

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 2295

**SMJERNICE ZA IZRADU PROJEKTNE
DOKUMENTACIJE FOTONAPONSKOG
SUSTAVA SPOJENOG NA
ELEKTROENERGETSKU MREŽU**

Tihomir Pehar

Zagreb, listopad 2009.

Tihomir Pechar

0036412407

Sažetak

Povoljan geografski položaj Hrvatske i sustav poticaja za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora povećali su interes za izgradnjom fotonaponskog sustava snage do 30kW te njegovog priključenja na elektroenergetsku mrežu.

U prvom djelu rada obrađeno je Sunčevo zračenje, fotonaponske ćelije i vrste fotonaponskih sustava. U drugom djelu obrađeno je sve što treba sadržavati projekt fotonaponskog sustava spojenog na elektroenergetsku mrežu, kao što je: procjena proizvodnje električne energije, tehnički opis i karakteristike fotonaponskog sustava, analiza isplativost projekta te način priključka na elektroenergetsku mrežu.

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Sunčevo zračenje	2
2.1.	Ekstraterestičko zračenje	2
2.2.	Procjena Sunčevog zračenja	4
2.3.	Sunčevo zračenje na plohu pod kutom	5
3.	Osnovni parametri fotonaponskih ćelija	7
3.1.	Serijski i paralelni otpor fotonaponske ćelije	8
3.2.	Napon praznog hoda	9
3.3.	Struja kratkog spoja	10
3.4.	Karakteristični otpor i snaga fotonaponske ćelije	11
3.5.	Djelotvornost fotonaponske ćelije	13
3.6.	Materijali za proizvodnju fotonaponskih ćelija	13
4.	Fotonaponski moduli	15
4.1.	Premosna dioda	16
5.	Vrste fotonaponskih sustava	18
5.1.	Samostalni (autonomni) sustav	18
5.2.	Hibridni FN sustavi	19
5.3.	Pasivni i aktivni mrežni FN sustav	20
6.	Photovoltaic Geographical Information System	22
6.1.	Podaci o intenzitetu sunčevog zračenja na području Makarske	23
6.2.	Procjena proizvodnje električne energije	27
6.3.	Postavljanje fotonaponskih modula	31
7.	Fotonaponski sustav spojen na mrežu	34
7.1.	Smjernice za projektiranje fotonaponskih sustava	36

7.1.1.	Upute za odabir opreme fotonaponskog sustava	36
7.2.	Tehnički opis fotonaponskog sustava	37
7.2.1.	FN moduli BP 4175S	39
7.2.2.	Kabeli za spajanje fotonaponskih modula	40
7.2.3.	Izmjenjivač.....	41
7.3.	Zaštita od atmosferskih i induciranih prenapona.....	44
7.4.	Ključne norme na području fotonaponskih sustava.....	47
8.	Troškovi i isplativost fotonaponskog sustav.....	48
8.1.	Analiza troškova ulaganja u fotonaponsku opremu.....	48
8.2.	Isplativost projekta	49
8.3.	Troškovi opreme i radova fotonaponskog sustava.....	50
8.4.	Naknada za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije (OIE)	52
8.5.	Isplativost fotonaponskog sustava	53
9.	Distribuirana proizvodnja	54
9.1.	Priključenje fotonaponskog sustava na mrežu	55
9.1.1.	Tehnički uvjeti za priključenje FN sustava na mrežu	56
9.2.	Potrebna dokumentacija za priključak FN sustava na mrežu.....	58
9.3.	Utjecaj fotonaponskog sustava na distribucijsku mrežu.....	59
9.4.	Nadzor fotonaponskog sustava.....	59
10.	Osvrt na iskustva u priključku FN sustava u Njemačkoj	61
10.1.	Inteligentno isključenje/uključenje uređaja	62
10.2.	Tehnički moguće, tržišno upitno.....	63
11.	Zaključak	65
12.	Literatura	66

Popis oznaka i kratica

AC	izmjenično (engl. alternating current)
CO ₂	ugljik dioksid
DC	istosmjerno (engl. direct current)
DHMZ	državni hidrometeorološki zavod
Engl.	Engleski
EU	Evropska Unija
ETHZ	Swiss Federal Institute of Technology Zurich
IEC	međunarodna elektrotehnička komisija (engl. International Electrotechnical Commission)
IEEE	institut inženjera elektrotehnike i elektronike (engl. Institute of Electrical & Electronics Engineers)
H ₂ O	voda
MPP	točka maksimalne snage (engl. maximum power point)
MPPT	sustav za praćenje optimalne radne točke (engl. maximum power point tracker)
NASA	Američka svemirska agencija
ODS	Operatora distribucijskog sustava
O ₃	ozon
Opt.	optimalan
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
RH	Republika Hrvatska
Si	silicij
THD	harmonično izobličenje

Popis tablica

<i>Tablica 1. Podaci o Sunčevom zračenju.....</i>	<i>23</i>
<i>Tablica 2. Podaci o proizvodnji električne energije za FN sustav sa fiksnim kutom</i>	<i>28</i>
<i>Tablica 3. Podaci o proizvodnji električne energije za FN sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 4. Četiri položaja modula.....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 5. Podaci o proizvodnji električne energije za FN sustav sa jednoosnim praćenjem, (4 stupnja horizontalnog pomicanja)</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 6. Karakteristike ugrađenog modula [10].....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 7. Karakteristike izmjenjivača [10].....</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 8. Troškovi materijala fotonaponskog sustava</i>	<i>51</i>
<i>Tablica 9. Poticajna cijena električne energije</i>	<i>52</i>

Popis slika

<i>Slika 1. Ekstraterestičko zračenje (AM 0) i zračenje na površini Zemlje (AM 1,5)[3]</i>	3
<i>Slika 2. Visina Sunca, zenitni kut Sunca, Sunčev azimut i kut upada</i>	6
<i>Slika 3. Ekvivalentna električna shema fotonaponske ćelije</i>	7
<i>Slika 4. Utjecaj a) serijskog b) paralelnog otpora na I-U karakteristiku</i>	9
<i>Slika 5. Strujno-naponska (I-U) karakteristika FN ćelije</i>	10
<i>Slika 6. Ovisnost I-U karakteristike o jakosti Sunčeva zračenja</i>	11
<i>Slika 7. Maksimalna snaga idealne i realne FN ćelije</i>	12
<i>Slika 8. Kapsuliranje fotonaponskih ćelija</i>	15
<i>Slika 9. Spajanje fotonaponski modula u polje</i>	17
<i>Slika 10. Samostalni FN sustav za istosmjerna i izmjenična trošila</i>	19
<i>Slika 11. Hibridni FN sustav za istosmjerna ili izmjenična trošila</i>	20
<i>Slika 12. Pasivni mrežni FN sustav</i>	20
<i>Slika 13. Aktivni mrežni FN sustav</i>	21
<i>Slika 14. Graf mjesečnog optimalnog kuta</i>	24
<i>Slika 15. Graf Sunčevog zračenja za različite plohe</i>	25
<i>Slika 16. Cilindrični Sunčev dijagram [7]</i>	25
<i>Slika 17. Godišnja ozračenost na horizontalnu plohu za RH [7]</i>	26
<i>Slika 18. Prikaz proizvodnje za sva tri položaja modula</i>	31
<i>Slika 19. Visina Sunca i minimalni razmak modula</i>	33
<i>Slika 20. Puštanje u mrežu samo suvišne energije</i>	35
<i>Slika 21. Puštanje u mrežu svu proizvodnu energiju</i>	35
<i>Slika 22. Jednopolna shema fotonaponskog sustava</i>	38
<i>Slika 23. U-I karakteristika solarnog modula BP 4175S</i>	40
<i>Slika 24. Zaštita FN sustava uzemljenjem i odvodnicima prenapona</i>	45
<i>Slika 25. FN sustav na kući sa gromobranskom instalacijom</i>	46
<i>Slika 26. Nacrt sučelja i priključka na mrežu fotonaponskog sustava</i>	56
<i>Slika 27. Povezivanje izmjenjivača sa računalom</i>	60
<i>Slika 28. Tarifa električne energije iz FN sustav predane u mrežu i potrošene lokalno [18]</i>	62

<i>Slika 29. Optimalno gospodarenje električnom energijom u kućanstvu pomoću inteligentnog brojila.....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 30. Verzije tokova električne energije iz mreže i FN sustava</i>	<i>64</i>

1. Uvod

U današnje vrijeme obnovljivi izvori energije imaju sve veću važnost u elektroenergetskom sustavu, a razvijene zemlje u velikoj mjeri potiču njihovu upotrebu. Razlog tome treba posebno istaknuti u visokoj cijeni fosilnih goriva uz njihov stalni porast, kao i veliko onečišćenje okoliša koje utječe na klimatske promjene. U obnovljive izvore energije spadaju energija vode, vjetra, biomase, Sunčevo zračenje i geotermalna energija.

Hrvatska ima veoma povoljan geografski položaj što se tiče iskorištavanja Sunčeve energije. Postoje uglavnom tri načina upotrebe Sunčeve energije: pretvorba u toplinsku energiju i električnu energiju te biomase. Sunčeva energija se može na više načina pretvoriti u električnu, a najjednostavnija je izravna pretvorba pomoću fotonaponskih (solarnih) ćelija. Princip rada sunčane ćelije temelji se na izravnoj pretvorbi Sunčeve energije u električnu energiju na temelju fotoelektričnog efekta.

Fotonaponski sustavi imaju brojne prednosti kao što su: Sunčeva energija je besplatna i praktički neiscrpna, tehnologija pretvorbe energije je čista, moguće je napajanje potrošača na mjestima gdje nema izgrađenog elektroenergetskog sustava, karakterizira je visoka pouzdanost i mali pogonski troškovi, a osigurava se dugogodišnji vijek trajanja fotonaponskih modula (>25 godina). Nedostatci fotonaponskog sustav su ti što proizvodnja ovisi o osunčanosti, potrebne su velike površine za veće elektrane, tehnologija pretvorbe Sunčeve energije u električnu energiju je još uvijek skupa, a sve to uz malu efikasnost. Time su ulaganja u solarne elektrane teško isplativa bez dodatnih poticaja. Iako se u Republiku Hrvatsku uvozi preko 30 % električne energije, od početka listopada 2008. godine instalirano je samo pet fotonaponskih sustava, a samo je jedan „Solarni krov Špansko-Zagreb“, dobio svu potrebnu dokumentaciju glede stjecanja statusa povlaštenog proizvođača električne energije [1].

2. Sunčevo zračenje

Pri proračunavanju i projektiranju sunčanih uređaja potrebno je poznavati Sunčeva zračenja koje upada na plohu kolektora.

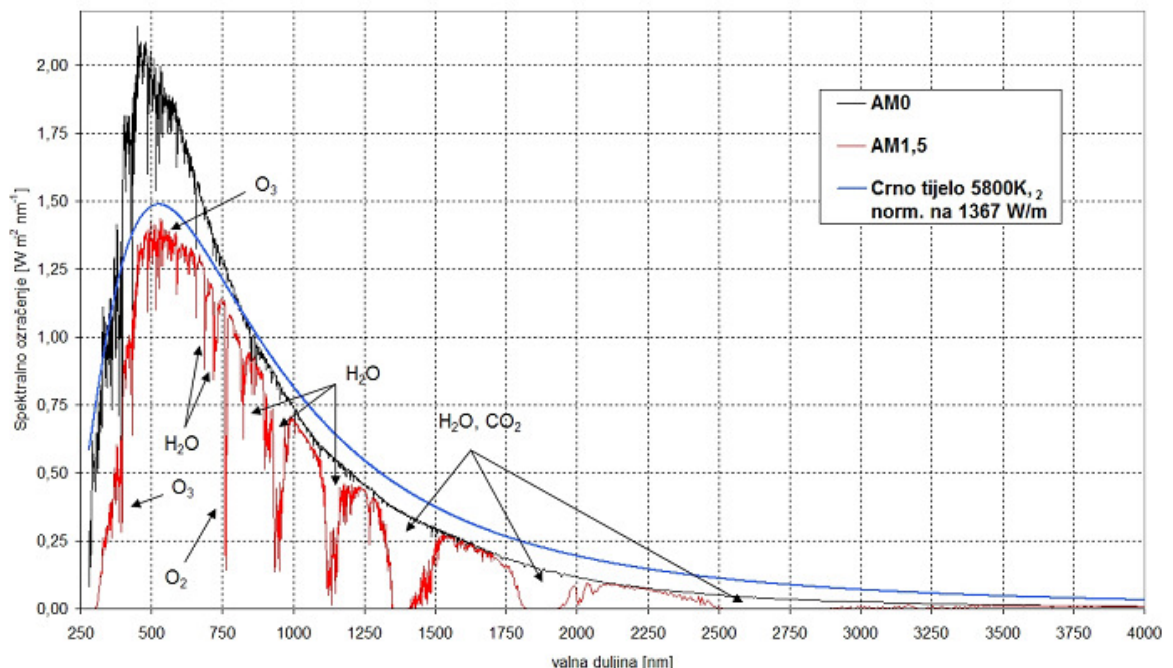
Sunce je zvijezda koja se nalazi u središtu našeg planetarnog sustava, Sunčevog sustava, te je neposredno ili posredno, izvor gotovo sve raspoložive energije na Zemlji. Velikim je djelom sastavljeno od vodika i helija. U unutrašnjosti Sunca vodik se nuklearnim reakcijama fuzije pretvara u helij što izaziva oslobađanje velikih količina energije, a temperatura u samoj jezgri premašuje 15000000 K. Zračenje iz unutrašnjosti u velikom dijelu apsorbira sloj vodika bliži površini pa je na površini Sunca temperatura oko 6000 K (točnije, 5762 ± 50 K), a spektar Sunca približno odgovara spektru crnog tijela ugrijanog na temperaturu 5760 K. Stoga se temperatura od 5760 K može uzeti kao efektivna temperatura Sunčeve površine, a pomoću nje se primjenom Stefan-Boltzmannova, Wienova i Planckova zakona moguće proračunati energijski spektar Sunčeva zračenja. Snaga Sunčevog zračenja iznosi oko $3,8 \cdot 10^{23}$ kW, od čega Zemlja dobiva $1,7 \cdot 10^{14}$ kW. Zemlja od Sunca godišnje dobiva oko $4 \cdot 10^{21}$ kJ energije što je nekoliko tisuća puta više nego što iznosi ukupna godišnja potrošnja energije iz svih primarnih izvora. To znači da Zemlja u jednom satu od Sunca primi dovoljno energije za zadovoljenje svih svojih godišnjih energetske potreba [2].

2.1. Ekstraterestičko zračenje

Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu naziva se ekstraterestičko zračenje. To zračenje opisujemo gustoćom energijskog toka koji upada na površinu okomitu na smjer upadnih Sunčevih zraka. Ta veličina je kratkovalno zračenje koje Zemlja dobiva od Sunca, a izražava se u W/m^2 . Kako se Zemlja oko Sunca giba po eliptičkoj putanji, tako se i njihova međusobna udaljenost mijenja pa gustoća snage na ulazu u Zemljinu atmosferu nije konstantna već se mijenja od najmanje vrijednosti od $1307 W/m^2$ do najveće $1399 W/m^2$. Srednja vrijednost Sunčevog zračenja dobivena je mjerenjem, a iznosi oko $1367 W/m^2$ [2]. Za razliku od ekstraterestičkog zračenje čije su promjene vrlo male, Sunčevo

zračenje na površini Zemlje zbog atmosferskih utjecaja, te lokalnih promjena u atmosferi kao što su vodena para, oblaci i smog, je promjenjivo.

Ulaskom u atmosferu, zbog apsorpcije i raspršenja, zračenje oslabi i poprimi drugačiji oblik spektra od ekstraterestičkog zračenja. Do raspršenja dolazi zbog interakcije zračenja s česticama ili velikim molekulama plinova prisutnih u atmosferi što uzrokuje promjenu izvorne putanje zračenja. Apsorpcija Sunčevog zračenja nastaje kad molekule u atmosferi apsorbiraju energiju određenih valnih duljina, pri čemu su za apsorpciju uglavnom odgovorni ozon (O_3), vodena para (H_2O) i ugljični dioksid (CO_2). Ozon u potpunosti apsorbira ultraljubičasto zračenje valnih duljina od $0.20\mu m$ do $0.36\mu m$ koje je štetno po zdravlje, a apsorpcija ovisi i o debljini sloja ozona koji se mijenja tijekom godine. Ugljični dioksid apsorbira infracrveno zračenje većih valnih duljina, a vodena para apsorbira znatan dio infracrvenog zračenja malih valnih duljina. Atmosferski plinovi apsorbiraju samo u strogo ograničenom području spektra fotona određene valne duljine pa se takva apsorpcija naziva selektivna apsorpcija (slika1).[3]



Slika 1. Ekstraterestičko zračenje (AM 0) i zračenje na površini Zemlje (AM 1,5)[3]

Čitav spektar Sunčevog zračenja koji dolazi do površine Zemlje obuhvaća valne duljine od 300 nm do 2500 nm.

Ukupno oko 51% upadnog ekstraterestičkog zračenja dolazi do površine Zemlje, 26% se rasprši ili reflektira na oblacima i atmosferskim česticama, 19 % zračenja se apsorbira, a oko 4% se reflektira od Zemljine površine nazad u svemir.

2.2. Procjena Sunčevog zračenja

Temeljni ulazni podatak o Sunčevom zračenju je srednja dnevna ozračenost vodoravne plohe, koja se dobiva raznim mjerenjem. Time se bavi posebna grana meteorologije, aktinometrija. Za praktično iskorištavanje sunčane energije važni su podaci o insolaciji (osunčanju), ukupnom ozračenju horizontalne plohe i difuznom ozračenju horizontalne plohe. Postupak procjene raspoloživog Sunčevog potencijala za određenu lokaciju olakšan je postojanjem baza podataka koje sadrže sve informacije o intenzitetu Sunčevog zračenja, temperaturama okoline, prosječnim dnevnim temperaturama itd.

Sunčevog zračenja koje upada na plohe na Zemlji može biti:

- neposredno: zračenje Sunčevih zraka
- difuzno zračenje neba: raspršeno zračenje cijelog neba zbog pojava u atmosferi
- difuzno zračenje obzorja: dio difuznog zračenja koji zrači obzorje
- sunčevo difuzno zračenje: difuzno zračenje bliže okolice Sunčevog diska koji se vidi sa Zemlje
- odbijeno zračenje: zračenje koje se odbija od okolice i pada na promatranu plohu.

Trenutno postoji više kvalitetnih baza podataka, a u skupinu najkorištenijih baza podataka spadaju:

- NASA – surface meteorology and solar energy database,
- Meteonom database,
- PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System.

Bitno je napomenuti da podaci o intenzitetu sunčeva zračenja na okomitu plohu u prethodno navedenim bazama podataka nisu izmjereni, već su izračunati

na osnovi satelitskih mjerenja ekstraterestičke radijacije na rubu Zemljine atmosfere. Za područje Republike Hrvatske ukupno Sunčevo zračenje na vodoravnu plohu se izračunava iz trajanja sijanja Sunca (insolacija, osunčavanje), koje se dobilo dugogodišnjim nizom mjerenja u 37 mjernih postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda [4]. Za procjenu Sunčevog zračenja na području na kojem se nalazi fotonaponski sustav koristit će se Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).

2.3. Sunčevo zračenje na plohu pod kutom

Fotonaponski moduli se najčešće postavljaju na plohe nagnute prema Suncu, u svrhu maksimalne ozračenosti.

U većini slučajeva u praksi, ploha fotonaponskog modula je orijentirana točno prema jugu (na sjevernoj Zemljinoj polutci) i nagnuta pod nekim određenim kutom u odnosu na horizontalu, pa je potrebno znati koliki iznos Sunčevog zračenja upada na tako nagnutu plohu.

Za proračun sunčeve energije koja upada na plohu pod kutom najvažniji podatak je upadni kut direktnog sunčevog zračenja. Kut upada Sunca θ je kut između upadnih Sunčevih zraka i normale na plohu na koju upada zračenje. Pri tome je orijentacija plohe definirana njenim azimutom α i nagibom plohe u odnosu na horizontalu β . Kut upada Sunca može se izračunati poznavanjem zemljopisne širine φ , satnog kuta Sunca ω i deklinacije δ i orijentacijom plohe [5].

$$\theta(\beta, \alpha) = \cos^{-1}(\cos^*(\beta, \alpha)), \text{ ako je } \cos^*(\beta, \alpha) > 0 \quad (1)$$

$$\theta(\beta, \alpha) = 0, \text{ ako je } \cos^*(\beta, \alpha) \leq 0 \quad (2)$$

gdje je:

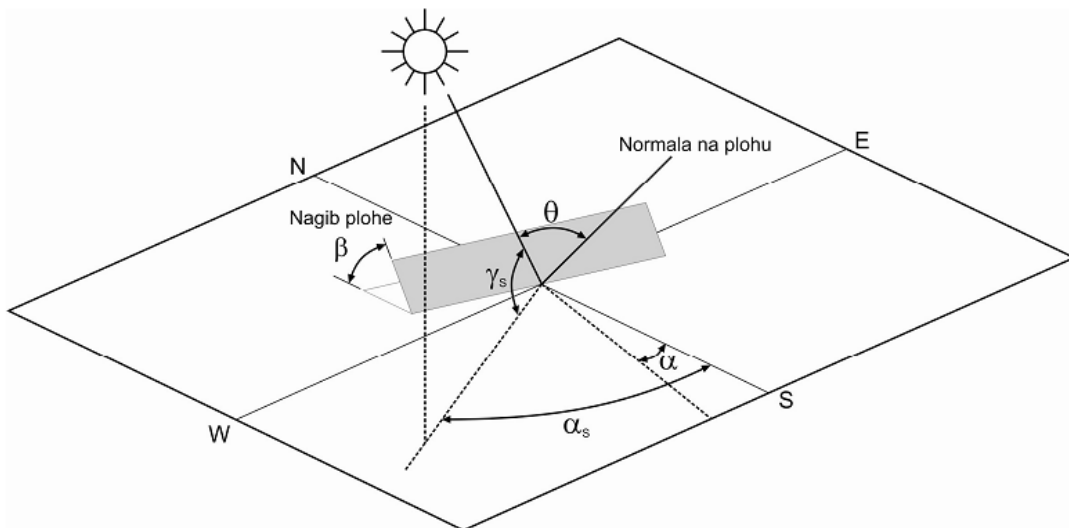
$$\begin{aligned} \cos^*(\beta, \alpha) = & \\ & \cos \omega [\cos \delta (\cos \varphi \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta)] + \sin \omega [\cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta] + \\ & \sin \omega [\sin \varphi \cdot \cos \beta - \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha] \end{aligned} \quad (3)$$

Deklinacija Sunca δ je glavni parametar potreban za proračunavanje položaja Sunca, a predstavlja kut između spojnice središta Zemlje i središta Sunca i ravnine u kojoj leži ekvator.

Visina Sunca γ_S je kut između središta Sunčevog diska i horizontalne ravnine, a može se izračunati iz:

$$\gamma_S = \sin^{-1}(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) [^\circ] \quad (4)$$

Sunčev azimut α_S je kut između vertikalne ravnine koja sadrži smjer Sunca i vertikalne ravnine koja prolazi smjerom sjever-jug. Sunčev azimut se mjeri od juga na sjevernoj, odnosno od sjevera na južnoj polutci. Azimut ima pozitivan predznak poslijepodne u sunčanom vremenu, dok prije sunčanog podneva poprima negativne vrijednosti. Visina Sunca, zenitni kut Sunca, Sunčev azimut i kut upada Sunca prikazani su na slici 2.



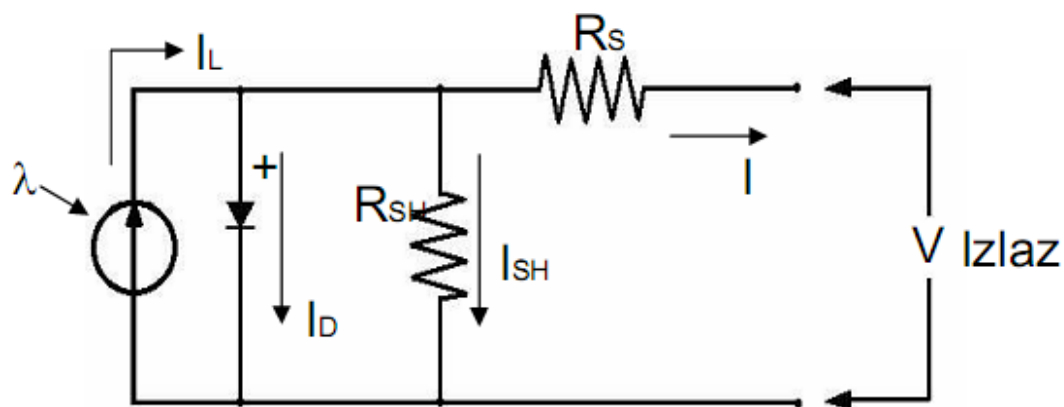
Slika 2. Visina Sunca, zenitni kut Sunca, Sunčev azimut i kut upada

3. Osnovni parametri fotonaponskih ćelija

Fotonaponska ćelija je elektronički element koji Sunčevu energiju koja upada na plohu ćelije pretvara izravno u električnu na principu fotonaponskog efekta. Za ispravan odabir fotonaponskih modula (za područje upotrebe) potrebno je poznavati parametre ćelija od kojih je stvoren. I-U karakteristika fotonaponske ćelije prolazi kroz tri karakteristične točke u kojima su definirani osnovni parametri fotonaponske ćelije:

1. Struja kratkog spoja I_{ks} – struja koja teče kad je napon na stezaljkama fotonaponskih ćelija jednak nuli.
2. Napon otvorenog kruga (praznog hoda) U_{ok} – napon koji postoji na stezaljkama fotonaponske ćelije u režimu otvorenog kruga (tj., kad je $I=0$).
3. Točka maksimalne snage P_m – točka u kojoj fotonaponska ćelija daje najveću moguću snagu. Maksimalna snaga P_m odgovara najvećoj mogućoj površini pravokutnika koji se može upisati u I-U karakteristiku. U točki maksimalne snage vrijednost struje je I_m , a napona U_m .

Osim ova tri parametra, napon otvorenog kruga ćelije, struja kratkog spoja, snaga FN ćelije, spomenut ćemo još i ove parametre: karakteristični otpor FN ćelije, stupanj korisnog djelovanja FN ćelije, ovisnost stupnja korisnog djelovanja ili spektralni odziv FN ćelije, ovisnost stupnja korisnog djelovanja ćelije o širini zabranjenog pojasa, te ovisnost navedenih parametara o temperaturi. Zbog jednostavnijeg razumijevanja parametara FN ćelija se prikazuje pomoću nadomjesnog strujnog kruga kao strujni izvor, što prikazuje slika 3.



Slika 3. Ekvivalentna električna shema fotonaponske ćelije

Struja I je jednaka struji I_L koju proizvodi sunčeva svjetlost, umanjenoj za zanemarivu struju diode I_D i struju šanta I_{SH} . Serijski otpor R_S predstavlja unutarnji otpor toka struje, a otpor šanta je obrnuto razmjernan rasipnoj struji prema zemlji.

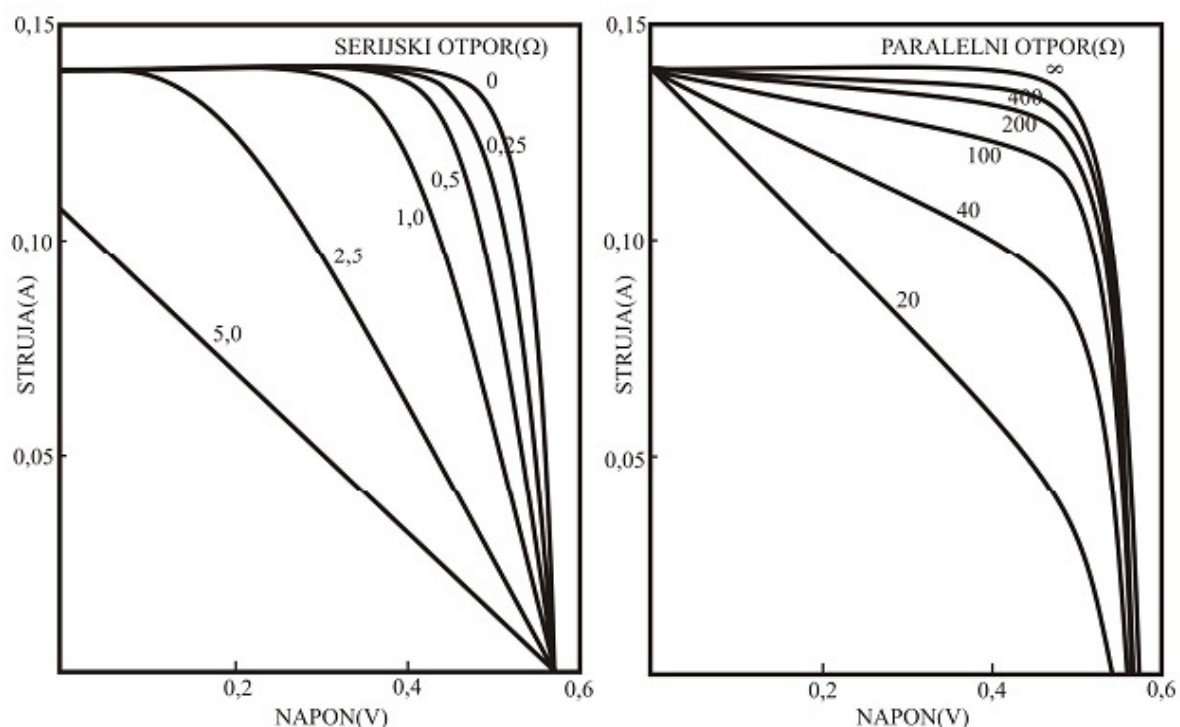
3.1. Serijski i paralelni otpor fotonaponske ćelije

Serijski otpor R_S je omski otpor na koji nailazi struja koja teče kroz ćeliju i kroz površinu ćelije prema kontaktima do spoja s priključkom na vanjski krug. Na iznos serijskog otpora utječe otpor materijala, kontakata, nečistoće i dr. Najvažniji efekt koji je posljedica postojanja serijskog otpora je smanjenje faktora punjenja, a pri većim vrijednostima može doći i do smanjenja struje kratkog spoja [6]. Iznos serijskog otpora nije stalan, mijenja se kako se mijenja i cijela strujno-naponska karakteristika sunčane ćelije s promjenom temperature i razine ozračenja. Kvalitetne sunčane ćelije imaju manji serijski otpor, odnosno oštrije koljeno I-U karakteristike.

Otpor šanta R_{SH} (paralelni otpor) je obrnuto razmjernan rasipnoj struji prema zemlji. Paralelni otpor posljedica je postojanja lokalnih defekata u pn spoju zbog čega dolazi do gubitaka zbog otjecanja struja. U idealnoj fotonaponskoj ćeliji otpor R_{SH} je beskonačan, ali u realnim su slučajevima struje otjecanja proporcionalne naponu na ćeliji. Mala vrijednost paralelnog otpora omogućuje otjecanje dijela fotostruje, što je posebno značajno pri manjim vrijednostima zračenja na ćeliju. Gubitke zbog paralelnog otpora karakterizira nelinearnost i nestalnost pa se razlikuju od ćelije do ćelije.

Serijski i paralelni otpor utječu na oblik I-U karakteristike fotonaponske ćelije te na ukupnu snagu. Taj se utjecaj može zanemariti u slučaju kad je serijski otpor puno manji od karakterističnog otpora ($R_S \ll R_k$), odnosno ako je paralelni otpor puno veći od karakterističnog otpora ($R_P \gg R_k$).

Utjecaj serijskog i paralelnog otpora na I-U karakteristiku prikazan je slikom 4.



Slika 4. Utjecaj a) serijskog b) paralelnog otpora na I-U karakteristiku

3.2. Napon praznog hoda

Napon praznog hoda ćelije je elektromotorna sila koja se javlja na stezaljkama ćelije prilikom otvorenog strujnog kruga (struja $I = 0$). To je uz struju kratkog spoja najvažniji parametar za opisivanje električne učinkovitosti pojedine ćelije. Maksimalni foto-napon (U_{PH}) se dobiva u praznom hodu strujnog kruga fotonaponske ćelije pod punim osvjetljenjem. Ignorirajući gubitke, odnosno struju rasipanja prema zemlji, uzimamo za $I = 0$ i napon iznosi:

$$U_{PH} = \frac{kT}{Q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_D} + 1\right) \quad [V] \quad (5)$$

gdje je:

- kT/Q – apsolutna temperatura izražena u voltima ($300 \text{ K} = 0.026 \text{ V}$)
- I_L – foto-generirana struja
- I_D – struja zasićenja diode
- $Q = \text{naboj} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- $k = \text{Boltzmannova konstanta} = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

- T – temperatura u K.

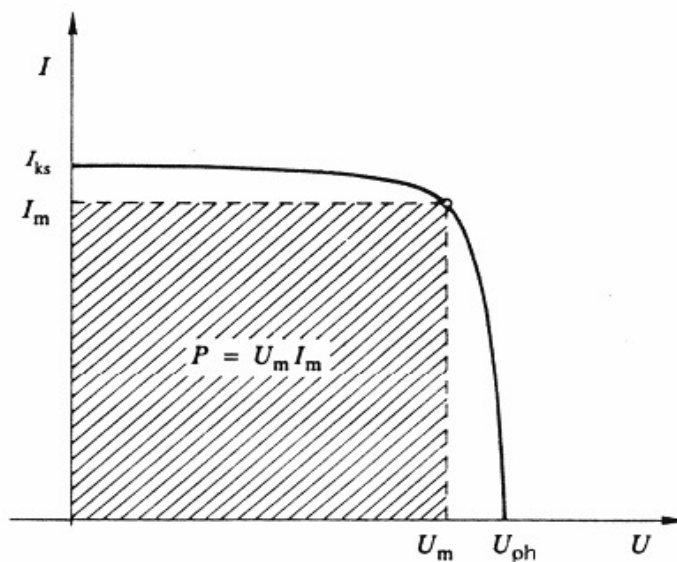
3.3. Struja kratkog spoja

Struja kratkog spoja I_{KS} je ona struja koja će poteći kad su stezaljke ćelije kratko spojene, odnosno ako je napon između stezaljki jednak nuli. Ukupna struja I_{KS} računa se prema izrazu (2):

$$I_{KS} = I_L - I_D \left[e^{\frac{QU_{PH}}{kT}} - 1 \right] - \frac{U_{PH}}{R_{SH}} \quad [A] \quad (6)$$

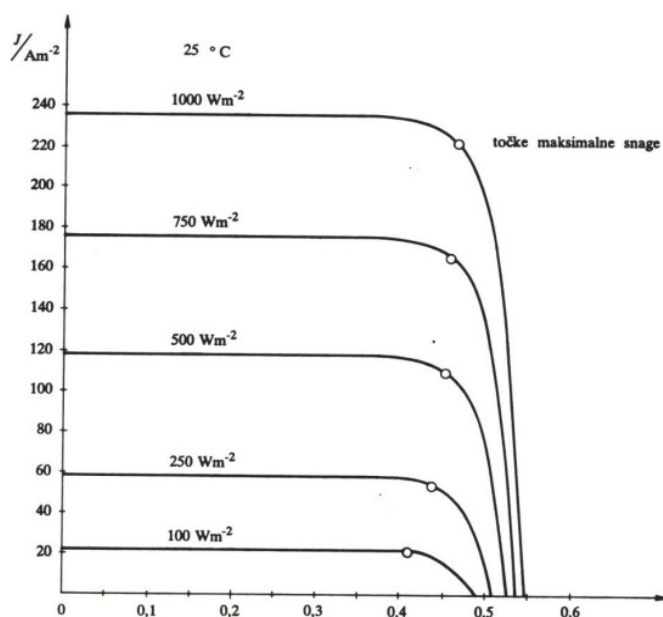
gdje je R_{SH} otpor šanta.

U gore navedenom izrazu posljednji član izraza (U_{PH}/R_{SH}) predstavlja struju rasipanja u zemlju, koja je znatno manja u odnosu na struje I_L i I_D , pa se može zanemariti. Struja zasićenja diode može se eksperimentalno odrediti primjenjujući napon U_{PH} u mraku i mjereći struju koja odlazi u ćelije. Ova struja često se naziva «struja mraka» ili obrnuta struja zasićenja diode. Na ovaj se način dobivaju dvije granične točke u strujno-naponskoj karakteristici FN ćelije, a ostale se točke dobiju mjerenjem (slika 5).



Slika 5. Strujno-naponska (I-U) karakteristika FN ćelije

Slika 6. prikazuje ovisnost strujno naponska (I-U) karakteristika o jakost sunčeva zračenja.



Slika 6. Ovisnost I-U karakteristike o jakosti Sunčeva zračenja

3.4. Karakteristični otpor i snaga fotonaponske ćelije

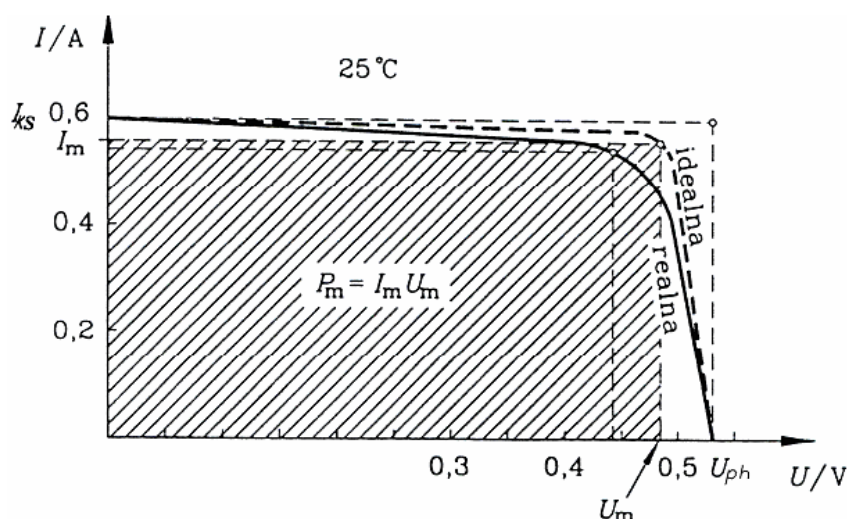
Pomoću napona praznog hoda i struje kratkog spoja definira se karakteristični otpor:

$$R_k = U_{PH}/I_{KS} \quad (7)$$

Snaga koju daje fotonaponske ćelije jednaka je umnožku napona i struje

$$P = U \cdot I = U \cdot \left[I_L - I_D e^{\frac{qU}{kT}} + I_D \right] \quad [W] \quad (8)$$

Snaga koju daje idealna fotonaponska ćelija je različita u odnosu na snagu koju može dati realna. Računski se može dobiti traženjem ekstrema funkcije (4) odnosno određivanjem površine pravokutnika na slici 7. koji ima maksimalnu površinu.



Slika 7. Maksimalna snaga idealne i realne FN ćelije

Maksimalna (vršna) snaga P_m koju FN ćelija može dati može se prikazati i pomoću napona praznog hoda i struje kratkog spoja

$$P_m = I_{KS} \cdot U_{PH} \cdot FF \quad [Wp] \quad (9)$$

gdje je:

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{PH} I_{KS}} \quad (10)$$

Faktor punjenja (engl. Fill Factor) definiran je omjerom površine pravokutnika U_m i I_m i površine drugog sa stranicama U_{PH} i I_{KS} . Faktor punjenja pokazuje koliko je stvarna ćelija blizu idealnoj, po karakteristikama, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora FN ćelije. Faktor punjenja FF opada linearno s omjerom R_S/R_K i R_K/R_P , gdje je R_S serijski, R_P paralelni i R_K karakteristični otpor FN ćelije i obično iznosi $0.7 < FF < 0.9$ [2]. Serijski otpor ćelije R_S je rezultatni otpor unutrašnjeg omskog otpora ćelije i otpora kontakata ćelije. Produkt serijskog otpora i površine ćelije $R_S A$ reda je veličine $0.0025 \Omega/m^2$ za uobičajene FN ćelije. Paralelni otpor ćelije R_P uzrokovan je lokalnim defektima u PN spoju. Za idealnu ćeliju on bi bio beskonačno velik, ali u stvarnoj ćeliji struje gubitaka proporcionalne su naponu na ćeliji.

3.5. Djelotvornost fotonaponske ćelije

Djelotvornost fotonaponske ćelije η definira se kao omjer između maksimalne snage koju ćelija može dati P_m i snage Sunčeva zračenja koje upada na ćeliju P_u :

$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{P_m}{E \cdot A} = \frac{U_m \cdot I_m}{E \cdot A} \quad (11)$$

gdje je E ozračenje površine, a A površina fotonaponske ćelije. Uvrštavajući izraz za maksimalnu snagu iz (9):

$$\eta = FF \cdot \frac{U_{ph} \cdot I_{ks}}{E \cdot A} \quad (12)$$

Djelotvornost fotonaponske ćelije je veći što je faktor punjenja bliži jedinici i što je veća struja kratkog spoja. Tipične vrijednosti silicijske ćelije približno iznose: $FF = 0.82$, $\eta = 10\%$. Najveća djelotvornost fotonaponske ćelije pri određenom ozračenju i temperaturi postiže se ukoliko je na sunčanu ćeliju spojen optimalni iznos potrošača.

3.6. Materijali za proizvodnju fotonaponskih ćelija

Prema tehnologiji izrade fotonaponski moduli mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije:

- Moduli temeljeni na pločicama kristala silicija
- Moduli izrađeni u tankoslojnoj tehnologiji, kao što su tankoslojni silicij, bakar/indij/galij-selenid/sulfid, amorfni silicij i kadmij-telurid.

Prva komercijalna fotonaponska ćelija od kristala silicija izrađena je 50-ih godina prošlog stoljeća, a do danas je tehnologija proizvodnje fotonaponskih modula temeljena na pločicama od kristala silicija ostala u prednosti u odnosu na module izrađene u tankoslojnoj tehnologiji.

Fotonaponske ćelije od kristala silicija se izvode u više morfoloških oblika, kao monokristalne i polikristalne.

Za proizvodnju monokristalnih Si ćelija potreban je apsolutno čisti poluvodički materijal. Monokristalni štapići se izvade iz rastaljenog silicija i režu na tanke

pločice. Takav način izrade omogućuje relativno visoki stupanj iskoristivosti. Ovaj tip fotonaponske ćelije proizvodi više električne energije od polikristalnih Si ćelija.

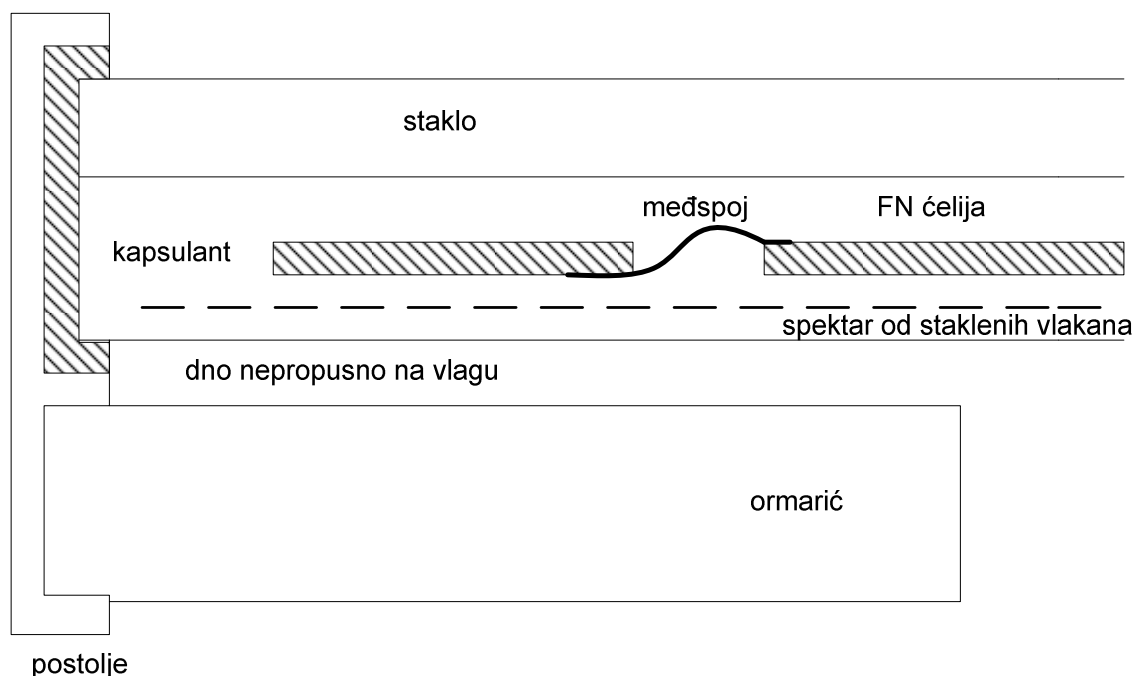
Proizvodnja polikristalnih Si ćelija je ekonomski efikasnija u odnosu na monokristalne. Tekući silicij se ulijeva u blokove koji se zatim režu u ploče. Tijekom skrućivanja materijala stvaraju se kristalne strukture različitih veličina na čijim granicama se pojavljuju greške, zbog čega solarna ćelija ima manju iskoristivost.

Jedna od tankoslojnih tehnologija koje se sve intenzivnije istražuju je tehnologija proizvodnje sunčanih ćelija od amornog silicija. Proizvodnja je relativno jednostavna, zasniva se na nanošenju tankog sloja silicija u amorfnom stanju na podlogu. Debljina sloja iznosi manje od 1 μm , stoga su troškovi proizvodnje manji u skladu sa niskom cijenom materijala. Međutim iskoristivost amornih ćelija je puno niža u usporedbi s drugim tipovima ćelija. Detaljniji opis pojedinih tehnologija izrade fotonaponske ćelije može se naći u literaturi [2].

4. Fotonaponski moduli

Fotonaponske ćelije proizvode mali napon reda veličine 0.5V, uz gustoću struje oko $20\text{mA}/\text{cm}^2$ [6]. Da bi se dobila željena vršna snaga (npr. 170,175 W i viših itd.) i dani napon (obično 12 ili 24 V) potrebno je FN ćelije povezivati serijski, paralelno ili najčešće kombinacijom oba načina. Ukupni iznos napona na izlazu iz modula proporcionalan je broju serijskih spojenih ćelija, dok je izlazna struja proporcionalna broju paralelno spojenih ćelije. Tako spojene FN ćelije čine FN modul. Pakiranje FN ćelija u veće fotonaponske module (panele) provodi se za osiguravanje dugotrajnije i pouzdanje zaštite od atmosferskih i fizičkih oštećenja (slika 8.).

Ćelije se laminiraju između slojeva kaljenog stakla i bijelog teclara koji pružaju idealnu vodootpornu zaštitu. Kaljeno staklo visoko je transparentno i optimalno hvata direktnu i difuznu svjetlost. Tako izrađeni modul postavljaju se u aluminijski okvir, a time se postiže potrebnu robusnost te mogućnost praktičnog i jednostavnog postavljanja na željenu površinu.



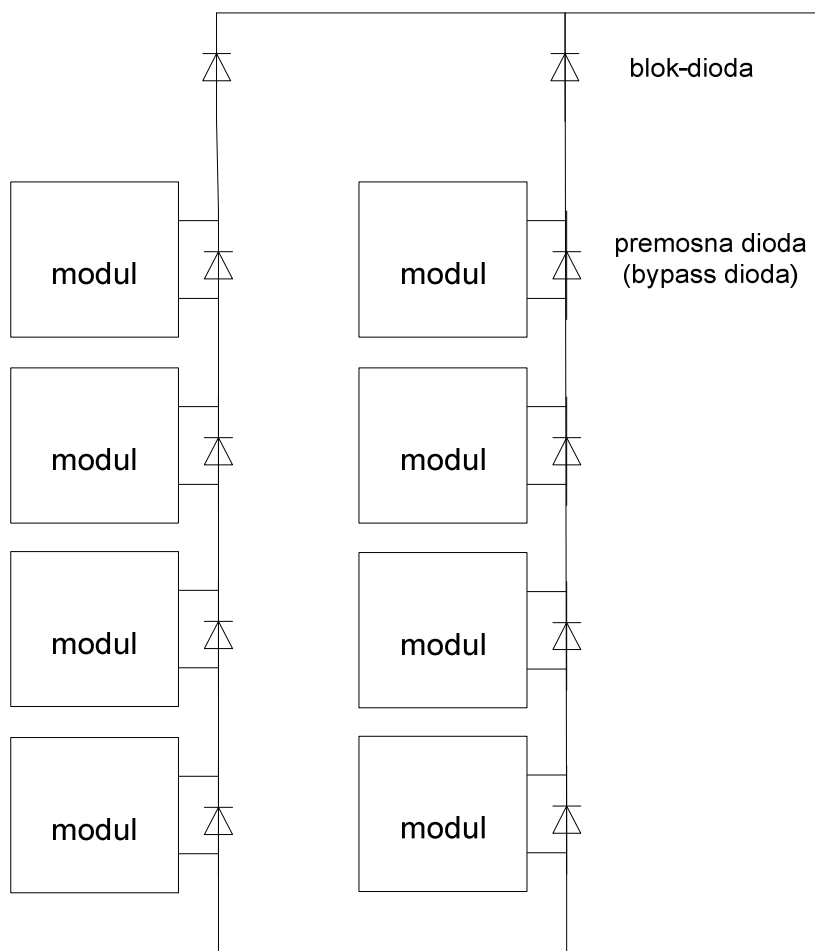
Slika 8. Kapsuliranje fotonaponskih ćelija

Za opis izlazne karakteristike fotonaponskog modula može se upotrijebiti model jedne sunčane ćelije ako se pretpostavi električka jednakost svih ćelije od kojih je modul sastavljen [2]. Karakteristika modula je funkcija temperature i ozračenja. Promjena temperature očituje se na U,I-karakteristici kao pomak po strujnoj i naponskoj osi i promjeni zakrivljenosti koljena krivulje. S porastom temperature raste i struja kratkog spoja, ali ta je promjena praktički neznatna u usporedbi sa promjenom ostalih parametara. Kod porasta temperature dolazi do mnogo većeg pada napona otvorenog kruga, što za posljedicu daje pad maksimalne snage ćelije za oko 0.5% po svakom 1 °C porasta temperature. Iz toga slijedi zaključak da FN moduli za razliku od solarnih kolektora moraju biti montirani tako da se osigura dobra prozračnost, prirodna konvekcija topline zrakom i prirodna ventilacija vjetrom. Proizvođač fotonaponskih modula obično daje U,I-dijagrame koji odgovaraju različitim razinama ozračenja pri normalnoj temperaturi, odnosno različitim temperaturama pri normalnom ozračenju, a pomoću kojih je moguće odrediti karakteristične točke (I_{ks} , U_{ok} , U_m , I_m).

4.1. Premosna dioda

Premosne ili tako zvane bypass diode se koriste kako bi se izbjeglo pregrijavanje najlošije ćelije u pojedinim modulima, koje bi tijekom sunčanog dana ostala u sjeni i počela bi se ponašati kao dioda sa suprotnim prenaponom, za razliku od ostalih ćelija koje bi se dalje ponašale ko generator. Ovaj efekt se naziva vruća točka na modulu [7]. Takve loše ćelije ili ćelije u sjeni bi tada trošile struju koju proizvode ostale ćelije. Kao rezultat potrošnje struje, fotonaponske ćelije u sjeni bi se grijale do temperature 100 °C što materijal kućišta ne bi mogao izdržati i može doći do oštećenja cijelog modula.

To posebno predstavlja problem kod većih modula, gdje energija koju bi takva ćelija pod visokoj temperaturi trebala predavati okolini u jedinici vremena može biti vrlo velika. Premosne diode u takvom slučaju predstavljaju premosnicu koja ograničava snagu modula i preventivno sprečava trajno oštećenje modula. Spajanje fotonaponskih modula u polje i korištenje premosne diode prikazano je na slici 9.



Slika 9. Spajanje fotonaponski modula u polje

Prenosne diode se ugrađuju u samoj proizvodnji fotonaponskog modula. Osim prenosnih dioda u autonomnim sustavima koji nisu mrežno vezani koriste se i blok-diode koje sprečavaju nožno pražnjenje akumulatora posredstvom FN modula.

5. Vrste fotonaponskih sustava

Fotonaponski sustavi (FN sustavi) predstavljaju integrirani skup FN modula i ostalih potrebnih komponenata. Projektiran je tako da prima Sunčevu energiju i izravno je pretvara u konačnu električnu energiju kojom se osigurava rad određenog broja istosmjernih (DC) i/ili izmjeničnih (AC) trošila, samostalno ili zajedno s pričuvnim izvorom.

U najjednostavnijem sustavu FN sustav napaja samo istosmjerna trošila, a ako se u FN sustav doda izmjenjivač tada takav sustav može proizvoditi električnu energiju za sva izmjenična trošila.

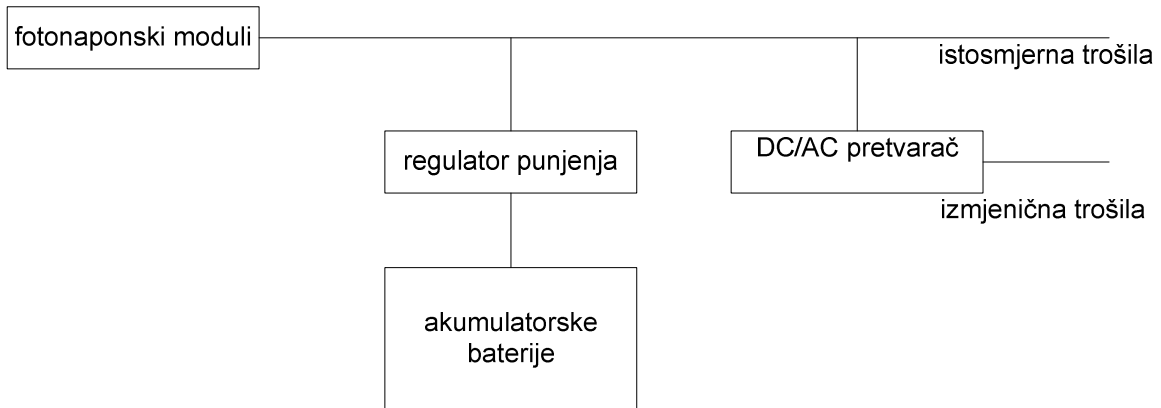
Ovisno o načinu rada, postoje sljedeće vrste FN sustava:

1. samostalni (autonomni), za čiji rad mreža nije potrebna
2. mrežni, spojeni na električnu mrežu:
 - pasivni, kod kojih mreža služi (samo) kao pričuvni izvor
 - aktivni (interaktivni), kod kojih mreža može pokrivati manjkove, ali i preuzimati viškove električne energije iz FN modula
3. hibridni, koji su zapravo samostalni povezani s drugim (obnovljivim) izvorima.

5.1. Samostalni (autonomni) sustav

Samostalni (autonomni) sustavi za svoj rad nemaju potrebu spajanja na električnu mrežu. Kod njihove primjene, kad električnu energiju treba isporučivati tijekom noći ili u razdobljima s malim intenzitetom Sunčevog zračenja nužan je akumulator (baterija) koji služi kao spremnik električne energije. Tom se sustavu pored akumulatora mora dodati regulator za kontrolirano punjenje i pražnjenje baterije, a dodavanjem izmjenjivača ($=12\text{ V} / \sim 230\text{ V}$) autonomni sustavi mogu zadovoljiti i sve vrste tipičnih mrežnih potrošača, kojima je potreban izmjenični napon kao što su perilice, hladnjaci, crpke, motori, televizori, računala, usisavači, mali kućni aparati i druga trošila. Takvi su sustavi pogodni za osiguravanje potrebnih količina električne energije za udaljene (izolirane) potrošače kao što su ruralna (izolirana) ili primorska vikend-naselja te za brojne pojedinačne objekte

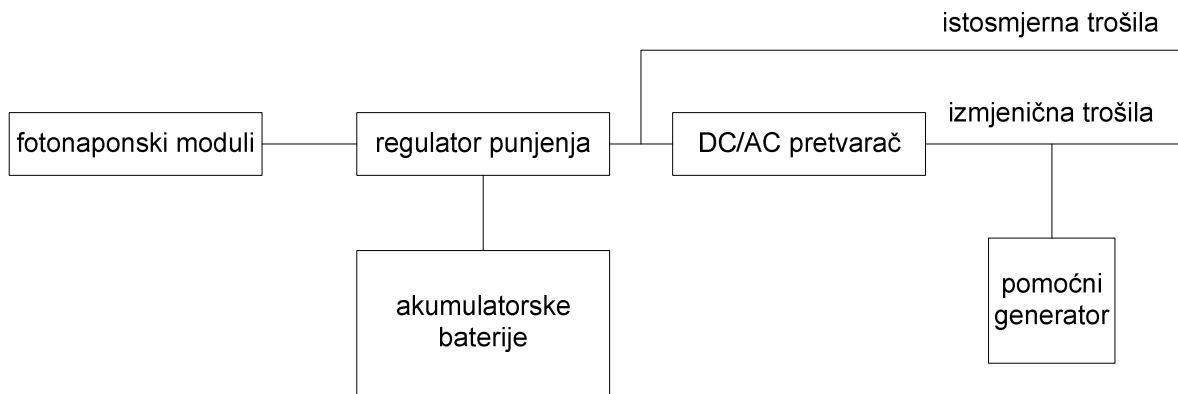
različitih namjena (npr. razne vrste signalizacija i upozorenja, rasvjetu, telekomunikacijske releje, svjetionike, sustave nadgledanja itd.). Primjer ovog sustav prikazan je na slici 10.



Slika 10. Samostalni FN sustav za istosmjerna i izmjenična trošila

5.2. Hibridni FN sustavi

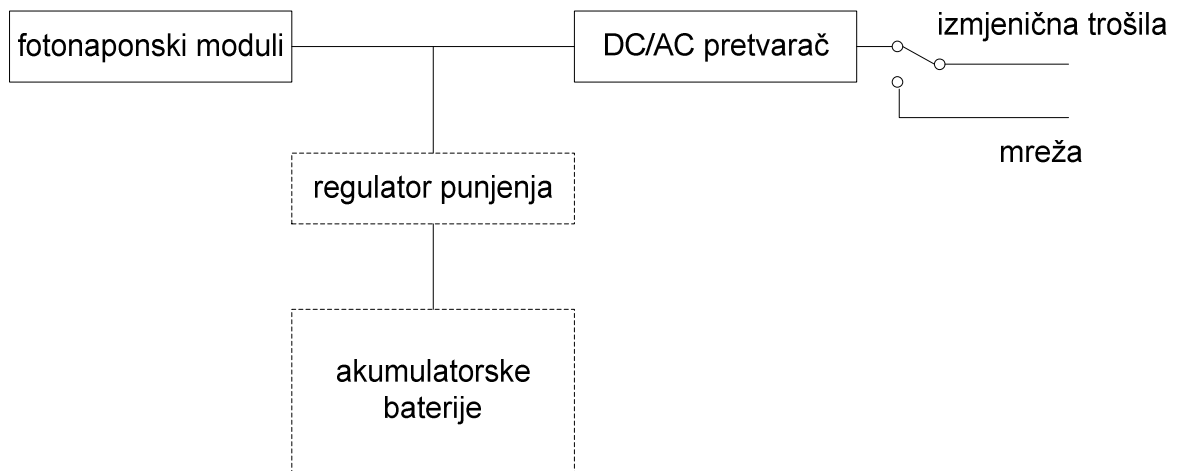
Hibridni FN sustavi nastaju povezivanjem samostalnih (osobito većih) s drugim alternativnim (pričuvnim) izvorima električne energije, kao što su vjetroturbine, hidrogeneratori, pomoćni plinski ili dizelski agregati. U današnje vrijeme vjetroturbine i fotonaponski sustavi se mogu povezati pomoću zajedničkog izmjenjivača. Takva rješenja daju veću sigurnost i raspoloživost isporuke električne energije te omogućavaju manje kapacitete akumulatora kao spremnika električne energije. Kod rješenja koja koriste plinske i dizelske agregate sustavi se dimenzioniraju tako da se agregati koriste malo sati u godini čime se štedi gorivo, smanjuju troškovi održavanja i produžava vijek trajanja. Primjer hibridnog fotonaponskog sustava prikazan je na slici 11.



Slika 11. Hibridni FN sustav za istosmjerna ili izmjenična trošila

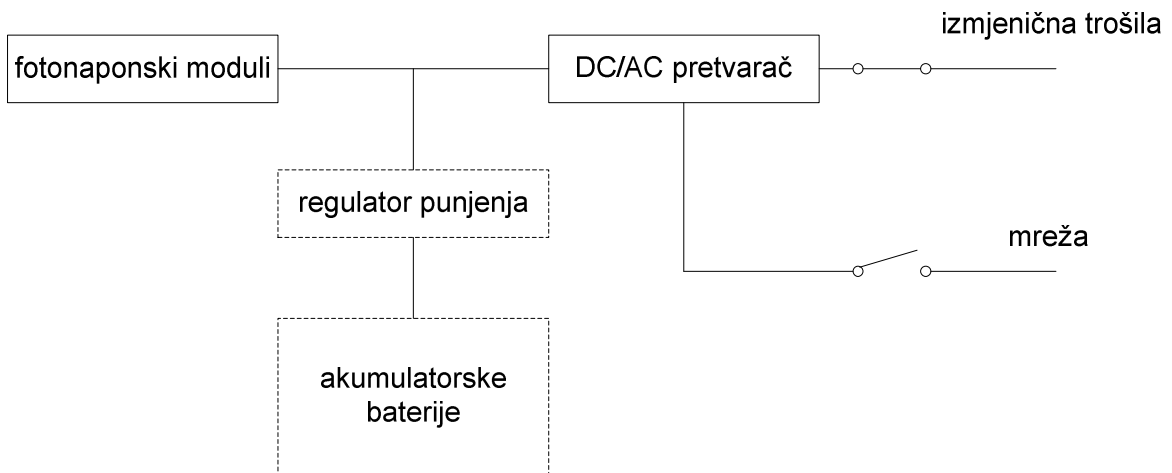
5.3. Pasivni i aktivni mrežni FN sustav

Pasivni mrežni FN sustavi električnu mrežu koriste samo uvjetno, u razdobljima kada FN moduli ne mogu proizvesti dovoljne količine električne energije, primjerice noću kada su istodobno akumulatori električne energije prazni (slika 12).



Slika 12. Pasivni mrežni FN sustav

Aktivni, odnosno interaktivni mrežni FN sustavi mrežu koriste interaktivno, uzimajući je u slučaju većih potreba ili vraćajući je u slučaju viškova električne energije proizvedene u FN modulima (slika 13).



Slika 13. Aktivni mrežni FN sustav

Oba mrežna sustava na izlazu iz modula mogu koristiti i istosmjerno-istosmjerne pretvornike napona kojima se mogu podešavati naponske razine za potrebe istosmjernih trošila koja rade na naponu različitim od 12V i 24V ili se mogu podesiti na napon baterije koje rade na većim istosmjernim naponima.

6. Photovoltaic Geographical Information System

Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) pruža popis solarnih energetskih resursa i procjenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava temeljen na geografskoj karti u Europi, Africi i jugozapadnoj Aziji. On je dio „SOLAREC“ (Solar Electricity Action) akcije koja doprinosi implementaciji obnovljivih izvora energije u Europskoj Uniji kao održivog i dugoročnog izvora energije [8]. Diljem Europe postoji stotine meteoroloških mjernih postaja gdje se direktno ili indirektno mjeri solarno zračenje. Vrste podataka spremljenih u PVGIS bazi podataka za Europski subkontinent sadrži tri grupe slojeva rezolucije 1km x 1km :

1. geografski podaci: digitalni model visine, administrativne granice, gradovi
2. prostorno neprekinuti klimatski podaci:
 - dnevna ozračenost horizontalne plohe
 - omjer difuznog i globalnog ozračenja
 - optimalni kut nagiba FN modula za maksimalizaciju iskorištenja energije
3. regionalni prosjeci za izgrađena područja:
 - godišnja suma ozračenosti (horizontalna, vertikalna i optimalno nagnuta ploha)
 - godišnja suma predviđene proizvodnje električne energije (horizontalna, vertikalna i optimalno nagnuta ploha)
 - optimalni kut nagiba FN modula za maksimalno iskorištenje energije kroz cijelu godinu

Baza podataka za Mediteranski bazen, Afrika i jugozapadna Azija sadrži prve dvije grupe rasterskih slojeva kao i za Europski subkontinent (navedeno iznad) rezolucije 2 km x 2 km.

6.1. Podaci o intenzitetu sunčevog zračenja na području Makarske

Podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja potrebni su za proračun proizvodnje električne energije fotonaponskog sustava. Zemljopisna širina i dužina specificiraju lokaciju objekta na kojem se nalazi fotonaponski sustav. Posebice zemljopisna širina predstavlja važnu varijablu pri solarnim kalkulacijama. Također predstavlja važnu varijablu pri izračunu Sunčevog ozračenja površine postavljene pod određenim kutom (FN modula). Makarska se nalazi se na $43^{\circ} 17' 38''$ sjeverne zemljopisne širine i na $17^{\circ} 1' 20''$ istočne zemljopisne dužine. Podaci o Sunčevom zračenju na području Makarske uzeti su iz PVGIS-ove baze podataka.

Tablica 1. Podaci o Sunčevom zračenju

Makarska					
Zemljopisna širina [N]: $43^{\circ} 17' 38''$					
Zemljopisna dužina [E]: $17^{\circ} 1' 20''$					
Mjeseci	H_h (Wh/m ²)	H_{opt} (Wh/m ²)	$H(90^{\circ})$ (Wh/m ²)	I_{opt} (°)	T_{24h} (°C)
Siječanj	1670	2910	2990	65	7.3
Veljača	2410	3620	3290	57	8.0
Ožiljak	3770	4820	3670	45	10.8
Travanj	5020	5560	3360	30	14.3
Svibanj	6050	6040	2940	18	19.3
Lipanj	6640	6310	2710	12	23.2
Srpanj	7090	6910	3010	15	25.7
Kolovoz	6140	6580	3570	26	25.4
Rujan	4790	5960	4200	41	21.1
Listopad	3140	4580	3960	54	17.7
Studeni	1850	3070	3030	62	12.6
Prosinac	1390	2500	2630	66	8.8
Godišnji prosjek	4170	4910	3280	36	16.2

Gdje je:

H_h : dnevno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu (Wh/m^2)

H_{opt} : dnevno Sunčevo zračenje na optimalnu kosu plohu (Wh/m^2)

$H(90^\circ)$: Sunčevo zračenje na plohu 90° (Wh/m^2)

l_{opt} : mjesečni optimalni kut ($^\circ$)

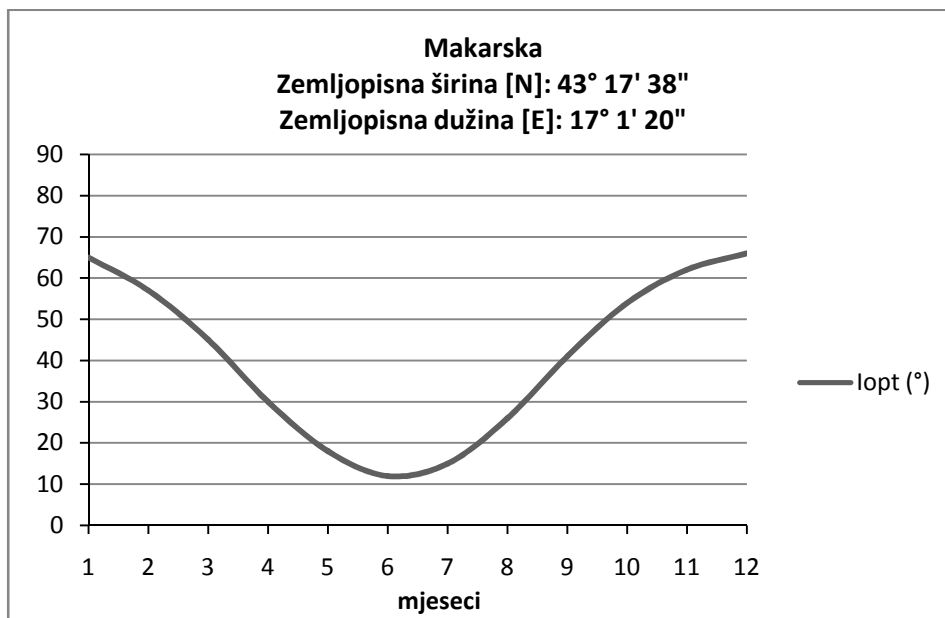
T_{24h} : srednja mjesečna temperatura ($^\circ C$).

Zemljopisni položaj, vremenski uvjeti te blaga mediteranska klima pružaju optimalne uvjete za korištenje Sunčeve energije na području južne Dalmacije, a grad Makarska spada u sam vrh raspoloživog Sunčevog potencijala u Hrvatskoj.

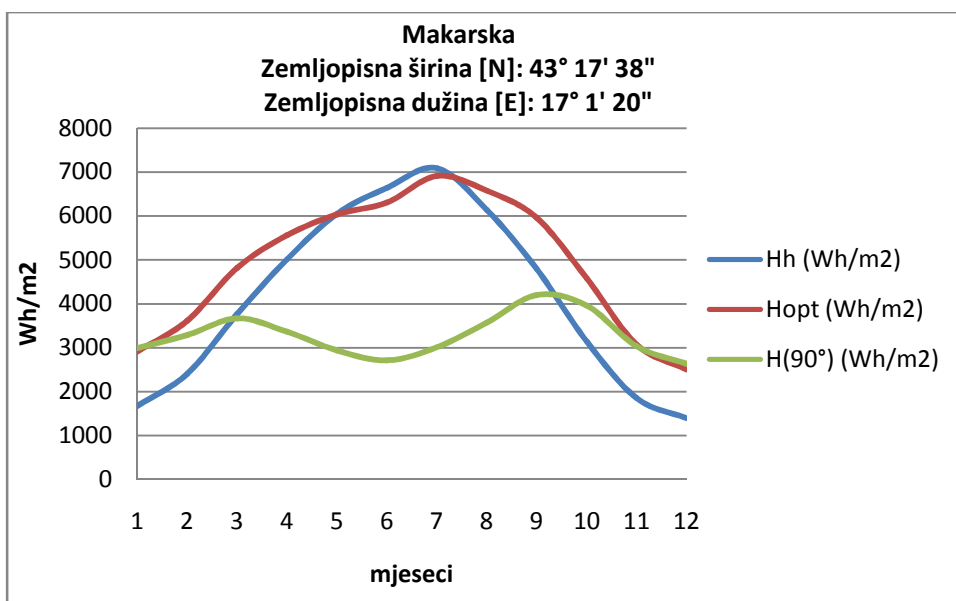
Podaci za grad Makarsku su sljedeći:

- prosječna godišnja insolacija iznosi oko $1.52 MWh/m^2$ godišnje,
- prosječan broj Sunčanih sati iznosi 2553.

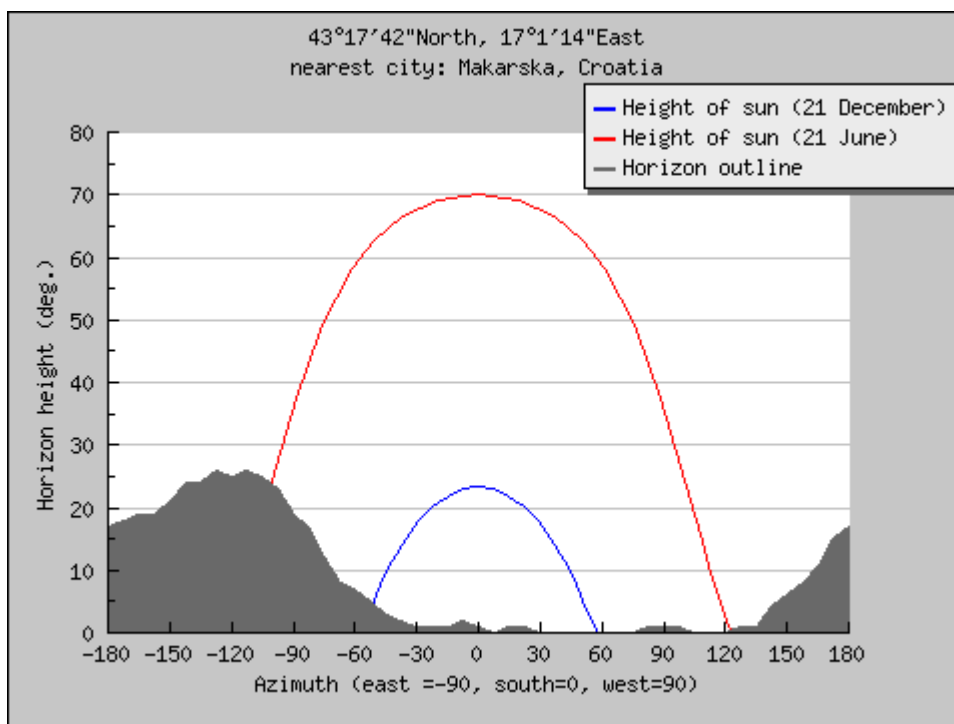
Na osnovi stvarnih i proračunatih podataka može se zaključiti da je lokacija grada Makarske izrazito povoljna za postavljanje fotonaponskog sustava.



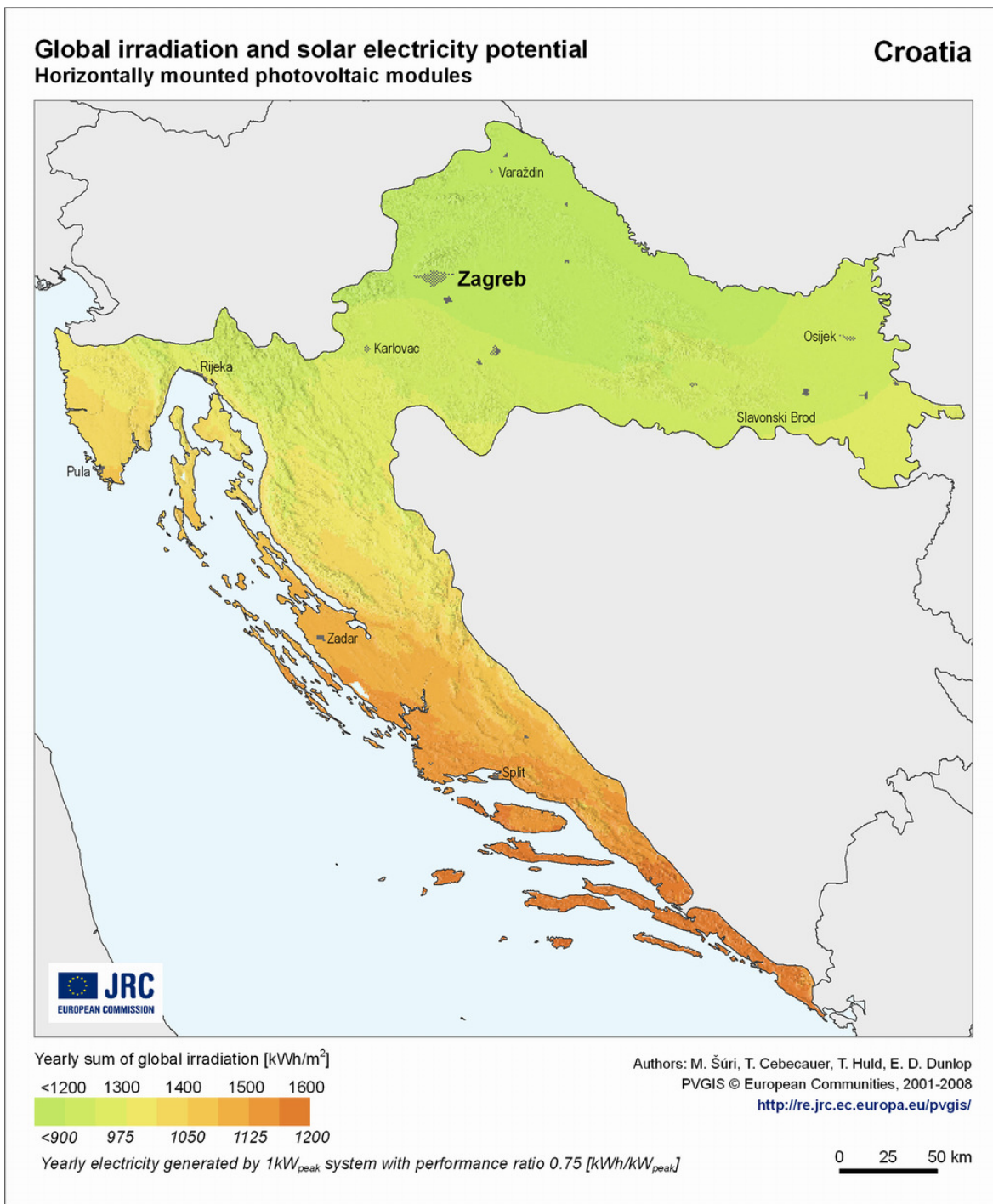
Slika 14. Graf mjesečnog optimalnog kuta



Slika 15. Graf Sunčevog zračenja za različite plohe



Slika 16. Cilindrični Sunčev dijagram [7]



Slika 17. Godišnja ozračenost na horizontalnu plohu za RH [7]

6.2. Procjena proizvodnje električne energije

Pomoću PVGIS-a izvršit će se procjena proizvodnje električne energije za fotonaponski sustav sa fiksnim kutom, fotonaponski sustav sa jednoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca i fotonaponski sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca koji su spojeni na mrežu. Podaci o intenzitetu Sunčeva zračenja potrebni su za proračun proizvodnje električne energije fotonaponskog sustava nalaze se u PVGIS-ovoj bazi podataka. Prema PVGIS podatcima optimalni kut se za područje RH kreće od 33° na sjeveru do 37° na jugu. Valja imati na umu da se optimalni kut mijenja tijekom godine zbog prividnog kretanja Sunca. Kod fiksnih instalacija je potrebno odabrati optimalni kut za maksimalnu godišnju energiju ili za maksimalnu energiju tijekom razdoblja u kojem nam je potrebna veća proizvodnja električne energije. Najbolje je rješenje je sa dvoosnim praćenjem prividnog kretanja Sunca. Time se može povećati dobivena energija za 25-40%.

Budući da se radi o istoj lokaciji fotonaponskog sustava u sva tri slučaja, podaci koji su vezani uz specifičnu lokaciju, u ovom slučaju Sunčevo zračenje ostaje isto. Tehnički podaci koji su vezani uz FN sustav (vrsta modula, izmjenjivač) također ostaju isti. Proračun proizvodnje električne energije iz fotonaponskog sustava izvršit će se za područje grada Makarske. Fotonaponski sustav je snage 9.9750 kW.

Sustav praćenja kretanja Sunca (engl. tracking system) je ponuđen kao opcija. U slučaju odabira takovog sustava potrebno je između ponuđenih opcija naznačiti kakvu vrstu praćenja Sunčevog kretanja želimo koristiti. Kut nagiba PV modula (engl. slope) je zakrenutost modula naspram horizontale. Može se osobno upisati fiksni kut ili odabrati opciju da sam PVGIS postavi optimalni fiksni kut tijekom cijele godine. Azimut služi kao pokazatelj zakrenutosti PV sustava. Da bi se dobio maksimum iz PV sustava koji je postavljen pod fiksnim kutom on mora biti orijentiran prema jugu. Za sjevernu zemljinu polutku azimut je najčešće 0° .

U PVGIS-u gubitci fotonaponskog sustava zbog povišene temperature sa modulima postavljenim uz sam krov kuće iznose 15,2%, a sa modulima postavljenima na nosivu konstrukciju 10,5% [8]. Razlog tome je zbog veće

prozračenosti, a samim tim manji pad maksimalne snage modula. Tu se još nalaze gubitci zbog refleksije 2,4% i gubitci izmjenjivača i kabela od 4%. Iz tri različita FN sustav može se vidjeti razlika u količini sučevog zračenja na FN modul, a samim tim i razlika u proizvodnji električne energije FN sustava.

E_d -Prosječna dnevna proizvodnja električne energije iz danog sustava (kWh)

E_m - Prosječna mjesečna proizvodnja električne energije iz danog sustava (kWh)

H_d - Prosječni dnevni zbroj globalnog zračenja po kvadratnom metru dobivena po modulima danog sustava (kWh/m²)

H_m - Prosječna suma globalnog zračenja po kvadratnom metru dobivena po modulima danog sustava (kWh/m²)

Tablica 2. Podaci o proizvodnji električne energije za FN sustav sa fiksnim kutom

Makarska				
Zemljopisna širina [N]: 43° 17' 38"				
Zemljopisna dužina [E]: 17° 1' 20"				
fotonaponski sustav postavljen fiksno pod kutom od 36°				
Mjeseci	E_d	E_m	H_d	H_m
Siječanj	26.20	813	2.91	90.4
Veljača	32.10	899	3.62	101
Ožujak	41.50	1290	4.82	149
Travanj	46.90	1410	5.56	167
Svibanj	49.70	1540	6.04	187
Lipanj	50.80	1520	6.31	189
Srpanj	55.20	1710	6.91	214
Kolovoz	52.60	1630	6.58	204
Rujan	49.00	1470	5.96	179
Listopad	38.70	1200	4.58	142
Studeni	27.00	811	3.07	92.1
Prosinac	22.50	697	2.50	77.6
Mjesečni prosjek	41.1	1250	4.91	149
Ukupno		15000		1790

Tablica 3. Podaci o proizvodnji električne energije za FN sustav sa dvoosnim sustavom za praćenje prividnog kretanja Sunca

Makarska				
Zemljopisna širina [N]: 43° 17' 38"				
Zemljopisna dužina [E]: 17° 1' 20"				
FN sustav sa dvoosnim praćenje prividnog kretanja Sunca				
Mjeseci	E_d	E_m	H_d	H_m
Siječanj	32.70	1010	3.68	114
Veljača	39.20	1100	4.46	125
Ožujak	51.30	1590	5.99	186
Travanj	60.10	1800	7.12	213
Svibanj	64.70	2000	7.85	243
Lipanj	68.90	2070	8.54	256
Srpanj	75.80	2350	9.48	294
Kolovoz	69.30	2150	8.67	269
Rujan	62.70	1880	7.62	229
Listopad	48.20	1500	5.74	178
Studeni	33.30	998	3.81	114
Prosinac	27.90	863	3.14	97.3
Mjesečni prosjek	52.9	1610	6.35	193
Ukupno		19300		2320

Sustav sa jednoosnim praćenjem kretanja sunca, izveden je tako da se horizontalno može pomicati u 4 različita položaja. Zavisno o kojim se mjesecima radi fotonaponski moduli se postavljaju u jedan od četiri moguća položaja. U tablici 1. su dana 4 moguća položaja pomicanja fotonaponskih modula.

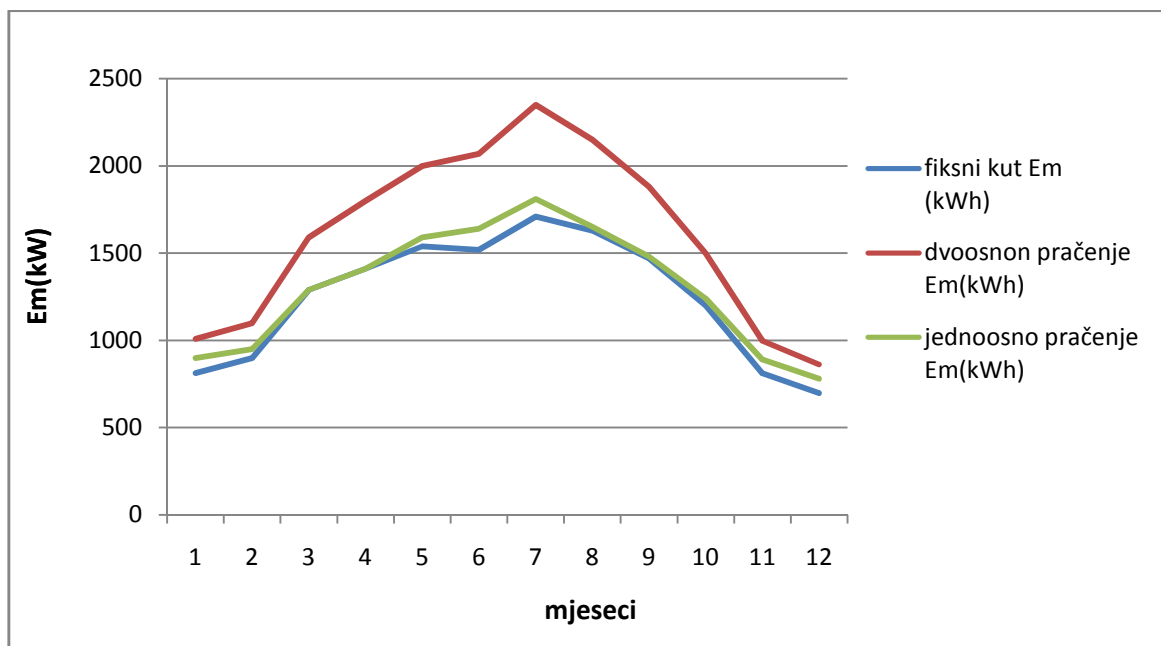
Tablica 4. Četiri položaja modula

stupanj	Mjeseci	Nagib modula (°)
I.	6,7	10
II.	5,8	25
III.	3,4,9	40
IV.	10,11,12,1,2	60

Tablica 5. Podaci o proizvodnji električne energije za FN sustav sa jednoosnim praćenjem, (4 stupnja horizontalnog pomicanja)

Makarska					
Zemljopisna širina [N]: 43° 17' 38"					
Zemljopisna dužina [E]: 17° 1' 20"					
FN sustav sa jednoosnim praćenjem, (horizontalno pomicanja)					
Mjeseci	I_{opt} (°)	E_d	E_m	H_d	H_m
Siječanj	60	29.00	900	3.25	101
Veljača	60	33.70	950	3.82	107
Ožujak	40	41.70	1290	4.85	150
Travanj	40	46.70	1410	5.53	166
Svibanj	25	51.30	1590	6.23	193
Lipanj	10	54.50	1640	6.73	202
Srpanj	10	58.30	1810	7.25	225
Kolovoz	25	53.30	1650	6.66	207
Rujan	40	49.20	1480	5.98	179
Listopad	60	40.00	1240	4.75	147
Studeni	60	29.50	890	3.37	101
Prosinac	60	25.20	780	2.82	88
Mjesečni prosjek		42	1302	5.01	155.5
Ukupno			15630		1866

Iz dobivenih procjena o proizvodnji električne energije iz FN sustava vidi se da je najveća proizvodnja električne energije iz sustav sa dvoosnim praćenjem prividnog kretanja sunca i iznosi 19300kWh, dok kod jednoosnog praćenja kretanja sunca po mjesecima (4 stupnja) procjena o proizvodnji iznosi 15630kWh, dok sustav sa fiksnim kutom ima najmanju proizvodnju od 15000kWh. Može se reći da na području grada Makarske za FN sustava, sa modulima postavljenim pod fiksnim kutom od 36°, za instaliranu snagu od 1kW može se dobiti 1500kWh godišnje.



Slika 18. Prikaz proizvodnje za sva tri položaja modula

U PVGIS-u se pretpostavlja da moduli rotiraju po vertikalnoj i horizontalnoj osi u toku dana tako da je kut upada sunčevog zračenja optimalan (uz pretpostavku da se kut neće mijenjati stalnom brzinom tijekom dana).

6.3. Postavljanje fotonaponskih modula

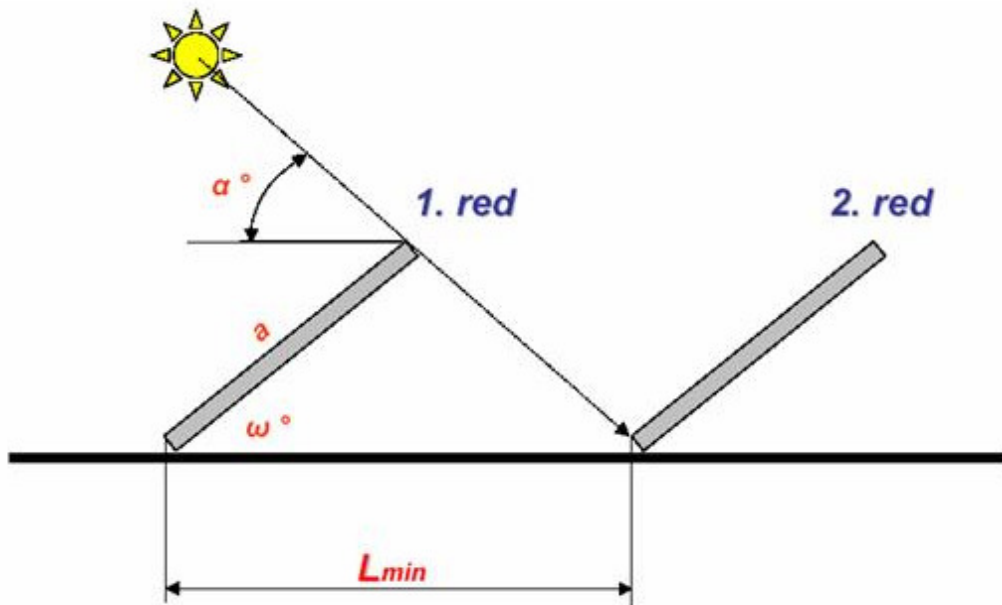
Većina fotonaponski moduli se postavljaju fiksno na nosivu konstrukciju pod nekim optimalnim kutom, koja je orijentirana prema jugu. Druga opcija postavljanja modula je sa mogućnošću rotiranja modula. Fotonaponski sustavi

koji mogu rotirati FN module omogućuju im da prate (engl. track) kretanje sunca na nebu. Na taj način možemo povećati količinu sučevog zračenja na FN modul, a time se povećava proizvodnja FN sustava. Ta kretanja mogu biti izvedena na nekoliko različitih načina. Ovdje ćemo pojasniti tri moguća načina:

- jednoosna rotacija po vertikalnoj osi: Moduli su montirani tako da rotiraju po vertikalnoj osi za određeni kut, (istok-zapad), a raspon kuta se kreće od 0° do 90° .
- jednoosna rotacija po horizontalnoj osi: Moduli su montirani tako da rotiraju u odnosu na horizontalnu os ([0-90], sjever-jug).
- dvoosna rotacija : Moduli su montirani na sustav koji može pomicati module u smjeru istok-zapad i mijenjati kut nagiba modula u odnosu na horizontalu, tako da će moduli uvijek biti optimalno okrenuti prema suncu.

Montiranje FN modula na konstrukcije koje omogućavaju dvoosno praćenje Sunca tijekom dana može se dobiti solarni doprinosi i do 140% u odnosu na fiksnu montažu. Jednoosno praćenje je puno jednostavnije , ali je doprinos puno manji i ne prilaze 115%. Manji FN sustavi koji imaju samo nekoliko modula u nizu mogu postići učinak jednak 95% onog kod dvoosnog praćenja Sunca, ako se samo dva puta (sredinom jutra i sredinom dana) provede korekcija Sunčevog azimuta, uz jedno tromjesečno namještanje modula prema jugu. Slični učinci se mogu postići postavljanjem FN modulima smještenim na okomitim ili približno okomitim zidovima i dijelovima krova zgrade, ako se ispred njih postave reflektori nagnuti pod kutom od oko 5° prema ekvadoru.

Kod postavljanja modula na nosivu konstrukciju pod nekim kutom ω_0 , veoma je važan minimalni razmak modula (slika 19.), razlog tome je da prethodni modul ne pravi sjenu na sljedeći.



Slika 19. Visina Sunca i minimalni razmak modula

Razmak između modula može se dobiti pomoću sljedeće formule.

$$L_{min} = a \left(\frac{\sin \omega}{\tan \alpha} + \cos \omega \right) \quad (13)$$

Gdje je:

- a – dužina modula,
- ω – kut nagiba modula,
- α – kut upada Sunčevog zračenja.

7. Fotonaponski sustav spojen na mrežu

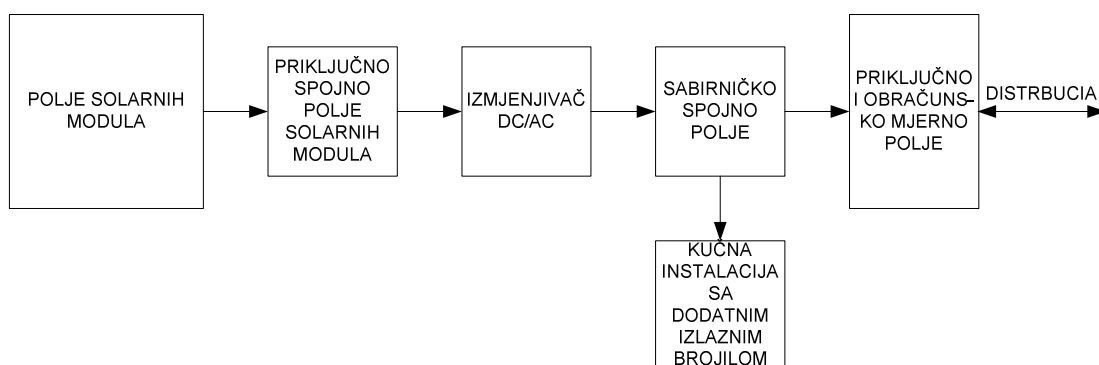
Postoje razni razlozi spajanje fotonaponskih sustav na distribucijsku mrežu. Neki od glavnih razloga su: ograničavanje emisije CO₂ i zaštita okoliša, izbjegavanje dodatne izgradnje mreža i velikih proizvodnih jedinica, diversifikacija izvora električne energije, povećavanje kvalitete električne energije i raspoloživosti distribucijske mreže, poticanje tržišnog natjecanja itd. Naravno postoje i loši utjecaji FN sustava spojenih na distribucijsku mrežu, a tu treba spomenuti povećavanje struje kratkog spoja, narušavanje osjetljivosti zaštite u elektroenergetskoj mreži, utjecaj na kvalitetu električne energije, raspoloživost distribucijske mreže, te gubitci u mreži. Naravno, svi ti utjecaji ovise o snazi distribuiranog izvora (FN sustava), njegovoj potrošnji na mjestu priključka i osobini pogona, te karakteristikama distribucijske mreže na koju se spaja. Povezivanje FN sustava na mrežu predstavlja i nove izazove za mrežne operatore koji sada imaju tokove snage u dva smjera, a ne samo prema potrošaču kao što su navikli.

Hrvatska je, kao i mnoge druge zemlje, potpisnica Kyoto protokola čime se obvezala smanjiti emisiju CO₂ koji uzrokuje efekt staklenika i dovodi do globalnog zatopljenja [9]. Nakon što se u Republici Hrvatskoj uveo poticaj u sklopu donesene zakonske regulative u 2007. godini, te stalnog pada cijene opreme interes za izgradnjom mrežnih FN sustava stalno raste. Integracija FN sustava na električnu mrežu pokriva se standardima o sigurnost i kvaliteta napona, o kojima će biti govora u daljnjem testu. Sigurnost osoblja i zaštita opreme najvažnija su pitanja FN sustava.

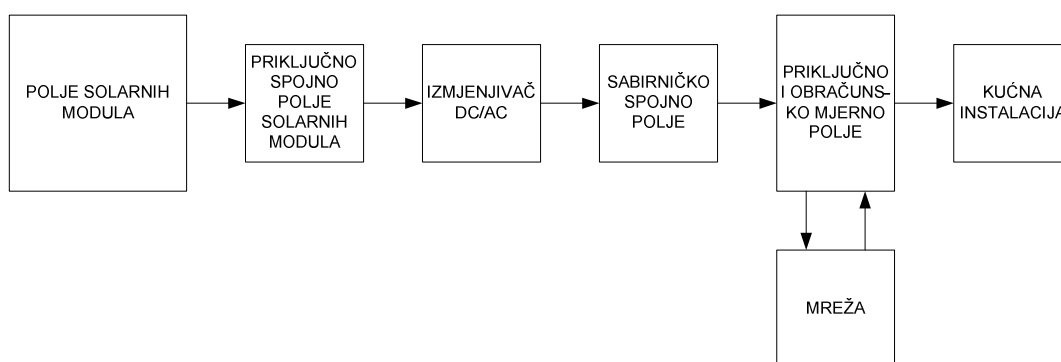
Fotonaponski sustavi spajaju se preko izmjenjivača na distribucijsku mrežu i sami proizvode istosmjernu struju koju treba naknadno pretvoriti u izmjenični napon mrežne frekvencije kako bi napajali trošila ili radili paralelno s elektroenergetskom mrežom. Karakteristična osobina fotonaponskih sustava je ta što imaju iznos početne struje kratkog spoja približan iznosu nazivne struje izmjenjivača, što je dobro u pogledu opasnosti od struje kratkog spoja na mjestu priključka na mrežu.

FN sustavi mrežno povezani rade tako da ih mreža „vodi“, odnosno održava frekvenciju i napon, gdje se u slučaju nestanka mrežnog napona prekida rad izmjenjivača.

Kod FN sustava na krovu kuće osim proizvodne električne energije predane u mrežu, postoji i potrošnja električne energije obiteljske kuće. Spajanje s mrežom može se oblikovati na dva načina. U prvom načinu spajanja FN sustava na mrežu, izlazna struja iz sustav služi za snabdijevanje potrošača u kućanstvu, a proizvedeni višak se mjeri i daje u mrežu (slika 20.). Drugi mogući način spajanja je taj da se FN sustav nakon izmjenjivača i mjernog brojila direktno spaja na mrežu, tj sva proizvedena električna energija se daje u mrežu, a potrošač se napaja preko drugog voda koji ima svoje brojilo (slika 21.). Drugi način je povoljniji za potrošače obzirom da se proizvodnja iz FN sustava financijski potiče, pa se tako može više zaraditi puštajući svu električnu energiju u mrežu.



Slika 20. Puštanje u mrežu samo suvišne energije



Slika 21. Puštanje u mrežu svu proizvodnu energiju

Određeni broj fotonaponskih modula zavisno o potrebnoj snazi i raspoloživoj površini krova, spajaju se su u seriju i paralelu. Solarni moduli se pomoću kablova

spajaju sa solarnim izmjenjivačima u razdjelnom ormariću. Razdjelni ormarić opremljen je odvodnicima prenapona i istosmjernim prekidačima. Solarni izmjenjivači pretvaraju istosmjernu struju solarnih modula u izmjenični napon reguliranog iznosa i frekvencije, sinkroniziran s naponom mreže.

7.1. Smjernice za projektiranje fotonaponskih sustava

Kao što je već rečeno postoji niz fotonaponskih sustava, kao što su:

- mali autonomni sustavi za istosmjerna trošila
- mali autonomni sustavi za istosmjerna trošila i izmjenična trošila
- autonomni sustavi za izmjenična trošila
- mrežno povezani sustavi.

Fotonaponski sustavi vrlo se razlikuju od svih konvencionalnih izvora električne energije, a ponajviše po:

- odabiru individualnog i nipošto rutinskoga tehničkog rješenja
- kritičnom odabiru veličine fotonaponskog i konvencionalnog sustava, o čemu najviše ovisi ekonomičnost
- vrlo kritičnom odabiru opreme koja bez popravka mora odraditi 25g.
- vrlo važno kome podvrgnuti izvođenje radova. [7]

Ukupna cijena ulaganja je posebna priča za svaki pojedini fotonaponski sustav. U ovom radu će se navesti neke smjernice za projektiranje mrežno povezanog fotonaponskog sustava.

7.1.1. Upute za odabir opreme fotonaponskog sustava

Najvažniji dio svakog fotonaponskog sustava su fotonaponski moduli, koji moraju zadovoljiti odgovarajuća tehnička svojstva. To znači da mora postojati sva potrebna tehnička dokumentacija kojom se dokazuju ispitivanja, funkcionalnost i godišnja proizvodnja po točno određenim uvjetima.

Kriteriji za odabir opreme su:

- poznato podrijetlo opreme
- tehnička dokumentacija opreme

- atesti i tehnička jamstva opreme
- upute za upravljanje i montažu
- ugovor o tehničkim i proizvodnim jamstvima za opremu
- određena cijena, rok i način plaćanja, trajanje jamstva
- popis referenci proizvođača ili njihovog ovlaštenog zastupnika

7.2. Tehnički opis fotonaponskog sustava

Na južnu stranu krova kuće postavljeni su fotonaponski moduli BP 4175S pod kutom od 36°. Fotonaponski moduli spojeni su u tri grupe po 19 modula snage 175W. Moduli u svakoj grupi, njih 19 spojeni su serijski na svaki izmjenjivač (ukupno tri takva izmjenjivača) Sunny Boy, Tip SB 4200TL HC, koji tako imaju ukupnu snagu $19 \times 175 = 3325 \text{ Wp}$. To je vršna ulazna snaga za svaki izmjenjivač. Nazivna snaga svakog izmjenjivača iznosi 4200 VA. Ukupna snaga fotonaponskog sustava iznosi 9.9750 kW. Površina koju zauzimaju moduli iznosi 71.73 m², dok je ukupna težina modula 877.8 kg.

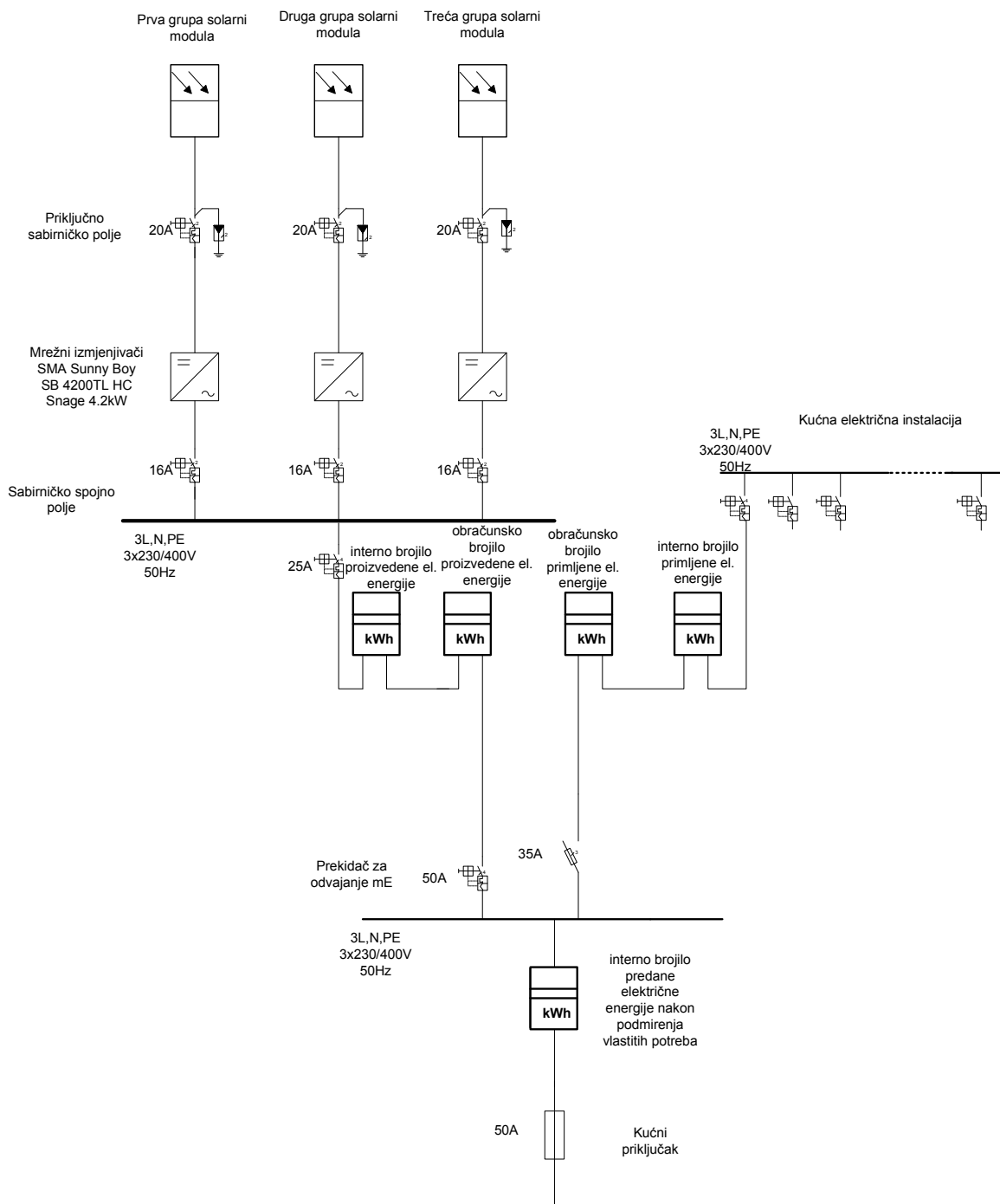
Fotonaponski moduli se spajaju kabelima tipa H07RN-F (EPN-50), koji se potom od niza fotonaponskih modula uvode u razdjelni ormarić modula. U razdjelnom ormariću se dovodi od svake grupe fotonaponskih modula razvode prema solarnim izmjenjivačima. Razdjelni ormarić opremljen je odvodnicima prenapona i istosmjernim prekidačima.

Sustavno su primijenjene sigurnosne i zaštitne mjere u skladu sa svim važećim hrvatskim i europskim normama za ovakve sustave. Za zaštitu modula korišteni su istosmjerni prekidači od 20A, te automatski osigurači od 16A i 25A tipa B za izmjenjivač, kao što je preporučeno od samog proizvođača. Potrebna su dva obračunska mjerna brojila, jedno za mjerenje proizvodnje električne energije iz FN sustava, te dvotarifno brojilo za tarifnog kupca električne energije. Tri interna brojila koja su: brojilo proizvedene energije, potrošene energije i brojilo koje mjeri višak električne energije predane u mrežu spojena su na računalo radi praćenja rada FN sustava.

Pomoću PVGIS-a prethodno je procijenjeno da će se ovim FN sustavom godišnje dobiti oko 15000 kWh električne energije. Sustav je u paralelnom

pogonu s distribucijskom mrežom, gdje je proizvedena električna energija iz fotonaponskog sustava napajanje za opskrbu električnom energijom trošila u kući i višak predavati u elektrodistribucijsku mrežu. Jednopolnu shemu fotonaponskog sustava prikazuje slika 22.

Detaljni opis karakteristika pojedinih elemenata bit će opisane u daljnjem tekstu.



Slika 22. Jednopolna shema fotonaponskog sustava

7.2.1. FN moduli BP 4175S

Osnovni element svakog fotonaponskog sustava su fotonaponski moduli. Moduli se sastoje od velikog broja fotonaponskih ćelija koji su povezani u kombinaciju (serijski i paralelno) da bi se dobio odgovarajući napon odnosno snaga. Njihove osnovne karakteristike su dugovječnost, visoka učinkovitost, te velika mehanička i atmosferska otpornost. Najvažniji faktor koji utječe na proizvodnju električne energije svakog solarnog modula je njegova snaga. Snaga solarnih modula ovisi o starosti modula, te o vremenskim uvjetima. Smanjuje se s porastom temperature, a povećava sniženjem temperature. Prilikom usporedbe različitih tipova solarnih modula, važno je usporediti njihove minimalne snage. Bitan pokazatelj opće kvalitete proizvođača fotonaponskih solarnih modula, zasigurno je iznos odstupanja od nazivne snage u ovisnosti o prije spomenutim faktorima, temperaturi i starosti.

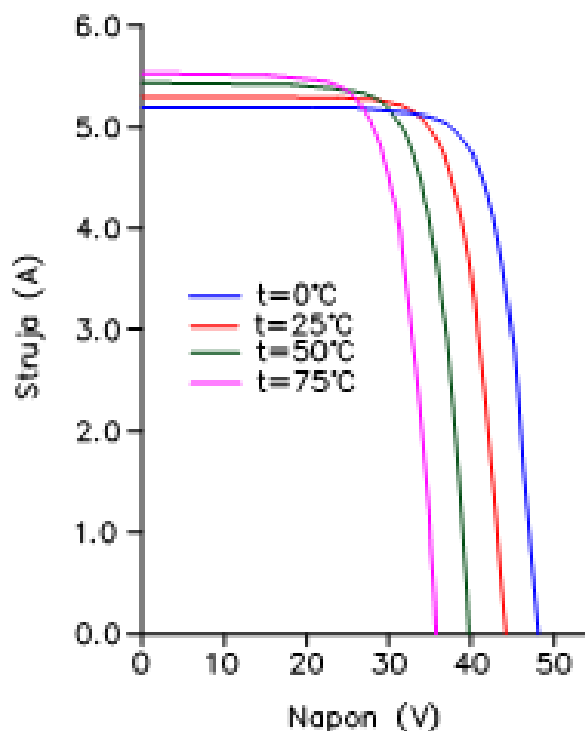
Za realizaciju fotonaponskog sustava uzeti su fotonaponski moduli BP 4175S snage 175W proizvođača BP Solar, SAD. Module BP 4175S sačinjen od monokristalnih Si ćelija s anti-refleksivnom prevlakom. Posjeduje visok stupanj iskoristivosti (preko 15%) i dugog je životnog vijeka sa jamstvom na snagu od 25 godina. Karakteristika ugrađenih modula dana je u tablici 6.

Tablica 6. Karakteristike ugrađenog modula [10]

Modul BP Solar, SAD		BP 4175S	
Maksimalna snaga	P_{max}	175	W
Napon pri maksimalnoj snazi	U_{mp}	35,4	V
Struja pri maksimalnoj snazi	I_{mp}	4,9	A
Struja kratkog spoja	I_{sc}	5,5	A
Napon otvorenog kruga	U_{oc}	44,3	V
Maksimalni napon sustava		600	V
Dimenzije 1593 x 790 x 50			mm
Težina		15,4	kg
Broj modula		57	kom

U-I karakteristika modula BP 4175S prikazana je na slici 23. Ovisnost snage o temperaturi ovog tipa solarnih modula iznosi $-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ\text{C}$, ovisnost napona o

temperaturi iznosi $-(160\pm 20)\text{mV}/^\circ\text{C}$, dok ovisnost struje o temperaturi iznosi $(0,065\pm 0,015)\%/^\circ\text{C}$.



Slika 23. U-I karakteristika solarnog modula BP 4175S

7.2.2. Kabeli za spajanje fotonaponskih modula

Fotonaponski moduli zbog atmosferskih utjecaja, kiše, sunčevog zračenja i visoke temperature, međusobno se spajaju kabelima H07RN-F.

Građa kabela H07RN-F (EPN-50) je od finožičnog (pokositrenog) vodiča s izolacijom od posebne gumene smjese (EI 1) i plaštem od kloroprenske gume. Zahvaljujući izvanrednoj mehaničkoj čvrstoći H07RN-F kabel idealan je za upotrebu pri srednjim i teškim mehaničkim opterećenjima, u suhim i vlažnim uvjetima, u uvjetima sa viših temperatura od standardnih i velikom Sunčevom zračenju, u slobodnom prostoru i pogonima gdje postoji opasnost od eksplozija. Taj kabel je proizveden korištenjem spojeva koji imaju puno bolje ponašanje nego standardni kabeli. Ova činjenica čini H07RN-F kabel višenamjenski za napona do 1kV.

7.2.3. Izmjenjivač

Solarni izmjenjivači pretvaraju istosmjerni napon solarnih modula u izmjenični napon reguliranog iznosa i frekvencije, sinkroniziran s naponom mreže [9]. Izmjenjivači koji se koriste za povezivanje FN sustava s mrežom dijele se na naponske izmjenjivače i strujne izmjenjivače, dok se obzirom na regulaciju dijele na strujno upravljane (egl. current-controlled inverter) i naponski regulirane izmjenjivače. Općenito se u praksi koristi više tipova izmjenjivača za mrežno povezivanje FN sustava, kao što su [6]:

- Linijski komutirani izmjenjivač
- Samokomutirani izmjenjivač
- FN izmjenjivač sa visokofrekventnim transformatorom

Karakteristike mrežnih izmjenjivač su:

- Vrijeme odziva
- Faktor snage
- Frekvencijska regulacija
- Harmonične karakteristike
- Sinkronizacija
- Doprinos struji kratkog spoja
- Injekcija DC snage
- Zaštita.

Minimalni zahtjev za ostvarivanje paralelnog rada je taj da zaštita izmjenjivača proradi (tj. da djeluje na sklopku) i da izolira FN sustav od mreže ako se pojavi odstupanje od napona (prenapon ili podnapon) ili frekvencije (nadfrekvencija ili podfrekvencija). Granice mogućeg odstupanja su tvornički postavljene ili programibilne za svaki pojedini izmjenjivač. Zahtjevi za zaštitnim funkcijama i granice podešavanja izmjenjivača moraju ispunjavati norme EU, o čemu će bit govora kod distribuirane proizvodnje.

Ugrađeni izmjenjivači u FN sustav su Sunny Boy, Tip SB 4200TL HC, proizvođača SMA iz SR Njemačke čije su karakteristike dane u tablici 7.

Tabela 7. Karakteristike izmjenjivača [10]

TEHNIČKI PODACI		SB 4200	
Ulazne veličine			
Maksimalna PV snaga	P_{pv}		W_p
Maksimalna DC snaga	$P_{DC, max}$	4400	W
Maksimalni DC napon	$U_{DC, max}$	750	V
PV napon, MPP-područje	U_{PV}	125-750	V
Maksimalna struja	$I_{PV, max}$	11	A
DC napon brujanja	U_{SS}	< 10	%
Maksimalni broj u nizu (paralelno)		2	
DC strana odspajanja		utični spoj	
Prenaponska zaštita		Da	
Nadziranje kvara uzemljenja		Da	
Zaštita zamjene polova		Da	
Izlazne veličine			
Maksimalna AC snaga	$P_{AC, max}$	4200	W
AC nazivna snaga	$P_{AC, nom}$	4000	W
Ukupno harmonijsko izobličenje struje		< 4	%
Radno područje, Napon mreže	U_{AC}	198-260	V
Moguće područje, Napon mreže		180-265	V
Frekvencija mreže	f_{AC}	49,8-50,2	Hz
Moguća frekvencija mreže		45,5-54,5	Hz
Fazni pomak	$\cos \varphi$	1	
Otporan na kratki spoj		Da	
Mrežni priključak		utični spoj	
Stupanj korisnog djelovanja			
Maksimalni stupanj korisnosti	η_{max}	96,2	%
Europski stupanj korisnosti	η_{euro}	95,4	%
Vlastita potrošnja			
Potrebna snaga pri pogonu		< 10	W
Snaga kod noćnog pogona		< 0,25	W
Vrsta zaštite			
Prema DIN EN 60529		IP65	
Temperatura okoliša, dopuštena		-25 do +60	°C
Mehaničke veličine			
Dimenzije		470x460 x225	Mm
Težina		31	Kg

Izmjenjivači su od renomiranog proizvođača i u sebi objedinjuju sve sklopove potrebne za siguran i pouzdan rad na niskonaponskoj mreži u paralelnom režimu rada.

Izmjenjivač Tip SB 4200TL HC je opremljen sa:

- sustavom za praćenje rada mreže,
- uređajem za automatsku sinkronizaciju postrojenja i mreže,
- zaštitnim uređajem sa mogućnošću podešavanja u granicama dozvoljenih odstupanja od nazivnih vrijednosti, ($U_{<}$, $U_{>}$, $f_{<}$, $f_{>}$)
- sustavom zaštite od injektirane istosmjerne struje u mrežu,
- uređajem za isključenje odnosno uključenje na mrežu, (isključenje u slučaju odstupanja od zadanih vrijednosti odnosno uključanja kad se ispune uvjeti).

Izmjenjivača Tip SB 4200TL HC ima dva ulaza označeni sa „String A“ i „String B“ svaki sa svojim MPP područjem rada. Što znači da se maksimalno može na izmjenjivač spojiti dva niza FN modula, koji su prethodno spojeni u seriju. Ulazni istosmjerni napon ulazi u sustav za praćenje optimalne radne točke (MPPT, eng. Maximum Power Point Tracking), kojim se osigurava da FN moduli u bilo kojim uvjetima rada, bez obzira na intenzitet Sunčevog zračenja ili njegovu radnu temperaturu, uvijek rade na istom maksimalnom naponu. Istosmjerni napon koji se dobije spajanjem FN modula za izmjenjivač Tip SB 4200TL HC mora biti između 125-750V, a maksimalna ulazna struja ne smije biti veća od 11A za svaki ulaz, „String A“ i „String B“.

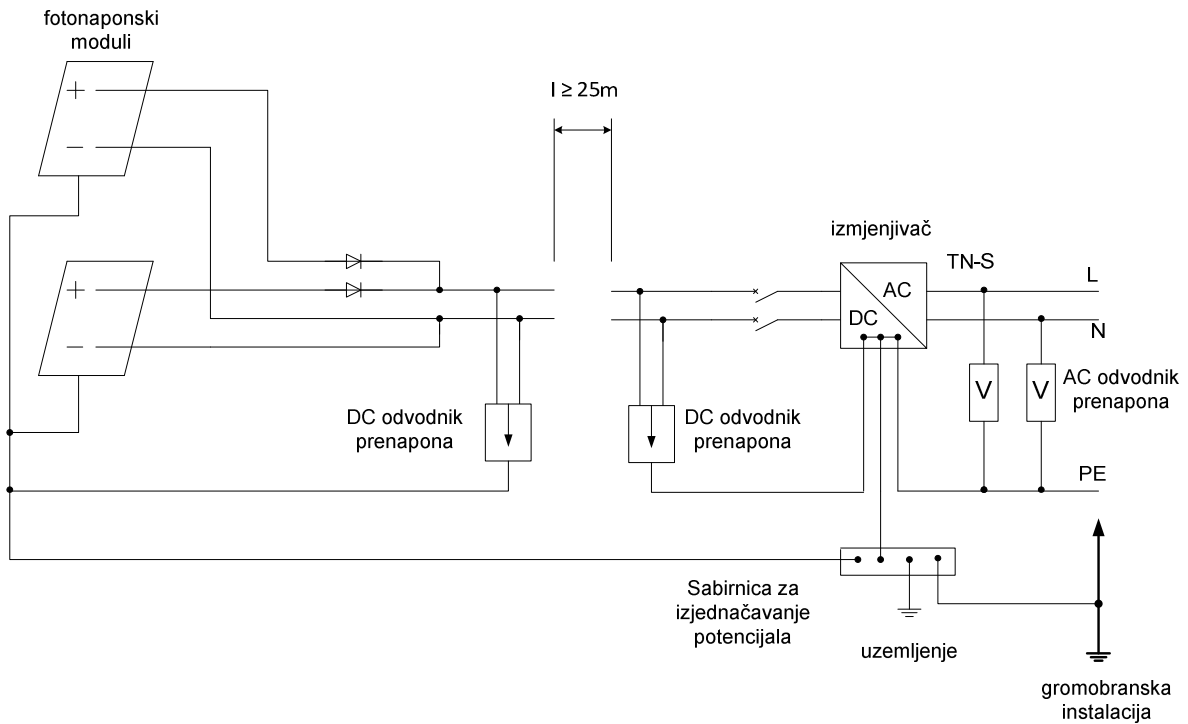
Maksimalna izlazna struja izmjenjivača tipa SB 4200TL HC je 19A, a proizvođač preporučuje da izmjenjivač mora biti štićen osiguračem jakosti 25A tipa B [11].

7.3. Zaštita od atmosferskih i induciranih prenapona

Da bi se osigurao siguran i neprekidani rad FN sustava kroz njegov životni vijek potrebno je predvidjeti cjelokupnu zaštitu od atmosferskih i induciranih prenapona već u fazi projektiranja FN sustava i provedbi projekta. Zaštita mora biti osigurana ne samo na izlaznoj strani izmjenjivača, već i na izlaznoj strani fotonaponskih modula. Fotonaponski sustavi su obično instalirani na krovovima kuća ili na velikim zelenim površinama, što u startu predstavlja veću vjerojatnost od udara groma (atmosferskih prenapona). Posljedice udara groma na fotonaponske module imat će posljedice i na ostalu električnu opremom, zbog električne povezanost između fotonaponski sustav i električne instalacije u kući, što dovodi do financijskih gubitaka. Nadalje, rizik od financijskog gubitka prilikom udara groma treba uzeti u obzir pri razmatranju ulaganja u fotonaponske panele.

U skladu s normom EN 62305-2 u očekivane rizike oštećenja fotonaponskog sustava spadaju direktni ili ne direktni udari groma. Zaštita fotonaponskih sustava od atmosferskih i induciranih prenapona mora biti u skladu sa normama Evropske Unije EN 60364-7-712 (Električna instalacija fotonaponskog sustava), EN 61173 (zaštita od prenapona nastalih u fotonaponskom sustavu) i grupa standarda EN 62,305 (gromobrani) [12].

Jezgru fotonaponskog sustav čini izmjenjivač, tako da će zaštita od groma i od prenapona biti usmjerena na izmjenjivač, a u isto vrijeme u zaštitu od groma i induciranih prenapona bit će uključen cijeli fotonaponski sustav. Ako je udaljenost između priključno sabirničkog polja fotonaponskih modula i izmjenjivača manja od 25m tada je dovoljno da se samo na jednom mjestu ugradi odvodnik prenapona, a u protivnom se mora ugraditi na oba mjesta. Na slici 24. je prikazan fotonaponski sustav sa ugrađenim odvodnicima prenapona u neposrednoj blizini izmjenjivača i priključnog sabirničkog polja fotonaponskih modula.



Slika 24. Zaštita FN sustava uzemljenjem i odvodnicima prenapona

Kod postavljanje fotonaponskih modula na krov kuće sa postojećom gromobranskom instalacijom, oštećenje fotonaponskog sustava se minimaliziraju dozvoljenom udaljenošću između fotonaponskih modula i gromobranske instalacije, kao što prikazuje slika 25.



Slika 25. FN sustav na kući sa gromobranskom instalacijom

Udaljenost između fotonaponskih modula i gromobranske instalacije na krovu treba biti veća od 0.5m. Ako nije moguće ostvariti udaljenost veću od 0.5m, tada je potrebno fotonaponske module vodljivo spojiti sa gromobranskom instalacijom koja je spojena sa uzemljenjem. Svrha toga je da struja udara groma ne teče konstrukcijskim okvirom fotonaponskih modula. Ako konstrukcija fotonaponskih modula nije vodljivo spojena sa gromobranskom instalacijom ili sama kuća nema gromobransku instalaciju tada je potrebno konstrukciju fotonaponskih modula direktno spojiti sa uzemljenjem. Uzemljenje omogućuje brzo pražnjenje naboja u okolno tlo, a za uzemljenje se primjenjuju duboko zabijene čelične ili bakrene šipke ili ploče.

Izmjenjivač se štiti odvodnikom prenapona na DC strani (na slici označeno brojem 1) i odvodnikom prenapona na AC strani (na mjestu označenom sa brojem

5 ili brojem 3). Odvodnici prenapona na DC strani odabiru se prema naponu praznog hoda fotonaponskog izvora (cjelokupni spoj modula).

7.4. Ključne norme na području fotonaponskih sustava

Nositelji normizacije na području fotonaponskih sustava su IEC i IEEE-SA, a ključne norme na području fotonaponskih sustava su:

- IEC 61730 Photovoltaic Module Safety
- IEC 61215 Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval
- IEC 61646 Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval [13].

Norma IEC 61730 opisuje temeljne konstrukcijske zahtjeve za fotonaponske module. Njihov cilj je osigurati siguran mehanički i električni rad tijekom predviđenog životnog vijeka. Norma IEC 61215 i norma IEC 61646 opisuje tip modula i zajedno sa normom IEC 61730 definira temeljne zahtjeve na konstrukciju fotonaponskih modula.

IEEE SCC21 je razvio niz normi, smjernica i preporuka u svezi funkcionalnih i pogonskih zahtjeva za rad fotonaponskih sustava i opreme.

- IEEE 1262 Recommended Practice for Qualification of Photovoltaic (PV) Modules
- IEEE 1374 Guide for Terrestrial Photovoltaic Power System Safety
- IEEE 928 Recommended Criteria for Terrestrial Photovoltaic Power System [13].

8. Troškovi i isplativost fotonaponskog sustav

8.1. Analiza troškova ulaganja u fotonaponsku opremu

Cijena malih fotonaponskih sustava značajno je veća od cijene ostalih konvencionalnih tehnologija koje koriste fosilna goriva. Za velike fotonaponske sustave potrebne su velike slobodne površine, pri tome se daje sve više prednost malim distribuiranim izvorima, pri čemu se koriste sve raspoložive površine kao što su pročelja, verande i krovovi kuća. Pri tome te površine i dalje zadržavaju svoje glavne funkcije. Istodobno se ostvaruju primjena Sunčeve energije za proizvodnju električne energije i zaštita od prevelikog zagrijavanja unutrašnjosti tijekom ljetnog razdoblja. Fotonaponski moduli tada postaju integrirani dio pojedinih građevinskih elemenata i tada manje utječu na troškove izgradnje fotonaponskog sustava. Prednost ovakve distribuirane proizvodnje električne energije jest i to što se električna energija proizvodi na mjestu potrošnje, pa je njena stvarna cijena jednaka prodajnoj, a ne proizvodnoj cijeni kao u nekom od termoenergetskih postrojenja. Korisnici mrežno povezanog sustava imaju izravnu (mikroekonomsku) korist koja nastaje na temelju državnih poticaja, subvencija i naknada za isporučenu „zelenu energiju“. Mikroekonomski gledano smanjuje se uvoz električne energije i fosilnih goriva, a postiže se i velika ekološka prednost kroz stalni trend smanjenja emisije stakleničkih plinova.

Troškovi ulaganja u fotonaponsku opremu načelno se mogu podijeliti na:

- troškovi ulaganja u fotonaponske module
- troškovi ulaganja u izmjenjivače
- troškovi ulaganja u regulatore napona i punjenje baterija
- troškovi ulaganja u akumulatore
- troškovi ulaganja u ostalu opremu
- troškovi projektantsko-konzultantskih usluga
- troškovi montaže opreme.

Troškovi autonomnih sustava, takozvanih otočnih sustava su dva puta veći od fotonaponskih sustava priključenih na mrežu. Razlog je taj što fotonaponski sustavi spojeni na mrežu nisu potrebne neke komponente kao što su akumulatorske baterije, regulator punjenja i pražnjenja, kao ni regulator istosmjernog napona. Razlog u manjoj investiciji je i u tome što je mrežni pretvarač jednostavniji po funkciji i značajno je manje snage nego kod autonomnih sustava. Osim manjih početnih investicija tu se još smanjuju troškovi pogona i održavanja, jer nije potrebno mijenjati i održavati akumulatorske baterije.

8.2. Isplativost projekta

Osnovni pokazatelji isplativosti projekta su novčani tijekom te izvještaj o neto financijskim i ekonomskim koristima. Oni sadrže projekcije godišnjih primitaka i izdataka za vrijeme vijeka korisnosti projekta. Isplativost projekta se može dobiti pomoću više metoda, a neke od njih su:

- Metoda razdoblja povrata
- Metoda neto (čiste) sadašnje vrijednosti
- Metoda interne stope povrata (IRR).

Za prikaz isplativosti projekta koristit će se metoda razdoblja povrata. Otplatni period je razdoblje potrebno da se investicijsko ulaganje pokrije očekivanim pozitivnim gotovinskim tijekovima. Broj godina potrebnih za nadoknadu ulaganja je jednako početnom ulaganju kroz godišnji novčani primitci.

$$I = \sum_{t=1}^{t_p} V_t \quad (14)$$

gdje je:

- I - investicijski troškovi
- T_p - razdoblje povrata
- V_t – čisti novčani tok po godinama t

Da bi se projekt usvojio treba se ispuniti uvjet da je razdoblje povrata investicije unutar razdoblja životnog vijeka projekta.

Karakteristike metode razdoblja povrata su:

- ne respektira dinamiku gotovinskih tijekova i vremensku vrijednost novca tijekom otplatnog perioda
- ne respektira iznos ni dinamiku gotovinskih tijekova nakon perioda otplate
- ne vodi računa o trošku kapitala projekta
- ne vodi računa o maksimalizaciji bogatstva dioničara
- laka je za izračun i daje jasne rezultate
- daje određenu sliku o likvidnosti i rizičnosti projekta.

Isplativost svih tehnologija proizvodnje energije, pa tako i fotonaponskih sustava, određuju:

- prihodi i uštede od korištenja sustava
- troškovi ulaganja (investicije)
- pogonski troškovi
- troškovi servisa i održavanja
- troškovi raspremanja na završetku radnog vijeka postrojenja
- neizravni (preventivni i sanacijski) troškovi očuvanja okolice.

8.3. Troškovi opreme i radova fotonaponskog sustava

Popis opreme i troškovi projektiranog fotonaponskog sustava 10kW navedeni su u tablici 8. Troškovi projektantskih, elektromontažnih usluga kao i troškovi priključnog (istosmjernog) polja fotonaponskih modula i priključnog (izmjeničnog) polja izmjenjivača pretpostavljeni su na osnovi sličnih projekata mrežno povezanog fotonaponskog sustava na području Republike Hrvatske, literatura [14].

Tablica 8. Troškovi materijala fotonaponskog sustava

Redn i broj	Materijal	Jed. mjere	Količina	Jedinična cijena (kn)	Iznos (kn)	Iznos (%)	
1.	FN moduli BP 4175S snage 175W	Kom	57	7.189,00	409.773,00	77.30	
2.	Nosači solarnih modula	Kom	1	22.000,0	22.000,00	4.15	
3.	Izmjenjivač tip SB 4200TL HC	Kom	3	17.617,00	52.851,00	9.97	
4.	Priključno (DC) polje fotonaponskih modula	Kom	1	3.000,00	3.000,00	0.56	
5.	Priključni set kabela za fotonaponske module	Kom	1	4.100,00	5.000,00	0.77	
6.	Priključnom (AC) polje izmjenjivača	Kom	1	3.500,00	3.500,00	0.66	
7.	Kućni priključno mjerni ormarić s automatskom galvanskom sklopkom	Kom	1	14.000,00	14.000,00	2.64	
8.	Elektromontažni radovi	Kom	1	10.000,00	10.000,00	1.88	
9.	Projektantski radovi	Kom	1	10.000,00	10.000,00	1.88	
Ukupni materijal						530.124,00	

Tri ključne stavke u ukupnim troškovima izgradnje fotonaponskog sustava su:

- fotonaponski moduli s udjelom u troškovima od 77.3 %,
- izmjenjivač s udjelom u troškovima od 9.97 %,
- konstrukcija s udjelom troškova od 4.15 %.

Ukupni specifični trošak odnosno cijena 1 kW instalirane snage fotonaponskog sustava za ovaj slučaj iznosi 53.012,00 kn/kW.

8.4. Naknada za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije (OIE)

Ključni čimbenici pri analizi isplativosti odnosno računanja razdoblja povrata su trend kretanja cijene električne energije, iznosa poticaja i poreznih olakšica. Prema uredbi o naknadi za poticanje proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije ("Narodne novine", br. 33/2007), koju je donijela Vlada Republike Hrvatske, od 1. srpnja 2007. godine započela je naplata naknade za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije (skraćeno: Naknada za poticanje) od svih kupaca električne energije u Republici Hrvatskoj.

Sredstva Naknade za poticanje koriste se za isplatu poticajne cijene koju Hrvatski operator tržišta energije d.o.o. plaća povlaštenim proizvođačima za isporučenu električnu energiju sukladno tarifnom sustavu za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije koji je donijela Vlada Republike Hrvatske ("Narodne novine", br. 33/2007). Pravo na poticajnu cijenu električne energije ima proizvođač koji električnu energiju proizvodi iz obnovljivih izvora energije, u našem slučaju je to iz sunčeve energije. Poticajna cijena električne energije iz postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije dana je u tablici 9.

Tablica 9. Poticajna cijena električne energije

Tip postrojenja	za 2007.g. kn/kWh	za 2008.g. kn/kWh	za 2009.g. kn/kWh
Sunčana elektrana instalirane snage do uključivo 10kW	3,40	3,5972	3,7015
Sunčana elektrana instalirane snage do 10kW do uključivo 30kW	3,00	3,1740	3,2660
Sunčana elektrana instalirane snage veće od 30kW	2,10	2,2218	2,2862

8.5. Isplativost fotonaponskog sustava

Isplativost ulaganja u izgradnju fotonaponskog sustava ovisi o mnogo parametara poput:

- veličine, položaja prema suncu, učinkovitosti, orijentacije,
- zračenja sunca,
- tarifnih stavki i cijene električne energije
- poticaja za proizvedenu električnu energiju,
- kamatnih stopa i poreznih olakšica.

Ključni čimbenici pri analizi isplativosti odnosno računanja razdoblja povrata su trend kretanja cijene električne energije, iznosa poticaja i poreznih olakšica. Podaci potrebni za sagledavanje isplativosti u slučaju projektiranog FN sustav dani su u daljnjem tekstu. Uz prosječnu godišnju proizvodnju od 15000kWh, pretpostavku da se sva proizvedena električna energija preda u mreže i uz iznos poticaja od 3,7015 kn/kWh. Ukupno početni troškovi fotonaponskog sustava iznose 530.124,00kn + PDV, a životni vijek projekta je 25 godina. Za prikaz isplativosti projekta (fotonaponski sustav) koristit će se metoda razdoblja povrata, koja je objašnjena u poglavlju 8.3., a čija formula je:

$$I = \sum_{t=1}^{t_p} V_t$$

Gdje je:

$$V_t = 3,7015 \text{ kn/kWh} \cdot 15000 \text{ kWh} - \text{porez na dobit od } 20\% = 44.418,00 \text{ kn}$$

$$I = 530.124,00 \text{ kn} + \text{PDV} = 646.751,00 \text{ kn}$$

$$t_p = \frac{I}{V_t} = \frac{646\,751,00 \text{ kn}}{44\,418,00 \text{ kn/god}} = 14.56 \text{ god} \approx 15 \text{ god}$$

Projekt fotonaponskog sustava bi se isplatio nakon 15 godina.

9. Distribuirana proizvodnja

Distribuirana proizvodnja električne energije (eng. DG – distributed generation ili DP –distributed power) je proizvodnja električne energije unutar distribucijske mreže blizu mjestu potrošnje. Sukladno tome je distribuirani izvor svaki onaj koji je priključen na distribucijsku mrežu [15].

Prilikom rješavanja situacije o priključenju jedinica distribuirane proizvodnje (malih elektrana) na distribucijsku mrežu, dolazi do izražaja potrebna regulativa u obliku definiranih zakona, pod-zakonskih akata, normi i propisa. Pritom se javljaju pitanja rješavanja tehničkih, pravnih i ekonomskih aspekata priključenja takvih objekata. Norme su potrebne da bi se proizvod mogao tehnički definirati kroz zahtijevane karakteristike i određene mjerne veličine.

Za priključenje elektrana na distribucijsku mrežu potrebni su:

- Zakon o prostornom uređenju i gradnji (NN 76/07)
- Opći uvjeti za opskrbu električnom energijom (NN 14/06)
- Mrežna pravila elektroenergetskog sustava (NN 36/06)
- Pravilnik o naknadi za priključenje na elektroenergetsku mrežu i za povećanje priključne snage (NN 28/06)
- HEP-ovi Tehnički uvjeti za priključenje malih elektrana na EES (1995).

Svaka mala elektrana za priključak na mrežu mora zadovoljiti neke minimalne tehničke uvjete:

- odstupanje frekvencije
- odstupanje napona
- valni oblik napona
- nesimetriju napona
- pogonsko i zaštitno uzemljenje
- razinu kratkog spoja
- razinu izolacije
- zaštitu od kvarova i smetnji
- faktor snage.

9.1. Priključenje fotonaponskog sustava na mrežu

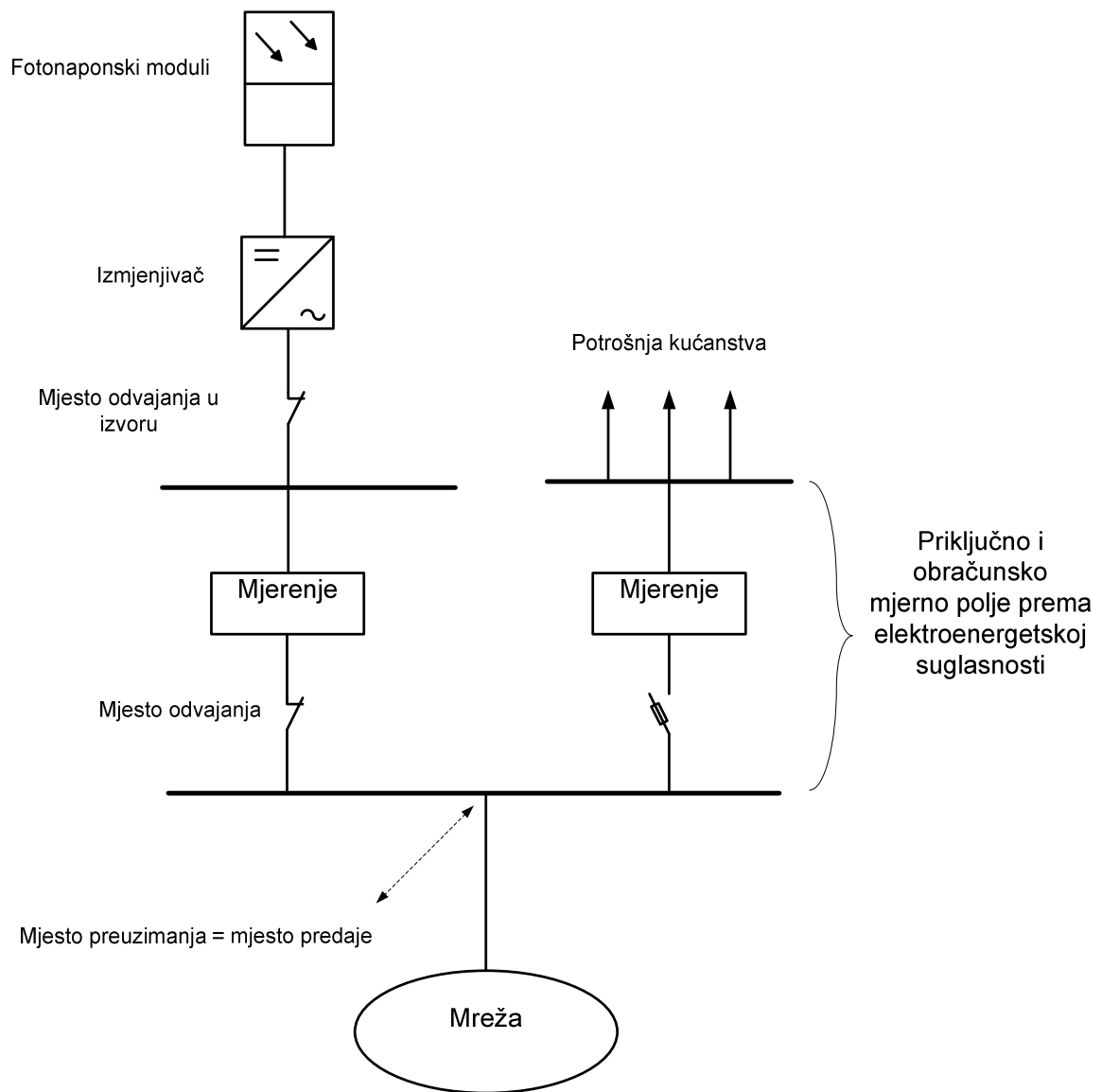
Mjesto priključka distribuiranog izvora ovisi o vršnoj snazi elektrane. Fotonaponski sustavi do uključivo 30 kW se priključuju na niskonaponski vod. Kod priključenja fotonaponskog sustava na mrežu nije riječ samo o distribuiranoj proizvodnji, već i o povlaštenom proizvođaču kojeg moramo promatrati u položaju proizvođača koji isporučuje električnu energiju u mrežu i u položaju kupca koji iz mreže preuzima električnu energiju za vlastite potrebe. S tog stajališta treba vidjeti kakvi će biti tokovi radne i jalove električne energije u promatranom trenutku. To prvenstveno ovisi o tehničkim značajkama proizvodnog postrojenja (npr. kod fotonaponskog sustava ima li izmjenjivač ulazni transformator), od pogonskog stanja proizvodnog postrojenja i nacрта sučelja prema mreži. Mjerenja kvalitete električne energije iz literature [16], [17] su potvrdila predviđene pretpostavke da rad male sunčane elektrane reda veličine do 30 kW ne utječe na tokove radne i jalove električne energije.

Osnovni podaci o priključku FN sustava do 30kW su:

- nazivni napon mreže: 0,4 kV
- frekvencija: 50 Hz
- mjesto priključka: niskonaponski vod
- vrste priključka: jednofazni (do 5kW), trofazni (od 5kW do 30kW).

Vrsta sklopnog aparata za odvajanje je osigurač sklopka, ostvarena zaštitna funkcija na mjestu sklopnog aparata je nadstrujna kratkospojna (osigurač).

Utjecajni faktor izgleda nacрта sučelja prema mreži je način odvajanja proizvodnog postrojenja iz paralelnog pogona sa mrežom. Prema propisanim pravilima na sučelju elektrane (fotonaponskog sustava) i distribucijske mreže ugrađuje se prekidač za odvajanje, koji omogućuje odvajanje postrojenja elektrane iz paralelnog pogona s distribucijskom mrežom (slika 26). Upravljanje prekidačem za odvajanje je isključivo u nadležnosti Operatora distribucijskog sustava (ODS).



Slika 26. Nacrt sučelja i priključka na mrežu fotonaponskog sustava

Povlašteni proizvođač osim što je dužan omogućiti ODS u svako vrijeme pristup priključku proizvodnog postrojenja, dužan je osigurati i pristup obračunskom mjernom mjestu radi uvida u stanje opreme, vođenja pogona i očitavanja stanja brojila.

9.1.1. Tehnički uvjeti za priključenje FN sustava na mrežu

Kao što je već spomenuto da svaka mala elektrana mora ispuniti tehničke uvjete za spajanje na mrežu, tako postoje i tehnički zahtjevi koje mora zadovoljiti fotonaponski sustav.

Temeljni tehnički zahtjevi za priključak fotonaponskog sustav na mrežu koje mora zadovoljiti fotonaponski sustav su:

- maksimalna dozvoljena trofazna snaga
- vrsta priključka na niskonaponsku mrežu
- način pogona
- izmjenični pretvarač
- električna instalacija
- mjerenje i obračun električne energije
- ostali mjerni uređaji
- kućište priključnog mjernog ormara
- ispitivanje tijekom probnog pogona
- ostali uvjeti.

Prvom točkom tehničkih uvjeta utvrđuje se područje primjene tehničkih uvjeta s stajališta maksimalne priključne snage elektrane u slučaju jednofaznog (do 5 kW) i trofaznog priključka (do 30 kW). Zahtjevi kod izmjenjivača određuju se prije svega zahtjevom da izmjenjivač mora ispunjavati norme EU. Također su utvrđeni zahtjevi za zaštitne funkcije i granice podešavanja izmjenjivača:

- nadnaponska ($U_n - 1,06 U_n$) i podnaponska zaštita ($0,9 U_n - U_n$)
- nadfrekventna i podfrekventna zaštita (49,5 – 50,5 Hz)
- automatsko isključivanje rada nakon ispada niskonaponske mreže
- uključivanje u paralelan rad s mrežom nakon prethodnog prekida napajanja (ispada) mreže.

Obračunsko mjerno mjesto se određuje prema naponskoj razini (0.4kV), vršnoj priključnoj električnoj snazi (do 30KW) i karakteristikama brojila. Karakteristike brojila su: dvosmjerno intervalno, izravno mjerenje, mjerenje vršne snage, daljinsko očitavanje, razred točnosti za djelatnu snagu je 1, razred točnosti za jalovu snagu je 2, jednofazno ili trofazno što ovisno o vrsti priključka.

Za kvalitetu električne energije definirani su zahtjevima za maksimalno dozvoljenu vrijednost faktora ukupnoga harmonijskog izobličenja (THD) napona od 2,5 % i maksimalnu dozvoljenu vrijednost indeksa jačine flikera. Vrijednosti

indeksa jačine flikera uzrokovanih priključenjem proizvođača i/ili kupca na mjestu preuzimanja i/ili predaje mogu iznositi najviše:

- za kratkotrajne flikere: 0,7,
- za dugotrajne flikere: 0,5.

Tijekom probnog pogona potrebna je obaviti određena ispitivanja, kao što su:

- ispitivanja propisanih veličina pri uključenju i isključenju elektrane iz paralelnog rada s mrežom te ispitivanja podešavanja i prorade zaštite
- pregled i provjeru ugovorenih nazivnih vrijednosti elektrane
- pregled i provjeru protokola tipskih ispitivanja izmjenjivača
- ispitivanje sustava pogonskih i obračunskih mjerenja.

Navedenim ispitivanjima utvrđuje se prikladnost FN sustav za paralelni pogon s distribucijskom mrežom. Konačno izvješće o funkcionalnom ispitivanju paralelnog pogona FN sustav mora jednoznačno iskazati spremnost postrojenja za pogon.

9.2. Potrebna dokumentacija za priključak FN sustava na mrežu

Potrebna dokumentacija za priključak FN sustava na elektrodistribucijsku mrežu do 30kW navedena je na temelju stvarnog primjera(Solarni krov Špansko-Zagreb) [1].

Prvo je potrebno Rješenje o upisu u Registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP). Za što je nadležno Ministarstvo gospodarstva rada i poduzetništva Republike Hrvatske (MINGORP).

Drugo je potrebna Elektroenergetska suglasnost, Ugovor o korištenju mreže i Ugovor o opskrbi električnom energijom. Za što je nadležan Operator distribucijskog sustava (HEP-ODS).

Treće je potrebno Rješenje o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije. Za što je nadležna Hrvatska energetska regulativna agencija (HERA).

Četvrto što je potrebno je Ugovor o otkupu električne energije. Za što je nadležan Hrvatski operator tržišta energije (HROTE).

Ove navedene institucije dobrim djelom nisu u suglasju, preklapaju svoja prava i obveze te traže veliki broj nepotrebnih dokumenata [1].

9.3. Utjecaj fotonaponskog sustava na distribucijsku mrežu

Kod rada fotonaponskog sustava paralelno sa mrežom važno je razmotriti utjecaj fotonaponskog sustava na distribucijsku niskonaponsku mrežu. U tu svrhu je potrebno izvesti mjerenja utjecaja na kvalitetu napona, mjerene strujne i naponske vrijednosti. Paralelni pogon fotonaponskog sustava s distribucijskom mrežom može uzrokovati određene promjene na mjestu priključka s distribucijskom mrežom koje su neznatne. Iz literature [16], [17] u kojoj su obavljena mjerenja utjecaja fotonaponskog sustava na distribucijsku mrežu, može se reći da strujno-naponske prilike ostaju zadovoljavajuće i nakon priključenja, a snaga trolnog kratkog spoja neznatno se povećava. Vrijednosti harmonijskog izobličenja napona (THD), uzrokovanog priključenjem fotonaponskog sustava na mjestu priključenja, kao što je već ranije spomenuto, iznose najviše 2.5%. Mjerenjima je izmjereno da je vrijednost THD-a unutar dozvoljenih granica.

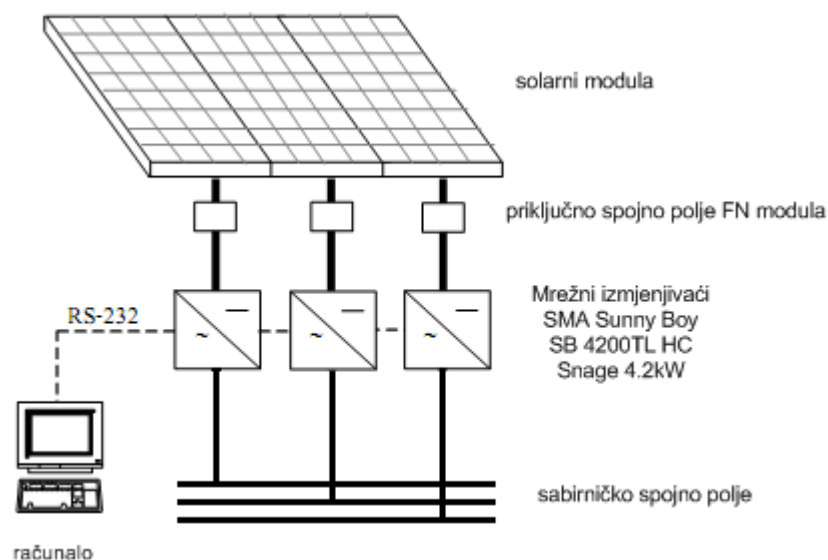
Mjerenje kvalitete električne energije obavljaju se prema normi EN 50160, koja daje kvantitativne odlike kvalitete napona. Pretpostavka je da rad malog fotonaponskog sustava reda veličine do 10 kW ne utječe negativno na kvalitetu električne energije i napon distribucijske mreže. Možemo sa sigurnošću reći da zadovoljavaju sve zahtjeve u skladu s EU[16].

9.4. Nadzor fotonaponskog sustava

Kod korištenja mreže veoma je važan onaj dio koji se odnosi na vođenje pogona proizvodnog postrojenja na sučelju s mrežom. Kod malih elektrana, danas je uobičajeno uređajima za nadzor mreže fizički i funkcionalno pridružen prekidač ili druga odgovarajuća sklopna naprava za odvajanje, koja je u nadležnost ODS-a. Kod malih fotonaponskih elektrane prekidač za odvajanje je sastavni dio izmjenjivača

Kao što je već spomenuto fotonaponski sustavi mrežno povezani rade tako da ih mreža „vodi“, odnosno održava frekvenciju i napon. U slučaju promjena napona ili frekvencije izvan dozvoljenih granica ili ispad same mreže, slijedi automatsko isključivanje rada. Kad dođe do odvajanja proizvodnog postrojenja fotonaponskog sustava iz paralelnog rada s mrežom, a potom se uklone uzroci narušavanja uvjeta za paralelan rad, moguće je povratak u paralelni rad djelovanjem automatike ili ručnim uključanjem.

Na izmjenjivač se preko serijskog kanala (RS232), kojeg posjeduje i izmjenjivač proizvođača Sunny Boy, može spojiti računalo koje služi kao povratna veza prema proizvođaču, u koji se pohranjuju sve bitne električne veličine i registrira proizvedenu električnu energiju (slika 27).

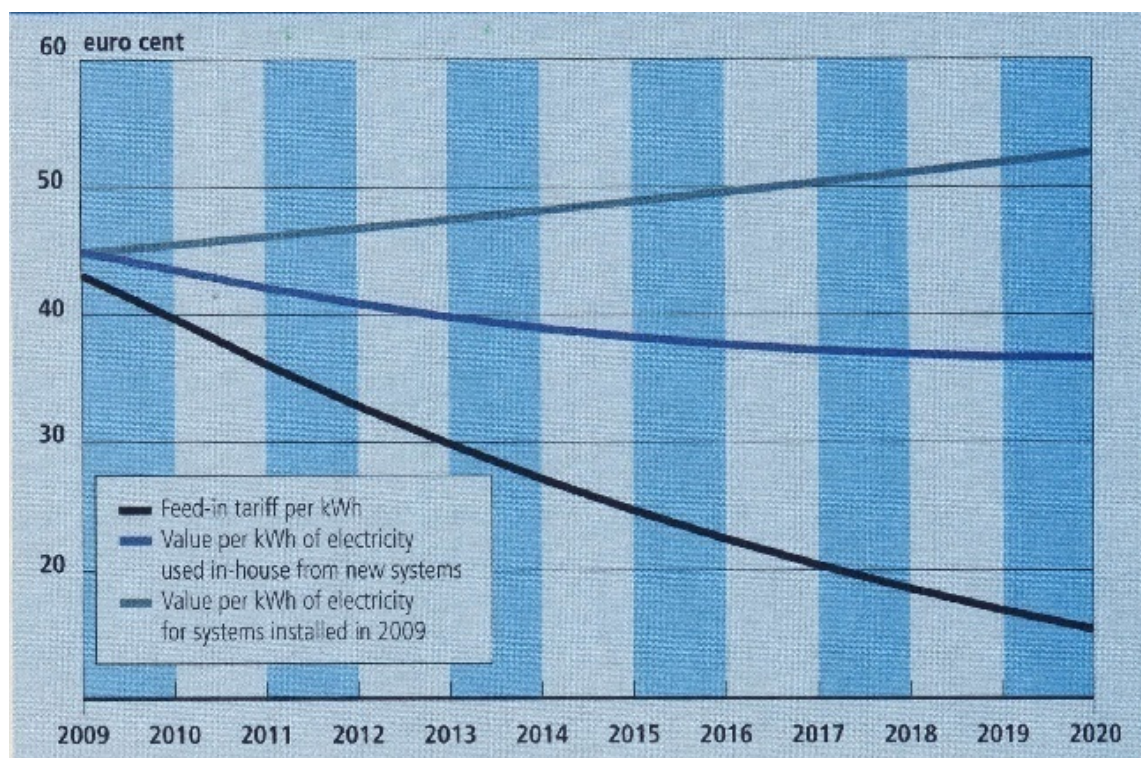


Slika 27. Povezivanje izmjenjivača sa računalom

10. Osvrt na iskustva u priključku FN sustava u Njemačkoj

Zbog sve većeg broja FN sustava spojenih na mrežu i njihovog davanja proizvedene električne energije u mrežu, javljaju se sve veći problemi glede regulacije od strane mrežnog operatora. Taj problem se već danas javlja u Njemačkoj, zbog toga se razmišlja o novoj regulativi koja bi poticala lokalnu potrošnju električne energije proizvedenu u FN sustavu. Novi zakon bi omogućio da proizvođači električne energije iz FN sustava, električnu energiju koriste za svrhe koje oni žele.

Mrežni operator će plaćati 25 c€/kWh solarne električne energije FN proizvođaču za lokalnu potrošnju za sve sustave manje od 30kW. Ako se uključi ušteda isporuke električne energije od 20 c€/kWh za kućanstvo; što znači da svaki kWh solarne električne energije potrošen lokalno vrijedi $25 + 20 = 45$ c€, što je u biti 2 c€ više nego da se električna energija iz FN sustava šalje u mrežu. Ova regulativa bi trebala poticati lokalnu potrošnju električne energije iz FN sustava, zbog čega je taj zakon i stvoren. Pretpostavka je da će u budućnosti električna energija iz mreže biti sve skuplja. Zbog tog razloga korištenje solarne električne energije za vlastite potrebe (lokalno) će se sve više koristiti. Od 2012. (pod pretpostavkom porasta cijene električne energije od 3%) 1kWh solarne električne energije korišten lokalno (ako je sustav iz 2009.) će već vrijediti 3.85 c€ više nego da se šalje u mrežu (slika 28.).



Slika 28. Tarifa električne energije iz FN sustav predane u mrežu i potrošene lokalno [18]

10.1. Inteligentno isključenje/uključenje uređaja

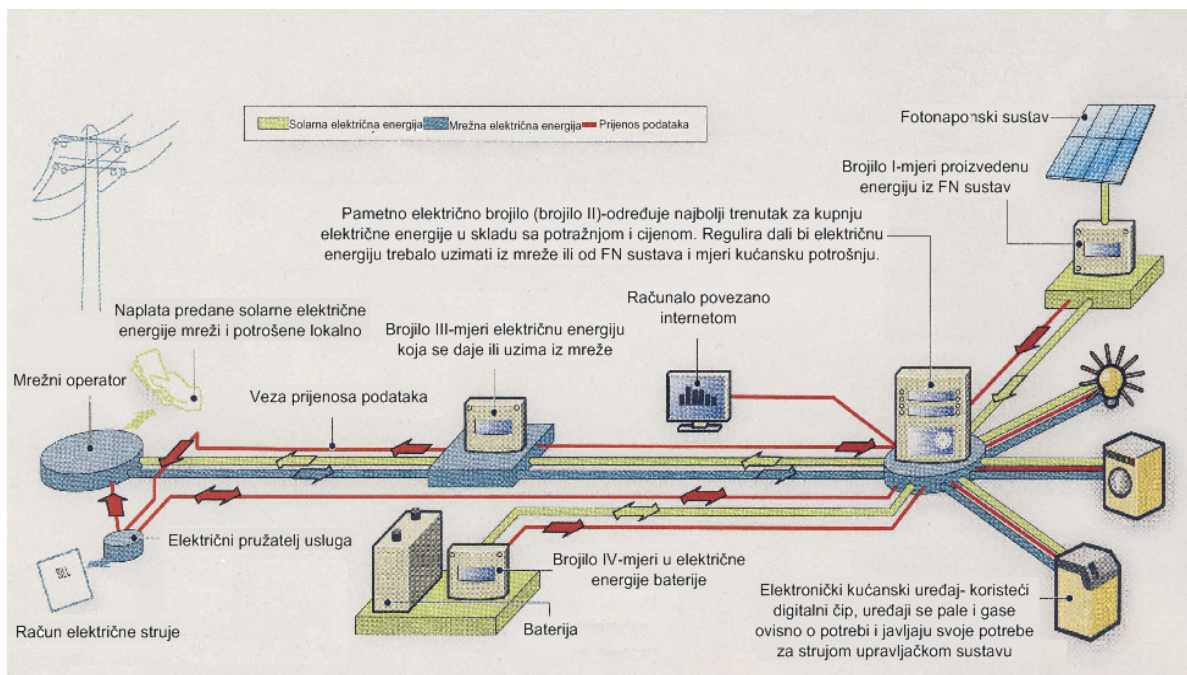
Švicarski tehnički institut (ETHZ) je razvio sistem digitalne elektronike (engl. digital-electricity), ta tehnologija ima mogućnost da sva trošila u zgradi isključuje ili uključuje. Potrošnja se stalno prati, bez korištenja radio veze ili skupih kabela. Oni koriste integrirani električni čip sa visokonaponskim čipom, tom se tehnologijom obični elektronički uređaji pretvaraju u pametne uređaje. Integrirana pločica se umeće u sklopku ili u mjesto samog priključnog uređaja, uz pomoć koje se preko električne mreže komunicira sa upravljačkim uređajem u razvodnom ormariću. Ovim dobivamo mogućnost paliti i gasiti uređaje, tj. ograničiti potrošnju ovisno o cijeni električne energije. Ideja je stabilizirati potrošnju u kućanstvu.

U budućnosti bi izmjenjivači trebali imati digitalni čip na bazi digitalne elektronike, pomoću kojeg bi javljali trenutnu proizvodnju FN sustava upravljačkom uređaju, a upravljački uređaj bi trebao uključivati/isključivati trošila prema prioritetoj listi opterećenja. Ti uređaji sa čipom trebali bi bit dostupni 2010., a svim postojećim uređajima bi se naknadno dodao čip. Ova tehnika bi trebala donijeti

posebne pogodnosti fotonaponskim proizvođačima kod kojih se proizvedena električna energija troši lokalno, zato što ova tehnologija može raditi sa novom vrstom tarifnog sustava (više tarifnih sustava koji zavisno o opterećenju daju različite cijene električne energije). Te nove tarife će donijeti sve veći broj dobavljača električne energije, a tarife mijenjaju cijenu električne energije svakih 15 minuta. Ta se cijena preko interneta prenosi do pametnog električnog centra, što se dalje prosljeđuje do uređaja sa integriranim čipom. Cijena električne energije za krajnjeg korisnika može varirati od 3 do 5 c€ između skupih i jeftinih perioda. U periodima skupe struje (obično kad Sunce sja), privatni FN proizvođači mogu svoju proizvedenu solarnu električnu energiju trošiti lokalno, a višak davati u mrežu sve dok je cijena iznad 45 c€/kWh za vlastitu potrošnju. To bi dodatno pogodovalo regulativi lokalne potrošnje solarne električne energije.

10.2. Tehnički moguće, tržišno upitno

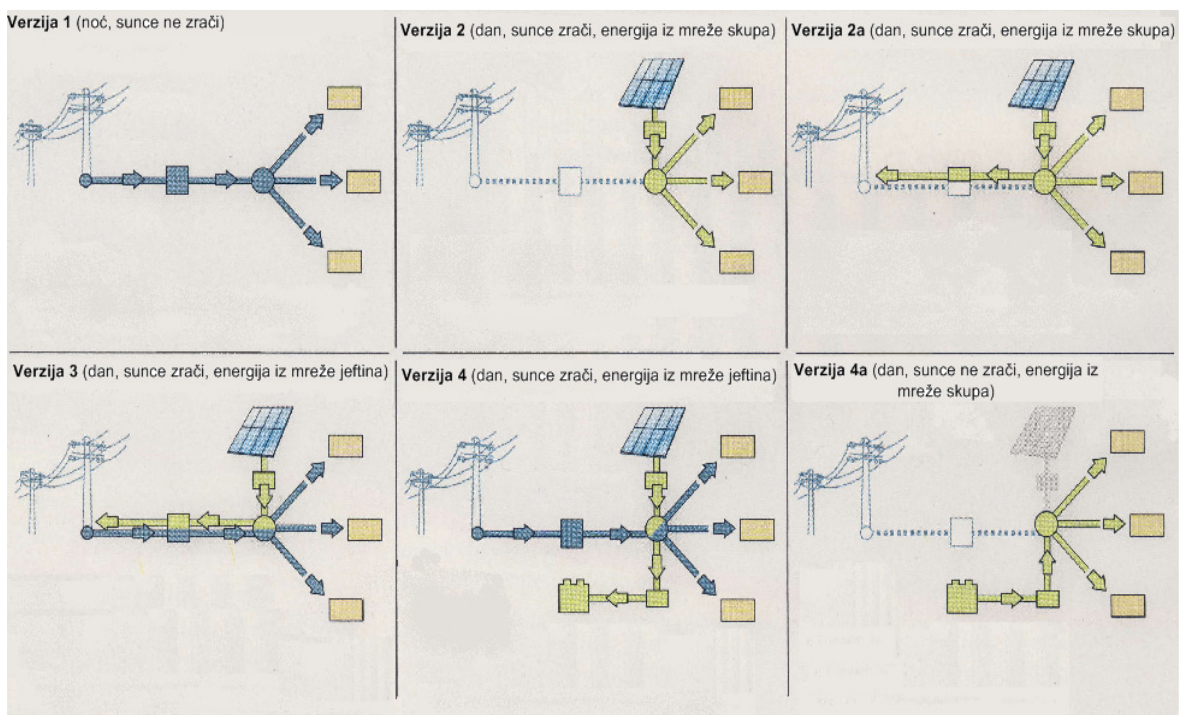
Za lokalnu potrošnju solarne električne energije potrebno je pametno brojilo. Točnije tri uređaja (brojila): prvo brojilo određuje koliko fotonaponski sustav proizvodi električne energije, drugo brojilo registrira potrošnju električne energije u kućanstvu, a treće mjeri koliko se energije daje ili uzima iz mreže (slika 29.).



Slika 29. Optimalno gospodarenje električnom energijom u kućanstvu pomoću inteligentnog brojila

Pametno brojilo šalje izmjerene podatke preko interneta u bazu podataka radi obračuna, što je potrebno radi novog tarifnog sustava koji mijenja cijenu električne energije u intervalima od 15min (poglavlje 10.1.).

Slika 30. prikazuje sve moguće tokove između mreže, fotonaponskog sustava i kućanstava.



Slika 30. Verzije tokova električne energije iz mreže i FN sustava

Dok su FN proizvođači predavali svu električnu energiju u mrežu smatrali su se poduzetnicima i dobivali su povrat poreza. Sa novom regulativom proizvedena električna energija bi se prvo trošilo lokalno, zbog čega vas zakon više ne smatra poduzetnikom, a samim tim više ne dobivate povrat poreza. Stoga taj model (lokalne potrošnje) je financijski upitan ako se ne riješe neka važna zakonska pitanja.

11. Zaključak

U diplomskom radu cilj je bio opisati fotonaponski sustav do 30 kW spojen na elektroenergetsku mrežu, te odrediti procjenu proizvodnje električne energije i isplativost.

Na osnovi proračunatih podataka pomoću PVGIS-a može se zaključiti da je lokacija grada Makarske izrazito povoljna za postavljanje fotonaponskog sustava. Odabir tehničkog rješenja instalacije sustava je individualan, ali nikako rutinski posao. Problem nastaje u visokim početnim troškovima izgradnje, od čega su tri ključne stavke u ukupnim troškovima:

- fotonaponski moduli s udjelom u troškovima od 77.3%,
- izmjenjivač s udjelom u troškovima od 9.97% i
- konstrukcija s udjelom troškova od 4.15%.

Na temelju ukupnih troškova i procjene proizvodnje električne energije vidljiva je isplativost projekta. Stalan pad cijena fotonaponskih modula i sustav poticaja značajno bi trebao povećati interes za ulaganjem u izgradnju fotonaponskih sustava spojenih na mrežu.

Spomenuti sustav do 30kW u paralelnom pogonu sa elektroenergetskom mrežom na mjestu priključka uzrokuje neznatne promjene. Odnosno ne utječe negativno na kvalitetu električne energije i napon mreže.

Proizvodnjom električne energije iz fotonaponskih sustava smanjuje se utjecaj na okoliš, a posebno se smanjuje emisija CO₂. Što je još jedan od razloga za korištenje fotonaponskih sustava.

12. Literatura

- [1] Solarna tehnologija, časopis broj 8, Urednik dr.sc.Ljubomir Majdandžić, dipl.ing
- [2] Kulišić, P., „Sunčane ćelije“, Školska knjiga, Zagreb 1994
- [3] Nacionalni energetska program korištenja Sunčeve energije SUNEN: "Atlas Sunčevog zračenja na području Republike Hrvatske", Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2004.
- [4] „Hrvatski klimatski motriteljski sustav“, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 2005.
- [5] K. Scharmer, J. Greif: The European Solar Radiation Atlas, Vol. 2: Database and exploitation software, Les Presses de l'École des Mines 2000.
- [6] Luka Lugarić, „Mrežni fotonaponski sustavi za kućanstva“ ,diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2007.
- [7] Boris Labudović i suradnici: „Obnovljivi izvori energije“, Energetika marketing, 2002.
- [8] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), <http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/>, kolovoz 2009
- [9] N. Dizdarević, M. Majstorović, S. Žutobradić, „Distribuirana proizvodnja električne energije“,Energija, 52, str. 321-339, listopad 2003.
- [10] Majdandžić, Lj. „ Pilot projekt Solarni krov Špansko – Zagreb“, prosinac 2008.
- [11] Installation Guide, SBTLHCMS-11:SE2406, IME-SB42-50tlhc, kolovoz 2009.
- [12] Photovoltaic system protection, www.saltek.eu/ , kolovoz 2009.
- [13] R. Orlovac, A. Tunjić, „Tehnički uvjeti za priključak mikro sunčanih elektrana na niskonaponsku mreži“ Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijska konferencija, HO CIRED, Šibenik, svibanj 2008.
- [14] I. Pipinić, „Solarni fotonaponski sustav za proizvodnju električne energije: Solarni krov Južni Jadran“, svibanj 2008
- [15] „Razdjelne mreže i distribuirana proizvodnja“, predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2008.

- [16] J. Grašo, M. Cvitanović, A. Čović, „Utjecaj sunčane elektrane „Solarni krov Špansko-Zagreb“ na distribucijsku mrežu“, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijska konferencija, HO CIRED, Šibenik, svibanj 2008.
- [17] D. Škrlec i suradnici, „Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja na elektroenergetsku mrežu – fotonaponska elektrana Benkovačko Selo (950 kW)“, kolovoz 2009.
- [18] Photon International, časopis, listopad 2008.
- [19] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Planning and installing photovoltaic systems, 2008.
- [20] www.bpsolar.com, 1. kolovoza 2009.
- [21] www.hrote.hr, 1. kolovoza 2009.