

Projektiranje FN sustava privatnog korisnika.

Knežević, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:200:276967>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**PROJEKTIRANJE FN SUSTAVA PRIVATNOG
KORISNIKA**

Diplomski rad

Marko Knežević

Osijek, 2022.

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Zadatak diplomskog rada | 2 |
| 2. PREGLED LITERATURE | 3 |
| 3. TEORIJA I DEFINICIJE | 4 |
| 3.1. Energija Sunca | 4 |
| 3.2. Fotonaponska ćelija | 6 |
| 3.3. Fotonaponski efekt | 8 |
| 3.4. Fotonaponski moduli | 10 |
| 4. FOTONAPONSKI SUSTAV I KOMPONENTE | 11 |
| 4.1. Samostojeći fotonaponski sustavi | 11 |
| 4.2. Mrežni fotonaponski sustavi | 12 |
| 4.3. Baterije | 14 |
| 4.4. Regulatori napajanja | 15 |
| 4.5. Izmjenjivači | 17 |
| 4.5.1. Baterijski inverter | 18 |
| 4.5.2. Hibridni inverter | 19 |
| 5. POVLAŠTENI PROIZVOĐAČ | 21 |
| 5.1. Korisnik postrojenja za samoopskrbu | 22 |
| 5.2. Krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom | 23 |
| 5.3. Priključivanje povlaštenog proizvođača | 24 |
| 6. PROJEKTIRANJE FOTONAPONSKOG SUSTAVA | 25 |
| 6.1. PV SOL premium | 25 |
| 6.2. Odabir panela | 27 |
| 6.3. Odabir izmjenjivača | 30 |
| 6.4. Odabir baterije | 31 |
| 6.5. Dizajn i 3D vizualizacija | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 6.6. Shema fotonaponskog sustava | 34 |
| 6.7. Rezultati simulacije..... | 35 |
| 7. ANALIZA REZULTATA I ISPLATIVOSTI..... | 37 |
| 7.1. Troškovnik..... | 37 |
| 7.2. Poticaji | 38 |
| 7.3. Procjena isplativosti..... | 39 |
| 7.4. Prednosti i nedostaci fotonaponskog sustava | 42 |
| 8. ZAKLJUČAK..... | 43 |
| LITERATURA | 44 |
| ŽIVOTOPIS..... | 47 |

1. UVOD

Razvojem društva i tehnologije svakim danom je potrebno sve više energije kako bi se napajali strojevi, elektronika, rasvjeta, mobiteli i bezbroj drugih uređaja koji se svakodnevno koriste. Električna energija, na prvi pogled, izgleda potpuno čisto jer je potrebno samo uključiti uređaj u utičnicu i on radi bez dima i drugih onečišćenja, ali u stvari je potpuno suprotno. Električna energija proizvodi se uz mnogo negativnih posljedica za okoliš i ljude. Velike termoelektrane koje svakodnevno „gutaju“ tone uglja i plina te nuklearne elektrane koje ostavljaju radioaktivni otpad za koji će morati brinuti stotine generacija trenutno su osnova proizvodnje električne energije. Elektrane koje pogone vjetar i voda na prvi pogled izgledaju savršeno, ali i ta proizvodnja negativno utječe na biljni i životinjski svijet.

Električna energija je svakodnevno potrebna i ne postoji mogućnost značajnog smanjenja potrošnje, ali postoji mogućnost da se proizvodi uz minimalne posljedice izgradnjom fotonaponskih sustava. Svijet se sve više okreće Suncu kao izvoru energije i grade se solarne elektrane i fotonaponski sustavi raznih veličina pa sve to ulijeva nadu da će se smanjiti postotak električne energije proizvedene na načine koji uveliko štete okolišu i ljudima.

Nuklearna fuzija na površini Sunca, za ljudsko poimanje vremena, je beskrajn izvor energije i najbolji način za uštedu i očuvanje okoliša. Na površinu Zemlje svakodnevno dolazi ogromna količina energije, a fotonaponski sustavi izravno pretvaraju jedan dio te energije u električnu energiju. Ovaj diplomski rad opisuje male fotonaponske elektrane koje privatni korisnici mogu instalirati na svojim krovovima ili posjedima te tako postići značajnu uštedu, ali i biti dio nastojanja proizvodnje čiste i obnovljive energije.

Rad se sastoji iz šest cjelina koje detaljno opisuju što je fotonapon i kako funkcionira pretvorba energije Sunca u električnu energiju, prednosti i nedostatke fotonaponskog sustava, zakonske odredbe, proračune te analizu isplativosti. Diplomski rad u cijelosti sadrži sve podatke za instalaciju privatne fotonaponske elektrane prikazane na primjeru jedne kuće na području Osijeka.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak diplomskog rada je projektiranje male fotonaponske elektrane na krovu kuće privatnog korisnika na području Osijeka. Rad uključuje teorijski uvod i upoznavanje o fotonaponu te analizu dobivenih rezultata i isplativosti. Rad je podijeljen u šest cjelina:

1. Pregled literature
2. Teorija i definicije
3. Fotonaponski sustav i komponente
4. Povlašteni proizvođač
5. Projektiranje fotonaponskog sustava
6. Analiza rezultata i isplativosti

2. PREGLED LITERATURE

Uvod u solarnu energiju i fotonapon temeljen je na literaturi [1, 2] koja sadrži osnovne podatke o fotonaponskim sustavima, energiji Sunca, fotonaponskoj ćeliji i modulima. Podatci o insolaciji za područje Republike Hrvatske i ostalih država Europske Unije pronađeni su u literaturi [3].

Informacije o fotonaponskim sustavima i njihovim komponentama, odabiru tih komponenti i njihovim prednostima i manama pružila je literatura [2, 4, 5] koja sadrži sve potrebne informacije za instalaciju ovih sustava.

Detaljan uvid u pojedine komponente fotonaponskog sustava i princip njihovog rada kao što je punjenje baterija putem regulatora punjenja, odabir baterija ovisno o aplikaciji, odabiru invertera i razlikama između pojedinih skupina invertera pružila je literatura [2, 5].

Upoznavanje s projektiranjem fotonaponskih sustava u programskom paketu PV SOL osigurala je literatura [6], a zakonske odredbe kao što su status povlaštenog proizvođača te kategorije samoopskrbe i krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom uz primjere računa za navedene kategorije literatura [7, 8].

3. TEORIJA I DEFINICIJE

Proizvodnja električne energije predstavlja veliki izazov u današnjem razvijenom društvu. Većinom se proizvodi u elektranama velikih instaliranih snaga, ali u posljednje vrijeme sve više električne energije dolazi iz malih, privatnih fotonaponskih sustava. Solarna energija predstavlja jedan od načina proizvodnje čiste energije i sve razvijene zemlje ulažu u ovo područje. Fotonaponske elektrane su najjednostavniji i najpovoljniji način iskorištavanja energije Sunca i ovaj rad se temelji na projektiranju i izgradnji malih elektrana koje, na krovovima objekata, pretvaraju sunčevo zračenje u korisnu, električnu energiju. .

3.1. Energija Sunca

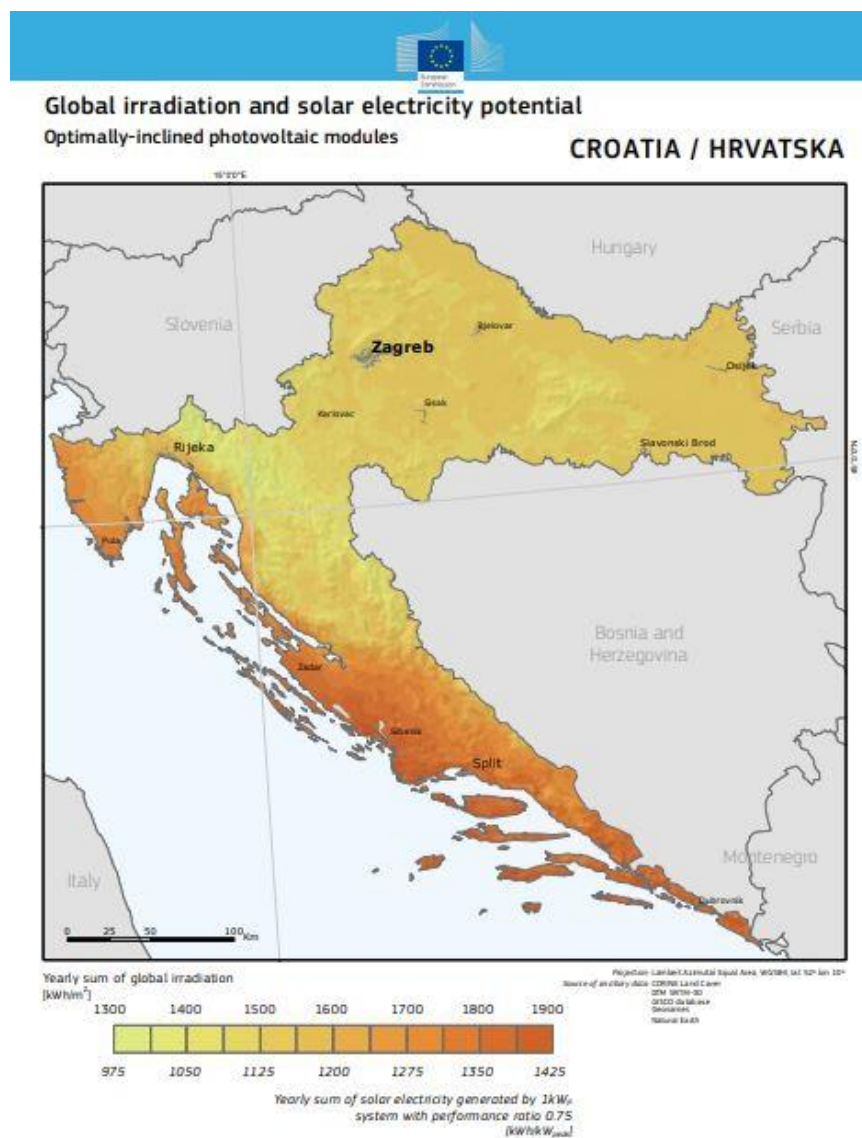
Sunce je zvijezda u kojoj se događa reakcija nuklearne fuzije pri čemu dolazi do spajanja četiri jezgre vodika u jezgru helija uz oslobađanje velike količine energije. Mali dio te energije, koja se neprestano oslobađa na površini Sunca, dolazi na površinu Zemlje i izvor je gotovo svih drugih oblika energije. Svakodnevno se „besplatno“ dobiva toliko energije da ju ni današnja nezasitna tehnologija ne bi mogla potrošiti, samo je pitanje kako ju „uhvatiti“ i koristiti kada je potrebna. Potrebno je jako puno energenata da se ugrije samo jedna kuća tijekom sezone grijanja. Nameće se pitanje koliko onda energije dolazi od Sunca kad uspije zagrijati cijelu površinu Zemlje.

Količina sunčevog zračenja nije jednaka na svim dijelovima Zemlje i ovisi o mnogo faktora. Najvažniji je geografski položaj koji određuje količinu sunčanih sati, kut upada svjetlosti te klimu koja može uveliko utjecati na proizvodnju električne energije. Solarni paneli „ne vole“ oblačno vrijeme i kišu, ali ni previsoke temperature koje smanjuju efikasnost pretvorbe. Pogrešno je razmišljati da je proizvodnja moguća samo u savršenim uvjetima jer se sve više proizvode solarne ćelije koje imaju visoku efikasnost i prilikom oblačnog vremena i ostalih nepovoljnih uvjeta. Njemačka ima značajno lošije uvjete nego primjerice Španjolska, a unatoč tome je vodeća zemlja Europske unije u proizvodnji električne energije iz fotonapona sa gotovo 60 *GWp* instaliranih fotonaponskih sustava. [9] Ujedinjeno Kraljevstvo je područje neprestane kiše i oblačnog vremena, ali ima oko 13 *GWp* instaliranih fotonaponskih sustava. [9]

Ukoliko ove napredne zemlje ulažu u fotonapon, unatoč lošijim uvjetima, to je alarm da zemlje poput Hrvatske moraju krenuti u tom pravcu. Postavlja se pitanje koliko je pametno spaljivati fosilna goriva, pregrađivati rijeke ili graditi nuklearne elektrane kad postoje tako povoljni uvjeti za korištenje „besplatne“ energije Sunca. S druge strane nerealno je zamišljati kako se cjelokupne energetske potrebe Hrvatske i svijeta mogu zadovoljiti iz fotonaponskih sustava jer i oni imaju

svoje mane i ograničenja, ali to je nedovoljno iskorišten potencijal. Potrebno je više edukacije kako bi se pojedinci zainteresirali za ulaganje u proizvodnju električne energije. Postoji tako puno neiskorištenih krovova obiteljskih kuća i ostalih objekata koji bi mogli „nositi“ tisuće fotonaponskih modula i tako uveliko doprinijeti proizvodnji čiste i povoljnije energije.

Republika Hrvatska se nalazi na izrazito povoljnom položaju za iskorištavanje solarne energije s prosječnom godišnjom insolacijom od oko 1400 kWh/m^2 . [3] Najpovoljnije je područje Dalmacije, ali i kontinentalna Hrvatska i područje Osijeka imaju veliki potencijal kao što se može vidjeti na slici 3.1.



Slika 3.1 Insolacija na području Hrvatske [3]

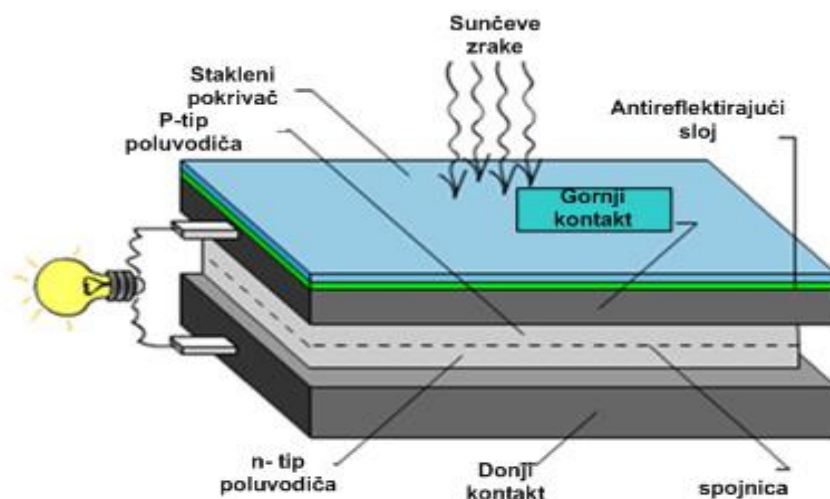
3.2. Fotonaponska ćelija

Fotonaponska ćelija je komponenta u kojoj se događa pretvorba sunčevog zračenja u električnu energiju. Građa i princip rada slični su PN diodama. Osnovni materijal koji tvori fotonaponske ćelije je silicij. To je izrazito zastupljen i dostupan materijal odličnih poluvodičkih svojstava. Četiri valentna elektrona grade čvrste veze i u normalnim uvjetima silicij ima izrazito lošu vodljivost i djelovanjem sunčeve svjetlosti elektroni bi ostali na svojim mjestima.

Fotonaponska ćelija nastaje dodavanjem primjesa kristalima silicija pri čemu se stvaraju dva sloja koja imaju različita svojstva. Gornjem sloju dodaju se peterovalentne primjese koje imaju pet elektrona i prilikom spoja sa atomima silicija jedan elektron peterovalentne primjese ostaje bez čvrste veze i lako se oslobodi. Ovaj sloj naziva se N sloj. Drugi dio silicija dobiva trovalentne primjese koje imaju jedan elektron manje i nastaje jedna slaba veza koja nastoji privući elektron. To je P sloj koji sadrži „rupe“, odnosno upražnjena mjesta u kovalentnim vezama atoma silicija i trovalentne primjese koje nastoje privući elektron i postići čvrstu vezu. Na mjestu dodira ova dva sloja stvara se neutralna zona. Slabo vezani elektroni iz N sloja, privučeni prazninama u P sloju, „otkidaju“ se i popunjavaju upražnjene veze. Nakon toga gornji sloj, zbog nedostatka elektrona postaje pozitivno nabijen, a donji negativno. Stvara se električno polje i potencionalna barijera koja ne dozvoljava daljnju rekombinaciju P i N sloja. Velika prednost ovih komponenti je u činjenici da je osnovni materijal silicij koji se dobiva preradom pijeska. Može se reći da postoje neiscrpe zalihe osnovnog materijala za građu fotonaponskih sustava. [2]

Načelo rada fotonaponskih ćelija otkrio je francuski fizičar A.E. Becquerel. Nakon toga dogodila su se brojna unaprjeđenja pa se otkriće ne može pripisati samo jednom čovjeku. Bell Labs je 1950. kreirao tehnologiju koja se koristila u svemiru i bila je izrazito skupa. Nakon toga je dolazilo do stalnih unaprjeđenja pa se fotonaponska tehnologija počela koristiti za napajanje uređaja za komunikaciju u udaljenim mjestima. Nakon niza unaprjeđenja, kroz naredna dva desetljeća, došlo je do pada cijene i korištenja ove tehnologije u privatne svrhe. U početku su se fotonaponske ćelije koristile za punjenje baterija i napajanje u mjestima gdje nije bilo priključka električne energije kao što su vikendice, kamperske kućice i razna odmarališta. [2]

Danas je to razvijena tehnologija koja se koristi kao izvor električne energije u elektroenergetskim sustavima. Osim P i N sloja fotonaponska ćelija ima još nekoliko slojeva koji omogućavaju funkcioniranje. Mogu se vidjeti na slici 3.2.



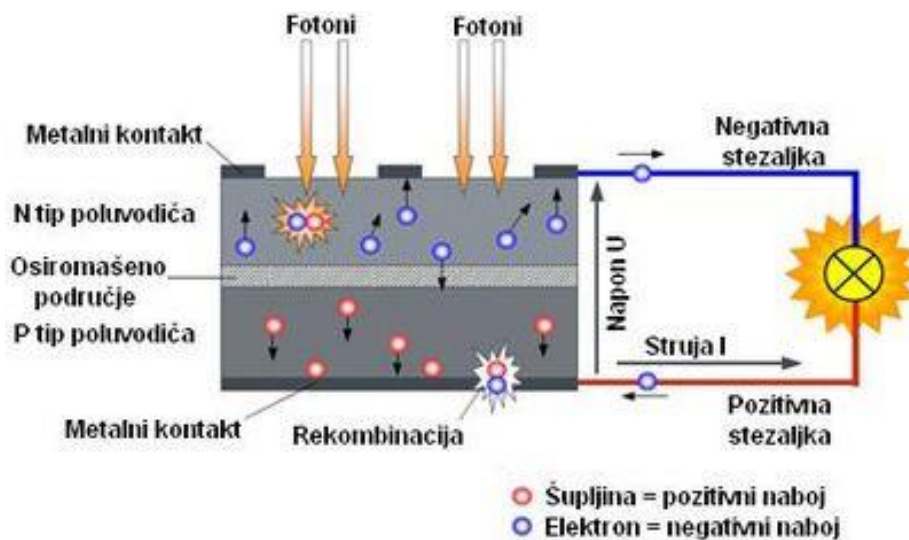
Slika 3.2 Fotonaponska ćelija [10]

Sloj stakla nalazi se na površini i ima ulogu mehaničke zaštite, a zbog svojih svojstava propušta preko 95% sunčevog zračenja. Štiti ćelije od mehaničkih oštećenja i nepovoljnih vremenskih uvjeta kao što je tuča ili snažna kiša. Drugi sloj se naziva antireflekcijskim jer osigurava „zarobljavanje“ sunčevih zraka koje bi se inače odbile od svijetlog silicija. To bi prouzročilo značajne gubitke i smanjilo efikasnost. Treći sloj je vodič u obliku mreže koji služi za vođenje elektrona. Tijekom fotonaponskog efekta elektroni se „nakupljaju“ na kraju N sloja i dolaze u metalni vodič kojim se usmjeravaju prema nekoj vrsti trošila. Oblik mreže osigurava propusnost svjetlosti uz dobru vodljivost elektrona. Naredna dva sloja su N i P sloj, a ispod njih postoji sloj vodiča koje je pločast kako bi se smanjio otpor i povećala kontaktna površina s P slojem poluvodiča, a ima ulogu „povratka“ elektrona koje je fotonaponski efekt odgurno u N sloj iz neutralne zone. Metalni vodič koji se nalazi na dnu ćelije nije mrežastog oblika jer kroz njega ne prolazi svjetlost. [5]

Primjese koje se dodaju siliciju, kroz postupak koji se naziva dopiranje, najčešće su bor i fosfor. Njihova svojstva i dostupnost ih čine najpovoljnijim elementima iz svoje skupine u periodnom sustavu elemenata. Osnovni kriterij za ove elemente je broj valentnih elektrona, ali uz to važni su i drugi kriteriji kao što je cijena ili toksičnost.

3.3. Fotonaponski efekt

Dodavanjem različitih primjesa kristalima silicija dobiju se dva sloja koja omogućavaju pretvorbu sunčevog zračenja u električnu energiju. Pretvorba je jednostavno „usmjereno gibanje elektrona“ unutar kristala silicija. Ovaj proces omogućava proizvodnju sve većih količina energije te uveliko sudjeluje u proizvodnji čiste električne energije. Proces se naziva fotonaponski efekt, a prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Fotonaponski efekt [1]

Sunčevo zračenje dolazi do površine fotonaponske ćelije, prolazi kroz staklo i antirefleksijski sloj te djeluje na neutralnu zonu stvorenu na granici P i N sloja silicijevog poluvodiča. Svjetlost izaziva titranje elektrona koji se oslobađaju iz svojih veza i u neutralnoj zoni stvaraju se slobodni elektroni i praznine. Brzina generiranja ovisi o jakosti i kutu upada sunčevog zračenja. Električno polje „gura“ elektrone u N sloj, a šupljine u P sloj. Stvara se značajna razlika potencijala na metalnim kontaktima koji se nalaze na krajevima ova dva sloja. Spajanjem trošila poteče istosmjerna električna struja.

Prilikom izrade solarnih ćelija debljina P i N sloja nije jednaka. Svjetlost mora proći kroz N sloj kako bi djelovala na neutralnu zonu i poželjno je da je ovaj sloj što tanji kako bi se smanjili gubitci energije fotona. N sloj se znatno više obogati primjesama kako bi se stvorila što šira neutralna zona pri čemu se povećava efikasnost ćelije.

Kvantna fizika objašnjava dualni karakter svjetlosti za koju kaže da je val, ali ujedno i skup čestica. Te čestice se nazivaju fotoni, a gibaju se brzinom svjetlosti. Nemaju masu i njihova energija ovisi o frekvenciji odnosno o valnoj duljini, a računa se prema sljedećoj relaciji:

$$E = h \cdot \nu$$

gdje je:

E – energija fotona (eV)

h – Planckova konstanta

ν – frekvencija fotona (Hz)

Fotoni djeluju na neutralnu zonu unutar fotonaponskih ćelija i predaju svoju energiju pri čemu dolazi do stvaranje slobodnih elektrona i šupljina. Ovaj efekt opisao je Elbert Einstein u svojoj kvantnoj teoriji i za to dobio Nobelovu nagradu. Otkriće za koje ne postoji dovoljna nagrada jer omogućava proizvodnju električne energije koristeći sunčevo zračenje i silicij, gotovo nepresušne sastavnice fotonaponskog efekta.

Djelovanjem sunčevog zračenja i neprestanom rekombinacijom elektrona dolazi do smanjivanja efikasnosti pretvorbe i propadanja silicija. Ovaj proces oštećenja je jako spor i solarni paneli većinom imaju garanciju od 25 godina s efikasnosti iznad 80%. Ne samo da je materijal za izradu jeftin i dostupan već ima i jako dug vijek trajanja. Efikasnost panela je u prosjeku 20%, ali zbog velike količine energije koja dolazi na površinu Zemlje i to je više nego dovoljno da bi ulaganje bilo isplativo. U novije vrijeme provode se istraživanja s novim tehnologijama i postignuti su zapanjujući rezultati. Znanstvenici s instituta National Renewable Energy Laboratory u SADu oborili su rekord u efikasnosti panela i u stvarnim i u laboratoriskim uvjetima. U laboratoriju je izmjerena efikasnost od 47,1%, a pri stvarnom svjetlu 39,2%. Ta nova tehnologija ima čak 140 slojeva od kojih svaki upija različite valne duljine svjetlosti. [11] Trenutno su ti novi paneli jako skupi i koriste se samo u svemiru, ali i paneli koji se trenutno koriste su nekad bili skupi i neisplativi. Ovi rezultati pokazuju da je napredak u fotonaponu samo pitanje vremena i da ova tehnologija ima budućnost.

3.4. Fotonaponski moduli

Fotonaponske ćelije su malih dimenzija i proizvode napon od oko 0.6 V. U većini slučajeva to nije dovoljno jer svi ozbiljniji potrošači zahtijevaju minimalno 12V. Primjer su baterije, izmjenjivači i većina direktnih potrošača kao što su grijači ili istosmjerni motori. Jednostavnom kombinacijom, odnosno spajanjem u serije i paralele, dobiju se sklopovi željene snage koji se nazivaju fotonaponski moduli.

Veličina modula određena je aplikacijama za koje se koriste pa tako danas postoje moduli raznih veličina, odnosno snaga. Mogu se vidjeti svakodnevno, od malih fotonaponskih ćelija u digitronima do velikih modula koji prekrivaju cijela polja i krovove objekata. Moduli srednjih veličina mogu se vidjeti uz prometne znakove gdje se koriste za napajanje svjetlosne signalizacije.

Velika prednost fotonaponskih sustava je što se vrlo jednostavno kombiniraju pri čemu se postiže željena snaga. Drugi izvori energije ne mogu se tako lako „povećati“. Hidroelektrana je ovisna o količini vode, termoelektrana o dostupnosti goriva i zakonskim odredbama. Fotonaponska elektrana jednostavno se proširi dodavanjem fotonaponskih ćelija, odnosno modula.



Slika 3.4. Fotonaponski moduli [12]

4. FOTONAPONSKI SUSTAV I KOMPONENTE

U prethodnom poglavlju objašnjeno je kako se od nuklearne fuzije, koja se odvija u Suncu, dobije električna energija. Fotonaponske ćelije, odnosno moduli, su najvažnija komponenta u proizvodnji električne energije djelovanjem sunčevog zračenja, ali bez drugih komponenata to je samo lijepa zamisao. Sunce nije kotao termoelektre ili reaktor nuklearnih elektrana koji se može „naložiti“ po želji. Zračenje se neprestano mijenja, a noću ga uopće i nema. To je prvi i najveći problem fotonaponskih sustava. Drugi problem predstavlja istosmjerna struja koja se može koristiti samo u ograničenom broju trošila, a i to nije moguće bez dodatne opreme.

Zbog toga postoji nekoliko komponenata koje se neizostavno vežu uz module i tvore fotonaponske sustave. Osnovna zadaća tih sustava je da nadomjeste nedostatke fotonapona i učine ga kvalitetnim i pouzdanim izvorom električne energije. Fotonaponski moduli su „izvor“ električne energije, ali bez ostalih komponenata ne postoji mogućnost značajnog iskorištavanja te energije. Ti neizostavni dijelovi fotonaponskih sustava su: izmjenjivači, baterije, regulatori napajanja i druga elektronička oprema koja je mozak ovih sustava. Detaljnije o ovim komponentama i načinu njihovog odabira u nastavku.

Postoje dvije osnovne skupine fotonaponskih sustava koje se dijele na osnovu pohrane proizvedene električne energije, a to su samostojeći i mrežni fotonaponski sustavi.

4.1. Samostojeći fotonaponski sustavi

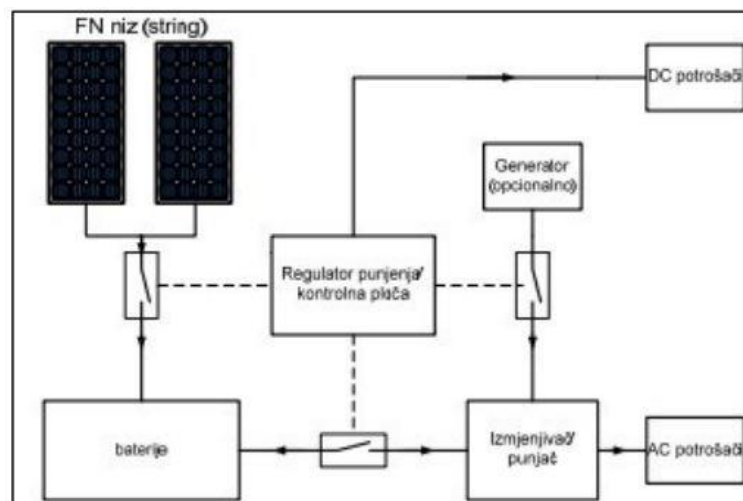
Nazivaju se još i autonomni, a često se spominje i engleski naziv *off grid*. Osnovni problem s kojim se suočavaju inženjeri elektrotehnike, koji se bave fotonaponskim sustavima, je pohrana proizvedene električne energije. Kod ovih sustava energija se pohranjuje u baterijama i sustavi su neovisni o mreži, odakle i potječe naziv samostalni, autonomni.

Moduli vrše pretvorbu i električna energija se pohranjuje u baterije, a punjenje kontroliraju BMS (*Battery Management System*) uređaji. To su elektroničke komponente koje sprječavaju prepunjavanje i preduboko pražnjenje baterija i tako im produžavaju životni vijek. U baterijama se pohranjuje istosmjerna električna energija koja se zatim preko BMSa spaja na izmjenjivač. Većina uređaja koristi izmjeničnu struju, koja se ne može pohraniti u baterijama, i zbog toga je ovaj uređaj neizostavan u svim fotonaponskim sustavima.

Zadatak ovih sustava je potpuna opskrba električnom energijom. Zbog toga moraju uključivati baterije koje spremaju energiju i omogućavaju napajanje i u uvjetima odsutnosti sunčevog

zračenja. Ovo je ujedno i najveći nedostatak *off grid* sustava jer baterije imaju visoku cijenu i kratak vijek trajanja i prikladni su za područja koja nemaju energetska mrežu kao što su udaljene vikendice i odmarališta u kojima se povremeno boravi. Ovaj sustav nije isplativ ukoliko objekt ima priključak struje i ako se u njemu živi tijekom cijele godine.

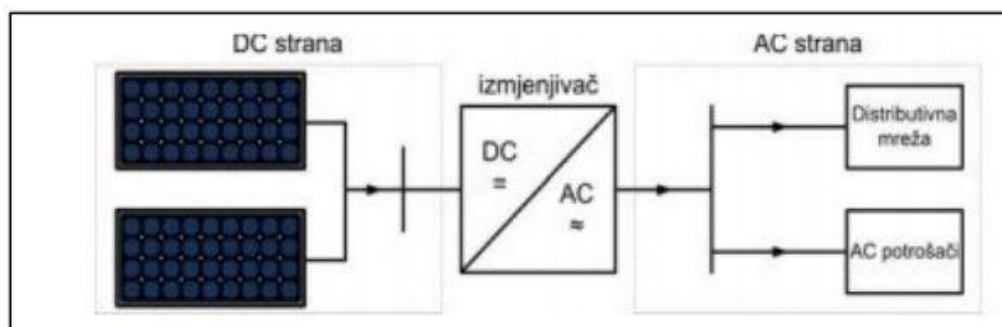
Na slici 4.1. može se vidjeti kako izgleda *off grid* sustav sa svim komponentama. Fotonaponski moduli su spojeni na baterije, a punjenje i pražnjenje kontroliraju regulatori punjenja. Na baterije je spojen izmjenjivač preko kojeg se napajaju AC potrošači. Često uključuju i agregate na fosilna goriva kako bi se osigurala električna energija i u uvjetima nedovoljne proizvodnje iz fotonapona. Za ovaj diplomski rad važnija je druga vrsta fotonaponskih sustava, koja ne koristi baterije kao glavni medij za spremanje energije, a to su *on grid* sustavi.



Slika 4.1 *Off grid* sustav [1]

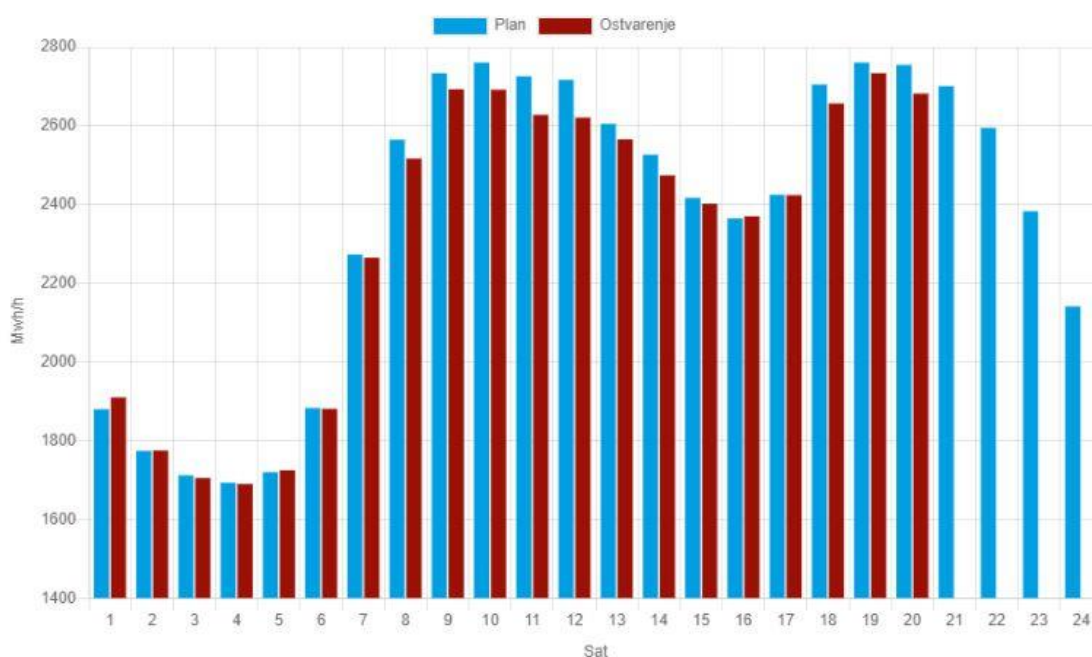
4.2. Mrežni fotonaponski sustavi

Poznatiji su po engleskom nazivu *on grid* i čvrsto su vezani za mrežu. To su sustavi koji kao spremnik energije koriste elektroenergetsku mrežu. Osnovni zakon elektroenergetskog sustava govori da proizvodnja u svakom trenutku mora odgovarati potrošnji uvećanoj za neizbježne gubitke. [4] Mreža zapravo nije spremnik energije već samo medij kojim se električna energija prenosi od izvora do potrošača. Zbog toga je upravljanje proizvodnjom električne energije složen i jako važan posao o kojem ovisi kvaliteta električne energije i samo funkcioniranje elektroenergetskih sustava. Na slici 4.2 može se vidjeti kako izgleda *on grid* sustav sa svim komponentama. Za razliku od *off grid* sustava *on grid* sustavi se sastoje od fotonaponskih modula spojenih na izmjenjivač preko kojeg se izmjenična električna energija šalje potrošačima ili mreži.



Slika 4.2 On grid fotonaponski sustav [1]

Krivulja koja pokazuje kako se potrošnja mijenja tijekom dana naziva se dnevni dijagram opterećenja. Iz ove krivulje jasno je vidljivo da se energija troši kad je potrebna, a ne onda kad postoji dovoljno sunčevog zračenja i dolazi se do zaključka da ne postoji mogućnost da privatni korisnik ima neku vrstu mikrosustava gdje će paneli proizvoditi onoliko energije koliko je korisniku u tom trenutku potrebno. Dnevni dijagram opterećenja za jedan dan u veljači 2022. godine u Republici Hrvatskoj može se vidjeti na slici 4.3.



Slika 4.3 Dnevni dijagram opterećenja [13]

Zbog toga on grid sustavi funkcioniraju na način da većinu proizvodnje predaju mreži i služe kao jako mali proizvođači energije koje dispečeri, odnosno inženjeri, računaju kao temeljne proizvođače. Temeljni proizvođači su oni koji neprekidno daju energiju u elektroenergetski sustav i pokrivaju temeljni dio dnevnog dijagrama opterećenja.

Fotonapon nije temeljni proizvođač kao primjerice nuklearne elektrane, ali cjelokupna proizvodnja fotonaponskih sustava se „uzima“ u mrežu pa se mogu nazvati jednom vrstom temeljnih elektrana. Sustavi funkcioniraju tako da višak energije privatnog korisnika troše potrošači koji u tom trenutku trebaju energiju. Privatni korisnik uzima energiju iz mreže kad mu je potrebna i postiže se jedna ravnoteža koja izbacuje velika ulaganja u baterije kao kod autonomnih sustava. Dvosmjerno brojilo bilježi predanu i preuzetu energiju iz mreže te se vrši naknada prema ugovoru i zakonu o otkupu električne energije.

Ovi sustavi zahtijevaju dozvolu i suglasnost elektroprivrede koja posjeduje mrežu. Izmjenjivači, koji pretvaraju istosmjernu električnu energiju u izmjeničnu, skloni su stvaranju harmonika koji su problematični u mreži i stvaraju „prvljavu“ električnu energiju. Zbog toga je ovo posao za stručne ljude koji imaju znanje i iskustvo za instalaciju sustava koji neće imati posljedice na elektroenergetsku mrežu i ostale potrošače.

4.3. Baterije

Pohrana energije je jedan od vodećih problema u elektroenergetskom sustavu. Proizvodnja električne energije uveliko ovisi o dobu dana, godišnjem dobu, vremenskim uvjetima i mnogim drugim čimbenicima. To je posebno izraženo u fotonaponskim sustavima, koji potpuno ovise o vremenu. Postoji nekoliko načina za pohranu energije, ali za privatne korisnike najbolji izbor su baterije. Iako imaju svoju negativnu stranu to je i dalje najbolji i najpovoljniji izbor.

Ukoliko se koristi *off grid* fotonaponski sustav baterije su neizostavna komponenta. Služe za pohranu energije koju proizvode moduli, a zatim ju predaju korisniku po potrebi. Elektroenergetska mreža je jako složen sustav i mnogo toga može uzrokovati kratkotrajne prekide napajanja. Ukoliko se želi postići potpuna neovisnost o mreži i mogućim ispadima potrebno je osigurati određenu rezervu u vidu baterija. Postoji mogućnost pohrane električne energije u razdobljima dana s nižom tarifom koja se zatim koristi tijekom razdoblja više tarife. Na ovaj način se postiže dodatna ušteda, ali i djeluje pozitivno na opterećenje elektroenergetskog sustava.

Solarni moduli proizvode električnu energiju i prvo napune zalihu, a zatim višak energije predaju u mrežu. Na ovaj način osigurana je određena rezerva u slučaju prekida napajanja. Rezerva električne energije iznimno je važna u ustanovama poput bolnica u kojima ne smije doći do prekida napajanja. Agregati zahtijevaju određeno vrijeme za zalet dok baterije djeluju gotovo trenutno.

Na tržištu postoji nekoliko vrsta baterija koje se temelje na različitim tehnologijama i materijalima. Svaka od njih ima svoje prednosti i mane pa se različite tehnologije koriste u različitim

aplikacijama. Za spremanje energije u fotonaponskim sustavima trenutno su najbolje LFP (LiFePO₄ – litij-željezo-fosfat) baterije. Nedostatak ove tehnologije je veća masa pa se ne koriste u mobitelima i uređajima gdje je volumen baterije jako važan faktor. LFP baterije zauzimaju nešto više prostora, ali daju bolje karakteristike od litijskih baterija koje koristimo u mobitelima. [5] Na slici 4.4 može se vidjeti usporedba olovnih i LFP baterija.



Slika 4.4 Usporedba dvije vrste baterija [14]

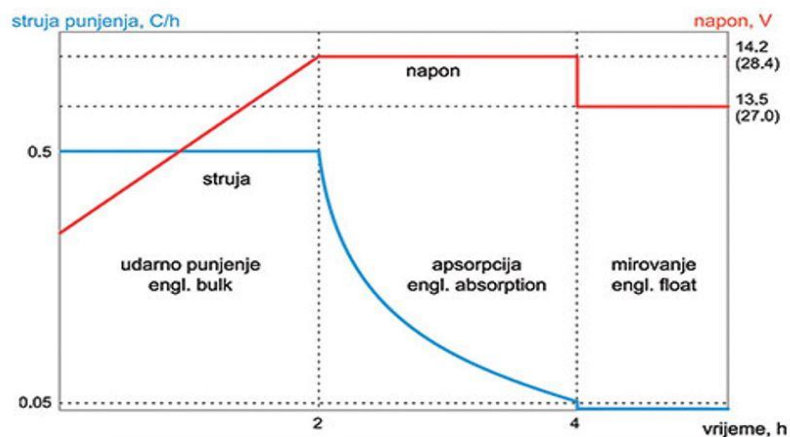
LFP tehnologija ima dva do četiri puta veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja u odnosu na olovne baterije, a prilikom pražnjenja može predati gotovu svu svoju energiju bez oštećenja članaka. Baterije se, kao i fotonaponske ćelije, jednostavno slažu u serije i paralele kako bi se dobio željeni napon i kapacitet. Energija se pohranjuje u istom obliku u kojem se proizvodi pa ne postoje značajniji gubici. Iako postoji mnogo prostora za napredak, LFP tehnologija je odličan izbor za pohranu u fotonaponskim sustavima. [14]

4.4. Regulatori napajanja

Kao što govori sam naziv ovi uređaji imaju upravljačku ulogu. To su elektroničke komponente koje čine „mozak“ u procesu punjenja i pražnjenja baterija. Proces proizvodnje električne energije odvija se sve dok ima dovoljno sunčevog zračenja i fotonaponski moduli proizvedenu energiju odmah šalju u baterije. Problem je što baterije nisu neograničeni spremnici energije i u jednom trenutku je potrebno zaustaviti punjenje sve dok baterije ne potroše dio energije. Bez regulatora

punjenja fotonaponski moduli bi mogli svu svoju energiju predati baterijama, bez obzira na njihove potrebe. S vremenom bi došlo do trajnog oštećenja baterija, ali i opasnosti od požara i eksplozija.

Struja i napon prilikom punjenja ovise o vrsti i izvedbi baterije i potrebno je osigurati da je regulator usklađen s baterijama na koje je povezan. Unatoč malim razlikama sve baterije imaju tri stupnja punjenja koji se mogu vidjeti na slici 4.5.



Slika 4.5 Krivulja punjenja baterije [2]

Prilikom punjenja baterija koje se nalaze u mobitelima može se primjetiti da se punjenje odvija različitom brzinom. Na početku se odvija znatno brže nego prilikom završnog punjenja kapaciteta. To se može vidjeti i na dijagramu koji prikazuje tri faze punjenja. Prva faza se odvija kad je baterija prazna pri čemu povlači maksimalnu dozvoljenu struju koja je definirana prilikom izrade baterije. Na dijagramu se može vidjeti kako napon raste uz maksimalnu struju sve do određene točke kad struja naglo pada, a napon ostaje isti. U tom trenutku počinje druga faza punjenja koja obuhvaća oko 20% kapaciteta. Dijagram prikazuje da se struja postupno smanjuje kako se baterija puni i na kraju dostigne određenu nisku vrijedost koja je konstantna. Tu počinje treća faza punjenja koja zapravo omogućava da baterija ostane puna. [5]

Bez regulatora punjenja struja, koja ulazi u bateriju, bi uvijek bila maksimalna i ne bi imali ove tri faze. Nakon prve faze baterija ne bi mogla prihvatiti tako visoku struju i došlo bi do zagrijavanja i trajnog oštećenja baterije. Osim uloge punjenja regulatori često štite baterije i od previsokih struja pražnjenja. Trošila povuku struju koja im je potrebna, a to može oštetiti bateriju. Regulatori su komponente koje štite baterije i omogućavaju rad fotonaponskih sustava.

U *on grid* sustavima može doći do slučaja da fotonaponski moduli ne mogu potpuno napuniti baterije. Ukoliko dođe do dugotrajnog oblačnog vremena ili obilnih padalina na module ne dolazi dovoljno zračenja i u tom slučaju baterije se dopune električnom energijom iz mreže. Na ovaj

način uvijek postoji određena zaliha koja „spremno čeka“ ispad u mreži i omogućava potpunu sigurnost i konstantno napajanje. Može se vidjeti da je ovo složen sustav koji ne bi mogao funkcionirati bez regulatora napajanja.

4.5. Izmjenjivači

Izmjenjivači mogu imati nekoliko uloga, ali jedna je zajednička za sve vrste izmjenjivača. Kao što i samo ime kaže pretvaraju istosmjernu struju u izmjeničnu. Fotonaponski moduli proizvode istosmjernu električnu energiju, ali ona se jako rijetko koristi i zbog toga su izmjenjivači neizostavne komponente fotonaponskih sustava.

Postoje i mali sustavi bez izmjenjivača kao što su solarne lampe, punjači mobitela i slično, ali ti uređaji troše jako malo električne energije i imaju ograničenu primjenu. Većina elektroničkih uređaja zahtijeva istosmjernu električnu energiju, ali ona se ne može prenositi na velike udaljenosti i gotovo se nikad ne koristi u elektroenergetskim sustavima. Zbog toga se gotovo cjelokupna proizvodnja fotonaponskih sustava pretvara u izmjeničnu električnu energiju putem uređaja koji se nazivaju izmjenjivači ili inverteri. [5]

Postoje dvije osnovne skupine invertera, a podijeljeni su na osnovu vrste fotonaponskog sustava u kojima se koriste. *Off grid* sustavi koriste autonomne invertere koji pretvaraju istosmjernu struju iz baterija, a *on grid* sustavi sadrže mrežne invertere koji vrše pretvorbu istosmjerne struje iz fotonaponskih modula u izmjeničnu struju koju predaju trošilima ili mreži. Postoje mrežni inverteri koji ujedno vrše i ulogu autonomnih jer vrše invertiranje struje iz baterija, koje se koriste kao rezerva u pojedinim *on grid* sustavima, a nazivaju se hibridni inverteri.

Većina instaliranih fotonaponskih sustava koristi invertere kod kojih su na ulaznoj strani spojeni moduli, a na izlaznoj elektroenergetska mreža. Nemaju nikakvu mogućnost pohrane energije i široko su rasprostranjeni zbog svoje efikasnosti, cijene i jednostavnosti. Princip rada je vrlo jednostavan i sastoji se u pretvaranju ulazne istosmjerne struje u izmjeničnu, koja se zatim predaje trošilima i mreži. Rade paralelno s mrežom i tako opskrbljuju potrošače u objektu. Ukoliko fotonaponski sustav ne proizvodi dovoljno energije mreža „pomaže“ u opskrbi, a ako je ima viška šalje se u mrežu. Proces pretvorbe sastoji se iz sljedećih koraka:

1. Istosmjerna struja se isporučuje iz modula u inverter
2. Različitim metodama inverter pretvara istosmjernu u izmjeničnu struju
3. Izlaz invertera je spojen na trošila, ali i mrežu s kojom radi u paraleli
4. Izlazna izmjenična struja ide u trošila ili mrežu, ovisno o potrošnji i proizvodnji

Direktni mrežni izmjenjivači ne mogu raditi bez mreže pa u slučaju kvara dolazi do prekida napajanja. Dvosmjerno brojilo služi za mjerenje predane i preuzete energije iz mreže. Ovo je najjednostavniji fotonaponski sustav koji, uz određene nedostatke, vrlo dobro funkcionira. Ulazni napon je većinom između 150 V i 600 V. Ukoliko se želi dodatna sigurnost u vidu zalihe energije potrebni su mrežno baterijski inverteri. Na slici 4.6 može se vidjeti primjer jednog direktnog mrežnog invertera.



Slika 4.6 Direktni mrežni inverter [12]

4.5.1. Baterijski inverter

Inverteri koji se koriste u *off grid* sustavima nemaju nikakvu vezu s mrežom koja u većini slučajeva nije ni dostupna. Princip rada je vrlo jednostavan i na ulaz invertera spojena je baterija koja se preko regulatora punjenja napaja iz fotonaponskih modula. Na izlazu invertera spojeni se uređaji, odnosno trošila, koja koriste izmjeničnu struju. Sustav je jednostavan i kvarovi su vrlo rijetki pa se može pomisliti kako je to najbolji i najstabilniji fotonaponski sustav.

Sustav je uistinu dobar i stabilan, ali dok ima dovoljno sunčevog zračenja. Vrijeme je promjenjivo i nije svaki dan lijep i sunčan. Ukoliko dođe do oblačnog razdoblja, a pogotovo za vrijeme jeseni i zime, potrošnja može nadmašiti proizvodnju i u tom slučaju dolazi do prekida napajanja. Regulatori napajanja prekidaju opskrbu iz baterija kako ne bi došlo do predubokog pražnjenja i

oštećenja baterije. Upravljačka elektronika u inverteru ili regulatoru napajanja upozorava da je potrebno uključiti agregat ili neki drugi izvor napajanja. Ovi sustavi imaju još jednu veliku manu, a to je početno ulaganje. Baterije su još uvijek skupe i relativno kratkog trajanja pa se ovi sustavi uglavnom izbjegavaju.

Baterijski inverteri su slabo zastupljeni, ali imaju svoje mjesto u udaljenim područjima gdje je njihova uloga nezamjenjiva. Primjer su vikedice, odmarališta i druga udaljena mjesta koja nemaju priključak na mrežu. Ove uređaje i *off grid* sustave nema smisla koristiti ukoliko postoji priključak na mrežu, a ukoliko se žele koristiti baterije, kao određena rezerva, najbolja opcija je kombinacija ova dva prethodna invertera. To je najsloženiji inverter koji obavlja nekoliko funkcija i zbog toga se naziva hibrid.



Slika 4.7 *Off grid inverter* [15]

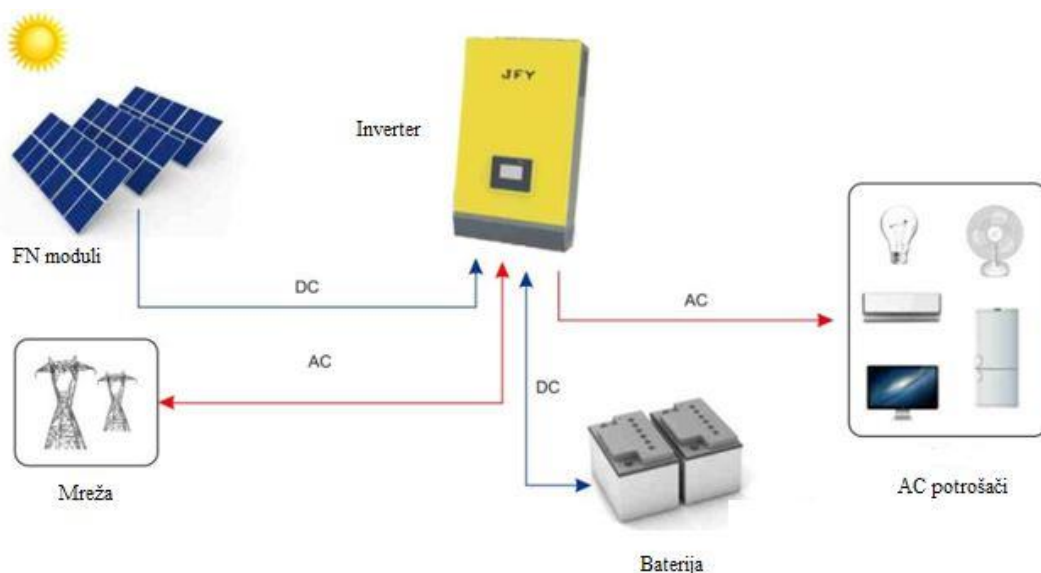
4.5.2. Hibridni inverter

Ovaj složeni uređaj uzima najbolje iz oba prethodna invertera. Najbolja opcija je potpuna energetska neovisnost i sigurnost, a to pruža hibridni inverter. Osnovna zadaća je jednaka, a to je

naravno pretvorba istosmjerne struje u izmjeničnu, ali ovaj uređaj omogućava i dodatnu sigurnost u vidu baterija. Proces rada hibridnog invertera izgleda ovako:

1. Na početku dana moduli proizvode istosmjernu električnu energiju i šalju ju u baterije
2. Nakon što baterije napune svoj kapacitet struja ide u inverter gdje se pretvara u izmjeničnu struju
3. Izmjenična struja iz invertera odlazi na glavni distribucijski panel (MDB-Main distribution panel)
4. Energija odlazi prema trošilima, a ako postoji višak pušta se u mrežu
5. Ukoliko moduli ne proizvode dovoljno energije glavni distribucijski panel uzima energiju iz baterija ili mreže
6. Zaliha u baterijama koristi se prilikom prekida napajanja uslijed kvara na mreži

Na ovaj način postiže se potpuna neovisnost i sigurnost opskrbe električnom energijom. Nakon nekoliko godina, kada se isplati uloženo, privatni korisnik ima besplatnu električnu energiju. Uz to je osiguran od prekida napajanja, ali i sudjeluje u proizvodnji čiste i prihvatljivije. Hibridi su odličan izbor za *on grid* sustav, ali zahtijevaju nešto veće početno ulaganje. To je složeniji sustav koji pruža dodatne pogodnosti i sigurno će se s vremenom isplatiti. Hibridni inverter uz ostale komponente sustava može se vidjeti na slici 4.8.



Slika 4.8 Hibridni sustav [16]

5. POVLAŠTENI PROIZVOĐAČ

Otkup i prodaja električne energije funkcionira na temelju tržišta. Cijenu određuje ponuda i potražnja, a proizvođači nastoje proizvedenu energiju prodati po najpovoljnijim uvjetima kako bi ostvarili što veću zaradu. Mali proizvođači, poput privatnih fotonaponskih elektrana, nisu konkurentni na tržištu jer njihova proizvodnja ovisi o godišnjem dobu, vremenu, dobu dana i mnogim drugim čimbenicima. Zakonskim odredbama, u većini razvijenih zemalja, takvi proizvođači imaju povlašten status prilikom isporuke proizvedene električne energije. Operatori prijenosnog i distribucijskog sustava dužni su, u slučajevima smanjene potrošnje, osigurati prioritetnu isporuku proizvođačima sa statusom povlaštenog proizvođača.

Prema *Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinskoj kogeneraciji* to je elektroenergetski subjekt, odnosno druga pravna ili fizička osoba čije postrojenje ispunjava uvjete određene odredbama ovoga *Zakona* te je stekao status povlaštenog proizvođača. [7]

Status povlaštenog proizvođača električne energije može steći elektroenergetski subjekt ili druga pravna ili fizička osoba za proizvodno postrojenje:

1. u kojem se koriste obnovljivi izvori energije i/ili otpad i obnovljivi izvori energije ili istodobno proizvodi električna i toplinska energija na visokoučinkovit način, neovisno o snazi proizvodnog postrojenja
2. koje je upisano u Registar OIEKPP-a
3. za koje je izgrađen priključak na mrežu i ugrađena mjerna oprema tako da je omogućen obračun neto isporučene električne energije
4. koje ispunjava odgovarajuće uvjete učinkovitosti u slučaju kogeneracijskih postrojenja
5. za koje je osigurana mjerna oprema potrebna za utvrđivanje ispunjavanja uvjeta učinkovitosti za postrojenja koja istodobno proizvode električnu i toplinsku energiju
6. za koje je osigurana mjerna oprema i sustav evidencije korištenja goriva za postrojenja koja koriste fosilna ili obnovljiva goriva te otpad
7. koje ima potrebne akte, prema propisima kojima se uređuje gradnja, na temelju kojih se postrojenje i priključak na mrežu može koristiti, odnosno staviti u pogon

U Republici Hrvatskoj postoje dvije vrste povlaštenih proizvođača koji imaju instalirane fotonaponske sustave. Osnovna razlika je u omjeru preuzete i predane električne energije tijekom obračunskog razdoblja od jedne godine te cijeni po kojoj se otkupljuje višak energije. [7]

5.1. Korisnik postrojenja za samoopskrbu

Prema *Zakonu o obnovljivim izvorima energije i visokoučinskoj kogeneraciji* to je korisnik iz kategorije kućanstva ili ustanova koji ima instaliranu privatnu fotonaponsku elektranu čiju proizvodnju koristi za vlastite potrebe, a mreža mu služi kao jedan oblik baterije. Uvjet za ostanak u ovoj kategoriji povlaštenog proizvođača je da energija puštena u mrežu ne bude veća od preuzete energije.

Proizvodnja fotonaponskog sustava ovisi o mnogo čimbenika i nije moguće postići ravnotežu u kojoj se proizvodi onoliko energije koliko se troši. U ljetnim mjesecima proizvodi se više energije nego je potrebno, ali u mjesecima jeseni i zime proizvodnja ne može pokriti potrošnju. Uz to proizvodnja se mijenja i tijekom dana, a noću je uopće nema. Zbog toga ovaj sustav funkcionira na način da se višak proizvodnje predaje mreži, a kad je proizvodnja nedostatna mreža predaje energiju korisniku. Na ovoj način ne postoji potreba za skupim baterijama koje bi morale imati veliki kapacitet kako bi se osiguralo konstantno napajanje.

Na kraju svakog mjeseca operator ispostavi račun na kojem je vidljivo koliko je energije predato ili uzeto iz mreže u pojedinom tarifnom modelu. Obračunava se samo razlika preuzete i predane energije. Postoje dva slučaja koja ovise o dobu godine. U većini slučajeva u razdoblju od listopada do veljače potrošnja je veća od proizvodnje i tad se operateru plaća razlika koja se dobije oduzimanjem preuzete i predane energije. Energija se plaća po trenutnoj cijeni koju je odredio operater, a uz to postoje i fiksne naknade kao što su: opskrbna naknada, solidarna naknada, naknada za poticanje proizvodnje iz OIE i mrežarina. Ove naknade, osim opskrbne, plaćaju se po *kWh* potrošene energije pa fotonaponski sustav smanjuje troškove i za ova davanja.

Drugi slučaj je za vrijeme ljetnih mjeseci kad proizvodnja premašuje potrošnju. Za svaki mjesec se ispostavi račun i operater je dužan otkupiti višak električne energije po cijeni:

$$C_{iVT} = 0,8 \cdot C_{pVT}$$

$$C_{iNT} = 0,8 \cdot C_{pNT}$$

Gdje je:

C_{pVT} - cijena ukupne električne energije preuzete iz mreže od strane krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja više dnevne tarife, izražena u *kn/kWh*

C_{pNT} - cijena ukupne električne energije preuzete iz mreže od strane krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja niže dnevne tarife, izražena u kn/kWh

C_{iVT} – cijena ukupne električne energije isporučene u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja više dnevne tarife, izražena u kn/kWh

C_{iVT} – cijena ukupne električne energije isporučene u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu krajnjeg kupca unutar obračunskog razdoblja, za vrijeme trajanja niže dnevne tarife, izražena u kn/kWh

U ovom slučaju ne plaćaju se naknada za poticanje proizvodnje iz OIE i solidarna naknada, a mrežarina ovisi o preuzetoj energiji u pojedinoj tarifi. Mreža ne može spremati energiju, ali višak proizvodnje povlaštenog proizvođača u tom trenutku potroši netko drugi tko treba energiju, a poslije proizvođač troši energiju koja se proizvela iz nekih drugih izvora. Ova ravnoteža nadomješta promjenjivu proizvodnju fotonapona i omogućava isplativost ovih sustava. [7]

5.2. Krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom

Ovo je druga kategorija povlaštenog proizvođača u koju odmah spadaju obrtnici i poduzetnici. Kućanstva spadaju u kategoriju korisnika postrojenja za samoopskrbu, ali ukoliko u jednoj godini proizvedu više energije nego što potroše prelaze u ovu drugu kategoriju u kojoj ostaju sve dok ponovno ne potroše više energije nego što su proizveli. Operater svake godine uspoređuje predanu i preuzetu energiju i na osnovu toga svrstava kućanstva u jednu od ove dvije kategorije. Krajnji kupac s vlastitom proizvodnjom nije isplativa kategorija i zbog toga kućanstva moraju paziti da ne dođe do promjene statusa.

U ovom slučaju proizvođač plaća cjelokupnu preuzetu energiju, a uz to i naknade kao što su solidarna naknada, mrežarina i naknada za poticanje proizvodnje iz OIE. Račun se umanjuje za iznos predane energije u mrežu, ali ta energija se plaća gotovo upola manje od preuzete energije. Cijena po kojoj se otkupljuje višak proizvedene energije formira se za svako obračunsko razdoblje, a postoje dva slučaja:

1. $C_i = 0,9 \cdot PKC_i$, ako za obračunsko razdoblje vrijedi:
 $E_{pi} \geq E_{ii}$
2. $C_i = 0,9 \cdot PKC_i \cdot E_{pi}/E_{ii}$, ako za obračunsko razdoblje vrijedi:
 $E_{pi} \geq E_{ii}$

Gdje je:

E_{pi} – ukupna električna energija preuzeta iz mreže od strane kupca unutar obračunskog razdoblja, izražena u kWh

E_{ii} – ukupna električna energija isporučena u mrežu od strane proizvodnog postrojenja u vlasništvu kupca, unutar obračunskog razdoblja, izražena u kWh

$PKCi$ – prosječna jedinična cijena električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za prodanu električnu energiju, bez naknada za korištenje mreže te drugih naknada i poreza, unutar obračunskog razdoblja, izražena u kn/kWh

U ovom slučaju cilj je potrošiti što više električne energije kako bi sustav bio isplativ, ali ne može se mjeriti s prvom kategorijom koju predstavlja korisnik postrojenja za samoopskrbu. Zbog toga mali privatni proizvođači, koji se po zakonu mogu svrstati u prvu kategoriju, moraju paziti da troše više ili jednako energije od one koju proizvode. U ovom diplomskom radu projektiran je fotonaponski sustav za obiteljsku kuću pa spada u prvu kategoriju, ali prilikom projektiranja potrebno je odrediti optimalnu instaliranu snagu kako proizvodnja ne bi nadmašila potrošnju. [7]

5.3. Priključivanje povlaštenog proizvođača

Proces priključivanja kućanstva sastoji se iz nekoliko koraka koje propisuje HEP i *Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinskoj kogeneraciji*:

- podnošenje zahtjeva za provjeru mogućnosti priključka
- izdavanja obavijesti o mogućnosti priključenja i prijedloga novog ugovora o korištenju mreže
- uplate troškova za opremanje obračunskog mjernog mjesta
- radovi na opremanju obračunskog mjernog mjesta
- sklapanja ugovora o korištenju mreže i podnošenje zahtjeva za promjenu statusa korisnika
- izdavanja potvrde za trajni pogon

Nakon što su ispunjeni svi uvjeti privatna elektrana može započeti s radom, a vlasnik elektrane je dužan prijaviti bilo kakav kvar ili smetnju kako ne bi došlo do trajnih posljedica za kupca i operatera. [17]

6. PROJEKTIRANJE FOTONAPONSKOG SUSTAVA

U prethodnim poglavljima napravljen je teorijski uvod u fotonapon i sve komponente fotonaponskog sustava. U ovom poglavlju je napravljen projekt izgradnje fotonaponske elektrane privatnog korisnika, sa statusom povlaštenog proizvođača, za jednu kuću na području Osijeka. Korištena je južna strana krova kuće koja ima odličnu osunčanost tijekom cijelog dana, a instalirana snaga iznosi 4 kWp . Nije iskorištena cijela površina krova jer bi proizvodnja značajno nadmašila potrošnju i kućanstvo bi nakon prve godine prešlo u kategoriju krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom. Koristi se hibridni izmjenjivač koji omogućava paralelni rad fotonaponskih modula, mreže i baterije koja služi kao rezerva u slučaju prekida.

Za projektiranje je korišten program PV SOL koji ima odlične mogućnosti u projektiranju i vizualizaciji. Nakon proračuna izvršena je analiza rezultata i isplativosti.

6.1. PV SOL premium

Na tržištu postoji mnogo programskih paketa koji se koriste za projektiranje elektrana obnovljivih izvora energije, ali PV SOL je savršen za studente jer je besplatan i prilično jednostavan za korištenje. Projektiranje je podijeljeno u nekoliko koraka, a sve je prikazano simbolima koji su poredani s lijeva na desno, redom kojim se koriste kao što se može vidjeti na slici 6.1.



Slika 6.1 Slijed koraka u projektiranju [6]

PV SOL premium omogućava projektiranje, odnosno dizajniranje i 3D vizualizaciju u sljedećim koracima:

1. *Project Data* – omogućava unos osnovnih podataka o projektu, projektantu i naručitelju projekta. Upisuje se naziv projekta, kratki opis i adresa instalacije.
2. *System type, climate and grid* – odabir vrste fotonaponskog sustava, države i regije na kojoj se gradi FN sustav. U ovom primjeru projektirana je *on grid* fotonaponska elektrana s

priključenim uređajima i zalihom energije u vidu baterija. Država je Republika Hrvatska, a odabrana je regija Slavonski Brod jer je najbliža regija području Osijeka za koju postoje podatci u programu.

3. *Consumption* – u ovom koraku unose se podatci o potrošnji električne energije. Postoji nekoliko načina, a u ovom radu je unesena prosječna mjesečna potrošnja za 2021. godinu. Jedna od mogućnosti je i pojedinačni unos potrošnje za svaki mjesec ukoliko postoje podatci, odnosno sačuvani računi za struju za prethodnu godinu.
4. *3D Design* – dizajniranje i 3D vizualizacija objekta i bliže okolice (pomoćni objekti, drveće..) koja može utjecati na zasjenjenost panela te tako smanjiti proizvodnju. Nakon objekta određuje se vrsta panela koji će se koristiti, njihov raspored i položaj te kablove i način povezivanja.
5. *Battery System* – određivanje proizvođača i modela baterije koja se koristi kao zaliha energije. Potrebno je izabrati model s kapacitetom koji odgovara aplikacijama. U ovom diplomskom koristi se baterija kapaciteta 4,8 kWh. Ukoliko se radi o *off grid* sustavu potreban je značajno veći kapacitet.
6. *Cables*- u ovom koraku unose se gubici vodova koji se koriste u sustavu. Prikazana je shema sustava na kojoj se prikazani DC i AC vodovi te sve ostale komponente. Mogućnost ubacivanja simbola i brojila u shemu sustava.
7. *Plans and parts list* – prikaz sheme sustava sa svim dijelovima strujnog kruga fotonaponskog sustava. Mogućnost printanja dijagrama na kojem se u donjem desnom kutu nalaze podatci o instaliranoj snazi, projektantu, firmi, vrsti sustava i slično. Uvid u sve dijelove sustava.
8. *Financial analysis* – financijska analiza u kojoj se unose svi podatci vezani za investicije, cijenu otkupa i preuzimanja električne energije, poreza, inflacije, kredita i sve ostalo vezano uz financiranje i isplativost sustava.
9. *Results* – prikazuje rezultate simulacije i daje detaljan uvid u potrošnju i proizvodnju energije, isplativost, količinu preuzete i predane energije slično. Rezultati su prikazani u

obliku raznih tablica, dijagrama, grafova i omogućavaju potpuno analizu i razumijevanje rezultata.

10. *Presentation* – objedinjeni rezultati za printanje i prikaz korisnicima. Važan korak u projektiranju jer objedinjuje i pregledno prikazuje najvažnije iz svih prethodnih koraka.

6.2. Odabir panela

Odabir solarnih panela je početni korak u projektiranju fotonaponskih sustava. Na tržištu postoje stotine proizvođača, ali nisu svi paneli iste kvalitete i iskoristivosti. Za kvalitetu je potrebno izdvojiti više novca, ali s vremenom se investicija višestruko vrati. Jeftini i nekvalitetni paneli prebrzo gube na efikasnosti i s vremenom investitor gubi jako puno novca, daleko više nego je uštedio prilikom kupnje jeftine opreme.

Česta je pojava da za samo nekoliko godina dođe do značajnog pada proizvodnje, a ta pojava često se naziva „rak panela“. Normalno je da efikasnost s vremenom blago pada, ali paneli bi trebali imati preko 80% efikasnosti tijekom perioda od 25 godina. [18]

U ovom primjeru odabran je panel LG400Q1C-A6 proizvođača LG Electronics. To je silicijev monokristalni panel nominalne snage 400W uz najveću efikasnost na tržištu od oko 22%. Podatci o modulu vidljivi su u tablicama 6.1 i 6.2.

Tablica 6.1 Podatci o modulu [19]

| MODEL | | STC | NOCT |
|--------------------------|------|---------------|---------------|
| | Jed. | LG400Q1C – A6 | LG400Q1C – A6 |
| Vršna snaga P_{MPP} | [W] | 400 | 303 |
| Nazivna struja I_{mPP} | [A] | 10,76 | 8,62 |
| Nazivni napon U_{mpp} | [V] | 37,2 | 35,2 |
| Struja kratkog spoja | [A] | 11.32 | 9,13 |
| Napon praznog hoda | [V] | 43,8 | 41,8 |
| Učinkovitost modula | [%] | 22,1 | 22,1 |
| Dozvoljeno odstupanje | [%] | 0 ~ +3 | 0 ~ +3 |

Gdje su:

STC (*Standard Test Condition*) – Standardni testni uvjeti uz 1000 W/m^2 , temperatura ćelije $25 \text{ }^\circ\text{C}$, odstupanje mjerenja $\pm 3\%$ i optička masa zraka $A_m = 1.5 \text{ g}$

NOCT (*Nominal Module Operating Temperature*) – Normalna radna temperatura ćelije uz 800 W/m^2 , temperatura okoline $20 \text{ }^\circ\text{C}$, odstupanje mjerenja $\pm 3\%$, brzina vjetra 1 m/s i optička masa zraka $A_m = 1.5 \text{ g}$

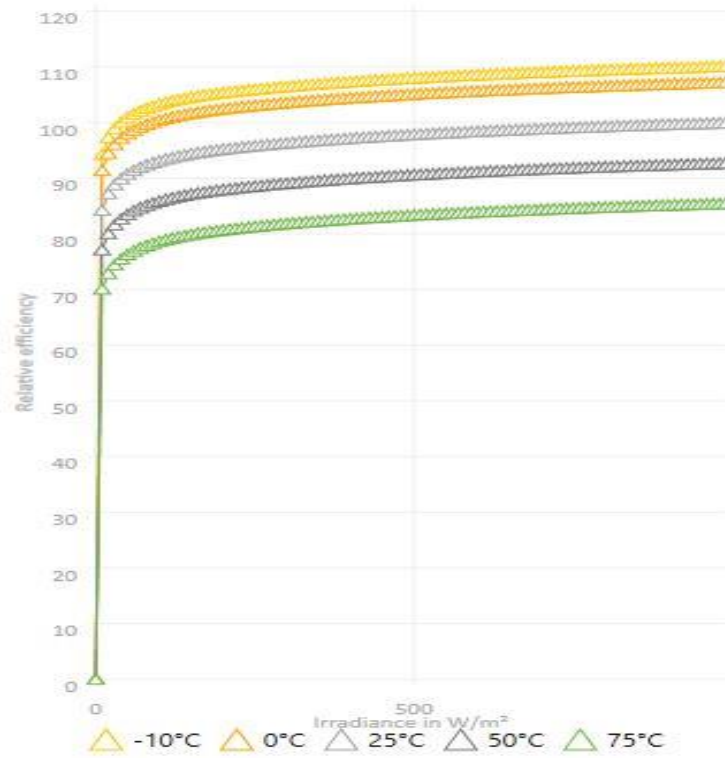
Tablica 6.2 *Certifikat i garancija modula* [19]

| CERTIFIKAT I GARANCIJA | | |
|-------------------------------|--------|--|
| Certifikat | | IEC 61215-1/-1-1/2:2016, IEC 61730-1/2:2016, UL 61730-1: 2017, UL 61730-2:2017, ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001, OHSAS 18001 |
| Test na koroziju | | IEC 62716:2013 |
| Zapaljivost | | Class C (UL 790) |
| Utjecaj soli | | EC 61701:2012 Severity 6 |
| Garancija | godina | 25 |
| Pad snage-Pmax | [%] | <ul style="list-style-type: none"> • Prva godina 98.5% • 2. – 24. godina -0.25% godišnje • 92.5% nakon 25 godina rada |

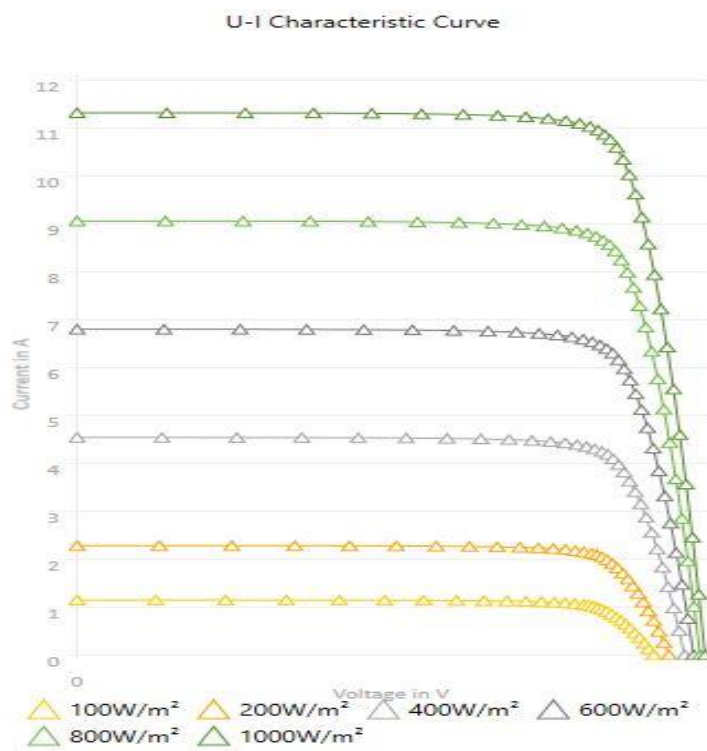
Može se vidjeti nizak stupanj propadanja tijekom 25 godina što značajno povećava profit i smanjuje potrebno vrijeme isplate sustava. Ovi moduli sigurno neće doživjeti naglo propadanje i „služit“ će investitora nekoliko desetljeća.

Na slikama 6.2 i 6.3 prikazani su $U-I$ karakteristika i graf ovisnosti korisnosti i temperature. Može se vidjeti da pri visokim temperaturama efikasnost značajno pada jer dolazi do povećanja otpora u kristalima silicija. Zbog toga vrući ljetni dani nisu najsavršeniji uvjeti za proizvodnju električne energije iz fotonaponskih sustava.. Najbolji su umjereno topli dani s puno sunčanih sati i vedrim nebom.

Na grafu koji prikazuje ovisnost struje, napona i jačine zračenja vidi se da struja raste s povećanjem zračenja, ali blago pada s povećanjem napona. Pad struje s povećanjem napona je blag sve do jedne točke kad počne naglo padati. U toj točki dolazi do zasićenja kristala silicija i metalnih vodiča i zbog povećanja otpora dolazi do zagrijavanja i pada struje.



Slika 6.2 Ovisnost efikasnosti o temperaturi [6]



Slika 6.3 Ovisnost struje o naponu panela [6]

6.3. Odabir izmjenjivača

Izmjenjivač (engl. *Inverter*) je elektronički uređaj koji pretvara istosmjernu električnu energiju u izmjeničnu, odnosno povezuje istosmjerni i izmjenični dio sustava. Na ulazu izmjenjivača je istosmjerna, a na izlazu izmjenična električna energija. Može pretvarati električnu energiju direktno iz modula ili energiju povučenu iz baterija. Odabir izmjenjivača ovisi o zahtjevima i svojstvima sustava, a odabire se na osnovu sljedećih tehničkih podataka:

- izlazna nazivna snaga P_{AC} [W]
- nazivni napon na DC strani U_{AC} [V]
- nazivna frekvencija f [Hz]
- ulazna nazivna snaga P_{DC} [W]
- faktor snage $\cos \varphi$
- maksimalan učinkovitost η_{max} [%]
- europska učinkovitost η_{EU} [%]
- maksimalni ulazni napon na DC
- maksimalna ulazna struja na DC

Prilikom odabira izmjenjivača potrebno je proučiti karakteristike fotonaponskog niza (povezanog sustava panela) i usporediti ih s karakteristikama željenog izmjenjivača koji mora zadovoljiti četiri uvjeta:

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

U ovom primjeru odabran je izmjenjivač SPH 4000TL3 BH proizvođača *GROWATT* koji zadovoljava sve navedene uvjete. [5]

6.4. Odabir baterije

Baterija je najčešći oblik spremnika energije koji u fotonaponskim sustavima pohranjuje energiju proizvedenu u fotonaponskim panelima. *Off grid* sustavi zahtijevaju veliki kapacitet baterija jer je potrebno spremiti energiju dovoljnu za nekoliko dana, ali u ovom primjeru koristi se hibridni izmjenjivač koji kombinira baterije i mrežu kao vid „pohrane“ energije.

U ovom primjeru kućanstvo je kategorija korisnika postrojenja za samoopskrbu i baterija nema veliku ulogu kao kod krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom. Mreža ima ulogu „baterije“, ali određeni manji kapacitet baterije je poželjan u slučajevima prekida napajanja ili za dodatnu uštedu spremanjem energije tijekom jeftine tarife. Današnji moderni izmjenjivači imaju jako puno opcija i mogu se podesiti po želji. Baterije imaju svoju ulogu u pohrani energije i traju 10 do 15 godina, ovisno o vrsti i kvaliteti baterije te broju ciklusa punjenja i pražnjenja. Veliki nedostatak baterija je izrazito visoka cijena, ali početno ulaganje se s vremenom isplati te povećava kvalitetu opskrbe energijom. Velika prednost je zaliha energije koja omogućava napajanje u slučaju prekida napajanja elektroenergetskog sustava.

U ovom primjeru odabrana je baterija US2000 proizvođača *GROWATT* s ukupnim kapacitetom 4,8 kWh koja ima preko 6000 ciklusa s kapacitetom od 90%. Baterija može trajati preko 15 godina ukoliko se svakodnevno puni i prazni što predstavlja jako dobre karakteristike.

Tablica 6.3 Karakteristike baterije [15]

| MODEL | GROWATT US2000B | |
|-------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Vrsta baterije | | LiFePo4 (litij–željezo-fosfat) |
| Broj ćelija u seriji | | 15 |
| Nazivni napon ćelije | [V] | 3.2 |
| Nazivni napon baterije | [V] | 48 |
| Broj nizova | | 2 |
| Kapacitet baterije | [Ah] | 100 |
| Unutarnji otpor | [mΩ] | 9.6 |
| Mjesečno samopražnjenje | [%] | 3 |
| Broj ciklusa (90%) | | 6000 |

6.5. Dizajn i 3D vizualizacija

Jedna od velikih prednosti programskog paketa PV SOL je mogućnost 3D vizualizacije koja pruža preglednost i osjećaj stvarnosti. Moguće je učitati već dizajniran objekat ili vrlo jednostavno „složiti“ vlastiti dizajn objekta. Program omogućava odabir vrste objekta kojem se zatim unose dimenzije i ostali objekti, koji mogu utjecati na proizvodnju, kao što su krovni prozori ili dimnjaci. Na proizvodnju može utjecati i okolno drveće ili druge građevine koje pružaju zasjenjenost u određenom dobu dana.

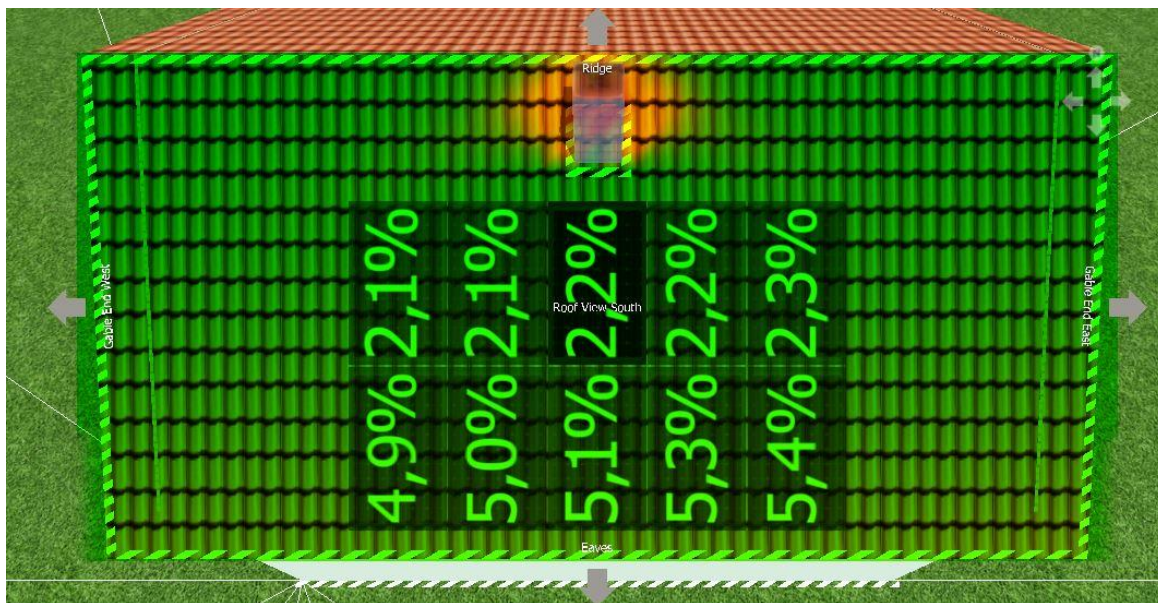
Nakon dizajna objekta odabere se željena strana krova (po mogućnosti južna) i poredaju fotonaponski paneli koji se konfiguriraju i povezuju s odgovarajućim izmjenjivačem. Na slici 6.4 može se vidjeti 3D izgled objekta za koji se vrši projektiranje fotonaponskog sustava.



Slika 6.4 3D dizajn objekta za fotonaponski sustav [6]

Paneli su uspravno poredani, a vršna snaga je 4 kWp s ukupno 10 panela. Iskoristiva površina krova može nositi mnogo više panela, ali veća proizvodnja bi prebacila ovog korisnika u nepovoljnu kategoriju krajnjeg kupca s vlastitom proizvodnjom. Paneli su pozicionirani ispod dimnjaka kako bi se izbjeglo zasjenjenje koje smanjuje proizvodnju.

Moduli su spojeni u seriju i povezani s inverterom koji proizvedenu električnu energiju raspoređuje između baterije, potrošača i mreže ovisno o potrebi. Objekt ima jako dobar položaj jer je južna strana krova cijeli dan izložena sunčevom zračenju, a ne postoje dodatni objekti koji uzrokuju zasjenjenje i smanjuju proizvodnju. Na slici 6.5. može se vidjeti da je zasjenjenost panela zanemariva. U gustim naseljima može doći do značajnog smanjenja proizvodnje jer okolni objekti zaklanjaju panele u određenom dijelu dana.

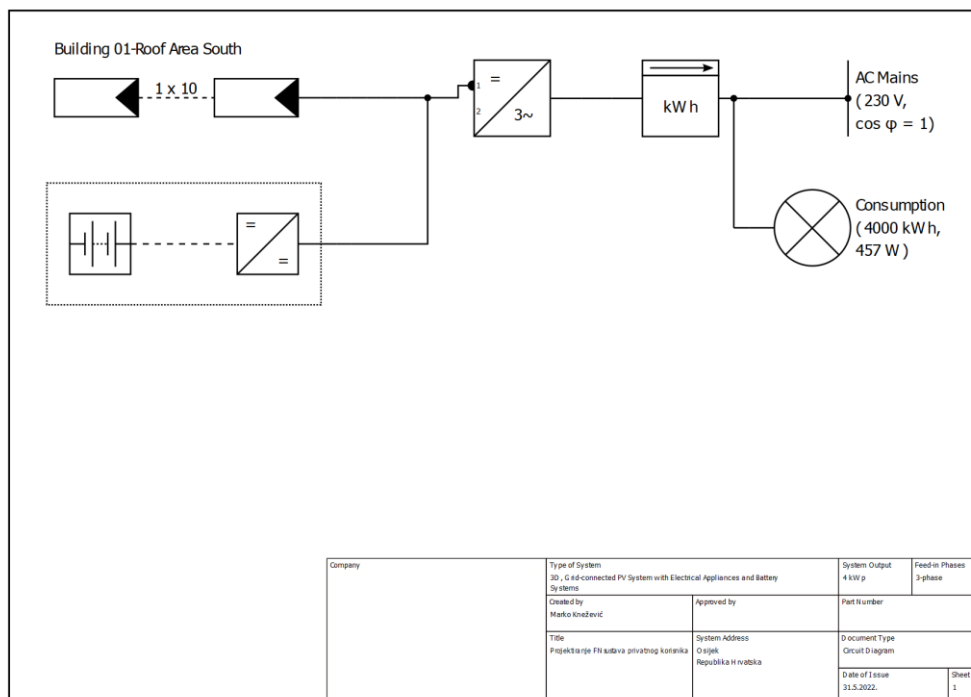


Slika 6.5 Zasjenjenje panela [6]

6.6. Shema fotonaponskog sustava

Svaki fotonaponski sustav ima svoje sastavne komponente bez kojih ne može funkcionirati. U ovom primjeru radi se o jednom od složenijih sustava s hibridnim izmjenjivačem koji vrši nekoliko funkcija. PV SOL daje uvid u strujni krug i sve dijelove sustava kao što se može vidjeti na slici 6.6. U donjem desnom kut navedeni su najvažniji podatci i informacije u vezi projekta što je jako važno u implementaciji.

Shema sustava jako je važna jer daje brzi uvid u sve komponente i olakšava realizaciju projekta. To je još jedna prednost programskog paketa PV SOL jer u jednostavnim koracima projektiranja osigurava svu potrebnu dokumentaciju prilikom izrade projekta.



Slika 6.6 Shema sustava [6]

Jasno je vidljivo da postoje jedna skupina panela spojenih u seriju koji ulaze u inverter, a iz njega izlazi vod izmjenične struje spojen na mrežu i potrošače. Kako se radi o hibridnom izmjenjivaču postoji mogućnost ugradnje baterija koje možemo vidjeti na shemi, a služe za pohranu i „manipulaciju“ skupljom i jeftinijom tarifom struje te mnogim drugim korisnim opcijama za uštedu. Korištenjem baterije smanjuje se količina energije puštena u mrežu pa je moguća instalacija elektrane veće snage uz ostanak u povoljnoj kategoriji samoopskrbe.

6.7. Rezultati simulacije

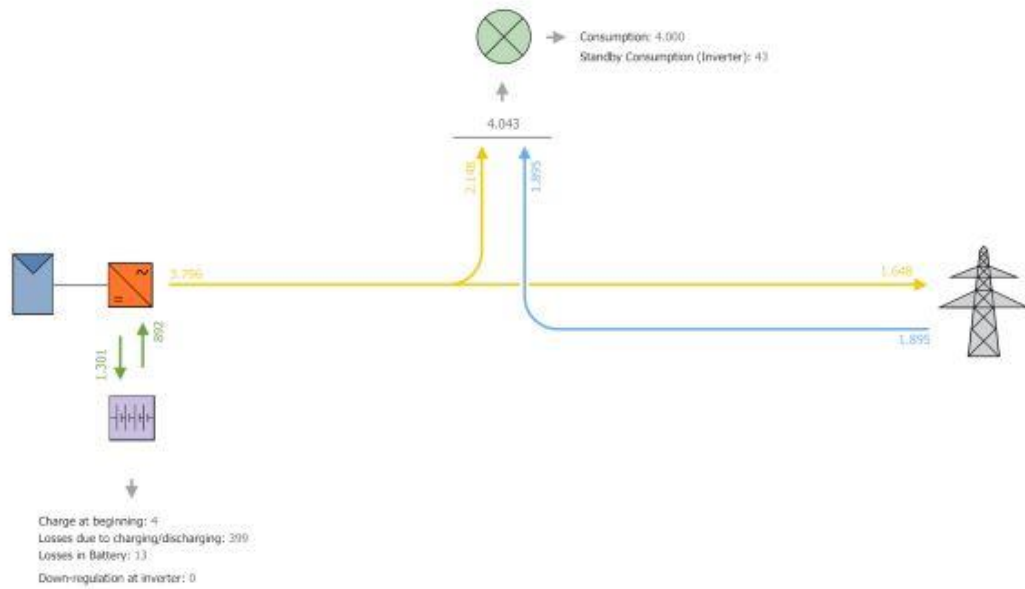
Nakon prethodnih koraka u kojima su uneseni svi potrebni podatci, urađena 3D vizualizacija i odabrane vrste komponenata izvršen je najvažniji korak, a to je simulacija sustava. Projektirani sustav privatnog korisnika uz godišnju potrošnju od 4000 kWh dao je sljedeće rezultate:

- Proizvedena energija: 3796 kWh
- Potrošena energija: 4043 kWh
- Energija puštena u mrežu: 1648 kWh
- Energija uzeta iz mreže: 1895 kWh

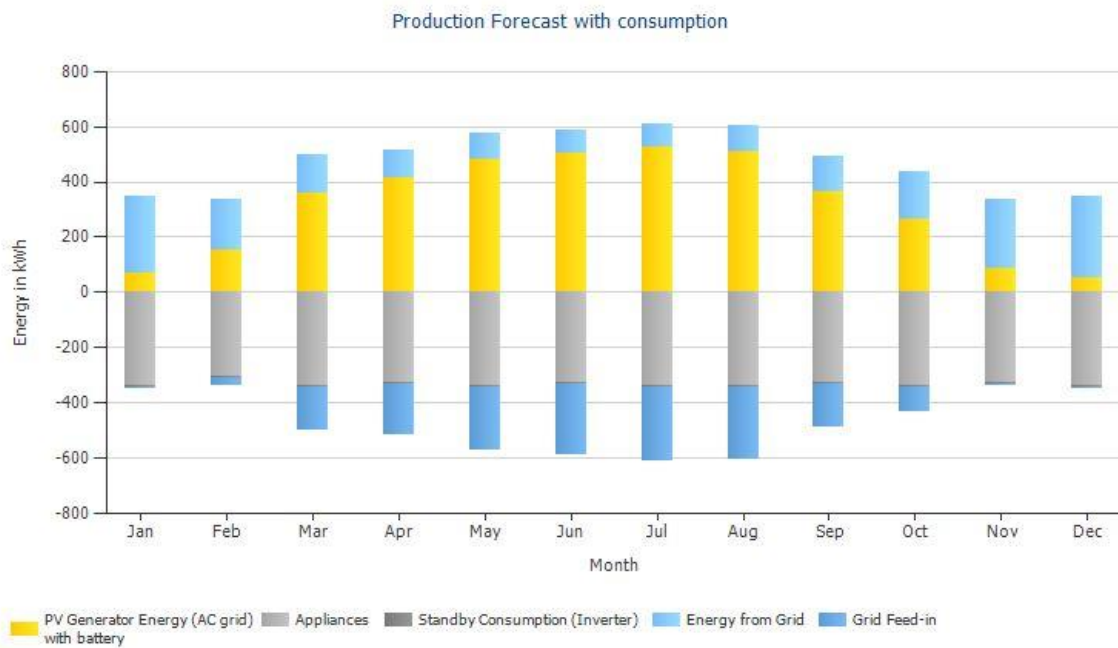
Može se vidjeti da je energija puštena u mrežu značajno manja od preuzete pa se ovaj korisnik ne mora plašiti prelaska u nepovoljnu kategoriju povlaštenog proizvođača.

Energy Flow Graph

Project: Projektiranje FN sustava privatnog korisnika



Slika 6.7 Tok energije [6]



Slika 6.8 Dijagram proizvodnje i potrošnje energije [6]

7. ANALIZA REZULTATA I ISPLATIVOSTI

Isplativost je osnovni podatak koji potencijalni investitori žele znati prije ulaganja u projekat. Tako je i u području fotonaponskih sustava koji obično vraćaju uloženo u razdoblju između pet i deset godina. Proizvodnja električne energije i sama isplativost ovise o mnogim čimbenicima i za detaljnije podatke potrebno je uraditi proračun u nekom od softvera kao što je PV SOL. Ukoliko se elektrana nalazi na povoljnijem geografskom području isplativost je naravno veća i brže se vrati uloženo. Ljudi ne mogu mijenjati klimu i vrijeme kako bi povećali efikasnost, ali postoje čimbenici na koje se može utjecati. Ugradnja kvalitetnih panela, invertera i ostale opreme te pravilno postavljanje u odnosu na kretanje Sunca mogu uveliko povećati proizvodnju. Zbog toga instalaciju treba prepustiti provjerenim stručnjacima koji će odrediti optimalan kut prema Suncu i preporučiti kvalitetnu i efikasnu opremu. Postoji mogućnost dodatnog povećanja proizvodnje ugradnjom panela koji „prate“ Sunce i uvijek su u savršenoj poziciji. To naravno zahtijeva ugradnju dodatnog sustava koji zakreće panele i povećava početno ulaganje.

Europska Unija i razvijene zemlje svijeta sve više ulažu u ovu vrstu proizvodnje električne energije i zbog toga su osigurani razni poticaji kao pomoć u početnom ulaganju. Efikasnost panela još uvijek je niska i državni poticaji omogućavaju da se vrijeme isplativosti dodatno smanji. Fotonaponski paneli će u svakom slučaju donijeti zaradu, ali ljudi se lakše odluče za ulaganje ako je vrijeme isplativosti nešto kraće. Kvalitetni paneli mogu proizvoditi energiju preko trideset godina i ako se uzme slučaj da je vrijeme isplativosti deset godina opet postoji prostor za značajnu uštedu. U većini slučajeva tih deset godina se ljudima čini jako daleko i poticaji su neizostavni dio ulaganja u fotonapon.

7.1. Troškovnik

Kako bi se odredilo točno vrijeme isplativosti potrebno je izraditi detaljan popis troškova tijekom instalacije sustava. Troškovnik je jedan od osnovnih dokumenata prilikom projektiranja i predstavlja podatak na osnovu kojeg se investitori odluče pokrenuti projekat. Nakon izrade projekta u programskom paketu PV SOL prikazani su rezultati proizvodnje i godišnje uštede. Nije moguće izraditi troškovnik prije projektiranja jer nisu poznati podatci kao što je broj panela te odabir odgovarajućeg izmjenjivača i ostale opreme.

Tablica 7.1 Troškovnik

| Stavka | Količina | Cijena [kn] | Ukupna cijena [kn] |
|-----------------------------|----------|-------------------|--------------------|
| FN modul LG400Q1C-A6 | 10 | 2500 | 25000 |
| Izmjenjivač SPA 10000TL3 | 1 | 9200 | 9200 |
| Elektro ormar | 2 | 850 | 1700 |
| Kabeli | - | 700 | 700 |
| Nosači panela | 20 | 155 | 3100 |
| Projektna dokumentacija | - | 7000 | 7000 |
| Montaža | - | 4000 | 4000 |
| Baterija | 1 | 17400 | 17400 |
| UKUPNO | | 68100 kuna | |

Može se vidjeti da je početna investicija 68100 kuna uz najkvalitetniju opremu i provjerene stručnjake koji će vršiti montažu. Kod ovih se investicije na smije „štedjeti“ i kupovati jeftinije panele i opremu koji će dugoročno uveliko smanjiti proizvodnju, a time i uštedu. Početna investicija na prvu izgleda mnogo, ali radi se o sustavu s dodatnim osiguranjem napajanja u vidu baterije od 4,8 kWh. Na ovaj iznos treba dodati i zamjenu izmjenjivača koji se mijenja svakih 10 godina.

7.2. Poticaji

Republika Hrvatska je dio Europske Unije koja već dugi niz godina ulaže velika sredstva u obnovljive izvore energije. Osigurani su razni fondovi za sufinanciranje izgradnje privatnih fotonaponskih sustava što značajno smanjuje početne troškove i vrijeme isplativosti.

Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost Republike Hrvatske u javnom pozivu, objavljenom krajem 2021. godine, objavio je natječaj za energetske obnovu obiteljskih kuća što uključuje i izgradnju fotonaponskih elektrana. Korisnicima je bilo na raspolaganju 390 milijuna kuna, a postotak sufinanciranja ovisio je o području na kojem se planira graditi elektrana. Najveću pomoć, u iznosu od 80% opravdanih troškova, mogu ostvariti korisnici na području posebne državne skrbi. Korisnici na brdsko-planinskom području mogu dobiti potporu u iznosu od 60% troškova, a svi ostali, koji nisu u ove dvije kategorije, ostvaruju sufinanciranje u iznosu od 40%

troškova. Može se vidjeti da u „najlošijem“ slučaju potencionalni investitori mogu ostvariti veliku pomoć u izgradnji fotonaponskog sustava.

Poticaji imaju veliku važnost i sve više ljudi odlučuje uložiti u obnovljive izvore energije. Energetska neovisno je jako važna, što se može vidjeti u ovom vremenu poskupljenja energenata. U svojoj politici energetske neovisnosti EU će sve više poticati izgradnju fotonaponskih elektrana i to je odlična prilika za sve koji žele investirati u slične projekte.

7.3. Procjena isplativosti

Programski paket PV SOL omogućio je projektiranje fotonaponskog sustava i dobiveni su rezultati koji se mogu vidjeti u prethodnim poglavljima. Godišnja proizvodnja je oko 3750 kWh što je jako dobar rezultat u odnosu na instaliranu snagu. Ovo je još jedan pokazatelj da je Hrvatska na jako dobrom području za iskorištavanje solarne energije.

Korisnik se nalazi u kategoriji samoopskrbe i tablice 7.2 i 7.3 prikazuje proizvodnju i potrošnju te količinu preuzete i puštene energije u mrežu za svaki mjesec na osnovu čega se može izračunati mjesečna i godišnja ušteda. U tablici 7.2 nalaze se mjeseci u kojima je preuzeta energija veća od one puštene u mrežu. U ovom slučaju korisnik plaća razliku u energiji po trenutnoj važećoj cijeni.

Tablica 7.2 Rezultati za $E_{pi} > E_{ii}$

| Mjesec | | Siječanj | Veljača | Listopad | Studeni | Prosinac | Ukupno |
|---|------------|----------|---------|----------|---------|----------|----------------|
| Proizvedena energija | <i>kWh</i> | 70,5 | 154,4 | 265,5 | 88,2 | 54,4 | 633 |
| Potrošena energija | <i>kWh</i> | 346,4 | 311 | 343,6 | 334,6 | 346,6 | 1682,2 |
| En. puštena u mrežu | <i>kWh</i> | 0,3 | 27,5 | 90,7 | 1,5 | 0,1 | 120,1 |
| En. preuzeta iz mreže | <i>kWh</i> | 276,1 | 184,1 | 168,9 | 247,8 | 292,3 | 1169,2 |
| <i>E_{pi} – E_{ii}</i> | <i>kWh</i> | 275,8 | 156,6 | 78,2 | 246,3 | 292,2 | 1049,1 |
| Cijena preuzete en. | <i>kn</i> | 290,58 | 165 | 82,18 | 259,5 | 307,86 | 1105,12 |

Može se vidjeti da je ovih pet mjeseci potrošeno 1682,2 kWh koji bi se bez fotonaponskog sustava platili **1772,37 kuna**, a u ovom slučaju potrošena energija je plaćena samo **1105,12 kuna** što predstavlja uštedu od **667,24 kune**. Mora se uzeti u obzir da se radi o mjesecima u kojima su uvjeti za proizvodnju jako loši, a unatoč tome ostvarena je značajna ušteda.

Tablica 7.3 prikazuje rezultate za mjesece u kojima proizvodnja nadmašuje potrošnju pa je energija puštena u mrežu veća od one preuzete iz mreže.

Tablica 7.3 Rezultati za $E_{pi} < E_{ii}$

| Mjesec | | Ožujak | Travanj | Svibanj | Lipanj | Srpanj | Kolovoz | Rujan | Ukupno |
|---|------------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|----------------|
| Proizvedena energija | <i>kWh</i> | 358,6 | 412,4 | 482,6 | 502,5 | 528,8 | 510,7 | 366,9 | 3162,5 |
| Potrošena energija | <i>kWh</i> | 342,9 | 331 | 342 | 330,5 | 341,3 | 341,3 | 331,6 | 2360,6 |
| En. puštena u mrežu | <i>kWh</i> | 155,4 | 186 | 232,3 | 259,1 | 270,6 | 264,3 | 159,8 | 1527,5 |
| En. preuzeta iz mreže | <i>kWh</i> | 139,7 | 104,6 | 91,1 | 87,1 | 83,1 | 95,3 | 124,5 | 725,5 |
| <i>E_{pi} – E_{ii}</i> | <i>kWh</i> | -11,3 | -81,4 | -141,2 | -172 | -187,5 | -166 | -35,3 | -802 |
| Cijena preuzete en. | <i>kn</i> | -4,79 | -34,5 | -58,81 | -72,86 | -79,42 | -70,32 | -14,95 | -339,73 |

Iz rezultata u tablici vidljivo je da je u ovih 7 mjeseci proizvodnja značajno nadmašila potrošnju, a bez fotonaponskog sustava potrošenih 2360,6 *kWh* električne energije koštalo bi **2487,13 kuna**. Zbog toga što je preuzeto manje energije nego što je pušteno u mrežu u ovom periodu vlasnik neće plaćati električnu energiju već će od operatera dobiti **339,73 kune** kao naknadu za višak proizvedene energije. Može se zaključiti da je u ovom periodu vlasnik fotonaponskog sustava uštedio **2826,86 kuna**.

Zbrajanjem rezultata vidljivih u tablicama 7.2 i 7.3 dolazi se do zaključka da bi korisnik iz ovog primjera, bez fotonaponske elektrane, električnu energiju platio **4259,5 kuna**, a u ovom slučaju morao bi platiti samo **765,4 kune**. Ostvarena je godišnja ušteda od **3494 kune**.

Ukoliko se uzme najlošiji slučaj u vezi poticaja, odnosno najniža subvencija od 40%, te se usporede troškovi i godišnja dobit dolazi se do sljedećih rezultata:

Tablica 7.4 Ekonomska računica

| Fotonaponska elektrana 11.2 kWh | | | |
|--|-------------|-------------|---------------------|
| Godina | Investicija | Ušteda | Trenutna vrijednost |
| 1. | 40860 | 3494 | -37366 |
| 2. | - | 3494 | -33872 |
| 3. | - | 3494 | -30378 |
| 4. | - | 3494 | -26884 |
| 5. | - | 3494 | -23390 |
| 6. | - | 3494 | -19896 |
| 7. | - | 3494 | -16402 |
| 8. | - | 3494 | -12908 |
| 9. | - | 3494 | -9414 |
| 10. | 9200 | 3494 | -15120 |
| 11. | - | 3494 | -11626 |
| 12. | - | 3494 | -8132 |
| 13. | - | 3494 | -4638 |
| 14. | - | 3494 | -1144 |
| 15. | - | 3494 | 2350 |
| 16. | - | 3494 | 5844 |
| 17. | - | 3494 | 9338 |
| 18. | - | 3494 | 12832 |
| 19. | - | 3494 | 16326 |
| 20. | 9200 | 3494 | 10620 |
| 21. | - | 3494 | 14114 |
| 22. | - | 3494 | 17608 |
| 23. | - | 3494 | 21102 |
| 24. | - | 3494 | 24596 |
| 25. | - | 3494 | 28090 |
| 26. | - | 3494 | 31584 |
| 27. | - | 3494 | 35078 |

Iz rezultata se može vidjeti da će se početni ulog vratiti tijekom 15. godine. Razlog ovako dugog trajanja otplate je u tome što postoji dodatna baterija koja služi kao sigurnost u slučaju prekida napajanja i što je korištena kvalitetna, skuplja oprema. Korištena je najkvalitetnija oprema što se može vidjeti u samim panelima proizvođača LG s korisnošću od 22%, ali ti paneli neće doživjeti nagli pad efikasnosti i proizvodit će velike količine energije i nakon isteka garancije od 25 godina. Baterije su još uvijek jako skupe i to je jedan od problema fotonaponskih sustava, ali napretkom

tehnologije doći će do dodatnog pada cijene. Može se vidjeti da bi ovo kućanstvo nakon 27 godina ostvarilo uštedu od 35000 kuna, a uz to bi sudjelovalo u proizvodnji čiste i obnovljive energije.

7.4. Prednosti i nedostaci fotonaponskog sustava

Ništa na svijetu nije savršeno i svaki sustav ima svoje dobre i loše strane. Može se reći da je sustav dobar ako prednosti nadmašuju nedostatke, a savršen primjer je fotonapon. Na prvi pogled izgleda savršeno jer proizvodi energiju iz sunčevog zračenja koje je za nas ljude neiscrpno, a pri tome nema loših produkata. Materijal od kojeg se izrađuju paneli je silicij kojega također imamo u izobilju. Jedini problem je dostupnost „goriva“. Kad bi sunčevo zračenje bilo konstantno fotonapon bi dominirao proizvodnjom električne energije, ali nažalost nije tako.

Ukoliko se zamisli termoelektrana u kojoj svaki dan nestane ugljena ili hidroelektrana na rijeci koja često presuši može se stvoriti slika svijeta u kojem je fotonapon jedini izvor električne energije. To je veliki problem za ljude koji upravljaju elektroenergetskim sustavom. Proizvodnja u svakom trenutku mora biti jednaka potrošnji i ne postoji drugi način opskrbe električnom energijom. Energija se troši kad je potrebna, neovisno o dobu dana i zbog toga postoji problem s fotonaponom. Uz to problem stvara i niska efikasnost panela koja iznosi oko 20%. To nije problem tijekom ljeta kad postoji dovoljno zračenja, ali u zimskom periodu dolazi do velikih problema. U udaljenim mjestima gdje nema elektroenergetske mreže paneli se koriste za napajanje videonadzora, signalizacije, uređaja za komunikaciju.. Ponekad se dogodi da je zračenje tako slabo da sustav ne može napajati ni ovako male potrošače. Zbog toga se mora povećati instalirana snaga fotonaponskih panela koji onda većinu godine nemaju svrhu i znatno podižu početno ulaganje.

Nedostaci postoje i to je činjenica, ali ni ostali izvori energije nisu savršeni. Termoelektrane zagađuju, nuklearne su opasne, a hidroelektrane zahtijevaju pregrađivanje rijeka i raseljavanje ljudi te loše utječu na biljni i životinjski svijet. Zbog toga je najbolje rješenje kombinacija svih ovih izvora energije kako bi se njihove posljedice svele na minimum. Svaki *kWh* električne energije koji se proizvede iz fotonaponskih sustava znači da negdje gori manje ugljena ili uranija. Ne postoji mogućnost potpunog izbacivanja neobnovljivih izvora energije, ali se proizvodnja električne energije na taj način može uveliko smanjiti. Nepotrebno je spaljivati fosilna goriva, koja toliko zagađuju svijet, tijekom ljeta kad postoje velike količine sunčevog zračenja. Prednost fotonapona je čista proizvodnja i mogućnost instalacije na mjestima koja se inače ne mogu koristiti za druge aktivnosti. Krovovi svih objekata mogu nositi fotonaponske panele i ne postoje ograničenja poput blizine naselja, zagađenja, opasnosti od poplava ili radijacije. To je jednostavno „krov“ koji proizvodi električnu energiju i nikako ne smeta ljudima i okolišu.

8. ZAKLJUČAK

Ubrzani napredak društva dovodi do povećane potražnje za energijom. Dugi niz godina ljudi nisu marili na koji način se dolazi do te energije i kakve posljedice ostaju iza tih procesa. Bio je važan samo napredak i novac. Zemlja se dovela na rub i ljudi su počeli osjećati posljedice zagađenja. U posljednje vrijeme stvari idu na bolje i mnoge zemlje svijeta ulažu u obnovljive izvore energije. Nastoje se zamijeniti štetni procesi proizvodnje energije, a jedan od načina je iskorištavanje sunčevog zračenja. Sunce je beskrajna energija koja omogućava život na zemlji, a ljudi su pronašli način da dio te energije pretvore u električnu energiju koja je toliko potrebna. Fotonaponski sustavi imaju svojih nedostataka, ali su već dostigli razinu na kojoj su isplativi za obične ljude i u njima postoji svijetla budućnost energetike i svijeta. Ova tehnologija se koristila samo u svemiru, a sad je dostupna svima. Tehnologija se razvija i postoje velike šanse da će u bližoj budućnosti iskoristivost panela biti znatno veća, a povrat investicije mnogo brži.

Male fotonaponske elektrane mogu se postaviti na gotove sve objekte i proizvoditi čistu energiju koja će omogućiti očuvanje okoliša i kvalitetniji život za ljude. Ovaj diplomski rad opisao je način na koji prosječno domaćinstvo može postati proizvođač električne energije i bio dio nastojanja u očuvanju Zemlje. U početku je napravljen uvod u solarnu energiju i opisano je kako dolazi do pretvorbe u fotonaponskim panelima. Opisane su sve komponente koje čine ovaj sustav i njihove uloge. U programskom paketu PV SOL odrađen je projekat izgradnje male elektrane na krovu objekta na području Osijeka. Na kraju je odrađena analiza rezultata i isplativosti. Dobiveni rezultati prikazuju da će izgradnja fotonaponskog sustava, u kategoriji samoopskrbe, nakon 27 godina dovesti do uštede od 35000 kuna.

Do velikih uspjeha dolazi se malim koracima i ljudi, koji su u mogućnosti, moraju razmišljati kako očuvati ovaj svijet i sva živa bića koja u njemu žive. Izgradnja fotonaponskih sustava je jedan od načina kako krenuti u ovaj veliki projekat. Država i svi ljudi kao pojedinci moraju dati sve od sebe da svijet koji se ostavlja budućim generacijama bude bolji nego što je bio kad su ga „dobili“. Ovo je savršen primjer da je moguće ostvariti uštedu i čuvati okoliš.

LITERATURA

- [1] D. Šljivac, »Predavanja OIE,« u *Fotonaponski sustavi*, Osijek, 2017_2018.
- [2] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering*, 2013.
- [3] »European Commission: Photovoltaic Geographical Information System,« EU, 2017. [Mrežno]. Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-photovoltaic-geographical-information-system/pvgis-data-download/country-and-regional-maps_en. [Pokušaj pristupa 26 travanj 2022].
- [4] K. Fekete, »Predavanje OEES,« u *Distribucija električne energije*, Osijek, 2017_2018.
- [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] »valentin-software: PV SOL - premium,« VALENTIN software, [Mrežno]. Available: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>. [Pokušaj pristupa svibanj 2022].
- [7] »zakon.hr : Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji,« Republika Hrvatska, [Mrežno]. Available: <https://www.zakon.hr/z/827/Zakon-o-obnovljivim-izvorima-energije-i-visokou%C4%8Dinkovitoj-kogeneraciji>. [Pokušaj pristupa 2022].
- [8] M. Katić, »zgradonacelnik: Obračun energije solarne elektrane i zašto je 'opasno' postati proizvođač,« 23 5 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.zgradonacelnik.hr/savjeti/obracun-energije-solarne-elektrane-i-zasto-je-opasno-postati-proizvodac/740>. [Pokušaj pristupa 28 5 2022].
- [9] B. Werhmann, »CLEAN ENERGY WIRE: Solar power in Germany – output, business & perspectives,« 13 4 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/solar-power-germany-output-business-perspectives>. [Pokušaj pristupa 29 5 2022].
- [10] I. Sučić, »Obnovljivi.com : Moderni način pretvorbe energije Sunca u električnu energiju,« 2015. [Mrežno]. Available: <https://www.obnovljivi.com/energija-sunca/53-moderni-nacini-pretvorbe-energije-sunca-u-elektricnu-energiju-fotonapon?showall=1>. [Pokušaj pristupa 27 travanj 2022].
- [11] »National Renewable Energy Laboratory: Research in PV technology,« [Mrežno]. Available: <https://www.nrel.gov/index.html>. [Pokušaj pristupa 27 travanj 2022].
- [12] »Solarprojekt:Fotonaponski moduli,« [Mrežno]. Available: <http://solarprojekt.hr/1902-2/led-fotonaponski-moduli/>. [Pokušaj pristupa 27 travanj 2022].
- [13] »hops: Dijagram opterećenja 5.2.2022.,« HOPS, 10 veljača 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.hops.hr/dijagram-opterecenja-dnevni>. [Pokušaj pristupa 10 veljača 2022].
- [14] »solaxpower: Types of battery,« [Mrežno]. Available: <https://www.solaxpower.com/>. [Pokušaj pristupa 7 4 2022].
- [15] »ginverter: Grid inverters,« GROWATT, [Mrežno]. Available: <https://www.ginverter.com/>. [Pokušaj pristupa 5 svibanj 2022].
- [16] »Cro-Solar: Hibridni inverteri,« [Mrežno]. Available: <https://www.cro-solar.eu/hybrid.htm>. [Pokušaj pristupa svibanj 2022].

- [17] »hep.hr : Kupac s vlastitom proizvodnjom,« HEP, [Mrežno]. Available: <https://www.hep.hr/opskrba/poduzetnistvo/kupac-s-vlastitom-proizvodnjom/1534>. [Pokušaj pristupa 2022].
- [18] »solarno.net: RAK SOLARA zašto solarne elektrane u BiH prerano gube snagu,« 31. 1. 2021. [Mrežno]. Available: <https://solarno.net/rak-solara-zasto-solarne-elektrane-u-bih-prerano-gube-snagu/>. [Pokušaj pristupa travanj 2022].
- [19] »lg.com: Products: LG400Q1C-A6,« LG, [Mrežno]. Available: <https://www.lg.com/us/business/neon-r/lg-lg400q1c-a6>. [Pokušaj pristupa travanj 2022].
- [20] »Wikipedija,« 22. travanj 2022. [Mrežno]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_in_the_European_Union. [Pokušaj pristupa 26. travanj 2022].
- [21] »Wikipedija,« 2022. [Mrežno]. Available: http://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija. [Pokušaj pristupa 27. travanj 2022].

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad opisuje način iskorištavanja solarne energije izgradnjom fotonaponskih sustava. U uvodnom dijelu opisana je energija Sunca i način na koji dolazi do pretvorbe u električnu energiju. Drugo poglavlje daje osnovne informacije o fotonaponskim ćelijama, modulima i principu fotonaponskog efekta koji omogućava pretvorbu. Zatim je rečeno osnovno o fotonaponskom sustavu i komponentama koje ga čine, njihovom odabiru i ulozi koju imaju u sustavu. Navedene su zakonske odredbe i uvjeti koji se moraju ispuniti prilikom izgradnje fotonaponske elektrane. Projektiran je primjer privatne elektrane na objektu na području Osijeka. Radi se o hibridnom sustavu koji paralelno koristi proizvodnju modula, mrežu i baterije. Analizirani su rezultati, troškovi i isplativost ulaganja. Na kraju su komentirane pozitivne i negativne strane ovog sustava i moguća poboljšanja. Navedeni su savjeti za povećanje efikasnosti elektrane koji su jako korisni za potencijalne investitore.

ABSTRACT

This graduate thesis describes how to harness solar energy by building photovoltaic systems. The introductory part describes the energy of the sun and the way in which the conversion to electricity occurs. The second chapter provides basic information about photovoltaic cells, modules and the principle of photovoltaic effect that enables conversion. Then it was said basically about the photovoltaic system and the components that make it up, their selection and the role they play in the system. The legal provisions and conditions that must be met when building a photovoltaic power plant are listed. An example of a private power plant on a facility in the Osijek area was designed. It is a hybrid system that uses the production of modules, network and batteries in parallel. The results, costs and cost-effectiveness of investments were analyzed. Finally, the positive and negative sides of this system and possible improvements were commented on. There are tips to increase the efficiency of the power plant that are very useful for potential investors.

ŽIVOTOPIS

Marko Knežević rođen je u Novoj Biljoj 04. ožujka 1997. Osnovnu školu je završio u Žepču, a gimnaziju u srednjoj školi Katoličkog školskog centra „Don Bosco“ u Žepču. Nakon završetka srednje škole odlučuje se za nastavak školovanja u Republici Hrvatskoj i upisuje preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon uspješne 3 godine studiranja stekao je zvanje Sveučilišni prvostupnik (baccalaureus) inženjer elektrotehnike i informacijske tehnologije te upisuje diplomski studij i odabire izborni blok Elektroenergetski sustavi.

Društvena je i komunikativna osoba, spremna za nova iskustva i izazove. Odlikuje ga tečan govor engleskog jezika i rad u programima kao što su AutoCAD, PV SOL, LogoSOFT, DigSILENT, Easy Power, MS Office (Word, Excel) , Matlab. To je osoba koja uživa u svojoj struci, ali i u povijesti i raznim dokumentarnim filmovima. Odlikuju ga fleksibilnost i prilagodljivost, spremnost za nova znanja i napredak.

Marko Knežević

Vinište bb, 72230 Žepče, BiH

Mobitel; 098 953 6333

Mail: marko.knez971@gmail.com