

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 133

OTOČNI FOTONAPONSKI SUSTAV

Goran Oreški

Zagreb, rujan 2008

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 5. svibnja 2008.

Zavod: **Zavod za visoki napon i energetiku**
Predmet: **Energetska elektrotehnika**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 133

Pristupnik: **Goran Oreški**
Studij: **Elektrotehnika**
Smjer: **Industrijska elektronika**

Zadatak: **Energetske i ekonomske karakteristike samostalnih fotonaponskih sustava**

Opis zadatka:

Iskorištavanje energije Sunčeva zračenja fotonaponskom pretvorbom relativno je male važnosti za ukupnu potrošnju električne energije. Međutim, svojom karakteristikom raspoloživosti, golemim potencijalom i malim štetnim utjecajem na okoliš fotonaponska pretvorba predstavlja veliki potencijal u budućnosti. Značaj i ekonomičnost korištenja Sunčeva zračenja za proizvodnju električne energije znatno je veći kada se radi o samostalnim fotonaponskim primjenama.

Samostalnu fotonaponsku instalaciju određuju posebni zahtjevi za spremanjem električne energije i osiguravanjem odgovarajućih uvjeta za trošila.

Zadatak je u diplomskom radu odrediti konfiguraciju samostalnog fotonaponskog sustava, provesti proračun proizvodnje električne energije tijekom godine te procijeniti ekonomičnost. Za potrebe proračuna potrebno je i predvidjeti zahtjeve trošila.

Zadatak uručen pristupniku: 7. svibnja 2008. u 12:00

Rok za predaju rada: 8. rujna 2008.

Mentor:



Doc. dr. sc. Zdenko Šimić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Neven Mijat

Djelovođa:



Prof. dr. sc. Davor Petrinović

Zahvaljujem mentoru Doc. dr. sc. Zdenku Šimiću za ukazanu podršku i razumijevanje.

Posebno zahvaljujem Zdeslavu Matiću koji je svojim bogatim iskustvom, znanjem i srdačnom stručnom pomoći doprinio izvrsnosti ovog diplomskog rada.

Također zahvaljujem Energetskom institutu Hrvoje Požar na pruženim resursima koji su pisanje ovog rada učinili pravim zadovoljstvom.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji na odricanju i bezrezervnoj potpori u bez koje sve ovo ne bi bilo moguće. Hvala Vam.

Sažetak

U radu je opisan postupak projektiranja i modeliranja otočnog fotonaponskog sustava te su prikazani rezultati simulacije dvaju modela. Prikazan je princip rada i prednosti otočnog fotonaponskog sustava s izmjeničnom sabirnicom te su opisani svi pojedini dijelovi sustava. Cijeli rad zaokružili smo u cjelinu opisom Sunčevog zračenja i pregledom trenutnog stanja tržišta fotonaponske industrije u svijetu, Europi i Hrvatskoj.

SADRŽAJ

POPIS OZNAKA I KRATICA

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

1.	UVOD.....	1
1.1.	Otočni sustavi	1
1.2.	Stanje tržišta	2
1.3.	Proizvodnja u Hrvatskoj	7
1.4.	Instalirani fotonaponski kapaciteti u Europi.....	7
1.5.	Instalirani fotonaponski kapaciteti u Hrvatskoj	8
2.	SUNČEVO ZRAČENJE	10
2.1.	Sunčevo zračenje, ozračenje i ozračenost.....	10
2.2.	Spektar Sunčevog zračenja	11
2.2.	Definicija kutova.....	14
2.3.	Sunčevo zračenje na području Hrvatske.....	15
3.	SUNČANE ĆELIJE I MODULI	17
3.1.	Povijest sunčane ćelije.....	17
3.2.	Princip rada sunčane ćelije	18
3.3.	Aktualan tehnološki status	20
3.3.1.	Kristalične silicijske sunčane ćelije	20
3.3.2.	Tehnologija tankog filma.....	23
3.3.3.	Usporedba sunčanih ćelija.....	24
3.4.	Strujne i naponske karakteristike sunčane ćelije	26
3.5.	Promjena izlaznih parametara sunčane ćelije.....	30
3.6.	Fotonaponski moduli.....	32
3.6.1.	Pojava vrućih točaka.....	33
3.7.	Monokristalični fotonaponski moduli Solaris HT-135	34
4.	AKUMULIRANJE ENERGIJE	35
4.1.	Olovne akumulatorske baterije	35

4.2.	Olovni akumulatori Sonnenschein S12/130 A.....	40
5.	FOTONAPONSKI IZMJENJIVAČI	41
5.1.	Princip rada izmjenjivača	42
5.2.	Izvedbe izmjenjivača.....	45
5.2.1.	Izmjenjivač s niskofrekventnim transformatorom	45
5.2.2.	Izmjenjivač s visokofrekventnim transformatorom	46
5.2.3.	Izmjenjivač bez transformatora	47
5.3.	Fotonaponski izmjenjivač SMA SB 2500	48
6.	BIDIREKCIJSKI USMJERIVAČ	49
6.1.	Upravljanje akumulatorskom bankom	49
6.2.	Upravljanje izmjeničnom sabirnicom.....	51
6.3.	Bidirekcijski usmjerivač SMA Sunny Island SI 4500	54
7.	FOTONAPONSKI OTOČNI SUSTAV S IZMJENIČNOM SABIRNICOM ..	56
7.1.	Projektiranje otočnog fotonaponskog sustava	59
7.2.	Konfiguracija fotonaponskog polja	63
7.3.	Modeliranje otočnog fotonaponskog sustava	66
7.4.	Analiza rezultata simulacije.....	67
7.5.	Ekonomska analiza otočnog fotonaponskog sustava	70
8.	ZAKLJUČAK	73

POPIS OZNAKA I KRATICA

AC	izmjenična struja (engl. <i>alternating current</i>)
AM	optička masa zraka (engl. <i>air mass</i>)
BPT	energetski bipolarni tranzistor (engl. <i>bipolar power transistor</i>)
DC	istosmjerna struja (engl. <i>direct current</i>)
engl.	engleski
EVA	etilen vinil acetat
FN	fotonaponski
GTO	tiristor isklapiv upravljačkom strujom (engl. <i>gate turn-off thyristor</i>)
IEC	međunarodna elektrotehnička komisija (engl. <i>International Electrotechnical Commission</i>)
IGBT	bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom (engl. <i>insulated gate bipolar transistor</i>)
MOSFET	metal-oksidni poluvodički tranzistor s efektom polja (engl. <i>metal oxide semiconductor field effect transistor</i>)
MPP	točka maksimalne snage (engl. <i>maximal power point</i>)
NF	niskofrekventni
NP	niskopropusni
VF	visokofrekventni
SCR	tiristor (engl. <i>silicon controlled rectifier</i>)
SOC	nivo naboja u bateriji (engl. <i>state of charge</i>)
STC	standardni uvjeti testiranja (engl. <i>standard test conditions</i>)
TF	tehnologija tankog filma (engl. <i>thin film</i>)

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Ukupna svjetska proizvodnja sunčanih ćelija od 1999. do 2007. godine (Izvor:[1])	2
Slika 1.2. Udio pojedinih tehnologija sunčanih ćelija (Izvor: [1])	3
Slika 1.3. Deset najvećih svjetskih proizvođača kristaličnih ćelija u 2007. godini (Izvor:[1])	4
Slika 1.4. Deset najvećih svjetskih proizvođača modula u tehnologiji tankog filma u 2007. godini (Izvor: [1]).....	5
Slika 1.5. Udio pojedinih zemalja u ukupnoj proizvodnji sunčanih ćelija u 2007. godini (Izvor: [2])	6
Slika 1.6. Svjetski proizvodni kapaciteti u 2006 i 2007 godini te planirani porast kapaciteta proizvodnje ovisno o tehnologiji (Izvor: [2]).....	6
Slika 1.7. Instalirani fotonaponski kapaciteti u zemljama EU (Izvor: [3])	9
Slika 2.1. Vrste Sunčevog zračenja (Izvor: [9])	11
Slika 2.2. Optička masa zraka (Izvor: [5])	12
Slika 2.3. Spektar zračenja AM0 i AM1,5 i spektar zračenja crnog tijela temperature 5800 K normaliziran na 1367 W/m^2 s utjecajem atmosferskih plinova (Izvor: [5])	13
Slika 2.4. Spektralna osjetljivost različitih tipova sunčanih ćelija (Izvor: [9])	13
Slika 2.5. Definicija kutova za računanje zračenja na nagnutu plohu (Izvor: [9])	14
Slika 2.6. Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske (Izvor: [5])	15
Slika 3.1. Razvoj sunčanih ćelija (Izvor: [6]).....	18
Slika 3.2. Dizajn i princip rada kristalične sunčane ćelije (Izvor:[9]).....	19
Slika 3.3. Tipična komercijalna monokristalična silicijska sunčana ćelija.....	19
Slika 3.4. Vrste sunčanih ćelija (Izvor: [9])	20
Slika 3.5. Proces izrade kristaličnih ćelija (Izvor: [9])	21
Slika 3.6. Sastav kristaličnog fotonaponskog modula (Izvor: [9]).....	22
Slika 3.7. Nadomjesna shema sunčane ćelije (Izvor: [9])	26
Slika 3.8. U-I karakteristika sunčane ćelije (Izvor: [9])	27

Slika 3.9. Faktor punjenja (Izvor: [9])	28
Slika 3.10. Određivanje U-I karakteristike sunčane ćelije (Izvor: [9])	29
Slika 3.11. Utjecaj temperature na napon otvorenog kruga U_{ok} i struju kratkog spoja I_{ks} (Izvor: [9])	30
Slika 3.12. Utjecaj ozračenja na napon otvorenog kruga i struju kratkog spoja (Izvor: [9])	31
Slika 3.13. U-I karakteristika fotonaponskog polja ovisno o broju serijski i paralelno spojenih modula (Izvor: [9]).....	32
Slika 3.14. Paralelni spoj diode premosnice (Izvor: [9])	33
Slika 3.15. Utjecaj zasjenjenja na U-I karakteristiku modula (Izvor: [9])	33
Slika 4.1. Broj ciklusa olovne baterije ovisno o dubini ispražnjenosti (Izvor: [15])	36
Slika 4.2. Građa olovne akumulatorske baterije s elektrolitom u obliku gela (Izvor: [9])	37
Slika 4.4. Napon baterijske ćelije ovisno o punjenju ili pražnjenju baterije konstantnom strujom (Izvor: [9])	39
Slika 5.1. Priključak fotonaponskog polja i izmjenjivača na elektroenergetsku mrežu (Izvor: [9])	41
Slika 5.2. Shema spoja mosta izmjenjivača (Izvor: [9]).....	42
Slika 5.3. Unipolarna širinska modulacija impulsa (Izvor: [17]):	44
Slika 5.4. Shematski prikaz izmjenjivača s niskofrekventnim transformatorom (Izvor:[18])	45
Slika 5.5. Shematski prikaz izmjenjivača s visokofrekventnim transformatorom (Izvor:[16])	46
Slika 5.6. Shematski prikaz izmjenjivača bez transformatora (Izvor: [18]).....	47
Slika 6.1. Status baterije i režim punjenja (Izvor: [20])	50
Slika 6.2. Ovisnost frekvencije o omjeru radne snage izvora napajanja i snage trošila (Izvor: [20])	52
Slika 6.3. Ovisnost napona o omjeru jalove snage izvora napajanja i snage trošila (Izvor: [20])	52
Slika 6.4. Upravljanje snagom promjenom frekvencije elektroenergetske mreže (Izvor:[20])	53
Slika 7.1. Otočni sustav s izmjeničnom sabirnicom (Izvor: [14])	56
Slika 7.2. Fotonaponsko polje snage 2970 Wp, (Izvor: [Graditeljska škola Čakovec]) ..	57

Slika 7.3 Bidirekcijski usmjerivač SI 4500 (žuto), izmjenjivač SB 2500 (crveno), akumulatorska banka (donji lijevi ugao), (Izvor: [Graditeljska škola Čakovec])	58
Slika 7.4. Dijagram srednje dnevne potrošnje električne energije(Izvor: [Graditeljska škola Čakovec]).....	60
Slika 7.5. Odabir lokacije, tipa modula, veličine i orijentacije fotonaponskog polja.....	64
Slika 7.6. Odabir izmjenjivača, broj izmjenjivača i konfiguracije fotonaponskog polja ...	65
Slika 7.7. Srednja dnevna ozračenost vodoravne plohe (Izvor: [5]).....	66
Slika 7.8. Topologija modela sustava.....	67
Slika 7.9. Rezultati simulacije modela s fotonaponskim poljem snage 3 kWp.....	68
Slika 7.10. Rezultati simulacije modela s fotonaponskim poljem snage 5 kWp.....	69
Slika 7.11. Usporedba troškova investicije izgradnje fotonaponskog elektroenergetskog sustava za pojedine snage u ovisnosti o udaljenosti od elektroenergetske mreže (Izvor: [21]).....	71
Slika 7.12. Ekonomska analiza dizel generatora i fotonaponskog hibridnog sustava (Izvor: [21]).....	71

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Srednja dnevna ozračenost vodoravne plohe i srednja mjesečna temperatura zraka u Varaždinu (Izvor: [5])	16
Tablica 3.1. Maksimalne učinkovitosti sunčanih ćelija (Izvor: [9])	25
Tablica 3.2. Električne karakteristike fotonaponskog modula HT-135 (Izvor: [13])	34
Tablica 4.1. Ovisnost kapaciteta baterije S12/130 A o brzini pražnjenja (Izvor: [15])	40
Tablica 5.1. Tehničke karakteristike SB 2500 (Izvor: [18])	48
Tablica 6.1. Tehničke karakteristike Sunny Island 4500 (Izvor: [18, 19])	54
Tablica 7.1. Prosječna dnevna potrošnja	59

1. UVOD

1.1. Otočni sustavi

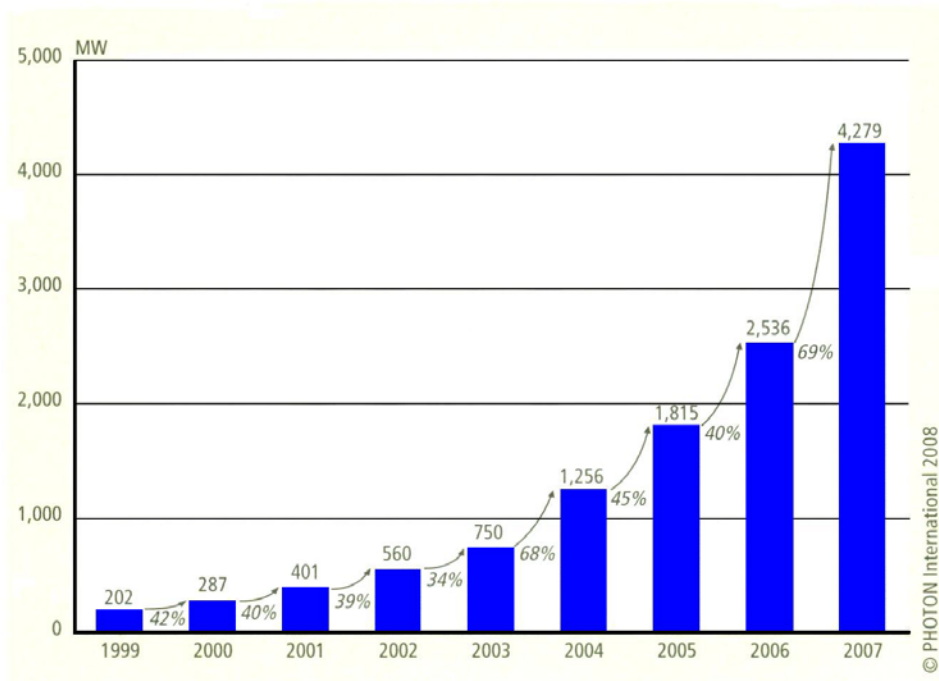
Osnovno svojstvo otočnog sustava je sposobnost uspostavljanja i regulacije elektroenergetske mreže odgovarajućeg napona i frekvencije, 230 V kod jednofaznih ili 400 V kod trofaznih sustava. Dvije su važne primjene otočnih sustava: osiguravanje napajanja u područjima ili objektima bez pristupa na javnu elektroenergetsku mrežu i osiguravanje besprekidnog napajanja u umreženim sustavima u slučaju ispada s mreže.

U svijetu živi preko dvije milijarde ljudi koji još uvijek nemaju pristup električnoj energiji. Najčešće se radi o malim naseljima s malim brojem stanovnika i malom gustoćom naseljenosti. Često se radi i o teškom i nepristupačnom terenu s slabo razvijenom infrastrukturom. Zbog malog broja stanovništva očekivana potrošnja električne energije je niska, troškovi izgradnje i održavanja elektroenergetske mreže su visoki te je isplativost cijelog projekta niska. U takvim situacijama otočni energetske sustavi mogu biti optimalno rješenje. Otočni sustavi omogućuju gospodarski razvoj izoliranih područja i podizanje kvalitete života. U Hrvatskoj je primjena otočnih fotonaponskih (FN) sustava posebno zanimljiva na otocima ili planinarskim domovima odnosno područjima koja obiluju Sunčevim zračenjem, a troškovi izgradnje elektroenergetske mreže su visoki.

Zbog još uvijek visoke cijene baterija i njihovog relativnog kratkog radnog vijeka najčešće se koriste hibridni sustavi kombiniranjem obnovljivih izvora i dizel generatora. Očekuje se pad cijena trenutno vrlo skupih litij-ionskih baterija i njihova šira upotreba u fotonaponskim sustavima. Također radi se na razvoju gorivih ćelija i njihove primjene u fotonaponskim sustavima kao spremnicima energije. U skladu s navedenim razlozima, sve višim cijenama nafte i potrebom smanjenja emisije CO₂ korištenje isključivo fotonaponskih otočnih sustava ubrzo će biti zanimljivije.

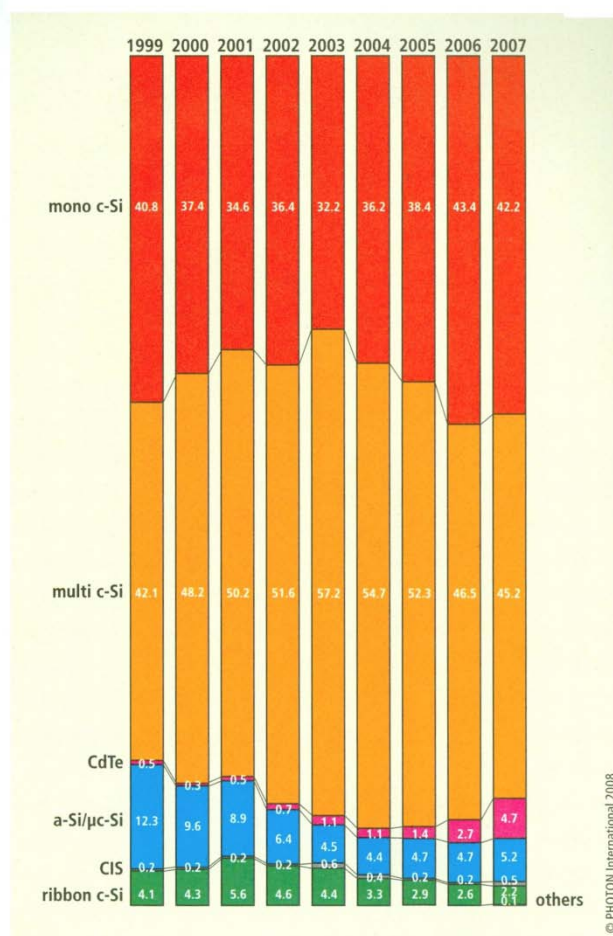
1.2. Stanje tržišta

Fotonaponska industrija se u posljednjih deset godina uspjela preobraziti u snažan sektor danas vrijedan više od 55 milijardi eura godišnje. U 2007. godini fotonaponska industrija nastavila je s impresivnim rastom od 69% na godišnjoj razini isporučivši 4279 MWp sunčanih ćelija (Slika 1.1). Od 2003. godine ukupna proizvodnja raste prosječnom stopom od gotovo 56%, dok je u tehnologiji tankog filma (eng. *thin film, TF*) zabilježen rast od 80% s ukupnom proizvodnjom od oko 450 MWp u 2007. godini. U 2008. godini predviđa se ukupna proizvodnja od oko 6000 MWp. Masivnim ulaganjem u povećanje proizvodnih kapaciteta očekuje se da će do 2011. godine ukupni proizvodni kapaciteti premašiti 20 GW [1, 2].



Slika 1.1. Ukupna svjetska proizvodnja sunčanih ćelija od 1999. do 2007. godine
(Izvor: [1])

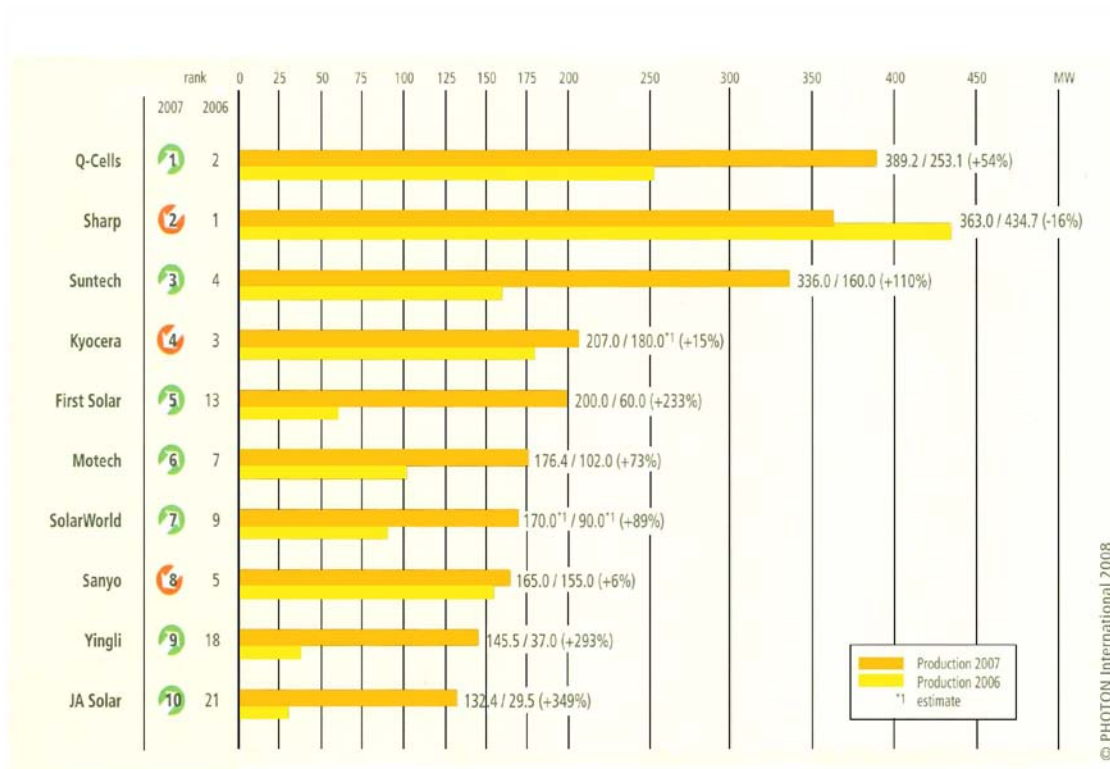
Tehnološka razina fotonaponskog modula je visoka tako da većina proizvođača daje jamstvo duže od 20 godina. Sve više cijene energije iz konvencionalnih izvora čine fotonaponske sustave konkurentnijim. U ukupnoj proizvodnji sunčanih ćelija kristalične ćelije danas zauzimaju oko 90% tržišta (Slika 1.2). Nedostatak osnovne sirovine za proizvodnju kristaličnog silicija i napredak tehnološke razine sunčanih ćelija u tehnologiji tankog filma značajno je privuklo ulaganja u tehnologiju tankog filma (amorfni silicij, CdTe, CIS). Elektrokemijske ćelije su dosegle nivo razvoja na kojem počinju biti tržišno konkurentne i spremne za ulazak na tržište.



Slika 1.2. Udio pojedinih tehnologija sunčanih ćelija (Izvor: [1])

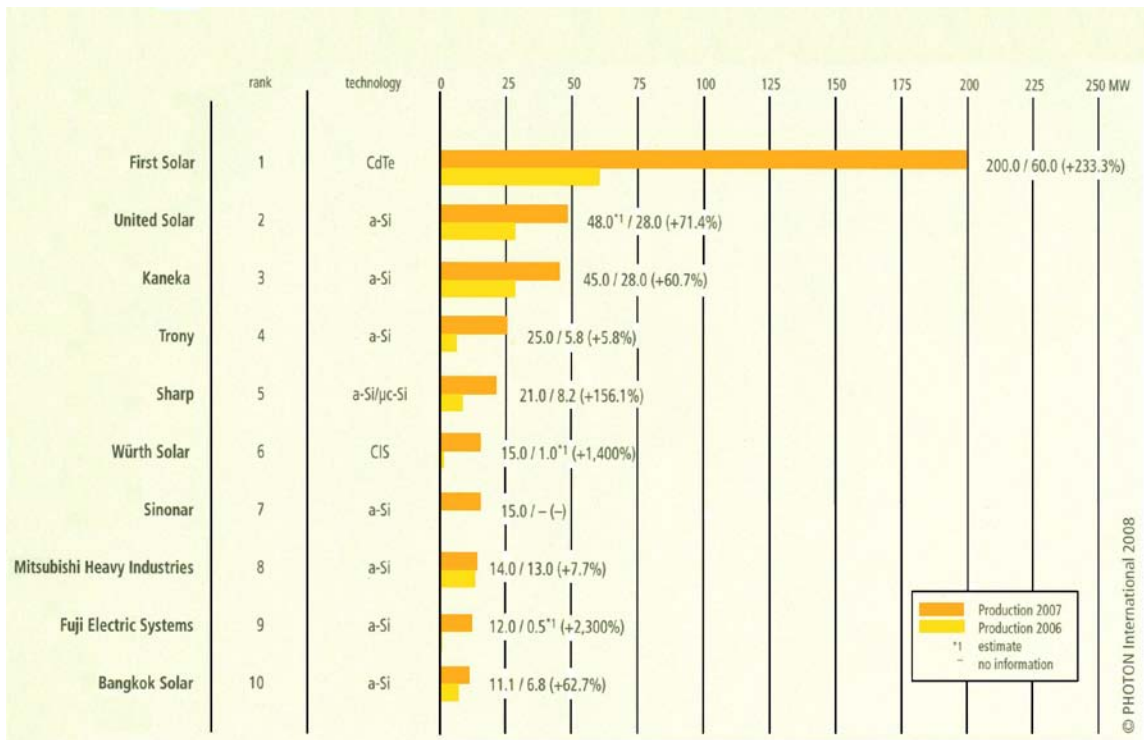
Usprkos nestašici silicija kristalinična tehnologija zabilježila je jak rast u 2007. godini. Najjeftinija tehnologija CdTe bilježi konstantni rast, dok amorfni silicij gubi svoj tržišni udio.

Najveći proizvođači kristaliničnih ćelija trenutno su Q-Cells, Sharp i Suntech (Slika 1.3).

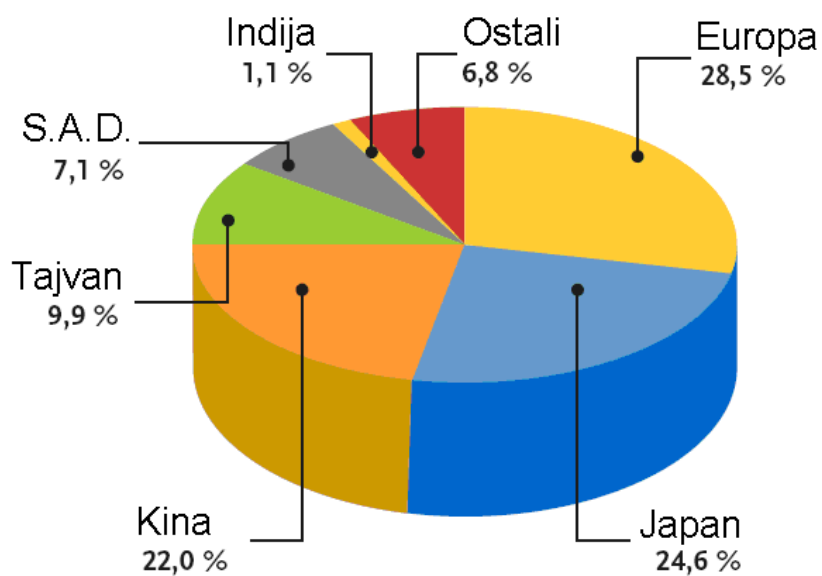


Slika 1.3. Deset najvećih svjetskih proizvođača kristaliničnih ćelija u 2007. godini
(Izvor: [1])

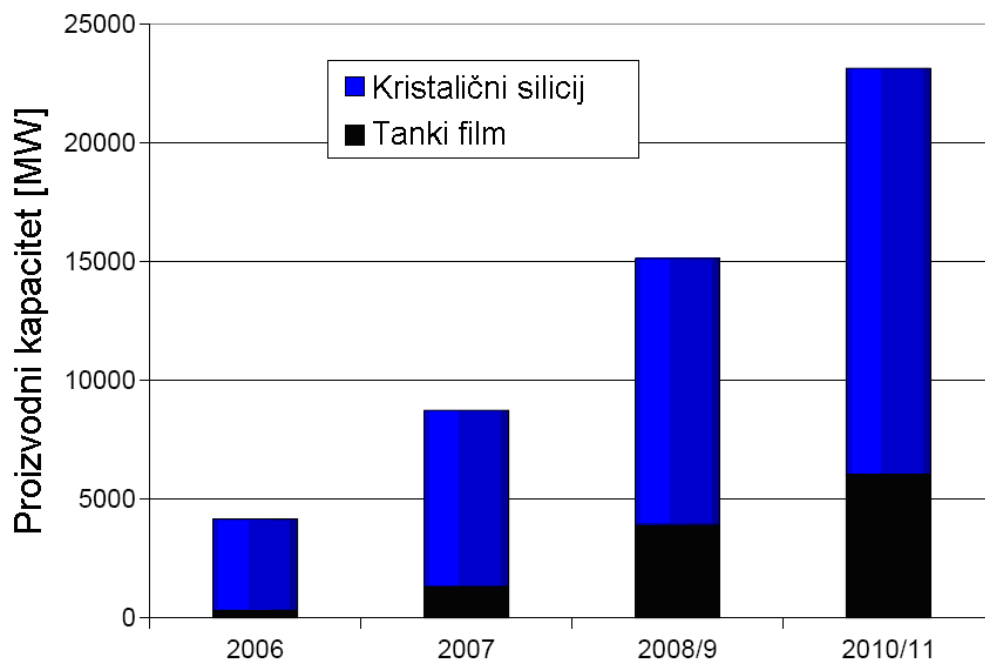
Najveći proizvođači modula u tehnologiji tankog filma su First Solar, United Solar i Kaneka (Slika 1.4).



Slika 1.4. Deset najvećih svjetskih proizvođača modula u tehnologiji tankog filma u 2007. godini (Izvor: [1])



Slika 1.5. Udio pojedinih zemalja u ukupnoj proizvodnji sunčanih ćelija u 2007. godini (Izvor: [2])



Slika 1.6. Svjetski proizvodni kapaciteti u 2006 i 2007 godini te planirani porast kapaciteta proizvodnje ovisno o tehnologiji (Izvor: [2])

1.3. Proizvodnja u Hrvatskoj

U Novigradu je 1999. godine počela s radom tvornica Solaris d.o.o. koja kristalične ćelije inkapsulira u fotonaponske module. U 2007. godini proizvodnja tvornice je bila 9 MW. U 2008. godini tvornica planira dosegnuti godišnji proizvodni kapacitet od 55 MW.

Rade Končar je u Splitu 1987. godine pokrenuo proizvodnju fotonaponskih modula u tehnologiji amornog silicija učinkovitosti 4-5%. Proizvodni kapacitet iznosi 0,8 MW godišnje. Tvornica od 2001. godine posluje pod nazivom Solarne ćelije d.o.o.

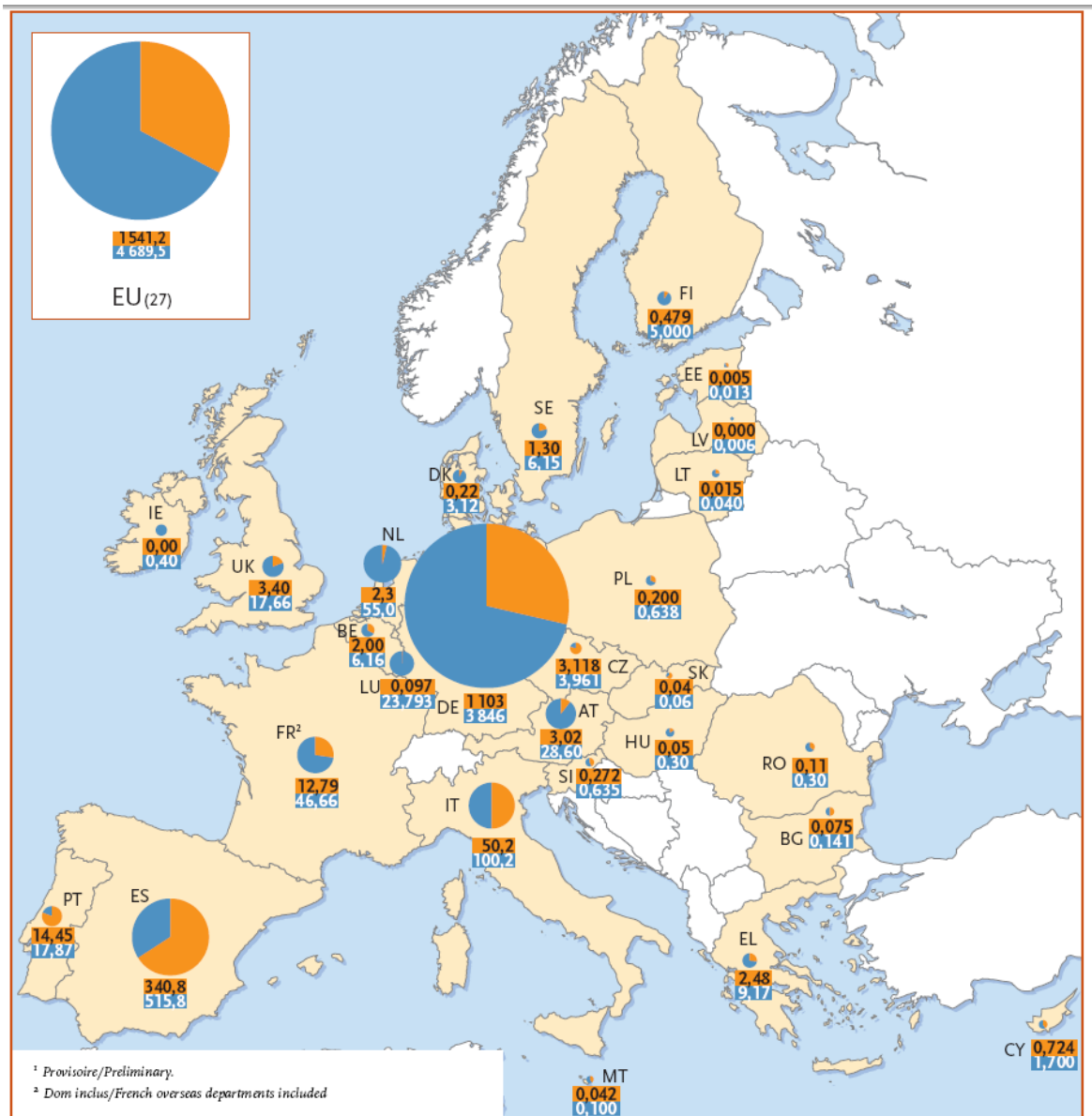
Krajem 2008. godine tvrtka Solvis d.o.o. počinje proizvodnju fotonaponskih modula u tehnologiji kristaličnog silicija u Varaždinu. Kapacitet tvornice je 20 MW godišnje.

1.4. Instalirani fotonaponski kapaciteti u Europi

Prema procijeni EurObserv'ER-a (Slika 1.7) u 2007. godini je u Europskoj Uniji instalirano novih 1541,2 MWp (rast od 57% u odnosu na 2006. godinu) fotonaponskih sustava, povećavši kapacitet ukupno instaliranih fotonaponskih sustava u EU na 4689,5 MWp. Od ukupno 1541,2 MWp novoinstaliranih kapaciteta 99,5% fotonaponskih sustava je vezano na elektroenergetsku mrežu dok je 0,5% odnosno 8,4 MWp u otočnom režimu rada. S instaliranih 1103,0 MWp u 2007. godini Njemačka je zadržala poziciju vodećeg svjetskog tržišta fotonaponskih industrije. Španjolska je s 340,8 MWp instaliranih u 2007. godini postala drugo najveće svjetsko tržište. Slijedi ih Italija s 50,2 MWp.

1.5. Instalirani fotonaponski kapaciteti u Hrvatskoj

U Hrvatskoj je do sad instalirano pet fotonaponskih sustava ukupne snage 59 kWp. U Zagrebu su instalirana dva fotonaponskih sustava, jedan je mrežno vezan na lokaciji Špansko snage 7,14 kWp, dok je drugi u otočnom režimu rada na lokaciji Žitnjak snage 36,1 kWp. U Čakovcu su također instalirana dva fotonaponskih sustava, jedan je mrežno vezan instaliran na krovu obiteljske kuće snage 6,72 kWp, dok je drugi mrežno vezan s mogućnošću otočnog rada snage 2,9 kWp instaliran u Graditeljskoj školi Čakovec u sklopu projekta Revetis [<http://www.revetis.hr>]. Posljednji mrežno vezani fotonaponskih sustav snage 6,12 kWp instaliran je na krovu obiteljske kuće u Drnišu [4].



Slika 1.7. Instalirani fotonaponski kapaciteti u zemljama EU (Izvor: [3])

2. SUNČEVO ZRAČENJE

2.1. Sunčevo zračenje, ozračenje i ozračenost

Ozračenje (iradijancija) je gustoća energetskog toka Sunčevog zračenja i jednaka je omjeru energetskog toka Sunčevog zračenja i površine plohe okomite na smjer tog zračenja. Jedinica za ozračenje je vat po četvornom metru (W/m^2).

Ozračenost (iradijacija) je gustoća dozračene energije koja u promatranom vremenu upadne na jediničnu površinu plohe. Dobiva se integriranjem ozračenja po vremenu, a jedinica za ozračenost je vat sat po četvornom metru (Wh/m^2). Ovisno o promatranom vremenskom intervalu ozračenost se često naziva satna, dnevna, mjesečna ili godišnja suma zračenja.

Na putu kroz atmosferu Sunčevo zračenje slabi jer se apsorbira¹ zbog interakcije s plinovima i vodenom parom i raspršuje na molekulama plinova i česticama prašine. Zbog toga Sunčevo zračenje do tla dopijeva kao izravno i kao raspršeno zračenje.

Izravno (direktno) Sunčevo zračenje dolazi izravno iz prividnog smjera Sunca.

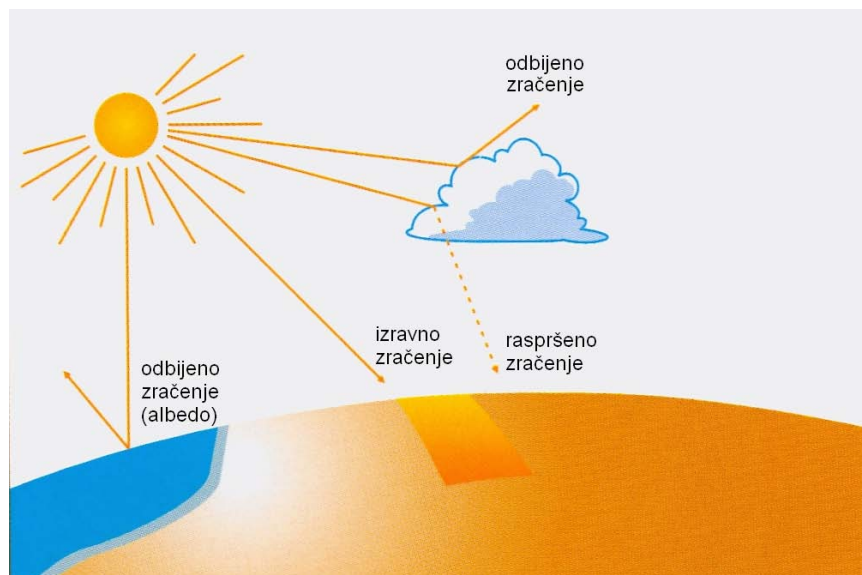
Raspršeno (difuzno) Sunčevo zračenje nastaje raspršenjem Sunčevog zračenja u atmosferi i do tla dopire iz svih smjerova neba.

Ukupno (globalno) Sunčevo zračenje na vodoravnoj plohi sastoji se od izravnog i raspršenog Sunčevog zračenja. Nagnuta ploha osim izravnog i raspršenog zračenja prima i od tla odbijeno Sunčevo zračenje.

Odbijeno (reflektirano) Sunčevo zračenje je dio Sunčevog zračenja koji se odbije od tla ili vodenih površina.

Ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu sastoji se od izravnog, raspršenog i od tla odbijenog zračenja [5].

¹ apsorpcija – međusobno međudjelovanje elektromagnetskog zračenja i tvari pri čemu tvar upija zračenje

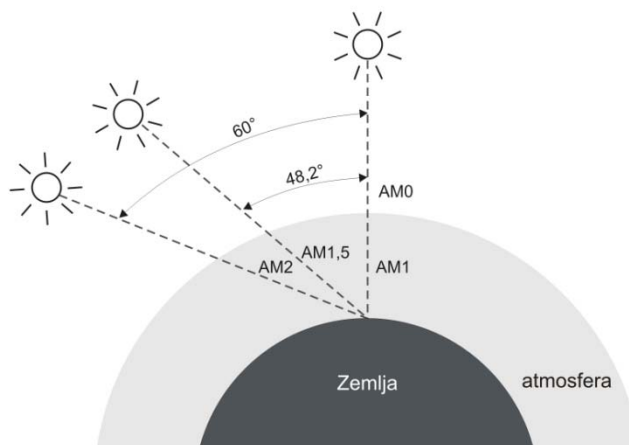


Slika 2.1. Vrste Sunčevog zračenja (Izvor: [9])

2.2 Spektar Sunčevog zračenja

Snaga zračenja koje Sunce zrači sa svoje površine iznosi oko $9,5 \cdot 10^{25}$ W, od čega na Zemlju upada oko $1,7 \cdot 10^{17}$ W. Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu naziva se ekstraterestričko zračenje. Ekstraterestričko ozračenje za srednju udaljenost Zemlje od Sunca iznosi $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ i naziva se **Sunčeva (solarna) konstanta**. Prolaskom kroz Zemljinu atmosferu Sunčevo zračenje slabi pa tako za vedrih ljetnih dana u Srednjoj Europi ozračenje iznosi od 800 do 1000 W/m^2 dok za oblačnog vremena može pasti i ispod 100 W/m^2 . Za vrijeme vedrih dana direktno zračenje čini oko 90% ukupnog zračenja dok je za oblačnog vremena ukupno zračenje 100% difuzno. Što je optička masa zraka veća slabljenje Sunčevog zračenja prolaskom kroz atmosferu je veće. Optička masa zraka m definira se kao omjer stvarne duljine puta Sunčevih zraka na putu kroz atmosferu i najkraćeg mogućeg puta.

$$m = \frac{1}{\cos \vartheta_z} \quad (1)$$

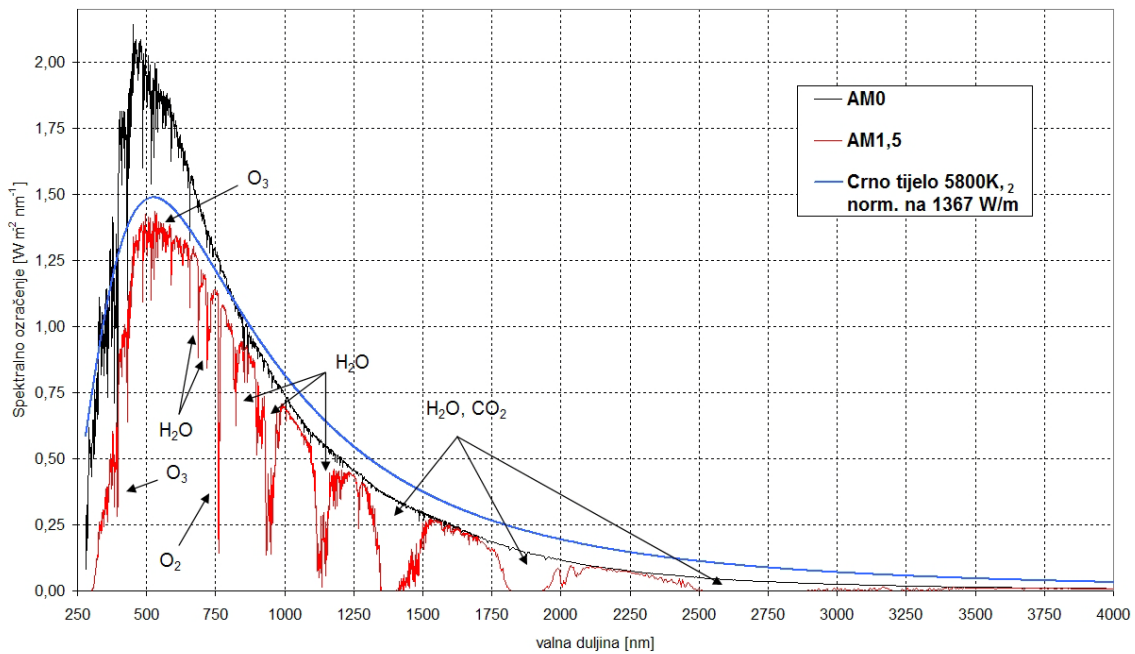


Slika 2.2. Optička masa zraka (Izvor: [5])

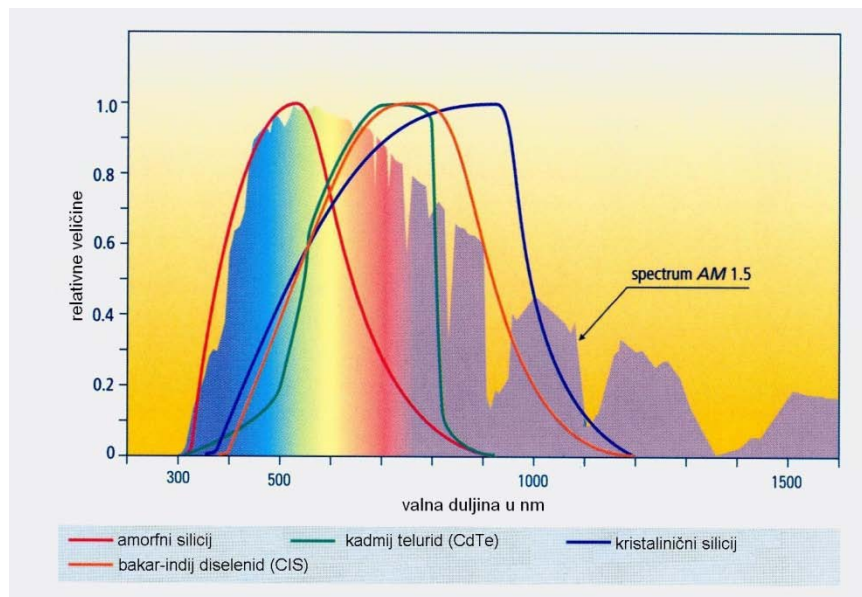
Za ekstraterističko zračenje vrijedi da je $m = 0$ i to označavamo kao AM0 (engl. *Air Mass*, AM). Na području Europe kao referentnu vrijednost uzimamo da je $m = 1,5$ i označavamo kao AM1,5.

Sunčevo zračenje sastoji se od ultraljubičastog, vidljivog i infracrvenog dijela. Ultraljubičasti dio nosi oko 9 posto, vidljivi oko 41,5 posto i infracrveni oko 49,5 posto ukupne energije Sunčevog zračenja.

Ovisno o materijalu i tehnologiji izrade sunčane ćelije imaju različite spektralne osjetljivosti (Slika 2.4).



Slika 2.3. Spektar zračenja AM0 i AM1,5 i spektar zračenja crnog tijela temperature 5800 K normaliziran na 1367 W/m² s utjecajem atmosferskih plinova (Izvor: [5])



Slika 2.4. Spektralna osjetljivost različitih tipova sunčanih ćelija (Izvor: [9])

2.2. Definicija kutova

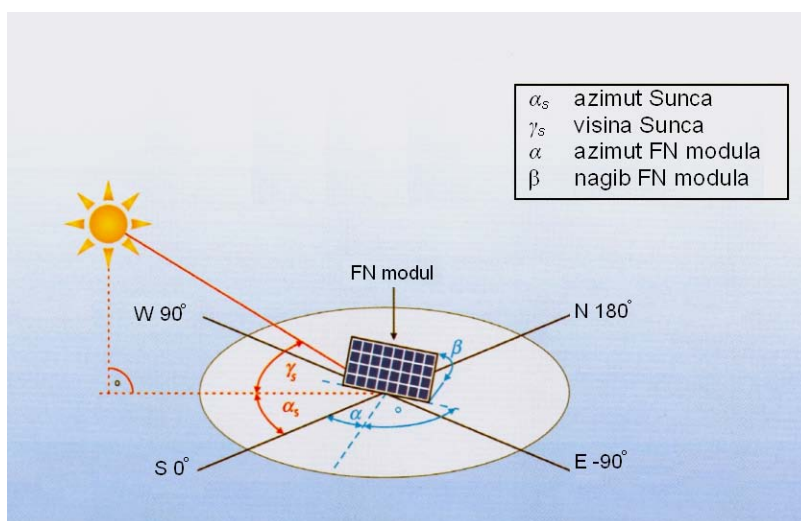
Kako bi mogli proračunati ozračenost ploha pod nagibom potrebno je definirati međusobni geometrijski odnos nagnute plohe i Sunca.

Azimet² Sunca α_s je kut između projekcije Sunčeve zrake na vodoravnu plohu i smjera sjever-jug u vodoravnoj ravnini (slika 2.5).

Visina Sunca γ_s je kut između središta Sunčevog diska i vodoravne ravnine (slika 2.5).

Azimet nagnute plohe α je kut između projekcije okomice na nagnutu plohu i smjera sjever-jug u vodoravnoj ravnini (slika 2.5)

Nagib nagnute plohe β je kut između ravnine nagnute plohe i vodoravne ravnine (slika 2.5).

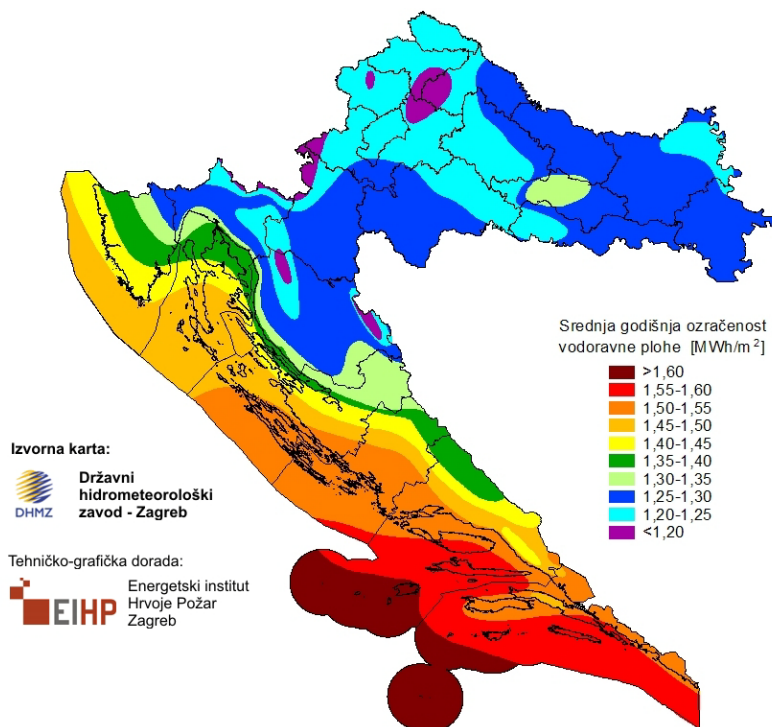


Slika 2.5. Definicija kutova za računanje zračenja na nagnutu plohu (Izvor: [9])

² azimet – vodoravna kutna udaljenost od utvrđenog smjera do položaja objekta na nebu

2.3. Sunčevo zračenje na području Hrvatske

Hrvatska zahvaljujući svojem geografskom položaju ima vrlo povoljne uvjete za iskorištavanje Sunčeve energije. U južnom dijelu Hrvatske godišnja proizvodnja klasičnog fotonaponskog sustava iznosi od 1100 do 1330 kWh po instaliranom kWp snage, dok u kontinentalnom dijelu Hrvatske ona iznosi od 1000 do 1100 kWh po instaliranom kWp snage. Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske prikazana je na slici 2.6.



Slika 2.6. Srednja godišnja ozračenost vodoravne plohe ukupnim Sunčevim zračenjem na području Republike Hrvatske (Izvor: [5])

Da bi mogli predvidjeti količinu dobivene električne energije iz fotonaponskog sustava za određeno vremensko razdoblje najbitnije je poznavati iznos srednjeg mjesečnog ukupnog zračenja koje upada na vodoravnu plohu te srednju temperaturu zraka. Najčešće se te vrijednosti daju kao srednje vrijednosti za pojedini mjesec u godini. Specijalizirani softverski alati pomoću tih

podataka predviđaju količinu dobivene električne energije iz fotonaponskih modula postavljenih pod proizvoljnim nagibom. Za konkretnu lokaciju razmatranu u ovom radu u Čakovcu nema podataka za ukupno Sunčevo zračenje pa se koriste podaci najbliže lokacije, Varaždina (Tablica 2.1).

Tablica 2.1. Srednja dnevna ozračenost vodoravne plohe i srednja mjesečna temperatura zraka u Varaždinu (Izvor: [5])

Lokacija:	Varaždin	
Zemljopisna širina [N]:	46° 18'	
Zemljopisna dužina [E]:	16° 23'	
Nadmorska visina[m]:	167	

Mjesec	Srednja dnevna ozračenost vodoravne plohe [kWh/m ²]	Srednja mjesečna temperatura zraka [°C]
siječanj	1,10	-1,3
veljača	1,86	1,3
ožujak	3,06	5,4
travanj	4,30	10,3
svibanj	5,18	15,1
lipanj	5,68	18,3
srpanj	5,71	19,8
kolovoz	4,94	18,9
rujan	3,88	15,3
listopad	2,38	10,1
studeni	1,24	4,9
prosinac	0,85	0,5
prosječno	3,36	9,9
Σ [MWh/m²]	1,22	-

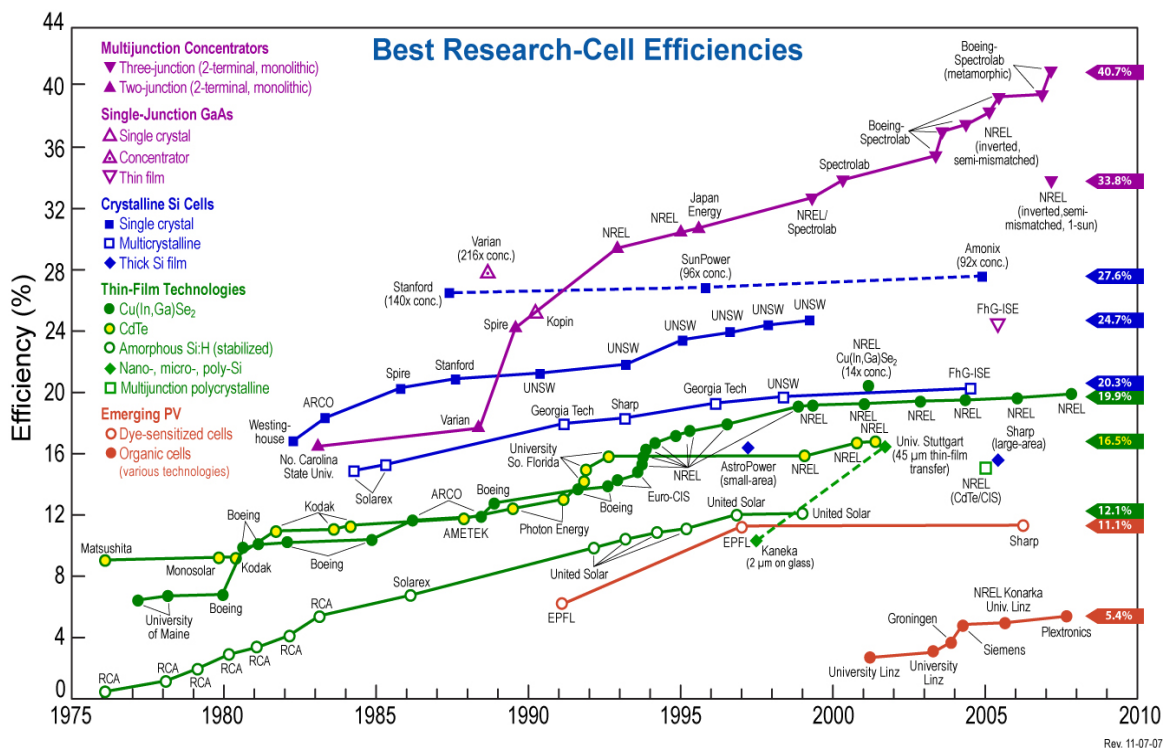
3. SUNČANE ĆELIJE I MODULI

3.1. Povijest sunčane ćelije

Fizikalnu pojavu pretvorbe energije svjetlosti u električnu energiju – fotonaponski efekt, otkrio je 1839. godine Francuski fizičar Alexandre Edmond Becquerel kada je eksperimentirajući sa metalnim elektrodama i elektrolitom zapazio da vodljivost elektrolita raste s porastom osvijetljenosti. 1873. godine Willoughby Smith otkrio je fotonaponski efekt u seleniju, dok je 1876. godine William G. Adams otkrio da se na spoju selenija i platine odvija fotonaponski efekt. Ta dva otkrića bila su temelj za izradu prve sunčane ćelije na bazi selenija 1877. godine.

Fotonaponski efekt teoretski je opisao Albert Einstein 1904. godine za što je dobio Nobelovu nagradu 1921. godine. 1916. godine Einsteinovu teoriju eksperimentalno je potvrdio Robert Millikan.

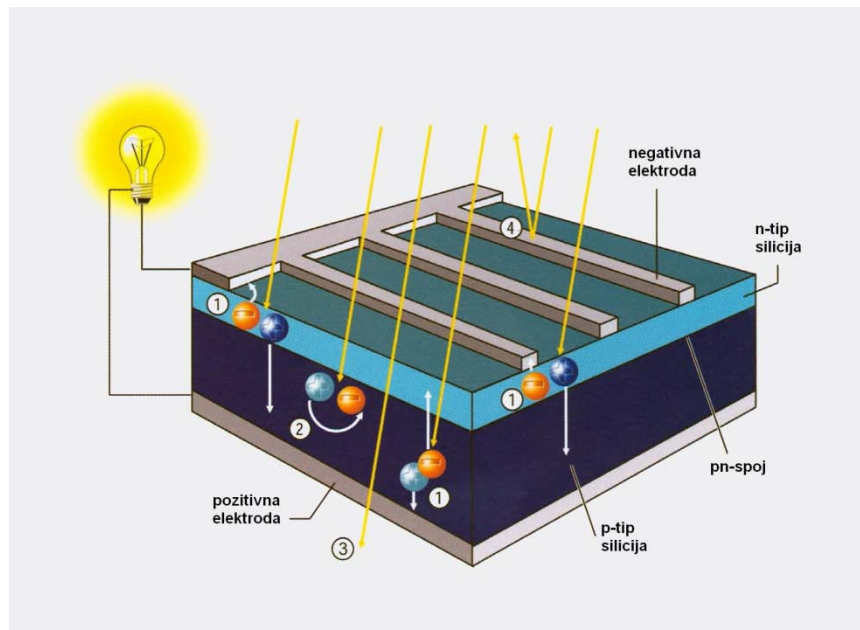
Poljski znanstvenik Jan Czochralski 1918. godine otkrio je metodu dobivanja monokristaličnog silicija što je omogućilo proizvodnju monokristaličnih silicijskih sunčanih ćelija. Daryl Chapin, Calvin Fuller i Gerald Pearson u Bell Telephone Laboratories 1954. godine razvili su silicijsku ćeliju učinkovitosti 4%. Kasnijim razvojem povećala se učinkovitost ćelija (Slika 3.1) te su razvijene nove tehnologije i materijali.



Slika 3.1. Razvoj sunčanih ćelija (Izvor: [6])

3.2. Princip rada sunčane ćelije

Izlaganjem sunčane ćelije Sunčevom zračenju dolazi do direktne pretvorbe energije svjetlosti u električnu energiju. Energija fotona apsorbira se u elektronima i ako je apsorbirana energija veća od širine zabranjenog pojasa stvaraju se parovi elektron-šupljina. Pomoću električnog polja slobodni elektroni migriraju u n -područje, a šupljine u p -područje. Posljedica ovog procesa je pojava razlike potencijala između krajeva poluvodiča, odnosno sunčane ćelije (Slika 3.2).



Slika 3.2. Dizajn i princip rada kristalične sunčane ćelije (Izvor:[9])

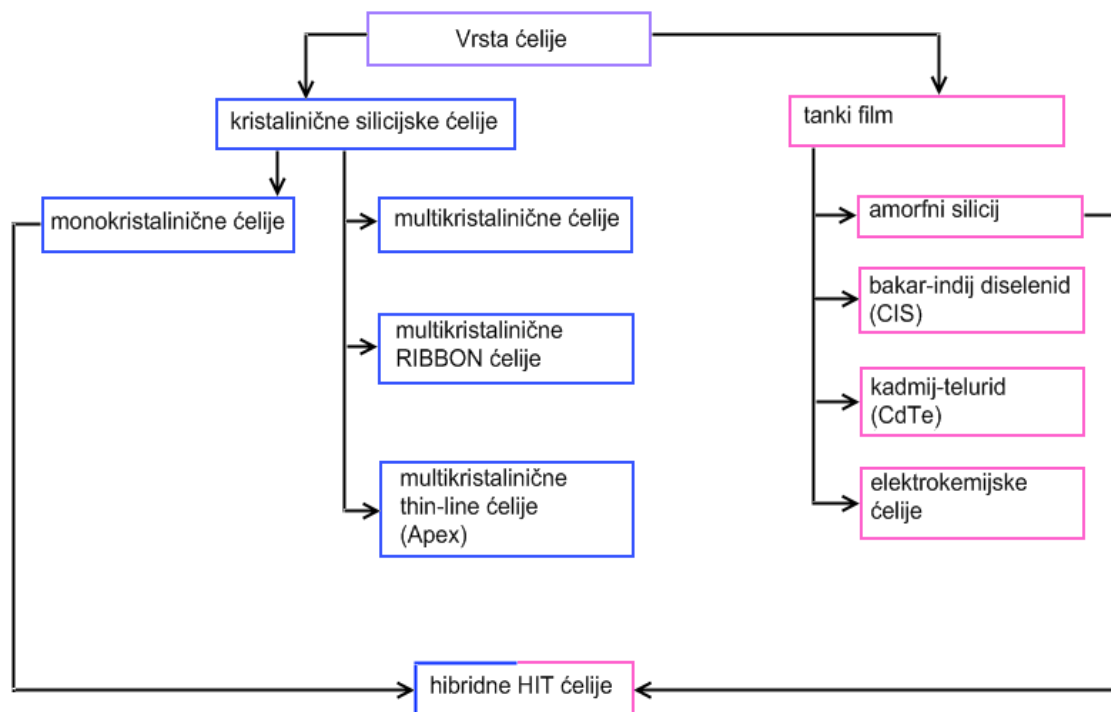
- 1 - stvaranje parova elektron-šupljina, 2 - rekombinacija, 3 - neiskorištena energija fotona, 4 - refleksija i zasjenjenje uzrokovano prednjim kontaktima



Slika 3.3. Tipična komercijalna monokristalična silicijska sunčana ćelija

3.3. Aktualan tehnološki status

Sunčane ćelije danas se izrađuju u dvije osnovne tehnologije, u tehnologiji kristaličnog silicija ili u tehnologiji tankog filma (Slika 3.4).

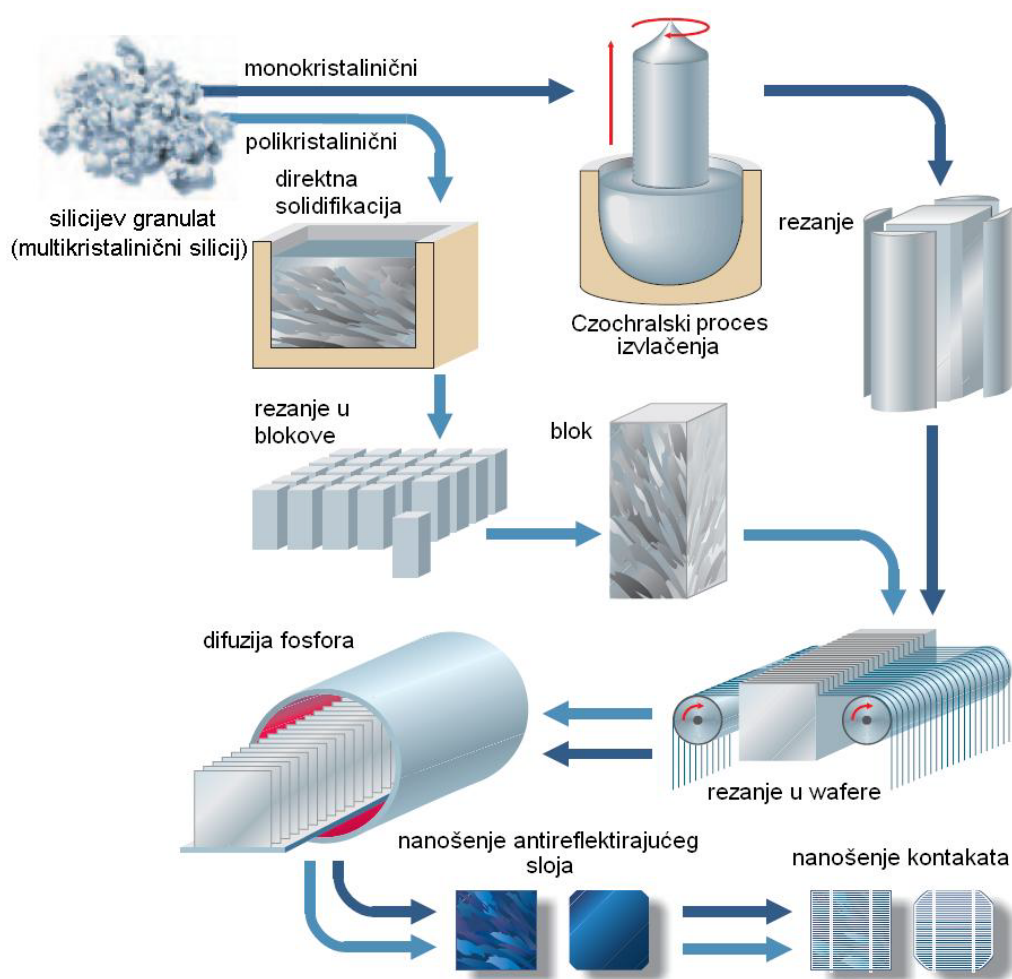


Slika 3.4. Vrste sunčanih ćelija (Izvor: [9])

3.3.1. Kristalične silicijske sunčane ćelije

Bazni materijal u izradi kristaličnih ćelija je silicij. Silicij je drugi najzastupljeniji element na Zemlji i dostupan je u gotovo neograničenim količinama. U prirodi je prisutan kao kvarcni pijesak (silicij oksid, SiO_2). Silicij se iz kvarcnog pijeska dobiva redukcijom ugljikom. Kvarcni pijesak i štapići ugljika zagrijavaju se na temperaturu od $1800\text{ }^\circ\text{C}$ do $1900\text{ }^\circ\text{C}$. Rezultat ovog procesa je

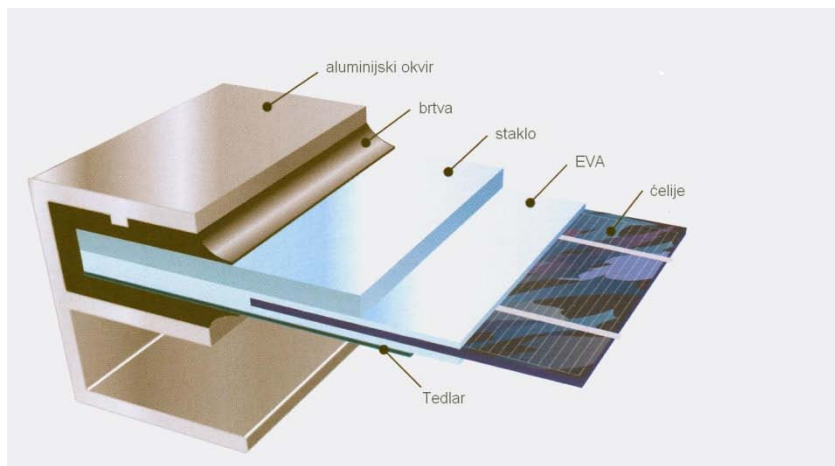
ugljik monoksid i materijal koji se naziva metalurški silicij, čistoće oko 99%. Jedan posto nečistoće je previše za upotrebu u fotonaponskoj industriji pa se metalurški silicij daljnjom kemijskom obradom pročišćuje do minimalno 99.999999% čistoće. Rezultat procesa pročišćavanja je multikristalični silicij u obliku granulata. Taj materijal se koristi kao bazni materijal za izradu monokristaličnih i multikristaličnih vafera (Slika 3.5).



Slika 3.5. Proces izrade kristaliničnih ćelija (Izvor: [9])

Silicijev granulat u posebnim pećima se zagrijava na temperaturu od oko 1420 °C te se dopira borom. Direktnom solidifikacijom se dobiva multikristalinični,

Czochralski procesom iz otopljenog silicija se izvlači monokristalični blok, a *Float zone* procesom iz multikristaličnog bloka se dobiva monokristalični blok. *Float zone* proces iziskuje dvostruko više energije od *Czochralski* procesa pa se komercijalno relativno rijetko upotrebljava. Blok težine nekoliko stotina kilograma se reže u 4", 5", 6" ili 8" vafere debljine 160 μm ili više. Difuzijom fosfora stvara se *pn*-spoj. Na kraju procesa na ćeliju se nanosi antireflektirajući sloj i kontakti.



Slika 3.6. Sastav kristaličnog fotonaponskog modula (Izvor: [9]).

Sunčane ćelije međusobno se električki povezuju i inkapsuliraju u vodonepropusno kućište tvoreći fotonaponski modul (Slika 3.6). Nosivost modula i optičku prozirnost do aktivnog dijela uređaja osigurava kaljeno staklo s niskim sadržajem željeza i posebnih optičkih svojstava. Sunčane ćelije utopljene su u sloj etilen-vinil-acetata (EVA). Prilikom procesa laminacije etilen-vinil-acetat zagrijava se na temperaturu od oko 150°C, topi se, postaje transparentan, a zatim se hladi, očvršćuje te povezuje staklo, ćelije i polivinil-flourid (Tedlar) u kompaktnu cjelinu (laminat). Uloga polivinil-flourida je zaštita stražnje strane ćelije od utjecaja atmosferlija. Osim polivinil-flourida kao zadnje strane modula, može se koristiti i staklo. Nakon procesa laminacije, modul se stavlja u aluminijski okvir, a kontakti se spajaju u priključnu kutiju. Nakon ispitivanja, fotonaponski modul spreman je za montažu.

3.3.2. Tehnologija tankog filma

U osamdesetim godinama prošlog stoljeća počela su intenzivnija istraživanja na razvoju tehnologije tankog filma. Poluvodički materijal nanosi se procesom napanjanja na podlogu dovoljno niske cijene i dobrih optičkih svojstava (najčešće staklo). Kao poluvodiči koriste se amorfni silicij, bakar-indij diselenid (CIS) i kadmij-telurid (CdTe). Zbog visokog koeficijenta apsorpcije svjetlosti film poluvodiča debljine 1-6 μm je dovoljan za učinkovit fotonaponski efekt. Sam proces napanjanja odvija se na temperaturama između 200 i 600 °C. Manje količine poluvodičkog materijala i manji utrošak energije unatoč nižoj učinkovitosti čine tehnologiju tankog filma konkurentnom još uvijek dominantnoj tehnologiji kristaličnog silicija.

Amorfni silicij

Na temperaturama između 200 i 250°C silan (SiH_4) se iz plinovite faze deponira na staklo gdje stvara sloj amornog silicija. Zbog nepravilne kristalne rešetke nosioci naboja imaju vrlo malu srednju difuzijsku duljinu pa se obično koristi p-i-n struktura odnosno između p i n tipa poluvodiča nanosi se intrinzični sloj. Nedostatak ćelija od amornog silicija je niska učinkovitost od svega 5 do 7 posto u stabiliziranom stanju, te degradacija učinkovitosti tijekom prvih 6 do 12 mjeseci rada (tzv. *Staebler-Wronski* efekt). Da bi se povećala učinkovitost i smanjio efekt degradacije često se koristi višestruka p-i-n struktura pri čemu se svaki p-i-n sloj optimizira za određenu valnu duljinu svjetlosti. Zbog dobrog koeficijenta apsorpcije difuzne svjetlosti ćelije se često koriste za napajanje malih elektroničkih uređaja u uvjetima smanjene osvijetljenosti.

Bakar-indij diselenid (CIS)

Aktivni sloj CIS ćelije izvodi se naparavanjem bakra, indija i selenija na podlogu u vakumskim komorama na temperaturama od 500 do 600 °C. Učinkovitost između 9 i 11 posto CIS ćelije su trenutno najučinkovitije ćelije u tehnologiji tankog filma te nema degradacije učinkovitosti. S masovnom proizvodnjom očekuju se značajno niži troškovi proizvodnje u odnosu na kristalični silicij.

Kadmij telurid (CdTe)

Proces naparavanja aktivnog dijela ćelija se odvija na temperaturi od oko 600 °C. Tehnologija CdTe u odnosu na ostale tehnologije tankog filma ima najniže troškove proizvodnje. Učinkovitost modula iznosi od 7 do 8,5 posto. Nedostatak ove tehnologije je korištenje teškog metala kadmija koji je otrovan. Kadmij se javlja kao nusprodukt u procesu dobivanja cinka pa procesiranjem kadmija u bezopasan spoj CdTe može biti ekološki prihvatljivo.

3.3.3. Usporedba sunčanih ćelija

U sustavima spojenim na elektroenergetsku mrežu najčešće se koriste kristalične ćelije. Niža učinkovitost multikristaličnih ćelija u odnosu na monokristalične (Tablica 3.1) kompenzira se nižom cijenom i većim faktorom punjenja modula jer multikristalični vaferi ne trebaju biti kvazi-kvadrati. Moduli iz amornog silicija obično se koriste u manjim aplikacijama (kampiranje, brodovi) ili u arhitekturi kao fasadni sistemi. Moduli u tehnologiji CIS i CdTe već se koriste u elektranama reda veličine megavata. Ćelije s vrlo visokom učinkovitosti (>30%), poznate kao III-V poluvodiči (GaAs, Ge, GaInAs, GaInP) se zbog svoje

visoke cijene koriste isključivo u svemirskim aplikacijama ili koncentratorskim sustavima.

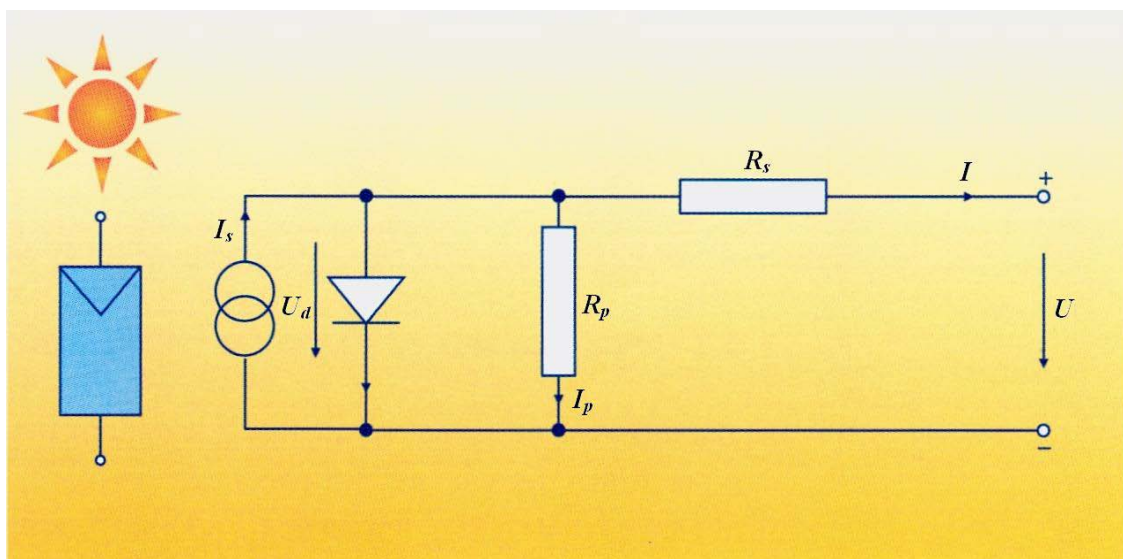
Tablica 3.1. Maksimalne učinkovitosti sunčanih ćelija (Izvor: [9])

a-stabilizirano stanje, b-mjereno pod koncentriranim ozračenjem, c-pilot proizvodnja

Materijal	Učinkovitost ćelije $\eta_{c,lab}$ (laboratorij) [%]	Učinkovitost ćelije $\eta_{c,p}$ (proizvodnja) [%]	Učinkovitost modula η_M (serijska proizvodnja) [%]
Monokristalični silicij	24,7	21,5	16,9
Multikristalični silicij	20,3	16,5	14,2
Trakasti (<i>Ribbon</i>) silicij	19,7	14,0	13,1
Kristalični silicij u tankom filmu	19,2	14,0	13,1
Amorfni silicij ^a	13,0	10,5	7,5
Mikromorfni silicij ^a	12,0	10,7	9,1
CIS	19,5	14,0	11,0
CdTe	16,5	10,0	9,0
III-V poluvodiči	39,0 ^b	27,4	27,0
Elektrokemijske ćelije	12,0	7,0	5,0 ^c
Hibridne HIT ćelije	21,0	18,5	16,8

3.4. Strujne i naponske karakteristike sunčane ćelije

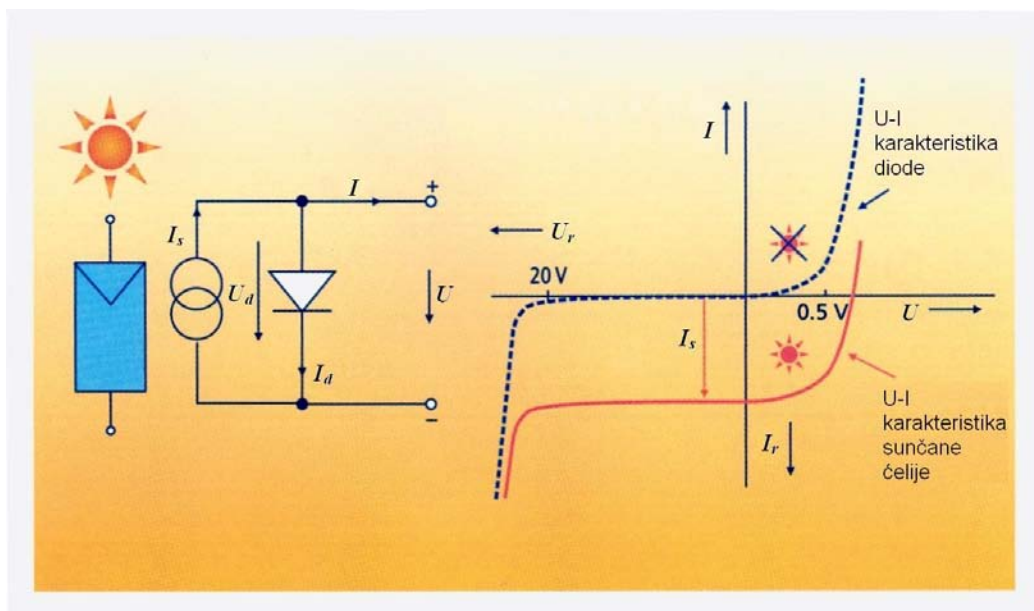
Sunčana ćelija ponaša se kao strujni izvor s paralelno spojenom diodom (Slika 3.7). Dioda određuje U-I karakteristiku sunčane ćelije. Gubici u poluvodiču i metalnim kontaktima prikazuju se u nadomjesnoj shemi preko serijskog otpora R_s . Da bi gubici u samoj ćelije bili što manji i njena učinkovitost što veća otpor R_s mora biti što manji. Paralelni otpor R_p ovisi o kvaliteti poluvodiča i tehnologiji izrade ćelije. U pravilu je dovoljno velik i može se zanemariti.



Slika 3.7. Nadomjesna shema sunčane ćelije (Izvor: [9])

Kroz trošilo spojeno s osvjetljenom sunčanom ćelijom teče struja I jednaka razlici generirane fotostruje I_s i struje diode I_d (Slika 3.8).

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (2)$$



Slika 3.8. U-I karakteristika sunčane ćelije (Izvor: [9])

Glavni parametri koji opisuju sunčanu ćeliju su napon otvorenog kruga (U_{ok}), struja kratkog spoja (I_{ks}) i faktor punjenja (engl. *Fill Factor*, FF). Napon otvorenog kruga U_{ok} definira se kao elektromotorna sila ćelije, to jest napon na kontaktima ćelije uz uvjet da je struja kroz ćeliju jednaka nuli. Uz uvjet $I = 0$ iz izraza (2) slijedi:

$$U_{ok} = U_T \ln\left(\frac{I_s}{I_0} + 1\right) \quad (3)$$

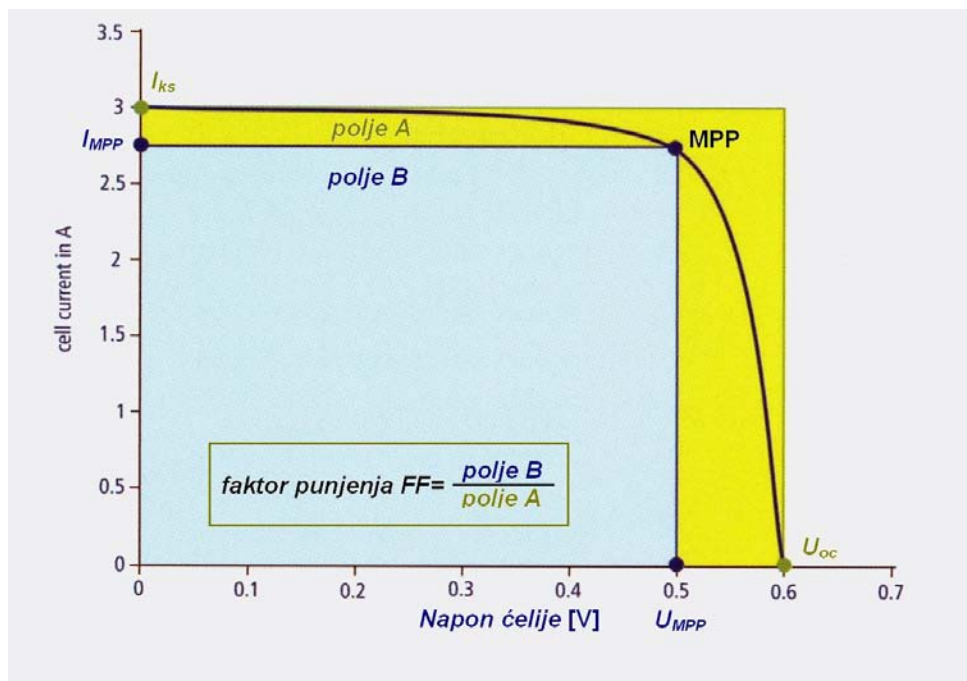
Napon U_{ok} kod standardnih silicijske ćelija iznosi oko 600 mV. Struja kratkog spoja I_{ks} definira se kao struja koja teče kroz ćeliju kada su kontakti ćelije kratko spojeni. Uz uvjet $U = 0$ iz izraza (2) slijedi:

$$I_{ks} = I_s \quad (4)$$

Struja kratkog spoja I_{ks} i napon otvorenog kruga U_{ok} su maksimalne vrijednosti napona i struje sunčane ćelije. Iz izlazne U-I karakteristike vidimo da je snaga koju ćelija predaje u tim točkama jednaka $P = 0$. Faktor punjenja određuje omjer maksimalne moguće i idealne snage koju ćelija može predati trošilu (Slika 3.9):

$$FF = \frac{P_{MPP}}{P_{ideal}} = \frac{I_m U_m}{I_{ks} U_{ok}} \quad (5)$$

Radna točka ćelije u kojoj trošilu predaje maksimalnu snagu nazivamo **točka maksimalne snage** (engl. *maximal power point*, MPP). Položaj MPP ovisi o temperaturi i ozračenju stoga za optimalno iskorištenje ćelije trošilo mora imati mogućnost praćenja točke maksimalne snage.



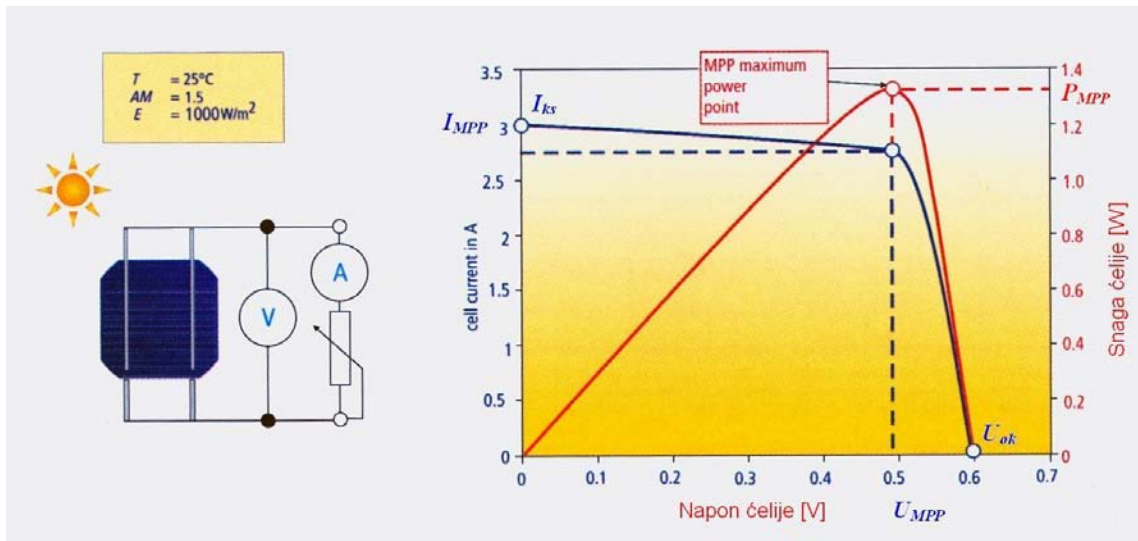
Slika 3.9. Faktor punjenja (Izvor: [9])

Poželjno je da je faktor punjenja što veći, za idealnu ćeliju jednak je jedan. Silicijske komercijalne ćelije imaju faktor punjenja oko 0,83, a galij-arsenidne oko 0,89 [7].

Kod međusobne usporedbe svojstava različitih tipova ćelija prvenstveno kao parametar koristimo učinkovitost. Učinkovitost se definira kao omjer dobivene električne snage iz ćelije i snage Sunčevog zračenja koje je upalo na površinu ćelije:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{Sunce}} = \frac{I_{ks} U_{ok} FF}{P_{Sunce}} \quad (6)$$

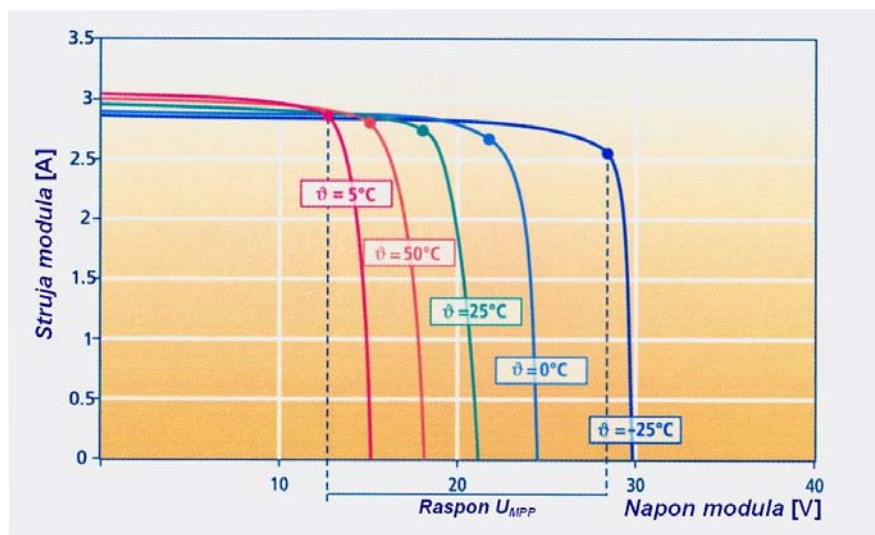
Učinkovitost ćelije ovisi o upadnom spektru, jačini zračenja i temperaturi fotoćelije. Stoga su za mjerenje svih karakteristika ćelije propisani **standardni uvjeti testiranja** (engl. *standard test conditions*, STC). Za komercijalne ćelije to su: optička masa zraka AM1,5, ozračenost 1000 W/m² i temperatura ćelije 25 °C (Slika 3.10).



Slika 3.10. Određivanje U-I karakteristike sunčane ćelije (Izvor: [9])

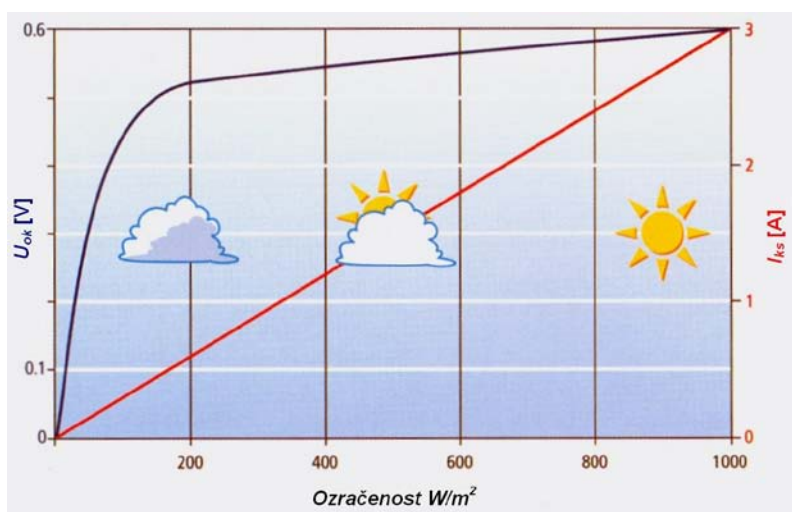
3.5. Promjena izlaznih parametara sunčane ćelije

Kod fotonaponskih sustava najopasnija je pojava prenapona. Izmjenjivači mogu ograničiti ulaznu struju odnosno snagu, ali ne i napon. U izmjenjivače je ugrađena prenaponska zaštita od kratkotrajnih prenapona, na primjer udara groma, ali ne i od stalnog prenapona jer se on u ispravno projektiranom sustavu ne može javiti. Napon otvorenog kruga U_{ok} najviše ovisi o temperaturi a vrlo malo o jakosti zračenja. Silicijske ćelije imaju negativni temperaturni koeficijent napona od oko $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Zbog međusobnog serijskog spoja ćelija u modulu (Slika 3.11) te serijskog spoja samih modula u fotonaponskom polju, sve promjene napona na pojedinoj ćeliji zbrajaju se i mogu rezultirati velikim varijacijama ukupnog izlaznog napona fotonaponskog polja. Zbog negativnog temperaturnog koeficijenta najgori slučaj pojave prenapona javlja se kod niskih temperatura, recimo za vedrog sunčanog dana zimi kad je Sunčevo zračenje dovoljno jako, a temperatura zraka niska. Svi fotonaponski sustavi u srednjoj Europi projektiraju se za minimalne temperature $-10 \text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 3.11. Utjecaj temperature na napon otvorenog kruga U_{ok} i struju kratkog spoja I_{ks} (Izvor: [9])

Struja kratkog spoja I_{ks} proporcionalna je jačini Sunčevog zračenja (Slika 3.12). Temperaturna ovisnost struje o temperaturi iznosi oko 2 mA/°C te se zbog serijskog spajanja ćelija može praktički zanemariti. Porastom jačine Sunčevog zračenja struja i temperatura ćelije rastu. Porastom temperature pada napon ćelije. Efekt porasta struje ćelije usred rasta ozračenosti je dominantan u odnosu na pad napona pa izlazna snaga ćelije raste s jačinom Sunčevog zračenja.



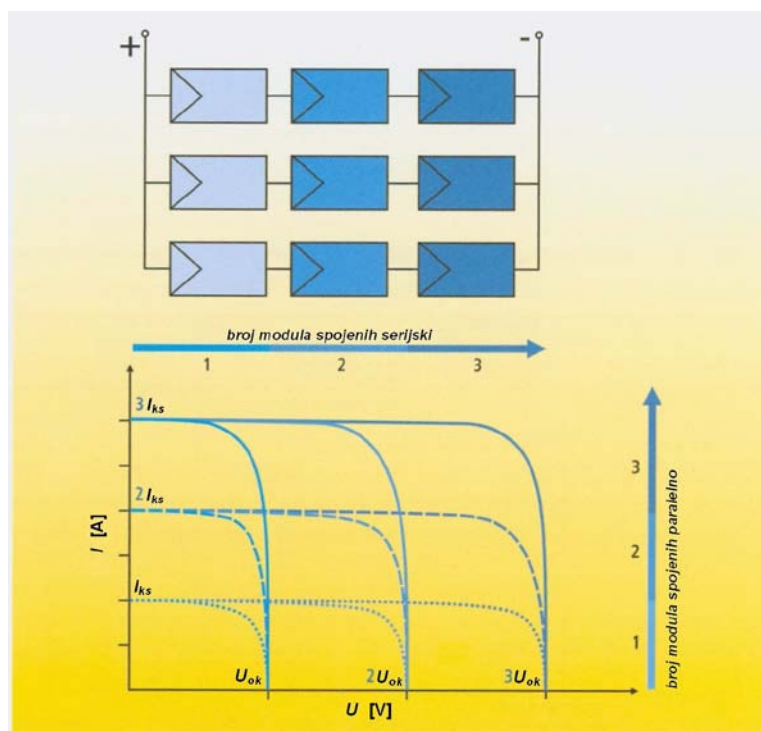
Slika 3.12. Utjecaj ozračenja na napon otvorenog kruga i struju kratkog spoja

(Izvor: [9])

3.6. Fotonaponski moduli

Inkapsuliranjem u fotonaponski modul, sunčane ćelije se štite od vlage, kiše, tuče i ostalih atmosferlija, daje im se mehanička čvrstoća, a okoliš se štiti od dodira visokog napona. Svi kristalični moduli koji se koriste na području Europe i Azije testiraju se i certificiraju prema IEC 61215 ed. 2, normi [11], a moduli izrađeni u tehnologiji tankog filma prema IEC 61646 normi [12].

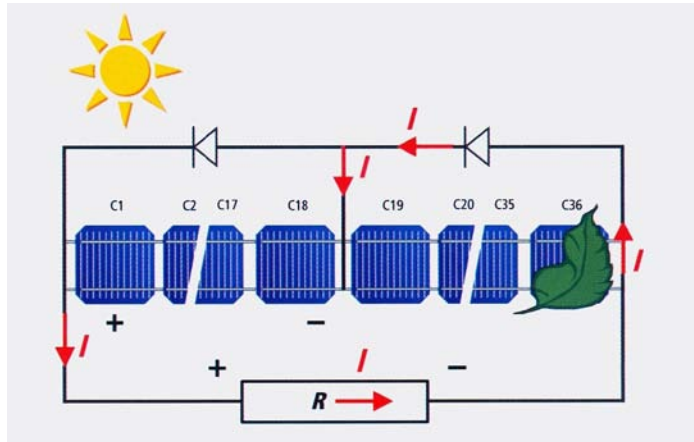
Ovisno o izvedbi, standardni moduli sadrže 36, 60, 72 ili 96 ćelija. Ćelije se spajaju serijski u *stringove*. Serijskim spajanjem ćelija povećavamo ukupni izlazni napon modula. Time se smanjuju gubici u vodovima i potreba za spojnim kabelima velikog presjeka. Međusobnim spajanjem modula u fotonaponsko polje raste izlazna snaga polja. Serijskim spajanjem modula raste izlazni napon, a paralelnim spajanjem raste izlazna struja fotonaponskog polja (Slika 3.13).



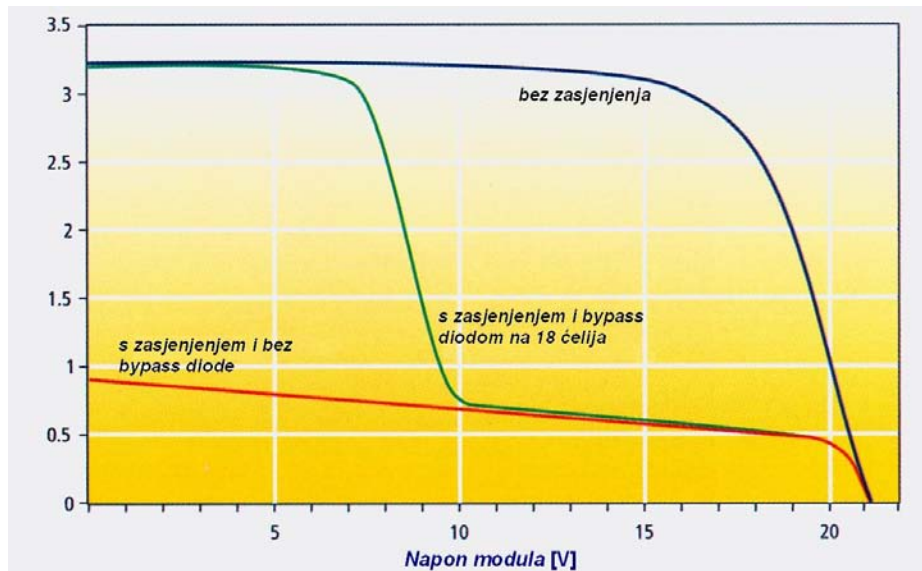
Slika 3.13. U - I karakteristika fotonaponskog polja ovisno o broju serijski i paralelno spojenih modula (Izvor: [9])

3.6.1. Pojava vrućih točaka

Reverzni napon U_R sunčanih ćelija iznosi oko 20 V. Uslijed djelomičnog zasjenjenja modula postoji mogućnost reverzne polarizacije ćelije naponom većim od maksimalnog reverznog napona ćelije. Iz U-I karakteristike (Slika 3.6) vidimo da ukoliko je reverzni napon veći od U_R struja kroz diodu naglo raste. Struja može zagrijati diodu do te mjere da se ćelija ili čak modul termički uništi. Najgori slučaj je kada je samo jedna ćelija u *stringu* zasjenjena jer se tada ukupna energija proizvedena u *stringu* troši na zagrijavanje jedne ćelije. Kako bi ograničili maksimalni reverzni napon na pojedinoj ćeliji na svakih 18-20 serijski spojenih ćelija paralelno se spaja dioda prenosnica (engl. *bypass diode*) (Slika 3.14).



Slika 3.14. Paralelni spoj diode prenosnice (Izvor: [9])



Slika 3.15. Utjecaj zasjenjenja na U-I karakteristiku modula (Izvor: [9])

3.7. Monokristalični fotonaponski moduli Solaris HT-135

U modeliranom sustavu koristimo 22 fotonaponska modula HT-135 vršne snage 135 Wp proizvođača Solaris d.o.o. iz Novigrada. Modul sadrži 36 monokristaličnih ćelija dimenzija 156 x 156 mm. Prednja strana je izrađena od kaljenog sunčanog stakla debljine 3,2 mm, a stražnja od Tedlara. Za laminaciju se koristi EVA. Okvir je od anodiziranog aluminijske širine 34 mm. Modul dolazi sa spojnom kutijom tipa Spelsberg s ugrađene dvije diode prenosnice. Dimenzije modula su 1494 mm x 664 mm, a težina 11 kg. Električne karakteristike prikazane su u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Električne karakteristike fotonaponskog modula HT-135 (Izvor: [13])

Maksimalna snaga, P_m	135 W
Napon u točki maksimalne snage, U_{MPP}	18,1 V
Struja u točki maksimalne snage, I_{MPP}	7,5 A
Napon otvorenog kruga, U_{ok}	22,3 V
Struja kratkog spoja, I_{ks}	7,9 A
Maksimalni napon sustava, U_m	750 V
Temperaturni koeficijent napona, α_{U_i}	-90 mV/°C
Tolerancija izlazne maksimalne snage	±5 %

4. AKUMULIRANJE ENERGIJE

Količina Sunčevog zračenja mijenja se ovisno o meteorološkim prilikama, dobu dana i godine. Kako otočni fotonaponski sustav treba osigurati električnu energiju u svakom trenutku, manjak energije za oblačna vremena ili noću treba namiriti iz spremnika energije, akumulatorske banke. Za sunčanih dana s viškom električne energije baterije se pune, a u noći i kad je Sunčevo ozračenje nisko baterije se prazne i predaju akumuliranu energiju. U otočnim fotonaponskim sustavima se zbog najboljeg omjera cijene i učinkovitosti najčešće koriste olovne (Pb) akumulatorske baterije. Rjeđe, obično kod sustava namijenjenih radu na niskim temperaturama, koriste se nikal-kadmij (NiCd) baterije, dok su litij-ionske (Li-ion) baterije za ovakve aplikacije još uvijek preskupe. Više pojedinačnih akumulatorskih baterija spojenih u seriju i/ili paralelu nazivamo akumulatorskom bankom.

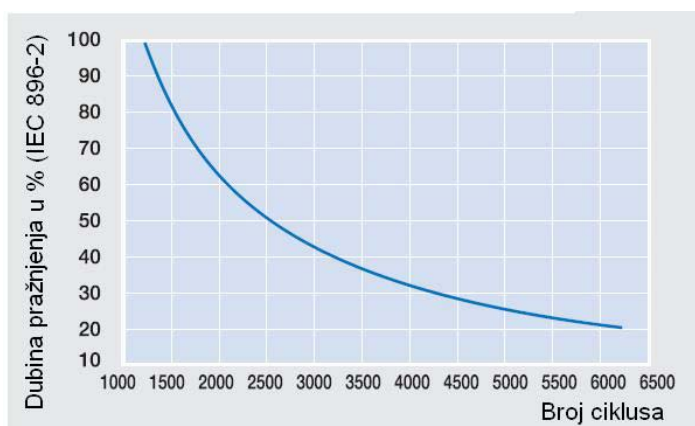
4.1. Olovne akumulatorske baterije

Olovna akumulatorska baterija sastoji se od nekoliko serijski vezanih olovnih članaka. Članak se sastoji od dvije elektrode suprotnog polariteta uronjene u sumpornu kiselinu (H_2SO_4). Kod pune baterije aktivni materijal negativne elektrode je olovo (Pb), a pozitivne elektrode olovni oksid (PbO_2). Pozitivna i negativne elektrode odvojena je separatorom. Nazivni napon jedne akumulatorske ćelije je 2 V.

U procesu pražnjenja kroz trošilo se zatvara strujni krug i elektroni s negativne elektrode putuju prema pozitivnoj elektrodi uzrokujući kemijske reakcije između elektroda i sumporne kiseline. Na obje elektrode stvara se olovni sulfat ($PbSO_4$), koncentracija kiseline u elektrolitu pada i baterija se prazni. Bateriju možemo ponovno napuniti dovodeći na elektrode napon veći od trenutnog napona baterije. Elektroni sad putuju s pozitivne prema negativnoj elektrodi i kemijska reakcija odvija se u suprotnom smjeru.

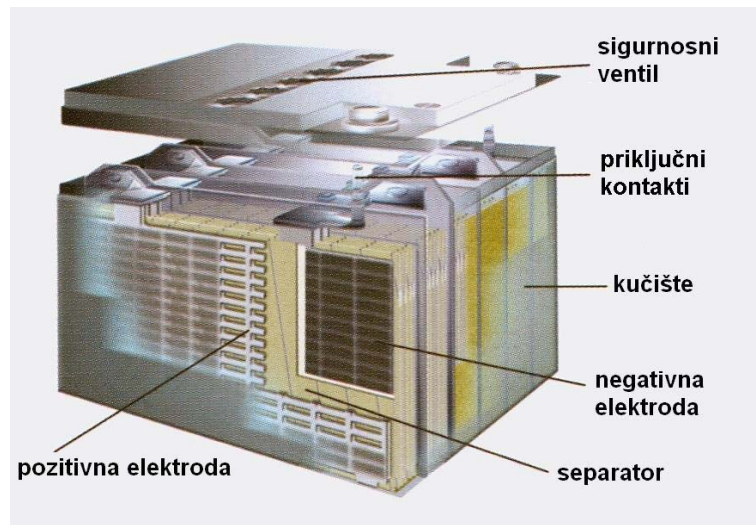


Proces punjenja i pražnjenja u realnosti nije u potpuno reverzibilan. Male količine olovnog sulfata se ne disociraju u potpunosti što vodi do starenja baterija odnosno gubitka kapaciteta. Gubitak kapaciteta je veći što je stupanj ispražnjenosti veći i dugotrajniji. Broj ciklusa baterije odnosno njen radni vijek ovisi o tipu baterije, stupnju ispražnjenosti i temperaturi skladištenja odnosno rada (Slika 4.1), [9].



Slika 4.1. Broj ciklusa olovne baterije ovisno o dubini ispražnjenosti (Izvor: [15])

Postoji više tipova olovnih baterija. Možemo ih podijeliti prema tipu elektroda ili prema tipu elektrolita. Prema tipu elektroda postoje pločaste (engl. *flat plate*), mrežaste (engl. *grid plate*) i cjevaste (engl. *tubular plate*) baterije. Najkvalitetnije i ujedno najskuplje baterije s najvećim brojem ciklusa punjenja i pražnjenja (preko 1600 ciklusa i radnim vijekom od 12 do 16 godina [9]) su baterije s cjevastim elektrodama i namijenjene su radu u teškim pogonskim uvjetima (engl. *heavy duty*). Prema tipu elektrolita postoje akumulatorske baterije s tekućim elektrolitom (engl. *wet batteries*) ili s elektrolitom u obliku gela (engl. *gel batteries*) (Slika 4.2). Gel baterije su skuplje od baterija s tekućim elektrolitom, ali imaju niz prednosti: nema raslojavanja elektrolita, ne trebaju održavanje, imaju veći broj ciklusa punjenja i pražnjenja, kućište im je u potpunosti zatvoreno i nema stvaranja plinova u procesu punjenja baterije.



Slika 4.2. Građa olovne akumulatorske baterije s elektrolitom u obliku gela, [9]

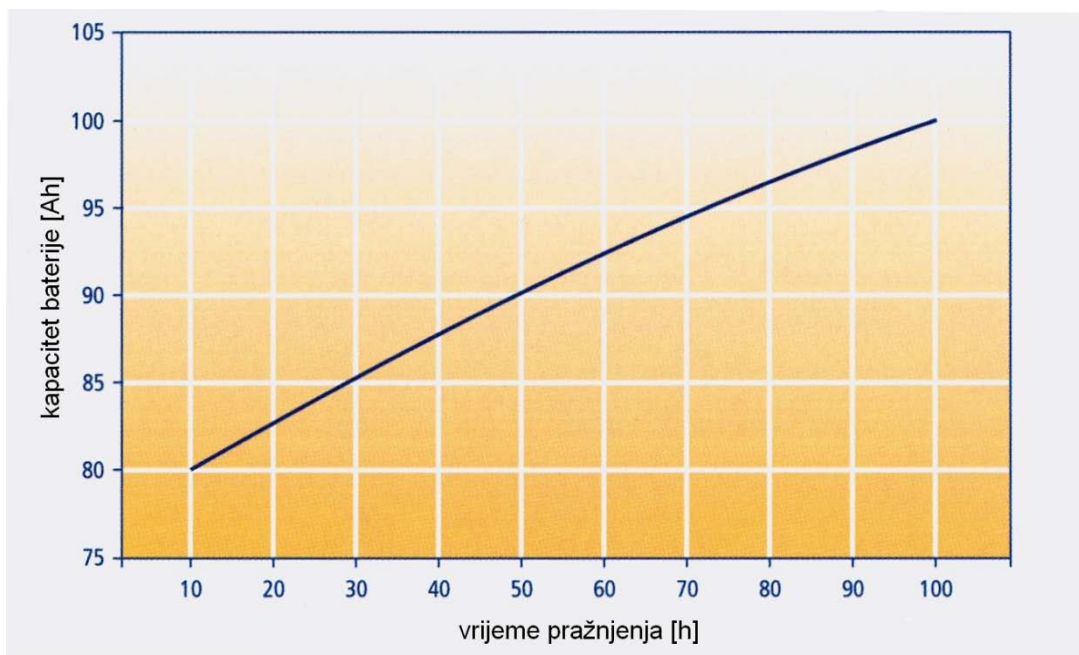
Kapacitet baterije C izražavamo u jedinicama amper sati [Ah], računa se kao umnožak konstantne struje kojom se prazni baterija i vremena koje je potrebno da se baterija isprazni.

$$C_{n,Ah} = I_n \times t_n \text{ [Ah]} \quad (8)$$

Kod projektiranja fotonaponskih sustava snagu izražavamo u kilovatima [kW] odnosno energiju u kilovat satima [kWh] stoga je kapacitet baterije potrebno promatrati kao količinu energije pohranjene u bateriji i izražavati ga u kWh.

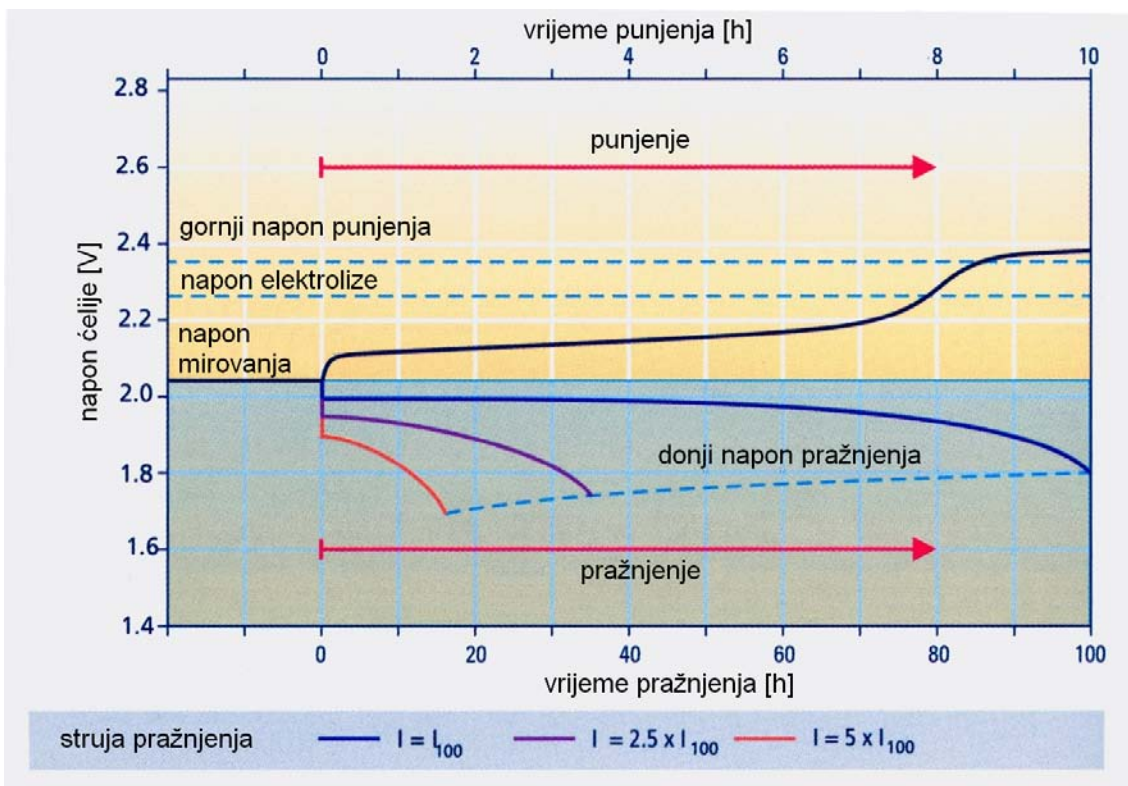
$$C_{n,E} = I_n \times U_n \times t_n \text{ [kWh]} \quad (9)$$

Kapacitet baterije ovisi o vremenu pražnjenja (Slika 4.3) i što je vrijeme pražnjenja manje kapacitet baterije je manji. Stoga se kapacitet baterije označava kao C_h gdje C označava nazivni kapacitet baterije za vrijeme pražnjenja od h sati. Obično se za baterije namijenjene radu u fotonaponskim sustavima definira kapacitet za vrijeme pražnjenja 100 sati i obilježava se kao C_{100} . Porastom temperature kapacitet baterije raste, ali se i njeno starenje ubrzava s faktorom dva za svakih 10 °C.



Slika 4.3. Ovisnost kapaciteta akumulatorske baterije o struji (vremenu) pražnjenja (Izvor: [9])

Nazivni napon jedne ćelije olovne baterije je 2 V. Obično se unutar jednog kućišta šest ili dvanaest ćelija povezuje u seriju kako bi se dobili naponi 12 odnosno 24 V. Napon ćelije ovisi o stupnju napunjenosti, tipu baterije i temperaturi. Njegova vrijednost kreće se između 1,96 i 2,12 V odnosno 11,7 i 12,7 V za 12 V baterije. Posebnu pozornost treba posvetiti punjenju baterija. Tijekom punjenja napon baterije raste i jednom trenutku doseže vrijednost u kojoj dolazi do elektrolize vode u elektrolitu (Slika 4.4). Kao gornji napon baterije proizvođač definira nešto višu vrijednost. Kod tog napona regulator punjenja prekida punjenje kako bi se spriječilo stvaranje većih količina visoko eksplozivne mješavine vodika i kisika, isušivanje elektroda ili povećanje koncentracije kiseline iznad dopuštenih vrijednosti. Gornji napon baterija ovisi o temperaturi pa regulator osim napona mora pratiti i temperaturu baterije.



Slika 4.3 Napon baterijske ćelije ovisno o punjenju ili pražnjenju baterije konstantnom strujom (Izvor: [9])

U otočnim sustavima vrlo je važno u svakom trenutku znati koliki je nivo napunjenosti baterija odnosno koliko energije imamo na raspolaganju. Omjer trenutne količine energije pohranjene u bateriji i ukupnog kapaciteta baterije je nivo napunjenosti (engl. *state of charge*, SOC). Mjerenje nivoa napunjenosti baterija je vrlo složeno i neprecizno. Razvijeno je nekoliko složenih algoritama koji mogu predvidjeti nivo napunjenosti baterija s prihvatljivom pogreškom. Ti algoritmi prate napon i temperaturu baterija, količinu energije koja je ušla i izašla iz baterija, a kod baterija s tekućim elektrolitom mjeri se i koncentracija kiseline u elektrolitu.

Također je važno znati kolika je učinkovitost baterije. Učinkovitost baterije je omjer energije utrošene za punjenje baterije i energije dobivena pražnjenjem baterije. Učinkovitost olovne baterije iznosi od 80% do 90%.

4.2. Olovni akumulatori Sonnenschein S12/130 A

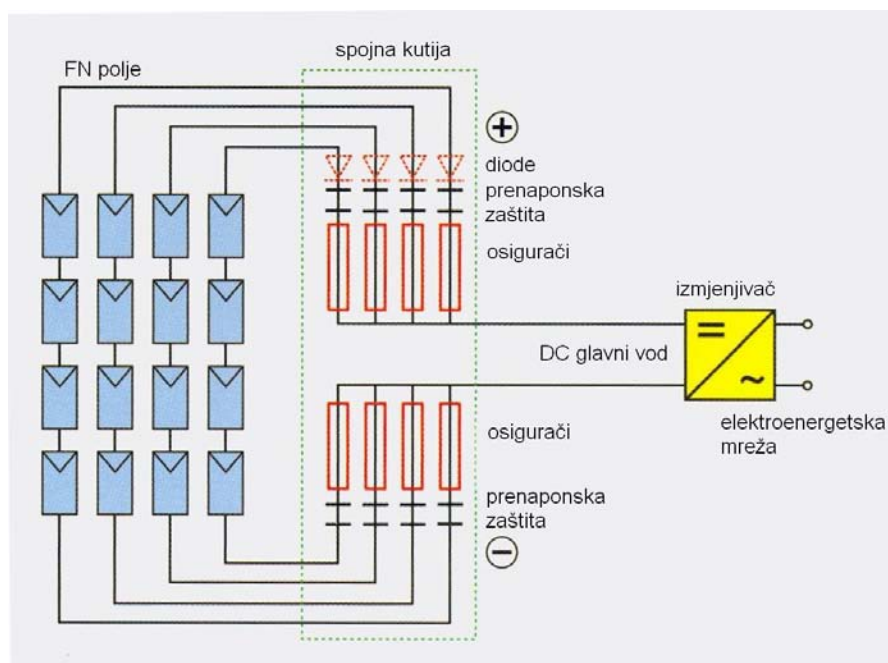
Akumulatorske baterije Sonnenschein S12/130 A namijenjeni su manjim fotonaponskim sustavima s malim do srednjim opterećenjem. Imaju mrežastu elektrodu i gel elektrolit. Dolaze u zatvorenom kućištu i nije ih potrebno održavati. Radni vijek prema IEC 896-2 normi iznosi 800 ciklusa. Nazivni napon baterije je 12 V, a kapacitet $C_{100} = 130$ Ah (Tablica 4.1).

Tablica 4.1. Ovisnost kapaciteta baterije S12/130 A o brzini pražnjenja (Izvor: [15])

Nazivni napon [V]	12
C_1 uz 1,7 V/ćelija [Ah]	66
C_5 uz 1,7 V/ćelija [Ah]	93,5
C_{10} uz 1,7 V/ćelija [Ah]	104,5
C_{100} uz 1,8 V/ćelija [Ah]	130

5. FOTONAPONSKI IZMJENJIVAČI

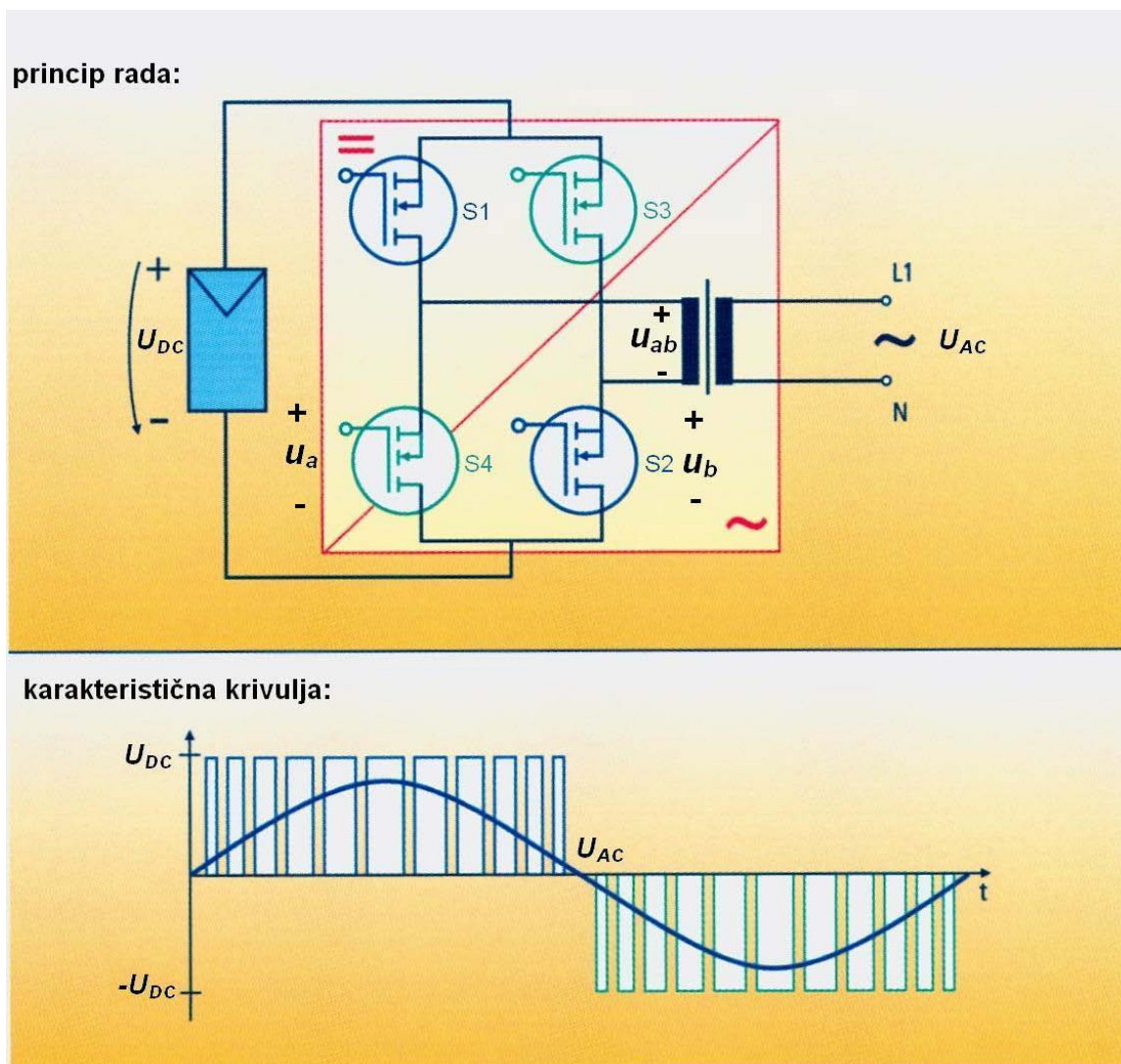
Fotonaponsko polje je izvor istosmjernog napona i ukoliko ga želimo priključiti na elektroenergetsku mrežu moramo ga pretvoriti u izmjenični napon. Tu pretvorbu obavlja izmjenjivač (engl. *Inverter*). Izmjenjivač je elektronički uređaj koji istosmjerni napon fotonaponskog polja pretvara u izmjenični napon koji odgovara naponu elektroenergetske mreže. Izmjenjivač ne može formirati vlastitu mrežu već mu je za rad potrebna prisutnost javne elektroenergetske mreže ili mreže koju formira neki drugi uređaj s tom funkcijom. Formiranje mreže od strane izmjenjivača nije dozvoljeno iz sigurnosnih razloga. To bi kod ispada elektroenergetske mreže dovelo do stvaranja lokalnih mjesta na mreži koja su unatoč ispada mreže ostala pod naponom i kao takva predstavljaju opasnost za radnike koji mrežu servisiraju. Izmjenjivač ima ugrađenu zaštitu od pojave otočnog režima rada. Izmjenjivač mjeri napon, struju, frekvenciju i impedanciju mreže te se isključuje ukoliko bilo koja vrijednost odstupa od zadanih vrijednosti. Priključivanje fotonaponskog polja na izmjenjivač prikazano je na slici 5.1.



Slika 5.1. Priključak fotonaponskog polja i izmjenjivača na elektroenergetsku mrežu (Izvor: [9])

5.1. Princip rada izmjenjivača

Centralni dio svakog izmjenjivača je upravljivi poluvodički most (Slika 5.2) koji prekidanjem struje kroz poluvodičke sklopke pretvara istosmjerni napon u izmjenični.



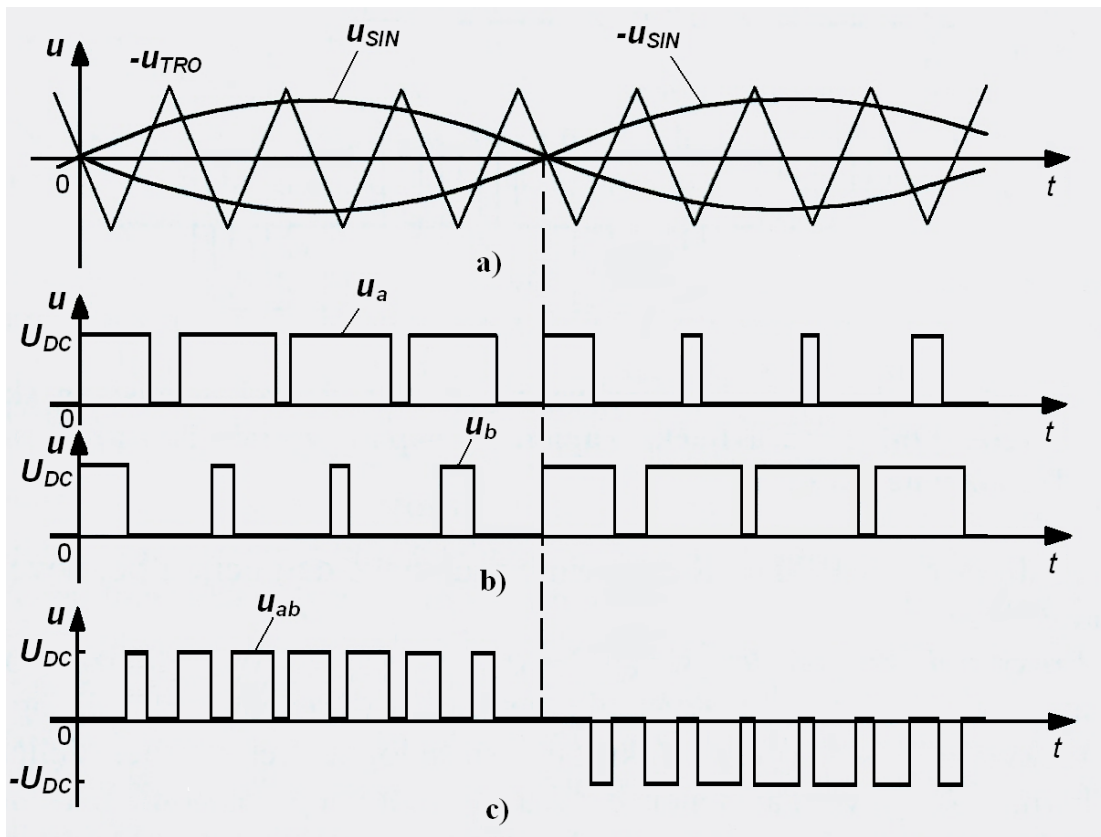
Slika 5.2. Shema spoja mosta izmjenjivača (Izvor: [9])

Izlazni napon U_{AC} ovisi o tome koje su sklopke zatvorene. Napon na trošilu može biti jednak $+U_{DC}$, $-U_{DC}$ ili nula. Uključene sklopke S1 i S2 spajaju trošilo na napon $+U_{DC}$, a uključene sklopke S3 i S4 na napon $-U_{DC}$. Periodičnim sklapanjem trošila na napon $+U_{DC}$ ili $-U_{DC}$ na trošilu nastaje pravokutni napon. Valni oblik struje ovisi o karakteru trošila. Pravokutni napon sadrži značajan udio viših harmonika koji nije pogodan za napajanje osjetljivijih trošila. Širinskom modulacijom upravljačkih impulsa (engl. *pulse width modulation*, PWM) i filtriranjem niskopropusnim filtrom smanjuje se udio viših harmonika. Frekvencija upravljačkog napona značajno je viša od frekvencije sinusnog izlaznog napona i iznosi oko 1 kHz.

Pomoću referentnog (modulacijskog) sinusnog napona i signala nosioca trokutastog valnog oblika dobivamo napon kojim upravljamo poluvodičkim sklopkama mosta (Slika 5.3).

Filtriranjem izlaznog napona niskopropusnim (NP) filtrom dobivamo sinusni izlazni napon U_{AC} s izobličenjem manjim od 4% [12]. Kao sklopke koriste se poluvodičke sklopke snage: SCR, GTO, IGBT, MOSFET i BPT.

Da bi prijenos energije između fotonaponskog polja i izmjenjivača bio maksimalno učinkoviti izmjenjivač mora pratiti točku maksimalne snage fotonaponskog polja. Točka maksimalne snage fotonaponskog polja mijenja se s jačinom Sunčevog zračenja i temperaturom. Napon u točki maksimalne snage obično iznosi oko $0,8U_{ok}$, stoga se ubrzava pronalaženje točke maksimalne snage kod uključivanja izmjenjivača na mrežu tako da izmjenjivač prvo izmjeri napon U_{ok} koji zatim pomnoži s faktorom 0,8. Nakon toga izmjenjivač pomoću posebnog algoritma metodom sukcesivne aproksimacije pronalazi točku maksimalne snage.



Slika 5.3. Unipolarna širinska modulacija impulsa (Izvor: [17]):

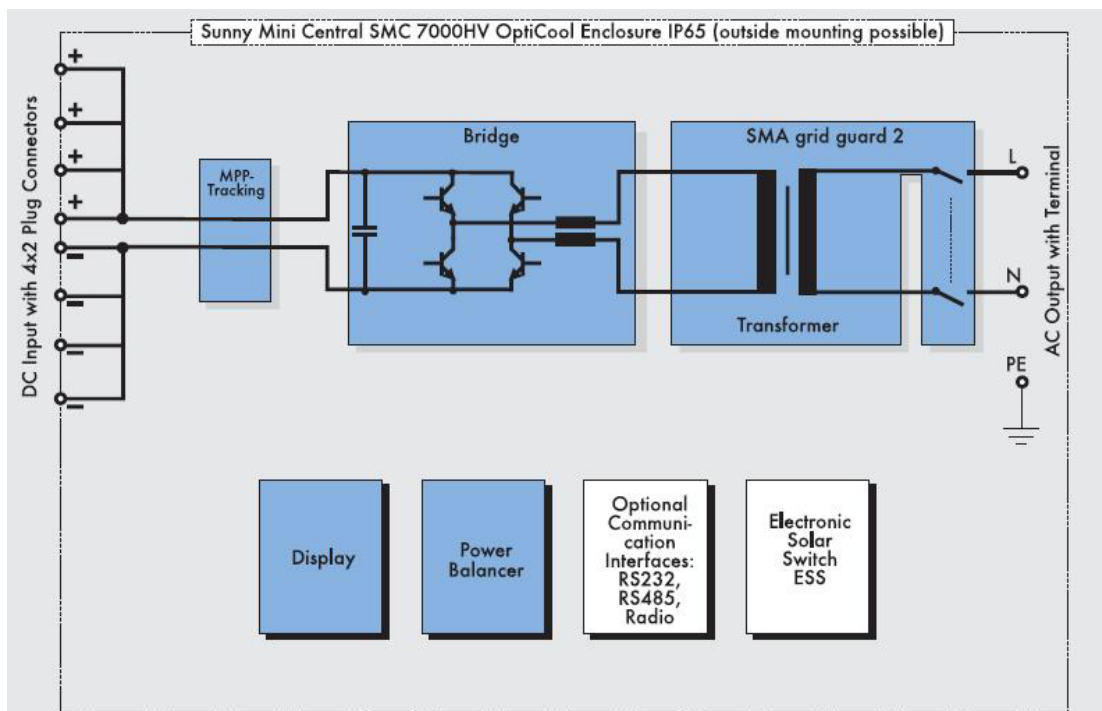
- a) sinusni referentni val i trokutni nosilac; b) valni oblici napona mosta;
 c) izlazni valni oblik napona (izlaz je $+U_{DC}$ kada je $u_{SIN} > u_{TRO}$ i $-u_{SIN} < u_{TRO}$, a $-U_{DC}$ kada je $-u_{SIN} > u_{TRO}$ i $u_{SIN} < u_{TRO}$.)

5.2. Izvedbe izmjenjivača

Izmjenjivače prema izvedbi dijelimo na izmjenjivače s niskofrekventnim (NF) transformatorom (engl. *low frequency (LF) transformer inverter*), s visokofrekventnim (VF) transformatorom (engl. *high frequency HF transformer inverter*) i na izmjenjivače bez transformatora (engl. *transformerless (TL) inverter*). Svaka izvedba ima svoje prednosti i nedostatke.

5.2.1. Izmjenjivač s niskofrekventnim transformatorom

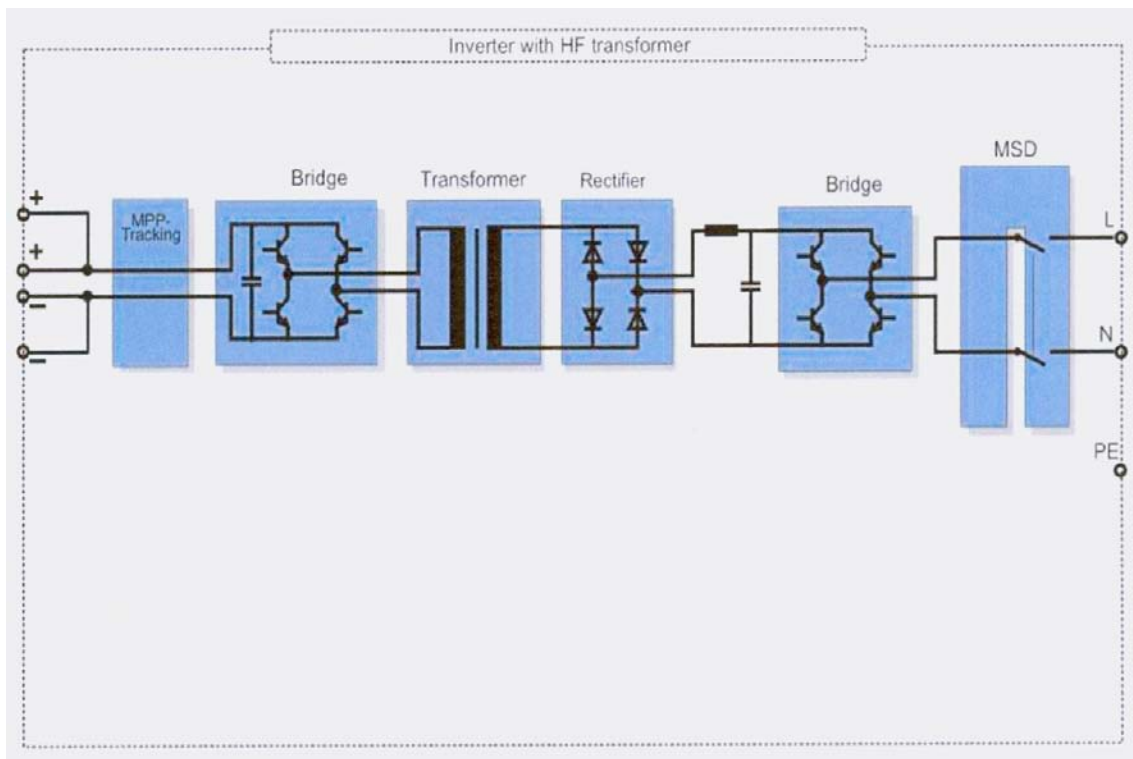
Na izlazu ove izvedbe izmjenjivača nalazi se niskofrekventni transformator (Slika 5.4). Izlazni izmjenični napon mosta transformator transformira na razinu napona elektroenergetske mreže. Elektroenergetska mreža i fotonaponsko polje međusobno su galvaniski odvojeni. Prednosti izmjenjivača s niskofrekventni transformatorom su jednostavni dizajn, pouzdanost, mali broj poluvodičkih sklopki (četiri), galvanisko odvajanje elektroenergetske mreže i fotonaponskog polja. Nedostaci su veliki volumen i težina, prvenstveno zbog niskofrekventnog transformatora. Učinkovitost ove izvedbe izmjenjivača je oko 96%.



Slika 5.4. Shematski prikaz izmjenjivača s niskofrekventnim transformatorom, [18]

5.2.2. Izmjenjivač s visokofrekventnim transformatorom

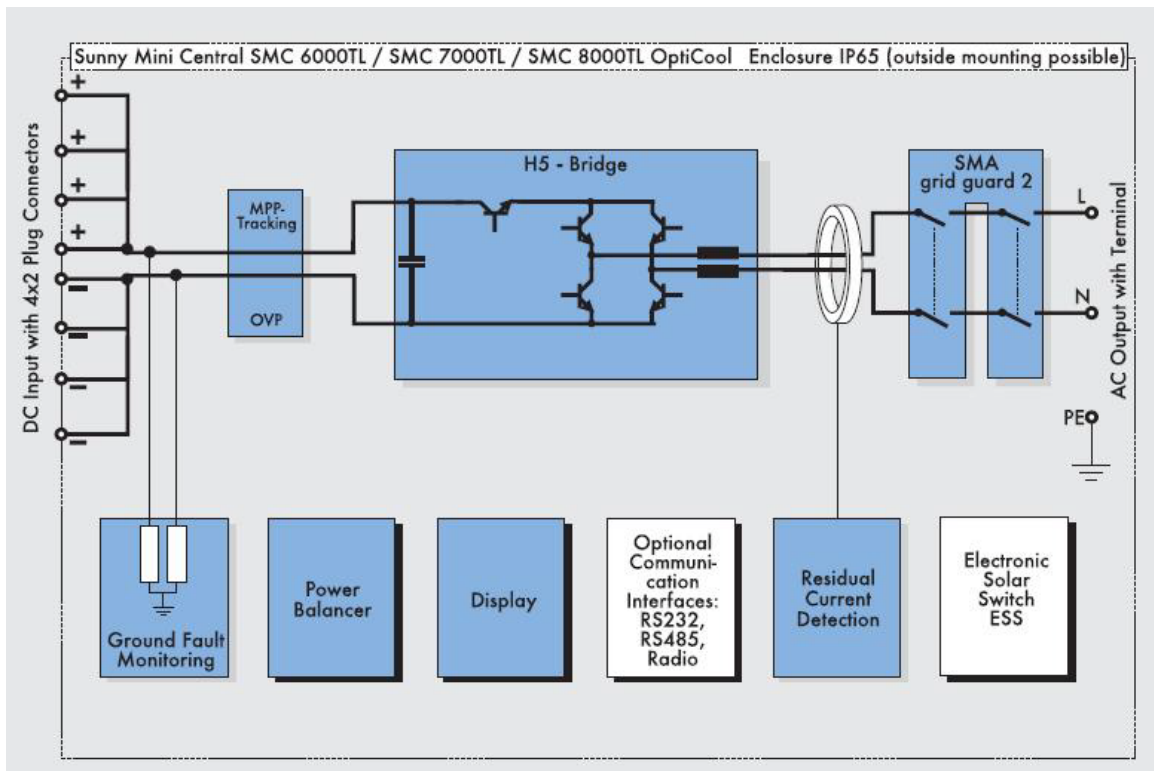
Ova izvedba izmjenjivača je elektronički najsloženije konstrukcije. Sastoji se od dva mosta, ispravljača i visokofrekventnog transformatora (Slika 5.5). Ulazni istosmjerni napon se pomoću prvog mosta pretvara u izmjenični napon visoke frekvencije, zatim se visokofrekventnim transformatorom transformira na napon potrebne razine. Kako se dobio napon frekvencije elektroenergetske mreže izlazni napon visokofrekventnog transformatora ispravlja se drugim mostom i opet pretvara u izmjenični, ali sada frekvencije 50 Hz. Prednosti izmjenjivača s visokofrekventnim transformatorom su galvansko odvajanje elektroenergetske mreže i fotonaponskog polja te mala masa. Nedostaci su kompleksna elektronika, veliki broj poluvodičkih sklopki (dvanaest) i relativno niska učinkovitost od oko 94,5%.



Slika 5.5. Shematski prikaz izmjenjivača s visokofrekventnim transformatorom (Izvor: [16])

5.2.3. Izmjenjivač bez transformatora

Osim standardnog mosta kod izmjenjivača bez transformatora koristi se dodatna peta poluvodička sklopka (slika 5.6). Uloga te sklopke je sprječavanje pojave rezonancije između ulaznih kondenzatora i izlaznih induktiviteta niskopropusnog (NP) filtra. Tako se energija akumulirana u induktivitetima šalje u mrežu, a ne vraća se u ulazne kondenzatore o time bitno povećava učinkovitost izmjenjivača. Fotonaponsko polje i elektroenergetska mreža nisu galvanski odvojeni pa su potrebni dodatni mehanizmi zaštite. Prati se impedancija između plus i minus pola te uzemljenja. Ukoliko je impedancija manja od $2 \text{ M}\Omega$ signalizira se kvar. Tako se prati jačina struje na izlazu izmjenjivača tj. razlika struje koja izlazi i ulazi u izmjenjivač te ukoliko je ona veća od 30 mA izmjenjivač signalizira kvar. Prednosti izmjenjivača bez transformatora su visoka učinkovitost (oko 98 %), mali broj poluvodičkih sklopki (pet) i mala masa. Glavni nedostatak je što nema galvanskog odvajanja ulaza i izlaza pa nisu primjenjivi u svim fotonaponskim sustavima. Posebnu pozornost treba obratiti kod modula u tehnologiji tankog filma.



Slika 5.6. Shematski prikaz izmjenjivača bez transformatora (Izvor: [18])

5.3. Fotonaponski izmjenjivač SMA SB 2500

SB 2500 je jedan od najpopularnijih i najpouzdanijih izmjenjivača proizvođača SMA. Opremljen sa *SMA grid guard 2* sučeljem prema elektroenergetskoj mreži i automatskim prepoznavanjem frekvencije. SB 2500 je kompatibilan s gotovo svim elektroenergetskim mrežama diljem svijeta. SB 2500 je izmjenjivač s niskofrekventnim transformatorom, maksimalne snage 2500 W i maksimalnom učinkovitošću 94,1% (Tablica 5.1).

Tablica 5.1. Tehničke karakteristike SB 2500 (Izvor: [18])

DC karakteristike	
Maks. DC snaga	2700 W
Maks. DC napon	600 V
Dinamika ulaznog DC napona	224 – 600 V
Maks DC struja	12 A
AC karakteristike	
Maks. AC snaga	2500 W
Nazivna AC snaga	2300 W
Harmonička distorzija	<4%
Nazivni AC napon	220 - 240 V
Nazivna AC frekvencija	50/60 Hz
cos φ	1
Učinkovitost	
Maks. učinkovitost	94,1 %
Euro učinkovitost	93,2%
Mehanički podaci	
Širina/visina /dubina	434 / 295 / 214 mm
Težina	30 kg

6. BIDIREKCIJSKI USMJERIVAČ

Bidirekcijski usmjerivač je elektronički uređaj koji sadržava ispravljač, regulator punjenja baterija i izmjenjivač. Glavna uloga bidirekcijskog usmjerivača je formiranje i upravljanje izmjeničnom (AC) mrežom koja je u potpunosti kompatibilna s klasičnom elektroenergetskom mrežom. Najčešće se koristi u sustavima gdje elektroenergetska mreža nije dostupna, kod otočnih sustava ili sustava s neprekidnim napajanjem. Bidirekcijski usmjerivač osim formiranja mreže vrši i potpuno upravljanje otočnim sustavom. Definira amplitudu i frekvenciju, upravlja punjenjem i pražnjenjem baterija, uključivanjem i isključivanjem dodatnih izvora napajanja te upravlja trošilima. Na mrežu koju formira bidirekcijski usmjerivač paralelno se vežu izmjenjivači i trošila. Osim izmjenjivača moguće je priključenje bilo kojeg standardnog izmjeničnog generatora, kao na primjer dizel generatora te generatora u kogeneraciji ili maloj hidroelektrani. Snaga cijelog sustava može biti znatno veća od snage samog bidirekcijskog usmjerivača. Cijeli sustav se jednostavno proširuje kako od strane trošila tako i od strane izvora napajanja.

6.1. Upravljanje akumulatorskom bankom

Akumulatorske baterije su jedan od skupljih i osjetljivijih dijelova fotonaponskog otočnog sustava te o njima treba voditi posebnu brigu. Radni vijek kvalitetnih i dobro održavanih baterija je od 10 do 15 godina nakon čega ih treba zamijeniti novima. Ukoliko se o baterijama ne vodi dovoljno računa njihov radni vijek može se drastično smanjiti, na svega nekoliko godina. Bidirekcijski usmjerivač Sunny Island 4500 ima ugrađeni regulator punjenja baterija koji štiti baterije od pregrijavanja, predubokog pražnjenja i prevelikog punjenja. Regulator punjenja prati temperaturu, napon i struju punjenja baterija te izračunava trenutni kapacitet baterije.

Bidirekcijski usmjerivač uvijek radi u jednom od tri režima. U prvom fotonaponsko polje proizvodi više energije nego što trošila troše te se višak energije sprema u baterije. U drugom fotonaponsko polje proizvodi manje

energije nego što trošila troše te se potrebna energija nadoknađuje iz baterija ili fotonaponsko polje proizvodi jednaku količinu energije kao što trošila troše.

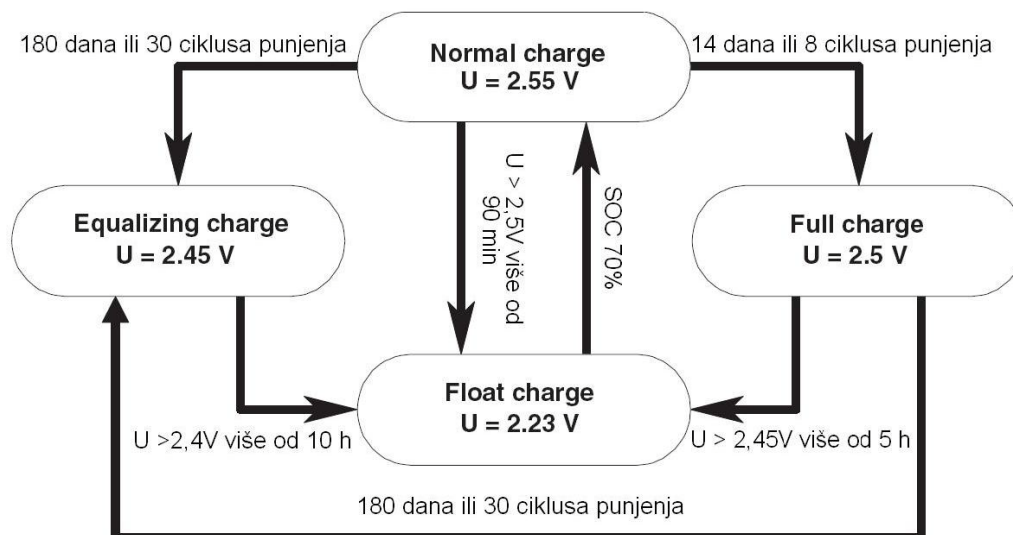
Bidirekcijski usmjerivač podržava nekoliko režima punjenja baterija. Ovisno o tipu baterija i temperaturi automatski se podešavaju naponske razine i vremena punjenja određenog režima punjenja.

Normalno punjenje (engl. *normal charge*) primjenjuje se što je češće moguće. Počinje kada kapacitet baterije padne ispod 70%. Prioritet je punjenje baterija iz dizel generatora ako je dostupan.

Potpuno punjenje (engl. *full charge*) primjenjuje se po mogućnosti najmanje jednom mjesečno. Potpuno punjenje primjenjuje se svakih 14 dana ili 8 ciklusa punjenja. Potpuno punjenje vodi do potpunog punjenja baterija te se tako izbjegava nepovratno starenje baterija zbog kristaliziranja sulfatnih soli na elektrodama baterije.

Ujednačavajuće punjenje (engl. *equalizing charge*) primjenjuje se svaka dva do tri mjeseca odnosno svakih 180 dana ili 30 ciklusa punjenja. Ovakvim punjenjem izjednačavaju se naponi na svim ćelijama baterije te se sprečava ubrzano starenje pojedinih ćelija.

Plivajuće punjenje (engl. *float charge*) primjenjuje se kada su svi ostali režimi punjenja završeni (Slika 6.1).



Slika 6.1. Status baterije i režim punjenja (Izvor: [20])

6.2. Upravljanje izmjeničnom sabirnicom

Bidirekcijski usmjerivač može se modularno kombinirati s drugim izvorima napajanja te stoga mora podržavati različite režime rada. Ovisno o strukturi cijelog sustava usmjerivač se može automatski prebacivati s jednog na drugi režim rada. Usmjerivač uvijek radi u jednom od tri režima:

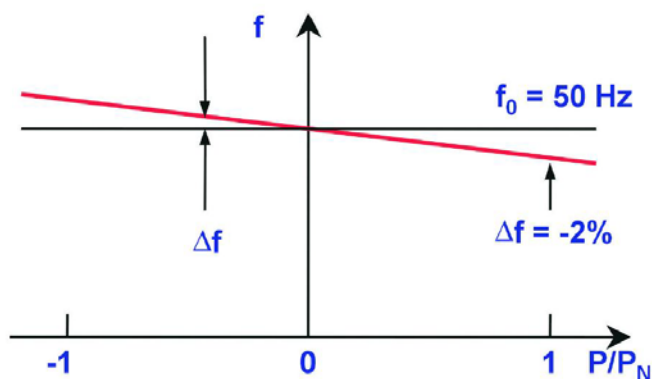
Formiranje elektroenergetske mreže (engl. *grid forming*). Usmjerivač drži napon i frekvenciju mreže konstantnom. Vrijednosti napona i frekvencije definiraju se u izborniku usmjerivača. Usmjerivač kontrolira AC sabirnicu snabdijevajući je potrebnom radnom i jalovom snagom. Svi ostali izvori napajanja i trošila priključena na AC sabirnicu moraju raditi kao komponente upravljane AC sabirnicom. U ovom režimu nije moguć paralelni rad sa elektroenergetskom mrežom ili izvorima napajanja sa sinkronim generatorima. Usmjerivač puni baterije samo u slučaju da je snaga generatora priključenih na AC sabirnicu veća od snage trošila. U slučaju da je snaga izvora napajanja manja od snage trošila usmjerivač snabdijeva AC sabirnicu snagom prazneći baterije. Upravljanje stanjem napunjenosti baterija moguće je jedino upravljanjem izvorima napajanja i trošilima.

Mrežno vezani režim rada (engl. *grid tied*). Usmjerivač se sinkronizira na napon i frekvenciju vanjskog izvora napajanja. To može biti sinkroni generator ili elektroenergetska mreža. U ovom slučaju usmjerivač ne kontrolira napon i frekvenciju na AC sabirnici, ali kontrolira veličinu struje koju vuče iz mreže za punjenje baterija na optimalni način.

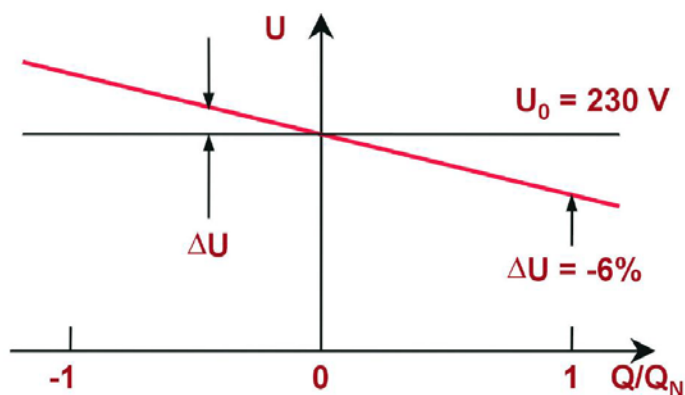
Multilateralno definiranje elektroenergetske mreže (engl. *droop mode*). *Droop-mode* režim rada dopušta paralelan rad više bidirekcijskih usmjerivača s time da svaki usmjerivač može kontrolirati AC sabirnicu. Takav sustav ponaša se kao klasična elektroenergetska mreža.

Ako je snaga na AC sabirnici veća od trenutne snage trošila usmjerivač će puniti baterije i povećavati frekvenciju mreže razmjerno stupnju napunjenosti baterija. U suprotnom ako je snaga na AC sabirnici manja od trenutne snage trošila

usmjerivač će snabdijevati AC sabirnicu snagom prazneći baterije i spuštajući frekvenciju mreže razmjerno stupnju ispražnjenosti baterija (Slika 6.2).



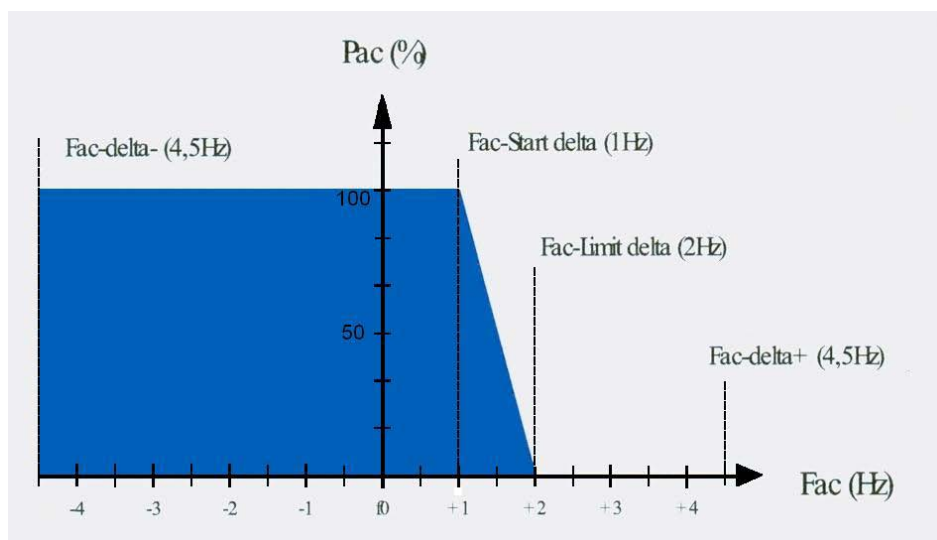
Slika 6.2. Ovisnost frekvencije o omjeru radne snage izvora napajanja i snage trošila (Izvor: [20])



Slika 6.3. Ovisnost napona o omjeru jalove snage izvora napajanja i snage trošila (Izvor: [20])

Usmjerivač će kontrolirati napon na AC sabirnici kontrolirajući jalovu struju (Slika 6.3). U ovom režimu rada na AC sabirnicu nije moguće priključivati izvore napajanja koji se ne mogu automatski sinkronizirati na mrežu. Ukoliko izvori

napajanja podržavaju automatsku sinkronizaciju na mrežu i imaju ugrađeno upravljanje snagom promjenom frekvencije elektroenergetske mreže (engl. *frequency shift power control*) (Slika 6.4) ovaj režim rada omogućuje paralelni rad većeg broja izvora napajanja bez potrebe za dodatnom komunikacijom.



Slika 6.4. Upravljanje snagom promjenom frekvencije elektroenergetske mreže

(Izvor: [20])

Ukoliko frekvencija elektroenergetske mreže poraste iznad 51 Hz izmjenjivač smanjuje izlaznu snagu. Na frekvenciji 52 Hz izmjenjivač se isključuje iz mreže (Slika 6.4).

6.3. Bidirekcijski usmjerivač SMA Sunny Island SI 4500

Sunny Island 4500 je bidirekcijski usmjerivač firme SMA. Pogodan je za primjenu u otočnim sustavima snage od 3 do 54 kW, kako jednofaznim tako i trofaznim. Dobro podnosi kratkoročna preopterećenja. Ima ugrađen napredan regulator punjenja akumulatorskih baterija, sustav za upravljanje dizel generatorima i kogeneracijskim uređajima te trošilima kako bi se baterije optimalno iskoristavale i njihov radni vijek maksimalno produžio. Tehničke karakteristike Sunny Islanda 4500 prikazane su u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Tehničke karakteristike Sunny Island 4500 (Izvor: [18,19])

Izlazne karakteristike		
AC napon (prilagodljiv)	U_{AC}	230 V (200-260V)
Frekvencija mreže (prilagodljiva)	f	50 ili 60 Hz (40-70 Hz)
Kontinuirana izlazna AC snaga	P_{nom}	3700 / 3300 W
Kontinuirana izlazna AC snaga na 30/5/1 min	$P_{30}/P_5/P_1$	4500/5200/6000 W
Nazivna AC struja	$I_{AC,nom}$	16 A
Harmonička distorzija izlaznog napona	K_{VAC}	< 3%
Faktor snage	$\cos \varphi$	-1 do +1
Ulazne karakteristike		
Ulazni napon	$U_{AC,ext}$	230 V (150-260 V)
Ulazna frekvencija	f_{ext}	50 ili 60 Hz (40 -70 Hz)
Maksimalna ulazna struja	$I_{AC,ext}$	0 – 500 A (ovisno o ožičenju)
Maksimalna ulazna snaga	$P_{AC,ext}$	ovisno o ožičenju

Baterije		
Napon baterija	U_{Bat}	48-60 V (41-81 V)
Maksimalna struja punjenja baterija	$I_{\text{Bat, max}}$	125 A
Kontinuirana struja punjenja baterija	$I_{\text{Bat, nom}}$	60 A
Kapacitet baterije	C_{Bat}	100 – 10000 Ah
Regulator punjenja		IU ₀ U s automatskim punim i izjednačavajućim punjenjem

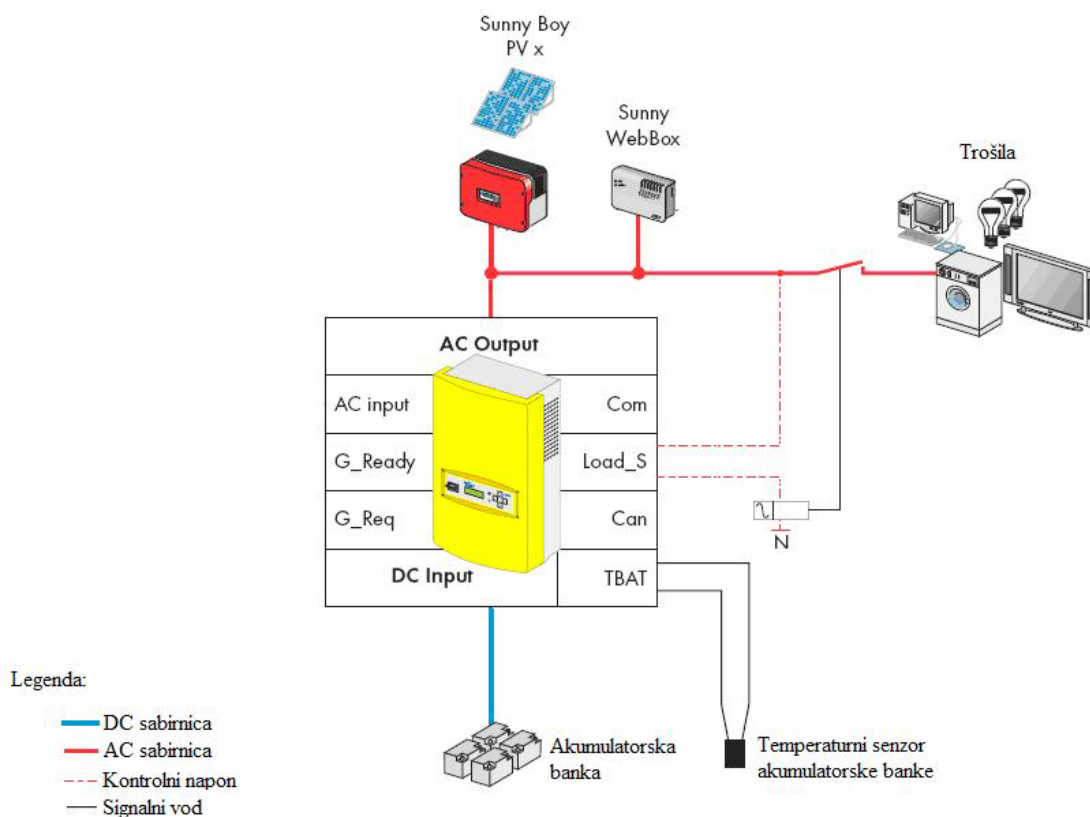
Učinkovitost		
Učinkovitost usmjerivača	η_{st}	> 91%
Vlastita potrošnja(standby)		60 W (< 9W)
Maks. učinkovitost izmjenjivača		93,2%

Zaštita		kratki spoj, preopterećenje, pregrijavanje
----------------	--	--

Mehanički podaci		
Širina/visina /dubina		510 / 560 / 270 mm
Težina		45 kg

7. FOTONAPONSKI OTOČNI SUSTAV S IZMJENIČNOM SABIRNICOM

Jezgra otočnog sustava je bidirekcijski usmjerivač (Slika 7.1). On upravlja izvorima napajanja, trošilima, baterijama te naponom i frekvencijom AC sabirnice.



Slika 7.1. Otočni sustav s izmjeničnom sabirnicom (Izvor: [14])

Izvori napajanja i trošila povezani su izmjeničnom sabirnicom. Amplituda i frekvencija napona na sabirnici odgovara specifikacijama elektroenergetske mreže, 230 V i 50 Hz. Fotonaponsko polje generira istosmjerni napon te ga je potrebno pretvoriti u izmjenični. Pretvorbu istosmjernog napona u izmjenični obavlja izmjenjivač.

Prednosti korištenja AC sabirnica je mogućnost upotrebe široko dostupnih potrošača. Na AC sabirnicu možemo uključivati cijeli niz dodatnih AC izvora napona koji su široko dostupni i standardizirani kao što su dizel agregati, elektroenergetska mreža, izmjenjivači, vjetroagregati, hidroagregati i kogeneracijska postrojenja. Instalacija izmjeničnih mreža je u struci u uobičajena, a distribucija energije na veće udaljenosti je jednostavnija. Učinkovitost koncepta s AC sabirnicom je minimalno 10% veća od sustava s DC sabirnicom [10].

Ovdje modelirani otočni sustav sastoji se od 22 monokristalična fotonaponska modula HT-135 ukupne snage 2970 W, instaliranih pod optimalnim kutom od 30° , izmjenjivača Sunny Boy 2500 nominalne snage 2300 W, bidirekcijskog usmjerivača Sunny Island 4500 nominalne snage 3300 W, akumulatorske banke od 4 baterije Sonnenschein S12 / 130 A ukupnog kapaciteta 520 Ah te trošila. Treba naglasiti da se ovdje radi o pokaznom sustavu namijenjenom edukaciji učenika Graditeljske škole u Čakovcu u sklopu projekta REVETIS te realna trošila nisu predviđena.



Slika 7.2. Fotonaponsko polje snage 2970 Wp, (Izvor: [Graditeljska škola Čakovec])



Slika 7.3 Bidirekcijski usmjerivač SI 4500 (žuto), izmjenjivač SB 2500 (crveno), akumulatorska banka (donji lijevi ugao), (Izvor: [Graditeljska škola Čakovec])

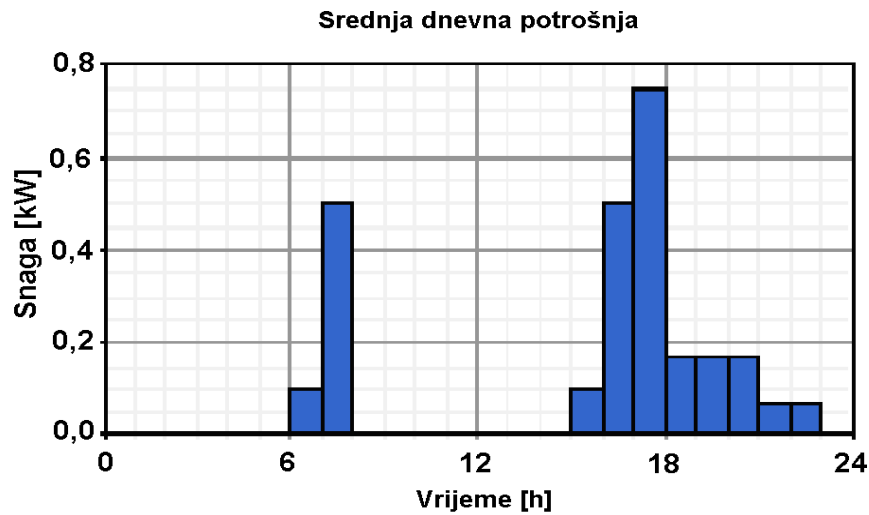
7.1. Projektiranje otočnog fotonaponskog sustava

Projektiranje otočnog fotonaponskog sustava je složenije nego projektiranje fotonaponskog sustava priključenog na elektroenergetsku mrežu. Ovim primjerom pokazati ćemo samo osnovne smjernice u projektiranju otočnog sustava. Kod otočnih sustava cilj je omogućiti kontinuirano napajanje svih trošila kada je to potrebno. Kako bi optimizirati sustav i smanjiti trošak investicije vrlo je važno znati snagu trošila te vremenski okvir rada trošila.

Tablica 7.1. Prosječna dnevna potrošnja

Vrijeme	Snaga [kW]	Vrijeme	Snaga [kW]
0:00 – 01:00	0,00	12:00 – 13:00	0,00
1:00 – 02:00	0,00	13:00 – 14:00	0,00
2:00 – 03:00	0,00	14:00 – 15:00	0,00
3:00 – 04:00	0,00	15:00 – 16:00	0,10
4:00 – 05:00	0,00	16:00 – 17:00	0,50
5:00 – 06:00	0,00	17:00 – 18:00	0,75
6:00 – 07:00	0,10	18:00 – 19:00	0,17
7:00 – 08:00	0,50	19:00 – 20:00	0,17
8:00 – 9:00	0,00	20:00 – 21:00	0,17
9:00 – 10:00	0,00	21:00 – 22:00	0,07
10:00 – 11:00	0,00	22:00 – 23:00	0,07
11:00 – 12:00	0,00	23:00 – 00:00	0,00

Dnevna potrošnja energije $E_{Dan} = 2,60$ kWh.



Slika 7.4. Dijagram srednje dnevne potrošnje električne energije (Izvor: [Graditeljska škola Čakovec])

Uz poznatu srednju dnevnu potrošnju u sustavu i željenu autonomiju sustava, možemo izračunati potreban kapacitet akumulatorske banke. Autonomija sustava T_a se iskazuje kao broj dana kada sustav može namiriti sve potrebe trošila uz oblačno vrijeme. Pretpostavljamo autonomiju od 2 dana:

$$C_{Bat,i} = T_a \times E_{Dan} = 2 \times 2,60 = 5,2 \text{ kWh} . \quad (10)$$

Kod proračuna kapaciteta baterija mora se uzeti u obzir učinkovitost bidirekcijskog usmjerivača koja iznosi oko 90% te učinkovitost ciklusa punjenja baterija koja iznosi oko 92%. Dubokim pražnjenjem baterija skraćujemo njihov radni vijek (Slika 4.1) pa je baterije potrebno predimenzionirati. Mi ćemo ih predimenzionirati za 50% odnosno $k = 0,5$.

$$C_{Bat,r} = \frac{C_{Bat,i}}{\eta_{SI} k} = \frac{5,2}{0,9 \cdot 0,92 \cdot 0,5} = 12,56 \text{ kWh} \quad (11)$$

Uzimamo 8 baterija kapaciteta 130 Ah odnosno ukupnog kapaciteta 12,48 kWh.

Uz poznat kapacitet akumulatorske banke moramo još odrediti veličinu fotonaponskog polja. Veličinu polja određuje količina ukupne dnevne Sunčeve ozračenosti. Sustav projektiramo za najgori mogući slučaj, za mjesec prosinac kada je Sunčevo ozračenje najmanje. Srednja dnevna ozračenost plohe pod kutom od 30° za mjesec prosinac u Čakovcu iznosi $I_p = 1,24 \text{ kWh/m}^2$ [1]. Učinkovitost modula je 13,5 % [13]. U proračun još moramo uključiti učinkovitost izmjenjivača (93,2%) i bidirekcijskog usmjerivača (91%). Pretpostavimo da se 40% dobivene električne energije utroši izravno, a 60% se sprema u baterije.

Izračunat ćemo potreban broj modula da se namire dnevne potrebe za električnom energijom. Dnevna potrošnja električne energije je $E_{Dan} = 2,60 \text{ kWh}$.

Izravna potrošnja 40% energije:

$$E_{Dan,40\%} = 0,4 \cdot 2,6 = 1,04 \text{ kWh} \quad (12)$$

Učinkovitost sustava:

- modul: $\eta_m = 13,5\%$

- izmjenjivač: $\eta_{SB} = 93,2\%$

Potrebna površina modula:

$$S_d = \frac{E_{Dan,40\%}}{\eta_m \cdot \eta_{SB} \cdot I_p} = \frac{1,04}{0,135 \cdot 0,932 \cdot 1,24} = 6,67 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Baterije punimo sa 60% energije:

$$E_{Dan,40\%} = 0,6 \cdot 2,6 = 1,56 \text{ kWh} \quad (14)$$

Učinkovitost sustava:

- modul: $\eta_m = 13,5\%$
- izmjenjivač: $\eta_{SB} = 93,2\%$
- bidirekcijski izmjenjivač: $\eta_{SI} = 90\%$
- baterije: $\eta_{Bat} = 92\%$

Potrebna površina modula:

$$S_{Bat} = \frac{E_{Dan,60\%}}{\eta_m \cdot \eta_{SB} \cdot \eta_{SI} \cdot \eta_{Bat} \cdot I_p} = \frac{1,56}{0,135 \cdot 0,932 \cdot 0,9 \cdot 0,92 \cdot 1,24} = 12,08 \text{ m}^2 \quad (15)$$

Ukupna površina modula iznosi:

$$S = S_d + S_{Bat} = 18,75 \text{ m}^2. \quad (16)$$

Površina jednog modula iznosi 1 m², dakle potrebno je minimalno 19 modula snage 135 Wp pa je minimalna snaga sustava 2565 Wp. Kako bi optimalno koristili baterije možemo predimenzionirati fotonaponsko polje, a prema [16] preporuča se predimenzionirati polje do 200% nominalne snage bidirekcijskog usmjerivača. S obzirom na količinu godišnje ozračenosti na lokaciji u Čakovcu dovoljno je predimenzionirati sustav 100%, što daje snagu fotonaponskog polja od 5 kWp da bi ukupna raspoloživosti električne energije bila oko 98%. Na konkretnom sustavu instaliranom u Graditeljskoj školi Čakovec fotonaponsko polje je predimenzionirano svega 15%.

Izmjenjivač odabiremo prema snazi fotonaponskog polja pa izlazna snaga fotonaponskog polja rijetko jednaka maksimalnoj snazi često se radi smanjenja troškova odabire izmjenjivač manje snage od snage fotonaponskog polja. Prihvatljiv je odabir izmjenjivača čija nominalna snaga iznosi od 90 do 100% snage fotonaponskog polja. Izmjenjivač ima ugrađenu zaštitu od preopterećenja, no ne i zaštitu od prenapona pa je potrebno posvetiti posebnu pažnju u projektiranju izlaznog napona fotonaponskog polja.

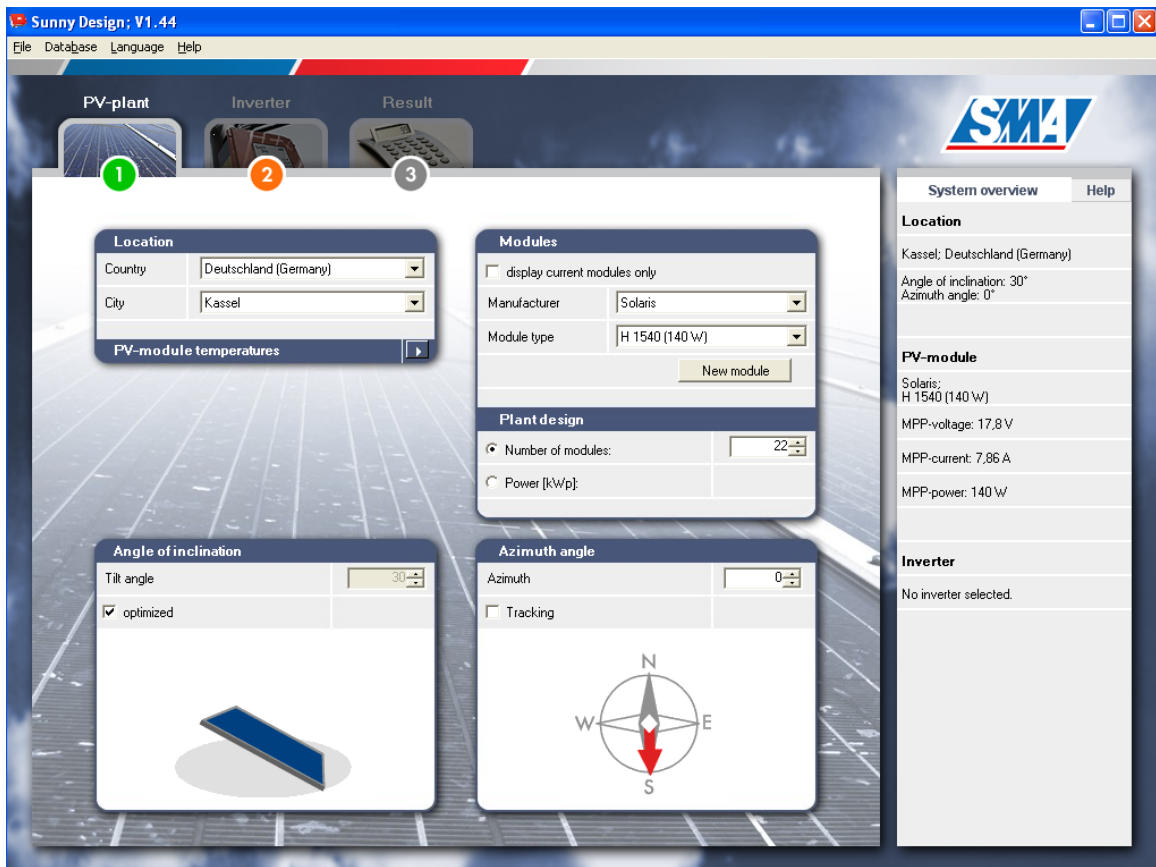
7.2. Konfiguracija fotonaponskog polja

Nakon što odredimo snagu fotonaponskog polja, odnosno tip i broj fotonaponskih modula te odgovarajuću vrstu i broj izmjenjivača moramo odrediti konfiguraciju fotonaponskog polja odnosno broj međusobno serijski spojenih modula (*strings*) i broj međusobno paralelno spojenih *string*-ova. Ukoliko koristimo izmjenjivače proizvođača SMA najjednostavnije je koristiti njihov programski alat *Sunny Design* koji možemo besplatno preuzeti sa njihovih Internet stranica [www.sma.com]. Programski alat u tri koraka omogućava na jedan vrlo brz i jednostavan način projektiranje fotonaponskog polja i izmjenjivača s proračunom očekivane godišnje proizvodnje električne energije. *Sunny Design* ima unesenu meteorološku bazu podataka za veće svjetske gradove na području kojih je fotonaponsko tržište razvijeno, bazu podataka fotonaponskih modula svih većih proizvođača te bazu podataka svih njihovih izmjenjivača. Baze podataka se sa širenjem tržišta nadopunjuju svakih nekoliko mjeseci. Nedostatak *Sunny Designa* je što ne dozvoljava unošenje vlastitih podataka, ne omogućuje proračun utjecaja zasjenjenja i ne omogućava modeliranje otočnih sustava.

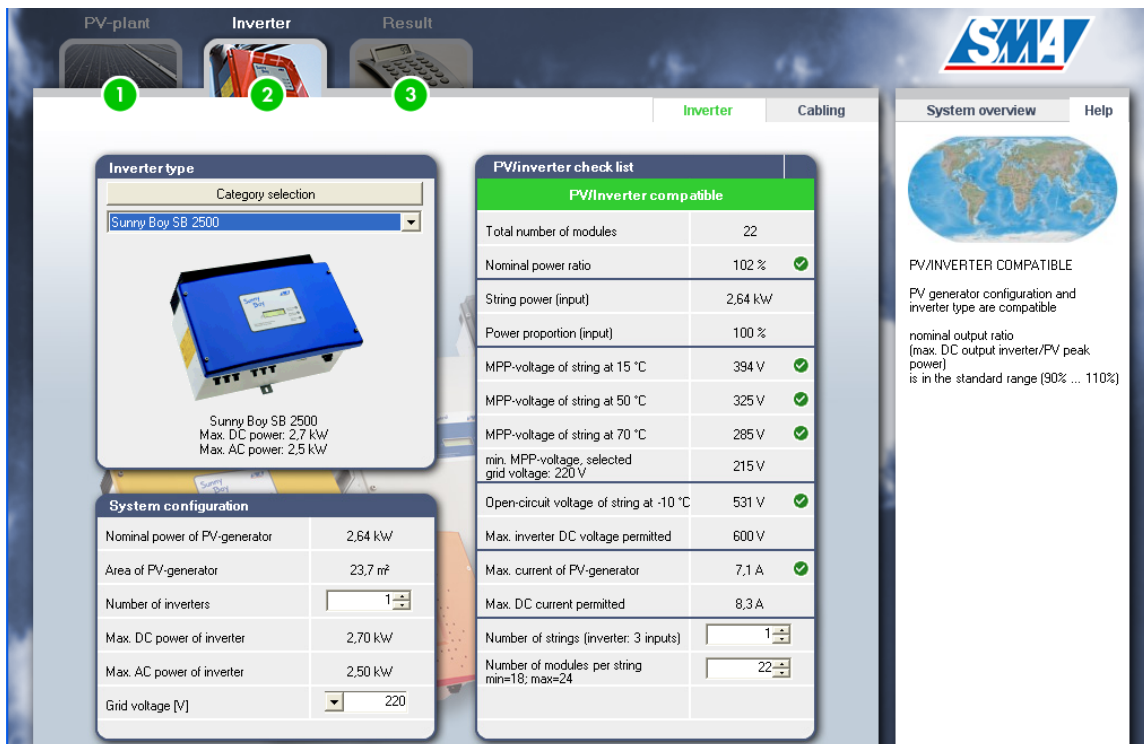
U prvom koraku odabiremo lokaciju, tip modula, veličinu fotonaponskog polja (snagu ili broj modula) te orijentaciju fotonaponskog polja (Slika 7.5).

Kada odaberemo sve potrebne parametre pozadina broja dva promijeni boju iz narančaste u zelenu i možemo prijeći na slijedeći korak odnosno odabir izmjenjivača.

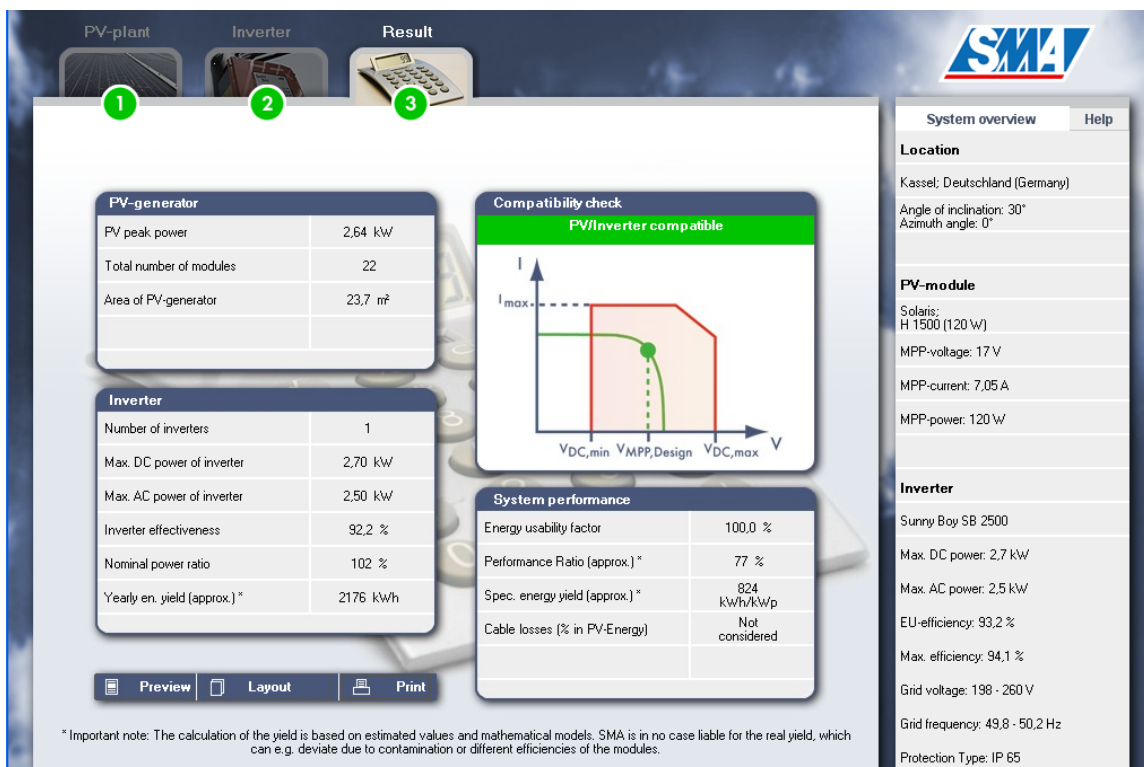
U drugom koraku odabiremo tip izmjenjivača, broj izmjenjivača i konfiguraciju fotonaponskog polja (Slika 7.6). Ukoliko su nam sve kvačice uz parametre zelene sustav je pravilno projektiran i možemo prijeći na posljednji korak odnosno prikaz rezultata (Slika 7.7).



Slika 7.5. Odabir lokacije, tipa modula, veličine i orijentacije fotonaponskog polja



Slika 7.6. Odabir izmjenjivača, broj izmjenjivača i konfiguracije fotonaponskog polja

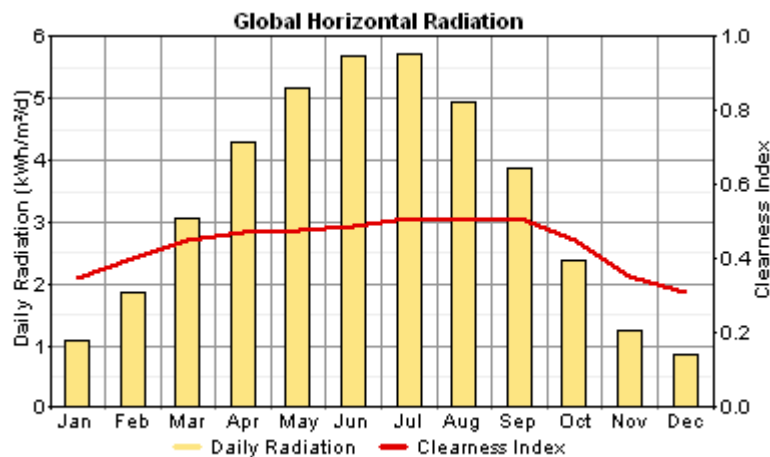


Slika 7.5. Prikaz konačnih parametara fotonaponskog polja

7.3. Modeliranje otočnog fotonaponskog sustava

Model otočnog fotonaponskog sustava napraviti ćemo u programskom alatu Homer. Homer omogućava modeliranje obnovljivih i distribuiranih izvora energije. Glavne prednosti ovog besplatnog programskog alata pred sličnim komercijalnim alatima su brza optimizacija sustava, mogućnost modeliranja hibridnih sustava i jednostavnost. Nedostatak mu je što nema internu bazu meteoroloških podataka, usmjerivača i izmjenjivača.

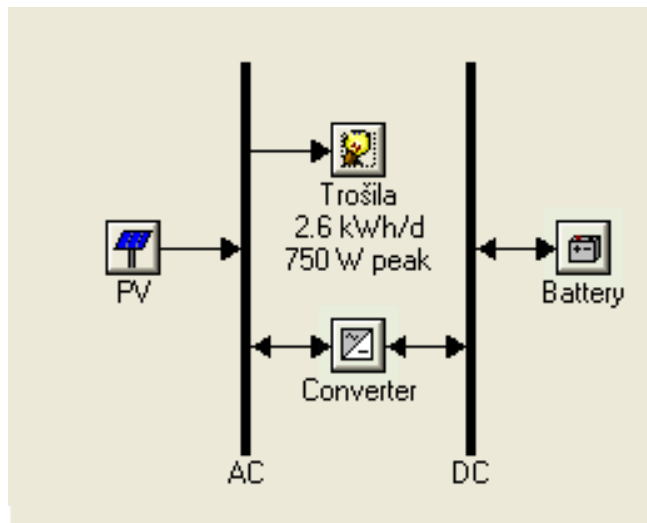
Prvi korak u modeliranju je unos meteoroloških podataka iz tablice 2.1 koji su pomoću dijagrama prikazani na slici 7.7



Slika 7.7. Srednja dnevna ozračenost vodoravne plohe (Izvor: [5])

U sljedećem koraku definiramo konfiguraciju modela (Slika 7.8) te unosimo sve parametre sustava:

- snaga fotonaponskog polja,
- kapacitet akumulatorske banke,
- snaga i efikasnost izmjenjivača,
- dijagram srednje dnevne potrošnje.

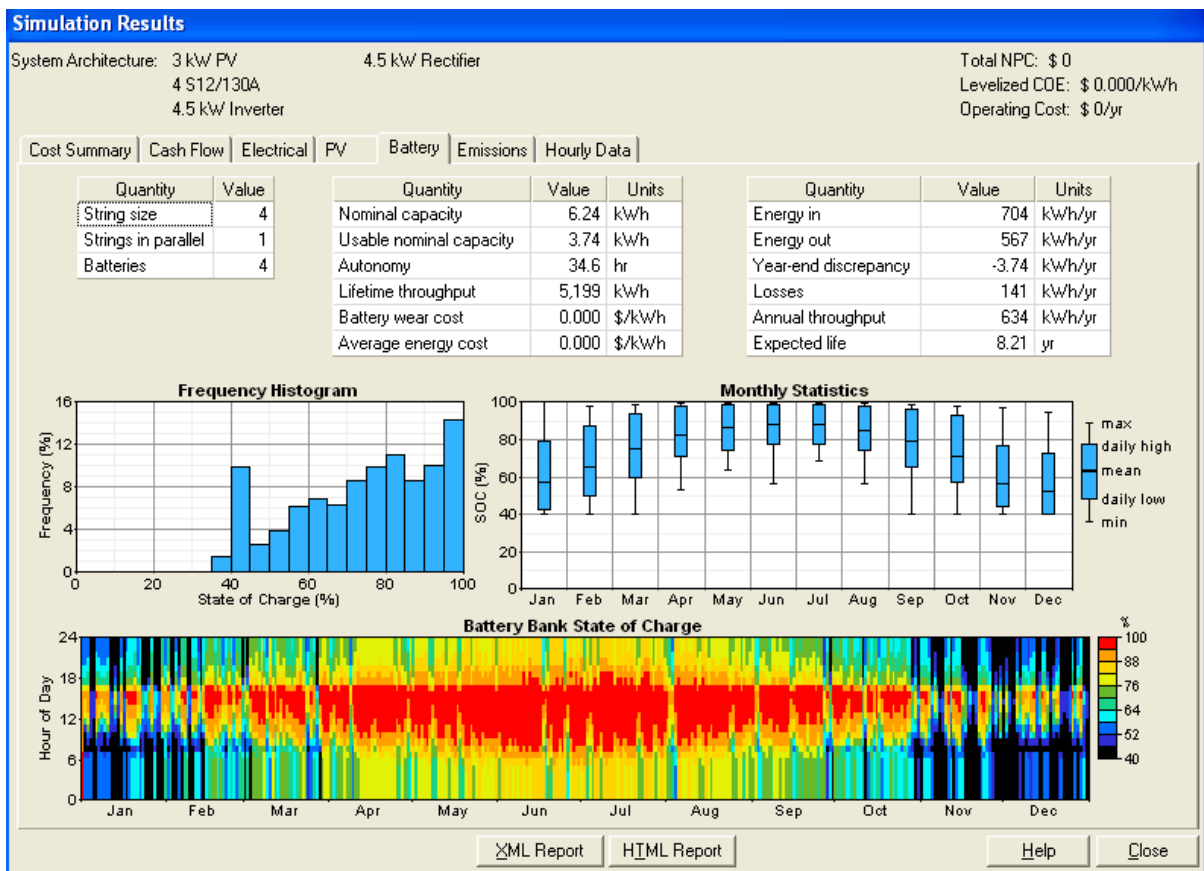


Slika 7.8 . Topologija modela sustava

7.4. Analiza rezultata simulacije

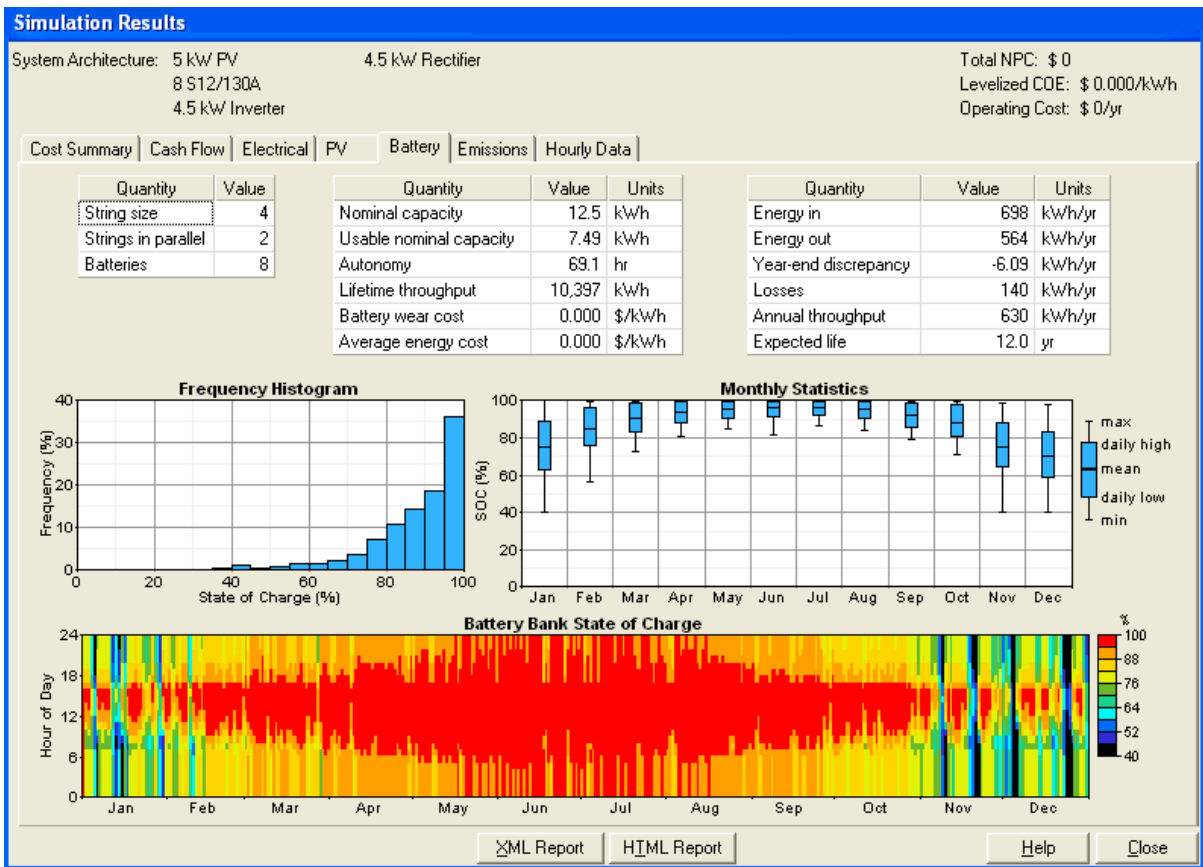
U Homeru smo napravili simulacije za dva modela fotonaponskih otočnih sustava. Prvi model napravili smo za 3 kWp, dok smo drugi model napravili za 5 kWp sustav proračunat u poglavlju 7.1.

Na slici 7.7. vidimo rezultate simulacije modela s fotonaponskim poljem snage 3 kWp i kapacitetom akumulatorske banke 6,24 kWh koji odgovara otočnom fotonaponskom sustavu instaliranom u Graditeljskoj školi Čakovec. Za danu dnevnu potrošnju sustav je dobro projektiran za godišnje razdoblje od travnja do listopada. Tijekom zimskih mjeseci dolazi do pomanjkanja raspoložive električne energije. U ovom slučaju potrebno je povećati autonomiju sustava tj. povećati kapacitet akumulatorske banke i povećati snagu fotonaponskog polja da bi i kod smanjene količine ozračenosti prikupili dovoljno energije. Treba naglasiti da je taj sustav namijenjen edukaciji i projektiran je na način da bude cjenovno što povoljniji, a opet da ima punu funkcionalnost otočnog fotonaponskog sustava. Zbog jačeg pražnjenja baterija tijekom zimskih mjeseci očekivani radni vijek baterija se smanjio s 12 na 8 godina.



Slika 7.9. Rezultati simulacije modela s fotonaponskim poljem snage 3 kWp i kapacitetom akumulatorske banke 6,24 kWh

Unatoč povećanju snage fotonaponskog polja i kapaciteta akumulatorske banke rezultati simulacije modela pokazuju (slika 7.8) da je još uvijek nemamo sto postotnu raspoloživost električne energije. Ovisno od sustava do sustava trebamo vidjeti da li je sa ekonomskog stajališta optimalno daljnje ulaganje u baterije i fotonaponsko polje ili korištenje dizel agregata odnosno imati hibridni sustav ili jednostavno smanjiti potrošnju tijekom zimskih mjeseci što bi odgovaralo primjeni na nekim našim otocima jer je zimi zbog malog broja lokalnog stanovništva potrošnja relativno mala dok je za vrijeme turističke sezone osjetno povećana.

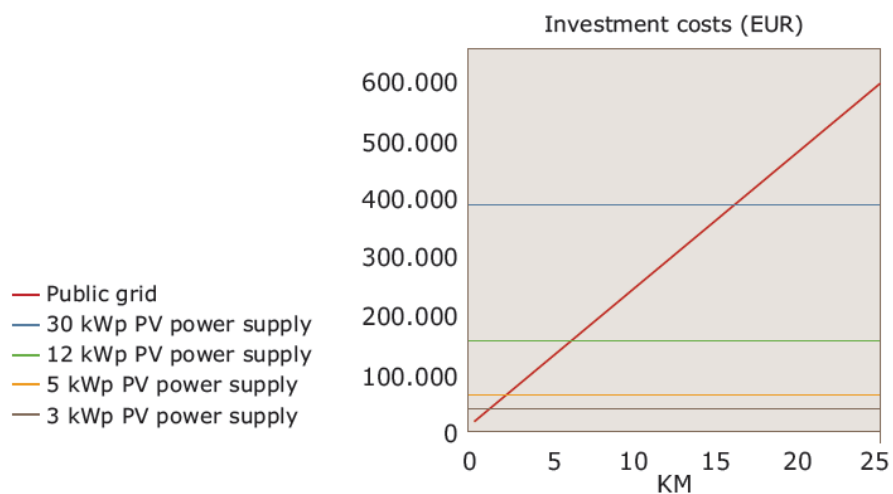


Slika 7.10. Rezultati simulacije modela s fotonaponskim poljem snage 5 kWp

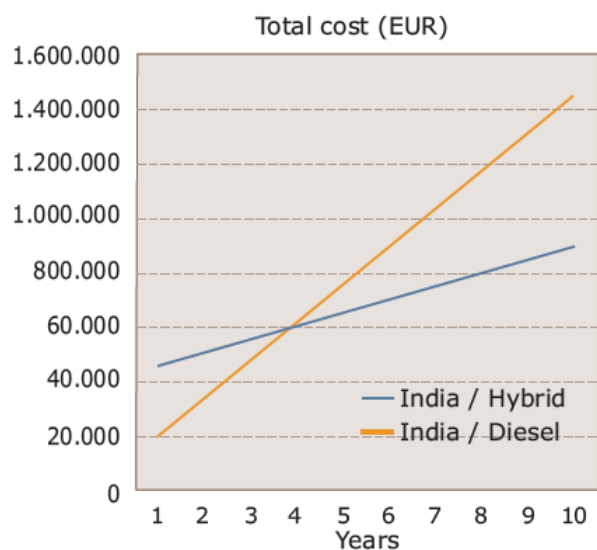
i kapacitetom akumulatorske banke 12,5 kWh

7.5. Ekonomska analiza otočnog fotonaponskog sustava

Uvriježeno je mišljenje, kako u javnosti tako i u stručnim krugovima, da zbog visoke početne investicije, usprkos velikom rastu cijena energenata otočni fotonaponski sustavi nisu isplativi. Pokazat ćemo da je to samo djelomično točno odnosno da vrijedi za slučaj kada u neposrednoj blizini imamo dostupnu stabilnu elektroenergetsku mrežu, u suprotnom što smo udaljeniji od elektroenergetske mreže fotonaponski otočni sustavi su sve ekonomičnija opcija, osim toga fotonaponski sustavi su za sad ekološki najprihvatljiviji izvori električne energije. Hibridni fotonaponski sustavi najčešće su kombinacija fotonapona i dizel generatora, a nešto rjeđe vjetroagregata i kogeneracijskih postrojenja. Jedan od interesantnijih hibridnih otočnih sustava su nalazi se na otoku Kythnos, Grčka s 100 kWp fotonaponskim poljem, 200 kW dizel generatorom, 100 kW vjetroagregatom i kapacitetom baterija 600 kWh [22]. Studije [21] su pokazale da je cjenovni optimum hibridni sustav, odnosno kombinacija fotonaponskog sustava i dizel generatora, no u nekim zemljama zbog izrazito slabe kvalitete dizela i potrebe za održavanjem primjena dizel generatora je značajno otežana. Optimalna opcija je u tom slučaju fotonaponski sustav ili ako ima dovoljno vjetro potencijala korištenje hibridnog sustava odnosno kombinacije fotonapona i vjetroagregata. Zbog relativno kratkog radnog vijeka od maksimalno 10 do 12 godina i visoke cijene najslabija točka otočnog fotonaponskog sustava je baterija. Ukoliko u kombinaciji s fotonaponskim sustavom koristimo dizel generator potreba za veličinom akumulatorske banke se smanjuje, a ujedno se generator koristi optimalno.



Slika 7.11. Usporedba troškova investicije izgradnje fotonaponskog elektroenergetskog sustava za pojedine snage u ovisnosti o udaljenosti od elektroenergetske mreže (Izvor: [21]).



Location: India
Application: Village power supply
System configuration PV/wind Hybrid: 100kVA hybrid inverter; 40kWp PV generator; 10kW wind generator; 276kWh battery
System configuration diesel: 100kVA diesel generator

Slika 7.12. Ekonomska analiza dizel generatora i fotonaponskog hibridnog sustava (Izvor: [21]).

U navedenim studijama uzeta je u obzir udaljenost potrošača od elektroenergetske mreže, tip terena preko kojeg se gradi elektroenergetska mreža, snaga potrošača, cijena instalacije elektroenergetske mreže, cijena električne energije i troškovi održavanja sustava. Iz grafova se jasno vidi da je u nekim slučajevima korištenje otočnih fotonaponskih sustava ekonomski opravdano.

Tablica 7.2. Cijena otočnog fotonaponskog sustava [16]

	jedinična cijena po vatu instalirane snage
Fotonaponski modul	3 – 4 €/W
Fotonaponski izmjenjivač	0,3 – 0,5 €/W
Fotonaponski usmjerivač	0,3- 0,5 €/W
Olovna akumulatorska baterija	300 €/kWh
Projektiranje	15% investicije
El oprema i montaža	25% investicije
Ukupno	6 – 10 €/W

Ove cijene su navedene kao orijentacijske i mogu značajnije odstupati od slučaja do slučaja.

8. ZAKLJUČAK

Otočni fotonaponski sustav je na trenutnoj tehnološkoj razini sposoban samostalno uspostaviti i regulirati elektroenergetsku mrežu nazivne snage do 100 kW s odgovarajućim naponom i frekvencijom, 230 V kod jednofaznih ili 400 V kod trofaznih sustava. Naprednim upravljanjem baterijskom bankom može se postići servisni period sustava duži od 12 godina dok je ukupni radni vijek sustava preko 30 godina.

Usprkos velikom povećanju proizvodnje u posljednjih nekoliko godina nije došlo do značajnijeg pada cijene sunčanih ćelija te je fotonaponska tehnologija još uvijek relativno skupa u odnosu na konvencionalne izvore energije. Daljnjim usavršavanjem tehnologije i povećanjem proizvodnje sunčanih ćelija očekuje se nastavak pada cijene kWh dobivenog iz Sunčeve energije. Trenutni opći rast cijena energije doprinijet će konkurentnosti fotonaponske industrije.

Otočni fotonaponski sustavi su već sad našli svoje mjesto u dvije važne primjene: osiguravanje napajanja u područjima bez pristupa na javnu elektroenergetsku mrežu i osiguravanje besprekidnog napajanja u umreženim sustavima. Samo u EU u prošloj godini bilo je instalirano 8,4 MWp otočnih fotonaponskih sustava s time da se ovakvi sustavi najviše instaliraju u područjima Afrike, Azije i Južne Amerike gdje je javna elektroenergetska mreža slabo razvijena [21].

Projektiranje otočnog fotonaponskog sustava zahtjeva dobro poznavanje fotonaponske tehnologije, energetske elektronike i klimatskih specifičnosti same lokacije. Glavni problem kod optimiziranja otočnih fotonaponskih sustava u našem podneblju su razlike u ozračenosti između zimskih i ljetnih mjeseci do sedam puta. To poskupljuje cijeli projekt jer su potrebna sedam puta veća ulaganja u fotonaponske module koji su najskuplji dio sustava. Dosadašnja iskustva i analize pokazuju da je, ukoliko je to moguće, još uvijek optimalno koristiti hibridni fotonaponski sustav odnosno kombinaciju fotonapona i dizel generatora jer time dobivamo potpunu autonomiju, optimalno korištenje dizel generatora i akumulatorske banke te smanjenje ukupne početne investicije.

LITERATURA

1. M. Schmela, Q-Cells is new No.1, Photon International 3(2008)
2. A. Jager-Waldau, PV status report 2007, Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics, JRC European Commission, EUR 23018 EN- 2007
3. EurObserv'ER, Photovoltaic Energy Barometer – travanj 2008
4. HSUSE, Solarna tehnologija 7(2008)
5. Z. Matic, Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2007
6. L.L. Kazmerski, National Renewable Energy Laboratory (USA), URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:PVeff\(rev110707\)d.png](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:PVeff(rev110707)d.png)
7. P. Kulišić, J. Vuletin, I. Zulim, Sunčane ćelije, Školska knjiga, Zagreb, 1994
8. P. Biljanović, Poluvodički Elektronički elementi, Školska knjiga, Zagreb, 2004
9. Planning and Installing Photovoltaic Systems, The German Solar Energy Society, James & James/ Earthscan, United Kingdom, 2005
10. S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, R. Corkish, Applied Photovoltaics, Earthscan, United Kingdom, 2007.
11. International Standard, IEC 61215 Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval, Edition 2.0, IEC, 2005.
12. International Standard, IEC 61646, Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval, Edition 1.0, IEC, 1996
13. Tehničke specifikacije fotonaponskog modula HT-135, Solaris, 2008.
14. SMA Sunny Island 3324/4248 Installation Guide, SMA, 2008.
15. Specifications Sonnenschein Solar series Batteries, 2008.
16. SMA Solar Academy 2008, priručnik
17. T. Brodić, Osnove energetske elektronike, Dio 2: Energetski poluvodički pretvarači, Zigo-Rijeka, 2005.
18. Katalog Sunny Boy 2007/2008, SMA, 2008.

19. Sunny Island technical data, SMA, 2008.
20. Sunny Island 4500 Installation & Operating Instructions, 2008.
21. Alliance for Rural Electrification, Hybrid power systems based on renewable energies, 2007.
22. D. Lenardic, URL: <http://www.pvresources.com/en/hybrid.php>