

Uticaj incidentnog ugla solarne iradijacije na proizvodnju panela

Željana Bjelica

student drugog ciklusa studija
Elektrotehnički fakultet
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
zeljana.gasevic@hotmail.com

Sažetak—Solarna energija zauzima značajno mjesto među obnovljivim izvorima energije. Direktno pretvaranje energije Sunca u električnu energiju se vrši preko fotonaponskih ćelija, čiji rad se zasniva na fotonaponskom efektu. Te ćelije su male pa se vrši njihovo povezivanje, tako da se dobijaju solarni moduli. Solarni moduli zajedno sa komponentama koje regulišu, skladište i isporučuju električnu energiju, čine fotonaponski sistem. Fotonaponski moduli se mogu postaviti u fiksni položaj ili tako da prate kretanje Sunca. U ovom radu je pojednostavljenim eksperimentom prikazana promjena snage panela, zavisno od ugla pod kojim svjetlost pada na njegovu površinu.

Ključne riječi—solarna ćelija; solarni modul; fotonaponski (FN) sistem; položaj FN modula

I. UVOD

Skoro sve tehnologije obnovljivih izvora se direktno ili indirektno napajaju pomoću energije Sunca. Energija Sunca se može pretvarati u električnu i u toplotnu energiju. Najjednostavniji način za pretvaranje u električnu energiju jeste pomoću solarnih ćelija, odnosno panela i modula. Oni ne zagađuju okolinu, ne emituju buku, fleksibilni su, lako se transportuju. Osnovne mane solarnih sistema su izostanak proizvodnje električne energije noću i smanjena proizvodnja kada je oblačan dan, kao i cijena instalacije koja je još uvijek relativno visoka. Pored toga, dolazi do starenja panela i do zaprljanja usljed duže izloženosti različitim ambijentalnim uslovima pa se pogoršavaju njegove karakteristike. Da bi se povećala efikasnost fotonaponskih sistema, potrebno je odrediti optimalni položaj panela kako bi se Sunčevo zračenje maksimalno iskoristilo.

II. FOTONAPONSKI SISTEMI

A. Solarne ćelije

Direktno pretvaranje energije Sunca u električnu energiju se vrši na poluprovodničkim elementima koji se nazivaju solarne (fotonaponske) ćelije. One su jednostavne, nemaju pokretne dijelove i ne zagađuju okolinu. Imaju dug životni vijek, dvije

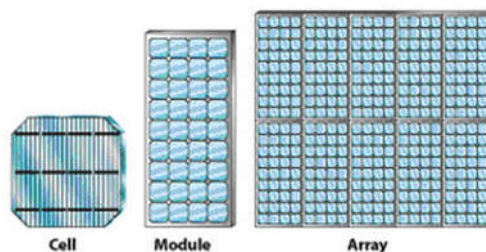
do tri decenije mogu da rade sa visokim postotkom nazivnog kapaciteta.

Rad solarnih ćelija se zasniva na fotoelektričnom efektu, koji predstavlja emisiju elektrona iz metala pod dejstvom svjetlosti određene talasne dužine. Solarna ćelija sadrži poluprovodnike P i N tipa, čijim spajanjem nastaje P-N spoj. Energija Sunca stiže na zemlju u obliku fotona. Kada fotoni padnu na ćeliju, dolazi do stvaranja elektrona i šupljina. Parovi elektron - šupljina koji su formirani daleko od P-N spoja se brzo rekombinuju i nemaju doprinos u stvaranju struje. Ako se Sunčevo zračenje apsorbira u ili blizu P-N spoja dolazi do razdvajanja elektrona i šupljina. Tada se elektroni kreću prema N strani, a šupljine prema P strani, dolazi do razlike potencijala, tj. generiše se struja [1].

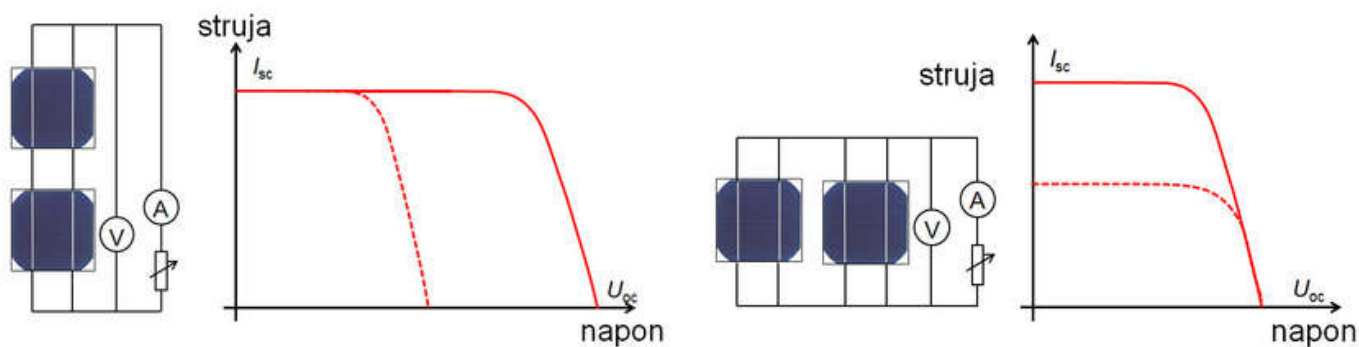
Za izradu fotonaponskih ćelija koriste se razne vrste poluprovodničkih materijala, koji se kombinuju na različite načine da bi se postigla što veća efikasnost. Silicijum je element koji se najčešće koristi prilikom izrade solarnih ćelija. Zavisno od kristalografske strukture, razlikuju se monokristalne, polikristalne i amorfne ćelije [2].

B. Solarni moduli

Pojedinačne fotonaponske ćelije uglavnom imaju male dimenzije (od 1 do 15 cm) i u prosjeku proizvode snagu od 1 do 2W, pa kao takve ne bi mogle imati široku primjenu. Zbog toga se vrši njihovo električno povezivanje. Povezivanjem više ćelija u red, nastaje fotonaponski modul. Uglavnom se vrši redno povezivanje 36 ćelija kako bi se dobio modul od 12V. Moduli se povezuju redno ili paralelno i tako formiraju fotonaponske panele kojima se dobija znatno veća snaga. (Sl. 1.) [2].



Slika 1. Solarna ćelija, modul i panel [3]



Slika 2. Napon i struja pri serijskoj i paralelnoj vezi solarnih ćelija [4]

Serijskim povezivanjem solarnih ćelija postiže se veća vrijednost napona na izlazu, dok vrijednost struje ostaje nepromijenjena (Sl. 2). Ukoliko se želi postići veća struja, moduli se povezuju paralelno.

Povezivanjem ćelija, osim dobijanja veće snage, postiže se i poboljšavanje nekih svojstava kao što su jednostavnost rukovanja, postavljanja i održavanja, te otpornost na vanjske uticaje pa se tako za modul postavlja nekoliko osnovnih zahtjeva:

- mehanička stabilnost,
- postojanost prema uticajima iz neposredne okoline kao što su vremenski uticaji (padavine, vlažnost, udari vjetra i sl.), mehanička oštećenja itd.,
- stabilnost u području temperatura od -50 do +90 °C,
- otpornost na ultraljubičasto zračenje,
- sigurnost od strujnog udara i drugih opasnosti vezanih uz primjenu električne energije [5].

Jedan od problema koji se često javlja je zasjenjenje solarne ćelije, što predstavlja problem za cijeli modul jer ova pojava drastično smanjuje izlaznu snagu modula. Ako je jedna ćelija djelimično zasjenjena, njena struja je manja nego kod ostalih nezasjenjenih ćelija, što dovodi do smanjenja struje cijelog modula. Ako je ćelija potpuno zasjenjena, ona se ponaša kao obična dioda i kroz nju prolazi struja koju proizvedu ostale ćelije. Dolazi do povećanja temperature na ćeliji, što može izazvati čak i uništenje ćelije, pa se zbog toga prilikom spajanja fotonaponskih ćelija u module koriste prenosne diode za zaštitu u serijskom nizu. Korištenjem dioda, spriječen je tok struje kroz zasjenjenu ćeliju pa se sprječava opasnost od pregrijavanja. U praksi se uglavnom spaja jedna prenosna dioda na svakih 15 ili 20 solarnih ćelija [4], [6].

Standardni fotonaponski modul napravljen od silicijuma sadrži više različitih slojeva - transparentni gornji sloj, inkapsulant, donji sloj i okvir. Gornji transparentni sloj modula se uglavnom izrađuje od kaljenog stakla. Inkapsulant štiti solarnu ćeliju od spoljašnjih uticaja, i on povezuje gornji sloj, ćeliju i donji sloj. Donji sloj fotonaponskog modula je tanki

polimerni film. On mora biti otporan na vodu i koroziju i za njegovu izradu se najčešće koristi tedlar. FN modul se stavlja u aluminijski okvir da bi se postigla robusnost i da bi se mogao kasnije jednostavno postaviti na neku površinu [2].

Da bi se električna energija koja se proizvede pomoću fotonaponskih modula isporučila krajnjim potrošačima, potrebne su komponente koje regulišu, skladište i isporučuju energiju. Sve te komponente, zajedno sa modulima, čine fotonaponski sistem. FN moduli na svom izlazu daju jednosmjernu struju, tako da je za napajanje naizmjeničnih potrošača potrebno koristiti pretvarače energetske elektronike, tj. invertore. Fotonaponski sistem se može koristiti kao (Sl. 2):

- samostalni izvor energije (off-grid)
- dodatni izvor energije (on-grid).

Fotonaponski sistemi koji nisu priključeni na mrežu se često nazivaju i autonomnim ili paralelnim sistemima. Jednosmjerna struja koja se proizvede u solarnom modulu se pomoću kablova dovodi do kontrolera čiji je osnovni zadatak sprječavanje prekomjernog punjenja akumulatora. Uglavnom se više akumulatora veže redno ili paralelno, pa se tako formiraju baterijske banke. Tokom dana, tj. kada postoji Sunčeva svjetlost, akumulator se puni, a noću ili kada je oblačno, akumulirana energija se crpi iz njega. Ako je akumulator u potpunosti napunjen, sprječeno je proticanje struje prema njemu. U nekim slučajevima, moguće je i direktno povezati potrošače, tj. bez upotrebe akumulatora. Postoje i tzv. hibridni sistemi kod kojih se u slučaju potrebe za dodatnom energijom, paralelno sa modulom koristi npr. dizel agregat, vjetroturbina i sl. [4], [5].

Za spajanje FN sistema sa elektrodistributivnom mrežom koriste se specijalni mrežni invertori. Fotonaponski sistemi koji su povezani sa mrežom se dijele na aktivne i na pasivne sisteme. U aktivnim sistemima, višak proizvedene struje, umjesto skladištenja u akumulatoru, šalje se u mrežu, a tokom noći, kada nema Sunčeve svjetlosti uzima se iz nje. Ovi sistemi sadrže električno brojilo za mjerenje snage koja se uzima iz mreže i koja se predaje u mrežu. Za razliku od aktivnih sistema, pasivni sistemi ne predaju mreži višak proizvedene struje [4].

III. POLOŽAJ SOLARNIH MODULA

A. Sunčevo zračenje

Osnovni parametar koji je relevantan za proizvodnju električne energije je nivo solarne radijacije (zračenja) (W/m^2). Postoje dva vida solarne radijacije:

- solarna iradijacija (trenutna vrijednost ukupnog solarnog zračenja data za svaki trenutak u toku dana)
- solarna insolacija (srednja vrijednost solarnih iradijacija za neki interval, npr. za godinu, mjesec i sl.) [7].

Sunčevo zračenje stiže na Zemlju u vidu direktnog, difuzionog i reflektovanog zračenja. Ukupno zračenje na vodoravnoj površini se sastoji od direktnog i raspršenog zračenja, dok ukupno Sunčevo zračenje na nagnutoj površini sadrži sve tri komponente [4]. Direktna komponenta I_{BC} , difuziona komponenta I_{DC} i reflektovana komponenta I_{RC} Sunčevog zračenja na panel koji je postavljen pod nekim uglom se mogu izračunati na osnovu:

$$I_{BC} = I_B * \cos \theta$$

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

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

Gdje su:

I_B - direktna iradijacija koja u jedinici vremena dospjeva normalno na kvadratni metar površine,

I_{BH} - direktno Sunčevo zračenje koje u jedinici vremena dospjeva na kvadratni metar horizontalne površine na Zemlji,

I_{DH} - difuziono Sunčevo zračenje koje u jedinici vremena pada na jediničnu horizontalnu površinu na Zemlji,

θ - incidentni ugao upadnog zračenja na panel,

Σ - nagibni ugao panela,

ρ - koeficijent refleksije upadnog zračenja od površine Zemlje.

Incidentni ugao upadnog Sunčevog zračenja na panel se može odrediti na osnovu izraza:

$$\cos \theta = \sin \beta * \cos(\Phi_S - \Phi_V) * \sin \Sigma + \sin \beta * \cos \Sigma$$

Gdje su:

Φ_S - azimutni ugao Sunca,

Φ_C - azimutni ugao solarnog panela,

β - altitudni ugao Sunca.

Ukupna iradijacija I_C na površini panela pri vedrom danu je:

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC}$$

Nivo iradijacije na FN modul zavisi od upadnog ugla Sunčevog zračenja na modul, ali i od vremenskih uslova. Incidentni ugao upadnog Sunčevog zračenja se može mijenjati podešavanjem ugla nagiba modula prema tlu. Upadni ugao Sunčevih zraka na solarni modul je zavisan i od godišnjeg doba, zimi je ovaj ugao manji nego ljeti zbog različitog položaja Sunca na nebu [7].

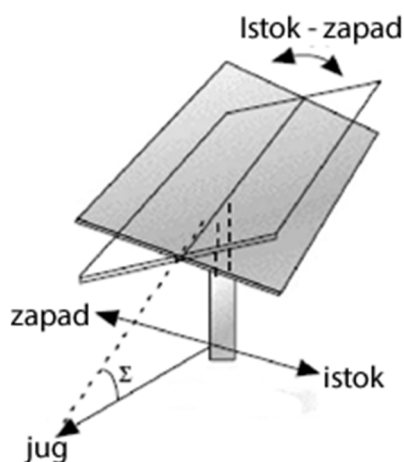
U ukupnom zračenju pri vedrom danu je dominantna direktna komponenta, pa se maksimalno ozračenje dobija kada je površina postavljena okomito na smjer zračenja. Kada je oblačno, postoji postoji samo difuzna komponenta zračenja, pa modul treba postaviti u horizontalan položaj što predstavlja optimalan ugao za difuzno zračenje. Maksimalno ozračenje površine je moguće ako modul ima sistem za praćenje prividnog kretanja Sunca na nebu. Kod sistema koji su postavljeni u fiksni položaj, određuje se vrijednost optimalnog ugla pod kojim je potrebno postaviti modul u odnosu na vodoravnu površinu da bi se dobila najveća moguća godišnja ozračenost. Vrijednost tog ugla iznosi oko 30° . Prilikom postavljanja modula na nosivu konstrukciju pod nekim uglom, veoma je bitno minimalno rastojanje između modula kako prethodni modul ne bi pravio sjenu na sljedećem [5], [8].

B. Solarne elektrane

Tokom posljednjih godina, u svijetu se sve više instaliraju solarne elektrane, tj. elektrane u kojima se električna energija dobija pomoću FN sistema. Faktor koji stvara najveći problem je optimalan položaj panela prema Suncu. U kontinentalnim predjelima se instaliraju fiksne elektrane, a u tropskim solarne elektrane sa sistemom za praćenje Sunca koje su efikasnije, ali su i puno skuplje.

Kod fiksne solarne elektrane, solarni moduli su fiksno postavljeni, pod optimalnim uglom u odnosu na horizontalnu ravan sa orijentacijom prema jugu. Na ovaj način se ne može dobiti optimalna količina električne energije jer solarni moduli ne prate kretanje Sunca, što predstavlja veliki nedostatak ovih elektrana.

Solarne elektrane sa sistemom za praćenje Sunca mogu imati jednoosne ili dvoosne sisteme. Kod elektrane sa jednoosnim sistemom (Sl. 3) solarni moduli su postavljeni pod optimalnim uglom prema jugu. Moduli se okreću oko vertikalne ose od istoka ka zapadu i tako prate promjenu položaja Sunca. Module pokreću elektromotori koji se napajaju iz akumulatora ili iz mreže. Kontrola rada elektromotora se vrši pomoću računara. Osim toga, položaj modula se može i ručno podešavati, ako je iz nekog razloga došlo do otkazivanja računarskog sistema. Nagib solarnih modula u odnosu na visinu Sunca se ne podešava automatski u toku godine, što predstavlja nedostatak solarnih elektrana sa jednoosnim sistemom. Kod solarnih elektrana sa jednoosnim sistemom se javlja efekat zasjenjenja solarnih modula.



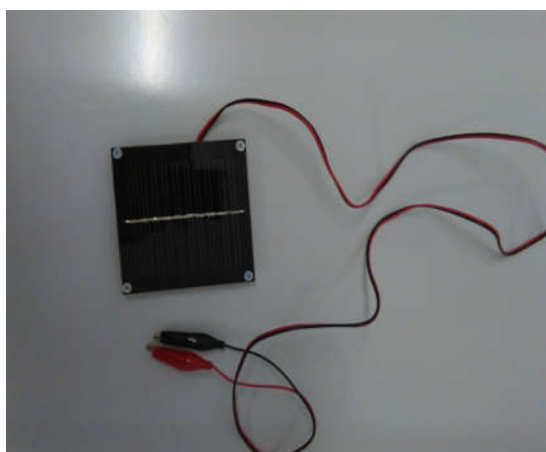
Slika 3. Položaj solarnih modula kod jednoosno rotacione solarne elektrane [1]

Kod solarnih elektrana sa dvoosnim sistemom solarni moduli se okreću oko vertikalne i oko horizontalne ose. Pošto je sistem za dvoosno praćenje položaja Sunca kompleksan, u praksi se mnogo češće primjenjuje sistem za jednoosno praćenje Sunca [1].

IV. EKSPERIMENTALNO POTVRĐIVANJE ZAVISNOSTI SNAGE PANELA OD UPADNOG UGLA SVJETLOSTI

Za proračun energije koja pada na površinu koja je postavljena pod nekim uglom, najvažniji podatak je upadni ugao direktnog zračenja Sunca (θ). To je ugao između upadnih Sunčevih zraka i normale na površinu na koju pada zračenje. Da bi se pokazala zavisnost snage solarnog panela od ugla pod kojim svjetlost pada na njegovu površinu, izvršen je pojednostavljen eksperiment u kom je korišten solarni panel sljedećih karakteristika:

- maksimalni napon 5 V,
- maksimalna struja 100 mA,
- maksimalna snaga 0,5 W
- dimenzije 80*80 mm (Sl. 4).



Slika 4. Solarni panel

Da bi se mjerenje lakše izvršilo, tj. da se ne bi svaki put morao raskopčavati sistem pri promjeni otpornika, korištena je matador pločica na kojoj se nalaze otpornici različitih vrijednosti, a jumperom se bira koji otpornik će biti spojen kao potrošač (Sl. 5). Vrijednosti korištenih otpornika su izmjerene multimetrom klase tačnosti 1% i one iznose:

$$R_1 = 23,6 \Omega,$$

$$R_2 = 201,8 \Omega,$$

$$R_3 = 305,3 \Omega,$$

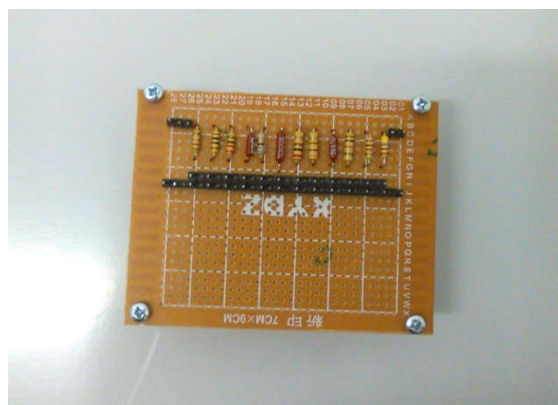
$$R_4 = 500 \Omega,$$

$$R_5 = 1 \text{ k}\Omega,$$

$$R_6 = 2,005 \text{ k}\Omega,$$

Mjerenje se moglo izvršiti i pomoću potencijometra i dva instrumenta (ampermetar i voltmetar). Međutim, digitalni instrumenti koji su bili na raspolaganju nisu imali dovoljnu preciznost za mjerenje malih struja, pa se zbog toga mjerenje radilo sa poznatim vrijednostima otpornika.

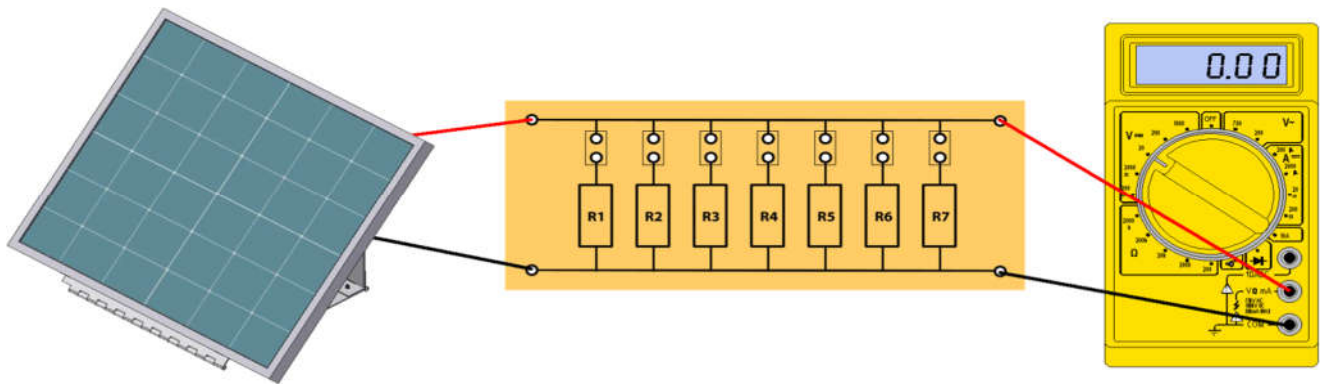
Eksperiment je vršen u zamračenoj prostoriji, kako bi se minimizovao uticaj ambijentalnog osvjetljenja. Panel je postavljen u centar polukruga (poluprečnika 103,5 cm) duž koga je ručno pomjerana baterijska lampa (Sl. 6).



Slika 5. Pločica sa otpornicima



Slika 6. Polukrug uz koji je pomjerana baterijska lampa



Slika 7. Povezivanje panela sa otpornicima i multimetrom

Solarni panel je povezan sa matador pločicom. Na pločicu je spojen i multimetar kako bi se njime mjerila vrijednost napona. Na Sl. 7. je dat šematski prikaz spajanja panela, pločice i multimetra.

Baterijska lampa je prvo postavljena uz polukrug tako da osvjetljava panel pod uglom od 0°. Multimetrom je mjereno napon, a struja je određena na osnovu Omovog zakona.

$$I = \frac{U}{R}$$

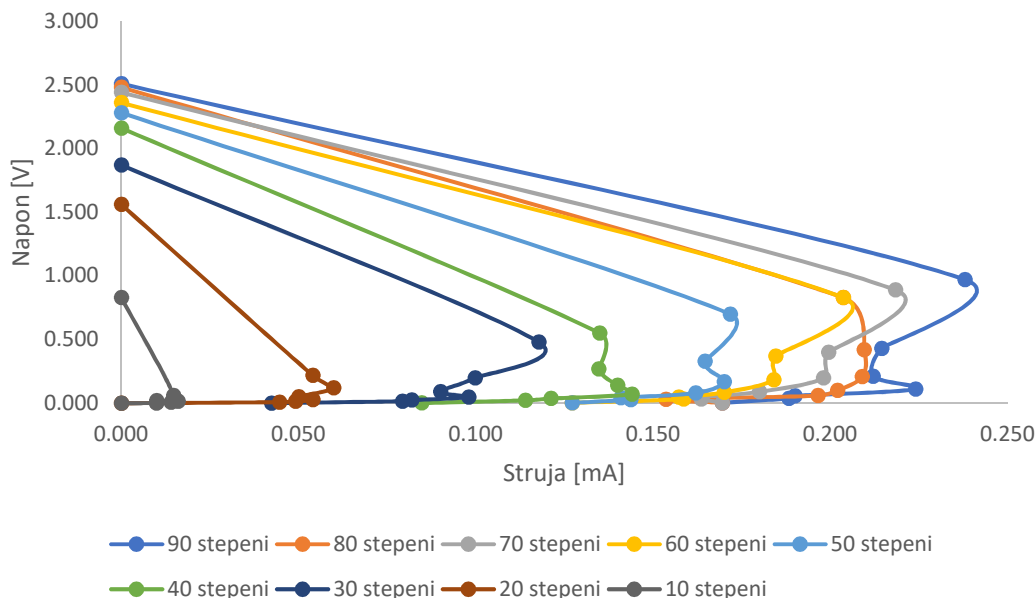
Množenjem struje i napona dobija se snaga koju panel daje.

$$P = U * I$$

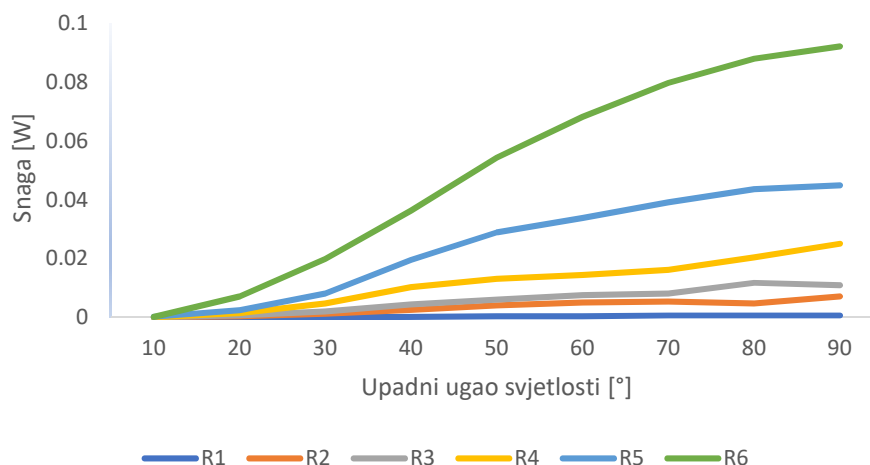
Mjerenja su vršena za 6 različitih vrijednosti otpornika. Za početnu vrijednost upadnog ugla od 0°, snaga je iznosila 0 W. Potom se baterija pomakne tako da osvjetljava panel pod uglom od 10°. U svakom narednom koraku, vrijednost ugla je povećavana za 10°, sve dok ugao nije dostigao vrijednost od 90°.

Na Sl. 8 je prikazana strujno – naponska karakteristika panela, za različite uglove pod kojima svjetlost pada na njegovu površinu. Što je veći upadni ugao svjetlosti, veći je napon i struja panela, a samim tim i izlazna snaga. Kao što je i očekivano, rezultati su pokazali da je izlazna snaga panela najveća kada svjetlost direktno pada na njega, odnosno pod uglom od 90° (Sl. 9).

Kao što su eksperimentalni rezultati pokazali, idealno bi bilo da solarni paneli uvijek budu direktno okrenuti prema izvoru osvjetljenja – Suncu (da svjetlost na njih pada pod uglom od 90°). Međutim, opšte je poznato da se taj ugao (između stacioniranog objekta i Sunca) mijenja usljed Zemljinog kretanja oko Sunca. Zbog toga bi umjesto fiksno postavljenih solarnih modula, bilo bolje koristiti module koji posjeduju sistem za praćenje položaja Sunca.



Slika 8. Strujno - naponska karakteristika panela pri različitim upadnim uglovima svjetlosti



Slika 9. Promjena snage panela sa povećanjem upadnog ugla svjetlosti

ZAKLJUČAK

Zbog dnevnih i sezonskih promjena azimutnog i altitudnog ugla Sunca, incidentni ugao pod kojim padaju zraci Sunca na modul sa fiksnom orijentacijom i nagibom se mijenja. Fiksno postavljene module mogu da apsorbiraju manje Sunčevog zračenja nego module koji se mogu podešavati tako da prate kretanje Sunca. Sa smanjenjem upadnog ugla pod kojim Sunčevo zračenje pada na površinu panela, smanjuje se i njegova izlazna snaga. Stoga, idealno bi bilo kada bi se uvijek koristili sistemi koji omogućavaju promjenu položaja modula tako da Sunčevi zraci uvijek budu okomiti na njegovu površinu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je napisan na osnovu projekta „Solarna energija“ koji je rađen pod mentorstvom profesora Čedomira Vujović.

LITERATURA

- [1] D. Milosavljević, „Proučavanje energetske efikasnosti solarnih elektrana u Republici Srbiji i Republici Srpskoj.“ Univerzitet u Nišu prirodno-matematički fakultet, Niš, 2013.
- [2] L. Šikić, „Energija sunca i solarne inovacije za budućnost.“ Veleučilište u Šibeniku, Šibenik, 2016.
- [3] T. Vasić, A. Stjepanović, „Mogućnosti primjene solarne energije,“ Infoteh-Jahorina Vol. 8, Ref. F-11, p. 875-878, Mart 2009.

- [4] B. Daraboš, „Projektiranje i izgradnja solarne elektrane Solvis 2.“ Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.
- [5] A. Žiher, „Analiza uticaja izgradnje FN sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava i cijenu električne energije na otoku Korčuli.“ Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [6] Y. Sun, S. Chen, L. Xie, R. Hong, H. Shen. „Investigating the Impact of Shading Effect on the Characteristics of a Large-Scale Grid-Connected PV Power Plant in Northwest China.“ International Journal of Photoenergy, Volume 2014.
- [7] J. Đ. Jovanović, „Unapređenje performansi energetske efikasne projektovanja eksperimentalnim i simulacionim istraživanjima pcm materijala i ugradnjom fotonaponskih sistema u omotače građevinskih objekata.“ Fakultet za graditeljski menadžment, Beograd, 2017.
- [8] J. Mikulović, Ž. Đurišić, R. Kostić, „Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela.“ Infoteh-Jahorina Vol. 12, Mart 2013.

ABSTRACT

Solar energy is very important renewable energy source. Direct conversion of solar energy into electricity is done through photovoltaic cells, whose work is based on photovoltaic effect. Solar moduli consist of several PV cells that are connected in serial or parallel. Solar modules together with components that regulate, store, and deliver electricity, make up a photovoltaic system. Photovoltaic modules can be set at a fixed angle or can monitor the movement of the Sun. In this paper, the power of the panel is experimentally shown, depending on the angle under which the light falls on it.

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Željana Bjelica