT 1

Slika 4.18 nam prikazuje kako je porast napona na sabirnici SPMO Srednjika najizraženiji od 16:00 do 24:00. Razlog tomu je uključenje rasvjete.



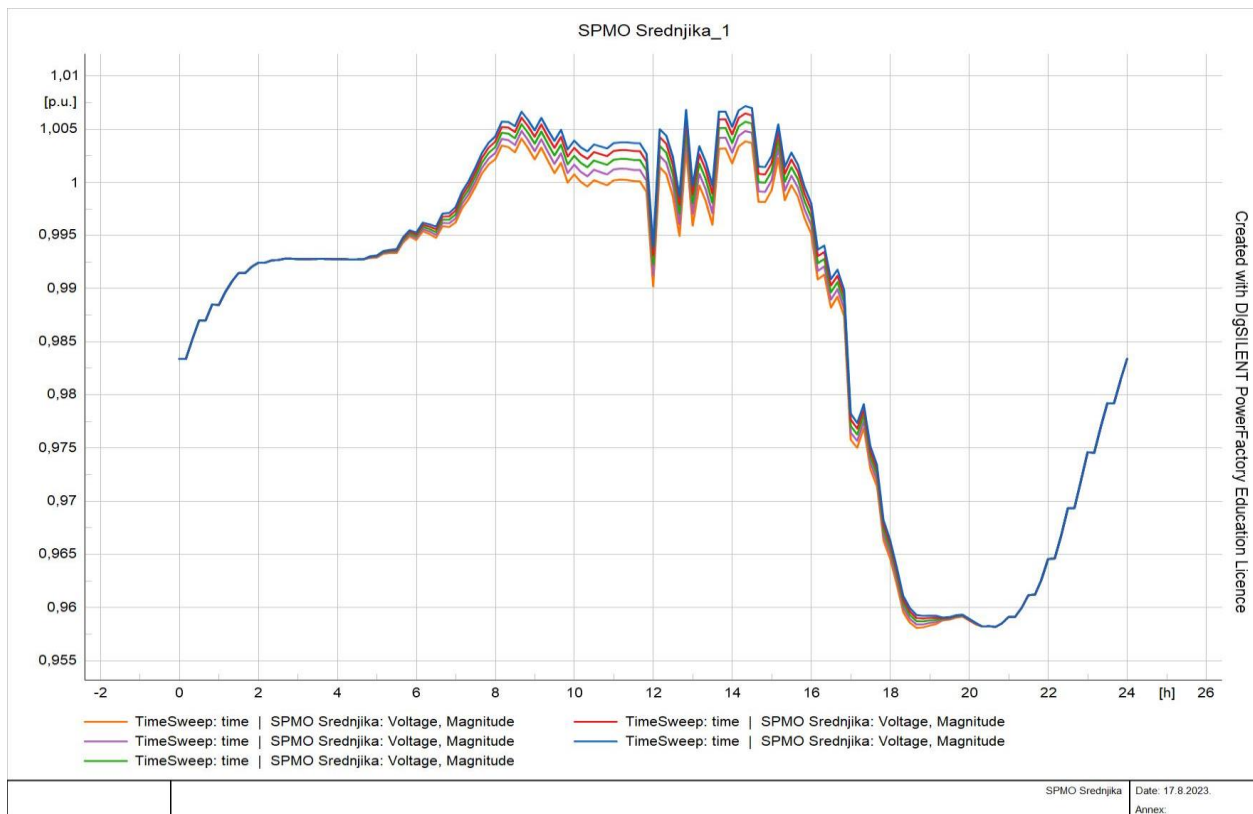
4.17. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15.lipanj nakon integracije elektrane FERIT 1

Na slikama 4.18 i 4.19 također možemo primijetiti porast napona nakon priključenja elektrane FERIT 1. Naponi ne rastu u tolikoj mjeri kao na sabirnicama GRO i RO-SE2, jer je sabirnica dovoljno udaljena od same elektrane. Maksimalni napon na sabirnici pri trenutno maksimalnoj proizvodnji iznosi 1,004 p.u., što je porast za samo 0,002 p.u. u odnosu na referentno stanje.



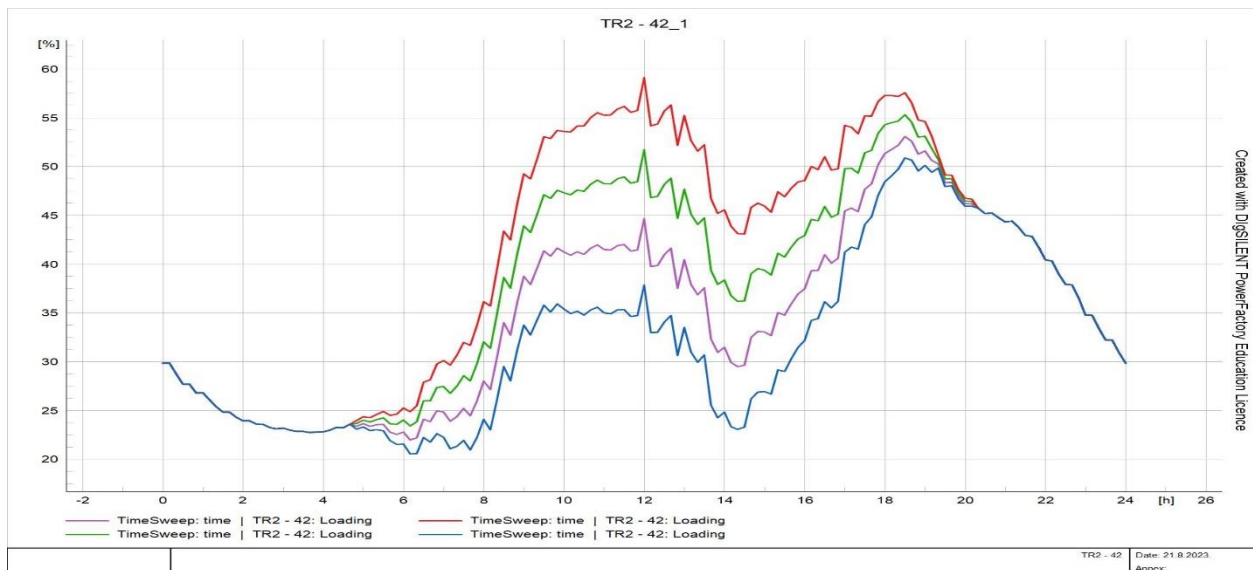
4.18. Dijagram napona sabirnice SPMO Srednjika za 15.lipanj bez integrirane elektrane FERIT 1





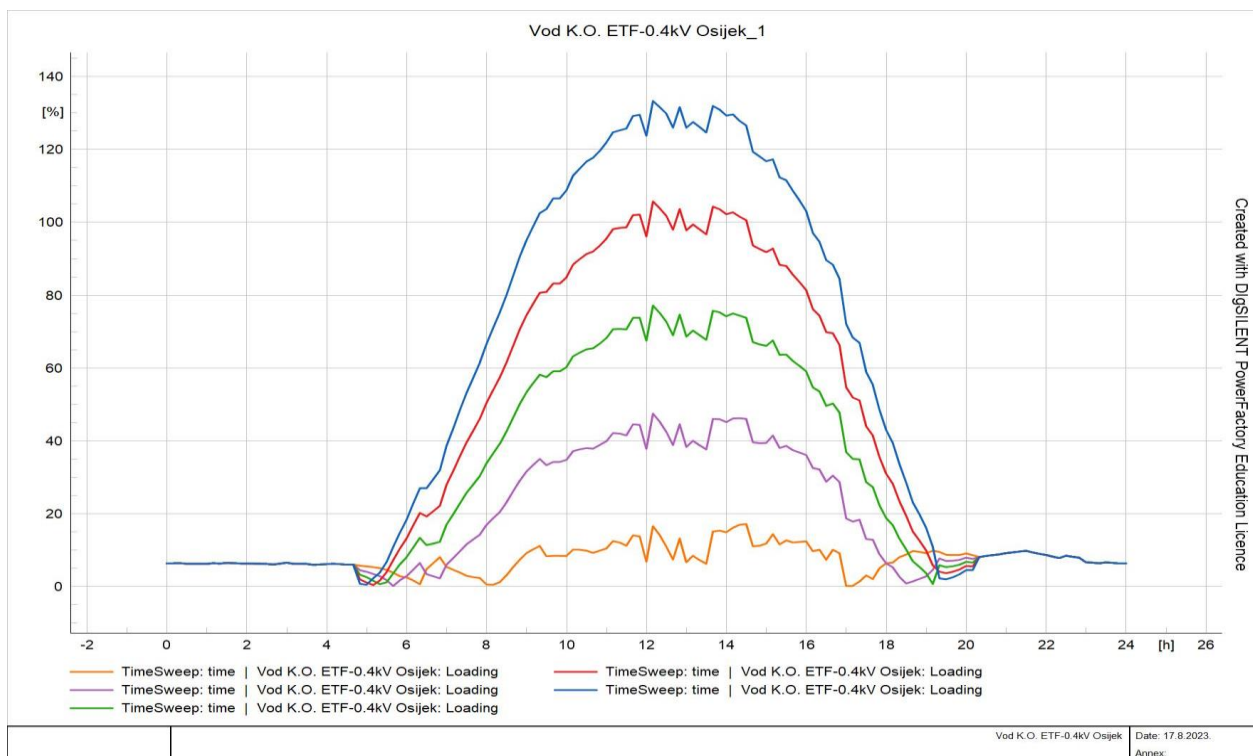
4.19. Dijagram napona sabirnice SPMO Srednjika za 15.lipanj nakon integracije elektrane FERIT 1

Priključenjem elektrane FERIT 1 mikromreža više nije pasivna, te postoji i razmjena s krutom mrežom na koju je priključena. Uzlazni tok snage prema krutoj mreži se javlja isključivo tokom dana. Na dijagramu je primjetno kako je opterećenje transformatora TR-42 najveće za referentni slučaj (crvena linija), kada nemamo proizvodnju iz elektrane FERIT1. Također je primjetno kako nakon svake nove razine integracija, vrijednost opterećenja opada, te je najmanje za instaliranu snagu elektrane od 285 kW(plava linija). Razlog tomu je taj što je potrebna manja količina energije iz krute mreže, jer se dio potrebne energije za opskrbu potrošača uzima iz fotonaponske elektrane, što rezultira već spomenutom smanjenju opterećenja transformatora. Promjenu opterećenja transformatora TR-42 možemo vidjeti na slici 4.20.



#### 4.20. Opterećenje transformatora za Slučaj 1

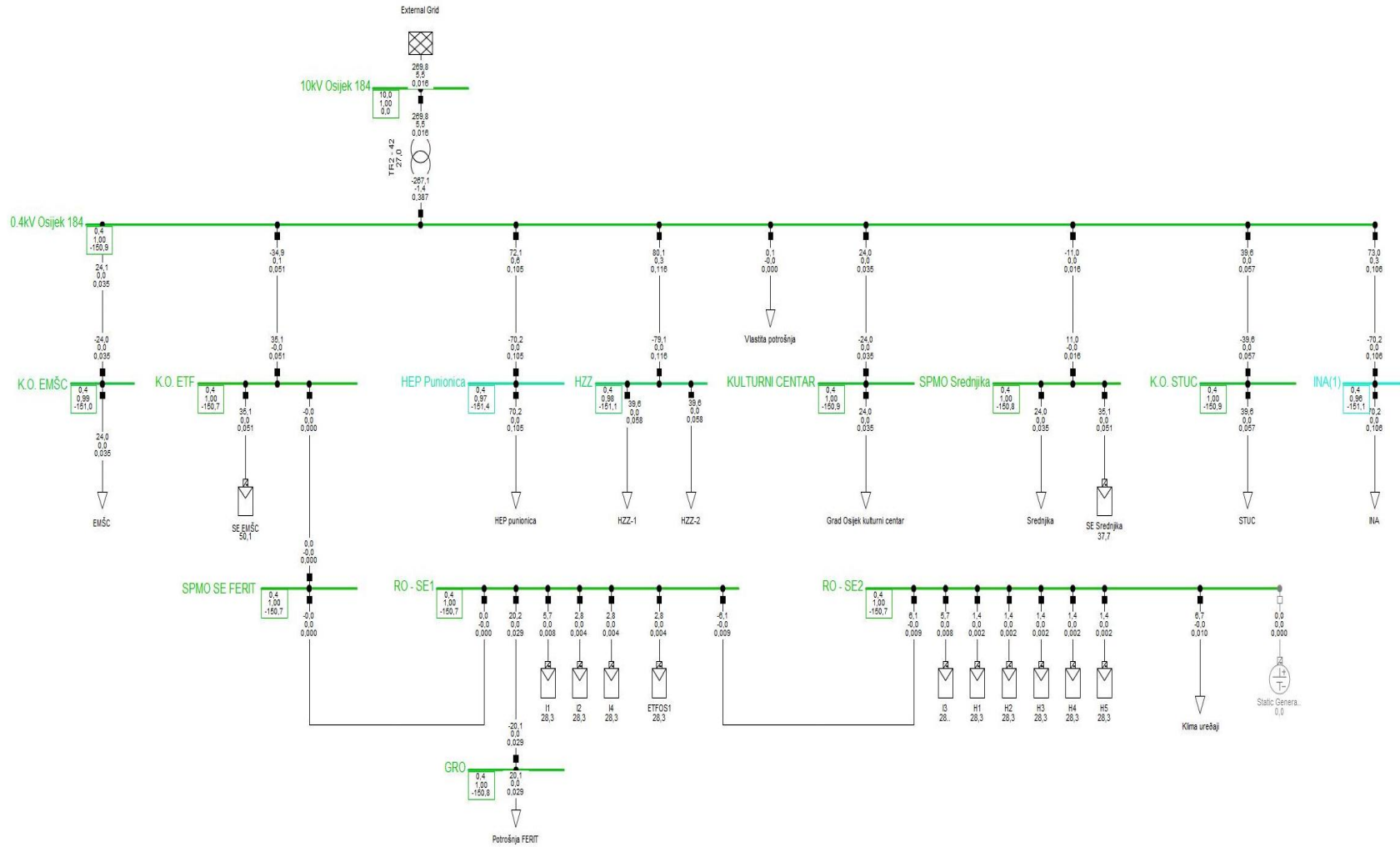
Kako opterećenje transformatora opada, tako raste opterećenje voda, osobito onih koji povezuju fotonaponsku elektranu FERIT1 i ostatak mikromreže. Porast opterećenja voda se događa zbog uzlaznih tokova snaga, koji se pojavljuju kad je proizvodnja iz fotonaponske elektrane veća od potrošnje. Porast opterećenja voda prikazan je na slici 4.21. Pri instaliranoj snazi elektrane FERIT1 od 285kW, opterećenje voda blago prelazi vrijednost od 100%, te u maksimalnoj točki opterećenja iznosi 104,2%.



#### 4.21. Opterećenje voda između sabirnica K.O. ETF i 0,4kV Osijek za 15.lipanj

#### **4.3.2. Slučaj 2: 1. kolovoz**

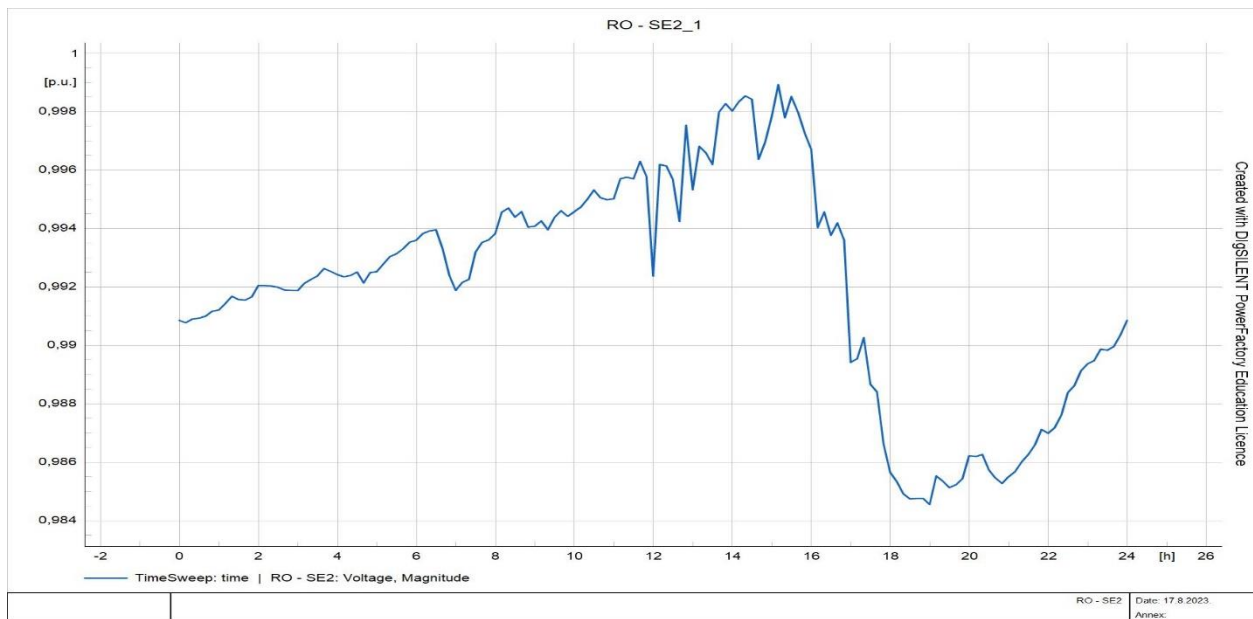
Za slučaj 2 je također karakteristična veća proizvodnja fotonaponske elektrane, jer se radi o ljetnom godišnjem dobu te su intenzitet Sunčeva zračenja i duljina dana duži nego u ostatku godine. Međutim proizvodnja je ipak primjetno manja nego za slučaj 1. Potrošnja za slučaj 2 je nešto niža od potrošnje u slučaju 1. Dodavanjem proizvodnje od 95 kW pozitivno utječemo na naponske prilike u mikromreži, te se ona nalazi u stabilnom stanju, što je vidljivo na slici 4.22.



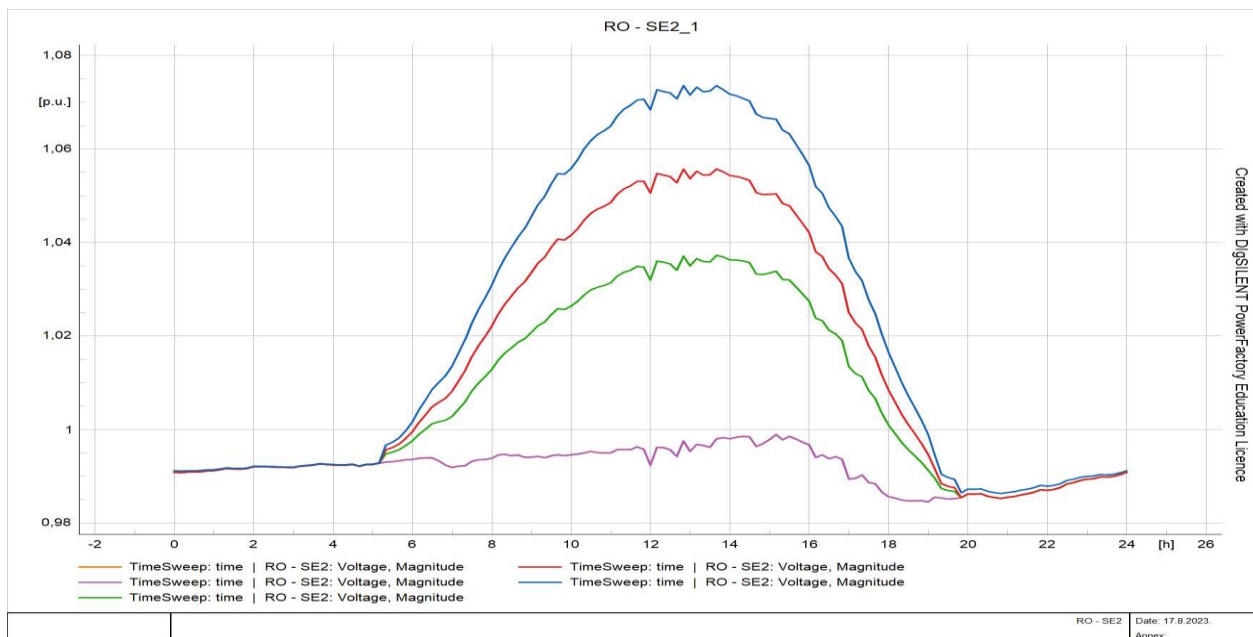
4.22. Prikaz stanja mikromreže FERIT 1 nakon integracije elektrane FERIT 1

Nakon dodavanja proizvodnje iz fotonaponske elektrane, primjetan je porast napona na krajnjim sabirnicama, poput: GRO, RO-SE1,RO-SE2, K.O. ETF, itd. Međutim porast napona je u dozvoljenim granicama, te je integracija elektrane FERIT 1 uspješno provedena do instalirane snage od 285kW.

Na sljedećim slikama su prikazane promjene napona na sabirnicama, promjena opterećenja transformatora TR-42 i voda između sabirnica RO-SE1-SPMO FERIT u odnosu na referentno stanje bez proizvodnje iz fotonaponske elektrane, kao i za slučaj 1.



4.23. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 1.kolovoz bez integrirane elektrane FERIT 1

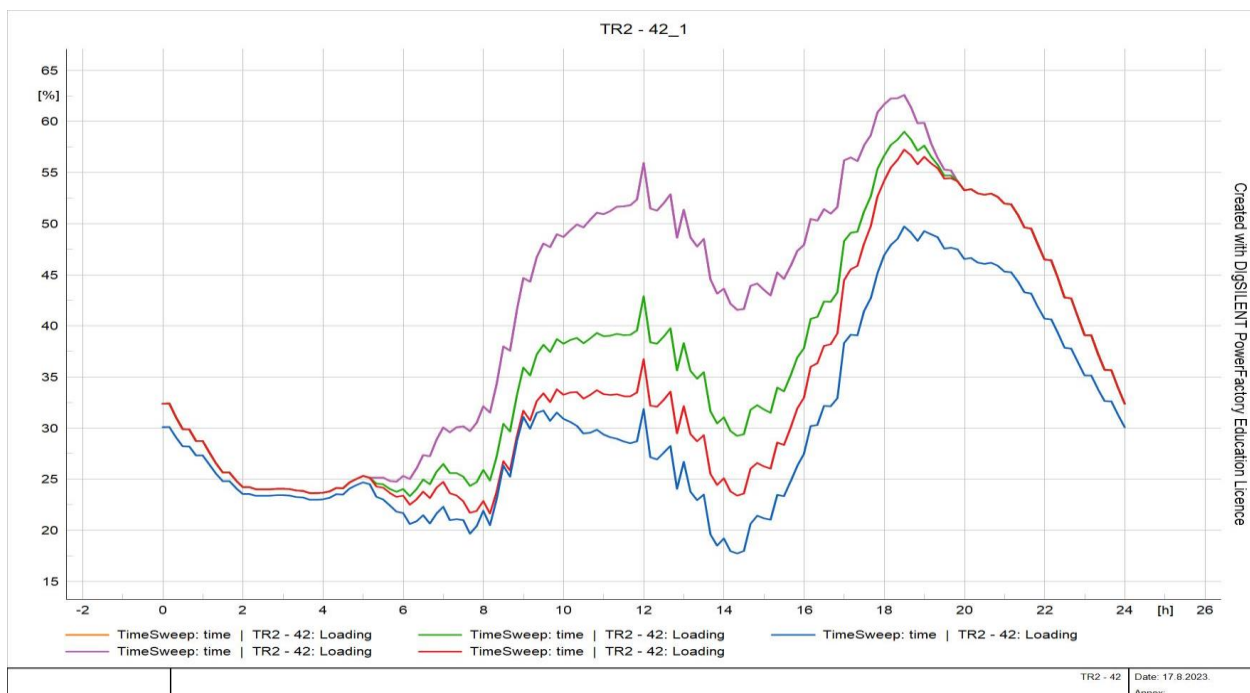


4.24. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 1.kolovoz nakon integracije elektrane FERIT 1

Sa gornje dvije slike (4.23 i 4.24) primjetna je jednaka promjena kao i za slučaj 1. Povećanje napona u mreži u vremenu kad postoji dovoljan intenzitet Sunčeva zračenja je karakteristično za fotonaponske elektrane. Također je primjetno kako je povećanje napona nešto niže nego za slučaj 1, te maksimalni napon na sabirnici RO-SE2 iznosi 1,058 p.u. Ljubičasta linija predstavlja referentni slučaj, odnosno bez integrirane fotonaponske elektrane, zelena za instaliranu snagu od 95 kW, crvena za 190 kW i naposljetku plava za instaliranu snagu od 285 kW.

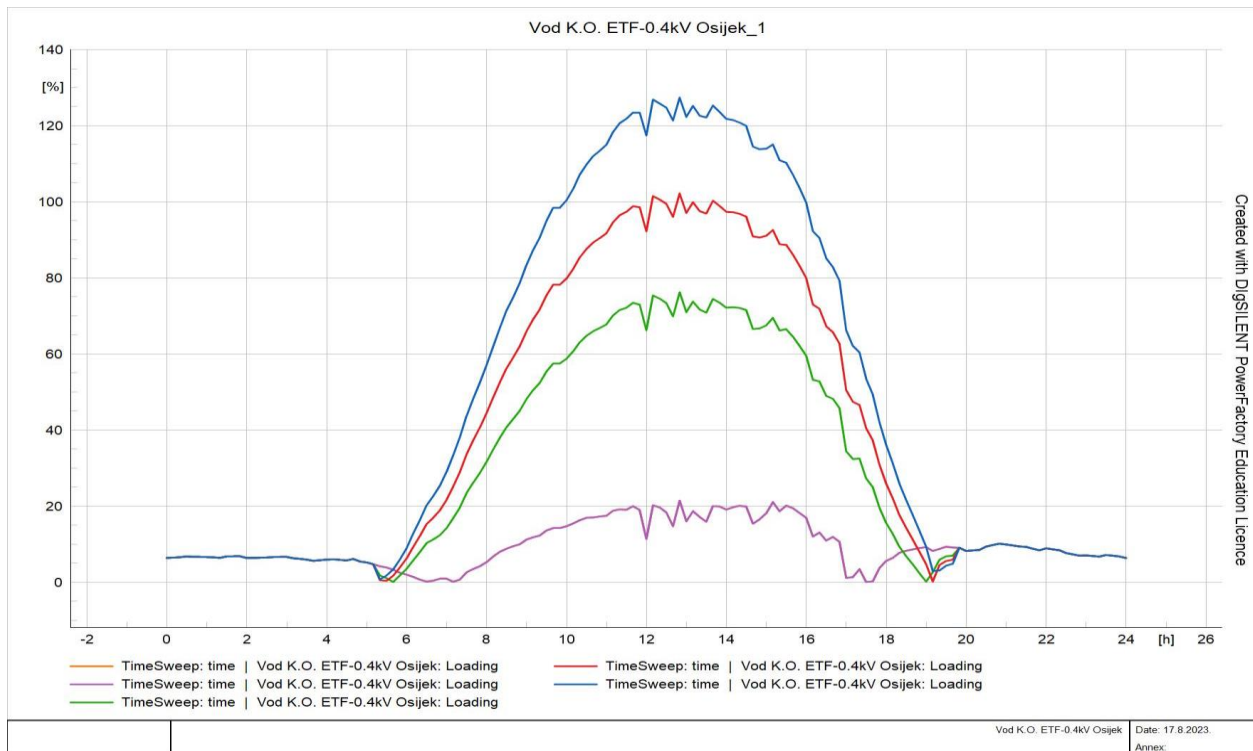
Prikazi za napona sabirnica 0,4kV Osijek i SPMO Srednjika su vidljivi u prilogu. Na osnovu dijagrama napona na sabirnici RO-SE2 možemo zaključiti kako je porast napona vidljiv i na sabirnicama 0,4kV Osijek i SPMO Srednjika, ali je ta promjena nešto manja nego u slučaju 1. Razlog tomu je taj što je intenzitet Sunčeva zračenja manji za 1.kolovoz u odnosu na 15.lipanj, a i kut upada svjetlosti na fotonaponski modul nije isti, što rezultira već spomenutom manjom proizvodnjom, što potom rezultira manjim porastima napona u mreži.

Na slici 4.25 vidimo da opterećenja transformatora prati porast potrošnje za vremensko razdoblje od 06:00 do 12:00 h , te da opada od 12:00 do 15:00 h. Opadanje opterećenja transformatora je zbog proizvodnje elektrane FERIT1, zelena linija prikazuje kako se mijenja opterećenje pri instaliranoj snazi od 95 kW, te postupno opada i najmanje je pri instaliranoj snazi od 285 kW (plava linija), zbog toga što sve veći dio potrebne energije za potrošače dolazi iz elektrane FERIT 1.



4.25. Opterećenje transformatora TR-42 za 1.kolovoz prije priključene proizvodnje (plavo) i nakon priključene proizvodnje (crveno, zeleno, ljubičasto) fotonaponske elektrane FERIT 1

Za vrijeme proizvodnje raste opterećenje voda u mikromreži FERIT 1, što je najprimjetnije na vodu između sabirnica K.O. ETF i 0,4kV Osijek, prikazano na slici 4.26.



4.26. Opterećenje voda između sabirnica K.O. ETF i 0,4kV Osijek za 1.kolovoz nakon priključenja elektrane FERIT

1

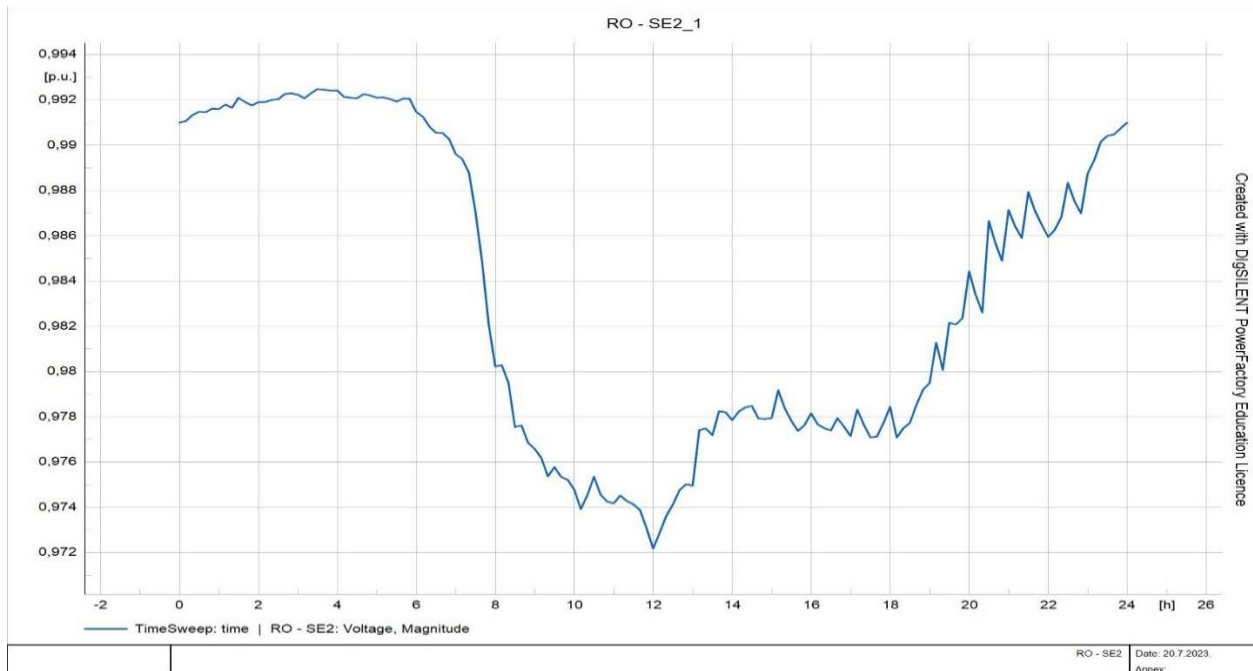
Sa slike 4.26 je primjetno kako opterećenje voda pri instaliranoj snazi fotonaponske elektrane FERIT1 od 95 kW blago prelazi 20% (ljubičasta linija), te daljnjom integracijom raste, i pri instaliranoj snazi od 285kW (crvena linija) blago prelazi vrijednost od 100%, a iznosi 101,5%. Pri instaliranoj snazi od 380kW, opterećenje iznosi 130%, što nije prihvatljivo i tolika razina integracije nije moguća.

### 4.3.3. Slučaj 3: 15. prosinac

Slučaj 3 nam predstavlja najpovoljniji scenarij s gledišta maksimalne razine integracije. 15. prosinac pripada zimskom godišnjem dobu kojeg karakterizira oblačno vrijeme i niska razina sunčevog zračenja, što rezultira minimalnom proizvodnjom fotonaponske elektrane. Potrošnja za slučaj 3 je približna maksimalnoj potrošnji za 15.lipanj, te nam i to doprinosi povećanju moguće

instalirane snage fotonaponske elektrane. Međutim slučaj 3 se zanemaruje pri izradi elaborata utjecaja fotonaponske elektrane na mrežu, jer nije referentan slučaj. U ovom radu postoji samo kako bi predočili kolika je razlika instalirane snage elektrane moguća u odnosu na slučaj 1 i 2.

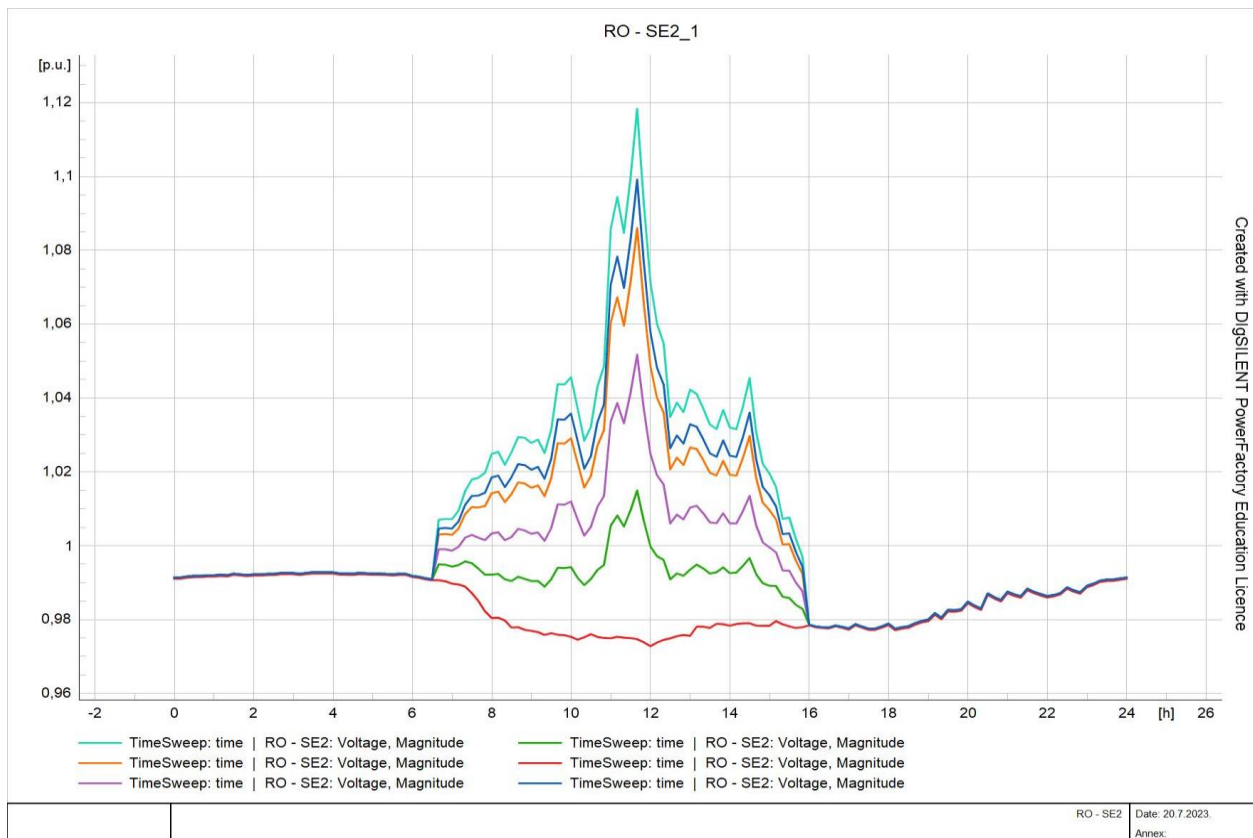
Na slici **Error! Reference source not found.** možemo primijetiti da napon na sabirnici RO-SE2 diktira kruta mreža, te da napon opada s porastom potrošnje.



#### 4.27. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15.prosinac bez integrirane fotonaponske elektrane FERIT 1

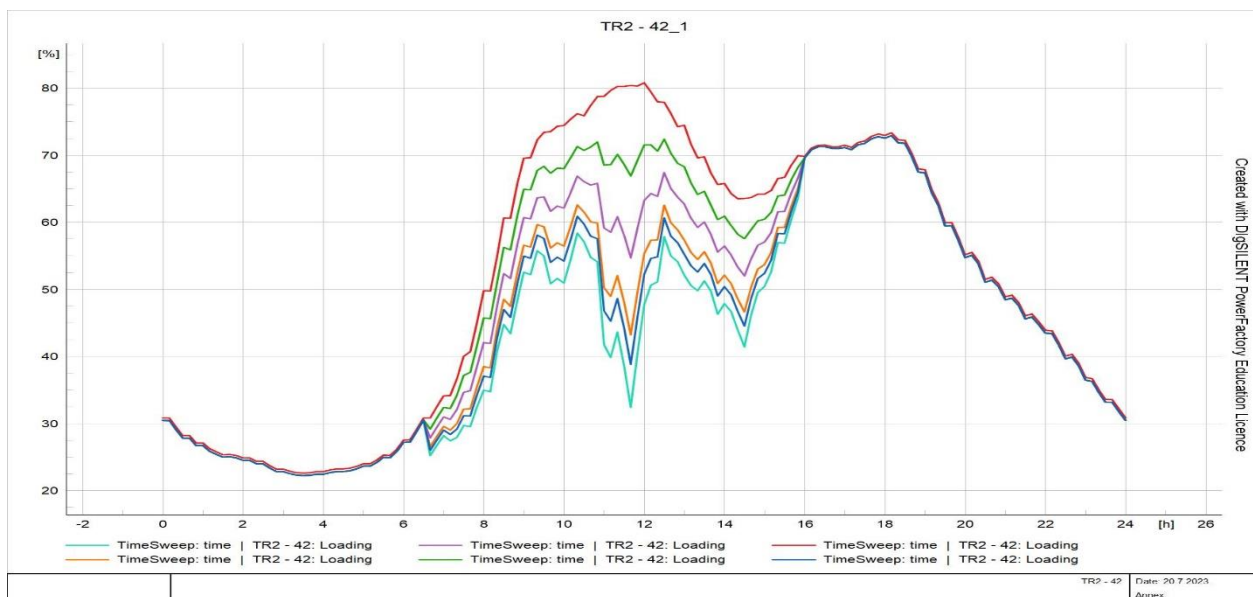
Potom na slici **Error! Reference source not found.** možemo vidjeti da napon na sabirnici više ne opada s porastom potrošnje, nego sve više raste kako povećavamo razinu integracije. Naponi na sabirnici RO-SE2 su u dozvoljenim granicama sve do instalirane snage elektrane od 1,615 MW, što je za 5,67 puta veća instalirana snaga nego za slučaj 1. Svjetlo-plava linija nam prikazuje da napon prelazi dozvoljenu granicu od 1.1 p.u, pri instaliranoj snazi od 1,9 MW, a tamno-plava predstavlja dijagram napona pri instaliranoj snazi od 1,615 MVA. Crvena linija predstavlja dijagram napona bez instalirane fotonaponske elektrane, zelena za instaliranu snagu od 95 kW.





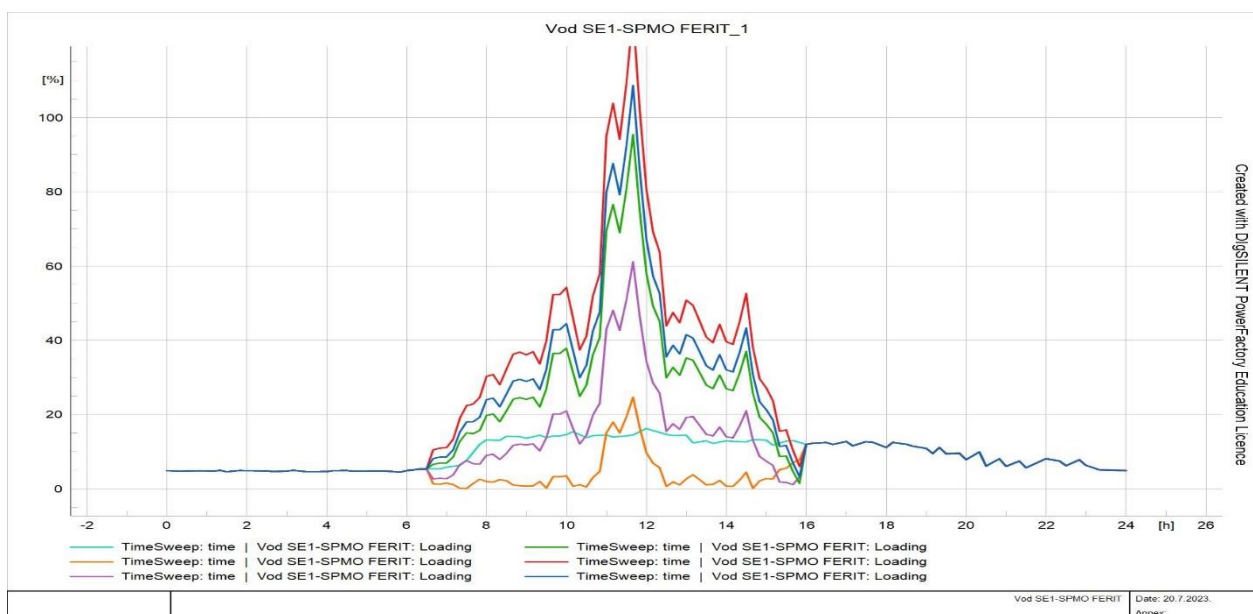
4.28. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15. prosinac nakon integracije fotonaponske elektrane FERIT 1

Opterećenje na transformatoru također opada s povećanjem integracije. Međutim razlika u opterećenju pri postupnom povećanju je niža nego za slučaj 1 i 2. Promjena opterećenja transformatora s povećanjem razine integracije je prikazana na slici 4.29.



4.29. Opterećenje transformatora za 15. prosinac

Opterećenje voda se smanjuje u vremenu od 06:30 do 11:00h i od 12:00 do 16:00h za instaliranu snagu od 95 kW (narančasta linija). Isto možemo primijetiti i za instaliranu snagu od 190 kW (ljubičasta linija), samo u drugim vremenskim razdobljima, jer nema uzlaznih tokova i sva električna energija proizvedena iz elektrane FERIT1 je potrošena lokalno na zgradu FERIT-a. Daljnje povećanje instalirane snage dovodi do povećanja opterećenja voda. Promjena opterećenja voda je prikazana na slici 4.30. Maksimalno opterećenje voda za instaliranu snagu od 1,425 MW iznosi približno 97%, predstavljeno zelenom krivuljom. Plava linija predstavlja opterećenje voda za instaliranu snagu od 1,520 MVA, a crvena za snagu 1,615 MVA, te možemo primijetiti kako pri tim vrijednostima instalirane snage, opterećenje voda prelazi dopuštenu granicu od 100%.



4.30. Opterećenje voda između sabirnica RO-SE1 i SPMO FERIT za 15. prosinac

#### 4.4. Povećanje integracije fotonaponskih elektrana

Slučaj 1 nam predstavlja najnepovoljniji scenarij. Nakon instalacije FN elektrane FERIT1, u slučaju 1 se javljaju najveći porasti napona i vodovi su najviše opterećeni. Bitno je napomenuti kako prema mrežnim pravilima najveća dozvoljena instalirana snaga na 0.4 kV izvodu ne smije preći 100kW. Simulacije za prva 3 slučaja su provedene iznad dozvoljene granice instalirane snage kako bi se prikazali učinci fotonaponske elektrane na mrežu. Mikromreža FERIT1 se nalazi u neposrednoj blizini krute urbane mreže, te je električki dovoljno jaka da izdrži snagu veću od 100kW bez negativnih utjecaja, osim blagog povećanja opterećenja voda do instalirane snage od 285kW za slučaj 1, kako je već prikazano u gornjem tekstu. U daljnjim simulacijama ćemo

postupno smanjivati trofaznu snagu kratkog spoja krute mreže, za slučaj 1, te pratiti kako se parametri u mikromreži mijenjaju, te u slučaju da smanjenje snage krute mreže dovodi do negativnih utjecaja na napon ili opterećenje voda u mirkomreži, predložiti mjere koje će pozitivno utjecati na dovođenje tih parametara u normalno pogonsko stanje. Instalirana naga fotonaponske elektrane FERIT1 je postavljena na 100kW. Snagu kratkog spoja ćemo smanjiti tako da se ubaci vod između VN strane transformatora TR-42, i krute mreže. Povećanjem duljine voda povećavamo njegovu impedanciju, što rezultira smanjenjem trofazne snage kratkog spoja.

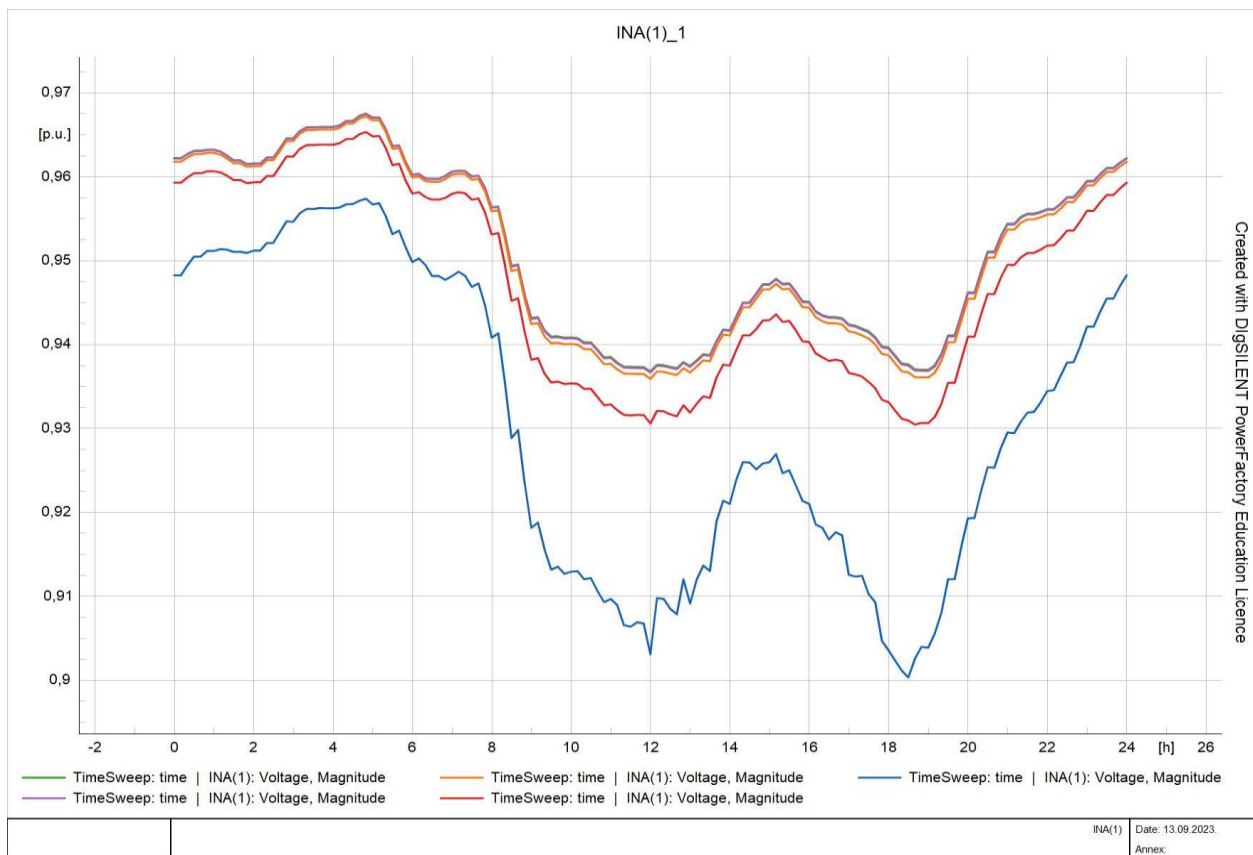
#### 4.4.1. Smanjenje snage trofaznog kratkog spoja do granice stabilnosti

Smanjenje trofazne snage kratkog spoja, pri instaliranoj snazi fotonaponske elektrane FERIT1 od 100kW, smo proveli u nekoliko koraka povećavajući duljinu voda prema krutoj mreži, vidljivo u Tablica 4.1. Promjenu napona na sabirnici INA možemo vidjeti na slici 4.31.

Tablica 4.1. Promjena snage trofaznog kratkog spoja povećanjem duljine voda prema krutoj mreži

Korak	$S_{k3}$ na sabirnici 10kV Osijek [MVA]	$S_{k3}$ na sabirnici 0.4kV Osijek [MVA]	$S_{k3}$ na sabirnici EMŠC [MVA]	$S_{k3}$ na sabirnici K.O. ETF [MVA]	$S_{k3}$ na sabirnici SPMO FERIT [MVA]
1	288.04	17.06	5	5	4
1	201.9	17.1	5	5	4
3	144.1	16.5	5	5	4
4	72	14.8	4.8	4.8	3.9
5	43.2	12.9	4.7	4.7	3.8
6	28.8	11.2	4.5	4.5	3.7
7	14.4	8	4	4	3.4
8	7.2	5	3.2	3.2	2.8
9	3.9	3.1	2.4	2.4	2.2

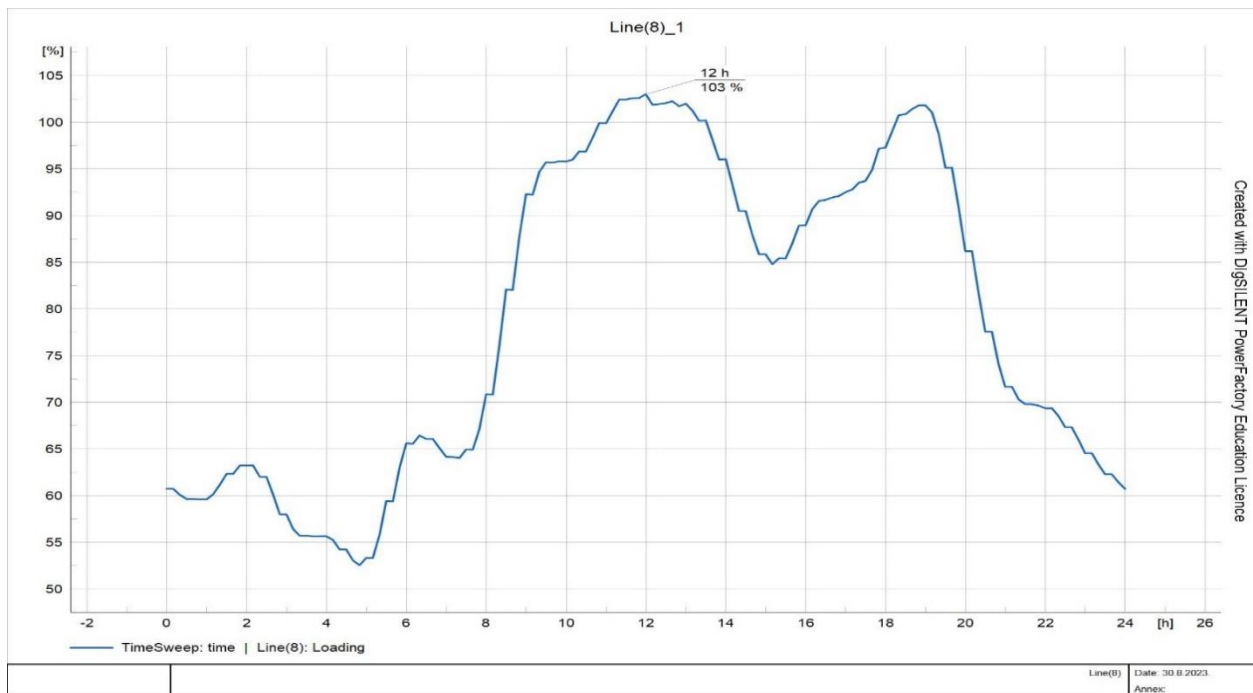
Na slici plava krivulja predstavlja dijagram napona za snagu trofaznog kratkog spoja krute mreže od 3,9 MVA, crvena za snagu od 72 MVA, narančasti za snagu od 201,9 MVA dok je ljubičasti za snagu od 288,04 MVA.



4.31. Dijagram napona na sabirnici INA za različite trofazne snage kratkog spoja krute mreže

Smanjenjem snage trofaznog kratkog spoja krute mreže smo dobili bolji uvid u promjene koje izaziva fotonaponska elektrana FERIT1. Kako je se radi o urbanoj krutoj mreži, morali smo joj smanjiti snagu kako bi promjene parametara mreže bile izraženije. Pri snazi trofaznog kratkog spoja krute mreže od 3,9 MVA, napon na najudaljenijoj sabirnici INA, koja je najudaljenija od krute mreže i od elektrane FERIT1, je na granici stabilnosti, što je vidljivo na slici 4.31.

Postupnim smanjenjem snage trofaznog kratkog spoja krute mreže, padali su i naponi na sabirnicama koje su najudaljenije od elektrane FERIT1 i krute mreže. Bitno je primijetiti kao je vod do sabirnice INA, u blagom preopterećenje, što je vidljivo sa slike 4.32.



#### 4.3.2. Opterećenje voda do sabirnice INA za $S_{k3}$ od 3,9 MVA

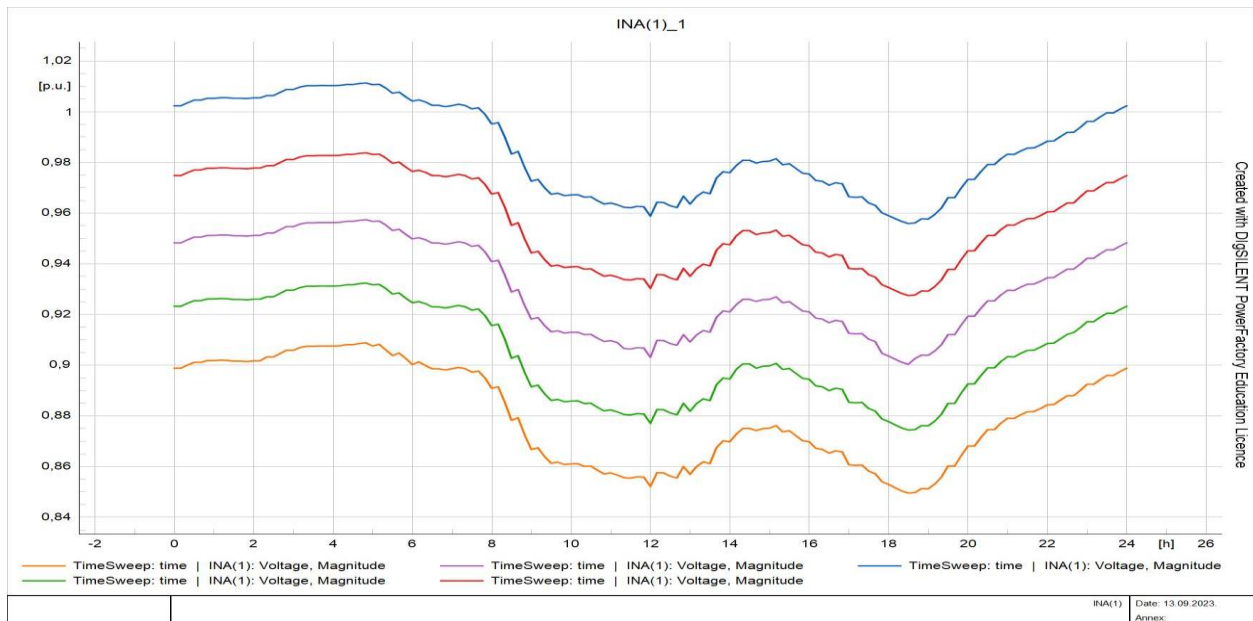
Kako je opterećenje mikromreže veliko, proizvodnja iz fotonaponske elektrane FERIT1 nije dostatna da ih u potpunosti pokrije, te su smanjenjem snage krute mreže naponi na svim sabirnicama opali. Za slučaj da je snaga krute mreže manja i od trenutne, možemo provesti više mjera kako bi smo regulirali napone i tokove snaga u mreži, te ih doveli u granice stabilnosti. Metode za povećanje integracije su:

- a) Regulacije prijenosnog omjera transformatora
- b) Promjena  $\cos\varphi$  distributivnog izvora
- c) Izgradnja novih vodova ili dodavanje istih u paralelu

#### 4.4.2. Regulacija prijenosnog omjera transformatora

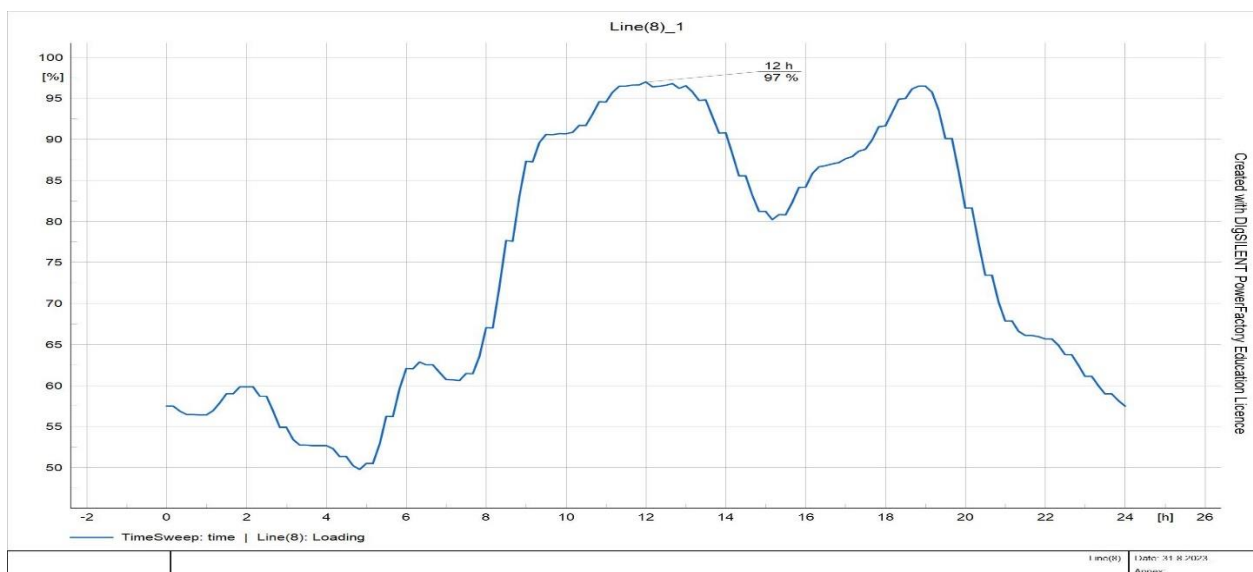
Za ovaj slučaj regulaciju prijenosnog omjera vršimo preko regulacijske sklopke koja ima 5 položaja (-2,-1,0,1,2). Svaki položaj nosi promjenu napona na sekundaru od 2,5%, tj. napon na stezaljkama sekundara može biti  $\pm 5\%$  nazivnog napona u položaju 0. Metodu regulacije prijenosnog omjera također koristimo za slučaj 1, za  $S_{k3}$  od 3,9MVA, i instaliranu snagu fotonaponske elektrane FERIT1 od 100kW.

Dijagram napona na sabirnici INA za različite položaje regulacijske sklopke prikazan je na slici 4.33. Sa slike se može primijetiti kako je za položaje 1 (zelena krivulja) i 2 (narančasta krivulja) napon pao ispod granice stabilnosti, dok je za položaje -1 (crvena krivulja) i -2 (plava krivulja) napon na sabirnici INA porastao, te je za položaj -2 napon na sabirnici INA najviši i iznosi 0,9559 p.u. u minimalnoj točki krivulje. Ljubičasta krivulja prikazuje dijagram napona za nulti položaj sklopke.



4.33. Dijagram napona na sabirnici INA za  $S_{k3}$  od 3,9 MVA za različite položaje regulacijske sklopke

Također je i opterećenje voda do sabirnice INA opalo, zbog povećanja napona na sekundaru, vidljivo na slici 4.34.



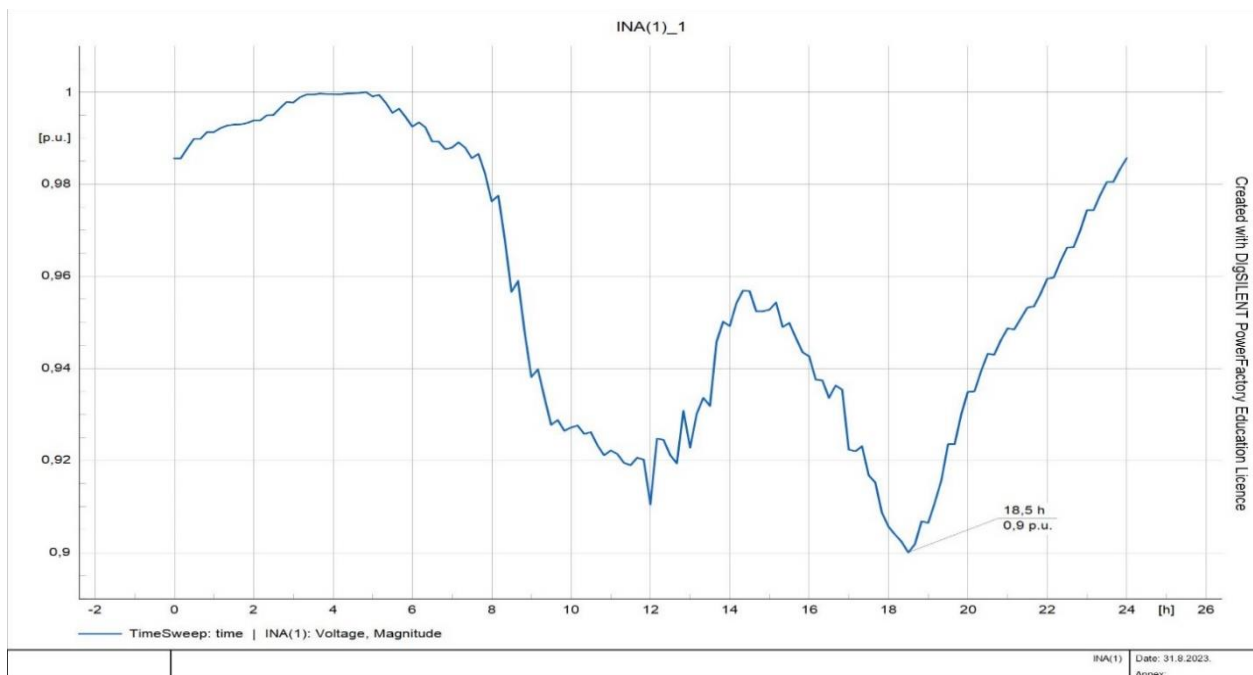
4.34. Opterećenje voda do sabirnice INA za  $S_{k3}$  od 3,9 MVA i položaj sklopke -2

Sa slika 4.33 i 4.34 je vidljivo da je moguće dodatno smanjenje trofazne snage kratkog spoja krute mreže. Stoga smo povećali duljinu voda do krute mreže, sve dok ponovno nismo došli na granicu stabilnosti. Ovakvo dodatno smanjenje  $S_{k3}$  je opasno ako dođe do neplaniranog ispada elektrane, napon na sabirnici INA će sigurno pasti ispod 0,9 p.u. te će doći do ispada tog dijela mreže iz pogona.  $S_{k3}$  je moguće dodatno smanjiti na vrijednost od 2,4MVA, što odgovara duljini voda između VN strane transformatora TR-42 i krute mreže od 16,07km, a snage trofaznog kratkog spoja ostalih sabirnica prikazane su u Tablica 4.2.

Tablica 4.2. Snage trofaznog kratkog spoja za duljinu voda do krute mreže od 16,07 km

Sabirnica	10kV Osijek	0.4kV Osijek	K.O. ETF	EMŠC	SPMO FERIT
$S_{k3}$ [MVA]	2.3	1.9	1.6	1.6	1.5

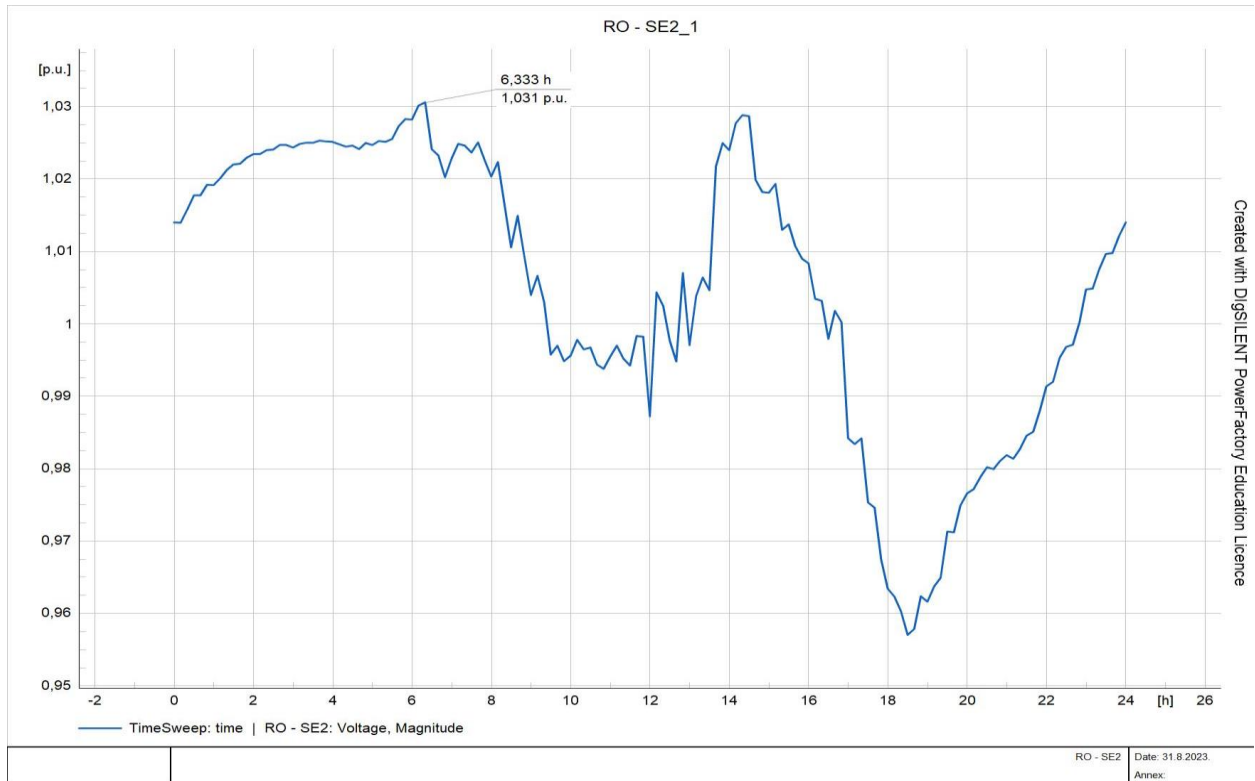
Nakon povećanja duljine voda, na slici 4.35 je prikazan dijagram napona za sabirnicu INA, gdje se minimalna vrijednost napona nalazi na donjoj granici stabilnosti.



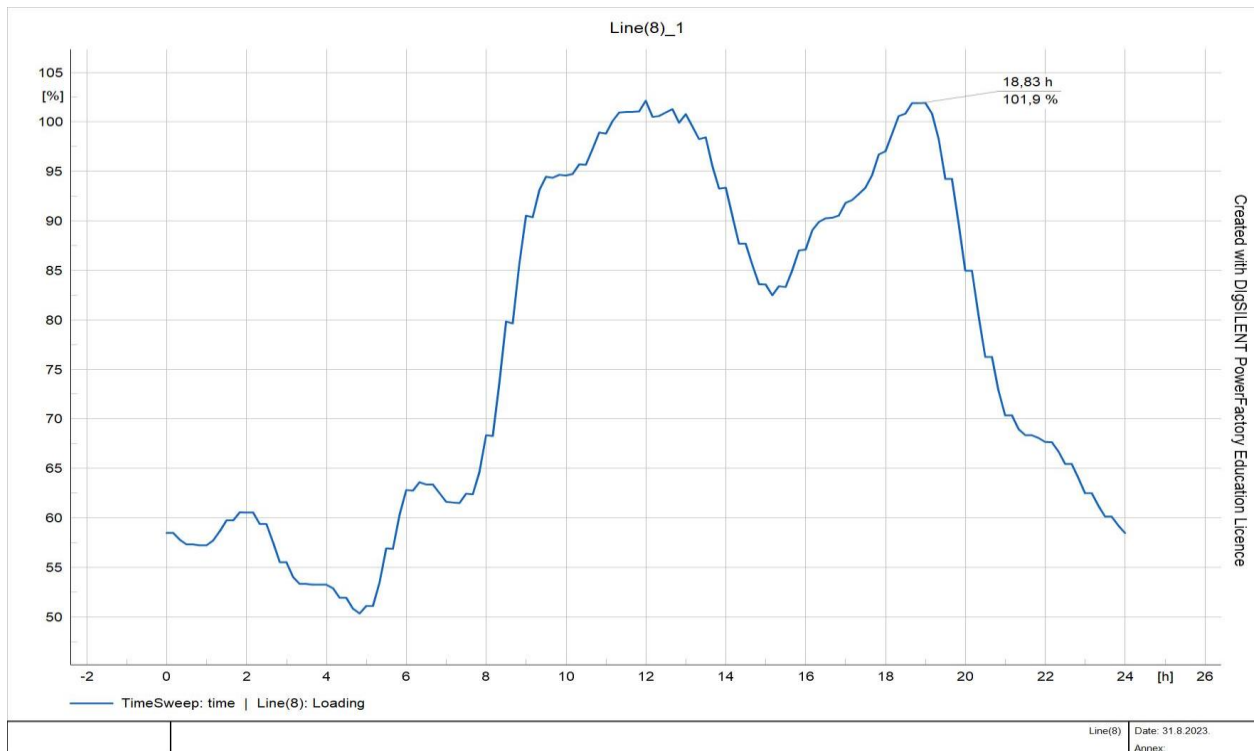
4.35. Dijagram napona na sabirnici INA za  $S_{k3}$  od 2,3 MVA i položaj regulacijske sklopke -2

Naponi na ostalim sabirnicama u mikromreži su u granicama, a na slici 4.36 možemo vidjeti da minimalna vrijednost napona na sabirnici RO-SE2 iznosi približno 0.955 p.u.

Povećanjem duljine voda ponovno imamo i povećanje opterećenja voda do sabirnice INA, ali ponovno blago prelazi vrijednost maksimalnog opterećenja od 100%, vidljivo na slici 4.37.



4.36. Dijagram napona na sabirnici RO-SE2 za  $S_{k3}$  od 2,3 MVA i položaj regulacijske sklopke -2



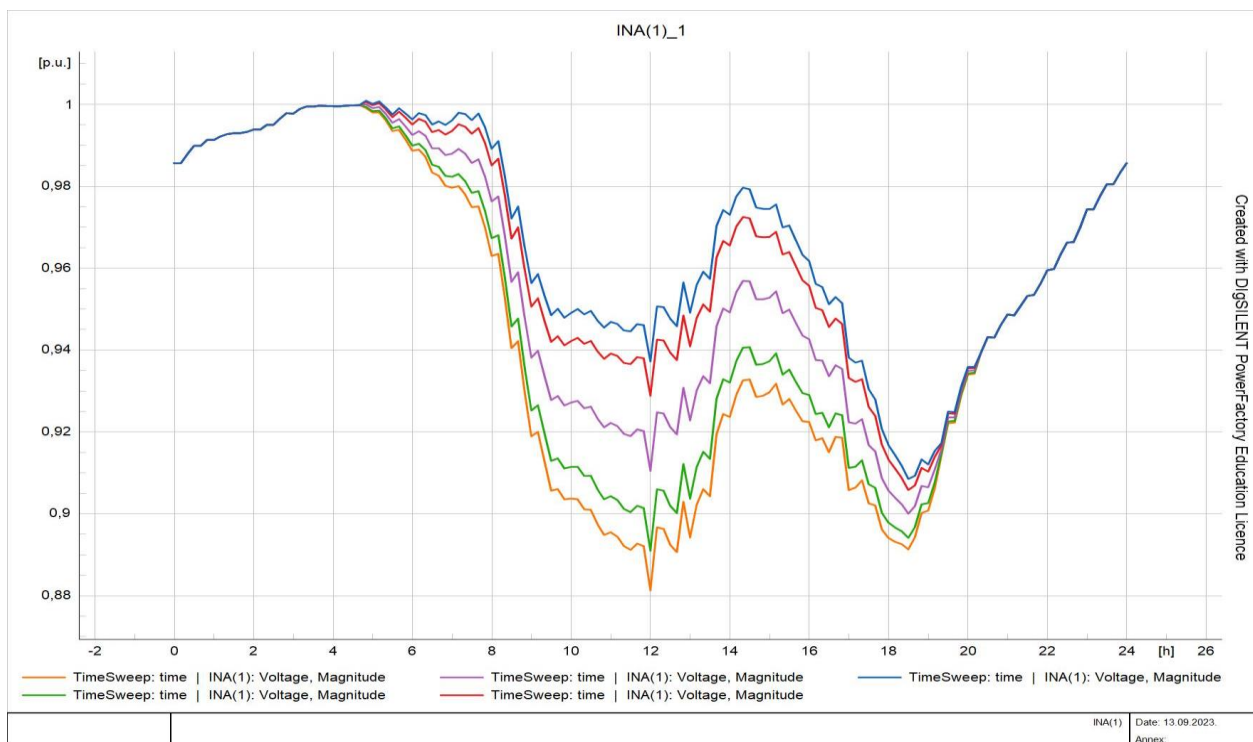
4.37. Opterećenje voda do sabirnice INA za  $S_{k3}$  od 2,3 MVA i položaj regulacijske sklopke -2



### 4.4.3. Promjena faktora snage ( $\cos\phi$ )

Promjena faktora snage ( $\cos\phi$ ) je sljedeća mjera koja se koristi za povećanje razine napona. Promjenom faktora snage možemo regulirati tokove snaga u mreži, i time smanjiti pad napona uzduž voda. Promjena  $\cos\phi$  prema mrežnim pravilima za fotonaponske izvore u distribucijskoj mreži može biti do 0,9 ind. i 0,9 kap. Promjenu  $\cos\phi$  vršimo kao nastavak na promjenu prijenosnog omjera transformatora, za  $S_{k3}$  od 2,3 MVA i instaliranu snagu fotonaponske elektrane od 100kW, kako bi smo vidjeli je li moguće dodatno smanjiti snagu trofaznog kratkog spoja. Za naš slučaj kako bi smo odredili maksimalno povećanje napona u mikromreži pomoću promjena faktora snage, mijenjati ćemo  $\cos\phi$  na inverterima fotonaponske elektrane FERIT 1 za 0,05 i to kapacitivno i induktivno. Dijagram napona na sabirnici INA za različite vrijednosti  $\cos\phi$  prikazan je na slici 4.38.

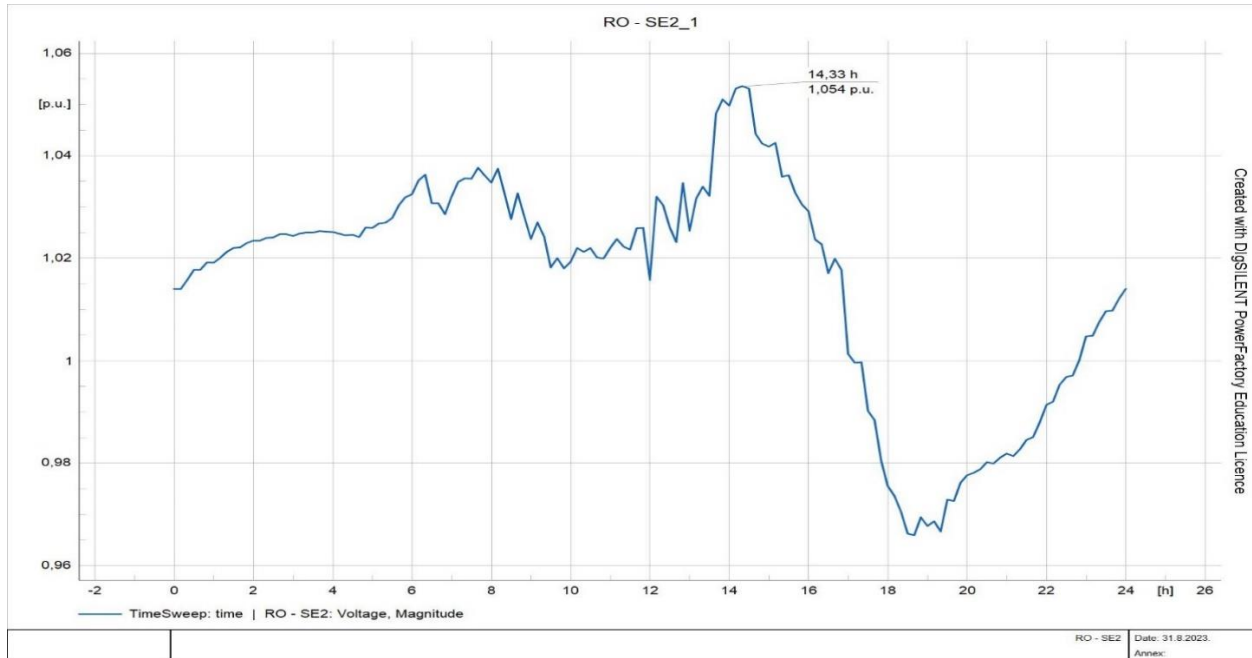
Na slici 4.384.38 također je vidljivo da se napon na sabirnici INA ima najveći porast od 0.085 p.u., nakon promjene faktora snage sa 1 na 0,9 ind.



4.38. Dijagram napona na sabirnici INA za različite vrijednosti  $\cos\phi$

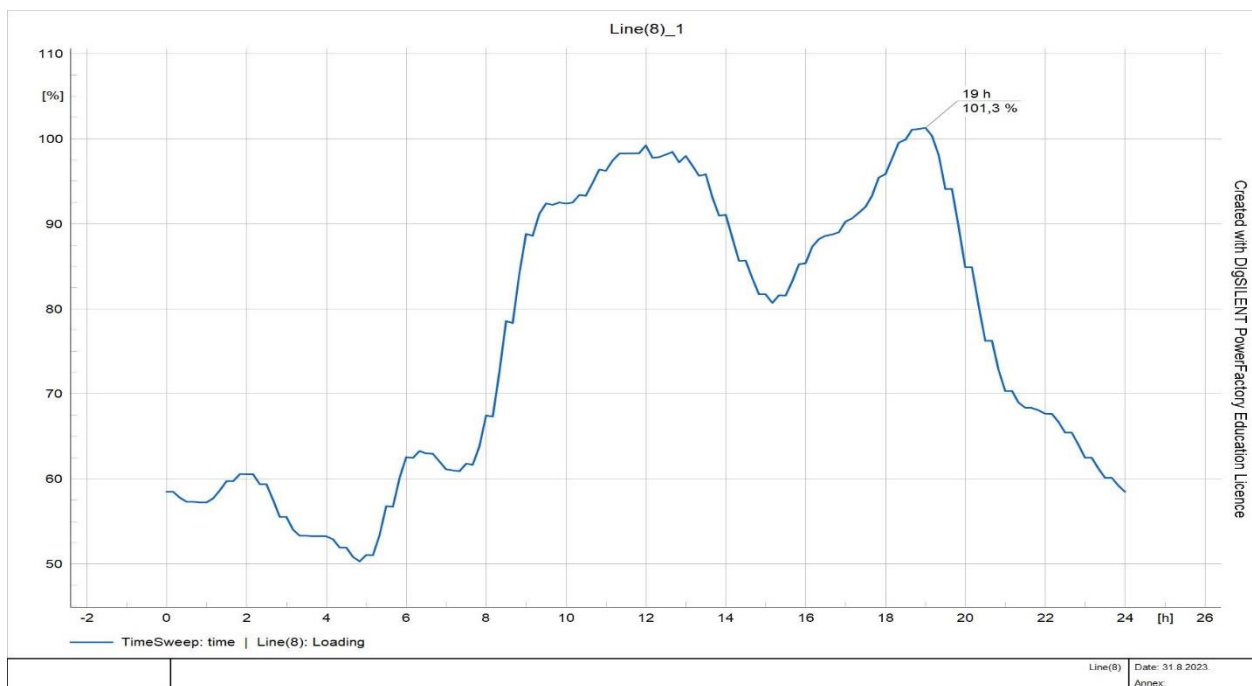
Narančasta krivulja predstavlja dijagram napona za  $\cos\phi$  od 0,9 cap., zelena za 0,95 cap, ljubičasta krivulja za  $\cos\phi$  od 1, te gornje dvije gdje je napon u porastu u odnosu na  $\cos\phi = 1$ , od kojih crvena predstavlja dijagram napona pri  $\cos\phi$  od 0,95 ind., a plava za  $\cos\phi$  od 0,9 ind.

Naponi i na ostalim sabirnicama prate trend opadanja, ali se i naponi ostalih sabirnica podignu, a napon na sabirnici RO-SE2 prikazan je na slici 4.39.



4.39. Dijagram napona na sabirnici RO-SE2 nakon promjene  $\cos\varphi$  na 0,9 ind.

Na slici 4.40 je primjetno kao i prošlim slučajevima blago povećanje opterećenja na vodu do sabirnice INA.



4.40. Opterećenje voda do sabirnice INA nakon promjene  $\cos\varphi$  na 0,9 ind.

Kako je napon na sabirnici INA 0.9085, možemo ponovno smanjiti snagu trofaznog kratkog spoja povećanjem duljine voda do krute mreže do napona od 0.9 p.u. Bitno je napomenuti kako je dodatno smanjenje  $S_{k3}$  opasno, jer neplaniranim ispadom fotonaponske elektrane, gubimo jalovu snagu potrebnu za regulaciju napona te će ponovno doći do ispada dijela mreže iz pogona.

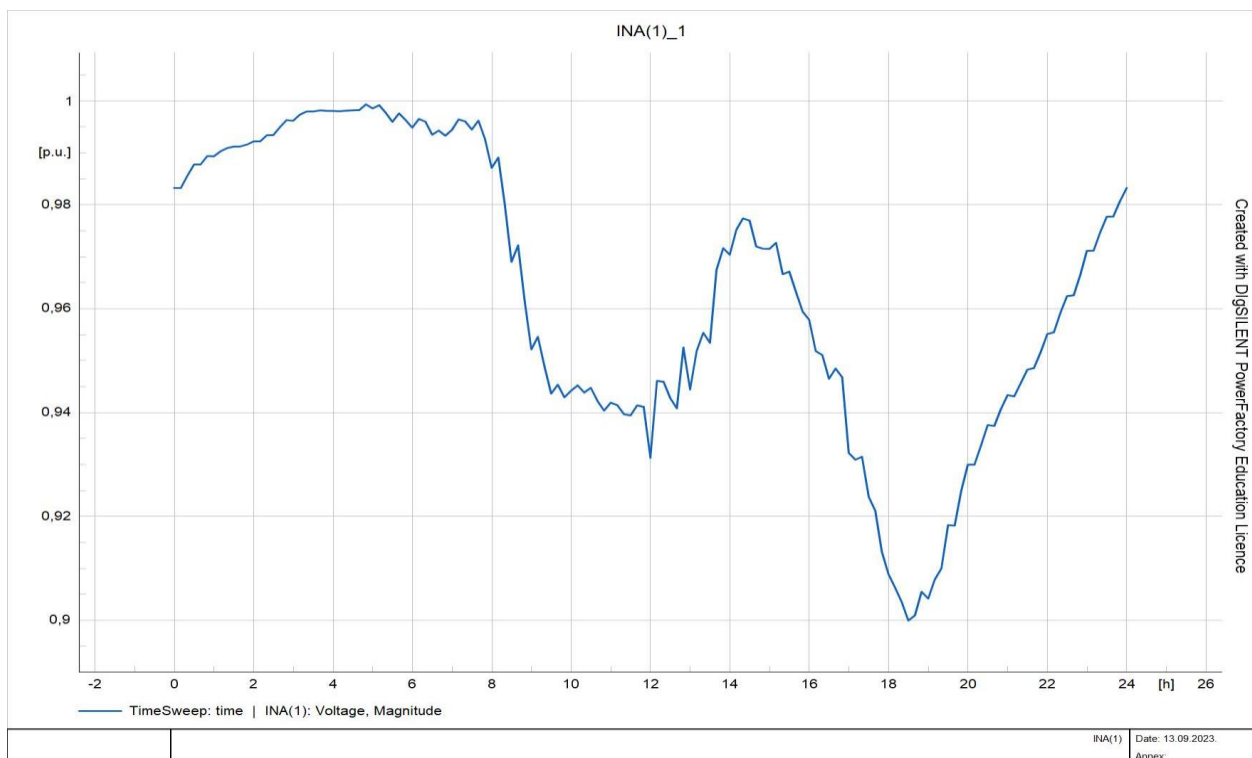
Nova granica stabilnosti je za  $S_{k3}$  od 2,1 MVA, što odgovara duljini voda između VN strane TR-42 i krute mreže od 16,9 km, a snage kratkog spoja ostalih sabirnica prikazane su Tablica 4.3.

Tablica 4.3. Snage kratkog spoja za duljinu voda prema krutoj mreži od 16,4 km

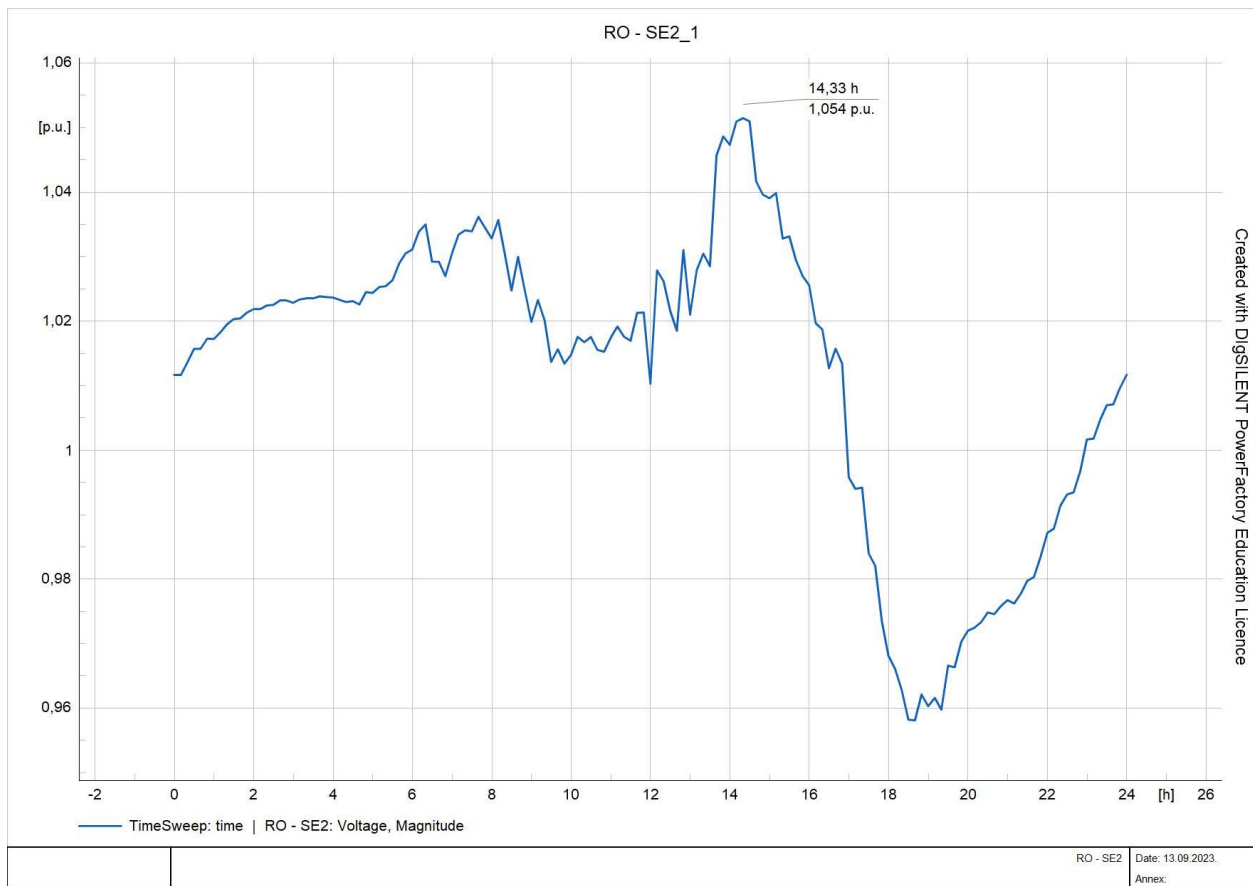
Sabirnica	10kV Osijek	0.4kV Osijek	K.O. ETF	EMŠC	SPMO FERIT
$S_{k3}$ [MVA]	2.1	1.8	1.6	1.6	1.5

Nakon promjene  $S_{k3}$  na 2,1 MVA, napon na sabirnici INA ponovno je na granici stabilnosti, vidljivo na slici 4.41, dok je napon na sabirnici RO-SE2, na koju je spojena fotonaponska elektrana FERIT 1 u dozvoljenim granicama stabilnosti, vidljivo na slici 4.42.

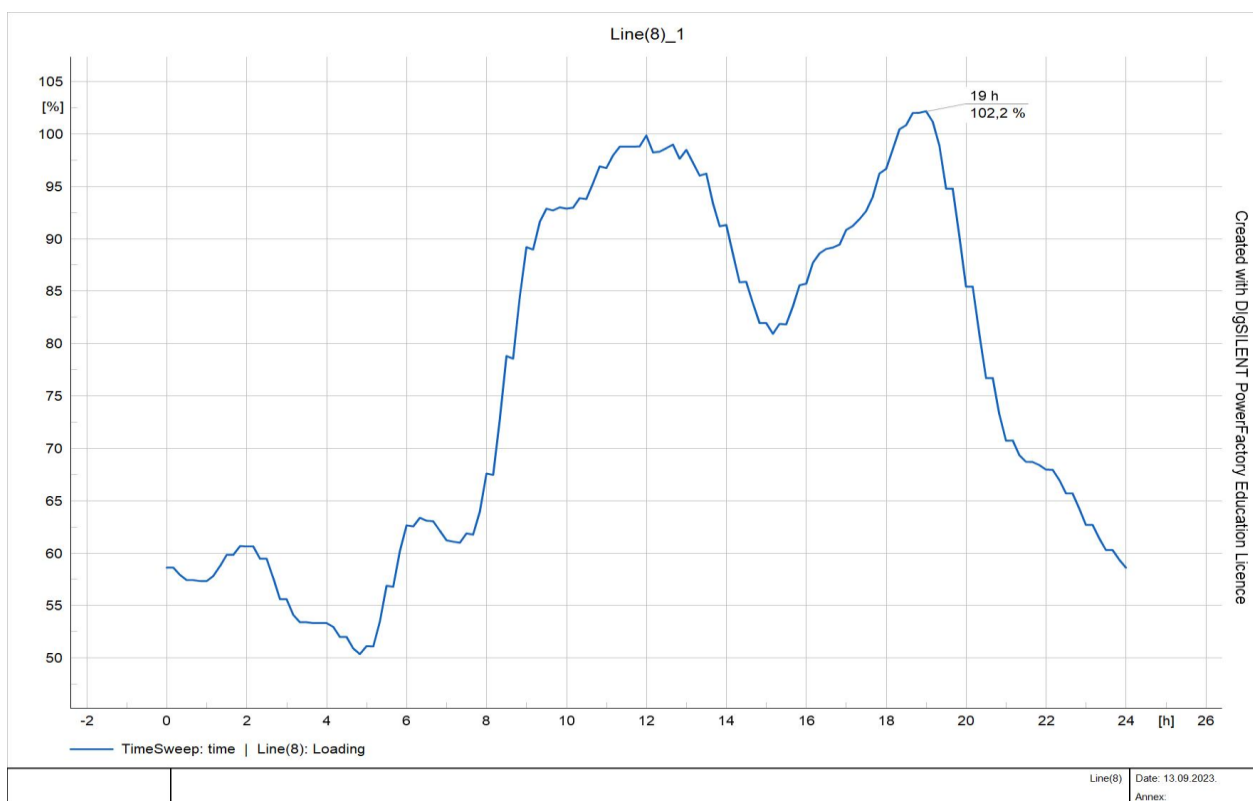
Pri  $S_{k3}$  od 2,1 MVA, opterećenje na vodu do sabirnice INA ponovno blago prelazi maksimalnu dopuštenu vrijednost od 100%, vidljivo na slici 4.43.



4.41. Dijagram napona na sabirnici INA pri  $S_{k3}$  od 2,1 MVA i  $\cos\phi$  od 0,9 ind.



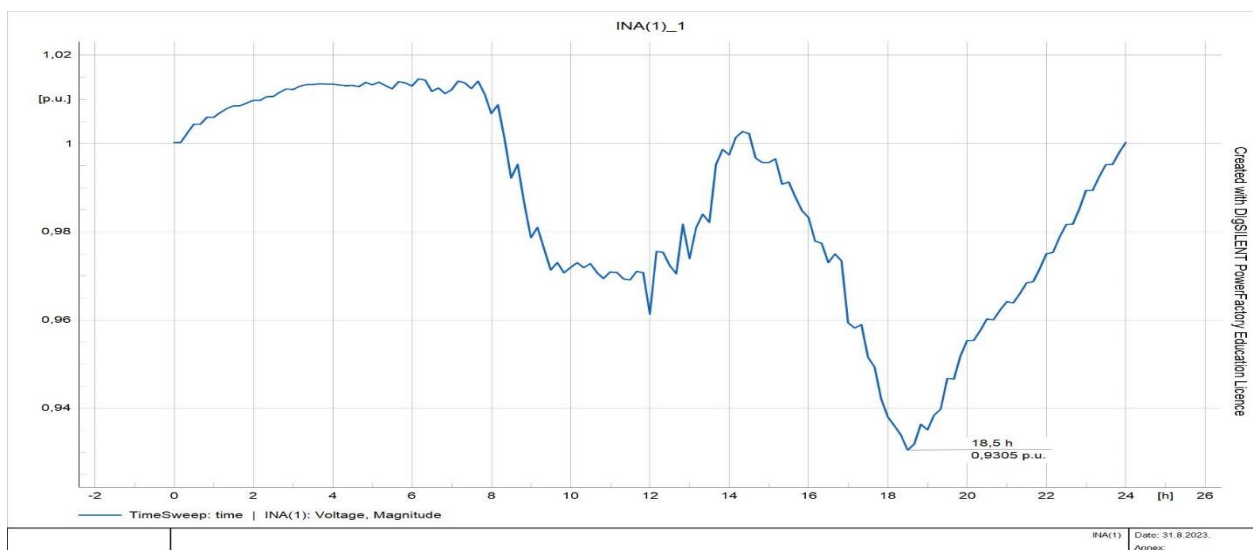
4.42. Dijagram napona na sabirnici RO-SE2 pri  $S_{k3}$  od 2,1 MVA i  $\cos\phi$  od 0,9 ind.



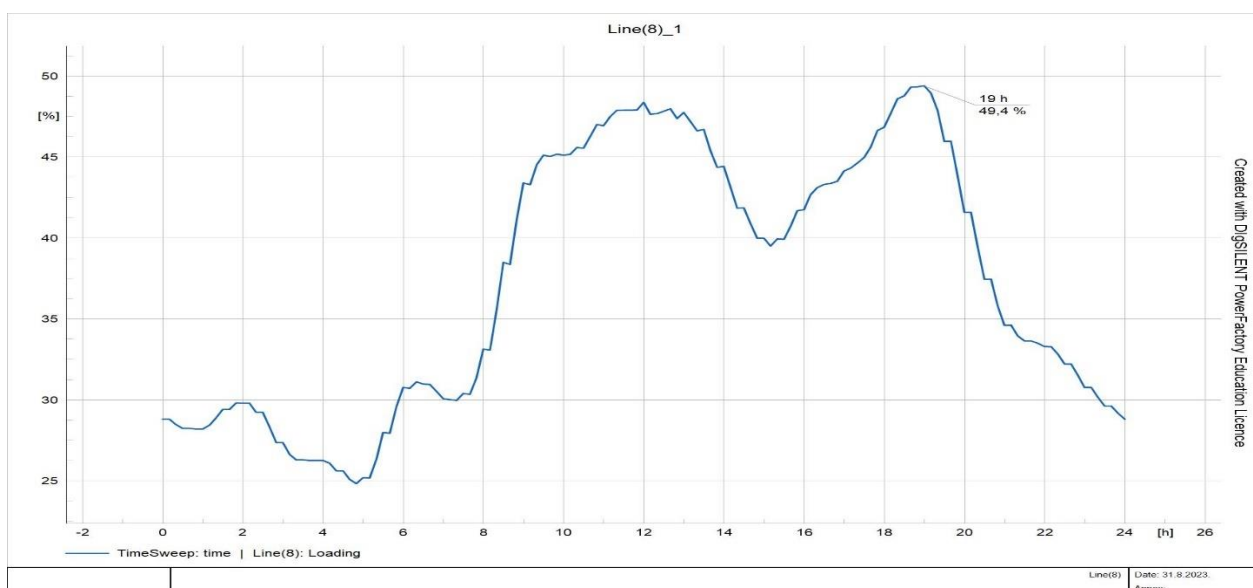
4.43. Opterećenja voda do sabirnice INA pri  $S_{k3}$  od 2,1 MVA i  $\cos\phi$  od 0,9 ind.

#### 4.4.4. Izgradnja novog voda ili dodavanje istih u paralelu

Izgradnjom novih vodova ili dodavanjem istih u paralelu s postojećim smanjujemo impedanciju u tom dijelu mreže i time smanjujemo padove napona na vodovima a ujedno smanjujemo i opterećenje samih vodova. Kako je vod do sabirnice INA jedini blago preopterećen, jer smanjenjem napona struje kroz vod rastu. Dodavanjem novog voda u paralelu smo povećali napon na sabirnici INA sa 0,9 p.u., na 0,9305 p.u. (slika 4.44.), a ujedno i smanjili opterećenje voda vidljivo na slici 4.45. Simulacija se ponovno nastavlja na prethodnu, provodimo ju za slučaj 1, instaliranu snagu od 100kW i  $S_{k3}$  2,1 MVA.

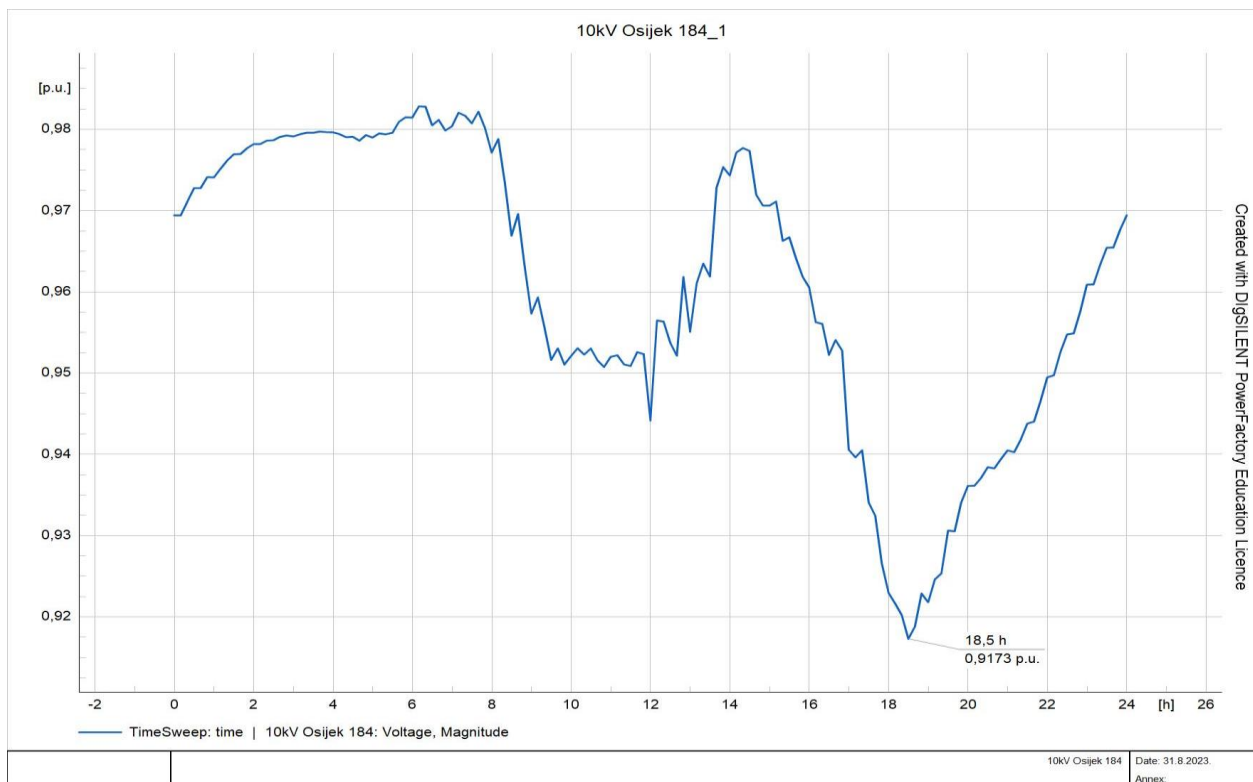


4.44. Dijagram napona na sabirnici INA nakon dodavanje dodatnog paralelnog voda



4.45. Opterećenje voda do sabirnice INA nakon dodavanja paralelnog voda

Snagu krute mreže smo do sada već dovoljno smanjili, te je sada napon na sabirnici 10kV Osijek najmanji, vidljivo na slici 4.46. Sada je vidljivo kako su naponi na sabirnicama električni udaljenim od fotonaponske elektrane FERIT1 najmanji, jer pojna mreža do mikromreže FERIT1 više nije kruta s obzirom na mikromrežu.



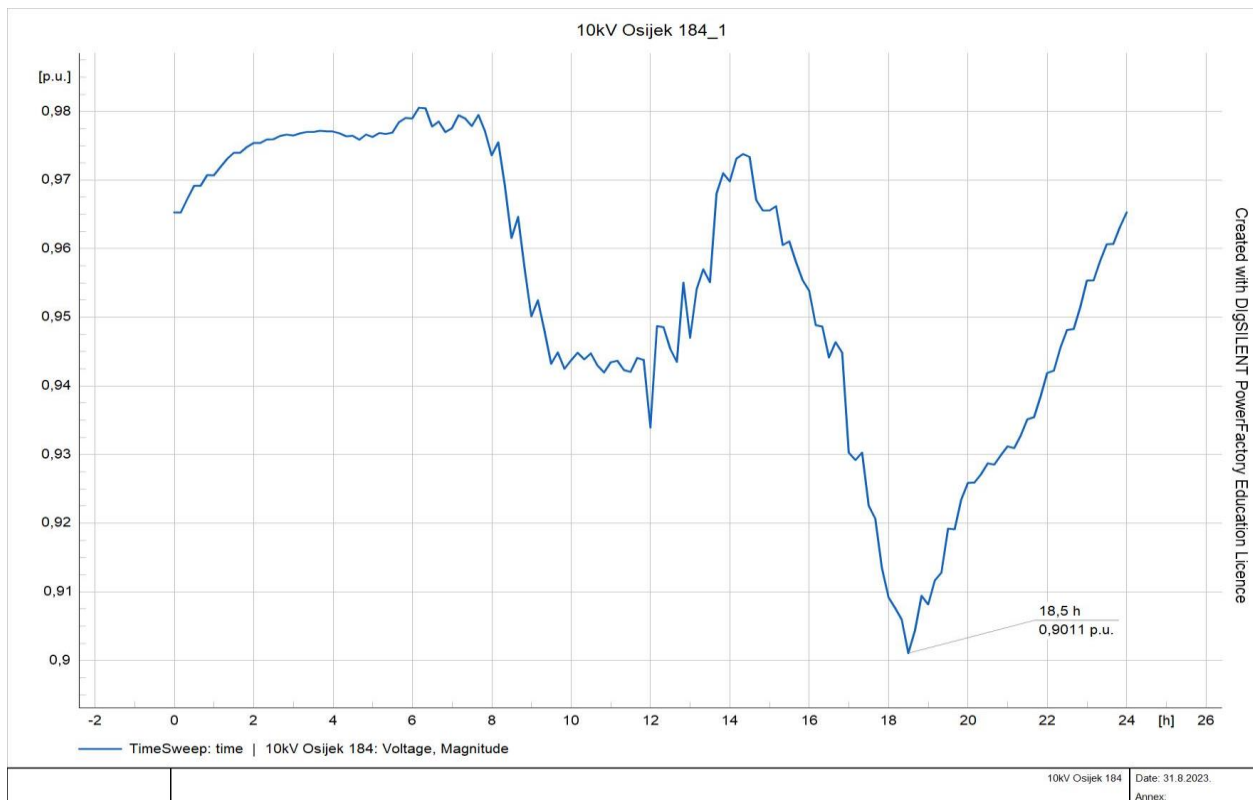
4.46. Dijagram napona na sabirnici 10 kV Osijek

Kako minimalni napon na sabirnici 10kV Osijek iznosi 0.9173 p.u., možemo dodatno smanjiti snagu trofaznog kratkog spoja kako bi smo odredili minimalnu snagu  $S_{k3}$ , za koju je moguća integracija instalirane snage od 100kW. Nova duljina voda do krute mreže iznosi 18,4 km, a snage trofaznog kratkog spoja na sabirnicama za tu duljinu su prikazani u Tablica 4.4.

Tablica 4.4. Snage trofaznog kratkog spoja sabirnica za duljinu voda do krute mreže od 18,4 km

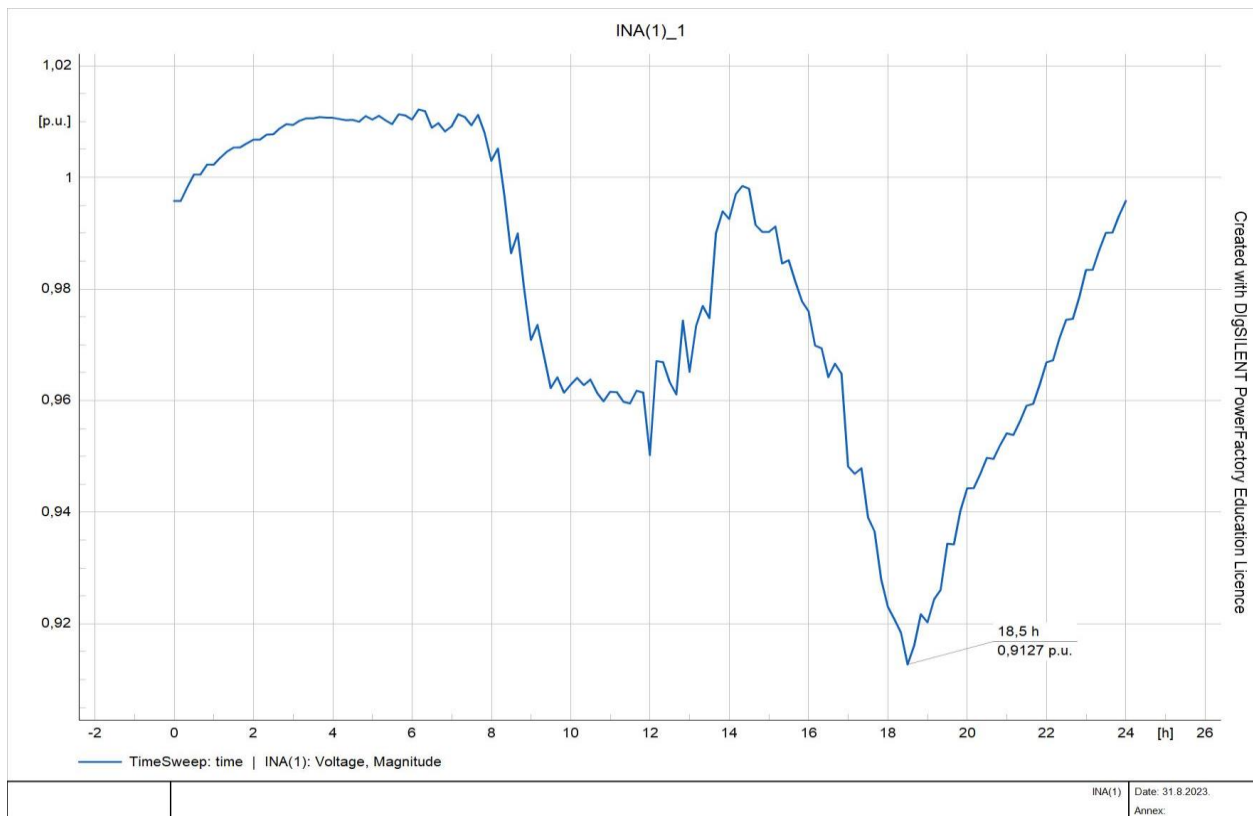
Sabirnica	10kV Osijek	0.4kV Osijek	K.O. ETF	EMŠC	SPMO FERIT
$S_{k3}$ [MVA]	2	1.7	1.5	1.5	1.4

Nakon dodatnog smanjenja  $S_{k3}$  na 2 MVA, minimalni napon na sabirnici 10kV Osijek se nalazi na rubu stabilnosti i iznosi 0.9011 p.u. Dijagram napona sabirnice 10kV Osijek prikazan je na slici 4.47.

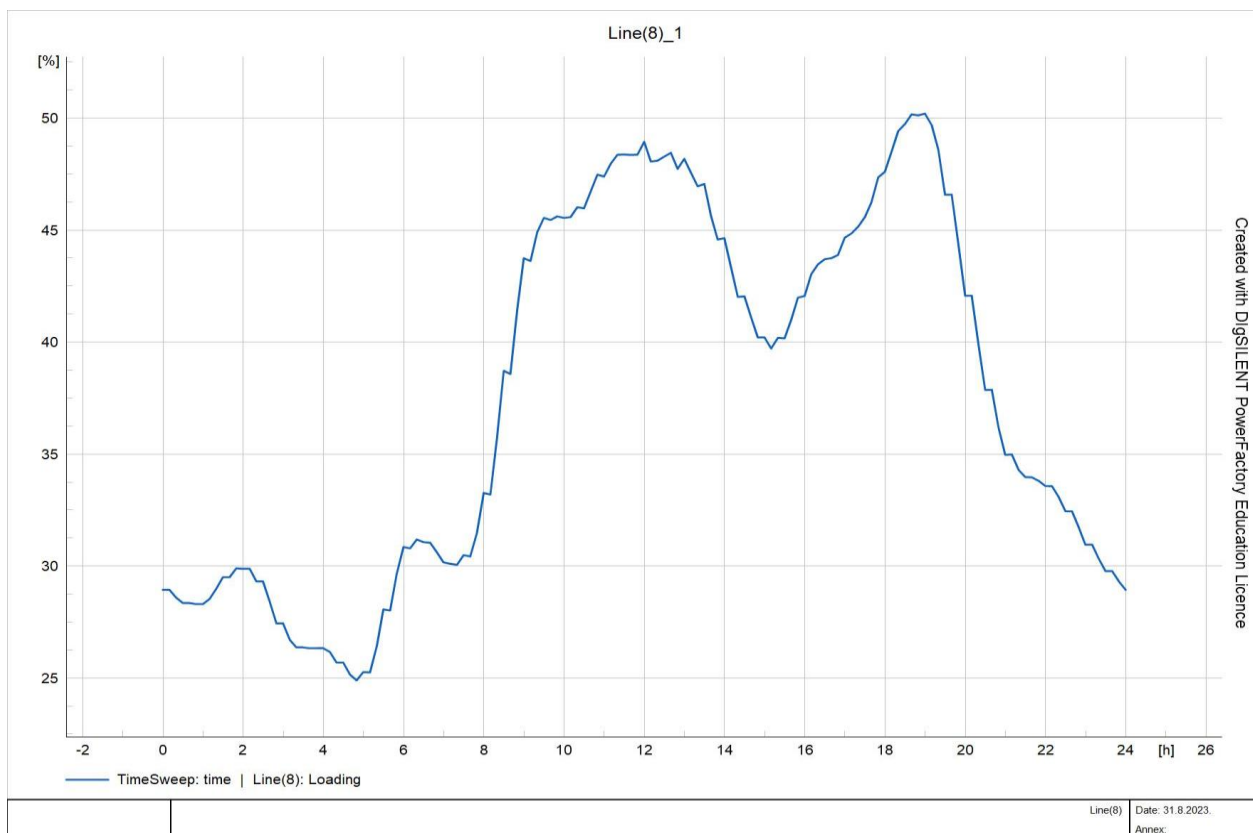


4.47. Dijagram napona na sabirnici 10kV Osijek za  $S_{k3}$  od 2 MVA

Zbog velike potrošnje u mikromreži, postupnim smanjenjem snage krute mreže možemo primijetiti kako su naponi svakim korakom sve više opadali. Razlog tome je što prema mrežnim pravilima fotonaponska elektrana FERIT1 koja je spojena na 0,4kV izvodu i ne smije imati iznos instalirane snage veći od 100kW. Napon na sabirnici INA prikazan je na slici 4.48. Dodavanjem novog voda u paralelu smo riješili problem preopterećenja, te je opterećenje voda do sabirnice INA prikazan na slici 4.49.



4.48. Dijagram napona na sabirnici INA za  $S_{k3}$  od 2 MVA



4.49. Opterećenje voda do sabirnice INA za  $S_{k3}$  od 2 MVA



## 5. ZAKLJUČAK

Integracijom fotonaponskih sustava ili nekog drugog distribuiranog izvora, pozitivno smo utjecali na elektroenergetsku mrežu u pogledu povećanja pouzdanosti opskrbe električnom energijom, smanjenja gubitaka i povećanja prijenosne snage. Međutim, integracija izbora i distributivnu mrežu može imati i negativan utjecaj na naponske prilike i tokove snaga. Kako bi se izbjegli negativni utjecaju, potrebno je odrediti pravilan iznos instalirane snage izvora.

Za simulacijski dio diplomskog rada, pomoću mjerenih podataka i potrebnih matematičkih izraza je modelirana potrošnja zgrade FERIT-a, te proizvodnja iz fotonaponske elektrane FERIT1 za tri slučaja: 15.lipanj (slučaj 1), 1.kolovoz (slučaj 2), i 15.prosinac (slučaj 3). Nakon modeliranja potrošnje i proizvodnje mikromreže, i određivanja referentnog slučaja, provedena je *Timesweep* analiza mikromreže kako bi se prikazao utjecaj fotonaponske elektrane FERIT1 na mikromrežu i NN mrežu.

Analiza je provedena tako da se postupno smanjivala snaga trofaznog kratkog spoja krute mreže, iz razloga što je kruta mreža bila električni prejaka kako bi se primijetili utjecaji elektrane FERIT1 na mikromrežu pri maksimalnoj dopuštenoj instaliranoj snazi na 0,4kV izvod prema mrežnim pravilima od 100 kW. Smanjenjem snage trofaznog kratkog spoja sa 288 MVA na 3,9 MVA, napon na sabirnici INA je na granici stabilnosti od 0,9 p.u. Sabirnica INA je električni najudaljenija od fotonaponske elektrane FERIT1, te je zbog toga na njoj vidljiv najveći pad napona. Potom su predložene metode za povećanje integracije kako bi smo odredili je li moguće dodatno smanjenje snage krute mreže i do koje granice. Metode za povećanje integracije nam omogućuju povećanje napona na kritičnim sabirnicama i smanjenje opterećenja voda.

Promjenom prijenosnog omjera transformatora smo podigli napon na sabirnici INA s kritične vrijednosti 0,9 p.u., na vrijednost od 0,9559 p.u. Uz povećanje napona, pozitivno smo utjecali i na smanjenje opterećenja voda. Zbog provođenja ostalih metoda, ponovno je smanjena snaga krute mreže, ovog puta na 2,3 MVA. Sljedeća mjera je promjena faktora snage fotonaponske elektrane. Promjenom  $\cos\phi$  na 0,9 ind. smo pozitivno utjecali na smanjenje tokove snaga, zbog ubacivanja kapacitivne snage u mikromrežu. Razina napona na kritičnoj sabirnici INA je ponovno porasto, te smo ponovno mogli smanjiti snagu krute mreže, sada na 2,1 MVA. Posljednja mjera provedena u simulaciji je ugradnja dodatnog paralelnog voda između sabirnica 0,4kV Osijek i INA. Dodavanjem paralelnog voda smo smanjili impedanciju u tom dijelu mreže i pozitivno utjecali na napon sabirnice INA i opterećenje voda. Snagu krute mreže smo smanjili na vrijednost od 2 MVA, što nam predstavlja i graničnu vrijednost na kojoj je sustav stabilan.

## 6. SAŽETAK

U teorijskom dijelu diplomskog rada opisani su fotonaponski sustavi, mikromreža i utjecaj fotonaponske elektrane na parametre mikromreže. Nakon određivanja modela potrošnje i proizvodnje koje se nalaze u mikromreži FERIT1, odrađena je *Timesweep* analiza za više slučajeva kako bi se dobio uvid u utjecaj fotonaponske elektrane na mikromrežu. Potom su odrađeni granični slučajeva s obzirom na stabilnost sustava, te predložene mjere za maksimalnu razinu integracije u odnosu na snagu krute mreže.

KLJUČNE RIJEČI: fotonaponska elektrana, mikromreža, naponska razina, strujno-naponske prilike, integracija fotonaponskog sustava.

## 7. SUMMARY

The theoretical part of this master's thesis describes photovoltaic systems, microgrids, and impact of photovoltaic power plant on microgrids parameters. After determining the consumption and production models within the FERIT1 microgrid, a *Timesweep* analysis was conducted for multiple scenarios to gain insight into the impact of photovoltaic power plant on the microgrid. Subsequently, boundary cases were analyzed with the regard to system stability, and proposed measures for maximum integration level with respect to the grid short-circuit power.

KEY WORDS: photovoltaic power plant, microgrid, voltage level, current and voltage conditions, integration of photovoltaic power plant.

## LITERATURA

- [1] "IEA", dostupno na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-data-explorer>, [20.lipanj.2023]
- [2] Renewable Energy Lab Osijek, dostupno na: <https://reslab.ferit.hr/?news&id=77#m>, [20.lipanj.2023]
- [3] D.Šljivac, Predavanje, "Obnovljivi izvori električne energije", dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6206683/mod\\_resource/content/3/OIelen\\_2021\\_2021\\_2poglavlje.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6206683/mod_resource/content/3/OIelen_2021_2021_2poglavlje.pdf), [23.lipanj.2023]
- [4] D.Šljivac, Predavanje, "Integracija OIE i napredne (pametne) mreže", dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7045210/mod\\_resource/content/15/Integracija%20OIE%20i%20napredne%20mre%C5%BEe%202022\\_2023\\_1poglavlje.pdf](https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7045210/mod_resource/content/15/Integracija%20OIE%20i%20napredne%20mre%C5%BEe%202022_2023_1poglavlje.pdf), [25.lipanj.2023]
- [5] D.Šljivac, Predavanje, "Integracija OIE i napredne (pametne) mreže", dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7045216/mod\\_resource/content/11/Integracija%20OIE%20i%20napredne%20mre%C5%BEe%202022\\_2023\\_2poglavlje.pdf](https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7045216/mod_resource/content/11/Integracija%20OIE%20i%20napredne%20mre%C5%BEe%202022_2023_2poglavlje.pdf), [27.lipanj.2023]
- [6] P.Matić, Predavanje, "Integracija OIE i napredne (pametne) mreže", dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7045236/mod\\_resource/content/1/UTJECAJ%20INTEGRACIJE%20OBNOVLJIVIH%20IZVORA%20NA%20STABILNOST%20I%20ZASTITU.pdf](https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7045236/mod_resource/content/1/UTJECAJ%20INTEGRACIJE%20OBNOVLJIVIH%20IZVORA%20NA%20STABILNOST%20I%20ZASTITU.pdf), [27.lipanj.2023]
- [7] P.Kundur et al "Definition and Classification of Power System Stability" IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definition, s IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, DOI 10 1109 /TPWRS 2004 825981 2004
- [8] L. Gudelj, "Utjecaj distribuirane proizvodnje na smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2020. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:701406>, [27.lipanj.2023]

- [9] Ljubomir Majdandžić, “Fotonaponski sustavi“, dostupno na: <https://dokumen.tips/documents/fotonaponski-sustavi-ljubomir-majdandzic.html>, [1.srpanj.2023]
- [10] P. Kulušić, J. Vuletin, I. Zulim, Sunčeve ćelije, Školska knjiga, Zagreb, 1994
- [11] Narodne Novine, “Mrežna pravila distribucijskog sustava“, dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_08\\_74\\_1539.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_08_74_1539.html), [10.srpanj.2023]

## ŽIVOTOPIS

Josip Grbavica rođen je u 17.03.1995. godine u Vinkovcima. Osnovnu školu Josipa Lovrečića u Otoku završava 2010. godine. Srednju Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer elektrotehnika završava 2014 godine, te nakon tri godine rada upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer Elektrotehnika. Nakon završetka preddiplomskog studija 2021. godine, upisuje Diplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok Održiva elektroenergetika. Aktivno se koristi engleskim jezikom. Tijekom studija naučio je vješto koristiti programe Power Factory, Easy Power, Eplan i druge. Na završnoj godini diplomskog studija postaje stipendist tvrtke KONČAR-Distributivni i specijalni transformatori d.d. (KONČAR D&ST).

---

Potpis autora

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Porast instalirane snage iz FN elektrana [1].....	2
Slika 3.1. Nadomjesna shema fotonaponske ćelije .....	6
Slika 3.2 Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije .....	7
Slika 3.3. Strujno-naponska karakteristika FN ćelije u ovisnosti o jakosti Sunčeva zračenja (lijevo) .....	8
Slika 3.4. Samostojeći fotonaponski sustav s pohranom energije [3].....	10
Slika 3.5. Hibridni fotonaponski sustav [3].....	11
Slika 3.6. Model mrežne fotonaponske elektrane [3].....	12
Slika 3.7. Prikaz elektroenergetskog sustava .....	15
Slika 3.8. Theveninova mreža .....	17
Slika 3.9. Pokazatelji stabilnosti elektroenergetskog sustava [7].....	21
Slika 3.10. PV krivulja[6]0 .....	22
Slika 3.11. QV krivulja [6].....	23
3.12. P- $\delta$ krivulja sustava [6].....	24
4.1. Shema mikromreže FERIT1 u DIgSILENT PowerFactory-u.....	28
4.2. Dnevni dijagram opterećenja za 15. lipanj.....	29
4.3. Dnevni dijagram opterećenja za 1. kolovoz .....	30
4.4. Dnevni dijagram opterećenja za 15. prosinac .....	31
4.5. Profil G0.....	32
4.6. Profil G1 .....	33
4.7. Profil G2.....	33
4.8. Profil G3.....	34
4.9. Dnevni dijagram intenziteta Sunčevog zračenja .....	36
4.10. Dnevna promjena temperature okoline ( $T_{amb}$ ) .....	36
4.11. Dnevna promjena temperature modula .....	37
4.12. Snaga proizvodnje iz FN elektrane FERIT 1 .....	38
4.13. Referentno stanje mikromreže FERIT 1 za slučaj 1 .....	39
4.14. Dijagram napona sabirnice GRO bez integrirane elektrane FERIT 1 .....	40
4.15. Dijagram napona sabirnice GRO za 15.lipanj nakon integracije elektrane FERIT 1 .....	40
4.16. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15.lipanj bez integrirane elektrane FERIT 1 .....	41
4.17. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15.lipanj nakon integracije elektrane FERIT 1 .....	42
4.18. Dijagram napona sabirnice SPMO Srednjika za 15.lipanj bez integrirane elektrane FERIT 1 .....	42
4.19. Dijagram napona sabirnice SPMO Srednjika za 15.lipanj nakon integracije elektrane FERIT 1 .....	43
4.20. Opterećenje transformatora za Slučaj 1 .....	44
4.21. Opterećenje voda između sabirnica K.O. ETF i 0,4kV Osijek za 15.lipanj.....	44
4.22. Prikaz stanja mikromreže FERIT 1 nakon integracije elektrane FERIT 1 .....	46
4.23. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 1.kolovoz bez integrirane elektrane FERIT 1 .....	47
4.24. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 1.kolovoz nakon integracije elektrane FERIT 1 ...	47

4.25. Opterećenje transformatora TR-46 za 1.kolovoz prije priključene proizvodnje (plavo) i nakon priključene proizvodnje (crveno, zeleno, ljubičasto) fotonaponske elektrane FERIT 1 ....	48
4.26. Opterećenje voda između sabirnica K.O. ETF i 0,4kV Osijek za 1.kolovoz nakon priključenja elektrane FERIT 1 .....	49
4.27. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15.prosinac bez integrirane fotonaponske elektrane FERIT 1 .....	50
4.28. Dijagram napona sabirnice RO-SE2 za 15. prosinac nakon integracije fotonaponske elektrane FERIT 1 .....	51
4.29. Opterećenje transformatora za 15.prosinac .....	51
4.30. Opterećenje voda između sabirnica RO-SE1 i SPMO FERIT za 15. prosinac.....	52
4.31. Dijagram napona na sabirnici INA za različite trofazne snage kratkog spoja krute mreže .	54
4.32. Opterećenje voda do sabirnice INA za <i>Sk3</i> od 3,9 MVA .....	55
4.33. Dijagram napona na sabirnici INA za <i>Sk3</i> od 3,9 MVA za različite položaje regulacijske sklopke .....	56
4.34. Opterećenje voda do sabirnice INA za <i>Sk3</i> od 3,9 MVA i položaj sklopke -2 .....	56
4.35. Dijagram napona na sabirnici INA za <i>Sk3</i> od 2,3 MVA i položaj regulacijske sklopke -2	57
4.36. Dijagram napona na sabirnici RO-SE2 za <i>Sk3</i> od 2,3 MVA i položaj regulacijske sklopke -2.....	58
4.37. Opterećenje voda do sabirnice INA za <i>Sk3</i> od 2,3 MVA i položaj regulacijske sklopke -2 .....	58
4.38. Dijagram napona na sabirnici INA za različite vrijednosti $\cos\varphi$ .....	59
4.39. Dijagram napona na sabirnici RO-SE2 nakon promjene $\cos\varphi$ na 0,9 ind.....	60
4.40. Opterećenje voda do sabirnice INA nakon promjene $\cos\varphi$ na 0,9 ind.....	60
4.41. Dijagram napona na sabirnici INA pri <i>Sk3</i> od 2,1 MVA i $\cos\varphi$ od 0,9 ind.....	61
4.42. Dijagram napona na sabirnici RO-SE2 pri <i>Sk3</i> od 2,1 MVA i $\cos\varphi$ od 0,9 ind. ....	62
4.43. Opterećenja voda do sabirnice INA pri <i>Sk3</i> od 2,1 MVA i $\cos\varphi$ od 0,9 ind. ....	62
4.44. Dijagram napona na sabirnici INA nakon dodavanje dodatnog paralelnog voda.....	63
4.45. Opterećenje voda do sabirnice INA nakon dodavanja paralelnog voda .....	63
4.46. Dijagram napona na sabirnici 10 kV Osijek .....	64
4.47. Dijagram napona na sabirnici 10kV Osijek za <i>S_k3</i> od 2 MVA .....	65
4.48. Dijagram napona na sabirnici INA za <i>S_k3</i> od 2 MVA .....	66
4.49. Opterećenje voda do sabirnice INA za <i>S_k3</i> od 2 MVA .....	66

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Promjena snage trofaznog kratkog spoja povećanjem duljine voda prema krutoj mreži.....	53
Tablica 4.2. Snage trofaznog kratkog spoja za duljinu voda do krute mreže od 16,07 km .....	57
Tablica 4.3. Snage kratkog spoja za duljinu voda prema krutoj mreži od 16,4 km .....	61
Tablica 4.4. Snage trofaznog kratkog spoja sabirnica za duljinu voda do krute mreže od 18,4 km .....	64