

ANALIZA UTJECAJA SJENE NA FOTONAPONSKI MODUL U POLUĆELIJSKOJ IZVEDBI

ANALYSIS OF THE SHADING EFFECTS ON THE HALF-CUT PHOTOVOLTAIC MODULE

Stipe Vučković, Zvonimir Meštrović

Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10000 Zagreb, Hrvatska

SAŽETAK

U ovom radu analiziran je utjecaj zasjenjenja na fotonaponske module u polučelijskoj izvedbi. Razvijen je simulacijski model u programskom paketu Simulink, koji je potvrđen laboratorijskim mjerenjima. Ispitani su različiti scenariji zasjenjenja kako bi se procijenio njihov utjecaj na električne karakteristike modula. Rezultati ukazuju na značajnu prednost polučelijske izvedbe u uvjetima zasjenjenja u odnosu na standardne fotonaponske module.

Ključne riječi: *Sunčeva energija, fotonapon, fotonaponski modul, utjecaj zasjenjenja, prenosne diode, simulacijski model, polučelijski*

1. UVOD

1. INTRODUCTION

Sunčane elektrane zajedno s vjetroelektranama predstavljaju dvije tehnologije na kojima se temelji nisko-ugljična energetska tranzicija. Samo u 2023. godini svijet je dodao 447 GW novih kapaciteta sunčanih elektrana i 117 GW vjetroelektrana, dosegnuvši tako kumulativno 1624 GW odnosno 1021 GW.

Ovu ekspanziju prati i kontinuirani tehnološki napredak. Posebno je vidljiv u sektoru fotonaponskih modula, gdje stalna poboljšanja u proizvodnim procesima i dizajnu omogućuju postizanje sve veće efikasnosti. Među brojnim inovacijama koje oblikuju industriju, posebno se izdvaja prelazak na fotonaponske module u tzv. polučelijskoj izvedbi, koji su brzo postali industrijski standard.

Zanimljivo je stoga detaljnije sagledati prednosti navedene tehnologije.

Osnovne prednosti i mane fotonaponskih modula u polučelijskoj izvedbi detaljnije sagledava [1] uz točno predviđanje da će navedena tehnologija postati industrijski standard.

Većina literatura [1-6] kao osnovnu prednost polučelijskih modula ističe njihovo bolje ponašanje pod utjecajem sjene, a što je i tema istraživanja ovog rada. U [3] dana je detaljna analiza ponašanja standardnih FN modula u uvjetima zasjenjenja uz potvrdu simulacijskog modela stvarnim mjerenjima. U [4] autori su na sličan način analizirali ponašanje FN modula u polučelijskoj izvedbi, a u [5] dana je složena analiza točnosti standardnog Simscape modela FN modula u uvjetima različitog zasjenjenja. Slične i analize s detaljnijim utjecajem većeg broja različitih oblika sjene u realnim uvjetima dane su u [6-7].

Iako sva navedena literatura detaljno sagledava način rada FN modula u polučelijskoj izvedbi, ni na jednom mjestu nije na jednostavan način dana usporedba ponašanja FN modula u polučelijskoj izvedbi naspram standardne u uvjetima istog segmentnog zasjenjenja, a što će se detaljnije razraditi u ovom radu.

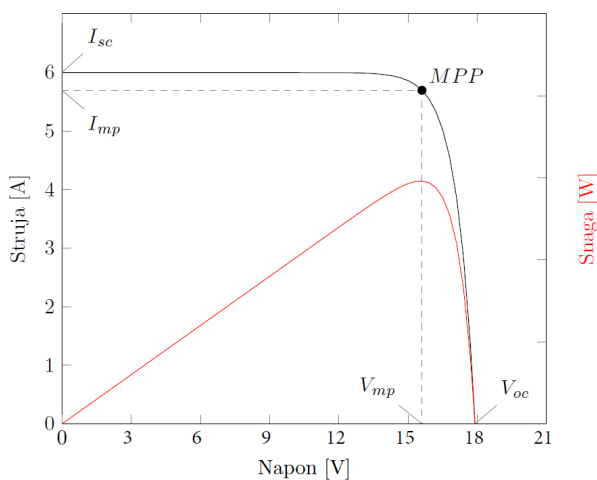
2. FOTONAPONSKI MODUL

2. PHOTOVOLTAIC MODULE

Fotonaponska (FN) ćelija je uređaj koji putem fotonaponskog efekta pretvara sunčevu energiju u električnu energiju. Kako bi se osigurali

odgovarajući napon i snaga, veći broj FN ćelija povezuje se u seriju, čime se formira fotonaponski modul.

Jedan od ključnih pokazatelja rada FN modula su njegove I–V i P–V karakteristike, prikazane na Slici 1. Te karakteristike određene su temeljnim električnim veličinama: naponom praznog hoda (V_{oc}), strujom kratkog spoja (I_{sc}), naponom u točki maksimalne snage (V_{mp}) i strujom u točki maksimalne snage (I_{mp}). Vidljivo je da se točka maksimalne snage (engl. *Maximum Power Point*, *MPP*) pojavljuje u blizini koljena I–V krivulje.



Slika 1 I – V i P – V krivulja fotonaponskog modula [2]
Figure 1 I – V & P – V characteristics of photovoltaic module [2]

Sve navedene veličine dostupne su u tehničkim listovima svakog FN modula i određene su pri standardnim tehničkim uvjetima (engl. *Standard Test Conditions, STC*)¹. Međutim, pri

¹ 1.000 W/m², 25°C, AM 1.5

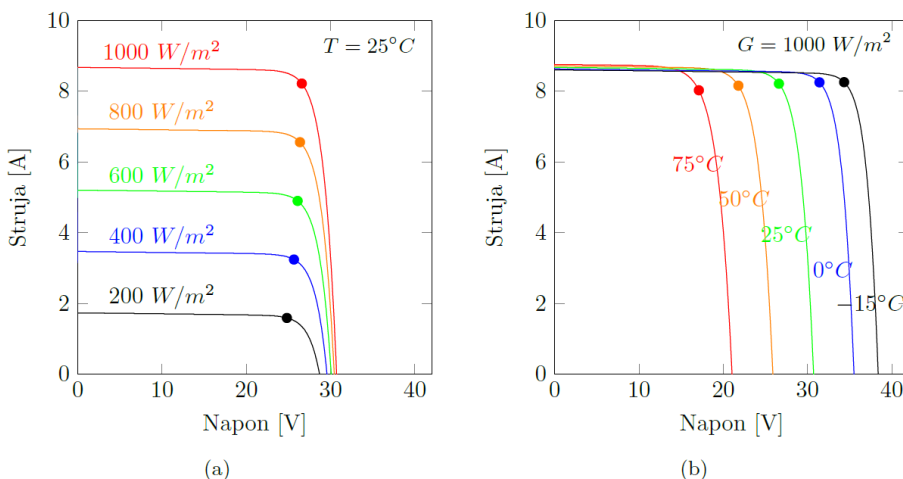
promjenjivim atmosferskim uvjetima, kao što su promjene sunčevog zračenja i temperature, karakteristike modula mijenjaju se i poprimaju drugačije oblike (vidi Slika 2).

Posebno složen i zanimljiv utjecaj na I–V i P–V karakteristike uzrokuje pojava sjene koja zahvaća određeni segment FN modula.

Kada se zasjeni samo jedna ćelija unutar FN modula, dolazi do značajnog smanjenja snage cijelog sustava. Budući da su ćelije međusobno povezane u seriji, zasjenjena ćelija postaje najslabija karika koja ograničava protok struje kroz sve ostale ćelije. Štoviše, zasjenjena ćelija ne samo da ne doprinosi proizvodnji energije, već djeluje kao trošilo, uzrokujući dodatni pad napona.

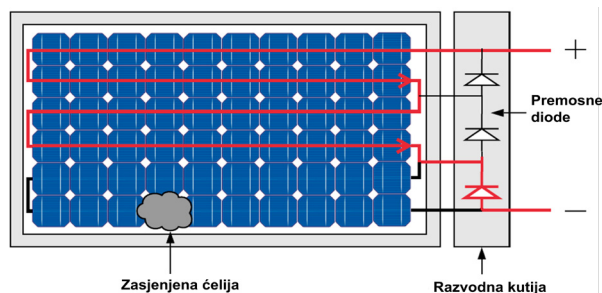
Problem dodatno pogoršava činjenica da nezasjenjene ćelije i dalje generiraju električnu energiju, no taj višak energije ne koristi se učinkovito, već se pretvara u toplinu na zasjenjenim ćelijama. Ova pojava dovodi do značajnog povećanja temperature zasjenjenih ćelija, što može rezultirati trajnim oštećenjem modula poznatim kao "vruće točke".

Jedna od najčešće primjenjivanih metoda za smanjenje negativnih učinaka sjene na FN module je korištenje prenosnih dioda (engl. *Bypass diodes*). Premosne diode povezuju se antiparalelno s određenim grupama FN ćelija, dijeleći modul na nekoliko serijski povezanih podnizova ćelija. U slučaju zasjenjenja, prenosne diode preuzimaju ulogu zaobilaznog puta za struju, omogućujući struji da teče kroz nezasjenjeni dio modula i tako zaobilazi zasjenjeni podniz.



Slika 2 Utjecaj promjenjivog sunčevog zračenja (a) i temperature (b) [2]
Figure 2 Variable insolation (a) and temperature (b) influence [2]

Na Slici 3 prikazano je načelo rada prenosnih dioda u situaciji kada je zasjenjena jedna FN ćelija unutar modula.



Slika 3 Načelo rada prenosnih dioda [3]

Figure 3 Working principle of bypass diodes[3]

Detaljna analiza utjecaja sjene na klasične FN module s prikazom I-V krivulja pri različitim scenarijima zasjenjena već je obrađena u [3]. Stoga će se u ovom radu analiza proširiti na utjecaj sjene na FN module u tzv. polućelijskoj (engl. *Half-cut cell*) izvedbi.

3. POLUĆELIJSKI FOTONAPONSKI MODULI

3. HALF-CUT CELL PHOTOVOLTAIC MODULES

Suvremeni FN moduli rade se u tzv. polućelijskim (engl. *Half-cut cell*) izvedbama. Kao što samo ime sugerira, u polućelijskim FN modulima ćelije su prepolovljene i povezane u seriju.

Dodatno, cijeli modul podijeljen je na dva dijela – gornju i donju polovicu, koje su električki spojene paralelno.

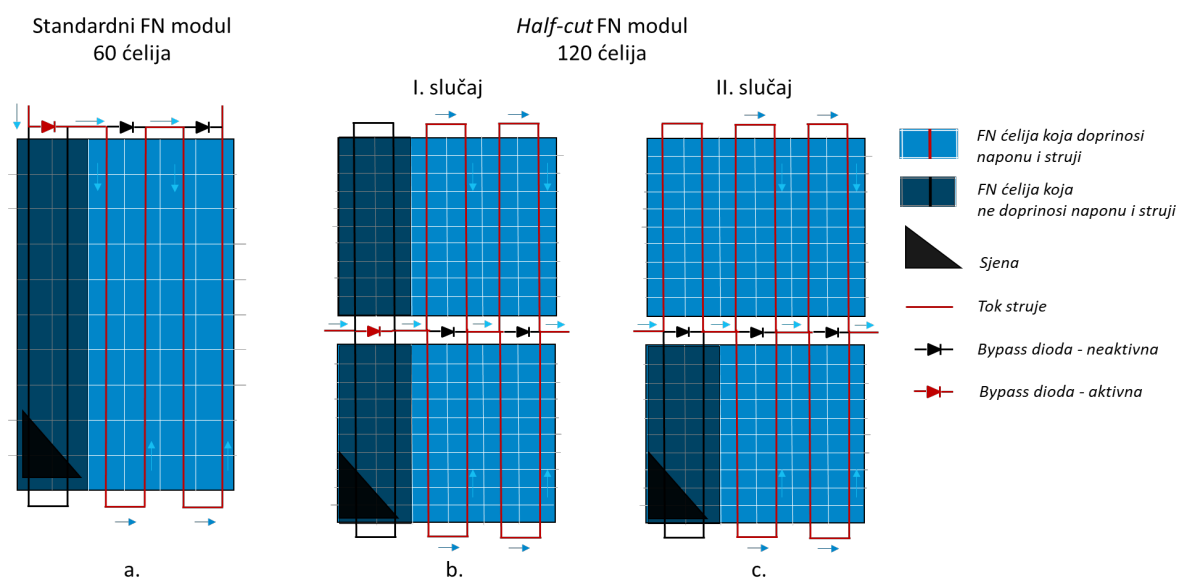
Na taj način vanjske električne karakteristike FN modula ostaju nepromijenjene; napon i struja na priključcima jednaki su kao kod FN modula u standardnoj izvedbi. Međutim, unutar svake polovice modula, napon je dvostruko veći, a struja dvostruko manja, što rezultira smanjenjem Joulovih gubitaka.

Dodatne prednosti polućelijskih modula uključuju bolju otpornost na mikro pukotine (zbog smanjenih dimenzija ćelija) te značajno bolje ponašanje tijekom zasjenjenja. Upravo ova posljednja prednost bit će detaljnije analizirana u ovom radu.

Prikaz standardnog FN modula sa 60 ćelija i polućelijskog modula sa 120 ćelija (6 podnizova od 20 ćelija) u uvjetima segmentnog zasjenjenja dan je na Slici 4. Vidljivo je da je kod polućelijske izvedbe FN modula funkcija prenosnih dioda dodatno unaprjeđena.

U prikazanom primjeru, kod standardnog FN modula uslijed pada napona uzrokovanog sjenom dolazi do aktivacije prve prenosne diode i premošćivanja 1/3 panela (slika 4 a.).

Sličan scenarij odvija se i kod polućelijskog modula, pri čemu aktivacija prenosne diode



Slika 4 Usporedba standardnog i polućelijskog FN modula u uvjetima zasjenjenja

Figure 4 Comparison of standard and Half-cut PV module under shading conditions

premošćuje odgovarajući gornji i donji podniz FN modula (slika 4 b.). U oba slučaja FN modul nastavlja raditi s približno 2/3 svoje snage.

No, specifičnost polučelijske izvedbe omogućuje i alternativni način rada, pri kojem ne dolazi do aktivacije premosne diode već FN modul nastavlja rad s ukupno 5/6 podnizova (slika 4 c.) i tako potencijalno proizvodi veću snagu.

Iz navedenog jednostavnog primjera proizlazi da je utjecaj zasjenjenja na rad FN modula, a osobito na polučelijske izvedbe, izrazito složen.

Kako bi se ova problematika preciznije sagledala, u nastavku rada provest će se detaljna analiza različitih scenarija zasjenjenja uz primjenu simulacijskog modela. Dobiveni rezultati bit će dodatno validirani kroz stvarna mjerenja na laboratorijskom postavu, s ciljem pružanja cjelovitog uvida u njihov utjecaj na električne karakteristike modula.

4. LABORATORIJSKI POSTAV

4. LABORATORY SETUP

Prilikom laboratorijskog mjerenja, korišten je FN modul tvrtke QCells s integriranim premosnim diodama u polučelijskog izvedbi. FN modul ima tri premosne diode i šest podnizova, svaki sa po 20 monokristalnih ćelija. Tijekom mjerenja FN modul bio je postavljen u dvorištu Elektrotehničke škole Zagreb pod kutom od 60° okrenut prema jugu.

Detaljne karakteristike modula dane su u Tablici 1.

Tablica 1 Tehničke karakteristike korištenog FN modula

	QCells Q.PEAK DUO-G9 350
Nazivna snaga P_{MPP} (W)	350
Napon u točki nazivne snage V_{mp} (V)	34,31
Struja u točki nazivne snage I_{mp} (A)	10,20
Napon praznog hoda V_{oc} (V)	40,94
Struja kratkog spoja I_{sc} (A)	10,68
Efikasnost (%)	20,3
Dimenzije (mm)	1673 × 1030 × 32
Br. ćelija	6 × 20 monokristal



Slika 5 FN modul korišten u laboratorijskom postavu

Figure 5 The PV module used in laboratory testing

Za potrebe konstruiranja I-V i P-V krivulje, FN modul se spajao na promjenjive otpornike vrijednosti od 0 do 1000 Ω . Za mjerenje struje i napona korištena su dva digitalna multimetra Peak Tech 3360 DMM, a za mjerenje sunčevog zračenja korišten je mjerni instrument Kimo SL 200. Simulacija zasjenjenja napravljena je prekrivanjem određenog dijela FN modula svjetlonepropusnim pokrivalom.

5. SIMULACIJSKI MODEL

5. SIMULATION MODEL

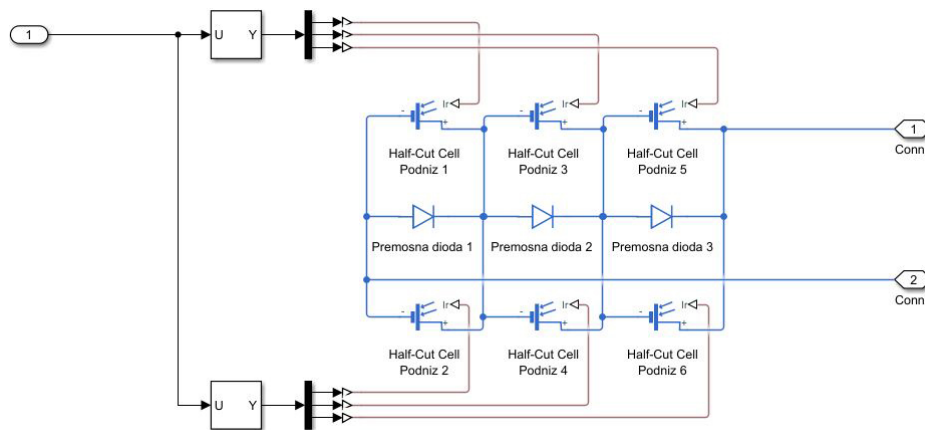
Za potrebe analize kreiran je simulacijski model FN modula u polučelijskoj izvedbi u programskom paketu MATLAB-Simulink (Slika 6).

Model je kreiran od šest FN podnizova čijim se radom upravlja kroz pet zadanih parametara:

1. Struja kratkog spoja I_{sc} (A)
2. Napon praznog hoda U_{ph} (V)
3. Referentno ozračenje G (W/m^2)
4. Vrijednost spektra zračenja $AM=1.5$
5. Vrijednost serijskog otpora R_s (Ω)

Sve navedene vrijednosti preuzete su iz tehničkog lista FN modula koji je korišten u laboratorijskom postavu.

Vrijednosti ozračenja unose se ručno u matricu tipa 3 x 2, pri čemu svaki element matrice prenosi svoju vrijednost na odgovarajući podniz FN modula. Ovakav način izvedbe simulacijskog sklopa omogućava realističnu simulaciju zasjenjenog modula. Naime, nezasjenjeni podniz prima vrijednost ozračenja koje odgovara izmjerenom

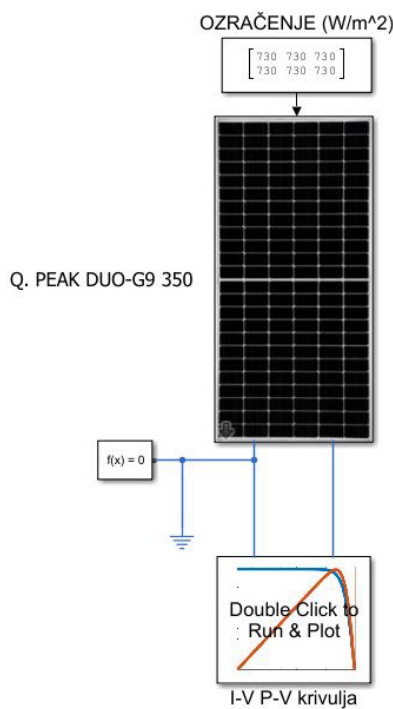


Slika 6 Simulacijski model FN modula

Figure 6 Simulation model of PV module

ozračenju tijekom laboratorijskog mjerenja, dok zasjenjeni podniz ima vrijednost ozračenja blizu 0 W/m². Izmjerena vrijednost ozračenja u trenutku laboratorijskog ispitivanja iznosila je 730 W/m², što je vidljivo na samom modelu.

1. scenarij – Bez zasjenjenja
2. scenarij – Zasjenjenje u gornjoj polovici
3. scenarij – Zasjenjenje u gornjoj i donjoj polovici
4. scenarij – Vertikalna sjena
5. scenarij – Horizontalna sjena



Slika 7 Cjelokupni simulacijski model

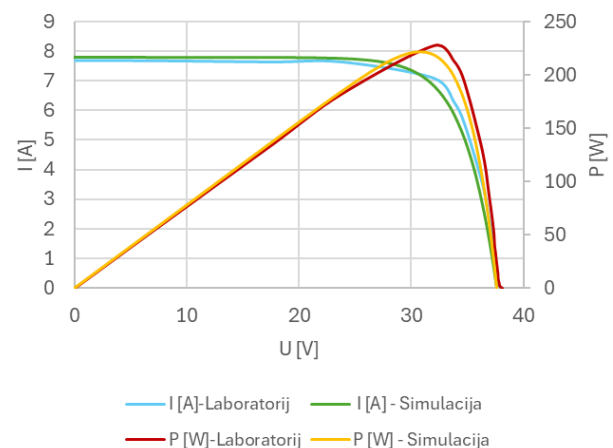
Figure 7 Complete simulation model

6. REZULTATI MJERENJA I VALIDACIJA MODELA

6. MEASUREMENT RESULTS AND MODEL VALIDATION

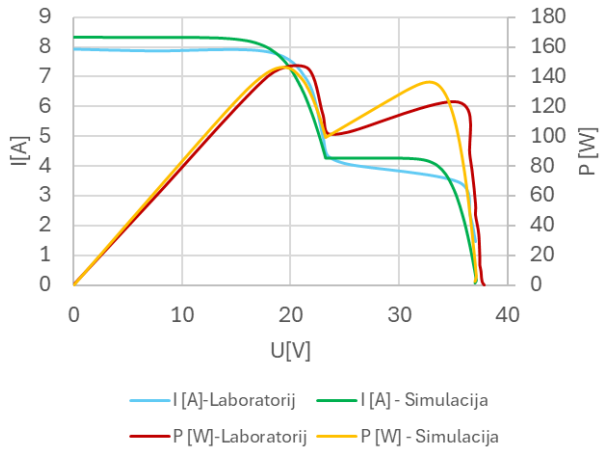
Kako bi se dobili što korisniji rezultati, simulacija se provodi na temelju pet različitih scenarija zasjenjenja:

I-V i P-V krivulje dobivene simulacijskim modelom za svaki scenarij zasjenjenja prikazane su u nastavku rada, zajedno s odgovarajućim krivuljama dobivenim laboratorijskim mjerenjem.

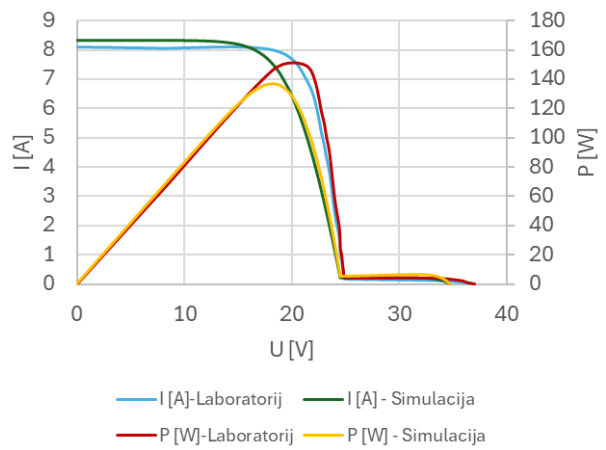
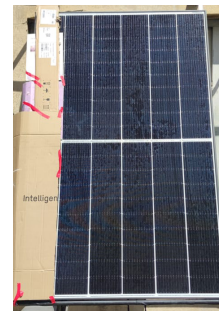


Slika 8 1. scenarij – Bez zasjenjenja

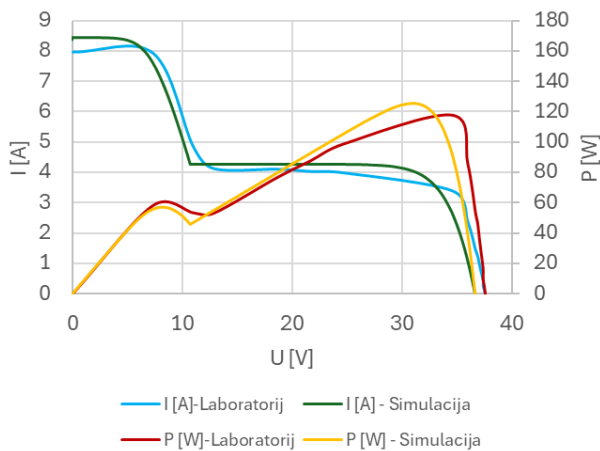
Figure 8 1st scenario – Without shading



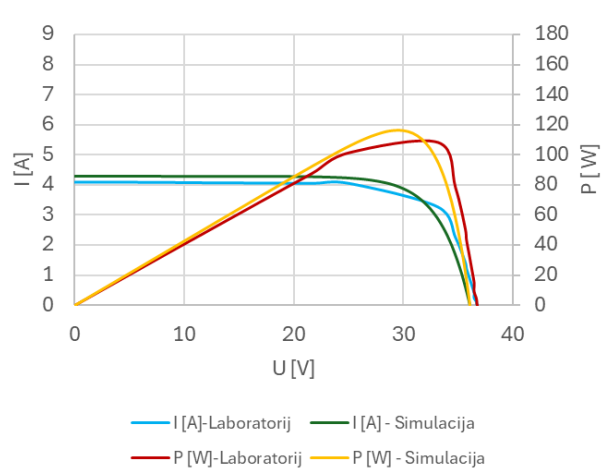
Slika 9 2nd scenarij – Zasjenjenje u gornjoj polovici FN modula
Figure 9 2nd scenario – Shading in top part of the PV module



Slika 11 4th scenarij – Vertikalna sjena
Figure 11 4th scenario – Vertical shade



Slika 10 3rd scenarij – Zasjenjenje u gornjoj i donjoj polovici FN modula
Figure 10 3rd scenario – Shading in top and bottom part of the PV module



Slika 12 5th scenarij – Horizontalna sjena
Figure 12 5th scenario – Horizontal shade

Analiza dobivenih rezultata dana je u nastavku.

Prvi scenarij je referentni slučaj bez sjene u kojem se s obzirom na trenutno sunčevo zračenje postigla najveća snaga modula od oko 230 W.

Drugi scenarij analogan je već teorijski obrađenom primjeru iz uvodnog dijela rada. Analizom P-V krivulje uočava se da se globalni maksimum pojavljuje pri nižim naponima, odnosno uz aktivaciju prve prenosne diode i premošćivanja pripadajućih podnizova u gornjoj i donjoj polovici modula. Ova konfiguracija uzrokuje redukciju snage za približno 1/3, što je slično kao kod standardnog FN modula. Slijedi da u ovom specifičnom slučaju polučelijska izvedba ne pokazuje prednosti u odnosu na standardnu izvedbu.

U **trećem scenariju**, sjena na gornjoj i donjoj polovici dvaju različitih podnizova uzrokuje veću snagu u slučaju kada prenosne diode nisu aktivirane. Na taj način, 4 od 6 podnizova nastavlja doprinosti ukupnoj struji, što rezultira redukcijom snage od oko 50%. Kod standardnog FN modula, takva bi sjena aktivirala dvije od tri prenosne diode, što bi dovelo do pada snage od približno 66%.

Četvrti scenarij predstavlja specifični slučaj sjene kod kojeg su zasjenjena dva podniza iste prenosne diode pa se polučelijska izvedba ponaša identično kao i standardna izvedba – aktivira se prva prenosna dioda i premošćuje se 1/3 FN modula pa dolazi i do redukcije snage od oko 33%.

Konačno, **peti scenarij** razmatra pojavu sjene preko cijele kraće stranice FN modula. Standardni FN modul u ovom slučaju imao bi redukciju snage od oko 100%, dok polučelijski nastavlja raditi s oko 50% snage. Ovo je u praksi ujedno i najrealniji scenarij zasjenjenja s obzirom da je prisutan kod velikih FN elektrana s većim brojem redova stolova, a slični učinci nastaju i uslijed nakupljanja snijega na donjim redovima FN modula montiranih na krovovima.

7. ZAKLJUČAK

7. CONCLUSION

Fokus ovog rada bio je na utjecaju segmentnog zasjenjenja na FN module u polučelijskoj izvedbi. Za potrebe analize razvijen je simulacijski

model koji je validiran usporedbom sa stvarnim mjerenjima na laboratorijskom postavu. Analizirano je pet različitih scenarija zasjenjenja, a rezultati su prikazani kroz I-V i P-V krivulje, čime je omogućeno detaljno praćenje promjena u električnim karakteristikama modula pod različitim uvjetima zasjenjenja.

FN modul u polučelijskoj izvedbi u gotovo svim scenarijima zasjenjenja pokazuje bolje rezultate u odnosu na standardne izvedbe modula, osim u nekim specifičnim slučajevima koji nisu česta pojava u praksi.

Svaki pojedini slučaj zasjenjenja analiziran simulacijskim modelom u programskom paketu MATLAB-Simulink generira gotovo identične rezultate kao laboratorijska mjerenja, što ukazuje da se ovaj model može koristiti za daljnje analize i istraživanja.

Za daljnju razradu istraživanja bilo bi potrebno dodatno sagledati utjecaj zasjenjenja prilikom segmentnog zasjenjivanja većeg broja FN modula spojenih u seriju odnosno niz, slično kao u [8], ali za polučelijsku izvedbu.

8. REFERENCE

8. REFERENCES

- [1.] Jens Schneider, et.al. Half-cell solar modules: The new standard in PV production? Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics CSP, Halle (Saale), German<
- [2.] Z. Meštrović, Zbirka zadataka iz predmeta Obnovljivi izvori energije u EE sustavima, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, srpanj 2024.
- [3.] Pale, Tonko; Meštrović, Zvonimir; Marković, Ivor Analiza utjecaja sjene na fotonaponski modul // Polytechnic and design, 10 (2022), 3; 205-210. doi: 10.19279/TVZ.PD.2022-10-3-08
- [4.] Sarniak, M.T. Modeling the Functioning of the Half-Cells Photovoltaic Module under Partial Shading in the Matlab Package. Appl. Sci. 2020, 10, 2575. doi: 10.3390/app10072575
- [5.] Betti, T.; Kristić, A.; Marasović, I.; Pekić, V. Accuracy of Simscape Solar Cell

- Block for Modeling a Partially Shaded Photovoltaic Module. *Energies* 2024, 17, 2276. doi: 10.3390/en17102276
- [6.] A. G. Galeano, et. al. Shading Ratio Impact on Photovoltaic Modules and Correlation with Shading Patterns; *Energies* 2018, 11(4), 852; doi:10.3390/en11040852
- [7.] Ebrar Özkalay, Flavio Valoti, Mauro Caccivio, Alessandro Virtuani, Gabi Friesen and Christophe Ballif; The effect of partial shading on the reliability of photovoltaic modules in the built-environment. *EPJ Photovolt.*, 15 (2024) 7 DOI: 10.1051/epjpv/2024001
- [8.] J. C. Teo et.al. Impact of Partial Shading on the P-V Characteristics and the Maximum Power of a Photovoltaic String; *Energies* 2018, 11, 1860; doi:10.3390/en11071860

AUTORI · *AUTHORS*



• **Stipe Vučković** - rođen je 18. ožujka 1997. godine u Sinju. Osnovnoškolsko obrazovanje stekao je u Osnovnoj školi Ivana Lovrića, a srednjoškolsko u Tehničkoj i industrijskoj školi Ruđera Boškovića Sinj, smjer

elektrotehničar. Akademsko obrazovanje nastavio je na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, smjer energetska elektrotehnika.

Korespondencija · *Correspondence*

stipe.vuckovic@gmail.com



• **Zvonimir Meštrović** - rođen je 21.8.1988. godine u Zagrebu. Preddiplomski i diplomski studij završio je 2012. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, smjer Elektroenergetika. Trenutno je

zaposlen u tvrtki Encro d.o.o. kao voditelj odjela sunčanih elektrana. Uz to, radi kao viši predavač vanjski suradnik na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu.

Korespondencija · *Correspondence*

zmestrovic@tvz.hr