

POVEĆANJE STEPENA EFIKASNOSTI FOTONAPONSKIH SISTEMA IMPROVEMENT OF EFFICIENCY FACTOR FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Aleksandar Stjepanović, Saobraćajni fakultet Doboj
Slađana Stjepanović, Telekom Srpske RJ Doboj
Ferid Softić, Zlatko Bundalo, Elektrotehnički fakultet Banja Luka

Sadržaj - U radu su opisani načini za povećanje faktora korisnosti fotonaponskih sistema. Pogodnim praćenjem putanje Sunca u odnosu na poziciju modula mogu se ostvariti poboljšanja ukupne efikasnosti sistema. Opisane su metode za simulaciju fotonaponskih modula u programskom paketu Matlab, dati modeli realnih fotonaponskih sistema i modula, rezultati simulacija, te izvršena poređenja sa eksperimentalnim rezultatima dobijenim mjerenjem na realnom sistemu.

Abstract – Methods for improvement of efficiency factor for photovoltaic systems are described in the paper. By appropriate Sun path tracking in relation to module position it can be obtained improvements of total efficiency of the system. Methods for simulation of photovoltaic modules in software package Matlab are described, models of real photovoltaic systems and modules and simulation results are given, and comparisons with experimental results obtained by measurements on real system are performed.

1. UVOD

Povećanje iskoristivosti solarnih modula može se postići na različite načine. Jedan od relativno dobrih načina koji ne iziskuje velika materijalna ulaganja je sistem za praćenje kretanja Sunca i postizanje maksimalnog zračenja na solarnom modulu. Intenzitet Sunčevog zračenja koje pada na površinu plohe fotonaponskog modula je najveći ukoliko pada pod pravim uglom. Konstrukcijom uređaja koji prati putanju Sunca tokom dana, te prilagođava položaj solarnog panela na najveći intenzitet zračenja, dobija se sistem koji će imati mnogo bolju iskoristivost u odnosu na fiksni sistem. Eventualni nedostatak takvih sistema je dodatna potrošnja energije za pokretanje modula, koja je uvijek manja od dobitka koji se postiže pomoću takvih sistema.

2. POLOŽAJ FOTONAPONSKOG MODULA I INTENZITET ZRAČANJA

Upadni ugao zračenja Sunca θ_{hor} na horizontalnu površinu fotonaponskog modula je u direktnoj funkciji visine Sunca izraženog preko ugla elevacije γ_s . Upadni ugao se može definisati i kao ugao zenita θ_z [1]:

$$\theta_{hor} = \theta_z = 90^\circ - \gamma_s. \quad (1)$$

Proračun ugla upadnih zraka na nagnutu površinu θ_{tilt} je dosta složen. Površinski ugao zenita α_t opisuje odstupanja položaja od južne strane. Ako se ploha odnosno fotonaponski modul nalazi na zapadu, α_t je pozitivno. Ugao γ_t opisuje nagib fotonaponskog modula u odnosu na horizontalnu površinu. Između vektora s okrenutog u smjeru Sunca i

vektora n normalnog na ploču modula nalazi se ugao θ_{tilt} . Pozicija Sunca je definisana vektorima sjever, zapad i zenit. Vektori s i n su definisani sa [2]:

$$\begin{aligned} s &= (\cos \alpha_s \cdot \cos \gamma_s, -\sin \alpha_s \cdot \cos \gamma_s, \sin \gamma_s) \\ n &= (-\cos \alpha_t \cdot \sin \gamma_t, \sin \alpha_t \cdot \sin \gamma_t, \cos \gamma_t) \end{aligned} \quad (2)$$

Oba vektora su normalizovana, pa se stoga upadni ugao θ_{tilt} na površinu sa nagibom računava kao skalarni proizvod ova dva vektora [2]:

$$\begin{aligned} \theta_{tilt} &= \arccos(s \cdot n) = \\ &= \arccos(-\cos \gamma_s \cdot \sin \gamma_t \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_t) + \sin \gamma_s \cos \gamma_t) \end{aligned} \quad (3)$$

Ukupno solarno zračenje na nagnutu površinu je sastavljeno od direktne komponente zračenja $E_{dir,tilt}$, difuzione komponente nastale odbijanjem od oblaka i neba $E_{dif,tilt}$ i zračenja nastalog refleksijom od zemlje $E_{ref,tilt}$ (ta komponenta ne postoji za horizontalno montirane module):

$$E_{G,tilt} = E_{dir,tilt} + E_{dif,tilt} + E_{ref,tilt}. \quad (4)$$

Direktno zračenje koje prima neka horizontalna površina A_{hor} je iste snage zračenja Φ kao i za neku manju površinu koja je normalna na dolazeće Sunčeve zrake:

$$\Phi_{dir,hor} = E_{dir,hor} \cdot A_{hor} = \Phi_{dir,s} = E_{dir,s} \cdot A_s, \quad (5)$$

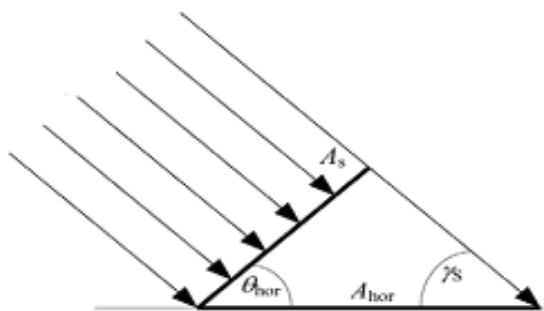
$$A_s = A_{hor} \cdot \cos \theta_{hor} = A_{hor} \cdot \sin \gamma_s. \quad (6)$$

Na sl.1. je dat prikaz upadnih talasa na koso postavljeni modul.

Slijedi da je svjetlosni talas direktnog zračenja $E_{dir,s}$ na okomitu površinu veće od direktnog zračenja $E_{dir,hor}$ na

horizontalnu površinu. Sa θ_{tilt} iz jednačine direktno zračenje na kosoj površini modula je jednako:

$$E_{dir,s} = \frac{E_{dir,tilt}}{\cos \theta_{tilt}} \geq E_{dir,hor} \quad (7)$$



Sl.1. Prikaz upadnih talasa na koso postavljenu modul.

Direktno zračenje na kosoj površini može se računati iz direktnog zračenja na horizontalnoj površini:

$$E_{dir,tilt} = E_{dir,hor} \cdot \frac{\cos \theta_{tilt}}{\sin \gamma_s} \quad (8)$$

Difuziono zračenje na kosoj površini sa uglom zakošenja γ_t može se izračunati iz difuzionog zračenja $E_{dif,hor}$ na horizontalnoj ravni:

$$E_{dif,tilt} = E_{dif,hor} \cdot 0,5 \cdot (1 + \cos \gamma_t) \quad (9)$$

Za proračun refleksije svjetlosti od zemlje $E_{refl,hor}$ mora se uzeti uticaj albedo efekta (A_L), zatim ukupno zračenje $E_{G,hor}$. Uz ugao nagiba γ_t dobija se:

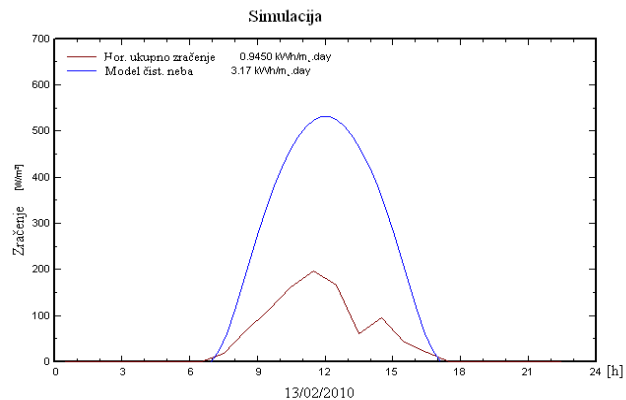
$$E_{refl,tilt} = E_{G,hor} \cdot A_L \cdot 0,5 \cdot (1 - \cos \gamma_t) \quad (10)$$

U Tabeli I su dati podaci o vrijednostima albedo efekta za različite sredine[2].

TABELA I

Površina	Albedo A_L	Površina	Albedo A_L
Trava	0,25	Asfalt	0,15
Travnjak	0,18-0,23	Šume	0,05-0,18
Pokošena trava	0,26	Topli i pjeskoviti predjeli	0,10-0,25
Suha trava	0,28-0,32	Vodne površine	0,05
Šljunak	0,18	Friški sloj snijega	0,8-0,9
Čisti beton	0,30	Stari sloj snijega	0,45-0,70

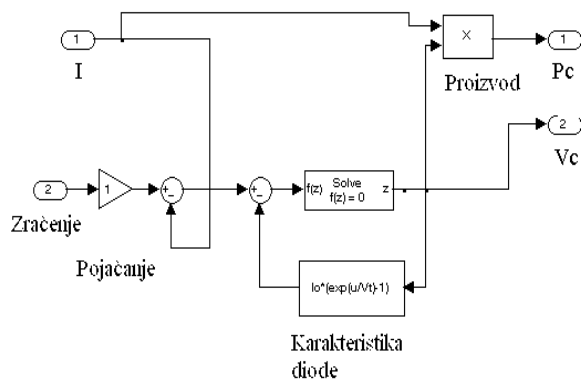
Korištenjem softvera PVSYST V5.02 dobijeni su podaci o projektovanom zračenju za područje grada Doboja tokom jednog dana u februaru (za 13. 02. 2010. god.). Na sl.2. je prikazan dobiveni uporedni grafik za ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnoj površini sa čistim nebom i sa oblacima.



Sl.2. Intenzitet ukupnog zračenja na ravnoj plohi.

3. MODEL FOTONAPONSKOG MODULA

Standardno se fotonaponski moduli izrađuju od solarnih ćelija vezanih u serijskom spoju. Broj serijski vezanih ćelija kod modula H250 koji je korišten za eksperimente je 42. Za model fotonaponskog modula u paketu Matlab/Simulink® može se iskoristiti predloženi model solarne ćelije sastavljen od strujnog generatora i poluprovodničke diode [3]. Pomenuti model je sastavljen od strujnog generatora intenziteta struje i zavisnosti od intenziteta upadnog zračenja na solarnoj ćeliji. Na sl.3 je prikazan model solarne ćelije urađen u Simulink paketu.



Sl.3. Model solarne ćelije.

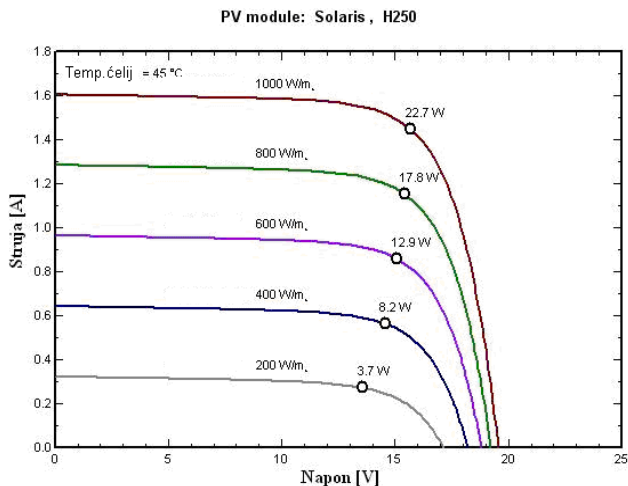
Struja I predstavlja izlaznu struju iz solarne ćelije. Svjetlosno generisana struja je izražena preko intenziteta zračenja. Karakteristika pn spoja je data izrazom za struju diode. Gustina svjetlosno generisane struje data je za standardne uslove testiranja solarnih ćelija (STC *Standard Test Condition*, $1000W/m^2$, $T=25^0C$, brzina vjetrova $1m/s$). Solarne ćelije korištene u fotonaponskom modulu su dimenzija $6,7cm \times 6,7cm$, uz izmjerenu gustinu struje kratkog

spoja solarne ćelije $J_{sc}=34,7\text{mA/cm}^2$. Svjetlosno generisana struja može se opisati obrascem [3]:

$$I_{ph} = \frac{A \cdot J_{sc}}{1000} \cdot G, \quad (11)$$

gdje su: A - površina solarne ćelije, G - intenzitet Sunčevog zračenja, J_{sc} - gustina struje solarne ćelije.

Za serijski spoj 42 solarne ćelije približno istih karakteristika dobija se fotonaponski modul koji je korišten u eksperimentima i čija IV karakteristika i PV karakteristika su prikazane na sl.4 i sl.5. To su karakteristike modula H250, proizvođača „Solaris“ iz Novog Grada u Hrvatskoj.



Sl.4. IV karakteristika modula H250.

Sl.4 prikazuje IV karakteristike solarnog modula za različite intenzitete Sunčevog zračenja. Promjena intenziteta zračenja ima značajan uticaj na struju kratkog spoja modula odnosno svjetlosno generisanu struju, uz manji uticaj na napon otvorenog kola koji je definisan obrascem:

$$V_{ocM} = N \cdot \varphi_T \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right), \quad (12)$$

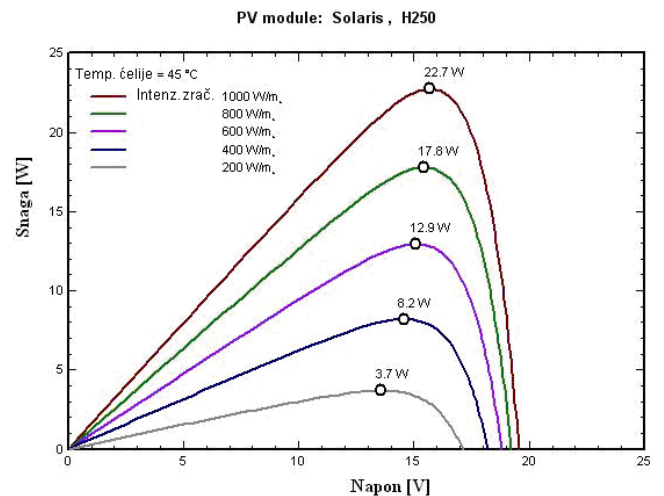
gdje su: V_{ocM} napon otvorenog kola modula, N broj serijski spojenih solarnih ćelija u modulu (za modul H250 je $N=42$).

Izlazna snaga fotonaponskog modula H250 za različite intenzitete zračenja prikazana je na sl.5.

3. POVEĆANJE EFIKASNOSTI FOTONAPONSKOG SISTEMA

Za eksperimente je konstruisan novi uređaj za praćenje i podešavanje optimalnog ugla fotonaponskog modula na najveći intenzitet Sunčevog zračenja. Za razliku od sličnih sistema predlaganih u literaturi predloženo rješenje ima nekoliko prednosti. Jedna od prednosti je mogućnost vrlo brze programske dogradnje ili reprogramiranja uređaja. Prilikom rada moguć je izbor više različitih algoritama rada, opet u zavisnosti od prilika i položaja montiranog sistema.

Druge prednost je mogućnost programiranja mikrokontrolera u na mjestu korištenja bez potrebe za njegovim nošenjem na dodatno programiranje pomoću programatora. Još jedna prednost je stabilnost rada uređaja te mogućnost podešavanja potrebne tačnosti mjerenja. Predložena tačnost je 8 bita sa mogućnosti za povećanjem tačnosti na 10 bita [4].



Sl.5. PV karakteristika modula H250.

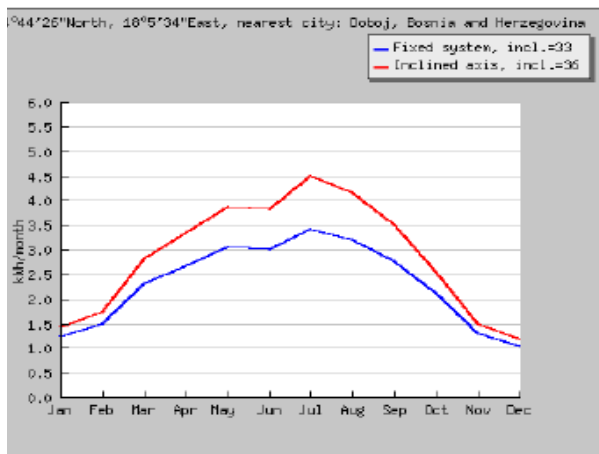
Konstruktivno, uređaj se sastoji od programskog i hardverskog dijela. Programski dio konstruisanog uređaja obuhvata izradu algoritma ponašanja uređaja za praćenje Sunčevog zračenja te podešavanje optimalnog položaja fotonaponskog modula. Ovo rješenje je urađeno u „PICBASIC PRO“ [1] softverskom paketu namijenjenom za programiranje PIC mikrokontrolera. Zbog raznovrsnosti naredbi te prihvatljivog interfejsa ovaj programski paket je vrlo dobar za ovakav tip aplikacija. Za unos, obradu podataka te kompajliranje koda korišten je paket „MicroCode Studio“ verzija 2.30, sa ugrađenim kompajlerom za PICBASIC PRO ver. 2.30. Ovaj paket obuhvata široku paletu PIC mikrokontrolera od serije 12Cxxx pa sve do 18Cxxx. Pored kompajliranja programskog koda paket sadrži i mogućnost unosa koda u mikrokontroler. Izborom jednog od poznatih programatora može se vrlo lako isprogramirati bilo koji mikrokontroler iz „Microchip“-ove serije ponuđenih mikrokontrolera. Prilikom izrade ovog sistema korišten je programator „PROPIC2“ u kombinaciji sa „ICPROG“ softverom za unos koda u mikrokontroler.

Hardverski dio uređaja je baziran na „Microchip“-ovom mikrokontroleru tipa PIC16F877. Upotrebljeni mikrokontroler se odlikuje nizom dobrih osobina. Radi se o RISC CPU koji ima 35 instrukcija za programiranje. Sve instrukcije se izvršavaju u jednom ciklusu osim instrukcija grananja koje se izvršavaju u dva ciklusa. Radna frekvencija je 4 MHz i 20 MHz što omogućava primjenu ovih mikrokontrolera i u zahtjevnim aplikacijama. Pomenuti mikrokontroler posjeduje FLASH programsku memoriju veličine 8Kx14 riječi, zatim 368x8 bajta memorije za podatke (RAM) i na kraju 256x8 bajta EEPROM memorije podataka.

Za pogonski dio sistema odabran je step motor sa dovoljnim momentom i silom za pokretanje sistema koji je

težak oko 3,2 kg i odgovarajući drajver koračnog motora (ULN2803). Pri realizaciji vršeni su eksperimenti u izboru senzorskog dijela. Korištene su solarne ćelije dimenzija 2,5cmx2,5cm, međutim zbog problema oko ograničavanja snopa svjetlosti koji pada na senzore odabrana je verzija sa fototranzistorima. Za mjerenje intenziteta zračenja korišteni su fototranzistori BPW42.

Na sl.6 su prikazani rezultati simulacije sistema sa fiksnom i pokretnom osom za period od godinu dana. Prikazani rezultati su dobijeni simulacijom u programskom paketu "PVGIS" [5].

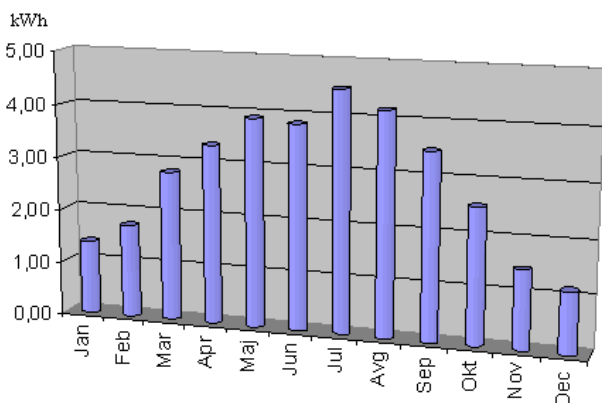


Sl.6. Uporedni prikaz rezultata za fiksni i pokretni sistem.

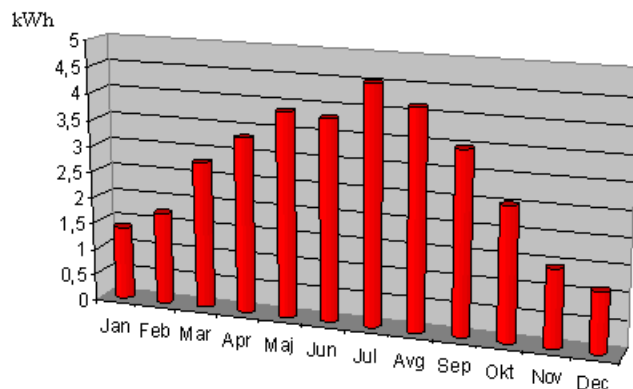
Pokretni sistemi u odnosu na fiksne sisteme sa optimalno podešenim uglom nagiba ostvaruju bolje rezultate i do 30% u proizvodnji električne energije.

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Za eksperiment je korišten autonomni fotonaponski sistem sa fotonaponskim modulom H250 „Solaris“ snage $P_{max}=25W$, baterija SLA 12V, 7Ah, regulator punjenja baterija Microlamp 4A „Helios Technology“ i uređaj za podešavanje optimalnog položaja modula. Mjerenje je vršeno univerzalnim instrumentom „Agilent“ tip U1242A tokom 2009. godine. Na sl.7 su prikazani podaci dobiveni eksperimentalno za fiksni solarni sistem.



Sl.7. Prosječna proizvodnja električne energije za fiksni solarni sistem.



Sl.8. Prosječna proizvodnja električne energije za pokretni solarni sistem.

Na sl.8 su prikazani eksperimentalno dobiveni podaci prosječne mjesečne proizvodnje električne energije za pokretni fotonaponski sistem baziran na istom modulu H250.

Za pokretni sistem sa pokretnom osom dobivena je ukupna godišnja proizvodnja električne energije od oko 34,4kWh. Kod fiksno sistema ukupna godišnja proizvodnja električne energije je bila oko 27,6 kWh. Na osnovu toga se vidi da godišnja dobit pokretnog sistema u odnosu na fiksni solarni sistem iznosi oko 24%.

ZAKLJUČAK

Povećanje efikasnosti fotonaponskih sistema moguće je postići na više načina. Opisana i korištena metoda praćenja trajektorije Sunca i podešavanja optimalnog položaja fotonaponskog modula je relativno jednostavna i jeftina. Ona može dati značajno povećanje generisane električne energije u odnosu na fiksne solarne sisteme. Dobiveni rezultati mogu biti i do 30% u odnosu na fiksne sisteme, što zavisi od konkretnog sistema, njegove veličine i položaja na površini Zemlje. Realizovani i korišteni pokretni solarni sistem na konkretnom mjestu njegovog korištenja ostvaruje poboljšanje od oko 24% u odnosu na isti takav fiksni sistem. S obzirom na mala potrebna ulaganja za dobivanje pokretnog solarnog sistema u odnosu na fiksni, pokazuje se da je primjena metoda za praćenje kretanja Sunca i korištenje pokretnih sistema potpuno opravdano.

LITERATURA

- [1] Z. Sen, "Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques", Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [2] German Energy Society, "Planning and Installing Photovoltaic Systems, Earthscan 8-12 Camden High Street, London, 2008.
- [3] L. Castaner, S. Silvestre, "Modelling Photovoltaic Systems using PSpice®", John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester West Sussex, England, 2002
- [4] A. Stjepanovic, S. Stjepanovic, F. Softic, Z. Bundalo, "Microcontroller Based Solar Tracking System", International Conference TELSIKS 2009, Niš, Serbia.
- [5] European Commission Joint Research Centre Ispra Italy, <http://re.jrc.ec.europa.eu>.