

# Elektrotehnički projekt sunčane elektrane na krovu hale sortirnice

---

Joha, Ivan

Master's thesis / Diplomski 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:190:970319>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT SUNČANE ELEKTRANE NA  
KROVU HALE SORTIRNICE**

Rijeka, srpanj 2022.

Ivan Joha  
0069077095

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT SUNČANE ELEKTRANE NA  
KROVU HALE SORTIRNICE**

Mentor: Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, srpanj 2022.

Ivan Joha  
0069077095

Rijeka, 22. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Projektiranje električnih postrojenja**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

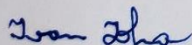
Pristupnik: **Ivan Joha (0069077095)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Elektrotehnički projekt sunčane elektrane na krovu hale sortirnice / Electric design of the PV plant integrated on the roof of the sorting hall**

### Opis zadatka:

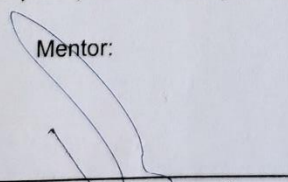
U diplomskom radu je potrebno izraditi elektrotehnički projekt na razini glavnog projekta za integriranu sunčanu elektranu na krovu hale sortirnice. U projektu je potrebno riješiti elektroinstalaciju sunčane elektrane te sustav zaštite elektrane od štetnog djelovanja munje. Razraditi priključak elektrane na postojeću instalaciju objekta, istosmjerni i izmjenični razvod te razvodne ormare. Provesti procjenu moguće godišnje proizvodnje električne energije iz planirane sunčane elektrane.

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




Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Viktor Sučić

## IZJAVA

Sukladno s člankom 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2020. godine, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Elektrotehnički projekt sunčane elektrane na krovu hale sortirnice“, prema zadatku za diplomski rad od 21. 03. 2022.

A handwritten signature in blue ink, reading "Ivan Joha", is written above a horizontal line.

Ivan Joha

## **Zahvala**

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću na svim savjetima, komentarima i sugestijama tijekom pisanja ovog diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se gospodinu Nevenu Pavloviću, dipl. ing. el. iz tvrtke EL-Team d.o.o. na pomoći pri izboru teme diplomskog rada kao i na svemu što me naučio tijekom rada za vrijeme diplomskog studija.*

*Zahvaljujem se svojim roditeljima Katici i Borislavu na podršci tijekom cijelog studiranja i bez čije pomoći ovo postignuće ne bi bilo moguće. Također, hvala sestri Magdaleni i njenom zaručniku Hrvoju te bratu Danielu i njegovim kćerima Doris i Dunji na podršci. Hvala i svoj rodbini na podršci.*

*Zahvaljujem se kumu Jakovu i njegovoj obitelji na pomoći prilagodbe prilikom dolaska u Rijeku i podršci tijekom studiranja. Hvala i mojim prijateljima Dori, Borni, Marijani, Josipu, Antoniu, Marku, Martinu, Mihaelu, Mihovilu i svim drugim znanim i neznanim junacima koji su na bilo koji način pomogli tijekom studiranja.*

*Zahvaljujem se kolegama Ivani, Sanjinu, Leu, Marinu i svim drugim kolegama sa diplomskog studija na pomoći tijekom studiranja.*

*Hvala.*

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OPĆENITO O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA.....	2
2.1. Solarne ćelije .....	2
2.1.1. Pretvorba sunčevog zračenja u električnu energiju.....	3
2.1.2. Izrada solarnih ćelija .....	6
2.2. Fotonaponski moduli.....	9
2.2.1. Serijski i paralelni spoj fotonaponskih modula .....	10
2.2.2. Premosne diode .....	12
2.3. Pretvarači.....	15
2.3.1. Centralni pretvarači .....	15
2.3.2. Mikro pretvarači.....	16
2.3.3. Pretvarači niza .....	17
2.3.4. Centralni pretvarači s optimizatorima .....	18
2.4. Vrste fotonaponskih sustava.....	19
2.4.1. Autonomni fotonaponski sustavi.....	20
2.4.2. Mrežni fotonaponski sustavi .....	21
2.4.3. Hibridni fotonaponski sustavi .....	22
3. RAZINE PROJEKATA U PROJEKTIRANJU ELEKTRIČNIH POSTROJENJA .....	24
3.1. Projektni zadatak .....	26
3.2. Idejno rješenje .....	27
3.3. Idejni projekt .....	27
3.4. Investicijski elaborat .....	28
3.5. Glavni projekt.....	29
3.6. Izvedbeni projekt.....	30
3.7. Dokumentacija za pogon i održavanje .....	31
4. GLAVNI PROJEKT SUNČANE ELEKTRANE HALE SORTIRNICE .....	32
4.1. Projektni zadatak .....	32
4.2. Opis tehnologije .....	33
4.3. Analiza lokacije.....	34
4.4. Tehnički opis sunčane elektrane .....	34
4.4.1. Fotonaponski moduli.....	35
4.4.2. Pretvarači.....	37
4.4.3. Potkonstrukcija za montažu modula .....	38
4.4.4. Zaštitna oprema sunčane elektrane .....	38
4.4.5. Gromobranska i uzemljivačka instalacija .....	39

4.4.6. Priključak sunčane elektrane na elektroenergetsku mrežu.....	39
5. TEHNIČKI PRORAČUNI SUNČANE ELEKTRANE HALE SORTIRNICE .....	40
5.1. Procjena proizvodnje električne energije .....	41
5.2. Proračun prilika na istosmjernom razvodu.....	43
5.3. Proračun istosmjernih kabela na ulaznoj strani pretvarača .....	44
5.4. Proračun prilika na izmjeničnom razvodu .....	48
5.5. Proračun gubitaka na izmjeničnoj strani elektrane .....	49
5.6. Ukupni gubici elektrane .....	50
5.7. Proračun struje kratkog spoja na izlaznoj strani elektrane .....	51
6. DOKUMENTACIJA U POSTUPKU PRIKLJUČENJA ELEKTRANE NA MREŽU .....	52
6.1. Elaborat utjecaja elektrane na mrežu .....	52
6.1.1. Problematika prijelaznog procesa prilikom uključenja/isključenja elektrane na mrežu .....	54
6.1.2. Utjecaj elektrane na MTU signal .....	55
6.1.3. Doprinos elektrane treperenju napona (flikerima) .....	56
6.1.4. Emisija strujnih harmonika elektrane.....	57
6.2. Operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu.....	58
6.2.1. Preduvjeti za provedbu priključenja proizvodnog postrojenja na mrežu.....	58
6.2.2. Utvrđivanje i usklađivanje okretnog polja .....	59
6.2.3. Uključenje proizvodnog postrojenja i sinkronizacija na mrežu .....	59
6.2.4. Ispitivanje mogućnosti rada proizvodnog postrojenja u definiranom režimu rada .....	60
6.2.5. Ispitivanje izlaska proizvodnog postrojenja iz paralelnog pogona s mrežom (normalni isklop).....	60
6.2.6. Ispitivanje automatskog ponovnog uključenja proizvodnog postrojenja i sinkronizacije na mrežu nakon povratka mrežnog napona.....	61
6.2.7. Provjera ograničenja snage predaje u mrežu .....	61
6.2.8. Ispitivanje odziva korisnika mreže na nestanak mrežnog napona .....	62
6.3. Elaborat podešenja zaštite .....	63
6.3.1. Zaštite u pretvaračima .....	63
6.3.2. Utjecaj priključenja elektrane na prilike pri kratkom spoju.....	64
6.3.3. Zaštita od otočnog rada .....	64
7. ZAKLJUČAK .....	66
8. LITERATURA.....	68
9. SAŽETAK RADA I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLESKOM JEZIKU.....	69
10. PRILOG .....	71
10.1. Dispozicija modula elektrane .....	72
10.2. Shema ožičenja FN modula elektrane.....	73



10.3. Jednopolna shema istosmjernog razvoda elektrane .....	74
10.4. Jednopolna shema izmjeničnog razvoda elektrane .....	75
10.5. Sustav zaštite od djelovanja munje (LPS) – krovne plohe.....	76

# 1. UVOD

Sunčeva, geotermalna i gravitacijska energija su tri izvora ukupne energije na Zemlji. Sunčeva energija je neiscrpan izvor energije koji se može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Prednost sunčeve energije je u tome što je energija dostupna u izobilju, a proizvodnja električne energije ne šteti okolišu kao u slučaju kod elektrana na fosilna goriva. Zbog toga električna energija proizvedena iz obnovljivih izvora energije (koja uključuje i sunčevu energiju) postepeno postaje kompetitivna energiji iz fosilnih goriva. Predviđa se da će u budućnosti energija sunca i vjetra biti glavni izvor u proizvodnji električne energije. Energija sunca najveći je izvor energije koji je također i najmanje korišten izvor.

Otkako je 1954. godine izumljena solarna ćelija postala je vrlo važna opcija za proizvodnju električne energije velikih snaga. Godine 1958. prva solarna ćelija puštena je u prodaju. Današnje solarne ćelije imaju iskoristivost do 22 %. U 2015. godini električna energija iz sunčanih elektrana pridonosi 1 % globalnoj proizvodnji električne energije. Predviđa se da će do 2050. godine ukupan udio od 27 % svjetske proizvodnje električne energije biti iz fotonaponskih elektrana.

Ovim diplomskim radom prikazati će se projektiranje jedne sunčane elektrane. Stoga će kao uvod u rad u 2. poglavlju biti opisan princip proizvodnje električne energije iz sunčeve energije kao i najbitniji dijelovi fotonaponskog sustava te koje sve vrste fotonaponskih sustava postoje.

U 3. poglavlju opisati će se razine projekata u projektiranju električnih postrojenja.

Glavni projekt sunčane elektrane opisan je u 4. poglavlju, a on prikazuje opisno predmetnu elektranu.

Svi bitni tehnički proračuni kao što je procjena proizvodnje, proračuni istosmjernih i izmjeničnih kabela i gubici sunčane elektrane sadržani su u 5. poglavlju.

U 6. poglavlju opisana je dokumentacija u postupku priključenja elektrane na mrežu, ovo poglavlje sadrži samo opisno elaborat utjecaja elektrane na mrežu, operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu i elaborat podešenja zaštite.

Zaključak ovog diplomskog rada na temelju teorijskog i proračunskog dijela opisan je u 7. poglavlju.

Literatura koja je korištena tijekom pisanja diplomskog rada prikazana je u poglavlju 8., sažetak rada i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku dani su u poglavlju 9.

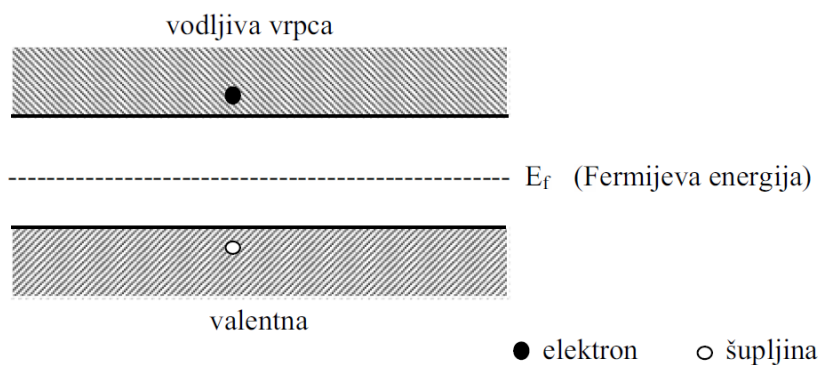
Nacrtna dokumentacija sunčane elektrane hale sortirnice prikazana je u poglavlju 10.

## 2. OPĆENITO O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA

Fotonaponski sustavi sadrže puno različitih komponenata. Za uspješno projektiranje fotonaponskog sustava ključno je za razumjeti funkcije različitih komponenata te poznavanje njihovih glavnih tehničkih podataka. Neki od najbitnijih komponenti, koje će biti objašnjenje u ovom poglavlju su: solarna ćelija, fotonaponski modul i pretvarač.

### 2.1. Solarne ćelije

PN-spoj, poznatiji kao poluvodička dioda, pojavljuje se kao osnova solarne ćelije. Kako bi nastao P-tip poluvodiča kristalu čistog poluvodiča moraju se dodati trovalentne (akceptorske) primjese. Za nastanak N-tipa poluvodiča dodaju se peterovalentne (donorske) primjese. Zbog gradijenta koncentracije na granici između PN-spoja dolazi do difuzije elektrona. Elektroni iz N-područja idu prema P-području, a šupljine idu iz P-područja prema N-području. Kako je broj elektrona u vodljivoj vrpci jednak broju šupljina u valentnoj vrpci, Fermijeva energijska razina  $E_f$ , prikazana na slici 2.1. [1], se nalazi na sredini.



Slika 2. 1. Prikaz Fermijeve energijske razine

Ispravljačko djelovanje najbitnije je svojstvo PN-spoja, ukoliko je P-područje pozitivno a N-negativno, lakše će voditi struju. U ovom slučaju napon je u propusnom smjeru, dok je u suprotnom slučaju napon u zapornom smjeru. Ako se na PN-spoj priključi izvor vanjskog napona u propusnom smjeru, tako da je pozitivan pol na P-strani a negativan na N-strani, protekne struja elektrona iz N-područja prema P-području i šupljina iz P-područja prema N-području [1].

Jakost struje  $I_d$  kroz PN-spoj i vanjski napon  $U$  naziva se još i I-U karakteristika diode, a definira se jednadžbom (2.1.):

$$I_d = I_z(e^{eU/kT} - 1) \quad (2.1.)$$

gdje je:

$I_d$  – struja diode (jakost struje kroz PN-spoj),

$I_z$  – struja zasićenja,

$e$  – elementarni naboj ( $1.02176462 \cdot 10^{-19}$  C),

$U$  – električni napon,

$k$  – Boltzmannova konstanta ( $1.3806 \cdot 10^{-23}$  J/K),

$T$  – termodinamička temperatura.

### 2.1.1. Pretvorba sunčevog zračenja u električnu energiju

Pretvorba sunčevog zračenja zasniva se na fotonaponskom efektu, kojeg je prvi opisao 1839. godine Edmond Becquerel. On je otkrio fotonaponski efekt kada je dvije ploče od platine ili zlata uronio u kiselu, neutralnu ili lužnatu otopinu te ju je izložio sunčevu zračenju. Posljedično je došlo do proizvodnje električne struje poznatijem kao fotonaponski efekt.

Elektromotorna sila (napon) nastaje, zbog fotonaponskog efekta, na krajevima solarne ćelije kada se ona osvijetli odnosno kada upija sunčevo zračenje. Na taj način solarna ćelija proizvodi električnu energiju.

Fotoni su snop čestica kojim se opisuje sunčevo zračenje (elektromagnetski valovi) kod analiziranja emisije i upijanja sunčevog zračenja solarnih ćelija. Tok fotona koji upada na solarnu ćeliju potreban nam je kod proračuna fotostruje solarnih ćelija. Elektromagnetski spektar naziv je za ukupan raspon zračenja nastao u svemiru. Pojedina elektromagnetska zračenja razlikuju se samo po frekvenciji. Gibanjem električnog naboja u elektromagnetskom polju nastaje svjetlost. Ukoliko se atomu potaknu, vanjskom energijom, elektroni on će odašiljati svjetlost. Valom se prikazuje zračenje tih pobuđenih elektrona. Manju frekvenciju, ali veću valnu duljinu ima svjetlost manje energije, dok svjetlost s većom frekvencijom i manjom valnom duljinom ima više energije. Fotoni se gibaju brzinom svjetlosti  $c_0$  te su oni čestice bez naboja. Einsteinovom relacijom definira se energija fotona (2.2.):

$$E = h * \nu = h * \frac{c_0}{\lambda} \quad (2.2.)$$

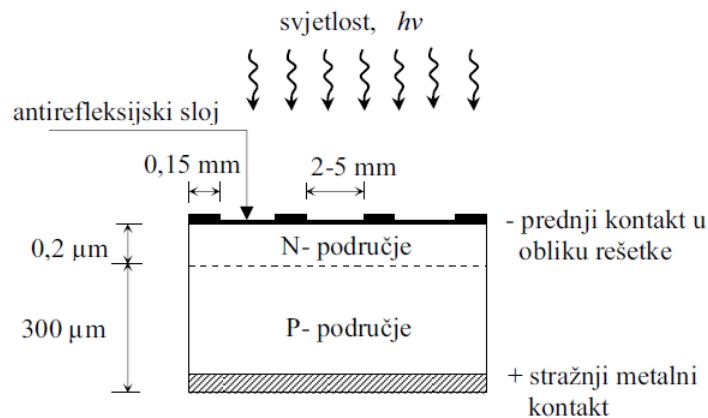
gdje je:

$h$  – Planckova konstanta ( $6.625 \cdot 10^{-34}$  Js),

$\nu$  – frekvencija promatranog elektromagnetskog zračenja,

$c_0$  – brzina svjetlosti ( $3 \cdot 10^8$  m/s),

$\lambda$  – valna duljina.

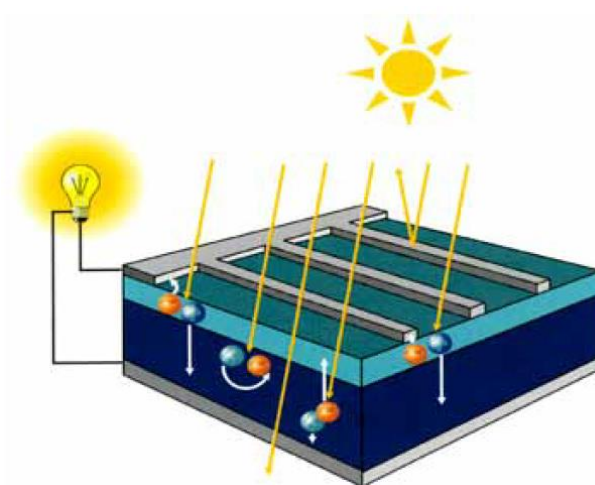


Slika 2. 2. Izgled silicijeve solarne ćelije

Slika 2.2. prikazuje izgled silicijeve solarne ćelije [1]. U njoj su na površini pločice P-tipa silicija difundirane primjese, npr. fosfor. To se radi zbog toga da nastane područje N-tipa poluvodiča na tankom površinskom sloju. Metalna rešetka, koja se nalazi na prednjoj površini ćelije, ne pokriva više od 5 % površine i služi nam za skupljanje naboja nastalog apsorpcijom fotona iz sunčevog zračenja. Metalnim kontaktom prekrivena je stražnja strana solarne ćelije. Antirefleksijski sloj ima za zadatak da smanji refleksiju sunčeve svjetlosti, samim time povećava se djelotvornost solarne ćelije.

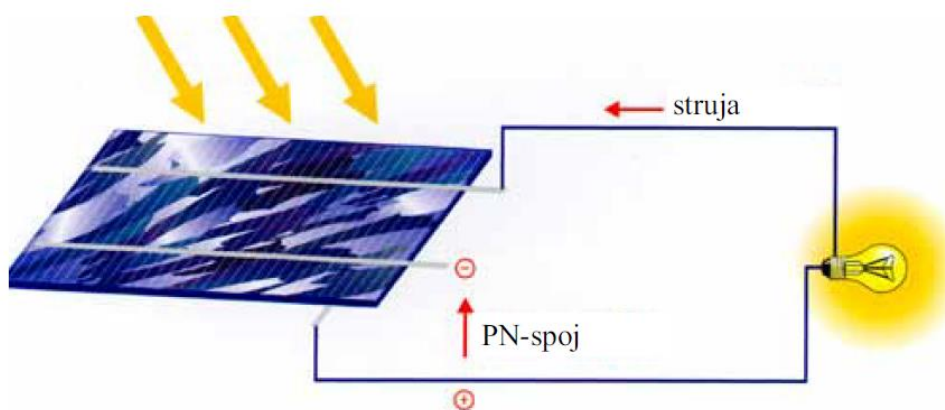
Kao što je ranije navedeno, elektromotorna sila (napon) nastaje kada se solarna ćelija osvijetli. Tada se solarna ćelija ponaša kao ispravljajući uređaj (propušta struju u samo jednom smjeru) odnosno može se prikazati kao poluvodička dioda (PN-spoj). Ako se PN-spoj osvijetli dolazi do proizvodnje parova elektron-šupljina zbog apsorbiranih fotona. Rekombinacija nastalih parova nastaje ukoliko se apsorpcija nije desila blizu PN-spoja. U osiromašenom području nalazi se unutrašnje električno polje koje odvaja nastali elektron i šupljinu ako je apsorpcija nastala blizu ili unutar PN-spoja. Prema N-strani giba se elektron, dok se prema P-strani giba šupljina. Do

pojave elektromotorne sile (napona), na krajevima solarne ćelije, dolazi zbog skupljanja šupljina i elektrona na suprotnim stranama PN-spoja, što je prikazano na slici 2.3. [1].



Slika 2. 3. Prikaz nastanka elektron-šupljina u solarnoj ćeliji

Kod osvjetljivanja solarne ćelije kontakt na P-dijelu biti će pozitivan, dok će na N-dijelu biti negativan. Ukoliko se kontakti solarne ćelije spoje s vanjskim trošilom, proteći će električna struja, te će time ćelija postati izvorom električne energije, što je prikazano na slici 2.4. [1].



Slika 2. 4. Izvor električne energije preko solarne ćelije

## 2.1.2. Izrada solarnih ćelija

Materijali od kojih se izrađuju solarne ćelije su: monokristali, polikristali i amorfni. Za izradu solarnih ćelija, od materijala trenutno dostupnih na tržištu, najpoznatiji su: monokristalični silicij, polikristalinični silicij, amorfni silicij, kadmij telurid, itd. Solarne ćelije definiraju se parametrima napona praznog hoda  $U_{ph}$ , gustoće struje kratkog spoja  $J_{ks}$  i stupnja djelovanja ćelije, parametri solarnih ćelija za različite materijale dani su u tablici 2.1.

Tablica 2. 1. Parametri solarnih ćelija za različite materijale

Vrsta ćelije	$U_{ph}$ [V]	$J_{ks}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$\eta$
Monokristalna-Si	0.65	30	0.17
Polikristalna-Si	0.60	26	0.15
Amorfna-Si	0.85	15	0.09
CdS/Cu <sub>2</sub> S	0.5	20	0.10
CdS/CdTe	0.7	15	0.12
GaAlAs/GaAs	1	30	0.24
GaAs	1	20	0.27

U današnjoj tehnologiji izrade solarnih ćelija prevladava siliciji sa udjelom od 98 % i to kao tehnologija kristalnog silicija. Najčešće se proizvodi monokristalni silicij koji se može dobiti na dva načina:

1. Czochralskim postupkom,
2. tehnologija lebdeće zone (eng. *float zone*).

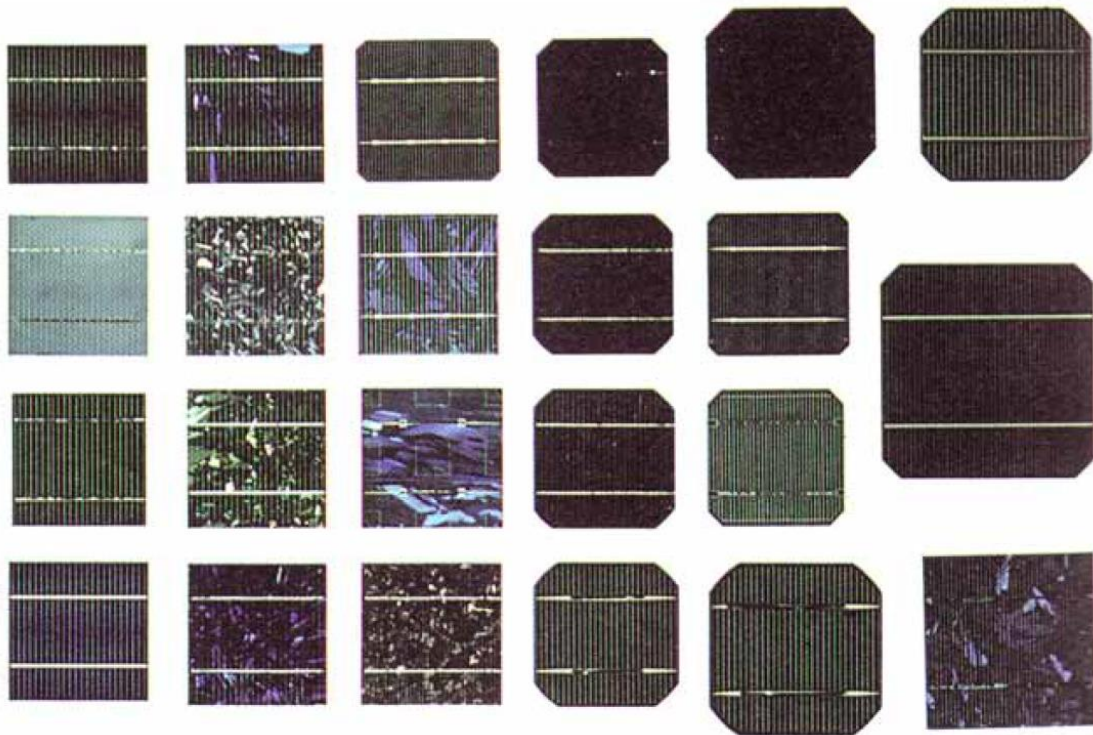
Učinkovitost solarne ćelije od monokristalnog silicija je veća, ali je proizvodnja skuplja. Jedan od nedostataka kristalnog silicija je da je on poluvodič s neizravnim zabranjenim pojasom. S tim u vezi, potrebne su velike debljine aktivnog sloja za što veće iskorištavanje energije sunčeva zračenja.

Jedna od tehnologija koristi primjenu trakastog silicija koji ima prednost u tome što tijekom proizvodnje nema potrebe za rezanjem vafera. Zbog rezanja vafera gubi se čak 50 % materijala.

Kod tehnologije tankog filma u primjenu dolaze poluvodiči s izravnim zabranjenim pojasom. To za posljedicu ima manje debljine pa je i utrošak materijala manji. Zbog toga je i niža cijena proizvodnje, što otvara mogućnost proizvodnje velikog broja solarnih ćelija. Solarne ćelije proizvedene tehnologijom tankog filma spadaju u treću generaciju solarnih ćelija. Neki od eksperimentalnih poluvodičkih materijala za izradu su:

- bakar-indij-galij-selenid (CIGSS),
- bakar-indij-diselenid (CIS),
- kadmij telurid (CdTe).

Solarne ćelije napravljene od tankog filma silicija (TFSi) jedine su ušle u masovnu proizvodnju. Sama izvedba postiže se tankim slojevima (filmova) poluvodičkih materijala koji se postavljaju na podlogu (tzv. supstrat). Ovakva izvedba ima prednost fleksibilnosti u odnosu na klasične solarne ćelije što omogućava širu primjenu. U usporedbi sa klasičnom silicijevom solarnom ćelijom, djelotvornost iznosi 7 do 10 %, što solarnoj ćeliji od tankog filma predstavlja negativnu stranu. Slika 2.5. prikazuje ćelije od kristala raznih boja i dimenzija [1].



*Slika 2. 5. Ćelije od kristala raznih boja i dimenzija*



Na slici 2.6. prikazane su različite izvedbe solarnih ćelija: lijevo – solarna ćelija od bakar-indij-diselenida (CIS), sredina – solarna ćelija od amornog silicija, desno – solarna ćelija od kadmijeva telurida (CdTe) [1].



Slika 2. 6. Različite izvedbe solarnih ćelija: lijevo – solarna ćelija od bakar-indij-diselenida (CIS), sredina – solarna ćelija od amornog silicija, desno – solarna ćelija od kadmijeva telurida (CdTe)

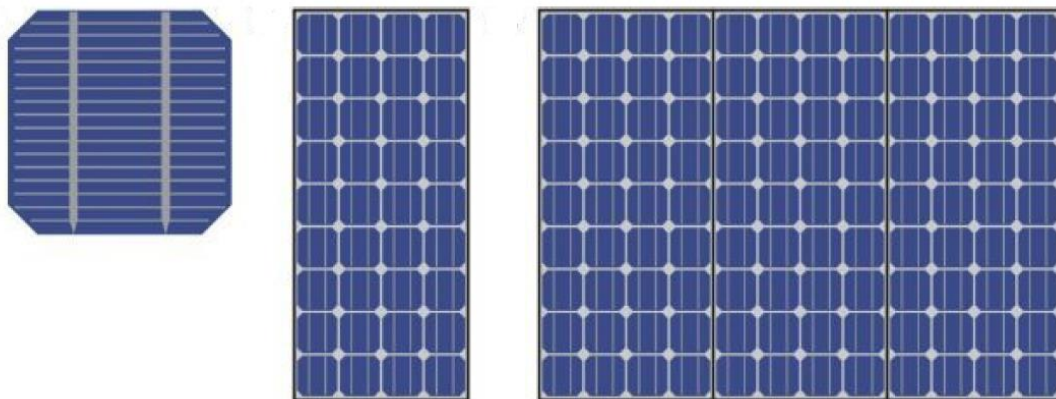
Slika 2.7. prikazuje proces proizvodnje solarnih ćelija [1].



Slika 2. 7. Proces proizvodnje solarnih ćelija

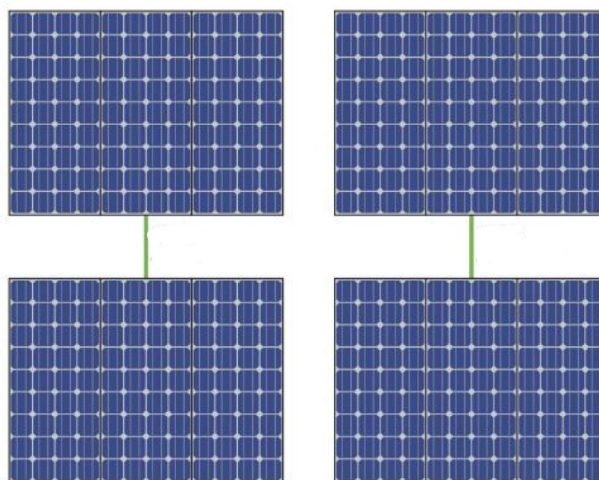
## 2.2. Fotonaponski moduli

Spajanjem više fotonaponskih (solarnih) ćelija dobiva se fotonaponski modul, dok se kod spajanja više fotonaponskih modula na noseću konstrukciju dobiva fotonaponski panel, slika 2.8. prikazuje spajanje solarne ćelije sve do fotonaponskog panela [2].



*Slika 2. 8. Spajanje fotonaponske ćelije u modul i modula u fotonaponski panel*

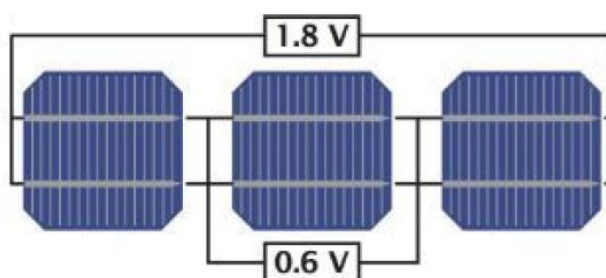
Fotonaponski moduli mogu se spajati u seriju ili paralelu, o čemu će više biti riječi u potpoglavlju koji slijedi. Nekoliko fotonaponskih panela čine fotonaponski niz. Fotonaponski niz, prikazan na slici 2.9. [2], sastoji se od dva niza sa po dva solarna panela svaki, gdje niz predstavlja spoj panela u seriju.



*Slika 2. 9. Prikaz spoja dva fotonaponska niza*

### 2.2.1. Serijski i paralelni spoj fotonaponskih modula

Ako od skupa solarnih ćelija napravimo solarni modul, možemo spojiti solarne ćelije na različite načine. Prvi način na koji možemo spojiti solarne ćelije je serijski spoj, u serijskom spoju naponi se zbrajaju. Napon otvorenog kruga jedne solarne ćelije iznosi 0.6 V, kod serijskog spoja triju solarnih ćelija taj napon će iznositi 1.8 V. Slika 2.10. prikazuje iznos napona praznog hoda jedne solarne ćelije te napon triju solarnih ćelija spojenih u seriju [2].



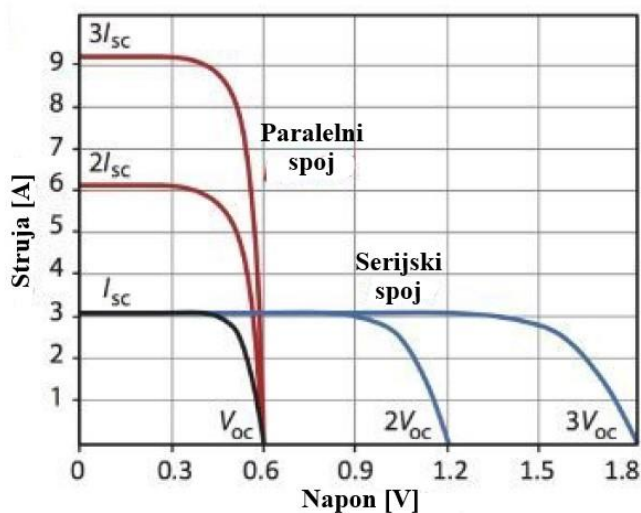
*Slika 2. 10. Iznos napona praznog hoda jedne solarne ćelije te napon triju solarnih ćelija spojenih u seriju*

Za solarne ćelije s klasičnom prednjom metalnom rešetkom serijski spoj postiže se tako da se spoji sabirnica na prednjoj strani sa stražnjim kontaktom susjedne ćelije, to je prikazano slikom 2.11. [2].



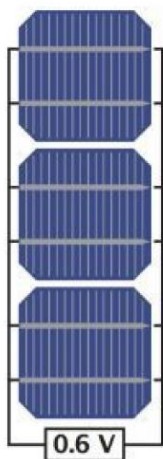
*Slika 2. 11. Prikaz mogućeg načina serijskog spajanja solarnih ćelija*

Kod serijskog spoja solarnih ćelija struje se ne zbrajaju. Iznos struje cijelog niza određuje solarne ćelija koja daje najmanju struju. Dakle, ukupna struja u serijskom spoju solarnih ćelija jednaka je najmanjoj struji koju stvara jedna solarne ćelija. Slika 2.12. prikazuje I-U karakteristiku solarne ćelije spojene u seriju i paralelu [2].



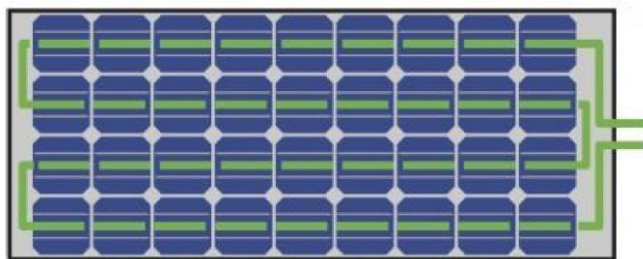
Slika 2. 12. I-U karakteristika solarne ćelije spojene u seriju i paralelu

Također, solarne ćelije mogu se spajati i u paralelu. Kod ovakvog spoja napon ostaje isti dok se struja solarnih ćelija zbraja. Tako bi struja, za paralelni spoj triju solarnih ćelija, bila tri puta veća nego kod jedne solarne ćelije. To se može vidjeti i iz I-U karakteristike sa slike 2.12., dok slika 2.13. prikazuje paralelni spoj triju solarnih ćelija [2].



Slika 2. 13. Paralelni spoj triju solarnih ćelija

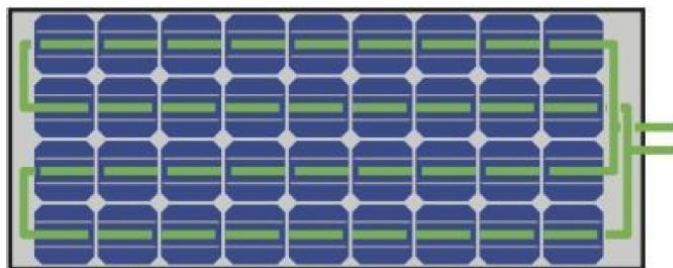
Nekoliko serijski spojenih solarnih ćelija može se spojiti u paralelu. Također i paralelni spoj solarnih ćelija može se spojiti u seriju. Međutim to se u praksi ne prakticira zbog toga što tada struje postaju znatno više što rezultira u većim gubicima prijenosa nego kod serijskog spoja. Slika 2.14. prikazuje serijski spoj od 36 solarnih ćelija kod jednog fotonaponskog modula [2].



Slika 2. 14. Serijski spoj 36 solarnih ćelija za jedan fotonaponski modul

Ako jedna solarna ćelija, sa slike 2.14., ima struju kratkog spoja od 5 A, a napon praznog hoda od 0.6 V, tada modul ima izlazni napon od  $U = 36 \cdot 0.6 \text{ V} = 21.6 \text{ V}$  i struju  $I = 5 \text{ A}$ .

Slika 2.15. prikazuje paralelni spoj dva niza sa po 18 solarnih ćelija spojenih u seriju [2].



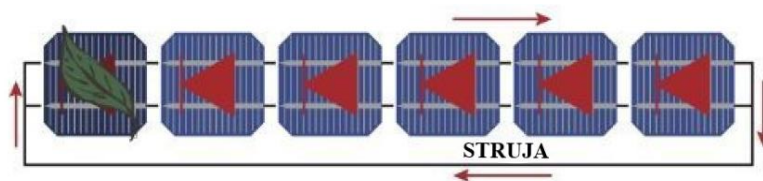
Slika 2. 15. Paralelni spoj dva niza sa po 18 solarnih ćelija spojenih u seriju

Kod spoja sa slike 2.15. izlazni napon bi iznosio  $U = 18 \cdot 0.6 \text{ V} = 10.8 \text{ V}$ , a struja  $I = 2 \cdot 5 \text{ A} = 10 \text{ A}$ . Općenito, za I-U karakteristike modula koji se sastoji od m identičnih ćelija u seriji i n identičnih nizova u paraleli, napon se množi sa faktorom m, dok se struja množi sa faktorom n. Današnji fotonaponski moduli najčešće sadrže 60, 72 pa čak i 96 solarnih ćelija koji su spojeni u seriju. Sve se to radi u svrhu smanjenja gubitaka prijenosa te zbog dobivanja što većeg napona koji je potreban za učinkovit rad pretvarača.

### 2.2.2. Premosne diode

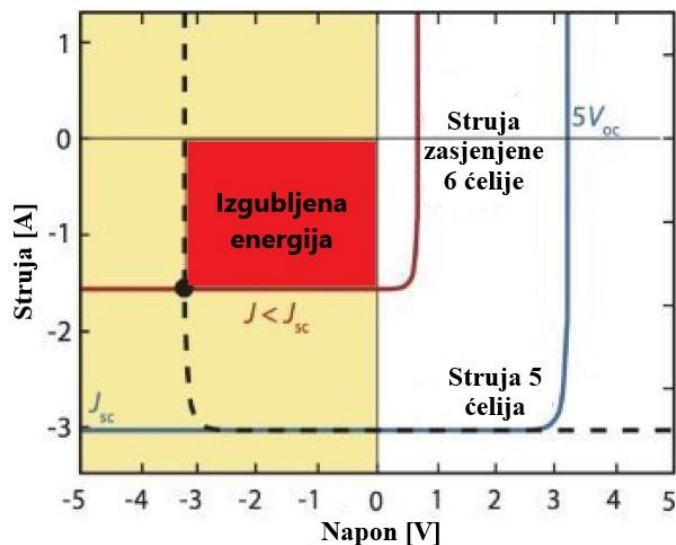
Fotonaponski moduli sadrže tzv. premosne diode. Premosne diode su potrebne zbog toga što u stvarnim uvjetima fotonaponski moduli mogu biti djelomično zasjenjeni. Sjena može doći od objekta u blizini, poput drveta, dimnjaka ili susjedne zgrade. Također ju može uzrokovati list koji je pao na fotonaponski modul. Djelomično zasjenjenje može imati značajne posljedice na

izlazne parametre fotonaponskog modula. Za primjer, uzmimo šest solarnih ćelija spojenih u seriju od koje je jedna pokrivena listom, što je prikazano na slici 2.16. [2].



Slika 2. 16. Serijski spoj šest solarnih ćelija bez prenosnih dioda

Kod pada lista na jednu solarnu ćeliju doći će do smanjenja struje koju proizvodi ćelija. Za serijski spoj solarnih ćelija ukupna struja određena je najmanjom strujom koju proizvodi jedna ćelija. Slika 2.17. prikazuje I-U karakteristiku za solarne ćelije koje nisu zasjenjene i jednu ćeliju koja je zasjenjena [2].



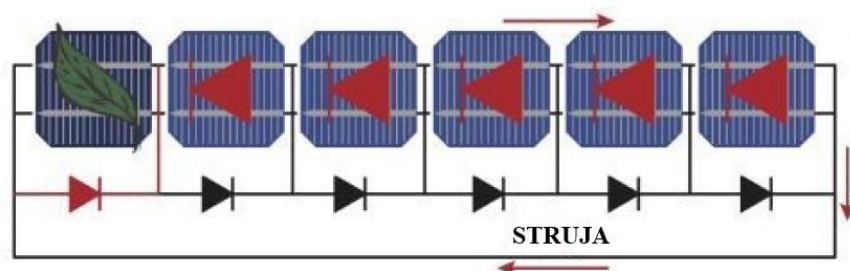
Slika 2. 17. I-U karakteristika solarnih ćelija koje nisu zasjenjene i jedne ćelije koja je zasjenjena

Pet ne zasjenjenih solarnih ćelija ponašaju se kao obrnuti izvor u odnosu na zasjenjenu diodu, što je prikazano isprekidanom linijom na slici 2.17. Zasjenjena solarna ćelija radi na sjecištu svoje krivulje i isprekidane krivulje. Radna točka nalazi se u području negativnog napona te zbog toga solarna ćelija ne proizvodi energiju već „prosipa“ energiju i počinje se zagrijavati.



Temperatura ćelije može doseći takvu vrijednost da dođe do pucanja zaštitnog sloja između antirefleksijskog sloja i stražnjih slojeva fotonaponskog modula. Visoke temperature također vode do snižavanja parametara fotonaponskih modula.

Ugradnjom premosne diode problemi uzrokovani zasjenjivanjem mogu se spriječiti. Slika 2.18. prikazuje serijski spoj šest solarnih ćelija uz upotrebu premosnih dioda [2].



*Slika 2. 18. Serijski spoj šest solarnih ćelija uz upotrebu premosnih dioda*

Kao što je poznato dioda blokira struju kada je pod negativnim naponom, a provodi struju kada se nalazi pod pozitivnim naponom. Stoga, ako solarna ćelija nije zasjenjena kroz premosnu diodu neće teći struja. Ukoliko je jedna od ćelija zasjenjena premosna dioda će provoditi struju. Kao rezultat imamo da struja teče kroz premosnu diodu i fotonaponski modul i dalje može proizvoditi struju jednaku onoj u ne zasjenjenoj jednoj solarnoj ćeliji. U stvarnosti kod fotonaponskih modula nije svaka solarna ćelija opremljena premosnom diodom nego grupa ćelija dijele jednu diodu. Kod fotonaponskog modula od 60 solarnih ćelija, spojenih u seriju koje tvore jedan niz, modul može sadržavati tri premosne diode gdje svaka dioda dijeli po 20 ćelija.

## 2.3. Pretvarači

Osnovna tehnologija povezana s fotonaponskim sustavima kod pretvorbe električne energije su pretvarači. Pretvarači imaju za zadatak pretvaranje istosmjerne struje dobivene iz fotonaponskih panela u izmjeničnu struju. Karakteristike pretvarača ovise o vrsti fotonaponskog sustava, da li je autonomni ili mrežni. O vrstama fotonaponskih sustava biti će više riječi u poglavljima koji slijede, za sada će se samo opisati kakve karakteristike pretvarača su ovisno o različitim fotonaponskim sustavima.

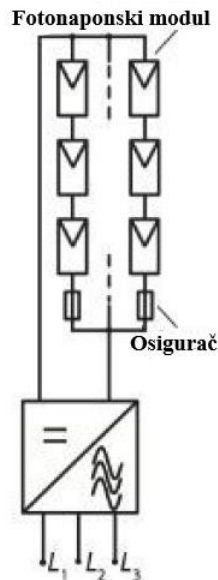
Kod mrežnih fotonaponski sustava pretvarač je spojen direktno na fotonaponske panele. On pretvara istosmjernu struju koja dolazi s fotonaponskih panela u izmjeničnu struju. Kako je pretvarač spojen direktno na mrežu izmjenična struja koju pretvori mora biti u fazi s onom iz mreže. Kada dođe do nestanka napona u mreži, na koji je spojen, pretvarač se isključuje.

Pretvarači za autonomne fotonaponske sustave najčešće, ali ne mora biti, su spojeni na baterijske spremnike. Ovakvi pretvarači posebno su napravljeni za korištenje s baterijama pri čemu ne dozvoljavaju duboko pražnjenje. Duboko pražnjenje štetno bi utjecalo na vijek trajanja baterije.

### 2.3.1. Centralni pretvarači

Ovo je najjednostavnija vrsta pretvarača koja se koristi u fotonaponskim sustavima. Fotonaponski moduli spojeni su u seriju što rezultira u većem naponu. Serija modula je zatim spojena u paralelu te se tako dobiva fotonaponska mreža koja je spojena na jedan centralni pretvarač. Slika 2.19. prikazuje shemu centralnog pretvarača [2].





Slika 2. 19. Shema centralnog pretvarača

Ovakva konfiguracija koristi se kod velikih fotonaponskih elektrana pri čemu je centralni pretvarač obično istosmjerni s tri faze. Mnoge različite topologije pretvarača koriste se kao trofazni pretvarači. Ponekad su konfigurirani kao jedna jednofazna ili trofazna jedinica, a nekada i kao tri odvojene jednofazne jedinice koje rade s faznim pomakom od  $120^\circ$  svaka.

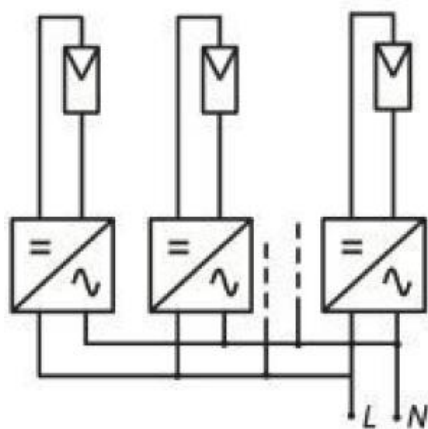
Ukoliko se fotonaponski moduli spajaju u jedan niz kao kod ovakve centralne konfiguracije to nam daje najniži specifični trošak (trošak po  $kW_p$  instalirane snage). Budući da centralni pretvarači koriste samo nekoliko komponenti vrlo su pouzdani što ih čini preferiranom opcijom kod velikih fotonaponskih elektrana.

Usprkos svojoj jednostavnosti i niskom specifičnom trošku, centralni pretvarači imaju i svoje nedostatke. Zbog rasporeda sistema kroz istosmjerne kablove prenosi se velika količina snage. To može uzrokovati sigurnosne probleme jer je istosmjernu struju kratkog spoja teško prekinuti. Također je potrebno i odabrati deblju izolaciju istosmjernog kabela te posebne prekidače, što može povećati troškove.

### 2.3.2. Mikro pretvarači

Mikro pretvarači spojeni su na jedan ili više fotonaponskih modula i imaju nazivnu snagu od nekoliko stotina W. Zbog niskog napona modula ovi pretvarači često zahtijevaju dvostupanjsko pretvaranje snage. U prvom stupnju istosmjerni napon se podiže na traženu vrijednost dok se u drugom stupnju pretvara u izmjenični napon. Često je zbog toga ugrađen transformator koji

također pruža potpunu galvansku izolaciju što poboljšava fleksibilnost sustava. Slika 2.20. prikazuje shemu mikro pretvarača [2].



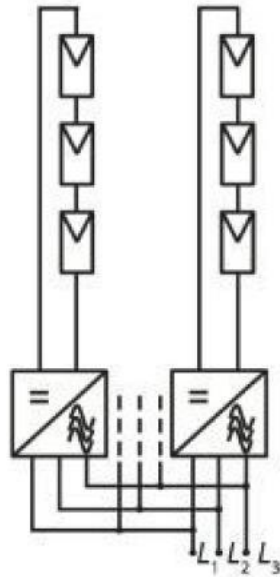
Slika 2. 20. Shema mikro pretvarača

Ovi pretvarači se obično postavljaju blizu fotonaponskih panela, ponekad mogu biti izravno integrirani u panele (tzv. „izmjenični fotonaponski paneli“). Jedna od prednosti ovakvog koncepta pretvarača je laka i brza instalacija te niska cijena ulaganja fotonaponskog sustava.

Kako su ovi pretvarači postavljeni blizu panela (ili čak u panelima) rade na svim vanjskim uvjetima koji mogu biti visoke i niske temperature, kiša, led i slično. Jedan od nedostataka je i što su pretvarači napravljeni za mali raspon ulaznih napona. Zbog toga nije moguće korištenje prenosnih dioda kod modula koji premošćuju jednu ili dvije trećine modula. Mikro pretvarači imaju najveći specifičan trošak od svih drugih pretvarača.

### 2.3.3. Pretvarači niza

Pretvarači niza kombiniraju prednosti centralnog pretvarača i mikro pretvarača uz male kompromise. U jednofaznoj izvedbi imaju snagu od 5-6 kW<sub>p</sub>, a u trofaznoj 20-30 kW<sub>p</sub>, slika 2.21. prikazuje shemu pretvarača niza [2].

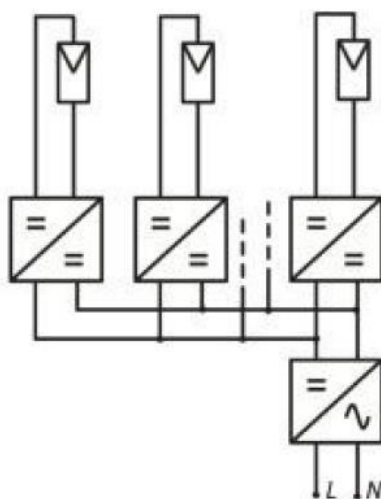


*Slika 2. 21. Pretvarači niza*

Naponi praznog hoda mogu ići i do 1 kV, što predstavlja prvi nedostatak ovih pretvarača. Ovdje je to vrlo važno jer se pretvarači niza ugrađuju kod kućanstava ili u poslovnim zgradama bez određene potporne konstrukcije ili povećanih sigurnosnih zahtijeva. Stoga zaštita sustava zahtijeva posebnu pažnju s naglaskom na pravilan izbor istosmjernog kabela.

#### 2.3.4. Centralni pretvarači s optimizatorima

Ovi pretvarači su hibridna verzija između centralnog i mikro pretvarača. Optimizatorska kutija priključena je na svaki modul te sadrži solarni regulator punjenja i istosmjerno-istosmjerni pretvarač. Slika 2.22. prikazuje shemu centralnog pretvarača s optimizatorom [2].



Slika 2. 22. Centralni pretvarač s optimizatorom

Optimizacijske kutije svih fotonaponskih modula spojene su serijski na centralni pretvarač. Pretvarač može raditi na naponu samo u određenom rasponu. Ukoliko napon nije unutar tog raspona struja se mijenja tako da napon opet dođe unutar raspona. Kao posljedica toga, izlazni napon optimizatora određen je ulaznom snagom fotonaponskog modula i strujom pretvarača.

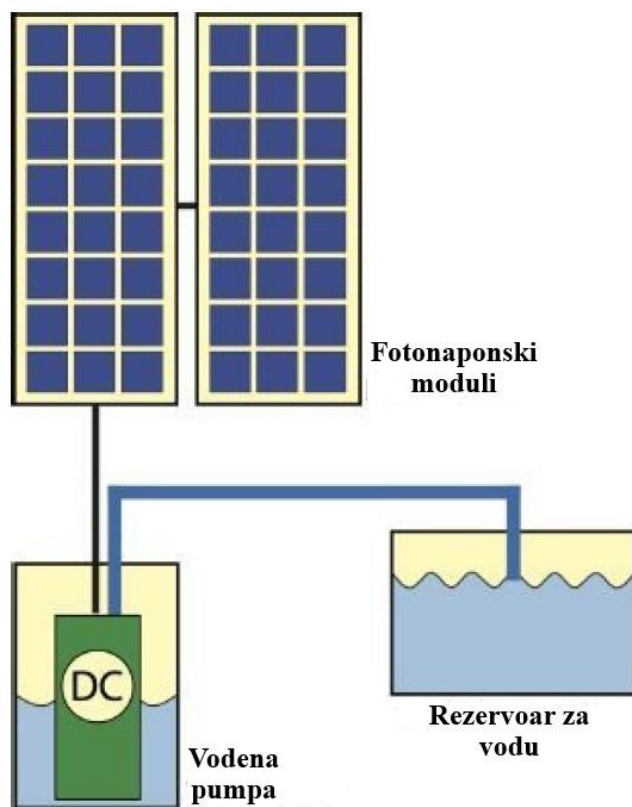
Glavna prednost ovog pretvarača je što svi optimizatori mogu raditi na naponu koji je blizak naponu fotonaponskog modula. Zbog toga je istosmjerno-istosmjerna pretvorba vrlo učinkovita. Također, optimizatori troše vrlo malo energije pa nema problema sa zagrijavanjem.

## 2.4. Vrste fotonaponskih sustava

Fotonaponski sustavi mogu biti mali i vrlo jednostavni sa samo jednim fotonaponskim modulom i teretom. Isto tako, mogu se graditi i kao velike elektrane sa snagom od nekoliko MW, takvi sustavi spojeni su na mrežu. Neka današnja kućanstva sadrže fotonaponske sustave. Kod kućanstava koji se napajaju isključivo iz fotonaponskog sustava, a nisu dodatno spojeni na električnu mrežu, takvi sustavi moraju biti u funkciji danju i noću. Također, moguće da će ti fotonaponski sustavi morati napajati izmjenična i istosmjerna trošila te imati izvor rezervnog napajanja. Ovisno o konfiguraciji sustava razlikujemo tri glavne vrste fotonaponskih sustava: autonomni, mrežni i hibridni sustavi. Kod svakih od ova tri sustava osnovni principi fotonaponskog sustava i elementi ostaju isti. Pojedini sustavi su prilagođeni da zadovolje posebne zahtjeve variranjem vrste i količine osnovnih elemenata.

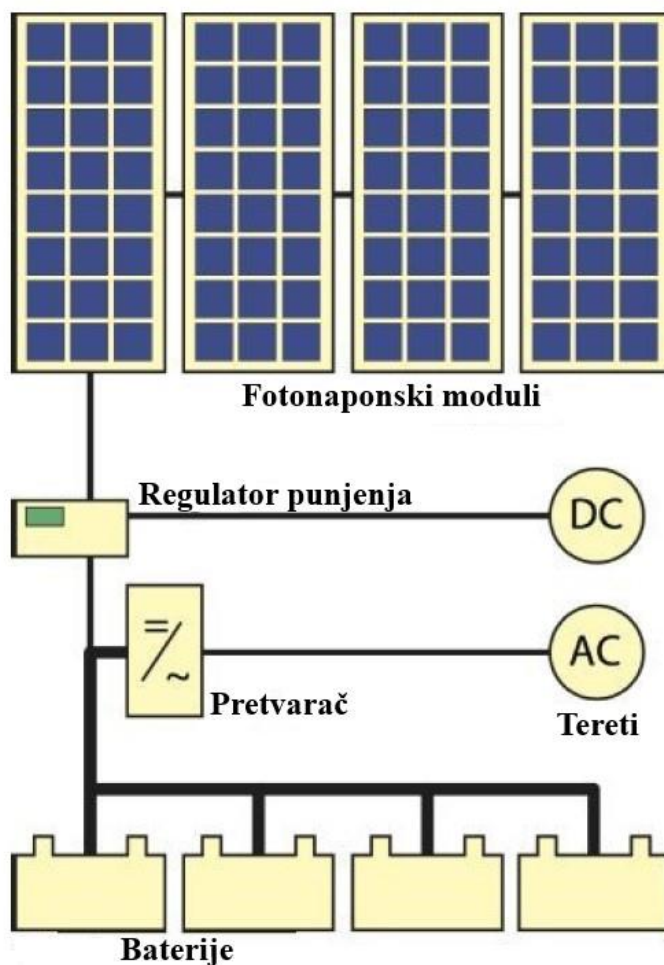
### 2.4.1. Autonomni fotonaponski sustavi

Autonomni fotonaponski sustavi oslanjaju se samo na solarnu energiju. Ovi sustavi mogu se sastojati samo od fotonaponskih modula i trošila, a mogu uključivati i baterije za pohranu energije. Kod korištenja baterija za pohranu energije moraju se koristiti regulatori punjenja koji odvajaju baterije od fotonaponskog modula kada su potpuno napunjene. Također, mogu isključiti opterećenje kako bi se spriječilo da se baterije isprazne ispod određene granice. Baterije moraju imati dovoljan kapacitet za pohranjivanje energije proizvedene tijekom dana kako bi se ta energija mogla koristiti noću ili tijekom razdoblja lošeg vremena. Slika 2.23. prikazuje autonomni fotonaponski sustav za napajanje vodene pumpe [2].



Slika 2. 23. Autonomni fotonaponski sustav za napajanje vodene pumpe

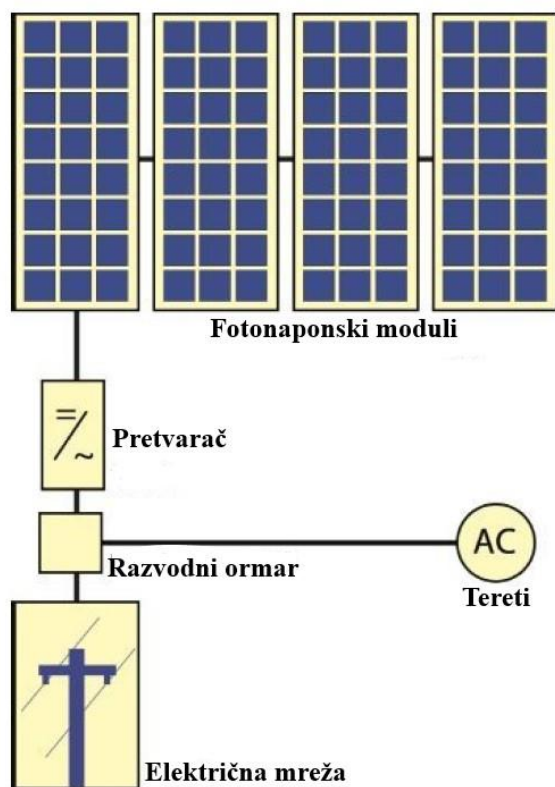
Slika 2.24. prikazuje autonomni fotonaponski sustav sa upotrebom baterija.



Slika 2. 24. Autonomni fotonaponski sustav sa upotrebom baterija

#### 2.4.2. Mrežni fotonaponski sustavi

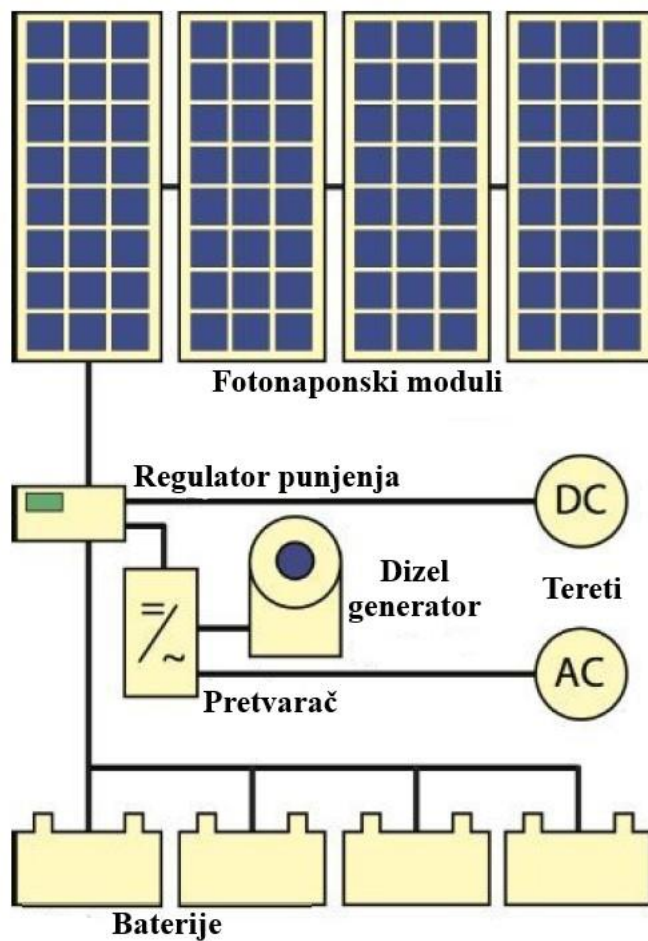
Mrežni fotonaponski sustavi spojeni su na mrežu preko pretvarača koji pretvaraju istosmjernu struju u izmjeničnu. Kod malih sustava kao što su oni instalirani u stambenim kućama pretvarač se spaja na razvodni ormar odakle se energija dalje prenosi u električnu mrežu ili u kućanstvo. U razvodnom ormaru nalazi se i brojilo proizvedene i preuzete električne energije. Ovakvi sustavi ne zahtijevaju korištenje baterija jer su spojeni na električnu mrežu gdje ona preuzima višak energije koji se ne iskoristi. Također, električna mreža može opskrbljivati kućanstvo ukoliko ne postoji dovoljno proizvedene energije iz solarne elektrane. Slika 2.25. prikazuje mrežni fotonaponski sustav [2].



Slika 2. 25. Mrežni fotonaponski sustav

### 2.4.3. Hibridni fotonaponski sustavi

Hibridni fotonaponski sustavi kombiniraju fotonaponske module s komplementarnom metodom proizvodnje električne energije kao što je dizel, plin ili vjetar. Kako bi se optimizirale različite metode proizvodnje električne energije, hibridni sustavi obično zahtijevaju sofisticiranije metode kontrole nego mrežni i autonomni sustavi. Na primjer, u slučaju fotonaponskog sustava i generatora na dizel, dizel motor se mora pokrenuti kada baterija dosegne zadanu razinu pražnjenja, a zaustaviti kada baterija dosegne određen iznos napunjenosti. Generator na dizel može se koristiti i za napajanje potrošnje, a ne samo za punjenje baterije. Slika 2.26. prikazuje hibridni fotonaponski sustav [2].

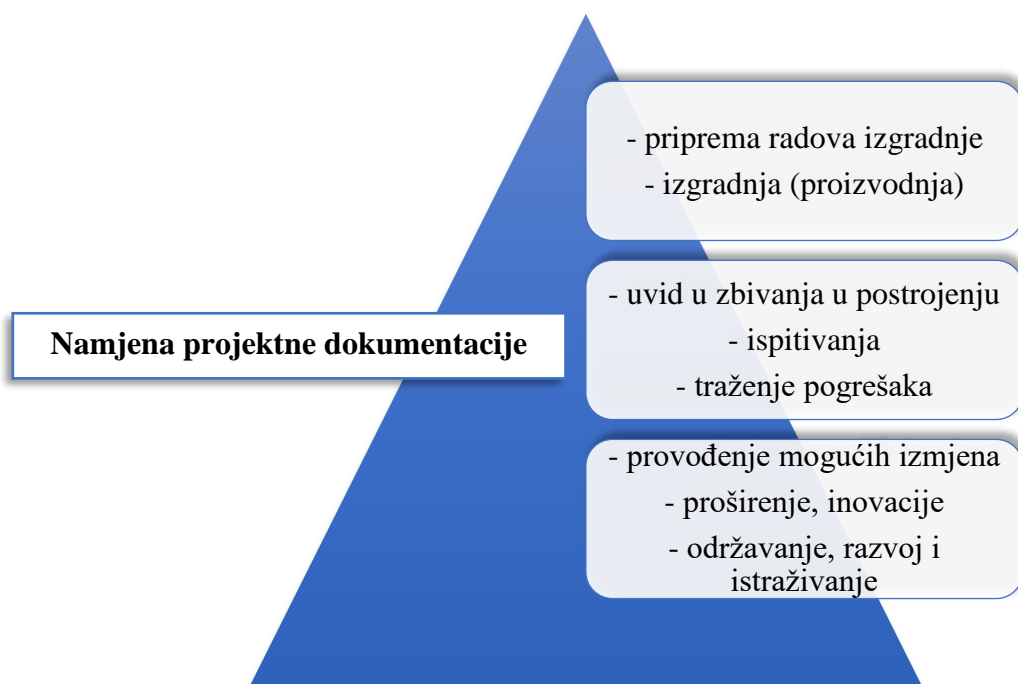


Slika 2. 26. Hibridni fotonaponski sustav

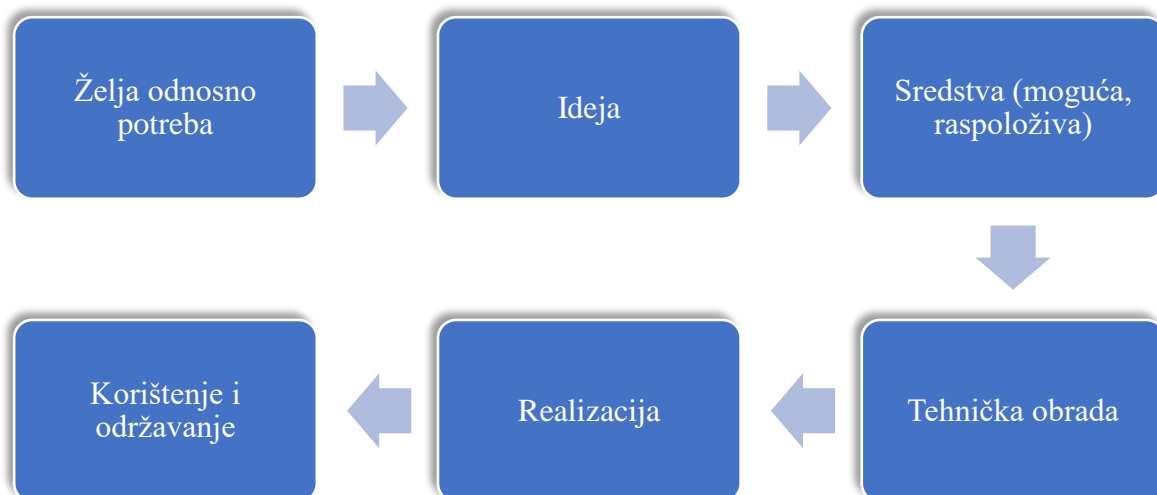


### 3. RAZINE PROJEKATA U PROJEKTIRANJU ELEKTRIČNIH POSTROJENJA

Projektna ili tehnička dokumentacija nekog električnog postrojenja (objekta, uređaja, sklopa ili elementa) je skup svih dokumenata koji mogu biti u različitom obliku (pismenom, nacrtnom, računalnom, slikovnom i sl.). Za svrhu imaju omogućavanje izrade daljnjih stupnjeva projektne ili tehničke dokumentacije, izgradnju, održavanje postrojenja, objekta, uređaja, sklopa ili elementa. Projektnom dokumentacijom određuje se narav nekog postrojenja, jednog dijela ili elementa te međusobne veze dijelova postrojenja ili elementa. To se postiže putem shema, nacрта i drugih potrebnih opisa. Projektant svoja promišljanja, ideje i umni napor usmjerava prema rješavanju određenog projektnog zadatka te sve to prikazuje tehničkom dokumentacijom. Svođenje dokumentacije na optimalni minimum jedan je od zadataka projektanta. Također, sistematičnost, jednostavnost, cjelovitost i kvalitetnost bitno je svojstvo kod izrade projektne dokumentacije. Namjena projektne dokumentacije prikazana je sljedećim grafom:



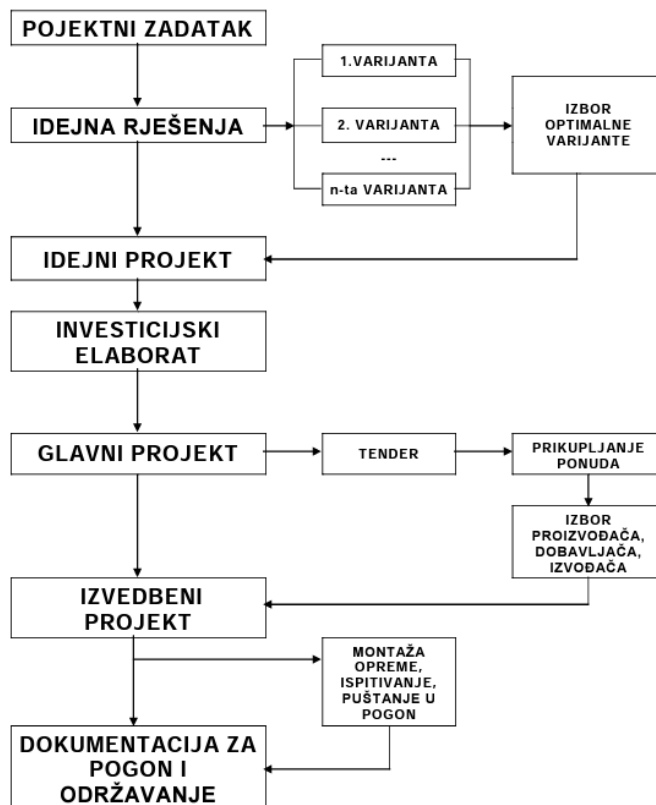
Obzirom na opseg, vrstu i način izrade, projektna dokumentacija nije jednoznačno određena propisima. Zbog toga svaki projektantski ured ima svoje načine prikaza opreme za projekt koji projektira ili isporučuje. Projektanti imaju različit pristup, pa se tako mogu koristiti gotovi kompleksni sklopovi (kao npr. polja trafostanica, tiristorski mostovi i sl.), ponekad se moraju poneki detalji, koji nisu standardni, istaknuti. U realizaciji električnog postrojenja, od prve želje do eksploatacije, tehnička dokumentacija je vezana uz pojedine faze realizacije. Put ostvarenja neke zamisli u tehničkom smislu dan je sljedećim grafom [4]:



Prema Zakonu o gradnji projektna dokumentacija dijeli se na: glavni projekt, izvedbeni projekt, tipski projekt i projekt uklanjanja građevine. U elektrotehničkom smislu projektne ili tehničku dokumentaciju možemo podijeliti na:

- projektni zadatak,
- idejno rješenje,
- idejni projekt,
- investicijski elaborat,
- glavni projekt,
- izvedbeni projekt,
- dokumentacija za pogon i održavanje.

Slika 3.1. prikazuje hijerarhijski raspored projektne dokumentacije [4].

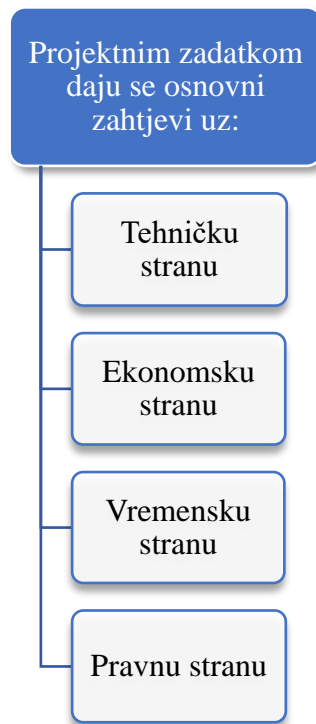


Slika 3. 1. Hijerarhijski raspored projektne dokumentacije

### 3.1. Projektni zadatak

Projektni zadatak je vrsta dokumentacije u kojoj se predstavlja svrha i opseg aktivnosti koje se trebaju izvršiti i u kojem vremenskom periodu. Metode i standardi koji se moraju primjenjivati također su prikazani projektnim zadatkom. Tehnološka zadaća bitna je sa aspekta elektrotehnike kako bi projektanti mogli odrediti informacijske i elektroenergetske tokove.

Naručitelj sam ili uz pomoć projektanta izrađuje projektni zadatak. Definiranje okvira projekta je jako bitno te se stoga to prepušta ljudima s puno iskustva i znanja. Projektni zadatak je temelj svega pa zbog toga ima veliki utjecaj na kvalitetu kompletnog projekta.



### 3.2. Idejno rješenje

Idejnim rješenjem određuju se osnovni parametri željenog rješenja. Sadrži grubu procjenu troškovnika i odabira opreme. Idejno rješenje najčešće se izrađuje u više varijanti koje se zatim uspoređuju prema troškovima i kvaliteti. Pri tome u svakoj varijanti jasno mora biti objašnjeno tehničko rješenje te njegovi učinci. Između svih varijanti idejnog rješenja odabire se ono koje ima najbolje optimalno tehničko-ekonomsko rješenje. Idejno rješenje osnova je za daljnje analize.

Odabirom idejnog rješenja dalje se razrađuje sa svrhom:

- izrade investicijskog elaborata,
- podloge za glavni projekt.

### 3.3. Idejni projekt

Prema Zakonu o gradnji iz 2014. godine izrada idejnog projekta nije obavezna. Idejni projekt izrađuje se kao podloga za ishođenje posebnih uvjeta. Također može biti osnova za tender. Tender je ponuda koja se podnosi u određenom formatu, na javnome nadmetanju, na temelju objavljenog poziva. Sadrži uvjete ponuđača, tehničku dokumentaciju i bankovnu garanciju. Raspisivač natječaja zadaje uvjete te krajnji rok do kada je potrebno predati ponude. Odabire se

ponuđač s najpovoljnijom ponudom i sklapa se ugovor sa njime. Tehnička dokumentacija, koju sadrži tender, sadrži nacрте i opise iz koje se vide svojstva, izgled, kvaliteta i funkcionalnost ponuđene robe. Odustajanje ponuđača od posla ili rizik nemogućnosti obavljanja posla prema investitoru štiti se bankovnom garancijom.

Idejni projekt sadrži dvije vrste tokova: elektroenergetski i informacijski. Prikaz tih tokova dan je u tablici 3.1. [4].

*Tablica 3. 1. Tokovi idejnog projekta*

<b>Elektroenergetski tokovi</b>	<b>Informacijski tokovi</b>
- energetska bilanca, definiranje i kategorizacija potrošača	- definirati načine i razine upravljanja električnim postrojenjem
- izvori i načini napajanja	
- makro i mikro lokacije	- definirati organizacijsku strukturu upravljačkog sustava prema tehnološkim tokovima
- približni proračun instalacija	
- približni broj razvoda, polja sklopova	- definirati broj signala (digitalnih, analognih, mjernih i regulacijskih i njihovu povezanost)
- potrošnja električne energije	- definirati opremu sa zahtjevima na kvalitetu i nivo automatizacije (broj upravljačkih jedinica po složenosti)
- osnovne dimenzije	

### 3.4. Investicijski elaborat

Investicijski elaborat izrađuje se na temelju projektnog zadatka ili odabranog idejnog rješenja. Svrha mu je dokazivanje potrebnih sredstava za investicije. Sadrži ekonomsku analizu:

- rentabilnosti,
- odnosa na tržištu,
- opravdanosti povećanja kapaciteta, zamjene ili modernizacije opreme,
- načina financiranja.

Slika 3.2. prikazuje preporučljivi sadržaj investicijskog elaborata [4].

1. **UVOD**
2. **SAŽETAK ULAGANJA**
3. **INFORMACIJE O PODUZETNIKU – INVESTITORU**
4. **OPIS DJELATNOSTI POSLOVANJA**
5. **ANALIZA DOSADAŠNJEG FINANCIJSKOG POSLOVANJA**
6. **OPIS POSTOJEĆE IMOVINE**
7. **OCJENA RAZVOJNIH MOGUĆNOSTI ULAGANJA**
8. **LOKACIJA**
  - Opis postojeće lokacije poduzetnika
  - Opis lokacije projekta
  - Opis zaštite i utjecaja okoline
9. **TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI ELEMENTI ULAGANJA**
  - Opis strukture ulaganja (tehnička, tehnološka i dr.)
  - Struktura i broj postojećih zaposlenika
  - Struktura, broj i dinamika novozaposlenih
10. **ANALIZA TRŽIŠTA**
  - Tržište nabave
  - Tržište prodaje
  - Procjena ostvarenja prihoda – tržišta
11. **DINAMIKA REALIZACIJE ULAGANJA**
12. **EKONOMSKO – FINANCIJSKA ANALIZA**
  - Ulaganje u osnovna sredstva
  - Ulaganje u obrtna sredstva
  - Struktura ulaganja u osnovna i obrtna sredstva
  - Izvori financiranja i obračun kreditnih obveza
  - Proračun amortizacije
  - Projekcija računa dobiti i gubitka
  - Financijski tok
  - Ekonomski tok
  - Projekcija bilance
13. **FINANCIJSKO – TRŽIŠNA OCJENA**
  - Statična ocjena efikasnosti projekta
  - Dinamička ocjena projekta
    - Metoda razdoblja povrata ulaganja
    - Metoda neto sadašnje vrijednosti
    - Metoda interne stope rentabilnosti
14. **ANALIZA OSJETLJIVOSTI PROJEKTA**
15. **ZAKLJUČNA OCJENA PROJEKTA**

*Slika 3. 2. Preporučljiv sadržaj investicijskog elaborata*

### **3.5. Glavni projekt**

Glavnim projektom detaljnije se razrađuje idejni projekt gdje se potpuno usuglašavaju pojedini dijelovi projekta te svi podaci za izvođenje. Ti podaci su: smještaj razvoda usklađen s građevinskim projektom, smještaj elemenata u razvode, itd. Glavni projekt je osnova za izradu izvedbene dokumentacije i tendera. Kako se ne zna još isporučitelj opreme ne mogu se svi detalji razraditi. Stoga se glavnim projektom omogućuje prikupljanje ponuda od proizvođača, dobavljača i izvođača radova.

Glavni projekt ovisno o vrsti građevine, odnosno radova sadrži [3]:

1. arhitektonski projekt,
2. građevinski projekt,
3. elektrotehnički projekt,
4. strojarski projekt.

Izradi glavnog projekta, odnosno pojedinih projekata koje sadrži, ovisno o vrsti građevine, odnosno radova, ako je to propisano posebnim zakonom ili ako je potrebno, prethodi izrada [3]:

1. krajobraznog elaborata,
2. geomehaničkog elaborata,
3. prometnog elaborata,
4. elaborata tehničko-tehnološkog rješenja,
5. elaborata zaštite na radu,
6. elaborata zaštite od buke,
7. konzervatorskog elaborata,
8. drugog potrebnog elaborata.

Glavni projekt, zajedno s građevinskom dozvolom, dužan je trajno čuvati investitor, njegov pravni sljednik, odnosno vlasnik građevine [3].

### **3.6. Izvedbeni projekt**

Izvedbeni projekt izrađuje se na temelju idejnog projekta i glavnog projekta. Svrha mu je priprema sve dokumentacije kako bi se oprema mogla naručiti te potom kako bi se moglo obaviti sklapanje elektroenergetskog postrojenja. U ovoj razini projektne dokumentacije poznat je proizvođač opreme. Kod izrade izvedbenog projekta potrebno je znati sljedeće podatke:

- točne tipove opreme – narudžbene podatke – lista materijala,
- duljine kabela i točne spojeve,
- način sklapanja.

### 3.7. Dokumentacija za pogon i održavanje

Dokumentacija za pogon i održavanje ima za zadatak obradu dokumentacije s obzirom na pogon elektroenergetskog postrojenja. Kod ove dokumentacije važne su upute jer izostankom njih može doći do konfuzije i velikih problema kod osoblja koje upravlja postrojenjem. Dokumentacija za pogon i održavanje nije uključena u uobičajenim projektima. Stoga ju investitor mora posebno tražiti, pogotovo kod skupljih i kompliciranih postrojenja. Potrebno je dugotrajno provjeravanje (naknadne studije) dokumentacije za pogon i održavanje te se nakon toga ovjerava za upotrebu. Zbog toga je ova dokumentacija podložna stalnim promjenama i korekcijama. Kod pisanja uputa trebaju se poštivati propisi te ih je potrebno prilagoditi razini stručnosti osoblja koje će upravljati i održavati elektroenergetsko postrojenje. Sadržaj i oblik dokumentacije za pogon i održavanje ovisi o [4]:

- lokalnim propisima,
- internom propisu investitora, koji često vode računa i o stručnoj kvalifikacijskoj strukturi, odnosno stručnoj razini osoblja koje upravlja i održava pogon.



## 4. GLAVNI PROJEKT SUNČANE ELEKTRANE HALE SORTIRNICE

U diplomskom radu bilo je potrebno izraditi elektrotehnički projekt na razini glavnog projekta za integriranu sunčanu elektranu na krovu hale sortirnice. Glavni projekt mora sadržavati elektroinstalacije sunčane elektrane i sustav zaštite elektrane od štetnog djelovanja munje. Potrebno je razraditi priključak elektrane na postojeću instalaciju objekta, istosmjerni i izmjenični razvod i razvodni ormar sunčane elektrane. Izvršiti će se procjena moguće godišnje proizvodnje električne energije iz sunčane elektrane.

Ovo poglavlje sadrži tekstualni dio razrade glavnog projekta kao što je: projektni zadatak, opis tehnologije, analize lokacije i tehnički opis sunčane elektrane. U kasnijim poglavljima biti će prikazani proračuni i nacrtana dokumentacija elektrane kao i dokumentacija u postupku priključenja elektrane na mrežu.

### 4.1. Projektni zadatak

Kao sastavni dio novo planiranog postrojenja za sortiranje odvojeno prikupljenog otpada (sortirnice) planiranog na lokaciji Mihačeva Draga u Rijeci, planira se izgraditi sunčana elektrana na krovu hale sortirnice snage 130 kW. U tablici 4.1. dani su podaci o trenutnom obračunskom mjernom mjestu.

*Tablica 4. 1. Predviđeno mjesto priključenja sunčane elektrane*

<b>Priključna snaga planirane elektrane (smjer proizvodnje):</b>	130 kW
<b>Priključna snaga kupca (smjer potrošnje):</b>	130 kW
<b>Mjesto priključenja elektrane:</b>	GRO objekta

Na slici 4.1. prikazana je građevina hale sortirnice u programskom paketu *PV\*SOL premium* u kojem će se izvršiti proračun proizvodnje.



*Slika 4. 1. Prikaz građevine hale sortirnice u programskom paketu PV\*SOL premium 2021*

## **4.2. Opis tehnologije**

Električna energija proizvodi se u solarnim ćelijama. Solarne ćelije su napravljene od poluvodičkog materijala od jednog ili dva sloja. Električna struja nastaje u solarnim ćelijama kada ih obasjaju Sunčeve zrake. Većem toku električne struje odgovara veći intenzitet Sunčevog zračenja. Silicij je najčešći materijal za proizvodnju solarnih ćelija. On se dobiva iz pijeska i najčešći je element u Zemljinoj kori.

Pouzdanost, dugotrajnost i tišina glavne su karakteristike fotonaponskih modula. Koliku količinu Sunčeve energije fotonaponski moduli mogu pretvoriti u električnu energiju ovisi o učinkovitosti modula. Uobičajeno učinkovitost iznosi oko 16 %, što znači da takav fotonaponski modul pretvori šestinu Sunčeve energije u električnu. Solarne elektrane u svom radu ne ispuštaju štetne tvari u okolinu (kao što je slučaj kod konvencionalnih elektrana), tihe su u svom radu i ne sadrže pokretne dijelove. Kod same proizvodnje fotonaponskih modula u atmosferu se ne ispušta tolika količina ugljičnog dioksida kao kod elektrana na fosilna goriva. Vijek trajanja fotonaponskih modula je preko trideset godina. Fotonaponski moduli mogu se u dobroj mjeri reciklirati nakon svog životnog ciklusa pri čemu se temeljne sirovine mogu ponovno koristiti. Solarne elektrane također imaju minimalno održavanje.

### 4.3. Analiza lokacije

Kako bi se mogao provesti proračun proizvodnje električne energije potrebni su nam podaci o intenzitetu Sunčevog zračenja. Zemljopisna širina i dužina specificiraju lokaciju objekta na kojem se nalazi sunčana elektrana. Posebice Zemljopisna širina predstavlja važnu varijablu pri proračunu proizvodnje. Tablica 4.2. prikazuje klimatske pokazatelje najbliže lokacije, dok tablica 4.3. daje meteorološke parametre za pojedine mjesece u godini.

*Tablica 4. 2. Klimatski pokazatelji najbliže lokacije*

<b>Meteorološki parametri najbliže lokacije</b>	Rijeka
<b>Zemljopisna širina [N]</b>	45° 19'
<b>Zemljopisna dužina [E]</b>	14° 26'
<b>Nadmorska visina [m]</b>	20

*Tablica 4. 3. Meteorološki parametri za pojedine mjesece u godini*

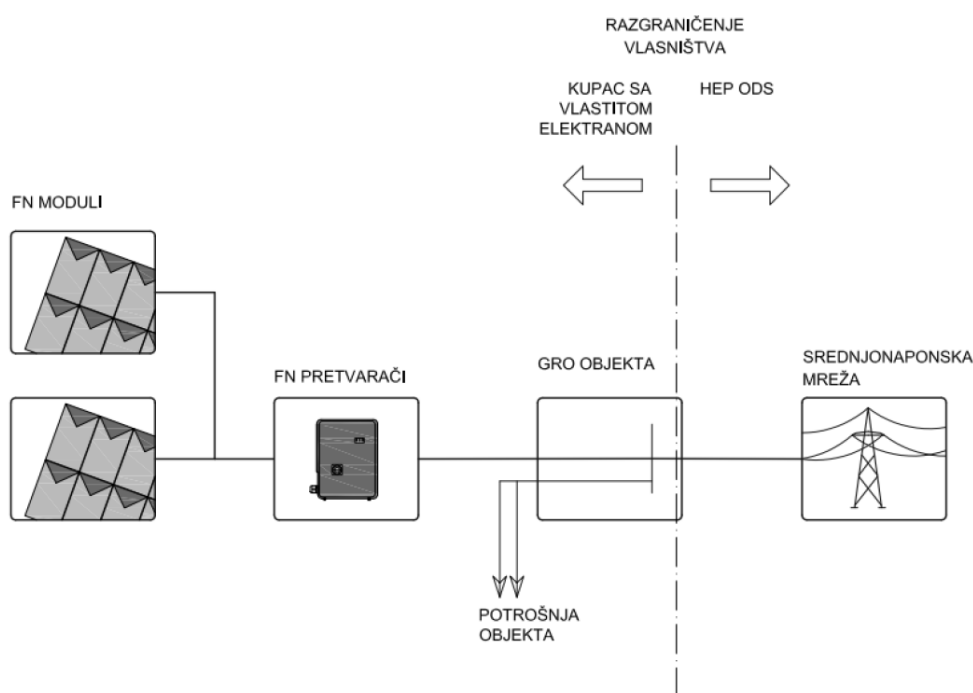
<b>Mjesec u godini</b>	<b>Srednja dnevna ozračenost vodoravne plohe [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Srednja mjesečna temperatura zraka [°C]</b>
Siječanj	1.29	5.3
Veljača	2.29	6.1
Ožujak	3.35	8.5
Travanj	4.62	12.2
Svibanj	5.71	16.6
Lipanj	6.21	20.1
Srpanj	6.45	22.8
Kolovoz	5.42	22.3
Rujan	4.19	18.9
Listopad	2.74	14.4
Studeni	1.44	9.8
Prosinac	0.93	6.5
Godina	3.73	13.67

### 4.4. Tehnički opis sunčane elektrane

Pretvarač i fotonaponsko polje osnovni su dijelovi sunčane elektrane koja se priključuje na elektroenergetsku mrežu. Slika 4.2. prikazuje shemu sunčane elektrane priključene na elektroenergetsku mrežu. Sunčana elektrana će prvenstveno proizvedenu električnu energiju koristiti za vlastitu potrošnju objekta, a eventualni „višak“ energije predavati će u mrežu. U ovom potpoglavlju biti će još navedena i zaštitna oprema sunčane elektrane, gromobrnska i

uzemljivačka instalacija, potkonstrukcija za montažu modula i priključak sunčane elektrane na elektroenergetsku mrežu.

Fotonaponski moduli međusobno povezani u seriju tvore fotonaponsko polje. Solarne ćelije direktno pretvaraju Sunčevu energiju u istosmjernu električnu energiju. Istosmjernu električnu energiju potrebno je pretvoriti u izmjeničnu električnu energiju, pri čemu se mora dobiti odgovarajući napon i frekvencija (400 V i 50 Hz). Kako bi se ostvarila prethodno navedena pretvorba koristi se pretvarač. Glavni dio pretvarača je poluvodički most. Poluvodički most sastoji se od upravljivih poluvodičkih sklopki. Te sklopke visokom frekvencijom pretvaraju istosmjerni u izmjenični napon tako što ga prekidaju uz pomoć pulsno širinske modulacije. Izmjenični napon se prije predaje u mrežu filtrira.



Slika 4. 2. Shema sunčane elektrane priključene na elektroenergetsku mrežu

#### 4.4.1. Fotonaponski moduli

Fotonaponski modul SV72-330 hrvatskog proizvođača SOLVIS d.o.o. koristiti će se za ugradnju. Modul se sastoji od 72 serijski spojenih multikristaliničnih silicijskih solarnih ćelija. Solarne ćelije dimenzija su 156 x 156 mm. Kod proizvodnje ćelija korištena je tehnika sitotiskanja prednjih i stražnjih električnih kontakata. Kontakti su difundirani emiterom koji je dopiran fosforom na silicijskom supstratu s dopiranim borom. Staklo koje ima izvrsna optička i mehanička

svojstva štiti ćelije od vanjskih utjecaja. Ćelije su laminirane između stakla i zalemljene su međusobno pomoću bakrenih pokositrenih vodiča. Polimerni zaštitni film nalazi se sa stražnje strane modula. Štićenje modula od korozije galvanski je izvedeno aluminijskim kućištem. Fotonaponski modul ima nazivnu snagu od 330 W. Nepovratni procesi koji se događaju unutar modula tijekom vremena smanjuju snagu solarnih ćelija. Zbog toga proizvođač fotonaponskih modula mora jamčiti za koliko se stvarna snaga neće smanjiti i u kojem periodu. Tvrтка SOLVIS d.o.o. za odabrani fotonaponski modul jamči da tijekom 25 godina stvarna snaga modula neće pasti ispod nazivne za više od 20 %. Dimenzije modula su 1.962 mm x 992 mm x 40 mm, a težina modula je 22.5 kg. Na slici 4.3. prikazan je fotonaponski modul SV72-330 koji će se koristiti za ugradnju [5].



*Slika 4. 3. Fotonaponski modul SV72-330*

#### 4.4.2. Pretvarači

Kod odabira pretvarača moraju se odabrati pretvarači koji mogu pokriti naponska i strujna ograničenja radnog područja fotonaponskog polja te u svim uvjetima. Dimenzioniranje pretvarača za sunčanu elektranu na krovu hale sortirnice izvedeno je za temperaturu okoline  $-10^{\circ}\text{C}$  i za maksimalni napon  $1000\text{ V}_{\text{DC}}$ .

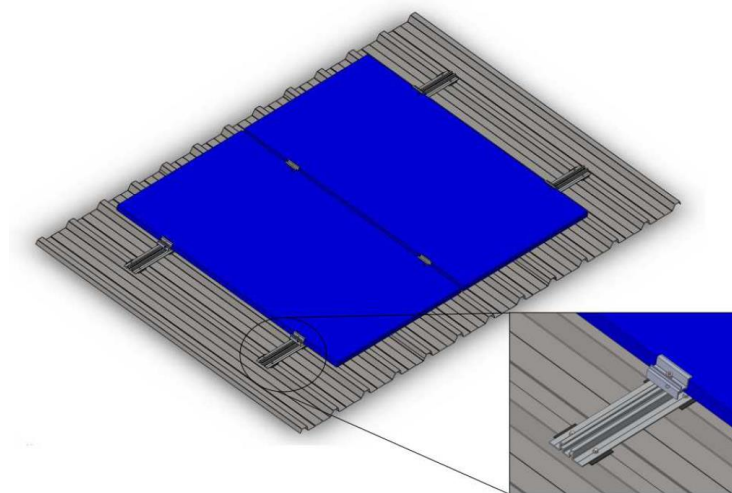
Uzimajući u obzir snagu fotonaponskog polja i prije navedene uvjete za pretvarače sunčane elektrane odabrani su pretvarači *SMA SUNNY TRIPOWER 25000TL-30* odnosno *20000TL-30*. Ulazne električne karakteristike pretvarača u cijelosti odgovaraju izlaznim električnim karakteristikama (napon, struja i snaga) fotonaponskog polja te pri cijelom temperaturnom opsegu. Sustav koji prati točku maksimalne snage (MPPT: eng. *maximum power point tracking*) također je sadržan u pretvaraču. Pretvarači u sebi ne sadrže transformator te zbog toga imaju visoku učinkovitost, tihi rad i nisko zagrijavanje, a izvedeni su u poluvodičkoj tehnologiji. Pretvarači su kompatibilni sa međunarodnim normama elektromagnetske kompatibilnosti EN 61000-6-2:2005, EN 61000-6-3/A1:2011, te DIN VDE 0126-1-1 standardom. Na slici 4.4. prikazan je pretvarač *SUNNY TRIPOWER 25000TL-30* odnosno *20000TL-30*.



Slika 4. 4. Pretvarač *SUNNY TRIPOWER 25000TL-30* odnosno *20000TL-30*

#### 4.4.3. Potkonstrukcija za montažu modula

Potkonstrukcija od mini profila, koja je prikazana na slici 4.5., na krovovima objekta pokrivenim trapeznim limom koristiti će se za ugradnju fotonaponskih modula. Fotonaponski moduli prilikom ugradnje pratiti će nagib krova. Obzirom na proizvodnost sustava to nije optimalan položaj fotonaponskih modula. Unatoč tome, taj položaj je odabran radi jednostavnosti montaže i instalacije fotonaponskih modula na raspoloživu krovnu površinu.



*Slika 4. 5. Primjer potkonstrukcije tipa Nika Solar na krov pokriven limom*

#### 4.4.4. Zaštitna oprema sunčane elektrane

Odvodnici prenapona tipa II koristiti će se za zaštitu fotonaponskog polja i ulaza pretvarača od atmosferskih pražnjenja, a imaju nazivni napon  $1000 V_{DC}$ . Također, svi odabrani pretvarači *SMA SUNNY TRIPOWER* imaju već ugrađeni odvodnik prenapona tipa II na svim ulazima. Četveropolna izvedba odvodnika prenapona tipa II, na izlazu iz sunčane elektrane, služiti će za zaštitu pretvarača od prenapona uslijed atmosferskih pražnjenja od strane elektroenergetske mreže.

Automatski osigurači trole izvedbe nazivne struje 63 A i B karakteristike služiti će kao nadstrujna zaštita izmjenične strane pretvarača. Nadstrujna i brza nadstrujna zaštita izvesti će se ugradnjom glavnog prekidača sunčane elektrane. Glavni prekidač biti će izveden u četveropolnoj izvedbi s nazivnom strujom od 250 A s elektroničkim okidačem. Elaboratom podešenja zaštite odrediti će se postavne vrijednosti glavnog prekidača.



Za zaštitu pretvarača od diferencijalne struje koristiti će se RCD (eng. *residual current device*) uređaj u četveropolnoj izvedbi tip A sa 300 mA i nazivnom strujom od 63 A.

#### 4.4.5. Gromobranska i uzemljivačka instalacija

Pri dimenzioniranju i projektiranju gromobranske instalacije korištene su odredbe iz „Tehničkog propisa za sustave zaštite od djelovanja munje na građevinama“ (NN RH br. 87/08, 33/10). Kod provođenja radova mora se paziti da isti budu izvedeni stručno i kvalitetno.

Postojeća gromobranska instalacija poslužiti će za zaštitu od atmosferskog pražnjenja. Na temeljni uzemljivač moraju se spojiti svi prethodno galvanski povezani metalni dijelovi konstrukcije za montažu fotonaponskih modula. Također, na temeljni uzemljivač potrebno je povezati, P/f vodičem minimalnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, sabirnice uzemljenja spojnog ormara sunčane elektrane. Otpor uzemljivača, prema HRN EN 62305, kako bi se postigao siguran rad odvodnika prenapona mora biti <5 Ω. Potvrdu o iznosu otpora uzemljivača potrebno je provjeriti mjerenjima.

#### 4.4.6. Priključak sunčane elektrane na elektroenergetsku mrežu

Sunčana elektrana na krovu hale sortirnice priključiti će kao trofazni priključak na niskonaponskoj strani (0.4 kV) na elektroenergetsku mrežu. Priključenje elektrane kupaca sa vlastitom elektranom, prema mrežnim pravilima EES-a, izvodi se direktno u niskonaponskom bloku korisnikove transformatorske stanice. Pri čemu brojilo mora biti zamijenjeno dvosmjernim brojiлом. Stručna služba HEP ODS-a Elektroprimorje Rijeka utvrđuje način i uvjet priključenja na elektroenergetsku mrežu pomoću elektroenergetske suglasnosti (EES).



## 5. TEHNIČKI PRORAČUNI SUNČANE ELEKTRANE HALE SORTIRNICE

Tehničkim proračunom dati će se prikaz procjene proizvodnje sunčane elektrane, proračun naponskog raspona na istosmjernoj strani izmjenjivača, presjek kabela s obzirom na zagrijavanje vodiča, padove napona i prijenosne gubitke. Procjena proizvodnje sunčane elektrane izvršena je u programskom paketu *PV\*SOL premium 2021*. Tehnički opis aktivnih elemenata dan je tablicama 5.1., 5.2. i 5.3.

*Tablica 5. 1. Tehnički opis fotonaponskog modula SOLVIS SV72-330*

<b>FN MODUL SOLVIS SV72-330</b>	
Nazivna snaga na STC [W]	330
Napon otvorenog kruga [V]	46.5
Struja kratkog spoja [A]	9.27
Napon u MPP točki [V]	38.4
Struja u MPP točki [A]	8.74
Temperaturni koeficijent napona [%/K]	-0.31

*Tablica 5. 2. Tehnički opis pretvarača SMA SUNNY TRIPOWER 25000TL-30*

<b>FN PRETVARAČ SMA SUNNY TRIPOWER 25000TL-30</b>	
Nazivna snaga na STC [kW]	25
Maksimalni ulazni napon [V]	1000
MPPt raspon [V]	390-800
Maksimalna ulazna struja po MPPt sklopu [A]	33
Broj MPPt sklopova [kom]	2

*Tablica 5. 3. Tehnički opis pretvarača SMA SUNNY TRIPOWER 20000TL-30*

<b>FN PRETVARAČ SMA SUNNY TRIPOWER 20000TL-30</b>	
Nazivna snaga na STC [kW]	20
Maksimalni ulazni napon [V]	1000
MPPt raspon [V]	320-800
Maksimalna ulazna struja po MPPt sklopu [A]	33
Broj MPPt sklopova [kom]	2

## 5.1. Procjena proizvodnje električne energije

Slika 5.1. prikazuje građevinu hale sortirnice s fotonaponskim modulima u programskom paketu *PV\*SOL premium 2021*.



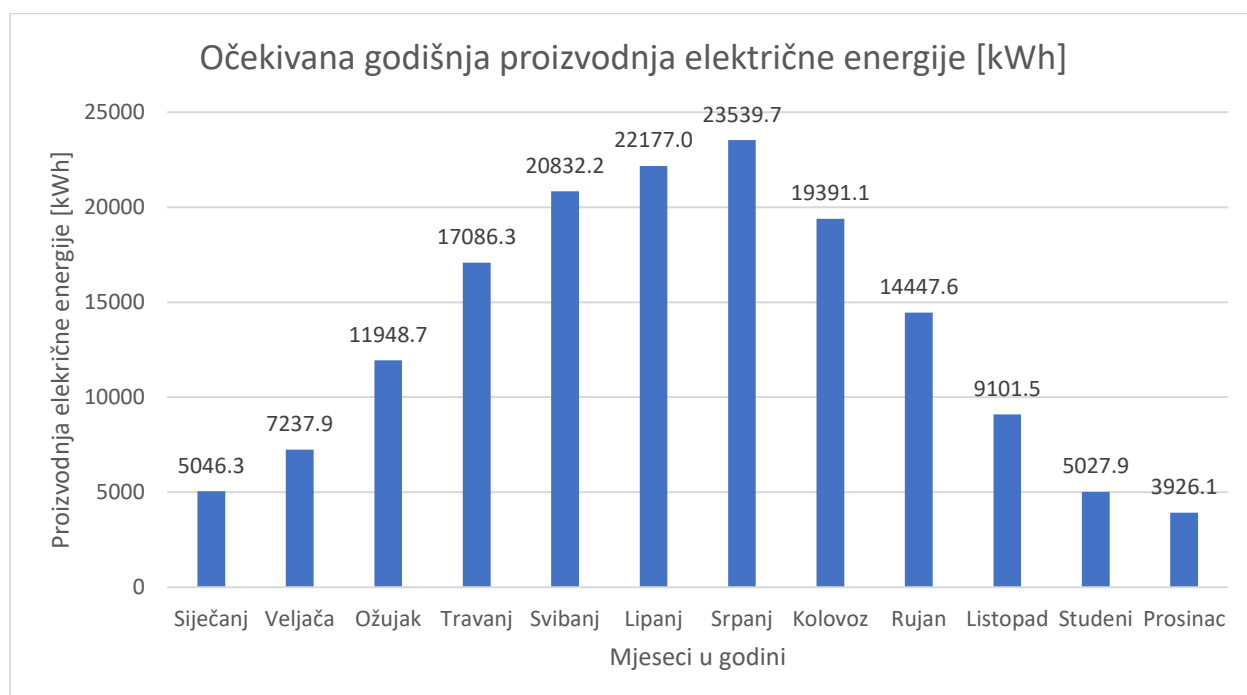
*Slika 5. 1. Prikaz građevine hale sortirnice s fotonaponskim panelima*

Procjena očekivane godišnje proizvodnje električne energije sunčane elektrane provedena je u programskom paketu *PV\*SOL premium 2021* i iznosi 159762.3 kWh. Način održavanja elektrane i meteorološka odstupanja mogu utjecati na stvarnu proizvodnju sunčane elektrane.

Najveća mjesečna proizvodnja očekuje se u srpnju i to 23539.7 kWh. Najmanja mjesečna proizvodnja se očekuje u prosincu i to 3926.1 kWh. Omjer proizvodnje u najizdašnjem prema najoskudnijem mjesecu je 5.996. Prosječna mjesečna proizvodnja je 13313.53 kWh. U tablici 5.1. prikazana je energetska bilanca po mjesecima.

Tablica 5. 4. Energetska bilanca po mjesecima

Mjesec u godini	Ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem [kWh/m <sup>2</sup> ]	Srednja dnevna temperatura zraka [°C]	Ozračenost nagnute plohe ukupnim Sunčevim zračenjem [kWh/m <sup>2</sup> ]	Ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem [kWh/m <sup>2</sup> ]	Električna energija predana u mrežu [kWh]
Siječanj	41.62	6	54.72	36.63	5046.3
Veljača	59.06	6.41	71.50	51.78	7237.9
Ožujak	96.30	9.9	106.63	85.84	11948.7
Travanj	138.93	13.86	146.66	124.87	17086.3
Svibanj	172.91	19.46	175.44	156.33	20832.2
Lipanj	186.27	22.99	186.41	169.02	22177
Srpanj	199.36	25.7	200.65	180.22	23539.7
Kolovoz	165.19	25.24	171.44	148.92	19391.1
Rujan	120.69	19.31	132.31	107.48	14447.6
Listopad	76.98	15.92	88.70	67.73	9101.5
Studeni	42.07	11.2	51.38	37.14	5027.9
Prosinac	32.8	7.35	44.10	29.23	3926.1
Godina	1333.2	15.34	1429.9	1195.2	159762.3



## 5.2. Proračun prilika na istosmjernom razvodu

Proračun maksimalnog istosmjernog napona na ulazu u pretvarač računa se za slučaj kada se moduli nalaze u praznom hodu i temperatura ćelija je niska, vrši se kontrola na  $-10^{\circ}\text{C}$ . Maksimalni istosmjerni napon računa se prema formuli (5.1.):

$$U_{MAX(DC)} = N_{PV\ mod\ ul} * U_{oc} * (1 + \Delta T * K) \quad (5.1.)$$

gdje je:

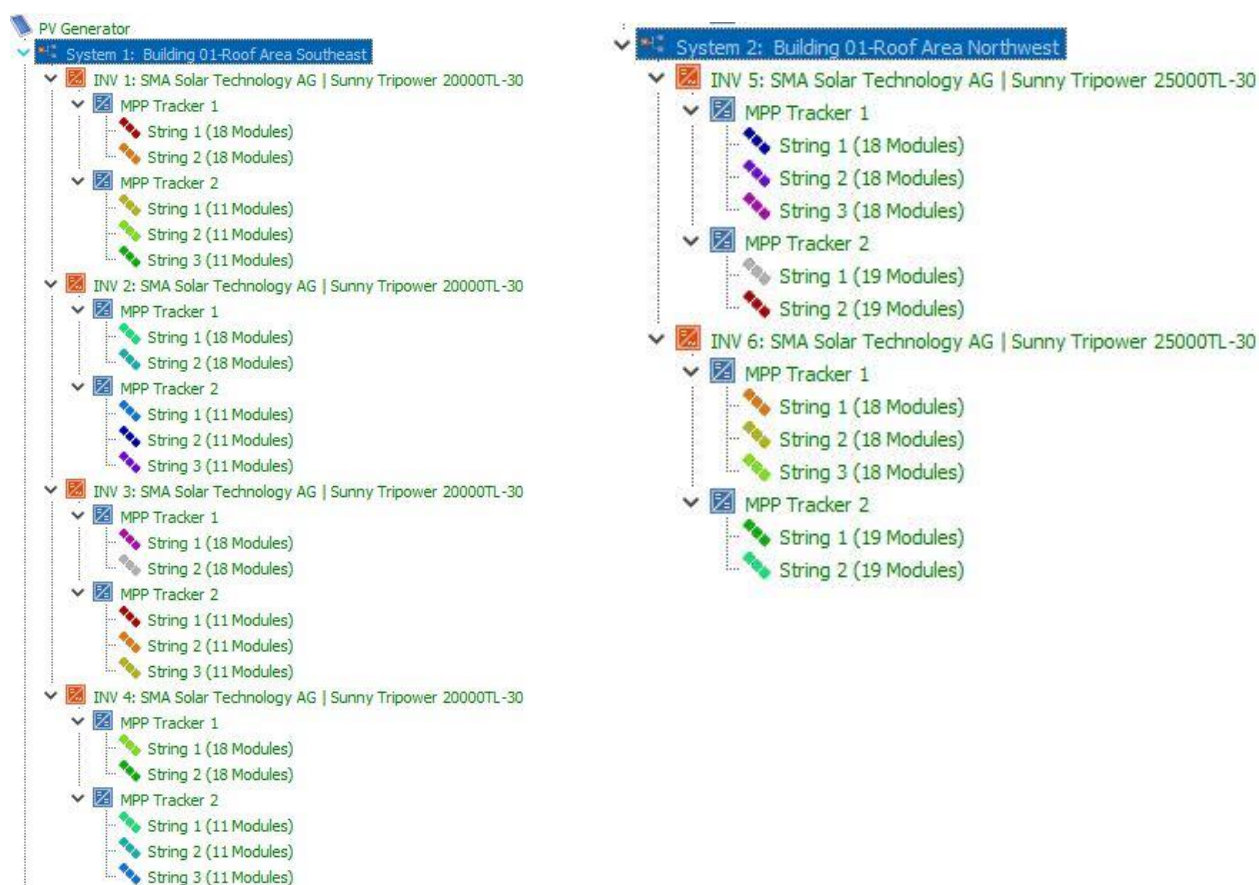
$N_{PV\ modul}$  – ukupan broj modula spojenih na pretvarač,

$U_{oc}$  – napon praznog hoda modula,

$K$  – temperaturni koeficijent napona,

$\Delta T$  – razlika temperature kontrole i temperature u standardnim uvjetima testiranja.

Slika 5.2. prikazuje broj modula po nizovima za sve pretvarače dobiven u programskom paketu PV\*SOL premium 2021.



Slika 5. 2. Prikaz broja modula po nizovima u programskom paketu PV\*SOL premium 2021

Iz slike 5.2. vidljivo je kako će najveći broj modula za niz biti 19, uvrštavanjem svih vrijednosti u formulu 5.1. dobiva se maksimalni istosmjerni napon na ulazu u pretvarač:

$$U_{MAX(DC)} = 19 * 46.5 * \left[ 1 + (-35) * \left( -\frac{0.31}{100} \right) \right] = 979.36 V$$

Najveći očekivani napon za oba odabrana pretvarača iznosi 979.36 V, a u tehničkim specifikacijama proizvođača, iz tablice 5.2. i 5.3., odabranih pretvarača najveći dopušteni ulazni napon iznosi 1000 V, usporedbom rezultata vidljivo je da pretvarači zadovoljavaju u pogledu maksimalno očekivanog napona.

Proračun minimalnog istosmjernog napona na ulazu u pretvarač računa se za slučaj kada se moduli nalaze u MPP točki i temperatura ćelija je visoka, vrši se kontrola na +60°C. Minimalni istosmjerni napon računa se prema formuli (5.2.):

$$U_{MIN(DC)} = N_{PV\ mod\ ul} * U_{MPP} * (1 + \Delta T * K) \quad (5.2.)$$

gdje je:

$N_{PV\ modul}$  – ukupan broj modula spojenih na pretvarač,

$U_{MPP}$  – napon modula u MPP točki,

$K$  – temperaturni koeficijent napona,

$\Delta T$  – razlika temperature kontrole i temperature u standardnim uvjetima testiranja.

Uvrštavanjem svih vrijednosti u formulu 5.2. dobiva se minimalni istosmjerni napon:

$$U_{MIN(DC)} = 19 * 38.4 * \left[ 1 + (+35) * \left( -\frac{0.41}{100} \right) \right] = 624.90 V$$

Najmanji očekivani napon za oba odabrana pretvarača iznosi 624.90 V, u tehničkim specifikacijama, iz tablice 5.2. i 5.3., odabranih pretvarača MPPT raspon iznosi 390-800 V odnosno 320-800 V. Stoga, najmanji MPP napon nalazi se unutar granica MPPT raspona pretvarača.

### 5.3. Proračun istosmjernih kabela na ulaznoj strani pretvarača

Minimiziranje gubitaka u kabelima, maksimalno strujno opterećenje kabela i naponska klasa kabela tri su glavna kriterija prema kojima se vrši dimenzioniranje kabela.

U fotonaponskim sustavima najčešće se koristi kabel PV1-F koji ima naponsku klasu 1000 V. Pri projektnoj temperaturi -10°C izračunat je maksimalni napon praznog hoda, uz uvažavanje

najduljeg niza fotonaponskih modula, i iznosi 979.36 V. Vidljivo je da taj napon ne prelazi naponsku klasu odabranog PV1-F kabela.

Maksimalna struja koja teče kroz kabel koristi se za dimenzioniranje presjeka kabela. Pri maksimalnom strujnom opterećenju kabela potrebno je zadovoljiti vrijednosti prema normi IEC 60512 dio 3. Razlika struje kratkog spoja fotonaponskog generatora i struje kratkog spoja jednog niza definira maksimalnu struju koja teče kroz modul (5.3.):

$$I_{MAX} = I_{SCPV} - I_{SCString} \quad (5.3.)$$

Kod dimenzioniranja kabela koristi se vrijednost iz formule 5.3. ili uz uporabu osigurača koji će u tom slučaju štiti kabel od preopterećenja. Dozvoljene maksimalne struje opterećenja, za kabel i zaštitni uređaj, veće su od maksimalne struje. Kabeli nizova, prema IEC 60364-7-712, moraju u odnosu na struju kratkog spoja fotonaponskog generatora podnositi 1.25 veću struju. Osiguranje kabela od zemljospoja i kratkog spoja pri polaganju kabela mora biti uzeto u obzir. Zahtjevi za polaganje, prema IEC 60512, udovoljava pri dimenzioniranju kabela.

Dimenzioniranje presjeka kabela, prema VDE 0100 dio 712, uzima u obzir što je manje moguće gubitke u kabelima. Ovim propisom ograničen je gubitak, kroz sve istosmjerne kabele, snage na najviše 1 %. Sve to se uzima u obzir u standardnim uvjetima testiranja (STC).

Gubitak snage u istosmjernom kabelu uz odabrani presjek kabela računa se prema formulama (5.4.) i (5.5.):

$$P_{DC} = \frac{n * L_M * P_{ST}^2}{A_M * V_{MPP}^2 * \kappa} \quad (5.4.)$$

gdje je:

$n$  – ukupan broj modula spojenih u niz,

$L_M$  – duljina kabela od modula do pretvarača,

$P_{ST}$  – snaga modula,

$A_M$  – presjeka kabela,

$V_{MPP}$  – napon u MPP točki,

$\kappa$  – vodljivost kabela (za bakar iznosi 56 Sm/mm<sup>2</sup>).

$$p_{\%} = \frac{P_{DC}}{n * P_{ST}} * 100 \quad (5.5.)$$

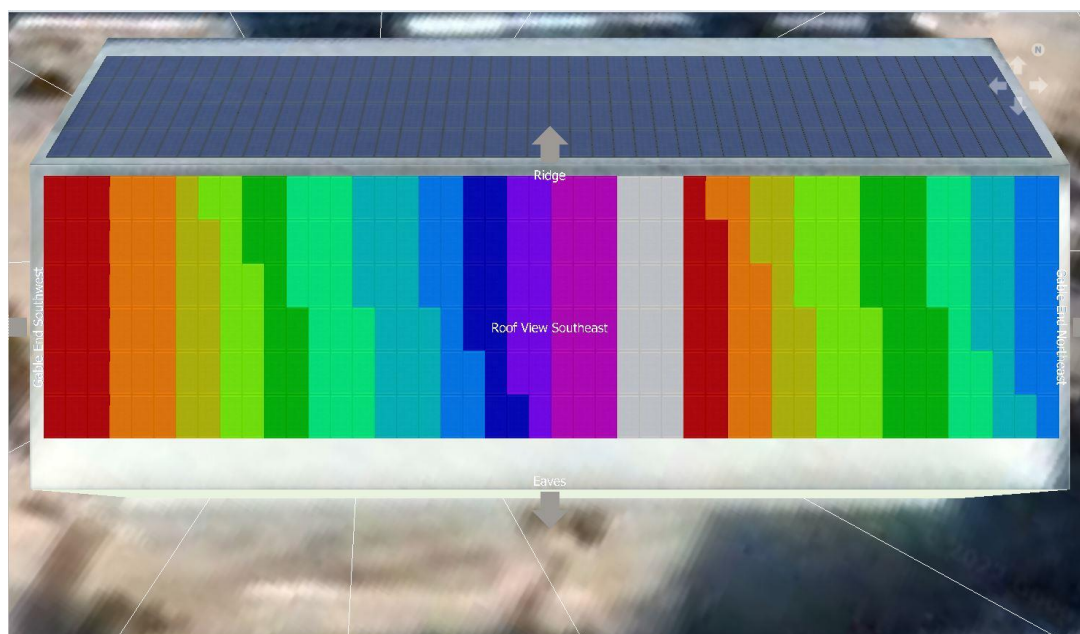
gdje je:

$P_{DC}$  – gubici snage u istosmjernom kabelu,

$n$  – ukupan broj modula spojenih u nizu,

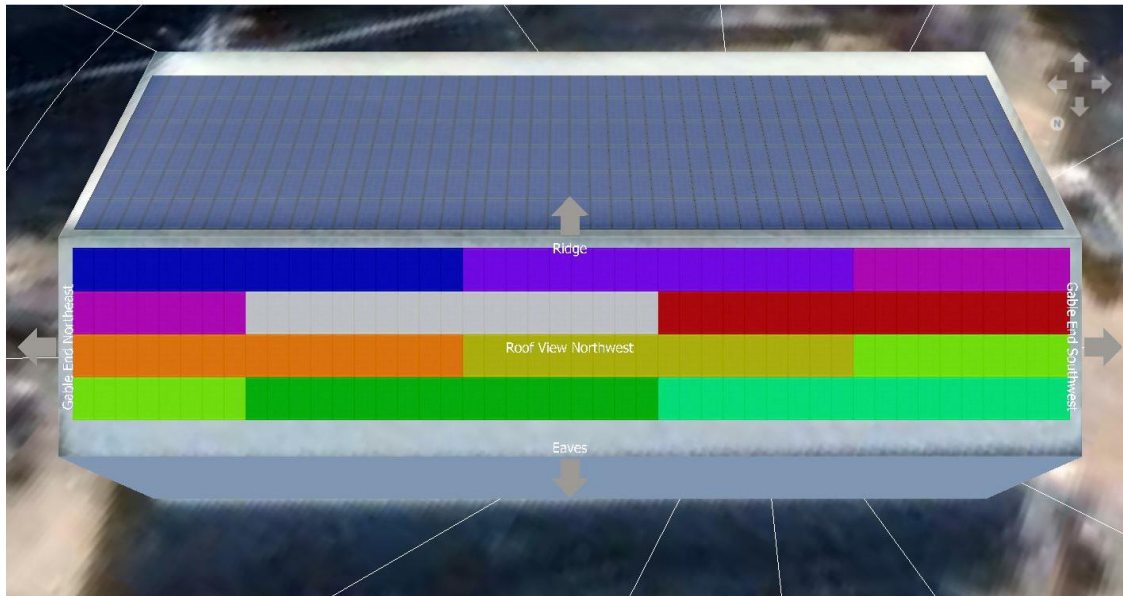
$P_{ST}$  – snaga modula.

Slike 5.3. i 5.4. prikazuju nizove u programskom paketu *PV\*SOL premium 2021* prema slici 5.2.



*Slika 5. 3. Vizualni prikaz nizova jugoistočnog dijela krova u programskom paketu PV\*SOL premium 2021*





Slika 5. 4. Vizualni prikaz nizova sjeverozapadnog dijela krova u programskom paketu PV\*SOL premium 2021

Uvrštavanjem svih vrijednosti u formule 5.4. i 5.5. dobivaju se gubici koji su dani u tablici 5.5., te je vidljivo kako gubici ne prelaze dozvoljenu granicu od 1 %.

Tablica 5. 5. Ukupni gubici snage u istosmjernim kabelima

<b>PRORAČUN GUBITAKA U ISTOSMJERNIM KABELIMA</b>				
-uz projektirane dužine kabela				
-za bakreni kabel PV1-F, $\kappa = 56 \text{ Sm/mm}^2$ , $A_M = 4 \text{ mm}^2$				
<b>Pretvarač</b>	<b>Niz</b>	<b><math>L_M</math></b>	<b><math>P_{DC} [W]</math></b>	<b><math>p_{\%} [\%]</math></b>
-PRETVARAČ 1	1.1	35 m	11.65	0.20
	1.2	40 m	13.33	0.22
	1.3	45 m	9.16	0.25
	1.4	50 m	10.17	0.28
	1.5	55 m	11.19	0.31
-PRETVARAČ 2	2.1	60 m	19.98	0.34
	2.2	65 m	21.64	0.36
	2.3	70 m	14.24	0.39
	2.4	75 m	15.26	0.42
	2.5	80 m	16.28	0.45
-PRETVARAČ 3	3.1	90 m	29.97	0.50
	3.2	95 m	31.63	0.53
	3.3	100 m	20.35	0.56
	3.4	105 m	21.37	0.59
	3.5	110 m	22.38	0.62
-PRETVARAČ 4	4.1	115 m	38.30	0.64
	4.2	120 m	39.96	0.67
	4.3	125 m	25.44	0.70



	4.4	130 m	26.45	0.73
	4.5	135 m	27.47	0.76
-PRETVARAČ 5	5.1	55 m	18.31	0.31
	5.2	40 m	13.32	0.22
	5.3	60 m	19.98	0.33
	5.4	45 m	15.82	0.25
	5.5	30 m	10.54	0.17
-PRETVARAČ 6	6.1	65 m	21.64	0.36
	6.2	45 m	14.98	0.25
	6.3	55 m	18.31	0.31
	6.4	50 m	17.57	0.28
	6.5	35 m	12.3	0.20
<b>UKUPNI GUBICI NA ISTOSMJERNOM RAZVODU</b>			588.99	0.41

#### 5.4. Proračun prilika na izmjeničnom razvodu

Naponsko nadvišenje od najviše 3 % u odnosu na nazivni napon mreže koristi se za proračun presjeka izmjeničnog kabela. Pri proračunu uzima se udaljenost od pretvarača do priključne točke pripadajuće razdjelnice.

Normom VDE 0201 i 0202 za višezilne vodove koji su položeni u kabelske kanale provodi se kontrola na maksimalno dozvoljeno strujno opterećenje, to se vrši prema formuli (5.6.):

$$A_{ACcable} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_n \cdot L \cdot \cos \varphi}{0,03 \cdot U_n \cdot \kappa} \quad (5.6.)$$

gdje je:

$I_n$  – nazivna struja kabela,

$L$  – duljina kabela od komponente do pripadajuće razdjelnice na koju se spaja komponenta,

$\cos \varphi$  – faktor snage,

$U_n$  – nazivni napon,

$\kappa$  – vodljivost kabela (za bakar iznosi 56 Sm/mm<sup>2</sup>).

Uvrštavanjem svih poznatih vrijednosti u formulu 5.6. dobivamo rezultate dane u tablici 5.6., vidljivo je da svi odabrani kabeli zadovoljavaju kriterije.

Tablica 5. 6. Proračun prilika na izmjeničnom razvodu

Komponenta	Pripadajuća razdjelnica na koju se spaja komponenta	Strujno opterećenje kabela [A]	Odabran priključni kabel i dužina do razdjelnice	Dužina kabela [m]	Potreban presjek za 3% nadvišenja	Dozvoljena strujna opteretivost kabela [A]
-PRET_1	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	2	0.21 mm <sup>2</sup>	60
-PRET_2	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	3	0.31 mm <sup>2</sup>	60
-PRET_3	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	4	0.42 mm <sup>2</sup>	60
-PRET_4	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	5	0.52 mm <sup>2</sup>	60
-PRET_5	GRO-SE	36	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	6	0.77 mm <sup>2</sup>	60
-PRET_6	GRO-SE	36	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	7	0.90 mm <sup>2</sup>	60
-GRO-SE	GRO objekta	188	FG16OR 3x95 mm <sup>2</sup> + 1x50 mm <sup>2</sup>	8	5.39 mm <sup>2</sup>	238

### 5.5. Proračun gubitaka na izmjeničnoj strani elektrane

Gubici na izmjeničnoj strani elektrane računaju se prema formuli (5.7.):

$$P_{AC} = \frac{3 \cdot I_n^2 \cdot L}{\kappa \cdot A_{AC}} \quad (5.7.)$$

gdje je:

$I_n$  – nazivna struja kabela,

$L$  – duljina kabela,

$\kappa$  – vodljivost kabela (za bakar iznosi 56 Sm/mm<sup>2</sup>),

$A_{AC}$  – presjek kabela.

Uvrštavanjem svih vrijednosti u formulu 5.7. dobivaju se gubici snage na izmjeničnoj strani elektrane koji su prikazani u tablici 5.7.

Tablica 5. 7. Proračun gubitaka na izmjeničnoj strani elektrane

Početna razdjelnica	Krajnja razdjelnica	Očekivano strujno opterećenje [A]	Odobran priključni kabel	Dužina kabela [m]	Gubitak snage na trasi [W]
-PRET_1	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	2	5.63
-PRET_2	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	3	8.45
-PRET_3	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	4	11.26
-PRET_4	GRO-SE	29	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	5	14.08
-PRET_5	GRO-SE	36	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	6	26.04
-PRET_6	GRO-SE	36	FG16OR 5x16 mm <sup>2</sup>	7	30.38
-GRO-SE	GRO objekta	188	FG16OR 3x95 mm <sup>2</sup> + 1x50 mm <sup>2</sup>	8	159.45
<b>UKUPNI GUBICI NA IZMJENIČNOM RAZVODU [W]</b>					<b>255.29</b>

## 5.6. Ukupni gubici elektrane

Komponente koje se uzimaju u obzir pri računanju ukupnih gubitaka elektrane su: istosmjerni i izmjenični kabelski razvod te pretvarači. Formulom (5.8.) računaju se ukupni gubici:

$$P_{Guk} = P_{DC} + P_{AC} + \sum P_{Ginv} \quad (5.8.)$$

gdje je:

$P_{DC}$  – gubici elektrane na istosmjernom dijelu elektrane,

$P_{AC}$  – gubici elektrane na izmjeničnom dijelu elektrane,

$P_{Ginv}$  – gubici pretvarača.

Uvrštavanjem svih vrijednosti u formulu 5.8. dobivaju se ukupni gubici elektrane koji su prikazani u tablici 5.8.

Tablica 5. 8. Ukupni gubici elektrane

Komponenta	Pretvarači INV1-INV6	Istosmjerni kabelski razvod	Izmjenični kabelski razvod	UKUPNO
<b>Disipacija snage [W]</b>	4 x 400 2 x 475	588.99	255.29	3394.28

## 5.7. Proračun struje kratkog spoja na izlaznoj strani elektrane

Pretvarači ograničavaju iznos struje kratkog spoja na izlaznoj strani sunčane elektrane. Ograničenje struje kratkog spoja za odabrane pretvarače iznosi:

- 116.37 A za pretvarač *SMA SUNNY TRIPOWER 25000TL-30*,
- 98.58 A za pretvarač *SMA SUNNY TRIPOWER 20000TL-30*.

Prema tome iznos struje kratkog spoja na izlaznoj strani sunčane elektrane iznosi 627.06 A na 0.4 kV strani.

## 6. DOKUMENTACIJA U POSTUPKU PRIKLJUČENJA ELEKTRANE NA MREŽU

Nakon što se sunčana elektrana izgradi, prema glavnom projektu, potrebno je prije puštanja u pogon obaviti razna ispitivanja kako bi se utvrdilo da je elektrana sigurna za pogon sa mrežom. U tu svrhu izrađuju se elaborati utjecaja elektrane na mrežu i podešenja zaštite, te se razrađuje operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu. Ovo poglavlje daje opis pojedinog operativnog plana i programa ispitivanja u pokusnom radu, kao i elaborata koje je potrebno izraditi.

### 6.1. Elaborat utjecaja elektrane na mrežu

Elaboratom utjecaja elektrane na mrežu obrađuju se elementi koji prethode proceduri puštanja elektrane u pokusni rad. Elaborat sadrži analizu utjecaja elektrane na mrežu kao što su: utjecaj na tokove snaga, naponske prilike, kratke spojeve i utjecaj na kvalitetu napona. Prethodnom analizom i na temelju izmjerenih referentnih vrijednosti (koji mogu biti definirani od strane operatera distribucijskog/prijenosnog sustava) određuju se apsolutni iznosi parametara kvalitete električne energije.

U smjernicama za izradu elaborata utjecaja elektrane na mrežu koji se dostavljaju od strane HEP-ODS-a traži se analiza mjerenja kvalitete električne energije na mjestu priključenja elektrane za period od 7 dana prije priključenja i 7 dana poslije priključenja. Analiza kvalitete električne energije obrađuje se u posebnom izvješću koje obuhvaća razna mjerenja koja su opisana u nastavku.

Određivanje granične razine emisije određenog poremećaja kod pojedinog korisnika mreže, na mjestu priključenja, određuje se proporcionalno njegovoj priključnoj snazi, u skladu s tehničkim izvještajem IEC/TR 61000-3-X. Utvrđivanje dozvoljenih granica i kriterija prihvatljivosti provodi se u 3 stupnja. Prvi stupanj je potreba određivanja graničnih vrijednosti. Glavni kriterij za određivanje potrebe detaljnog vrednovanja povratnog utjecaja na mrežu je omjer priključne snage i snage kratkog spoja na mjestu priključenja. Tablica 6.1. prikazuje omjer prema Mrežnim pravilima, gdje je  $S_k$  snaga kratkog spoja, a  $S_p$  priključna snaga.

Tablica 6. 1. Omjer snage kratkog spoja i priključne snage prema Mrežnim pravilima

	<b>S<sub>k</sub>/S<sub>p</sub></b>
<b>Srednji napon</b>	≥ 1 000
<b>Niski napon</b>	≥ 150

Prema EN 61000-3-X omjer iznosi  $S_p/S_k \leq 0,2 \%$  za srednji napon ili  $S_{Dwi} = \sum S_{Dj} * W_j$ , prema kriteriju ponderiranja snage pojedine opreme postrojenja koja uzrokuje smetnje.  $S_{Dj}$  je snaga pojedine opreme, a  $W_j$  faktor iz tablice u normi IEC 61000 za pojedini tip opreme. Kako se elektrana iz glavnog projekta priključuje na niski napon potrebno je gledati omjer  $S_k/S_p$  za niski napon. Ukoliko je taj omjer manji od 150 potrebno je računati granične razine u drugom stupnju.

Drugi stupanj je kriterij određivanja graničnih vrijednosti. U ovoj fazi dopušteni je globalni doprinos ukupnoj razini emisija raspodijeljen na svaku pojedinu električnu instalaciju pojedinog korisnika u skladu s njenim udjelom u ukupnom kapacitetu opskrbnog sustava ( $S_i$ ) na koji je spojena instalacija. To osigurava da razina poremećaja zbog emisije svih kupaca priključenih na sustav neće premašiti indikativne planirane razine za pojedinu veličinu kvalitete napona.

Odstupanje napona i frekvencije također je bitno kod određivanja utjecaja elektrane na mrežu. Mrežna pravila i norma HRN EN 50160:2012 određuju granične vrijednosti minimalnih, odnosno maksimalnih vrijednosti desetominutnih prosjeka napona u niskonaponskoj mreži, to je prikazano u tablici 6.2.

Tablica 6. 2. Granične vrijednosti minimalnih i maksimalnih desetominutnih prosjeka napona za niskonaponsku mrežu prema Mrežnim pravilima i normi HRN EN 50160:2012

<b>0.4 kV</b>	<b>Nazivni</b>	<b>±10 %</b>	<b>-15 % / +10 %</b>
<b>Fazni napon</b>	230 V	207 – 253 V	195.5 – 253 V
<b>Linijski napon</b>	400 V	360 – 440 V	340 – 440 V

Prema Mrežnim pravilima, odstupanje frekvencije u normalnom pogonu u mreži gdje postoji interkonekcija može iznositi ±50 mHz. Norma HRN EN 50160:2012 koja se odnosi na distribucijsku mrežu niskog i srednjeg napona dozvoljava odstupanje frekvencije ±1 % od nazivne frekvencije u normalnom pogonu. Prikaz dozvoljenih odstupanja frekvencije dan je tablicom 6.3.

Tablica 6. 3. *Dozvoljeno odstupanje frekvencije*

	<b>Nazivna</b>	<b>±1 % (u 95 %)</b>	<b>-6 % / +4 % (u 100%)</b>
<b>Frekvencija</b>	50 Hz	49.5 – 50.5 Hz	47 – 52 Hz

Elaborat utjecaja elektrane na mrežu sadrži utjecaj elektrane na strujno naponske okolnosti i tehničke gubitke, kao i utjecaj elektrane na kratkospojne prilike u mreži. Oni se provode u raznim računalnim programima i neće biti predmet ovog rada. Suština tih utjecaja je prikaz proračuna tokova snaga i gubitaka mreže sa i bez priključene elektrane. Dok se kod utjecaja elektrane na kratkospojne prilike u mreži prikazuju rezultati za sve kratke spojeve kako bi se vidio doprinos elektrane u trajnoj struji kratkog spoja.

#### 6.1.1. Problematika prijelaznog procesa prilikom uključenja/isključenja elektrane na mrežu

Najnepogodniji utjecaj priključenja elektrane na mrežu bio bi u slučaju najniže potrošnje i istovremene maksimalne proizvodnje elektrane. Kod normalnog dnevnog pogona, elektrana se počinje sinkronizirati na mrežu u jutarnjim satima s oko 2-3 % snage. Daljnji porast snage elektrane nije skokovit, već postepeno raste do između 12 i 13 h, kada opet počinje postepeno padati prema večernjim satima.

Najnepogodniji slučaj isključenja sunčane elektrane s mreže, koji bi unio veću nestabilnost u sustav i potrebu angažiranja pričuvne snage, bio bi trenutak kada bi priključena sunčana elektrana proizvodila maksimalno, a istovremeno bi u mreži bila i maksimalna potrošnja.

Struja koju svi pretvarači zajedno mogu dati u normalnom pogonu iznosi 188.4 A/fazi na 0.4 kV. Budući da je trajanje prijelazne pojave kod gašenja pretvarača, zbog komutacijskih procesa u pretvaraču, iznimno kratko (1-4 ms), može se smatrati da je utjecaj pretvarača na prijelazne prilike pri uključenju/isključenju elektrane zanemariv.

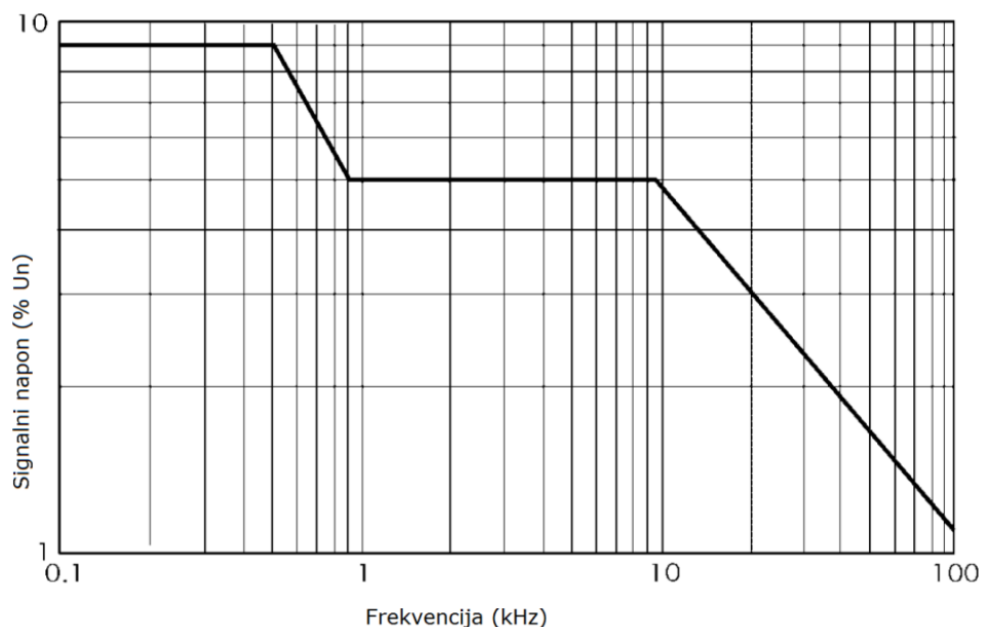
Nagli ispad elektrane utječe i na trenutnu promjenu frekvencije. Snagu elektrane potrebno je nadoknaditi pričuvnom energijom u mreži, a ponovna brzina uspostavljanja normalne razine frekvencije ovisi o brzini akcija u mreži kao što su angažiranje pričuvne snage ili isklopi određenih potrošača.

## 6.1.2. Utjecaj elektrane na MTU signal

Tonfrekventni signali superponiraju se na valni oblik osnovnog harmonika napona/struje kao kratka sekvenca impulsa kako bi stvorili kodiranu poruku/naredbu. Tako se omogućuju daljinske sklopne operacije na nekim teretima, promjena tarifa, itd. Kako bi ovaj sustav mogao raditi moraju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

1. tonfrekventni signal na udaljenom mjestu (na nekom uređaju koji mora biti pobuđen signalom) mora imati vrijednost koja se nalazi u zoni osjetljivosti prijemnika,
2. uređaji u mreži ne smiju uzrokovati značajan pad vrijednosti signala niti proizvesti signale koji mogu uzrokovati distorziju tonfrekventnog signala,
3. teret uređaja na mreži ne smije prekoračiti snagu izvora tonfrekventnog signala.

Mrežni tonfrekventni upravljački signali (MTU) na području Elektroprimorja Rijeka generirani su s frekvencijama od 216.66 Hz. Tijekom mjerenja kvalitete električne energije snimaju se tri-sekundne srednje vrijednosti napona MTU signala na 0.4 kV u glavnom razvodnom mjernom ormaru na koji se priključuje kupac s vlastitom proizvodnjom. Prema normi HRN EN 50160:2012 kroz 99 % dana tri-sekundne srednje vrijednosti signalnih napona moraju biti unutar površine ispod krivulje dane na slici 6.1.



Slika 6. 1. Dozvoljene razine napona signalnih frekvencija u distribucijskim, niskonaponskim mrežama



### 6.1.3. Doprinos elektrane treperenju napona (flikerima)

Frekvencijski opseg flikera je od 0 do 25 Hz. Termin fliker potječe od utjecaja fluktuacije napona na izvore svjetlosti, kada ljudsko oko primjećuje treperenje (eng. *flicker*). Fluktuacije napona predstavljaju elektromagnetsku pojavu, dok je treperenje njihova neželjena posljedica. Titranje električne rasvjete ili zaslona osobnog računala, kod niskonaponskih potrošača, posljedica je brzih dinamičkih promjena napona (flikera).

Uzroci samih flikera jesu nepravilne varijacije potražnje za reaktivnom snagom u distribucijskoj mreži koje izazivaju fluktuirajuće padove napona na mrežnim impedancijama, nagle promjene opterećenja koje mogu biti uzrokovane radom velikih potrošača koji troše velike i promjenjive količine struje iz mreže (npr. elektrolučne peći). Također, flikeri mogu biti uzrokovani pokretanjem motora koji pri pokretanju vuku nekoliko puta veću struju od nazivne. Osim rada velikih i promjenjivih trošila, pojavu flikera mogu uzrokovati i kratki spojevi.

Glavni uzrok fluktuacija napona u čvorištu elektrane je utjecaj prolazne oblačnosti na osciliranje snage elektrane, što utječe na promjene napona distribucijske mreže u čvorištu sunčane elektrane. Prema normi HRN EN 50160:2012, jačina treperenja kao intenzitet smetnji izazvanih svjetlosnim flikerom na osnovi veličina ocjenjuje se i utvrđuje pomoću sljedećih izraza:

1. Indeks kratkotrajne jačine treperenja koji se mjeri u toku desetominutnog intervala  $P_{st}$ , ovaj indeks se izračunava kao kombinacija pet postotnih vrijednosti, a računa se prema formuli (6.1.):

$$P_{st} = \sqrt{0.0314 * P_{0,1} + 0.0525 * P_1 + 0.065 * P_3 + 0.28 * P_{10} + 0.08 * P_{50}} \quad (6.1.)$$

Vrijednost  $P_{st=1}$  je vrijednost flikera koji predstavlja neugodnost.

2. Indeks dugotrajne jačine treperenja računa se na osnovi niza od 12 vrijednosti  $P_{st}$  tijekom vremenskog intervala od dva sata i računa se prema formuli (6.2.):

$$P_{tr} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (6.2.)$$

Procjena doprinosa flikera temelji se na računanju tzv. vremena flikera  $t_f$ , koji opisuje utisak flikera uzrokovanog jednom promjenom napona, a računa se prema formuli (6.3.):

$$t_f = 2.3 * (d * F)^{3.2} \quad (6.3.)$$

gdje je:

$d$  – relativna promjena napona iskazana u postocima nazivnog napona,

$F$  – faktor oblika (za pravokutne promjene napona  $F=1$ ).

Zbroj svih vremena flikera  $\sum t_f$  unutar ukupnog vremenskog intervala  $T_p$  je osnova za izračun kratkotrajne jakosti flikera  $P_{st}$  i računa se prema formuli (6.4.):

$$P_{st} = \left( \frac{\sum t_f}{T_p} \right)^{\frac{1}{3.2}} \quad (6.4.)$$

gdje je:

$T_p$  – vrijeme u s, a za proračun kratkotrajne jakosti flikera  $P_{st}$  treba biti 10 min.

Prema normi HRN EN 50160:2012 relativan doprinos elektrane na iznos dugotrajnih flikera mora biti  $P_{lt} < 1$ . Dok prema Mrežnim pravilima u normalnim pogonskim uvjetima, indikativna planirana razina jakosti treperenja napona u srednjenaponskoj mreži iznosi najviše:

- 0.9 za kratkotrajno treperenje napona,
- 0.7 za dugotrajno treperenje napona.

#### 6.1.4. Emisija strujnih harmonika elektrane

Pri  $THDi=0$  pretvarač daje struju idealnog sinusnog oblika. Za pretvarač povezan na mrežu valni oblik izlaznog napona je sinkroniziran s valnim oblikom mrežnog napona. Povećanjem izlazne snage pretvarača relativne vrijednosti harmonika struje opadaju, što znači da su apsolutne vrijednosti tih harmonika male u odnosu na vrijednosti struje osnovnog harmonika koji je u porastu prema nominalnoj vrijednosti.

Totalna harmonijska distorzija struje  $THDi$  koju pretvarač injektira u mrežu manja je na većoj snazi pretvarača (visoka osunčanost). U trenucima smanjene snage pretvarača (niska osunčanost)  $THDi$  vrijednost se znatno povećava. Međutim, stvarno je harmonijsko izobličenje struje tada slabo jer su amplitude tih harmonika neznatne. Iz navedenog može se zaključiti da je emisija strujnih harmonika funkcija karakteristike pretvarača i snage (osunčanosti sunčanog generatora). Uvidom u podatke, koje daje proizvođač, ispitivanjem pretvarača može se odrediti utjecaj sunčane elektrane na emisiju strujnih harmonika.

Prema Mrežnim pravilima, odnosno normi HRN EN 50160:2012 za određivanje faktora ukupnog harmonijskog izobličenja ( $THD$ ) uzima se u obzir prvih 40 harmonika snimanog napona. U normalnim pogonskim uvjetima, indikativna planirana razina ukupnog harmoničkog izobličenja ( $THD$ ) napona u srednjenaponskoj mreži iznosi 6.5 % (8 % u niskonaponskoj mreži).

## 6.2. Operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu

U pokusnom radu postrojenja korisnika mreže (investitora) provode se ispitivanja prema operativnom planu i programu ispitivanja u pokusnom radu (u daljnjem tekstu: OPIP). Provedbu pojedinih ispitivanja u pokusnom radu koordinira voditelj ispitivanja. Obaveza voditelja ispitivanja, odnosno investitora, je da osiguraju uvjete i mjere za rad na siguran način, svaki u svojoj domeni, u skladu sa Zakonom o zaštiti na radu i njegovim podzakonskim aktima. Uz voditelja ispitivanja u provedbi ispitivanja sudjeluju i drugi ispitivači, te izvršitelji pojedinih aktivnosti (pogonske manipulacije, mjerenje, očitavanje, zapisivanje rezultata i dr.) osposobljeni za rad na siguran način.

Nakon pojedinog ispitivanja zapisuju se rezultati ispitivanja i provjerava udovoljavaju li traženim kriterijima, tj. je li pravilno provedenim ispitivanjima ostvaren očekivani rezultat naveden u svakom pojedinom pokusu u OPIP-u. Ako su rezultati ispitivanja zadovoljavajući (unutar granica tolerancije) konstatira se uspješan završetak svakog pojedinog ispitivanja. Uspješnom provedbom svih ispitivanja iz OPIP-a završava postupak ispitivanja. Voditelj ispitivanja na temelju rezultata ispitivanja sastavlja bilješku o provedbi ispitivanja kojeg potpisuju voditelj ispitivanja, predstavnik investitora i predstavnik HEP ODS-a.

Operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu sadrži puno ispitivanja, stoga neće biti opisana sva ispitivanja, izdvojena su najbitnija. Ispitivanja koja nisu opisana su: mjerenje povratnog utjecaja na mrežu i kvalitetu napona na obračunskom mjernom mjestu korisnika mreže prije i poslije priključenja proizvodnog postrojenja i ispitivanje djelotvornosti zaštite od otočnog pogona proizvodnog postrojenja.

### 6.2.1. Preduvjeti za provedbu priključenja proizvodnog postrojenja na mrežu

Za provedbu programa ispitivanja po ovom OPIP nužni su sljedeći preduvjeti:

- priključak je završen i spreman za pogon,
- postrojenje i instalacija Korisnika mreže su završeni i spremni za pogon,
- izvršena je provjera ispravnosti kompletne opreme nakon montaže,
- izvršeno je sekundarno ispitivanje, programiranje i podešavanje opreme za električnu zaštitu, upravljanje i signalizaciju,
- postoji kompletna odgovarajuća dokumentacija o izvršenim funkcionalnim i ostalim ispitivanjima ugrađene opreme, odnosno dijelova postrojenja i instalacije Korisnika mreže.

Za mjerenje karakterističnih veličina tijekom provedbe OPIP-a može se koristiti slijedeća mjerna i registracijska oprema:

1. prijenosni uređaj za praćenje kvalitete napona tip *METREL MI 2891 Power Master* postavlja se na obračunsko mjerno mjesto korisnika mreže u susretnom postrojenju i služi za:
  - a. sedmodnevno mjerenje prije i poslije priključenja proizvodnog postrojenja (mjerenje kvalitete napona po normi HRN EN 50160),
  - b. snimanje rezultata provedenih pokusa.
2. prijenosni uređaj za praćenje kvalitete napona tip *METREL MI 2892 Power Master* s mogućnošću snimanja u mili-sekundnom području postavlja se unutar instalacija korisnika mreže i služi za:
  - a. funkcionalna ispitivanja i snimanje rezultata provedenih pokusa.

#### 6.2.2. Utvrđivanje i usklađivanje okretnog polja

Ovim ispitivanjem utvrđuje se polje dobiveno iz mreže na generatorskim prekidačima te konstatiranje spremnosti proizvodnih jedinica za sinkronizaciju na utvrđeno okretno polje iz mreže. Prije ispitivanja potrebno je isključiti mrežni uređaj za odvajanje u susretnom postrojenju kao i isključivanje svih sklopnih elemenata proizvodnog postrojenja. Nakon što smo se uvjerali da su prijašnje navedeni koraci ispunjeni uključuje se mrežni uređaj za odvajanje u susretnom postrojenju. Privodi se mrežni napon do generatorskog prekidača, uključanjem glavnog prekidača proizvodnog postrojenja te svih ostalih sklopnih elemenata u nizu do generatorskih prekidača. Generatorski prekidači ostaju isključeni. Izvršava se snimanje okretnog polja dobivenog od strane mreže na svakom generatorskom prekidaču. Uvidom u dokumentaciju o svakom pretvaraču utvrđuje se njegova spremnost za sinkronizaciju na utvrđeno okretno polje iz mreže. Ukoliko se utvrdi da okretno polje iz mreže ne udovoljava uvjetima za rad pretvarača moraju se provesti korektivne radnje i pokus se ponavlja.

#### 6.2.3. Uključenje proizvodnog postrojenja i sinkronizacija na mrežu

Ispitivanjem uključenja proizvodnog postrojenja i sinkronizacije na mrežu vrši se provjera, demonstracija i verifikacija sinkronizacije svih proizvodnih jedinica. Uključuju se proizvodne jedinice, jedna za drugom, i prati se postupak sinkronizacije. Prije početka ispitivanja moramo se

uvjeriti da je mrežni napon priveden do generatorskih prekidača proizvodnih jedinica. Nakon toga, uključuju se svi pretvarači na istosmjernoj strani. Zatim se uključuje generatorski prekidač pretvarača 1 te se prati postupak sinkronizacije pretvarača 1. Potvrdom o uspješnoj sinkronizaciji i početku proizvodnje pretvarača 1 postupak je potrebno ponoviti za sve ostale pretvarače, jedan za drugim, te za svaki konstatirati uspješnost sinkronizacije i početak proizvodnje. Tijekom provođenja pokusa snimati električne veličine (minimalno: napon, struja, radna i jalova snaga i  $\cos \varphi$ ) na mjernim uređajima navedenim u potpoglavlju 6.2.1. Potrebno je priložiti snimke mjerenih veličina u sekundnom području.

#### 6.2.4. Ispitivanje mogućnosti rada proizvodnog postrojenja u definiranom režimu rada

Ovo ispitivanje vrši se prema Elaboratu utjecaja elektrane na mrežu, koji će biti kasnije posebno opisan, a svrha mu je potvrđivanje mogućnosti rada proizvodnog postrojenja u definiranom režimu rada. Prije samog ispitivanja proizvodnog postrojenja mora biti u paralelnom pogonu s mrežom i predavati električnu energiju u instalaciju kupca, odnosno mrežu. Zatim se postavlja definirani režim rada proizvodnog postrojenja prema odredbama Elaborata utjecaja elektrane na mrežu. Ako se definirani režim rada odnosi na aktivnu regulaciju napona, a tijekom provođenja ispitivanja se ne očekuje aktivacija regulacije napona od strane proizvodnog postrojenja (vrijednosti napona su unutar definiranog praga), potrebno je privremeno prepodesiti parametre regulacije napona, na način da dođe do aktivacije regulacije napona od strane proizvodnog postrojenja. Ukoliko su postavke definiranog režima rada privremeno prepodešene, kao što je to prethodno navedeno, nakon provedbe ispitivanja parametre regulacije napona potrebno je postaviti prema odredbama Elaborata utjecaja elektrane na mrežu. Tijekom provođenja ispitivanja potrebno je snimati električne veličine (minimalno: napon, radna i jalova snaga i  $\cos \varphi$ ) na mjernim uređajima iz poglavlja 6.2.1. Potrebno je priložiti snimke mjerenih veličina kojima se potvrđuje ispravnost rada proizvodnog postrojenja u definiranom režimu rada.

#### 6.2.5. Ispitivanje izlaska proizvodnog postrojenja iz paralelnog pogona s mrežom (normalni isklop)

Ispitivanjem se utvrđuje provjera, demonstracija i verifikacija povratnog djelovanja na mrežu uslijed normalnog isključenja proizvodnog postrojenja, praćenje tokova snaga i potvrda isključenja svih proizvodnih jedinica. Prije ispitivanja mora se potvrditi da je proizvodno postrojenje u paralelnom pogonu s mrežom i da predaje električnu energiju u instalaciju kupca,

odnosno mrežu. Zatim se daje nalog za normalni isklop proizvodnog postrojenja (prema projektiranom tehničkom rješenju) pri radu sa maksimalno raspoloživom snagom, ali ne manjom od 50 % instalirane izmjenične snage proizvodnog postrojenja, te se prati odziv proizvodnih jedinica. Tijekom provođenja pokusa snimati električne veličine (minimalno: napon, struja, radna i jalova snaga i  $\cos \varphi$ ) na mjernom uređaju iz potpoglavlja 6.2.1., a nakon završetka pokusa prilaže se snimka mjerenih veličina u sekundnom području.

#### 6.2.6. Ispitivanje automatskog ponovnog uključanja proizvodnog postrojenja i sinkronizacije na mrežu nakon povratka mrežnog napona

Prije ispitivanja mora se potvrditi da je mrežni napon prisutan u instalaciji korisnika, a da je proizvodno postrojenje isključeno i nije u paralelnom pogonu s mrežom. Nakon toga, istovremeno se privodi mrežni napon do svih proizvodnih jedinica te se prati i snima:

- a. napon i frekvencija te vrijeme promatranja mreže prije sinkronizacije,
- b. vrijeme od trenutka sinkronizacije do trenutka dostizanja maksimalno raspoložive snage proizvodnog postrojenja (konstatirati koliko iznosi gradijent porasta snage nakon uključanja).

Tijekom provođenja pokusa snimaju se električne veličine (minimalno: napon, struja, radna i jalova snaga i  $\cos \varphi$ ) na mjernim uređajima iz potpoglavlja 6.2.1., te nakon završetka pokusa isti se prilažu u sekundnom području.

#### 6.2.7. Provjera ograničenja snage predaje u mrežu

Ovaj pokus provodi se samo ako je instalirana snaga proizvodnog postrojenja veća od priključne snage u smjeru predaje u mrežu, odnosno ako je realiziran sustav za ograničenje snage predaje u mrežu. Prije samog pokusa potrebno je utvrditi da je proizvodno postrojenje u paralelnom pogonu s mrežom i da predaje električnu energiju u instalaciju kupca, odnosno mrežu. Nakon toga, u instalaciji kupca potrošnju je potrebno prilagoditi proizvodnji (isključenjem strujnih krugova u instalaciji kupca) na način da je proizvodnja veća od potrošnje te je pritom snaga predaje u mrežu u okolini (što bliže) priključne snage u smjeru predaje u mrežu. Zatim je u instalaciji kupca potrebno odrediti strujni krug čijim će isključenjem snaga predaje u mrežu porasti (trenutno) iznad priključne snage u smjeru predaje u mrežu. Isključuje se odabrani strujni krug i prati se odziv proizvodnog postrojenja, odnosno prati se snaga predaje u mrežu. U trenutku isključenja

odabranog strujnog kruga očekuje se prekoračenje priključne snage, međutim, odmah zatim (unutar nekoliko sekunda) proizvodno postrojenje treba započeti postupak automatskog ograničavanja predane snage na vrijednost odobrene priključne snage. Tijekom ispitivanja potrebno je snimati električne veličine (minimalno: napon, struja, radna i jalova snaga i  $\cos \varphi$ ) na mjernim uređajima iz potpoglavlja 6.2.1., te se isti prilažu u sekundnom području. Nakon završetka pokusa potrebno je uključiti sve strujne krugove kupca koji su, u svrhu provođenja pokusa, bili isključeni.

#### 6.2.8. Ispitivanje odziva korisnika mreže na nestanak mrežnog napona

Ovim ispitivanjem prati se odziv dodatnog izvora napajanja (ako isti postoji) te se utvrđuje da ne postoji mogućnost istodobnog rada dodatnog izvora napajanja i proizvodnog postrojenja nakon isključenja mrežnog napona. Očekuje se isključenje proizvodnog postrojenja u roku minimalno 100 ms kraćem od trajanja pauze brzog automatskog ponovnog uklopa, odnosno isključenje u roku od najviše 2 s ako se u mreži ne primjenjuje automatski ponovni uklop. Prije početka ispitivanja utvrditi da je proizvodno postrojenje u paralelnom pogonu s mrežom i da predaje električnu energiju u instalaciju kupca, odnosno mrežu. Uvidom u instalaciju kupca utvrditi da postoji sklopka za preklapanje napajanja nužnih potrošača s mreže na dodatni izvor napajanja te da nakon preklapanja proizvodno postrojenje neće biti napajano od strane dodatnog izvora. Ovaj korak se provodi samo u slučaju kada je u instalaciji kupca ugrađen dodatni izvor napajanja. Nakon toga se isključuje mrežni uređaj za odvajanje i prati se odziv elektroenergetskog postrojenja i instalacije korisnika mreže. Konstatira se kako je djelovala zaštita proizvodnog postrojenja (koja i u kojem vremenu). Tijekom provođenja pokusa potrebno je snimati električne veličine (minimalno: napon, struja, radna i jalova snaga i frekvencija) na mjernim uređajima iz potpoglavlja 6.2.1., a snimke (efektivne vrijednosti i valni oblici) zatim priložiti u mili-sekundnom području. Na snimkama potrebno je označiti trenutak isključenja mrežnog uređaja za odvajanje i trenutak isključenja posljednje proizvodne jedinice, te naznačiti vrijeme trajanja između ova dva događaja. Ukoliko je u instalaciji kupca ugrađen dodatni izvor napajanja potrebno je pratiti i opisati postupak prelaska napajanja nužnih trošila s mreže na dodatni izvor napajanja te potvrditi da ne postoji mogućnost paralelnog rada dodatnog izvora i proizvodnog postrojenja.

Ako korisnik ima ugrađen dodatni izvor napajanja kojemu je HEP ODS odobrio kratkotrajni paralelni rad s mrežom (prilikom povratka mrežnog napona), dozvoljen je paralelni rad proizvodnog postrojenja s dodatnim izvorom napajanja te zajednička sinkronizacija dodatnog izvora i proizvodnog postrojenja na mrežu prilikom povratka mrežnog napona.

### 6.3. Elaborat podešenja zaštite

U elaboratu podešenja zaštite provode se simulacije kvarova i poremećaja, a koriste se podaci o tokovima snaga i kratkih spojeva dobiveni u elaboratu utjecaja elektrane na mrežu. Selektivnost, brzina, osjetljivost i rezerva najbitniji su zahtjevi zaštite, a elaborat podešenja zaštite daje vrijednosti karakterističnih veličina za djelovanje zaštite i izbor podešenja zaštite sve u svrhu postizanja navedenih zahtjeva. Elaborat podešenja zaštite sastoji se od sljedećih dijelova: prikaz osnovnih tehničkih parametara elektrane, prikaz razmatrane distribucijske električne mreže, pregled trenutnog podešenja zaštite, utjecaj priključenja elektrane na struje kratkog spoja, prijedlog podešenja nadstrujnih zaštita, zaštita od otočnog rada (podešenje naponske i frekvencijske zaštite), automatski ponovni uklop, preporuke o podešenju zaštite, I-t krivulje podešenja nadstrujnih zaštita i sheme podešenja svih zaštita.

Podešenja proradnih vrijednosti zaštita moraju biti usklađene s HEP ODS-om. To mora biti vidljivo iz elaborata podešenja zaštite (EPZ) kojeg korisnik mreže treba izraditi u dogovoru s HEP ODS-om. Elaborat podešenja zaštite je nužan u slučaju kada elektrana ima glavni prekidač, a glavni prekidač elektrane je potreban u slučaju da u elektrani postoji:

- više od jedne proizvodne jedinice,
- spremnik električne energije,
- kompenzacija jalove energije priključena između generatorskog prekidača i mreže.

Kako je elaborat podešenja zaštite baziran na puno proračuna, shema i prikaza rezultata biti će opisani samo dijelovi elaborata koji se odnose na zaštitu izmjenjivača i njihov doprinos pri kratkom spoju a sve u skladu s glavnim projektom iz poglavlja 4.

#### 6.3.1. Zaštite u pretvaračima

U samim pretvaračima postoje diferencijalna, nadnaponska, podnaponska, nadfrekvencijska, podfrekvencijska zaštita i aktivne zaštite od otočnog rada. Naponske i frekvencijske zaštite nazivaju se pasivnima zbog načina na koji rade, odnosno prate (mjere) napon i frekvenciju na stezaljkama samog pretvarača, a svako odstupanje izvan podešenih granica isključuje pretvarača. Aktivna pak metoda stalno injektira jalovu komponentu struje male amplitude u mrežu te u slučaju otočnog pogona takva injektirana struje uzrokuje nestabilnost rezonantne LC frekvencije mreže, a detektor u pretvaraču mjeri tu promjenu i šalje signal u



modulator. U otočnom se pogonu amplituda moduliranog signala na taj način pojačava i kada prijeđe granice odabrane norme uzrokuje isključenje pretvarača.

### 6.3.2. Utjecaj priključenja elektrane na prilike pri kratkom spoju

Pretvarači u sunčanim elektranama zbog svoje se izvedbe mogu smatrati strujnim izvorima. Struja kojom sudjeluju u kratkom spoju puno je manja od struje kojom sudjeluju distribuirani izvori koji posjeduju inerciju, kao što su sinkroni i asinkroni generatori, te ne može biti mnogo veća od maksimalne struje koju pretvarači mogu dati u normalnom pogonu, a tu vrijednost svaki proizvođač prikazuje u tehničkim karakteristikama pretvarača.

Maksimalna vrijednost struje kojom elektrana doprinosi trajnoj struji kratkog spoja ovisi o modulacijskoj tehnici, implementiranim algoritmima, trenutnoj ulaznoj snazi pretvarača u istosmjernom krugu (akumuliranoj energiji) i padu napona na stezaljkama pretvarača. Prema podacima proizvođača *SMA* ona za pretvarač *SUNNY TRIPOWER 25000TL-30* iznosi 36.2 A/fazi, odnosno za pretvarač *SMA SUNNY TRIPOWER 20000TL-30* iznosi 29 A/fazi. Ukupna vrijednost struje kojom će sunčana elektrana hale sortirnice doprinositi trajnoj struji kratkog spoja iznosi:

$$4 * 29 A + 2 * 36.2 A = 188.4 A/fazi$$

### 6.3.3. Zaštita od otočnog rada

Otočni rad za pojedinu elektranu određuje se prema elektroenergetskoj suglasnosti. Ukoliko otočni rad nije dozvoljen uvjeti za prekidanje paralelnog pogona elektrane i distribucijske mreže su (Mrežna pravila HEP ODS-a):

- odstupanja napona većeg od  $\pm 10\%$  nazivne vrijednosti,
- odstupanja frekvencije iznad 50.05 Hz ili ispod 49.95 Hz.

U slučaju ispada distribucijske elektroenergetske mreže fotonaponski pretvarač ne smije nastaviti napajati mrežu. Da bi elektrana ostala u otočnom radu moraju se zadovoljiti 2 uvjeta:

- rezonantna frekvencija preostalog dijela mreže mora biti takva da pretvarač kao strujni izvor na otočnoj impedanciji proizvede frekvenciju blisku frekvenciji mreže,
- u otočnom dijelu mreže, u trenutku prije razdvajanja, potrošnja djelatne i jalove snage treba biti gotovo jednaka proizvodnji elektrane.

Vjerojatnost poklapanja tih događaja vrlo je mala, međutim svejedno je potrebno primijeniti odgovarajuće metode za otkrivanje otočnog rada. Pasivnim metodama prati se napon i frekvencija otočnog dijela mreže. Svako odstupanje izvan podešenih opsega aktivira naponske i frekvencijske zaštite u pretvaraču. Aktivnim metodama smanjuje se zona neosjetljivosti detekcije otočnog rada, a također se smanjuje i vrijeme detekcije.

Aktivna metoda aktivna je cijelo vrijeme u pretvaračima, dakle i u normalnom pogonu. Princip rada je da cijelo vrijeme injektira jalovu komponentu struje male amplitude u mrežu, jer se u slučaju rada pretvarača na krutu mrežu na taj način ne mijenja ni frekvencija ni napon mreže.

U slučaju da se poklope prethodno navedena 2 uvjeta za nastanak otočne mreže, takva injektirana struja uzrokuje nestabilnost rezonantne LC frekvencije mreže. Detektor u pretvaraču mjeri promjenu i šalje signal u modulator. U otočnom pogonu se amplituda moduliranog signala na taj način pojačava i kada prelazi granice odabrane norme, tada uzrokuje isključenje pretvarača.

Za slučaj da omski teret potrošača nije jednak proizvodnji elektrane u trenutku nastanka otočne mreže, u pretvaraču se uključe pasivne zaštite. Napon na 0.4 kV priključku elektrane bit će približno jednak padu napona kojeg struja pretvarača stvara na impedanciji potrošača koji su u trenutku odvajanja od mreže bili spojeni na 10 kV vodno polje iz kojeg se napaja elektrana.

Zbog ograničenog pristupa detaljima konstrukcije pretvarača (kontrola jedinica, modulator, detektor), podešenjima regulatora u izmjenjivaču i MPPT algoritma koji je specifičan za svakog pojedinog proizvođača pretvarača, ne može se modelirati realan tip pretvarača.

S obzirom da detaljni tehnički podaci potrebni za realni model pretvarača ne postoje, u simulacijama se ne može sa sigurnošću tvrditi da će i stvarni pretvarač reagirati na isti način u slučaju kod kojeg se uspijeva balansirati proizvodnja i potrošnja. Isto tako, u praksi u javnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži veliki je problem postići uvjete za otočni rad u kojima su zadovoljena dva već spomenuta glavna uvjeta za ostanak mrežno kontinuiranog pretvarača u otočnom pogonu. Mjerenje vremena odvajanja elektrane (pretvarača) u otočnom pogonu zahtijeva laboratorijske uvjete mjerenja i testiranja.

Ipak, najsigurnije je kod provedbe plana i programa ispitivanja paralelnog pogona elektrane s distribucijskom mrežom provesti pokuse otočnog pogona te snimiti, analizirati i potvrditi pravilno isključenje pretvarača prilikom nastanka otočne mreže.

## 7. ZAKLJUČAK

Za uspješno projektiranje sunčane elektrane potrebno je poznavati i razumjeti kako pojedini dijelovi rade. Osnovni dijelovi jedne sunčane elektrane su: solarna ćelija, fotonaponski modul i pretvarač. Od materijala trenutno dostupnih na tržištu, za izradu solarnih ćelija, najpoznatiji su: monokristalični silicij, polikristalinični silicij, amorfni silicij, kadmij telurid, itd. Pretvorba sunčevog zračenja zasniva se na fotonaponskom efektu, gdje elektromotorna sila (napon) nastaje na krajevima solarne ćelije kada se ona osvijetli odnosno upija sunčevo zračenje. Sve to je moguće zbog ispravljačkog djelovanja PN-spoja, koji je osnova solarne ćelije, ukoliko je P-područje pozitivno a N-negativno PN-spoj lakše vodi struju. Spajanjem više solarnih ćelija dobiva se fotonaponski modul, a spajanjem više fotonaponskih modula na noseću konstrukciju fotonaponski panel. Unutar fotonaponskih modula solarne ćelije mogu se spajati u seriju i paralelu. Kod serijskog spoja ukupni napon jednak je zbroju napon pojedinih ćelija, u paralelnom spoju ukupni napon je jednak i obično iznosi 0.6 V. Ukupna struja je kod serijskog spoja jednaka i iznos određuje solarna ćelija koja daje najmanju struju, dok se kod paralelnog spoja struja pojedine ćelije zbraja i daje ukupan iznos struje. Osnovni zadatak pretvarača je da pretvaraju istosmjernu struju, dobivenu iz fotonaponskih panela, u izmjeničnu struju. Karakteristike pretvarača ovise o vrsti fotonaponskog sustava, da li je autonomni ili mrežni. Kod mrežnih sustava pretvarač je direktno spojen na fotonaponske panele, dok je kod autonomnih sustava pretvarač najčešće, ali ne i nužno, spojen na baterijske spremnike.

Projektna ili tehnička dokumentacija nekog električnog postrojenja je skup svih dokumenata koji mogu biti u različitim oblicima kao što je: pismeni, nacrti, računalni, slikovni i sl. Narav nekog postrojenja, jednog dijela ili elemenata te međusobne veze dijelova postrojenja ili elemenata prikazuje se projektom dokumentacijom. To se postiže putem shema, nacrti i drugih potrebnih opisa. Projektant svoja promišljanja, ideje i umni napor usmjerava prema rješavanju određenog projektnog zadatka te sve to prikazuje projektom dokumentacijom. U elektrotehničkom smislu projektom dokumentaciju možemo podijeliti na: projektom zadatak, idejno rješenje, idejni projekt, investicijski elaborat, glavni projekt, izvedbeni projekt i dokumentacija za pogon i održavanje.

U ovom diplomskom radu bilo je potrebno izraditi elektrotehnički projekt, na razini glavnog projekta, za integriranu sunčanu elektranu na krovu hale sortirnice. Kao sastavni dio novo planiranog postrojenja za sortiranje odvojeno prikupljenog otpada (sortirnice) planiranog na lokaciji Mihačeva Draga u Rijeci, planira se izgraditi sunčana elektrana na krovu hale sortirnice snage 130 kW. Fotonaponski modul SV72-330 hrvatskog proizvođača SOLVIS d.o.o. koristiti će

se za ugradnju. Za pretvarače, a prema podacima snage fotonaponskog polja, odabrani su pretvarači *SMA SUNNY TRIPOWER 25000TL-30* odnosno *20000TL-30*. Odvodnici prenapona tipa II koristiti će se za zaštitu fotonaponskog polja i ulaza pretvarača od atmosferskih pražnjenja. Također, svi odabrani pretvarači imaju već ugrađeni odvodnik prenapona tipa II na svim ulazima. Četveropolna izvedba odvodnika prenapona tipa II, na izlazu iz sunčane elektrane, služiti će za zaštitu pretvarača od prenapona uslijed atmosferskih pražnjenja od strane elektroenergetske mreže. Sunčana elektrana na krovu hale sortirnice priključiti će se kao trofazni priključak na niskonaponskoj strani (0.4 kV) na elektroenergetsku mrežu.

Procjena očekivane godišnje proizvodnje električne energije sunčane elektrane provedena je u programskom paketu *PV\*SOL premium 2021* i iznosi 159762.3 kWh. Na stvarnu proizvodnju sunčane elektrane mogu utjecati način održavanja i meteorološka odstupanja. Pri proračunu prilika na istosmjernom razvodu dobiven je maksimalni napon od 979.36 V i minimalni napon od 624.90 V. Oba napona nalaze se unutar dozvoljenih granica koje je propisao proizvođač pretvarača *SMA SUNNY*. Kod proračuna gubitaka u istosmjernim kabelima izračunat je gubitak snage pojedinog niza, niti jedan ne prelazi dozvoljenu granicu od 1 %. Ukupni gubici elektrane, koji uključuju gubitke istosmjernog i izmjeničnog razvoda kao i svih pretvarača, iznose 3394.28 W. Struja kratkog spoja na izlaznoj strani sunčane elektrane iznosi 627.06 A na 0.4 kV strani.

Prije puštanja u pogon sunčane elektrane potrebno je obaviti razna ispitivanja radi utvrđivanja da je elektrana sigurna za pogon sa mrežom. Radi toga se izrađuju elaborati utjecaja elektrane na mrežu i podešenja zaštite, te se određuje operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu. Elaborat utjecaja elektrane na mrežu sadrži analizu utjecaja elektrane na mrežu kao što je: utjecaj na tokove snaga, naponske prilike, kratke spojeve i utjecaj na kvalitetu napona. Operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu definira pojedina ispitivanja koja je potrebno izvršiti a koje koordinira voditelj ispitivanja. Neka od ispitivanja su: utvrđivanje i usklađivanje okretnog polja, uključenje proizvodnog postrojenja i sinkronizacija na mrežu, ispitivanje izlaska proizvodnog postrojenja iz paralelnog pogona s mrežom, i dr. Elaborat podešenja zaštite prikazuje simulacije kvarova i poremećaja radi provjere selektivnosti, brzine, osjetljivosti i rezerve zaštitnih uređaja. Integriranjem sunčane elektrane u mrežu dolazi do promjena u iznosima struja kratkog spoja te se zbog toga mora provjeriti djelovanje zaštite nakon integriranja elektrane na mrežu kao i eventualna naknadna podešenja zaštite.

## 8. LITERATURA

- [1] Majdandžić, Lj.: „Fotonaponski sustavi“, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu i Srednja škola Oroslavje,
- [2] Smets, HM A. i dr.: „Solar energy“, UIT Cambridge, England, 2016.
- [3] „Zakon o gradnji“, s Interneta, <https://www.zakon.hr/z/690/Zakon-o-gradnji>, 24. ožujak 2022.
- [4] Franković, D.: Predavanja sa kolegija Projektiranje električnih postrojenja, 2020/2021.
- [5] Katalog za fotonaponski modul SV72 tvrtke SOLVIS d.o.o., s Interneta, <https://solvis.hr/proizvodi/polikristalni-moduli/sv72/>, 1. travanj 2022.
- [6] Katalog za izmjenjivače *SUNNY TRIPOWER 20000TL-30* i *25000TL-30* tvrtke SMA, s Interneta, <https://files.sma.de/downloads/STP15-25TL-30-DS-en-41.pdf>, 15. travanj 2022.

## **9. SAŽETAK RADA I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLISKOM JEZIKU**

Sunčeva energija je neiscrpan izvor energije koji se može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Fotonaponski sustavi sadrže puno različitih komponenata. Ovisno o vrsti razlikujemo tri glavne vrste fotonaponskih sustava: autonomni, mrežni i hibridni. Razumijevanje rada pojedinih komponenata fotonaponskih sustava kao što su: solarna ćelija, fotonaponski modul i pretvarač ključno je za uspješno projektiranje sunčane elektrane. U elektrotehničkom smislu projektnu dokumentaciju možemo podijeliti na: projektni zadatak, idejno rješenje, idejni projekt, investicijski elaborat, glavni projekt, izvedbeni projekt i dokumentacija za pogon i održavanje. Pri projektiranju sunčane elektrane potrebno je provesti niz tehničkih proračuna kao što su: procjena proizvodnje električne energije, proračun prilika na istosmjernom i izmjeničnom razvodu, proračun istosmjernih kabela na ulaznoj strani pretvarača, proračun gubitaka na izmjeničnoj strani elektrane i proračun struje kratkog spoja na izlaznoj strani elektrane. Prije puštanja sunčane elektrane u pogon potrebno je obaviti razna ispitivanja kako bi se utvrdilo da je elektrana sigurna za pogon sa mrežom. Zbog toga se izrađuju elaborati utjecaja elektrane na mrežu i podešenja zaštite, te se propisuje operativni plan i program ispitivanja u pokusnom radu.

Ključne riječi: sunčeva energija, projektiranje, sunčana elektrana, projektna dokumentacija, glavni projekt.

### **Summary**

Solar energy is an unused source of energy that can be used to produce electricity. Photovoltaic systems contain many different components. Depending on the type, we distinguish between three main types of photovoltaic systems: autonomous, grid and hybrid. Understanding the operation of individual components of photovoltaic systems such as: solar cell, photovoltaic module and converter is essential for the successful design of a solar power plant. In the electrotechnical sense, the project documentation can be divided into: project assignment, conceptual solution, conceptual project, investment study, main project, executive project and documentation for operation and maintenance. When designing a solar power plant, it is necessary to carry out a series of technical calculations such as: estimation of electricity production, calculation of conditions on the DC and AC distribution, calculation of DC cables on the input side of the converter, calculation of losses on the AC side of the power plant and calculation of short-circuit current on the output side of the power plant. Before putting the solar power plant into operation, it is necessary to carry out various tests in order to determine that the power plant is safe for operation with the grid. For this reason, studies of the impact of the power plant on the

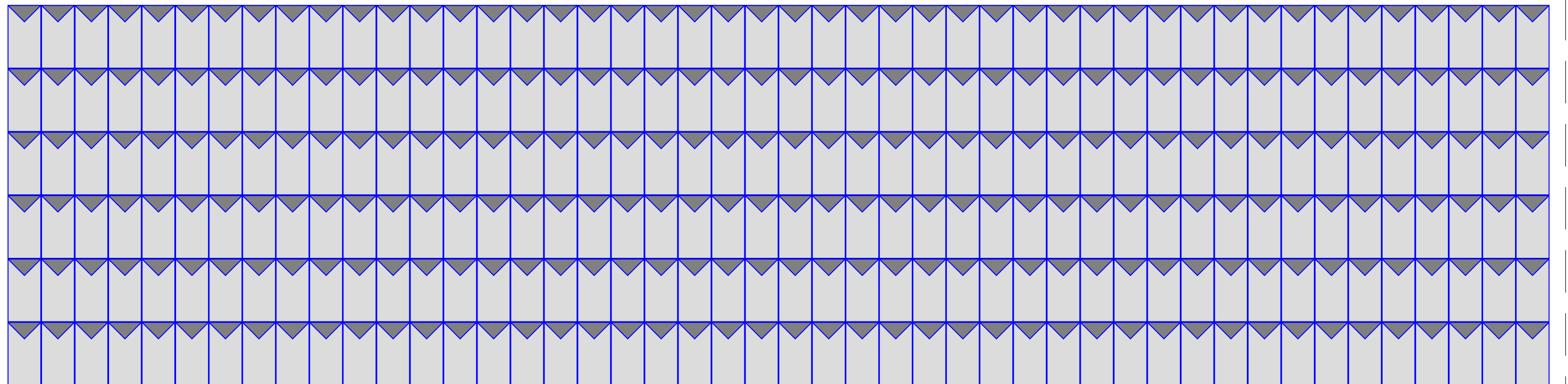
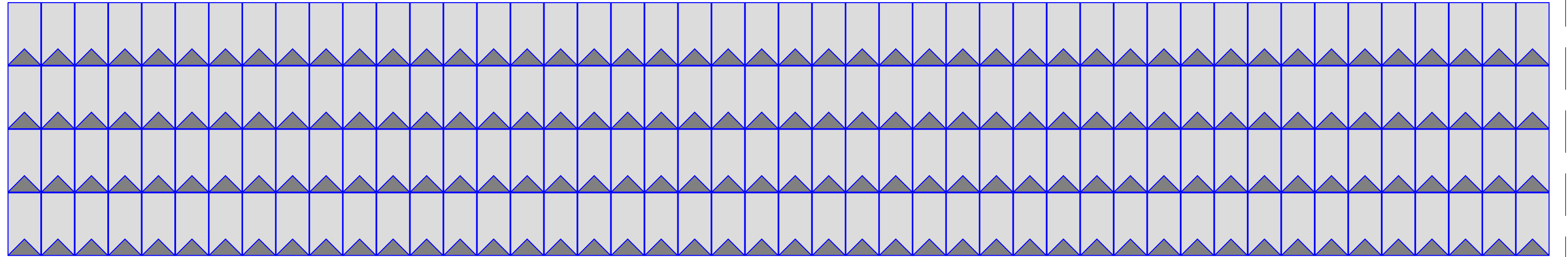
network and protection settings are being prepared, and an operational plan and program of testing in experimental work are being prescribed.

Keywords: solar energy, designing, solar power plant, project documentation, main project.

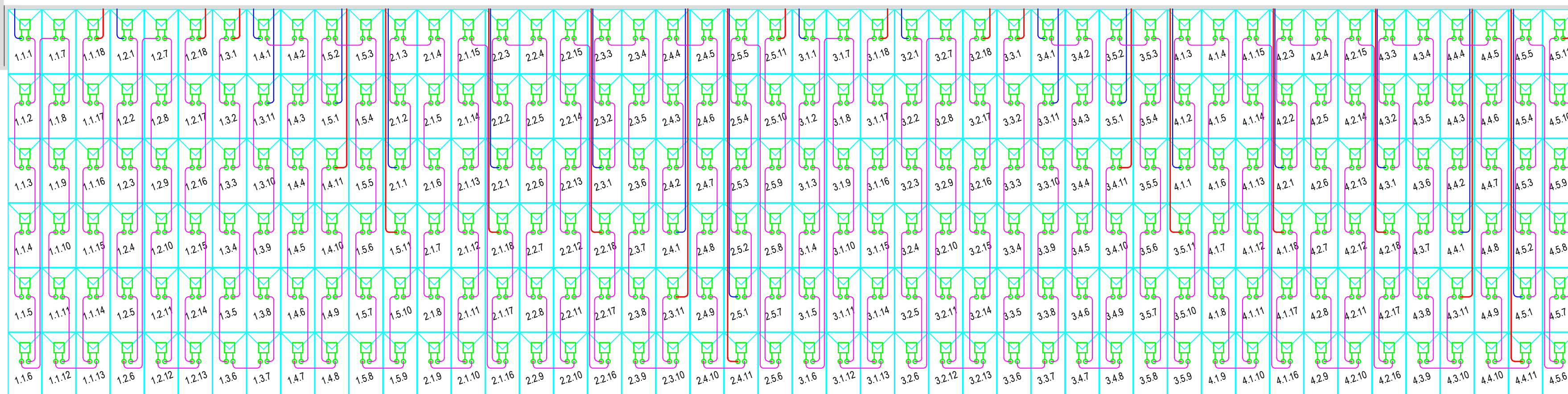
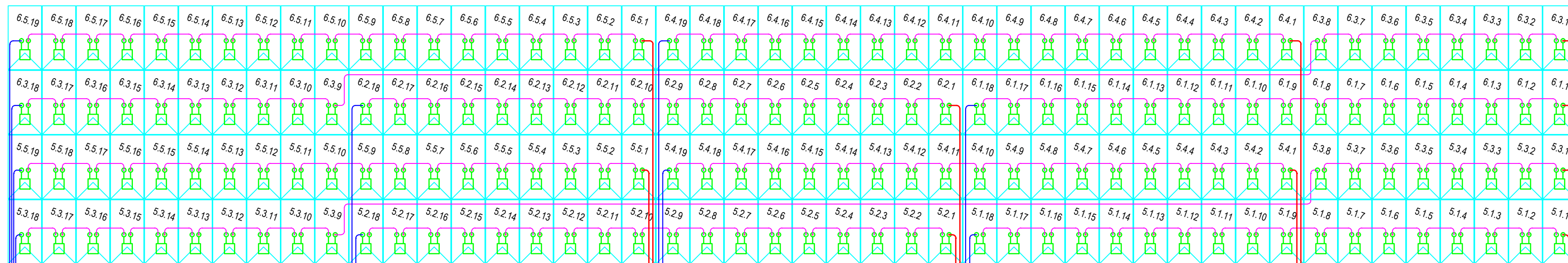
## **10. PRILOG**

Nacrtnom dokumentacijom prikazati će se svi bitni dijelovi sunčane elektrane kao što su: dispozicija modula, shema ožičenja FN modula, jednopolna shema istosmjerno i izmjeničnog razvoda i sustav zaštite od djelovanja munje.





Projektant: Ivan Joha, bacc.ing.el.		Naziv projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>		ZOP:
				Oznaka mape:
				Broj projekta:
Projektant suradnik:	Vrsta projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>	Sadržaj nacrt:		Nacrt br.: 10.1.
	Razina projekta: <b>GLAVNI PROJEKT</b>	<b>DISPOZICIJA MODULA ELEKTRANE</b>		List: 1
Izmjene:	Revizija projekta:			Listova: 1
	Veza:		Mjerilo: 1:100	Datum: 05/22
	Oznaka:			
	Datum:			

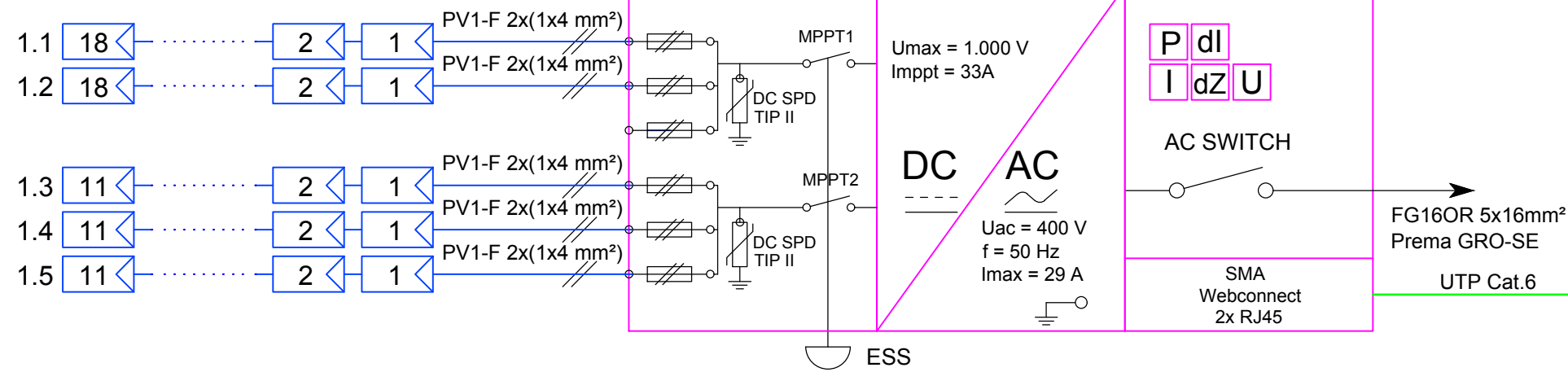


Spust sa krova do energetskog kontejnera  
2x PK 100/60 toplo cinčani kabelski kanal

Projektant: Ivan Joha, bacc.ing.el.		Naziv projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>		ZOP:
				Oznaka mape:
				Broj projekta:
Projektant suradnik:	Vrsta projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>	Sadržaj nacrt:		Nacrt br.: 10.2.
	Razina projekta: <b>GLAVNI PROJEKT</b>	<b>SHEMA OŽIČENJA FN MODULA ELEKTRANE</b>		List: 1
Izmjene:	Revizija projekta:			Listova: 1
Veza:				Mjerilo: 1:100
Oznaka:				Datum: 05/22
Datum:				

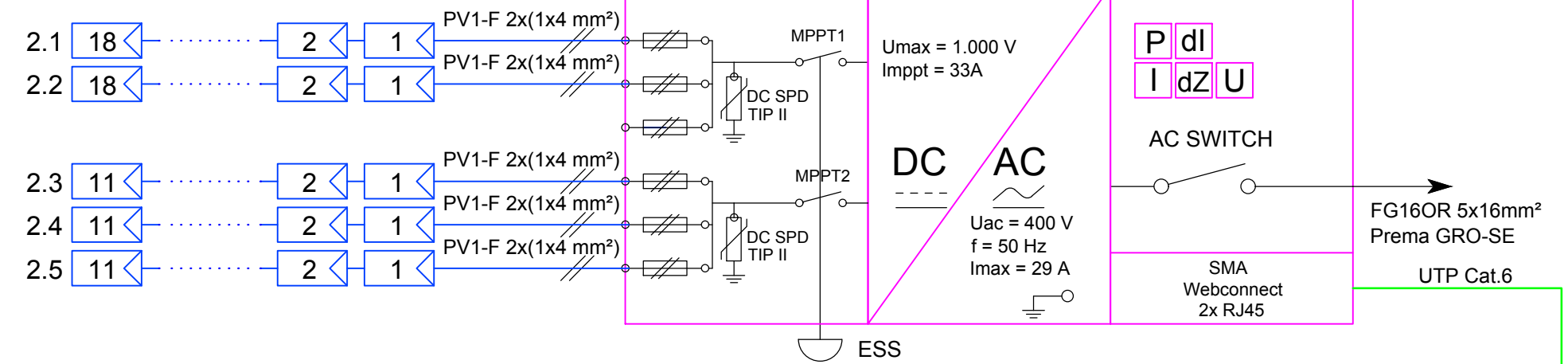
### FN MODULI, 69x SV72-330

### FN PRETVARAČ 1: SMA STP 20000TL-30



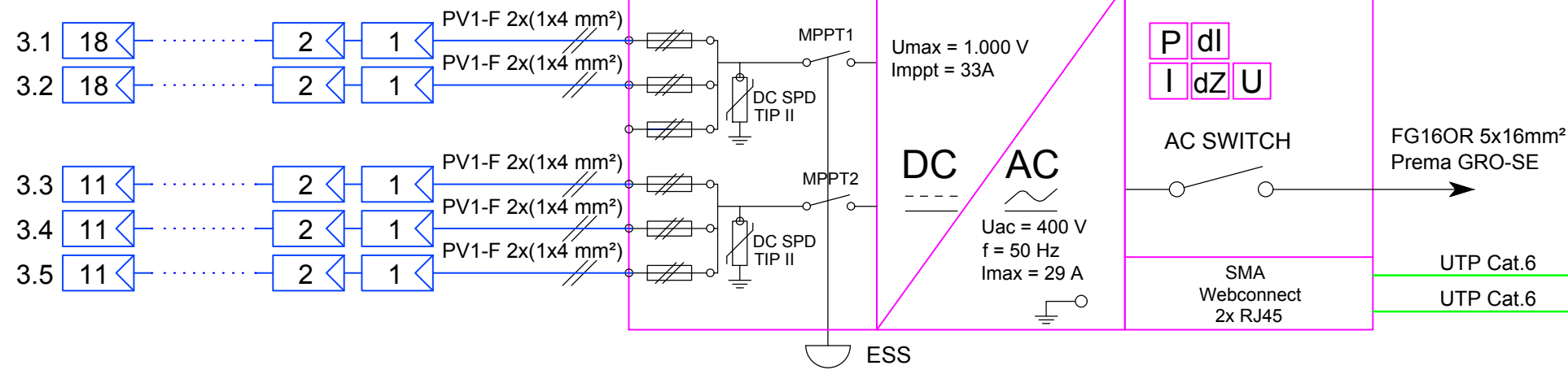
### FN MODULI, 69x SV72-330

### FN PRETVARAČ 2: SMA STP 20000TL-30



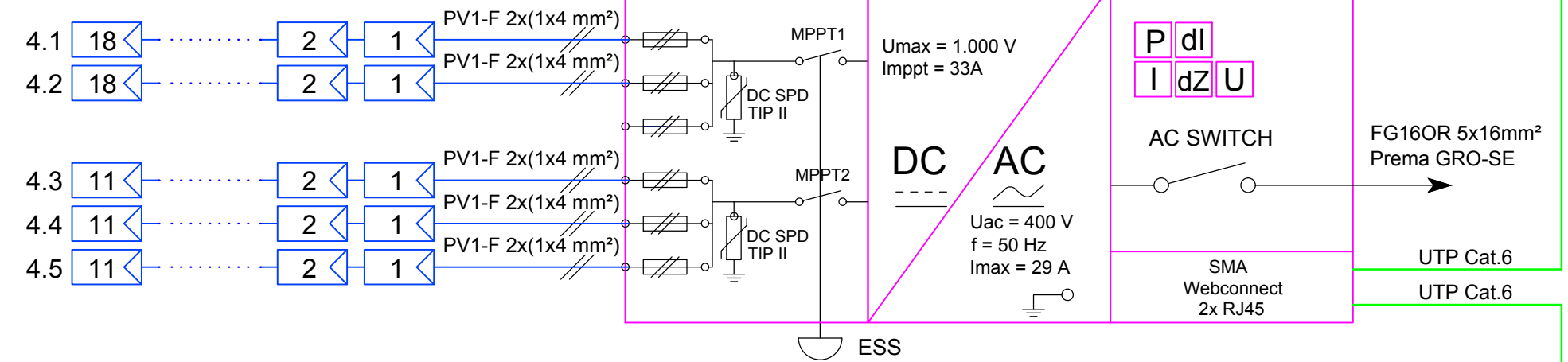
### FN MODULI, 69x SV72-330

### FN PRETVARAČ 3: SMA STP 20000TL-30



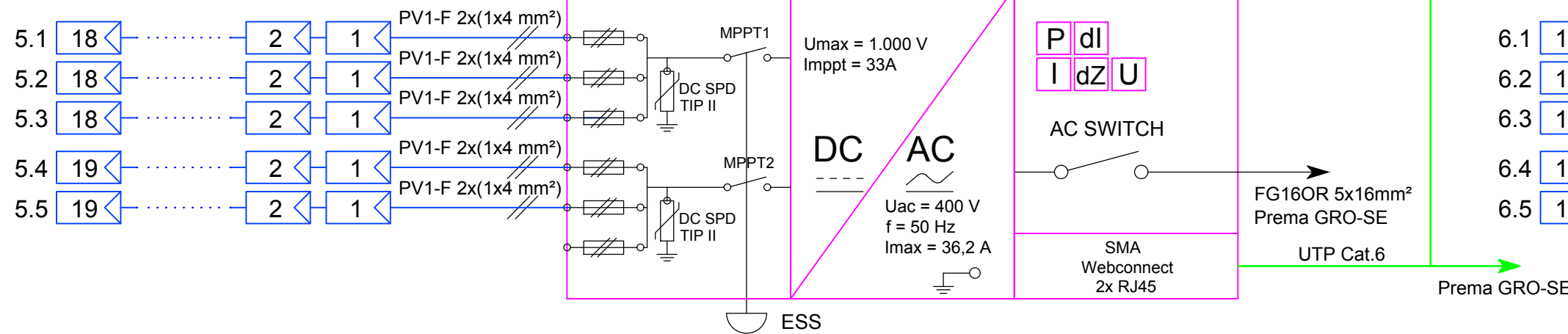
### FN MODULI, 69x SV72-330

### FN PRETVARAČ 4: SMA STP 20000TL-30



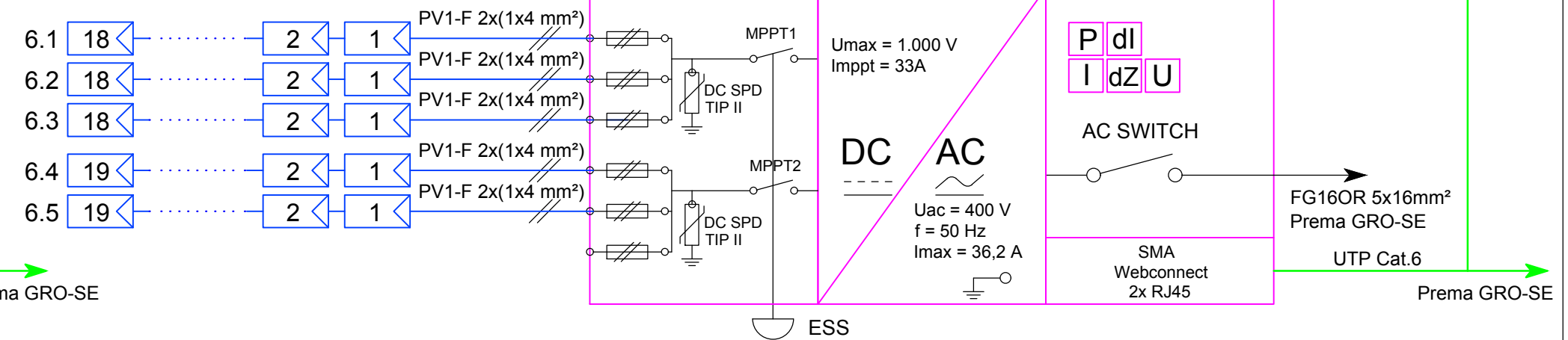
### FN MODULI, 92x SV72-330

### FN PRETVARAČ 5: SMA STP 25000TL-30



### FN MODULI, 92x SV72-330

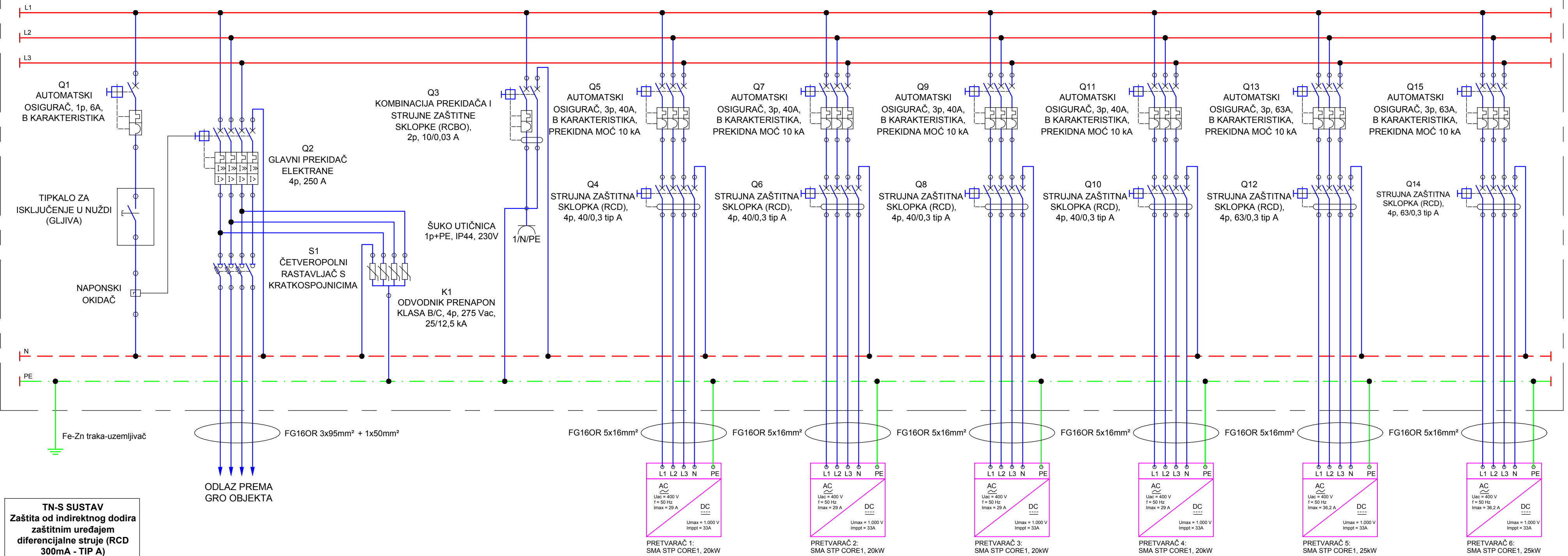
### FN PRETVARAČ 5: SMA STP 25000TL-30



Projektant: Ivan Joha, bacc.ing.el.		Naziv projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>		ZOP:
				Oznaka mape:
				Broj projekta:
Projektant suradnik:	Vrsta projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>	Sadržaj nacrt:		Nacrt br.: 10.3.
	Razina projekta: <b>GLAVNI PROJEKT</b>	<b>JEDNOPOLNA SHEMA ISTOSMJERNOG RAZVODA ELEKTRANE</b>		List: 1
Izmjene:	Revizija projekta:			Listova: 1
Veza:				Mjerilo: -
Oznaka:				Datum: 05/22
Datum:				

GRO-SE UNUTAR ENERGETSKOG KONTEJNERA

GLAVNE SABIRNICE GRO-SE



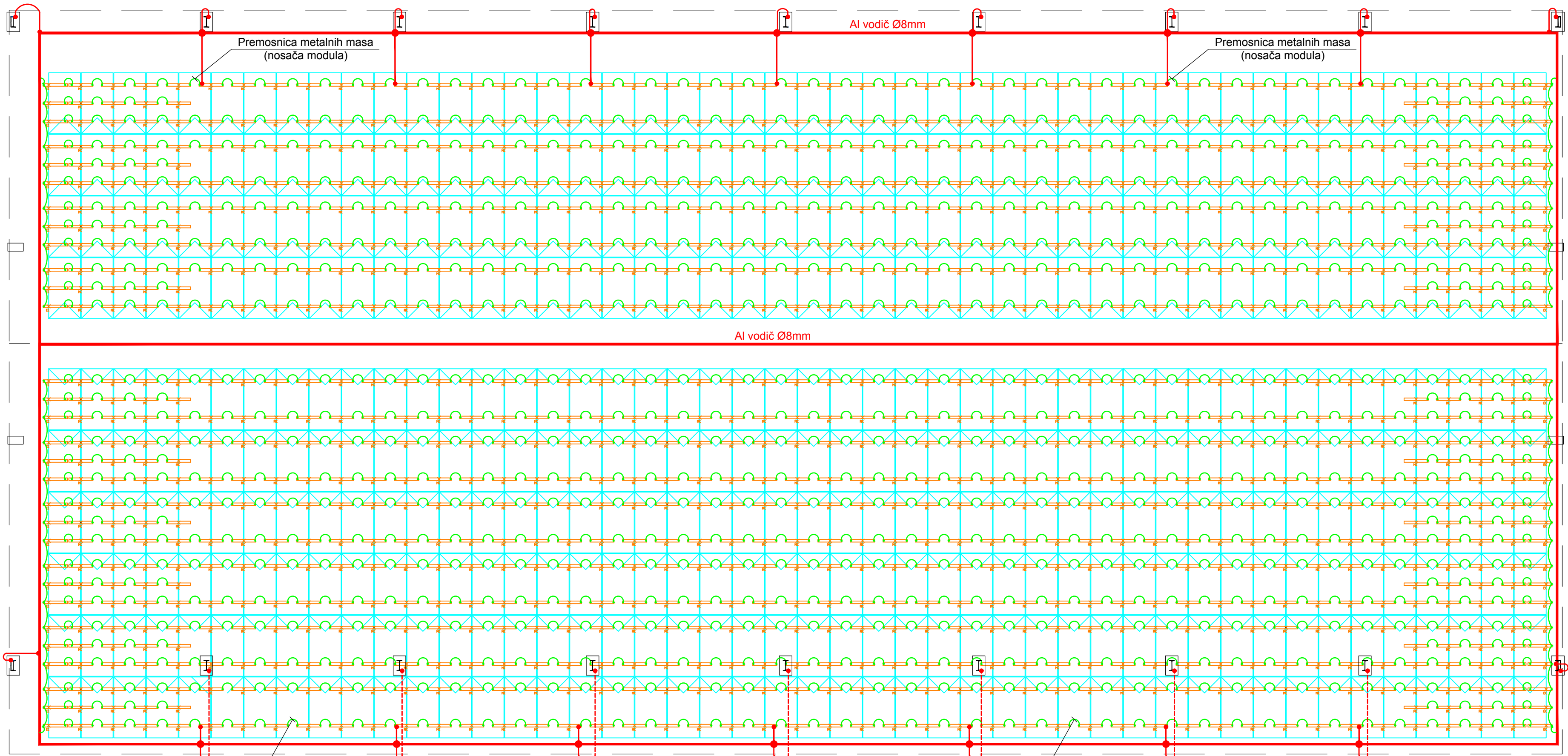
**TN-S SUSTAV**  
 Zaštita od indirektnog dodira  
 zaštitnim uređajem  
 diferencijalne struje (RCD  
 300mA - TIP A)

**OPREZ!!**  
 U razdjelniku je moguć  
 dvosmjerni tok  
 energije (iz mreže i iz  
 pretvarača)

NAPOMENA:  
 PROJEKTIRANI SU AC/DC  
 PRETVARAČI KOJI SPREČAVAJU  
 PROLAZ DC KOMPONENTE  
 STRUJE, STOGA JE PROJEKTIRAN  
 RCD UREĐAJ TIP "A".

Projektant: Ivan Joha, bacc.ing.el.		Naziv projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>		ZOP:
Projektant suradnik:		Sadržaj nacrt:		Oznaka mape:
Vrsta projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>		<b>JEDNOPOLNA SHEMA IZMJENIČNOG RAZVODA ELEKTRANE</b>		Broj projekta:
Razina projekta: <b>GLAVNI PROJEKT</b>		Nacrt br.: 10.4.		List: 1
Revizija projekta:		Mjerilo: -		Listova: 1
Veza:	Datum:	Datum: 05/22		





Prenosnica metalnih masa  
(nosača modula)

Prenosnica metalnih masa  
(nosača modula)

Projektant: Ivan Joha, bacc.ing.el.		Naziv projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>		ZOP:
Projektant suradnik:		Vrsta projekta: <b>ELEKTROTEHNIČKI PROJEKT</b>		Oznaka mape:
Izmjene:		Razina projekta: <b>GLAVNI PROJEKT</b>		Broj projekta:
Veza:	Oznaka:	Revizija projekta:		Nacr. br.: 10.5.
Datum:		Sadržaj nacrta: <b>SUSTAV ZAŠTITE OD DJELOVANJA MUNJE (LPS) - KROVNE PLOHE</b>		List: 1
				Listova: 1
				Mjerilo: 1:100
				Datum: 05/22