

Monitoring fotonaponskih elektrana kroz evaluaciju temperature modula i proizvedene snage

Nikolina Gajić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
nikolina.gajic@student.etf.unibl.org

Sažetak — Fotonaponske elektrane igraju veoma važnu ulogu u tranziciji ka održivim izvorima energije, omogućavajući iskorišćenje nepresušne solarne energije za proizvodnju električne energije. Međutim, njihova efikasnost i pouzdanost zavise od različitih faktora, uključujući promjene u vremenskim uslovima, degradaciju modula i tehničke probleme u sistemu. U ovom radu predstavljen je integrisani pristup razvoju i evaluaciji naprednog sistema za nadzor fotonaponskih elektrana, pri čemu je implementacija temperaturnih i proizvodnih modula imala centralnu ulogu u unapređenju tačnosti i funkcionalnosti monitoringa. U okviru istraživanja analizirana su tri temperaturna modela Faiman, Sandia i NOCT modelu, u odnosu na realna mjerenja temperature modula sa fotonaponske elektrane „MSE EFT Stanari“. Pored toga, razmatran je i model za procjenu očekivane proizvedene snage sistema. Za potrebe testiranja i vizualizacije modela razvijena MATLAB GUI aplikacija koja omogućava učitavanje, obradu i vizualizaciju mjerenih i modeliranih podataka u realnom vremenu. Na osnovu poređenja teorijskih i eksperimentalnih podataka, ustanovljeno je da Sandia model i Faiman model nudi slične rezultate, dok NOCT model iako je jednostavniji, pokazuje veća odstupanja i ograničenu primjenljivost u dinamičkim uslovima. Pouzdana procjena temperatura modula je važan ulazni podatak za proračun očekivane proizvodnje električne energije. Kroz poređenje modeliranih i izmjerenih vrijednosti proizvedene snage, potvrđeno je da model vjerodostojno prati izmjerene vrijednosti sa elektrane. Kombinovana analiza temperaturnih i proizvodnih modela omogućava detaljniji nadzor performansi sistema, bržu identifikaciju odstupanja i pouzdaniju osnovu za tehničke i ekonomske analize rada fotonaponske elektrane. Pristup prikazan u ovom radu predstavlja vrijednu osnovu za optimizaciju sistema nadzora i poboljšanja efikasnosti i pouzdanosti fotonaponskih postrojenja.

Ključne riječi — temperatura modula; fotonaponska elektrana; Faiman model; Sandia model; NOCT model, model proizvedene snage; MATLAB

I. UVOD

Fotonaponske elektrane omogućavaju direktnu konverziju sunčevog zračenja u električnu energiju na održiv i ekološki prihvatljiv način, ali njihov rad može biti narušen usljed uticaja spoljašnjih faktora kao što su vremenski uslovi, postepena degradacija i tehnički kvarovi unutar sistema koji mogu dovesti do potpunog gubitka očekivane proizvodnje električne energije. Da bi se minimizovali ovi rizici i obezbjedio optimalan rad sistema, neophodno je primijeniti adekvatne sisteme za monitoring i upravljanje. Sistemi za

monitoring fotonaponskih elektrana omogućavaju kontinuirano praćenje najvažnijih parametara, identifikaciju odstupanja od optimalnih vrijednosti i blagovremenu reakciju na moguće probleme. Njihova arhitektura, složenost i performanse zavise od veličine i značaja same elektrane. U manjim sistemima se najčešće prate osnovne električne veličine, poput napona, struje i snage, dok se kod većih i kompleksnijih sistema uvode napredne SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) platforme koje omogućavaju prikupljanje, memorisanje i analizu podataka u realnom vremenu. Pored električnih parametara, savremeni sistemi za monitoring uključuju i praćenje meteoroloških veličina, kao što su solarna iradijansa, temperatura i brzina vjetra, čime se omogućava preciznija analiza performansi elektrane. Na osnovu prikupljenih podataka, operatori mogu donositi odluku o optimizaciji rada sistema, otkrivanju potencijalnih kvarova i održavanju, što direktno doprinosi povećanju efikasnosti i smanjenju operativnih troškova, te produženju životnog vijeka. Digitalizacija i automatizacija procesa nadzora postaju neizostavni faktori u upravljanju velikim solarnim postrojenjima, omogućavajući preciznije prognoze proizvodnje, analizu performansi i povećanje pouzdanosti rada. U cilju proširenja funkcionalnosti sistema monitoringa, u ovom radu razvijen je softverski alat u MATLAB GUI okruženju koji omogućava učitavanje i obradu realnih podataka sa fotonaponske elektrane, primjenu temperaturnih i proizvodnih modela, kao i vizualizaciju dobijenih rezultata. Implementirani su modeli za snagu na osnovu parametara okoline i karakteristika modula. Time je omogućeno upoređivanje teorijskih rezultata sa stvarnim izmjerenim vrijednostima dobijenim sa senzora u sistemu. Pažnja je posvećena odstupanju između modeliranih i mjerenih vrijednosti, kako u pogledu temperature tako i proizvodnje, pri čemu su identifikovani uticaji faktora poput termalne inercije modula i promjenljive iradijanse. Ovaj pristup omogućava dublje razumijevanje ponašanja fotonaponskih modula, doprinosi boljoj validaciji matematičkih modela, te ostavlja prostor za optimizaciju nadzora i pouzdanosti sistema fotonaponskih sistema.

II. TEORIJSKI OSVRT NA SISTEM ZA MONITORING

Osnovna funkcija monitoring sistema je prikupljanje i obrada podataka u realnom vremenu, što uključuje dvije glavne grupe komponenti, a to su električni parametri (napon i struja fotonaponskih stringova ili pojedinačnih modula,

izlazna snaga invertora i energija) i meteorološki parametri (iradijansa u ravni modula, ambijentalna temperatura, temperatura modula, brzina i smjer vjetra). Električni parametri nam služe za procjenu trenutne efikasnosti pretvaranja solarne energije u električnu, kao i detekciju smanjenja performansi i kvarova, dok meteorološki parametri omogućavaju razumijevanje spoljnih faktora koji utiču na rad sistema, ali i računanje teorijske proizvodnje na osnovu modela. Arhitektura sistema za monitoring može značajno da varira u zavisnosti od veličine elektrane i zahtjeva korisnika. Tri najčešće konfiguracije su na nivou modula, na nivou stringa, te na nivou invertora. Zahvaljujući integraciji sa bazom podataka i sistemima za daljinski pristup, savremeni monitoring omogućava kako lokalni nadzor tako i centralizovano upravljanje više elektrana sa jednog mjesta. Uvođenje monitoringa fotonaponskih sistema naročito je značajno za srednje i velike elektrane, gdje čak i mala odstupanja mogu uzrokovati značajan finansijski gubitak na nivou godišnje proizvodnje. U okviru meteoroloških parametara temperatura fotonaponskog modula predstavlja jedan od značajnih parametara koji utiču direktno na njegovu efikasnost. Iako su nazivne vrijednosti snage definisane pri standardnim test uslovima (STC), realni uslovi na terenu odstupaju zbog varijabilnosti ambijentalne temperature, vjetra i intenziteta sunčevog zračenja. Povećanjem temperature modula iznad standardnih test uslova (STC: 25°C i 1000W/m²) dovodi do smanjenja napona ćelije, a time i ukupne proizvedene snage sistema. Iz tog razloga, precizno modeliranje temperature modula je od velikog značaja u analizama performansi, pouzdanoj procjeni fotonaponske snage i implementaciji strategija za detekciju kvarova. Na temperaturu modula prije svega utiče sunčevo zračenje na ravni modula, temperatura okoline i brzina vjetra [1]. Uz uslove okoline, važnu ulogu igra i sama montaža. Kaplan i Kaplan detaljno su proučili uticaj nagiba modula i ugla upada vjetra na temperaturu modula koristeći teorijske izraze za koeficijent prinudne toplotne konvekcije, kao i eksperimentalna mjerenja. Više temperaturnih modela razvijeno je u cilju estimacije stvarne temperature modula na osnovu mjerenih parametara okoline. Izbor modela može da zavisi od ciljeva istraživanja ili korišćenih softverskih alata. Modeli stacionarnog stanja koriste vremenske serije sunčevog zračenja, temperature okoline i brzine vjetra, koji se često daju kao prosjeci pri niskoj vremenskoj rezoluciji. Stoga, korišćenje ovih modela za takve ulazne podatke može biti razumno rješenje, dok s druge strane, ako se izlaz fotonaponskog sistema modelira za ulazne podatke visoke rezolucije, dinamički modeli su poželjniji [2]. U ovom radu analizirana su sva tri modela, Faiman model, Sandia model i NOCT model, te model proizvodnje, pri čemu su svi modeli testirani u realnim uslovima i međusobno upoređeni u pogledu tačnosti.

A. Temperaturni modeli

Faiman model je empirijski model gubitka toplote koji je usvojen u IEC standarde. Definiše temperaturu modula kao funkciju ambijentalne temperature, vrijednosti iradijance u ravni modula i brzine vjetra:

$$T_m = T_a + \frac{E_{POA}}{U_0 + U_1 \times WS}, \quad (1)$$

gdje su T_m vrijednost temperature modula, T_a vrijednost temperature ambijenta, E_{POA} vrijednost iradijance na ravni modula, U_0 vrijednost konstante prenosa toplote, U_1 konvektivna vrijednost prenosa toplote i WS je vrijednost brzine vjetra. [3]

Sandia model je eksponencijalni model koji bolje opisuje ne-linearnu zavisnost temperature modula od brzine vjetra:

$$T_m = T_a + E_{POA} \times e^{(a+b \times WS)}, \quad (2)$$

gdje su a i b parametri koji zavise od konstrukcije i materijala modula, kao i od konfiguracije montaže modula [4].

Prednosti Sandia modela ogleda se u njegovoj sposobnosti da preciznije modelira hlađenje modula pri različitim brzinama vjetra, što ga čini pogodnim za primjenu u analizama performansi u realnim meteorološkim uslovima.

NOCT model se bazira na konceptu *Nominal Operating Cell Temperature* i koristi se u tehničkim listovima proizvođača:

$$T_m = T_a + E_{POA} \frac{(T_{NOCT} - 20)}{800}, \quad (3)$$

gdje je T_{NOCT} vrijednost nominalne radne temperature ćelije pod standardnim uslovima [5].

Model se prvenstveno koristi u prelimenarnim analizama i nije toliko precizan kao prethodna dva, ali je od koristi zbog jednostavne upotrebe kada nisu dostupni detaljni meteorološki podaci [1].

B. Metrika evaluacije modela

Za procjenu preciznosti matematičkih temperaturnih modela primjenjene su tri standardne metrike, srednja apsolutna greška, korjen srednje kvadratke greške i koeficijent determinacije, koje omogućavaju kvantitativno poređenje između modeliranih i eksperimentalnih podataka.

Srednja apsolutna greška – *MAE (Mean Absolute Error)* daje prosječnu apsolutnu grešku između predviđene i stvarne vrijednosti,

$$MAE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]}, \quad (4)$$

gdje je, y_i izmjerene vrijednost temperature, a $\hat{y}_i$ modelirana vrijednost [7].

Korjen kvadratne greške *RMSE (Root Square Error)* posebno naglašava veće greške [7],

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (5)$$

Koeficijent determinacije (R^2) izražava koliko dobro model objašnjava varijabilnost mjerenih podataka. R^2 bliži jedinici

označava bolje slaganje modela sa eksperimentalnim podacima.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (6)$$

gdje je $\bar{y}$ srednja vrijednost mjerenih podataka [7].

Metrike omogućavaju sveobuhvatnu evaluaciju svakog temperaturnog modela i dodatno doprinose objektivnosti zaključaka o njihovoj tačnosti i pouzdanosti u realnim uslovima rada.

C. Model proizvodnje

U kontekstu analize performansi fotonaponskih sistema, pored temperature modula, podjednako važnu ulogu ima i precizna procjena proizvodnje električne energije. Tačnost ovog modela je veoma važna u analizi fotonaponskih sistema, jer direktno određuje količinu očekivane električne energije i time ima presudan uticaj na procjenu proхода, ekonomsku isplativost i ukupnu efikasnost sistema. Na osnovu te procjene izrađuje se finansijska analiza, kalkuliše period povrata, te donosi investicione odluke. Procjenu očekivane proizvedene snage sistema moguće je realizovati pomoću pojednostavljene linearne formule:

$$(1) \quad \dots \quad (7)$$

gdje je N ukupan broj modula, P_{STS} nazivna snaga modula pri STS uslovima [W], γ temperaturni koeficijent snage [%/K].

Kroz integrisanu analizu koja uključuje temperature i proizvodne metode, u ovom radu se vrši njihova implementacija i evaluacija na realnim podacima iz postojeće fotonaponske elektrane. Rezultati modela su upoređeni sa izmjerenim vrijednostima sa senzora, čime se provjerava njihova vjerodostojnost i korisnost za operativni monitoring i optimizaciju performansi sistema.

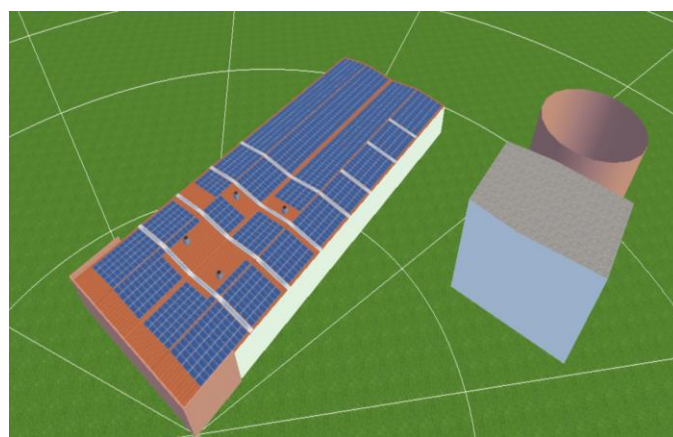
III. OPIS OGLEDNOG SISTEMA ZA MONITORING

Fotonaponska elektrana „MSE EFT Stanari“ čiji podaci se koriste u ovom radu se nalazi u Stanarima sa ukupnom nazivnom snagom od 405,44kWp izgrađene 2019. godine na krovnoj konstrukciji u kompleksu ETF – Rudnik i termoelektrana Stanari. Krov objekta je izveden tako da ima dva dvovodna krova od kojih su dvije ravni orijentisane ka jugoistočnoj strani, a dvije ka sjeverozapadnoj strani, oslonjenja na betonsku konstrukciju pod uglom od 6 stepeni. Elektrana je izgrađena korišćenjem polikristalnih fotonaponskih modula Q CELLS tipa Q POWER-G5 280. Na elektrani ima ukupno 1447 postavljenih fotonaponskih modula koji su povezani na 19 invertora proizvođača Fronius. Na Sl. 1 je prikazan ilustrirani prikaz elektrane pripremljen u PV*SOL-u [6].

Fotonaponska elektrana, čiji se monitoring sistem koristi kao osnov ovog rada, predstavlja objekat sa instaliranim senzorima za mjerenje iradijance, temperature, brzine vjetra, napona i struje. Elektrana radi već 5 godina, što omogućava analizu dugoročnih performansi i uticaja spoljnih faktora na njen rad.

Analiza je sprovedena na osnovu višednevnog skupa podataka koji obuhvata četiri karakteristična dana iz različitih godišnjih doba, 07. februara, 22. mart, 23. jun, 22. oktobar. Ovim pristupom omogućeno je obuhvatanje meteoroloških uslova, uključujući sezonske oscilacije u intenzitetu sunčevog zračenja, temperaturnim uslovima i brzini vjetra, što utiče na pouzdanu procjenu temperaturnih modela u realnim operativnim okolnostima. Za svaki od navedenih dana, modelirane vrijednosti temperature modula dobijene su na osnovu ulaznih meteoroloških parametara, a zatim su poređene sa eksperimentalnim mjerenjima prikupljenim sa senzora na fotonaponskoj elektrani. U cilju kvantitativne evaluacije preciznosti svakog modela, korišćene su tri standardne metrike, srednja apsolutna greška, korjen srednje kvadratne greške i koeficijent determinacije.

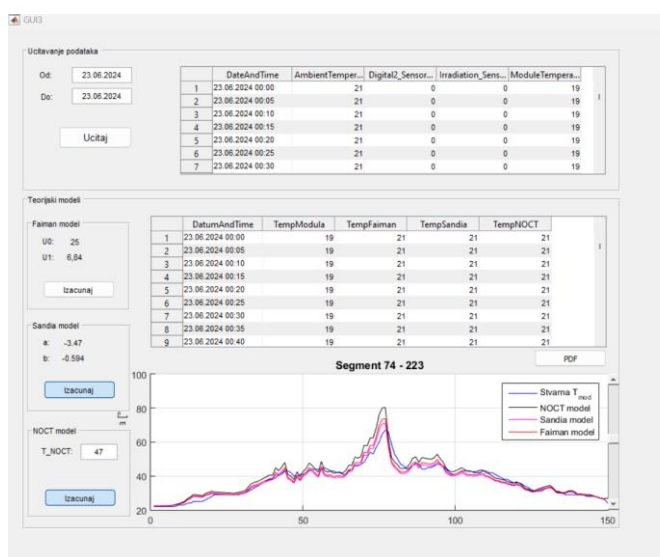
Za radi olakšavanja analize temperaturnih modela i procjene proizvodnje, razvijen je interaktivni sistem koja se sastoji od tri povezane MATLAB GUI aplikacije. Glavni prozor omogućava izbor između dvije funkcionalne cjeline, analize podataka temperature i analize podataka proizvodnje. U okviru GUI3 aplikacije implementirana je mogućnost za učitavanje podataka iz unaprijed definisane Excel tabele, filtriranje podataka po vremenskom intervalu, automatsku konverziju i validaciju meteoroloških parametara, te proračun temperature modula korišćenjem tri modela, Faiman, Sandia i NOCT. Pored toga, aplikacija omogućava grafički prikaz izmjerenih i modeliranih vrijednosti temperature, kao i vizualizaciju trendova i odstupanje kroz interaktivne grafikone. S druge strane, GUI4 se bavi procjenom proizvodnje fotonaponskog sistema. Na osnovu ulaznih parametara kao što su iradijansa i



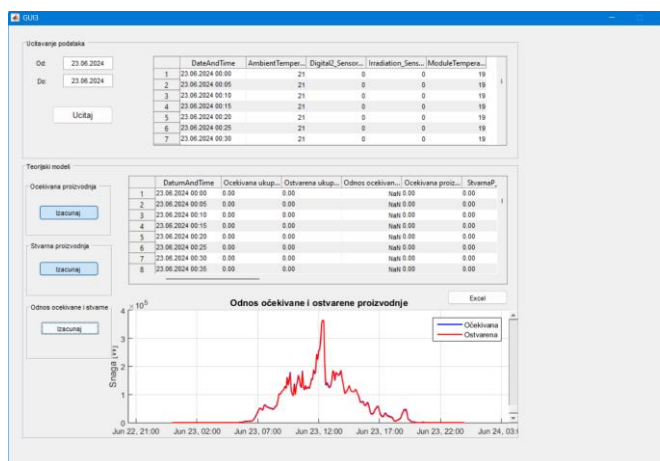
Sl. 1 – Ilustrovani prikaz elektrane pripremljen u PV*SOL

temperatura modula, izračunava se očekivana snaga, a zatim se ona poredi sa stvarnim podacima prikupljenim sa invertora. Aplikacija omogućava korisniku da analizira iskorišćenost sistema, sagleda performanse svakog pojedinačnog invertora, te vizuelno uporedi očekivane i ostvarene rezultate na vremenskoj skali. Obe aplikacije nude intuitivne kontrole za unos i upravljanje parametrima, pregledne tabele i grafičke prikaze rezultata, kao i mogućnost izvoza podataka za dalju analizu. Na taj način, sistem pruža

sveobuhvatan alat za validaciju modela, detekciju odstupanja i podršku u donošenju odluke vezano za održavanje i optimizaciju rada fotonaponske elektrane. Izgled GUI3 interfejsa na „Sl. 2“ i GUI4 interfejsa na „Sl. 3.“

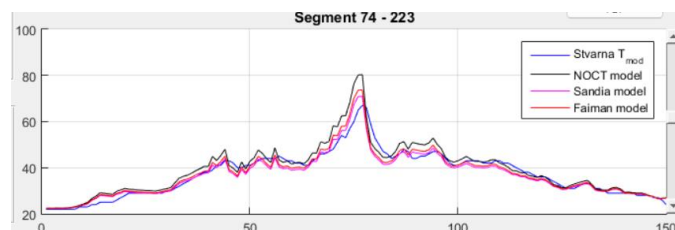


Sl. 2 – Izgled GU3 interfejsa



Sl. 3 – Izgled GUI4 interfejsa

februar, 22. mart, 23. jun, 22. oktobar, te za analizirane dane su dobijene vrijednosti prikazane u Tabeli I.



Sl. 4 – Grafički prikaz sva tri teorijska modela

TABELA I. PRIKAZ PRECIZNOSTI MODELA

Datum	Modeli	MAE	RMS E	R2
07.02.2024.	Faiman	2,0742	2,9327	0,91677
	Sandia	2,5056	3,2430	0,89823
	NOC T	2,8767	3,8928	0,85335
22.03.2024.	Faiman	2,3607	2,8222	0,95334
	Sandia	3,0127	3,6467	0,92210
	NOC T	4,3691	5,7644	0,80535
23.06.2024.	Faiman	1,2827	2,0213	0,96312
	Sandia	1,2837	2,0241	0,96301
	NOC T	1,6530	2,7941	0,92952
22.10.2024.	Faiman	2,1613	2,9930	0,95763
	Sandia	2,1515	2,9776	0,95806
	NOC T	2,8895	4,3010	0,91250

IV. PRIMJENA OGLEDNOG SISTEMA ZA MONITORING

A. Estimacija temperature modula i poređenje sa mjerenjem

Na osnovu izmjerenih vrijednosti iradijanse, temperature, ambijenta i brzine vjetra, implementirana je procjena fotonaponskih modula pomoću Faiman modela, Sandia modela i NOCT modela. Na „Sl. 4“ je prikazan grafik sa sva tri teorijska modela na dan 23.06.2024. godine, kao i sa stvarnom vrijednosti temperature sa senzora. Plava linija predstavlja izmjerene vrijednosti temperature sa senzora, dok su ostale linije rezultat simulacije tri modela.

U cilju validacije i kvantitativnog ocjenjivanja preciznosti modela, primjenjene su tri standarde metrike za dane 07.

Na osnovu metrike potvrđujemo da su Sandia i Faiman modeli znatno pouzdaniji u procjeni temperature modula, dok NOCT model, iako je jednostavniji, pokazuje veće odstupanje i nižu korelaciju sa stvarnim mjerenjima.

Faiman model – Faiman model pruža uravnoteženu procjenu temperature modula u periodu stabilne iradijanse i umjerene brzine vjetra. Međutim, tokom naglih promjena iradijanse model često predviđa brže povećanje temperature nego što se to stvarno mjerenjem pokazalo. Ovo se može pripisati zanemarivanju termalne inercije modula, odnosno modulima je potrebno vrijeme da se zaista zagriju ili ohlade, što Faiman model ne uzima u obzir.

Sandia model – Sandia model bolji reprezentuje efekat brzine vjetra na hlađenje modula od Faiman modela, jer koristi eksponencijalnu zavisnost. Model se pokazao kao najprecizniji

u periodima visoke iradijancije, što potvrđuje njegovu efikasnost u punim sunčanim uslovima. Međutim, parametri modela nisu univerzalni, već zavise od tipa modela i uslova instalacije, što može umanjiti tačnost ako se model prethodno ne prilagodi lokalnim uslovima.

NOCT model – NOCT model je najjednostavniji, jer ne uključuje uticaj vjetra niti realne karakteristike fotonaponskih modula. Međutim, pokazuje najveća odstupanja u uslovima promjenljive iradijancije i brzine vjetra. Precjenjuje temperaturu u hladnijim i vjetrovitijim uslovima, dok potcjenjuje u vrlo toplim uslovima bez vjetra. Koristan je za početne projektne proračune, ali nije pogodan za precizni operativni monitoring.

U periodu naglog porasta iradijancije, svi modeli predviđaju temperaturu veću od stvarne, jer senzor modula reaguje sa kašnjenjem zbog termalne inercije materijala. Sva tri modela prate sličan trend porasta i opadanja temperature modula u jutarnjim i večernjim satima, kada je temperatura ispod 30°C, razlike između modela su gotovo zanemarljive, međutim u toku maksimalnog solarnog zračenja, u sredini dana, razlika postaje izraženija. Najveća razlika između modela uočena je kada je temperatura modula iznad 50°C. U nekoliko trenutaka, razlika između NOCT, Faiman i Sandia modela prelazi 5°C, što može značajno uticati na fotonaponske performanse.

Faiman model pokazuje veću osjetljivost na promjene vjetra (kroz U_1), što se ogleda u nešto nižim temperaturama kada je brzina vjetra veća. Sandia model koristi eksponencijalni izraz i daje konzervativnije vrijednosti u ekstremnim uslovima, dok NOCT model je jednostavan i najčešće pokazuje najvišu temperaturu, jer ne uključuje vjetar direktno.

B. Estimacija proizvodnje i poređenje sa mjerenjima

U ovoj analizi, korišćeni su realni podaci sa fotonaponske elektrane, uključujući izmjerenu iradijanciju E_{POA} , procijenjenu temperaturu modula T_{mod} , poznatu nazivnu snagu panela 280W, proizvođački temperaturni koeficijent modula -0,40 [%/K]. Korišćen je isti skup podataka koji je primijenjen i u estimaciji temperature modula. Za svaki trenutak izračunata je očekivana vrijednost proizvedene snage invertora i poređena je sa stvarnim vrijednostima. Ukupna snaga stvarne vrijednosti na invertorima je dobijena tako što su učitane struje i naponi na pojedinačim MPPT-ovima te sumiran njihov proizvod. Na osnovu raspoloživih podataka izračunat je i procenat iskorišćenosti sistema u odnosu na očekivanu vrijednost. Rezultat poređenja pokazuje vrlo jasno uvid u stepen saglasnosti između modeliranih i izmjerenih vrijednosti. Za svaki vremenski trenutak izračunata je apsolutna razlika između stvarne izlazne snage i modelovane snage, koja je zatim izražena u odnosu na modelovanu vrijednost kao relativno odstupanje. Srednja vrijednost relativnog poklapanja za cijeli dan dobijena je tako što su odstupanja izračunata za sve vremenske korake i potom iskorištena za određivanje prosječnog stepena saglasnosti. Na osnovu navedenog računa dobijeno je da je srednje poklapanje između stvarne i modelovane izlazne snage 99,38%, što ukazuje na visoku tačnost modela za konkretne uslove mjerenja. Vizuelna potvrda

ovakvog rezultata vidi se na "Sl. 5", gdje kriva izmjerene snage u velikoj mjeri prati krivu očekivanih, odnosno modelovanih vrijednosti.

Ovaj primjer jasno ilustruje kako sistem za monitoring omogućava da se na osnovu stvarnih podataka napravi predikcija očekivanih performansi i otkrije ekvivalentna odstupanja u radu elektrane. Takođe demonstrira značaj prethodne tačke estimacije temperature modula kao ulaznog parametra za tačnu procjenu snage, kao i ekstimaciju proizvodnje koja je značajna za prije svega za finansijsku analizu.



Sl. 5 – Prikaz stvarne i očekivane vrijednosti proizvedene snage

V. ZAKLJUČAK

Savremeni sistemi za monitoring fotonaponskih elektrana predstavljaju neizostavan alat u postizanju visoke efikasnosti, pouzdanosti i dugovječnog održavanja proizvodnih performansi solarnih postrojenja. Njihova primjena omogućava kontinuirano praćenje važnih parametara, pravovremeno otkrivanje odstupanja, te unapređenje procesa donošenjem odluka kroz analitičku obradu i vizualizaciju podataka. U ovom radu prikazan je primjer implementacije integrisanog sistema za monitoring, koji kroz tri segmenta MATLAB GUI aplikacije omogućava dvosmjernu analizu, evaluaciju temperaturnih modula i estimaciju očekivane proizvodnje. U okviru analize temperature modula upoređeni su modeli Faiman, Santia i NOCT sa izmjerenim vrijednostima u realnim uslovima rada, pri čemu je Sandia model i Faiman model pokazali približno slične rezultate, a NOCT model odstupa. U drugom dijelu, korištenjem istih meteoroloških podataka, izvedena je procjena očekivane proizvodnje i njeno poređenje sa ostvarenom proizvodnjom, čime je demonstrirana uloga monitoring sistema u verifikaciji performansi i detekciji mogućih odstupanja. Kombinovanjem teorijskih modela, stvarnih mjerenja i napredne softverske podrške, sistem za monitoring se potvrđuje kao značajna komponenta u efikasnom upravljanju i optimizaciji rada fotonaponskih elektrana. Prikazani primjeri jasno ilustruju njegovu ulogu ne samo u nadzoru, već i u validaciji modela, predikciji ponašanja sistema i unapređenju ukupne strategije održavanja i planiranja proizvodnje.

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se profesoru dr Čedomiru Zeljkoviću na nesebičnom angažmanu, stručnim savjetima i sugestijama, kao i na kontinuiranoj podršci tokom izrade ovog rada. Takođe, izražavam zahvalnost tehničkom osoblju elektrane „MSE EFT

Stanari“ na dostavljenim podacima i podršci tokom realizacije istraživanja.

LITERATURA

- [1] Akhsassi, M., El Fathi, A., Erraissi, N., Aarich, N., Bennouna, A., Raoufi, M., & Outzourhit, A. (2018). Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.052>
- [2] Anderson, K., Kemnitz, J., & Boyd, M. (2021). *Evaluating cell temperature models and the effect of wind speed in PV system capacity testing* Preprint. Paper presented at 48th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 48). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.130M>.
- [3] Sandia National Laboratories. (n.d.). *Faiman module temperature model*. PV Performance Modeling Collaborative. Pristupljeno 25.03.2025. godine. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/module-temperature/faiman-module-temperature-model/>
- [4] Sandia National Laboratories. (n.d.). *Sandia module temperature model*. PV Performance Modeling Collaborative. Pristupljeno 25.03.2025. godine <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/module-temperature/sandia-module-temperature-model/>
- [5] Zeljković, Č. (2018). *Obnovljivi izvori energije: Solarna energetika*. Univerzitet u Banjoj Luci / Elektrotehnički fakultet; Akademska misao
- [6] EFT – Rudnik i termoelektrana Stanari (2018). *Glavni projekat fotonaponske elektrane "EFT SOLAR" (405.44 kW)*. EFT – Rudnik i Termoelektrana Stanari, Banja Luka (*Interna dokumentacija*).
- [7] Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>

ABSTRACT

Photovoltaic power plants play a crucial role in the transition towards sustainable energy sources, enabling the utilization of inexhaustible solar energy for electricity generation. However, their efficiency and reliability depend on various factors, including changes in weather conditions, module degradation, and technical issues within the system. This paper presents an integrated approach to the development and evaluation of an advanced monitoring system for photovoltaic plants, in which the implementation of temperature and power output models plays a central role in improving the accuracy and functionality of the monitoring process. As part of the study, three temperature models — Faiman, Sandia, and NOCT — were analyzed in relation to real temperature measurements from the photovoltaic power plant “MSE EFT Stanari.” Additionally, a model for estimating the expected power output of the system was considered. For the purpose of testing and visualization, a MATLAB GUI application was developed, enabling the loading, processing, and real-time visualization of measured and simulated data. Based on the comparison between theoretical and experimental data, it was established that the Sandia and Faiman models offer similar results, while the NOCT model, despite its simplicity, shows greater deviations and limited applicability under dynamic conditions. Accurate

estimation of module temperature is a critical input for calculating the expected energy production. Through comparison of modeled and measured power output values, it was confirmed that the production model reliably tracks the real data recorded at the plant. The combined analysis of temperature and power models allows for more detailed performance monitoring, faster identification of deviations, and a more reliable basis for technical and economic evaluation of photovoltaic systems. The approach presented in this study provides a valuable foundation for optimizing monitoring systems and improving the overall efficiency and reliability of photovoltaic installations.

EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC MODULE TEMPERATURE MODEL ACCURACY USING A MATLAB GUI TOOL AND DATA FROM AN OPERATIONAL POWER PLANT

Nikolina Gajić