

Analiza uticaja različitih faktora na efikasnost rada fotonaponskih panela

Anita Gegić-Petrović, Branko Savić
Visoka tehnička škola strukovnih studija
Novi Sad, Republika Srbija
petrovic.a@vtsns.edu.rs

Božo Ilić
Tehnički školski centar
Zvornik, Republika Srpska, BiH
bozoilic66@gmail.com

Sadržaj—Cilj ovog rada je da se na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja analizira uticaj različitih faktora na efikasnost rada fotonaponskih panela u realnim uslovima eksploatacije.

Ključne riječi – solarna energija; fotonaponski paneli; efikasnost rada

I. UVOD

Intenzivno korišćenje fosilnih goriva (uglja, nafte i prirodnog gasa) naročito tokom 20 - tog veka ima za posledicu smanjenje njihovih rezervi. Procene su da će uglja biti za narednih 70 godina, a rezervi nafte za sledećih 50 godina. Osim što ne postoji mogućnost njihovog obnavljanja, fosilna goriva su i veliki zagađivači životne sredine. Naime, sagorevanjem ovih goriva oslobađaju se značajne količine CO₂ jednog od gasova koji negativno utiču na klimatske promene. Takođe, povećanje broja stanovnika sa 2,5 milijarde 1950 g. na blizu 7 milijardi danas, ili pretpostavljenih 10 milijardi do 2050 g., kao i kontinuirano poboljšanje komforčnosti života, dovodi do povećanja potrošnje energije. Sve navedeno nameće potrebu za iznalaženjem novih izvora energije, po mogućnosti iz obnovljivih izvora. Pored energije vetra, energije biomase, hidroenergije, geotermalne energije, energije plime i oseke i sl., posebnu pažnju treba posvetiti energiji sunca, zbog toga što je dostupna u svim delovima sveta.

Solarna energija je obnovljivi izvor energije, to je energija sunčevog zračenja koja se uočava u obliku svetlosti i toplote koju primamo od najvećeg izvora energije na Zemlji, Sunca. Sunčevo zračenje je odgovorno i za stalno obnavljanje energije vetra, morskih struja, talasa, vodenih tokova i termalnog gradijenta u okeanima. Već decenijama se solarna energija koristi za proizvodnju toplotne energije koja se koristi za zagrevanje vode i grejanje prostora. Upotreba solarne energije ima višestruke prednosti, to je tih, čist i pouzdan izvor energije. Zbog rastuće cene fosilnih goriva, kao i zbog jačanja svesti o potrebi očuvanja životne sredine, sve više raste interes za korišćenjem solarne energije. Usprkos ogromnom potencijalu, korišćenjem solarne energije trenutno se pokriva vrlo mali postotak energetske potrebe čovečanstva. Jednim delom to je zbog slabe razvijenosti trenutnih tehnologija za korišćenje energije Sunca, ali ipak je najveći problem trenutna cena sistema za korišćenje solarne energije.

Postoji više tehnologija korišćenja solarne energije, kao što su:

- proizvodnja električne energije, direktnim pretvaranjem solarne energije u električnu energiju, pomoću fotonaponskih (photovoltaic) ćelija;
- proizvodnja električne energije, indirektnim pretvaranjem solarne energije u električnu, prvo se solarna energija pretvara u toplotnu, a zatim toplotna u električnu energiju (tzv. koncentrisane solarne termoelektre);
- proizvodnja toplotne energije koja se koristi za grejanje prostora, pripremu sanitarne tople vode, za razne potrebe u industriji, poljoprivredi i sl., ovo je najjednostavniji i najjeftiniji način korišćenja solarne energije;
- proizvodnja toplotne energije koja se koristi u sistemima solarnog apsorpcionog hlađenja itd.

Fotonaponske ćelije se mogu koristiti kao samostalni izvori energije ili kao dodatni izvori energije. Kao samostalni izvori energije koriste se za: napajanje svemirskih satelita i brodova, za obezbeđenje električne energije u objektima gde nema distributivne mreže, za napajanje raznih signalnih i telekomunikacionih uređaja. U svemiru je i snaga sunčevog zračenja puno veća, jer Zemljina atmosfera apsorbuje veliki deo zračenja, pa je i dobijena energija veća. Kao dodatni izvori energije fotonaponske ćelije se mogu priključiti na distributivnu mrežu, ali tada je potrebno ugraditi odgovarajući pretvarač (inverzor) koji vodi računa o potrebnom naponu, frekvenciji i faznom stavu da bi se ostvarilo uspešno prenošenje energije u distributivnu mrežu. Glavni elementi jednog fotonaponskog sistema su: fotonaponski panel, regulator punjenja baterije, baterija, inverzor napona [1].

Proizvodnja električne energije pomoću fotonaponskih ćelija ima mnogo prednosti. Jedna od glavnih prednosti je ta što se konverzija vrši direktno, bez potrebe za mehaničkim delovima (to u praksi znači da im je izuzetno smanjeno održavanje, nema zagrevanja okoline i imaju duži radni vek), prednosti su još: uvek prisutno besplatno gorivo, ne zagađuju životnu sredinu, uklapaju se u "vršno dnevno opterećenje" kada potrošnja raste preko dana itd. Najveći nedostatak proizvodnje

električne energije pomoću fotonaponskih ćelija je taj što se električna energija proizvodi samo preko dana, kada sunce sija; nedostak je još i taj što su efekti rada umanjeni po oblačnom i kišovitom vremenu i zimi kada je intenzitet sunčevog zračenja 4-5 puta manji u odnosu na leto [1].

Cilj ovog rada je da se na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja razmotri uticaj različitih faktora na efikasnost rada fotonaponskih panela u realnim uslovima eksploatacije.

II. FAKTORI KOJI UTIČU NA EFIKASNOST RADA FOTONAPONSKIH ĆELIJA

Fotonaponske ćelije rade na principu fotonaponskog efekta, pri čemu se pod uticajem sunčevog zračenja u fotonaponskim ćelijama, koje se izrađuju najčešće od silicijuma, generiše jednosmerni napon. Fotonaponska ćelija proizvodi napon od oko 0,5 [V] uz gustinu struje od nekoliko desetina [mA/cm²] zavisno od intenziteta sunčevog zračenja, ali i od spektra zračenja.

Efikasnost fotonaponske ćelije definiše se kao odnos električne snage koju daje fotonaponska ćelija i snage sunčevog zračenja [1]:

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{sol}} = \frac{U \cdot I}{E \cdot A} \quad (1)$$

gde je:

P_{el} [W] - izlazna električna snaga fotonaponske ćelije

P_{sol} [W] - snaga sunčevog zračenja

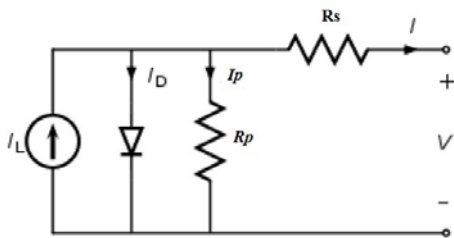
U [V] - efektivna vrednost izlaznog napona

I [A] - efektivna vrednost izlazne struje

E [W/m²] - intenzitet sunčevog zračenja

A [m²] - površina ćelije

Da bi se bolje razumele osnovne karakteristike fotonaponske ćelije, idealna fotonaponska ćelija se može modelovati (predstaviti) paralelnom vezom idealnog strujnog izvora i diode, jer se po svojoj prirodi osvetljena fotonaponska ćelija se ponaša kao izvor stalne struje. Da bi se dobila realna fotonaponska ćelija, ovom modelu treba dodati paralelni i serijski otpor R_s i R_p , na taj način se u obzir uzimaju gubici snage u samoj ćeliji, Sl. 1. Model je upotrebljiv za bilo koji tip fotonaponske ćelije.



Slika 1. Jednodiodni model fotonaponske ćelije [1]

Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije data je relacijom [1]:

$$I = I_L - I_o \left[e^{\frac{e(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2)$$

gde je:

I - struja kroz priključke fotonaponske ćelije

V - napon na priključcima fotonaponske ćelije

I_L - fotogenerisana struja fotonaponske ćelije, koja zavisi od intenziteta sunčevog zračenja

I_o - tamna struja zasićenja fotonaponske ćelije

R_s - serijski otpor fotonaponske ćelije

R_p - paralelni otpor fotonaponske ćelije

e - elementarno naelektrisanje

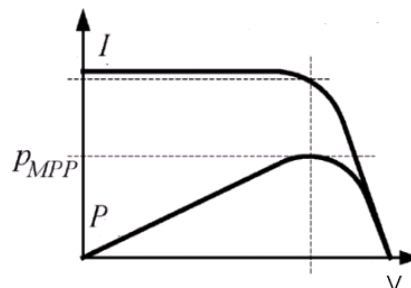
n - faktor idealnosti fotonaponske ćelije

k - Bolcmanova konstanta

T - apsolutna temperatura

Parametri I_o , R_s , R_p su za svaku fotonaponsku ćeliju različiti i zavise od njene fizičke veličine. Tipične vrednosti za R_s i R_p , silicijumskih fotonaponskih ćelija iznose $R_s < 0,5$ [Ω] i $R_p > 500$ [Ω].

Na Sl. 2. prikazana je I-V (struja – napon) i P-V (snaga – napon) karakteristika fotonaponske ćelije [1].



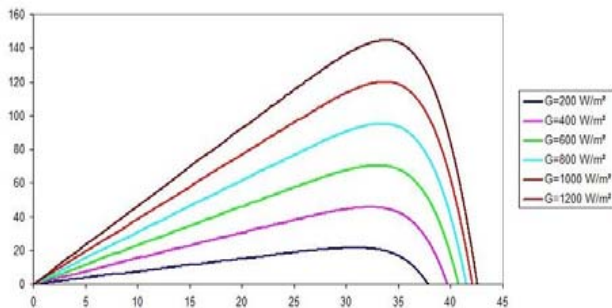
Slika 2. I-V i P-V karakteristika fotonaponske ćelije [1]

I-V i P-V karakteristike fotonaponske ćelije su nelinearne i dosta zavise od spoljašnjih faktora kao što su temperatura i intenzitet sunčeve zračenja koje je obasjava, takođe ove karakteristike zavise i od serijskog R_s i paralelnog otpora R_p koje poseduje svaka ćelija. Sa Sl. 2. vidi se da, pri određenim radnim uslovima (naponu V i struji ćelije I), postoji maksimum snage P koju fotonaponska ćelija može dati. Da bi se postiglo maksimalno iskorišćenje energije potrebno je uvek raditi u tački maksimalne snage – MPP (engl. Maximum Power Point) [2].

Na Sl. 3. je prikazana P-V karakteristika panela za šest različitih intenzitet sunčevog zračenja [2].

Serijski otpor R_s zavisi od materijala i pri izradi fotonaponske ćelije poželjno je da bude što manji. Serijski otpor ćelije R_s je omski otpor na koji nailazi struja koja teče

kroz ćeliju pa kroz površinu ćelije prema omskim kontaktima do spoja sa priključkom na spoljašnje kolo. Njega prouzrokuje otpor materijala, kontakta i slično. Proizvod serijskog otpora i površine ćelije je reda veličine $0,0025 \text{ } [\Omega/\text{m}^2]$ za tipične fotonaponske ćelije. Ako se serijski otpor povećava, smanjuje se napon na priključcima solarne ćelije, što ima za posledicu pad struje, odnosno smanjenje strmine strujno – naponske karakteristike, pa se za veliko R_s fotonaponska ćelija ponaša kao otpornik [1].



Slika 3. P-V karakteristika panela za šest različitih intenziteta sunčevog zračenja [2]

Paralelni otpor (šant) R_p zavisi od osobina ćelije i većinom je dovoljno velik da se može zanemariti. Potiče od mikrodefekata i nečistoća unutar solarne ćelije. Paralelni otpor ćelije R_p uzrokovao je lokalnim defektima u p-n spoju. Za idealnu ćeliju on bi bio beskonačan, međutim, u svakoj stvarnoj ćeliji struje gubitaka proporcionalne su naponu na ćeliji. U ekvivalentnoj šemi ćelije struje gubitaka se prikazuju paralelnim otporom R_p . Ako se paralelni otpor smanjuje, kroz njega teče veća struja, pa je za isti napon manja struja u priključcima solarne ćelije. Ako se paralelni otpor još više smanji, onda će se značajno smanjiti i napon fotonaponske ćelije, pa će se ona ponašati slično otporniku [1].

Kako bi se dobio odgovarajući napon, odnosno struja ćelije se mogu povezivati paralelno ili redno u zavisnosti od potrebe. Veći broj povezanih fotonaponskih ćelija čine fotonaponski panel (modul), na kome su ćelije pričvršćene i zaštićene od atmosferskih uticaja. Pomoću više povezanih jednodiodnih modela u serijsku vezu realizuje se model fotonaponskog panela.

Silicijum predstavlja glavni poluprovodnički element u proizvodnji fotonaponskih ćelija. Silicijum pripada IV-grupi periodnog sistema elemenata. Silicijum se lako dobija i prerađuje, nije toksičan i ne gradi jedinjenja koja su štetna po okolinu. Sa kiseonikom silicijum gradi SiO i SiO_2 , koji spadaju u dielektrične materijale. U pogledu strukture silicijum može biti amorfan, polikristalan i monokristalan, pa prema tome postoje tri vrste fotonaponskih ćelija od silicijuma i to [1]:

- fotonaponska ćelije od monokristalnog silicijuma
- fotonaponske ćelije od polikristalnog silicijuma
- fotonaponske ćelja solarne ćelije od amorfno silicijuma

Pored fotonaponskih ćelija od silicijuma postoje još i ćelije od galijum arsenida GaAs i germanijuma Ge. Ćelije od ovih materijala odlikuje visok stepen iskorišćenosti. Ove ćelije uglavnom se koriste za posebne namene, poput satelita i istraživanja svemira. Najrasprostranjeniji su fotonaponski paneli s monokristalnim ili polikristalnim silicijumskim ćelijama.

Efikasnost fotonaponskih solarnih ćelija kreće se od svega nekoliko procenata do 40%, a najčešće u granicama od 10% za jeftinije izvedbe s amorfim silicijumom, do 25% za skuplje izvedbe. Ćelije od monokristalnog silicijuma imaju faktor korisnosti oko 24%, ćelije od polikristalnog silicijuma imaju faktor korisnosti oko 15% i ćelije od amorfno silicijuma imaju faktor korisnosti oko 10%. U novije vreme eksperimentiše se s tzv. kaskadnim ili višeslojnim ćelijama sastavljenim od različitih poluprovodnika, koje imaju veću efikasnost. Ostatak koji se ne pretvori u električnu energiju uglavnom se pretvara u toplotu i na taj način zagreva ćeliju. Uopšteno, porast temperature fotonaponske solarne ćelije utiče na smanjenje njene efikasnosti. [3-4].

III. PARAMETRI KOJE TREBA UZETI U OBZIR PRILIKOM PROJEKTOVANJA FOTONAPONSKIH SISTEMA

Jedan kvadratni metar fotonaponskih panela može davati snagu do 150 [W] u trajanju do trideset godina bez održavanja. Oni će čak i raditi pri difuznom svetlu kad su oblačni dani, ali sa manje izlazne snage. Napon proizveden fotonaponskim panelom ostaje približno isti bez obzira na vreme, ali snaga će varirati. Najvažniji parametar koji treba uzeti prilikom projektovanja fotonaponskih solarnih sistema je izlazna snaga, a koja u najvećoj meri zavisi od četiri faktora [5-8]:

- maksimalne snage solarnog panela (izražene u peak-vatima ili [Wp]),
- intenziteta sunčevog zračenja,
- ugla izlaganja suncu i
- broja sunčanih sati.

A. Maksimalna snaga solarnog panela

Maksimalna snaga solarnog panela P_{max} se izražava u [Wp] i znači koliko će solarne energije u jedinici vremena panel pretvarati u optimalnim uslovima, tj. u podne uz direktnu sunčevu svetlost po hladnom vremenu. Maksimalni intenzitet sunčevog zračenja je $1.000 \text{ } [\text{W}/\text{m}^2]$.

B. Intenzitet sunčevog zračenja

Faktori koji utiču na intenzitet sunčevog zračenja, a time i na efikasnost fotonaponskih panela:

- vremenski uslovi (oblaci, magla i sl.),
- visina sunca na nebu itd.

Vremenski uslovi se pomalo olako shvataju, panel 50 [W] bi trebao da proizvede 50 [W] za svaki sat sunčevog zračenja intenziteta od $1.000 \text{ } [\text{W}/\text{m}^2]$. Panel će proizvesti pola od tog iznosa (25 [W] svakog sata) kada je izložen do 1/2 navedenog intenziteta sunčevog zračenja ($500 \text{ } [\text{W}/\text{m}^2]$). Difuzno svetlo

koje prolazi kroz tanke oblake može davati oko $300 \text{ [W/m}^2\text{]}$. U vrlo lošim vremenskim uslovima s debelim, tamnim oblacima, intenzitet sunčevog zračenja mogao bi pasti na $100 \text{ [W/m}^2\text{]}$ i proizvesti samo 5 [W] po satu. Sunčevi zraci su raspršeni i postaju difuzniji prilikom prolaska kroz maglu ili zagađenja [1].

Sledeći faktor, visina sunca iznad horizonta varira od godišnjeg doba. Kada je sunce vrlo visoko na nebu (leti), njegovi zraci putuju kroz atmosferu za kraće vreme na kraće udaljenosti, nego kada je nisko na nebu (zimi). Mesto koje dobija puno sunca u septembru moglo bi biti u senci od novembra do februara zbog prepreka (drveća, dimnjaka, krovova i sl.) [5].

C. Ugao izlaganja suncu

Faktor koji stvara najveći problem je optimalni položaj panela prema Suncu. Uvek je najbolje da se paneli usmere prema jugu sa idealnim uglom nagiba nezavisno do geografskog položaja i doba godine. Sunčevi zraci bi trebalo da padaju na panel pod pravim uglom. Idealna situacija u Evropi je krov okrenut prema jugu sa elevacijom između 40 i 60 stepeni, ili još bolje, ravni krov ili površina na kojoj se položaj panela može podesiti po želji. Može se odstupati od ovih vrednosti ako postoje konstruktivna ili estetska ograničenja kako bi se uklopili u postojeće arhitektonske strukture [1].

Budućnost fotonaponskih sistema zavisiće u velikoj meri od mogućnosti integracije panela u konstrukciju zgrade. Najveći broj fotonaponskih sistema u svetu realizovan je s fiksnim panelima. Primenuju se i pokretni paneli koji prate putanju sunca po azimutu i elevaciji. Ovo su efikasniji ali znatno skuplji sistemi.

Od ostalih parametara, koje treba uzeti prilikom projektovanja fotonaponskih sistema, a koji još nisu spomenuti sa energetskog stanovišta, bitno je vreme povratka uložene energije. Kao i svaki uređaj, tako i fotonaponske ćelije, da bi se proizvele, zahtevaju određena ulaganja energije. Vreme povratka uložene energije je vreme za koje fotonaponska ćelija mora raditi da bi proizvela električnu energiju koja je bila potrebna za njenu proizvodnju. To vreme iznosi od jedne do nekoliko godina, dok je vek trajanja od 10 do 30 godina, u zavisnosti od tehnologije.

IV. REZULTATI ISPITIVANJA I NIHOVA ANALIZA

Usled duže izloženosti spoljašnjim uticajima na panelu dolazi do nakupljanja prljavštine usled spoljašnjih uticaja. Da bi utvrdili koliki uticaj spoljašnji faktori imaju na sam panel u realnim uslovima eksploatacije izvršena su:

- merenja po oblačnom i maglovitom vremenu sa čistim i sa namerno zaprljanim panelom,
- merenja po sunčanom vremenu sa čistim i sa namerno zaprljanim panelom itd.

Merenja su vršena u oktobru mesecu u Novom Sadu. Prilikom ispitivanja korišćena su dva potpuno ista fotonaponska panela tipa HYP 230, od kojih je jedan je bio potpuno čist, a drugi je namerno zaprljan. Paneli su sledećih karakteristika: snaga 230 [W] , napon praznog hoda $V_{OC}=37$

[V], struja kratkog spoja $I_{CS}=8.33 \text{ [A]}$, nominalni napon $V_n=32 \text{ [V]}$, nominalna struja $I_n=7.78 \text{ [A]}$, Sl. 4.



Slika 4. Fotonaponski paneli od amornog silicijuma

Za merenje intenziteta sunčevog zračenja u $\text{[W/m}^2\text{]}$ korišćen je uređaj Voltcraft PL-110SM, tehničkih podataka: područje merenja: $0-1.999 \text{ [W/m}^2\text{]}$, prekidač: $0.1 \text{ [W/m}^2\text{]}$, tačnost: $\pm 10 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ili 5% . Za merenje izlazne električne snage sa panela korišćen je instrument za merenje snage vatmetar.

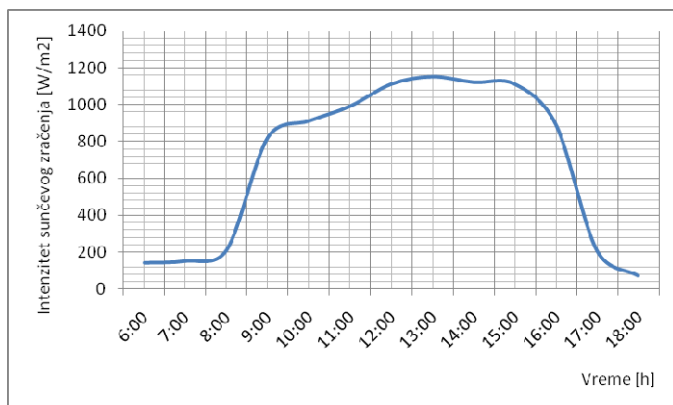
A. Merenje po sunčanom vremenu

Kako bi utvrdili kolika je efikasnost rada panela po sunčanom vremenu, sa velikim intenzitetom sunčevog zračenja, vršena su merenja u takvim uslovima, čiji rezultati su prikazani u tabeli I.

TABELA I. REZULTATI MERENJA DOBIJENI PO SUNČANOM VREMENU

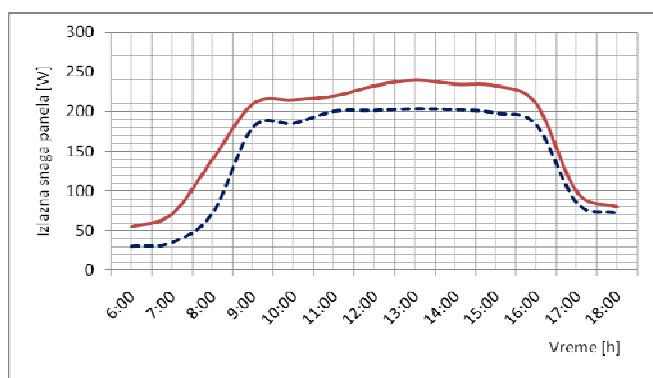
Vreme	Intenzitet sunčevog zračenja $E \text{ [W/m}^2\text{]}$	Izlazna snaga panela $P_{el} \text{ [W]}$	
		Čist panel	Zaprljani panel
6:00	140	55	30
7:00	150	71	35
8:00	210	140	72
9:00	820	210	180
10:00	910	215	185
11:00	990	220	200
12:00	1110	233	201
13:00	1150	240	203
14:00	1120	235	202
15:00	1110	233	198
16:00	890	210	183
17:00	205	99	85
18:00	70	80	72

Na Sl. 5. je prikazano kako se menjao intenzitet sunčeve svetlosti tokom ispitivanja po sunčanom vremenu.



Slika 5. Promena intenziteta sunčevog zračenja po sunčanom vremenu

Na Sl. 6. je prikazano kako se menjala snaga u zavisnosti od intenziteta sunčevog zračenja kod čistog i zaprljanog panela po sunčanom vremenu.



Slika 6. Zavisnost snage od intenziteta sunčevog zračenja kod čistog (puna linija) i zaprljanog panela (isprekidana linija) po sunčanom vremenu

Analiziranjem podataka iz tabele 1. i Sl. 6. Može se uočiti da fotonaponski panel u vreme najintenzivnijeg sunčevog zračenja (od 11 do 14 [h]) daje snagu veću nego što je proizvođač naveo u tehničkoj specifikaciji.

B. Merenje po oblačnom i maglovitom vremenu

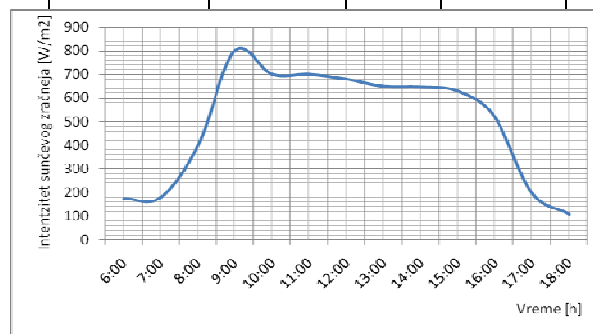
Kako bi se utvrdila efikasnost rada fotonaponskog panela u uslovima smanjenog intenziteta sunčevog zračenja vršena su ispitivanja po oblačnom vremenu, čiji rezultati su prikazani u tabeli II. Merenja su vršena na svakih sat vremena, kada je merenje započeto vreme je bilo umereno oblačno, a kako je dan odmicao došlo je do potpunog naoblacenja i povremenog padanja kiše, tako da je najjači intenzitet sunčevog zračenja zabeležen u jutarnjim časovima. Kao i u prethodnom slučaju i ovde je pažnja fokusirana na izlaznu snagu panela.

Na Sl. 7. su prikazane promene intenziteta sunčevog zračenja tokom ispitivanja po oblačnom vremenu.

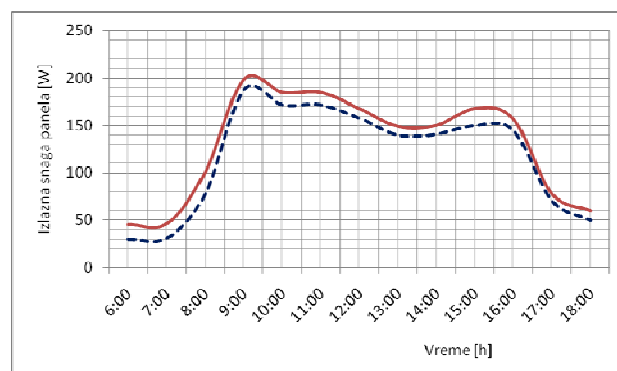
Na Sl. 8. je prikazano kako se menjala snaga na izlazu panela u zavisnosti od intenziteta sunčevog zračenja kod čistog i zaprljanog panela po oblačnom vremenu.

TABELA II. REZULTATI MERENJA DOBUJENI PO OBLAČNOM VREMENU

Vreme	Intenzitet sunčevog zračenja E [W/m ²]	Izlazna snaga panela P_{el} [W]	
		Čist panel	Zaprljani panel
6:00	175	45	30
7:00	180	46	31
8:00	400	201	78
9:00	800	199	188
10:00	700	185	172
11:00	700	185	172
12:00	680	168	158
13:00	650	149	140
14:00	647	150	141
15:00	630	168	150
16:00	520	157	145
17:00	200	78	71
18:00	110	60	50



Slika 7. Promena intenziteta sunčevog zračenja po oblačnom vremenu

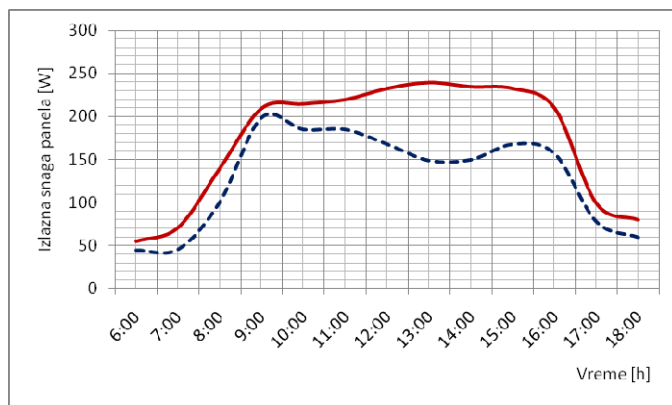


Slika 8. Zavisnost snage od intenziteta sunčevog zračenja kod čistog (puna linija) i zaprljanog panela (isprekidana linija) po oblačnom vremenu

Analiziranjem podataka iz tabele II. i Sl. 8. može se uočiti da i prilikom niskog intenziteta svetlosti panel daje snagu koja je nešto manja od snage koju je proizvođač naveo tehničkoj specifikaciji panela.

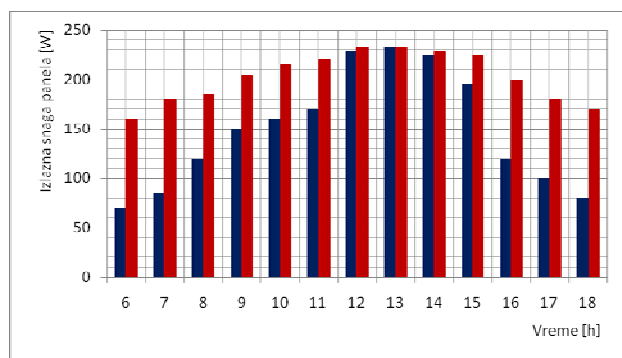
Takođe, analiziranjem podataka iz tabele I. i tabele II., kao i Sl. 6 i Sl. 8. može se uočiti da, pri najvećem intenzitetu sunčevog zračenja, zaprljani panel daje za 20-tak % manju snagu nego čisti panel.

Na Sl. 9. je prikazano kako se menjala snaga na izlazu panela u zavisnosti od intenziteta sunčevog zračenja kod čistog panela po sunčanom i oblačnom vremenu. Vidi se da je po oblačnom vremenu izlazna snaga panela znatno manja i do 70%, nego po sunčanom vremenu.



Slika 9. Zavisnost snage od intenziteta sunčevog zračenja kod čistog panela po sunčanom (puna linija) i oblačnom vremenu (isprekidana linija)

Pored toga vršena su merenja po sunčanom vremenu sa dva potpuno čista panela, od kojih je jedan pokretan (zauzima optimalan položaj prema suncu), a drugi je fiksni (u optimalnom položaju prema suncu je u 13 [h]). Na Sl. 10. je prikazan dijagram sa koga se može uočiti da je pokretni panel znatno efikasniji od fiksnog, naročito u jutarnjim časovima i predveče.



Slika 10. Ilustracija efikasnosti rada fiksnog (plava boja) i pokretnog (crvena boja) fotonaponskog panela tokom dana

V. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata sprovedenih ispitivanja može se zaključiti da se i pri slabijem intenzitetu sunčevog zračenja (po oblačnom vremenu) dobija solidna izlazna snaga. Sa druge strane, u uslovima jačeg intenziteta sunčevog zračenja za koje je panel projektovan (po sunčanom danu), panel pokazuje pun potencijal. Takođe može se zaključiti da nečistoće koje se nakupljaju na površini panela tokom eksploatacije smanjuju njegovu efikasnost za oko 10 do 20 %. Zbog toga je potrebno redovno održavanje panela, odnosno povremeno čišćenje spoljašnjih površina panela. Takođe, možemo zaključiti da na izlaznu snagu panela utiče i položaj panela u odnosu na sunce, odnosno da je panel koji zauzima optimalan položaj u odnosu na sunce znatno efikasniji od fiksnog panela.

Na osnovu dobijenih rezultata dolazi se do zaključka da se i na našim prostorima, koji nisu magloviti, mogu efikasno koristiti fotonaponski paneli, naročito pokretnih (koji zauzimaju optimalan položaj prema suncu), a efikasnost im se može povećati redovnim čišćenjem.

VI. LITERATURA

- [1] Ilić, B., Adamović, Ž., Kenjić, Z., Blaženović, R., Obnovljivi izvori energije i energetska efikasnost: automatizovana dijagnostika postrojenja obnovljivih izvora energije, povećanje energetske efikasnosti i pouzdanosti tehničkih sistema automatizovanom dijagnostikom, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013
- [2] Forcan, M., Efekat djelimičnog osunčavanja solarnog niza i predložena metoda njegove eliminacije, Infoteh-Jahorina, Vol. 12, March 2013.
- [3] Mikulović, J., Đurišić, Ž., Statistička metoda za procenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskog sistema, Infoteh-Jahorina, Vol. 11, March 2012.
- [4] Pešović, U., Milanković, I., Jagodić, D., Randić, S., Model intenziteta globalnog sunčevog zračenja na horizontalnu površinu, Infoteh-Jahorina, Vol. 11, March 2012.
- [5] Adamović, Ž., Ilić, B., Jovanov, G., Vulović, S., Cvetković, S., Energetska efikasnost: Zelena energija, Visoka tehnička škola strukovnih studija Beograd, 2013
- [6] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Uticaj automatizovane dijagnostike na energetska efikasnost i pouzdanost tehničkih sistema zgrada, Naučno-stručni časopis Tehnička dijagnostika, br. 2, Beograd, 2013,
- [7] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Unapređenje energetske efikasnosti tehničkih sistema u industriji automatizovanom dijagnostikom, Prvi naučno-stručni skup „Energetska efikasnost“, 25.10.2013., Visoka tehnička škola strukovnih studija Beograd
- [8] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Unapređenje energetske efikasnosti tehničkih sistema zgrada automatizacijom njihovog upravljanja, Prvi naučno-stručni skup „Energetska efikasnost“, 25.10.2013., Visoka tehnička škola strukovnih studija Beograd

ABSTRACT

The aim of this paper is that based on the results of experimental analysis examine the impact of various factors on the efficiency of the photovoltaic panels in real conditions.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VARIOUS FACTORS ON THE EFFICIENCY OF THE PHOTOVOLTAIC PANELS

Anita Gegic-Petrovic, Branko Savic, Bozo Ilic

Dimenzionisanje hibridnog fotonaponskog sistema sa dizel generatorom

Milica Dilparić

Institut "Nikola Tesla", Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
dilparic.milica@gmail.com

Igor Petrović, Jovan Mikulović

Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
igorpetrovic.ari@gmail.com, mikulovic@etf.rs

Sadržaj—U ovom radu pokazano je kako se na osnovu podataka o izmerenoj horizontalnoj sunčevoj iradijaciji može projektovati samostalni PV sistem koji bi odgovarao potrebama unapred zadate potrošnje. Predstavljena je metodologija za izbor odgovarajućih komponenti sistema. U radu je pokazano da je samostalni PV sistem predimenzionisan u većem delu godine i zbog toga se predlaže korišćenje hibridnog PV sistema sa dizel agregatom. Obrada raspoloživih mernih podataka, odgovarajući proračuni za izbor komponenti samostalnog fotonaponskog sistema i dimenzionisanje agregata u hibridnom sistemu izvršeni su upotrebom programskog alata MATLAB.

Ključne reči- izolovan PV-sistem; hibridni sistem; PV modul; inverter; baterije; dizel agregat;

I. UVOD

Fotonaponski sistem predstavlja integrisan skup fotonaponskih modula i ostalih komponenti projektovan tako da primarnu solarnu energiju direktno pretvara u električnu energiju i na taj način osigura rad jednosmernih i naizmeničnih potrošača. U zavisnosti od načina rada fotonaponski (PV-photovoltaic) sistemi mogu biti samostalni (kada za njihov rad nije potrebna mreža) ili mogu funkcionisati kao mrežno povezani uređaji. Izolovani (samostalni) PV sistemi su, obično, udaljeni od elektroenergetske mreže pa je potrebno da na neki način skladište energiju. Naime, kada je potrebno električnu energiju isporučiti u toku noći ili u periodima sa malim intenzitetom sunčevog zračenja mora postojati baterija u kojoj se akumulira električna energija. Ovakvi sistemi su dobra alternativa agregatima koji mogu biti veoma bučni, zahtevaju održavanje i troše relativno skupo gorivo. Ipak, najveća mana ovakvih sistema je stohastička priroda sunčeve iradijacije pa moduli neće moći da snabdevaju potrošnju svo potrebno vreme. Zbog toga se, u cilju poboljšanja performansi ovakvih sistema, uvode hibridni sistemi. Oni nastaju povezivanjem samostalnih PV sistema sa nekim drugim izvorima energije kao što su vetroturbine, hidrogenatori ili dizel agregati. Na ovaj način se postiže veća sigurnost i raspoloživost isporuke električne energije [1-3].

U ovom radu pokazano je kako se na osnovu podataka o izmerenoj horizontalnoj sunčevoj iradijaciji može projektovati samostalni, tzv. stand-alone, PV sistem koji bi odgovarao potrebama unapred zadate potrošnje. Merenja su vršena u toku jednog meseca. Uzet je, pritom, kritični period, sa stanovišta

sunčeve insolacije, odnosno zimski period, mesec decembar. Predstavljena je metodologija za izbor odgovarajućih komponenti sistema. Ukazujući na predimenzionisanost ovakvog rešenja predloženo je uvođenje hibridnog sistema u kome se pored PV modula koristi i dizel agregat. Način odabira karakteristika dizel agregata za koje će hibridni sistem najbolje odgovoriti zahtevima potrošnje takođe je predstavljen u radu.

II. SUNČEVI RESURSI

U ovom radu analizira se samostalni fotonaponski sistem koji se nalazi u Beogradu na $44^{\circ}49'14''$ severne geografske širine i na $20^{\circ}27'44''$ istočne geografske dužine. Za dimenzionisanje ovog sistema od interesa je zimski period jer je to najkritičniji slučaj pošto je potrošnja najčešće najveća a insolacija najmanja. Zbog toga su merni podaci za horizontalnu iradijaciju i temperaturu uzeti za mesec decembar. Merni podaci su prikupljeni sa desetominutnom rezolucijom. S obzirom da višegodišnja namenska merenja solarne iradijacije zahtevaju duži vremenski period za prikupljanje podataka, za potrebe ovog rada korišćeni su merni podaci za decembar mesec u toku jedne godine, što je u skladu sa time da se merni podaci o potrošnji odnose na istu godinu.

Na sl. 1 predstavljen je dijagram promene vrednosti horizontalne iradijacije za mesec decembar, dok je na sl. 2 predstavljen dijagram promene vrednosti temperature vazduha za mesec decembar. Minimalna temperatura ambijenta na sl. 2 iznosi -18.8°C .

Merni podaci o iradijaciji usrednjeni su primenom programskog paketa Matlab. Nakon usrednjavanja mernih podataka o insolaciji destominutni intervali u toku meseca svedeni su na satne intervale karakterističnog dana, za koji je uzet središnji dan tj. 15. decembar, a zatim su ovi rezultati ekstrapolirani na solarni modul. Pošto se pri proceni srednje dnevne insolacije za kritičan mesec vrši usrednjavanje desetominutnom mernih podataka u toku decembra meseca, relativno dan je centralni dan u mesecu, 15. decembar. Odstupanje u odnosu na 22. decembar kao najkritičniji dan prema teorijskom „clear day“ modelu je zanemarljivo.

Da bi se izvršila adekvatna ekstrapolacija, na početku je potrebno dekomponovati ukupnu horizontalnu iradijaciju (I_H) na direktnu (I_{BH}) i difuzionu (I_{DH}) komponentu [4]:

$$I_H = I_{BH} + I_{DH} \quad (1)$$

Za izračunavanje difuzione komponente potrebno je, prvo izračunati faktor vedrine K_T . On se definiše kao odnos srednje horizontalne insolacije na mernom mestu I_H i srednje horizontalne ekstraterestričke insolacije na površini atmosfere I_0 na koordinatama koje odgovaraju mernom mestu:

$$K_T = \frac{\overline{I_H}}{I_0} \quad (2)$$

Srednja dnevna horizontalna insolacija ekstraterestričkog zračenja I_0 predstavlja integral ukupnog ekstraterestričkog zračenja od izlaska do zalaska Sunca svedenog na horizontalnu površinu, odnosno:

$$\overline{I_0} = \left(\frac{24}{\pi} \right) SC \left[1 + 0.034 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta) \quad (3)$$

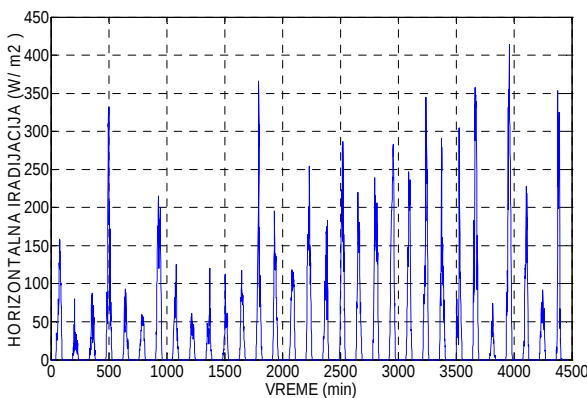
gde su:

L – odgovarajuća geografska širina,
 SC – solarna konstanta ekstraterestričkog zračenja koja iznosi 1370 W/m^2 ,
 n – redni broj posmatranog dana u godini,
 δ – solarna deklinacija koja se, za posmatrani dan računa prema relaciji:

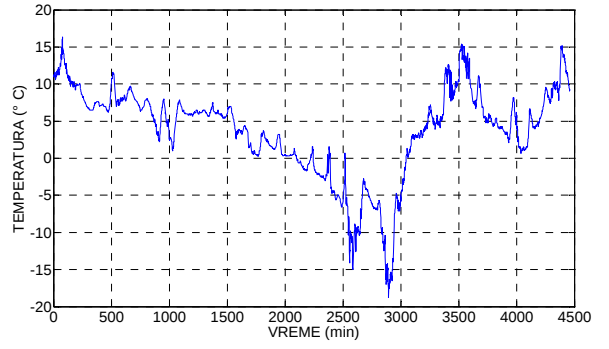
$$\delta = 23.4 \sin \left(\frac{360}{365} (n - 81) \right) \quad (4)$$

H_{SR} – satni ugao zalaska sunca koji se, za zadatu geografsku širinu i ugao deklinacije izračunava na osnovu:

$$H_{SR} = \arccos(-\tan L \tan \delta) \quad (5)$$



Slika 1. Horizontalna iradijacija za decembar



Slika 2. Ambijentalna temperatura za decembar

Odgovarajućim izračunavanjem dobijena je vrednost za faktor vedrine od 0.2475. Na osnovu relacije (2) može se zaključiti da što je faktor vedrine veći oblačnost je manja, a atmosfera čistija i obrnuto. Dobijena, relativno niska, vrednost za K_T opravdava pretpostavku da se pri razmatranju uzima mesec decembar kao najkritičniji slučaj sa stanovišta insolacije.

Poznavajući vrednost koeficijenta K_T za izmerenu horizontalnu iradijaciju I_H moguće je, na osnovu Liu-Jordan-ove empirijske relacije, odrediti difuzionu komponentu na osnovu [4]:

$$\frac{I_{DH}}{I_H} = 1.39 - 4.027 K_T + 5.531 K_T^2 - 3.108 K_T^3 \quad (6)$$

Dalje je, na osnovu (1) i (6) moguće odrediti i direktnu komponentu:

$$I_{BH} = I_H - I_{DH} \quad (7)$$

Na sl. 3 prikazane su ukupna, direktna i difuziona iradijacija na horizontalnu površinu za posmatrani karakteristični dan. Sa sl. 3 se vidi da u ukupnom zračenju veći deo predstavlja difuziona komponenta što je i očekivano uzimajući u obzir faktor vedrine. Naime, tokom oblačnog dana dominira difuziono zračenje.

Važno je takođe, napomenuti da se radi sa podacima koji su svedeni na satnu rezoluciju u toku karakterističnog dana. To omogućava uspostavljanje ekvivalencije između iradijacije i insolacije. Iradijacija predstavlja snagu sunčevog zračenja po jedinici površine, a insolacija energiju sunčevog zračenja u jedinici vremena po jedinici površine. Dakle, za podatke usrednjene na satnom nivou iradijacija u W/m^2 i insolacija u Wh/m^2 imaju iste vrednosti.

U radu je usvojeno da su PV moduli koji sačinjavaju samostalni PV sistem južno orijentisani i pod optimalnim nagibnim uglom za mesec decembar od 60° u odnosu na horizontalnu površinu [5]. Moduli su fiksno postavljeni i nemaju automatski sistem za praćenje. S obzirom da je decembar najkritičniji mesec u pogledu solarnog zračenja i da samostalni PV sistem mora da obezbedi dovoljno energije potrošačima u tom kritičnom periodu, opravdano je da PV

moduli u ovom slučaju budu postavljeni pod najpovoljnijim uglom za decembar mesec. U ostalom delu godine, zbog značajno većeg intenziteta solarnog zračenja, PV moduli će proizvoditi dovoljno energije čak i ako njihov nagibni ugao nije optimalan za taj period. Iz tog razloga, optimalni nagibni ugao PV modula kod samostalnog PV sistema se bira za najnepovoljniji mesec u toku godine ili za zimski period, optimizacija proizvodnje takvog sistema na godišnjem nivou nije od interesa [4]. Sada se, na osnovu proračunatog difuzionog zračenja mogu odrediti difuziona komponenta iradijacije na kolektor I_{DC} kao i reflektovana komponenta I_{RC} koja je posledica ambijentalne refleksije, prema relacijama:

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (8)$$

gde je:

Σ – nagibni ugao panela u odnosu na horizontalnu površinu, i

$$I_{RC} = \rho (I_{BH} + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (9)$$

gde je:

ρ – koeficijent ambijentalne refleksije; pretpostavljeno je da se u okolini objekta nalazi trava čiji je koeficijent 0.2; kako se međutim analizira mesec decembar kada postoji snežni pokrivač koji utiče na refleksiju (koeficijent refleksije 0.8) usvojen je korigovani koeficijent ambijentalne refleksije od 0.4.

Na kraju, direktna komponenta iradijacije na modul se dobija kao:

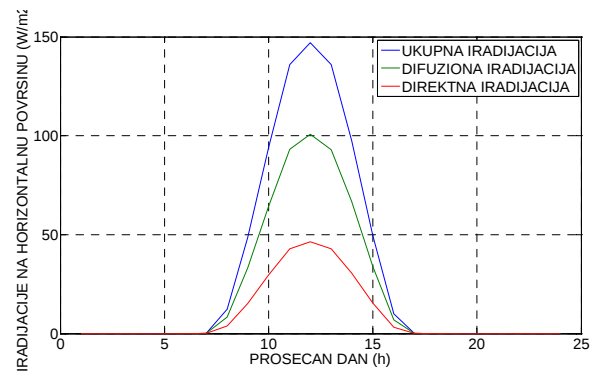
$$I_{BC} = R_B I_{BH} \quad (10)$$

gde je:

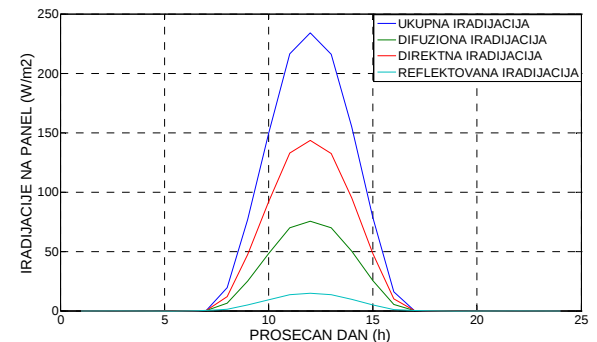
R_B – faktor kosine čija je srednja vrednost za decembar vrednost 3.1.

Ukupna iradijacija na solarni kolektor jednaka je zbiru direktne, difuzione i reflektovane iradijacije na modul. Ukupna iradijacija sa svojim komponentama predstavljena je na sl. 4. Sa slike se vidi da se, pogodnim izborom orijentacije i nagibnog ugla kolektora postiže da je srednja insolacija na PV panel u decembru maksimalna [5].

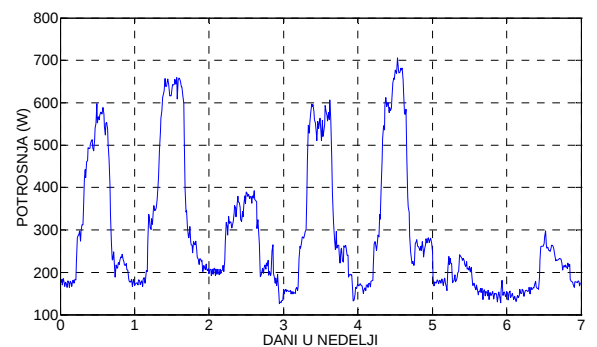
U cilju potpunog definisanja projektnog zadatka analiziranog u ovom radu na sl. 5 predstavljen je dijagram potrošnje koju samostalni PV sistem treba da napaja za sedmodnevni period. Podaci za potrošnju, svedeni na satnu rezoluciju karakterističnog dana, prikazani su na sl. 6.



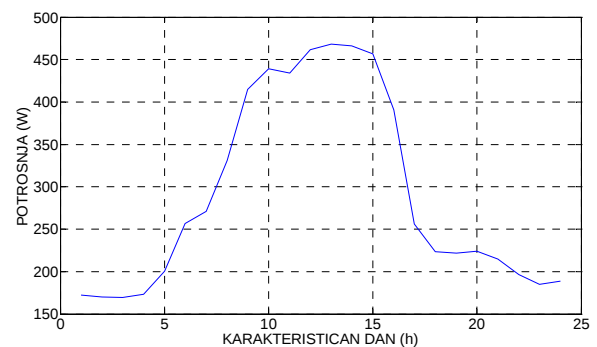
Slika 3. Horizontalna iradijacija i njene komponente za karakteristični dan



Slika 4. Iradijacija kolektora i njene komponente za karakteristični dan



Slika 5. Potrošnja u toku najkritičnijeg sedmodnevnog perioda



Slika 6. Potrošnja za karakterističan dan u decembru

III. PROJEKTOVANJE SAMOSTALNOG PV SISTEMA

Najvažniji elementi samostalnog PV sistema su solarni kolektori, inverter i baterije akumulatora. Oni su povezani međusobno i takođe potrošnjom različitim elementima rasklopne opreme kao što su: glavni prekidač jednosmerne struje, prekidači i osigurači za naizmeničnu struju i slično. Najčešće postoje i dve razvodne kutije: razvodna kutija PV sistema i razvodna kutija za naizmeničnu struju.

Izbor opreme i projektovanje samostalnog fotonaponskog sistema zahteva proračune u cilju postizanja što optimalnijeg i efikasnijeg sistema. Ovi proračuni zavise od niza faktora i u ovom delu rada prikazana je procedura za izbor osnovnih elemenata jednog ovakvog sistema.

Pri projektovanju sistema potrošnja je obično poznata, a na osnovu potrošnje se vrši dimenzionisanje sistema. Analiza je, u ovom radu, započeta izborom invertora. Kako je, jedna od najvažnijih karakteristika invertora ulazni napon, potrebno je prvo odrediti napon DC sistema. Smernica za njegovo određivanje je da struja ne prelazi 100A da bi se mogla koristiti standardna rasklopna oprema. Tako se napon jednosmernog sistema bira na osnovu maksimalne naizmenične snage. Sa sl. 5 vidi se da je maksimalna snaga potrošnje $P_{Acmax} = 706W < 1200W$ pa je prema preporuci napon sistema $U_S = 12V$. U tabeli I su, za glavne elemente PV sistema, date tehničke karakteristike. Treba napomenuti da to nisu celokupne električne karakteristike elemenata već samo one koje su od značaja u ovoj analizi. Iz tabele se vidi da je snaga invertora koja može kontinuirano da se predaje dovoljno velika da u svakom trenutku zadovolji zahteve potrošnje.

Kao što je već napomenuto, samostalni PV sistemi moraju imati sistem za skladištenje energije. U tu svrhu se koriste akumulatorske baterije. One, osim što daju energiju u periodima kada proizvodnja modula nije dovoljna ili je nema, obezbeđuju udarnu struju pri eventualnom uključenju potrošača velike snage. Baterije se u sistemu mogu vezivati redno, da bi se postigao zahtevani napon i paralelno, da bi se postigao željeni kapacitet [6].

Uobičajeno je da se kod baterija umesto skladištene energije u vatčarovima (Wh) koristi kapacitet u amperčasovima (Ah), pošto se napon baterije menja tokom njenog pražnjenja. Pri određivanju tipa i broja baterija potrebno je prvo proračunati ukupnu jednosmernu potrošnju kao zbir jednosmerne, W_{DC} i svedene naizmenične potrošnje (naizmenične potrošnje W_{AC} korigovane stepenom iskorišćenja invertora η_{inv}) odnosno:

$$W_{DCtot} = W_{DC} + \frac{W_{AC}}{\eta_{inv}} \quad (11)$$

Efikasnost invertora zavisi od opterećenja, zbog toga treba izabrati inverter koji i pri minimalnoj snazi opterećenja radi sa velikom efikasnošću (što je uzeto u obzir u ovom radu [7]). Ovako dobijena potrošnja je u Wh pa ju je potrebno preračunati u Ah prema relaciji:

$$Ah_{totalload} = \frac{W_{DCtot}}{U_S} \quad (12)$$

Zamenom odgovarajućih vrednosti u (11) i (12) dobija se da ukupna DC potrošnja u karakterističnom danu iznosi 7676.8132 Wh odnosno 639.7344 Ah.

Sistem za skladištenje energije se dimenzioniše tako da ispuni zahteve potrošnje u nekom periodu vremena. Tako, sistem koji ispunjava zahteve potrošnje u 99% vremena je i do tri puta skuplji od sistema čija je dostupnost napajanja 95%. Zbog toga je uzeto da baterije ispunjavaju zahteve potrošnje u 95% vremena.

Broj dana potrebnih za skladištenje se računa na osnovu približne formule [4]:

$$n_{stor} = 9.43 - 1.9n_{hz} + 0.11n_{hz}^2 \quad (13)$$

gde su:

n_{stor} - broj dana potrebnih za skladištenje,

n_{hz} - broj sati zenita sunca, koji je po vrednosti jednak ukupnoj srednjoj insolaciji kolektora u kWh, i u ovom slučaju iznosi 1.2.

Proračunom je dobijeno $n_{stor} = 7.308$ dana. Poznaajući broj dana potrebnih za skladištenje energije koju zahteva potrošnja i ukupnu potrošnju u Ah za karakterističan dan moguće je odrediti kapacitet baterije koji mora biti raspoloživ:

$$Ah_{useablestorage} = Ah_{totalload} n_{stor} \quad (14)$$

Na osnovu prethodne formule dobijen je raspoloživi kapacitet od 4675.43 Ah.

Pošto kapacitet baterije zavisi od brzine pražnjenja i temperature okoline to je, za proračun ukupnog kapaciteta baterije, potrebno uvažiti koeficijente koji određuju dubinu pražnjenja i zavisnost od temperature pa je ukupni kapacitet baterije:

$$Ah_{totalstorage} = \frac{Ah_{useablestorage}}{MODD \cdot (T, DR)} \quad (15)$$

TABELA I. PARAMETRI ELEMENATA PV SISTEMA

Element	Karakteristike	
Inverter	Nominalni jednosmerni napon	12 V
	Kontinuirana snaga	1000W
	Efikasnost	91%
Baterija	Napon	4 V
	Kapacitet (C/20)	1460 Ah
PV modul	Snaga	140 W
	Napon u tački maksimalne snage	17.5 V
	Struja u tački maksimalne snage	8.0 A

gde su:

$MODD$ - maksimalna dubina pražnjenja; za olovne baterije je tipična vrednost 0.8,

(T, DR) - dostupan kapacitet u funkciji temperature; uzimajući u obzir minimalnu temperaturu i razmatranja u [4] usvojeno je 0.66.

Zamenom odgovarajućih vrednosti u prethodnu formulu dobijen je ukupni kapacitet sistema baterija od 10119.98 Ah.

Na kraju, potreban broj redno vezanih baterija N_R i potrebnih paralelnih grana N_P dobija se na osnovu relacija:

$$N_R = \frac{U_S}{U_b} \quad (16)$$

$$N_P = \frac{Ah_{total\ storage}}{Ah_b} \quad (17)$$

gde su U_b i Ah_b napon i kapacitet odabranog tipa baterije pri standardnim uslovima. Dobijeno je da je potrebno 7 paralelnih grana sa po 3 redno vezane baterije, ukupno 21 baterija. Struja punjenja baterije zavisi od kapaciteta baterije i iznosi 73 A za izabranu bateriju C/20 kapaciteta 1460 Ah. S obzirom da u konfiguraciji postoji 7 paralelnih grana sa po 3 baterije, ukupna struja punjenja svih baterija je 511 A.

Paneli u okviru samostalnog PV sistema se dimenzionišu na osnovu broja sati zenita sunca i struje panela pri maksimalnoj snazi. Takođe, važno je napomenuti da je radna tačka punjenja baterije levo u odnosu na tačku maksimalne snage modula u UI ravni. To znači da treba birati modul tako da njegov napon u tački maksimalne snage bude nešto veći od napona sistema baterija.

Broj ampersati koji se dobijaju iz odabranog modula je:

$$Ah_{modula} = I_m n_{hz} \eta_c \eta \quad (18)$$

gde su

η_c - Kulonova efikasnost; usvaja se vrednost 0.9

η - smanjenje efikasnosti usled zaprljanja; usvaja se 0.9

I_m - struja panela u tački maksimalne snage.

Dobijena je proizvodnja panela od 7.78 Ah.

Na kraju, potreban broj redno vezanih modula u grani (N_R) i broj grana (N_P) dobijaju se prema formulama:

$$N_R \geq \frac{U_S}{U_m} \quad (19)$$

$$N_P \geq \frac{Ah_{total\ load}}{Ah_{modula}} \quad (20)$$

gde je:

U_m - napon panela u tački maksimalne snage.

Dobijeno je rešenje od 83 grane sa po jednim modulom u grani, dakle ukupno 83 modula. Vezivanje 83 modula ne izgleda kao praktično rešenje, međutim u ovom slučaju se može pokazati da rešenje sa dva redno vezana modula u grani rezultuje povećanjem ukupnog broja modula i baterija. Dimenzionisanje PV panela je izvršeno na osnovu radne struje PV modula koja je u režimu punjenja baterija neznatno veća od struje pri maksimalnoj snazi PV modula (radna tačka je u preseku karakteristike panela i karakteristike baterije koja je praktično vertikalna prava na I - U dijagramu). Zbog toga, uvođenje pretvarača sa MPPT funkcijom neće bitno povećati broj amper-sati koji se dobijaju iz fotonaponskih modela. Ukupna struja PV modula na osnovu izabrane konfiguracije je 664 A, što je veće od struje punjenja sistema baterija (511 A). Samostalni PV sistem je projektovan tako da se u periodima sa dovoljnom inolacijom (kada je struja PV modula veća od 511 A) skladišti dovoljno energije za periode sa smanjenom inolacijom (kada je struja PV modula manja od 511 A). Regulator punjanja baterija je moguće realizovati za svaku paralelnu granu sistema baterija.

IV. HIBRIDNI SISTEM

Na osnovu prethodnog proračuna, zaključuje se da preveliki broj modula čini sistem dosta složenijim, a takođe veliki broj modula povećava cenu samog sistema. Iz tog razloga prelazi se na hibridni sistem, gde je pored PV panela za proizvodnju električne energije i snabdevanje potrošača zadužen i dizel agregat.

Da bi se izabrao hibridni sistem, tj. dimenzionisao odgovarajući agregat, analizira se tabela II. U ovoj tabeli prikazani su rezultati koji su dobijeni na osnovu programskog paketa Matlab i to proizvodnja jednog modula na mesečnom nivou (W_{Imes}), potrošnja za jedan mesec (W_{Pmes}), kao i neophodan broj PV modula (n_{modula}) na mesečnom nivou da bi se zadovoljila celokupna potrošnja.

Na osnovu tabele II potvrđuje se da je mesec decembar kritičan za dimenzionisanje samostalnog fotonaponskog sistema zbog smanjene sunčeve iradijacije. Na godišnjem nivou jedan modul može da proizvede 97kWh, odnosno PV panel sa 83 modula može da proizvede 8051kWh, dok je ukupna potrošnja na godišnjem nivou 2802kWh gde se jasno vidi da je sistem predimenzionisan.

TABELA II. MESEČNA PROIZVODNJA I POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE SAMOSTALNOG PV SISTEMA SA POTREBNIM BROJEM MODULA

mesec	W_{Imes} (kWh)	W_{Pmes} (kWh)	n_{modula}
januar	4.38	238.0	55
februar	6.96	215.0	31
mart	8.13	238.0	30
april	11.13	230.3	21
maj	10.73	238.0	23
jun	9.16	230.3	26
jul	11.26	238.0	22
avgust	10.31	238.0	24
septembar	9.58	230.3	25
oktobar	6.81	238.0	35
novembar	5.49	230.3	42
decembar	2.89	238.0	83

Da bi se sistem racionalnije dimenzionisao bira se dizel agregat čija se potrebna snaga određuje na osnovu relacije [4]:

$$P_G(W) = \frac{Ah_{total\ storage}(Ah) \cdot U_S(V)}{Charg.time(h) \cdot Charge. efficiency} \quad (21)$$

U formuli (21) figuriše vreme punjenja baterija (*Charg. time*), gde se na osnovu izbora baterije usvaja vreme od 20h kao i efikasnost punjenja (*Charg. efficiency*) koje se u proračunima uzima kao 0.8. Proračunom se dobija da je potreban dizel agregat od 7kW.

Ukupno angažovanje dizel agregata na godišnjem nivou određuje se na osnovu formule (22), gde se usvaja godišnja solarna frakcija 0.75 (*Ann.Sol.fr*), odnosno ukupno učešće PV modula u proizvodnji električne energije na godišnjem nivou [4]. Proizvodnja agregata na godišnjem nivou je:

$$W_G \left(\frac{kWh}{yr} \right) = \frac{W_{DCtot} \left(\frac{Wh}{day} \right) \cdot 365 \frac{day}{yr} \cdot (1 - Ann.Sol.fr.)}{Charg. efficiency \cdot 1000 \frac{W}{kW}} \quad (22)$$

Na osnovu formule (22) dobija se da je angažovanje agregata na godišnjem nivou 875 kWh. Učešće PV panela u mesecu decembru za napajanje potrošnje određuje se na osnovu mesečne solarne frakcije (*Mo.Solar fraction*), i to prema formulama (23) i (24) u zavisnosti od godišnje solarne frakcije.

$$Mo.Sol.fr = 0.625 \cdot Ann.Sol.fr \quad (Annual \leq 0.80) \quad (23)$$

$$Mo.Sol.fr = 0.5 + 28(Ann.Sol.fr - 0.8)^{2.5} \quad (Annual > 0.80) \quad (24)$$

U konkretnom slučaju dobija se da je mesečna solarna frakcija 0.469, odnosno, broj modula koji je potreban u hibridnom sistemu dobija se iz sledeće relacije:

$$N_p \geq \frac{Mo.Sol.fr \cdot Ah_{total\ load}}{Ah_{modula}} \quad (25)$$

Ukupan broj potrebnih PV modula u hibridnom sistemu je 39, odnosno angažovanjem dizel agregata značajno se smanjuje broj modula, što je i bio cilj uvođenja hibridnog sistema. Ovako smanjen broj PV modula rezultuje da oni ne mogu samostalno da pune izabran broj baterija. Da bi i ovaj uslov bio zadovoljen potrebno je da se smanji broj baterija na 12, u konfiguraciji 4 grane sa po 3 redno vezane baterije. U ovom slučaju je dovoljan dizel agregat čija je snaga 4 kW koji bi radio 219 h u toku godine.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizira se samostalni fotonaponski sistem za napajanje izolovanog potrošača za koji je poznat sedmični dijagram potrošnje. Za dimenzionisanje ovog sistema od interesa je zimski period jer je insolacija najmanja i zbog toga

su merni podaci uzeti za mesec decembar. Nakon usrednjavanja mernih podataka o insolaciji dobijeno je da u ukupnom zračenju veći deo predstavlja difuziona komponenta zbog relativno velikog broja oblačnih dana u decembru. Proračunom komponenti zračenja koje dolaze na panel potvrđeno je da se pogodnim izborom orijentacije i nagibnog ugla kolektora postiže najveća moguća insolacija na PV panel u kritičnom mesecu.

U radu je pokazano da samostalni fotonaponski sistem ispunjava zahteve potrošnje u decembru ali da je za preostali period godine predimenzionisan i ekonomski neisplativ. Zato je predloženo rešenje hibridnog sistema u kome se pored PV modula uvodi dizel agregat. Uvođenje dizel agregata rezultuje značajnim smanjenjem broja PV modula i baterija čime se dobija racionalnije dimenzionisan mrežno nezavisan sistem.

Cilj ovog rada jeste da prikaže energetske bilans pri projektovanju samostalnog ili hibridnog PV sistema, a rešavanje tehničkih problema koji mogu da se jave pri praktičnoj realizaciji ovakvih sistema može biti tema posebnog rada.

LITERATURA

- [1] Sandia National Laboratories (1995). Stand-Alone Photovoltaic Systems Handbook of Recommended Design Practices, U.S. Department of Energy, Albuquerque, NM.
- [2] O. Perpinan, E. Lorenzo, M. A. Castro, "On the calculation of energy produced by PV grid-connected system", Progress in Photovoltaics Research and Applications (2007), Volume: 15, Issue: 3, Publisher: Wiley Online Library, Pages: 265-274.
- [3] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science", John Wiley & Sons, UK 2003.
- [4] Renewable Power Systems. Photovoltaic Systems. Gilbery M. Masters, Stanford University
- [5] J. Mikulović, Ž. Đurišić, "Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela", Infoteh Jahorina, Mart 2012.
- [6] M. Žarković, J. Mikulović, "Dimenzionisanje baterije u izolovanom fotonaponskom sistemu", Infoteh Jahorina, Mart 2012.
- [7] <http://www.energymatters.com.au/images/laytronics/Manual500-1800.pdf>

Abstract— Projecting of standalone PV system that will achieve the requirements of pre-defined consumer is presented in this paper. Designing is based on energy resource's data (measured horizontal sunlight irradiation). A methodology for the selection of appropriate system components is, also, presented. Pointing primarily to the oversizing of such a solution for most of the year, the aim of this paper is to propose the introduction of a hybrid system. As part of it, in addition to the PV module, the diesel generator is used. Processing of available measurement data, the corresponding calculations for the selection of standalone PV system's components and choice of generator in hybrid system were carried out using the software tool MATLAB.

SIZING OF HYBRID PV SYSTEM WITH DIESEL GENERATOR

Milica Dilparić, Igor Petrović, Jovan Mikulović