

PRIMERJAVA IZPLENA SONČNIH ELEKTRARN S SONČNIMI MODULI RAZLIČNIH TIPOV TER PRAKTIČNE IZKUŠNJE Z OBRATOVANJEM LE-TEH

Bojan VOVČKO, Aleš ŠTRICELJ

POVZETEK

Namen tega članka je prikazati praktične izkušnje in rezultate obratovanja sončnih elektrarn različnih tehnologij in izvedb. V predstavljenem članku prikazujemo primerjavo energijskega izplena tankoplastnih amorfnih ter monokristalnih sončnih modulov malih fotovoltaičnih elektrarn (MFE) TE Brestanica pri različnih orientacijah in majhnih naklonih. V prvih dveh poglavjih podajamo podatke o sončnih elektrarnah MFE TEB 1-3, v tretjem poglavju pa je podana primerjava energijskega izplena tankoplastnih amorfnih in monokristalnih sončnih modulov na podlagi analize obratovanja MFE TEB 1-3. V zadnjem poglavju podajamo sklep oziroma predloge za bodoče investitorje, ki izhajajo iz predhodnih ugotovitev.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to demonstrate practical experiences and results of operations of the various solar power technologies and implementations. In this paper we present a comparison of the energy yield of thin-film amorphous and monocrystalline solar modules, for the small solar power stations (MFE) of TE Brestanica at different orientations and small angles. In the first two chapters we present data for the solar power stations MFE TEB 1-3, in the third chapter we present a comparison of the energy yield of thin-film amorphous and monocrystalline solar modules based on the analysis of operation MFE TEB 1-3. In the last chapter we present a decision and proposals for the future investors, resulting from the preliminary findings.

1. UVOD

Izkoriščanje OVE (obnovljivih virov energije) za proizvodnjo električne energije postaja v današnjem svetu iz dneva v dan pomembnejše, saj so zaloge fosilnih goriv omejene, poleg tega pa izgorevanje fosilnih goriv povzroča tudi obremenjevanje okolja z izpusti velikih količin CO₂ ter ostalih škodljivih snovi. Pri proizvodnji električne energije iz OVE je vpliv na okolje lahko bistveno manjši, poleg tega pa so količine OVE praktično neomejene, še posebno, ko govorimo o energiji sonca. Le-ta se zelo malo izkorišča, razlog za to je pripisati predvsem dragi tehnologiji za pretvarjanje sončne energije v električno, vendar je v

zadnjih letih tudi na tem področju opazen napredek, saj se je tehnologija za pretvarjanje energije sonca v električno energijo bistveno pocenila.

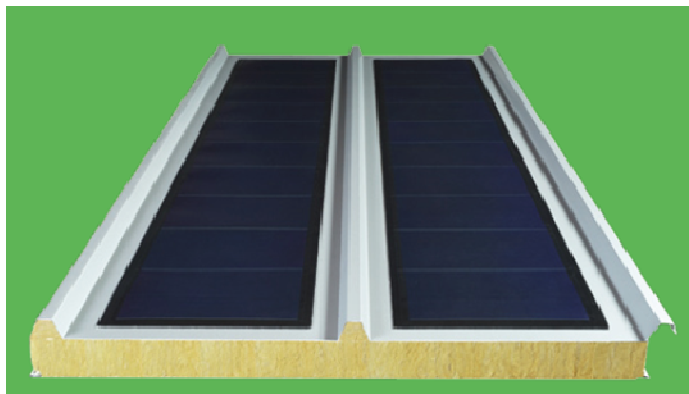
Tudi v podjetju Termoelektrarna Brestanica se dobro zavedamo pomena okolju prijazne proizvodnje električne energije, zato smo v zadnjih nekaj letih precej svojih aktivnosti usmerili v področje OVE. V podjetju smo že od samega začetka aktivno udeleženi pri izgradnji, obratovanju in vzdrževanju objektov hidroelektrarn na spodnji Savi, v letu 2008 pa smo se začeli aktivno ukvarjati tudi z izgradnjo sončnih elektrarn. V februarju leta 2009 smo v poskusno obratovanje predali prvo sončno elektrarno MFE TEB 1, nazivne moči 38 kW, konec meseca marca 2010 smo zgradili in predali v poskusno obratovanje še dve novi sončni elektrarni; avtomobilsko nadstrešnico z integrirano sončno elektrarno MFE TEB 2, ki ima nazivno moč 82 kW ter sončno elektrarno MFE TEB 3, zgrajeno na strehi industrijskega objekta GPO 2, ki ima nazivno moč 50 kW. Skupna inštalirana moč sončnih elektrarn v TE Brestanica tako znaša 170 kW. Za izgradnjo avtomobilске nadstrešnice z integrirano sončno elektrarno MFE TEB 2 smo v letu 2010 s strani Agencije za energijo pridobili status integrirane sončne elektrarne (višja obratovalna podpora), poleg tega pa smo za izvedbo le-te v letu 2011 s strani Območne zbornice GZS za področje Posavja prejeli tudi bronasto priznanje za najboljše inovacije leta 2010. Pri projektih izgradenj sončnih elektrarn smo zasledovali predvsem vizijo umestitve le-teh v okolje Termoelektrarne Brestanica na čim manj moteč in uporaben način (nismo strmeli k idealni postavitvi sončnih modulov za vsako ceno, kakor je danes to pogosto v navadi), poleg tega pa je pri snovanju elektrarn prevladoval precej eksperimentalen duh. V času izgradnje samih elektrarn smo poskušali uporabiti čim več različnih materialov in načinov izvedbe sončnih elektrarn z namenom, da bi ugotovili, kakšne so dejanske prednosti in slabosti (ali držijo razne teoretične in komercialne teze) tako izvedenih sončnih elektrarn tekom življenjske dobe in v realnih obratovalnih pogojih.

Vse tri sončne elektrarne so v obratovanju že kar nekaj časa in so bile podvržene različnim obratovalnim pogojem, zato sedaj že lahko izvedemo analizo obratovanja posamezne sončne elektrarne in podamo zaključke o učinkovitosti obratovanja le-teh glede na izbrani material sončnih celic in glede na vpliv zunanjih dejavnikov na proizvodnjo električne energije (neidealna postavitve, delno senčenje zaradi okoliških objektov,...).

2. SONČNE ELEKTRARNE TE BRESTANICA

2.1 Sončna elektrarna MFE TEB 1

Prva sončna elektrarna v TE Brestanica, MFE TEB 1, je bila zgrajena v sklopu energetske sanacije poslovnega objekta, ki je obsegala izvedbo energetske učinkovite fasade in zamenjavo salonitne kritine. Sanacija poslovnega objekta se je pričela izvajati novembra leta 2009, zaključena pa je bila spomladi leta 2009. Kot nova strešna kritina so se uporabili Trimo SNV-3L sendvič paneli z integriranimi tankoplastnimi sončnimi moduli Unisolar PVL 136 iz amorfne silicija. Tržno ime takšnega sendvič panela je Trimo EcoSolar PV (slika 1).



Slika 1: Trimo EcoSolar PV sendvič panel

Ključni razlogi za uporabo tankoplastnih sončnih modulov iz amorfne silicija so:

- **Nizki temperaturni koeficient moči** ($-0.21\%/^{\circ}\text{C}$) – izhodna moč manj upada z naraščanjem temperature površine modulov kot pri monokristalnih sončnih modulih ($-0,48\%/^{\circ}\text{C}$) – temperatura površine modulov je pri amorfni sončnih modulih višja, saj so prilepljeni na sendvič panel z izolacijo
- **Majhna teža** (7,7 kg) in **debelina** (3 mm) sončnega modula – ni bilo potrebnih dodatnih ojačitev ostrešja, prebojev strehe, arhitekturni videz stavbe ni spremenjen
- **Posebna zgradba celic** (tri plasti silicija), ki omogoča izkoriščanje **širšega spektra svetlobe** in **manjša občutljivost na delno senčenje** (vsaka celica ima bypass diodo), ki je pri MFE TEB 1 zaradi okoliških stavb precej izrazito (hladilni stolp, dimniki PB 4,5).

Osnovni tehnični podatki sončne elektrarne MFE TEB 1 so navedeni v tabeli 1, lokacija pa je prikazana na sliki 2.

2.2 Sončna elektrarna MFE TEB 2

Konec leta 2009 se je pristopilo k izgradnji avtomobilske nadstrešnice, katere streha je izvedena s sončnimi moduli, ki opravljajo hkrati funkcijo strehe ter funkcijo generatorja električne energije. Gre za tako imenovano integrirano sončno elektrarno, ki nosi oznako MFE TEB 2.

Avtomobilska nadstrešnica je zasnovana kot kovinska konstrukcija iz vroče cinkanih profilov, s streho iz monokristalnih sončnih modulov. Posebnost le-te je ostrešje, ki je izvedeno tako, da v primeru dežja voda ne zateka skozi reže v notranjost med sončnimi moduli. Problem »tesnjenja« se je rešil s kombinacijo omega profilov in kanalov, ki pod sončnimi moduli tvorijo lovilni sistem padavinskih voda. S tem smo se izognili uporabi tipskih rešitev tesnjenja, ki so drage, poleg tega pa so predvidene za večje naklonske kote streh (običajno od 22° naprej). Posebnost nadstrešnice je tudi ta, da je možno tekom življenjske dobe sam sistem nadstrešnice prigraditi za možnost napajanja električnih avtomobilov. Naša ocena je, da bo sama dogradnja takšnega sistema smiselna, v kolikor bo

razvoj električnih vozil napredoval do te mere, da bo uporaba množična. Kot smo omenili v uvodu, smo za ta projekt v letu 2011 s strani Območne zbornice GZS za področje Posavja prejeli bronasto priznanje za najboljše inovacije leta 2010, hkrati pa smo s strani Agencije za energijo pridobili tudi status integrirane sončne elektrarne, kar pomeni 15 % višjo podporo k proizvedeni električni energiji.

Izgradnja sončne elektrarne se je zaključila konec marca leta 2010, s poskusnim obratovanjem pa smo pričeli 2. aprila 2009. V tabeli 1 so navedeni osnovni tehnični podatki sončne elektrarne MFE TEB 2, lokacija le-te pa je prikazana na sliki 2.

2.3 Sončna elektrarna MFE TEB 3

Sočasno z izgradnjo sončne elektrarne MFE TEB 2 smo pričeli tudi z izgradnjo sončne elektrarne MFE TEB 3, ki je locirana na strehi objekta plinskih blokov PB 4 in 5. Z izgradnjo MFE TEB 3 smo se najbolj približali idealni postavitvi sončne elektrarne (orientacija jug, naklon 7°), vendar pa smo se pri sami izgradnji srečevali s problematiko delnega senčenja okoliških umetnih ovir (dimniki PB 1-3, strelovodni drog,...). Zaradi problematike delnega senčenja je bilo potrebno zelo premišljeno izvesti medsebojno povezavo samih sončnih modulov ter izbrati ustrezno konfiguracijo razsmernikov, s čimer smo znatno eliminirali vpliv delnega senčenja.

Izgradnja sončne elektrarne se je zaključila konec marca leta 2010, s poskusnim obratovanjem pa smo pričeli 2. aprila 2009. V tabeli 1 so navedeni osnovni tehnični podatki sončne elektrarne MFE TEB 3, lokacija le te pa je prikazana na sliki 2.



Slika 2: Sončne elektrarne MFE TEB 1-3

Tabela 1: Osnovni tehnični podatki sončnih elektrarn MFE TEB 1-3

		MFE TEB 1				MFE TEB 2				MFE TEB 3						
Nazivna moč		38,08 kW				81,78 kW				49,9 kW						
Lokacija		streha stavbe splošnega in tehničnega sektorja ter delavnic				nova avtomobilska nadstrešnica pred upravno zgradbo				streha objekta pliskih blokov PB 4 in 5						
Naklon in orientacija		5 ° proti vzhodu, zahodu in jugu				5 ° proti vzhodu				7 ° proti jugu						
Sončni moduli	tip		PVL 136 (tankoplastni sončni moduli iz amorfnega Silicija, prilepljeni na Trimove SNV-3L sendvič panele)				Asola 290 W/72 (monokristalni Silicij)				Solarwatt M230 96 GET AK (monokristalni Silicij)					
	moč		136 W		6%		290 W		15%		235 W		0,15			
	proizvajalec		Unisolar (ZDA)				Asola (Nemčija)				Solarwatt (Nemčija)					
	dimenzije		5486 x 394 x 4mm		7,7 kg		1979 x 990 x 50mm		26,6 kg		1610 x 1060 x 50mm		24 kg			
	U _{MPP}		I _{MPP}		U ₀		I _{sc}		33V		4,1A		46,2V		5,1A	
	temp. koef. moči		-0.21%/°C				-0.48%/°C				-0.50%/°C					
	število modulov		280				282				212					
	efektivna površina		524 m²				564 m2				339 m2					
	specifična moč		73 W/m²				145 W/m2				147 W/m2					
Razsmerniki		SMA (2 x 3 kW in 6 x 5 kW)				SMA (6 x 11 kW in 3 x 5 kW)				SMA (1 x 5kW, 2 x 7 kW in 3 x 11 kW)						
Dejanska letna proizvodnja		38,088 kWh (2011)				82.778 kWh (2011)				49.924 kWh (2011)						
Dejanske obratovalne ure		1000 ur (1000 kWh/kW)				1012 ur (1012 kWh/kW)				1000 ur (1000 kWh/kW)						
Izvajalec		Trimo d.d. (nosilec projekta) in Techaton d.o.o. (izvajalec)				Armat d.o.o. (nosilec projekta) in HTZ, I.P., d.o.o.				Trimo d.d. (nosilec projekta) in Techaton d.o.o. (izvajalec)						

3. PRIMERJAVA ENERGIJSKEGA IZPLENA AMORFNIH IN MONOKRISTALNIH SONČNIH MODULOV NA PODLAGI ANALIZE OBRATOVANJA SOČNIH ELEKTRARN

Kot smo omenili že v uvodu, smo pri snovanju sončnih elektrarn MFE TEB 1-3 dali velik pomen tudi eksperimentalnemu vidiku postavitve sončnih elektrarn (poleg arhitekturnega in ekonomskega vidika), zato smo pri sončni elektrarni MFE TEB 1 uporabili tankoplastne sončne module iz amorfnega silicija, pri ostalih dveh pa sončne module iz monokristalnega silicija. S takšno zasnovo sončnih elektrarn lahko sedaj praktično spremljamo in analiziramo proizvodnjo ter energijski izplen dveh različnih tipov sončnih celic, v zahtevnih, vendar realnih pogojih, kot so prisotnost delnega senčenja, nizki naklonski koti in neidealna orientacija.

Potencialni investitorji v sončno elektrarno se v fazi odločanja o investiciji srečujejo z vprašanji kot so npr. kateri tip sončnih modulov izbrati, ali namestiti sončne module tudi na vzhodno in zahodno stran in tudi, kako bo vplivalo morebitno delno senčenje okoliških objektov oziroma dreves na proizvodnjo samih sončnih elektrarn. Pogosto se namreč zgodi,

da objekt ni povsem idealen, zato so za investitorjevo odločitev pomembni odgovori na prej zastavljena vprašanja. Da bi lahko čim bolj korektno odgovorili na takšna vprašanja, smo se odločili izdelati preprosto analizo obratovanja z primerjavo energijskega izplena med tankoplastnimi amorfnimi sončnimi moduli in monokristalnimi sončnimi moduli in sicer za primer orientacije proti jugu ter proti vzhodu, preučili pa smo tudi vpliv delnega senčenja na proizvodnjo naših sončnih elektrarn. Z vidika delnega senčenja sta najbolj kritični sončni elektrarni MFE TEB 1 in 3, kjer delno senčenje povzročajo dimniki plinskih blokov PB1-5, hladili stolp ter številni dodatni elementi na strehah (strelovod za zaščito ex cone, oddušniki, prezračevalni sistemi,...), medtem ko pri sončni elektrarni MFE TEB 2 delno senčenje skoraj ni prisotno. Vsem trem sončnim elektrarnam je sicer skupen majhen naklon sončnih modulov (cca 5°), kar je razvidno tudi iz tabele 1. Ker imajo posamezne sončne elektrarne različne orientacije sončnih modulov (tabela 1) in pa delna senčenja, ki so različno prisotna ob določenih delih dneva, smo se odločili, da primerjavo energijskega izplena tankoplastnih amorfnih in monokristalnih sončnih modulov izvedemo samo za tiste dele fotonapetostnega generatorja – posledično razsmernike sončnih elektrarn MFE TEB 1-3, ki delujejo ves čas pri enakih pogojih (naklon, orientacija, brez delnega senčenja):

- **Primerjava vzhodne strani MFE TEB 1 in MFE TEB 2:** primerjava energijskega izplena kWh/kW za razsmernika R5 (MFE TEB 1) in R6 (MFE TEB 2)
- **Primerjava južne strani MFE TEB 1 in MFE TEB 3:** primerjava energijskega izplena kWh/kW za razsmernika R2 (MFE TEB 1) in R1 (MFE TEB 2)

Analizo smo opravili v dveh izbranih dnevih v katerih so bili zagotovljeni pogoji za korektno primerjavo med različnimi moduli (povsem jasno vreme, brez delnega senčenja skozi celoten dan). Rezultati analize so prikazani v tabeli 2.

Tabela 2: Primerjava energijskega izplena amorfnih in monokristalnih sončnih modulov na podlagi analize obratovanja MFE TEB 1-3

Datum	Faktor	MFE TEB 1	MFE TEB 2	MFE TEB 3
Primerjava MFE TEB 1 – vzhodna stran in MFE TEB 2, ki je orientirana na vzhod				
		Razsmernik R5	Razsmernik R6	
9.7.2011	kW	5,44	11,31	
sončno	kWh	32,42	66,57	
	kWh/kW	6,0	5,9	
10.7.2011	kW	5,44	11,31	
sončno	kWh	32,57	67,08	
	kWh/kW	6,0	5,9	
Primerjava MFE TEB 1 – južna stran in MFE TEB 3, ki je orientirana na jug				
		Razsmernik R2		Razsmernik R1
9.7.2011	kW	5,44		10,57
sončno	kWh	32,61		64,69
	kWh/kW	6,0		6,0

10.7.2011	kW	5,44		10,57
sončno	kWh	32,51		63,32
	kWh/kW	6,0		6,1

Na podlagi rezultatov analize v tabeli 02 so ugotovitve sledeče:

- Energijski izplen amorfni sončnih modulov je pri neidealni orientaciji (vzhod) in majhnemu naklonu nekoliko boljši od energijskega izplena monokristalnih modulov, vendar ta razlika ni bistveno velika.
- Pri idealni orientaciji (jug) in majhnem naklonu ni bistvene razlike v energijskem izplenu med amorfnimi in monokristalnimi moduli.
- Pri majhnih naklonih orientacija modulov ne igra zelo pomembne vloge, saj ni bistvene razlike v energijskem izplenu.

Vpliv delnega senčenja na izplen amorfni oziroma monokristalnih sončnih modulov smo določili na podlagi podatkov o proizvodnji sončnih elektrarn MFE TEB 1-3, ki so podani v tabeli 3. Iz podatkov o proizvodnji za leto 2011 se vidi, da je MFE TEB 1 dosegla podoben izplen kot MFE TEB 3, čeprav je pri slednji manj delnega senčenja in samo južna orientacija. Najboljše rezultate je dosegla MFE TEB 2, kjer skoraj ni prisotnega delnega senčenja.

Tabela 3: Proizvodnja sončnih elektrarn MFE TEB 1-3 v letih 2009-2011

Leto	MFE TEB 1 [kWh]	MFE TEB 2 [kWh]	MFE TEB 3 [kWh]
2009	36.502	/	/
2010	31.691	62.935	38.236
2011	38.088	82.778	49.924
Skupaj	106.281	145.713	88.160
Skupaj MFE TEB 1-3	340.154		

4. SKLEP

Na podlagi ugotovitev iz prejšnjega poglavja ter praktičnih izkušenj z obratovanjem sončnih elektrarn MFE TEB 1-3, lahko zapišemo sledeče sklepe, ki so lahko bodočim investitorjem na nek način v usmeritev in pomoč pri odločanju za investicijo v sončno elektrarno:

- Izbira tankoplastnih amorfni sončnih modulov je primerna takrat, kadar smo omejeni z maksimalno dopustno obremenitvijo strehe objektov in pa takrat, kadar za nas ni pomembna čim večja inštalirana moč.
- Pri majhnih naklonih orientacija modulov ne igra zelo pomembne vloge, saj ni bistvene razlike v izplenu, zato se lahko moduli nameščajo tudi na vzhodno in zahodno orientirane

površine. Priporočljivo je, da se sončni moduli namestijo čim bližje idealni postavitvi (jug, 30°), saj je energijski izplen v tem primeru lahko večji tudi do 10 %.

- Majhni nakloni fotonapetostnih generatorjev pa imajo tudi slabost in sicer se pojavijo težave pozimi, saj sneg zaradi majhnega naklona le počasi drsi z modulov, kar ima lahko za posledico tudi več tednov trajajoč izpad obratovanja sončne elektrarne.
- Delno senčenje sončnih modulov je tisti dejavnik, ki lahko zelo vpliva na sam energijski izplen le-teh. V takšni situaciji dobro delujejo amorfní moduli, saj ima vsaka celica v modulu bypass diodo, ki premosti celico v primeru delnega senčenja le-te.
- Delnemu senčenju se je potrebno, če se le da izogniti, v kolikor pa to ni možno je potrebno izbrati ustrezne razsmernike (z MPP sledilnikom na vsakem DC vhodu) in pa povezati tiste sončne module, ki bodo največ delno senčeni v ločene nize in ločen razsmernik.

AVTORJI



Bojan Vovčko je diplomiral leta 2006 na fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, Slovenija. V istem letu se je zaposlil v podjetju Termoelektrarna Brestanica in sicer kot vodja projektov. Njegovo delo obsega raziskave in vodenje projektov na področju proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov in soproizvodnje toplote in električne energije z visokim izkoristkom.



Aleš Štricelj je diplomiral leta 2007 na fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, Slovenija. V istem letu je vpisal podiplomski, doktorski študij na tej fakulteti. Trenutno je mladi raziskovalec gospodarstva v podjetju Termoelektrarna Brestanica, hkrati pa sodeluje z laboratorijem za digitalno procesiranje signalov na fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, Slovenija.