

# Utjecaj fotonaponskih elektrana na kvalitetu električne energije

---

**Opačak, Mislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:012732>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**Utjecaj fotonaponskih elektrana na kvalitetu električne  
energije**

**Diplomski rad**

**Mislav Opačak**

**Osijek, 2024.**

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

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Mislav Opačak
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D-1419,
<b>JMBAG:</b>	0165077982
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Utjecaj fotonaponskih elektrana na kvalitetu električne energije
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Obraditi osnovne pojmove o kvaliteti električne energije. Navesti i opisati glavne norme koje se odnose na kvalitetu električne energije. Opisati pokazatelje kvalitete električne energije. Detaljno analizirati utjecaj odabrane fotonaponske elektrane na elektroenergetsku mrežu, na temelju stvarnog mjerenja kvalitete električne energije.
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	28.11.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	18.12.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Dobar (3)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Dobar (3)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	24.12.2024.



**FERIT**

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

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 24.12.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Mislav Opačak
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1419,
Turnitin podudaranje [%]:	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj fotonaponskih elektrana na kvalitetu električne energije**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Zvonimir Klaić

i sumentora

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

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

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. FOTONAPONSKE ELEKTRANE .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Najmanji gradijent FN elektrane .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Vanjski utjecaji na proizvodnju .....</b>	<b>3</b>
2.2.1. Sunčevo zračenje .....	4
2.2.2. Položaj sunca .....	5
2.2.3. Zasjenjenje .....	11
2.2.4. Temperatura .....	12
<b>2.3. Odabir izmjenjivača .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4. Odabir FN modula .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5. Odabir kabela .....</b>	<b>19</b>
<b>3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Definicija kvalitete električne energije .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Norma EN 50 160 .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Pokazatelji kvalitete električne energije .....</b>	<b>24</b>
3.3.1. Kolebanje napona .....	24
3.3.2. Treperenje napona (Flickeri) .....	25
3.3.3. Naponski propadi i prekidi .....	28
3.3.4. Nesimetrija napona .....	33
3.3.5. Previsoki naponi i prenaponi .....	37
3.3.6. Harmonici i harmonična izobličenja .....	38
<b>4. UTJECAJ FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1. Spoj elektrane s mrežom .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2. Razina integracije FN elektrane u mrežu .....</b>	<b>43</b>
4.2.1. Napon na mjestu priključka .....	43
4.2.2. Pozitivni i negativni utjecaj integracije FN elektrane u mrežu .....	45
4.2.3. Dodatni zahtjevi za priključenje fotonaponske elektrane na mrežu .....	46
<b>5. ANALIZA MJERENJA KVALITETE .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. Tehnički opis elektrane .....</b>	<b>47</b>

<b>5.2. Analiza mjerenja kvalitete EE prema HRN EN 50160.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3. Komentar izvršenog mjerenja .....</b>	<b>60</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>61</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>62</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>63</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>64</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>65</b>

## 1. UVOD

Primjena fotonaponske tehnologije postala je poznata široj javnosti 60-tih godina prošloga stoljeća zahvaljujući svemirskim programima gdje su sateliti i svemirske kapsule bile opremljene solarnim ćelijama za napajanje električnih sustava. Od tada fotonaponska se tehnologija nastavila proučavati, napredovati i integrirati u komercijalnu i industrijsku upotrebu.

Fotonaponske elektrane zbog pozitivnih utjecaja na okoliš, ekonomske isplativosti i jednostavnosti izvedbe sve se češće integriraju u kućanstva i industrijske pogone te se njihovim korištenjem smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima i uvozu energije što posljedično omogućuje zemljama i pojedincima proizvodnju vlastite električne energije iz solarnih izvora i time povećanje svoje energetske sigurnosti.

Brojne subvencije i poticaji za instaliranje i korištenje energije iz obnovljivih izvora, čine fotonaponske elektrane privlačnijim i ekonomski isplativijim. Te subvencije uključuju porezne olakšice, subvencije za kupnju opreme i druge oblike financijske podrške.

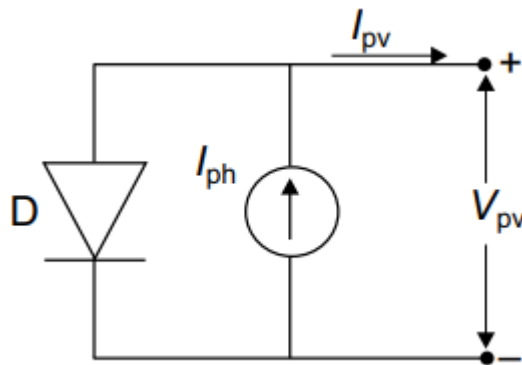
S napretkom tehnologije, javljaju se novi materijali i sustavi (sustavi za praćenje sunca) koji dodatno smanjuju troškove održavanja i dodatno povećavaju učinkovitost sustava. Sve ove prednosti čine fotonaponske elektrane privlačnom investicijom. S druge pak strane, integracija velikih FN sustava u javnu mrežu postavlja brojne izazove u pogledu održavanja kvalitete električne energije koje će biti detaljnije opisane u ovome radu. Tema ovog diplomskog rada je Utjecaj fotonaponskih elektrana na kvalitetu električne energije te će ista biti detaljnije opisana kroz naredna poglavlja.

Rad će kroz svoja poglavlja obuhvatiti tehnologiju fotonaponskih elektrana, njene komponente i parametre koje je potrebno poznavati pri njenom projektiranju. U drugom će poglavlju obuhvatiti i opisati sve vanjske utjecaje koje mogu doprinijeti promjeni proizvodnje FN elektrane i s time potencijalno narušiti kvalitetu električne energije. Treće poglavlje će obuhvatiti kvalitetu električne energije opisane normom EN50160. U četvrtom će se poglavlju opisati utjecaj fotonaponske elektrane na kvalitetu električne energije koje će se i praktično opisati u petom poglavlju koje se odnosi na analizu mjerenja kvalitete električne energije jedne veće FN elektrane.

## 2. FOTONAPONSKE ELEKTRANE

### 2.1. Najmanji gradijent FN elektrane

Najmanji element fotonaponske elektrane je FN ćelija koje proizvodi električnu struju kada je izložena suncu (fotonaponski efekt). Pojednostavljeni ekvivalentni krug na slici 2.1. prikazuje PV ćeliju, gdje dioda "D" sa svojim p-n spojem (tj. njenim poluvodičkim materijalom) blizu površine proizvodi električnu struju  $I_{ph}$  kao rezultat svjetlosti koja pada na nju. Izlazna struja ćelije  $I_{pv}$  je tada istosmjerna struja s konstantnom vrijednošću pri različitim izlaznim naponima niza.



Slika 2.1. Nadomjesna shema FN ćelije [1]

Veća količina zračenja rezultira većim strujama, a radni napon  $U_{pv}$  se prilagođava kako bi se pomaknula radna točka na točku maksimalne snage. Algoritmi za praćenje točke maksimalne snage (MPPT) ugrađeni su unutar tehnologije za međusobno povezivanje PV jedinice kako bi se prilagodio radni napon  $U_{pv}$  tako da se izvuče maksimalna snaga.

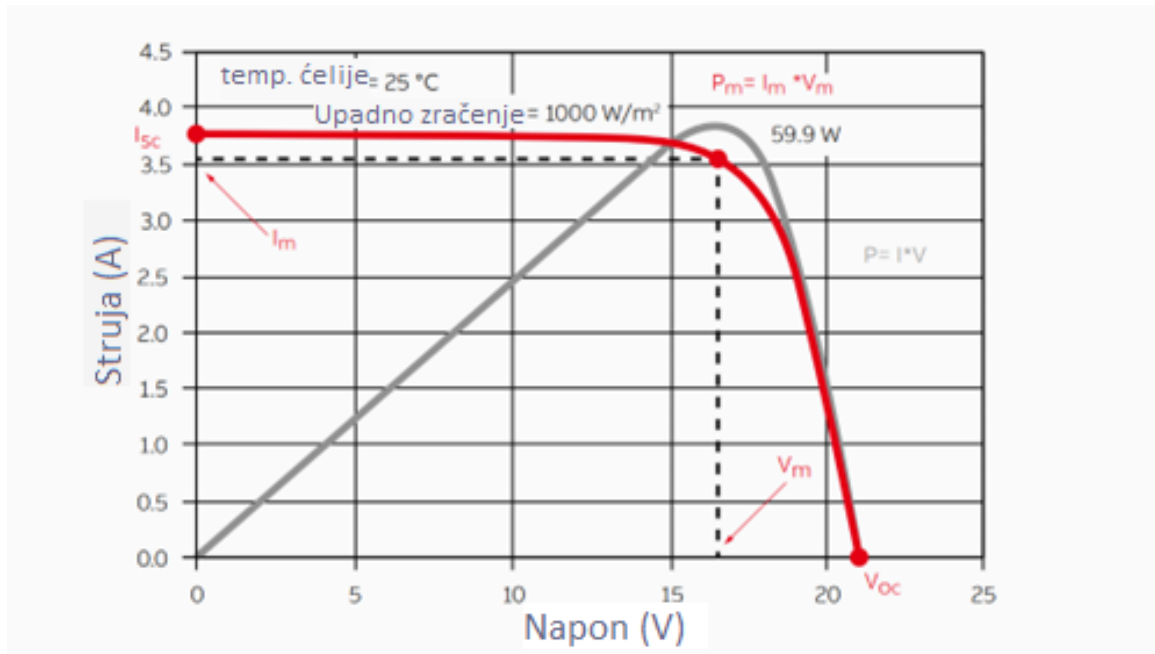
Strujno naponska karakteristika FN modula prikazana je na slici 2.2. te prikazuje tendenciju povećanja/ smanjenja snage u ovisnosti o povećanju ili smanjenju struje/ napona. U uvjetima kratkog spoja generirana struja ima maksimalnu vrijednost ( $I_{sc}$ ), dok je u uvjetima praznog hoda ( $V_{oc}$ ) napon maksimalan. U oba krajnja slučaja, električna snaga proizvedena u ćeliji je nula, dok u svim ostalim uvjetima, kada se napon povećava, proizvedena snaga raste sve do točke maksimalne snage (MPP, eng. *Maximum power point*), nakon koje snaga naglo opada do vrijednosti napona praznog hoda [1].

Karakteristični podaci strujno naponske karakteristike FN modula označavaju:

- $I_{sc}$  – struja kratkog spoja
- $V_{oc}$  – napon praznog hoda



- $P_m$  ili  $P_{MPP}$  – maksimalna proizvedena snaga pri standardnim testnim uvjetima STC
- $I_m$  ili  $I_{MPP}$  – struja proizvedena u maksimalnoj točki snage
- $V_m$  ili  $V_{MPP}$  – napon u točki maksimalne snage



Slika 2.2. Strujno naponska karakteristika FN modula [2]

## 2.2. Vanjski utjecaji na proizvodnju

Količina energije koju 1 m<sup>2</sup> Zemljine površine prima od sunca značajno varira o lokaciji. Bez obzira na oblake, najveća je blizu ekvatora, a najmanja blizu polova. Uključujući utjecaj oblaka, količina energije je najveća u pustinjama. Međutim, solarni panel se može nagnuti prema suncu kako bi se kompenzirala zakrivljenost Zemlje. Na optimalnom kutu, količina energije koja dolazi do solarnog panela kreće se između 1000 i 2000 kWh/m<sup>2</sup> godišnje za većinu lokacija. U Europi, najbolja područja su na jugu Španjolske s insolacijom iznad 1900 kWh/m<sup>2</sup>, dok su najlošija područja na sjeveru Skandinavije s vrijednostima nešto ispod 1000 kWh/m<sup>2</sup>.

Fotonaponske elektrane koliko god bile praktične za ugradnju, ekonomski isplative, pozitivne za okoliš, uvijek je važno imati na umu da su podložne vanjskim uvjetima i promjenama te da pri tome, zbog svojih čestih promjena u proizvodnji i prisutnosti energetske elektronike, uvelike mogu utjecati i mijenjati sliku strujne i naponske prilike distributivne mreže na koju su priključene.

Vanjski utjecaji okoline uvelike utječu na procjenu proizvodnje same FN elektrane, na način da i najmanjom promjenom, primjerice sunčeve ozračenosti, zasjenjenja ili temperature, FN elektrana proizvodit će manje ili više električne energije [1].

Procjena proizvodnje električne energije FN elektrana računa se prema specifičnim performansama modela koristeći povijesne vremenske podatke koji se smatraju relevantnima za određenu lokaciju.

Procjena proizvodnje FN elektrane može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$E_p = GHI \times \eta_{modul} \times A_{modul} \times PR \text{ [kWh]} \quad (2 - 1)$$

Gdje su:

$E_p$  – Procijenjena proizvodnja fotonaponske elektrane u ovisnosti o sunčevoj ozračenosti, učinkovitosti modula, površini modula te koeficijentu za gubitke u sustavu. Izražena je u kilovat satu [kWh].

GHI – Godišnja sunčeva ozračenost. Izražena u kilovat satu po metru kvadratnom [kWh/m<sup>2</sup>].

$\eta_{modul}$  – Učinkovitost pretvorbe FN modula prema standardnim testnim uvjetima (STC uvjeti: temperatura okoline iznosi  $t = 25^\circ\text{C}$ ; sunčeva ozračenost iznosi  $G = 1000\text{W/m}^2$ ; masa zraka iznosi  $AM = 1,5$

$A_{modul}$  – Površina FN modula u fotonaponskom sustavu izražena u metrima kvadratnim [m<sup>2</sup>]

PR – Omjer performansi (*eng. performance ratio*), koeficijent kojim se iskazuju gubici (omjer između 0,7 do 0,9)

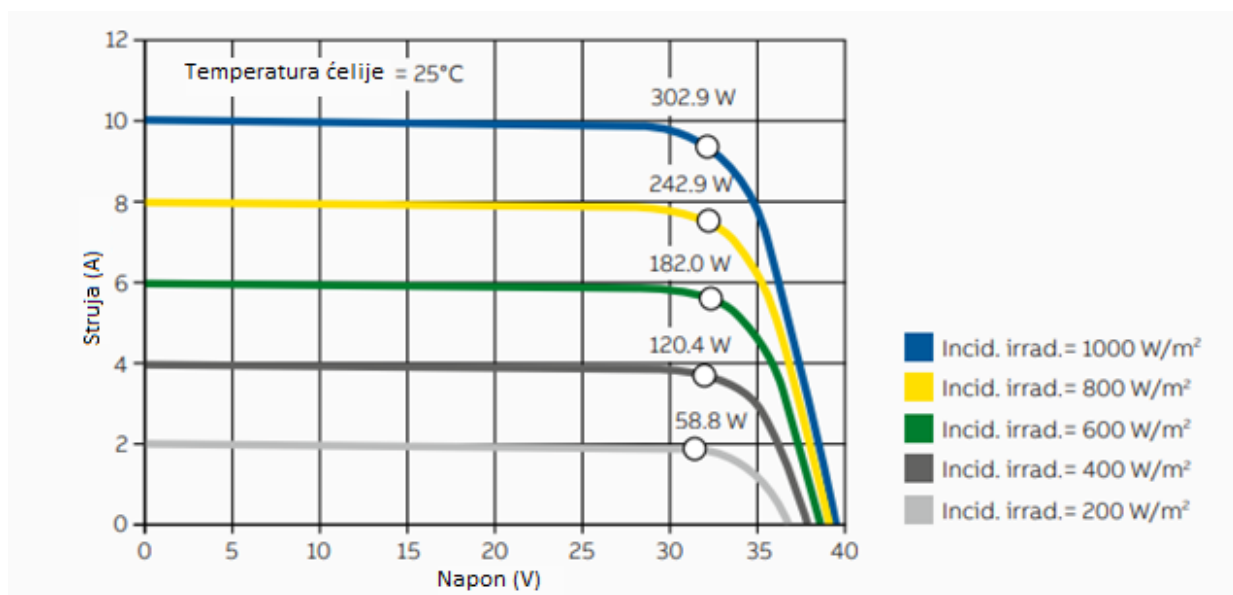
### 2.2.1. Sunčevo zračenje

Količina električne energije koju proizvodi fotonaponska instalacija (solarni panel) proporcionalna je količini zračenja koje doseže panel. Ova količina zračenja naziva se "insolacija" ili "iradijacija". Proizvedena snaga FN elektrane u ovisnosti o iradijaciji grafički je prikazana na slici 2.3.

Sunčevo se zračenje može podijeliti na sljedeći način:

- Direktna iradijacija je zračenje koje direktno dolazi do panela sa sunca. Ova količina ovisi o kutu između panela i njegovog usmjerenja prema suncu. Na vedar dan, kada je panel usmjeren prema suncu, direktna iradijacija iznosi oko 1000 W/m<sup>2</sup>. Čak i na vedar dan, direktna iradijacija se smanjuje kada je sunce niže na nebu.

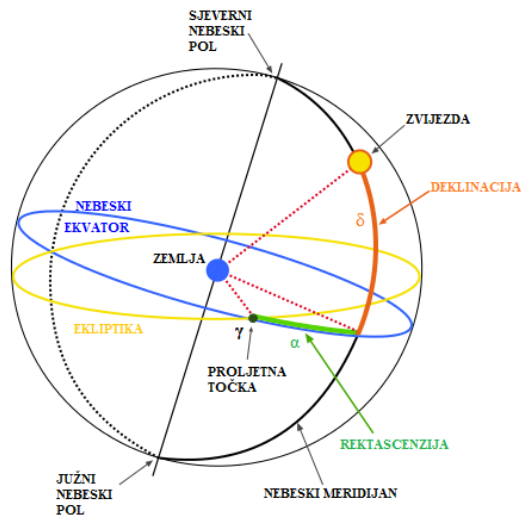
- Indirektna iradijacija, poznata i kao "raspršena iradijacija" ili "difuzna iradijacija". Indirektna iradijacija koja dolazi sa neba varira samo polako tokom vremena, dok se frakcija neba prekrivena oblacima mijenja. Ovdje govorimo o vremenskim skalama ili satima. Indirektna iradijacija koja dolazi sa neba nešto se povećava s povećanjem oblačnosti, jer je oblak svjetliji od vedrog plavog neba. Količina indirektna iradijacije sa neba opada kada je panel nagnut jer je panel izložen manjem dijelu neba.
- Indirektna iradijacija koja dolazi sa zemlje ovisi o količini direktne iradijacije na obližnjim lokacijama. Stoga, ova komponenta iradijacije opada s povećanjem oblačnosti. Također će pokazivati brze fluktuacije zbog prolaska oblaka preko sunca i promjene refleksija u okolini.



Slika 2.3. Proizvedena snaga u ovisnosti o sunčevoj ozračenosti [2]

### 2.2.2. Položaj sunca

Položaj sunca u odnosu na zvijezde prikazuje se u pojmovima „deklinacija“ i „rektascenzija“. Deklinacija predstavlja, kao što se može vidjeti iz slike 2.3., kut između sunca i nebeskog ekvatora (proljetni ekvinocij ima kut  $0^\circ$ ). Kako se zemljopisna dužina i širina koriste kao određivanje pozicije na zemlji, tako se deklinacija i rektascenzija koriste za određivanje položaja sunca na nebeskoj sferi, čiji se prikaz može vidjeti na slici 2.4 [1].



Slika 2.4. Prikaz položaja Sunca u odnosu na Zemlju [3]

Najpraktičniji način je prevesti nebeske koordinate u „zemaljske“ te ih iskazati kao „elevaciju“ (kut iznad horizonta) i azimut koji označava kut u odnosu na jug (za sjevernu hemisferu; za južnu hemisferu azimut označava kut u odnosu na sjever) [1].

Grafički prikaz ovisnosti azimuta i elevacije o vremenu za lokaciju 57°N (najudaljenije od ekvatora), u razdoblju 21. lipnja i 21. prosinca nalazi se na slici 2.5. Grafički prikaz ovisnosti azimuta i elevacije o vremenu za lokaciju 30°N, u razdoblju 21. lipnja i 21. prosinca nalazi se na slici 2.6., dok se grafički prikaz ovisnosti azimuta i elevacije o vremenu za lokaciju 17°N (najbliže ekvatoru), u razdoblju 21. lipnja i 21. prosinca nalazi se na slici 2.7.

Satni kut je pojam koji se uvodi pri prelasku na „zemaljske“ koordinate i označava razliku između rektascenzije i lokalnog vremena.

Izrazi za deklinaciju i satni kut koji se uglavnom koriste za studije solarne energije dane su u sljedećim izrazima:

$$\delta = 0,4093 \cos\left(\frac{2\pi(d - 173)}{365}\right) \quad (2 - 2)$$

$$\omega = \frac{2\pi TUC}{24} - \lambda_e \quad (2 - 3)$$

Gdje su:

$\delta$  – deklinacija

$\omega$  – satni kut

d – dan u godini

TUC – koordinatno univerzalno vrijeme (TUC – „Temps Universel Coordonné“, što je francuski naziv za „Coordinated Universal Time“ UTC)

$\lambda_e$  – geografska dužina zadane lokacije

Svi su kutovi iskazani u radijanima [rad].

Poznajući satni kut i deklinaciju, položaj sunca u odnosu na horizont može se izračunati iz sljedećih izraza:

$$\sin \psi = \sin \phi \sin \delta - \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2 - 3)$$

$$\cos A = \frac{\cos \phi \sin \delta + \sin \phi \cos \delta \cos \omega}{\cos \psi} \quad (2 - 4)$$

Gdje su:

$\Psi$ - elevacija

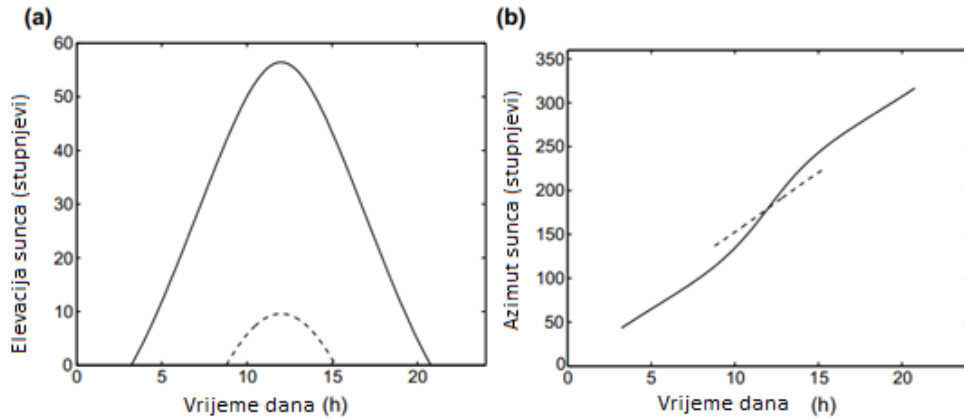
A- azimut

$\Phi$ - zemljopisna širina lokacije

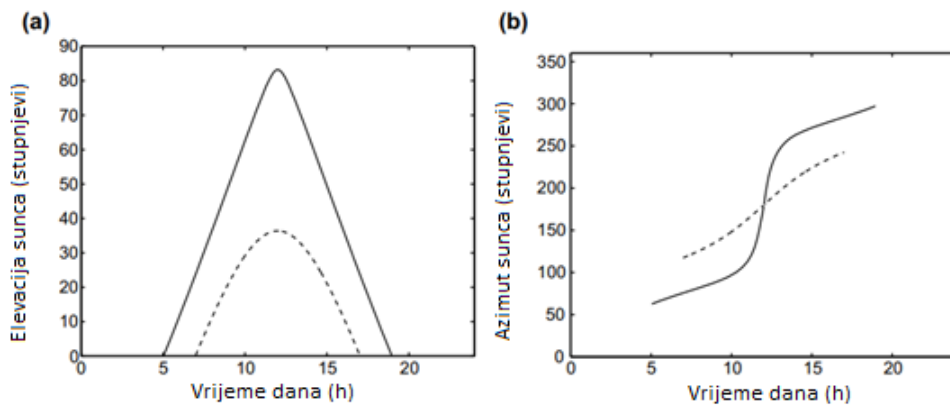
S obzirom da je položaj sunca iz prethodnih primjera poznat, iz sljedećeg izraza može se izračunati kut incidencije na panel (kut između smjera sunčevog zračenja i okomice na površinu).

Neka su  $\psi_s$  i  $A_s$  pozicije sunca, a  $\psi_p$  i  $A_p$  smjer okomice na FN modul

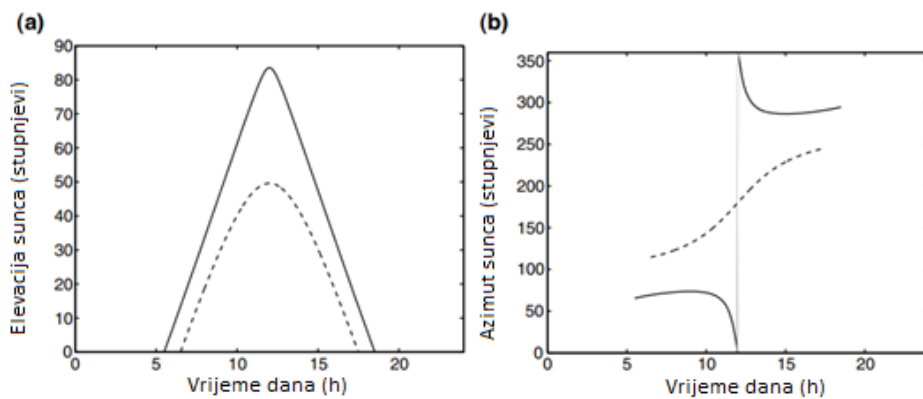
$$\cos \alpha = \sin \psi_p \sin \psi_s + \cos \psi_p \cos \psi_s \cos(A_s - A_p) \quad (2 - 5)$$



Slika 2.5. Elevacija (a) i azimut (b) sunca za lokaciju na 57°N 21. lipnja (puna linija) i 21. prosinca (isprekidana linija) [1].



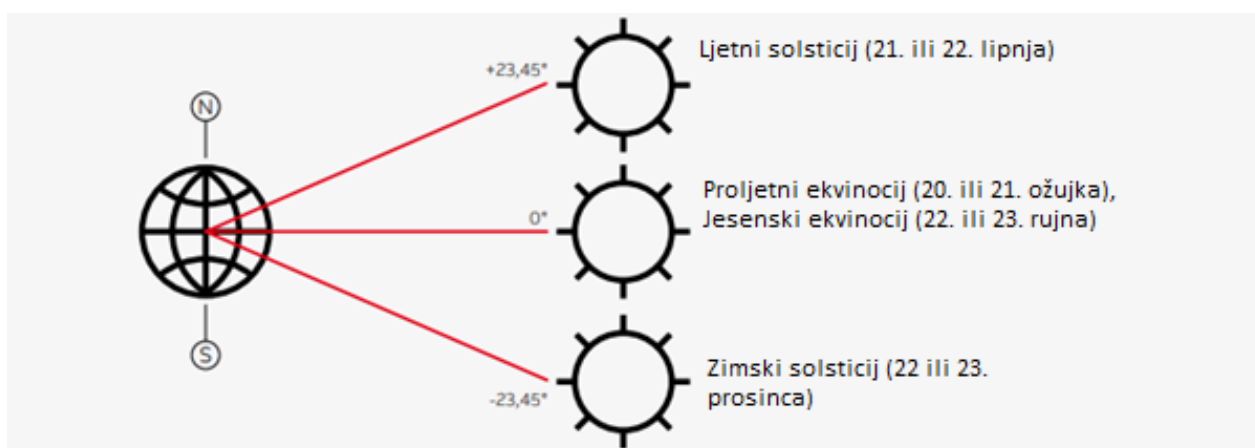
Slika 2.6. Elevacija (a) i azimut (b) sunca za lokaciju na 30°N 21. lipnja (puna linija) i 21. prosinca (isprekidana linija) [1].



Slika 2.7. Elevacija (a) i azimut (b) sunca za lokaciju na 17°N 21. lipnja (puna linija) i 21. prosinca (isprekidana linija) [1].

### 2.2.2.1. Utjecaj sunčeve ozračenosti na proizvodnju FN elektrane

Maksimalna učinkovitost solarnog panela bila bi kada bi kut incidencije sunčevih zraka uvijek bio  $90^\circ$ . U stvarnosti, incidencija sunčevih zraka varira i prema geografskoj širini i prema solarnoj deklinaciji tijekom godine. Budući da je Zemljina os nagnuta za  $23,45^\circ$  u odnosu na ravninu zemljine orbite oko Sunca (prema slici 2.8.), na određenoj geografskoj širini, visina sunca iznad horizonta mijenja se ovisno o godišnjem dobu time za posljedicu, varira i proizvodnja električne energije [2].



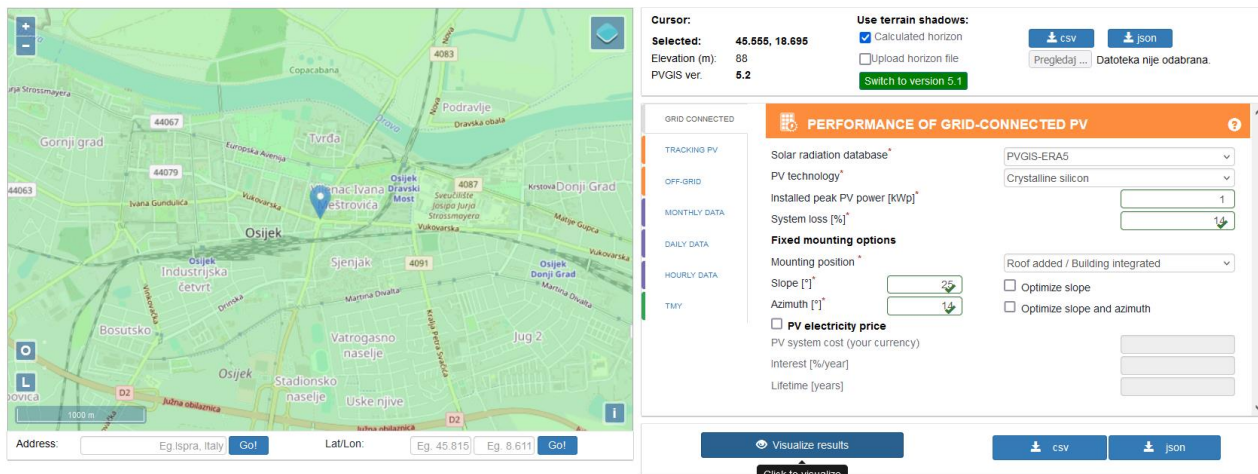
Slika 2.8. Položaj sunca za različito doba godine [2]

Fotonaponski moduli trebali bi biti orijentirani maksimalno izvedivo prema jugu na sjevernoj hemisferi kako bi se omogućila bolja insolacija površine panela u podne po lokalnom vremenu i bolja ukupna dnevna insolacija modula te u konačnici bolja proizvodnja električne energije [2].

### 2.2.2.2. Procjena proizvodnje u ovisnosti o sunčevom zračenju

Ključan element pri projektiranju i modeliranju fotonaponske elektrane jest procjena proizvodnje električne energije iz FNE. PVGIS je web aplikacija koja omogućava izračunavanje procijenjene proizvodnje fotonaponske elektrane u ovisnosti o sunčevoj ozračenosti za određenu lokaciju, čije je web sučelje prikazano na slici 2.9. Ona u svojoj bazi sadrži podatke o sunčevoj ozračenosti za bilo koju koordinatu na Zemljinoj površini, čije su vrijednosti dane na slici 2.12.

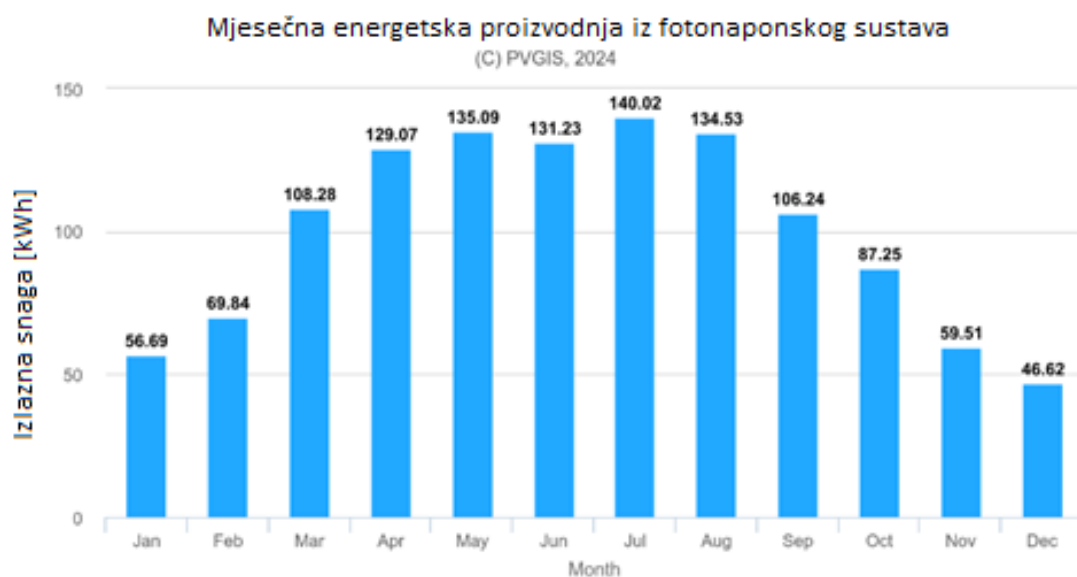
Prilikom izračunavanja procjene proizvodnje i sunčeve ozračenosti na površinu fotonaponske elektrane, potrebno je unijeti lokaciju na kojoj se nalazi promatrana elektrana, odgovarajuću bazu iz koje aplikacija izvlači podatke (PVGIS-ERA5), tehnologiju izrade fotonaponskih modula, instaliranu vršnu snagu FN elektrane [kWp], gubitak sustava, potrebno je definirati je li elektrana postavljena na zgradu ili je slobodno stojeća te u konačnici definirati nagib modula i azimut.



Slika 2.9. Prikaz sučelja web aplikacije PVGIS [4]

Prilikom određivanja azimuta važno je znati da kut od  $0^\circ$  predstavlja okrenutost modula direktno prema jugu. Prilikom otklona u smjeru zapada, kut ima pozitivan predznak na način ako je modul orijentiran direktno prema zapadu, njegov će azimut iznositi  $90^\circ$ . Ako je FN modul orijentiran direktno prema istoku, njegov će azimut iznositi  $-90^\circ$ .

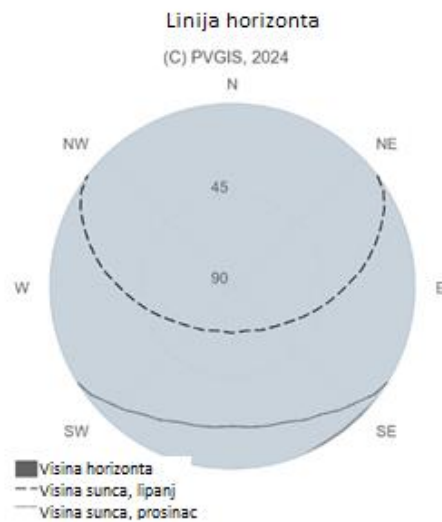
Praksa prilikom unošenja instalirane vršne snage elektrane je da se unese 1 kWp kako bi se dobila specifična procijenjena proizvodnja elektrane, koja je grafički prikazana po mjesecima na slici 2.10. Dobivena se vrijednost može pomnožiti s vršnom snagom elektrane kako bi se dobila stvarna vrijednost procjene proizvodnje.



Slika 2.10. Procjena proizvodnje električne energije po mjesecima [4]



Web aplikacija također nudi opciju prikaza visine horizonta za različita razdoblja na zadanoj lokaciji. Na slici 2.11. dan je prikaz visine horizonta za lipanj i prosinac na lokaciji Osijek.



Slika 2.11. Visina horizonta i visina sunca za dva razdoblja (lipanj i prosinac) [4]



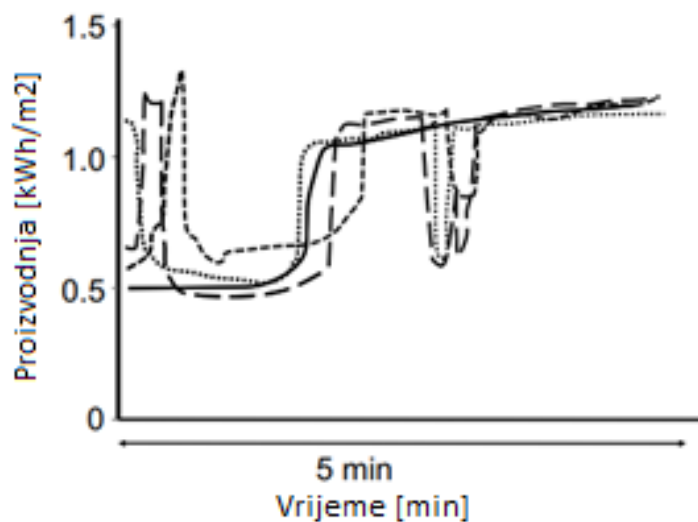
Slika 2.12. Sunčeva ozračenost u [kWh/m<sup>2</sup>] za svaki mjesec za zadani kut i koordinate [4]

### 2.2.3. Zasjenjenje

Veliki izazov postizanju pozitivnog utjecaja glede kvalitete električne energije predstavlja upravo zasjenjenje fotonaponskih modula. Uzrokovano tom pojavom javljaju se brze fluktuacije napona i struje što uvelike utječe na kvalitetu električne energije.

Osim što blokira struju, zasjenjena ćelija je izložena naponu drugih ćelija, što može dovesti do probijanja zbog lokalnog pregrijavanja („hot spot“), te na kraju do oštećenja modula. Ova pojava ne samo što smanjuje učinkovitost modula, već može uzrokovati trajna oštećenja koja zahtijevaju sanacije ili zamjenu modula. Prolaz oblaka ne stvara probleme kada je nebo potpuno oblačno ili potpuno vedro, već kada je nebo djelomično oblačno. Tu se dakle javljaju velike varijacije u zračenju, a samim time u proizvodnji energije [1].

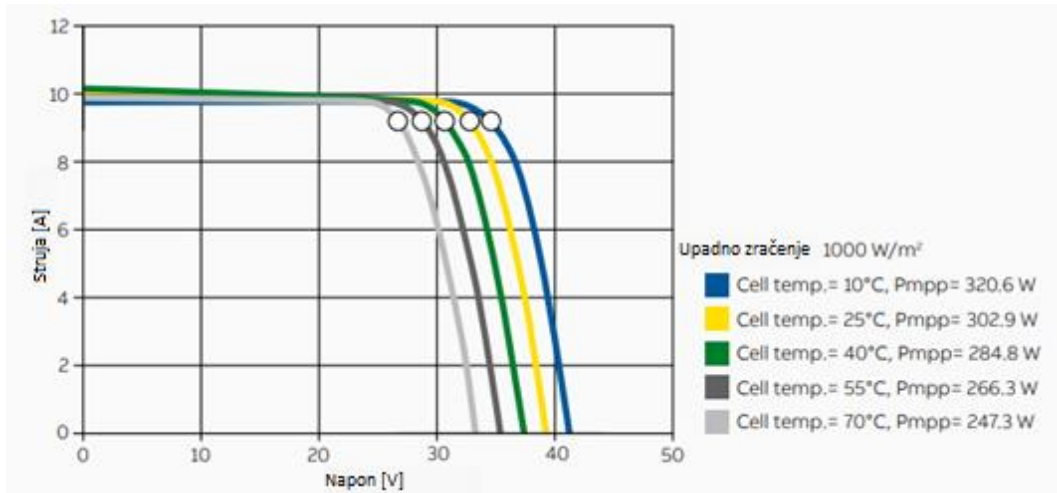
Primjer varijabilne proizvodnje uzrokovano prolaskom oblaka iznad FN modula prikazano je na slici 2.13. u vremenskom periodu od 5 minuta.



Slika 2.13. Prikaz varijabilne proizvodnje zbog utjecaja zasjenjenja i prolaska oblaka preko FN modula [1]

#### 2.2.4. Temperatura

Za razliku od prethodnog slučaja, gdje porastom sunčevog zračenja proporcionalno raste struja, a time i proizvodnja, porastom temperature napon obrnuto proporcionalno opada što dovodi do smanjenja performansi FN modula u smislu proizvedene električne energije, kao što je prikazano na slici 2.14.



Slika 2.14. Prikaz smanjenja napona zbog porasta temperature okoline [2]

Prilikom projektiranja FN elektrane, nužno je u obzir uzeti temperaturne koeficijente glede maksimalnog napona koji se pojavljuje zbog utjecaja vanjske temperature. Kako je već spomenuto, što je niža temperatura, to FN modul proizvodi veći napon te slijedno tome, fotonaponski niz može uzrokovati prenapon na ulazu u FN pretvarač. Kako bi se to spriječilo, bitno je provesti izračun maksimalnog napona FN modula (stringa na ulazu u pretvarač) pri minimalnoj temperaturi za navedenu lokaciju.

Izračun će biti proveden na primjeru FN modula karakteristika:  $U_{oc\_stc} = 38,3 \text{ V}$ ;  $\alpha U_{oc} = -133 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ ;  $T_{min} = -15^\circ\text{C}$ , prema sljedećim formulama:

$$U_{oc\_max} = K_u * U_{oc\_stc} \quad (2 - 5)$$

Gdje je:

$U_{oc\_max}$  - najveći napon u praznom hodu FN modula ili FN niza [V]

$K_u$  - koeficijent koji se uzima u obzir pri minimalnoj temperaturi  $T_{min}$

$U_{oc\_stc}$  - Napon praznog hoda pri standardnim testnim uvjetima (STC) [V]

$$K_u = 1 + \left( \alpha \frac{U_{oc}}{100} \right) (T_{min} - 25) \quad (2 - 6)$$

Gdje je:

$T_{min}$  - Minimalna vanjska temperatura izražena u  $^\circ\text{C}$

$\alpha U_{oc}$  - Temperaturna varijacija koeficijenta  $U_{oc}$  iskazana u  $[\%/\text{}^\circ\text{C}]$

-Negativni faktor koji može biti iskazan i u  $[\text{mV}/\text{}^\circ\text{C}]$

-U tom slučaju pretvoriti u  $[\%/\text{}^\circ\text{C}]$  prema formuli:

$$\alpha U_{oc} \left( \frac{\%}{^{\circ}C} \right) = \frac{0,1 \times U_{oc} (mV/^{\circ}C)}{U_{oc_{stc}(V)}} \quad (2 - 7)$$

Primjer:

$$U_{oc_{stc}} = 38,3V$$

$$\alpha_{U_{oc}} = -133mV/^{\circ}C$$

$$T_{min} = -15^{\circ}C$$

$$\alpha U_{oc} = \frac{0,1 * (-133)}{38,3} = -0,35\%/^{\circ}C$$

$$Ku = 1 + \left( \frac{-0,35}{100} \right) (-15 - 25) = 1,14$$

$$U_{oc_{max}} = 1,14 * 38,3 = 43,662 V$$

Kako bi dobili broj modula koji se mogu povezati u niz, a da pri tome ne prijeđu napon dozvoljen na ulazu u inverter (1000 V), maksimalan dopušteni napon ulaza u inverter se podijeli s maksimalnim naponom praznog hoda  $U_{oc_{max}}$ .

N - maksimalan broj modula u FN nizu

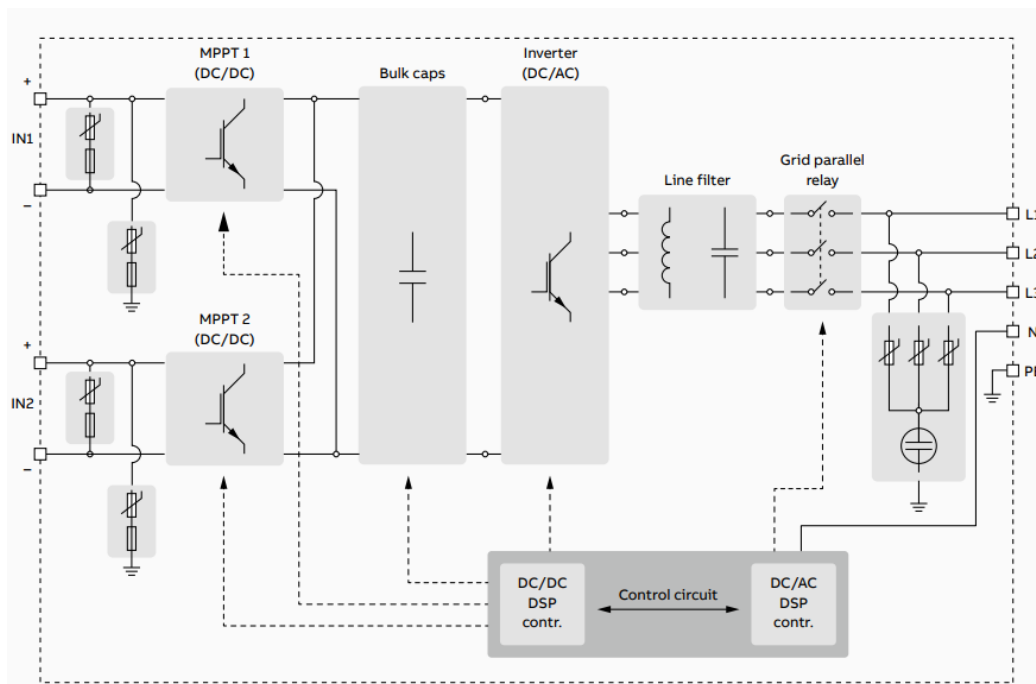
$$N = \frac{1000}{43,662} = 22,9$$

Iz dobivenog rezultata se zaključuje da je maksimalno 22 FN modula dozvoljeno povezati u seriju kako se ne bi dogodio napon veći od dozvoljenog pri vanjskoj temperaturi  $T_{min} = -15^{\circ}C$ .

### 2.3. Odabir izmjenjivača

Fotonaponski izmjenjivači predstavljaju glavnu funkcionalnu cjelinu u fotonaponskim elektranama gdje se istosmjerna DC struja proizvedena iz fotonaponskih modula pretvara u izmjeničnu AC struju. Izmjenjivač igra glavnu ulogu u održavanju i prilagodbi napona, struje i frekvencije uvjetima u mreži [2].

Na slici 2.15. prikazana je shema glavnih funkcionalnih dijelova fotonaponskog pretvarača, čiji su dijelovi opisani u nastavku.



Slika 2.15. Prikaz glavnih komponenti fotonaponskog izmjenjivača [2]

Iz slike se mogu uočiti glavne komponente FN izmjenjivača:

- **MPPT (Maximalno praćenje točke snage):** To je krug (obično DC-DC pretvarač) koji se koristi u fotonaponskim inverterima kako bi se maksimalizirala energija dostupna iz fotonaponskog generatora u bilo kojem trenutku tijekom rada. Snaga koju isporučuje PV generator ovisi o točki u kojoj djeluje. Kontroleri mogu slijediti različite strategije za optimizaciju izlazne snage fotonaponskog generatora. MPPT može implementirati različite algoritme (npr. „*Perturb and observe*“, „*Current sweep*“, „*Incremental conductance*“, „*Constant voltage*“, itd.) i prebacivati se između njih na temelju uvjeta rada fotonaponskog generatora.
- **Veliki kondenzatori:** Veliki kondenzatori koriste se za sprječavanje povratnih struja do DC izvora napajanja i za izravnavanje „peglanje“ varijacija napona na DC sabirnici. Također se koriste za zaštitu IGBT-ova.
- **DC/AC inverter:** Inverter je krug koji pretvara DC napajanje u AC napajanje pri željenom izlaznom naponu i frekvenciji. Ova konverzija se postiže pomoću uređaja s kontroliranim uključivanjem i isključivanjem (npr. IGBT). Valni oblik izlaznog napona idealnog invertera trebao bi biti sinusni. Međutim, naponski valni oblici invertera nisu savršeno sinusoidni i sadrže harmonike. Izlazna frekvencija invertera određuje se brzinom kojom se poluvodički uređaji uključuju i isključuju pomoću upravljačkog kruga invertera. Da bi se dobio valni oblik što je moguće više sinusoidan, koristi se sofisticiranija tehnika – pulsno širinska modulacija (*eng.*

„Pulse width modulation“); PWM tehnika omogućava regulaciju frekvencije kao i efektivne vrijednosti izlaznog valnog oblika.

- Linijski filter: Obično je to LC filter koji se koristi za kontrolu kvalitete izlazne snage koja se isporučuje mreži; upotreba LC filtera omogućava generiranje sinusnih napona s niskim harmonijskim izobličenjem.

U autonomnim sustavima inverteri moraju biti sposobni osigurati što konstantniji napon na AC strani bez obzira na promjene u proizvodnji generatora i potražnji opterećenja. U mrežno povezanim sustavima inverteri moraju što točnije reproducirati mrežni napon i istovremeno nastojati optimizirati i maksimizirati izlaznu snagu FN modula. Inverteri su opremljeni zaštitama koje kontroliraju sinkronizaciju invertera s parametrima mreže [2].

Na tvorničkoj natpisnoj pločici izmjenjivača navedeni su ključni tehnički podaci koji omogućuju pravilnu identifikaciju i siguran rad uređaja, čiji su neki od njih prikazani u tablici 2.1.

1. Ulazna nazivna snaga  $P_{DC}$
2. Područje rada na DC strani
3. Maksimalni napon na DC strani  $U_{DC\_MAX}$
4. Maksimalna ulazna struja na DC strani  $I_{DC\_MAX}$
5. Izlazna nazivna snaga  $P_{AC}$  [W]
6. Izlazni napon na DC strani  $U_{DC\_MAX}$
7. Nazivna frekvencija  $f$  [Hz]
8. Faktor snage  $\cos\varphi$
9. Maksimalna učinkovitost

Pri odabiru izmjenjivača nužno je provjeriti poštuju li se četiri važna uvjeta:

1. „Maksimalni napon praznog hoda FN niza  $U_{PH\_MAX}$  manji je od maksimalnog napona na ulazu DC strane izmjenjivača  $U_{DC\_MAX}$ “

$$U_{PH\_MAX} < U_{DC\_MAX}$$

2. „Minimalni napon vršne snage FN niza veći je od minimalnog napona vršne snage izmjenjivača“

$$U_{MPP\_min} > U_{IZMJ\_min}$$

3. „Maksimalni napon vršne snage FN niza veći je od minimalnog napona vršne snage izmjenjivača“

$$U_{MPP\_max} < U_{IZMJ\_max}$$

4. „Maksimalna struja FN niza manja je od najveće dozvoljene struje na ulazu DC strane izmjenjivača“

$$I_{KS\_max} < I_{DC\_max}$$

Pri odabiru veličine invertera, glavna je polazišna točka upravo nazivna instalirana snaga FN generatora prema kojoj se dimenzionira inverter. Polazeći od nazivne instalirane snage FN generatora, prema raspodjeli godišnje iradijacije na mjestu instalacije i prema uvjetima instalacije, projektant treba odlučiti treba li inverter biti poddimenzioniran ( $P_{DC\_INV} < P_{DC\_GEN}$ ) ili predimenzioniran ( $P_{DC\_INV} > P_{DC\_GEN}$ ). U slučaju poddimenzioniranog invertera, kada generator proizvodi snagu veću od procijenjene, izlazna AC snaga ograničava se na nazivnu snagu invertera.

Predimenzionirani inverter koristan je na mjestima s većom sunčevom iradijacijom gdje osigurava da inverter radi učinkovito i maksimizira energiju tijekom vršnog sunčevog zračenja, dok je poddimenzionirani inverter investicijski isplativiji, pogodan za mjesta s manjom sunčevom iradijacijom ili djelomičnim zasjenjenjem te učinkovit u ograničavanju izlazne AC snage kada generator premaši procijenjenu proizvodnju [2].

U tablici 2.1. navedeni su tehnički podaci za inverter koji se koristi u praktičnom dijelu rada (Sungrow SG110CX).

Tablica 2.1. Tehničke karakteristike izmjenjivača [2]

Parametri	Vrijednost
Maksimalni ulazni napon	1100 V
Minimalni ulazni napon PV sustava / Početni ulazni napon	200 V / 250 V
Nazivni ulazni napon PV sustava	585 V
Raspon MPP napona	200 – 1000 V
Broj neovisnih MPPT ulaza	9
Broj stringova po MPPT-u	2
Maksimalna ulazna struja	26 A × 9
Maksimalna DC struja kratkog spoja	40 A × 9
AC izlazna snaga	110 kVA @ 45 °C / 100 kVA @ 50 °C
Maksimalna izlazna AC struja	158.8 A
Nazivni AC napon	3 / N / PE, 400 V

AC naponski raspon	320 – 460 V
Nazivna frekv. Mreže / Raspon frekvencije mreže	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz
Harmonici (THD)	< 3% (pri nazivnom naponu)
Faktor snage pri nazivnoj snazi / podesivi faktor snage	>0.99 / 0.8 (kapacitivno) – 0.8 (induktivno)
Faze za priključak / AC priključak	3 / 3-PE

## 2.4. Odabir FN modula

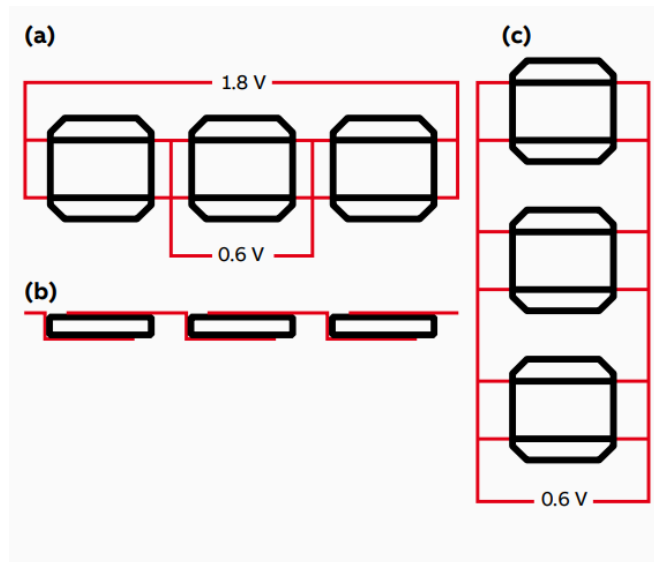
Kako je već spomenuto u prijašnjim poglavljima FN modul fotonaponskim efektom proizvodi DC struju. Posredstvom izmjenjivača, dobije se izmjenični napon i struja koja se u ovisnosti o modelu (kupac s vlastitom proizvodnjom / proizvođač) distribuira dalje u mrežu ili koristi za potrebe kućanstva.

Pri projektiranju FN elektrane važno je odabrati optimalan FN modul, koji će u ovisnosti o lokaciji instalacije, njezinoj klimi, osvjetljenosti i ostalim vanjskim parametrima, ali i parametrima koje je nužno održavati u granicama prilikom povezivanja na inverter, biti najefikasniji i dati najveću izlaznu snagu.

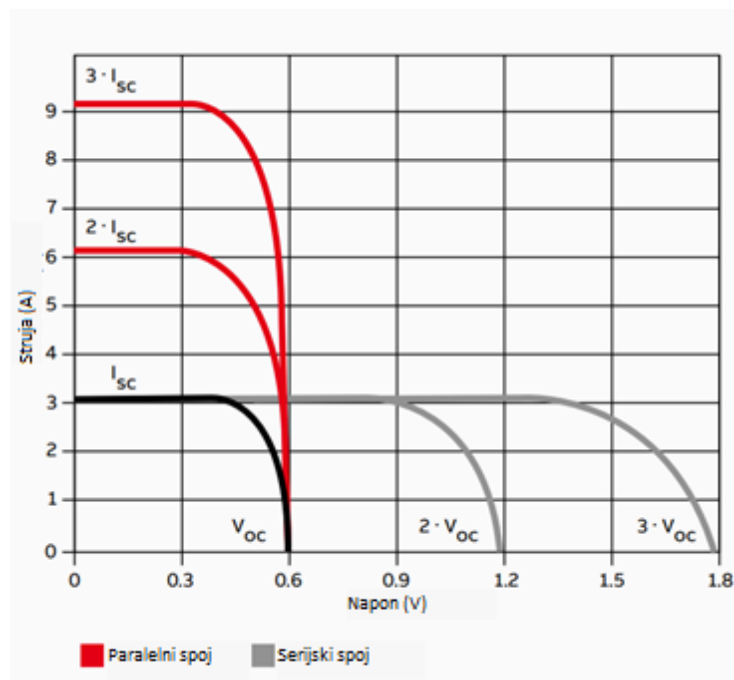
Prilikom povezivanja fotonaponskih modula u niz (*eng. string*), potrebno je obratiti pažnju na održavanje bitnih parametara unutar zadanih granica. Naime, parametri koji se posebno razmatraju prilikom povezivanja FN modula u nizove jesu maksimalni napon, minimalna struja, snaga i područje rada. Granice navedenih parametara određuje inverter na svojoj DC strani kako bi se omogućio nesmetan i pouzdan rad elektrane. Ako je fotonaponski niz koji se povezuje na inverter spojen serijski, struja ostaje jednaka, a napon se povećava, dok u suprotnom slučaju, ako je niz spojen paralelno, struja se povećava dok napon ostaje nepromijenjen [2].

Na sljedećim slikama prikazan je način povezivanje FN modula (slika 2.16.) i karakteristike (strujno - naponske) prilikom njihovog povezivanja (slike 2.17.), iz kojih je vidljivo kako pri paralelnom spoju modula struja raste dok napon ostaje isti, a pri serijskom spoju napon raste dok struja ostaje ista.





Slika 2.16. Prikaz serijski a) i paralelno c) spojenih FN modula [2]



Slika 2.17. U-I karakteristika pri paralelnom (crvena linija) i serijskom (siva linija) spoju modula u niz.[2]

## 2.5. Odabir kabela

Za povezivanje fotonaponskih modula koriste se kabeli specifično dizajnirani za istosmjerni napon serijski spojenih nizova do 1500 V s radnim vijekom do 25 godina te su izloženi direktnim atmosferskim utjecajima. Zbog svoje izloženosti svim atmosferskim prilikama, kabeli ne smiju biti dizajnirani na radnu temperaturu nižu od 90 °C te ukoliko nisu zaštićeni od direktnog UV zračenja (npr. cijevima, kanalima) oni moraju biti UV stabilni. Presjeci kabela koji se koriste za

povezivanje fotonaponskih izmjenjivača na DC stranu invertera iznose najčešće 4 ili 6 mm<sup>2</sup> te ih definira dozvoljeno strujno opterećenje koje ne smije biti veće od 2% [5].

Očekivana najveća struja kroz kabel modula može se izračunati prema jednadžbi:

$$I_b = 1,25 * I_{SC} \quad (2 - 8)$$

Pri čemu je:

$I_b$  – najveća struja u kabelu

$I_{SC}$  - struja kratko spojenih stezaljki modula pri STC uvjetima sunčeve ozračenosti

1,25 – Koeficijent koji omogućuje korekciju proračuna za slučajeve kada intenzitet sunčevog zračenja prelazi standardnih 1 kW.



Slika 2.18. Prikaz presjeka DC kabela [5]

### 3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

#### 3.1. Definicija kvalitete električne energije

Električna se energija može smatrati kao proizvod te kao i svaki drugi proizvod treba zadovoljavati odgovarajuće zahtjeve kvalitete. Da bi električna oprema ispravno radila, potrebno je da električna energija bude isporučena pri naponu unutar specificiranog raspona oko nazivne vrijednosti. Velik dio današnje opreme, posebno elektronički i računalni uređaji, zahtijeva visoku kvalitetu električne energije. Međutim, ista ta oprema često uzrokuje izobličenja napona u instalaciji zbog svojih nelinearnih karakteristika, odnosno, povlači ne sinusoidnu struju iz sinusoidnog napona. Dakle, održavanje zadovoljavajuće kvalitete električne energije zajednička je odgovornost dobavljača i korisnika električne energije.

Korisnici doživljavaju elektrodistribuciju kao glavni izvor poremećaja kvalitete električne energije zbog događaja u mreži kao što su udari munje ili djelovanje prekidača. Međutim, događaji u mreži predstavljaju mali postotak ukupnih događaja te u stvarnosti najveći broj problema glede kvalitete električne energije generiran upravo unutar objekta krajnjeg korisnika.

Najveći uzrok tomu jest povećana uporaba nelinearnih trošila kao što su uređaji informacijske tehnologije i automatizacije koji poboljšavaju razinu performansi objekta kroz učinkovito upravljanje podacima, ali zbog svoje nelinearne karakteristike imaju negativni utjecaj na kvalitetu električne energije.

Komponente ključne za opisivanje kvalitete napajanja su stalna dostupnost električne energije korisnicima (neprekinutost) i pouzdanost, što opisuje sposobnost sustav da radi bez kvarova. Kvaliteta električne energije se može definirati kao stupanj odstupanja od parametara jednofaznih i trofaznih sustava, a to su amplituda, frekvencija, valni oblik i simetrija napona. Kvaliteta električne energije može se također opisati kao mjera u kojoj uporaba i distribucija električne energije utječu na učinkovitost i rad električnih uređaja [1][6].

Analiza kvalitete električne energije obično uključuje pregled sljedećih karakteristika napona:

- Naponski propadi i prekidi,
- Kolebanja napona,
- Harmonički i međuharmonički sadržaj,
- Prijelazni prenaponi,
- Valovitost,

- Tranzijentni prenaponi,
- Naponska nesimetrija,
- Promjene osnovne frekvencije mreže,
- Prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom sustavu,
- Prisutnost signalnih napona.

### 3.2. Norma EN 50 160

Standardi i norme kvalitete električne energije postaju nužni zbog rastuće uporabe osjetljive elektroničke opreme, sve veće primjene nelinearnih uređaja za bolju energetske učinkovitost te povećane složenosti elektroenergetskog sustava. Norma EN 50160 određuje i opisuje osnovna svojstva opskrbnog napona na mjestu isporuke potrošačima u javnim mrežama niskog, srednjeg i visokog napona pod normalnim radnim uvjetima.

Svrha ove norme je definirati i opisati karakteristike opskrbnog napona u odnosu na:

- frekvenciju,
- amplitudu,
- oblik vala,
- simetriju tri fazna napona.

EN 50160 pruža samo opće granice koje su tehnički i ekonomski izvedive za održavanje parametara unutar zadanog opsega od strane dobavljača u javnim distribucijskim sustavima. EN 50160 ima dodatna ograničenja koja se manifestiraju u abnormalnim radnim uvjetima kao što su, npr, uvjeti nastali kao rezultat kvara ili privremenog stanja napajanja, uvjeti u kojima instalacija ili oprema potrošača ne zadovoljava relevantne standarde ili tehničke zahtjeve za povezivanje s distribucijskim sustavom ili u izvanrednim situacijama koji su izvan kontrole dobavljača električne energije, kao što su izuzetni vremenski uvjeti ili druge prirodne katastrofe, uplitanje treće strane, djelovanje javnih vlasti ili poremećaj energije uzrokovan vanjskim događajima [7].

U normi EN 50160 definirani su parametri napona (pokazatelji kvalitete električne energije), od kojih su najvažniji prikazani u tablici 3.1. sa svojim obilježjima i ograničenjima.

Tablica 3.1. Parametri norme EN 50160 i njihove granične vrijednosti [7]

EN 50160			
POKAZATELJ	MJERNA JEDINICA	Obilježja niskog napona	Obilježja srednjeg napona
Promjene napona	V	±10 % U <sub>n</sub> za 95 % tjedna	± 10 % U <sub>n</sub> za 95 % tjedna
		+10/-15 % U <sub>n</sub> za 5 % tjedna	
Kratki prekidi	Broj	< 3 min. – nekoliko desetaka do stotina godišnje	
Dugi prekidi	Broj	≥ 3 min. – < 10 – 50 godišnje	
Propadi	Broj	nekoliko desetaka do tisuću godišnje	
THD napona	% U <sub>n</sub>	< 8 % U <sub>n</sub>	
Treperenje	P <sub>It</sub>	P <sub>It</sub> ≤ 1, za 95 % tjedna	
Nesimetrija	% U <sub>n</sub>	< 2 % U <sub>n</sub>	
Frekvencija	Hz	± 1 % U <sub>n</sub> za 99,5 % godine	
		+ 4/-6 % U <sub>n</sub> za 100 % vremena	

Omjer lokacija za preuzimanje i/ili isporuku električne energije, gdje su izmjerene karakteristike napona zadovoljavale normu HRN EN 50160, naziva se općim pokazateljem kvalitete električne energije.

Računa se prema formuli:

$$p_v = \frac{N_{VOK}}{N_V} * 100\% \quad (3 - 1)$$

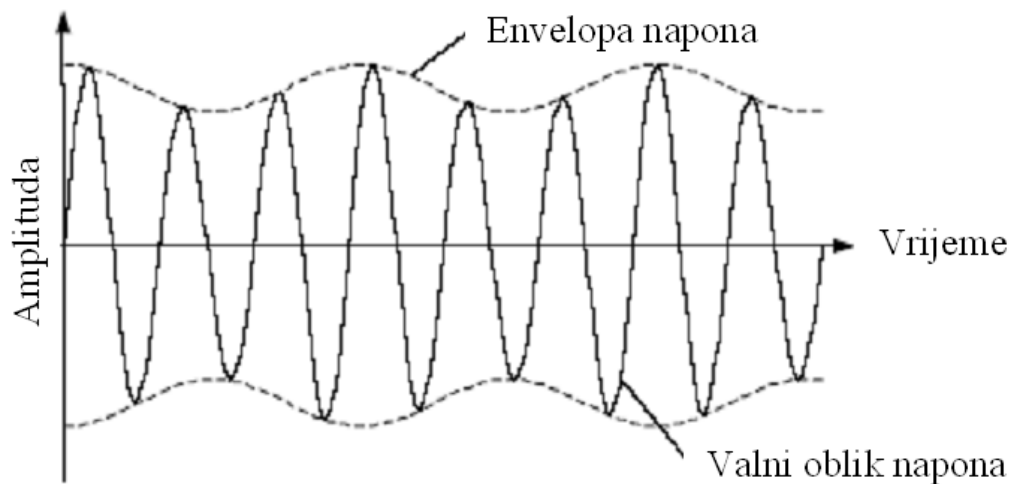
N<sub>VOK</sub> – „Broj mjesta preuzimanja i/ili predaje električne energije na kojima su izmjerene karakteristike napona bile usklađene s normom HRN EN 50160:2012/A1 tijekom promatrane godine.“

N<sub>V</sub> – „Ukupan broj mjesta preuzimanja i/ili predaje električne energije na kojima je kvaliteta napona mjerena tijekom promatrane godine.“

### 3.3. Pokazatelji kvalitete električne energije

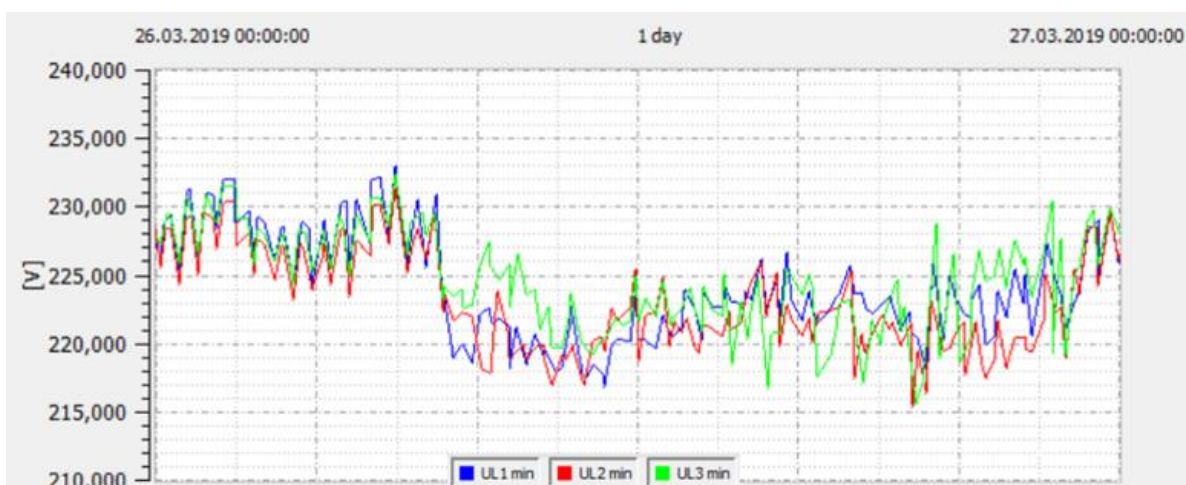
#### 3.3.1. Kolebanje napona

Kolebanje napona ili drugim riječima fluktuacije napona, promjene su u veličini napona u električnim mrežama zbog mnogobrojnih uklapanja i isklapanja električne opreme spojene na opskrbnu mrežu, čiji je valni oblik pri varijabilnom opterećenju dan na slici 3.1. Promjene u veličini napona mogu biti spore (kolebanje) i brze (treperenje), na način da spore promjene označavaju rastuće promjene opterećenja mreže, a brze promjene označavaju isprekidane promjene jednog trošila. Amplituda naponskih promjena u većini slučajeva ne prelazi 6-8% nazivnog napona [1].



Slika 3.1. Valni oblik napona pri varijabilnom opterećenju [1]

Na slici 3.2. prikazan je primjer spore promjene napona (kolebanja napona) unutar jednoga dana, gdje se vrijednost napona mijenja tijekom vremena od +10% do -10% nazivnog napona.



Slika 3.2. Spore promjene napona – mjerenje unutar jednoga dana[8]

Glavni uzorci kolebanja napona su sklapanja industrijskih postrojenja koji uzrokuju povećanje/pad opterećenja u elektroenergetskoj mreži i u konačnici fluktuacije napona. Naponske fluktuacije (kolebanja) koje su uzrokovane sklapanjem velikih industrijskih trošila utječu na druge korisnike priključene na istu mrežu. Kolebanje napona kroz duži period može uzrokovati oštećenje opreme, smanjene efikasnosti električnih uređaja i samim time veće potrošnje električne energije.

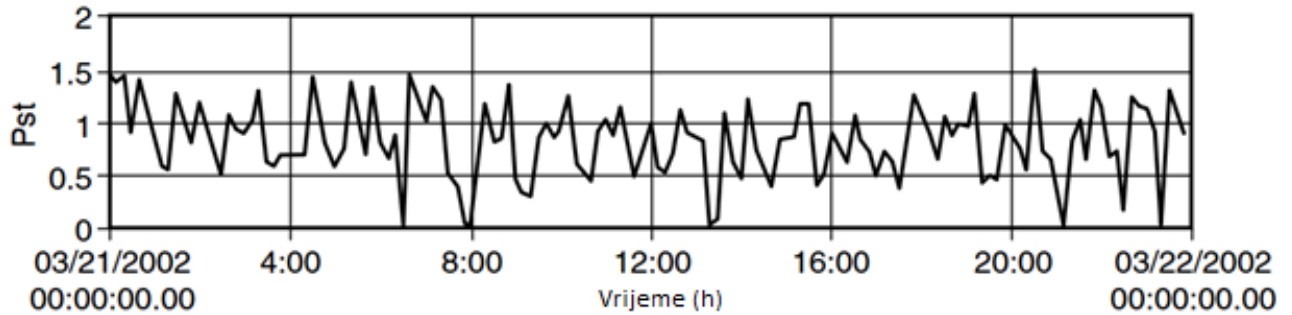
„Prema EN 50160 vrijednosti kolebanja napona tijekom bilo kojeg razdoblja unutar 1 tjedna, 95% 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona mora biti unutar +10% / -10% nazivne vrijednosti napona  $U_n$ . Nadalje, sve 10-minutne srednje vrijednosti efektivne vrijednosti opskrbnog napona moraju biti u unutar +10% / -15% nazivnog napona  $U_n$ .“[6]

### 3.3.2. Treperenje napona (Flickeri)

Pojam flicker označava subjektivni osjećaj koji čovjek doživljava pri izloženosti promjenama u intenzitetu osvjetljenja izvora svjetlosti. Ljudski faktor je jedan od čimbenika koji utječe na kompleksnost vrednovanja ovog fenomena jer se u obzir moraju uzeti i psihološki procesi ljudske percepcije. S elektrotehničkog kuta gledanja treperenje napona je uzrokovano fluktuacijama napona čije su amplitude uglavnom niže od praga otpornosti električne opreme. Može se zaključiti da je glavni učinak brzih fluktuacija napona upravo treperenje. „Treperenje se definira na sljedeći način: ako u prostoriji boravi 100 ljudi pod jednakim uvjetima i ako se intenzitet svjetla mijenja toliko da to opazi 50 od 100 nazočnih ljudi, kaže se da treperenje ima intenzitet 1.“

Važno je napomenuti da su promjene napona, fluktuacije napona i flickeri povezani pojmovi, ali ih se ne može tretirati kao identične. Naime, navedeni pojmovi označavaju različite pojave iako se često mogu pojaviti istovremeno. Varijacije u osvjetljenju nastaju kao posljedica fluktuacije napona što daje jasnu vezu između danih pojava. Ipak, u definiciji treperenja uključen je fiziološki aspekt, dok su fluktuacije napona definirane samo iz gledišta elektrotehnike što u konačnici dokazuje da treperenje proizlazi iz kombinacije dva faktora: fluktuacije napona i osobe izložene tim promjenama. Dakle, treperenje je fenomen koji je usko povezan s ljudskom percepcijom i reakcijom. Stoga, da bi se ispravno karakteriziralo i mjerilo treperenje, potrebno je razumjeti fiziološke procese koji sudjeluju u njegovoj percepciji [1][10].

Dva su načina mjerenja treperenja i to su kratkotrajno treperenje  $P_{st}$  (*eng. Short time*) koji se mjeri u intervalu od 10 minuta te predstavlja dobar kompromis jer je dovoljno dug da spriječi prevelik utjecaj pojedinačnih promjena napona te omogućuje promatranje trajanja poremećaja. Grafički prikaz kratkotrajnog treperenja nalazi se na slici 3.3.



Slika 3.3. Prikaz kratkotrajnog treperenja  $P_{st}$  [6]

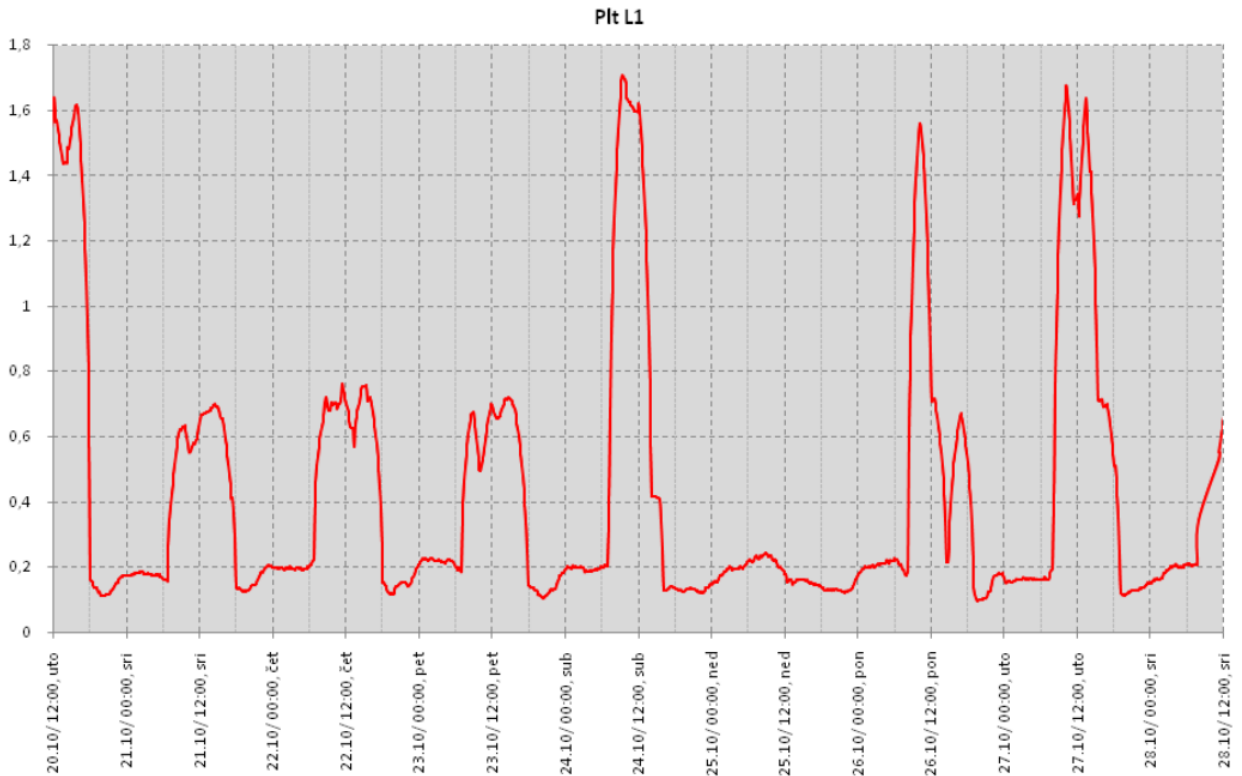
Istovremeno, dovoljno je kratak da karakterizira fluktuacije napona uzrokovane opremom s kratkim radnim ciklusima. Drugi način mjerenja treperenja jest dugotrajno treperenje  $P_{lt}$  (eng. „Long time“) koji se računa na temelju dvanaest uzastopnih vrijednosti  $P_{st}$  prema jednadžbi:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (3 - 2)$$

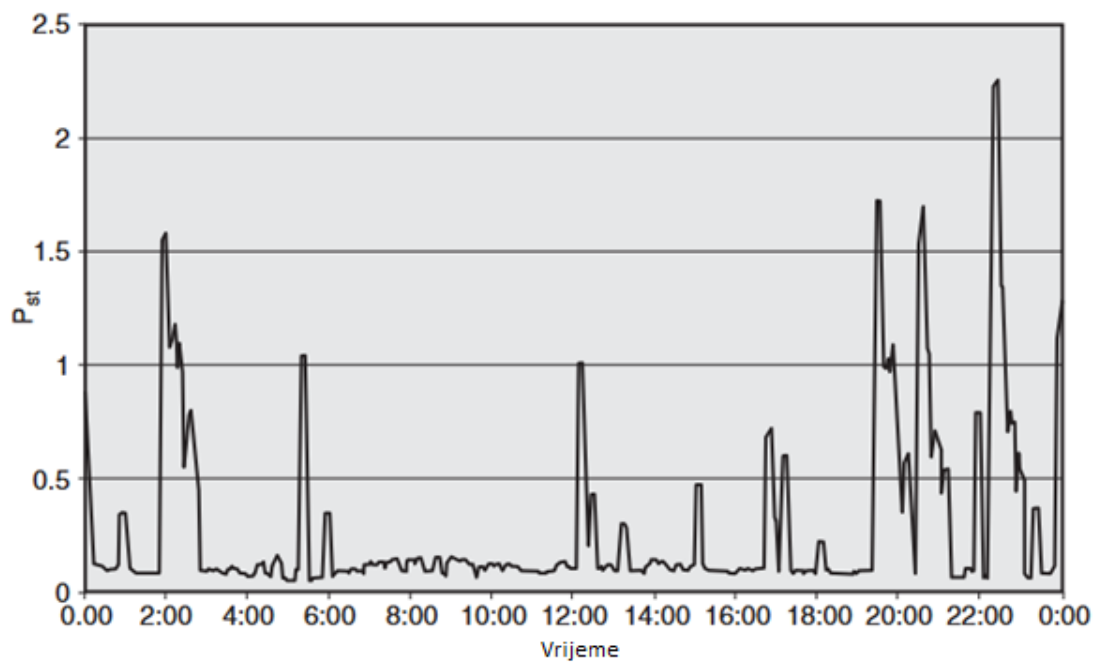
Parametar  $P_{lt}$  omogućuje procjenu dugotrajnog treperenja kada treba uzeti u obzir izvore treperenja s produženim i varijabilnim radnim ciklusima ili kada više uznemirujućih opterećenja djeluje istovremeno i nasumično, čiji je primjer mjerenja unutar jednog tjedna grafički prikazan na slici 3.4. te unutar jednog dana na slici 3.5.

Prema normi EN 50160 tijekom bilo kojeg tjedna, dugotrajna jakost treperenja ne smije prelaziti vrijednost  $P_{lt}=1$ .





Slika 3.4. Brze promjene napona – mjerenje unutar jednog tjedna [9]



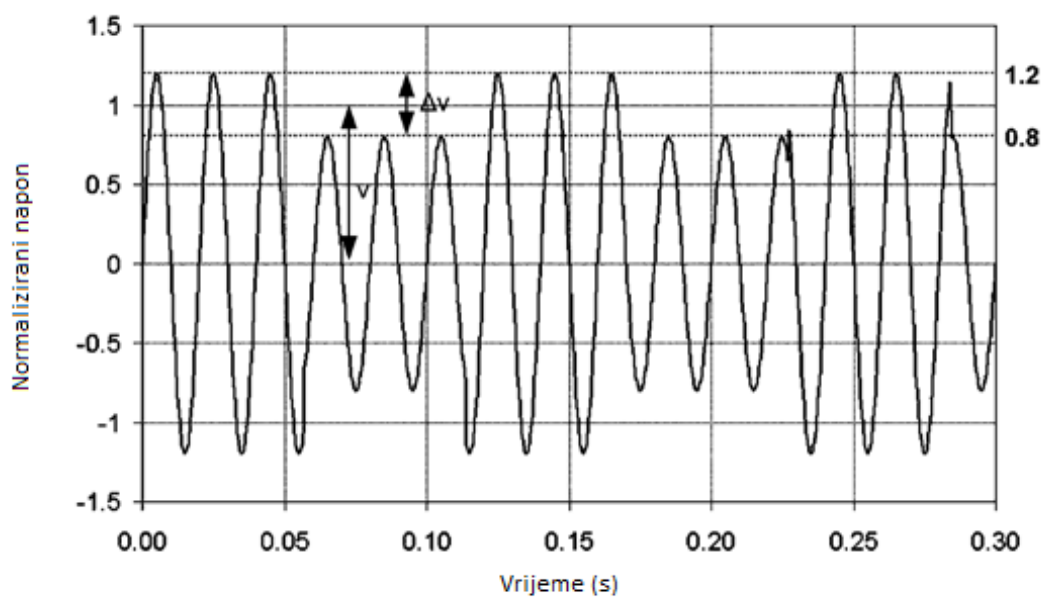
Slika 3.5. Brze promjene napona- mjerenje unutar jednog dana [6]

Glavni uzroci treperenja napona (flickera) su industrijska opterećenja kao što su primjerice valjaonice, veliki industrijski motori, pilane, lučne peći itd.

Potpuno isključenje učinaka treperenja nije moguće, ali se mogu poduzeti određene mjere za njegovo smanjenje koje uključuju promjene vrste rasvjete, instalacija sustava neprekidnog

napajanja - UPS sustavi (*engl. Uninterrupted Power Supply*), konfiguracija uređaja koji generiraju smetnje te uporaba reaktivnog kompenzatora.

Osim parametara Pst i Plt, koji su definirani u kontekstu intenziteta treperenja, postoji još jedan srodan parametar, a to je relativna promjena napona. Ova relativna promjena obično se izražava u postotcima i označava se kao  $d$  ili  $\Delta V/V$  i grafički je prikazana na slici 3.6. Ona prikazuje odstupanje efektivne vrijednosti napona u odnosu na stacionarnu vrijednost, prosječno kroz određeni vremenski period. Kao što je ranije spomenuto, ovaj parametar može se povezati s ozbiljnošću treperenja kroz različite približne metode. Na slici je prikazan primjer sinusnog vala s pravokutnim promjenama napona amplitude 40% i frekvencije 8,8 Hz [10].



Slika 3.6. Prikaz valnog oblika napona s pripadajućom relativnom promjenom napona[10]

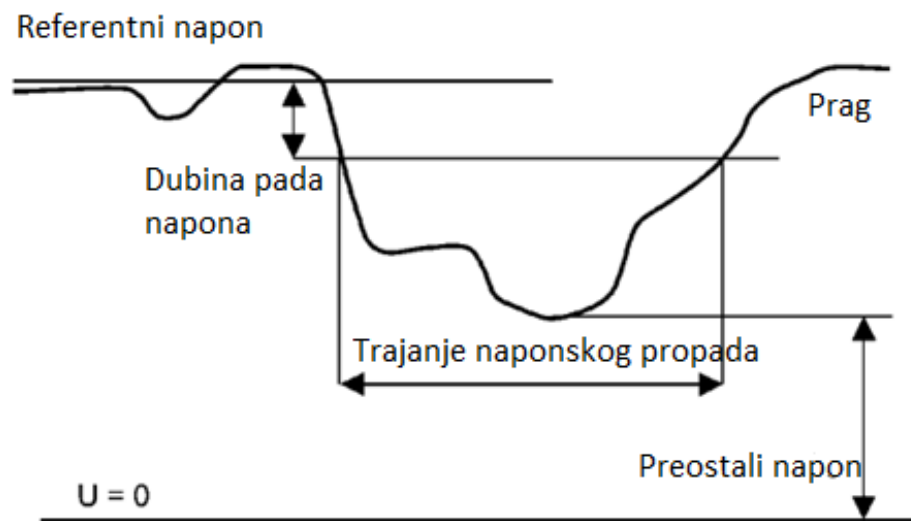
### 3.3.3. Naponski propadi i prekidi

Naponski propad je elektromagnetski poremećaj koji se manifestira naglim i kratkotrajnim padom efektivne vrijednosti opskrbnog napona ispod zadane vrijednosti (ispod vrijednosti napona praga). Vrijednost praga je efektivna vrijednost napona koja je definirana kako bi se odredio početak i kraj naponskog propada te se izražava u voltima (V) ili kao postotna vrijednost (*eng. Per unit*) referentnog napona. Vrijednost praga za početak naponskog propada se određuje za definiranje početka naponskog propada koji tipično iznosi 0.8 do 0.9 vrijednosti referentnog napona. Vrijednost praga za kraj naponskog propada određena je sa ciljem definiranja kraja naponskog propada te ona tipično iznosi 1-2 % referentnog napona iznad praga za početak propada. U

definiciji naponskog propada postoji izraz "dvodimenzionalni elektromagnetski poremećaj", čija se razina određuje naponom (preostalim naponom, *eng. Residual voltage*) i vremenom [1][10].

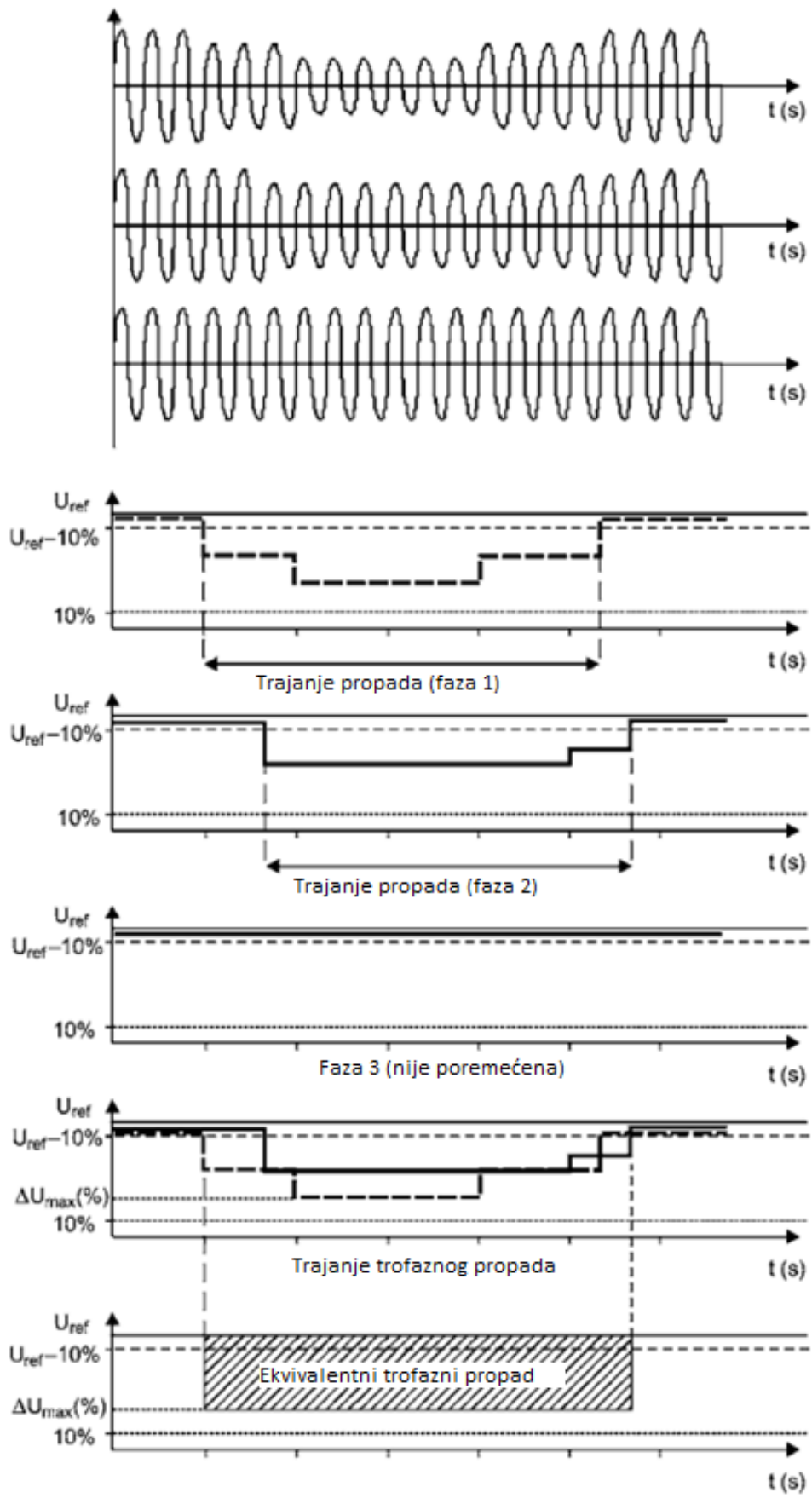
Obilježja naponskog propada prikazana su grafički na slici 3.7.

Referentni napon (*eng. Reference voltage*) predstavlja osnovnu vrijednost napona s kojom se uspoređuju ostale veličine i poremećaji te se obično prikazuju kao postotak. Dubina pada napona (*eng. Depth*) odnosi se na razliku između referentnog napona i preostalog napona (*eng. Residual voltage*) koja se može izraziti u voltima ili kao postotak, odnosno „per unit“ vrijednost referentnog napona. Trajanje naponskog propada (*eng. Duration of dip*) odnosi se na vrijeme od trenutka kada se dogodio naponski propad do trenutka kada se napon ponovno poveća iznad praga.



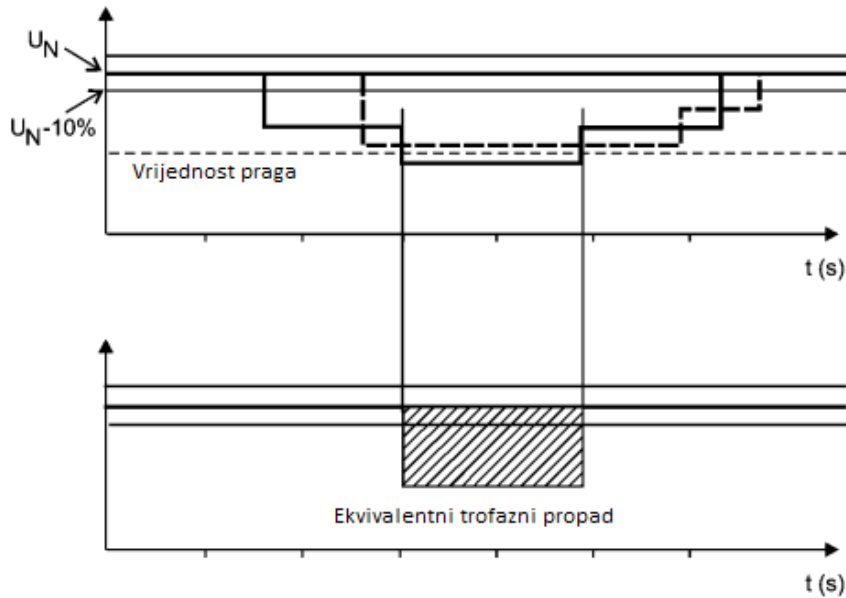
Slika 3.7. Grafički prikaz referentnog napona, dubine pada napona i trajanja naponskog propada[10]

U trofaznim sustavima, naponski propad se smatra započetim kada napon u jednoj od faza padne ispod predviđene granice (praga), a završava kada naponi u svim fazama prijeđu prag za završetak naponskog propada. Grafički prikazi trofaznog signala i njihovih propada napona dani su na slici 3.8. gdje je uočljivo kako i kada odabrati ekvivalentnu vrijednost trofaznog propada napona s obzirom na različite vrijednosti napona po fazama.



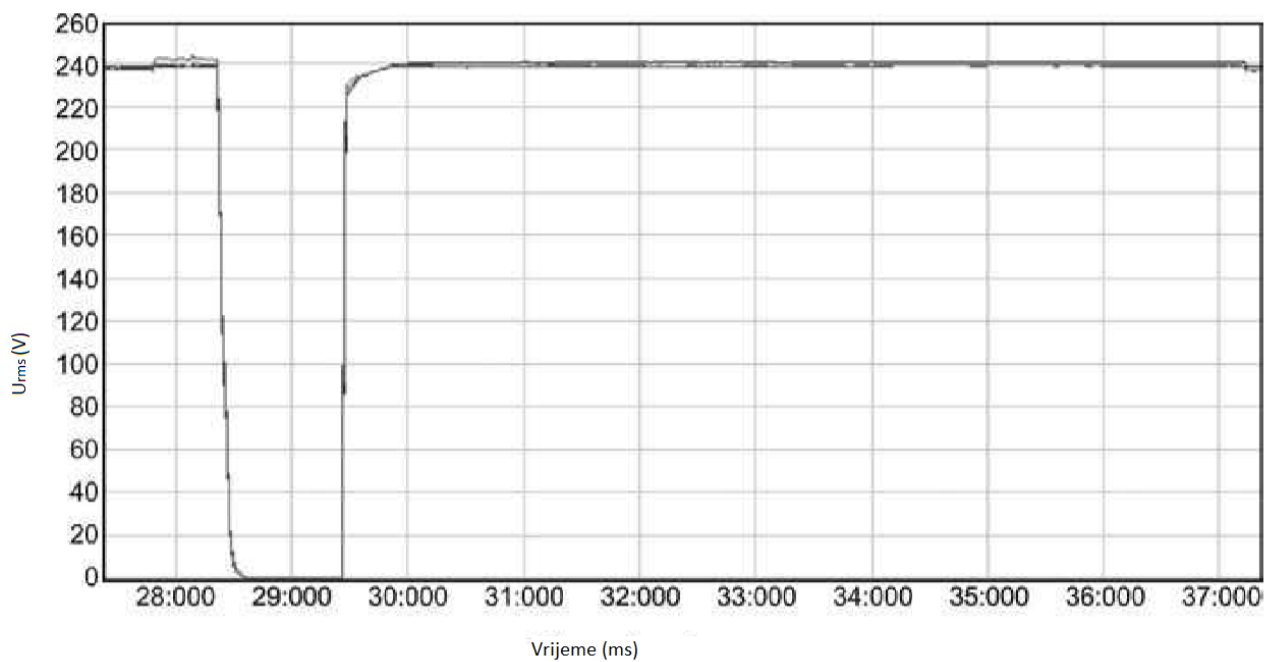
Slika 3.8. Grafički prikazi trofaznog signala i njihovih propada napona (po fazama)[10]

Na slici 3.9. vidljivo je kako ekvivalentni trofazni propad ovisi o vrijednosti praga za početak i za kraj propada. Ekvivalentni trofazni propad je prikazan kada je jedna od faza pala ispod zadane vrijednosti praga.



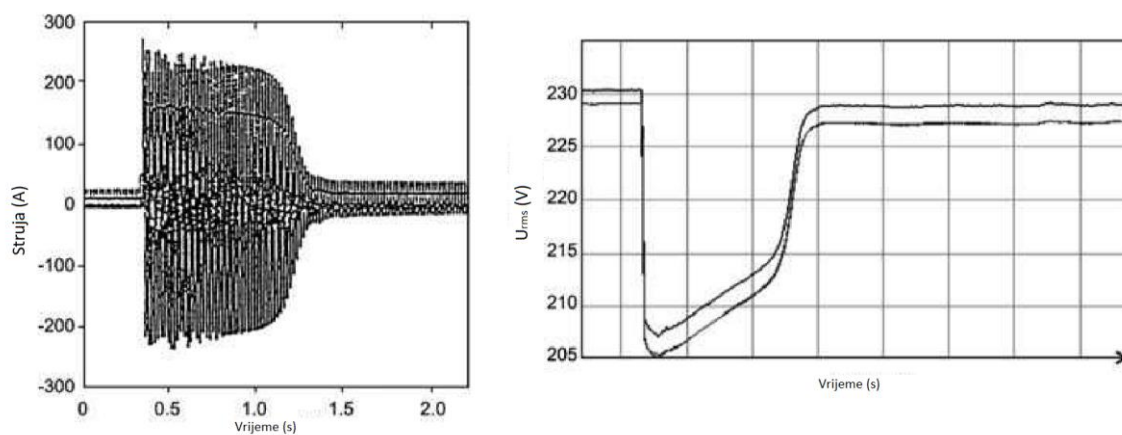
Slika 3.9. Grafički prikaz padanja vrijednosti napona ispod praga [10]

Kratki prekid napajanja predstavlja specifičan oblik pada napona, pri kojem napon na svim fazama elektroenergetskog sustava u određenoj točki pada ispod prethodno definirane granice. Primjer kratkog prekida opskrbe prikazan je na slici 3.10.



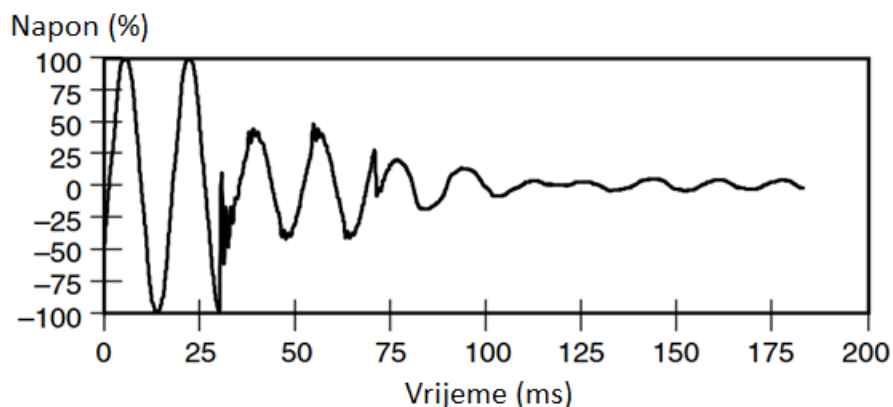
Slika 3.10. Prikaz kratkog prekida opskrbe [10]

Najčešće ga uzrokuju kratki spojevi i pokretanje velikih motora, a posebno su osjetljivi pogoni s promjenjivom brzinom, procesna oprema i računala. Ovi poremećaji se putem transformatora prenose na niže naponske razine i predstavljaju širi problem koji utječe na cijeli sustav. Broj zahvaćenih faza i dubina ovise o vrsti kvara i spoju transformatora. Nadzemne mreže izložene su lošim vremenskim uvjetima, pa imaju češće naponske propade i prekide nego podzemne mreže. Glavni uzrok je električni kratki spoj koji uzrokuje veliki porast struje i naponske propade na impedancijama opskrbnog sustava. Velika kolebanja struje pri sklapanju velikih opterećenja također mogu izazvati slične posljedice, što je grafički prikazano na slici 3.11.



Slika 3.11. Prikaz ovisnosti naponskog propada o porastu struje[10]

Prekid opskrbe nastupa kada napon na mjestu isporuke padne ispod 5% od dogovorenog nazivnog napona (grafički prikaz na slici 3.12.). Prekidi se klasificiraju na dugotrajne, koji traju duže od 3 minute, i kratkotrajne, koji ne prelaze trajanje od 3 minute, te mogu biti planirani ili neplanirani. Dugotrajni prekidi obično nastaju zbog izolacije trajnog kvara putem zaštitnih uređaja ili namjernog isključivanja prekidača zbog djelomičnih kvarova [10].



Slika 3.12. Prikaz prekida opskrbe [6]

Posljedice naponskih propada i prekida mogu biti ozbiljne, posebno za osjetljive sustave kao što su proizvodne linije, rasvjeta i sigurnosni sustavi, računalna oprema i pomoćna postrojenja za elektrane.

Metode poboljšanja uključuju smanjenje broja naponskih propada i prekida kroz povećanje pouzdanosti infrastrukture, modernizaciju, podzemne instalacije i konfiguraciju elektroenergetskog sustava. Također, smanjenje trajanja i dubine naponskih propada može se postići poboljšanjem elastičnosti u trafostanicama, ugradnjom zaštitnih uređaja i povećanjem snage kratkog spoja. Na razini opreme, ključno je smanjenje potrošnje snage od strane velikih varijabilnih opterećenja.

Unapređenje sigurnosti opskrbe energijom obuhvaća upotrebu besprekidnih napajanja (UPS) za održavanje napajanja tijekom prekida, omogućavanje pravilnog isključivanja procesa, elektroničke stabilizatore za kompenziranje naponskih propada i prekida te uređaje za prebacivanje izvora napajanja koji omogućuju upravljanje prijelazom između glavnog i rezervnog izvora napajanja [1][6][10].

#### 3.3.4. Nesimetrija napona

Naponska nesimetrija označava stanje u višefaznim sustavima kada efektivne vrijednosti linijskih napona ili fazni kutovi između uzastopnih linijskih napona nisu ravnomjerni. Pojava je često uzrokovana nesimetričnim opterećenjima u mreži, što dovodi do pojave inverznih i nultih komponenti napona. Stupanj se nesimetrije mjeri kao omjer inverzne/nulte komponente prema direktnoj komponenti. Nesimetrija se definira pomoću simetričnih komponenti (direktna, inverzna i nulta komponenta napona). Direktna komponenta predstavlja osnovni napon sustava, dok inverzna i nulta predstavljaju poremećaje uzrokovane nesimetričnim opterećenjima u mreži.

Inverzne i nulte komponente nastaju prije svega zbog struja koje proizlaze iz spomenutih nesimetričnih opterećenja unutar mreže. [10]

Jednadžbe za odgovarajuće simetrične komponente mogu se napisati na sljedeći način:

- Direktna komponenta, čije su komponente napona prikazane na slici 3.13.

$$\underline{U}_{1A} = \underline{U}_{1A}$$

$$\underline{U}_{1B} = a^2 \underline{U}_{1A}$$

$$\underline{U}_{1C} = a \underline{U}_{1A}$$

- Inverzna komponenta, čije su komponente napona prikazane na slici 3.14.

$$\underline{U}_{2A} = \underline{U}_{2A}$$

$$\underline{U}_{2B} = a \underline{U}_{2A}$$

$$\underline{U}_{2C} = a^2 \underline{U}_{2A}$$

- Nulta komponenta, čije su komponente napona prikazane na slici 3.15.

$$\underline{U}_{0A} = \underline{U}_{0B} = \underline{U}_{0C}$$

Gdje je  $a$  rotacijski operator:

$$a = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3-3)$$

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{1A} + \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A}$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{1B} + \underline{U}_{2B} + \underline{U}_{0B} = a^2 \underline{U}_{1A} + a \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A}$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_{1C} + \underline{U}_{2C} + \underline{U}_{0C} = a \underline{U}_{2A} + a^2 \underline{U}_{1A} + \underline{U}_{0A}$$

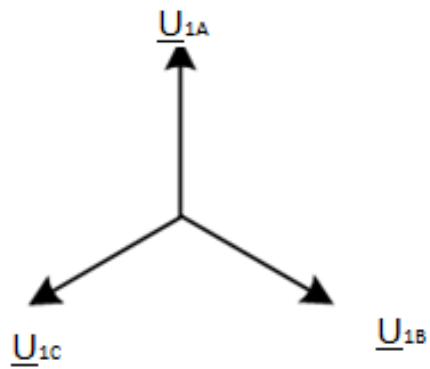
Simetrične komponente napona kao funkcija faznih napona mogu se odrediti iz prethodne jednadžbe:

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)$$

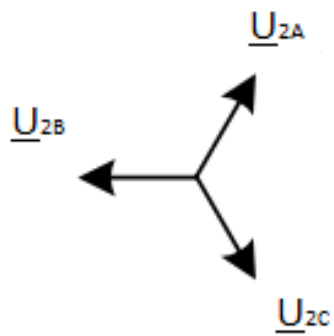
$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3} (\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C)$$

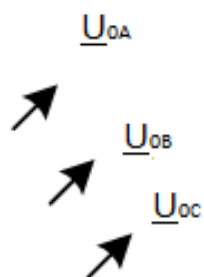




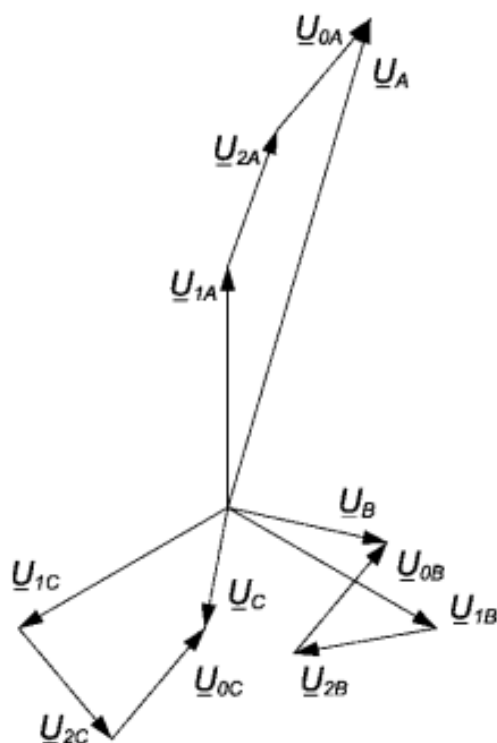
Slika 3.13. Direktne komponente napona [1]



Slika 3.14. Inverzne komponente napona[1]



Slika 3.15. Nulte komponente napona [1]



Slika 3.16. Rezultantni fazorski dijagram napona faza [1]

Sukladno normi EN 50160, u uvjetima normalnog rada, desetominutna srednja vrijednost efektivne vrijednosti inverzne komponente napona ne smije prelaziti 2% odgovarajuće izravne komponente za 95% srednjih vrijednosti unutar svakog tjednog intervala. S druge strane, u mrežama gdje su potrošači djelomično priključeni jednofazno ili dvofazno, nesimetrije na trofaznim mjestima mogu doseći i do 3% [6].

Postizanje potpune simetrije u distribucijskom sustavu gotovo je nemoguće što zbog nasumičnog i nepredvidivog isključivanja i uključivanja jednofaznih trošila, to zbog neujednačene raspodjele tih trošila među fazama i nesimetričnosti cjelokupnog elektroenergetskog sustava. Unatoč tomu, postoje određene mjere kojim se nastoji smanjiti razinu nesimetrije na prihvatljivu razinu. Jedna od učinkovitih metoda jest ravnomjerna distribucija jednofaznih opterećenja među sve tri faze. Nadalje, smanjenje impedancije elektroenergetskog sustava od uređaja koji uzrokuje nesimetriju može pomoći, s time da se poveća nazivna snaga transformatora i presjek kabela. Metoda u kojoj se ugrađuju jednofazni regulatori mogu uvelike pomoći u balansiranju opterećenja, dok u konačnici, kako bi se smanjio utjecaj nesimetrije, osjetljivu opremu treba izbjegavati priključivati na sustave koji napajaju jednofazna trošila [10].

U slučaju fotonaponskih sustava, nesimetrija napona nastaje kada FN sustavi nisu ravnomjerno raspoređeni među fazama distribucijske mreže, što može uzrokovati dodatna opterećenja i smanjenje učinkovitosti mreže, kao i probleme s opremom i kvalitetom napajanja.

### 3.3.5. Previsoki naponi i prenaponi

Previsoki napon je događaj kojim dolazi do prekoračenja gornje granice vrijednosti nazivnog napona (iznad 10% nazivne vrijednosti napona  $U_n$ ). Izraz prenapon specifična je vrsta previsokog napona koja se koristi isključivo za prijelazne pojave poput atmosferskih pražnjenja te prenapona izazvanih procesima uklapanja, isklapanja i kratkih spojeva unutar elektroenergetske mreže te ga je krivo poistovjećivati s izrazom za previsoki napon [1].

Prenapone karakterizira brzi prirast napona i mogu se klasificirati prema vremenu do vršne vrijednosti i trajanju [10]:

- Prolazni prenaponi sporog rasta koji traju do 20 ms te im vrijeme do vršne vrijednosti iznosi između 20  $\mu$ s i 5000 $\mu$ s. Ovi prenaponi imaju relativno spor rast i mogu trajati dulje od ostalih tipova prenapona
- Prolazni prenaponi brzog rasta koji traju do 300 $\mu$ s te im vrijeme potrebno do vršne vrijednosti iznosi između 0.1 $\mu$ s i 20 $\mu$ s. Prenapone karakterizira brzi uspon i kratko trajanje i većinom je posljedica prekidačkih djelovanja
- Prolazni prenaponi vrlo brzog rasta koji s vremenom trajanja kraćem od 3 ms i vremenom do vršne vrijednosti do 0.1  $\mu$ s. Prenapone karakteriziraju vrlo visoke oscilacije na visokim frekvencijama između 30 kHz i 100 MHz te su u većini slučajeva posljedica udara munje i vrlo brzih prekidačkih djelovanja.

Postoji nekoliko vrsta previsokih napona, ovisno o uzrocima njihovog nastanka; Mogu biti prolazni, sklopni ili atmosferski. Prolazni previsoki naponi mogu nastati uslijed različitih uzroka, među kojima su: proboj izolacije između faze i zemlje, što dovodi do povećanja faznog napona do razine linijskog napona; prekid neutralnog vodiča, koji uzrokuje porast napona na uređajima priključenim na fazu s najnižim opterećenjem; kvarovi u sustavima za regulaciju napona generatora ili transformatora; te prekompenzacija jalove snage, pri čemu kondenzatorske baterije mogu uzrokovati povećanje napona, osobito pri uvjetima niskog opterećenja. Sklopni previsoki naponi nastaju kao rezultat naglih promjena u konfiguraciji elektroenergetske mreže, primjerice aktiviranjem zaštitnih uređaja (uključivanje i isključivanje). Ovi naponi mogu se pojaviti tijekom normalnih uvjeta opterećenja, prilikom uklapanja i isklapanja niskih induktivnih struja ili pri sklapanju kapacitivnih krugova, kao što su neopterećeni vodovi, kabeli i kondenzatorske baterije. Atmosferski previsoki naponi nastaju kao posljedica prirodne pojave udara munje. Razlikuju se izravni udari munje u vodove ili druge dijelove mreže te neizravni učinci, poput induciranih prenapona i povećanja potencijala tla.

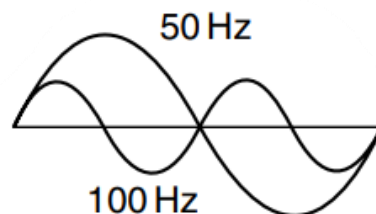
Posljedice previsokih napona su varijabilne, ovisno o njihovoj trajanju, učestalosti ponavljanja, intenzitetu i frekvenciji. Izazivaju oštećenja opreme, poremećaje u upravljačkim i komunikacijskim sustavima te toplinske i elektrodinamičke udare, čije djelovanje može uzrokovati požare [10].

### 3.3.6. Harmonici i harmonična izobličenja

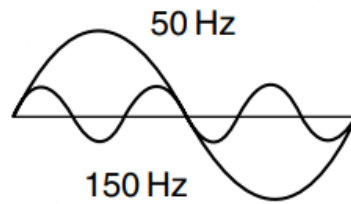
Harmonici su oduvijek prisutni u elektroenergetskim sustavima te su sve većom primjenom opreme energetske elektronike i elektroničkih sustava, postali značajan problem u električnim instalacijama. Harmonici uglavnom nastaju zbog upotrebe nelinearnih trošila koje čine velik dio industrijskih, komercijalnih i kućanskih opterećenja, što povećava razinu distorzije u mrežama niskog napona. Linearna opterećenja danas su vrlo rijetka i primjer za to su žarulje sa žarnom niti i neregulirani grijači.

Fotonaponski sustavi (DG) ne proizvode potpuno sinusni strujni oblik, baš kao niti većina druge opreme. Harmonici injektirani u distribucijsku mrežu od strane generatora rezultirat će povećanjem izobličenja napona pa čak i interferencije s komunikacijskim sustavima.

Harmonici su sinusni naponi ili struje koji su višekratnici osnovne frekvencije sinusnog signala koji se pojavljuju zbog nelinearnih opterećenja ili izvora kao što su elektronički uređaji (LED rasvjeta, UPS sustavi...), motori s promjenjivom brzinom (koji koriste elektroničke upravljačke jedinice), ispravljači (pretvaraju izmjeničnu u istosmjernu struju). Harmonijski broj (red) definira harmonijsku frekvenciju na način da prvi harmonik, predstavlja izvornu frekvenciju ( $f = 50 \text{ Hz}$ ), dok na primjer, drugi harmonik, prema slici 3.17., predstavlja frekvenciju dva puta veću od izvorne ( $f = 100 \text{ Hz}$ ), što vrijedi za svaki sljedeći red harmonika (slijedno tomu, za treći harmonik frekvencija iznosi  $f = 150 \text{ Hz}$ ), prema slici 3.18. Omjer harmonijske frekvencije i osnovne frekvencije naziva se red i označava se slovom  $h$ .



Slika 3.17. Prikaz izvornog harmonika (50 Hz) i drugog harmonika (100 Hz) [10]



Slika 3.18. Prikaz izvornog harmonika (50 Hz) i trećeg harmonika (150 Hz)[10]

Kako je moguće izobličeni val prikazati pomoću harmoničnih komponenti, tako je i periodički val moguće rastaviti u harmonične komponente pomoću Fouierove transformacije koja ima izraz:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)) \quad (3 - 4)$$

Gdje su  $a_0$ ,  $a_n$  i  $b_n$  koeficijenti Fouierove serije.

Energetska elektronika postaje sve prisutnija u industriji zahvaljujući brojnim prednostima, uključujući fleksibilno upravljanje i visoku energetska učinkovitost, ali visoka razina struja viših harmonika često je u uslužnom sektoru povezana s velikim instalacijama računalne opreme i elektronike.

THD (*eng. Total harmonic distortion*) označava koeficijent ukupnog harmonijskog izobličenja. Predstavlja ukupni zbroj efektivnih vrijednosti napona za sve harmonijske frekvencije, prikazan relativno u odnosu na osnovni harmonik napona.

Računa se prema izrazu:

$$THDU = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2 \frac{100\%}{U_1}} \quad (3 - 5)$$

Naponski harmonici koji nastaju zbog mrežnih impedancija uzrokuju izobličenja napona koja mogu ometati rad drugih uređaja priključenih na isto napajanje. Iz tog razloga, impedancija napajanja pri različitim frekvencijama od presudne je važnosti za smanjenje naponskog izobličenja. Što je impedancija izvora manja, to je naponsko izobličenje niže

Međuharmonici su sinusoidalne komponente s frekvencijama koje nisu cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije nego se nalaze među harmonicima. Njihova pojava povezana je s periodičnim promjenama snage, a najčešće ih generiraju uređaji poput lučnih peći, zavarivačkih sustava i

frekvencijskih pretvarača. MTU signali (frekvencije koje koriste isporučitelji električne energije za daljinsko upravljanje) također se ubrajaju u međuharmonike.

Prema normi EN 50160, u normalnim uvjetima rada, za svaku višeharmoničku komponentu, 95% desetominutnih srednjih vrijednosti efektivnog napona ne smije prelaziti granice specificirane u tablici 3.2. tijekom bilo kojeg tjednog intervala. Također, ukupno harmonijsko izobličenje (THD) opskrbnog napona koji se računa uzimajući u obzir sve više harmonike do 40. harmonika, ne smije premašiti 8% vrijednosti nazivnog napona  $U_n$  [6].

Tablica 3.2. Vrijednosti viših harmonika u % $U_n$  [10]

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

Dugotrajne posljedice harmonika uključuju strujno preopterećenje koje uzrokuje pregrijavanje i prerano starenje opreme. Kako raste ukupno harmonijsko izobličenje napona (THDU), istovremeno dolazi do porasta problema s potrošačkim uređajima i komponentama elektroenergetske mreže. Kada ukupno harmonijsko izobličenje (THD) iznosi do 5%, problemi su rijetki i minimalni. U rasponu od 5% do 7%, učestalost problema značajno raste te se do 10% dodatno povećava vjerojatnost pojave poteškoća. THD iznad 10% ukazuje na visoku vjerojatnost ozbiljnih problema [1].

## 4. UTJECAJ FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

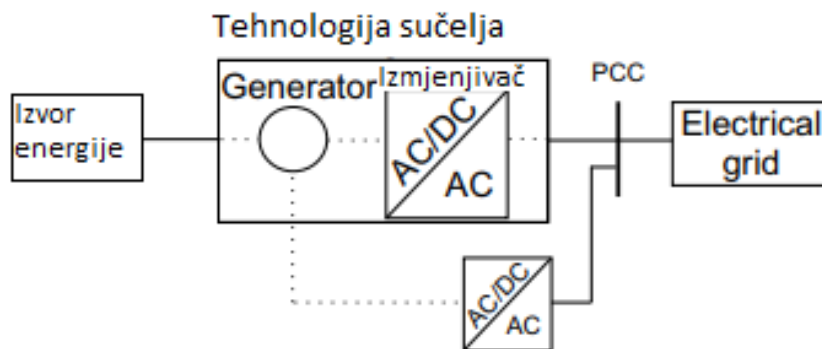
### 4.1. Spoj FN elektrane s mrežom

Integracija fotonaponskih (PV) sustava u elektroenergetsku mrežu može, zbog njihove povremene prirode (ovisnost o vanjskim utjecajima), utjecati na različite aspekte mrežne funkcionalnosti kao što su stabilnost, zaštita te uvođenje novih izazova u upravljanju i planiranju. To uključuje promjene u naponu, fluktuacije u proizvodnji energije, povećanje neuravnoteženosti napona između faza te povećanje harmonijskih izobličenja u mreži.

Elektrane i distribuirana proizvodnja (DG) na obnovljive izvore energije na mjestu priključka (PCC – *engl. „Point of Common Coupling“*) i u okolnoj mreži imaju nekoliko ključnih utjecaja. Prvi je utjecaj na tokove snaga, što posljedično utječe na strujna opterećenja i gubitke unutar grana mreže, uključujući vodove i transformatore. Ono također utječe na naponske uvjete i regulaciju napona u čvorištima elektroenergetske mreže, kao što su sabirnice postrojenja i potrošača. Nadalje, prisutnost elektrana može uzrokovati porast razina struja kratkog spoja, što može rezultirati prekoračenjem nazivnih vrijednosti rasklopnih uređaja, osobito prekidača, što zahtjeva podešenje sustava zaštite. Nadalje, kako je već spomenuto u prijašnjim poglavljima, elektrane uvelike mogu utjecati na kvalitetu električne energije što obuhvaća varijacije napona, harmonijsku distorziju, naponske propade i flikere i brojne druge parametre navedene u normi EN 50160. Svi navedeni parametri uvelike mogu utjecati na pouzdanost napajanja potrošača.

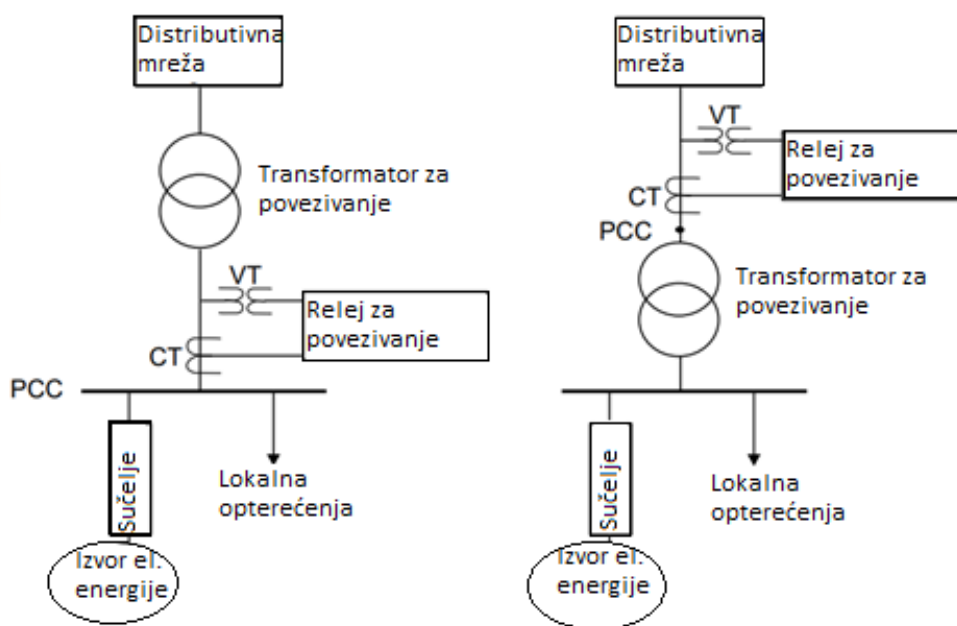
Vrsta priključka elektrane na obnovljive izvore električne energije na mrežu ima ključan utjecaj na strujno-naponske uvjete, uključujući tokove snaga, strujna opterećenja, gubitke, naponske prilike, regulaciju napona te ukupnu stabilnost sustava. Također, kvaliteta električne energije proizvedene iz elektrane mora zadovoljiti standarde koje zahtjeva operator distribucijskog ili prijenosnog sustava, kao što je norma EN 50160. Različite tehnologije povezivanja elektrana imaju različite stupnjeve osjetljivosti na poremećaje uzrokovane smanjenom kvalitetom električne energije u mreži, uključujući fluktuacije napona, padove napona, harmonijska izobličenja i flikere.

Postoje različite tehnologije povezivanja DG-a na mrežu, a zajedničko im je korištenje generatora i elektroničkih pretvarača snage, kako je prikazano na Slici 4.1. te im je glavni cilj prilagoditi proizvedenu energiju zahtjevima mreže.



Slika 4.1. Priključak DG-a preko pretvarača na mrežu [1]

Uobičajeno mjesto priključka FNE na mrežu jest zaštitni relej, a rjeđe transformator. Priključna točka izvora energije na mrežu naziva se točkom priključenja PCC (*engl. Point of Common Coupling*). Njena definicija ovisi o vlasništvu i zahtjevima za međusobno povezivanje unutar elektroenergetskog sustava te su dvije različite moguće definicije prikazane na Slici 4.2. gdje se obično zaštitni relej za međusobno povezivanje instalira na PCC (lijeva shema na slici 4.2.).[1]



Slika 4.2. Dvije moguće definicije PCC-a; preko transformatora i preko zaštitnog releja [1]

Prema tablici 4.1. vidljivo je kako energetske pretvarače nudi optimalno rješenje s obzirom na upravljivost, robusnost i učinkovitost gdje „-“ označava izraz za „manje“, a „+“ izraz za „više“.



Tablica 4.1. Usporedba vrste priključka s obzirom na upravljivost, robusnost, učinkovitost kao pogonskih karakteristika [1]

Tehnologija sučelja	Mogućnost kontrole	Robusnost	Efikasnost	Cijena
Indukcijski generator	-	-	+	-
Sinkroni generator	+	+	++	+
Elektronika za djelomičnu snagu	++	-	+	++
Energetska elektronika (eng. <i>Fully power electronics</i> )	+++	-	-	+++
Modularna ili distribuirana energetska elektronika	++++	+	+++	++

## 4.2. Razina integracije FN elektrane u mrežu

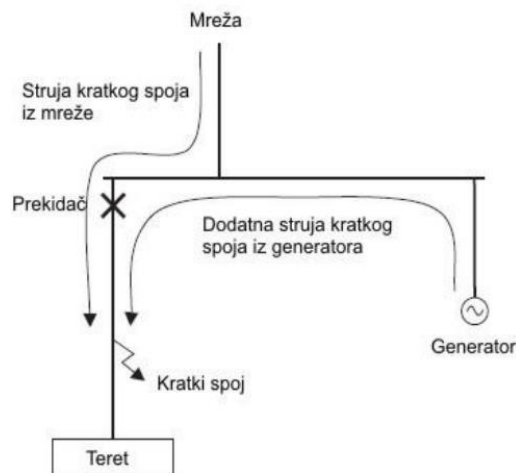
### 4.2.1. Napon na mjestu priključka

Kvaliteta napona na terminalima generatora ovisi o opremi priključenoj na mrežu i događajima unutar mreže. Kvaliteta napona utječe na trajanje opreme i može uzrokovati pogrešna isključenja i oštećenja. Razlika između generatora i ostale opreme je u tome što pogrešna isključenja generatora mogu predstavljati sigurnosni rizik zbog mogućeg prekida u opskrbi energijom, što može uzrokovati prenapone i probleme s elektroničkom opremom.

Pri razmatranju povezivanja elektrane (DG) na mrežu, ključan faktor koji se treba uzeti u obzir je snaga kratkog spoja na mjestu priključka jer on značajno određuje utjecaj koji će generator (elektrana) imati na mrežu. Grafički prikaz doprinosa generatora struji kratkog spoja nalazi se na slici 4.3. Mala će snaga kratkog spoja implicirati visoku impedanciju mreže, što uzrokuje relativno velike promjene napona na mjestu priključka uslijed injekcije i ekstrakcije aktivne i jalove snage (strojevi s promjenjivom brzinom vrtnje). Stoga je učinak distribuirane proizvodnje u velikoj mjeri ovisan o snazi kratkog spoja kao i o veličini generatora čija veličina upravo definira je li mreža slaba ili ne. Uobičajeno je izražavati omjer snage kratkog spoja na mjestu priključka mreže u

[MVA] u odnosu na instaliranu snagu predložene elektrane, koja se izražava u [MW], čiji se omjer naziva omjer kratkog spoja te može dati grubu procjenu prihvatljivosti priključenja.

Također, ako je utjecaj (integracija) PV snage u distributivnu mrežu niska, sadržaj harmonika u naponu je nizak, dok kada je utjecaj PV snage u distributivnu mrežu visok, proporcionalno se povećava sadržaj harmonika u naponu.



Slika 4.3. Prikaz doprinosa generatora struji kratkog spoja [1]

„Prema Mrežnim pravilima EES Hrvatske, bez detaljnijeg vrednovanja povratnog djelovanja na mrežu, moguće je razmotriti priključenje na mrežu u slučaju manjih priključnih snaga ili ograničenog udjela nelinearnih trošila kod kupaca, pod uvjetom da je ispunjen sljedeći uvjet: omjer snage kratkog spoja i priključne snage mora biti najmanje 1000 za srednji napon, odnosno 150 za niski napon.“ [11]

$$\frac{S_K}{S_P} \geq 1000 \text{ za srednji napon}$$

$$\frac{S_K}{S_P} \geq 150 \text{ niski napon}$$

Pri čemu je  $S_K$  snaga kratkog spoja na mjestu priključka, a  $S_P$  priključna snaga.

Povezivanje elektrane na višu naponsku razinu obično podrazumijeva veće troškove zbog potrebe za većim transformatorima, složenijim rasklopnim postrojenjima i dužim kablovskim povezivanjima koji bi bili potrebni za prijenos proizvedene energije i povezivanje s postojećom mrežom. S druge pak strane, priključivanje DG na prenizak napon, zbog eventualnog smanjenja

investicijskih troškova, može rezultirati prevelikim utjecajem na lokalnu mrežu i potencijalnom narušavanju pouzdanosti i kvalitete električne energije.

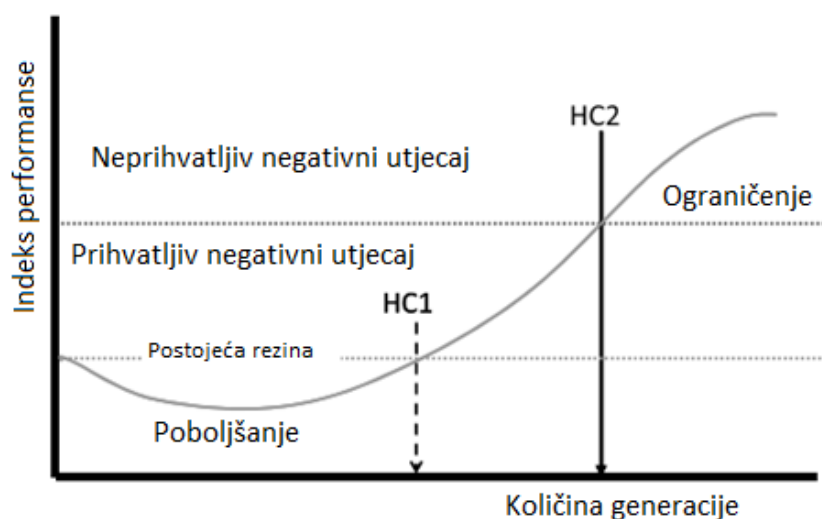
#### 4.2.2. Pozitivni i negativni utjecaj integracije FN elektrane u mrežu

Utjecaj može biti pozitivan, odnosno negativan ovisno o početnim uvjetima mreže i razini integracije elektrane.

Ako su početni uvjeti mreže na mjestu priključenja takvi da je napon niži od nazivnoga, priključenje DG (distribuirane proizvodnje) na mrežu rezultira povećanjem napona i to se smatra pozitivnim utjecajem na mrežu. Prikazano je na slici 4.4. krivuljom do točke HC1.

„HC“ je kratica za „*hosting capacity*“ što označava maksimalnu količinu distribuirane proizvodnje koju elektroenergetski sustav može podnijeti bez pogoršanja performansi ili kvalitete opskrbe izvan prihvatljivih granica. Drugim riječima, to je najveća količina distribuirane proizvodnje koju mreža može integrirati, a da pritom ne dođe do problema kao što su preopterećenja, naponi izvan granica ili povećani gubici u mreži.

Daljnjom integracijom distribuirane proizvodnje u mrežu indeks performansi se povećava do razine prihvatljivog negativnog utjecaja (od točke HC1 do HC2). U prikazanom području napon se povećava, a daljnjom integracijom distribuirane proizvodnje u mrežu može se prekoračiti dozvoljena granica napona te se dovodi do područja u kojem negativni utjecaji postaju neprihvatljivi. U tom slučaju može doći do ograničavanja daljnje integracije distribuirane proizvodnje u mrežu ili do uvođenja tehničkih mjera kao što su mjere regulacije i podešenja zaštite u mreži, upravljanje potrošnjom ili uvođenje naprednih mreža.[1]



Slika 4.4. Grafički prikaz utjecaja integracije DG na mrežu [1]

### 4.2.3. Dodatni zahtjevi za priključenje fotonaponske elektrane na mrežu

#### Članak 47

„Na niskonaponsku mrežu priključuje se postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 500 kW, prema sljedećim kriterijima:

- na niskonaponski vod može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 100 kW i
- na niskonaponske sabirnice u transformatorskoj stanici TS 10(20)/0,4 kV može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 500 kW “[11].

„Na srednjonaponsku mrežu može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 20 MW, prema sljedećim kriterijima:

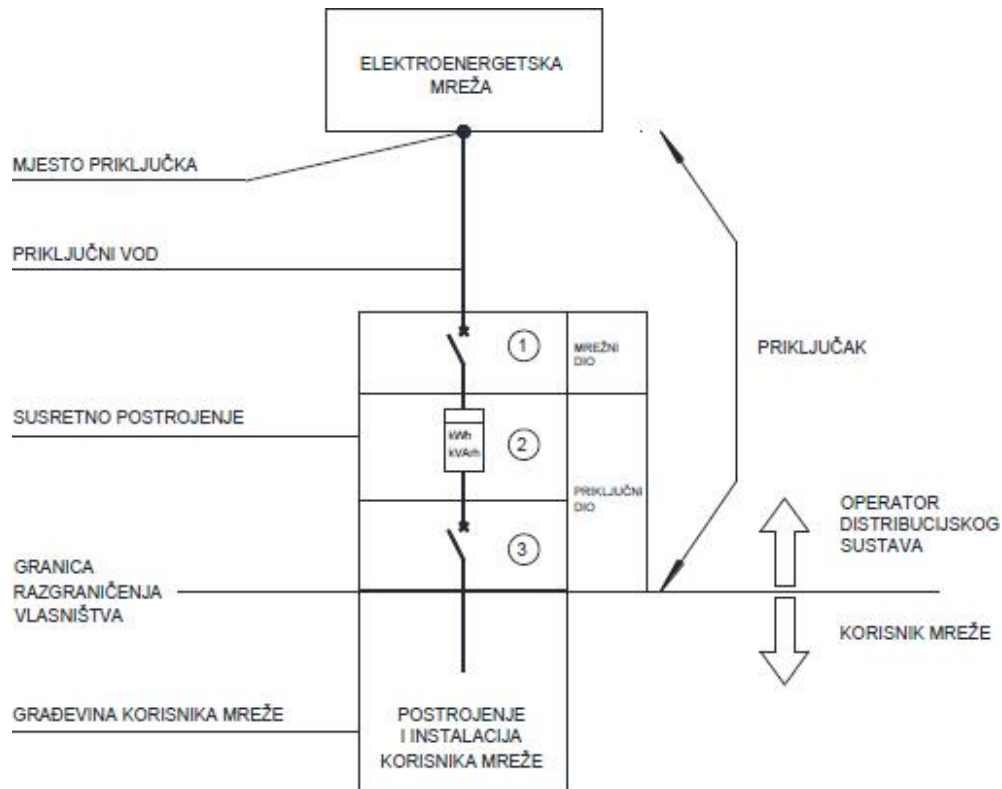
- na srednjonaponski vod, sabirnice TS SN/SN i rasklopište u srednjonaponskoj mreži može se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do 10 MW i
- na srednjonaponske sabirnice u transformatorskoj stanici TS VN/SN mogu se priključiti postrojenje i instalacija pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 20 MW, uz uvjet da se za priključnu snagu jednaku ili veću od 10 MW u EOTRP-u provede analiza prijenosne mreže u suradnji s operatorom prijenosnog sustava“ [11].

#### Članak 48.

„Analiza prijenosne mreže u EOTRP-u provodi se prilikom sagledavanja mogućnosti priključenja postrojenja i instalacije proizvođača na mrežu priključne snage veće od 5 MW do 10 MW, a koji se priključuje u mrežu koja se napaja iz TS VN/SN za koju vrijedi da je ukupna priključna snaga postojećih i budućih proizvođača veća ili jednaka nazivnoj snazi najmanjeg energetskeg transformatora VN/SN ugrađenog u predmetnoj TS VN/SN.“

„Postojeći i budući proizvođači iz stavka 1. ovog članka su: postojeći proizvođači, proizvođači koji imaju sklopljen ugovor o priključenju, proizvođači koji imaju važeću prethodnu elektroenergetsku suglasnost, proizvođači koji imaju važeći EOTRP u skladu s Uredbom o izdavanju energetske suglasnosti i utvrđivanju uvjeta i rokova priključenja na elektroenergetsku mrežu, s priključnom snagom većom od 500 kW “[11].

Shematski prikaz priključenja DG (fotonaponske elektrane) na mrežu prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Shematski prikaz priključka na EE mrežu [12]

## 5. ANALIZA MJERENJA KVALITETE

### 5.1. Tehnički opis elektrane

Investitor Pivovara Daruvar d.o.o. planira postavljanje sunčane elektrane na krov postojeće zgrade Pivovara Daruvar, s ciljem proizvodnje električne energije. Projekt obuhvaća instalaciju ukupno 584 fotonaponska modula snage 405 Wp na krov poslovne zgrade. Fotonaponski moduli bit će povezani na dva izmjenjivača, svaki maksimalne izlazne snage 110 kW, čime će ukupna projektirana snaga sunčane elektrane iznositi 220 kW. Proizvedena električna energija distribuirat će se putem postojećeg NN razvodnog ormara koji je povezan na niskonaponski razvod u transformatorskoj stanici. Proizvedena električna energija namjerava se koristiti za vlastitu potrošnju građevine na koju se postavlja, s mogućnošću predaje prekomjerno proizvedene električne energije u distributivnu elektroenergetsku mrežu.

Istosmjerna električna struja proizvedena u fotonaponskim modulima bit će pretvorena u izmjeničnu struju, napona 230 V, 50 Hz, u trofaznim izmjenjivačima ugrađenim na prikladnom mjestu na postojećoj građevini [14].

U tablici 5.1. vidljive su karakteristike ugrađenog FN modula proizvođača Yingli.

Tablica 5.1. Karakteristike fotonaponskog modula

Proizvođač	Yingli
Model	YL405D-37e
Vršna snaga P <sub>mpp</sub> (Wp)	405
Nazivna struja (A)	13,15
Nazivni napon (V)	30,80
Struja kratkog spoja (A)	13,86
Dimenzije (š x v x d) (mm)	1.724x1.134x30
Učinkovitost	20,7%

Projektirana snaga sunčane elektrane je 220 kW, određeno maksimalnom izlaznom snagom projektiranog izmjenjivača (2 x 110 kW), čije su karakteristike prikazane u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Karakteristike invertera

Proizvođač	Sungrow
Model	SG110CX
Nazivna snaga (kW)	110
Broj MPPT-a	9
Broj ulaza po MPPT-u	2
Nazivni ulazni napon (V DC)	585
Maksimalna ulazna struja po MPPT (A DC)	1.100
Maksimalna izlazna snaga (W)	26
Maksimalna izlazna struja (A)	158,8
Nazivni izlazni napon (V AC)	3x230/400
Nazivna izlazna frekvencija (Hz)	50
Faktor snage	1

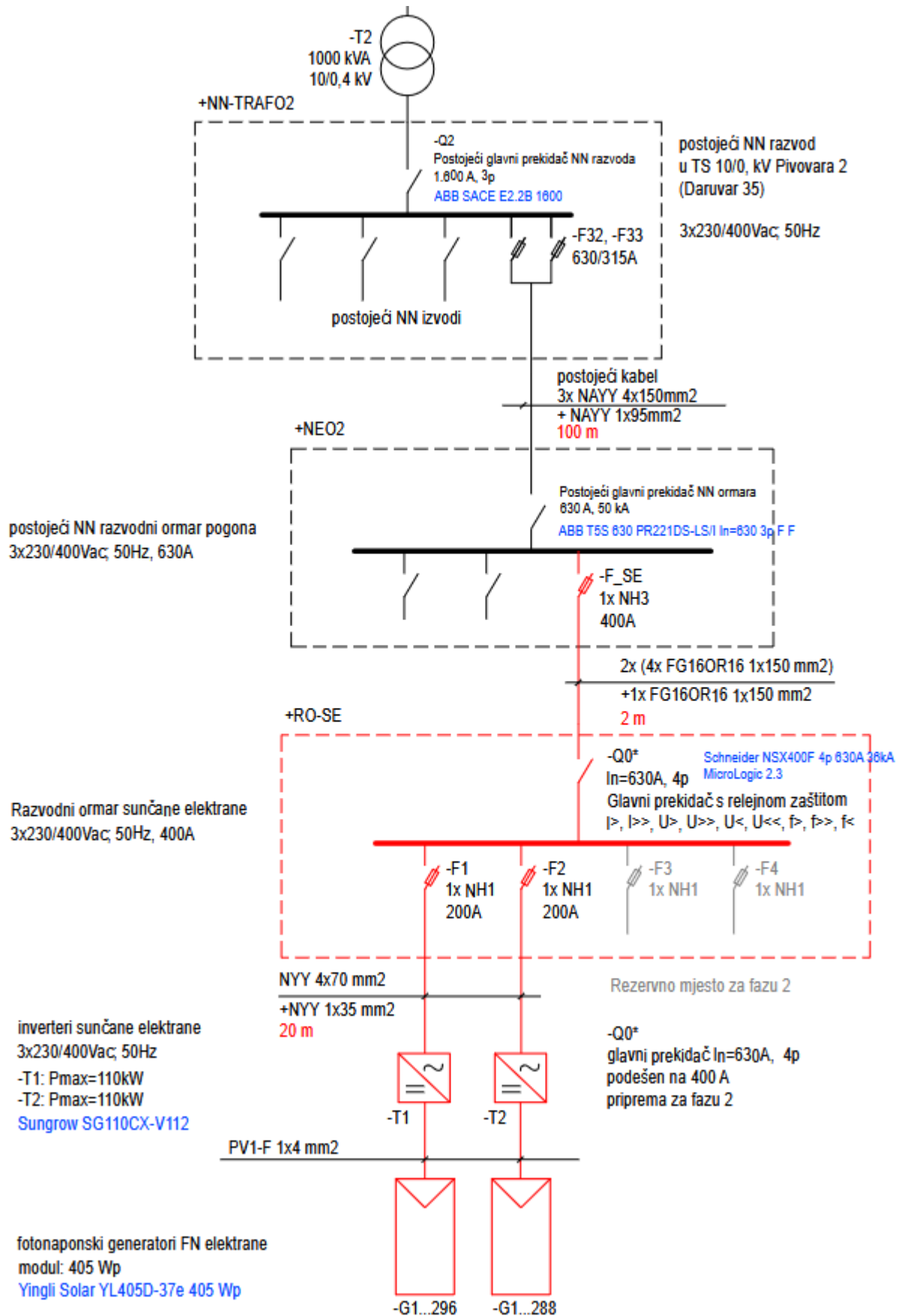
Kako instaliranu AC snagu elektrane definira snaga invertera, ona iznosi 220 kW, dok instaliranu DC snagu definira umnožak broja FN modula i njihove vršne snage, koja u ovom slučaju iznosi 236,52 kW, a njihov omjer DC/AC iznosi 1,18.

Mjerenje KEE provedeno je uređajem METREL MI 2892 – PowerMaster na srednjenaponskoj razini (10 kV), ali indirektno preko naponskog i strujnog mjernog transformatora. Vanjski izgled uređaja prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1. Uređaj METREL MI 2892 [13].

Jednopolna shema elektrane prikazana je na slici 5.2. koja prikazuje mjesto i način spajanja FN elektrane na distributivnu mrežu. Iz jednopolne se sheme može uočiti da su dva izmjenjivača spojena preko rastavnih pruga na sabirnicu razvodnog ormara sunčane elektrane +RO-SE na kojoj se nalazi glavni prekidač s relejnom zaštitom. Iz razvodnog ormara sunčane elektrane dolazi se do postojećeg NN razvodnog ormara pogona, gdje se dalje vodi do postojećeg NN razvoda u trafostanici. U jednopolnoj se shemi uočavaju detalji vezani za tipove kabela, karakteristike prekidača, osigurača te njihove nazivne vrijednosti.



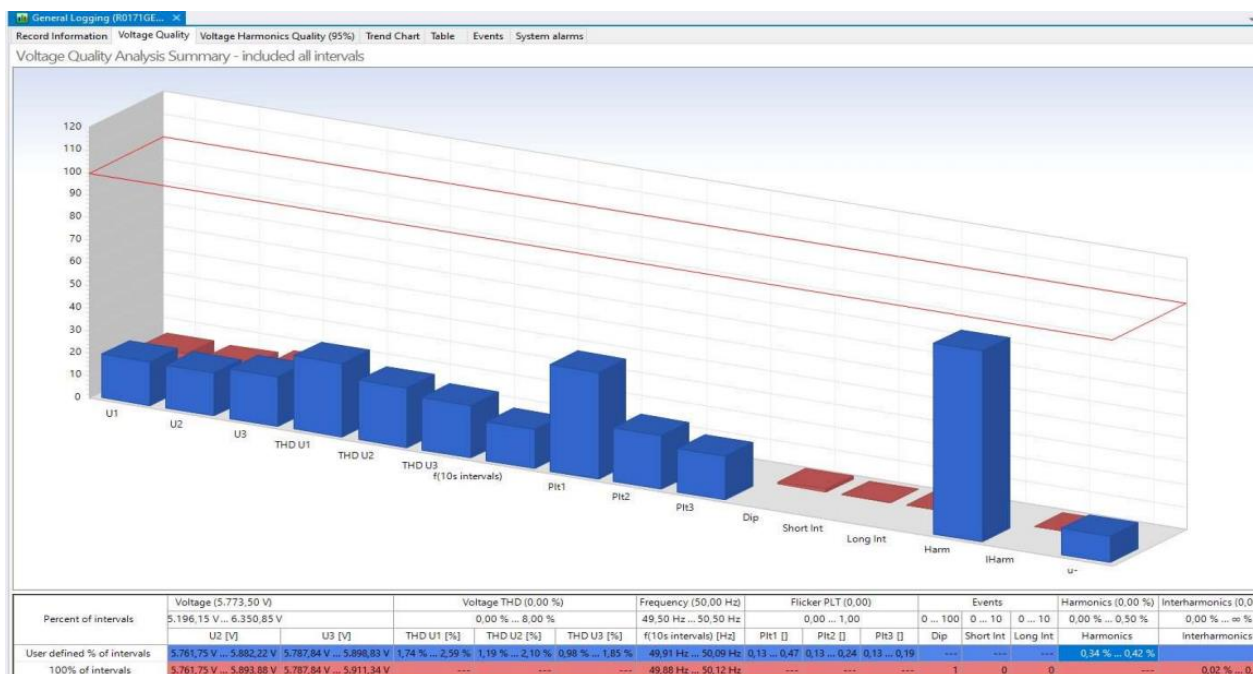
Slika 5.2. Jednopolna shema sunčane elektrane [14].



## 5.2. Analiza mjerenja kvalitete EE prema HRN EN 50160

Mjerenje se provodi kontinuirano tijekom sedam dana, odnosno 168 sati bez prestanka, dok vrijeme uzorkovanja (mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri) iznosi 10 minuta. Frekvencija se promatra u mjernim isječcima od 10 s, dok se naponi signaliziranja promatraju u intervalu od 3 s.

Na slici 5.3. prikazan je sveobuhvatan pregled parametara kvalitete u prvom mjernom tjednu na mjestu priključka, pri čemu je vidljivo da su svi parametri kvalitete napona u zadanim ograničenjima spomenute norme (HRN EN 50160), odnosno ispod granične vrijednosti koju prikazuje crvena linija na slici. U mjernom tjednu nije zabilježen niti jedan prenapon, propad ili prekid opskrbe, dok se svojom vrijednosti ističu jedino harmonici.



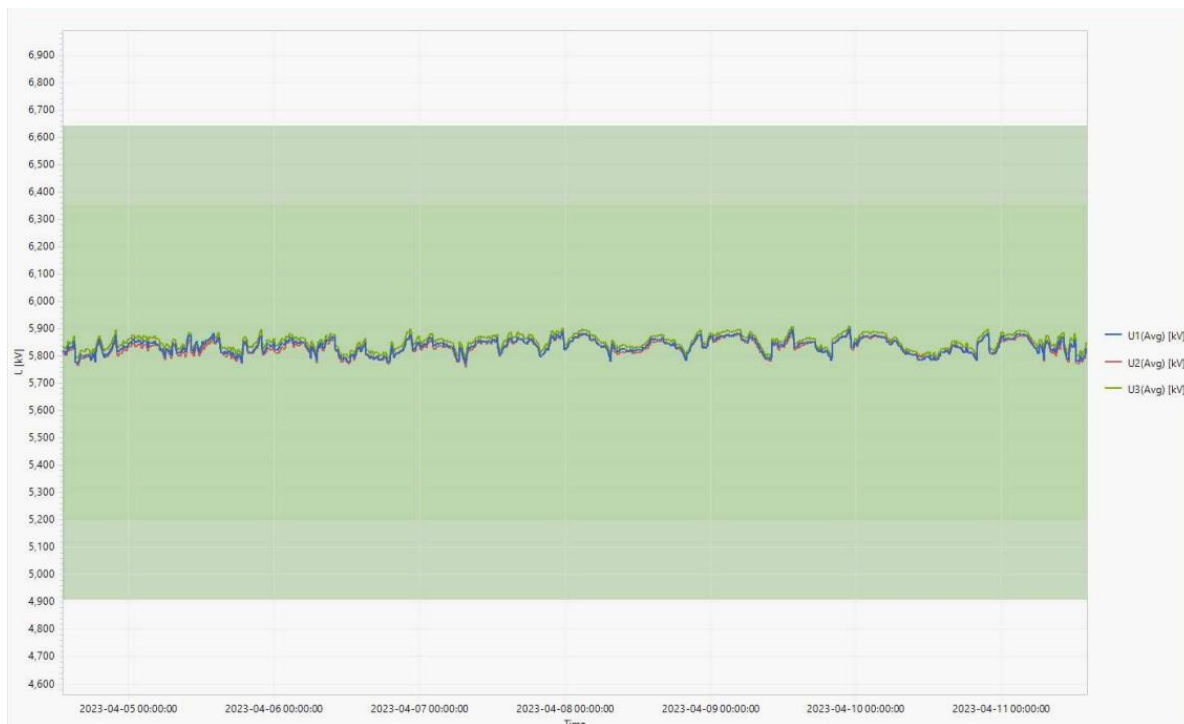
Slika 5.3. Sveobuhvatni prikaz pokazatelja kvalitete u mjernom tjednu [14].

Na slici 5.4. prikazane su vrijednosti frekvencije zabilježene u 10-sekundnim intervalima tijekom mjernog tjedna. Sve vrijednosti su u zadanom opsegu prema normi EN 50160: najniža izmjerena vrijednost iznosila je 49,88 Hz, dok je najviša zabilježena vrijednost bila 50,12 Hz, što se nalazi u dozvoljenom rasponu (49,50 Hz – 50,50 Hz za 99,5% godine). Fotonaponske elektrane uvelike mogu utjecati na frekvenciju u mreži zbog svoje varijabilne proizvodnje. Na primjer, tijekom razdoblja niskog opterećenja FN elektrane proizvodit će višak energije koji uzrokuje porast frekvencije.



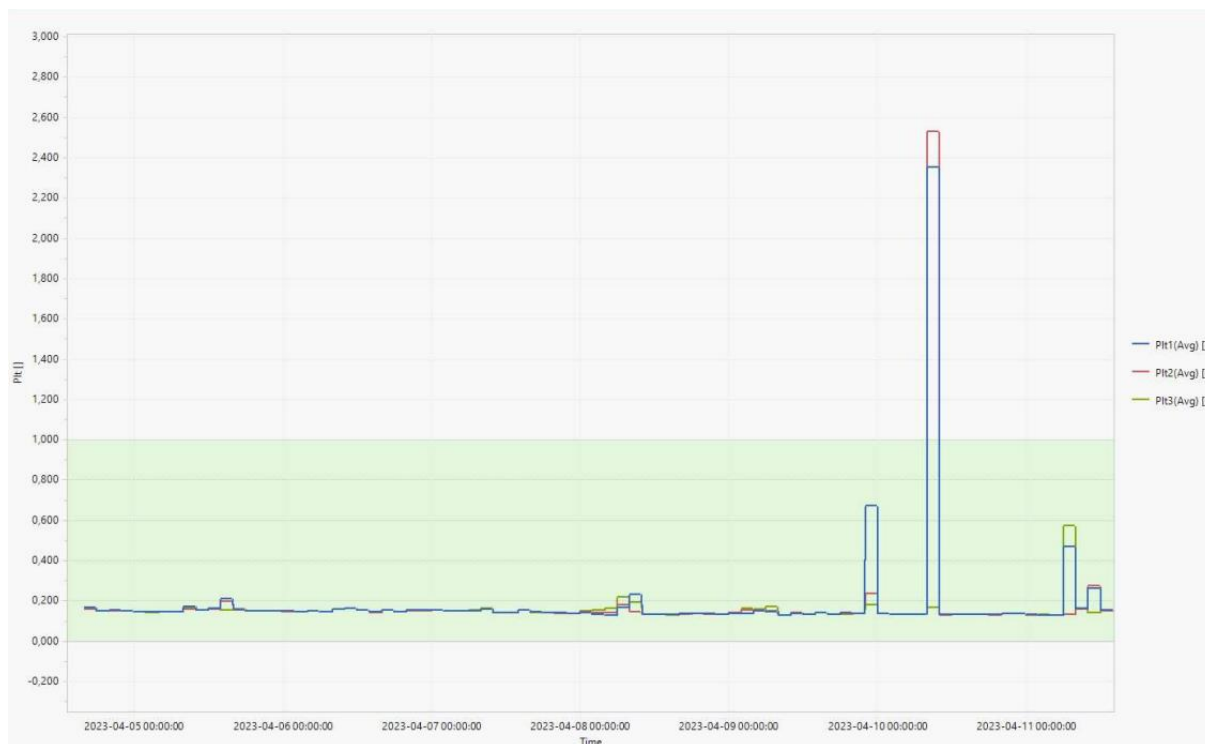
Slika 5.4. 10-secundne vrijednosti frekvencije u mjernom tjednu [14].

Na slici 5.5. prikazane su 10-minutne efektivne vrijednosti napona za sve tri faze tijekom mjernog tjedna. Može se vidjeti da su sve 10-minutne vrijednosti unutar propisanog raspona od 5.196,15 V - 6.350,85 V. Najmanja zabilježena vrijednost iznosila je 5.761,75 V u fazi L2, dok je najveća zabilježena vrijednost iznosila 5.911,34 V u fazi L3. Nije se dogodio niti jedan prenapon, propad ili prekid opskrbe, dok se iz grafa mogu uočiti samo spore promjene napona (kolebanja) koje su u zadanom ograničenju norme EN 50160. Kolebanja su često vezana uz promjene opterećenja u mreži na način da porast opterećenja uzrokuje pad napona u mreži, a smanjenje opterećenja može uzrokovati porast napona, osobito u mrežama s velikom proizvodnjom (npr. fotonaponske elektrane tijekom dana i mala potrošnja energije u ruralnim područjima).



Slika 5.5. 10-minutne efektivne vrijednosti napona sve tri faze u mjernom tjednu [14].

Slika 5.6. prikazuje 10-minutne vrijednosti dugotrajnog naponskog treperenja (flikera) Plt u mjernom tjednu. Prekoračenje propisane vrijednosti flikera zabilježeno je 10.4.2023. ujutro, u periodu između 8:20 i 9:50, kada je izmjerena najviša vrijednost Plt u iznosu od 2,528, što ukazuje na značajno naponsko treperenje.



Slika 5.6. 10-minutne vrijednosti dugotrajnog naponskog treperenja Plt u mjernom tjednu [14].

Za precizniju analizu tog događaja potrebno je proučiti sliku 5.7. koja prikazuje kratkotrajne vrijednosti flikera Pst i minimalne 10 - minutne vrijednosti napona u istom periodu

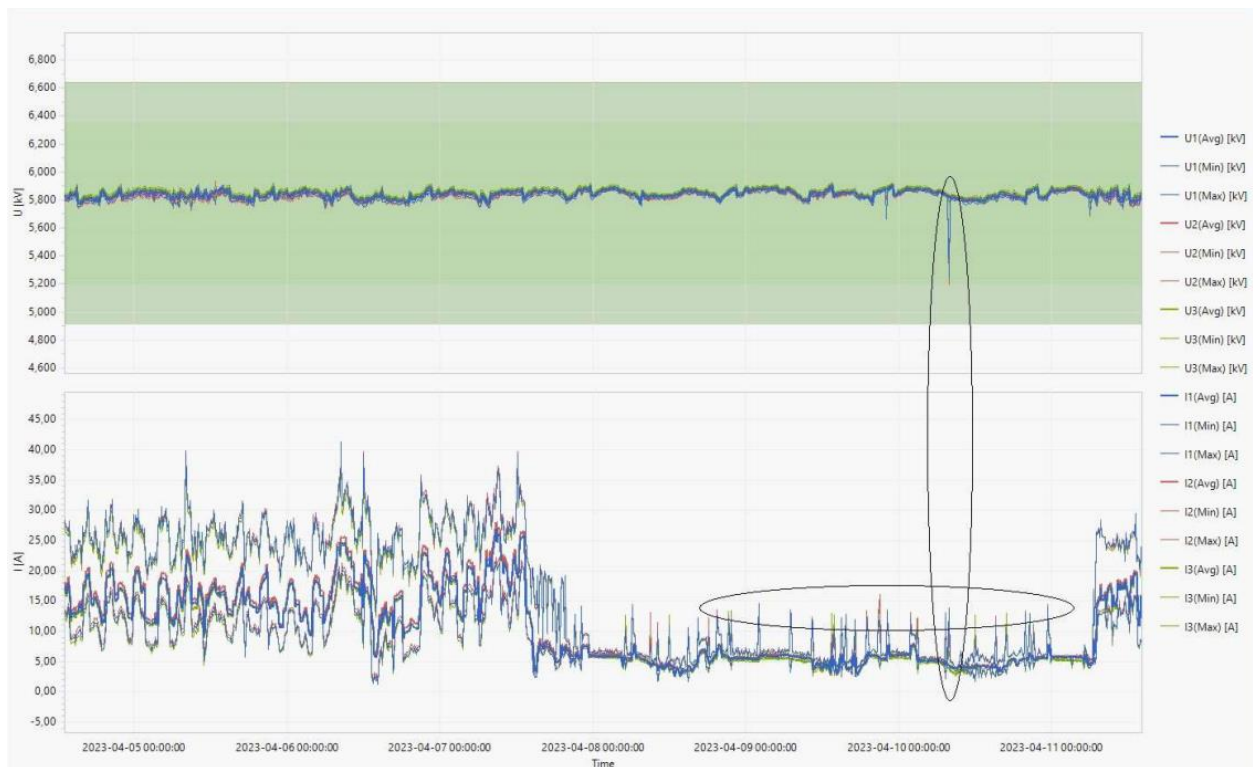


Slika 5.7. 10-minutne vrijednosti kratkotrajnog naponskog treperenja Pst (donji dijagram) te minimalnih 10 minutnih vrijednosti napona (gornji dijagram) u mjernom tjednu [14].

Prema podacima sa slike 5.7., 10.4.2023. u 7:50 h, zabilježeno je značajnije kolebanje napona koje se ne može smatrati naponskim propadom jer je minimalna izmjerena vrijednosti napona ( $U=5198$  V) ipak nešto viša od donje granice napona koja iznosi 5196,15 V.

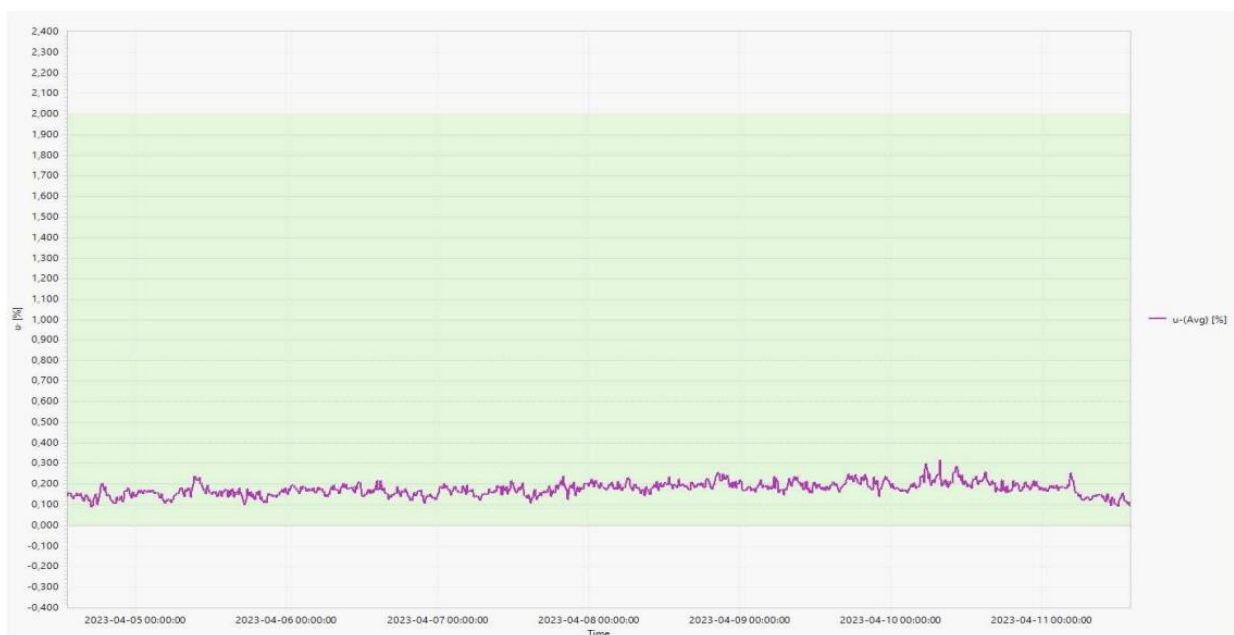
Za dodatnu analizu potrebno je pregledati i proučiti sliku 5.8. koja prikazuje maksimalne 10 – minutne vrijednosti strija i minimalne 10 – minutne vrijednosti napona. na zadanoj slici može se uočiti da se spomenuto kolebanje napona i istovremeni skok struje mogu povezati kao uzročno posljedični događaj (na slici 5.8. označeno uspravnom elipsom). Međutim, na slici 5.8. se također vide i brojni drugi slični strujni skokovi (na slici 5.8 označeni vodoravnom elipsom) pri kojima nije došlo do naponskih kolebanja.

Bitno je napomenuti da se povišeni fliker dogodio na neradni dan (Uskrсни ponedjeljak), dok su tijekom radnih dana (na slici 5.8. prikazane u lijevom dijelu dijagrama) zabilježeni viši strujni skokovi koji nisu uzrokovali značajna kolebanja napona. posljedično se može zaključiti s velikom sigurnošću da visoka vrijednost flikera Plt nije uzrokovana strujom SE Pivovara Daruvar.



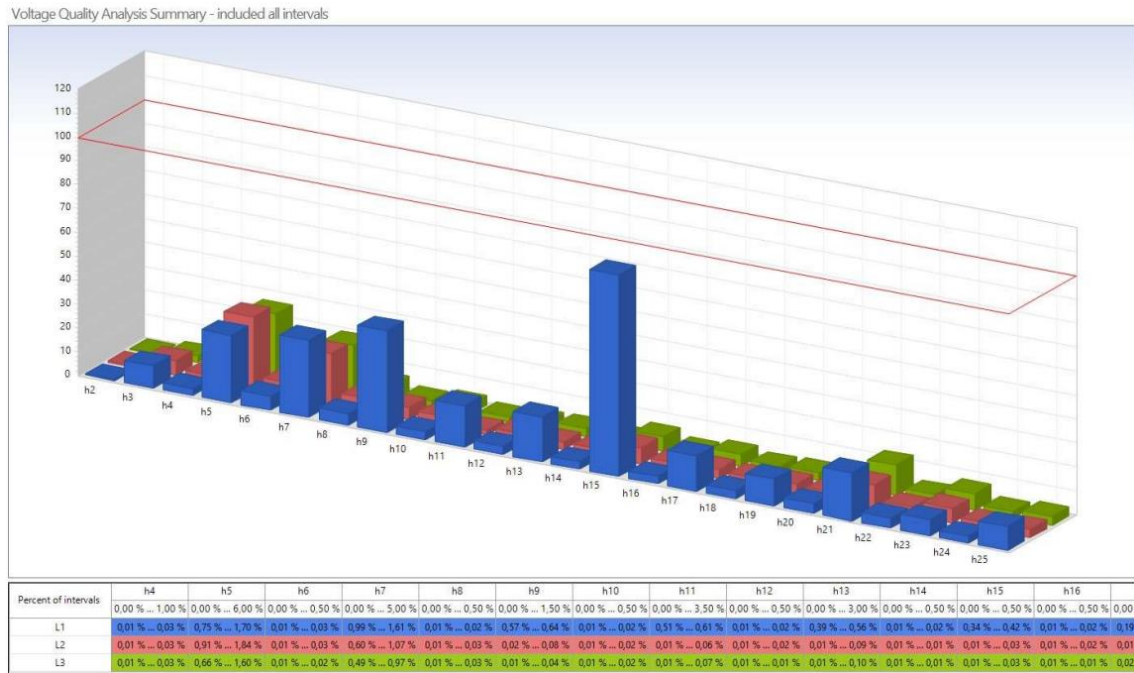
Slika 5.8. Maksimalne 10-minutne vrijednosti struja i minimalne 10-minutne vrijednosti napona [14].

Na slici 5.9. prikazane su 10-minutne vrijednosti nesimetrije u naponskom sustavu tijekom mjernog tjedna. Analizom podataka sa slike može se zaključiti da su zabilježene vrijednosti nesimetrije značajno ispod granične vrijednosti propisane normom EN 50160, koja iznosi 2 %. Najviša zabilježena vrijednost nesimetrije tijekom mjerenja iznosila je 0,321%.



Slika 5.9. 10-minutne vrijednosti nesimetrije u mjernom tjednu [14].

Na slici 5.10. prikazan je spektar naponskih harmonika u mjernom tjednu, a analiza pokazuje da su sve zabilježene vrijednosti harmonika unutar graničnih vrijednosti koje propisuje norma EN 50160. Među harmonicima najviše se ističe 15. harmonik u fazi L1, čija je vrijednost iznosila 0,42% što je blizu granične vrijednosti od 0,50%. također se izdvajaju 5., 7., i 9. harmonik, no njihove su vrijednosti značajno ispod dopuštenih granica.



Slika 5.10. Spektar naponskih harmonika u mjernom tjednu [14].

Za detaljniji pregled vrijednosti pojedinih harmonika potrebo je pogledati sliku 5.11. na kojoj su prikazane specifične vrijednosti svakog od harmonika.

		L1		L2		L3	
Harmonik	Uvjet	Mjereno	Status	Mjereno	Status	Mjereno	Status
THD	< 8,00 %	2,71 %	Zadovoljava	2,26 %	Zadovoljava	2,03 %	Zadovoljava
2	< 2,00 %	0,01 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava
3	< 5,00 %	0,46 %	Zadovoljava	0,30 %	Zadovoljava	0,13 %	Zadovoljava
4	< 1,00 %	0,03 %	Zadovoljava	0,03 %	Zadovoljava	0,03 %	Zadovoljava
5	< 6,00 %	1,70 %	Zadovoljava	1,84 %	Zadovoljava	1,60 %	Zadovoljava
6	< 0,50 %	0,03 %	Zadovoljava	0,03 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava
7	< 5,00 %	1,61 %	Zadovoljava	1,07 %	Zadovoljava	0,97 %	Zadovoljava
8	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,03 %	Zadovoljava	0,03 %	Zadovoljava
9	< 1,50 %	0,64 %	Zadovoljava	0,08 %	Zadovoljava	0,04 %	Zadovoljava
10	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava
11	< 3,50 %	0,61 %	Zadovoljava	0,06 %	Zadovoljava	0,07 %	Zadovoljava
12	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava
13	< 3,00 %	0,56 %	Zadovoljava	0,09 %	Zadovoljava	0,10 %	Zadovoljava
14	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava
15	< 0,50 %	0,42 %	Zadovoljava	0,03 %	Zadovoljava	0,03 %	Zadovoljava
16	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava
17	< 2,00 %	0,30 %	Zadovoljava	0,08 %	Zadovoljava	0,10 %	Zadovoljava
18	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava
19	< 1,50 %	0,17 %	Zadovoljava	0,06 %	Zadovoljava	0,05 %	Zadovoljava
20	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava
21	< 0,50 %	0,10 %	Zadovoljava	0,05 %	Zadovoljava	0,06 %	Zadovoljava
22	< 0,50 %	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava	0,02 %	Zadovoljava
23	< 1,50 %	0,10 %	Zadovoljava	0,09 %	Zadovoljava	0,10 %	Zadovoljava
24	< 0,50 %	0,01 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava	0,01 %	Zadovoljava
25	< 1,50 %	0,15 %	Zadovoljava	0,05 %	Zadovoljava	0,05 %	Zadovoljava

Slika 5.11. Raspodjela viših harmonika u naponu [14].

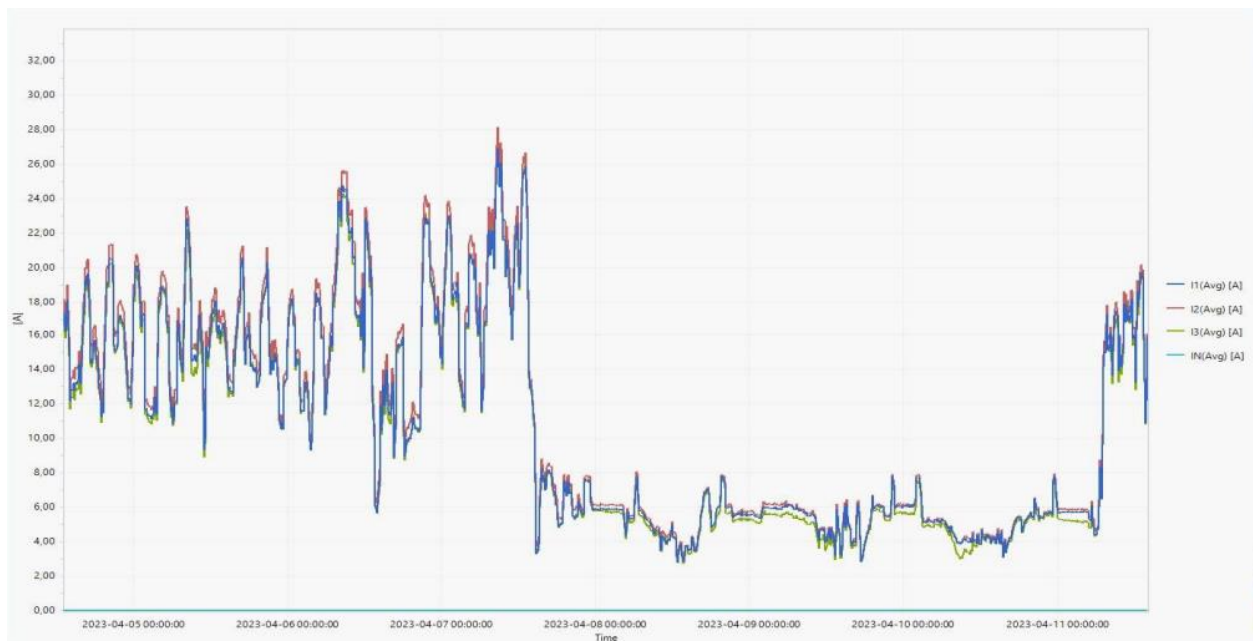
Slijedom prethodnih analiza harmonika, ukupno harmonijsko izobličenje napona (THDU) također je u skladu s normom EN 50160, što je prikazano na slici 5.12. Najviša zabilježena vrijednost THDU tijekom mjernog tjedna iznosi 2,711% u fazi L1, što je znatno ispod dozvoljene granice od 8%. Ovi podaci potvrđuju da je THDU u sustavu unutar prihvatljivih granica, osiguravajući stabilnost i kvalitetu napajanja u promatranom razdoblju.



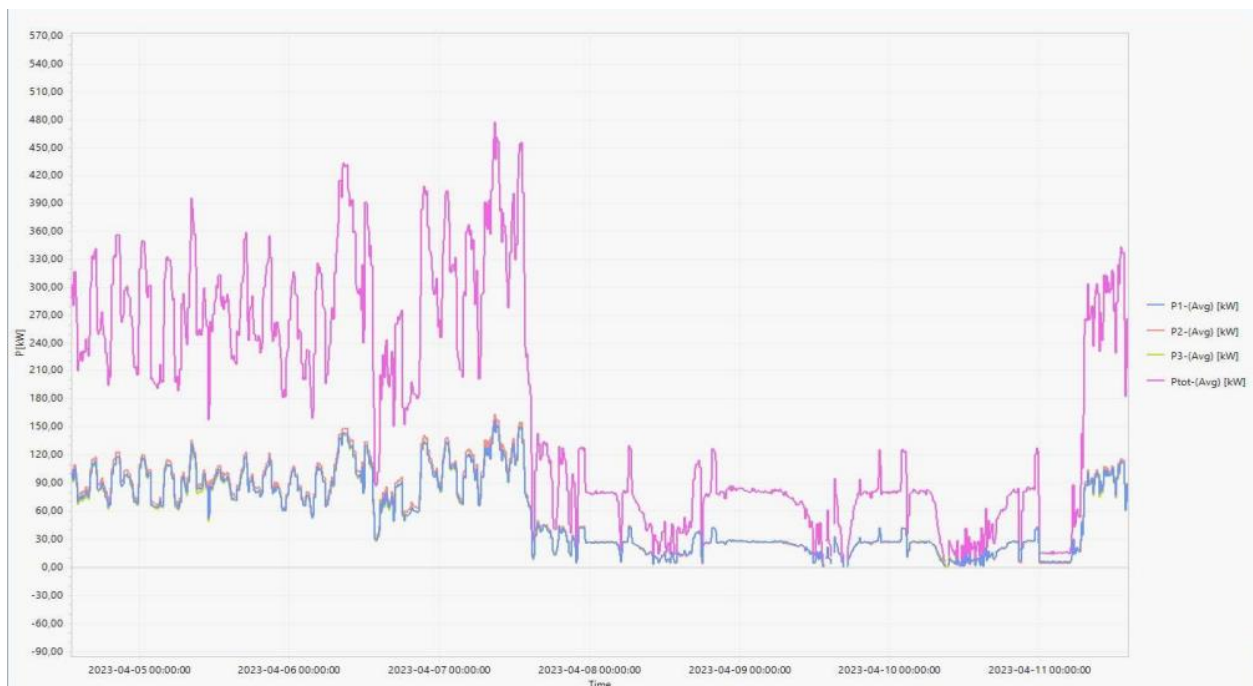
Slika 5.12. Ukupno harmonijsko izobličenje napona THDU u mjernom tjednu [14].

Na slici 5.13. prikazane su 10-minutne vrijednosti struja na priključnom mjestu Pivovare Daruvar, koje jasno pokazuju razlike u opterećenju između različitih dijelova tjedna. U prvom dijelu tjedna, koji obuhvaća radne dane (lijevi dio dijagrama na slici 5.13.), struje su značajno veće jer je Pivovara u redovnom pogonu. U drugom dijelu tjedna, koji obuhvaća produženi vikend (desni dio dijagrama na slici 5.13.), struje su značajno niže, što održava rad Pivovare s minimalnim pogonom.



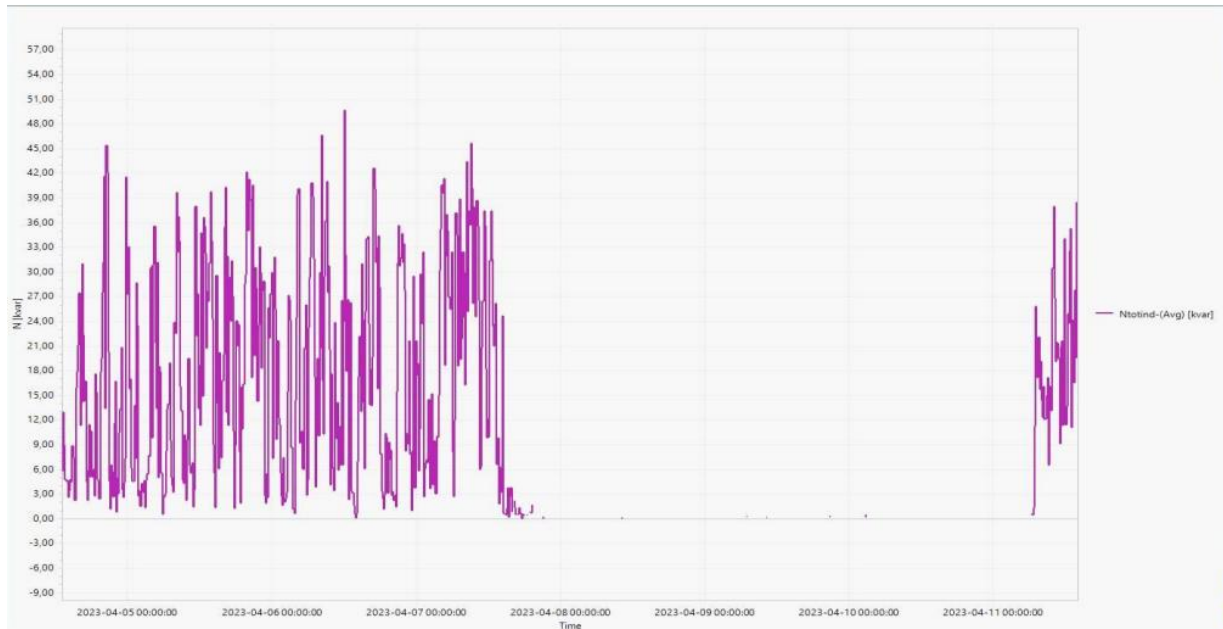


Slika 5.13. 10-minutne vrijednosti struja na priključnom mjestu Pivovare Daruvar, tijekom mjernog tjedna [14]. U drugom dijelu tjedna, kada je bio produženi vikend, vidljivo je da su struje bile niže jer je Pivovara radila s minimalnim opterećenjem. Također se može uočiti da je sunčana elektrana bila aktivna, što je dodatno smanjilo opterećenje. Ovi su podaci potvrđeni na slici 5.14., koja pokazuje kako su se djelatne snage mijenjale između radnih dana i vikenda te utjecaj sunčane elektrane na ukupnu potrošnju energije.



Slika 5.14. 10-minutne vrijednosti djelatnih snaga na priključnom mjestu Pivovare Daruvar, tijekom mjernog tjedna [14].

Na slici 5.15. prikazane su 10-minutne vrijednosti jalove snage na priključnom mjestu Pivovare Daruvar. Ovdje se također jasno uočava razlika u snagama između prvog i drugog dijela mjernog tjedna. U prvom dijelu tjedna (radni dani) zabilježene su vrijednosti jalove snage u iznosu do 49,61 kVAR. U drugom dijelu tjedna (produženi vikend), gdje prevladava proizvodnja sunčane elektrane uz minimalnu potrošnju pogona Pivovare, jalova snaga gotovo da nije zabilježena.



Slika 5.15. 10-minutne vrijednosti jalove snage na priključnom mjestu Pivovare Daruvar, tijekom mjernog tjedna [14].

### 5.3. Komentar izvršenog mjerenja

Mjerenje se provelo pomoću mjernih uređaja Metrel MI 2892 – PowerMaster te Metrel A 1227 – strujna kliješta.

Iz izvršenih i prikazanih mjerenja parametara kvalitete električne energije može se zaključiti da elektrana SE Pivovara Daruvar radi sukladno zahtjevima norme HRN EN 50160 te niti u jednome trenutku ne ugrožava kvalitetu opskrbnog napona na priključnom mjestu na 10 kV strani niti u dijelu distribucijske mreže HEP ODS DP „Elektra“ Križ.

## 6. ZAKLJUČAK

Fotonaponske elektrane kao obnovljivi izvor električne energije osim što donosi brojne benefite glede očuvanja okoliša, ekonomske isplativosti i modernog pristupa korištenja električne energije, također donosi brojne izazove glede očuvanja kvalitete napona i utjecaja na distributivnu mrežu. Uvijek je važno imati na umu da su podložne vanjskim uvjetima i promjenama te da uvelike mogu utjecati i mijenjati sliku distributivne mreže na koju su priključene. Kako bi se održala sigurnost i održivost elektroenergetskog sustava, pri projektiranju elektrane određene snage i povezivanju na mrežu, moraju se zadovoljiti i poštovati određene norme i pravila. Norma HRN EN 50160, koja je već spomenuta u radu, daje jasne granične vrijednosti parametara koje elektrana mora zadovoljiti prilikom puštanja u rad i povezivanja s mrežom.

Pri mjerenju kvalitete električne energije glavni razmatrani parametri su vrijednosti napona (propadi, naponski prekidi, kolebanja), flikera, harmonika, nesimetrije napona, vrijednosti struja i snaga koji su bili provedeni u praktičnom dijelu diplomskog rada prilikom mjerenja kvalitete i utjecaja na mrežu SE Pivovara Daruvar.

## LITERATURA

- [1] Integration of distributed generation in the power systems, Math Bollen, Fainan Hassan, New Jersey, 2011.
- [2] ABB TECHNICAL APPLICATION PAPER Photovoltaic plants Cutting edge technology. From sun to socket, 2019.
- [3] Celestial Sphere el.svg, Autor: Francisco Javier Blanco González, 4. srpnja 2014.
- [4] PVGIS, dostupno na: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/), [27.07.2024.]
- [5] Shrack Technik električne instalacije priručnik, Vladimir Rodeš, Josip Zdenković, Zagreb, 2024.
- [6] Electrical Power Systems Quality/ Rodger C. Dugan, Mark F. McGranahan, Surya Santoso, H, Wayne Beaty
- [7] Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems Henryk Markiewicz & Antoni Klajn Wroclaw University of Technology July 2004
- [8] NARUŠENA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE I KORISNICI MREŽE, mr. sc. Irena Šagovac, dipl. ing., str.(14-20), 29. listopada 2019
- [9] PRAKTIČNA UPORABA REZULTATA MJERENJA KVALITETE NAPONA U DIJAGNOSTICI FLIKERA, Nenad Rudan, dipl. ing. el. Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, str. (5-8), Umag, 16. – 19. svibnja 2010.
- [10] Handbook of Power Quality, Angelo Baggi, University of Bergamo, Italy, 2008
- [11] Mrežna pravila distribucijskog sustava NN 74/2018-1539
- [12] HEP ODS Mrežna pravila distribucijskog sustava, 2018.
- [13] Metrel [online], Dostupno na: <https://www.metrel.si/en/> [23.12.2024].
- [14] Izvješće o mjerenju kvalitete napona Pivovara Daruvar

## SAŽETAK

Diplomski rad prolazi kroz teorijska i praktična znanja iz područja kvalitete električne energije i fotonaponske tehnologije. Sastoji se od dva dijela, a to su teorijski dio i praktični dio. U teorijskom dijelu razrađeno je poglavlje o fotonaponskim elektranama, njenim ključnim funkcionalnim dijelovima (FN moduli, DC kabeli, inverteri) gdje su prikazane njihove tehničke karakteristike.

Također, teorijski se dio bavi i vanjskim utjecajima na proizvodnju električne energije (Temperatura, zasjenjenje, intenzitet svjetlosnog zračenja, položaj sunca) te parametrima koje je nužno poznavati pri dobivanju optimalne proizvodnje električne energije.

Teorijskim dijelom obuhvaćeno je poglavlje o kvaliteti električne energije te svim parametrima koji ju grade i pojavama koji ju mogu narušiti. Obradena je norma HRN EN 50160 koja je služila kao temelj opisivanja pokazatelja kvalitete električne energije (kolebanje napona, flikeri, propadi, harmonici, prenaponi i visoki naponi, nesimetrija napona) i graničnih vrijednosti koji se moraju poštovati kako se ne bi narušila kvaliteta mreže.

Također je teorijskim dijelom opisan spoj elektrane s mrežom te njenim utjecajem (pozitivnim i negativnim) na istu. Opisana je razina integracije fotonaponskih elektrana u elektroenergetsku mrežu te prikazana krivulja utjecaja integracije DG na mrežu.

Praktičnim dijelom je provedeno mjerenje kvalitete električne energije na primjeru jedne 220 kW sunčane elektrane SE Pivovara Daruvar te je analizom rezultata mjerenja dokazano da su svi promatrani parametri unutar zadanog ograničenja navedenog u normi HRN EN 50160.

**Ključne riječi:** Fotonaponska elektrana, kvaliteta električne energije, distributivna mreža, harmonijsko izobličenje, mjerenje kvalitete električne energije

## **SUMMARY**

The thesis covers both theoretical and practical knowledge in the field of power quality and photovoltaic technology. The theoretical part elaborates on the chapter about PV power plants, their key functional components (PV modules, DC cables, inverters), where their technical characteristics are presented.

Additionally, the theoretical part addresses external influences on electricity production (temperature, shading, light radiation intensity, sun position) and the parameters necessary to know for achieving optimal electricity production.

The theoretical section also includes a chapter on power quality and all the parameters that constitute it, as well as the phenomena that can degrade it. The HRN EN 50160 standard is described, which serves as the basis for describing power quality indices (voltage fluctuations, flickers, dips, harmonics, overvoltages, and high voltages, voltage asymmetry) and the limit values that must be adhered to in order not to degrade the quality of the grid.

The theoretical part also describes the connection of the power plant to the grid and its impact (both positive and negative) on it. The level of integration of PV plant into the power grid is described, and the impact curve of DG integration on the grid is presented.

The practical part involved measuring the power quality on the example of a 220 kW solar power plant, SE Pivovara Daruvar, and the results of the measurement demonstrated that all observed parameters are within the specified limits outlined in the HRN EN 50160 standard.

### **Key words:**

Photovoltaic power plant, power quality, distribution network, irradiation, shading, harmonic distortion, power quality measurement.

## ŽIVOTOPIS

Mislav Opačak rođen je 16. srpnja 1999. godine u Osijeku. Svoje obrazovanje započinje u Osnovnoj školi Darda nakon koje upisuje Opću gimnaziju u Osijeku. Nakon uspješno položene državne mature upisuje Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektrotehnika. 2021. godine stječe akademsko zvanje univ.bacc.ing.el. te nastavlja svoje visokoškolsko obrazovanje na diplomskom studiju, smjer održiva elektroenergetika (DEB).

Na prvoj godini diplomskog studija odlučuje se izvršiti stručnu praksu u trajanju od 6 mjeseci u HEP ODS u odjelu za realizaciju investicijskih projekata i pristup mreži, gdje se upoznao s raznim softverskim alatima za dimenzioniranje zaštite, procesom izgradnje i priključka sunčanih elektrana na elektroenergetsku distributivnu mrežu, kao i s modeliranjem i izgradnjom objekata (transformatorske stanice 10/0,4kV).

Na drugoj godini diplomskog studija obavlja obaveznu stručnu praksu u HEP ODS u odjelu za vođenje pogona i zaštitu u elektroenergetskom sustavu, gdje se upoznao s vrstama zaštite s obzirom na izvedbu koja se koristi u elektroenergetskom sustavu Elektroslavonije. Također, prisustvovao je revizijama postrojenja TS 35/10 kV, ispitivanju zaštite te je obilazio visokonaponska postrojenja TS110/35/10(20) kV Osijek 3 te TS 110/20(10) kV Osijek 4.

Na drugoj godini diplomskog studija 2023. godine prijavljuje se na program razmjene studenata (Erasmus + projekt) na sveučilište Hochschule Bremen, Njemačka te ljetni semestar polaže na fakultetu „Faculty of electronics“ Bremen. Nakon uspješno položenih kolegija, iste godine se zapošljava kao student u osječkoj tvrtki za projektiranje i izvedbu fotonaponskih elektrana. Na toj poziciji radi kao projektant od listopada 2023. do svibnja 2024. godine, stječući vrijedno praktično iskustvo u projektiranju komercijalnih i industrijskih fotonaponskih elektrana te se upoznao sa svim čimbenicima i parametrima koje je potrebno uzeti u obzir tijekom procesa projektiranja.

Svoje akademsko obrazovanje završava obranom diplomskog rada pod temom „Utjecaj fotonaponske elektrane na kvalitetu električne energije“ pod mentorstvom prof.dr.sc. Zvonimira Klaića. Svoje profesionalno usmjerenje i daljnje usavršavanje nastavlja u području visokonaponskih postrojenja.