

Uticaj zasenčenja na proizvodnju fotonaponskih panela

Jelena Kušić, Ana Đorđević

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija

jelenaetf@gmail.com, anaetf@gmail.com

Željko Đurišić

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
djurisic@etf.rs

Sadržaj— Pri proračunima proizvodnje fotonaponske elektrane obično se zanemaruje uticaj zasenčenja na smanjenje zračenja, a samim tim i proizvodnje. Zasenčenje može da izazove velike gubitke za solarni energetski sistem, stoga je modelovanje ovog uticaja jako značajno za procenu proizvodnje. U radu je prikazano kako se uticaj senki okolnih objekata može uzeti u obzir pri proračunu zračenja. LpsjTČfokfn! obwfefof! nfupef! j{wsTfob! kf! qspdfob! tnbokfokb! qspj{wpeokf! sfbmoph! gpupobqpotlph!tjtufnb/ Zbog različite propustljivosti zračenja, posmatran je i uticaj prozračnosti objekata koji stvaraju senku. Još jedan nedostatak PV sistema instaliranog na zemlji je u činjenici da senke nastaju i od stane drugih modula unutar samog sistema, pa je procena tnbokfokb! qspj{wpeokf! gpupobqpotlph!tjtufnb! j{wsTfob! vwbfbwbkvČj! j! pwbk! vujdbk.

Ključne reči— fotonaponski sistem; zasenčenje; proizvedena snaga; solarni dijagram;

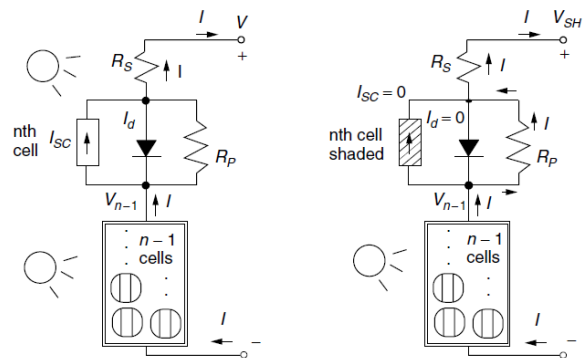
I. UVOD

Poslednjih godina prošlog veka došlo je do nagle ekspanzije u primeni fotonaponskih modula na različitim površinama, krovovima kuća, delovima fasada zgrada, poslovnim objektima i sl. Ovakva primena je otvorila nove koncepte u iskorišćenju, distribuciji i potrošnji solarne energije. Međutim, površine koje nisu izložene senkama okolnih objekata teško je naći u stvarnosti. Razno drveće i žbunje, kao i druge kuće koje su u blizini, utiču na zračenje koje bi fotonaponski sistem mogao apsorbovati. Novi koncepti postavljanja fotonaponskih modula su doveli do toga da paneli u nizu, zbog prostornog razmeštaja, nisu jednako osunčani, pa se kao problem pojavio i efekat zasenčenja solarnog niza. Usled zasenčenja PV modula dolazi do smanjenja raspoložive struje modula, što može da izazove značajne gubitke u proizvodnji fotonaponskog sistema. Dakle, naredni odeljci objašnjavaju kako se efekat zasenčenja može uzeti u obzir pri proračunima zračenja.

II. EFEKAT ZASENČENJA JEDNE ČELIJE MODULA

Na Sl. 1 je prikazan modul sa n redno vezanih PV ćelija, pri čemu je izdvojena jedna od ćelija i prikazana njenom ekvivalentnom zamenskom šemom [1]. Sve ćelije na slici levo

su osvetljene, tako da je struja generisanja svake ćelije ista. Na slici desno izdvojena ćelija je prekrivena i njena insolacija je



Slika 1. Zasenčenje jedne ćelije modula

0. Strujni izvor u modelu ove ćelije ne generiše struju, pa predstavlja prekid u nizu n redno vezanih izvora. Jedini put zatvaranja struje koju generišu ćelije koje nisu zasenčene je preko otpora R_p jer je dioda negativno polarisana (blokirana).

Usled pada napona na obojnoj otpornosti zasenčene ćelije doći će do pada napona na priključcima modula, pa samim tim i do pada snage koju modul predaje potrošaču. Napon na priključcima modula kada je jedna ćelija zasenčena V_{SH} , je manji od napona V , kada su sve ćelije sa istom insolacijom, za pad napona na obojnoj otpornosti zasenčene ćelije važi:

$$V_{SH} = V_{n-1} - I(R_p + R_s) = \left(\frac{n-1}{n}\right)V - I(R_p + R_s) \quad (1)$$

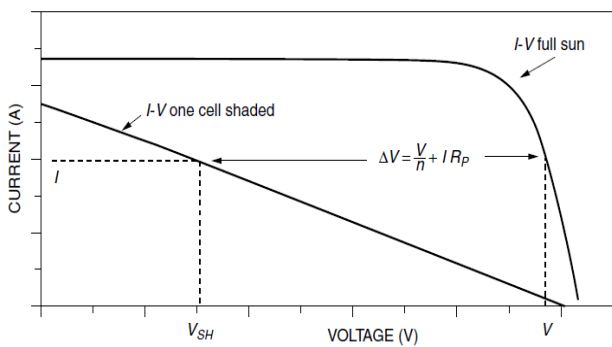
Smanjenje napona na priključcima PV modula uzrokovano senkom na jednoj od ćelija modula je:

$$\Delta V = V - V_{SH} = V - \left(1 - \frac{1}{n}\right)V + I(R_p + R_s) = \frac{V}{n} + I(R_p + R_s) \quad (2)$$

Pošto je $R_s \ll R_p$ može se zanemariti pad napona na rednom otporu, pa je:

$$\Delta V \cong \frac{V}{n} + IR_p \quad (3)$$

Na Sl. 2 je prikazan uticaj zasenčenja jedne od n redno vezanih ćelija na I - V karakteristiku PV modula.



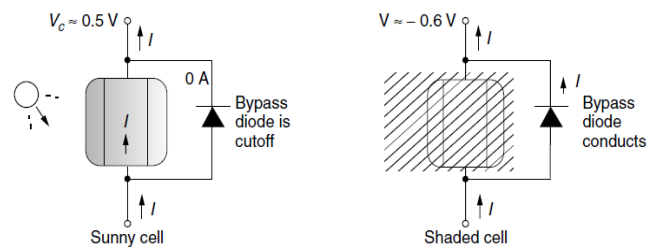
Slika 2. I-V karakteristika PV modula

Zaključak prethodne analize je da svako i malo zasenčenje modula uzrokuje drastičan pad efikasnosti modula. Uzrok takvog pada je inverzna polarizacija p - n spoja ćelije koja je zasenčena.

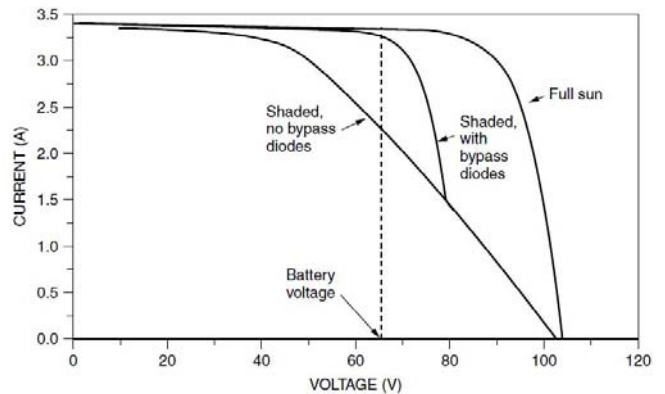
III. MOGUĆNOST PREVAZILAŽENJA PROBLEMA ZASENČENJA

U uslovima zasenčenja, na ćeliji koja je zasenčena se generiše relativno velika snaga disipacije koja stvara tople tačke i degradira samu ćeliju. Iz ovog razloga je neophodno analizirati mogućnost prevazilaženja problema zasenčenja koji se javlja u realnim uslovima eksploatacije. Jedan od efikasnih načina jeste postavljanje dioda za premošćavanje (bypass diodes). Na Sl. 3 je prikazan princip funkcionisanja bypass dioda na primeru jedne od ćelija koja je izdvojena iz modula. Paralelno svakoj od redno vezanih ćelija se postavlja dioda. Pošto je napon na solarnoj ćeliji u normalnim uslovima rada (npr. u tački maksimalne snage) oko 0.5 V, a prag provođenja direktno polarisane diode 0.6 V, bypass dioda će biti u normalnim uslovima inverzno polarisana (slika levo), pa dioda neće imati nikakvu ulogu.

Kada se jedna od ćelija zasenči, stvara se pad napon na otočnoj otpornosti i čim napon dostigne prag provođenja diode, ona će predstavljati malu otpornost i struja će proteći kroz bypass diodu (slika desno). Na ovaj način struja koju generišu ostale diode u rednoj vezi je na mestu zasenčene diode dobila novi efikasan kanal za njeno premošćenje. Uloga bypass dioda je, pored premošćavanja modula koji je zasenčen, i u slučaju kvara na nekom od modula, koji automatski biva premošćen i u električnom smislu izolovan iz sistema. Na Sl. 4 ilustrovan je uticaj zasenčenja na I - V karakteristiku panela sa i bez bypass dioda.



Slika 3. Bypass dioda na primeru jedne od ćelija modula



Slika 4. Uticaj zasenčenja na I-V karakteristiku panela sa i bez bypass dioda

PV paneli se formiraju rednim i paralelnim vezivanjem modula. Kod paralelne veze, za prevazilaženje problema zasenčenja, koriste se blokirajuće diode [2]. Njihova funkcionalna uloga je prikazana na Sl. 5.

U slučaju zasenčenja većeg dela panela (ili oštećenja nekoliko modula) kojeg čine redno vezani moduli, struje koju generišu moduli ostalih rednih veza bi se delom zatvarale kroz zasenčeni deo panela, a delom kroz opterećenje. Blokirajuće diode sprečavaju proticanje struje u kontra smeru kroz module i na taj način održavaju efikasnost panela i u uslovima delimičnog zasenčenja ili oštećenja.

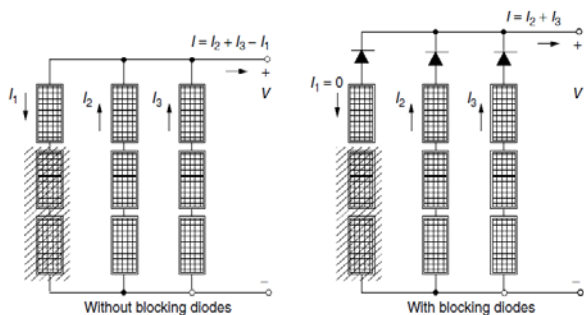
IV. UTICAJ SENKI KOJE STVARAJU OKOLNI OBJEKTI

Da bi se razmotrio uticaj senki koje stvaraju okolni objekti, neophodno je definisati referentnu tačku u odnosu na koju će biti određeni azimutni ugao, kao i ugao pod kojim pada senka objekta (Sl. 6). Tačka koja će sa najvećom verovatnoćom biti u senci je najbolji izbor. U sledećem koraku, azimutni ugao sunca α i ugao određen visinom objekata γ u okolini moraju biti procenjeni u odnosu na referentnu tačku. Ovi proračuni moraju biti izvršeni za sve moguće prepreke u blizini planiranog energetskog solarnog sistema.

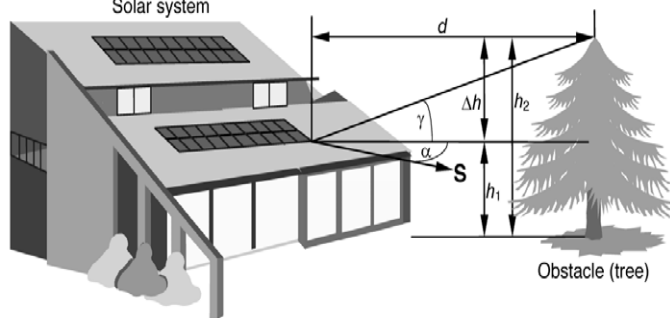
Ugao visine prepreke γ je:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{h_2 - h_1}{d}\right) = \arctan\left(\frac{\Delta h}{d}\right) \quad (4)$$

Specijalizovani instrumenti mogu se koristiti za lakše procene



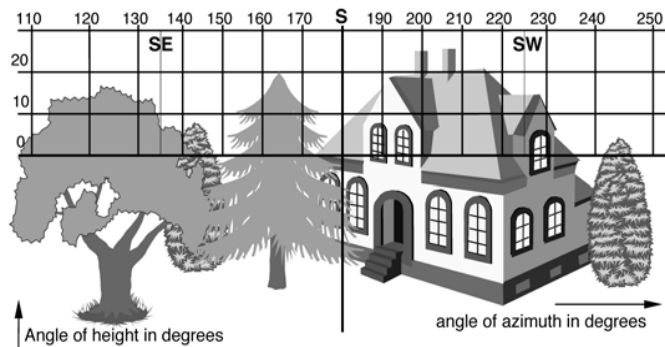
Slika 5. Blokirajuće diode na primeru paralelno vezanih ćelija modula Solar system



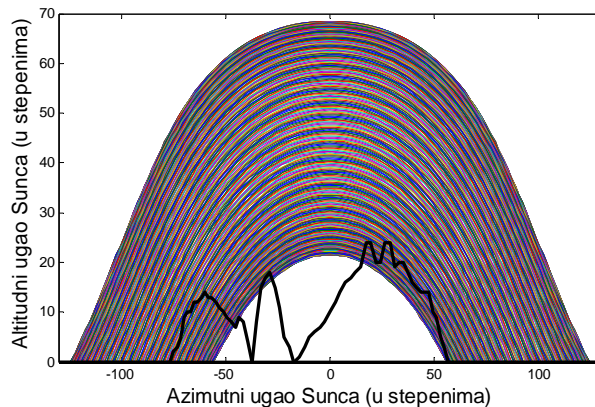
Slika 6. Definicija azimutnog ugla i ugla visine prepreke korišćenjem proizvoljno izabrane referentne tačke

ugla visine objekta i azimutnog ugla. Dijagram gde jedna osa određuje ugao visine objekta, a druga osa azimutni ugao (do 180°) je osnova za takav instrument. Posmatrač gleda kroz ovaj dijagram i može direktno očitati ugao visine prepreke kao i azimutni ugao. Takođe je moguće napraviti digitalne fotografije okoline i koristiti profesionalni softver za analiziranje. Ovaj softver automatski procenjuje azimutni i ugao visine objekta.

Analiza uticaja senki okolnih objekata na proizvodnju PV panela izvršena je za realan fotonaponski sistem sastavljen od 848 modula instalisane snage $295W$, postavljenih na lokaciji Bavanište. Korišćena je aproksimacija okoline prikazana na Sl. 7. Za analizu je korišćen programski paket "MATLAB". Kao ulazni parametri koriste se azimutni uglovi i uglovi visine objekata u okolini posmatranog fotonaponskog sistema. Na dijagramu putanje Sunca se dobija poligonalna aproksimacija silueta iz okoline, kao što je prikazano na Sl. 8. Kao rezultat se dobija godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane, koja bez uvažavanja uticaja senki okolnih objekata iznosi $W_g = 307.1$ MWh, dok je proizvodnja u slučaju kada su senke okolnih objekata uzete u obzir $W_g = 288.27$ MWh. Može se primetiti da je godišnja proizvodnja energije znatno umanjena modelovanjem uticaja senki okolnih objekata, stoga je uvažavanje ovog uticaja veoma značajno pri proračunima. Međutim, ne blokiraju svi objekti direktno zračenje u potpunosti, tako da recimo kroz drveće može proći deo direktnog Sunčevog zračenja. Stoga treba uzeti u obzir i prozirnost okolnih objekata. Propustljivost τ opisuje koji deo direktnog Sunčevog zračenja prolazi kroz objekat.



Slika 7. Okolina videna kroz ekran sa mrežom postavljenom za uglove



Slika 8. Senke objekata ucrtane na dijagramu solarne putanje Sunca

Ispitivanjem propustljivosti listopadnih stabala, dobijeno je da je vrednost ovog koeficijenta u slučaju kada je lišće opalo (zimi) $\tau = 0.64$, dok je u slučaju kada je stablo potpuno u listu (leti) $\tau = 0.23$ [3]. Izvršen je proračun proizvodnje fotonaponske elektrane na godišnjem nivou sa uvažavanjem ovih koeficijenata za objekte u okolini posmatranog fotonaponskog sistema. Kao rezultat se dobija da godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane u slučaju kada je uzeta u obzir i prozirnost okolnih objekata iznosi $W_g = 289.71$ MWh. Godišnja proizvodnja energije je uvećana sa uvažavanjem propustljivosti objekata koji stvaraju senku, pa je uzimanje u obzir ovog efekta bitno pri proceni proizvodnje fotonaponskog sistema.

V. UTICAJ SENKI KOJE STVARAJU MODULI UNUTAR FOTONAPONSKOG SISTEMA

Fotonaponski sistemi često se instaliraju na zemlji, ili na ravnim krovovima. Za montažu fotonaponskih energetskih sistema na zemlji koriste se nosači. Obično se solarni paneli postavljaju pod određenim uglom kako bi se dobilo sto veće zračenje tokom godine. Osim toga, nedostatak horizontalno instaliranih solarnih energetskih sistema su relativno visoki gubici nastali taloženjem prljavštine na površini panela, na primer, taloženjem zagađujućih materija u vazduhu, ptičijeg izmeta, ili na neki drugi način. Takođe, kiša ili sneg mogu lakše očistiti površinu koja je nagnuta, nego horizontalno postavljenu površinu. Kao opšte pravilo važi da, što je manji

ugao nagiba, manji je i efekat čišćenja kišom i snegom. U centralnim evropskim klimatskim uslovima, mogu se očekivati prosečni gubici usled zaprljanja u opsegu od 2-10 % za površine nagnute pod uglom od 30°, u slučaju da se nikada ne čiste ručno. Ovi gubici se značajno povećavaju za manje nagibne uglove panela. U ostalim regionima gde se javljaju dugi periodi bez kiše ovi gubici se takođe mogu značajno povećati.

Međutim, nedostatak PV sistema koji se instalira na zemlji u odnosu na onaj instaliran na krovu kuće je u činjenici da se kod prvih javlja efekat samozasenčenja [4]. Optimizacijom rastojanja između redova panela mogu se smanjiti gubici izazvani pomenutim efektom. Optimalno rastojanje i nagibni ugao se mogu odrediti na sledeći način. Na osnovu poznatog rastojanja između redova d i dužine PV panela l , kao što je prikazano na Sl. 9, definiše se stepen iskorišćenja terena [5]:

$$u = \frac{l}{d} \quad (5)$$

Zasenčenje ima različit uticaj na površine nagnute pod različitim uglovima. Uticaj zasenčenja je najveći u tački P_0 . Ako se stepen iskorišćenosti u povećava, gubici će takođe rasti usled veće izloženosti zasenčenju.

Ugao senke je funkcija stepena iskorišćenja terena i nagibnog ugla panela γ_t (vidi Sl. 10).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{u \cdot \sin \gamma_t}{1 - u \cdot \cos \gamma_t}\right) \quad (6)$$

Ako Sunčevi zraci padaju direktno na solarni sistem i altitudni ugao Sunca je manji od ugla senke α , doći će do samozasenčenja. Dakle može se primetiti da se sa povećanjem ugla senke povećavaju i gubici u zračenju.

Rastojanje između redova panela na osnovu preporuke [6] je:

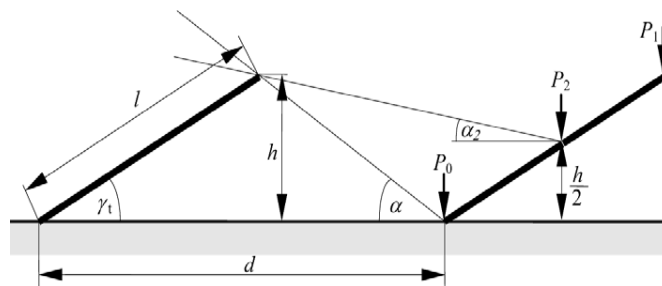
$$d > 4h \quad (7)$$

gde je h najviša tačka panela u odnosu na horizontalnu ravan. U proračunima je razmatran najkritičniji slučaj tj. $d=4h$ pa se za ugao senke α dobija:

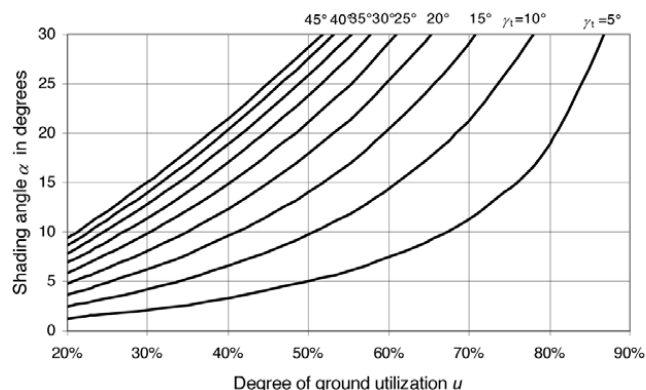
$$\alpha = \frac{1}{4 - \operatorname{ctg} \gamma_t} \quad (8)$$

Analiza uticaja međusobnog osenčavanja susednih redova na proizvodnju PV panela izvršena je za realan fotonaponski sistem prethodno opisan u radu. Za analizu je korišćen programski paket "MATLAB".

Na dijagramu putanje Sunca se dobija aproksimacija senke susednih redova panela, kao što je prikazano na Sl. 11. Kao rezultat se dobija da godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane, bez uvažavanja uticaja senki susednih redova panela, iznosi $W_g = 307.1$ MWh, dok je proizvodnja u slučaju



Slika 9. Dimenzije PV panela i struktura redova



Slika 10. Ugao senke α u funkciji stepena iskorišćenja terena u za različite nagibne uglove γ_t

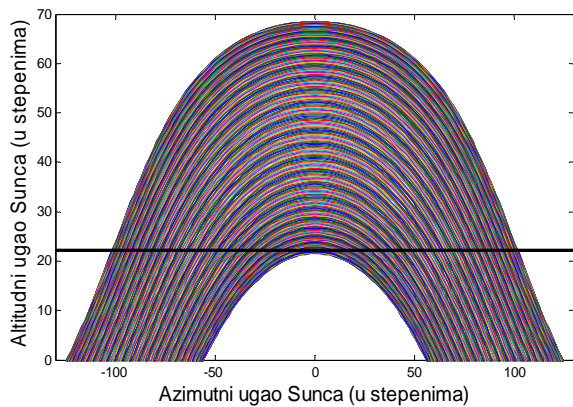
kada su uzete u obzir senke koje stvaraju moduli unutar samog sistema $W_g = 292.56$ MWh.

VI. ZAKLJUČAK

Površine koje nisu izložene senkama okolnih objekata je teško naći u stvarnosti. Zasenčenje može da izazove velike gubitke u proizvodnji fotonaponskog sistema. Osim gubitaka u proizvodnji, negativan efekat zasenčenja je i pojava generisanja relativno velike snage disipacije na ćeliji koja je zasenčena, što stvara tople tačke i degradira sistem.

U radu je razmotreno kako se uticaji senki, koje potiču od različitih izvora, mogu uzeti u obzir pri proračunu zračenja. Na osnovu analiza sprovedenih u radu, a koje su izvršene korišćenjem programskog paketa "MATLAB", rezultati proračuna proizvodnje PV sistema sa uvažavanjem uticaja senki okolnih objekata, prozračnosti objekata, kao i senki koje potiču od drugih modula unutar samog PV sistema prikazani su u Tabeli I.

Može se zaključiti da je uvažavanje ovih uticaja pri proceni proizvodnje električne energije jednog fotonaponskog sistema jako bitno, jer su gubici u zračenju, a samim tim i u proizvodnji, značajni.



Slika 11. Senke redova panela ucrtane na dijagramu solarne putanje Sunca

TABELA I. ANALITIČKI REZULTATI PRORAČUNA PROIZVODNJE PV SISTEMA

<i>Proračun proizvodnje PV sistema</i>	<i>Godišnja proizvodnja PV panela (MWh)</i>
Bez uvažavanja senki	307.1
Sa uvažavanjem senki okolnih objekata	288.27
Sa uvažavanjem senki okolnih objekata i njihove prozračnosti	289.71
Sa uvažavanjem senki modula unutar samog PV sistema	292.56

LITERATURA

- [1] Ž. Đurišić, "Obnovljivi izvori energije", Beograd, 2009.V.
 [2] J. Mikulović, Ž. Đurišić, "Statička metoda za procenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sistema", Infoteh, Mart 2012.

- [3] Quaschnig, "Understanding Renewable Energy Systems", Earthscan, London, Sterling, VA
 [4] M. Forcan, "Efekat djelimičnog osunčanja solarnog niza i predložena metoda njegove eliminacije", INFOTEH-JAHORINA Vol. 12, March 2013, Istočno Sarajevo, BiH
 [5] Gilbert M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Stanford University
 [6] D. James, Study Guide for Photovoltaic System Installers and Sample Examination, September 12, 2003 for the north american board of certified energy practitioners

ABSTRACT

In calculations of the production of photovoltaic power plants, the impact of shadowing on the reduction of radiation, and therefore production, is typically ignored. Shadowing can cause large losses for a solar energy system, therefore, modeling of impact is very important for the assessment of production. This work shows how the impact of the shadow of surrounding objects can be taken into account in calculations of the radiation. Using these methods reduction in real production of photovoltaic systems is calculated. Due to the different permeability to pass the radiation, the effects of objects which create a shadows are also observed. Another disadvantage of PV systems installed on the field is in the fact that shadows can be formed from other modules in the photovoltaic system, and the estimation of reducing production of photovoltaic systems which account this effect is taken.

Keywords-photovoltaic system; shading; produced power, solar diagram;

THE EFFECTS OF SHADOWING ON THE PRODUCTION OF PHOTOVOLTAIC PANELS

Jelena Kušić
 Ana Đorđević
 Željko Đurišić