



C6 05

POREĐENJE IRADIJANSE I ENERGIJE PROIZVEDENE KROVNIM FOTONAPONSKIM SISTEMOM DOBIJENIH PRORAČUNOM I MERENJEM

ZORAN RADAKOVIĆ*, UROŠ RADOMAN
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET, UNIVERZITET U BEOGRADU

JASNA GRUJIĆ, MIROSLAV ŽERAJIC
ENERGOPROJEKT ENTEL a.d., BEOGRAD

BEOGRAD

SRBIJA

Kratak sadržaj — Na krov zgrade Energoprojekta u Beogradu je postavljen fotonaponski (FN) sistem ukupne snage 115 kW. U okviru realizovanog sistema se vrši merenje i arhiviranje podataka o iradijansi i temperaturi pn spoja solarnih panela, kao i električne veličine na svakom od dva DC ulaza poluprovodničkih pretvarača (solarnih invertora) i na AC strani invertora. U radu se prikazuju najvažnije merne i izračunate vrednosti: iradijanse na površini panela (kao primarnog energetskeg resursa) i snage na izlazu iz solarnog invertora (snage koja se isporučuje u elektrodistributivnu mrežu). Za proračun je korišćen softver za proračun solarne iradijanse (razvijen na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu) za proizvoljno zadatu lokaciju (nadmorsku visinu, geografsku širinu i dužinu, orijentaciju u odnosu na strane sveta i nagib u odnosu na horizontalnu ravan). Za određivanje energije generisane solarnim generatorom korišćen je podatak o temperaturi pn spoja fotonaponskih dostupan iz arhiviranih merenih veličina.

Ključne reči — Fotonaponski sistem, iradijansa, Solarni kalkulator, solarni inverter, MPP tracker, rad na mreži

1 UVOD

Zakonski okviri podsticajnih mera za povlašćene proizvođače električne energije u Srbiji su dovele do investicija, odnosno izgradnje i puštanje u rad niza postrojenja u kojima se električna energija generiše pomoću FN panela. Ovo je, pored ekonomskih i političkih strateških aspekata, imalo značajne tehničke konsekvence, u smislu sticanja znanja iz oblasti FN tehnike uopšte, a posebno u praksi projektovanja i eksploatacije takvih sistema. Paralelno sa ovim tehničkim napretkom u Srbiji, u svetu se puno radilo na razvoju elemenata FN tehnike, od samih solarnih panela, do upravljanja energetskim pretvaračima, u čemu je učestvovao i razvojni tim na Elektrotehničkom fakultetu, čiji je deo ostvarenja publikovan u literaturi: primera radi, praktične realizacije su se odnosile na detekciju ispada mreže kada je solarni inverter priključen na elektrodistributivnu mrežu [1], kao i [2], u kome su opisani i upravljanje izlaznom strujom invertora, algoritmi za postizanje tačke maksimalne snage [3], kao i detektor električnog luka u stringovima FN panela - publikacija [4] i patentna prijava [5].

Suštinski faktor pri donošenju odluke da li treba ući u investiciju u FN sistem je procena njene isplativosti. Iako motivi za odluku za investiciju mogu biti i druge prirode (marketinški, edukativni, motivisani entuzijazmom), osnov za ulazak u investiciju je da ona bude isplativa. Pored cene postrojenja, uslova finansiranja, potencijalnih finansijskih podsticaja i cene isporučenog kWh u mrežu,

neophodno je izvršiti tehničku analizu i proceniti koliku energiju FN sistem može da generiše u periodu cikličnog ponavljanja ambijentalnih uslova (godinu dana). Da bi se izvršila procena generisane električne energije, potrebno je izvršiti procenu ambijentalnih uslova (iradijansa na površini FN panela, temperatura ambijenta i brzina vetra), a na promene ovih veličina u toku perioda od godinu dana procenu promene snage, kao i ukupnu energiju koja se dobija iz FN sistema.

Zbog složenosti pojava, za navedene procene, odnosno proračune, potrebno je koristiti softverske alate. To se pre svega odnosi na procenu iradijanse; procena snage generisane energije na osnovu ambijentalnih uslova je relativno jednostavna, dok se procena temperature ambijenta i brzine vetra mogu proceniti samo približno, koristeći statističke meteorološke podatke iz prethodnih godina - ovakva približna procena je dovoljno dobra za procenu ukupne energije koja se dobija u toku godinu dana, jer je uticaj ovih parametara značajno manji od uticaja iradijanse, tako da se može smatrati da se odstupanje promene ovih parametara od pretpostavljenog kompenzuje, odnosno da je posledična greška u proceni ukupne generisane energije zanemarljiva.

U [6] je opisan softverski alat koji je korišćen u analizama sprovedenim u ovom radu, za koji se po prvi put pružila prilika da se proveriti na osnovu podataka sa realizovanog FN sistema (podaci sa FN sistema snage 115 kW postavljenog na krov zgrade Energoprojekta u Beogradu, koji je opremljen sistemom za prikupljanje relevantnih podataka). Pored provere razvijenog softvera, cilj rada je da prikaže ponašanje FN sistema u lokalnim uslovima u Srbiji, o čemu nema mnogo javno dostupnih izveštaja i publikacija.

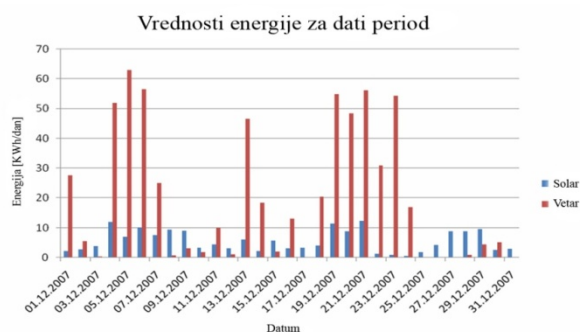
2 SOFTVER ZA PRORAČUN ENERGIJE GENERISANE FN SISTEMOM

Softver, opisan u [6], je razvijen za opštiji slučaj hibridnog napajanja potrošača udaljenih od distributivne mreže (simulator sistema sa prijemnicima, solarnim generatorom, invertorom (ako postoje AC prijemnici), vetrogeneratorom, baterijom akumulatora i dizel-električnim agregatom). Softver omogućava simulaciju rada hibridnog sistema napajanja, tako što kontinuirano vrši bilansiranje snage, odnosno izračunava razliku snage generisane i utrošene električne energije, koja se skladišti / nadoknađuje iz akumulatorske baterije.

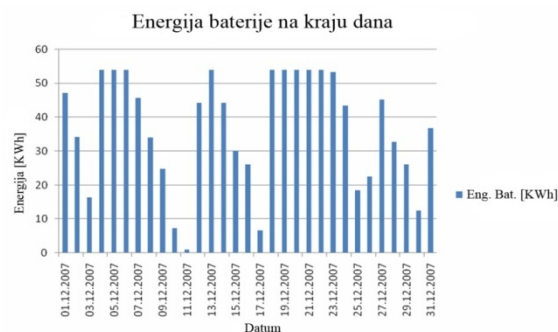
Program je razvijen korišćenjem sledećih alata: Excel (za ulazne podatke i pomoćne izlazne podatke), VBA (za rutine za proračune i za generisanje grafičkih izveštaja), Access (za baze podataka).

Na slici 1 je prikazan osnovni ekran sa ulaznim podacima, a na slikama 2 i 3 dve od mnoštva formi izveštaja koji se mogu dobiti iz programa; forme su odabrane tako da ilustruju princip rada simulatora hibridnog sistema.

Slika 1 - Maska sa osnovnim ulaznim podacima



Slika 2 - Dnevno generisane energije solarnim generatorima (15 panela po 175 W) i vetrogeneratorom (2.5 kW)



Slika 3 - Stanje baterije na kraju dana

Za analize u ovom radu se koristi deo softvera za solarne generatore, koji sadrži dva osnovna modula - modul za izračunavanje iradijance i modul za izračunavanje snage generisanja energije fotonaponskim panelima, kao i energije koja se injektira u elektrodistributivnu mrežu.

U modulu za izračunavanje solarne iradijance na površi panela (preko njene direktne, difuzne i reflektovane komponente), za proizvoljno zadatu lokaciju (nadmorsku visinu, geografsku širinu i dužinu, orijentaciju u odnosu na strane sveta i nagib u odnosu na horizontalnu ravan), određuje se vrednost solarne iradijance u svakom od trenutaka čija je perioda zadata (tipično 1 sat). Nešto više detalja o načinu ovih proračuna, kao i proračunu vrednosti temperatura ambijenta u svakom trenutku, može se naći u [6]. Brzina vetra se učitava iz fajla u kome su date njegove vrednosti, odnosno mora biti zadata kao ulazni podatak u program. Ovaj fajl, kao i maksimalna i minimalna temperatura u toku dana, potrebna za određivanje temperature u svakom trenutku, se formiraju na bazi statističkih podataka za prethodne godine.

Podaci o temperaturi ambijenta, kao i brzina vetra, se koriste da bi se odredila temperatura pn spoja FN modula, koja u izvesnoj meri, manje od dominantnog uticaja iradijance, utiče na generisanu električnu energiju FN panela. U konkretnom slučaju, na fotonaponskom sistemu se meri temperatura pn spoja, tako da je ta merena vrednost korišćena za izračunavanje energije generisane FN sistemom, čime je izbegnuta potreba da se ta temperatura određuje preko termičkog modela FN modula, za koji su potrebni ulazni podaci iradijansa, temperatura ambijenta i brzina vetra.

3 KARAKTERISTIKE REALIZOVANOG FN SISTEMA

FN sistem ukupne snage 115 kW je postavljen na krov zgrade Energoprojekta u Beogradu. Ukupna površina solarnih panela je 800 m² (maksimalna snaga pri standardnim uslovima testiranja (STC) svakog od 492 panela, površine 1.63 m², je 235 W). Fotonaponski sistem je povezan na elektrodistributivnu mrežu 10 kV preko posebnog trofaznog transformatora snage 250 kVA, 10/0.4 kV. Za pretvaranje jednosmerne (DC) električne energije koju daju fotonaponski paneli u naizmeničnu (AC) energiju se koristi 5 solarnih invertora, 2 nazivne snage 27.6 kW i 3 nazivne snage 20 kW; svaki od invertora na DC strani ima 2 MPP tracker-a (praćenje tačke maksimalne snage), na koje su vezani stringovi solarnih panela (dva ili tri paralelna stringa sa 18, 20 ili 24 redno vezana panela, zavisno od snage invertora i prostornog rešenja). Sistem je pušten u rad u režimu da isporučuje energiju u mrežu 30. Januara 2013. godine. U okviru realizovanog sistema vrši se merenje i arhiviranje podataka o iradijansi i temperaturi pn spoja solarnih panela kao i na svakom od dva DC ulaza poluprovodničkih pretvarača (solarnih invertora) i na AC strani invertora. Perioda arhiviranja mernih vrednosti je 10 min i u analizi koja je sadržana u radu se obrađuje karakteristični jednogodišnji period (1. avgust 2013. – 31. jul 2014.).

Proizvođač panela je Sun-Earth, a tip TPB156×156-60-P 235W. Radi se o modulima maksimalne snage 235 W, sa ćelijama polikristalne strukture [7].

Za DC/AC transformaciju energije korišćeni su solarni invertori proizvođača Power-One, modeli Trio-20.0-TL i Trio-27.6-TL, nazivnih izlaznih (sa AC strane) snaga, redom, 20 kW i 27.6 kW. Svaki ima dva nezavisna DC ulaza (sa MPP trackerom). Maksimalna efikasnost invertora je 98.2%, a euro (težinska, ponderisana) efikasnost je 98%. Više detalja je dostupno u katalogu na web-sajtu proizvođača [8].

4 POSTUPAK IZRAČUNAVANJA NAIZMENIČNE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Energija na DC ulazu u inverter računa se na osnovu merenih vrednosti iradijance na površini panela i merene temperature pn spoja. Smatrajući da je praćenje tačke maksimalne snage (MPP) idealno, da je vrednost maksimalne snage panela direktno srazmerna sa iradijansom, uz uvažavanje koeficijenta temperaturne zavisnosti snage u MPP iz kataloga proizvođača ($\gamma = -0.45\%/^{\circ}\text{C}$), snaga je određivana korišćenjem izraza

$$P_{MPP} = R_{MPP}^{STC} \frac{G}{G^{STC}} (1 - 0.0045 (T_C - T_C^{STC}))$$

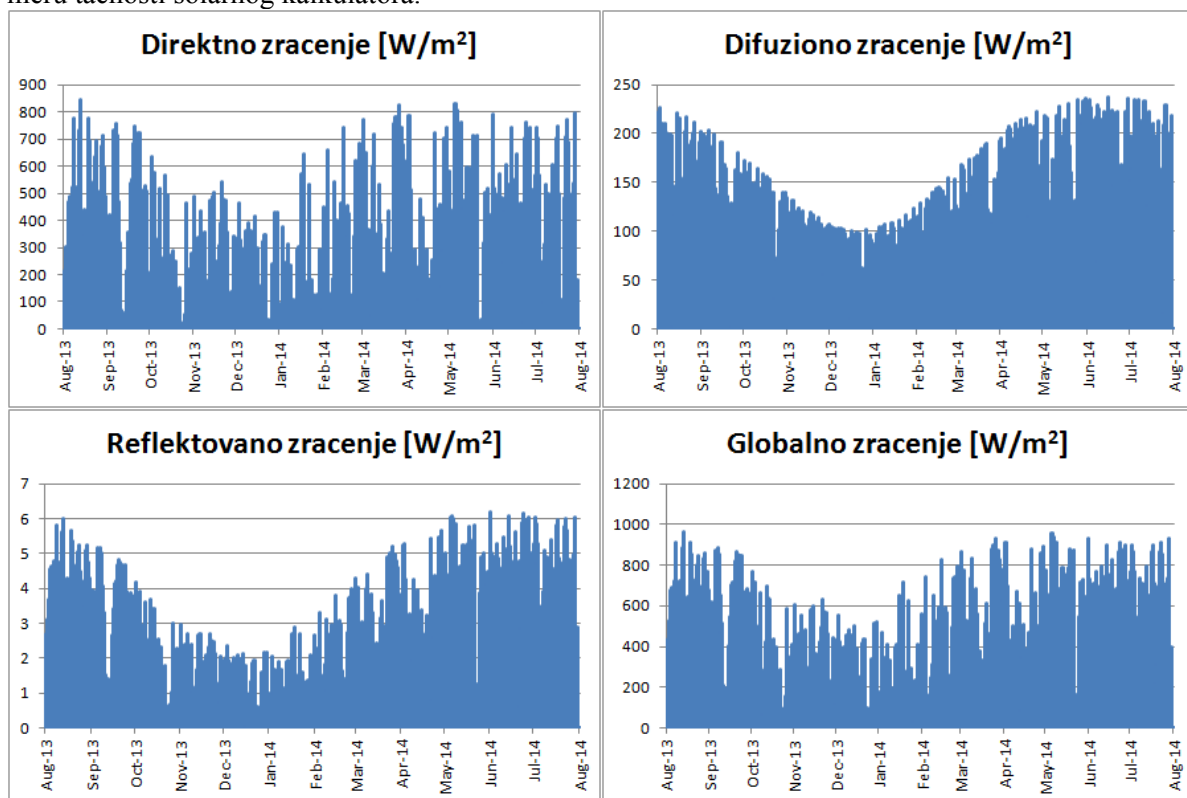
P_{MPP} , G i T_C označavaju ukupnu DC snagu u MPP, iradijansu i temperaturu pn spoja, respektivno. Indeks STC (Standard Test Conditions) označava odgovarajuće vrednosti pri standardnim uslovima ispitivanja (redom: 235W, 1000W/m² i 25°C).

Neuparenost (karakteristika svakog od panela malo odstupa od deklariranih, kataloških, podataka), zaprljanje i smanjenje efikasnosti usled starenja modula, kao ni gubici u vezama na DC strani nisu uzeti u obzir. Zbog ovoga je računata vrednost snage (samim tim i energije) nešto veća od izmerene, što će se videti u poglavlju 6.

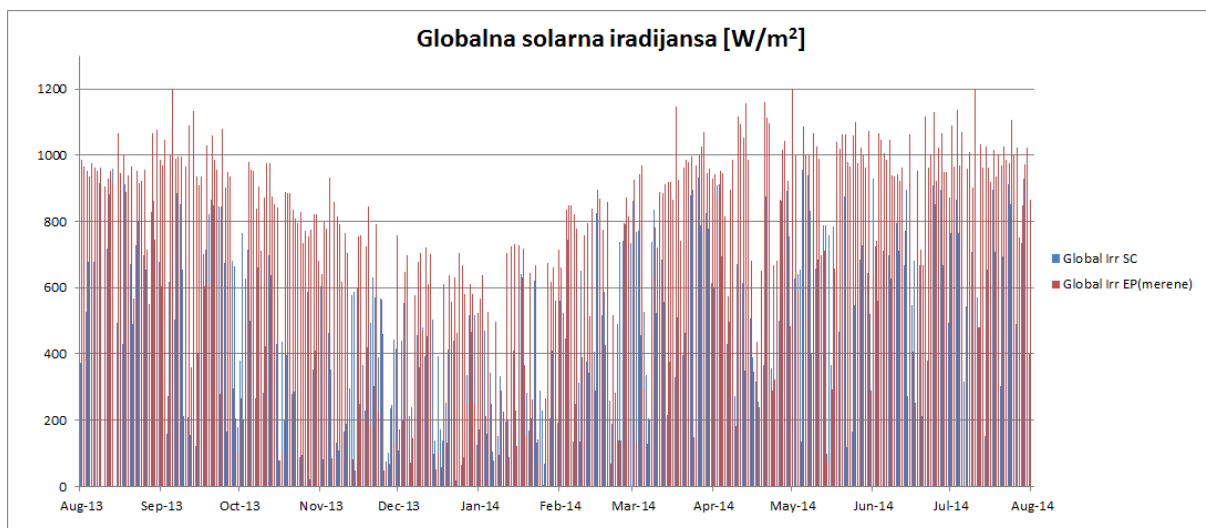
U proračunima je zanemarena zavisnost stepena iskorišćenja invertora od ulaznog DC napona i izlazne snage, već je proračun izvršen usvajajući da je efikasnost invertora konstantna i jednaka euro efikasnosti datoj u katalogu proizvođača (98%).

5 POREĐENJE RAČUNATE I MERENE IRADIJANSE

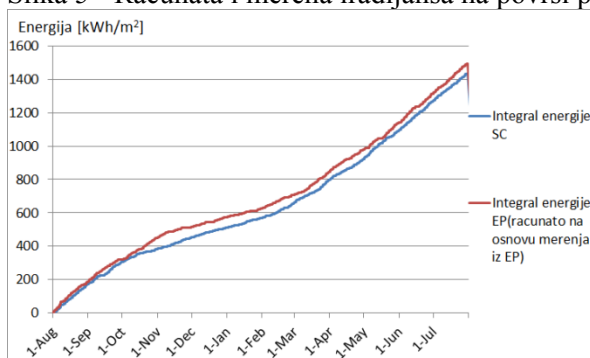
Na slici 4 su prikazane komponente iradijance, kao i ukupna iradijansa na solarnim panelima, orijentisanim prema jugu i pod nagibom od 34° u odnosu na horizontalnu ravan krova, dobijeni proračunom pomoću solarnog kalkulatora kao dela integralnog softvera [6]. Na slici je prikazana promena u toku perioda od godinu dana, od 1. 8. 2013. - 31. 7. 2014. Za isti period, na slici 5 je prikazana promena računate i merene iradijance na površi panela. Za potrebe procene ukupne energije koja se dobija od sunca, kao primarnog energetskog resursa, bolji prikaz je onaj koji je dat na slici 6, gde je dat integral vrednosti računate i merene iradijance; na slici 7 je prikazano i procentualno odstupanje ove integralne veličine (računato u odnosu na mereno) - odstupanje vrednosti na celokupnom posmatranom godišnjem intervalu iznosi 3.85 %. Ova vrednost praktično predstavlja meru tačnosti solarnog kalkulatora.



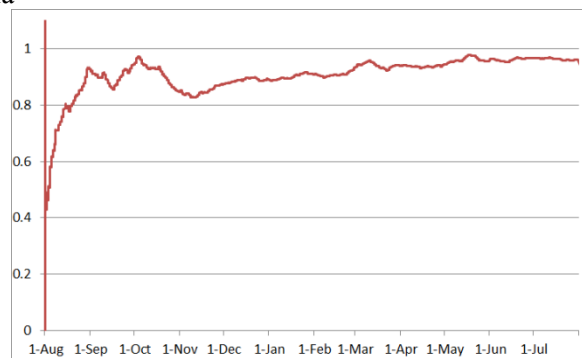
Slika 4 - Komponente iradijance i njena ukupna vrednost na površi panela



Slika 5 - Računata i merena iradijansa na površi panela



Slika 6 - Integral računate i merene iradijanse na površi panela



Slika 7 – Odnos vrednosti integrala energije zračenja dobijene proračunom pomoću solarnog kalkulatora i integrala energije zračenja izmerene na lokaciji FN sistema

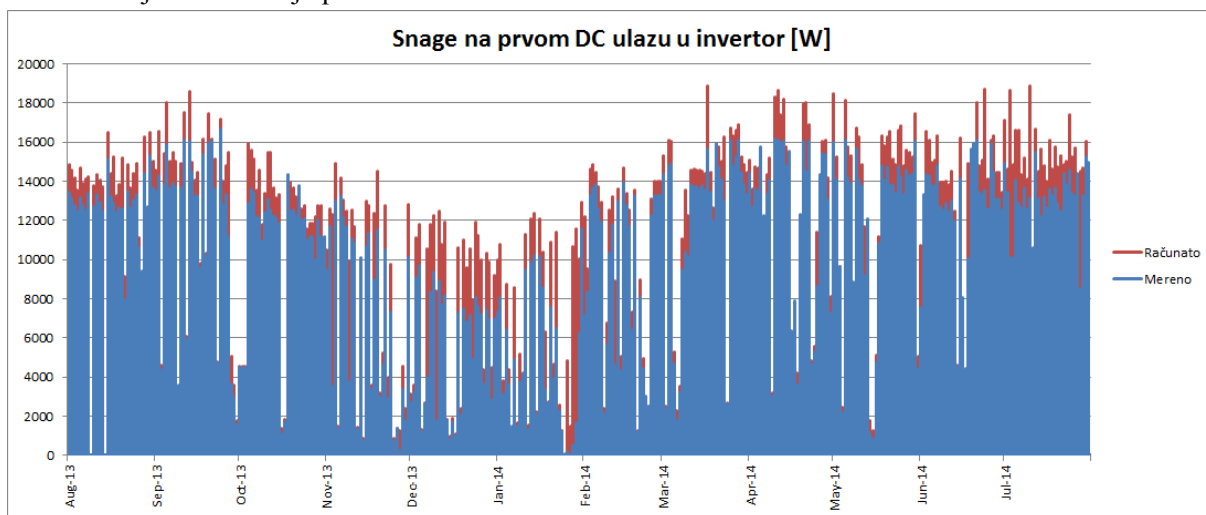
6 POREĐENJE RAČUNATE I MERENE JEDNOSMERNE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom odeljku se posmatraju dva jednosmerna priključka na solarni inverter nominalne snage 27.6 kW. Na prvi ulaz su priključena 3 paralelna stringa, svaki sa 24 serijski vezana panela, a na drugi 3 paralelna stringa, svaki sa 20 serijski vezana panela. Na slici 8 su prikazane računate i merene snage generisane električne energije na prvom jednosmernom priključku. Na slici 9 je prikazana promena merene temperature pn spoja, koja, zajedno sa računatom iradijansom (slika 5), predstavlja ulazni podatak na osnovu koga je, primenom postupka objašnjenog u poglavlju 4, izračunavana snaga generisanja jednosmerne električne energije. Na slici 10 je prikazana promena napona, koja prikazuje efekat rada MPP regulatora. Konačno, za prvi od dva jednosmerna priključka na solarni inverter (svaki od priključaka ima svoj MPP regulator), na slici 11 je prikazana ukupna generisana energija, dobijena kao integral snage (računate i merene, koje su prikazane na slici 8). Kao i kod kumulativne (integralne) iradijansa, na slici 12 je dato odstupanje računate generisane jednosmerne električne energije od merene; odstupanje, kao mera tačnosti proračuna procene energetske dohodovnosti, na kraju posmatranog perioda od godinu dana, iznosi 14.64 %; vrednost dobijena proračunom u odnosu na izmerenu snagu je precenjena.

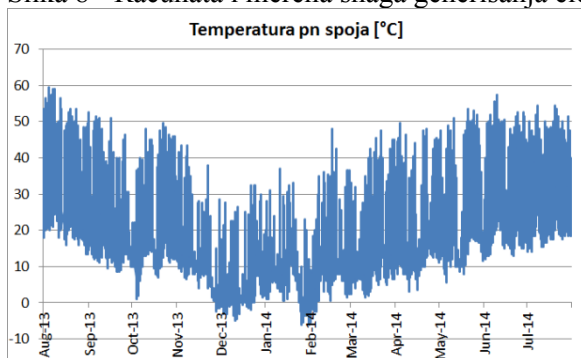
Analizom grafika na slikama 11 i 12 može se primetiti znatno povećanje odstupanja u toku druge polovine jeseni i tokom zime. Na slici 13 (a, b i c) data su odstupanja računate vrednosti integrala energije za periode 1.8.2013.-31.10.2013 (a), 1.11.2013.-15.2.2014. (b) i 16.2.2014.-31.7.2013 (c).

U periodima (a) i (c) ukupna vrednost odstupanja je oko 10%, karakteriše ih mali broj pikova na grafiku i, praktično, konstantna vrednost posmatrane veličine. Ova razlika je posledica neuparenosti, zaprljanja i smanjenja efikasnosti usled starenja modula, gubitaka u vodovima DC kola i eventualnog zasenčenja usled prostorne raspodele modula, koji nisu uzeti u obzir pri proračunu.

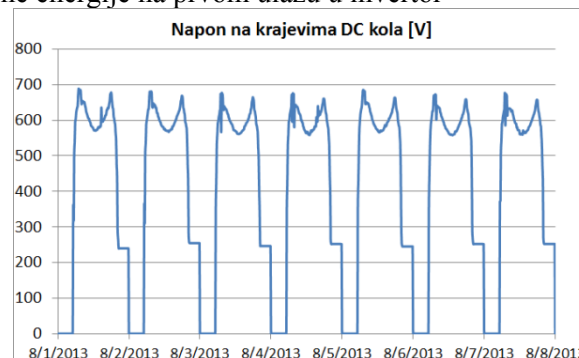
U periodu (b) uočavaju se mnogo veće vrednosti, kao i veće varijacije u toku vremena odstupanja merene od računate energije. Ovo se može objasniti nepovoljnijim vremenskim uslovima (padavinama i niskim temperaturama, zbog čega se menja absorpcija i refleksija sunčevog zračenja na panelima) i većim uticajem senki koje potiču od samih modula.



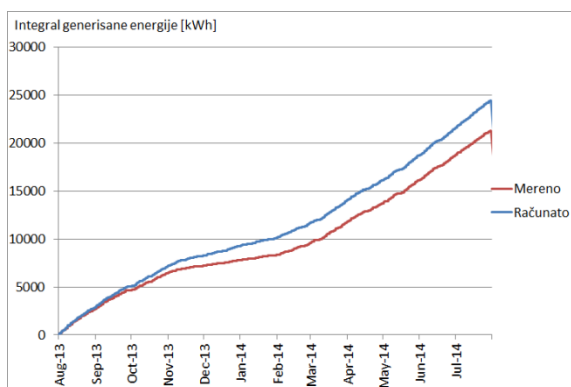
Slika 8 - Računata i merena snaga generisanja električne energije na prvom ulazu u invertor



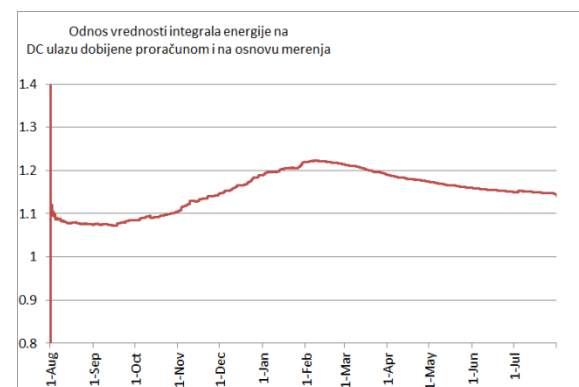
Slika 9 - Merena temperatura pn spoja FN modula



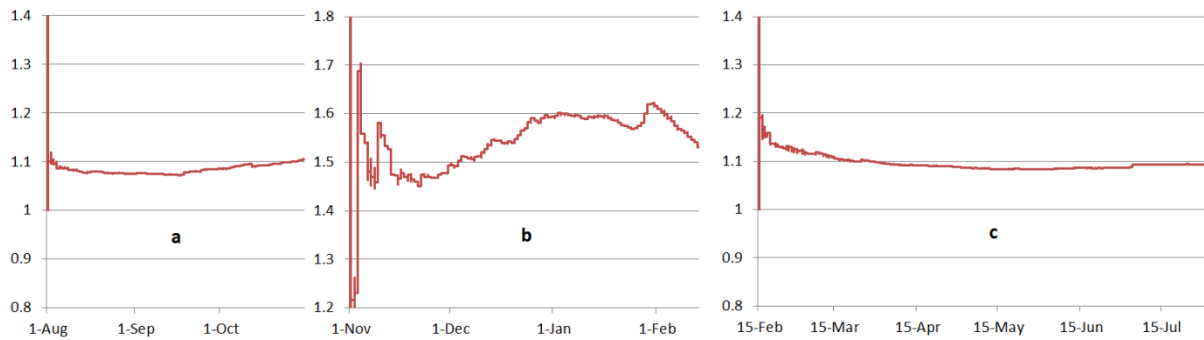
Slika 10 - Promena napona na prvom ulazu u invertor, kao rezultat rada MPP regulatora



Slika 11 - Integral računate i merene električne energije na prvom ulazu u invertor



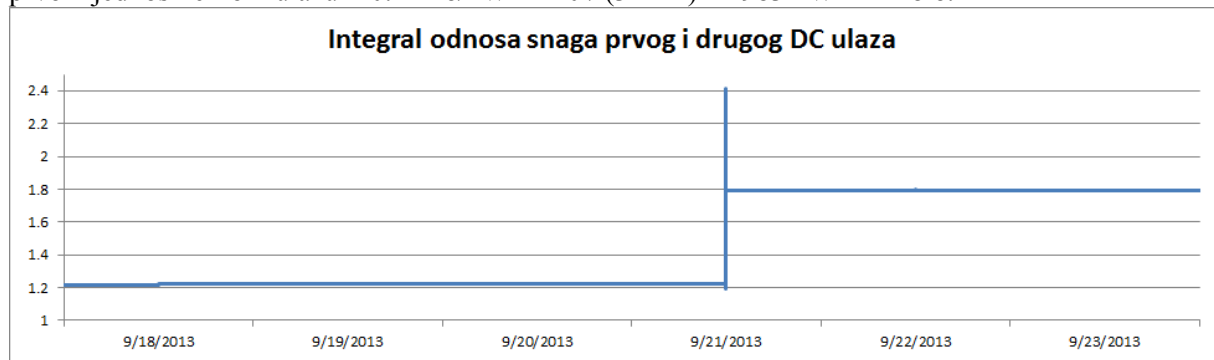
Slika 12 - Odstupanje računate jednosmerne električne energije od merene



Slika 13 - Odstupanje računate jednosmerne električne energije od merene (a 1.8.2013.-31.10.2013.,b 1.11.2013.-15.2.2014.,c 15.2.2014.-31.7.2014.)

6 PRIMER DETEKCIJE KVARA KORIŠĆENJEM AKVIZICIJE PODATAKA

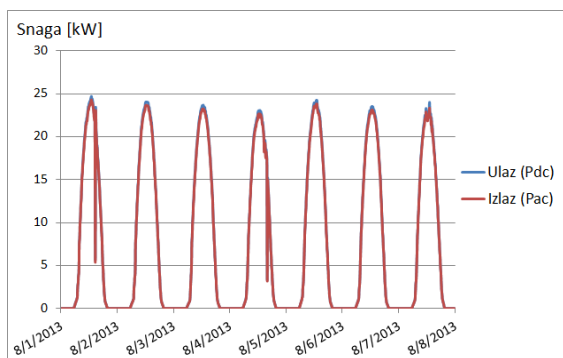
Na slici 14 je prikazan odnos merenih snaga na drugom (3 x 20 panela) i prvom (3 x 24 panela) jednosmernom ulazu posmatranog invertora u periodu 18.9.2013-23.9.2013. Obzirom da je orijentacija svih panela ista, da je zasenčenje panela ostalo približno isto, da je zaprljanje panela slično, nagla promena odnosa ukazuje da je u noći između 21. i 22. septembra 2014. došlo do kvara: promena odnosa sa ca. 1.2 na ca. 1.8 ukazuje na to da je došlo do prekida jednog od 3 stringa na drugom ulazu (njihov broj se smanjio za 1 / 3); pregledom je ustanovljeno da je uzrok prekida mehaničko oštećenje konektora za priključak kabla na invertor. S obzirom da je invertor putem preostala dva paralelno vezana stringa dobijao korektan ulazni napon, nije se generisao signal greške. Približni finansijski gubitak zbog ispada navedenog stringa panela, na nivou meseca septembra (dakle, kada string ne bi radio tokom čitavog septembra) iznosio bi $0.214 \text{ €/kWh} \times 20 / (3 \times 24) \times \text{Energija na prvom jednosmernom ulazu} = 0.214 \text{ €/kWh} \times 20 / (3 \times 24) \times 1983 \text{ kWh} = 118 \text{ €}$.



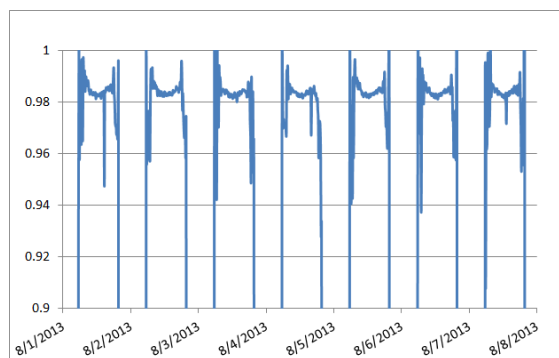
Slika 14 - Integral odnosa snaga merenih na prvom i drugom jednosmernom ulazu u invertor u periodu 18.9.2013.-23.9.2013., sa resetom integratora u trenutku kvara.

7 POREĐENJE RAČUNATE I MERENE NAIZMENIČNE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Na slici 15 su prikazane vrednosti zbira merenih snaga na jednosmernim ulazima invertora i snaga na naizmjeničnom izlazu (a), kao i stepen iskorišćenja invertora (b), određen kao količnik naizmjenične izlazne i ukupne jednosmerne ulazne snage (η_M). Pikovi na početku i kraju dana, su posledica ograničene rezolucije i tačnosti merenja snage - u navedenim periodima se dele dve male veličine, pa mala greška u merenju (bilo na DC, bilo na AC strani) izaziva veliku promenu količnika.



Slika 15a - Merene snage na ulazu i izlazu iz invertora



Slika 15b - Stepen iskorišćenja invertora, određen kao količnik merenih snaga na ulazu i izlazu iz invertora

8 ZAKLJUČAK

U radu se prikazuju podaci o radu fotonaponskog sistema postavljenog na krov zgrade Energoprojekta u Beogradu. Prva grupa analiza se odnosi na iradijansu: poređene su njene vrednosti merene na površini panela sa vrednostima dobijenim primenom originalnog solarnog kalkulatora [6]. Druga grupa analiza se odnosi na generisanu električnu energiju: na jednosmernom naponu, na izlazu iz stringova solarnih panela i na naizmeničnom naponu, na izlazu iz solarnog invertora (energija koja se predaje mreži).

Sveobuhvatan skup merenja i arhiviranja podataka u izvedenom FN sistemu koji je u radu na mreži od januara 2013. godine je po prvi put omogućio testiranje razvijenih programskih alata, koji su do sada korišćeni za procenu energije koju je moguće dobiti iz FN sistema i time proceniti isplativost investicije u varijanti statusa povlašćenog proizvođača električne energije, kao i za optimizaciju hibridnog napajanja (primenjeno za projekat napajanja bazne stanice mobilne telefonije postavljenog na planinskom vrhu udaljenom od distributivne mreže).

Rad sadrži i primer koji pokazuje praktičnu korist od sistema za nadzor podataka u FN sistemu, koji je pomogao da se otkrije da je došlo do kvara (prekida jednog stringa panela) i time preduzmu mere da se kvar što pre otkloni i spreči finansijski gubitak zbog smanjenja generisanja električne energije.

LITERATURA

- [1] Z. Radaković, N. Đorđević, M. Kozomara: Pregled metoda za detekciju ispada elektrodistributivne mreže na koju je priključen solarni inverter, 31. Konferencija Cigre Srbija, Zlatibor, Jun 2013, C6-04
- [2] N. Đorđević, S. Srdić, Z. Radaković: Realizacija detekcije ispada elektrodistributivne mreže u sklopu digitalnog upravljanja solarnim invertorom, Tehnika, 2013; 68(5):910-916.
- [3] S. Srdić, Z. Radaković, N. Đorđević: Izbor metode za praćenje tačke maksimalne snage fotonaponskih panela, Druga međunarodna konferencija o obnovljivim izvorima električne energije, Beograd, 16-18 Oktobar 2013, rad broj 26, Sekcija III
- [4] N. Georgijević, S. Srdić, Z. Radaković: Detekcija rednog električnog luka u kolu fotonaponskih panela, Druga međunarodna konferencija o obnovljivim izvorima električne energije, Beograd, 16-18 Oktobar 2013, rad broj 25, Sekcija III
- [5] C. Krumpholz, Z. Radakovic, N. Georgijevic, S. Srdic: ARC DETECTION Patent Application (Application #20140347069)
- [6] Z. Radaković, N. Paunović, I. Mitev: Optimalno projektovanje hibridnog sistema za off-grid napajanje električnom energijom, 17. Telekomunikacioni forum TELFOR 2009, Beograd, 24 – 26 November 2009
- [7] http://www.sigsolar.com/files/sun_earth_db_en_web_235_240_245_2012.pdf
- [8] <http://www.solarpower.co.il/userfiles/files/%D7%9E%D7%9E%D7%99%D7%A8%20POWERONE%2027.6K.pdf>

COMPARISON OF CALCULATED AND MEASURED IRRADIANCE AND ENERGY PRODUCED BY PV SYSTEM

ZORAN RADAKOVIĆ*, UROŠ RADOMAN
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING UNIVERSITY OF BELGRADE

JASNA GRUJIĆ, MIROSLAV ŽERAJIĆ
ENERGOPROJEKT ENTEL a.d., BELGRADE

BELGRADE

SERBIA

Abstract — On the roof of building of Energoprojekt Company photovoltaic system of total power 115 kW was installed. The system contains acquisition of irradiance on panel surface and temperature of P-N junction of the solar cell. In addition, on each of solar inverters electrical data on the both DC inputs (points of connection of DC strings) and the AC output (connection to the grid) are recorded. The paper presents calculated and measured value of the characteristic quantities in solar engineering technique: irradiance on the solar panel (as the primary power source) and power at the output AC side of the solar inverter (power delivered to the grid). Calculation of the irradiance is performed using originally developed software, with altitude, geographic latitude and longitude, cardinal direction (south, north, west, east) and inclination to the ground surface. For the calculation of the generated power main input is the irradiance, but the temperature of P-N junction of solar cell is also used. Since this value was measured, there was no need to calculate it using thermal model of solar cell, as being done in case that the calculations are performed for the estimation of expected generated energy and expected income in phase of profitability of the project.

Key words — Photovoltaic, Irradiance, Solar calculator, Solar Inverter, MPP tracker, Grid connected solar system