

Realizacija i ocjena MPPT algoritama u fotonaponskom sistemu napajanja

Srđan Lale, Slobodan Lubura, Milimir Šoja

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
srdjan.lale@etf.unssa.rs.ba,
slobodan.lubura@etf.unssa.rs.ba,
milimir.soja@etf.unssa.rs.ba

Milan Radmanović

Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Niš, Republika Srbija
radmanovic@elfak.ni.ac.yu

Sadržaj—Zbog nelinearne strujno-naponske karakteristike i niskog koeficijenta efikasnosti solarnih panela, uvode se tzv. MPPT (engl. *Maximum Power Point Tracking*) algoritmi za “izvlačenje” maksimalne snage iz solarnih panela. U ovom radu razvijena su dva MPPT algoritma: standardni P&O (engl. *Perturb and Observe*) algoritam i metod zlatnog presjeka, koji predstavlja novi MPPT algoritam. Performanse oba algoritma su ispitane i međusobno upoređene kroz simulacije i eksperimente.

Ključne riječi—solarni paneli; MPPT algoritmi; P&O; metod zlatnog presjeka;

I. UVOD

Za proizvodnju električne energije danas se sve više koriste obnovljivi izvori energije, među kojima su najzastupljeniji solarni paneli.

Solarni paneli se sastoje od solarnih ćelija, koje pretvaraju energiju sunčevog zračenja (radijacije) u električnu energiju. Solarne ćelije mogu biti napravljene od različitih poluprovodničkih materijala (Si, GaAs, InP). Kada su izložene djelovanju sunčevog zračenja, solarne ćelije provode jednosmjernu električnu struju, čija jačina zavisi od raznih faktora, kao što su intenzitet sunčevog zračenja, spoljašnja temperatura, površina ćelije, itd. Napon na izlazu solarne ćelije takođe zavisi od pomenutih faktora.

Detaljna analiza rada solarnih ćelija, njihove tehnologije izrade, osobine i druge specifikacije, date su u [1].

Osnovni nedostatak solarnih ćelija je u tome što imaju nizak stepen korisnog dejstva, koji definiše koliki dio energije sunčevog zračenja koje „pada“ na površinu solarne ćelije se pretvori u električnu energiju. Na tržištu su najzastupljenije solarne ćelije sa koeficijentom korisnog dejstva od 14% do 19% [2].

Serijskim i paralelnim povezivanjem više solarnih ćelija nastaje solarni panel.

Tipične vrijednosti snage solarnih panela kreću se u opsegu od 100 W do 320 W [3]. Radi dobijanja većih snaga solarni paneli se međusobno vežu paralelno ili serijski.

Solarni paneli po svojoj prirodi predstavljaju strujne izvore. Napon i struja solarnog panela, odnosno njegova snaga, zavise

Ovaj rad je nastao u okviru projekta “Realizacija MPPT algoritama i optimalnog pretvarača energetske elektronike kao sastavnih dijelova solarnog sistema napajanja”, koji je finansiran od strane Ministarstva nauke i tehnologije u Vladi Republike Srpske.

od nekoliko faktora, od kojih su najznačajniji intenzitet sunčevog zračenja i temperatura okoline. Tipične krive zavisnosti struje i snage solarnog panela od njegovog napona, za različite vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja i temperature, date su redom na Sl. 1 i Sl. 2.

Na prikazanim karakteristikama očigledno je da pri datim radnim uslovima postoji uvijek samo jedna tačka u kojoj je snaga solarnog panela maksimalna.

Uzimajući u obzir nizak stepen korisnog dejstva solarnih panela i postojanje samo jedne tačke njihove maksimalne snage pri određenim radnim uslovima, veoma značajno je da se iz solarnih panela dobije i prati maksimalna snaga. Da bi iz njih „izvlačili“ maksimalnu snagu, opterećenje mora stalno biti prilagođeno njihovoj radnoj tački, odnosno radna prava opterećenja mora da presječe tačku maksimalne snage solarnih panela. Cijena koja se mora platiti je ubacivanje pretvarača energetske elektronike (DC/DC ili DC/AC) između solarnog panela i opterećenja, koji imaju funkciju pronalazjenja i praćenja tačke maksimuma snage solarnog panela, odnosno podešavanja opterećenja uslovima rada solarnog panela.

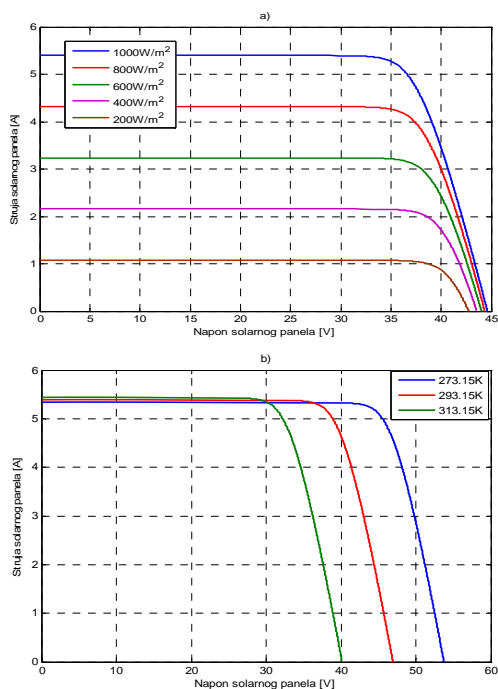
Postupak praćenja tačke maksimalne snage solarnih panela se popularno naziva MPPT postupak. MPPT algoritmi istovremeno određuju i radnu tačku pretvarača energetske elektronike.

Do danas je razvijeno i implementirano mnogo različitih MPPT algoritama, kao što su: P&O, metod inkrementalne provodnosti, metode praznog hoda i kratkog spoja solarnog panela, metod sa fazi-logikom, metod na bazi neuronskih mreža, itd. U [4] je napravljeno detaljno njihovo međusobno poređenje.

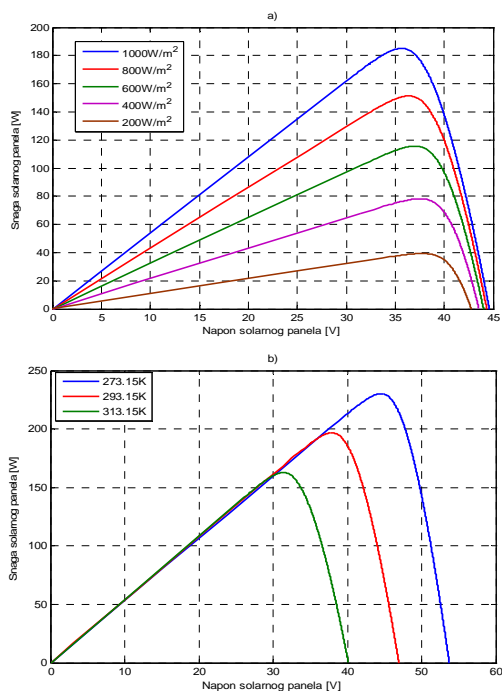
Jedan od prvih MPPT algoritama koji se pojavio u literaturi i primjeni je P&O algoritam. U ovom radu je opisano njegovo funkcionisanje. Osim P&O algoritma, u ovom radu predložen je novi MPPT algoritam, koji se zasniva na primjeni metoda zlatnog presjeka za traženje maksimuma/minimuma unimodalnih funkcija.

Rad je organizovan na sljedeći način. U dijelu II opisan je tip pretvarača energetske elektronike koji je korišćen za testiranje razvijenih MPPT algoritama. U dijelu III opisani su razvijeni MPPT algoritmi. Rezultati simulacija rada oba

algoritma dati su u dijelu IV. U dijelu V opisana je eksperimentalna platforma koja je razvijena za validaciju algoritama i dati su odgovarajući eksperimentalni rezultati njihovog rada. Zaključak rada dat je u dijelu VI.



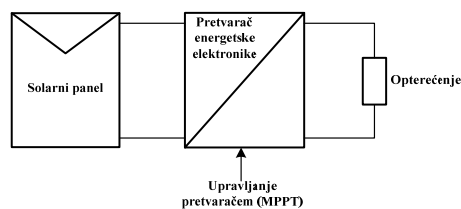
Slika 1. Zavisnost struje solarnog panela od njegovog napona za: a) različite vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja pri sobnoj temperaturi (25 °C); b) različite vrijednosti temperature okoline pri intenzitetu sunčevog zračenja od 1000 W/m²



Slika 2. Zavisnost snage solarnog panela od njegovog napona za: a) različite vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja pri sobnoj temperaturi (25 °C); b) različite vrijednosti temperature okoline pri intenzitetu sunčevog zračenja od 1000 W/m²

II. PRETVARAČI ENERGETSKE ELEKTRONIKE SA MPPT FUNKCIJOM

Solarni sistem napajanja se u opštem slučaju sastoji iz tri osnovna dijela: solarni panel, pretvarač energetske elektronike i opterećenje (potrošač). Na Sl. 3 data je blok-šema solarnog sistema napajanja, koji ima ugrađenu MPPT funkciju.



Slika 3. Blok-šema solarnog sistema napajanja sa MPPT funkcijom

MPPT postupak je nemoguće obaviti bez postojanja pretvarača energetske elektronike između solarnog panela i opterećenja. Moguće je koristiti samo DC/DC ili samo DC/AC pretvarače, ili oba tipa zajedno.

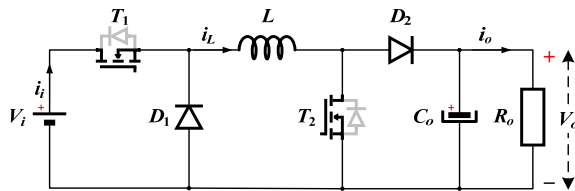
Zavisno od primjene, cijene i drugih faktora, postoji mnogo različitih topologija i jednosmjernih i naizmjeničnih solarnih sistema napajanja. Takođe, postoji ogroman broj naučnih radova u kojima se predlažu različite topologije [5]-[9]. U novije vrijeme sve više se koristi spuštač-podizač (engl. *buck-boost converter*) napona. U zavisnosti od vrijednosti faktora ispunje upravljačkih impulsa ovaj pretvarač može raditi ili kao spuštač ili podizač napona.

U ovom radu predlaže se upotreba spuštača-podizača napona, čija je električna šema prikazana na Sl. 4. Ovaj pretvarač, sa dva tranzistora, ne mijenja znak ulaznog napona, što predstavlja njegovu prednost u odnosu na spuštač-podizač sa jednim tranzistorom, koji invertuje znak ulaznog napona.

Ovaj pretvarač u principu predstavlja kaskadnu vezu spuštača i podizača napona, pa se izlazni napon V_o može izraziti preko ulaznog napona V_i na sljedeći način:

$$V_o = \frac{D}{1-D} V_i, \quad (1)$$

gdje je D faktor ispunje upravljačkog PWM (engl. *Pulse Width Modulation*) signala koji istovremeno upravlja tranzistorima T_1 i T_2 .



Slika 4. Električna šema spuštača-podizača napona

III. MPPT ALGORITMI

MPPT algoritmi se mogu ocjenjivati po raznim kriterijumima, kao što su složenost, broj potrebnih senzora, brzina konvergencije (dostizanja tačke maksimuma snage

solarnog panela), prilagodljivost na brze promjene atmosferskih uslova, cijena, efikasnost, mogućnost primjene u određenim aplikacijama, hardver za implementaciju, popularnost, itd.

U ovom radu razvijena su dva MPPT algoritma: P&O algoritam i algoritam zlatnog presjeka.

A. P&O MPPT algoritam

P&O algoritam se zasniva na stalnoj perturbaciji položaja radne tačke solarnog panela, s ciljem njenog približavanja tački maksimuma snage.

Izlaz iz P&O algoritma je faktor ispunje, koji se zatim vodi na generator PWM signala, koji upravlja spuštačem-podizačem. Radna prava, koja u presjeku sa strujno-naponskom karakteristikom solarnog panela određuje radnu tačku, zavisi od dobijenog faktora ispunje D na sljedeći način:

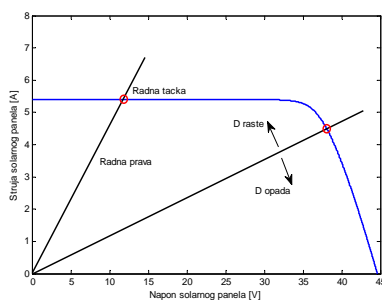
$$I_{pv} = \frac{1}{R_o} \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 V_{pv} \quad (2)$$

Veličine I_{pv} i V_{pv} predstavljaju redom struju i napon solarnog panela, a R_o predstavlja otpornost opterećenja.

Automatskim podešavanjem faktora ispunje, radna prava, odnosno tačka „klizi“ po karakteristici solarnog panela. Pošto postoji samo jedna tačka maksimuma snage, na ovaj način se ona može dostići, tj. pratiti.

Na Sl. 5 pokazan je uticaj faktora ispunje D na položaj radne tačke solarnog panela.

Da bi se radna tačka pomijerala ka tački maksimuma snage solarnog panela, mora se obezbjediti stalno ažuriranje vrijednosti faktora ispunje. Mjerenjem struje i napona solarnog panela određuje se vrijednost njegove trenutne snage, u trenutku $k\Delta T$, gdje je ΔT period ažuriranja faktora ispunje. Trenutna snaga se poredi sa snagom izračunatom u prethodnom trenutku $(k-1)\Delta T$. U zavisnosti od znaka promjene snage i napona solarnog panela, faktor ispunje se povećava ili smanjuje za unaprijed definisanu vrijednost ΔD . Opisani postupak se neprekidno ponavlja i u nekom trenutku će radna tačka doći veoma blizu maksimuma snage. Priroda P&O algoritma je takva da radna tačka stalno osciluje oko dostignutog maksimuma snage solarnog panela.



Slika 5. Zavisnost položaja radne tačke solarnog panela od faktora ispunje

Zbog svoje jednostavnosti P&O algoritam je lako implementirati na različitim tipovima harvera, kao što su

mikrokontroleri, DSP procesori (engl. *Digital Signal Processors*), i sl., što predstavlja njegovu veliku prednost. Međutim, osnovni nedostatak P&O algoritma je što je spor. U zavisnosti od početne vrijednosti faktora ispunje, veličine promjene ΔD i trajanja vremena odabiranja struje, napona i snage solarnog panela (vrijeme tokom kojeg je faktor ispunje konstantan), proces dostizanja tačke maksimuma snage može relativno dugo trajati. Zatim, postojanje neprekidnih oscilacija radne tačke solarnog panela može pokvariti talasne oblike struje i napona solarnog panela.

P&O algoritam je prilagodljiv na brze i nagle promjene atmosferskih uslova, od kojih su najizraženije promjene intenziteta sunčevog zračenja. Međutim, može se desiti da se nova tačka maksimuma snage dostigne veoma sporo, zbog prirode algoritma, koji uvijek korak po korak dovodi radnu tačku na željeno mjesto.

Zbog navedenih nedostataka P&O algoritma, predlažu se novi MPPT algoritmi, njemu sličnih ili boljih karakteristika. Jedan od novih MPPT algoritama u kome se koristi numerički metod traženja ekstrema funkcije je metod zlatnog presjeka, skraćeno GSS (engl. *Golden Section Search*) [10]. Metod zlatnog presjeka je poznati numerički metod koji se često koristi u algoritmima za optimizaciju određenih veličina, ali se ovdje smatra novim u smislu primjene u MPPT postupku.

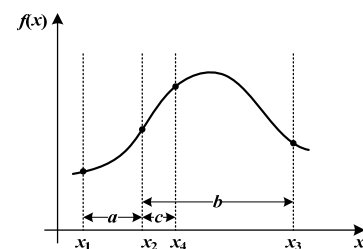
B. GSS MPPT algoritam

Za funkciju kažemo da je unimodalna ukoliko na posmatranom intervalu argumenata sadrži samo jedan ekstrem (minimum ili maksimum).

Algoritam zlatnog presjeka je tehnika za pronalaženje ekstrema unimodalne funkcije naizmjeničnim sužavanjem intervala u kome se po pretpostavci ekstrem nalazi [11]. Algoritam je dobio naziv po tome što računa vrijednosti funkcije u tri tačke, čija rastojanja formiraju tzv. zlatni presjek.

Rad GSS algoritma za traženje maksimuma unimodalne funkcije $f(x)$ može se objasniti na osnovu Sl. 6.

Prvo se zadaje početni interval $[x_1, x_3]$ u kome se nalazi samo jedna tačka maksimuma funkcije $f(x)$. Nakon toga, definišu se tačke x_2 i x_4 , koje leže u intervalu $[x_1, x_3]$. Način definisanja tačaka x_2 i x_4 je određen pravilima GSS algoritma.



Slika 6. Traženje maksimuma unimodalne funkcije $f(x)$ pomoću GSS algoritma

Početne tri tačke od kojih algoritam polazi su x_1, x_2 i x_3 . Sljedeći korak je računanje vrijednosti funkcije $f(x)$ u tačkama x_2 i x_4 . Nakon toga, porede se izračunate vrijednosti funkcije $f(x_4)$ i $f(x_2)$. Ako je $f(x_4) > f(x_2)$, kao na Sl. 6, onda se maksimum nalazi sigurno u intervalu $[x_2, x_3]$ i nove tri tačke su x_2, x_4 i x_3 .

Ako je $f(x_4) < f(x_2)$, onda se maksimum nalazi sigurno u intervalu $[x_1, x_4]$ i nove tri tačke su x_1, x_2 i x_4 . Ponavljajući opisani proces više puta dobije se svaki put uži interval u kome se nalazi maksimum funkcije $f(x)$. Kada širina intervala postane manja od neke zadate male vrijednosti, algoritam prestaje sa radom.

Sa Sl. 6 može se uočiti da je širina intervala između tačaka x_1 i x_4 jednaka $a+c$, a širina intervala između tačaka x_2 i x_3 jednaka b . Po GSS algoritmu ova dva intervala moraju biti jednakih širina. Dakle, $b=a+c$. Da bi se ovo obezbjedilo, tačka x_4 mora biti jednaka:

$$x_4 = x_1 + x_3 - x_2. \quad (3)$$

Međutim, ostaje pitanje gdje treba postaviti tačku x_2 u intervalu $[x_1, x_3]$. GSS algoritam nalaže da odnos rastojanja između tačaka x_1, x_2 i x_3 bude isti kao odnos rastojanja između narednih tačaka x_2, x_4 i x_3 ili x_1, x_2 i x_4 . To znači da se održavajući odnose između navedenih tačaka uvijek konstantnim, izbjegava pojava da tačka x_2 bude veoma blizu tačaka x_1 i x_3 , i osigurava da se širina novog intervala u svakoj iteraciji smanjuje podjednako, tj. istim brojem puta. U skladu sa navedenim pravilom, postavlja se sljedeći uslov:

$$\frac{b-c}{c} = \frac{b}{a} = \frac{a}{c}. \quad (4)$$

Rješavajući (4), dobije se da je odnos $b/a = \varphi$ jednak:

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1.618, \quad (5)$$

što predstavlja tzv. zlatni odnos.

Koristeći odnos $b/a = \varphi$ lako se dobije da je tačka x_2 u početnom koraku (prvoj iteraciji) jednaka:

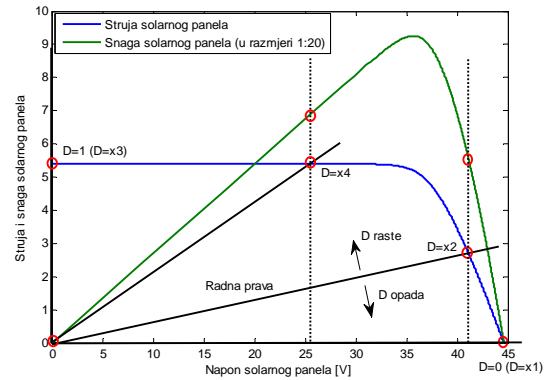
$$x_2 = \frac{x_1 \varphi + x_3}{1 + \varphi}. \quad (6)$$

Opisani GSS algoritam se može upotrebiti za pronalaženje tačke maksimuma snage solarnog panela. U odnosu na Sl. 6 i opisanu proceduru GSS algoritma, funkcija $f(x)$ predstavlja snagu solarnog panela P_{pv} , a njen argument x faktor ispuine D . Kao argument snage solarnog panela se uzima faktor ispuine iz razloga što radna tačka, kako je pokazano u (2), zavisi od faktora ispuine. Samo za jednu vrijednost faktora ispuine iz intervala $[0, 1]$ postoji samo jedna tačka maksimuma snage solarnog panela, tako da je funkcija $P_{pv}(D)$ na ovom intervalu unimodalna, pa se GSS algoritam može primijeniti. Primjena GSS algoritma u MPPT postupku za solarne panele ilustrovana je na Sl. 7.

Početni interval faktora ispuine D je interval $[0, 1]$, koji predstavlja početni interval $[x_1, x_3]$. Nakon toga, računaju se vrijednosti faktora ispuine $D=x_2$ i $D=x_4$ pomoću (6) i (3), respektivno, i mjere se i pamte njima odgovarajuće snage solarnog panela. Nakon svake iteracije sužava se interval

faktora ispuine u kome se nalazi maksimum snage solarnog panela. Algoritam kao rezultat daje vrijednost faktora ispuine $D=x_4$ nakon konačnog broja iteracija.

Ukoliko se dese brze promjene intenziteta sunčevog zračenja, potrebna vrijednost faktora ispuine D , pri kome je snaga solarnog panela maksimalna, se više ne nalazi u intervalu $[x_1, x_3]$ koji je prethodno izračunat. To znači da je potrebno proširiti dati interval i sa lijeve i desne strane, za određeni iznos. Nakon toga, GSS algoritam treba ponovo da počne sa radom, čime se računa nova vrijednost faktora ispuine.



Slika 7. Primjena GSS algoritma u MPPT postupku za solarne panele

Postoje dvije mogućnosti rješavanja problema skokovitih promjena intenziteta sunčevog zračenja. Prvi način podrazumijeva da se u trenutku skokovitih promjena intenziteta sunčevog zračenja, što se odražava na promjenu snage solarnog panela, vrši ponovna inicijalizacija tačaka x_1, x_2, x_3 i x_4 , dok se kod drugog načina proširuje interval $[x_1, x_3]$ za definisani iznos $2a$, a tačke x_2 i x_4 računaju u skladu sa (6) i (3). Nakon izvršene inicijalizacije ili proširenja intervala $[x_1, x_3]$, GSS algoritam nastavlja sa normalnim radom.

Kao i P&O algoritam, GSS MPPT algoritam je lako implementirati na različitim tipovima harvera.

Za razliku od P&O algoritma, GSS algoritam omogućava znatno brže dostizanje tačke maksimuma snage solarnog panela, jer je obično potrebno svega desetak iteracija da GSS algoritam uspješno obavi svoj posao. Nakon pronađenog maksimuma snage, faktor ispuine se više ne mijenja, sve dok se ne dese promjene atmosferskih uslova. To znači da se prilikom primjene GSS algoritma ne javljaju oscilacije radne tačke solarnog panela, što nije slučaj kod primjene P&O algoritma.

Problem koji se može javiti prilikom rada GSS algoritma je da tokom skokovitih promjena atmosferskih uslova, u prelaznom režimu, dođe do izvjesnih "propada", odnosno naglih promjena struje, napona i snage solarnog panela, zbog same prirode algoritma. Ovaj problem je znatno manje izražen kada se koristi P&O algoritam, ali tada prelazni režim, odnosno ponovno traženje novog maksimuma snage solarnog panela, može da znatno duže traje.

Opisani GSS MPPT algoritam ima određene prednosti i novine u odnosu na MPPT algoritam, takođe zasnovan na metodi zlatnog presjeka, koji je predložen u [10]. GSS MPPT algoritam predložen u ovom radu se primjenjuje za upravljanje

spuštačem-podizačem napona, za razliku od [10], gdje se koristi podizač napona. GSS algoritam u [10] kao rezultat daje referentnu vrijednost struje solarnog panela, koja je jednaka struji zavojnice podizača napona. To znači da je potrebna dodatna upravljačka petlja kojom se reguliše struja zavojnice. To usporava MPPT postupak. U [10] nisu izvedena eksperimentalna ispitivanja rada algoritma, već samo simulacije. Osim toga, nije razmatrano ponašanje algoritma usljed promjenljivih radnih uslova.

IV. SIMULACIONI REZULTATI

Predloženi solarni sistem napajanja, koji se sastoji od solarnog panela, spuštača-podizača, kojim upravljaju predloženi MPPT algoritmi, i otporničkog opterećenja, simuliran je u programu Matlab/Simulink.

Korišćen je model solarnog panela [12], koji se zasniva na specifikacijama koje daje proizvođač solarnih panela.

Prvo je izvršena simulacija rada P&O algoritma, a zatim i GSS algoritma. U oba slučaja uvedene su skokovite promjene intenziteta sunčevog zračenja pri nominalnoj temperaturi ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Nakon trajanja simulacije od 1 s, intenzitet sunčevog zračenja opadne sa 1000 W/m^2 na 400 W/m^2 , a nakon 2 s poraste sa 400 W/m^2 na 700 W/m^2 .

Početne vrijednosti faktora ispunje su iste za oba algoritma i iznose $D=0.618$ (početna vrijednost tačke x_4 iz GSS algoritma).

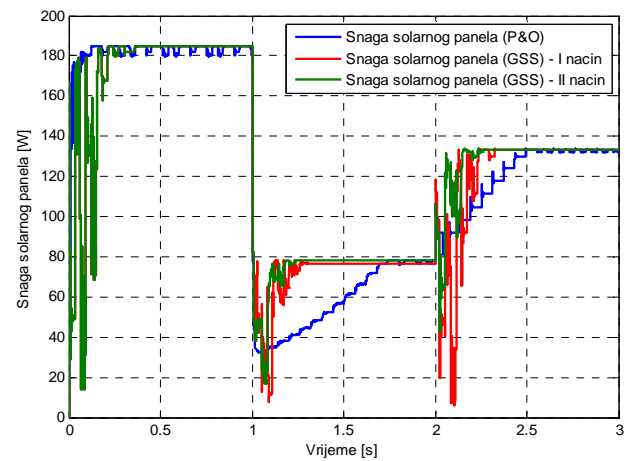
U Tabeli I dato je poređenje tačnih (stvarnih) i simuliranih vrijednosti maksimalne snage modela solarnog panela P_{pvm} , za tri vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja G_{ins} : 1000 W/m^2 , 700 W/m^2 i 400 W/m^2 .

TABELA I. REZULTATI SIMULACIJA RADA P&O I GSS ALGORITAMA

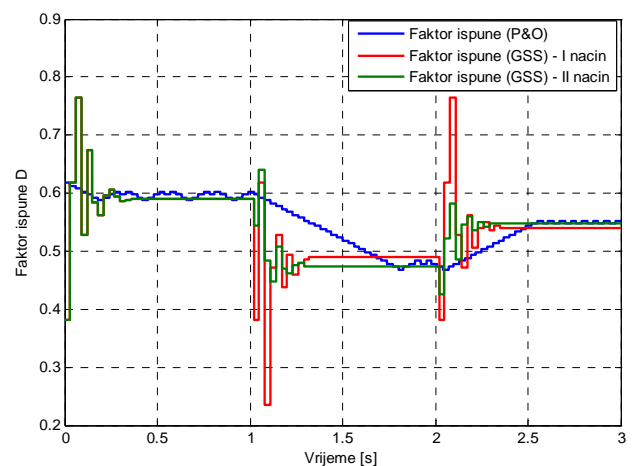
G_{ins} [W/m^2]	1000	700	400
P_{pvm} [W] (tačno)	185.1	133.6	78.2
P_{pvm} [W] (P&O)	185.1	133.3	78.2
P_{pvm} [W] (GSS)	185.1	133.3	78.2
D (P&O)	0.59	0.55	0.48
D (GSS)	0.59	0.54	0.47

Na Sl. 8 i Sl. 9 prikazani su talasni oblici snage modela solarnog panela i faktora ispunje, respektivno, dobijenih simulacijama rada P&O i GSS algoritama. Prikazana su dva načina rada GSS algoritma, kako je opisano u prethodnom poglavlju.

Iz prikazanih rezultata simulacija jasno je da oba MPPT algoritma uspješno obavljaju svoj posao. Međutim, očigledne su prednosti GSS algoritma nad P&O algoritmom. Prije svega, u stacionarnom stanju, kada je dostignuta tačka maksimuma snage modela solarnog panela, u slučaju primjene GSS algoritma se ne javljaju oscilacije talasnih oblika prikazanih signala, za razliku od slučaja kada se koristi P&O algoritam. Zatim, dostizanje maksimuma snage prilikom skokovitih promjena intenziteta sunčevog zračenja je znatno brže kod GSS algoritma nego kod P&O algoritma.



Slika 8. Poređenje snaga modela solarnog panela za P&O i GSS algoritam pri skokovitim promjenama intenziteta sunčevog zračenja ($1000\rightarrow 400\rightarrow 700\text{ W/m}^2$)



Slika 9. Poređenje faktora ispunje za P&O i GSS algoritam pri skokovitim promjenama intenziteta sunčevog zračenja ($1000\rightarrow 400\rightarrow 700\text{ W/m}^2$)

Jedini nedostatak GSS algoritma je u tome što se u trenutku skokovitih promjena intenziteta sunčevog zračenja, u prelaznom režimu, javljaju značajni "propadi" napona, struje i snage modela solarnog panela. Ovi "propadi" su manji u slučaju kada se pronađeni interval $[x_1, x_3]$, u kome se nalazi maksimum snage, proširi za određeni iznos, a ne inicijalizuje do početne vrijednosti $[0, 1]$.

V. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Da bi se istovremeno analizirao rad oba algoritma i izvršila njihova međusobna poređenja, razvijena je eksperimentalna platforma, koja je podijeljena na dva jednaka dijela. Svaki dio predstavlja zasebni solarni sistem napajanja i sastoji se od sljedećih komponenti:

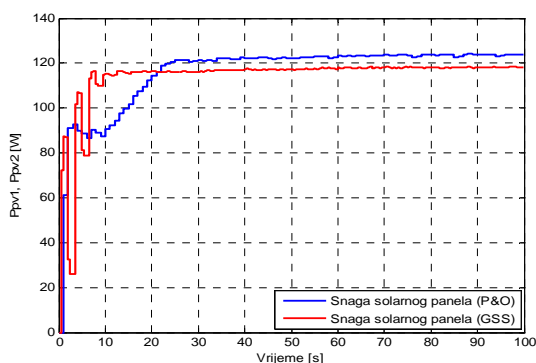
- Izvor, koji predstavlja dva solarna panela PROSTAR $75\text{ W}/24\text{ V}$ spojena u seriju,
- Spuštač-podizač napona sa otporničkim opterećenjem,

- Elektronski moduli za prilagođenje signala između solarnog panela, spuštača-podizača i upravljačke hardverske platforme (PC računara).

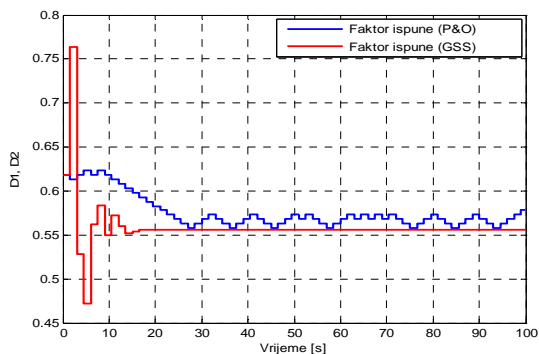
Ekperimentalna ispitivanja na razvijenoj platformi vršena su na Elektrotehničkom fakultetu u Istočnom Sarajevu, u Laboratoriji za Obnovljive izvore energije.

Realizacija MPPT algoritama i upravljanje spuštačem-podizačem ostvareni su u programu Matlab/Simulink, upotrebom multifunkcionalne ulazno/izlazne MF624 kartice, kompanije HUMUSOFT. Rad u realnom vremenu omogućava *Real Time Windows Target* biblioteka Simulink-a.

Na Sl. 10 i Sl. 11 prikazani su redom talasni oblici snage solarnih panela i faktora ispunje, dobijenih eksperimentalnim ispitivanjima rada P&O i GSS algoritama. Rezultati su snimljeni 08.11.2012. u 11:45h. Sa Sl. 10 se uočava mala razlika u snagama solarnih panela za P&O i GSS algoritam, ali to nije posljedica rada različitih algoritama, već male razlike u solarnim panelima, odnosno njihovom položaju prema suncu.



Slika 10. Poređenje snaga solarnih panela za P&O i GSS algoritam ($G_{ins}=414 \text{ W/m}^2$, $T=4.1 \text{ }^\circ\text{C}$)



Slika 11. Poređenje faktora ispunje za P&O i GSS algoritam ($G_{ins}=414 \text{ W/m}^2$, $T=4.1 \text{ }^\circ\text{C}$)

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu je teorijski i praktično pokazan princip rada P&O i GSS MPPT algoritama. Upotrebljena je fleksibilna upravljačka hardverska platforma na kojoj se vrlo brzo i jednostavno mogu implementirati različiti MPPT algoritmi. Upotrebom Matlab/Simulink-a za upravljanje sistemima u realnom vremenu se znatno olakšava razvoj i testiranje

upravljačkih algoritama, koji potom mogu biti implementirani na raznim tipovima hardvera koji su danas aktuelni na tržištu.

Solarni sistem napajanja koji je predložen u ovom radu je polazna tačka u realizaciji složenijih sistema napajanja koji se danas upotrebljavaju. S tim u vezi, postoji mnogo značajnih polja koja su otvorena za budući rad, kao što su: implementacija razvijenih MPPT algoritama na različitim tipovima hardvera, realizacija punjača baterija, realizacija tzv. mikroinvertora, itd.

LITERATURA

- [1] Tom Markvart, Luis Castaner, „Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications“, Elsevier Ltd., 2003.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency (pristupljeno 16.12.2012.)
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_panel (pristupljeno 16.12.2012.)
- [4] Trishan Eram, Patrick L. Chapman, „Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques“, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007.
- [5] P. C. M. Bernardo, Z. M. A. Peixoto, L.V. B. Machado Neto, „A High Efficient Micro-controlled Buck Converter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems“, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'09), Valencia (Spain), 15th to 17th April, 2009.
- [6] Chen-Chi Chu, Chieh-Li Chen, „Robust Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Cells: A sliding mode control approach“, Solar Energy, 2009.
- [7] Leonor L. Linares, „Design and Implementation of Module Integrated Converters for Series Connected Photovoltaic Strings“, Master thesis, 2009.
- [8] Yang Chen, Keyue Ma Smedley, „A Cost-Effective Single-Stage Inverter With Maximum Power Point Tracking“, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 19, NO. 5, SEPTEMBER 2004.
- [9] „Grid-Connected Solar Microinverter Reference Design Using a dsPIC® Digital Signal Controller“, Microchip Technology Inc., 2011.
- [10] Riming Shao, Liuchen Chang, „A New Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Arrays Using Golden Section Search Algorithm“, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2008.
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Golden_section_search (pristupljeno 16.12.2012.)
- [12] Marko Lalović, „Model PV panela baziran na specifikacijama koje daje proizvođač“, INFOTEH-JAHORINA Vol. 9, Ref. F-19, p. 1078-1082, Mart 2010.

ABSTRACT

Because of nonlinear current-voltage characteristic and low power efficiency of photovoltaic modules, it is necessary to use MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithms for extraction of their maximum power. In this paper, two MPPT algorithms are developed: standard P&O (Perturb and Observe) algorithm and novel golden section search algorithm. The performances of both algorithms are verified through simulations and experiments.

REALIZATION AND EVALUATION OF MPPT ALGORITHMS FOR PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEM

Srđan Lale, Slobodan Lubura, Milomir Šoja, Milan Radmanović