

ELIMINACIJA EFEKTA DJELIMIČNOG OSUNČANJA U STRING-INVERTOR FOTONAPONSKIM SISTEMIMA

ELIMINATION OF THE PARTIAL SHADING EFFECT IN STRING-INVERTER PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Miodrag FORCAN,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, miodrag.forcan@live.com,
Željko ĐURIŠIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs,
Jovan MIKULOVIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, mikulovic@etf.rs

U prvom dijelu rada razmotren je uticaj djelimičnog osunčanja na snagu solarnog niza. Zatim je objašnjena uloga „bypass“ dioda kod eliminacije efekta djelimičnog osunčanja. Predložena je metoda eliminacije efekta djelimičnog osunčanja koja se zasniva na upotrebi DC-DC pretvarača. Za specifične fotonaponske sisteme pod nazivom „string-invertor“ sistemi, predstavljen je koncept upravljanja zasnovan na pojmu referentnog PV modula. Obrazložene su prednosti metode koja koristi DC-DC pretvarače u odnosu na metodu sa „bypass“ diodama u pogledu postizanja veće snage solarnog niza pri djelimičnom osunčanju. Izvršeno je detaljno modelovanje u programu MATLAB u svrhu verifikacije pomenutih analiza.

Ključne reči: PV modul; string-invertor sistem; DC-DC pretvarač; referentna struja.

In this paper the partial shading effect of solar string has been analyzed. Through analysis it was concluded that usage of DC-DC converters contributes to greater amount of output power production of solar string, under shading conditions. Special operating method for DC-DC converters in string-inverter photovoltaic systems, based on reference current, has been proposed. Model of string-inverter photovoltaic system with DC-DC converters, resistant to partial shading effect, has been developed in program MATLAB.

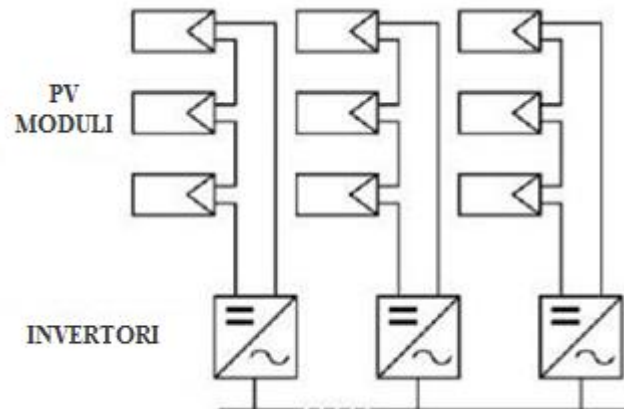
Key words: PV module; string-inverter system; integrated converter; reference current.

I. Uvod

U gradskim i prigradskim naseljima sa fotonaponskim (PV) sistemima postoji velika mogućnost pojave djelimičnog osunčanja solarnog niza. Najčešće zbog blizine susjednih građevina i ostalih objekata. Djelimično osunčanje izaziva efekat koji utiče na smanjenje snage solarnog niza u odnosu na svoj maksimalni trenutni potencijal. Trend upotrebe string-invertor PV sistema je u naglom porastu u novije vrijeme, pogotovo u gradskim i prigradskim oblastima. Osnovna odlika pomenutog PV sistema je mala snaga, zbog čega se ovi sistemi najviše koriste kod privatnih objekata (kuće, zgrade, itd.). Do sada je razvijeno nekoliko metoda eliminacije efekta djelimičnog osunčanja solarnog niza. Većina ovih metoda se oslanja na upotrebu pretvarača energetske elektronike [1,2]. Takođe, već u procesu proizvodnje, proizvođači u jednu cjelinu integrišu „bypass“ diodu i PV modul. U 2002. godini prvi put se pojavljuje ideja koja predlaže eliminaciju efekta djelimičnog osunčanja upotrebom integrisanih DC-DC pretvarača [3]. Na ovaj način svakom PV modulu je omogućeno da radi nezavisno od uslova koji su prisutni u ostatku solarnog niza. Osnovna teorijska analiza uzroka i posljedica efekta djelimičnog osunčanja je predstavljena u [4].

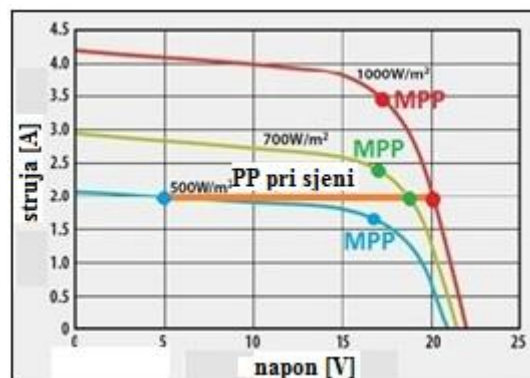
II. String-invertor PV sistem i efekti inercije solarne ćelije pri djelimičnom osunčanju

U slučaju manjih PV sistema, na primjer na krovovima privatnih kuća, kada uslovi osunčanja nisu isti na svim dijelovima krova, preporučuje se primjena string-invertor PV sistema. Sl. 1 prikazuje topologiju string-invertor PV sistema.



Sl. 1. Topologija string-invertor PV sistema

Postoje dva poznata efekta koja se dešavaju pri djelimičnom osunčanju solarnog niza. Ovim efektima se objašnjava pad trenutne snage solarnog niza. Sl. 2 prikazuje strujno-naponske karakteristike tri PV modula koja formiraju solarni niz pri djelimičnom osunčanju.



Sl. 2. Djelimično osunčanje solarnog niza sa tri PV modula

Zbog serijske veze kroz priključke svih PV modula uspostavlja se ista struja (narandžasta linija sa Sl. 2). PV modul, čija je karakteristika označena plavom bojom (najmanje osunčan) dolazi pod uticaj „inercije“ neosjenčenih solarnih ćelija. Kao posljedica toga njegova radna tačka se pomjera u režim većih struja i manjih napona, čime je njegova snaga značajno smanjena. PV moduli, čije su karakteristike označene zelenom i crvenom bojom, su pod uticajem „inercije“ osjenčenih solarnih ćelija, pa se njihove radne tačke nalaze u oblasti većih napona i manjih struja. Na ovaj način se redukuje i njihova snaga [5].

Grupa osjenčenih solarnih ćelija teži da zadrži postojeću vrijednost struje koja je srazmjerna uslovima osunčanja. Zbog serijske veze PV modula, neosjenčene solarne ćelije ostatka solarnog niza dolaze pod uticaj osjenčenih ćelija. Ćelije pod sjenom pokušavaju da dovedu ćelije ostatka solarnog niza u režim manje struje. Struja solarnog niza je u ovom slučaju ograničena strujom najslabije osunčanog PV modula u nizu [6].

Neosjenčene solarne ćelije će pokušati da dovedu osjenčene u režim rada većih struja. PV moduli koji nisu pod sjenom teže da uspostave struju u skladu sa uslovima osunčanja kojima su izloženi, te na taj način utiču na radne tačke PV modula pod sjenom [6].

III. Modelovanje PV sistema

Kao osnova za modelovanje PV modula odabran je jednodiodni model solarne ćelije, opisan jednačinom (1).

$$i = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{v+i \cdot R_S}{n_s \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{v+i \cdot R_S}{R_P}. \quad (1)$$

Parametri koji opisuju jednačinu (1) su:

I_{ph} - fotostruja solarne ćelije pri standardnim uslovima temperature i osunčanja,

I_0 - tamna struja zasićenja pri standardnim uslovima temperature i osunčanja,

R_S - ekvivalentni serijski otpor solarne ćelije,

R_P - ekvivalentni paralelni otpor solarne ćelije,

V_t - naponski ekvivalent temperature (temperaturni potencijal),

n_s - konstanta koja definiše broj serijski povezanih solarnih ćelija koje se modeluju.

Pod standardnim uslovima temperature i osunčanja se podrazumijeva slučaj kada nivo solarne iradijacije iznosi 1000 W/m² pri temperaturi od 25°C (sobna temperatura).

PV modul najčešće nastaje povezivanjem više solarnih ćelija u seriju. Pri modelovanju je potrebno uzeti odgovarajuću vrijednost za n_s (najčešće 36 ili 72). U nastavku rada biće korišćen model praktičnog PV modula BP MSX 120, koji se sastoji od 72 solarne ćelije. Kao konačni rezultat realizovan je model PV modula u programu MATLAB [7] osjetljiv na promjene iradijacije i temperature. Moguće je usvojiti dobro poznatu aproksimaciju da je fotostruja solarne ćelije linearno zavisna od solarne iradijacije (greška aproksimacije manja od 1%). Ova linearna zavisnost je data narednom relacijom:

$$I_{ph}(G) = I_{ph} \cdot \frac{G}{G_{nom}}, \quad (2)$$

gdje su:

G - trenutna vrijednost solarne iradijacije,

G_{nom} - vrijednost solarne iradijacije pri standardnim uslovima.

IV. Pojam referentnog solarnog niza i uloga „bypass“ dioda

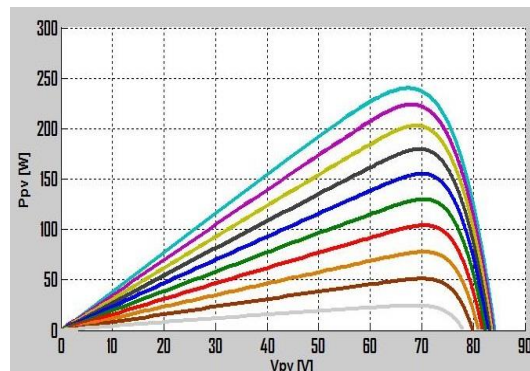
Osnovni problem pri djelimičnom osunčanju solarnog niza je smanjenje snage u odnosu potencijani maksimum. U programu MATLAB izvršeno je modelovanje solarnog niza za najjednostavniji slučaj, tj. kada se solarni niz sastoji od dva PV modula.

A. Modelovanje djelimičnog osunčanja solarnog niza bez „bypass“ dioda

Solarna iradijacija jednog PV modula je konstantna i podešena na standardnu vrijednost (1000 W/m²), dok je iradijacija drugog PV modula mijenjana u opsegu 100-1000 W/m² sa korakom 100 W/m². Kao rezultat simulacija prikazane su P-V karakteristike solarnog niza za sve slučajeve. Simulacije su rađene na način da se za svaku vrijednost iradijacije vrši promjena izlazne struje solarnog niza od vrijednosti koja odgovara praznom hodu do vrijednosti struje kratkog spoja. Sl. 3 prikazuje rezultate simulacije.

Svijetlo plava karakteristika odgovara slučaju ravnornog osunčanja, dok siva karakteristika odgovara slučaju najvećeg osjenčenja na jednom PV modulu. Primjetno je da,

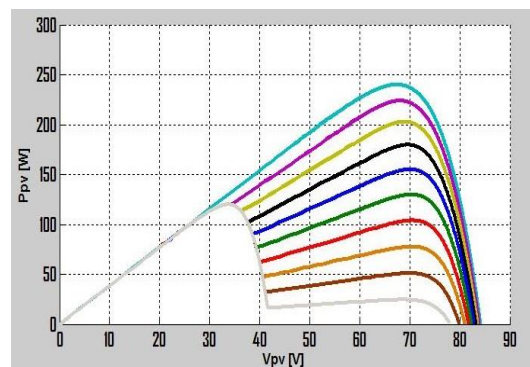
počevši od crvene karakteristike, snaga solarnog niza postaje manja od maksimalne snage jednog PV modula.



Sl. 3. P-V karakteristike solarnog niza od dva PV modula bez „bypass“ dioda

B. Modelovanje djelimičnog osunčanja solarnog niza sa „bypass“ diodama

Princip i uslovi modelovanja su potpuno identični kao u prethodnom slučaju. Jedina razlika je što su sa PV modulima antiparalelno povezane „bypass“ diode. Rezultati simulacija su prikazani na Sl. 4.



Sl. 4. P-V karakteristike solarnog niza od dva PV modula sa „bypass“ diodama

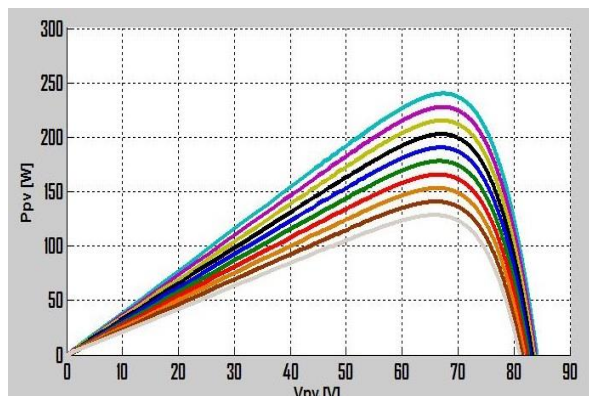
Na grafiku sa Sl. 4 je primjetno da pri djelimičnom osunčanju P-V karakteristika solarnog niza ima dva lokalna maksimuma. Drugi maksimum je posljedica prespajanja PV modula pod sjenom od strane „bypass“ diode. Ovaj slučaj nastupa kada je vrijednost iradijacije na površini PV modula dovoljno mala, te se na njegovom izlazu pojavljuje negativan napon. U opisanom trenutku P-V karakteristika solarnog niza postaje P-V karakteristika PV modula koji nije pod sjenom. Takođe, na grafiku sa Sl. 4 je primjetno da je, pri jakim sjenama (crvena karakteristika i niže), lijevi lokalni maksimum ujedno i globalni maksimum. U ovim slučajevima („heavy shading“) „bypass diode“ su korisne sa aspekta izvlačenja veće snage iz solarnog niza pri djelimičnom osunčanju.

C. Pojam referentnog solarnog niza

Polazeći od ranije usvojene pretpostavke, da je snaga solarnog niza približno linearno zavisna solarnih iradijacija pojedinih PV modula, može se zaključiti da efekat djelimičnog osunčanja narušava ovu linearnu zavisnost. Npr. ukoliko je riječ o slučaju da je jedan PV modul osunčan sa 1000 W/m^2 , a drugi sa 600 W/m^2 (jedan od slučajeva ranijeg modelovanja). Jedini način da se dobije maksimalna snaga je da efekat djelimičnog osunčanja bude eliminisan i da se dati solarni niz ponaša kao da se sastoji od dva PV modula osunčana sa 800 W/m^2 . Referentni solarni niz se definiše samo za solarni niz koji je pod efektom djelimičnog osunčanja, za slučaj kada nema efekta djelimičnog osunčanja dati solarni niz je sam sebi referentni. To je niz koji se sastoji od istog broja PV modula kao i djelimično osunčan niz, sa

tim što je svaki PV modul referentnog solarnog niza osunčan jednako, nivoom iradijacije koji odgovara aritmetičkoj sredini nivoa iradijacija pojedinačnih PV modula solarnog niza pod sjenom. PV moduli referentnog solarnog niza se nazivaju referentni PV moduli, dok se struja referentnog solarnog niza naziva referentna struja.

Za sve slučajeve iz prethodnog modelovanja, u programu MATLAB, formiran je odgovarajući referentni solarni niz i na narednoj slici su prikazane njegove P-V karakteristike.



Sl. 5. P-V karakteristike referentnog solarnog niza od dva PV modula

Sa grafika na Sl. 5 može se zapaziti da je čak i u slučaju 100 W/m^2 na jednom PV modulu moguće, formiranjem referentnog niza, postići maksimalnu snagu koja je veća od maksimalne snage jednog modelovanog PV modula (120 W).

U Tab. 1 su prikazane snage solarnih nizova za sva tri prethodno modelovana slučaja. Treća kolona odgovara solarnom nizu bez „bypass“ dioda. Četvrta kolona prikazuje snage solarnog niza sa „bypass“ diodama pri djelimičnom osunčanju. Numeričke vrijednosti za snage koje odgovaraju referentnom solarnom nizu su date u petoj koloni.

Tab.1: Snage solarnog niza pri djelimičnom osunčanju

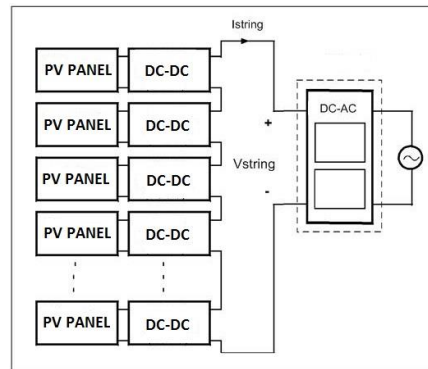
Redni broj simulacije	Iradijacija PV1/PV2	Snaga sol. niza	Snaga sol. niza sa b. diodama	Snaga referentnog sol. niza
1	100/1000 W/m^2	3.20 W	80.22 W	127.70 W
2	200/1000 W/m^2	12.02 W	80.22 W	141.00 W
3	300/1000 W/m^2	26.37 W	80.22 W	153.20 W
4	400/1000 W/m^2	46.26 W	80.22 W	165.80 W
5	500/1000 W/m^2	71.72 W	80.22 W	177.30 W
6	600/1000 W/m^2	102.70 W	102.70 W	190.70 W
7	700/1000 W/m^2	139.30 W	139.30 W	203.20 W
8	800/1000 W/m^2	181.40 W	181.40 W	215.00 W
9	900/1000 W/m^2	220.40 W	220.40 W	227.40 W
10	1000/1000 W/m^2	240.00 W	240.00 W	240.00 W

Numerički rezultati iz Tab. 1 predstavljaju radne tačke solarnog niza za deset različitih nivoa iradijacije, pri izlaznom opterećenju koje odgovara standardnim uslovima osunčanja i temperature. Iz treće kolone Tab. 1 vidljivo je značajno smanjenje snage solarnog niza sa padom iradijacije na modulu PV1. Upotreba „bypass“ dioda nema uticaja pri efektu djelimičnog osunčanja sve do trenutka kada nivo iradijacije modula PV1 opadne na 500 W/m^2 . Svako dalje smanjenje iradijacije modula PV1 ne utiče na izlaznu snagu solarnog niza, jer je modul PV1 prespojen „bypass“ diodom (četvrta kolona Tab. 1). U petoj koloni Tab. 1

prikazane su snage referentnog solarnog niza. U svih deset slučajeva je vidljivo značajno povećanje snage u odnosu na solarni niz bez i sa „bypass“ diodama.

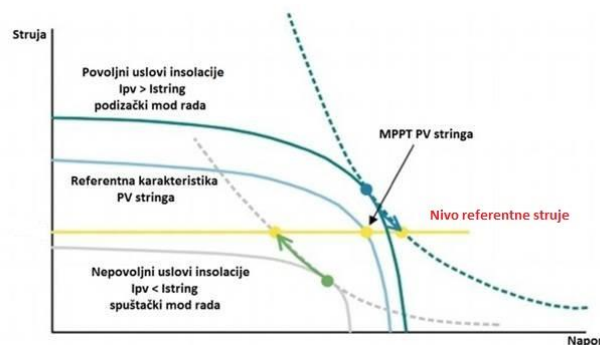
V. Upotreba DC-DC pretvarača za eliminaciju efekta djelimičnog osunčanja

Upotreba DC-DC pretvarača omogućava da svaki PV modul radi nezavisno od uslova koji vladaju u ostatku solarnog niza. Šematski prikaz string-invertor fotonaponskog sistema sa integrisanim DC-DC pretvaračima dat je na Sl. 6.



Sl. 6. String-invertor PV sistem sa DC-DC pretvaračima

Princip rada metode za eliminaciju efekta djelimičnog osunčanja je ilustrovan na Sl. 7.



Sl. 7. Princip eliminisanja djelimičnog osunčanja metodom upotrebe DC-DC pretvarača

Da bi se iz solarnog niza „izvukla“ maksimalna snaga (snaga referentnog niza) potrebno je mijenjati struju pojedinih PV modula. Metoda se zasniva na poređenju trenutne vrijednosti struje PV modula sa vrijednošću referentne struje. Vrijednost referentne struje se dobija prema narednoj relaciji:

$$I_{ref} = \frac{I_{PV1} + I_{PV2} + \dots + I_{PVn}}{n} \quad (3)$$

Postoje tri karakteristična slučaja:

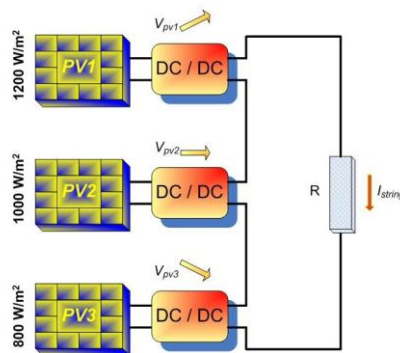
- $I_{PV} < I_{ref}$, DC-DC pretvarač treba da radi u modu spuštača napona, da bi se struja PV modula povećavala (zeleno strelica sa Sl. 7).
- $I_{PV} > I_{ref}$, DC-DC pretvarač treba da radi u modu podizača napona, da bi se struja PV modula smanjivala (plava strelica sa Sl. 7).
- $I_{PV} = I_{ref}$, DC-DC pretvarač nije potreban, neophodno ga je prespojiti.

Isprekidane linije na Sl. 7 predstavljaju krive konstantne snage (snaga odgovara MPP). Da bi se radna tačka PV modula kretala duž krivih maksimalne konstantne snage, upravljački sistem DC-DC pretvarača mora da sadrži algoritam za praćenje tačke maksimalne snage (MPPT algoritam).

Iz analize u prethodnom dijelu rada zaključeno je da se DC-DC pretvarač mora realizovati kao spuštač-podizač, zbog potrebe da se vrijednost struje PV modula podiže ili spušta u zavisnosti od uslova koji vladaju u ostatku solarnog niza. Takođe, pri projektovanju DC-DC pretvarača potrebno je smanjiti gubitke aktivne snage. Postizanje velike efikasnosti DC-DC pretvarača je od ključnog značaja u string-invertor sistemima, koji se odlikuju malim snagama. U programu MATLAB napravljen je model DC-DC pretvarača sa komponentama i upravljanjem iz [6]. Korišćen je poznati MPPT algoritam „Perturbe and Observe“ (PO).

VI. Eliminacija efekta djelimičnog osunčanja solarnog niza

Modelovan je niz od tri PV modula označena sa: PV1, PV2 i PV3. Njihove iradijacije su respektivno: 1200 W/m^2 , 1000 W/m^2 i 800 W/m^2 . Ilustracija simulacione šeme je prikazana na Sl.8, dok su numerički rezultati simulacije prikazani u Tab. 2.



Sl. 8. Simulaciona šema string-invertor PV sistema sa DC-DC pretvaračima

Tab.2: Numerički rezultati simulacije sa Sl. 8

Simulacija (PV1; PV2; PV3)	Niz bez DC-DC pretvarača	Niz sa DC-DC pretvaračima
Naponi PV modula	38.26; 36.45; 13.79 [V]	34.49; 33.93; 33.91 [V]
Izlazni naponi pretvarača	---	41.12; 33.93; 26.31 [V]
Faktori ispunje	---	0.2; ---; 0.8
Struje PV modula	---	4.184; 3.534; 2.802 [A]
Struja PV niza	3.086 [A]	3.534 [A]
Snage PV modula	118.1; 112.5; 42.5 [W]	143.8; 120.0; 94.3 [W]
Snaga PV niza	273.1 [W]	358.2 [W]

Iz Tab. 2 se jasno vidi da se, u datom slučaju djelimičnog osunčanja, snaga solarnog niza povećala za skoro 90 W upotrebom DC-DC pretvarača. Gubici u DC-DC pretvaračima se dobijaju oduzimanjem ukupne dobijene snage (358.2 W) od snage referentnog solarnog niza (360 W), te iznose 1.8 W. DC-DC pretvarač povezan sa modulom PV1 radi u podizačkom modu sa faktorom ispunje 0.2, dok DC-DC pretvarač povezan sa modulom PV3 radi u spuštačkom modu sa faktorom ispunje 0.2. DC-DC pretvarač povezan sa modulom PV2 radi u „panel“ modu (DC-DC pretvarač je prespojen).

Za praktični PV modul BP MSX 120, napon koji obezbjeđuje rad u tački maksimalne snage je 34 V. Iz treće kolone u Tab. 2 se vidi da je napon sva tri PV modula približno jednak 34 V. Numerički rezultati potvrđuju uveden pojam referentne struje. Struja solarnog niza sa DC-DC pretvaračima je jednaka referentnoj struji koja je ujedno i struja modula PV2.

Vrijednost referentne struje je 3.534 A, što upravo predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti struja pojedinačnih PV modula.

VII. Zaključak

U radu se predlaže primjena DC-DC pretvarača za eliminaciju efekta djelimičnog osunčanja solarnog niza. Za string-invertor fotonaponske sisteme realizovan je princip upravljanja zasnovan na postizanju vrijednosti referentne struje. Pokazane su prednosti primjene DC-DC pretvarača u odnosu na solarni niz sa „bypass“ diodama. Kroz detaljno modelovanje u programu MATLAB izvršena je verifikacija svih uvedenih principa rada. Dobijen je pouzdan model string-invertor fotonaponskog sistema sa DC-DC pretvaračima.

VIII. Literatura

- [1] **Patel, H., Agarwal, V.**, MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, no. 1, pp. 302-310, March 2008.
- [2] **Solar Magic by National Semiconductors, Texas Instruments**, Power optimizers partial deployment for single string systems, application note 2120, October 2010.
- [3] **Walker, G. R., Sernia P. C.**, Cascaded dc-dc converter connection of photovoltaic modules, IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 4, pp. 1130-1139, July 2004.
- [4] **Masters, M. G.**, Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons, 2004.
- [5] **Linares, L. L.**, Design and Implementation of Module Integrated Converters for Series Connected Photovoltaic Strings, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- [6] **Forcan, M., Tuševljak, J., Lubura, S., Šoja, M.**, Analyzing and Modeling the Power Optimizer for Boosting Efficiency of PV Panel, IX Symposium Industrial Electronics INDEL, Banja Luka, November, 2012.
- [7] **MATLAB** – The Language of Technical Computing, Version 7.10.0 (R2010a), The Math Works Inc., 2010.