

Projektiranje fotonaponske elektrane s proračunom i analiza utjecajnih parametara

Jurić, Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:658877>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

**PROJEKTIRANJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE S
PRORAČUNOM I ANALIZA UTJECAJNIH
PARAMETARA**

Diplomski rad

Krešimir Jurić

Osijek, 2024.

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

Ime i prezime pristupnika:	Krešimir Jurić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1453, 07.10.2022.
JMBAG:	0165084013
Mentor:	prof. dr. sc. Marinko Stojkov
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	Tomislav Alinjak
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Damir Šljivac
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Marinko Stojkov
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Projektiranje fotonaponske elektrane s proračunom i analiza utjecajnih parametara
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Opis načina rada fotonaponske elektrane s naglaskom na opremu; uz pomoć programskog paketa PV SOL izraditi 3D model fotonaponske elektrane i potencijal za proizvodnju električne energije; u excelu napraviti proračune svih DC i AC komponenti i utjecajne parametre na izbor komponenti (snaga, jakost struje DC i AC, gubici, udaljenost); izraditi analizu profitabilnosti s povratom ulaganja i razdobljem povrata investicije. Tema rezervirana za Krešimira Jurića.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	28.08.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	20.09.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	24.09.2024.

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

Osijek, 24.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Krešimir Jurić

Studij:

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika

Mat. br. Pristupnika, godina upisa:

D-1453, 07.10.2022.

Turnitin podudaranje [%]:

14

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Projektiranje fotonaponske elektrane s proračunom i analiza utjecajnih parametara**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Marinko Stojkov

i sumentora

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

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

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	1
2. PREGLED PODRUČJA TEMA.....	2
3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA	4
3.1. Sunčeva energija	4
3.2. Fotonaponski efekt.....	5
3.3. Fotonaponske ćelije.....	6
3.3.1. PN spoj	8
3.4. Materijali za izradu fotonaponskih ćelija	8
3.5. Strujno-naponska karakteristika FN ćelija	11
3.6. Fotonaponski moduli	13
3.6.1. STC i NOCT.....	15
3.7. Vrste fotonaponskih sustava	16
3.7.1. Mrežni (on grid) sustavi	16
3.7.2. Samostalni (off grid) sustavi.....	18
3.7.3. Hibridni sustavi	18
3.8. Fotonaponski pretvarači.....	19
3.8.1. Odabir pretvarača	23
3.9. Baterije.....	24
3.10. Kabeli	25
3.11. Zaštita fotonaponskog sustava	27
3.12. Utjecajni parametri fotonaponskih sustava.....	28
4. PROJEKTIRANJE I PRORAČUN FOTONAPONSKE ELEKTRANE U PROGRAMSKOM PAKETU PV SOL.....	31
4.1. Programski paket PV SOL premium.....	31
4.2. Izrada projekta.....	32
4.3. Proračun	39
4.4. Ekonomska analiza	42

5. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA	51
SAŽETAK.....	53
ABSTRACT	54
ŽIVOTOPIS.....	55
PRILOZI.....	56

1. UVOD

Sve većom potražnjom za električnom energijom značaj obnovljivih izvora energije raste sve više i više. Sunce je najbrže rastući izvor obnovljive energije u svijetu, taj rast potiče se kontinuiranim tehnološkim napretkom u području solarnih tehnologija, što rezultira efikasnijim i ekonomičnijim načinima proizvodnje solarne energije. Naglim smanjenjem troškova proizvodnje solarnih sustava koja je u kombinaciji s povećanjem potražnje za obnovljivom energijom znači da solarna energija sada raste brže od bilo kojeg drugog izvora energije. Osim toga, sve je veća svijest ljudi o potrebi za očuvanjem okoliša te smanjenjem stakleničkih plinova što također potiče investiranje u solarnu energiju iako i ona ima svojih nedostataka.

Energiju Sunca iskorištavamo pomoću fotonaponskih ćelija koje su napravljene uglavnom od legure Silicija ili drugog poluvodičkog elementa, te ju koristimo za pretvorbu u električnu ili toplinsku energiju (za toplu vodu i/ili grijanje).

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak diplomskog rada je teorijski opisati fotonaponske sustave, te način rada fotonaponske elektrane s naglaskom na opremu te uz pomoć programskog paketa PV SOL izraditi 3D model fotonaponske elektrane i potencijal za proizvodnju električne energije. Napraviti proračune svih DC i AC komponenti i utjecajne parametre na izbor komponenti (snaga, jakost struje DC i AC, gubici, udaljenost) te je potrebno izraditi analizu profitabilnosti s povratom ulaganja i razdobljem povrata investicije.

2. PREGLED PODRUČJA TEMA

Obnovljivi izvori energije postaju sve važniji u globalnoj tranziciji prema održivim i ekološki prihvatljivim energetske sustavima. Fotonaponski sustavi, osobito fotonaponske tehnologije, igraju ključnu ulogu u toj tranziciji, omogućujući proizvodnju električne energije iz sunčeve svjetlosti. Različite literature obrađuju teorijske i tehničke aspekte ovih tehnologija, pružajući znanje inženjerima, studentima i stručnjacima u području energetike kako bi mogli uspješno implementirati i razvijati solarne energetske projekte. Pregled pet ključnih izvora literature u nastavku pokriva široki raspon tema vezanih za fotonaponske sustave i obnovljive izvore energije.

Literatura [1] daje sveobuhvatan pregled obnovljivih izvora energije, s posebnim fokusom na njihovu primjenu u elektroenergetskim sustavima. Autori razrađuju razne vrste obnovljivih izvora, kao što su vjetroelektrane, hidroelektrane i fotonaponski sustavi. Knjiga također detaljno obrađuje izazove u njihovoj integraciji u elektroenergetsku mrežu, uključujući tehničke zahtjeve i specifične prednosti koje ovi izvori donose, poput smanjenja emisije stakleničkih plinova i osiguravanja energetske neovisnosti.

Priručnik [2] fokusira se na fotonaponske sustave, tj. sustave koji koriste solarnu energiju za proizvodnju električne energije putem fotonaponskih ćelija. Autor detaljno objašnjava radne karakteristike, strukturu i komponente fotonaponskih modula, kao i načine na koje se oni mogu implementirati u energetske sustave. Također se bavi ekonomskim aspektima primjene solarne energije, kao što su investicijski troškovi i financijska isplativost u odnosu na konvencionalne izvore energije, što je posebno korisno za projektante i inženjere koji planiraju primjenu ovih tehnologija.

Tehnički vodič [3] objavljen od strane ABB-a služi kao referentni materijal za projektiranje i instalaciju fotonaponskih postrojenja. U njemu su obrađene smjernice za odabir opreme, zaštitu sustava od prenapona, kao i tehnički aspekti poput dimenzioniranja modula i optimizacije proizvodnje energije. Dokument je vrijedan resurs za stručnjake koji se bave implementacijom fotonaponskih sustava u industrijskim i komercijalnim projektima, a pruža i uvid u sigurno i pouzdano korištenje fotonaponskih sustava u različitim uvjetima rada.

Knjiga [4] pruža dublji uvid u inženjerske aspekte solarne energije, uključujući teoriju i tehnologiju solarnih sustava. Autor S. A. Kalogirou naglašava važne tehničke principe, od prikupljanja sunčeve energije do njene konverzije u električnu energiju kroz fotonaponske i toplinske sustave. Ova literatura obuhvaća i metode za analizu performansi solarnih sustava te

optimizaciju njihove učinkovitosti, što je važno za postizanje maksimalne iskoristivosti solarnih energetske resursa.

Literatura [5] pruža detaljan pregled fizikalnih i inženjerskih aspekata fotonaponske konverzije te uključuje raspravu o novim tehnologijama i materijalima koji poboljšavaju učinkovitost fotonaponskih sustava. Osim toga, u ovoj knjizi se obrađuje i pitanje skladištenja energije putem baterijskih sustava. Autori opisuju različite tipove baterija koje se koriste za pohranu energije proizvedene u fotonaponskim sustavima, čime se omogućava njihovo korištenje i kada sunčeva svjetlost nije dostupna. Ovo je ključno za stabilnost i pouzdanost fotonaponskih sustava, osobito u kućnim i komercijalnim primjenama, gdje je skladištenje energije od velike važnosti.

Zaključno, pregledana literatura pokriva širok raspon tema vezanih uz obnovljive izvore energije, s posebnim naglaskom na fotonaponske sustave. Od teorijskih osnova do praktičnih smjernica za instalaciju i optimizaciju sustava, svaki od ovih izvora nudi važne informacije za stručnjake i studente u ovom području.

3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

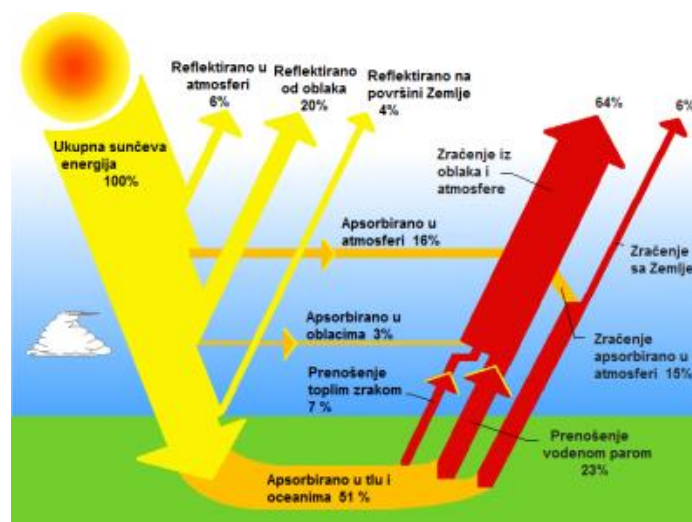
3.1. Sunčeva energija

Sunce je zvijezda u kojoj se događaju nuklearni procesi fisije te je izvor elektromagnetskih zračenja. U kombinaciji dva atoma vodika stvara se atom helija, te se pritom oslobađa velika količina energije. Sunčeva energija također uvelike pomaže životu na Zemlji. Energija putuje u svemir u obliku svjetlosti i topline, ali samo mali dio dolazi do Zemlje. Pri idealnim uvjetima na Zemljinoj površini može se dobiti 1 kW/m^2 , ovisno o lokaciji, dobu dana, godišnjem dobu ili vremenskim uvjetima.

Osim direktnog iskorištavanja, energiju Sunca možemo koristiti kroz aktivne i pasivne sustave. Pasivni način podrazumijeva korištenje Sunčeve energije za potrebe grijanja prostora. Aktivni sustavi spadaju pod potrošnju Sunčeve energije za potrošnju tople vode, hlađenje, proizvodnju pare, te proizvodnju električne energije.

Ako uzmemo u obzir da se oko 30% energije Sunčeva zračenja ponovno reflektira prema Svemiru, Zemlja od Sunca godišnje dobiva u prosjeku $1,07 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ energije. Time dolazimo do zaključka kako je to nekoliko tisuća puta više nego ukupna godišnja potrošnja energije.

Dio Sunčevih zraka se djelomično reflektiraju, dok se dio apsorbira na Zemlji. Energetska bilanca Zemlje nalazi se na slici 2.1.



Slika 2.1. Energetska bilanca, [2]

Energiju Sunca možemo aktivno iskoristavati putem fotonaponskog sustava, time ju pretvaramo u električnu energiju. Ovu energiju možemo koristiti za razne svrhe kao što su rasvjeta, ventilacija, grijanje i dr. Energija se također može sakupljati i pohranjivati u baterijama. U mnogim situacijama potrebno je osigurati električnu energiju na mjestima gdje nema izgrađene električne mreže.



Slika 2.2. Različite pretvorbe i oblici energije sunčeva zračenja, [2]

3.2. Fotonaponski efekt

Fotonaponski efekt je pojava oslobađanja elektrona iz površine nekog materijala kada je izložena svjetlosti. Ovu pojavu prvi je opisao Edmond Becquerel sredinom 19. stoljeća, dok je Albert Einstein dao teorijsko objašnjenje početkom 20. stoljeća. A. Einstein je došao do zaključka da se sunčeva svjetlost sastoji od fotona (kvanti elektromagnetskog zračenja) koje u sebi sadrže različitu količinu energije, te odgovaraju različitim valnim duljinama solarnog spektra što opisuje formula:

$$E_f = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c_0}{\lambda} \quad (3-1)$$

Gdje je :

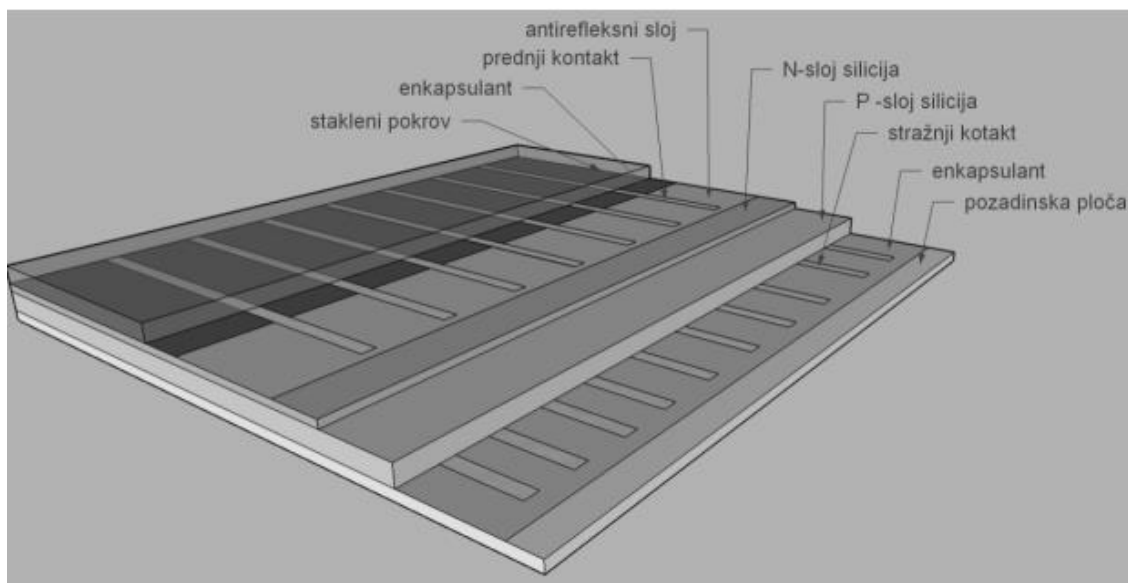
- h - Planckova konstanta ($6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)
- ν - frekvencija fotona
- c_0 - brzina svjetlosti
- λ – valna duljina

Kada roj fotona pogodi fotonaponsku ćeliju, samo fotoni koji su apsorbirani daju energiju za oslobođenje elektrona te proizvodnju električne struje, [4].

3.3. Fotonaponske ćelije

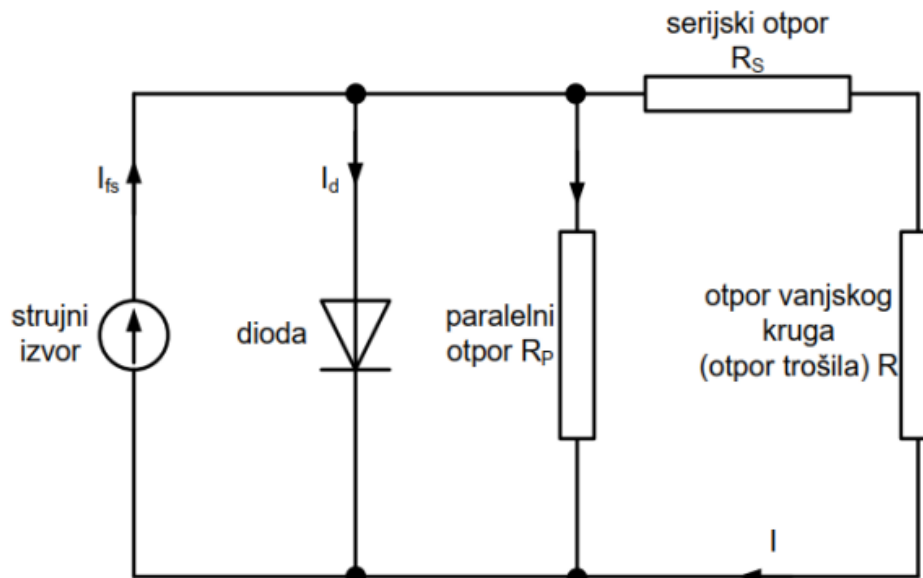
Fotonaponska ćelija se definira kao poluvodički element. Omogućuje izravnu pretvorbu svjetlosti sunčevog zračenja u električnu energiju, te se zasniva na pojavi fotonaponskog efekta. Kada svjetlost u obliku fotona udari u solarnu ćeliju poluvodički materijal u ćeliji ih apsorbira. Negativno nabijene čestice (elektroni) se izbijaju iz atoma i postaju slobodne. Zbog specifične građe solarnih ćelija mogu se gibati samo u jednom smjeru, te tako stvaraju istosmjernu struju. Struja koja se generira u solarnim ćelijama se obično kombinira u module i povezuje se na električni sustav zgrade ili distributivne mreže. Ovakvo generirana električna energija može se koristiti za napajanje uređaja ili se može skladištiti u baterijama za kasniju upotrebu.

Presjek jedne silicijske solarne ćelije možemo vidjeti na slici 2.6. Prvi sloj čini stakleni pokrov koji štiti ćeliju od vanjskih utjecaja. Ispod njega je enkapsulant - prozirni ljepljivi materijal koji štiti ćelije od vlage i drugih vanjskih utjecaja, te prašine. Zatim slijedi prednji kontakt koji omogućuje povezivanje s električnim kabelima, dalje je antirefleksirajući sloj koji ima zadatak smanjiti refleksiju. P i N sloj silicija omogućuju generiranje električne struje kada sunčeva svjetlost pogodi ćeliju, te ispod još imamo stražnji kontakt, zatim opet enkapsulant te ispod svega se nalazi pozadinska ploča koja podržava i štiti ćelije od pozadinskog strujanja, vremenskih uvjeta i drugih vanjskih faktora.



Slika 2.3. Silicijska fotonaponska ćelija, [1]

Kako bismo opisali električna svojstva fotonaponske ćelije potrebna nam je nadomjesna shema (slika 2.7). Iz nje možemo zaključiti da je izlazna struja I jednaka struji koju proizvede sunčeva svjetlost I_{fs} umanjena za struju paralelnog otpora I_p i struju diode I_d .



Slika 2.4. Nadomjesna shema fotonaponske ćelije, [1]

$$I = I_{fs} - I_d - I_p \quad (3-2)$$

Struju diode računamo kao:

$$I_d = I_z \left[e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] \quad (3-3)$$

Gdje je:

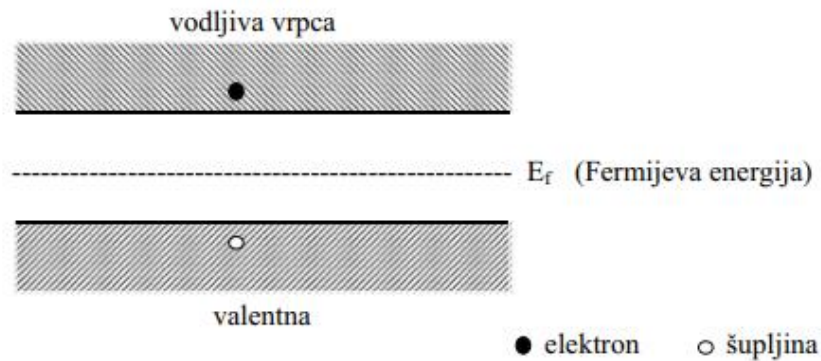
- I_z – struja zasićenja
- e – elementarni naboj, $e = 1,602176462 \cdot 10^{-19}$ As
- U – napon
- R_s - serijski otpor
- I – izlazna struja
- m – parametar fotonaponske ćelije
- k – Boltzmanova konstanta, $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ J/K
- T – apsolutna temperatura

Dioda (PN spoj) u fotonaponskoj ćeliji omogućava prolazak struje samo u jednom smjeru. Kada FN ćelije generiraju električnu energiju, struja teče kroz diodu (PN spoj) i sprječava povrat struje, time se osigurava da se električna energija usmjeri u željenom pravcu.

Dioda također štiti fotonaponske ćelije od oštećenja uslijed prekomjerne struje ili promjena napona koje mogu nastati kao posljedica promjenljivih uvjeta osvjetljenja ili temperature, [4].

3.3.1. PN spoj

Fotonaponska ćelija je zapravo PN-spoj. PN-spoj se formira kada se u jednom dijelu kristala čistog poluvodiča dodaju akceptorske primjese koje su trovalentne, čime nastaje p-tip poluvodiča, dok se u drugom dijelu dodaju donorske primjese koje su peterovalentne, stvarajući n-tip poluvodiča. Između ova dva područja (P i N područja) nalazi se Fermijeva energijska razina, koja proizlazi iz gradijenta koncentracije, [2].



Slika 2.5. Energetski dijagram za čisti poluvodič, [2]

PN-spoj sadrži električno polje koje omogućava kretanje elektrona samo iz p-sloja u n-sloj. Kada svjetlost udari na ćeliju, elektroni se oslobađaju iz oba sloja koristeći princip fotonaponskog efekta. Zbog suprotnih naboja, elektroni teže napuštati n-sloj i premještati se u p-sloj, no postojeće električno polje to sprječava. Spajanje vanjskog kruga omogućava elektronima prolaz prema p-sloju, čime se stvara istosmjerna struja u krugu. Istovremeno, na ćeliji se pojavljuje napon zbog prisutnosti električnog polja.

3.4. Materijali za izradu fotonaponskih ćelija

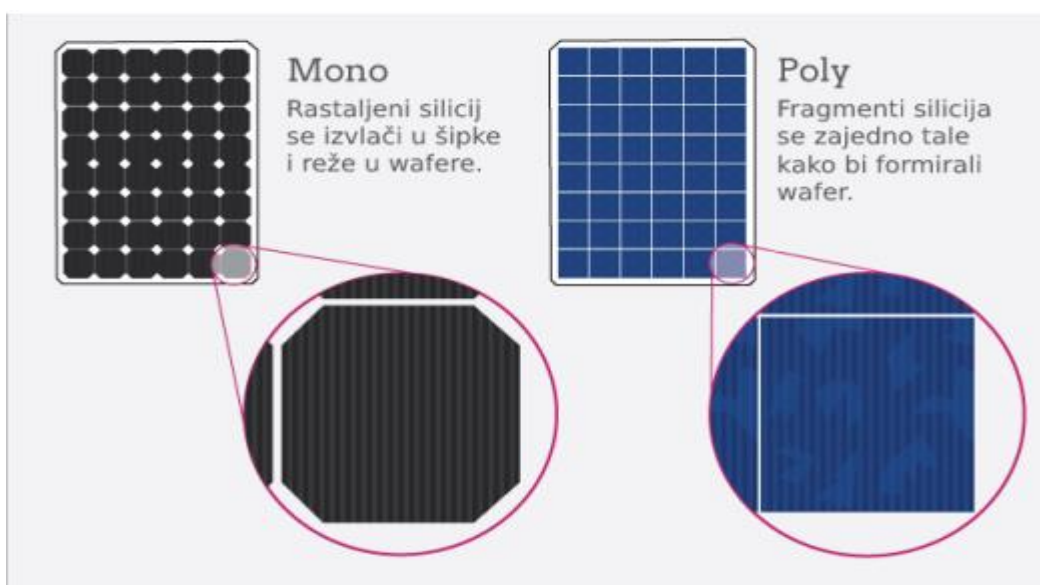
Ključni elementi u pretvorbi sunčeve energije u električnu pri izradi fotonaponskih ćelija su kristali. Kristali su čvrste tvari sastavljena od atoma, molekula ili iona imaju pravilan trodimenzionalan raspored koji tvori kristalnu rešetku. Promjenom strukture kristalne rešetke uslijed raznih vanjskih utjecaja mijenjaju se i toplinska, magnetska, mehanička te električna svojstva kristala, [2].

Najčešće materijali koje koristimo za izradu fotonaponskih ćelija su:

1. Monokristalni Silicij
2. Polikristalni silicij
3. Tanki filmovi
 - Amorfni Silicij
 - CI(G)S – Copper Indium (Gallium) Selenide
 - CdTe Cadmium Telluride
4. Višeslojne ćelije (ćelije od galij-arsenida)
5. Novi koncepti
 - Quantum dots, dye-sensitized (12% Sharp), organske ćelije, termoelektrični uređaji

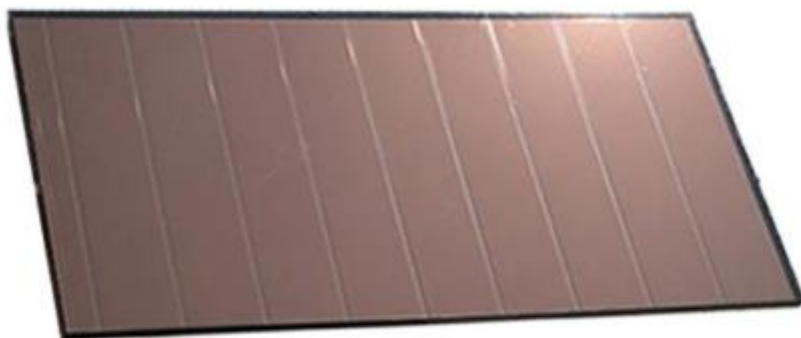
Monokristalni silicij (c-Si) kristali su jedan od najčešće korištenih materijala u fotonaponskoj tehnologiji. Za njihovu proizvodnju potreban je čisti poluvodički materijal, te omogućuje visoki stupanj iskoristivosti. Međutim, proizvodnja monokristalnih silicijskih modula je bila dosta skupa zbog zahtjeva za visokom čistoćom materijala i složenih procesa proizvodnje, ali znatnim napredovanjem tehnologije proizvodna cijena se dosta snižava.

Polikristalni silicij (pc-Si) kristali su također popularni u izradi fotonaponskih ćelija. Ovi kristali se proizvode iz više manjih kristala silicija, što rezultira nižim troškovima proizvodnje u odnosu na monokristale. Iako su obično manje efikasni od monokristala, polikristali su i dalje vrlo učinkoviti i široko korišteni.



Slika 2.6. Monokristalni i Polikristalni fotonaponski moduli, [10]

Amorfni silicij (a-Si) za razliku od kristaliničkih materijala nema kristalnu strukturu, već se raspoređuje u neuređenom, amorfnom stanju. Ima prihvatljivu cijenu, ali niži stupanj djelovanja koji je u porastu napredovanjem tehnologija.



Slika 2.7. Amorfni solarni modul, [15]

CI(G)S je tankoslojni poluvodički materijal koji se sastoji od sloja bakra, indija, galija i selena. Imaju stupanj djelovanja od 12-14%, te je jedna od glavnih prednosti CIGS tehnologije visoka fleksibilnost i lakoća proizvodnje tankih, fleksibilnih fotonaponskih modula. Imaju dug vijek trajanja i veliku stabilnost.



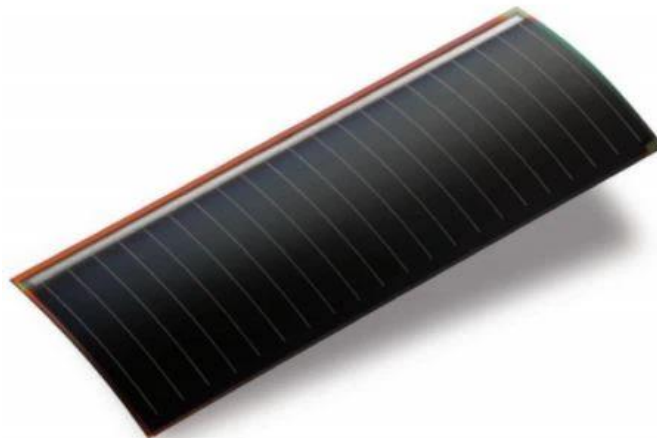
Slika 2.8. CI(G)S –Copper Indium (Gallium) Selenide solarna ćelija, [16]

Telurid kadmija (CdTe) je također tankoslojni poluvodički materijal koji je pogodan za upotrebu u tankim fotonaponskim modulima zbog svojih fizikalnih svojstava i jeftine tehnologije izrade.



Slika 2.9. CdTe solarni moduli, [6]

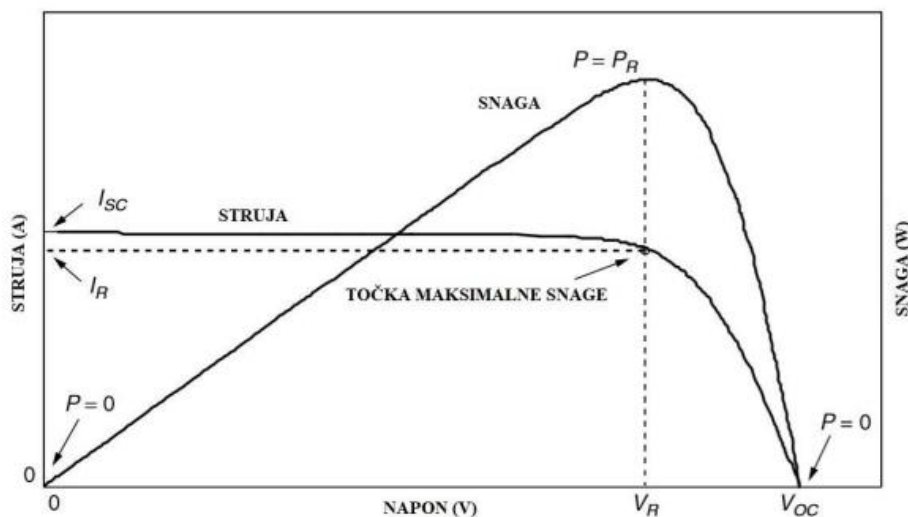
Galij arsenid (GaAs) je višeslojni poluvodič koji je napravljen od spoja galija i arsena. Ima vrlo veliku učinkovitost (25-40%), jaku plastičnost, te dobru otpornost na temperaturu. Međutim cijena mu je visoka, te je dosta krhki od silicija i lakše dolazi do loma pri obradi.



Slika 2.10. GaAs solarna ćelija, [7]

3.5. Strujno-naponska karakteristika FN ćelija

Karakteristike fotonaponske ćelije se mogu opisati pomoću strujno naponskih karakteristika. Strujno-naponske karakteristike prikazuju odnos između struje koja prolazi kroz ćeliju i napona na ćeliji.

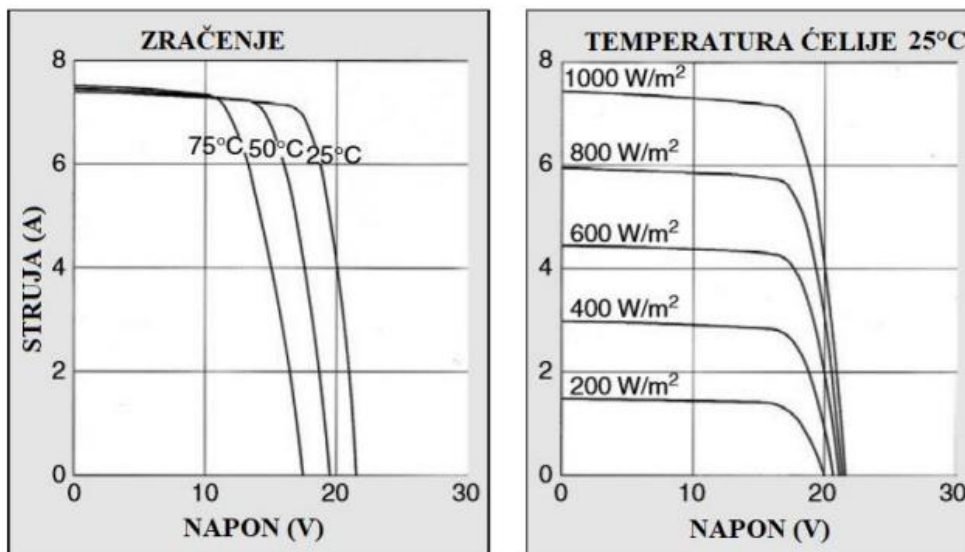


2.11. I-U karakteristika, P-U karakteristika, [2]

Osnovne točke karakteristike uključuju :

- $I_{SC(KS)}$ – struja kratkog spoja;
- $V_{OC(PH)}$ – napon praznog hoda;
- $P = P_R = P_{MPP}$ – maksimalna snaga koju ćelija može proizvesti;
- $V_R = V_{MPP}, I_R = I_{MPP}$ – vrijednosti struje i napona pri kojoj se postiže maksimalna snaga.

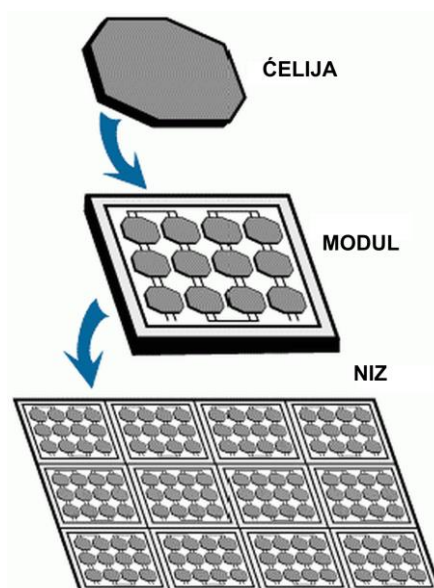
Strujno-naponska karakteristika također ovisi o raznim vanjskim faktorima kao što su temperatura i sunčevo zračenje. Na slici 2.12 možemo vidjeti primjer jednog silicijskog modula te njegovu ovisnost o temperaturi i sunčevom zračenju. Iz nje zaključujemo da smanjenjem temperature ćelije napon praznog hoda raste, dok se struja kratkog spoja povećava. Što se tiče sunčevog zračenja možemo vidjeti da se smanjenjem osvjetljenja na modul struja kratkog spoja smanjuje.



2.12. Ovisnost temperature ćelije i sunčevog zračenja o naponu modula, [2]

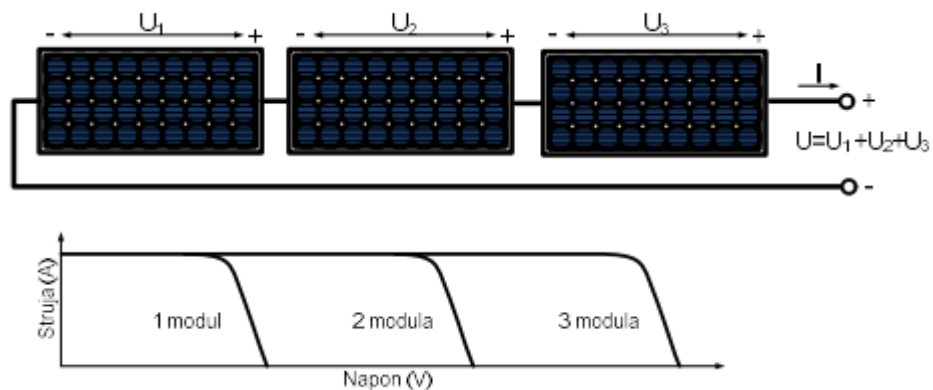
3.6. Fotonaponski moduli

Fotonaponski moduli se sastoje od niza fotonaponskih ćelija izlaznog napona 0,6-0,7 V što je relativno malo, te zbog toga više ćelija spajamo kako bih dobili veći izlazni napon (oko 30 V). Module dalje spajamo serijski ili paralelno što čini niz, te konačno više nizova čini fotonaponsku elektranu (postrojenje).



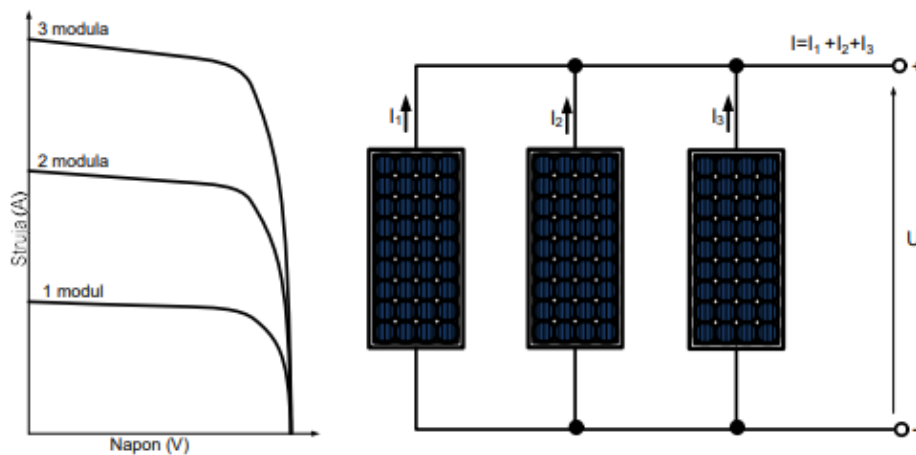
2.13. Ćelija, modul, niz, [8]

Ukoliko se želi postići veća vrijednost izlaznog napona tada se svi moduli spajaju u seriju, te je ukupni napon jednak zbroju svih napona modula spojenih u serijski spoj (slika 2.14).



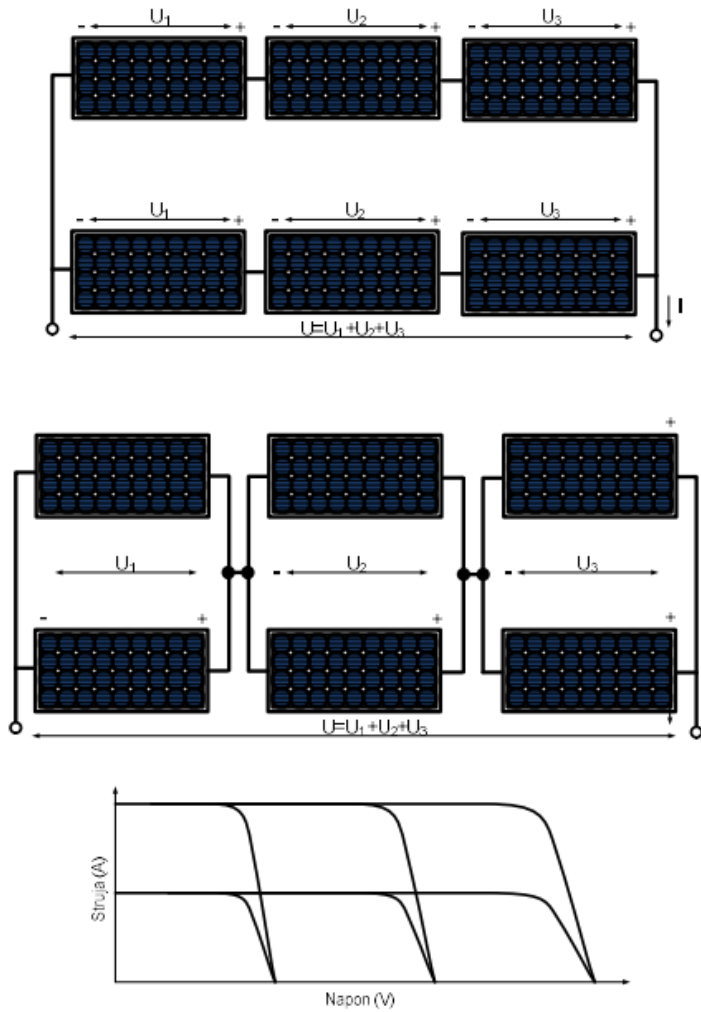
2.14. Serijski spoj modula, [1]

Ako se želi postići veća vrijednost izlazne struje tada se svi moduli spajaju u paralelu, te je ukupna struja jednaka zbroju svih struja modula u paralelnom spoju (slika 2.15).



2.15. Paralelni spoj modula, [1]

Kako bismo ostvarili željenu količinu energije pri dizajniranju fotonaponskog postrojenja potrebno je odrediti koliko će modula biti u serijskom spoju, a koliko u paralelnom spoju. Zbog toga se moduli spajaju kombinirano (slika 2.16.)



2.16. Kombinirano spojeni fotonaponski moduli, [1]

3.6.1. STC i NOCT

Vrlo bitni podatci koje su proizvođači dužni naznačiti kod fotonaponskih modula su karakteristike pri standardnim testnim uvjetima (STC uvjeti) i pri nominalnoj radnoj temperaturi ćelije (NOCT).

Standardni testni uvjeti (STC) su oni pod kojima se vrši testiranje i mjerenje karakteristika fotonaponskih modula te omogućuju uspoređivanje karakteristika različitih fotonaponskih modula.

Glavni STC parametri uključuju:

1. Intenzitet sunčeve svjetlosti: 1 kW/m^2 ;
2. Temperatura ćelija: 25°C ;
3. Debljina atmosferskog sloja: 1,5.

Pod ovim uvjetima, proizvođači testiraju i deklariraju maksimalnu snagu, napon vršne snage, struju vršne snage, napon otvorenih stezaljki, struju kratkog spoja i ostale karakteristike svojih fotonaponskih modula. Međutim, važno je imati na umu da stvarni uvjeti mogu varirati i da će performanse modula u stvarnom okruženju možda biti drugačije od onih izmjerenih pod STC uvjetima.

Nominalna radna temperatura ćelije ili skraćeno NOCT je standardizirani parametar kojeg koristimo za opisivanje temperature koju ćelije fotonaponskog modula dostižu u nominalnim radnim uvjetima. Ovaj parametar je važan jer temperatura ćelija može značajno utjecati na karakteristike fotonaponskog sustava.

NOCT se podrazumijeva pri sljedećim uvjetima:

1. Intenzitet sunčeve svjetlosti: $0,8 \text{ kW/m}^2$;
2. Brzina vjetra: 1 m/s ;
3. Temperatura okoline: $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Temperaturu ćelije prema drugim vanjskim uvjetima možemo odrediti prema sljedećem izrazu:

$$T_{\text{ćelije}} = T_{\text{okoline}} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ\text{C}}{0,8} \right) \cdot G \quad (3-4)$$

Gdje je:

- $T_{\text{ćelije}}$ – temperatura ćelije [$^\circ\text{C}$];
- T_{okoline} – temperatura okoline [$^\circ\text{C}$];
- G – sunčevo zračenje [kW/m^2].

3.7. Vrste fotonaponskih sustava

3.7.1. Mrežni (on grid) sustavi

Mrežni (on grid) fotonaponski sustavi isporučuju istosmjernu električnu struju izmjenjivaču, koji je pretvara u izmjeničnu struju koja se dalje isporučuje u elektroenergetsku mrežu. Ako proizvodnja električne energije iz fotonaponskog sustava ne pokriva trenutnu potrošnju, potrošači se automatski opskrbljuju električnom energijom iz mreže, osiguravajući kontinuirano zadovoljenje potreba za električnom energijom. Kada je proizvodnja fotonaponskog sustava veća od trenutne potrošnje, višak energije se prosljeđuje u elektroenergetsku mrežu. Ovaj sustav je

relativno siguran jer ne zahtijeva korištenje baterija u slučaju kvara, iako se ponekad mogu koristiti kao dodatna podrška u sustavu.

Vrste mrežnih sustava:

1. Mrežni sustavi priključeni izravno na javnu mrežu,

Mrežni fotonaponski sustavi koji su direktno spojeni na javnu mrežu povezuju se tako da se nakon izmjenjivača i mjernog brojila fotonaponski sustav direktno povezuje na javnu mrežu.

2. Mrežni sustavi priključeni na javnu mrežu preko kućnih instalacija

Fotonaponski sustavi koji su spojeni na javnu mrežu putem kućne instalacije se smatraju dijelom distribuirane proizvodnje električne energije. To omogućuje integraciju distribuiranih sustava na niskonaponsku razinu EES-a.

3. Mrežno spojene fotonaponske elektrane

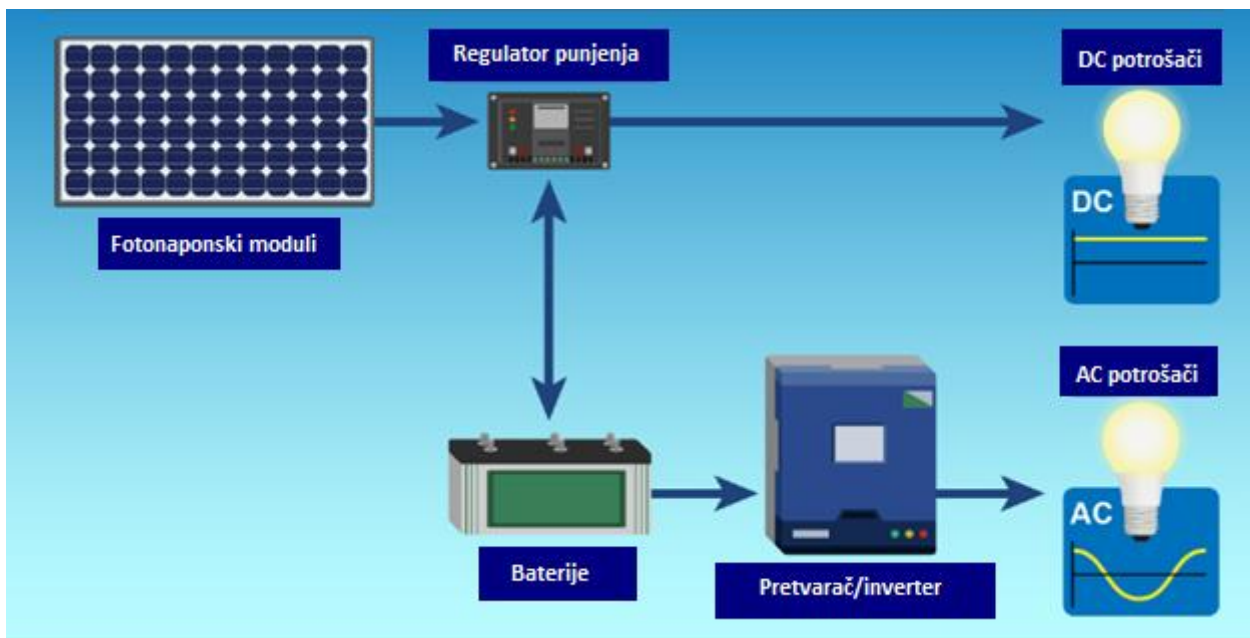
Mrežno spojene sunčeve elektrane proizvode značajne količine električne energije putem fotonaponskih instalacija koje su koncentrirane na jednom mjestu. Ove instalacije često se nalaze na velikim neplodnim površinama i farmama, pri čemu njihova snaga varira od nekoliko stotina kW do nekoliko stotina MW.



Slika 2.17. Prikaz mrežnog (on-grid) sustava, [9]

3.7.2. Samostalni (off grid) sustavi

Samostalni (off grid) fotonaponski sustavi su sustavi koji samostalno opskrbljuju potrošače električnom energijom, neovisno o spoju na električnu mrežu. Njihova glavna funkcija je zadovoljiti sve potrebe potrošača za električnom energijom. S obzirom na promjenjivost i ovisnost o faktorima poput sunčevog zračenja, proizvodnja fotonaponskih elektrana ne može uvijek zadovoljiti potrošačke potrebe. Zbog toga samostalne fotonaponske elektrane zahtijevaju upotrebu baterija kako bi se višak proizvedene električne energije mogao pohraniti za kasniju upotrebu kada je proizvodnja manja od potrošnje. Postoje i samostalne fotonaponske elektrane koje ne koriste baterije, već se koriste za napajanje potrošača samo kada je sunčeva energija dostupna, [1].



Slika 2.18. Prikaz samostalnog (off-grid) sustava, [9]

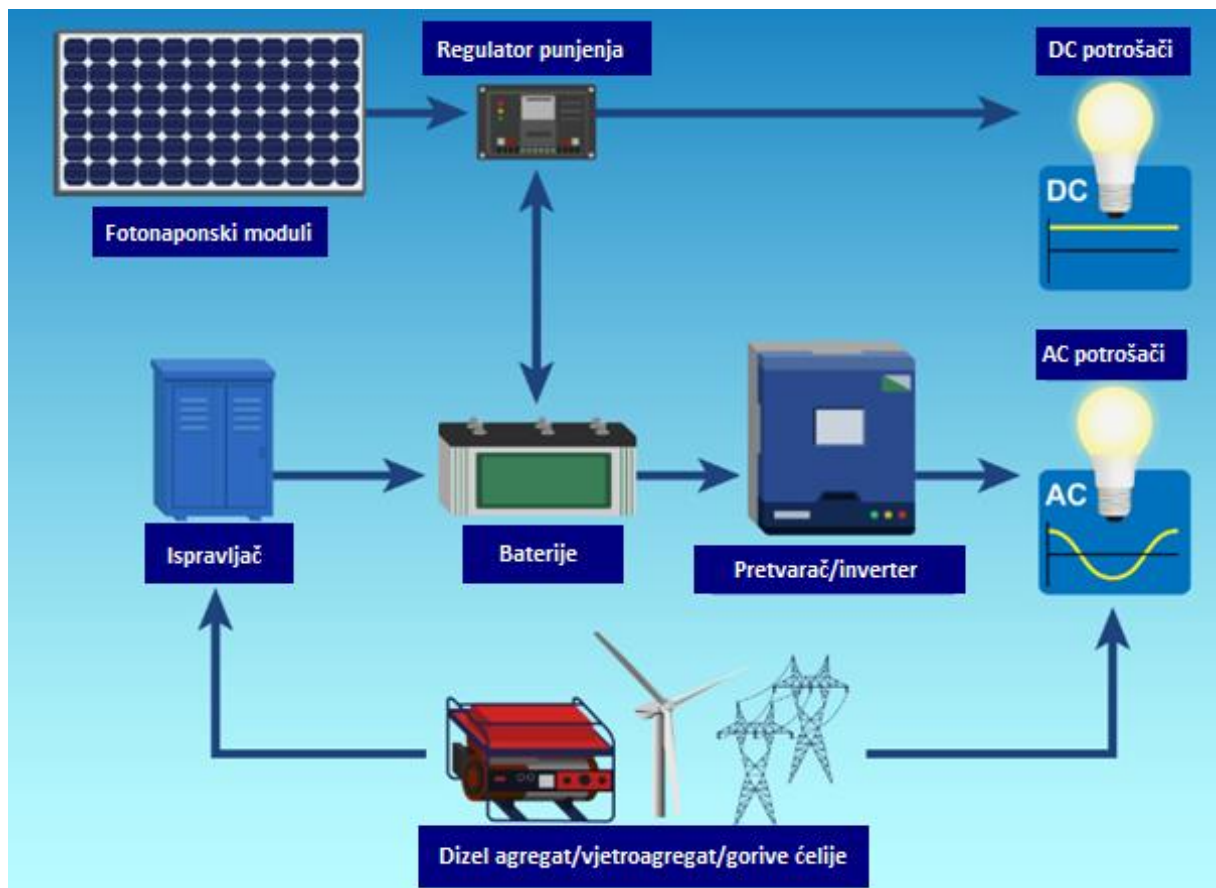
3.7.3. Hibridni sustavi

Hibridne fotonaponske elektrane su sustavi koji, osim fotonaponskih modula, uključuju i dodatne izvore energije kao što su vjetroagregati, dizel agregati ili gorivne ćelije.

U slučaju kombinacije s vjetroagregatom, prednost je što tijekom noći, kada nema sunčevog zračenja, postoji mogućnost da vjetar generira električnu energiju. Višak energije koji vjetroagregat proizvodi može se pohraniti tijekom noći, što nije moguće kod autonomnih fotonaponskih elektrana bez hibridnih sustava.

Kod hibridnih sustava s dizelskim agregatom, važno je održavati opterećenje dizelskog agregata iznad 70% nazivnog opterećenja, jer dizelski agregati pokazuju nižu učinkovitost pri nižim opterećenjima. Stoga se dizelski agregat koristi uglavnom za vršna opterećenja kako bi se postigla veća učinkovitost.

U hibridnim sustavima s gorivnim ćelijama, višak sunčeve energije može se iskoristiti za proizvodnju vodika putem elektrolize. Ovaj vodik može se kasnije koristiti kada nema dovoljno sunčeve energije za opskrbu potrošača, omogućujući gorivnim ćelijama da proizvode električnu energiju, [1].



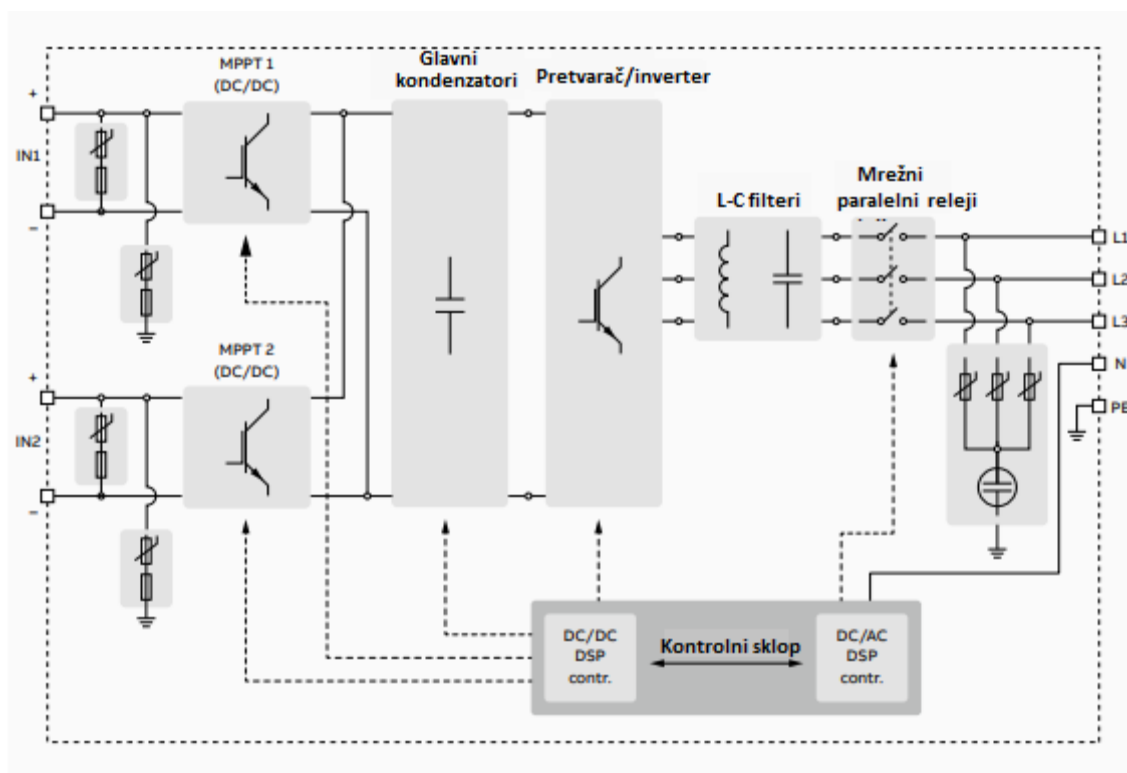
Slika 2.19. Prikaz hibridnog sustava, [9]

3.8. Fotonaponski pretvarači

Pretvarači (izmjenjivači/inverteri) imaju ulogu pretvaranja istosmjernog napona dobivenog iz fotonaponskih modula u izmjenični napon. Pri tome, izlazni napon mora zadovoljiti zahtijevane karakteristike, neovisno o varijacijama ulaznog istosmjernog napona. Ključna funkcija pretvarača je postizanje maksimalne učinkovitosti u pretvorbi istosmjernog u izmjenični napon.

Osnovni dijelovi koji čine pretvarače su:

- MPPT (Tragač maksimalne snage) – predstavlja sklop kojeg koristimo u fotonaponskim pretvaračima namijenjen za povećanje vršne snage prilagođavajući točku rada u bilo kojem trenutku (može biti unutar invertera ili samostalno).
- Glavni kondenzatori – koristimo ih kako bi izgladili varijacije napona na istosmjernoj sabirnici i spriječili povratak valovite struje do istosmjernog izvora napajanja.
- DC/AC pretvarač – pretvara istosmjerni napon iz fotonaponskog modula u izmjenični napon.
- L-C filteri - koriste se za kontrolu kvalitete izlazne snage koju šaljemo u mrežu [3].



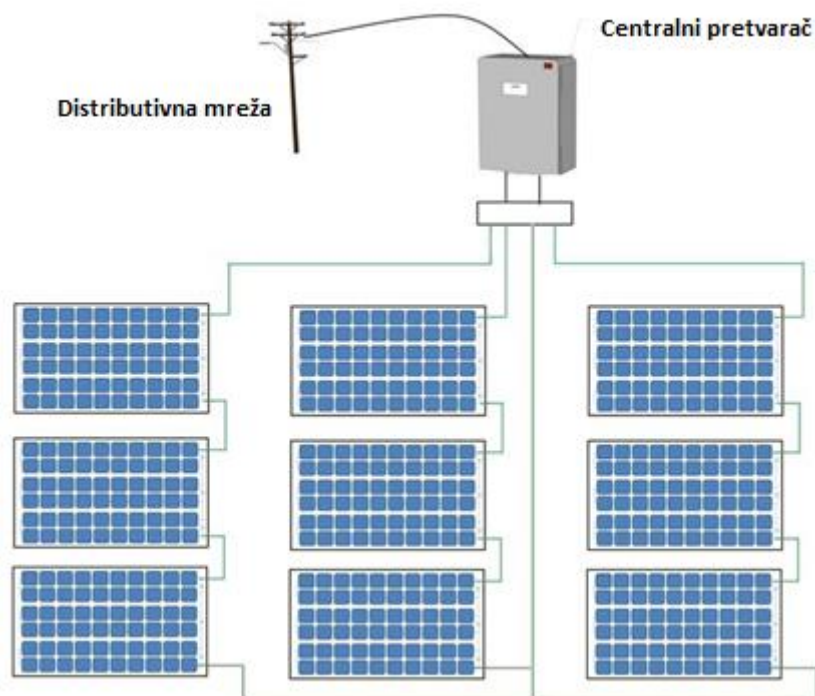
Slika 2.20. Komponente pretvarača, [3]

S obzirom na način spajanja fotonaponskih modula, fotonaponske pretvarače možemo podijeliti na:

- Centralne pretvarače;
- String pretvarače;
- Mikroinvertretere.

Centralni pretvarači

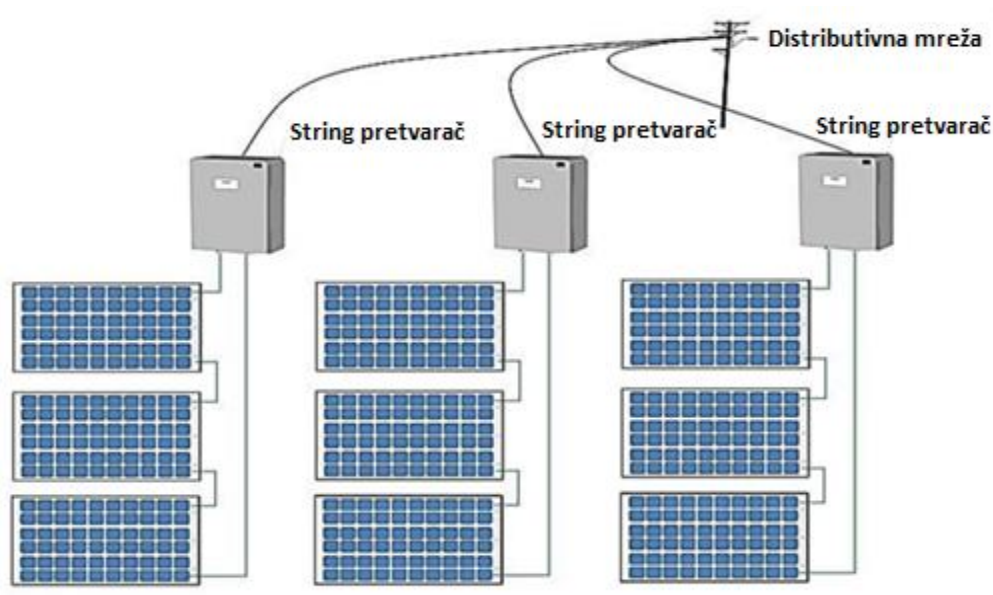
Centralni pretvarači su izvedbe gdje koristimo jedan pretvarač za sve fotonaponske module u sustavu. Centralni pretvarači su idealni za velike instalacije s konzistentnim uvjetima osvjetljenja. U takvim okruženjima, prednosti poput nižih troškova instalacije i visoke efikasnosti mogu se potpuno iskoristiti, pružajući pouzdanu i ekonomičnu solarnu energiju. Ovi sustavi zahtijevaju pažljivo planiranje kako bi se maksimizirala proizvodnja energije i osigurala optimalna učinkovitost, ali mogu biti vrlo isplativi za velike fotonaponske projekte.



Slika 2.21 Prikaz polja sa priključkom na centralni pretvarač, [11]

String pretvarači

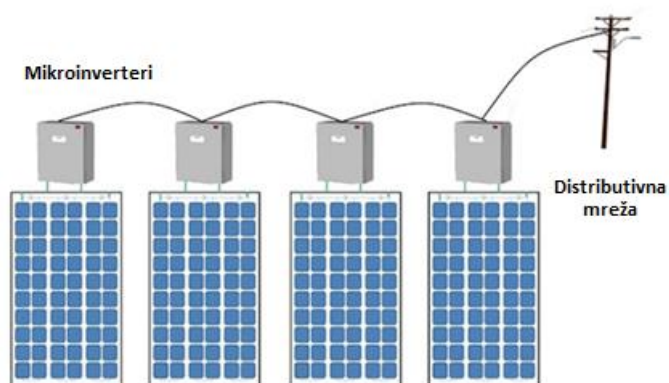
Najčešće korišteni pretvarači s obzirom na način spajanja su string pretvarači. String pretvarači su povezani s nizom (stringom) fotonaponskih modula koji su međusobno povezani serijski. Jedan string pretvarač može biti povezan s jednim ili više nizova fotonaponskih modula, ovisno o njegovom kapacitetu. String pretvarači su poznati po svojoj efikasnosti, ali njihova učinkovitost može biti smanjena ako jedan ili više modula u nizu imaju sjenku ili kvar, što može utjecati na ukupnu proizvodnju energije cijelog niza.



Slika 2.22. Prikaz polja sa priključkom na string pretvarače, [11]

Mikroinverteri

Izvedba pretvarača gdje svaki fotonaponski modul ima svoj mikroinverter. Jedna od najznačajnijih prednosti mikroinvertera je njihova sposobnost da maksimiziraju proizvodnju energije svakog modula pojedinačno. U sustavima sa string pretvaračima, sjena, prljavština ili kvar na jednom modulu mogu značajno smanjiti proizvodnju energije cijelog niza modula. S mikroinverterima, ovaj problem je minimiziran jer svaki modul radi neovisno, a problemi na jednom modulu ne utječu na druge. Ovo je osobito korisno u uvjetima gdje su moduli izloženi različitim razinama osvjetljenja, kao što su krovovi sa složenom geometrijom ili područja s povremenom sjenom. Mikroinverteri pružaju visoku razinu fleksibilnosti, učinkovitosti i pouzdanosti za fotonaponske sustave.



Slika 2.23 Prikaz polja sa priključkom na mikroinvertere, [11]

3.8.1. Odabir pretvarača

Odabir pretvarača se vrši u ovisnosti o svojstvima i zahtjevima fotonaponskog sustava te se odabire na osnovu sljedećih tehničkih podataka:

- maksimalni ulazni napon na istosmjernoj (DC) strani;
- maksimalna ulazna struja na istosmjernoj (DC) strani;
- ulazna nazivna snaga;
- izlazna nazivna snaga;
- nazivna frekvencija;
- faktor snage;
- europska učinkovitost;
- maksimalna učinkovitost;
- područje rada na istosmjernoj (DC) strani;
- nazivni napon na istosmjernoj (DC) strani.

Pri odabiru izmjenjivača moraju biti zadovoljena četiri osnovna uvjeta:

1. Maksimalni napon praznog hoda fotonaponskog niza mora biti manji od maksimalnog ulaznog napona na DC strani izmjenjivača.
2. Minimalni napon vršne snage fotonaponskog niza mora biti veći od minimalnog napona vršne snage izmjenjivača.
3. Maksimalni napon vršne snage fotonaponskog niza mora biti manji od maksimalnog napona vršne snage izmjenjivača.
4. Maksimalna struja fotonaponskog niza mora biti manja od maksimalne dozvoljene ulazne struje na DC strani izmjenjivača, [1].

Odabir izmjenjivača trebao bi biti usklađen s ciljevima i zahtjevima fotonaponskog sustava, pružajući optimalno rješenje koje će osigurati maksimalnu proizvodnju energije, minimalne gubitke i dugoročnu stabilnost. Pružajući temelj za učinkovit rad fotonaponskog sustava, pravi izmjenjivač postaje ključna karika u ostvarivanju potencijala solarne energije kao održivog i ekološki prihvatljivog izvora energije.

Tablica 2.1. Primjer jednog pretvarača Fronius SYMO 10.0-3M (tehnički podaci)

Ulazni podaci	Fronius SYMO 10.0-3M
ulazna nazivna snaga P_{DC} (W)	15,0 kW
područje rada na DC strani $U_{izmj,min} - U_{izmj,maks}$ (V)	200 - 1000 V
maksimalni ulazni napon na DC strani $U_{DC,maks}$ (V)	1000 V
maksimalna ulazna struja na DC strani $I_{DC,maks}$ (V)	27,0 A
Izlazni podaci	
izlazna nazivna snaga P_{AC} (W)	10.000 W
nazivni napon na DC strani U_{AC} (V)	230 V
nazivna frekvencija f (Hz)	50 Hz
faktor snage $\cos\phi$	0 - 1 ind. / cap.
maksimalna učinkovitost η_{maks} (%)	97,8%
europska učinkovitost η_{eu} (%)	95,6%



2.24. Fronius SYMO 10.0-3M, [12]

3.9. Baterije

Baterije u fotonaponskom sustavu imaju ključnu ulogu u pohrani energije, te omogućuju korištenje pohranjene solarne energije kada nema sunca. Korištenje baterija može značajno povećati fleksibilnost i pouzdanost fotonaponskog sustava, osobito u off-grid sustavima gdje su baterije neizostavna komponenta te u hibridnim sustavima.

Osnovne vrste baterija u fotonaponskim sustavima:

- Olovno-kiselinske GEL baterije:

- VRLA (engl. Valve Regulated Lead Acid) baterije – zatvorene baterije opremljene sigurnosnim ventilima u slučaju isplinjavanja prilikom prepunjavanja ili kvara ćelije;
- GEL tehnologija – elektrolit je u obliku gela čime se produljuje životni vijek, [14].
- Litij-željezo-polimer (LiFePo4) baterije - vrhunske performanse, te se trenutno najviše koriste u fotonaponskim sustavima. Imaju veliki kapacitet, dugačak životni vijek i visoku učinkovitost. Ipak nedostatak je nešto veća cijena u odnosu na druge vrste baterija, [5].



Slika 2.25. LiFePo4 baterije Pylontech H48050 u Laboratoriju za OIE FERIT-a, [14]

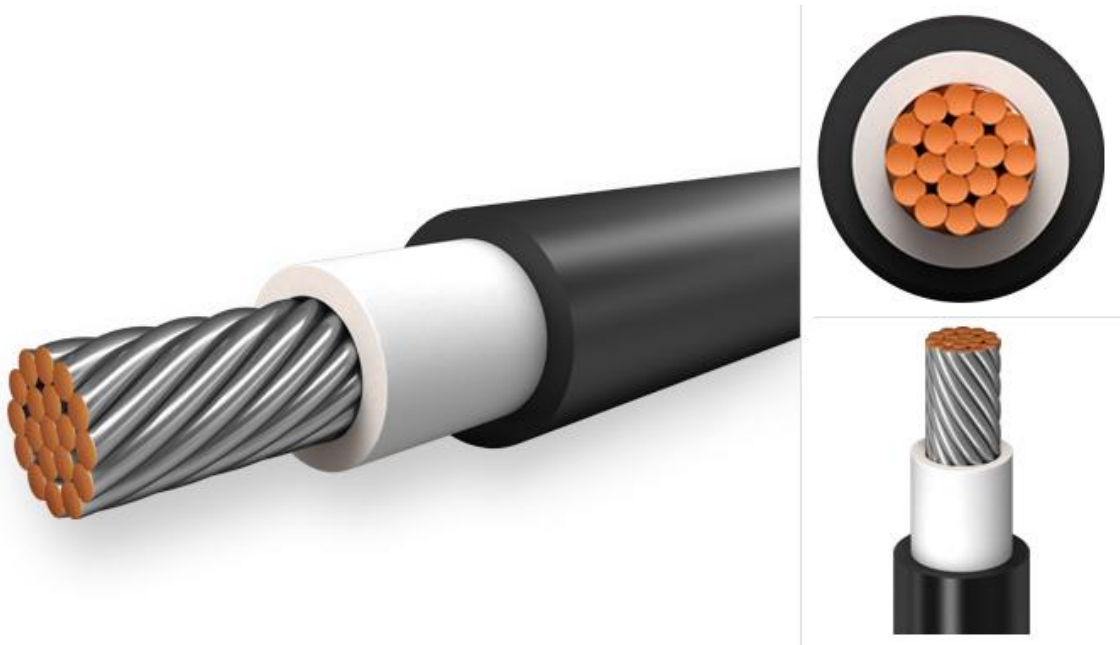
Izbor ispravne veličine baterije u fotonaponskim sustavima računamo prema formuli:

$$Baterija[Ah] = \frac{\text{dnevna potrošnja energije}[Wh] \cdot \text{vrijeme autonomije}[dan]}{\text{dubina pražnjenja} \cdot \text{Napon baterijskog sustava}[V]} \quad (3-5)$$

3.10. Kabeli

Kabeli su također važna komponenta fotonaponskih sustava, jer osiguravaju siguran i učinkovit prijenos električne energije između fotonaponskih modula, izmjenjivača, baterija i drugih komponenti sustava. Postoje dvije glavne vrste kabela u fotonaponskim sustavima: DC kabele za istosmjernu struju i AC kabele za izmjeničnu struju. DC kabele povezuju fotonaponske module međusobno i s DC razvodnim kutijama, a moraju biti otporni na UV zračenje, visoke temperature

i vremenske uvjete. AC kabeli prenose energiju iz izmjenjivača u mrežu ili kućnu elektroinstalaciju, te moraju biti odgovarajuće dimenzionirani za prijenos izmjenične struje i zadovoljiti relevantne sigurnosne standarde. Osim toga, svi metalni dijelovi fotonaponskog sustava moraju biti uzemljeni kako bi se osigurala sigurnost i spriječili električni udari.



Slika 2.26. Prikaz solarnog kabela, [13]

Izbor kabela

Kako bi ispravno izabrali kabel u fotonaponskim sustavima potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete [1]:

- Maksimalna struja koju kabel može podnijeti na DC strani mora biti veća $1,25 \cdot I_{KS}$ (struja kratkog spoja);

$$I_{z,DC} > 1,25 \cdot I_{KS} \quad (3-6)$$

Gdje je:

$$I_{z,DC} = k_1 k_2 I_n \quad (3-7)$$

- k_1 – korekcijski faktor nazivne struje na temperaturi $T_{maks} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$
- k_2 – korekcijski faktor nazivne struje pri postavljenom kabelu u cijevi ili kanalicu.
- Maksimalna struja koju kabel može podnijeti na AC strani mora biti veća od struje pri maksimalnoj izlaznoj snazi;

$$I_{z,AC} > \frac{P_i}{U \cdot \cos\varphi} \quad (3-8)$$

3.11. Zaštita fotonaponskog sustava

Kako bi fotonaponski sustav bio siguran i ispravno funkcionirao potrebno ga je zaštititi od:

- prevelikih struja i prenapona;
- atmosferskih utjecaja;
- od električnog udara.

Fotonaponski sustav štitimo od atmosferskih utjecaja, prevelikih struja i prenapona pomoću odvodnika prenapona kojeg ugrađujemo prije ulaza u izmjenjivač. Za zaštitu AC strane izmjenjivača potrebno je koristiti automatski osigurač s četveropolnom sklopkom. Na izmjeničnoj strani, potrebno je postaviti dodatni odvodnik prenapona, ako već nije ugrađen u pretvarač. Gromobranske instalacije i hvataljke je potrebno udaljiti najmanje 0,5 m od fotonaponskih modula.

Također, sustav je potrebno zaštititi i od električnog udara za koje je potrebno poštovati mjere zaštite od direktnog napona dodira i zaštite od indirektnog napona dodira

Zaštita od direktnog napona dodira postiže se zaštitom dijelova pod naponom putem izolacije i zaštitnih kućišta te tako sprječavaju kontakt s dijelovima koji su pod naponom. Kabeli koji se koriste u fotonaponskim sustavima moraju imati pojačanu izolaciju prema normi za zaštitu od električnog udara.

Zaštita od indirektnog napona dodira osigurava se automatskim isključenjem napajanja, koje u slučaju kvara na instalaciji sprječava pojavu napona dodira takve vrijednosti i trajanja koji bi mogli predstavljati opasnost u smislu negativnog fiziološkog utjecaja. Zaštitu od indirektnog napona dodira osiguravamo povezivanjem metalnih masa opreme i trošila na zaštitni vodič.

Opći principi zaštite od indirektnog napona dodira uključuju:

- uzemljenje;
- izjednačenje potencijala;
- isključenje napajanja;

Uzemljenje je jedan od općih principa zaštite od indirektnog napona fotonaponskih sustava, pruža neophodnu zaštitu od električnih opasnosti. Osigurava siguran put za višak električne energije,

sprečavajući potencijalna oštećenja opreme uslijed prenapona te smanjujući rizik od električnih udara.

Izjednačavanje potencijala ćemo postići tako da galvanski spojimo sve različite metalne dijelove instalacija sa zaštitnim vodičem (PE) električne instalacije u građevini ili prostoru.

Kako bi se zaštitili od udara električne struje potrebni su sam automatski ili rastalni osigurači te zaštitne sklopke kako bi automatski isključili napajanje.

Osigurački elementi trebaju biti odabrani tako da, pri maksimalnom očekivanom naponu od 400 V i frekvenciji od 50 Hz, osiguraju isključenje u skladu s vremenima:

- Za neprijenosna trošila: $t=5$ s;
- Za prijenosna trošila i priključnice: $t=0,4$ s;
- Za eksplozivno ugrožena trošila: $t=0,1$ s.

Uvjet je zadovoljen ako je:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0 \quad (3-8)$$

gdje je:

- Z_s predstavlja impedanciju strujnog kruga u kvaru;
- I_a je struja koja jamči automatsko isključenje zaštitnog uređaja;
- U_0 je nazivni napon prema zemlji.

3.12. Utjecajni parametri fotonaponskih sustava

Utjecaj nagiba krova i položaja objekta

Položaj i nagib krova imaju značajan utjecaj na učinkovitost fotonaponskih sustava jer određuju koliko sunčeve svjetlosti fotonaponski moduli mogu primiti tijekom dana i tijekom različitih godišnjih doba. Promjenom orijentacije i nagiba dolazi i do promjene proizvodnje solarne energije.

Idealan nagib krova u Hrvatskoj se kreće od 34 do 37 stupnjeva ovisno o geografskoj lokaciji objekta, međutim njegov utjecaj na samu proizvodnju nije značajno velik, dok je utjecaj orijentacije dosta veći. Idealan slučaj orijentacije fotonaponskog sustava je ka južnoj strani, sa

azimutom od 0 stupnjeva. Mijenjamo li orijentaciju prema jugoistoku ili jugozapadu dolazi do smanjenja ukupne godišnje proizvodnje energije do 5%, ako je sustav orijentiran prema istoku ili zapadu proizvodnja solarne energije se smanjuje za oko 15%. Sjeverna orijentacija koristi se znatno rjeđe te je i proizvodnja time dosta manja.

Dvije osnovne vrste krovova su:

- Kosi;
- Ravni.

Kod kosih krovova module postavljamo direktno na krov odnosno slijedimo orijentaciju i nagib krova. Također postoji mogućnost uzdizanja na određeni kut kako bi se postigla idealnija proizvodnja, ali se vrlo rijetko koristi zbog cijene i tehničke složenosti.

Kod ravnih krovova izdižemo module na određeni kut, to je najčešće kut od 10 stupnjeva, također zbog zasjenjenja potrebno je osigurati razmak od otprilike 0,5 m između redova modula. Postoje dvije osnovne vrste konstrukcija na ravnim krovovima, a to su jednostrana i dvostrana konstrukcija. Jednostranu konstrukciju koristimo kada module namjeravamo usmjeriti prema jugu kako bi se postigla veća jedinična proizvodnja. Druga osnovna vrsta su dvostrane konstrukcije te se još nazivaju istok-zapad konstrukcije, imaju manju jediničnu proizvodnju, ali veću iskoristivost površine što znači da se može instalirati 40-50% veća snaga sustava.

Utjecaj zasjenjenja

Zasjenjenje fotonaponskih sustava može značajno utjecati na njihovu učinkovitost i proizvodnju energije. Smanjena količina sunčevog zračenja koja dopire do modula izravno smanjuje proizvodnju električne energije.

Postotni gubitak snage fotonaponskog modula uslijed zasjenjenja u odnosu na izlaznu snagu ne zasjenjenog modula računamo prema formuli:

$$P_g = \frac{P_n - P_s}{P_n} \cdot 100 [\%] \quad (3-9)$$

Gdje je:

- $P_{g\%}$ - gubitak snage izražen u postotcima;
- P_s – snaga u točki maksimalne snage za pojedini scenarij zasjenjenja;
- P_n – snaga u točki maksimalne snage ne zasjenjenog fotonaponskog modula;

Lokalni uvjeti poput sjene koju bacaju drveće, zgrade i druge prepreke mogu značajno smanjiti učinkovitost fotonaponskih sustava, stoga je važno analizirati sjenu tijekom cijele godine. Vrlo je važno održavanje i čišćenje modula kako bi se uklonili potencijalni izvori sjene poput prljavštine, lišća ili drugih prepreka. Pravilno planiranje, instalacija i održavanje ključni su za minimiziranje negativnih utjecaja zasjenjenja i osiguravanje optimalne proizvodnje energije iz fotonaponskih sustava.

Utjecaj vlage

Vlaga može značajno utjecati na performanse i dugovječnost fotonaponskih sustava. Prije svega, vlaga može uzrokovati koroziju metalnih dijelova modula poput spojeva, vodiča i okvira, što slabi mehaničku strukturu i smanjuje vodljivost električnih spojeva, dovodeći do smanjenja učinkovitosti. Također, materijali korišteni u izradi fotonaponskih modula, poput zaštitnog stakla, silikonskih ćelija i polimernih laminata, mogu se degradirati pod utjecajem vlage, što može uzrokovati mikropukotine i delaminaciju te smanjiti radni vijek modula. Električni problemi su također česti, jer vlaga može prodrijeti u električne komponente, uzrokujući kratke spojeve i smanjenje izolacijske otpornosti, što povećava rizik od kvarova i smanjuje učinkovitost pretvorbe energije. Inverteri, koji pretvaraju istosmjernu struju (DC) iz modula u izmjeničnu struju (AC), osjetljivi su na vlagu, koja može uzrokovati kvarove i smanjenje njihove pouzdanosti. Kondenzacija na površini modula smanjuje količinu sunčevog zračenja koja dopire do ćelija, direktno smanjujući proizvodnju električne energije. Problemi uzrokovani vlagom često zahtijevaju dodatno održavanje i popravke, što povećava troškove. Kako bi se smanjio utjecaj vlage, preporučuje se korištenje kvalitetnih materijala i naprednih tehnologija za izradu modula, zaštita električnih komponenti i redovito održavanje.

4. PROJEKTIRANJE I PRORAČUN FOTONAPONSKE ELEKTRANE U PROGRAMSKOM PAKETU PV SOL

Kroz prethodno poglavlje napravljen je teoretski uvod u fotonaponske sustave uz opis osnovnih karakteristika. U ovom poglavlju cilj je napraviti projekt fotonaponskog sustava za jednu srednju školu u programskom paketu PV SOL premium uz proračune svih DC i AC komponenti i utjecajne parametre na izbor komponenti (snaga, jakost struje DC i AC, gubici, udaljenost) i analizu profitabilnosti s povratom ulaganja i razdobljem povrata investicije u Novoj Gradiški instalirane snage 162 kWp. Fotonaponski moduli će biti postavljeni na jugozapadnu i sjeveroistočnu stranu krova te će sustav biti spojen na mrežu.

4.1. Programski paket PV SOL premium

PV SOL premium je napredni programski paket za simulaciju i projektiranje fotonaponskih (PV) sustava. Razvijen je od strane njemačke tvrtke Valentin Software, koja je specijalizirana za razvoj softverskih rješenja za obnovljive izvore energije.

PV SOL premium omogućuje detaljno 3D modeliranje fotonaponskih (PV) sustava, uključujući različite tipove krovova, zgrada i prepreka koje mogu utjecati na performanse sustava. Detaljna analiza sjena tijekom različitih perioda godine pomaže optimizirati postavku modula i maksimizirati proizvodnju energije. Softver izračunava proizvodnju energije uzimajući u obzir različite faktore kao što su orijentacija modula, nagib, tip modula, invertera i lokalne klimatske uvjete. Ekonomska analiza omogućuje procjenu troškova i koristi, uključujući povrat investicije (ROI), unutarnju stopu povrata (IRR) i druge financijske pokazatelje. Integracija s velikom bazom podataka fotonaponskih modula, invertera i drugih komponenti olakšava dizajn PV sustava. Generiranje detaljnih izvještaja i dokumentacije potrebnih za klijente i regulatorna tijela dodatno pridonosi sveobuhvatnosti ovog softvera.

4.2. Izrada projekta

Prvi korak izrade projekta fotonaponske elektrane je definiranje klimatskih podataka i tipa sustava. Za ovaj projekt je odabran fotonaponski sustav spojen na mrežu s električnim uređajima, te je odabrana lokacija Hrvatska, grad Nova Gradiška, također je odabran jednosatni interval simulacije.

System Type, Climate and Grid

Type of System
3D, Grid-connected PV System with Electrical Appliances

Type of Design
 Use 3D Design

Time step of simulation
 1 Hour (faster simulation)
 1 Minute (more precise simulation)

Climate Data

Country	Location
Croatia	Nova Gradiška (2001-2020, Meteornorm 8.0)

Latitude	45° 15' 48" (45,26°)	Annual sum of global irradiation	1250 kWh/m ²
Longitude	17° 22' 34" (17,38°)	Annual Average Temperature	12,3 °C
Time zone	UTC+1		
Time Period	2001 - 2020		
Source	Meteornorm 8.2(i)		

Simulation Parameters

AC Mains

Enter

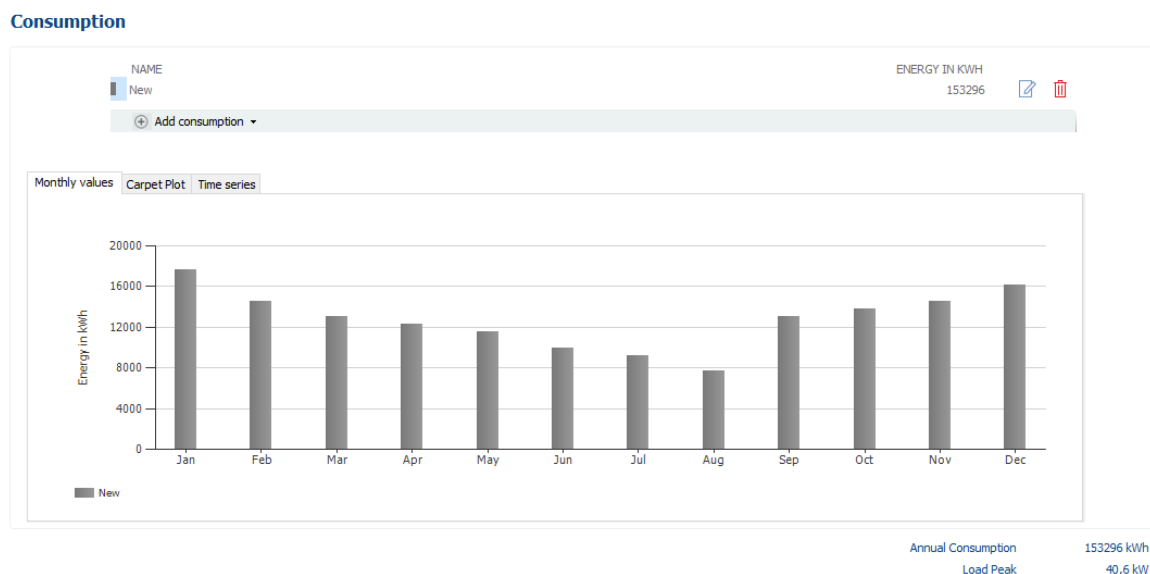
Voltage (N-L1)	230 V
Number of Phases	3-phase
cos φ	1
Maximum Feed-in Power Clipping	No

Slika 3.1. Tip sustava i klimatski podaci

Nadalje su uneseni podaci o potrošnji električne energije. Unesena je okvirna potrošnja za svaki mjesec što možemo vidjeti na slici 3.2. i 3.3. Možemo primijetiti da je najveća potrošnja zimi, dok je najmanja u srpnju i kolovozu zbog godišnjeg odmora. Ukupna godišnja potrošnja je 153,296 kWh.

Month	VT [kWh]	NT [kWh]
▶ Jan	17629	0
Feb	14563	0
Mar	13030	0
Apr	12264	0
May	11497	0
Jun	9964	0
Jul	9198	0
Aug	7665	0
Sep	13030	0
Oct	13797	0
Nov	14563	0
Dec	16096	0

Slika 3.2. Potrošnja električne energije po mjesecima



Slika 3.3. Dijagram potrošnje električne energije po mjesecima

Nakon toga izrađen je 3D model objekta (slika 3.4.) na koju se postavljaju fotonaponski moduli. Podloga je preuzeta sa Google Earth-a zajedno sa susjednim objektima koji su nam potrebni zbog simulacije utjecaja zasjenjenja na objekt na kojem se nalaze moduli. Postavljeno je 180 modula na jugozapadnu stranu krova, te 180 modula na sjeveroistočnu stranu, što je ukupno 360 modula. Odabrani su monokristalni moduli SUNPRO SP450-144M vršne snage 450 W sa tehničkim karakteristikama danim u tablici 3.1. Elektrana je ukupne snage 162 kWp. Zatim je potrebno odabrati odgovarajuće pretvarače. Odabrana su 2 identična pretvarača SOFAR 80KTLX-G3 sa tehničkim karakteristikama danim u tablici 3.2., nazivne izlazne snage od 80 kW.



Slika 3.4. 3D prikaz objekta

Tablica 3.1. Tehničke karakteristike SUNPRO SP450-144M modula

SUNPRO SP450-144M	
Maksimalna snaga Pmax [W]	450
Napon praznog hoda Uph [V]	49,8
Struja kratkog spoja Iks [A]	11,56
Nazivni napon Umpp [V]	41
Nazivna struja Imp [A]	10,98
Učinkovitost modula [%]	20,37
Masa [kg]	24,2
Dimenzije (dužina x širina x visina) [mm]	2108 x 1048 x 40
Broj ćelija	144
Radna temperatura [°C]	od -40 do +85
Temperaturni koeficijent za struju kratkog spoja [%/°C]	0,049
Temperaturni koeficijent za napon praznog hoda [%/°C]	-0,26
Temperaturni koeficijent za Pmax [%/°C]	-0,34

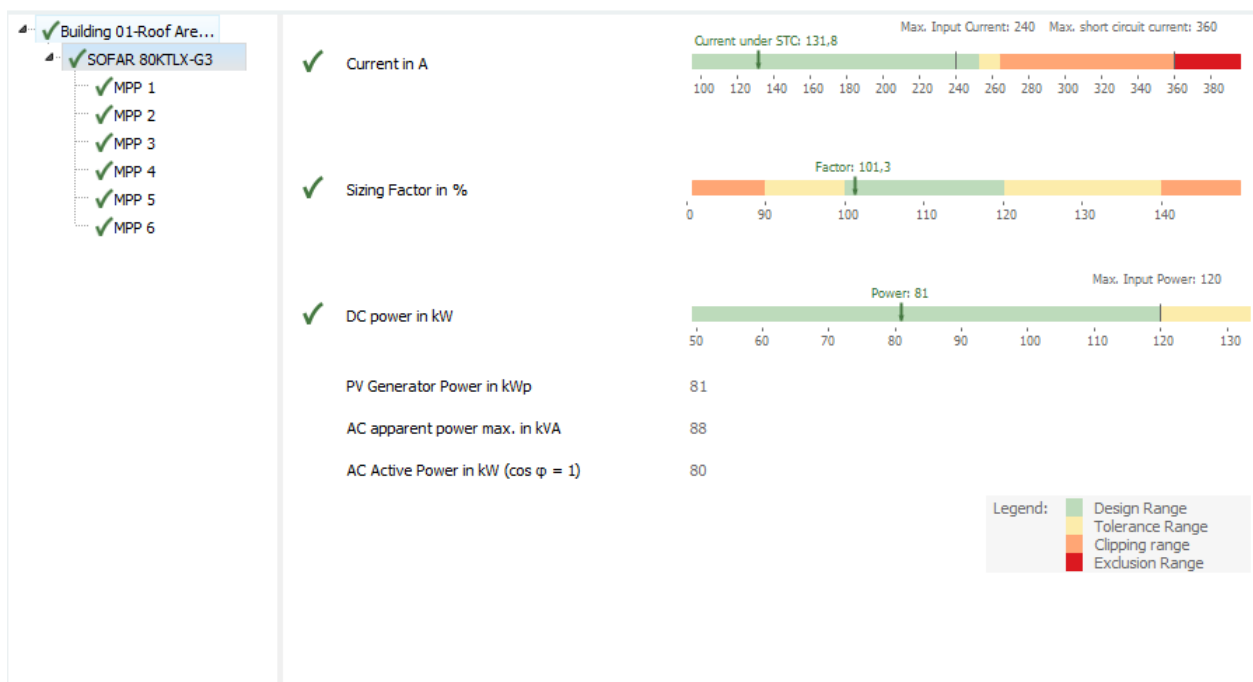
Tablica 3.2. Tehničke karakteristike pretvarača SOFAR 80KTLX-G3

SOFAR 80KTLX-G3	
Ulazni DC podaci	
Maks. ulazni napon (V)	1100
Napon pokretanja (V)	200
Nazivni ulazni napon (V)	620
MPPT radni napon (V)	180 - 1000
Maks. ulazna MPPT struja	6x40
Maks. ulazna struja kratkog spoja (A)	6x60
Broj MPP trackera	6
Broj DC ulaza	2 po MPPT
Izlazni AC podaci	
Nazivna snaga (kW)	80
Maks. AC snaga (VA)	88000
Maks. izlazna struja (A)	133,3
Nazivna frekvencija (Hz)	50 / 60
Faktor snage	1
Maks. Učinkovitost (%)	do 98,7
Raspon temperature okoline	od 30°C do – 60°C
THDi (%)	3
Raspon napona mreže (Vac)	310 - 480

U idućem koraku je potrebno konfigurirati module na pretvarače. Svaki pretvarač se sastoji od 6 MPPT ulaza te smo na svaki ulaz spojili po 2 stringa od 15 modula. Jedan pretvarač je konfiguriran na module koje se nalaze na jugozapadnoj stani, dok je drugi konfiguriran na module sa sjeveroistočne strane krova. Iz slika 3.5. i 3.6. možemo vidjeti da su moduli ispravno konfigurirani na pretvarače te se nalaze unutar dopuštenih granica (zeleno područje). Također postoji i područje tolerancije (žuto područje), dok je crveno područje nedozvoljeno područje i pretvarač ne može raditi ispravno ako se nalazi u tom području.

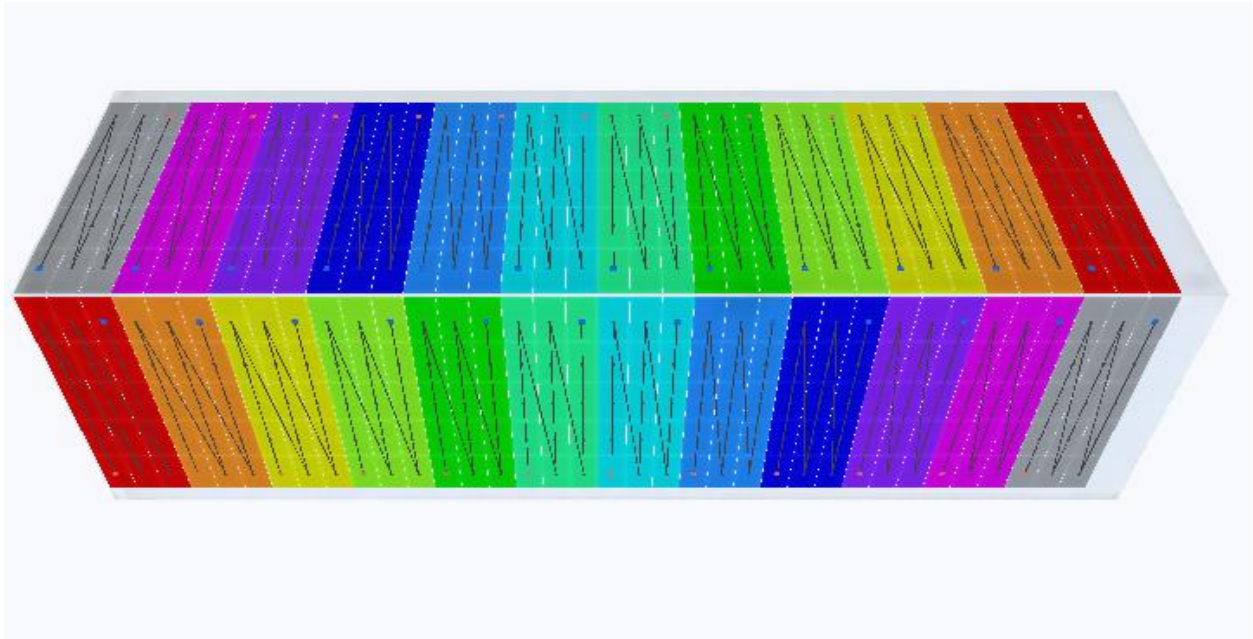
CHECK	VALUES	POWER
✓	CONFIGURATION: Building 01-Roof Area North	
	INVERTER 1: <input checked="" type="checkbox"/> Polystring Configuration	
✓	1 x SOFARSOLAR Co., Ltd. SOFAR 80KTLX-G3	81 kWp
	<input type="checkbox"/> Power Optimizer	
	Type of Operation: MPP 1, MPP 2, MPP 3, MPP 4, MPP 5, MPP 6	
✓	MPP 1: 2 Strings x 15 Modules in series	
	+ Add Row	
✓	MPP 2: 2 Strings x 15 Modules in series	
	+ Add Row	
✓	MPP 3: 2 Strings x 15 Modules in series	
	+ Add Row	
✓	MPP 4: 2 Strings x 15 Modules in series	
	+ Add Row	
✓	MPP 5: 2 Strings x 15 Modules in series	
	+ Add Row	
✓	MPP 6: 2 Strings x 15 Modules in series	
	+ Add Row	

Slika 3.5. Konfiguracija modula na pretvarače



Slika 3.6. Provjera konfiguracije pretvarača

Idućom slikom 3.7. je prikazan način povezivanja fotonaponskih modula u nizove. Vidimo da su svi nizovi sačinjeni od 15 serijski vezanih modula.

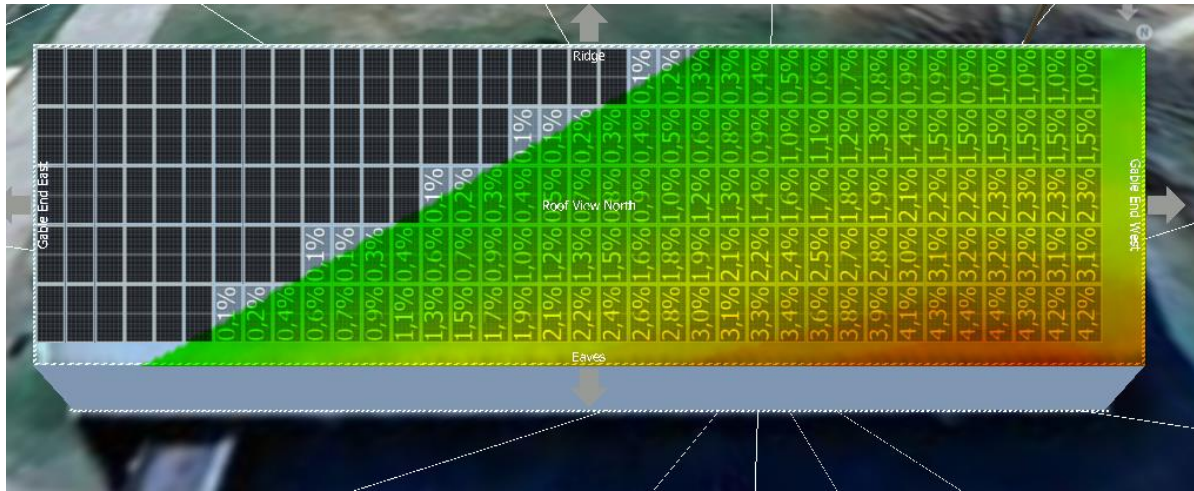


Slika 3.7. Prikaz spajanja modula

Jedan od najvažnijih utjecajnih parametara fotonaponske elektrane je utjecaj zasjenjenja modula, stoga je napravljena simulacija utjecaja zasjenjenja za obje strane krova. Na jugozapadnoj stani (slika 3.8.) utjecaj zasjenjenja je nešto veći na lijevoj strani zbog toga što se pored objekta nalazi drvo koje stvara zasjenjenje, dok je na desnoj strani utjecaj zasjenjenja zanemariv. Na sjeveroistočnoj strani (slika 3.9.) utjecaj zasjenjenja je nešto veći na desnoj strani zbog obližnjeg objekta, dok je na lijevoj strani utjecaj zanemariv.

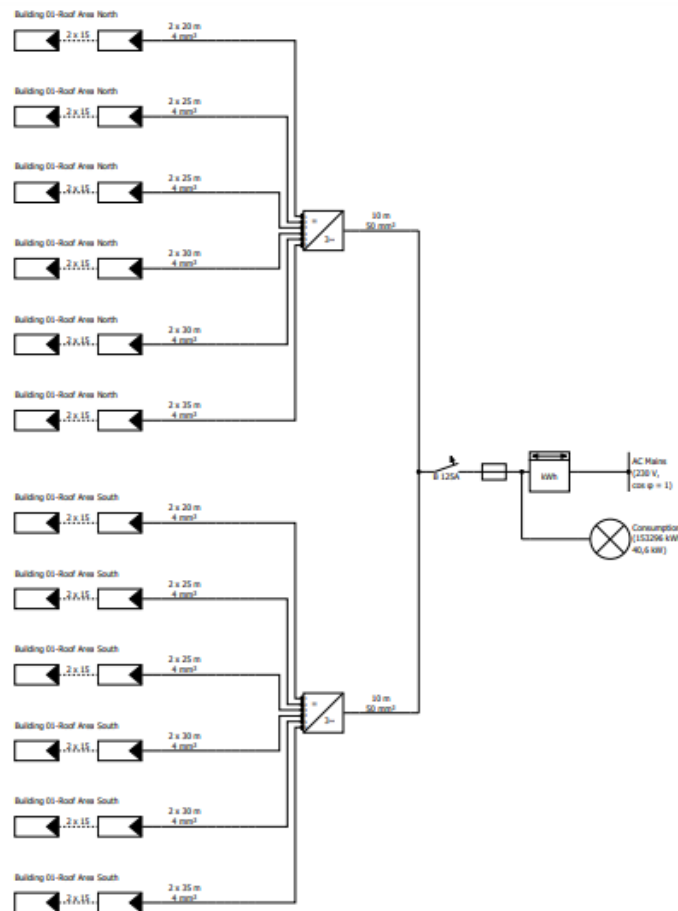


Slika 3.8. Utjecaj zasjenjenja na jugozapadnoj strani krova



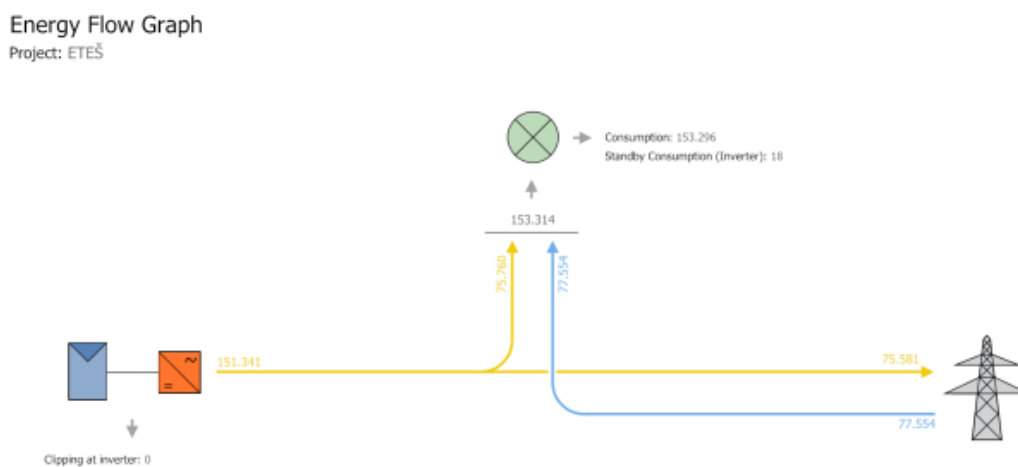
Slika 3.9. Utjecaj zasjenjenja na sjeveroistočnoj strani krova

Zadnji korak izrade elektrane je odabir kabela, te zaštitnih i mjernih uređaja. Na istosmjernoj DC strani odabrani su kabeli (4x20m, 8x25m, 8x30m, 4x35 m) poprečnog presjeka 4 mm^2 , dok su na izmjeničnoj AC strani odabrana 2 kabela od 10 m, poprečnog presjeka 50 mm^2 . Odabrani osigurač je nazivne struje 125 A, što je vidljivo na jednopolnoj shemi cijele fotonaponske elektrane (slika 3.10.).



Slika 3.10. Jednopolna shema fotonaponskog sustava

Graf (slika 3.11.) prikazuje tok energije fotonaponskog sustava. Fotonaponski sustav proizvodi 151.341 kWh energije, koja se zatim prenosi kroz pretvarač. Pretvarač pretvara tu energiju iz istosmjerne u izmjeničnu struju. Energija koja se koristi za potrošnju iznosi 153.314 kWh, od čega se 153.296 kWh troši u objektu, dok 18 kWh predstavlja standby potrošnju pretvarača. Višak energije od 77.554 kWh vraća se u mrežu. Ukupna energija predana u mrežu iznosi 75.581 kWh. Većina proizvedene energije koristi se za vlastite potrebe objekta, dok se ostatak predaje mreži. Energija proizvedena iz fotonaponskih modula učinkovito se koristi za pokrivanje potreba potrošača. Graf također pokazuje da nema gubitaka ili "clippinga" na pretvaraču. Na kraju, projekt osigurava održivo korištenje solarne energije uz optimalnu distribuciju proizvedene energije.



Slika 3.11. Tokovi energije fotonaponskog sustava

4.3. Proračun

PRORAČUN MAKSIMALNOG NAPONA NA ULAZU U IZMJENJIVAČ

Proračun se vrši kada su moduli u otvorenom krugu, te je temperatura ćelija niska. Kontrolu vršimo na -10°C .

Najveći očekivani napon na ulazu u izmjenjivač računamo prema formuli:

$$U_{max(DC)} = N_{modula} \cdot U_{PH,modula} \cdot \left(1 + \Delta T \cdot \frac{\text{Temp. koef. za } U_{PH}}{100}\right) \quad (3-1)$$

$$\Delta T = T_{min} - T_{STC} = -10 - 25 = -35^{\circ}\text{C} \quad (3-2)$$

$$U_{max(DC)} = 15 \cdot 49,8 \cdot \left(1 + (-35) \cdot \frac{-0,26}{100}\right) = 814,977 \text{ V}$$

PRORAČUN MINIMALNOG DC NAPONA NA ULAZU U IZMJENJIVAČ

Proračun se vrši kada se moduli nalaze u točki maksimalne snage, te je temperatura ćelija visoka. Kontrolu vršimo na 60°C .

$$U_{min(DC)} = N_{modula} \cdot U_{MPP,modula} \cdot \left(1 + \Delta T \cdot \frac{\text{Temp. koef. za } P_{max}}{100}\right) \quad (3-3)$$

$$\Delta T = T_{max} - T_{STC} = 60 - 25 = 35^{\circ}\text{C}$$

$$U_{min(DC)} = 15 \cdot 41 \cdot \left(1 + (+35) \cdot \frac{-0,34}{100}\right) = 541,815 \text{ V}$$

Iz proračuna možemo zaključiti da su maksimalni i minimalni napon unutar naponskih ograničenja pretvarača ($180 \text{ V} - 1000 \text{ V}$), te su uvjeti $U_{max(DC)} > U_{max(inv)}$ i $U_{MPP(min)} > U_{min(DC)} > U_{MPP(max)}$ zadovoljeni.

PRORAČUN GUBITAKA U ISTOSMJERNIM (DC) KABELIMA

Gubitke snage u kabelima na istosmjernoj (DC) strani računamo prema formulama:

$$P_{DC} = \frac{n \cdot L_m \cdot P_{modula}^2}{A_m \cdot U_{MPP}^2 \cdot \kappa} \quad (4-4)$$

$$P_{DC[\%]} = \frac{P_{DC}}{n \cdot P_{modula}} \cdot 100 [\%] \quad (4-5)$$

Ako je $n=1$ (dopušteni gubici, $n \leq 1$), $\kappa=56 \text{ Sm/mm}^2$ i $A_m=4 \text{ mm}^2$

Tablica 3.3. Proračun gubitaka u kabelima na DC strani za oba pretvarača

String	Broj modula	$P_{\text{modula}} [W]$	$U_{\text{MPP}} [V]$	$L_M [m]$	$P_{\text{DC}} [W]$	$P_{\text{DC}} [\%]$
1.1.	15	450	41	20	10,76	0,16
1.2.	15	450	41	25	13,45	0,2
1.3.	15	450	41	25	13,45	0,2
1.4.	15	450	41	30	16,13	0,24
1.5.	15	450	41	30	16,13	0,24
1.6.	15	450	41	35	18,82	0,28
2.1.	15	450	41	20	10,76	0,16
2.2.	15	450	41	25	13,45	0,2
2.3.	15	450	41	25	13,45	0,2
2.4.	15	450	41	30	16,13	0,24
2.5.	15	450	41	30	16,13	0,24
2.6.	15	450	41	35	18,82	0,28

STRUJNO DIMENZIONIRANJE, IZBOR OSIGURAČA I IZBOR PRESJEKA VODIČA NA AC STRANI

Kako bi kabel na AC strani zaštitili od preopterećenja moraju biti ispunjeni uvjeti:

$$I_n \leq I_0 \leq I_d \quad (4-6)$$

$$k \cdot I_0 \leq 1,45 \cdot I_d \quad (4-7)$$

gdje je:

I_n - nazivna struja

I_0 - nazivna struja osigurača

I_d -dozvoljena struja

k - prekidni koeficijent zaštitne naprave ($k=1,6$ ako je $I_0 > 25$ A)

$$I_n = \frac{P_{AC,INV}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{80000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1} = 115,47 \text{ A}$$

S obzirom na uvjete i nazivnu struju prema tablici odabiremo osigurač i presjek vodiča.

Tablica 3.4. Tablica presjeka, dozvoljene struje i struje osigurača

Presjek (mm ²)	Struja Cu (A) I_d	Osigurač Cu (A) I_0
0,75	12	6
1	15	10
1,5	18	10
2,5	26	20
4	34	25
6	44	35
10	61	50
16	82	63
25	108	80
35	135	100
50	168	125
70	207	160
95	250	200
120	292	250
150	335	250
185	382	315
240	453	400
300	504	400

Odabrani kabel je presjeka 50 mm², dok je osigurač od 125 A.

KONTROLA PADA NAPONA

Kontrolu pada napona između točke priključene na razdjelnicu i pretvarača računamo prema formuli:

$$u = \frac{l \cdot P_{AC(INV)} \cdot \rho \cdot 10^5}{U_{AC}^2 \cdot A_m} [\%] \quad (4-8)$$

gdje je:

l – duljina vodiča [m],

$P_{AC(INV)}$ – snaga [kW],

U_{AC} – napon [V],

A_m – presjek vodiča [mm²],

ρ - specifični otpor vodiča (bakar - 0,01793 mm² /m), aluminij (0,02874 mm² /m)

Uvjet koji treba biti zadovoljen je da iznosi manje od 5% napona mreže.

Tablica 3.5. Kontrola pada napona

	duljina vodiča [m]	$P_{AC(INV)}$ [kW]	A_m [mm ²]	Nazivni napon [V]	Pad napona [%]
Pretvarač 1	10	80	50	400	0,1792
Pretvarač 2	10	80	50	400	0,1792

Uvjet kod oba pretvarača je zadovoljen.

4.4. Ekonomska analiza

Nakon što je napravljen projekt i proračun, idući korak je ekonomska analiza čiji je cilj ocjena isplativosti investicije fotonaponske elektrane. Postavljeno vrijeme izračuna je 20 godina i prosječni godišnji povrat kapitala od 5% (neto). Trošak investicije je 1000 €/kWh, a godišnji troškovi održavanja su 2% od investicije uz inflaciju od 2%.

U projektu je korišten *Net Metering* finansijski model (Kupac korisnik postrojenja za samoopskrbu). Cijena koju taj kupac dobiva za energiju prodanu u mrežu računa se kao 80% cijene električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču. Kako je proizvodnja iz fotonaponskog sustava tijekom dana kada je na snazi viša tarifa za cijenu se uzima 80% cijene za energiju u višoj tarifi. To je cijena bez mrežarine. Dolazi se do cijene od 0,0598 €/kWh uz godišnju stopu inflacije 2%.

Koristili smo dvije tarife (viša i niža). Cijena energije u višoj tarifi je 0,15874 €/kWh, a cijena energije u nižoj tarifi je 0,08269 €/kWh. Tijekom ljetnog računanja vremena, viša tarifa je od 8:00 do 22:00, a niža od 22:00 do 8:00, dok je tijekom zimskog računanja vremena, viša tarifa od 7:00 do 21:00, a niža od 21:00 do 7:00, [16].

Country: Croatia (Local Name: Hrvatska)

City:

Energy Supplier: Example

Name: Bijeli tarifni model

Available

Version: 11

Created at: 21.8.2024. 22:13:06

User ID: kreso

Number of chronologically different tariff periods: 2

VT (1) NT (2)

From (energy in kWh/month)	Energy Price in €/kWh
0,00	0,15874

At a consumption-dependent energy price Zone tariff Sliding-scale tariff

Consumption Type: Residential Corporation

Minimum quantity: 0 €/Year

Base Price: 0,0000 €/Month

Compensation for Surplus: 0,0598 €/kWh

Type of Feed-in Upper Limit: None

Feed-in Upper Limit: 0,0 kWh

monthly accounting

Surplus can be used in a following month

Number of different tariff period definitions: 1

Setting of tariff period definitions

Tariff Periods Definition: Sun a Mon a Tue a Wed a Thu a Fri a Sat a

Tariff period definition a

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Jan	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Feb	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Mar	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Apr	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
May	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Jun	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Jul	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Aug	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Sep	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Oct	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Nov	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Dec	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2

Time shift: + 0 minutes

Slika 3.12. Definiranje tarife (VT) (Net-metering tariffs)

Number of chronologically different tariff periods: 2

VT (1) NT (2)

From (energy in kWh/month)	Energy Price in €/kWh
0,00	0,08269

At a consumption-dependent energy price Zone tariff Sliding-scale tariff

Number of different tariff period definitions: 1

Setting of tariff period definitions

Tariff Periods Definition: Sun a Mon a Tue a Wed a Thu a Fri a Sat a

Tariff period definition a

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Jan	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Feb	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Mar	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Apr	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
May	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Jun	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Jul	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Aug	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Sep	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Oct	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Nov	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Dec	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2

Time shift: + 0 minutes

Slika 3.13. Definiranje tarife (NT) (Net-metering tariffs)

Na slici 3.14. je prikazan graf koji prikazuje kumulativnu proizvodnju energije tijekom godine. Graf ima tri elementa:

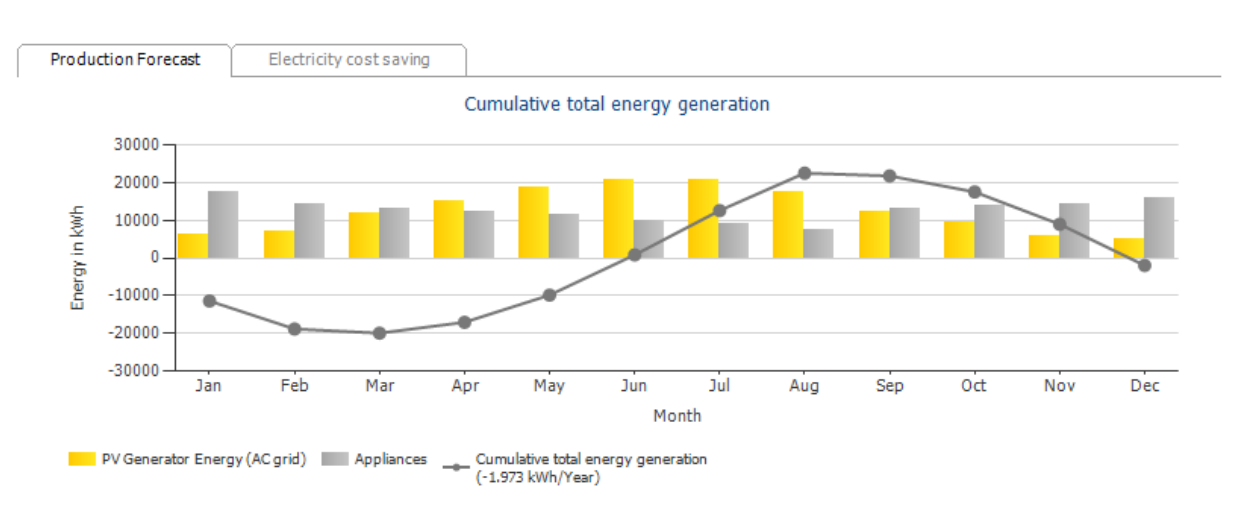
1. **Žute stupce** koji predstavljaju energiju proizvedenu pomoću fotonaponskog generatora spojenog na izmjeničnu mrežu (AC grid).
2. **Sive stupce** koji predstavljaju potrošnju energije kućanskih uređaja (Appliances).
3. **Crnu liniju** s točkama koja prikazuje kumulativnu ukupnu proizvodnju energije kroz godinu.

Os x prikazuje mjesec od siječnja (Jan) do prosinca (Dec), dok os y prikazuje količinu energije u kilovatsatima (kWh).

Na temelju prikazanih podataka:

- U jesenskim i zimskim mjesecima proizvodnja energije iz fotonaponskog generatora je niža od potrošnje energije kućanskih uređaja.
- Tijekom proljeća i ljeta (od travnja do kolovoza) proizvodnja energije fotonaponskog generatora nadmašuje potrošnju, što rezultira pozitivnom kumulativnom energijom.
- Kumulativna proizvodnja energije raste tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci, dostiže vrhunac u kolovozu, nakon čega se smanjuje prema kraju godine.

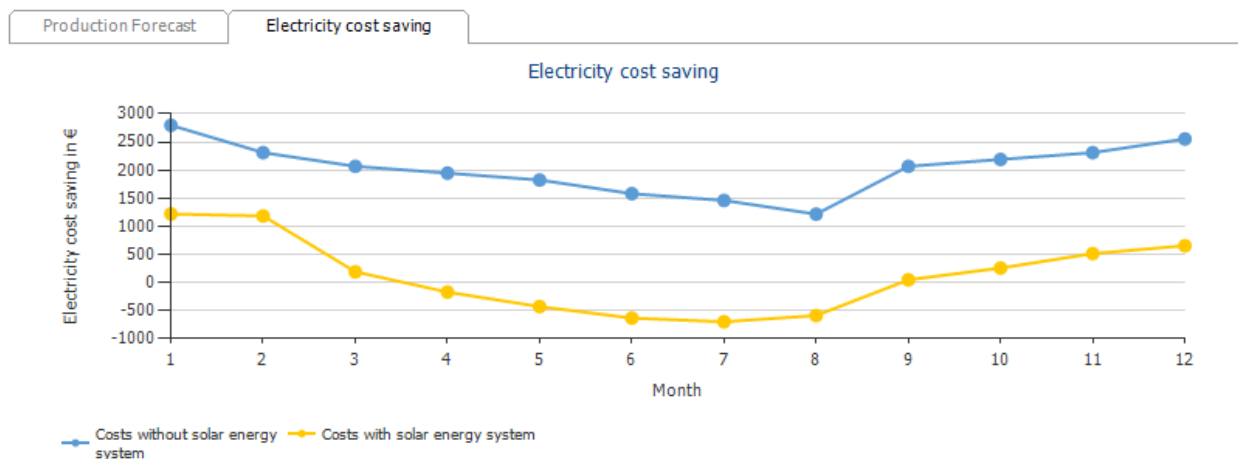
Zaključak grafičkog prikaza je da je ukupna proizvodnja energije manja od potrošnje za približno 1.973 kWh godišnje, što je naznačeno na grafu.



Slika 3.14. Dijagram kumulativnog tijeka energije

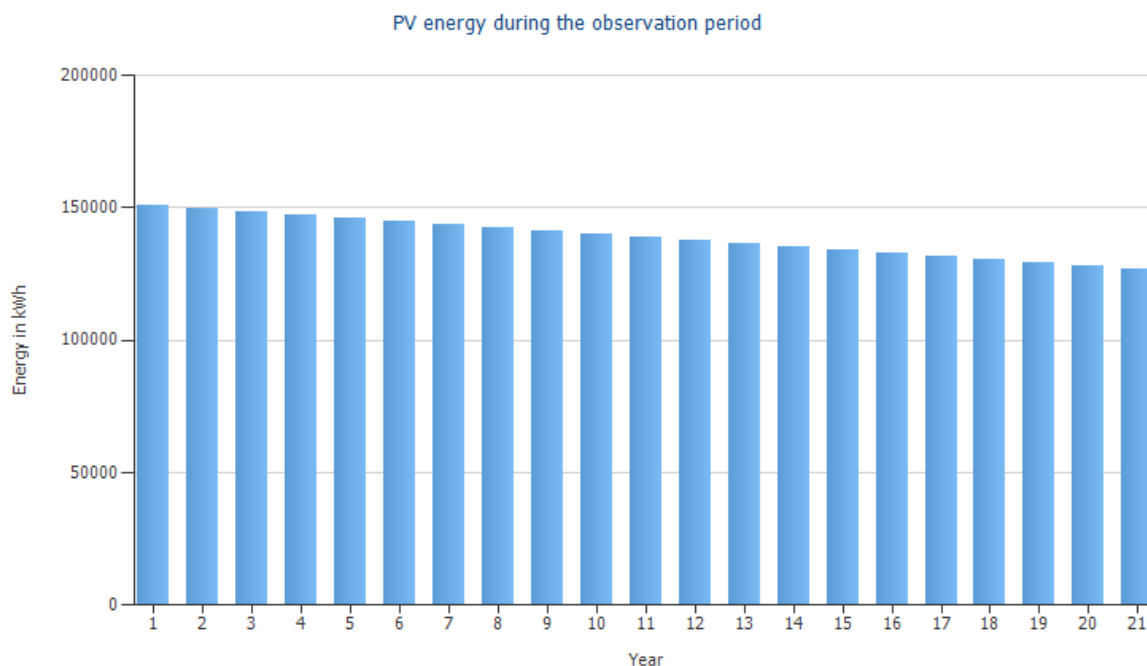
Graf (slika 3.15.) uspoređuje troškove električne energije s i bez korištenja fotonaponskog sustava kroz 12 mjeseci jedne godine. Plava linija prikazuje troškove električne energije bez fotonaponskog sustava. Ovi troškovi ostaju relativno visoki i stabilni tijekom cijele godine, ali se postupno povećavaju prema kraju godine. Ovo povećanje može biti posljedica sezonskih faktora, odnosno veće potrošnje energije tijekom zimskih mjeseci. Žuta linija predstavlja troškove električne energije s fotonaponskim sustavom. Na početku godine, ovi troškovi su značajno niži od troškova bez fotonaponskog sustava, ali postupno opadaju do točke kada postaju negativni, što sugerira da u nekim mjesecima dolazi do viška proizvodnje energije koja se može prodati ili

koristiti za dodatne uštede. Nakon sedmog mjeseca, troškovi s fotonaponskim sustavom počinju rasti, ali ostaju niži od troškova bez fotonaponskog sustava. Ovaj rast može biti povezan s manjom proizvodnjom energije zbog sezonskih promjena ili s povećanjem potrošnje energije. Pred kraj godine, razlika između troškova s i bez fotonaponskog sustava ponovno se povećava, što pokazuje dodatne uštede ostvarene fotonaponskim sustavom. Sveukupno, graf jasno ilustrira financijsku korist od uvođenja fotonaponskog sustava kroz znatno niže troškove električne energije tijekom cijele godine.



Slika 3.15. Ušteda troškova električne energije

Graf (slika 3.16.) prikazuje količinu energije proizvedene iz fotonaponskog sustava tijekom 21 godine. Energija se mjeri u kilovatsatima (kWh). U prvim godinama, proizvodnja energije je na najvišoj razini, što je tipično za novoinstalirane fotonaponske sustave koji rade s punim kapacitetom. Tijekom godina, dolazi do blagog, ali stalnog pada u proizvodnji energije. Ovaj pad može biti uzrokovan nekoliko faktora, uključujući starenje modula, prljavštinu koja se nakuplja na modulima, te eventualna degradacija fotonaponskih ćelija. Unatoč tom padu, sustav i dalje održava značajnu razinu proizvodnje energije kroz cijelo promatrano razdoblje, što sugerira da fotonaponski sustav i dalje ostaje efikasan i nakon više od dva desetljeća upotrebe.



Slika 3.16. Pregled dobivene energije iz fotonaponskog sustava tijekom promatranog perioda po godinama. Nadalje, tablica 3.6. prikazuje tehničke i financijske podatke za analizu isplativosti fotonaponskog sustava. Prikazana je očekivana godišnja proizvodnja energije, ukupni investicijski troškovi, te ekonomski pokazatelji poput interne stope povrata (IRR) i razdoblja amortizacije. Također su uključene procjene ušteda na računima za struju, prihoda od prodaje viška energije, i operativnih troškova sustava. Ovi podaci pomažu u procjeni povrata na ulaganje i ukupne isplativosti solarne elektrane tijekom njenog radnog vijeka.

Tablica 3.6. Cjelokupni pregled financijske analize

PODACI O SUSTAVU	
Energija generirana PV generatorom (AC mreža):	151,341 kWh/god
Izlaz PV generatora:	162 kWp
Početak rada sustava:	21.8.2024
Razdoblje procjene:	20 godina
Kamata na kapital:	5%
EKONOMSKI PARAMETRI	
Interna stopa povrata (IRR):	11,16 %
Akumulirani novčani tok (Novčana bilanca):	100 705,95 €

Razdoblje amortizacije:	10,4 godina
Troškovi proizvodnje električne energije:	0,1111 €/kWh
PREGLED PLAĆANJA	
Specifični troškovi investicije:	1 000,00 €/kWp
Troškovi investicije:	162 000,000 €
Jednokratna plaćanja:	0,00 €
Pristigli poticaji:	0,00 €
Godišnji troškovi	3 240,00 €/god
Ostali prihodi ili uštede	0,00 €/god
NAKNADE I UŠTEDE	
Ukupno plaćanje od strane pružatelja usluga u prvoj godini:	687,81 €/god
Uštede u prvoj godini:	22 095,41 €/god
BIJELI TARIFNI MODEL	
Cijena energije VT:	0,1587 €/kWh
Cijena energije NT:	0,0827 €/kWh
Naknada za višak:	0,0598 €/kWh
Stopa inflacije za cijenu energije:	2 %/god

Na slici 3.17. je prikazana financijska analiza projekta u razdoblju od 15 godina, koja uključuje troškove, prihode i novčane tokove (*cash flow*) povezane s investicijom u fotonaponski sustav.

Evo pregleda ključnih elemenata za svaku godinu:

- *Investments* (Investicije): Troškovi ulaganja, prikazani samo u prvoj godini s iznosom od -162.000,00 €. Ostatak godina nema dodatnih investicijskih troškova.
- *Operating costs* (Operativni troškovi): Godišnji operativni troškovi sustava, koji se smanjuju s godinama. Na primjer, u prvoj godini iznose -3.085,71 €, dok su u 15. godini -2.056,40 €.
- *Feed-in / Export Tariff*: Prihodi od prodaje proizvedene električne energije nazad u mrežu. Ovi prihodi se smanjuju tijekom godina, od 877,59 € u prvoj godini do 387,69 € u 15. godini.

- *Electricity Savings* (Uštede na električnoj energiji): Uštede na računima za električnu energiju zahvaljujući vlastitoj proizvodnji. Ove uštede su najveće u početnim godinama (19.851,25 € u prvoj godini) i postupno se smanjuju na 12.445,83 € u 15. godini.
- *Annual Cash Flow* (Godišnji novčani tok): Razlika između prihoda i troškova svake godine. U prvoj godini je novčani tok negativan zbog velikih početnih investicija (-144.356,87 €), ali u drugoj godini prelazi u pozitivan (+17.911,42 €), te ostaje pozitivan kroz cijelo razdoblje.
- *Accrued Cash Flow* (Akumulirani novčani tok): Ukupan kumulativni novčani tok do određene godine. Početno je negativan, ali se s godinama povećava i prelazi u pozitivan u 11. godini (7.041,16 €) te se nastavlja povećavati do 15. godine (52.835,20 €).

Ova analiza pokazuje da, unatoč velikim početnim troškovima, projekt postaje profitabilan nakon nekoliko godina, s pozitivnim godišnjim i akumuliranim novčanim tokom u kasnijim godinama.

	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5
Investments	-162.000,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Operating costs	-3.085,71 €	-2.997,55 €	-2.911,91 €	-2.828,71 €	-2.747,89 €
Feed-in / Export Tariff	877,59 €	631,25 €	608,27 €	586,09 €	564,68 €
Electricity Savings	19.851,25 €	20.277,72 €	19.538,75 €	18.825,46 €	18.136,98 €
Annual Cash Flow	-144.356,87 €	17.911,42 €	17.235,12 €	16.582,85 €	15.953,78 €
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-144.356,87 €	-126.445,45 €	-109.210,33 €	-92.627,48 €	-76.673,71 €

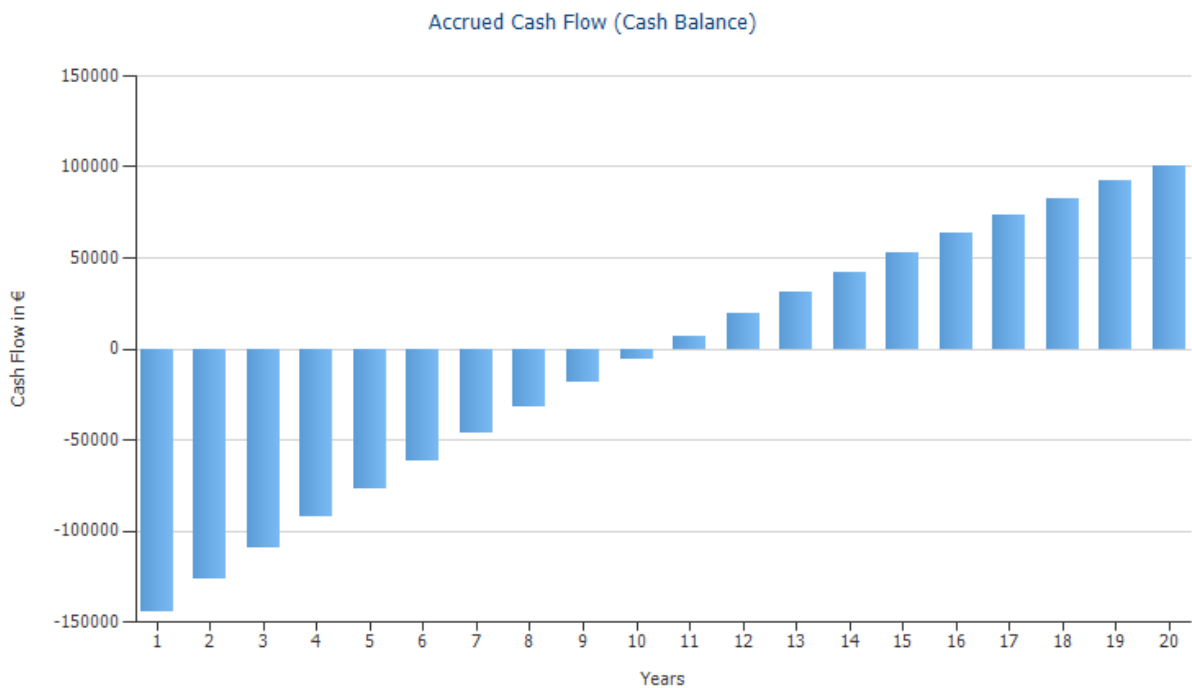
	Year 6	Year 7	Year 8	Year 9	Year 10
Investments	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Operating costs	-2.669,38 €	-2.593,11 €	-2.519,02 €	-2.447,05 €	-2.377,13 €
Feed-in / Export Tariff	544,02 €	524,08 €	504,83 €	486,25 €	468,32 €
Electricity Savings	17.472,48 €	16.831,13 €	16.212,18 €	15.614,85 €	15.038,43 €
Annual Cash Flow	15.347,12 €	14.762,10 €	14.197,99 €	13.654,05 €	13.129,62 €
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	-61.326,58 €	-46.564,49 €	-32.366,50 €	-18.712,45 €	-5.582,83 €

	Year 11	Year 12	Year 13	Year 14	Year 15
Investments	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Operating costs	-2.309,22 €	-2.243,24 €	-2.179,15 €	-2.116,88 €	-2.056,40 €
Feed-in / Export Tariff	451,02 €	434,33 €	418,22 €	402,68 €	387,69 €
Electricity Savings	14.482,18 €	13.945,46 €	13.427,58 €	12.927,91 €	12.445,83 €
Annual Cash Flow	12.623,99 €	12.136,55 €	11.666,66 €	11.213,71 €	10.777,12 €
Accrued Cash Flow (Cash Balance)	7.041,16 €	19.177,71 €	30.844,37 €	42.058,08 €	52.835,20 €

Slika 3.17. Tablica novčanog tijeka

Također, u programu je izrađen graf koji prikazuje kretanje akumuliranog novčanog toka (slika 3.18.) tijekom 20 godina, što predstavlja razliku između prihoda i rashoda povezanu s investicijom u fotonaponski sustav. Na početku, to jest u prvoj godini, novčani tok je značajno negativan, što je očekivano zbog visokih početnih ulaganja u instalaciju fotonaponskih sustava. Ta ulaganja uključuju troškove opreme, instalacije i eventualne dodatne troškove poput održavanja. Kako godine prolaze, negativni saldo se postupno smanjuje, iako se i dalje bilježe gubici do otprilike 9.

godine. U tom razdoblju dolazi do postupnog smanjenja negativnog novčanog toka, što sugerira da fotonaponski sustav počinje generirati prihode koji pokrivaju dio inicijalnih troškova. Nakon 10. godine, krivulja prelazi u pozitivno područje, što znači da su prihodi od fotonaponskih sustava konačno nadmašili početne investicije i tekuće troškove, te sustav počinje generirati profit. Od 13. godine nadalje, akumulirani novčani tok ubrzano raste, pokazujući kako se investicija počinje sve više isplaćivati. Do 20. godine, akumulirani novčani tok dostiže značajan pozitivan iznos, što ukazuje na isplativost ulaganja u fotonaponski sustav kroz dugoročno razdoblje.



Slika 3.18. Graf neto sadašnje vrijednosti

5. ZAKLJUČAK

Na temelju istraživanja provedenog u ovom radu, jasno je da fotonaponske elektrane predstavljaju ne samo ekološki prihvatljiv već i ekonomski isplativ izvor energije. Razvoj i primjena fotonaponskih sustava doživljavaju ubrzan rast zbog stalnog tehnološkog napretka i smanjenja troškova proizvodnje, što ih čini sve privlačnijim za ulaganja. Međutim, uspješnost investicije u fotonaponsku elektranu ovisi o nizu faktora, uključujući odabir tehnologije, pravilno dimenzioniranje sustava, geografske uvjete i kvalitetu instalacije.

Jedan od ključnih doprinosa ovog rada je prikaz značaja pravilnog projektiranja fotonaponskog sustava. Kroz detaljan pregled komponenti poput fotonaponskih modula, pretvarača i baterija, pokazano je kako svaki od tih elemenata utječe na ukupnu učinkovitost sustava. Pravilno dimenzioniranje i odabir kvalitetnih komponenti omogućuje maksimalno iskorištavanje raspoložive sunčeve energije te smanjenje gubitaka unutar sustava. Nadalje, analiza utjecajnih parametara, kao što su kut nagiba modula, orijentacija i lokalni klimatski uvjeti, dodatno naglašava važnost prilagodbe sustava specifičnim uvjetima lokacije na kojoj se elektrana nalazi.

Korištenje specijaliziranog softverskog alata PV SOL omogućilo je precizno modeliranje fotonaponske elektrane, simulaciju njezinog rada i proračun očekivane proizvodnje električne energije. Ovo je ključno za razumijevanje ekonomske isplativosti projekta, jer omogućuje preciznu procjenu troškova i prihoda te izračunavanje razdoblja povrata investicije. Analiza profitabilnosti pokazala je da, unatoč inicijalnim visokim ulaganjima, povrat investicije može biti relativno brz, pogotovo u područjima s visokim stupnjem sunčanosti i uz korištenje poticaja i subvencija za obnovljive izvore energije.

Također, treba napomenuti da fotonaponski sustavi nisu bez izazova. Promjenjivost sunčevog zračenja, degradacija materijala kroz vrijeme, kao i potencijalni troškovi održavanja, faktori su koje treba uzeti u obzir prilikom planiranja i operativnog upravljanja sustavom. Stoga, strateško planiranje, redovito održavanje i nadzor rada elektrane ključni su za osiguravanje dugoročne stabilnosti i efikasnosti investicije.

Ovaj rad potvrđuje da su fotonaponske elektrane značajan korak prema održivom razvoju i smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima. Njihova isplativost, uz pravilno projektiranje i optimizaciju, čini ih atraktivnom opcijom za proizvođače energije, investitore i krajnje korisnike. Kroz daljnji razvoj tehnologije i smanjenje troškova, očekuje se da će fotonaponski sustavi igrati sve važniju ulogu u globalnoj energetskej tranziciji prema čistim i obnovljivim izvorima energije.

LITERATURA

- [1] D. Šljivac, D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek 2018.
- [2] Lj. Majdandžić: Fotonaponski sustavi, priručnik, Zagreb, 2010.
- [3] ABB Technical Application Papers No. 10 – Photovoltaic Plants, 2010., dostupno na : [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d54672ac6e97a439c12577ce003d8d84/\\$FILE/Vol.10.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/d54672ac6e97a439c12577ce003d8d84/$FILE/Vol.10.pdf) [posjećeno 10.7.2024.] [Mrežno]
- [4] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering, 2013.
- [5] A. Smets, K. Jager, I. Olindo, M. Zeman i R. Swaaij, Solar Energy : The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems, Cambridge, United Kingdom: UIT Cambridge LTD, 2016
- [6] PV Magazine USA, Anne Fischer : „DOE launches \$20 million consortium to advance US-made cadmium telluride solar cells“, 2022., dostupno na: <https://pv-magazine-usa.com/2022/08/02/doe-launches-20-million-consortium-to-advance-us-made-cadmium-telluride-solar-cells/> [posjećeno 15.8.2024.] [Mrežno]
- [7] DS New Energy : „Advantages And Disadvantages Of GaAs Solar Cells“, 2021., dostupno na : <https://www.dsnew.com/info/advantages-and-disadvantages-of-gaas-solar-cel-54235610.html> [posjećeno 15.8.2024.] [Mrežno]
- [8] Meteo-info : „Solarne elektrane“, 2021., dostupno na : https://www.meteo-info.hr/article/178/Solarne_elektrane [posjećeno 17.8.2024.] [Mrežno]
- [9] Florida's Premier Energy Research Center at the University of Central Florida: „Types of PV Systems“, 2022., dostupno na : <https://energyresearch.ucf.edu/consumer/solar-technologies/solar-electricity-basics/types-of-pv-systems/> [posjećeno 17.8.2024.] [Mrežno]
- [10] Chuanda-tech : „What you need to know monocrystalline and polycrystalline solar panels“, 2022., dostupno na : <https://hr.chuanda-tech.com/info/what-you-need-to-know-monocrystalline-and-poly-75534970.html> [posjećeno 19.8.2024.] [Mrežno]

- [11] HUAWEI forum: „Central inverters overview“, 2023., dostupno na : <https://forum.huawei.com/enterprise/en/string-inverters-overview/thread/667286306176253952-667213868771979264> [posjećeno 19.8.2024.] [Mrežno]
- [12] PV shop: „Fronius SYMO 10.0-3-M“,2024., dostupno na : <https://pvshop.eu/Fronius-Symo-10.0-3-M> [posjećeno 13.8.2024.] [Mrežno]
- [13] Alfancar.com : „Photovoltaic Solar (PV) Cables“, 2022., dostupno na : <https://www.alfancar.com/Solor-cables> [posjećeno 13.8.2024.] [Mrežno]
- [14] M. Žnidarec, Materijali sa predavanja iz kolegija Napredne elektroenergetske mreže, 2023./2024., “ Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek“.
- [15] DS New Energy : „Amorphous 5V Solar Cell“,2022., dostupno na : <https://hr.dsnsolar.com/charge-controller/solar-charger/amorphous-5v-solar-cell.html> [posjećeno 22.8.2024.] [Mrežno]
- [16] D. Šljivac, Materijali sa predavanja iz kolegija Obnovljivi izvori električne energije, 2022./2023., “ Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek“.

SAŽETAK

Ovaj rad bavi se detaljnim procesom projektiranja fotonaponske elektrane, uz analizu ključnih parametara koji utječu na njezinu učinkovitost i isplativost. U uvodnom dijelu rada predstavljene su osnovni koncepti vezani uz fotonaponske sustave, uključujući načelo rada fotonaponskih modula, razlike između različitih tipova sustava te važnost odabira kvalitetnih komponenti. Obrađeni su svi aspekti koji su važni za projektiranje, od izbora lokacije i orijentacije modula, preko tehničkih specifikacija, pa sve do ekonomske analize projekta.

Posebna pažnja posvećena je proračunu fotonaponske elektrane korištenjem softverskog alata PV SOL, koji omogućuje detaljnu simulaciju rada elektrane u različitim uvjetima. Korištenjem ovog alata izrađen je 3D model elektrane, što je omogućilo precizno određivanje optimalnih parametara sustava. Provedeni proračuni obuhvaćaju procjenu proizvodnje električne energije, analizu troškova instalacije i održavanja te izračun povrata investicije. Također, u radu su analizirani i utjecaji vanjskih faktora, poput klimatskih uvjeta i lokalne geografske konfiguracije, na ukupnu učinkovitost sustava.

Rezultati analize pokazali su da, uz pravilno planiranje i optimizaciju, fotonaponske elektrane mogu biti vrlo isplative, s razumnim razdobljem povrata investicije, čak i u uvjetima početno visokih ulaganja. Rad također naglašava važnost redovitog održavanja i praćenja sustava kako bi se osigurala dugoročna stabilnost i učinkovitost elektrane. Zaključeno je da fotonaponske elektrane predstavljaju značajan potencijal za doprinos energetske neovisnosti i održivosti, te da njihova integracija u energetske sustav može značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova i ovisnost o fosilnim gorivima. Rad stoga pruža cjelovit pregled svih važnih koraka i faktora koje treba uzeti u obzir prilikom projektiranja i implementacije fotonaponskih sustava.

Ključne riječi: Fotonaponski sustav, PV SOL premium, projektiranje fotonaponskog sustava, električna energija, analiza isplativosti

ABSTRACT

This paper deals with the detailed process of designing a photovoltaic power plant, along with an analysis of the key parameters that influence its efficiency and profitability. The introductory section presents the fundamental concepts related to photovoltaic systems, including the operating principles of solar modules, differences between various types of systems, and the importance of selecting high-quality components. The theoretical part covers all aspects crucial for the design, from the selection of location and module orientation to technical specifications and economic analysis of the project.

Special attention is given to the calculation of the photovoltaic power plant using the PV SOL software tool, which allows for a detailed simulation of the plant's operation under different conditions. Using this tool, a 3D model of the plant was created, enabling precise determination of the optimal system parameters. The calculations include estimates of electricity production, cost analysis of installation and maintenance, and the calculation of return on investment. Additionally, the paper analyzes the impact of external factors, such as climatic conditions and local geographical configuration, on the overall efficiency of the system.

The results of the analysis show that, with proper planning and optimization, photovoltaic power plants can be highly profitable, with a reasonable payback period even considering the initially high investments. The paper also emphasizes the importance of regular maintenance and monitoring to ensure the long-term stability and efficiency of the plant. It is concluded that photovoltaic power plants offer significant potential for contributing to energy independence and sustainability, and their integration into the energy system can substantially reduce greenhouse gas emissions and reliance on fossil fuels. Therefore, this paper provides a comprehensive overview of all the important steps and factors to consider when designing and implementing photovoltaic systems.

Keywords: Photovoltaic system, PV SOL premium, photovoltaic system design, electrical energy, profitability analysis

ŽIVOTOPIS

Autor ovog diplomskog rada, Krešimir Jurić, rođen je 27.7.2000. godine u Novoj Gradiški. Nakon završetka osnovne škole Mato Lovrak u Novoj Gradiški, upisuje Elektrotehničku i ekonomsku školu u Novoj Gradiški, smjer tehničar za računalstvo. Srednju školu završava 2019. godine te upisuje sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnike i informacijskih tehnologija na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, koji završava 2022. godine. Iste godine upisuje sveučilišni diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, modul DEA – Elektroenergetski sustavi.

PRILOZI

SOFAR 60K-80KTLX-G3

60 / 80 kW

THREE-PHASE SIX MPPTS



Product advantages

- Max. efficiency up to 98.7%
- Longtime 110% AC overload ability
- Type II SPD for both DC and AC side
- 6 MPPTs with 1.5 times DC overload
- Low start-up voltage, wide MPPT voltage range
- Compatible with 500 W+ PV modules
- I-V curve scanning function



Datasheet		SOFAR 60KTLX2-G3	SOFAR 80KTLX-G3
Input (DC)			
Max. input voltage		1100V	
Rated input voltage		620V	
Start-up voltage		200V	
MPPT operating voltage range		180V-1000V	
Number of MPPTs		6	
Number of DC inputs		2 for each MPPT	
Max. input MPPT current		6'40A	
Max. input short circuit current		6'60A	
Output (AC)			
Rated output power	60000W	80000W	
Max. apparent power	66000VA	88000VA	
Max. output current	100A	133.3A	
Rated output voltage		3/N/PE, 230/400Vac	
Output voltage range		310Vac-480Vac	
Rated output frequency		50/60Hz	
Output frequency range		45Hz-55Hz/55Hz-65Hz	
Active power adjustable range		0-100%	
THDI		<3%	
Power factor		1 (adjustable +/-0.8)	
Efficiency			
DC reverse polarity protection		Yes	
Anti-islanding protection		Yes	
Leakage current protection		Yes	
Ground fault monitoring		Yes	
PV-array string fault monitoring		Yes	
DC switch		Yes	
SPD		PV: type II, AC: type II	
General Data			
Ambient temperature range		-30 C --+60 C	
Self-consumption at night		<2W	
Topology		Transformerless	
Degree of protection		IP66	
Allowable relative humidity range		0-100%	
Max. operating altitude		4000m (>3000m derating)	
Cooling		Smart air cooling	
Dimension (W*H*D)		687*561*275mm	
Weight		50kg	
Display		LCD & Bluetooth +APP	
Communication		RS485/WIFI	
Standard		IEC/EN 61000-6-2/4 IEC 62116, IEC 61727, IEC 61683, IEC 60068-1/2/14/50, IEC/EN 62109-1/2 C99, VDE-AR-N 4105, VDE V 0126-1-1, CEI0-21, EN 50549-1, UNE 217002-2020	

*All specifications are subject to change without notice.

05 / 2021—V2

Product Specification

Electrical parameters at standard test conditions
(STC:AM=1.5, 1000W/m², Cells Temperature 25°C)

Typical type	440W	445W	450W
Max power(Pmax)	440	445	450
Max power voltage(Vmp)	40.8	40.9	41.0
Max power current(Imp)	10.78	10.88	10.98
Open circuit voltage (Voc)	49.6	49.7	49.8
Short circuit current (Isc)	11.34	11.45	11.56
Module Efficiency(%)	19.92	20.14	20.37
Max system voltage	DC 1500V(TUV) / DC 1000V(TUV)		
Maximum Series Fuse Rating	20A		

Mechanical Data

Item	Specification
Dimensions	2108x1048x40mm
Weight	24.2kgs
Front glass	3.2mm tempered glass
Output cables	4mm ²
	symmetrical lengths 1100mm
Connectors	MC4 compatible IP68
Cell type	Mono-Crystalline PERC Half-Cell
Number of cells	83mmx166mm
	144 cells

Temperature Characteristics

Item	Specification
Temp.Coeff.of Isc(TK Isc)	0.049%/°C
Temp.Coeff.of Voc(TK Voc)	-0.26%/°C
Temp.Coeff.of Pmax(TK Pmax)	-0.34%/°C
Operating temperature	-40~+85°C
Normal operating cell temperature	45±2°C

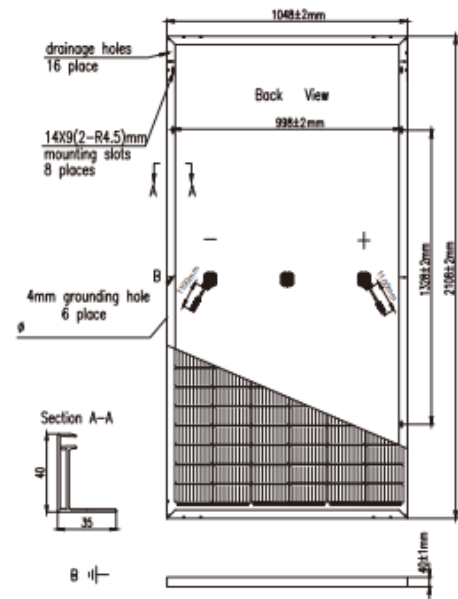
Packing Configuration

Item	Specification
Container	20'GP 40'GP 40'HQ
Pieces per pallet	54 54 58
Pallets per container	5 11 11
Pieces per container	270 594 638

Test, Certifications and Warranties

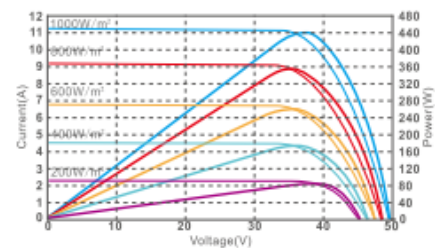
Item	Specification
Standard tests	IEC 61215, IEC 61730, EC 61701, IEC 62716, PPP 58042B
System certs	ISO 9001, ISO14001, ISO45001
Certifications	TUV, AMMONIA AND SALT MIST CORROSION, ANTI-PID, CE, WEEE, INMERTRO
Extreme wind and snow loads testing	Withstand extreme wind(2400 Pascal) and snow loads(5400 Pascal)
Power tolerance	0~+3%
Junction box	IP68
Warranties	12 years product warranty and 25 years 80% of power

Dimensions and Structure



I-V Curve

I-V characteristics at different irradiances



I-V characteristics at different temperature

