

Pregledni prikaz algoritama za praćenje točke maksimalne snage u fotonaponskim sustavima

Overview of the Algorithms for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems

D. Vulin^{1,*}, M. Štefok², D. Pelin³

^{1,2,3} Elektrotehnički fakultet Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

*Autor za korespondenciju. E-mail: dvulin@etfos.hr

Sažetak

Strujno-naponska karakteristika fotonaponskog (FN) sustava ovisi o promjenama temperature panela, sunčevog zračenja i opterećenja. Algoritam za praćenje točke maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point Tracking* – MPPT) implementiran je u energetskom pretvaraču kako bi osigurao maksimalnu izlaznu snagu iz sustava unatoč navedenim promjenama ulaznih veličina. Cilj ovog rada je dati sažet i sveobuhvatan prikaz MPPT algoritama u fotonaponskim sustavima. Nakon toga su oni najčešće korišteni algoritmi, Pomak i promatranje (eng. *Perturb and Observe* - P&O), Inkrementalni algoritam (eng. *Incremental Conductance* - InCond), i Upravljanje neizravnom logikom (eng. *Fuzzy Logic Control* - FLC), detaljno analizirani i uspoređeni.

Abstract

The current-voltage characteristic of a photovoltaic (PV) system depends on fluctuations of the panel temperature, solar irradiation, and load. The Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm is implemented in a power converter to obtain maximum output power from a PV system despite those fluctuations. The objective of this paper is to give brief and comprehensive overview of MPPT algorithms in photovoltaic systems. Then the most commonly used algorithms, Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (InCond) and Fuzzy Logic Control (FLC) are analyzed in detail and compared.

Ključne riječi: fotonaponski sustavi, praćenje točke maksimalne snage, MPPT algoritmi, elektronički energetski pretvarači

1. Uvod

Unatoč znatnijim ulaganjima u istraživanje i razvoj fotonaponske tehnologije u posljednjih desetak godina, danas je cijena fotonaponskih ćelija, odnosno fotonaponskih sustava i

dalje visoka, te su oni komercijalno konkurentni drugim uobičajenim izvorima električne energije samo u određenim područjima primjene, recimo tamo gdje ne postoji mogućnost priključenja određenih trošila na elektroenergetsku mrežu ili tamo gdje je priključenje na elektroenergetsku mrežu ekonomski neisplativo.

Međutim, vodeći svjetski stručnjaci u području energetike procijenili su da će upravo fotonaponska tehnologija u 21. stoljeću dominirati u zadovoljavanju potreba za električnom energijom zbog opadanja raspoloživih zaliha konvencionalnih goriva [1]. Također, svakim danom cijena fotonaponske opreme pada, pri čemu efikasnost fotonaponskih ćelija raste, što može u bliskoj budućnosti dovesti do toga da fotonaponski sustavi postanu komercijalno konkurentni konvencionalnim izvorima električne energije.

Efikasnost fotonaponskog sustava određena je trima faktorima: efikasnost fotonaponskih ćelija (efikasnost ćelija u komercijalnoj primjeni iznosi od 8% do 15%), efikasnost energetskog pretvarača (kreće se između 95% i 98%), te efikasnost MPPT algoritma (više od 98%). Povećanje efikasnosti ćelija i pretvarača nije jednostavno postići jer ovisi o dostupnim tehnologijama, pri čemu zahtijeva bolje, a samim time i skuplje komponente, te može značajno utjecati na ukupnu cijenu fotonaponskog sustava. Suprotno tome, povećanje efikasnosti MPPT algoritma, poboljšanjem postojećega ili implementiranjem novoga, znatno je jeftinije i može biti provedeno čak i na fotonaponskom sustavu koji je već u pogonu.

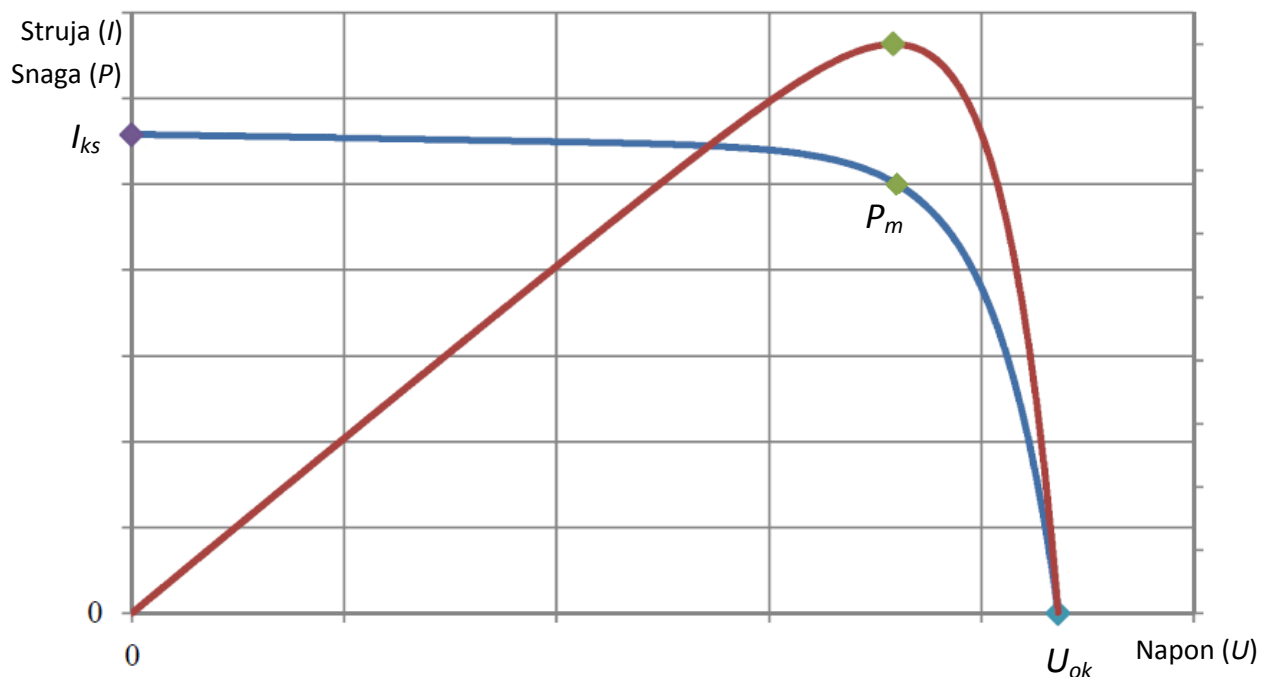
2. Strujno-naponska karakteristika fotonaponskog sustava

Osnovni zadatak MPPT algoritama je traženje točke maksimalne snage na strujno-naponskoj karakteristici fotonaponskog sustava i pozicioniranje radne točke sustava u točku maksimalne snage, odnosno što bliže toj točki. Pri tome treba uzeti u obzir da karakteristika, a time i položaj točke maksimalne snage ovisi o intenzitetu sunčevog zračenja i temperaturi fotonaponskih panela. S porastom sunčevog zračenja cijela karakteristika, a time i točka maksimalne snage, pomiče se prema gore. S porastom temperature ćelija cijela karakteristika, a time i točka maksimalne snage, pomiče se ulijevo.

Bitno je i napomenuti da pojam MPPT-a ne obuhvaća mehanički sustav praćenja koji fizički okreće panel prema suncu.

Karakteristika fotonaponskog sustava prolazi kroz tri karakteristične točke u kojima su definirani najvažniji parametri ćelije, slika 1. [2]:

1. struja kratkog spoja I_{KS} ,
2. napon otvorenog kruga U_{OK} ,
3. točka maksimalne snage P_m .

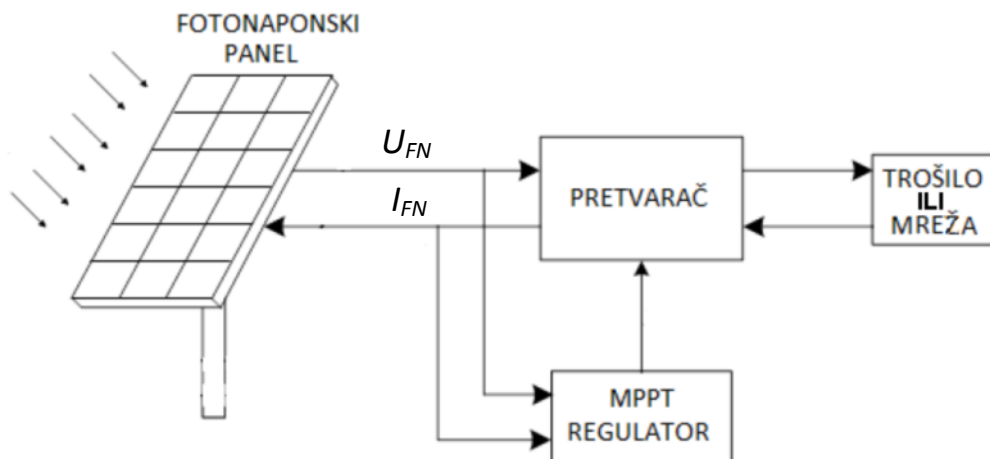


Slika 1. Karakteristike fotonaponskog sustava

Na slici 1. plavom bojom je prikazana strujno-naponska ($i-u$) karakteristika, a crvenom bojom prikazana je ovisnost snage o naponu.

3. Implementacija MPPT algoritma

MPPT algoritam implementiran je u energetsom pretvaraču, točnije u istosmjernom pretvaraču napona koji je sastavni dio energetske pretvarača preko kojega se fotonaponski sustav priključuje na elektroenergetsku mrežu ili na trošilo, ovisno o primjeni sustava. Od istosmjernih pretvarača, najčešće se koriste uzlazni pretvarač (eng. *boost converter*) i silazno-uzlazni pretvarač (eng. *buck-boost converter*).



Slika 2. Blokovski prikaz fotonaponskog sustava

4. Pregledni prikaz MPPT algoritama

U posljednjem desetljeću razvijeni su mnogi algoritmi za praćenje točke maksimalne snage koji se razlikuju po složenosti implementacije, potrebnim sensorima, brzini konvergencije, rasponu efikasnosti, cijeni, odzivu pri brzim promjenama temperature, odnosno zračenja, te po sklopovima potrebnima za implementaciju [3].

Najčešće korišteni algoritmi su Pomak i promatranje (eng. *Perturb and Observe* - P&O), Inkrementalni algoritam (eng. *Incremental Conductance* - InCond), i Upravljanje neizrazitom logikom (eng. *Fuzzy Logic Control* - FLC). S obzirom da se ova tri algoritma koriste u velikoj većini slučajeva, u nastavku će biti detaljnije predstavljani.

Ostali algoritmi su Neuronske mreže (eng. *Neural Networks* - NN), Djelomični napon praznog hoda i struja kratkog spoja (eng. *Fractional open circuit voltage and short circuit current*), Strujni zamah (eng. *Current Sweep*), i drugi.

4.1. Pomak i promatranje (eng. *Perturb and Observe* – P&O)

MPPT algoritam Pomak i promatranje (P&O) ubraja se u tzv. *hill-climbing* algoritme, kao i Inkrementalni algoritam (eng. *Incremental Conductance* - InCond). Naziv su dobili po tome što se kod njih radna točka fotonaponskog sustava pomiče u smjeru porasta snage [4].

Ovaj algoritam u diskretnim koracima mijenja napon istosmjerne veze između fotonaponskog sustava i energetskog pretvarača, pri čemu predznak promjene snage i predznak promjene napona određuju sljedeći korak. Ako je predznak promjene snage pozitivan, zadržava se isti predznak promjene napona, tj. ako je napon u prethodnom koraku povećan, i u sljedećem koraku će biti povećan, i obrnuto. Ako je predznak promjene snage negativan, odnosno ako se snaga u odnosu na prethodno stanje smanjila, mijenja se predznak promjene napona. Drugim riječima, promjena napona zadržava isti predznak sve dok vrijedi uvjet:

$$\frac{dP}{dU} > 0. \quad (1)$$

Na slici 1. se vidi da se na lijevom dijelu krivulje snage gledajući od točke maksimalne snage povećanjem napona povećava i snaga, dok se na desnom dijelu krivulje snaga povećava smanjenjem napona.

Ovaj algoritam postiže vrlo visoku efikasnost pri konstantnom sunčevom zračenju. Dodatne prednosti su jednostavna implementacija i mala računalna snaga potrebna za provedbu.

Postoje dva velika nedostatka. Ako se sunčevo zračenje brzo mijenja, algoritam može izgubiti pravi smjer prema točki maksimalne snage. To je posebno izraženo ako se sunčevo zračenje mijenja kontinuirano, a ne skokovito. U tom slučaju se i krivulja mijenja kontinuirano pa je algoritmu nemoguće odrediti mijenja li se snaga uslijed promjene napona ili uslijed promjene sunčeva zračenja. Ako se sunčevo zračenje mijenja skokovito, promjena krivulje događa se gotovo trenutno i tada je algoritmu lakše odrediti pravi smjer prema točki maksimalne snage.

Drugi nedostatak je osciliranje oko točke maksimalne snage. Ovo se događa zbog toga što je promjena napona diskretna uslijed čega napon i struja gotovo nikada ne pogode točno točku maksimalne snage već osciliraju oko nje. Veličina oscilacija ovisi o iznosu promjene napona jednog koraka. Što je veća promjena napona, veće su oscilacije. Međutim, što je veća promjena, algoritam brže dođe u točku maksimalne snage. Prema tome, potrebno je pronaći optimalan korak promjene napona jer relativno mali korak uzrokuje sporo pronalaženje točke maksimalne snage što može uzrokovati velike gubitke u proizvodnji energije pri bržim promjenama sunčeva zračenja, ali u isto vrijeme smanjuje oscilacije oko točke maksimalne snage. Relativno velik korak osigurava brže pronalaženje točke maksimalne snage, ali može uzrokovati velike oscilacije oko točke maksimalne snage, što također dovodi do gubitka u proizvodnji električne energije.

Kako bi se otklonili navedeni nedostaci, nekoliko je rješenja ponuđeno [5, 6]. Kako bi se poboljšao P&O algoritam u uvjetima brze promjene sunčeva zračenja ponuđen je tzv. dP-P&O algoritam u kojemu se izvodi dodatno mjerenje bez promjene napona. Na ovaj način se svako treće mjerenje izvodi bez promjene napona i na taj način se može točno odrediti koji dio promjene snage je uzrokovan promjenom sunčeva zračenja, a koji dio je uzrokovan promjenom napona.

Također, modificirani P&O algoritam predstavljen u [7] nudi promjenjivi korak promjene napona kako bi se poboljšala brzina dolaska u točku maksimalne snage, a u isto vrijeme smanjile oscilacije oko točke maksimalne snage. Kao početni uvjet pri određivanju koraka, algoritam mora odrediti udaljenost do točke maksimalne snage.

4.2. Inkrementalni algoritam (eng. *Incremental Conductance* – InCond)

Inkrementalni algoritam (InCond) temelji se na činjenici da je nagib krivulje snaga-napon jednak nuli u točki maksimalne snage, pozitivan na lijevoj strani od točke maksimalne snage i negativan na desnoj strani, kao što se može vidjeti na slici 1.:

$$\begin{aligned} \Delta P / \Delta U &= 0 \text{ u točki maksimalne snage,} \\ \Delta P / \Delta U &> 0 \text{ s lijeve strane,} \\ \Delta P / \Delta U &< 0 \text{ s desne strane.} \end{aligned}$$



Uspoređujući promjenu snage s promjenom napona između dva uzastopna koraka, može se odrediti smjer promjene napona u sljedećem koraku.

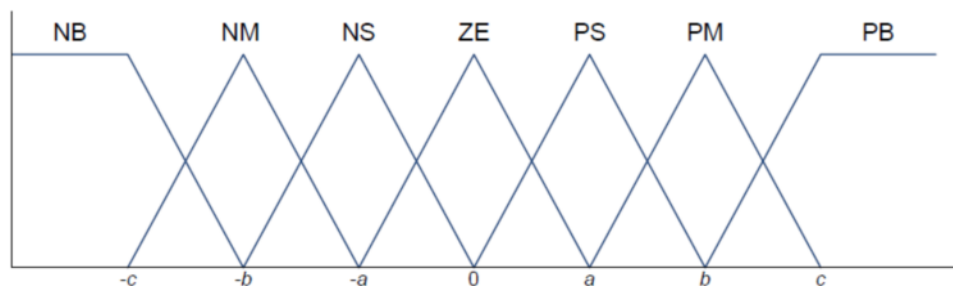
Prednosti i nedostaci InCond algoritma jednaki su kao kod P&O algoritma.

4.3. Upravljanje neizrazitom logikom (eng. *Fuzzy Logic Control* - FLC)

FLC algoritam postao je popularan u posljednjem desetljeću jer se može nositi s nepreciznim ulazima, ne treba točan matematički model i dobro se nosi s nelinearnošću. Na popularizaciju FLC-a dodatno je utjecao razvoj mikrokontrolera jer FLC algoritam zahtijeva jaču računalnu podršku od *hill-climbing* algoritama.

FLC se sastoji od tri faze: fuzifikacija (eng. *fuzzification*), sustav zaključivanja (eng. *inference system*) i defuzifikacija (eng. *defuzzification*). Fuzifikacija obuhvaća procese transformacije numeričkog ulaza u jezične varijable na temelju stupnja (položaja) pripadnosti u određenim grupama. Funkcija pripadnosti prikazana je na slici 3., a koristi se za povezivanje svakog stupnja s jezičnim izrazom. Broj funkcija pripadnosti koristi se ovisno o preciznosti regulatora, ali to obično varira između pet i sedam [4].

Na slici 3. koristi se sedam neizravnih razina: NB (negativna velika), NM (negativna srednja), NS (negativna mala), ZE (nula), PS (pozitivna mala), PM (pozitivna srednja), PB (pozitivna velika). Vrijednosti a , b i c temelje se na dometu vrijednosti numeričke varijable. U nekim slučajevima funkcije pripadnosti su manje simetrične jer su na taj način optimizirane za bolju točnost.



Slika 3. Funkcija pripadnosti

Ulazi neizrazitog regulatora su obično pogreške, E , i promjene u pogrešci, ΔE . Pogreška može biti izabrana od strane projektanta, ali obično je izabrana kao $\Delta P/\Delta U$ jer je nula u točki maksimalne snage. Tada su E i ΔE definirani kao:

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)}, \quad (2)$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1). \quad (3)$$

Izlaz iz neizrazitog regulatora je obično promjena u intervalu rada pretvarača (ΔD) ili promjena u referentnom naponu istosmjerne veze (ΔU). Bazno pravilo, koje se očitava u tablici baznih pravila, povezuje neizrazite izlaze s neizrazitim ulazima. Tablica 1. prikazuje bazno pravilo za trofazni izmjenjivač, gdje su ulazi E i ΔE , a izlaz je promjena napona istosmjerne veze, ΔU .

Tablica 1. Bazno pravilo

$E \Delta E$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Na primjer, ako je radna točka daleko udesno od točke maksimalne snage, E će biti NB, a ΔE će biti nula. Tada, napon istosmjerne veze mora se smanjiti kako bi se radna točka približila točki maksimalne snage, pa ΔU treba biti NB.

Posljednja faza je defuzifikacija. U toj fazi izlaz se transformira iz jezične varijable u brojčani izlaz na temelju funkcije pripadnosti prikazane na slici 3. Postoje različite metode za transformiranje jezične varijable u brojčanu vrijednost. Najčešće korištena je tzv. metoda centra gravitacije.

Prednosti ovog algoritma su, osim smanjene osjetljivosti na neprecizne ulaze, da ne treba točan matematički model, postiže brzo približavanje točki maksimalne snage i ima minimalne oscilacije oko točke maksimalne snage. Nadalje, ovaj algoritam dobro radi prilikom skokovite promjene sunčeva zračenja, ali još nije utvrđeno kako se ponaša prilikom kontinuirane promjene sunčeva zračenja. Drugi nedostatak je što efikasnost ovog algoritma ovisi o sposobnosti projektanta.

5. Zaključak

P&O i InCond, tzv. *hill-climbing* algoritmi su najčešće korišteni algoritmi zbog svoje jednostavne implementacije, cijene i učinkovitosti, ali imaju nedostatke kao što su oscilacije oko točke maksimalne snage i loš odziv na promjene sunčeva zračenja, pogotovo one kontinuirane. Modifikacijom temeljnih P&O i InCond algoritama, omogućava se bolje praćenje točke maksimalne snage pri promjeni zračenja, te njihova dinamička učinkovitost mjerena po europskoj normi EN 50530 iznosi 99,4% [4].



FLC algoritam ima bolji odziv na skokovitu promjenu sunčeva zračenja od P&O i InCond algoritama. Nedostatci su mu, u odnosu na P&O i InCond algoritme, složenost implementacije i cijena.

6. Literatura

- [1] Vulin, D. Fotonaponski materijali. Seminarski rad. Osijek: Elektrotehnički fakultet Osijek, 2013.
- [2] Betti, T. Testiranje fotonaponskih modula u realnim uvjetima. Magistarski rad. Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2005.
- [3] Esram, T., Chapman, P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques // *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, 2007.
- [4] Morales, D. S. Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications. Aalto University School of Science and Technology, Espoo, 2010.
- [5] Sera, D., Kerekes, T., Teodorescu, R., Blaabjerg, F. Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions // *Proceedings 12th International Conference on Power Electronics and Motion Control*. 2006, pp. 1614-1619
- [6] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method // *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, 2005.
- [7] Zhang, C., Zhao, D., Wang, J., Chen, G. A modified MPPT method with variable perturbation step for photovoltaic system // *Power Electronics and Motion Control Conference*. 2009, pp. 2096-2099