

Određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela

Jovan Mikulović, Željko Đurišić
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
mikulovic@etf.rs, djurisic@etf.rs

Rastko Kostić
Tehnicom computers
Beograd, Srbija
racabike@gmail.com

Sadržaj— U ovom radu je prikazan postupak za određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela u cilju dobijanja maksimalne godišnje insolacije na površini fotonaponskog (PV) sistema. Određivanje optimalnih azimutnih i nagibnih uglova solarnih panela pri vedrom danu izvršeno je na osnovu komponenti iradijacije koje su dobijene polazeći od ekstraterestričke iradijacije. Određivanje optimalnih azimutnih i nagibnih uglova solarnih panela uz uvažavanje realnih uslova oblačnosti u toku godine izvršeno je na osnovu raspoloživih mernih podataka o srednjoj desetominutnoj horizontalnoj solarnoj iradijaciji i temperaturi ambijenta u toku jedne godine.

Ključne reči— fotonaponski panel; iradijacija, insolacija, optimalni nagibni ugao

I. UVOD

Danas je u velikoj meri osvojena tehnologija i razvijena industrija za konverziju energije iz mnogih obnovljivih izvora, a pre svega energije Sunca i vetra [1]-[3]. Razvoj energetske elektronike, korišćenje savremenih materijala i sve veća potreba i zahtevi za korišćenjem čistih izvora energije rezultovali su naglim razvojem solarne energetike u svetu. Energija Sunca se direktno može pretvarati u električnu energiju pomoću fotonaponskih (PV-*photovoltaic*) solarnih ćelija, odnosno fotonaponskih modula i panela. Osim što se ne zagađuje prirodna sredina, korišćenje fotonaponskih modula ima i niz drugih prednosti: direktna konverzija energije Sunca u električnu energiju, nema mehanički pokretnih delova, nema buke, veoma dug životni vek solarnih modula, Sunčeva energija je besplatan, neiscrpan i sveprisutan energent, zatim, lakoća transportovanja fotonaponskih modula i panela, fleksibilna veličina sistema, itd. Pored ovih prednosti postoje i dve osnovne mane solarnih modula: zavisnost od Sunca, što kao posledicu ima izostanak proizvodnje električne energije noću i smanjenu proizvodnju kada je oblačan dan, i kao problem treba navesti cenu solarnih sistema koja je još uvek relativno visoka. Varijacije Sunčevog zračenja u toku godine čine da fotonaponski sistem ima u proseku mali faktor iskorišćenja kapaciteta, što zajedno sa niskom efikasnošću pri fotonaponskoj konverziji rezultuje da se relativno mali procenat Sunčeve energije pretvara u električnu energiju.

U cilju povećanja efikasnosti fotonaponskih sistema, neophodno je fotonaponske panele optimalno orijentisati i postaviti pod nagibnim uglovima tako da se postigne

maksimalno iskorišćenje energije Sunčevog zračenja u toku godine na određenoj mikrolokaciji [4]-[7]. Postupak određivanje optimalnih azimutnih i nagibnih uglova panela zahteva poznavanje komponenti Sunčevog zračenja na panel i uvažavanje uticaja temperature ambijenta. U ovom radu je prikazan postupak određivanje optimalnih azimutnih i nagibnih uglova fiksno postavljenih PV panela pri vedrom danu i u uslovima realne oblačnosti.

II. ODREĐIVANJE OPTIMALNOG NAGIBNOG UGLA SOLARNOG PANELA PRI VEDROM DANU NA OSNOVU EKSTRATERESTRIČKE IRADIJACIJE

Solarno zračenje stiže do solarnog panela u vidu direktnog, difuzionog i reflektovanog zračenja. Ove komponente solarnog zračenja na solarni panel pri vedrom danu se mogu izračunati na osnovu ekstraterestričke iradijacije. Ovakav proračun ne uvažava oblačnost i podrazumeva da je dan vedar (*Clear day model* – „Model vedrog dana“). Izraz za ekstraterestričku iradijaciju uzima u obzir dnevne promene te iradijacije tokom godine zbog promene udaljenosti Zemlje od Sunca [1]:

$$I_0 = SC \cdot \left(1 + 0.034 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \quad (1)$$

gde su: I_0 ekstraterestrička iradijacija, $SC=1367 \text{ W/m}^2$ solarna konstanta, n redni broj dana u godini.

Solarno zračenje koje u vidu direktnog zračenja dospe na zemljinu površinu je manje od ekstraterestričkog zračenja zbog apsorpcije i raspršivanja u atmosferi. Procena direktne iradijacije na zemljinoj površini je data Bouguer-Lambertovim zakonom:

$$I_B = A e^{-km} \quad (2)$$

gde su: I_B direktna iradijacija na površini Zemlje; A fluks ekstraterestričkog zračenja koji uđe u atmosferu; k koeficijent atenuacije sunčevog zračenja u Zemljinoj atmosferi (optička dubina), m optička vazдушna masa.

Proračun veličina koje figurišu u prethodnoj relaciji se vrši prema sledećim relacijama:

$$A = 1160 + 75 \sin\left(\frac{360}{365}(n - 275)\right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

$$k = 0.174 + 0.035 \sin\left(\frac{360}{365}(n - 100)\right) \quad (4)$$

$$m = \frac{1}{\sin \beta} \quad (5)$$

gde je β altitudni ugao Sunca.

Direktna komponenta I_{BC} , difuziona komponenta I_{DC} i reflektovana komponenta I_{RC} Sunčevog zračenja na panel se mogu izračunati na osnovu:

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta \quad (6)$$

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2}\right) \quad (7)$$

$$I_{RC} = \rho(I_{BH} + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2}\right) \quad (8)$$

gde su: θ incidentni ugao upadnog zračenja na panel, Σ nagibni ugao panela, ρ koeficijent refleksije upadnog zračenja od površine Zemlje, I_{BH} direktna komponenta zračenja na horizontalnu površinu, I_{DH} difuziona komponenta zračenja na horizontalnu površinu.

Direktna komponenta zračenja na horizontalnu površinu I_{BH} i difuziona komponenta zračenja na horizontalnu površinu I_{DH} se izračunavaju na sledeći način:

$$I_{BH} = I_B \sin \beta \quad (9)$$

$$I_{DH} = C \cdot I_B \quad (10)$$

gde je C difuziona konstanta.

Incidentni ugao upadnog zračenja na panel i difuziona konstanta se izračunavaju na osnovu:

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos(\Phi_S - \Phi_C) \cdot \sin \Sigma + \sin \beta \cdot \cos \Sigma \quad (11)$$

$$C = 0.095 + 0.04 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (n - 100)\right] \quad (12)$$

gde su: Φ_S azimutni ugao Sunca i Φ_C azimutni ugao solarnog panela.

Ukupna iradijacija I_c na površini panela pri vedrom danu je:

$$I_c = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (13)$$

Diferenciranjem ukupne iradijacije na panel po nagibnom uglu panela Σ i izjednačavanjem sa nulom dobija se izraz koji definiše optimalni nagibni ugao panela Σ_{opt} pri vedrom danu:

$$\text{tg} \Sigma_{opt} = \frac{\cos \beta \cdot \cos(\Phi_S - \Phi_C)}{\sin \beta + \frac{C}{2} - \frac{\rho}{2}(\sin \beta + C)} \quad (14)$$

Zbog dnevnih i sezonskih promena azimutnog i altitudnog ugla Sunca, incidentni ugao pod kojim padaju solarni zraci na modul sa fiksiranom orijentacijom i nagibom se menja. Maksimalno iskorišćenje modula sa aspekta direktnog zračenja bi se postiglo ako bi upadno zračenje uvek bilo normalno na površinu zračenja, što je moguće ostvariti ako modul ima sistem koji omogućava praćenje altitudnog i azimutnog ugla Sunca. Optimalni ugao sa aspekta direktnog zračenja nije optimalan i sa aspekta difuznog zračenja. Pri vedrom danu, pošto je direktno zračenje dominantno, optimalni nagibni ugao panela je neznatno manji od nagibnog ugla koji odgovara da upadno zračenje bude normalno na panel. Pri oblačnom danu, kada postoji samo difuzna komponenta zračenja, modul treba postaviti u horizontalu, što predstavlja optimalan ugao za difuzno zračenje. Zbog kompleksnosti sistema za dvoosno praćenje Sunca u praksi se mnogo češće koristi sistem za jednoosno praćenje Sunca. Kod ovog sistema nagibni ugao solarnog modula odgovara geografskoj širini L , dok sistem za praćenje rotira modul u smeru istok-zapad, odnosno prati azimut Sunca (za severnu hemisferu). Kod fiksno postavljenih fotonaponskih panela, u literaturi se preporučuje orijentacija panela ka jugu i nagibni ugao koji odgovara geografskoj širini L lokacije na kojoj se postavlja panel. Ipak, pri takvom nagibnom uglu panela njegova proizvodnja u toku godine neće biti maksimalna s obzirom na periode oblačnosti kada je dominantna difuzna komponenta zračenja za koju je optimalan nagib panela $\Sigma=0^0$ u odnosu na ravan Zemlje. Optimalni nagibni ugao fiksno postavljenog panela je očigledno manji od ugla koji odgovara geografskoj širini L lokacije na kojoj se postavlja panel. Zbog toga je od velike važnosti poznavati difuznu komponentu solarnog zračenja i broj sati oblačnosti u toku godine s obzirom da od toga zavisi optimalni nagibni ugao fotonaponskih panela.

III. ODREĐIVANJE OPTIMALNOG NAGIBNOG UGLA

SOLARNOG PANELA U REALNIM USLOVIMA OBLAČNOSTI NA OSNOVU MERNIH PODATAKA O HORIZONTALNOJ IRADIJACIJI

Da bi se merni rezultati o ukupnoj horizontalnoj iradijaciji I_H , koji su prikupljeni za određeni period, ekstrapolirali na proizvoljno orijentisan solarni modul, potrebno je dekomponovati ukupnu horizontalnu iradijaciju na odgovarajuću direktnu komponentu I_{BH} i difuznu komponentu I_{DH} [1], [8]-[10]:

$$I_H = I_{BH} + I_{DH} \quad (15)$$

Za proračun komponenti ukupne horizontalne iradijacije neophodno je proračunati indeks vedrosti (čistoće) K_T . Indeks vedrosti se računa za svaki dan ili se računa kao srednji mesečni indeks vrednosti. Indeks vedrosti se definiše kao odnos srednje horizontalne insolacije na površini Zemlje \bar{I}_H (mernom mestu) i srednje horizontalne ekstraterestričke insolacije na površini atmosfere \bar{I}_0 , na geografskoj širini i dužini koja odgovara mernom mestu na Zemlji:

$$K_T = \frac{\bar{I}_H}{\bar{I}_0} \quad (16)$$

Veći indeks znači da nebo nije oblačno i da je atmosfera čista i obrnuto. Srednja horizontalna dnevna insolacija ekstraterestričkog zračenja može se dobiti integraljenjem ukupnog ekstraterestričkog zračenja od izlaska do zalaska Sunca i njegovom projekcijom na horizontalnu površinu, što rezultuje sledećom relacijom:

$$\bar{I}_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) SC \left[1 + 0.034 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] (\cos L \cos \delta \sin H_{sr} + H_{sr} \sin L \sin \delta) \quad (17)$$

gde su: H_{sr} satni ugao izlaska Sunca, L geografska širina, δ solarna deklinacija.

Proračun srednje mesečne solarne deklinacije i satnog ugla izlaska Sunca su definisani sledećim relacijama:

$$\delta = 23.4 \sin\left(\frac{360}{365}(n-81)\right) \quad (18)$$

$$H_{sr} = \arccos(-\operatorname{tg}L \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (19)$$

Liu-Jordan-ova empirijska relacija za dekompoziciju ukupnog horizontalnog zračenja na direktnu i difuznu komponentu daje vezu između difuzne komponente zračenja na horizontalnu površinu i indeksa vedrosti [1]:

$$\frac{\bar{I}_{DH}}{\bar{I}_H} = 1.39 - 4.027K_T + 5.531K_T^2 - 3.108K_T^3 \quad (20)$$

Indeks vedrosti K_T se može primeniti za izračunavanje direktne i difuzne komponente insolacije ali takođe i za izračunavanje direktne komponente iradijacije I_{BH} i difuzne komponente iradijacije I_{DH} . Direktna komponenta iradijacije na PV panel se izračunava na osnovu:

$$I_{BC} = I_{BH} \cdot \frac{\cos\theta}{\sin\beta} = I_{BH} \cdot R_B \quad (21)$$

gde je $R_B = \cos\theta/\sin\beta$ faktor kosine. Incidentni ugao θ upadnog zračenja na panel zavisi od orijentacije panela Φ_C i nagiba panela Σ ali i od altitudnog ugla Sunca β i azimutnog ugla Sunca Φ_S tako da se faktor kosine menja u toku dana. Ukoliko se poseduje samo informacija o srednjoj mesečnoj (ili dnevnoj) vrednosti horizontalne iradijacije onda je potrebno sračunati srednju vrednost faktora kosine.

Za nagibni ugao modula Σ , direktna, difuzna i reflektovana komponenta iradijacije na površinu panela se mogu izračunati prema relacijama (6), (7) i (8). Diferenciranjem ukupne iradijacije na panel po nagibnom uglu panela Σ i izjednačavanjem sa nulom dobija se izraz koji definiše optimalni nagibni ugao panela Σ_{opt} u realnim uslovima (izraz važi i za vedar i za oblačan dan):

$$\operatorname{tg}\Sigma_{opt} = \frac{2I_{BH} \cdot \cos(\Phi_S - \Phi_C)}{\operatorname{tg}\beta(2I_{BH} + I_{DH} - \rho(I_{BH} + I_{DH}))} \quad (22)$$

IV. UTICAJ TEMPERATURE NA OPTIMALNI NAGIBNI UGAO PV PANELA

Važan faktor koji utiče na efikasnost PV sistema je i temperatura fotonaponskih modula. Povećanje temperature modula iznad standardne vrednosti (25 °C) uzrokuje pad efikasnosti modula jer se smanjuju napon otvorenog kola i struja kratkog spoja modula. Na temperaturu modula dominantno utiče snaga zračenja Sunca i uslovi hlađenja, odnosno vetar. Za svaki modul proizvođač definiše temperaturu pri nominalnim uslovima eksploatacije (*NOCT – Nominal Operation Cell Temperature*). *NOCT* je temperatura modula pri ambijentalnoj temperaturi 20°C, solarnoj iradijaciji 800 W/m² brzini vetra 1 m/s. Na osnovu podatka *NOCT* se može proceniti temperatura ćelije (modula ili panela):

$$T_{PV} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8}\right) \cdot I_C \quad (23)$$

gde su: T_C temperatura solarnih modula, T_{amb} temperatura ambijenta, I_C solarna iradijacija na površini modula.

S obzirom da je pad efikasnosti fotonaponskih ćelija usled povećanja temperature solarne ćelije iznad standardne vrednosti (25 °C) $\Delta P = -0,5\%/^{\circ}\text{C}$, onda je snaga na DC priključcima sistema:

$$P_{DC(PTC)} = P_{DC(STC)} (1 - 0,005(T_{cell} - 25^{\circ})) \quad (24)$$

Pri određivanju optimalnog nagibnog ugla panela uticaj temperature se može uzeti u obzir množenjem insolacije na panel faktorom koji definiše smanjenje efikasnosti panela usled povećanja temperature modula, pri čemu se dobija raspoloživa energija po površini PV panela:

$$\bar{E}_C = \bar{I}_C (1 - 0,005(T_{cell} - 25^{\circ})) \quad (25)$$

V. REZULTATI PRORAČUNA OPTIMALNOG NAGIBNOG UGLA SOLARNOG PANELOVA PRI VEDROM DANU NA OSNOVU EKSTRATERESTRIČKE IRADIJACIJE

Za područje Beograda izvršen je proračun ukupne insolacije na solarne panele pri vedrom danu na osnovu ekstraterestričke insolacije. Pretpostavljeno je da su paneli postavljeni na travnatom terenu, tako da je korišćen koeficijent refleksije za travu. Vršena je varijacija nagibnog ugla Σ i rezultati proračuna su prikazani u tabeli I.

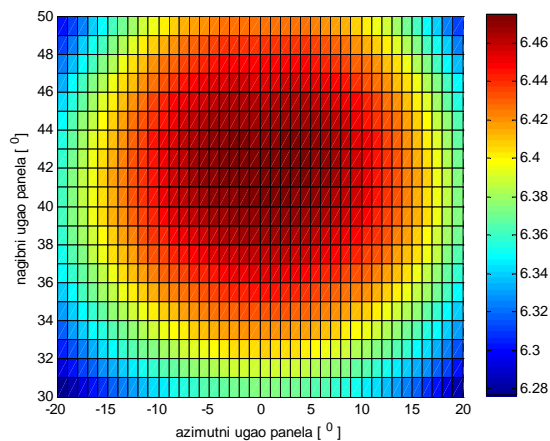
Vrednosti srednje dnevne insolacije koja pada na solarni panel za svaki mesec su izračunate za različite vrednosti nagibnog ugla panela. Ove vrednosti mogu poslužiti za procenu nagibnog ugla pod kojim će biti postavljen solarni panel tako da se ima maksimalno iskorišćenje potencijala Sunca pod pretpostavkom da su svi dani vedri u toku cele godine. Na osnovu vrednosti iz tabele I se može zaključiti da je vrednost optimalnog nagibnog ugla panela između 40° i 45° . Tačnijom analizom je utvrđeno da je vrednost optimalnog nagibnog ugla 41° . Na Sl. 1 su date izračunate vrednosti srednje dnevne insolacije koja pada na solarni panel u toku godine pod pretpostavkom da su svi dani vedri, za različite vrednosti nagibnog ugla panela.

Na osnovu ekstraterestričke iradijacije izračunate su insolacije na fotonaponski modul koji je fiksno postavljen pod nagibnim uglom od 41° i azimutnom uglom od 0° . Izračunate srednje dnevne insolacije na horizontalnoj površini i na fiksno postavljeni i optimalno orijentisani PV modul, za svaki mesec u toku godine su prikazane u tabeli II.

Na Sl. 2 je prikazana dozračena dnevna energija (insolacija) u toku godine (plava linija) i dakodje dozračena dnevna energija umanjena zbog uticaja temperature na efikasnost konverzije (zeleno linija) na fiksno postavljeni panel pod optimalnim uglom 41° . Pri proračunu su korišćene srednje dnevne temperature u toku godine.

TABELA I. IZRAČUNATE SREDNJE DNEVNE INSOLACIJE NA HORIZONTALNOJ POVRŠINI I NA FIKSNO POSTAVLJENI PV MODUL POD RAZLIČITIM NAGIBNIM UGLOVIMA PRI VEDROM DANU

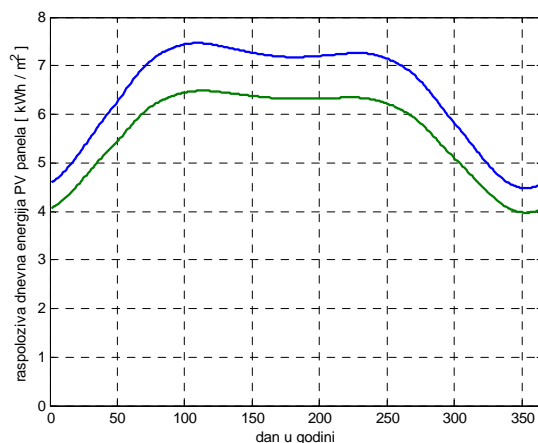
| mes. | \bar{I}_H | Insolacija na PV modul, \bar{I}_C (kWh/m ²) | | | | | |
|------|-------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | $\Sigma=20^\circ$ | $\Sigma=25^\circ$ | $\Sigma=30^\circ$ | $\Sigma=35^\circ$ | $\Sigma=40^\circ$ | $\Sigma=45^\circ$ |
| jan. | 2.1620 | 3.6890 | 4.0146 | 4.3126 | 4.5807 | 4.8168 | 5.0191 |
| feb. | 3.2646 | 4.8565 | 5.1796 | 5.4674 | 5.7178 | 5.9289 | 6.0991 |
| mar. | 4.9047 | 6.2835 | 6.5301 | 6.7333 | 6.8915 | 7.0036 | 7.0686 |
| apr. | 6.5941 | 7.4483 | 7.5449 | 7.5926 | 7.5910 | 7.5403 | 7.4409 |
| maj | 7.7704 | 8.0823 | 8.0349 | 7.9367 | 7.7886 | 7.5916 | 7.3473 |
| jun | 8.2397 | 8.2666 | 8.1527 | 7.9881 | 7.7742 | 7.5124 | 7.2048 |
| jul | 7.9558 | 8.1066 | 8.0223 | 7.8880 | 7.7048 | 7.4740 | 7.1975 |
| avg. | 6.9756 | 7.5698 | 7.6007 | 7.5836 | 7.5185 | 7.4061 | 7.2470 |
| sep. | 5.4454 | 6.5644 | 6.7429 | 6.8778 | 6.9680 | 7.0128 | 7.0118 |
| okt. | 3.7424 | 5.1792 | 5.4594 | 5.7033 | 5.9091 | 6.0752 | 6.2004 |
| nov. | 2.4172 | 3.9015 | 4.2137 | 4.4972 | 4.7500 | 4.9701 | 5.1558 |
| dec. | 1.8399 | 3.2659 | 3.5732 | 3.8558 | 4.1116 | 4.3388 | 4.5355 |
| god. | 5.1093 | 6.1011 | 6.2557 | 6.3697 | 6.4422 | 6.4725 | 6.4607 |



Slika 1. Izračunate srednje dnevne insolacije na fotonaponski panel pri vedrom danu, za različite nagibne i azimutne uglove panela

TABELA II. IZRAČUNATE SREDNJE DNEVNE INSOLACIJE NA HORIZONTALNOJ POVRŠINI I NA FIKSNO POSTAVLJENI PV MODUL POD NAGIBNIM UGLOM OD 41° PRI VEDROM DANU

| mesec | \bar{I}_H | Insolacija na PV modul, \bar{I}_C (kWh/m ²) |
|-----------|-------------|---|
| | | $\Sigma=41^\circ$ |
| januar | 2.1620 | 4.9643 |
| februar | 3.2646 | 5.9882 |
| mart | 4.9047 | 6.8662 |
| april | 6.5941 | 7.2026 |
| maj | 7.7704 | 7.1011 |
| jun | 8.2397 | 6.9440 |
| jul | 7.9558 | 6.9439 |
| avgust | 6.9756 | 7.0109 |
| septembar | 5.4454 | 6.7906 |
| oktobar | 3.7424 | 6.0666 |
| novembar | 2.4172 | 5.0903 |
| decembar | 1.8399 | 4.4955 |
| godišnje | 61.3119 | 6.2887 |



Slika 2. Uticaj temperature na raspoložive dnevne energije

Sa Sl.2 se vidi da je uticaj temperature veći u letnjim mesecima zbog visokih temperatura, pa je u letnjim mesecima smanjena efikasnost fotonaponskih panela. U zimskim mesecima je taj uticaj manji jer su temperature niske, što povoljno utiče na efikasnost, ali je i ozračenost panela mala pa su raspoložive dnevne energije znatno manje nego u letnjim mesecima. Sa slike se takođe može videti da su dozračene energije u oba slučaja neznatno veće u prolećnim i jesenjim nego u letnjim mesecima. Ovo je posledica korišćenja modela sa vedrim danima u toku godine (*Clear day model*) kod koga je ekstraterestrička iradijacija u letnjim mesecima manja nego u prolećnim i jesenjim. Osim toga, optimalni nagibni ugao panela najbolje odgovara prolećnim i jesenjim mesecima, što dodatno utiče da raspoloživa energija u prolećnim i jesenjim mesecima bude veća nego u letnjim mesecima.

VI. REZULTATI PRORAČUNA OPTIMALNOG NAGIBNOG UGLA SOLARNOG PANELA U REALNIM USLOVIMA OBLAČNOSTI NA OSNOVU MERNIH PODATAKA O HORIZONTALNOJ IRADIJACIJI

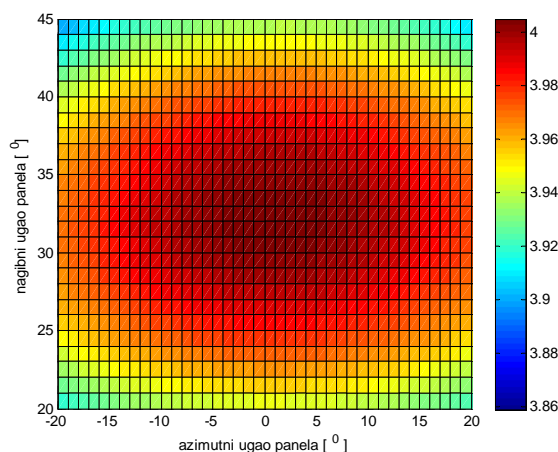
Prikazani model za proračun optimalnog nagibnog ugla PV panela pri vedrom danu na osnovu ekstraterestričke iradijacije ima nedostatak jer ne uvažava oblačnost koja realno postoji tokom godine. Tačniji proračun optimalnog nagibnog ugla PV panela se vrši na osnovu raspoloživih mernih podataka o horizontalnoj komponenti iradijacije i temperaturi vazduha. Na osnovu raspoloživih mernih podataka o srednjoj desetominutnoj horizontalnoj iradijaciji [W/m^2] u toku 2009. godine za Beograd, proračunate su srednje dnevne insolacije na površini solarnog panela za svaki mesec i prikazane u tabeli III.

Vrednosti srednje dnevne insolacije koja pada na solarni panel za svaki mesec su date za različite vrednosti nagibnog ugla panela. Ovi podaci mogu poslužiti za procenu nagibnog ugla pod kojim će biti postavljen solarni panel tako da se ima maksimalno iskorišćenje potencijala Sunca u toku cele godine. Na osnovu vrednosti iz tabele III se zaključuje da se postavljanjem fotonaponskog panela pod optimalnim nagibnim uglom utiče na povećanje raspoložive energije na panel od 10% u odnosu na slučaj horizontalno postavljenog panela kod koga je raspoloživa energija određena insolacijom na horizontalnu površinu. Takođe se može zaključiti da je vrednost optimalnog nagibnog ugla panela između 30° i 35° . Ipak, dalja analiza za nagibne uglove u opsegu između 30° i 35° bi dala približnu vrednost za optimalni nagibni ugao jer se u postupku koristi usrednjavanje vrednosti srednjih dnevnih insolacija na mesečnom nivou.

Preciznije određivanje optimalnog nagibnog i azimutnog ugla fiksno postavljenog fotonaponskog panela može se izvršiti variranjem nagibnog ugla panela između 30° i 35° i izračunavanjem godišnje insolacije na osnovu desetominutnih vrednosti za iradijaciju. Na osnovu izmerenih desetominutnih vrednosti iradijacija u toku godine, izračunata je godišnja insolacija na fotonaponski panel. Najveća vrednost ove insolacije iznosi 1461.8 kWh/m^2 i dobijena je pri nagibnom uglu panela od 33° i azimutnom uglu panela od -1° . Srednja dnevna insolacija na fotonaponski panel pri nagibnom uglu panela od 33° i azimutnom uglu panela od -1° iznosi 4.01 kWh/m^2 . Na Sl. 3 su prikazane vrednosti srednjih dnevnih insolacija na fotonaponski panel pri različitim nagibnim i azimutnim uglovima panela.

TABELA III. SREDNJE DNEVNE INSOLACIJE NA HORIZONTALNOJ POVRŠINI I NA FIKSNO POSTAVLJENI PV MODUL POD RAZLIČITIM NAGIBNIM UGLOVIMA PRI REALNIM USLOVIMA OBLAČNOSTI

| mes. | \bar{I}_H | Insolacija na PV modul, \bar{I}_C (kWh/m^2) | | | | | |
|------|-------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | $\Sigma=20^{\circ}$ | $\Sigma=25^{\circ}$ | $\Sigma=30^{\circ}$ | $\Sigma=35^{\circ}$ | $\Sigma=40^{\circ}$ | $\Sigma=45^{\circ}$ |
| jan. | 0.9356 | 1.3010 | 1.3792 | 1.4507 | 1.5149 | 1.5713 | 1.6196 |
| feb. | 1.9239 | 2.5388 | 2.6652 | 2.7781 | 2.8767 | 2.9603 | 3.0282 |
| mar. | 2.8159 | 3.3173 | 3.3991 | 3.4617 | 3.5046 | 3.5275 | 3.5301 |
| apr. | 5.2047 | 5.7139 | 5.7614 | 5.7756 | 5.7562 | 5.7037 | 5.6177 |
| maj | 5.9947 | 6.1278 | 6.0804 | 6.0007 | 5.8893 | 5.7470 | 5.5743 |
| jun | 5.7685 | 5.7130 | 5.6286 | 5.5164 | 5.3771 | 5.2117 | 5.0212 |
| jul | 6.7838 | 6.8258 | 6.7466 | 6.6321 | 6.4829 | 6.2997 | 6.0838 |
| avg. | 5.3237 | 5.6427 | 5.6459 | 5.6177 | 5.5583 | 5.4686 | 5.3481 |
| sep. | 3.9721 | 4.5906 | 4.6820 | 4.7461 | 4.7823 | 4.7903 | 4.7701 |
| okt. | 2.1189 | 2.6500 | 2.7482 | 2.8306 | 2.8966 | 2.9455 | 2.9771 |
| nov. | 1.3227 | 1.8624 | 1.9734 | 2.0726 | 2.1595 | 2.2332 | 2.2933 |
| dec. | 0.7308 | 1.0036 | 1.0620 | 1.1153 | 1.1633 | 1.2055 | 1.2416 |
| god. | 3.5746 | 3.9406 | 3.9810 | 3.9998 | 3.9968 | 3.9720 | 3.9254 |



Slika 3. Srednje dnevne insolacije na fotonaponski panel u realnim uslovima oblačnosti, pri različitim nagibnim i azimutnim uglovima panela

Na osnovu iradijacije na horizontalnoj površini izračunata je iradijacija na fotonaponski modul koji je fiksno postavljen i optimalno orijentisan (pod nagibnim uglom od 33° i azimutnom uglom od od -1°). Na osnovu podatka o iradijaciji, dobijene su srednje dnevne insolacije na horizontalnoj površini i srednje dnevne insolacije na fiksno postavljeni i optimalno orijentisani PV modul, za svaki mesec u toku godine (tabela IV).

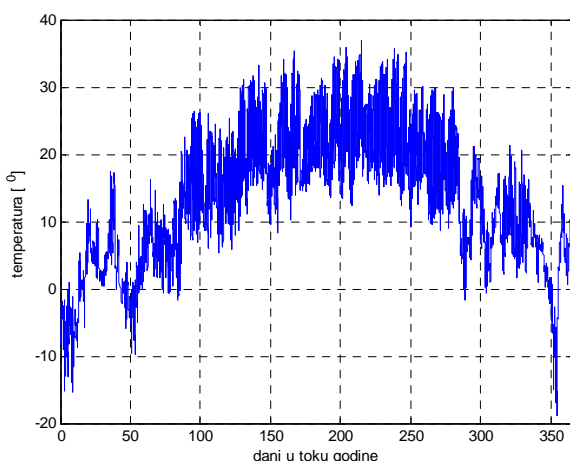
Zbog uticaja ambijentalne temperature na efikasnost fotonaponske konverzije, raspoloživa energija je manja od dozračene insolacije. Na Sl. 4 su prikazane izmerene vrednosti temperature u toku godine. Uvažavanjem uticaja temperature ambijenta prema izrazu (23), izračunate su raspoložive ekvivalente energije fotonaponskih panela za različite nagibne i azimutne uglove fotonaponskih panela. Najveća vrednost raspoložive energije iznosi 1316.1 kWh/m^2 i dobijena je takođe pri nagibnom uglu panela od 33° i azimutnom uglu panela od -1° . Srednja dnevna vrednost raspoložive energije pri nagibnom

uglu panela od 33° i azimutnom uglu panela od -1° iznosi 3.61 kWh/m^2 . Na osnovu prethodne analize se zaključuje da temperatura utiče na smanjenje raspoložive energije ali ne utiče na optimalni nagibni ugao fotonaponskih panela.

Ugradnjom pogonskog mehanizma kojim bi se kontinualno menjao nagibni ugao panela u toku godine prema izrazu (22), srednja dnevna vrednost insolacije na panel bi se povećala na 4.24 kWh/m^2 što predstavlja povećanje od 5.7% u odnosu na vrednost od 4.01 kWh/m^2 koja je dobijena sa fiksno postavljenim panelom pod optimalnim uglom od 33% . Ipak, zbog složenosti mehanizma za kontinualno menjanje nagibnog ugla panela, ugradnja ovakvog mehanizma nema tehničkog i ekonomskog opravdanja. Značajno veća insolacija na fotonaponske panele (do 30%) se može postiћи sistemima za praćenje azimutnog ugla Sunca u toku dana.

TABELA IV. IZRAČUNATE SREDNJE DNEVNE INSOLACIJE NA HORIZONTALNOJ POVRŠINI I NA FIKSNO POSTAVLJENI PV MODUL OD NAGIBNIM UGLOM OD 33° NA OSNOVU MERNIH PODATAKA

| mesec | \bar{I}_H | Insolacija na PV modul, $\bar{I}_c \text{ (kWh/m}^2\text{)}$ |
|-----------|-------------|--|
| | | $\Sigma=33^{\circ}$ |
| januar | 1.9239 | 2.5465 |
| februar | 2.8159 | 3.4812 |
| mart | 5.2047 | 5.5856 |
| april | 5.9947 | 5.9599 |
| maj | 5.7685 | 5.2876 |
| jun | 6.7838 | 6.5763 |
| jul | 5.3237 | 5.5977 |
| avgust | 3.9721 | 4.6102 |
| septembar | 2.1189 | 2.8590 |
| oktobar | 1.3227 | 2.0409 |
| novembar | 0.7106 | 1.1352 |
| decembar | 3.5746 | 4.0120 |
| godišnje | 1.9239 | 2.5465 |



Slika 4. Izmerene vrednosti temperature u toku godine

VII. ZAKLJUČAK

Pri vedrom danu, direktno Sunčevo zračenje dominantno određuje optimalni nagibni ugao PV panela. Zenemarenjem oblačnosti u toku godine, optimalni nagibni ugao fiksno postavljenog fotonaponskog panela na osnovu ekstraterestričke iradijacije je 41° za geografsku širinu koja odgovara Beogradu. U realnim eksploatacionim uslovima zbog postojanja oblačnosti u toku godine, difuziona komponenta zračenja takođe utiče na optimalni nagibni ugao PV panela. Vrednost nagibnog ugla panela od 33° odgovara maksimalnoj mogućoj godišnjoj insolaciji na fotonaponski panel i može se koristiti kao validan podatak o optimalnoj vrednosti nagibnog ugla panela pri kome bi bilo maksimalno iskorišćenje potencijala Sunca u toku cele godine. Optimalni azimutni ugao fiksno postavljenog fotonaponskog panela od -1° u odnosu na pravac koji odgovara solarnom podnevu se može objasniti većom oblačnošću u popodnevnim časovima (u toku godine).

LITERATURA

- [1] Gilbert M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Stanford University
- [2] T. Markvart, L. Castaner, Practical handbook of photovoltaics fundamentals and applications, Elsevier Ltd, 2003
- [3] T. Muner, Solar Radiation and Daylight Models, Elsevier Ltd, 2004
- [4] M. Kacira, M. Simsek, Y. Babur, S. Demirkol, "Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanliurf, Turkey", Renewable Energy 29 (2004), 1265-1275.
- [5] H. Yang, L. Lu, "The optimum tilt angles and orientation of PV Claddings for Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) Applications", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 129, May 2007, pp. 253-255.
- [6] E. Calabro, "Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels at typical north-tropical latitudes", Journal of Renewable and Sustainable Energy 1, 033104, May 2009.
- [7] T. P. Chang, "The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of solar collector in northern hemisphere", Solar Energy, Volume 83, Issue 8, August 2009, pp 1274-1284
- [8] O. Perpignan, 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.
- [9] J. Mikulović, Ž. Đurišić, "Statistička metoda za procenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskog sistema", Infoteh, Mart 2012.
- [10] Ž. Đurišić, J. Mikulović, "Prethodna studija isplativosti gradnje fotonaponske elektrane na mikrolokaciji u Obrenovcu", Januar 2012.

ABSTRACT

This paper presents a method for determination of optimum tilt angles of photovoltaic panels in order to obtain maximum annual insolation on the PV surface. Determination of optimum tilt and azimuth angles for clear day is based on irradiation components which are obtained starting from extraterrestrial irradiation. Determination of optimum tilt and azimuth angles under cloudy condition during a year is based on available measurement data for average ten-minute horizontal irradiation and ambient temperature during a year.

DETERMINING OPTIMUM TILT ANGLES OF PHOTOVOLTAIC PANELS

Jovan Mikulović, Željko Đurišić, Rastko Kostić