

# Utjecaj priključenja sunčanih elektrana na pogon niskonaponske distribucijske mreže

---

**Vugrinec, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:017537>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**UTJECAJ PRIKLJUČENJA SUNČANIH ELEKTRANA NA  
POGON NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE**

Rijeka, rujan 2022.

Dominik Vugrinec  
0069086930

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**UTJECAJ PRIKLJUČENJA SUNČANIH ELEKTRANA NA  
POGON NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE**

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, rujan 2022.

Dominik Vugrinec

0069086930

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Električna postrojenja**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Dominik Vugrinec (0069086930)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike**

Zadatak: **Utjecaj priključenja sunčanih elektrana na pogon niskonaponske distribucijske mreže / Influence of PV power plant connection on low voltage distribution network operation**

### Opis zadatka:

Uvodno o distribucijskim mrežama i priključenju obnovljivih izvora energije na niskonaponsku (NN) distribucijsku mrežu. Opisati sunčane elektrane (osnovni elementi, načelo rada, pogonske karakteristike). Na primjeru stvarne NN mreže ispitati utjecaj priključenja sunčanih elektrana osobito na naponski profil te na razinu struje kratkog spoja.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Dominik Vugrinec*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

Prof. dr. sc. Viktor Sučić

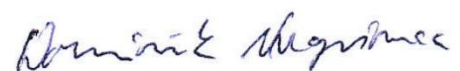
SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

**IZJAVA**

Sukladno s člankom 9. stavak 1) Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „ Utjecaj priključenja sunčanih elektrana na pogon niskonaponske distribucijske mreže“, od 21.03.2022. godine, koristeći se navedenom literaturom, znanjem stečenim tijekom dosadašnjeg studija i konzultacijama s mentorom prof. dr. sc. Dubravkom Frankovićem.

Rijeka, rujan 2022.



---

Dominik Vugrinec

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću na nesebičnoj pomoći, prijedlozima i smjernicama pri izradi ovog rada.

Također, zahvaljujem svojim roditeljima, djevojci, sestri, braći i prijateljima kao i svim profesorima i asistentima na bezuvjetnoj podršci, pomoći i razumijevanju tijekom cijelog školovanja.

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV .....	2
2.1.    Prijenosna mreža .....	4
2.2.    Distribucijska mreža .....	4
2.2.1. Vrste niskonaponskih distribucijskih mreža .....	6
3. PRIKLJUČENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA NISKONAPONSKU DISTRIBUCIJSKU MREŽU .....	8
3.1.    Atesti, mjerenja i ispitivanja .....	9
3.2.    Pokusni rad.....	10
3.3.    Zaštita.....	11
3.4.    Proračun .....	12
3.4.1. Proračun minimalnog i maksimalnog istosmjernog napona na ulazu u pretvarač.....	12
3.4.2. Proračun istosmjernog kabela na ulazu u pretvarač.....	13
3.4.3. Odabir izmjeničnog kabela na izlaznoj strani pretvarača .....	14
3.4.4. Proračun ukupnih gubitaka sunčane elektrane.....	14
4. SUNČANE ELEKTRANE.....	15
4.1.    Sunčeva energija .....	15
4.2.    Solarne termoelektrane .....	15
4.3.    Fotonaponske elektrane .....	16
4.3.1. Fotonaponske ćelije .....	17
4.4.    Fotonaponski sustavi.....	21
4.4.1. Fotonaponski modul.....	21
4.4.2. Ostale komponente fotonaponskog sustava .....	22
4.5.    Pogonske karakteristike sunčane elektrane „SOLEKTRA IX“ snage 999 kW .....	26
4.5.1. Fotonaponski modul.....	26
4.5.2. Izmjenjivač.....	27

5. UTJECAJ SUNČANE ELEKTRANE NA POGON NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE.....	28
5.1. Sunčana elektrana „SOLARNI KROV ŠPANSKO-ZAGREB“.....	28
5.1.1. Mjerenja .....	30
6. UTJECAJ PRIKLJUČENJA SUNČANE ELEKTRANE NA PRIMJERU STVARNE NISKONAPONSKE MREŽE – NEPLAN .....	37
6.1. Utjecaj sunčane elektrane na padove napona na čvorovima.....	38
6.2. Utjecaj sunčane elektrane na jednopolnu i tropolnu struju kratkog spoja .....	41
7. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	48
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	49
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLLESKOM JEZIKU .....	50



## 1. UVOD

S obzirom na današnji stil života i potrebe za velikim količinama električne energije, nužna je i njezina proizvodnja. Samim time nameće se neizbježno pitanje poskupljenja energenata, pa su logičan odgovor obnovljivi izvori energije. Glavni razlozi korištenja obnovljivih izvora energije su ograničavanje emisije CO<sub>2</sub> i zaštita okoliša. Obnovljivi izvori energije su svi izvori koji se mogu crpiti iz prirode u neograničenim količinama i koji se mogu obnavljati. Neki od obnovljivih izvora energije su energija vjetra, sunca i vode, kruta biomasa, bioplin, tekuće biogorivo, geotermalni izvori. Sve značajniji obnovljivi izvori energije su sunčane ili fotonaponske elektrane koje rade na principu korištenja izravne sunčeve svjetlosti za pretvorbu u električnu energiju, a fotonaponski paneli se koriste kao osnovni element za tu pretvorbu.

Sunčane elektrane koriste se od malih proizvodnih pogona i kućnih upotreba pa do velikih industrijskih postrojenja, no odluka o podizanju vlastite energetske neovisnosti će najviše ovisiti o cijenama sustava koji će se ugraditi i uštedi koju je moguće ostvariti. Naravno, geografski položaj Hrvatske uvelike pripomaže sve većoj potražnji za izgradnjom sunčanih elektrana.

Naravno, svaki priključak distribuiranog izvora (najvećem dijelu sunčane elektrane) vrši svoje dobre i loše utjecaje na distribucijsku mrežu, među kojima se ističu utjecaj na naponski profil i struju kratkog spoja, utjecaj na kvalitetu električne energije i gubitke u mreži.

U ovom radu razmatran je utjecaj priključenja distribuiranog izvora na pogon niskonaponske distribucijske mreže, opisani su elementi sunčanih elektrana, načelo rada i pogonske karakteristike sunčane elektrane.

U računalnom programu NEPLAN na primjeru realne niskonaponske distribucijske mreže ispitan je utjecaj priključenja sunčane elektrane na naponski profil te na razinu struje kratkog spoja.

## 2. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

Elektroenergetski sustav (EES) čine četiri osnovne cjeline, a to su proizvodni objekti odnosno elektrane, prijenosna i distribucijska mreža i potrošači električne energije, te podrazumijeva sve njihove objekte, postrojenja i uređaje.

Hrvatski elektroenergetski sustav povezan je sa elektroenergetskim sustavima susjednih država i ostalim sustavima članica ENTSO-E radi sigurne i kvalitetne razmjene električne energije i opskrbe kupaca električnom energijom [1].

Prema namjeni razlikujemo elektroenergetske mreže za prijenos i za distribuciju tj. razdiobu električne energije. Uloga elektroenergetskih mreža su povezanost svih dijelova EES-a, utjecaj pogonskog stanja u jednom dijelu sustava na ostale sustave, paralelni rad svih elektrana s istom frekvencijom.

Distribuirana proizvodnja električne energije proizvodnja unutar razdjelne mreže u blizini mjesta potrošnje, što znači da je svaki distribuirani izvor onaj koji je priključen na razdjelnu mrežu [4].



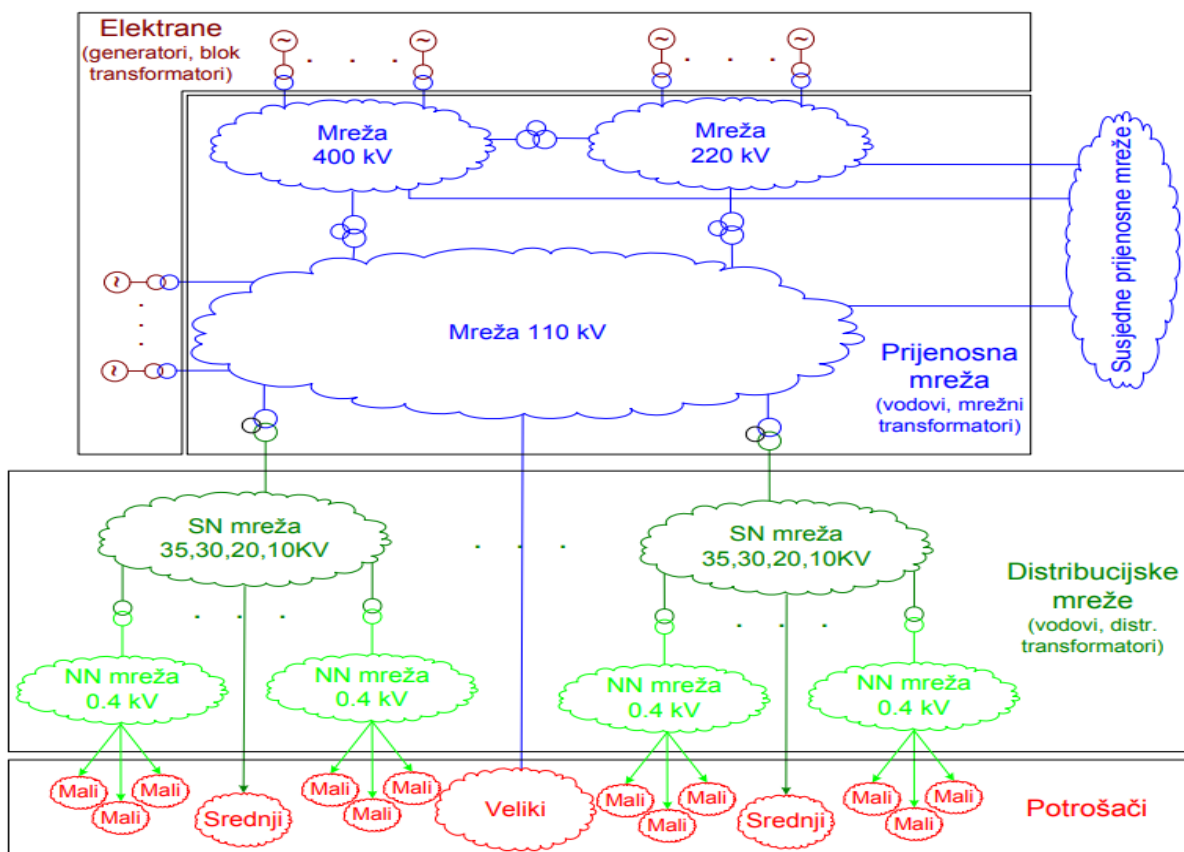
Slika 2.1. Shematski prikaz EE sustava RH [1]

Elektroenergetske mreže dijele se prema [3]:

- vrsti struje koja može biti istosmjerna i izmjenična,
- električnoj veličini (napon ili struja) kojom se vrši prilagođenje sustava promjenjivoj snazi,
- nazivnom naponu mreže koji može biti niski, srednji, visoki ili vrlo visoki napon mreže,
- funkciji mreže (prijenosne ili distribucijske mreže),
- obliku mreže,
- izvedbi mreže (nadzemne ili podzemne),
- vrsti uzemljenja zvjezdišta (neutralne nultočke).

Elementi elektroenergetskih mreža su elektrane, elektroenergetska postrojenja, elektroenergetski vodovi i potrošačka postrojenja i instalacije.

Današnje elektroenergetske mreže su isključivo trofazne mreže frekvencije 50 ili 60 Hz. Izuzetak su podsustavi trofaznih istosmjernih prijenosnih sustava. Oni se koriste u slučajevima gdje je potreban prijenos električne energije kabelskim vodovima na veće udaljenosti, pri povezivanju dva EES-a različitih frekvencija ili kada je to ekonomski opravdano [2].

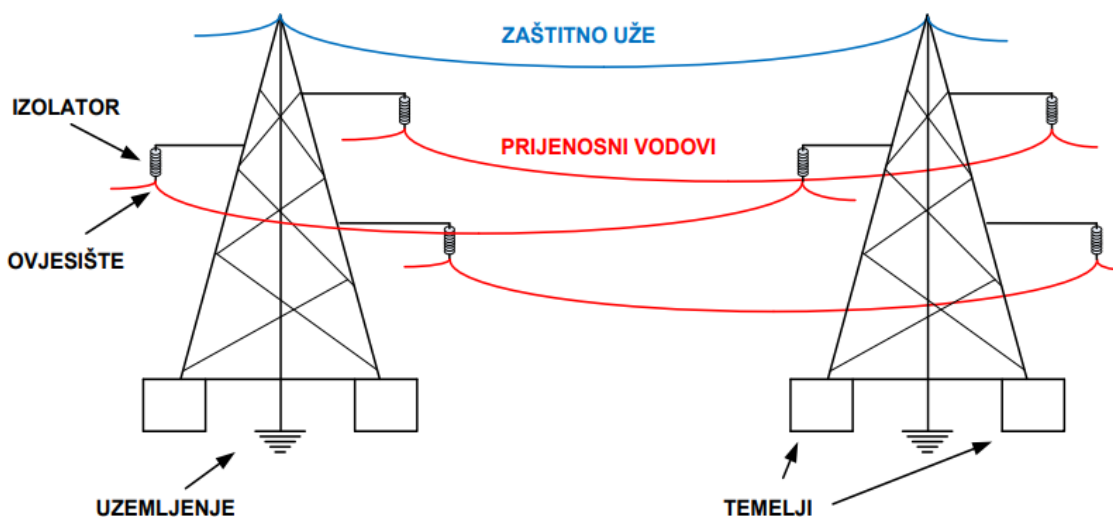


Slika 2.2. Primjer elektroenergetske mreže [2]

## 2.1. Prijenosna mreža

Prijenosne mreže su mreže visokog i vrlo visokog napona (110 kV, 220 kV, 400 kV) te prenose električnu energiju velikih elektrana s velikim potrošačkim centrima do distribucijske mreže i služi za razmjenu snaga među povezanim elektroenergetskim sustavima. Sastoje se od zračnih i kabljskih vodova i rasklopnih postrojenja preko kojih se električna energija iz jednog naponskog nivoa transformira u drugi. Prijenosne mreže su u pogonu su zatvorene zamkaste mreže tj. elektroenergetske mreže napajane iz više izvora, a lokacije čvorova elektroenergetskog postrojenja su čvrsto vezane za lokacije velikih izvora i potrošačkih postrojenja.

Ukupni gubici ostvareni u prijenosnim mrežama iznose 373 GWh odnosno 1.74 % za 2020. godinu, a 478 GWh odnosno 1.98 % za 2021. godinu. [3].



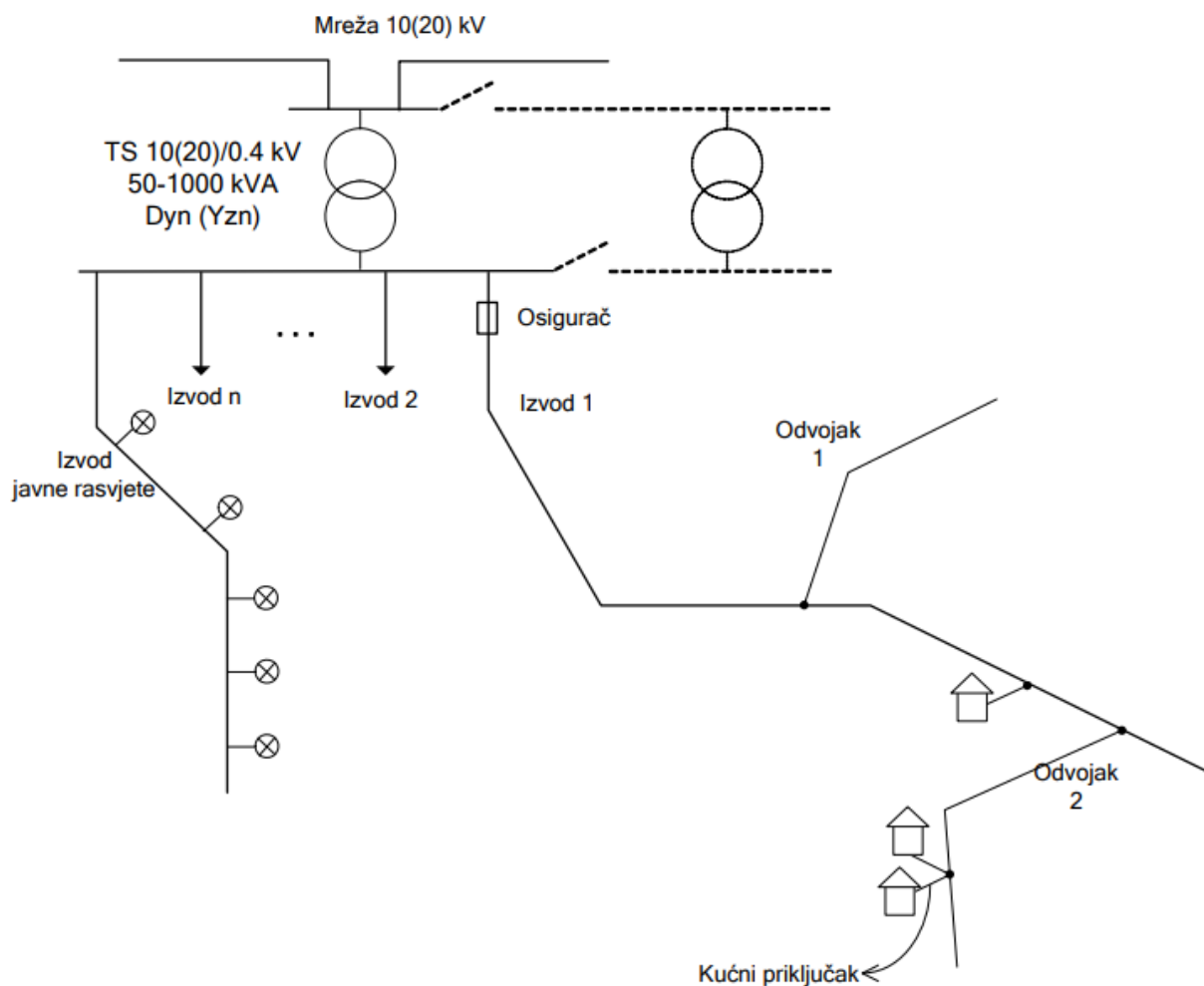
Slika 2.3. Elektroenergetski vodovi [3]

## 2.2. Distribucijska mreža

Distribucijska mreža služi za prijenos manjih količina energije na manje duljine do krajnjih korisnika srednjih i malih potrošača. Distribucijska mreža se napaja iz prijenosne mreže, a opskrba potrošača električnom energijom se vrši putem transformatorskih stanica najniže naponske razine 10(20)/0,4 kV, dok se za industrijske ili veće potrošače opskrba vrši direktno sa 10(20) kV. Distribucijska mreža se sastoji od zračnih i kabljskih vodova i rasklopnih postrojenja manjih nazivnih napona u odnosu na prijenosnu mrežu budući je snaga koju prenosi distribucijska mreža višestruko manja od snage koju prenosi prijenosna mreža [2].

Distribucijske mreže su u pogonu većim dijelom otvorene strukture odnosno radijalne mreže (radijalni vod i radijalni otcjepi sa grananjem), a u izvedbi su najčešće prstenaste mreže (prsten s radijalnim otcjepima). Kod prstenastih mreža je u slučaju kvara jednog voda ili transformatora moguće napajati potrošače iz drugog smjera, budući je napajanje iz drugog smjera rezervno. Prstenaste mreže se koriste u gradskim distributivnim mrežama. Kod radijalnih i prstenastih mreža elektroenergetska mreža je napajana iz jednog izvora [2].

Niskonaponska distribucijska mreža se napaja iz TS 10(20)/0,4 kV. Transformator (ili rjeđe dva transformatora) je direktno uzemljen na niskonaponskoj strani. Transformatorskim niskonaponskim izvodima napaja se velika većina potrošača distributivne niskonaponske mreže (400 V). Javna rasvjeta obično ima odvojene izvode za napajanje, no postoje i viševodički izvodi u posebnim slučajevima kada se potrošači napajaju s tri voda, a s dodatnom jednom ili dvije faze (i eventualno zajedničkim nul vodom) u posebnom strujnom krugu se napaja javna rasvjeta.



Slika 2.4. Primjer niskonaponske mreže sa javnom rasvjetom i potrošačima [2]

### 2.2.1. Vrste niskonaponskih distribucijskih mreža

Niskonaponska mreža može biti [2]:

- nadzemna mreža sa klasičnim golim vodičima (Al-Fe),
- nadzemna mreža sa izoliranim vodičima (SKS),
- kabela mreža.

Vrste niskonaponskih mreža s obzirom na uzemljenje trafostanice razlikuju se prema načinu uzemljenja potrošača odnosno sekundara trafostanice. Moguće varijante mreža su TN, TN-C, TN-C-S, TN-S, TT i IT mreža. U oznaci mreže prvo slovo se odnosi na uzemljenje transformatora pri čemu slovo T označava direktno uzemljenje, a slovo I prikazuje izolirano uzemljenje. Drugo slovo u oznaci odnosi se na način uzemljenja vodljivih dijelova potrošačkih uređaja, pri čemu se slovo N odnosi na uzemljenje preko nultog ili zaštitnog vodiča, a slovo T se odnosi na direktno uzemljenje na vlastiti uzemljivač. Dodatne oznake u TN mrežama odnose se na nulti i zaštitni vodič, pri čemu slovo S prikazuje da su nul vodič i zaštitni vodič odvojeni u cijeloj mreži, a slovo C prikazuje da su nul vodič i zaštitni vodič izvedeni kao jedan vodič kroz koji teče pogonska struja i u posebnom slučaju struja kvara [2].

Distribucijska mreža sastoji se od sljedećih elemenata:

- nadzemni vodovi,
  - stupovi,
  - vodiči,
  - izolatori,
  - zaštitno uže i uzemljenje stupa,
  - temelji
  - samonosivi kabelski snop
- kabelski vodovi,
  - podzemni kabeli,
  - podmorski kabeli,
- transformatori,
  - energetske,
  - mjerni,
  - specijalni
- potrošači,

Distribuirani izvori električne energije su svi izvori električne energije koji su priključeni na distribucijsku mrežu. Distribuirani izvori se konstruiraju u opsegu snage između 3 kW i 10 MW.

Podjela distribuiranih izvora energije dijeli se na:

- unutarnje izgaranje,
- vanjsko izgaranje,
- pohrana energije,
- obnovljivi izvori,
- gorive ćelije.

### 3. PRIKLJUČENJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA NISKONAPONSKU DISTRIBUCIJSKU MREŽU

Prema mrežnim pravilima distribucijskog sustava na niskonaponsku mrežu moguće je priključiti postrojenje ili instalaciju pojedinačnog proizvođača priključne snage do uključivo 500 kW, prema niže navedenim kriterijima:

Tablica 3.1. Niskonaponski priključak

NN jednofazni priključak	NN trofazni priključak
do 3,68 kW	do 100 kW na NN vod ili do 500 kW na sabirnicu transformatora

Kod instalirane snage elektrane do uključivo 3,68 kW pri jednofaznoj NN razini kao uređaj za odvajanje se koristi dvopolna rastavna osigurač – sklopka.

Pri instaliranoj snazi elektrane do uključivo 50 kW na trofaznoj NN razini kao uređaj za odvajanje se koristi četveropolna rastavna osigurač – sklopka.

Pri instaliranoj snazi elektrane većoj od 50 kW do uključivo 100 kW na trofaznoj NN razini kao uređaj za odvajanje se koristi četveropolna rastavna osigurač – sklopka osim u slučajevima kada je doprinos snazi trolnog kratkog spoja jednak ili veći od priključne snage kupca s vlastitom proizvodnjom u smjeru potrošnje ( $P_{\text{PROIZVODNJA}} * 1,1 \geq P_{\text{POTROŠNJA}}$ ) kada se kao uređaj za odvajanje koristi četveropolni prekidač.

Kod instalirane snage elektrane do uključivo 500 kW na trofaznoj NN razini kao uređaj za odvajanje se koristi četveropolni prekidač.

Proizvođači veći od 500 kW priključuju se na trofaznu SN mrežu.

Kako bi se obnovljivi izvori priključili na distribucijsku mrežu potrebno je izvršiti niz ispitivanja i analiza utjecaja elektrane na mrežu. Također je potrebna i popratna dokumentacija za priključak elektrane na mrežu u kojoj se javljaju pitanja tehničkih, ekonomskih i pravnih aspekata priključenja. U popratnoj dokumentaciji potrebno je opisati mjere zaštite na radu, program kontrole, osiguranja kvalitete i gospodarenja otpadom te priložiti opću dokumentaciju (dozvole, izvratke, izvave i rješenja).



Maksimalna instalirana snaga elektrane (u smjeru proizvodnje) kategorije kućanstvo može biti jednakog iznosa kojeg je i zakupljena priključna snaga u smjeru potrošnje (za trofazni priključak), dok je za jednofazni priključak ograničena snaga u smjeru proizvodnje na 3,68 kW, a u HEP ODS-u je potrebno predati zahtjev za provjeru mogućnosti priključenja kućanstva s vlastitom proizvodnjom sa svim potrebnim priložima (punomoć za zastupanje (kada zahtjev podnosi opunomoćenik), glavni projekt ili idejni projekt ili idejno rješenje (tehnički opis) proizvodnog postrojenja, dokaz o vlasništvu ili drugom stvarnom pravu, izjava korisnika mreže o pravnom interesu (u slučaju suvlasništva na građevini)) [5].

Za elektrane kategorije poduzetništvo maksimalna instalirana snaga elektrane (u smjeru proizvodnje) može biti jednakog iznosa kojeg je i zakupljena priključna snaga u smjeru potrošnje, a HEP ODS-u je potrebno predati zahtjev za izdavanje elektroenergetske suglasnosti sa svim potrebnim priložima (punomoć za zastupanje (kada zahtjev podnosi opunomoćenik), tehnički opis građevine, izvadak iz katastarskog plana, odnosno odgovarajuću podlogu s ucertanom građevinom, dokaz vlasništva ili drugog stvarnog prava (samo u slučaju promjene na priključku postojeće građevine), potpisan ugovor o priključenju (samo kod složenog priključenja), dokaz o legalnosti građevine i vlasništvu (samo za legalizirane građevine)). Za elektrane instalirane snage do 50 kW kategorije poduzetništvo potrebno je izraditi operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu (OPIP), dok je za elektrane s instaliranom snagom većom od 50 kW do uključivo 100 kW potrebno izraditi operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu (OPIP), elaborat podešenja zaštite (EPZ) i elaborat utjecaja na elektroenergetsku mrežu (EUEM) [5].

U tehničkom dijelu dokumentacije (glavnom projektu elektrane) opisuje se način rada elektrane koja se priključuje na distribucijsku mrežu, popis potrebne opreme za izvođenje i ispitivanje električnih instalacija, opis pokusnog rada i zaštite od udara munje, prenapona, nadstruje, kao i zaštita napona dodira. U popratnoj dokumentaciji je potrebno izvršiti proračune prilika na DC i AC razvodu, izvršiti proračune ukupnih gubitaka kao i ukupne učinkovitosti elektrane. Potrebno je navesti grafičke prikaze situacije i shematski prikaz elektrane.

### **3.1. Atesti, mjerenja i ispitivanja**

Kako bi se elektrana pustila u pogon potrebno je po završetku radova izvršiti ispitivanja elektroinstalacije te priložiti odgovarajuće ateste. Elektrana se pušta u pogon tek nakon svih provedenih ispitivanja kvalitete i sigurnosti. Izvođač radova mora jamčiti o kvaliteti ugrađene opreme i izvedenih radova. Ispitivanje kvalitete izvedenih radova može provesti samo ovlaštena organizacija za ispitivanje (ovlašteni električar).

Prema normi HD 60364-6 potrebno je izvesti sljedeća ispitivanja, kad su primjenjiva i treba ih prvenstveno izvoditi sljedećim redoslijedom: [6]

- Neprekidnost vodiča, uključujući i zaštitni vodič tj. spajanje metalnih masa na SIP (kutiju za izjednačenje potencijala) ili PE (zaštitni vodič),
- izolacijski otpor električne instalacije,
- zaštita SELV (Safety Extra – Low Voltage), PELV (Protection by Extra Low Voltage) ili električnim odjeljivanjem,
- otpor/impedancija poda i zida,
- automatski sklop opskrbe (mjerjenje otpora uzemljenja uzemljivača, mjerjenje otpora petlje kvara),
- dodatna zaštita,
- ispitivanje polariteta,
- ispitivanje slijeda faza,
- funkcionalno i pogonsko ispitivanje,
- pad napona.

Uobičajena ispitivanja opreme uključuju ispitivanja razvodnog ormara, 0,4 kV kabela i sustava uzemljenja.

### **3.2. Pokusni rad**

Nakon svih mjerenja i ispitivanja te prihvaćenih i odobrenih rezultata članova za ispitivanje elektrana se pušta u probni rad. Tehničke karakteristike električne opreme će se dobiti usporedbom rezultata ispitanih parametara u pokusnom radu i vrijednosti parametara tolerancije.

Tijekom pokusnog rada vršiti će se ispitivanja i mjerenja bitnih zahtjeva prema verificiranom planu i programu ispitivanja [6]:

- Pregled i verifikacija projektno-tehničke dokumentacije sunčane elektrane,
- Pregled podešenja relejne zaštite i prekidača u nadređenoj niskonaponskoj mreži te u niskonaponskoj instalaciji kupca i elektrane,
- Provjera istoimenosti faza i okretnog polja istoimenih faza,
- Ispitivanje ulaska svakog pretvarača u paralelni pogon s distribucijskom mrežom – prva sinkronizacija elektrane,

- Ispitivanje ulaska elektrane u paralelni pogon s distribucijskom mrežom – automatska sinkronizacija elektrane,
- Ispitivanje ulaska pretvarača u paralelni pogon s mrežom bez prisutnosti faze/nule,
- Ispitivanje odziva elektrane na prekid u faznom/nultom vodiču mreže,
- Ispitivanje izlaska elektrane iz paralelnog pogona s distribucijskom mrežom,
- Ispitivanja djelovanja relejne zaštite pri odstupanju od uvjeta paralelnog pogona – provjera zaštite od otočnog rada elektrane,
- Mjerenje kvalitete električne energije na OMM-u kupca s vlastitom elektranom – prije priključenja elektrane,
- Mjerenje kvalitete električne energije na OMM-u kupca s vlastitom elektranom – s priključenom elektranom u pogonu.

### 3.3. Zaštita

Izmjenjivač ima ugrađene odvodnike prenapona na ulaznoj strani te su preko njih istosmjerni strujni krugovi štice od prenapona. Također, prenaponska zaštita se ugrađuje i u izmjenični sklopni blok. Sunčana elektrana se uzemljuje pomoću uzemljenog krovišta. Zaštita od nadstruje za istosmjerne strujne krugove izvedena je cilindričnim osiguračima, dok je zaštita izmjenične strane predviđena automatskim osiguračima tipa B [6].

**Zaštita od indirektnog napona dodira** na objektu izvodi se automatskim isklapanjem napajanja uz primjenu nadstrujnih zaštitnih uređaja i FID sklopke. Instalacijski se zaštita provodi na način da se za svako trošilo u pojnom vodu pored faznih vodiča i nultog voda polaže i posebni (žuto-zeleni) vod koji spaja zaštitni kontakt trošila i zaštitnu sabirnicu.

**Zaštita od direktnog napona dodira** vrši se izoliranjem opreme i postavljanjem opreme u odgovarajuća kućišta i izvan dohvata ruku. Uređaji koji se postavljaju otvorenoj izvedbi (sabirnice, osigurači, kontakti prekidača, sklopke i drugo) postavljaju se u zatvorena kućišta, odnosno razvodne ormare. Ispred razvodnog ormara obavezan je slobodan prostor od 80 cm potrebnih u slučaju nesreće. Taj prostor se naziva manipulativni prostor. Vrata na razvodnim ormarima moraju imati mogućnost zaključavanja te se na njima mora nalaziti oznaka upozorenja dijelova pod naponom te oznaka sustava zaštite od indirektnog dodira.

**Zaštita električnih vodova** od mehaničkog oštećenja vrši se postavljanjem vodiča u PVC cijevi, a oprema pod naponom zaštićena je pertinaksom (industrijske ploče na bazi fenolnih smola i papira).

**Zaštita glavnih napojnih vodova od struje kratkog spoja** izvedena je visokoučinskim niskonaponskim osiguračima, dok se za ostale vodove koriste rastalni odnosno automatski osigurači i zaštitni prekidači koji se postavljaju na početak vodova. Automatske osigurače i zaštitne prekidače je također potrebno postaviti na mjesta gdje se smanjuje presjek vodiča.

**Zaštita električne instalacije od prenapona** se u glavnom razvodnom ormaru izvodi odvodnicima prenapona klase 1 (B), dok se u podrazvodnim ormarima zaštita izvodi odvodnicima prenapona klase 2 (C).

### **3.4. Proračun**

Nakon tehničkog dijela dokumentacije obavezno je izvesti proračun koji se odnosi na kompletan električni razvod elektrane. Proračun je odrađen za najopterećenije elemente istog tipa u sustavu.

Proračunom je obuhvaćena kontrola [6]:

- naponskog raspona na istosmjernoj strani pretvarača,
- presjeka kabela s obzirom na zagrijavanje vodiča, padove napona i prijenosne gubitke,
- odabira nazivnih vrijednosti sklopnih naprava.

#### **3.4.1. Proračun minimalnog i maksimalnog istosmjernog napona na ulazu u pretvarač**

Proračun maksimalnog istosmjernog napona na ulazu u pretvarač se računa kada se moduli nalaze u otvorenom krugu i pri niskoj temperaturi ćelija ( $-10^{\circ}\text{C}$ ). Proračun minimalnog istosmjernog napona na ulazu u pretvarač se računa pri visokoj temperaturi ćelija ( $+60^{\circ}\text{C}$ ). [7]

### 3.4.2. Proračun istosmjernog kabela na ulazu u pretvarač

Dimenzioniranje kabela vrši se prema tri slijedeća kriterija. [7]

Prvi kriterij dimenzioniranja istosmjernog kabela na ulaznoj strani pretvarača je naponska klasa kabela. Naponska klasa PV1-F kabela koji se koristi u FN sustavima je 1800 V. Iz proračuna maksimalnog napona praznog hoda koji se računa na  $-10^{\circ}\text{C}$  je vidljivo da li napon praznog hoda prelazi klasu PV1-F kabela.

Dimenzioniranje kabela se također vrši prema kriteriju za maksimalno strujno opterećenje kabela. Veličina presjeka kabela određuje se prema maksimalnoj struji koja može teći kabelom. Izraz za maksimalnu struju koja može teći kabelom niza ili modulom računa se prema izrazu (3.1):

$$I_{MAX} = I_{SCPV} - I_{SCstring} \quad (3.1)$$

gdje je:

$I_{SCPV}$             razlika struje kratkog spoja FN generatora,

$I_{SCstring}$         struja kratkog spoja jednog niza.

Struja  $I_{MAX}$  je struja prema kojoj se dimenzionira kabel, a postoji i opcija kada se koriste osigurači koji će štititi kabel od preopterećenja. Svi zaštitni uređaji i kabeli odabiru se prema dozvoljenoj maksimalnoj struji opterećenja, odnosno, dozvoljene maksimalne struje opterećenja kabela i uređaja moraju biti veće od maksimalne struje u pogonu. Kabeli nizova moraju podnositi 25% veću struju od struje kratkog spoja FN generatora. Kabeli nizova se moraju polagati tako da se osiguraju od kratkog spoja ili zemljospoja.

Treći kriterij za dimenzioniranje kabela je minimiziranje gubitaka u kabelima. U standardnim uvjetima testiranja gubitak energije u svim istosmjernim kabelima se ograničava na najviše 1%. Kod dimenzioniranja presjeka kabela uzimaju se u obzir što manji mogući gubici u kabelima odnosno što manji padovi napona.

### 3.4.3. Odabir izmjeničnog kabela na izlaznoj strani pretvarača

U proračunu presjeka izmjeničnog priključnog kabela od pretvarača do priključne točke na pripadajućoj razdjelnici dozvoljava se najveće naponsko nadvišenje od 3% u odnosu na nazivni napon mreže. Također je potrebno provesti kontrolu za maksimalno dozvoljeno strujno opterećenje za višežilne vodove koji su položeni u kabelaške kanale. [7]

### 3.4.4. Proračun ukupnih gubitaka sunčane elektrane

Ukupni gubici sunčane elektrane računaju se prema izrazu (3.2):

$$P_{Guk} = P_{DC} + P_{AC} + \Sigma P_{Gpr} \quad (3.2)$$

gdje je:

$P_{DC}$  gubitak snage u istosmjernom kabelskom razvodu

$P_{AC}$  gubitak snage u izmjeničnom kabelskom razvodu

$P_{Gpr}$  suma gubitaka snaga u pretvaračima

## **4. SUNČANE ELEKTRANE**

### **4.1. Sunčeva energija**

Energija sunca konstantno pristiže na Zemlju u obliku zračenja svjetlosti i topline sa površine Sunca, a dva osnovna tipa iskorištavanja sunčeve energije su proizvodnja električne energije u fotonaponskim (u daljnjem radu FN) sustavima i proizvodnja toplinske energije pomoću solarnih kolektora. Naravno, sunčeva energija se ne iskorištava u potpunosti, već se koristi i upotrebljava nemjerljivo maleni dio raspoložive sunčeve energije. Sunčeva energija je u potpunosti besplatna te sačinjava većinu raspoložive obnovljive energije.

Danas postoje te su razvijena dva načina pretvorbe energije Sunčevog zračenja u električnu energiju, a to su pomoću solarnih termoelektrana i pomoću fotonaponske elektrane. Na području Hrvatske se ne nalazi niti jedna solarna termoelektrana.

### **4.2. Solarne termoelektrane**

Solarne termoelektrane pretvaraju energiju sunčevog zračenja u toplinsku, koja se pomoću turbine u toplinskom kružnom procesu pretvara u mehaničku energiju. Mehanička energija zatim pogoni generator.

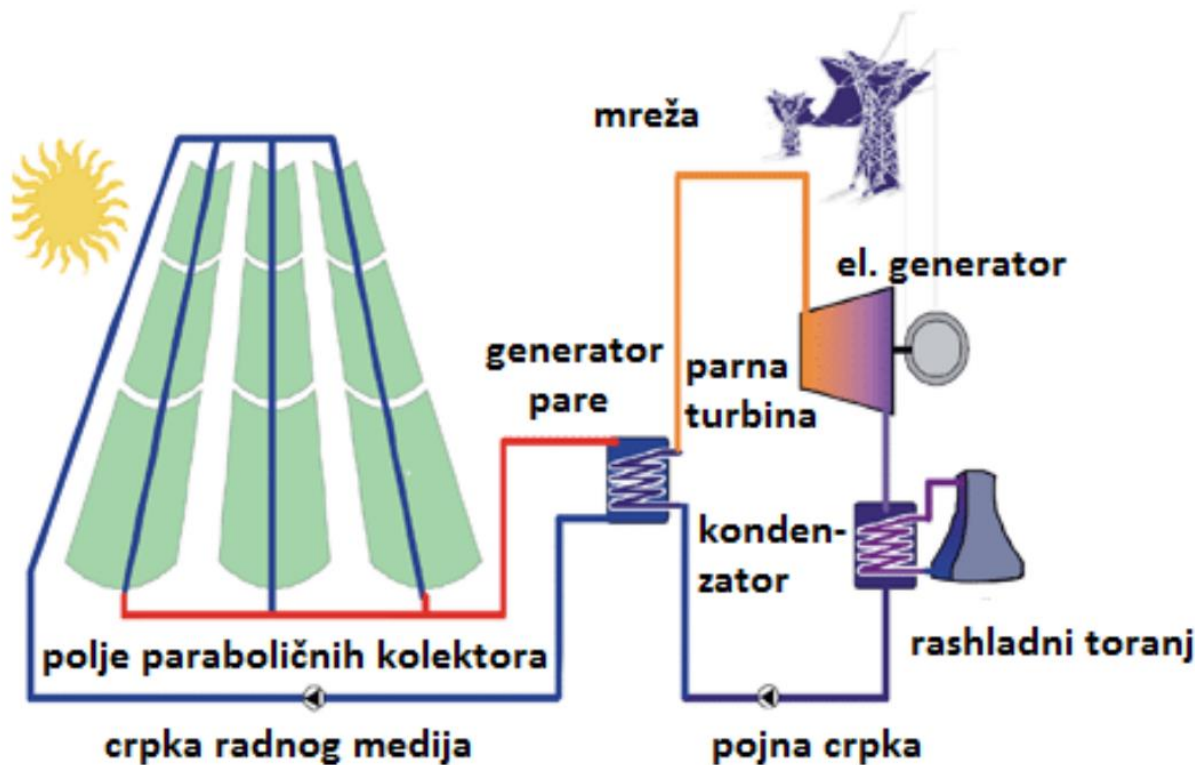
Postoje tri tipa solarnih termoelektrana:

- Solarna termoelektrana s paraboličnim kolektorom
- Solarna termoelektrana s tornjem
- Solarna termoelektrana s tanjurom

od kojih se najčešće u praksi upotrebljava solarna termoelektrana s paraboličnim kolektorom. Budući da je solarna termoelektrana (STE) s paraboličnim kolektorom najrasprostranjenija i najstarija, tehnologija koja se svakodnevno usavršava i koristi je najrazvijenija.

Solarne termoelektrane se sastoje od:

- cijevi koja se nalazi u paraboličnom kolektoru,
- generatora pare,
- parne turbine,
- električnoga generatora i
- kondenzatora.



Slika 4.1. Solarna termoelektrana s paraboličnim kolektorom [8]

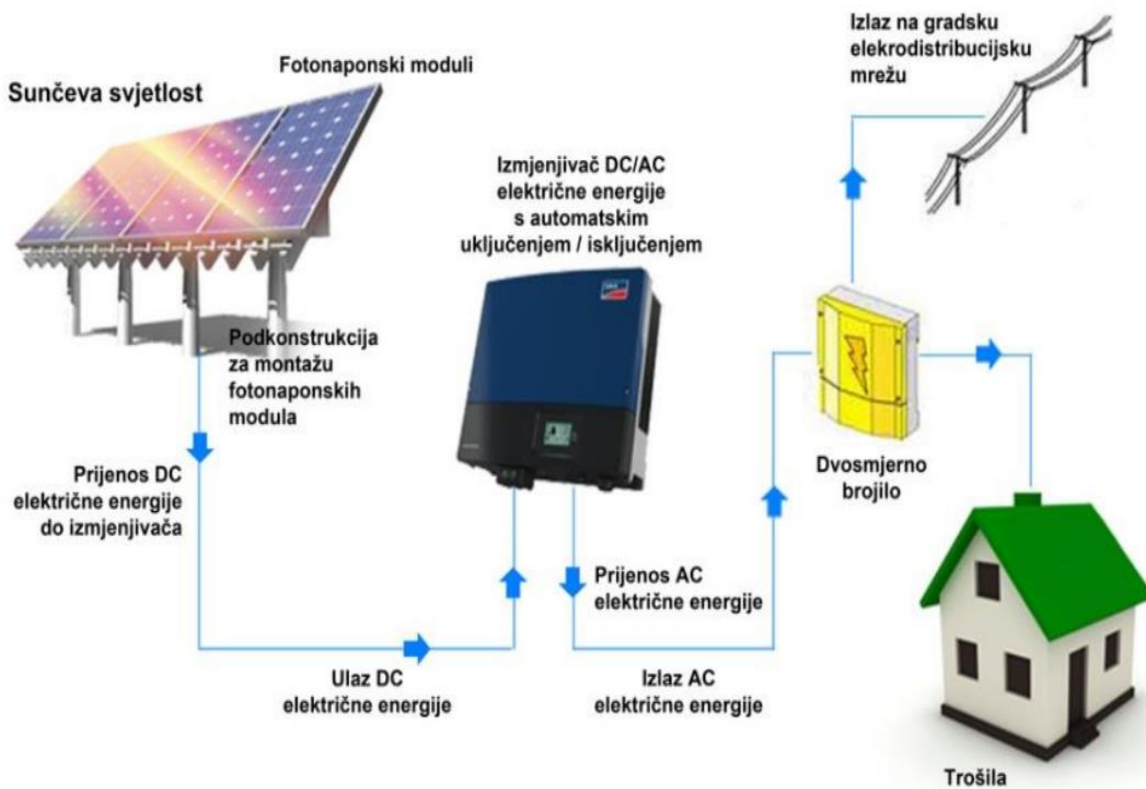
### 4.3. Fotonaponske elektrane

Fotonaponske elektrane energiju sunčeve svjetlosti ili zračenja u FN ćeliji pomoću FN efekta pretvaraju u električnu energiju. Kada sunčeve zrake odnosno fotoni koji se nalaze u sunčevoj svjetlosti udare u elektrone u FN ćelijama, fotoni pobuđuju elektrone u poluvodičkom elementu. Elektroni tako postaju slobodni nosioci naboja, kreću se u istom smjeru pod utjecajem električnog polja PN spoja te tako stvaraju električnu struju.

Svaka fotonaponska elektrana se sastoji od fotonaponskih modula odnosno panela kao najvažnijeg dijela fotonaponskog sustava. Osim modula, za proizvodnju električne energije potrebni su i regulator punjenja, baterije, izmjenjivač, brojila, prekidači, spojni vodovi, osigurači i konstrukcija odnosno nosači koji su potrebni za montažu fotonaponskih modula.

Fotonaponsko polje sastoji se od fotonaponskih panela koji su povezani serijski u stringove (najčešće 10 do 20 panela u jedan string). Napon koji je dobiven na panelima potrebno je pretvoriti pretvaračem ili izmjenjivačem u izmjenični napon iznosa 230 ili 400 V, frekvencije 50 Hz, sinusoidalnoga oblika. Nakon toga potrebno je izvršiti sinkronizaciju sa mrežnim naponom.





Slika 4.2. Dijelovi fotonaponske elektrane [9]

#### 4.3.1. Fotonaponske ćelije

Fotonaponska ćelija je poluvodički element koji direktno pretvara energiju sunca u električnu energiju prema prethodno opisanom principu. Fotonaponska ćelija se sastoji od p i n tipa poluvodiča. Napon jedne fotonaponske ćelije naziva se naponom otvorenog kruga, a prosječan napon jedne ćelije iznosi između 0,5 i 0,7 V, dok gustoća struje iznosi nekoliko desetaka miliampera po centimetru kvadratnom ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ). Ostale značajke odnosno osnovni parametri fotonaponske ćelije uz već spomenuti napon otvorenog kruga i gustoću struje kratkog spoja su stupanj djelovanja i faktor punjenja.

**Napon otvorenog kruga** je dobiveni napon na izlaznim stezaljkama osvjetljene FN ćelije pri otvorenom strujnom krugu, kada je  $I = 0$ , a sama fotonaponska ćelija je izvor. Napon otvorenog kruga ( $U_{OK}$ ) računa se prema formuli (4.1):

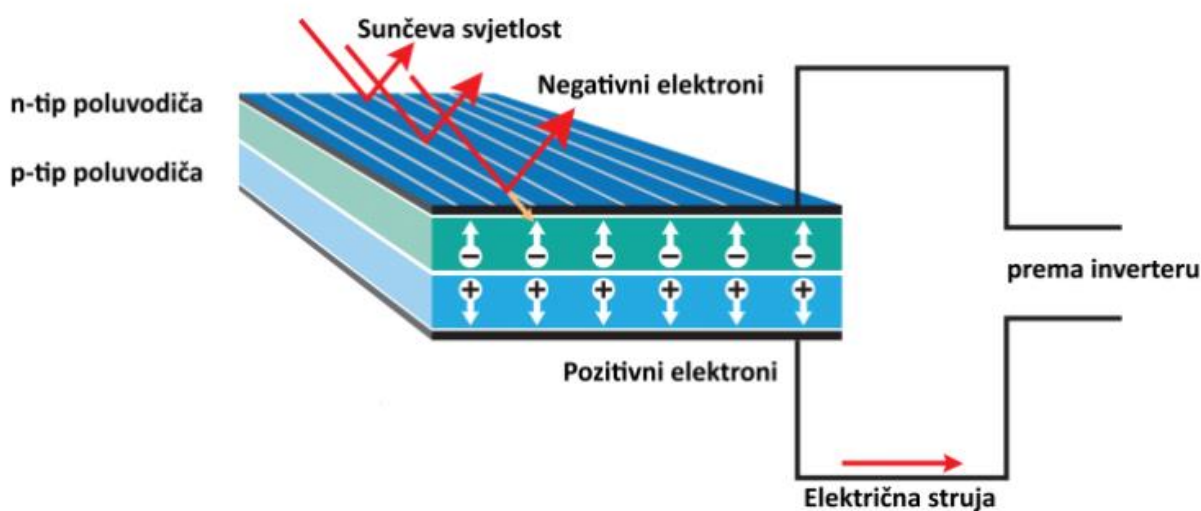
$$U_{OK} = \frac{m \cdot k \cdot T}{q} * \ln \left( \frac{I_{fs}}{I_0} + 1 \right) [V] \quad (4.1)$$

gdje je:

- m faktor idealnosti diode
- k Boltzmannova konstanta
- T temperatura
- q naboj elektrona
- $I_{fs}$  struja generirana fotonaponskom ćelijom
- $I_o$  struja zasićenja diode

Samostalne ćelije kao takve se koriste na satelitima, kalkulatorima, prometnim znakovima i kamerama i ostalim elektroničkim uređajima koji su udaljeni od EEM, a kojima je potrebno napajanje električne energije. FN ćelije se međusobno spajaju u FN modul koji je izuzetno pouzdan, tih i dugotrajan uređaj za proizvodnju električne energije.

**Stupanj djelovanja** fotonaponskih ćelija odnosno korisnost je vrlo mala, jer postoji dio sunčeve energije koji se ne uspije pretvoriti u električnu energiju, a koji se pretvara u toplinsku energiju. Tipičan fotonaponski modul ima učinkovitost oko 20,2% odnosno može pretvarati petinu Sunčeva zračenja koja padne na modul u električnu energiju. Naravno, efikasnost fotonaponskog sustava varira od različitih izvedbi, tako da jeftinije izvedbe imaju efikasnost oko 5%, a skuplje do 40%.



Slika 4.3. Presjek solarne ćelije [10]

Kao što je već rečeno, postoji nekoliko vrsti odnosno izvedbi fotonaponskih ćelija, koje mogu biti izrađene od silicija (u najčešćem slučaju), te od monokristalnih i polikristalnih tankoslojnih materijala. Raznim kombinacijama materijala koji se koriste pri izradi FN ćelija i različitim strukturama istih može se mijenjati odnosno postići veća korisnost FN ćelija. Korisnost fotonaponske ćelije definira se prema izrazu (4.2):

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{sunca}} \quad (4.2)$$

gdje je:

$P_{el}$  izlazna električna snaga fotonaponske ćelije

$P_{sunca}$  snaga sunčeva zračenja

Fotonaponske ćelije koje su izrađene od silicija su izrađene od:

- monokristalnog silicija (c-Si),
- polikristalnog silicija (p-Si),
- amorfno silicija (a-Si)

korisnost ovih tipova fotonaponskih ćelija kreće se između 7% i 16%, gdje je najveća korisnost kod fotonaponskih ćelija izrađenih od monokristalnog silicija, a najmanja kod ćelija koje su izrađene od amorfno silicija.

Također, koriste se i ćelije izrađene od monokristalnih tankoslojnih materijala, među kojima su najčešće izrađene ćelije od galij-arsenida (Ga-As), a korisnost tog tipa iznosi oko 17%.

Fotonaponske ćelije izrađene od polikristalnih tankoslojnih materijala su:

- ćelije bakar-indij-diselenida (CIS)
- ćelije kadmij-telurida (CdTe)
- ćelije amorfno silicija (a-Si)

**Faktor punjenja** fotonaponske ćelije nam prikazuje kolika je razlika između stvarne i idealne fotonaponske ćelije po karakteristikama odnosno koliki je utjecaj njezinog serijskog otpora. Utjecaj serijskog otpora ovisi o materijalu i načinu izrade. Faktor punjenja iznosi između 0,7 i 0,9, a može se izraziti omjerom snage idealne i realne fotonaponske ćelije, što je prikazano izrazom (4.3).

$$F = \frac{U_m * I_m}{U_{PH} * I_{KS}} \quad (4.3)$$

gdje je:

$U_m$  najveći napon FN ćelije

$I_m$  najveća struja FN ćelije

$U_{PH}$  napon otvorenog kruga

$I_{KS}$  struja kratkog spoja

Karakteristični otpor FN ćelije računa se kao omjer napona otvorenog kruga odnosno praznog hoda i jakosti struje kratkog spoja.

*Tablica 4.1. Tehnička svojstva silicijskih fotonaponskih ćelija*

FN ćelija	$U_{OK}$ [V]	$J_{KS}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$\eta$ [%]
FN ćelija od monokristalnog silicija	0,55-0,7	30	16
FN ćelija od polikristalnog silicija	0,6	26	10-14
FN ćelija od amorfne silicija	0,85	15	7

#### 4.4. Fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustavi se mogu podijeliti prema izvedbi na nekoliko osnovnih sustava. Prvi fotonaponski sustav je otočni ili autonomni sustav koji proizvedeni višak električne energije skladišti u baterije ili akumulatore. Takav sustav se još naziva i samostalni fotonaponski sustav odnosno *off grid* sustav. Drugi fotonaponski sustav sav višak električne energije može predati u mrežu. Takav mrežni fotonaponski sustav može biti aktivni ili pasivni, a naziva se *on grid* sustav. Naravno, još postoji i hibridni fotonaponski sustav, koji je sačinjen odnosno izveden kao kombinacija otočnog i mrežnog fotonaponskog sustava.

**Samostalni fotonaponski sustav** koristi se u mjestima gdje ne postoji mogućnost spajanja na mrežu. Nužno je koristiti bateriju odnosno akumulator kao spremnik električne energije, osobito tijekom noći ili pri oblačnom vremenu. Budući se koriste baterije, potrebno je koristiti i regulator za kontrolirano punjenje i pražnjenje baterije.

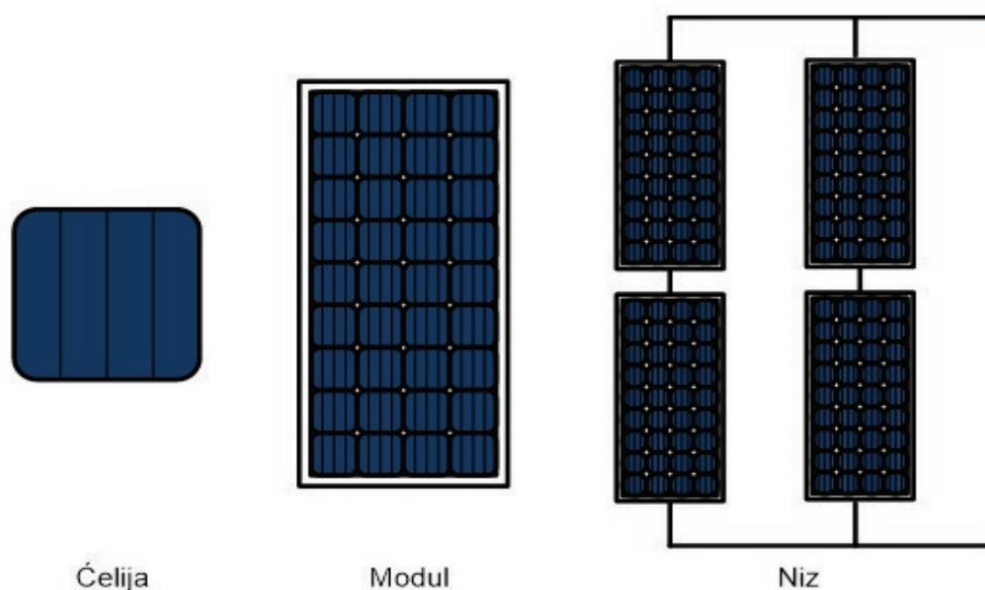
**Mrežni fotonaponski sustav** je sustav koji je potrebno spojiti na mrežu kako bi došlo do pretvorbe električne energije. Aktivni mrežni sustav znači da mreža služi kao pričuvni izvor električne energije, mreža preuzima višak električne energije kada dolazi do prekomjerne proizvodnje. Pasivni mrežni sustav znači da mreža služi samo kao pričuvni izvor električne energije.

**Hibridni fotonaponski sustav** je izveden kao kombinacija samostalnog i mrežnog fotonaponskog sustava, odnosno nastaje povezivanjem samostalnih fotonaponskih sustava s drugim izvorima električne energije.

##### 4.4.1. Fotonaponski modul

Fotonaponski modul odnosno solarni panel je skup fotonaponskih ćelija povezanih serijski, paralelno ili kombinacijom oba načina. Budući da svaka fotonaponska ćelija proizvodi 0,5-0,7 V uz gustoću struje oko 200 A/m<sup>2</sup> potrebno je spojiti više fotonaponskih ćelija navedenim spojevima kako bi se dobio određeni napon koji najčešće iznosi 12 V ili 24 V te željena vršna snaga solarnog panela od koje su najčešći iznosi 75, 100 ili 120 W. Kako bi dobili željene navedene vrijednosti napona i snage, za solarni panel koji na izlazu daje 12 V potrebno je spojiti 36 fotonaponskih ćelija ili članaka. Uz dodatne kombinacije spajanja modula od 12 V moguće je dobiti velika

fotonaponska postrojenja kojima serijsko spajanje modula služi za osiguranje željenoga napona, dok se paralelno spajanje modula koristi za dobivanje potrebne struje.



Slika 4.4. FN ćelija, FN modul i niz FN modula [11]

#### 4.4.2. Ostale komponente fotonaponskog sustava

Kao što je već spomenuto, fotonaponski sustav se sastoji od fotonaponskih modula koji su jedan od najvažnijih dijelova fotonaponskog sustava, a ostali dijelovi su regulator punjenja, baterije ili akumulatori, izmjenjivač, brojila, spojni vodovi, prekidači, osigurači i nosači odnosno konstrukcija za montažu solarnih panela. Važno je napomenuti da se regulator punjenja i baterije odnosno akumulatori koriste isključivo za otočne fotonaponske sustave.

**Regulator punjenja** je sklop koji služi za pretvaranje promjenjivog istosmjernog napona solarnih modula u precizno kontrolirani napon kojim se napajaju istosmjerna trošila te kojim se puni baterija. Regulator punjenja održava napon trošila konstantnim i unutar dozvoljenih granica, a napon baterije se automatski podešava. Vrlo je bitno da regulator nije osjetljiv na smetnje okoline i da ne generira smetnje koje mogu loše utjecati na rad uređaja koji regulator napaja.

Parametri regulatora su iznos i tolerancija ulaznog i izlaznog napona, promjena izlaznoga napona zbog promjene ulaznog napona i izlazne struje, izlazna valovitost napona i opseg radnih temperatura [12].

Budući da noću, kada fotonaponski moduli ne daju napon, predstavljaju trošilo, regulator punjenja tada sprječava pražnjenje baterije. Regulator punjenja ne dozvoljava prekomjerno punjenje baterije te zbog toga osigurava nadnaponsku zaštitu baterije.

Regulatori mogu biti izvedeni na dva načina, pri čemu je prvi način jednostavni dizajn odnosno „feed-forward“ dizajn, a drugi način je izvedba pomoću negativne kontrolne povratne petlje, a ovisno o načinu izvedbe može se koristiti da regulira jedan ili više napona istosmjerne ili izmjenične struje [12].

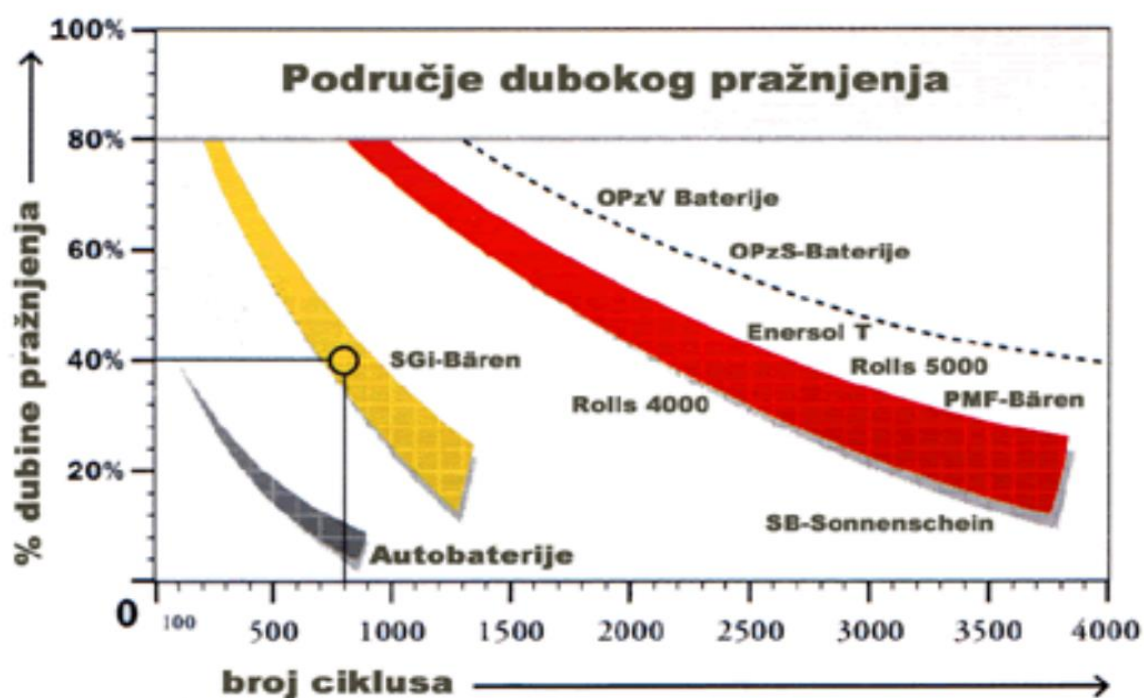


Slika 4.5. Regulator punjenja [13]

**Baterije** odnosno akumulatori se koriste samo u fotonaponskim sustavima koji su otočni ili autonomni sustavi. Oni proizvedeni višak električne energije skladište u baterije ili akumulatorne. Takav sustav se još naziva i samostalni fotonaponski sustav odnosno *off grid* sustav. Baterija je iznimno važna zato što predstavlja izvor energije u periodu kada fotonaponski moduli ne proizvode energiju (noću i za vrijeme oblačnog vremena). Tada se baterija prazni. Baterija također služi i kao skladište energije za rad sustava. Tada se baterija puni.

Potrebna je što veća korisnost baterije, odnosno što manji odnos energije utrošene tijekom punjenja baterije i dobivene energije iz baterije tijekom pražnjenja.

Ciklički način rada je također vrlo bitan uvjet solarne baterije. To je način rada kada se baterija redovito puni i prazni. Obične baterije imaju do 600 ciklusa, što znači da je vijek trajanja tih baterija između 4 i 6 godina, a baterija se sama po sebi zbog unutarnjeg otpora prazni oko 0,2%. AGM baterije imaju 1000 do 1300 ciklusa. Kod AGM baterija je vijek trajanja 7-8 godina. AGM baterija se sama prazni oko 0,14%, a dubina pražnjenja im je do 80%. GEL baterije imaju 1500 do 1900 ciklusa, što znači da im je vijek trajanja baterije 10-11 godina. GEL baterija se sama prazni oko 0,1%.



Slika 4.6. Pražnjenje solarne baterije [14]

Budući se vremenom olovne baterije sve manje koriste u fotonaponskim sustavima, zbog svojih svojstava zamjenjuju ih Litij-ionske baterije koje su izuzetno pogodne za solarne sustave, imaju više od 4500 ciklusa te veću dubinu pražnjenja od olovnih baterija. Litij-ionska baterija znatno je lakša od olovnih baterija, težina im pada čak do 60 % za razliku od olovnih, a baterija od 200 Ah, 25,6 V pruža 5210 Wh korisne energije pri 100% pražnjenju što je dvostruko veće od olovnog akumulatora istog kapaciteta.

Također, kod izbora solarne baterije je vrlo bitna nazivna snaga trošila. Za izmjenična trošila do 1,2 kW nazivne snage može se koristiti 12 V akumulator. Za nazivne snage trošila veće od 1,2 kW, a do maksimalno 5 kW koriste se 24 V solarni akumulatori. Pri snagama između 5 kW i 10 kW obavezno se koriste akumulatori od 48 V.





Slika 4.7. Solarni akumulatori [15]

**Pretvarači ili izmjenjivači** pretvaraju istosmjerni 12 V, 24 V ili 48 V napon iz fotonaponskih modula u izmjenični. Pretvarači imaju više funkcija, a neke od njih su uključivanje fotonaponskog modula na mrežu pri izlasku sunca, te isključenje modula pri zalasku sunca. Također, kako se mijenja jačina osvjetljenja panela, a i temperatura, uloga izmjenjivača je podešavanje struje i napona kako bi prinos električne energije iz fotonaponskih panela bio maksimalan.

Postoje pretvarači koji se koriste kod autonomnih sustava projektirani za korištenje zajedno sa baterijama, i kod mrežnih sustava koji se povezuju direktno na mrežu.



Slika 4.8. DC/AC pretvarač [16]

**Brojila** služe za praćenje stanja proizvodnje električne energije fotonaponskog sustava, stanja napunjenosti baterija, kao i količine energije predane u mrežu.

Za mrežne sustave, odnosno sustave gdje se višak proizvedene električne energije može vratiti u mrežu, potrebno je dvosmjerno brojilo radi obračuna električne energije.

**Prekidači** služe za prekidanje struje iz fotonaponskog modula i pretvarača u slučaju kvara ili u slučajevima kada je potrebno održavanje na sustavu, a **osigurači** služe za zaštitu osoblja tijekom održavanja i zaštitu sustava od kvarova.

#### 4.5. Pogonske karakteristike sunčane elektrane „SOLEKTRA IX“ snage 999 kW

Prema literaturi [17] očekivana godišnja proizvodnja električne energije sunčane elektrane SOLEKTRA IX iznosi 1727 MWh, dok na području Međimurske županije srednja očekivana proizvodnja instalirane snage za fiksni sustav po jednom kilovatu iznosi oko 1150 kWh godišnje. Navedena elektrana sastoji se od 5280 fotonaponskih modula nominalne snage 310 W te dvadeset izmjenjivača ukupne snage 999 kW koji će predavati energiju u mrežu. Na parceli je predviđena gradnja trafostanice 1000 kVA sa energetske transformatorom 20/0,4 kV i pripadajućim srednjenaponskim i niskonaponskim razvodom. Kao što je ranije spomenuto, priključak sunčane elektrane na mrežu izvodi se sukladno uvjetima propisanim elaboratom optimalnog tehničkog rješenja priključenja (EOTRP) i elektroenergetske suglasnosti (EES) koje će izdati HEP ODS.

##### 4.5.1. Fotonaponski modul

Za elektranu planirana je ugradnja fotonaponskih modula tipa Reisen RSM 60-60-310M nazivne snage 310 W. Fotonaponski modul je certificiran i u skladu s normama HRN EN 61215 i HEN EN IEC 61730, a tehničke karakteristike modula su opisane u tablici 4.2. Elektrana se sastoji od 5280 modula, te će biti ukupne nazivne snage 1636,8 kW [17].

Tablica 4.2. Tehnički karakteristike fotonaponskog modula Reisen RSM 60-30-310M [17]

Broj ćelija	60
Tip sunčane ćelije	Monokristalne, 156.75 mm x 156.75 mm
Nominalna snaga [ $P_{MPP}$ ]	310 W

Napon otvorenog kruga [ $U_{OK}$ ]	40,6 V
Struja kratkog spoja [ $I_{KS}$ ]	9,86 A
Nominalni napon [ $U_{MPP}$ ]	33,4 V
Nominalna struja [ $I_{MPP}$ ]	9.29 A
Efikasnost modula [ $\eta_m$ ]	18,9 %
Dimenzije modula	1650 mm x 992 mm x 35 mm
Standardni uvjeti ispitivanja	1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C, AM 1,5

#### 4.5.2. Izmjenjivač

Pri odabiru izmjenjivača osobito se gleda izmjenjivač koji pokriva ulaznim naponskim i strujnim ograničenjima radno područje fotonaponskog polja. Za navedenu elektranu odabran je izmjenjivač SMA Sunny Tripower CORE1 čije su tehničke karakteristike opisane u tablici 4.3. Potrebno je odabrati takav izmjenjivač čije će ulazne karakteristike u potpunosti odgovarati izlaznim karakteristikama fotonaponskog polja. SMA Sunny Tripower CORE1 izmjenjivač nema transformator, nazivna maksimalna snaga mu iznosi 50 kW, a maksimalna učinkovitost 97,8 % [17].

Tablica 4.3. Tehničke karakteristike izmjenjivača SMA Sunny Tripower CORE1 [17]

Maksimalna ulazna snaga (DC)	75000 W
Maksimalni ulazni napon (DC)	1000 V
Radno područje ulaznog napona (DC)	500-800 V
Maksimalna izlazna snaga (AC)	50000 W
Nominalni izlazni napon (AC)	230/400 V
Nominalna frekvencija izlaznog napona (AC)	50 Hz
Maksimalna izlazna struja (AC)	72,5 A
Maksimalna izlazna struja kratkog spoja (AC)	86 A

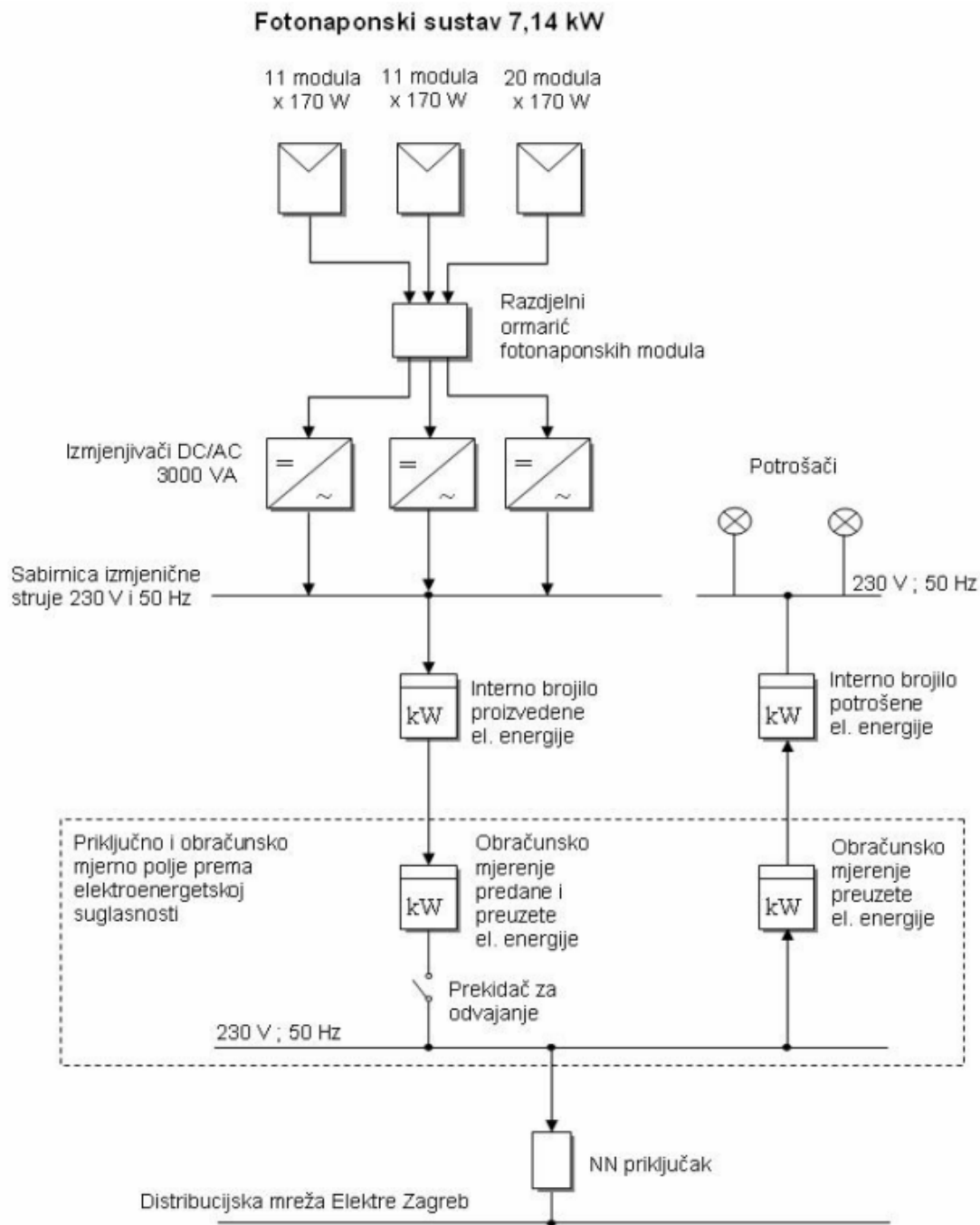
## **5. UTJECAJ SUNČANE ELEKTRANE NA POGON NISKONAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE**

Postoje dobri i loši odnosno pozitivni i negativni utjecaji distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu koji, naravno, ovise o snazi distribuiranog izvora, njegovoj potrošnji na mjestu priključka i osobni pogon, kao i karakteristikama distribucijske mreže na koju se spaja. Među tehničkim utjecajima izražava se utjecaj na sigurnost napajanja električnom energijom, povećanje struje kratkog spoja, narušavanje osjetljivosti zaštite u elektroenergetskoj mreži, utjecaj na kvalitetu električne energije, raspoloživost distribucijske mreže, te gubitke u mreži.

### **5.1. Sunčana elektrana „SOLARNI KROV ŠPANSKO-ZAGREB“**

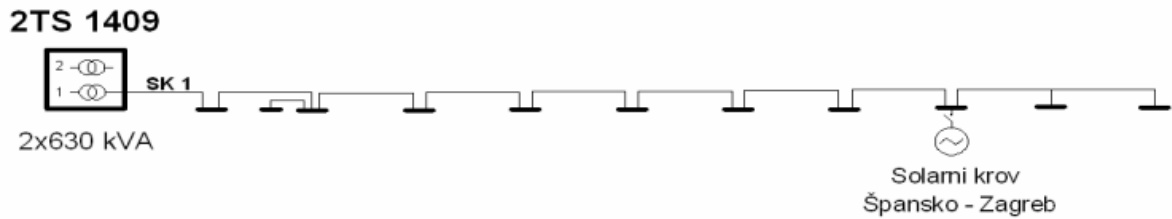
Navedena sunčana elektrana instalirana je na krovu obiteljske kuće, te je priključena na distribucijsku NN mrežu. FN sustav se sastoji od 42 solarna panela koji su postavljeni u tri stringa po tri grupe (faze), a u razdjelnom ormariću su spojeni paralelno. Svaki fotonaponski modul je spojen serijski unutar svake grupe odnosno faze, a nazivna snaga svakog fotonaponskog modula iznosi 170 W. U jednoj fazi je priključeno serijskim spojem 20 fotonaponskih modula po 170 W, a u preostale dvije faze priključeno je serijskim spojem po 11 fotonaponskih modula, također snage 170 W po modulu. Ukupna instalirana snaga cijelog fotonaponskog sustava iznosi 7,14 kW [18].

Izmjenjivači priključeni na fotonaponske module pretvaraju istosmjernu struju FN sustava u izmjeničnu, ukupno ih ima tri, svaki nazivne snage 3000 VA. Na izmjeničnoj strani pretvarača dobiven je izmjenični napon reguliranoga iznosa i frekvencije. Prekidač za odvajanje i obračunsko-mjerni uređaji za mjerenje električne energije nalaze se u priključno-mjernom ormariću. Dvosmjerno brojilo odnosno brojila proizvedene i potrošene električne energije mjeri električnu energiju koja je preuzeta iz mreže i koja se troši za vlastitu potrošnju potrebnu tijekom proizvodnje i rad elektrane u mirovanju, a mjeri se i električna energija koja je predana u distribucijsku mrežu [18].



*Slika 5.1. Blok shema sunčane elektrane [18]*

Sunčana elektrana priključena je paralelno na niskonaponsku mrežu, a na strujni krug sunčana elektrana je priključena zajedno sa još desetak potrošača sličnih karakteristika u vidu kućanstva (prikazano na slici 5.2.). Niskonaponska mreža na koju je priključena sunčana elektrana napajana je iz distribucijske 10(20)/0,4 kV transformatorske stanice instalirane snage 2x630 kVA [18].



Slika 5.2. Priključak SE na NN distribucijsku mrežu [18]

Paralelni pogon sunčane elektrane s distribucijskom mrežom uzrokuje određene promjene na mjestu priključka s distribucijskom mrežom kao i u samoj mreži. Jačina same elektrane od 7,14 kW ne bi trebala uzrokovati velike promjene u niskonaponskoj mreži, pa tako niti u niskonaponskom izvodu transformatorske stanice.

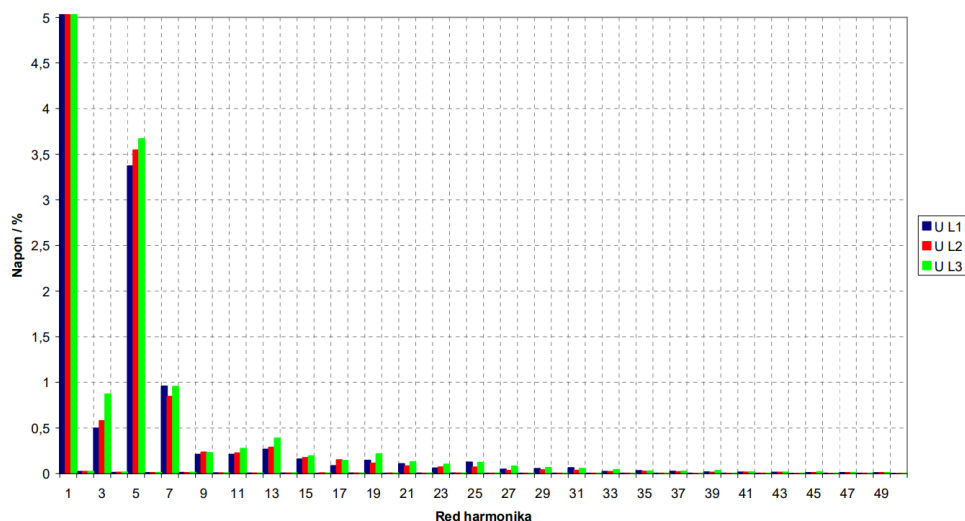
#### 5.1.1. Mjerenja

Mjerenja kvalitete električne energije su obavljena istovremeno na dva mjerna mjesta. Mjerna točka 1 nalazi se na početku strujnog kruga u niskonaponskom izvodu broj 1 transformatora broj 1 u transformatorskoj stanici. Mjerna točka 2 nalazi se na sabirnicama izmjenične struje iza izmjenjivača sunčane elektrane. Mjerenje kvalitete električne energije obavljeno je prema normi EN 50160. Navedena norma EN 50160 ima svrhu opisati i utvrditi obilježja distributivnog napona, gdje se ne opisuju prosječne vrijednosti, već se mjere najveća odstupanja pojedinih parametara koja se očekuju u distribucijskoj mreži. Budući je potrebno uočiti utjecaj sunčane elektrane na niskonaponsku distribucijsku mrežu potrebno je istovremeno obaviti mjerenje na mjernom mjestu 1 (niskonaponski izvod transformatora) i na mjernom mjestu 2 (mjesto proizvodnje), a mjeri se kvaliteta napona i efektivne vrijednosti struja i snaga. Tijekom mjerenja koje je provedeno s priključenom sunčanom elektranom na niskonaponsku distribucijsku mrežu, sunčana elektrana je radila u različitim režimima rada, ovisno o vremenskim uvjetima [18].

Pri mjerenju kvalitete električne energije izvršena su mjerenja kvalitete napona, vrijednosti napona, THD napona i nesimetrije napona, kao i mjerenja struje, radne i jalove snage i faktora snage.

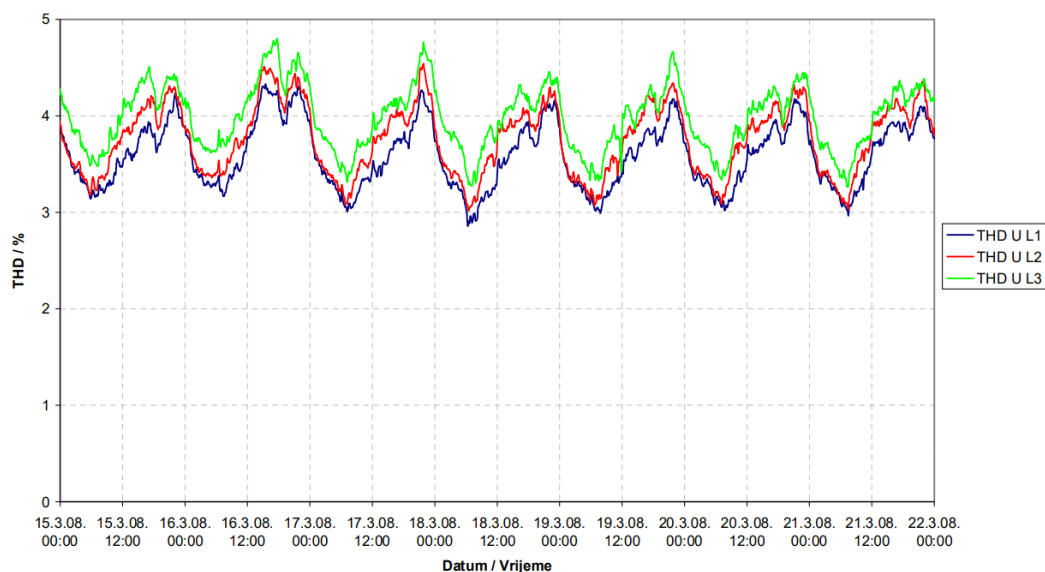
**Mjerenje kvalitete napona** izvršeno je na mjernim točkama 1 i 2. Iz prikaza mjernih rezultata može se zaključiti da je vrijednost parametara kvalitete napona na mjernom mjestu 1 u niskonaponskom izvodu transformatorske stanice boljih karakteristika u odnosu na parametre kvalitete napona na mjernom mjestu 2 u mjestu proizvodnje odnosno kod priključka elektrane na

mrežu. Rezultati izmjerenih parametara su unutar dozvoljenih granica vrijednosti. Naravno, na kvalitetu napona utječe i duljina strujnog kruga i karakteristike priključenih potrošača. Također je prikazan rezultat harmonijske analize mjernog mjesta 2 priključka elektrane na mrežu, te je vidljivo prema slici 5.3. da su izraženi harmonici 3., 5. i 7., od kojih je 5. harmonik dominantan. Ostali harmonici nemaju značajan utjecaj na valni oblik napona [18].



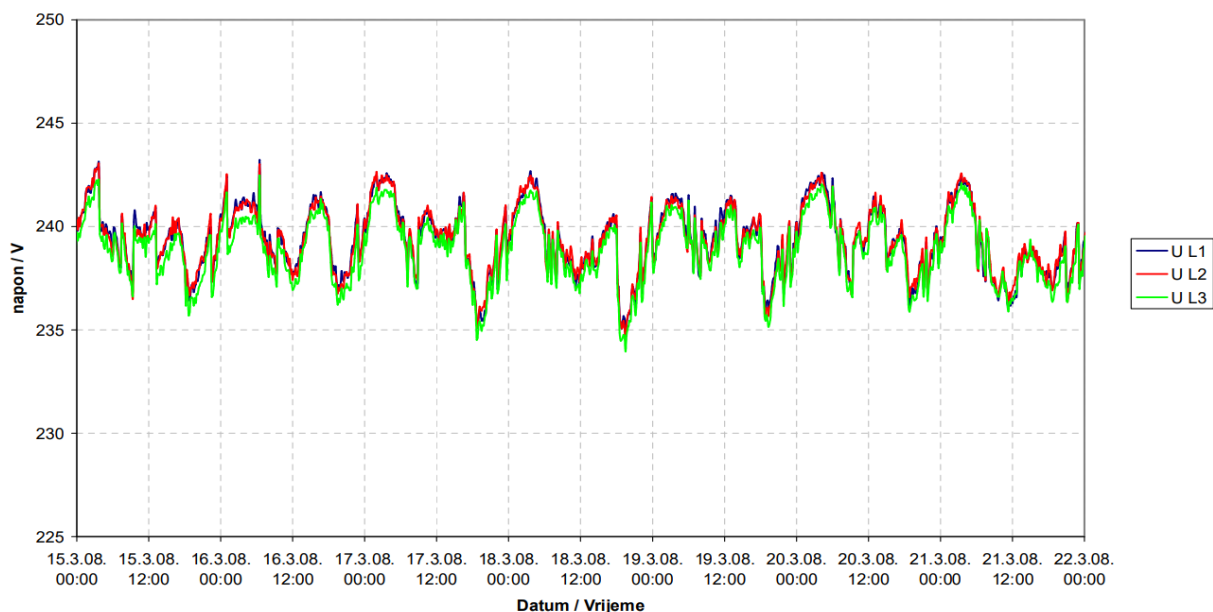
Slika 5.3. Harmonijska analiza napona na mjernom mjestu 2 [18]

**THD napona** je izmjeren, te je dobivena vrijednost unutar dozvoljenih granica, zadovoljena. Granica dozvoljenih vrijednosti harmonijskog izobličenja napona iznosi najviše 2,5 % u trenutku priključenja prije puštanja elektrane u pogon, no zbog ranijeg priključenja elektrane na mrežu granica dozvoljenih vrijednosti harmonijskog izobličenja napona iznosi najviše 5 % [18].

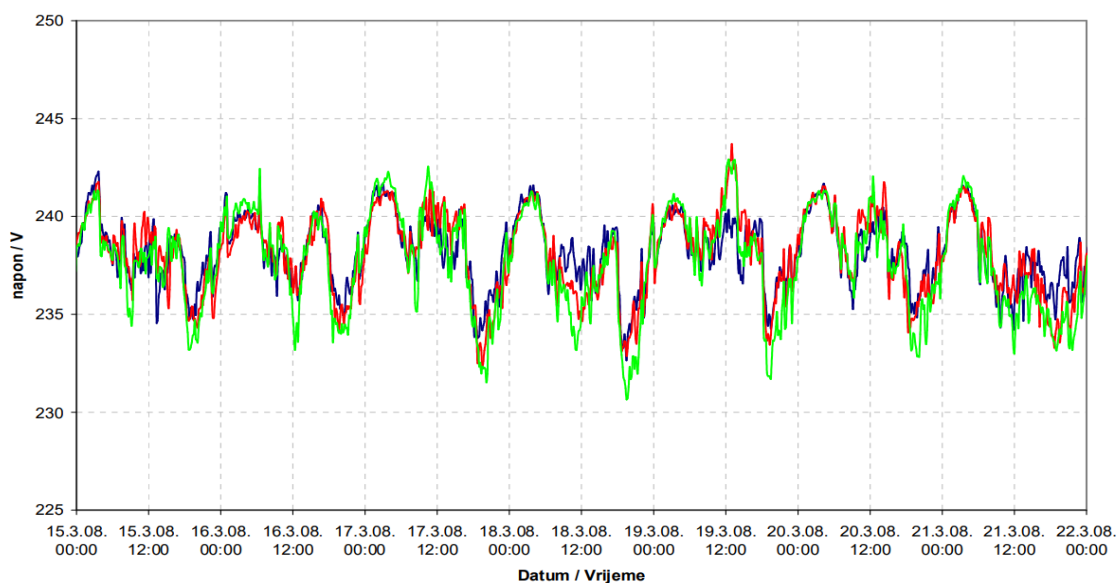


Slika 5.4. Vrijednost THD napona na mjernom mjestu 2 [18]

**Vrijednost napona** (efektivna vrijednost) napona mjerena je na mjernim točkama 1 i 2, a rezultati mjerenja prikazani su slikama 5.4. i 5.5. Vrijednost napona na mjernom mjestu 1 u niskonaponskom izvodu transformatorske stanice izmjerena je nešto veća od nazivne vrijednosti 230 V, no unutar dozvoljenih granica, a vrijednost napona na mjernom mjestu 2 u mjestu proizvodnje odnosno kod priključka elektrane na mrežu je stabilna, sa nešto manjim iznosom u odnosu na vrijednost napona u niskonaponskoj mreži. Naravno, uzrok smanjenju napona na mjernom mjestu 2 su priključeni potrošači i duljina strujnog kruga [18].



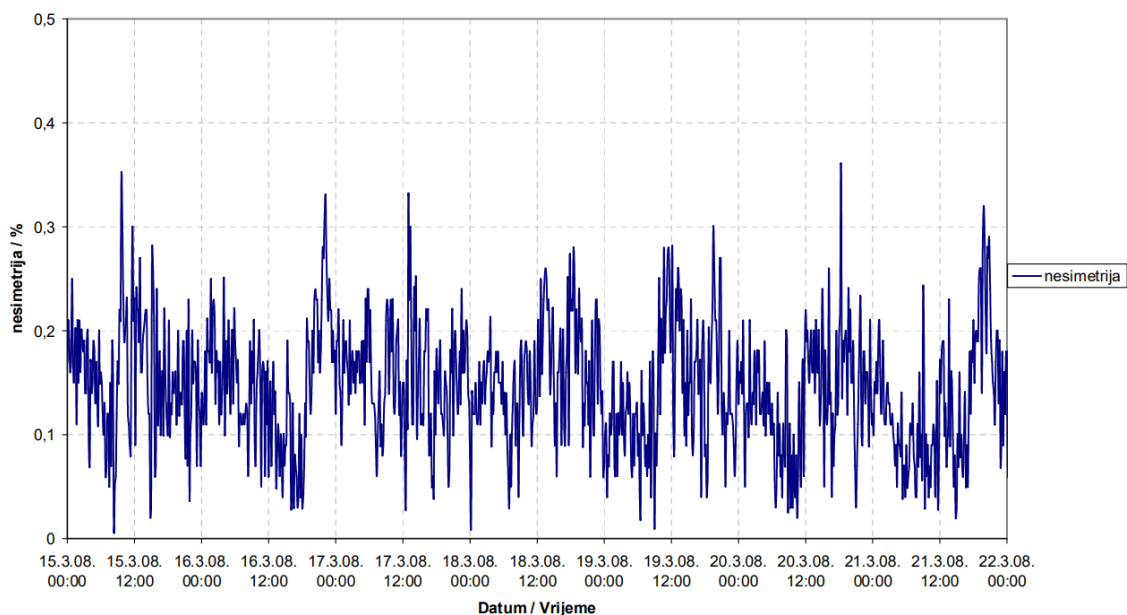
Slika 5.5. Vrijednost napona na mjernom mjestu 1 [18]



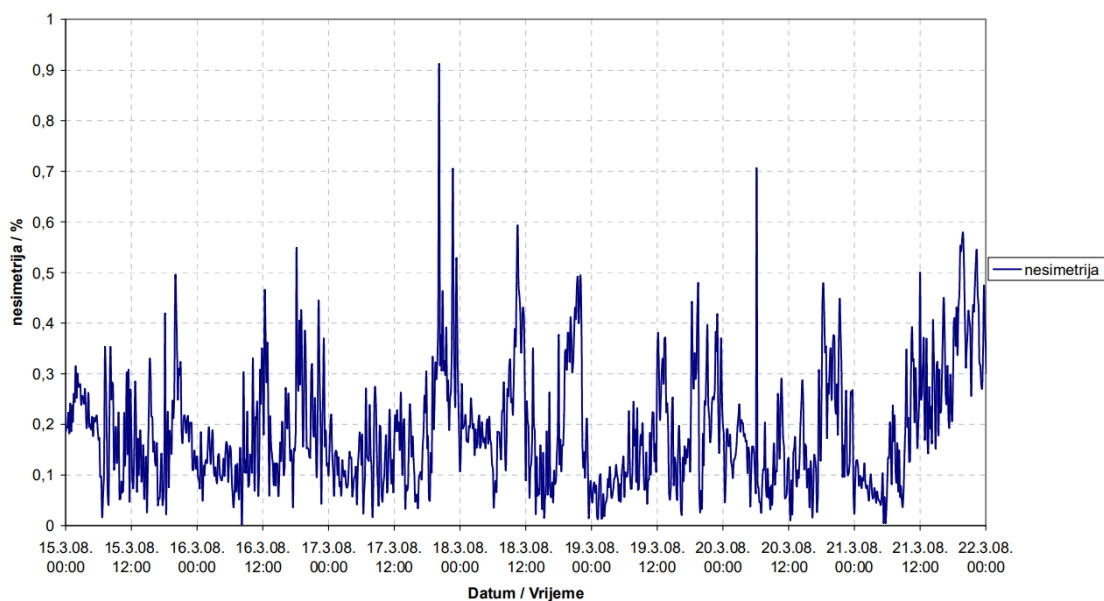
Slika 5.6. Vrijednost napona na mjernom mjestu 2 [18]



**Nesimetrija napona** nastaje uslijed nesimetričnosti elektromotorne sile po vrijednosti ili po kutu ili ako po fazama nisu jednake impedancije. Definira se kao omjer inverzne i direktne komponente simetričnog napona. Nesimetrija također nastaje priključenjem potrošača koji imaju nelinearnu karakteristiku. Na mjestu priključenja na mrežu maksimalna granica nesimetričnosti iznosi 1.3 % nazivnoga napona. Prema rezultatima mjerenja može se zaključiti da su vrijednosti nesimetrije u mjernim točkama 1 i 2 unutar dozvoljenih granica. Nesimetrija napona u mjernom mjestu 1 nije znatno izražena [18].

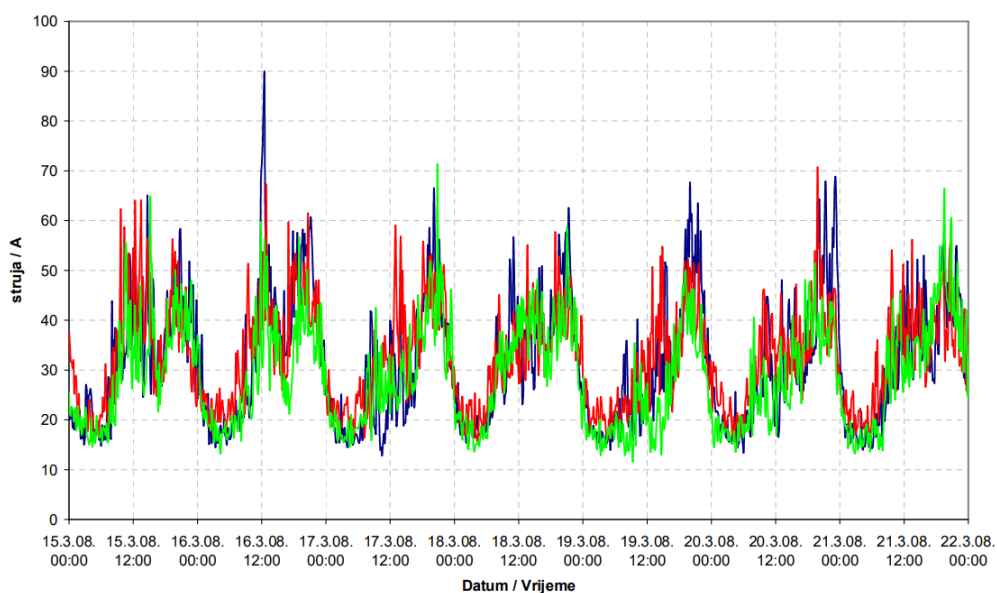


Slika 5.7. Nesimetrija napona na mjernom mjestu 1 [18]

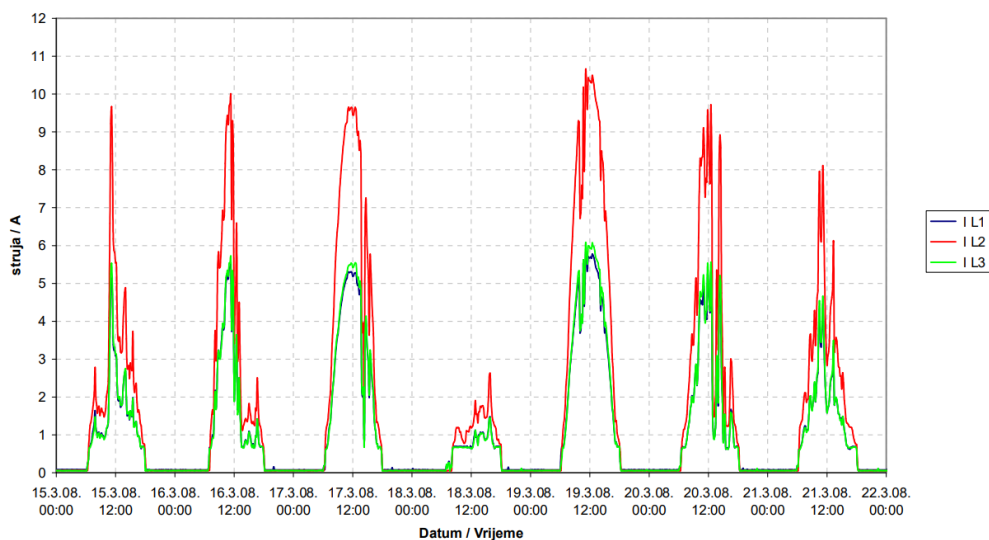


Slika 5.8. Nesimetrija napona na mjernom mjestu 2 [18]

**Vrijednosti struja** u niskonaponskom izvodu na mjernom mjestu 1 odnosno u niskonaponskom izvodu transformatorske stanice nisu simetrično opterećena (slika 5.9.) kao niti vrijednost struje na mjernom mjestu 2 u mjestu proizvodnje odnosno kod priključka elektrane na mrežu (slika 5.10.). Glavni razlog nesimetrije vrijednosti struja je dvostruki broj priključenih fotonaponskih modula na fazu L2, što je posljedica povećanju proizvedene snage koja je dvostruko veća u fazi L2 usporedno sa preostalim fazama (vidljivo na slici 5.10.). Slabi utjecaj sunčane elektrane na smanjenje opterećenja niskonaponskog izvoda se javlja kada sunčana elektrana predaje najviše energije u mrežu pri maksimalnoj snazi. Suprotna slika se očekuje ljeti kada velika većina potrošača ne radi, a sunčana elektrana predaje najviše energije u mrežu pri maksimalnoj snazi [18].

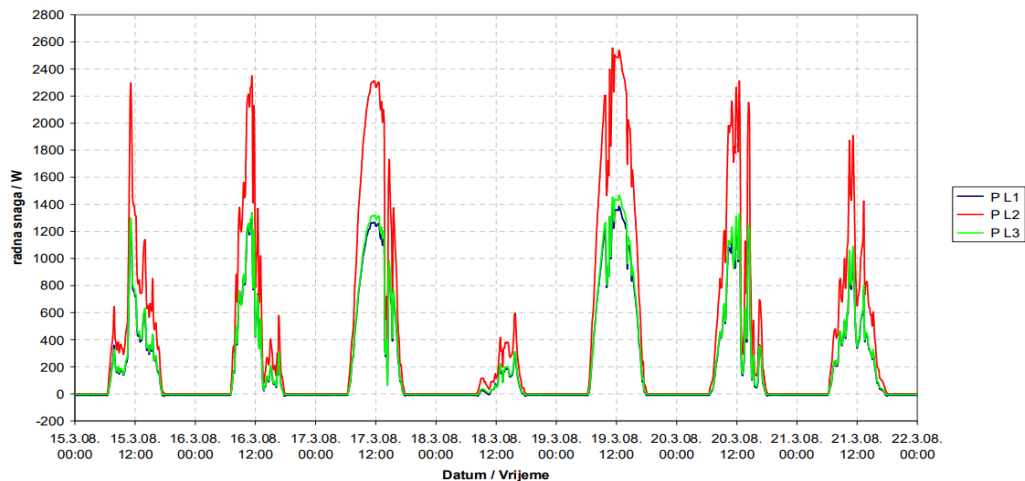


Slika 5.9. Vrijednost struje na mjernom mjestu 1 [18]



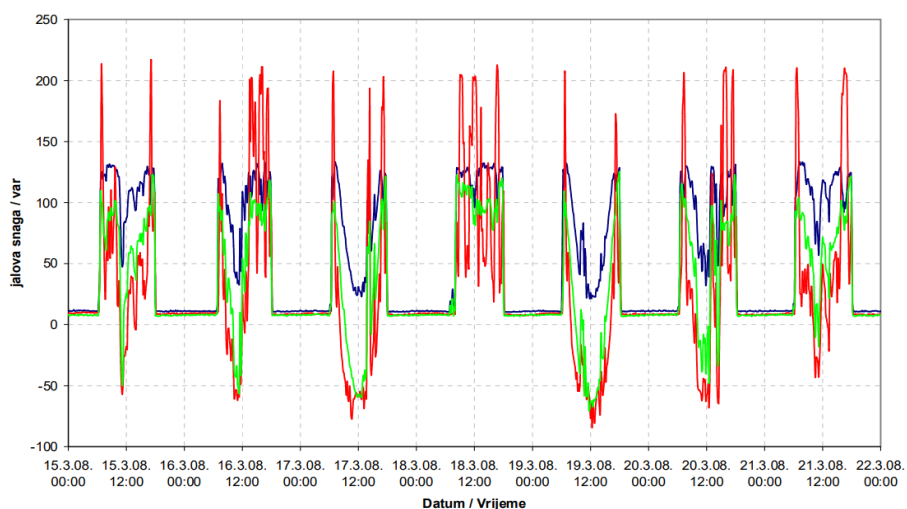
Slika 5.10. Vrijednost struje na mjernom mjestu 2 [18]

Prilikom mjerenja **radne snage** na mjernom mjestu 2 u mjestu proizvodnje utvrđeno je da je najveća vrijednost proizvedene snage u fazi L2, dok su izmjerene vrijednosti preostale dvije faze približno dvostruko manje. Prema trenutnim skokovima i osciliranjima po fazama se može zaključiti da opterećenja po fazama nisu simetrično raspoređena [18].



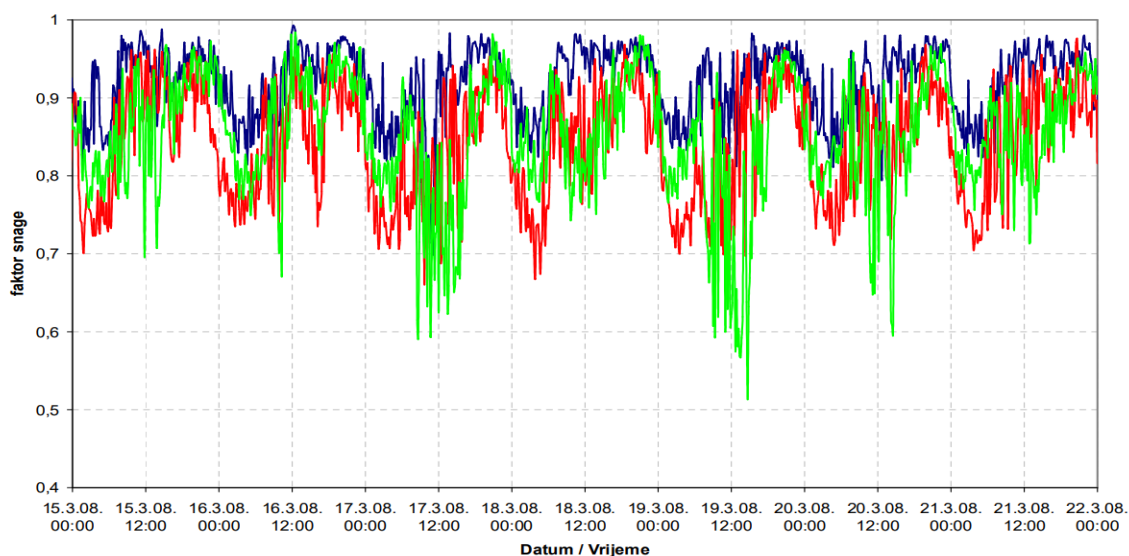
Slika 5.11. Vrijednost radne snage na mjernom mjestu 2 [18]

Prilikom mjerenja **jalove snage** zaključeno je da jalova snaga također nije simetrično raspoređena u sve tri faze. Pri pozitivnoj vrijednosti jalove snage na mjernom mjestu 2 u mjestu proizvodnje odnosno kod priključka sunčane elektrane na mrežu može se zaključiti da sunčana elektrana proizvodi jalovu električnu energiju, a u slučaju negativne vrijednosti jalove snage na mjernom mjestu 2 vrijedi da sunčana elektrana troši jalovu električnu energiju (prikazano na slici 5.12.). Izmjenjivači koje sunčana elektrana koristi troše jalovu električnu energiju pri maksimalnoj proizvodnji radne snage [18].

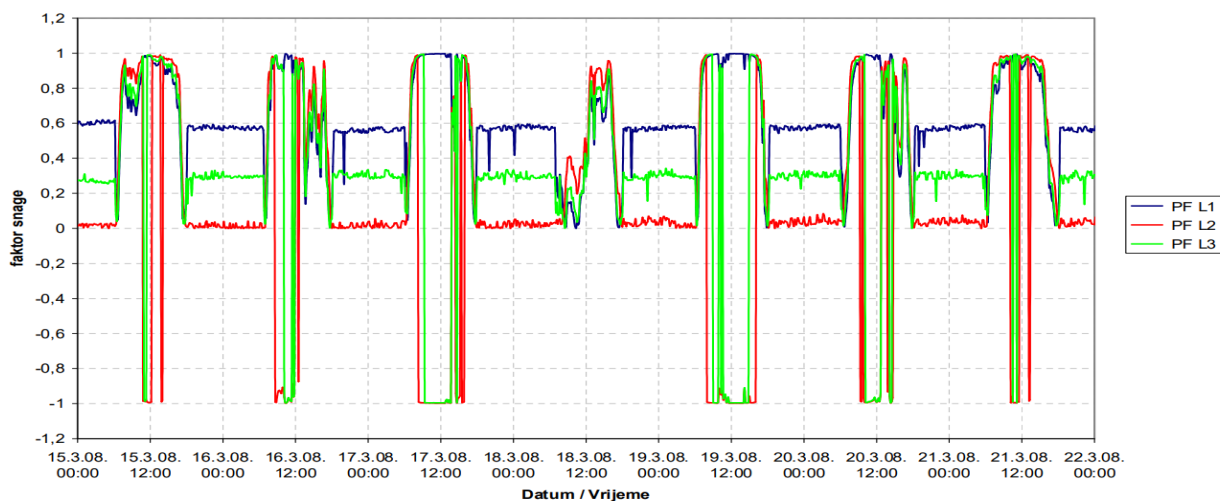


Slika 5.12. Vrijednost jalove snage na mjernom mjestu 2 [18]

**Faktor snage** računa se pomoću izmjerenih veličina snaga, gdje za pozitivnu vrijednost faktora snage vrijedi da sunčana elektrana proizvodi jalovu električnu energiju. Prema slici 5.14. mogu se uočiti nagli skokovi faktora snage, a razlog tome je već spomenuta potrošnja jalove električne energije pri najvećoj proizvodnji radne električne energije. Faktor snage će biti pozitivan kada sunčana elektrana neće trošiti jalovu električnu energiju. Na slici 5.13. je uočljiv izrazito loš faktor snage faze L2 i L3 u niskonaponskom izvodu transformatorske stanice, odnosno u mjernom mjestu 1, no upitno je da li je uzrok tome rad sunčane elektrane [18].



Slika 5.13. Vrijednost faktora snage na mjernom mjestu 1 [18]

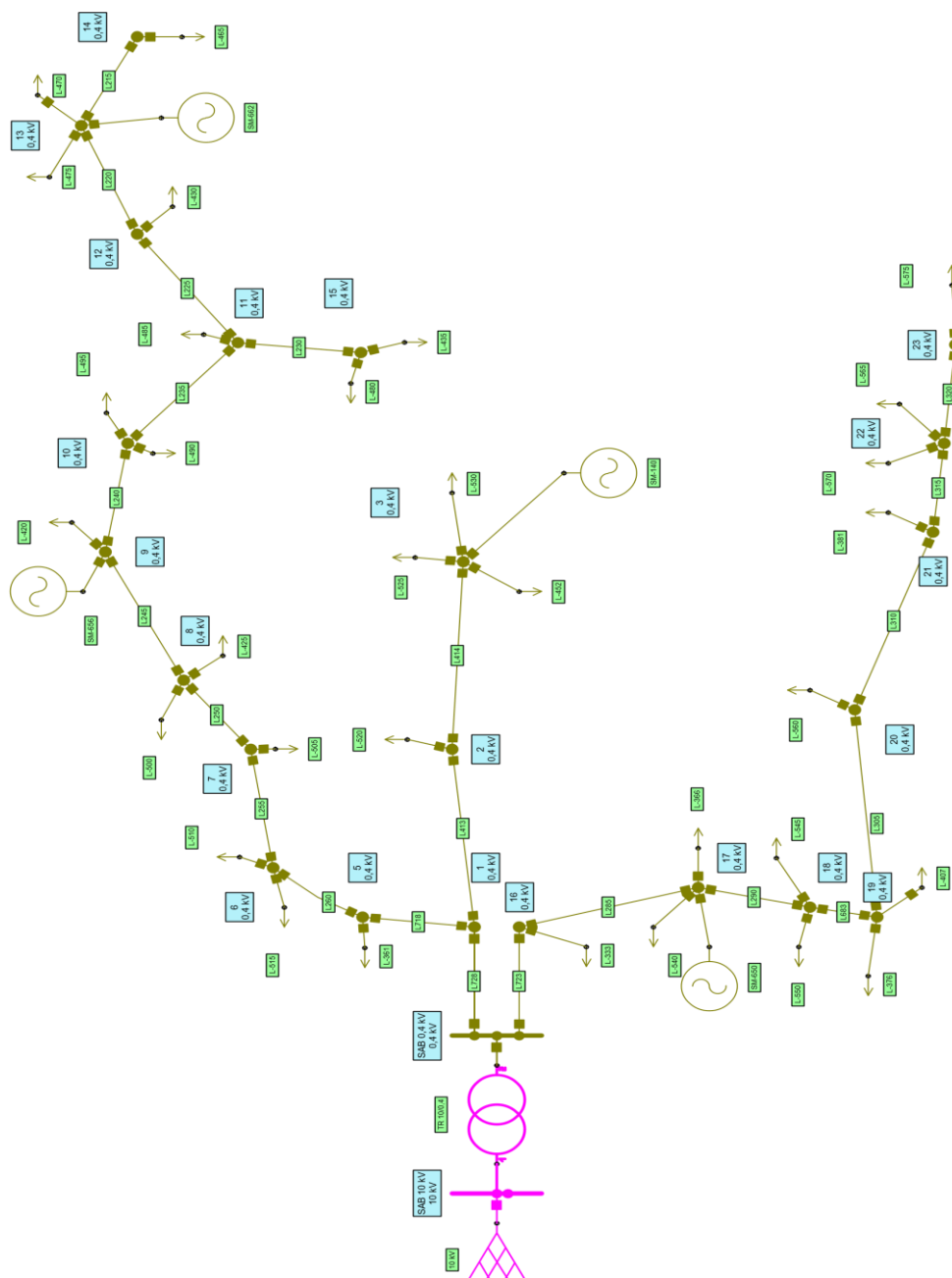


Slika 5.14. Vrijednost faktora snage na mjernom mjestu 2 [18]

Prilikom mjerenja kvalitete električne energije na mjernim mjestima 1 i 2 zaključeno je kako mala sunčana elektrana do 10 kW ne utječe negativno na kvalitetu električne energije i na napon mreže na koju je elektrana priključena.

## 6. UTJECAJ PRIKLJUČENJA SUNČANE ELEKTRANE NA PRIMJERU STVARNE NISKONAPONSKE MREŽE – NEPLAN

Na primjeru realne niskonaponske mreže sa 2 seoske ulice ispitan su utjecaji sunčane elektrane na padove napona u čvorovima, struju trolpnog kratkog spoja i struju jednofaznog kratkog spoja. Priključna snaga jednofaznih potrošača iznosi 7,36 kW, a trofaznih 17,25 kW. Struje kratkog spoja ispitane su na čvoru 5 koji se nalazi na početku mreže i na kojemu se nalazi jedan jednofazni priključak i na čvoru 13 koji je bliže kraju mreže, a na kojemu se nalaze dva trofazna priključka i sunčana elektrana iznosa 50 kW. Niskonaponska mreža prikazana je slikom 6.1.



Slika 6.1. Shema mreže sa potrošačima i priključenim elektranama

## 6.1. Utjecaj sunčane elektrane na padove napona na čvorovima

Efektivna vrijednost napona mjerena je na svim čvorovima, a rezultati mjerenja prikazani su slikama 6.2. i 6.3. izmjerena vrijednost napona na sabirnici u niskonaponskom izvodu transformatorske stanice SAB 0,4 kV jednaka je nazivnoj, a izmjerena vrijednost napona na čvorovima koji su udaljeni od transformatorske stanice je stabilna, sa nešto manjim iznosom u odnosu na vrijednost napona nego na početku mreže. Naravno, uzrok smanjenju napona su priključeni potrošači i duljina strujnog kruga.

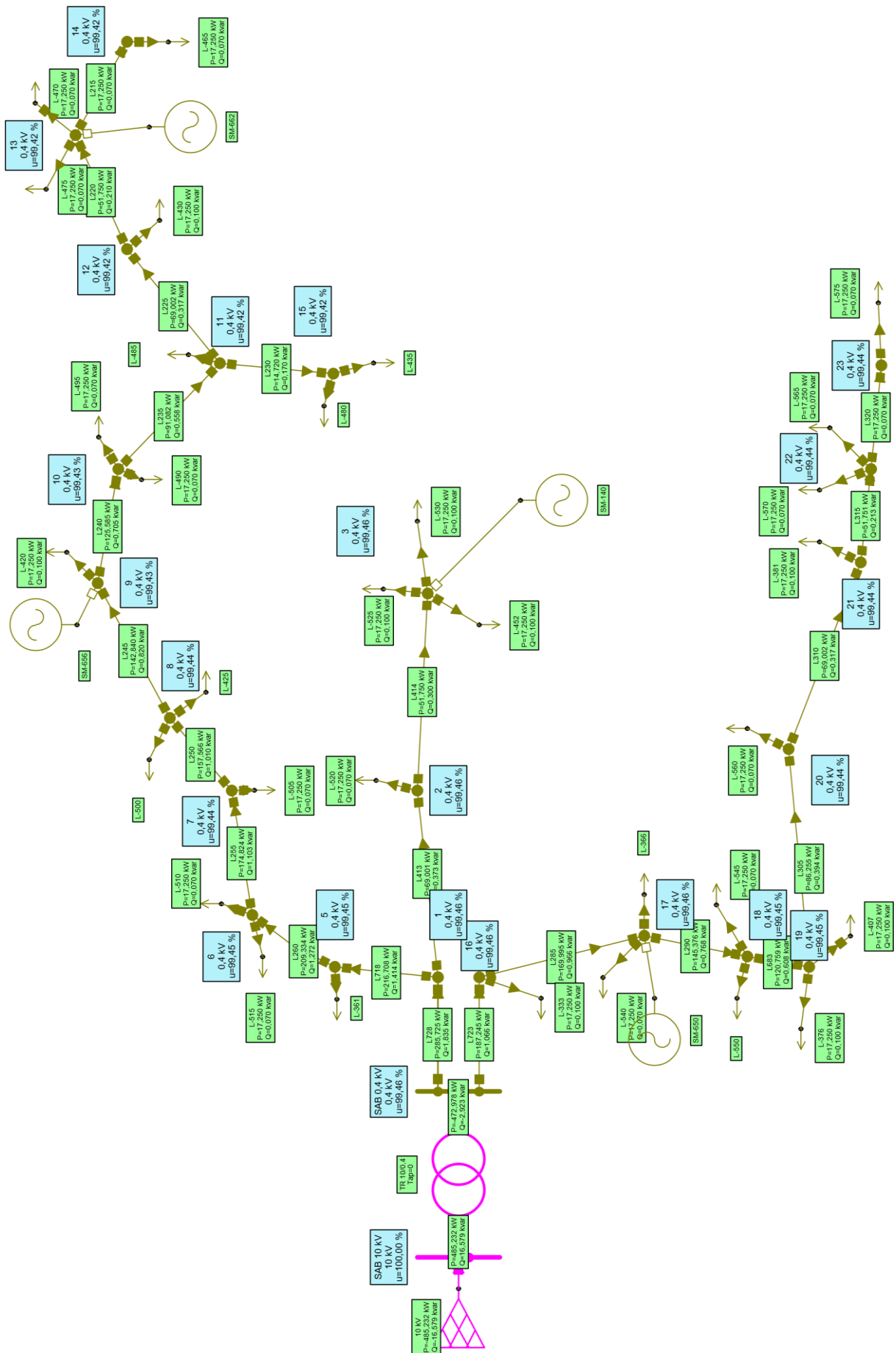
Na slikama 6.4. i 6.5. se mogu uočiti padovi napona kada su sunčane elektrane spojene na mrežu, odnosno kada su odspojene.

	ID	Name	U	u	U ang	P Load	Q Load	P Gen	Q Gen
			V	%	°	kW	kVar	kW	kVar
1	146	1	397,8	99,46	-1,6	0	0	0	0
2	197	10	397,7	99,43	-1,7	34,5	0,1	0	0
3	200	11	397,7	99,42	-1,7	7,4	0,1	0	0
4	206	12	397,7	99,42	-1,7	17,3	0,1	0	0
5	209	13	397,7	99,42	-1,7	34,5	0,1	0	0
6	212	14	397,7	99,42	-1,7	17,3	0,1	0	0
7	203	15	397,7	99,42	-1,7	14,7	0,2	0	0
8	155	16	397,8	99,46	-1,6	17,3	0,1	0	0
9	158	17	397,8	99,46	-1,6	24,6	0,2	0	0
10	161	18	397,8	99,45	-1,6	24,6	0,1	0	0
11	167	19	397,8	99,45	-1,7	34,5	0,2	0	0
12	115	2	397,8	99,46	-1,6	17,3	0,1	0	0
13	170	20	397,8	99,44	-1,7	17,3	0,1	0	0
14	173	21	397,8	99,44	-1,7	17,3	0,1	0	0
15	179	22	397,8	99,44	-1,7	34,5	0,1	0	0
16	182	23	397,8	99,44	-1,7	17,3	0,1	0	0
17	103	3	397,8	99,46	-1,6	51,8	0,3	0	0
18	149	5	397,8	99,45	-1,6	7,4	0,1	0	0
19	185	6	397,8	99,45	-1,7	34,5	0,1	0	0
20	188	7	397,8	99,44	-1,7	17,3	0,1	0	0
21	191	8	397,7	99,44	-1,7	14,7	0,2	0	0
22	194	9	397,7	99,43	-1,7	17,3	0,1	0	0
23	37	SAB 0,4 kV	397,8	99,46	-1,6	0	0	0	0
24	34	SAB 10 kV	10000	100	0	0	0	485,2	16,6

Slika 6.2. Vrijednosti napona po čvorovima bez priključene elektrane

	ID	Name	U	u	U ang	P Load	Q Load	P Gen	Q Gen
			V	%	°	kW	kVar	kW	kVar
1	146	1	398,4	99,6	-1,3	0	0	0	0
2	197	10	398,3	99,58	-1,3	34,5	0,1	0	0
3	200	11	398,3	99,57	-1,3	7,4	0,1	0	0
4	206	12	398,3	99,57	-1,3	17,3	0,1	0	0
5	209	13	398,3	99,57	-1,3	34,5	0,1	50	1
6	212	14	398,3	99,57	-1,3	17,3	0,1	0	0
7	203	15	398,3	99,57	-1,3	14,7	0,2	0	0
8	155	16	398,4	99,6	-1,3	17,3	0,1	0	0
9	158	17	398,4	99,59	-1,3	24,6	0,2	17,3	0,2
10	161	18	398,3	99,59	-1,3	24,6	0,1	0	0
11	167	19	398,3	99,58	-1,3	34,5	0,2	0	0
12	115	2	398,4	99,59	-1,3	17,3	0,1	0	0
13	170	20	398,3	99,58	-1,3	17,3	0,1	0	0
14	173	21	398,3	99,58	-1,3	17,3	0,1	0	0
15	179	22	398,3	99,58	-1,3	34,5	0,1	0	0
16	182	23	398,3	99,57	-1,3	17,3	0,1	0	0
17	103	3	398,4	99,59	-1,3	51,8	0,3	17,3	0,7
18	149	5	398,4	99,59	-1,3	7,4	0,1	0	0
19	185	6	398,3	99,59	-1,3	34,5	0,1	0	0
20	188	7	398,3	99,58	-1,3	17,3	0,1	0	0
21	191	8	398,3	99,58	-1,3	14,7	0,2	0	0
22	194	9	398,3	99,58	-1,3	17,3	0,1	17,3	0,7
23	37	SAB 0,4 kV	398,4	99,6	-1,3	0	0	0	0
24	34	SAB 10 kV	10000	100	0	0	0	382,6	8,6

Slika 6.3. Vrijednosti napona po čvorovima sa priključenim elektranama



Slika 6.4. Proračun padova napona po čvorovima bez priključenih elektrana

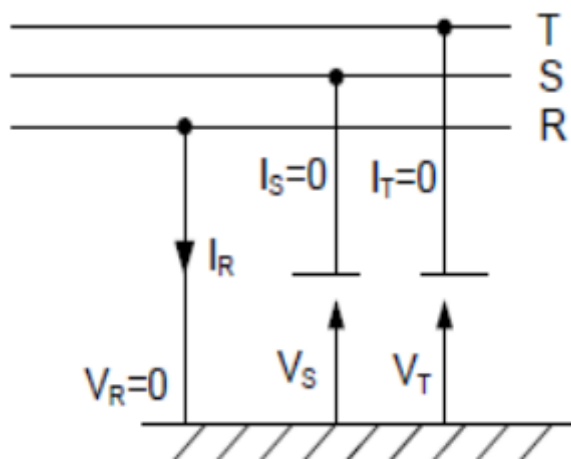






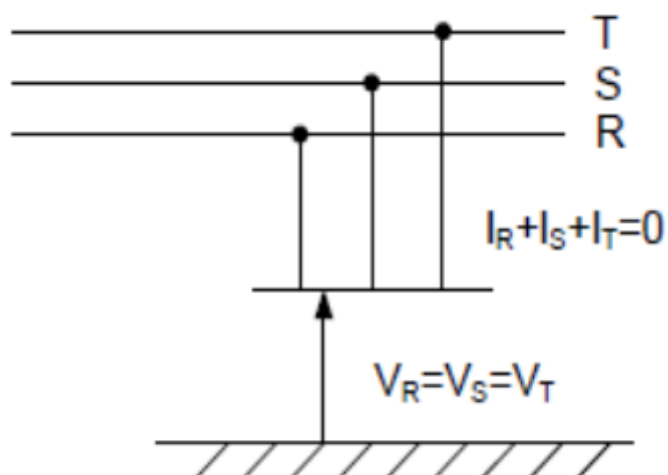
## 6.2. Utjecaj sunčane elektrane na jednopolnu i trolpolnu struju kratkog spoja

Jednopolni kratki spoj se događa samo u uzemljenom sustavu gdje struja kvara teče samo u fazi gdje se dogodio kvar. Fazni naponi u ispravnim fazama su konstantni, dok napon faze u kojoj se dogodio kvar opada od nazivnog napona do nule.



Slika 6.6. Jednopolni kratki spoj

Tropolni kratki spoj nastaje u slučaju međufaznog spoja svih triju faza u jednoj točki. Kod trolpnog kratkog spoja sve tri vrijednosti linijskoga napona izvora opadaju do nule, a struje su jednake u sve tri faze.



Slika 6.7. Tropolni kratki spoj

U tablicama 6.1. i 6.2. prikazane su dobivene vrijednosti struja za jednopolni i trolpolni kratki spoj u čvoru 5 (na početku mreže) i čvoru 13 (na kraju mreže), gdje se može vidjeti da sunčane elektrane, koje su priključene na mrežu u simulaciji, ne utječu značajno na struju kratkog spoja. Razlika u strujama kratkog spoja sa odnosno bez elektrane je do nekoliko stotina ampera, dok je razlika struja kratkog spoja između početka i kraja mreže 2,5 kA do 3 kA.

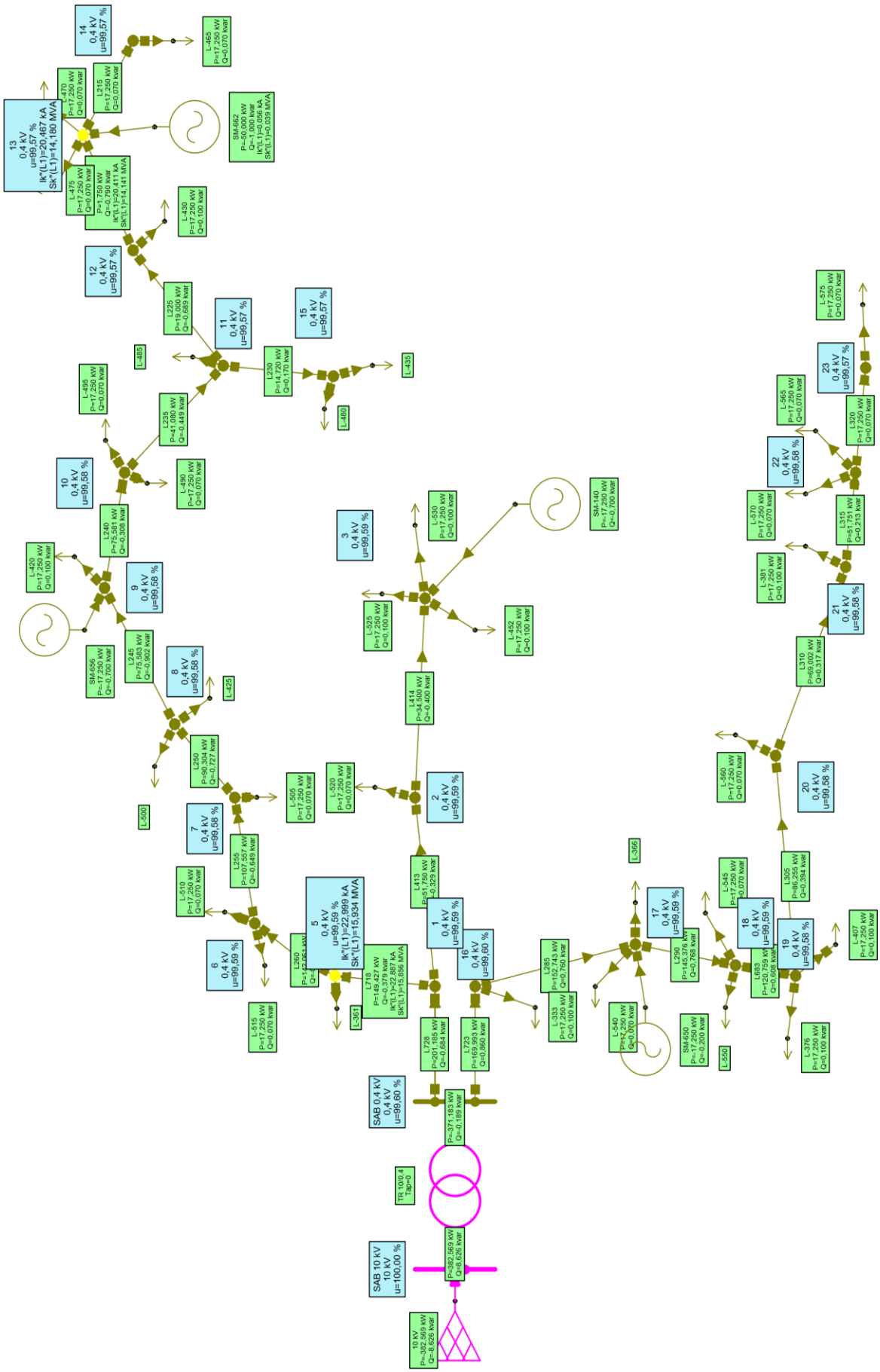
*Tablica 6.1. Vrijednosti struja kod jednopolnog kratkog spoja u čvorovima 5 i 13*

	$I''_{k1}$ [kA] – bez elektrana	$I''_{k1}$ [kA] – sa elektranama
Mjesto kvara – čvor 5	23,044	23,194
Mjesto kvara – čvor 13	20,485	20,616

*Tablica 6.2. Vrijednosti struja kod trolpolnog kratkog spoja u čvorovima 5 i 13*

	$I''_{k3}$ [kA] – bez elektrana	$I''_{k3}$ [kA] – sa elektranama
Mjesto kvara – čvor 5	22,778	22,999
Mjesto kvara – čvor 13	20,275	20,467





Slika 6.9. Pokus 3PKS u čvorovima 5 i 13 sa priključenim elektranama





## 7. ZAKLJUČAK

Svjedoci smo povišenja cijena energenata, te nemogućnost pojedinih zemalja za vlastitu proizvodnju električne energije. Sunčevu energiju je svakako potrebno dobro razmotriti i donijeti racionalne zaključke. Fotonaponski sustavi proizvode električnu energiju koja je dobivena od najvećeg izvora energije – Sunca, čime se smanjuje utjecaj na okoliš i djeluje se na ograničavanje emisije CO<sub>2</sub>, što i jest primarna zadaća.

U radu su opisani uvjeti priključenja sunčane elektrane, potrebna ispitivanja, zaštite i analize kako bi se provjerilo zadovoljava li sunčana elektrana uvjete priključenja. Opisani su svi dijelovi sunčane elektrane te su navedene pogonske karakteristike glavnih elemenata.

Na temelju primjera u radu može se zaključiti da male sunčane elektrane do uključivo 30 kW ne utječu bitno na kvalitetu električne energije, odnosno na naponski profil i struje kratkog spoja u niskonaponskim distribucijskim mrežama. Utjecaj priključenja većih snaga ogleda se kroz promjenu više parametara kvalitete električne energije, od kojih se ističe povećanje napona u točki priključenja i utjecaj na tokove snaga u mreži. U slučaju maksimalnog opterećenja mreže, sunčane elektrane velikih snaga smanjuju gubitke djelatne snage u mreži, dok svojim radom pri minimalnom opterećenju mreže povećavaju gubitke djelatne snage.

Kada se sve navedeno uzme u obzir vrlo se jednostavno može zaključiti da sunčane elektrane, uz odabir optimalne lokacije na kojoj će biti postavljena, mogu imati pozitivan utjecaj na distribucijsku mrežu.

Sunčane elektrane imaju široku primjenu u struci, svakodnevno se razvijaju i koriste. Vremenom će se, kao i sva ostala tehnologija, razvijati sve više, ima dosta prostora za nove vrste i podjele, napredak u razlikama dimenzija i učinkovitosti, materijala, načina izvedbe i slično.

Svakako, treba se maksimalno potruditi učiti i dati svoj doprinos u svim smjerovima elektrotehnike, smanjiti gubitke, a povećati učinkovitost jer ima još podosta prostora za napredak u budućnosti.

## LITERATURA

- [1] [HOPS, Hrvatski prijenosni sustav, s interneta, https://www.hops.hr/hrvatski-prijenosni-sustav](https://www.hops.hr/hrvatski-prijenosni-sustav), s interneta, 03.08.2022.
- [2] Goić, R.; Jakus, D.; Penović, I.: „Distribucija električne energije“, interna skripta, Split, 2008.
- [3] Živić Đurović, M.: „Elektroenergetske mreže“, predavanja, Rijeka, 2022.
- [4] Predavanje: „Utjecaj distribuiranih izvora na planiranje razdjelne mreže“, FER, Zagreb, 2019.
- [5] <https://www.hep.hr/ods/ostalo/obrasci-i-dokumenti/obrasci-i-dokumenti-vezani-uz-prikljucenje-na-mrezu/700>, s interneta, 15.08.2022.
- [6] Lukičević, P.; Šinković, D.: „Projekt fotonaponske elektrane“, INOVAPRO, Zagreb, 2021.
- [7] Marcijuš, M.: „Izvedbeni elektrotehnički projekt sunčane elektrane“, MBT-inženjering, Macinec, 2020.
- [8] Mišković, M.: „Solarne termoelektrane“, Završni rad, Osijek, 2017.
- [9] <https://eko-sustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/>, s interneta, 12.08.2022.
- [10] <https://hoora.hr/>, s interneta, 12.8.2022.
- [11] Balint, D.; Bodor, A.; Došen, D. i drugi.: „Obnovljivi izvori energije i energetska učinkovitost za ruralna područja“, MTA KRTK, Pečuh, 2018.
- [12] Tibljaš, A.: „Model energetska neovisne kuće s automatiziranim prozorom“, Diplomski rad, Rijeka, 2017.
- [13] <https://delani.hr/shop-nautika/cijena/victron-bluesolar-pwm-light-12v-24v-20a-solar-regulator-punjenja>, s interneta, 14.08.2022.
- [14] <http://www.omnibus.hr/baterije.htm>, s interneta, 14.08.2022.
- [15] [https://www.burzanautike.com/hr/pune\\_sunca/4386/5](https://www.burzanautike.com/hr/pune_sunca/4386/5), s interneta, 14.08.2022.
- [16] <https://www.aliexpress.com/item/4001332334962.html>, s interneta, 15.08.2022.
- [17] EKO-MONITORING: „Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš IZGRADNJA SUNČANE ELEKTRANE SOLEKTRA IX SNAGE 999 kW U OPĆINI GORNJI MIHALJEVAC“, Solektra d.o.o., Varaždin, 2020.
- [18] Grašo, J.; Cvitanović, M.; Čović, A.: „Utjecaj sunčane elektrane „Solarni krov Špansko-Zagreb“ na distribucijsku mrežu“, HO CRIED, 1. savjetovanje, Šibenik, 2008.
- [19] [https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/dokumenti/Obrasci/Pristup\\_mrezi/PM\\_1.2.1.\\_Zahtjev\\_za\\_izdavanje\\_EES\\_kupci.pdf](https://www.hep.hr/ods/UserDocsImages/dokumenti/Obrasci/Pristup_mrezi/PM_1.2.1._Zahtjev_za_izdavanje_EES_kupci.pdf), s interneta, 12.09.2022.



## POPIS OZNAKA I KRATICA

EES	Elektroenergetski sustav
CO <sub>2</sub>	Ugljikov dioksid
ENTSO	The European Network of Transmission System Operators
EEM	Elektroenergetska mreža
NN	Niskonaponska mreža
SN	Srednjenaponska mreža
OPIP	Operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu
EPZ	Elaborat podešenja zaštite
EUEM	Elaborat utjecaja na elektroenergetsku mrežu
SKS	Samonosivi kabelski snop
SIP	Kutija za izjednačenje potencijala
PE	Zaštitni vodič
SELV	Safety Extra – Low Voltage
PELV	Protection by Extra Low Voltage
FID	Diferencijalna sklopka
PVC	Polivinilov klorid
OMM	Obračunsko mjerno mjesto
EOTRP	Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja
FN	Fotonapon
STE	Solarna termoelektrana
THD	Ukupno harmonijsko izobličenje

# SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLISKOM JEZIKU

## Sažetak:

Ovaj rad podijeljen je na pet cjelina koje su predstavljene poglavljima Elektroenergetski sustav, Priključenje obnovljivih izvora energije na niskonaponsku distribucijsku mrežu, Sunčane elektrane, Utjecaj sunčane elektrane na pogon niskonaponske distribucijske mreže i Utjecaj priključenja sunčane elektrane na primjeru stvarne niskonaponske mreže u računalnom programu NEPLAN.

U prvom poglavlju opisan je elektroenergetski sustav, glavne podjele elektroenergetskih mreža, opisane su prijenosne i distribucijske mreže kao i vrste niskonaponskih distribucijskih mreža.

U drugoj cjelini predstavljeni su i opisani koraci priključenja obnovljivih izvora energije na niskonaponsku distribucijsku mrežu, opisana su mrežna pravila, redoslijed ispitivanja sunčane elektrane prije puštanja u pogon te pokusni rad. Navedene su naponske i strujne zaštite te proračun.

U trećem poglavlju opisane su sunčane elektrane sa svim dijelovima koji su potrebni za pravilan rad elektrane. Detaljno je opisan princip rada fotonaponske ćelije te su navedeni i opisani fotonaponski sustavi. Navedene su i opisane pogonske karakteristike fotonaponskoga modula i izmjenjivača sunčane elektrane „SOLEKTRA IX“ snage 999 kW.

U četvrtoj cjelini detaljno je opisan princip rada sunčane elektrane „SOLARNI KROV ŠPANSKO ZAGREB“ te su opisana izvršena mjerenja kvalitete napona, vrijednosti napona, THD napona i nesimetrije napona, kao i mjerenja struje, radne i jalove snage i faktora snage.

U zadnjem poglavlju pomoću računalnog programa NEPLAN simulirana je realna niskonaponska distribucijska mreža sa priključenim sunčanim elektranama, ispitan je utjecaj priključenja sunčane elektrane na naponski profil, razinu struje kratkog spoja i prikazani su tokovi snaga u mreži.

**Ključne riječi:** Obnovljivi izvori energije, elektroenergetski sustav, niskonaponska mreža, fotonapon, sunčana elektrana, fotonaponska ćelija, fotonaponski modul, izmjenjivač, baterija, kvaliteta električne energije.

**Abstract:**

This work is divided into five units, which are presented in the chapters Electric power system, Connection of renewable energy sources to the low-voltage distribution network, Solar power plants, Influence of the solar power plant on the operation of the low-voltage distribution network, and Influence of the connection of the solar power plant on the example of a real low-voltage network in the computer program NEPLAN.

In the first chapter, the power system is described, the main divisions of power networks, transmission and distribution networks as well as types of low-voltage distribution networks described.

In the second part, the steps of connecting renewable energy sources to the low-voltage distribution network are presented and described, network rules are described, the order of testing the solar power plant before commissioning, and experimental work. Voltage and current protections and calculation are listed.

In the third chapter, solar power plants are described with all the parts that are necessary for the proper operation of the power plant. The principle of operation of the photovoltaic cell is described in detail, and photovoltaic systems are listed and described. The operational characteristics of the photovoltaic module and inverter of the solar power plant "SOLEKTRA IX" with a power of 999 kW are listed and described.

In the fourth part, the principle of operation of the solar power plant "SOLARNI KROV SPANSKO ZAGREB" is described in detail, and the measurements of voltage quality, voltage value, THD voltage and voltage asymmetry, as well as measurements of current, active and reactive power and power factor are described.

In the last chapter, using the computer program NEPLAN, a realistic low-voltage distribution network with connected solar power plants was simulated, the influence of the connection of the solar power plant on the voltage profile, the short-circuit current level and the power flows in the network was examined.

**Key words:** Renewable energy sources, power system, low-voltage network, photovoltaic, solar power plant, photovoltaic cell, photovoltaic module, exchanger, battery, quality of electricity.