

# Solarna energija i fotonaponski sistemi

---

**Radivoje Đurić**

**4/29/2020**

## 1 Uvod

Upotreba alternativnih, obnovljivih izvora energije je u porastu i već sada igra značajnu ulogu u energetske sistemima. Jedan od načina korišćenja sunčeve energije je primena fotonaponskih sistema. Fotonaponske ćelije (*photovoltaic cells*) čine osnovni deo mnogih savremenih proizvoda, od malih uređaja do velikih sistema za snabdevanje električnom energijom. Pri tome, fotonaponske ćelije pri transformisanju sunčeve u električnu energiju ne ispuštaju nikakve štetne materije, što ima ogromnu prednost u odnosu na klasične fosilne izvore energije. Termin fotonapon (*photovoltaic*) je prvi put upotrebljen krajem XIX veka, da bi se označio istoimeni efekat. Fotonapon se može doslovce prevesti i kao "svetlosni elektricitet", a to je upravo ono što fotonaponski materijali i uređaji i rade, pretvaraju svetlosnu energiju u električnu. Ovu pojavu je otkrio devetnaestogodišnji francuski fizičar *Edmond Becquerel* 1839. godine. On je uspeo da izazove pojavu napona kada je svetleću metalnu elektrodu potopio u slab elektrolitski rastvor. Skoro 40 godina kasnije, Adams i Dej bili su prvi koji su ispitivali efekte fotonaponskih pretvarača čvrstih tela. Bili su u mogućnosti da naprave ćelije od Selena koje su imale efikasnost između 1% i 2%. Albert Ajnštajn je 1904. godine objavio teorijsko objašnjenje fotonaponskog efekta, što ga je 1923. godine dovelo do Nobelove nagrade. Otprilike u isto vreme poljski naučnik Jan Čokhralski počeo je da razvija metod za pravljenje savršenog silikonskog kristala, da bi se između 1940. i 1950. godine njegovim procesom počeli generisati jednokristalni fotonaponski pretvarači. Prvo postojano generisanje energije iz fotonaponskog pretvarača bilo je 1958. godine, na satelitu Avangarda I.

Od 2002. godine proizvodnja fotonaponskih pretvarača na svetskom nivou približila se vrednosti od 600MW godišnje i rasla je preko 40% godišnje. Poslednjih godina, na globalnom nivou, postoji uočljivo povećanje ulaganja u istraživanje i razvoj fotonaponske konverzije, kako bi se što jeftinije i efikasnije proizvodile fotonaponske komponente i time bitno povećala njihova primena.

Danas fotonaponski sistemi proizvode značajnu količinu električne energije koja se koristi širom sveta. PV tehnologija će u budućnosti moći da pruži veliku podršku stopi rasta naprednih ekonomija, kao i zemalja u razvoju. PV moduli mnogih proizvođača su sada komercijalno dostupni, a na tržište su plasirani određeni broj elektronskih elektroenergetskih sistema za obradu električne energije proizvedene od PV sistema, posebno za sisteme povezane na mrežu.

Solarne ćelije predstavljaju složenu strukturu čiji je glavni deo (aktivni sloj) napravljen od poluprovodničkih materijala. Fotonaponski elementi se mogu realizovati na mnogo različitih načina, o čemu svedoči veliki broj različitih tehnoloških i proizvodnih procesa, od kojih su neki specijalno razvijani za ovu oblast. Fotonaponski sistemi generalno se sastoje od više fotonaponskih ćelija (obično grupisanih i upakovanih u skupove ćelija nazvanih moduli).

Postoji više načina za matematičko modelovanje solarnih ćelija fotonaponskog sistema, a tokom godina stalno dolazi do unapređenja algoritama za praćenje tačke maksimalne snage, MPPT algoritama. U distribuiranim sistemima napajanja su potrebni distribuirani MPPT algoritmi, koji optimizuju rad svake jedinice. Komunikacijom sa ostalim jedinicama povećava se pouzdanost i raspoloživost fotonaponskog sistema.

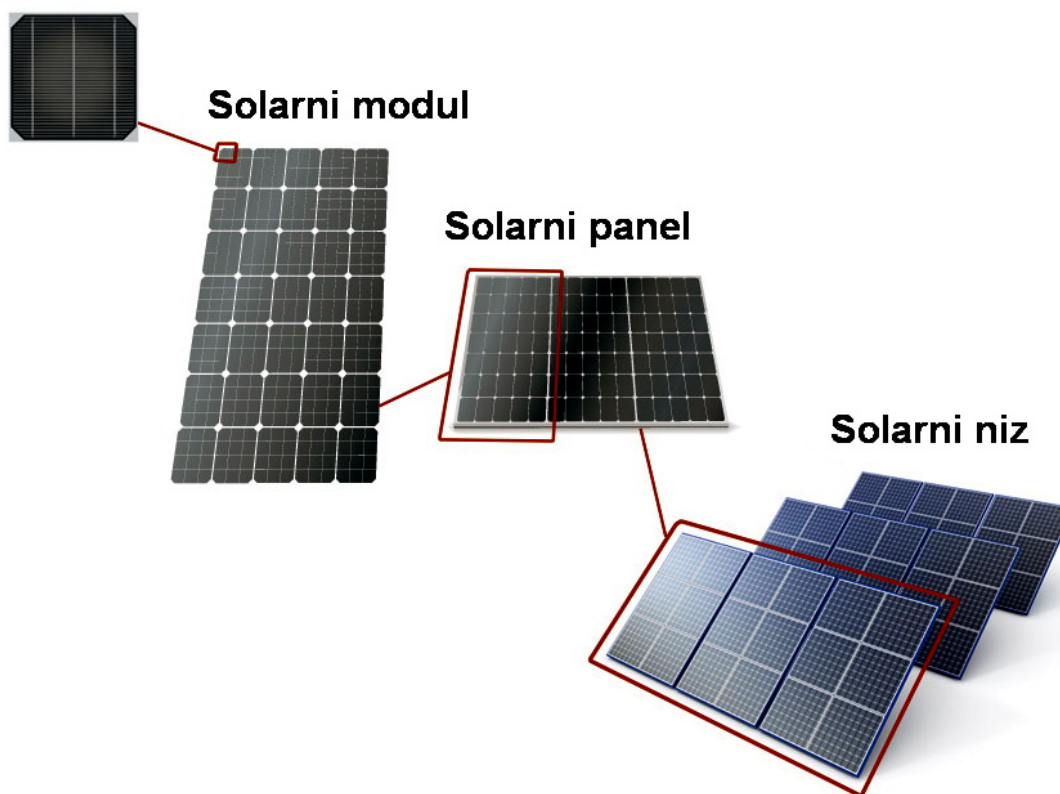
## 2 Fotonaponski elementi i sistemi

Postoji više načina na koji mogu biti napravljene fotonaponske ćelije različitih cena i efikasnosti. Svaki fotonaponski sistem sastoji se od različitih elemenata. Pored fotonaponskih ćelija (modula, panela) koje predstavljaju osnovni element svakog sistema, prisutne su i pomoćne komponente (regulatori, baterije, inverteri, noseće strukture, itd).

### 2.1 Fotonaponska hijerarhija

Pošto individualna solarna ćelija proizvodi oko 1 -2 W energije, retke su aplikacije kod kojih je samo jedna ćelija u upotrebi. Da bi se dobila veća izlazna snaga solarne ćelije se povezuju u veće jedinice koje se zovu moduli. Površine modula su od 0.5 m<sup>2</sup> do 2 m<sup>2</sup>. Zahtevana ukupna snaga definiše broj modula i vrstu solarnih ćelija koje čine modul. Težina solarnih modula iznosi između 10 i 15 kg/ m<sup>2</sup>. Fotonaponski moduli mogu biti spojeni u još veće jedinice, tj. u panele. Fotonaponski paneli se dalje međusobno povezuju da bi se obezbedilo više električne energije i sa drugim komponentama grade fotonaponski sistem, koji čini jednu zaokruženu celinu (Slika 2.1).

#### Solarna ćelija



Slika 2.1 FN ćelije spojene u module, koji se dalje povezuju u FN panele i nizove.

Fotonaponske ćelije moguće je spajati redno i paralelno. Rednim spajanjem fotonaponskih ćelija povećava se napon, dok struja koja teče kroz njih ostaje ista. U slučaju da se želi postići veća struja fotonaponskih modula potrebno je ćelije spojiti paralelno, tj. spojem u paralelu napon se ne menja, dok se struja povećava sa brojem ćelija. Fotonaponski moduli obično su sastavljeni od kombinacije serijski i paralelno spojenih panela kako bi se povećala korisna snaga.

Fotonaponski paneli (moduli) spojeni redno utiču na strujno-naponsku karakteristiku na sličan način kao i kod redne veze fotonaponskih ćelija. Ukupni napon je zbir napona pojedinih panela (modula). Kada se želi postići veća struja, potrebno je fotonaponske panele (module) spojiti paralelno. Jedan fotonaponski modul je sastavljen od više ćelija (36/54/72) i obezbeđuje napon od 12 V/18 V/24 V, a tipična snaga merena u standardnim uslovima testiranja varira od 12 W do 230 W, zavisno od vrste ćelije (4/5/6 inča) i modela. Na primer, visoko-efikasni modul PW1650 ima snagu od 165 W i napon 12 V/24 V, a dimenzije su mu 123,7x108,2x4,5cm. Proizvođači garantuju vek upotrebe od 20 do 25 godina za koje vreme snaga neće opasti više od 10% nominalne snage. Stepen korisnog dejstva se kreće u opsegu 12-17%. Veličina fotonaponskih panela, odnosno njegova površina, zavisi od nekoliko faktora, od količine sunčeve svetlosti koja je raspoloživa na posmatranoj lokaciji, kao i od potreba potrošača. Fotonaponski moduli odnosno paneli čine glavni deo fotonaponskog sistema, koji može uključivati i uređaje za električno povezivanje, opremu za montiranje, opremu za automatsko upravljanje i baterije koje čuvaju električnu energiju za korišćenje u periodu kada Sunce ne sija.

Fotonaponski sistemi se mogu podeliti u tri velike grupe:

- *on-grid* sistemi, koji su priključeni na javnu distributivnu mrežu,
- *off-grid* sistemi, koje nazivamo i autonomnim sistemima jer nisu priključeni na javnu distributivnu mrežu
- hibridni sistemi, koji su povezani sa nekim drugim izvorom električne energije

Autonomni fotonaponski sistemi najčešće se koriste u udaljenim mernim i radio stanicama, izolovanim uređajima na autoputevima i sl. Osnovne prednosti ovih sistema su: pouzdanost, fleksibilnost, mala potreba za održavanjem, ne ispuštaju štetne materije u okolinu, lako se integrišu sa okolinom (npr. na krovove zgrada), ali su jako zavisni od izvora energije, sunčevog zračenja i veštačkog osvetljenja. Pri dimenzionisanju fotonaponskog sistema potrebno je poznavati ukupno zračenje na datoj lokaciji kao i dužinu trajanja zračenja. Generisanje i potrošnja energije u principu nisu sinhronizovani procesi, pa je pri projektovanju fotonaponskog sistema bitno voditi računa o skladištenju energije. Baterija pre svega služi da bi se tokom oblačnog perioda ili tokom noći sistem snabdevao električnom energijom.

## 2.2 Struktura fotonaponske ćelije

Fotonaponska ili solarna ćelija je osnovni deo fotonaponskog sistema u kome se neposredno transformiše sunčeva energija u električnu energiju (Slika 2.2).

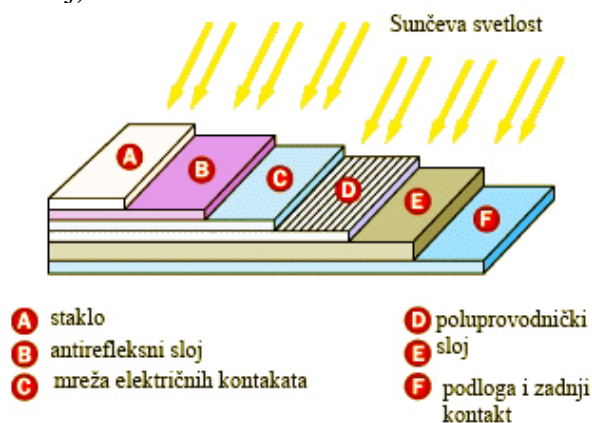


Slika 2.2 Fotonaponska ćelija

Tipična FN ćelija sastoji se iz više različitih delova (Slika 2.3):

- Zaštitnog providnog sloja (plastični ili staklen prekrivač ili drugi vid enkapsulacije);
- Providnog adhezivnog sloja;
- Antirefleksionog sloja;
- Mreže električnih kontakata sa prednje strane FN ćelije;
- Aktivnog poluprovodničkog sloja (p-n spoj);

- Električnog provodnog sloja (električni kontakt sa zadnje strane FN ćelije);
- Podloge (noseći sloj).



Slika 2.3 Tipična struktura jedne FN ćelije

Antirefleksioni sloj ima važnu ulogu s obzirom na to da se aktivni silicijumski sloj ponaša kao ogledalo koje reflektuje preko 30% upadne svetlosti. Da bi se povećao koeficijent konverzije fotonaponske ćelije, mora se smanjiti procenat reflektovane svetlosti i time povećati udeo apsorbovane svetlosti koja će generisati slobodne elektrone u poluprovodničkom aktivnom sloju. Postoje dve opšte tehnike kako se može redukovati refleksija. Prva tehnika se sastoji u nanošenju tankog sloja silicijum-monoksida (*silicon monoxide*, SiO) ili silicijum-nitrida (*silicon nitride*). Jedan takav sloj silicijum-monoksida smanjuje refleksiju na 10%, dok dva takva sloja je smanjuju na samo 4%. Silicijum-nitridni antirefleksni sloj povećava efikasnost FN ćelije preko 15%. Druga tehnika se sastoji u obradi gornje površine aktivnog sloja (povećanje hrapavosti površine). Pored antirefleksnog sloja sa prednje strane FN ćelije, značajnog uticaja na ukupnu apsorbovanu svetlost u aktivnom sloju može imati i provodni sloj (zadnja elektroda). Električni kontakti su od suštinske važnosti za FN ćelije zato što oni obezbeđuju vezu između aktivnog poluprovodničkog sloja i spoljašnjeg elektrinog kola (potrošača). Zadnji kontakt se relativno lako tehnološki ostvaruje, obično je to metalni sloj od aluminijuma ili molibdena. Međutim, kontakt sa prednje strane predstavlja mnogo ozbiljniji problem. Ova elektroda mora da pokriva što veći deo prednje površine, kako bi se sakupilo što više fotogenerisanih elektrona, ali se time bitno i povećava refleksija upadne svetlosti sa ovog metalnog sloja. Ovde imamo oprečne zahteve koji moraju biti pažljivo analizirani i odgovarajućim metodama optimizovani. Uobičajeno je da se prednja elektroda realizuje u obliku mreže tankih provodnih traka. Širina, debljina i raspored ovih provodnih traka se mora optimizovati, tako da se maksimalno moguće izvrši sakupljanje elektrona i minimalno spreči apsorpcija svetlosti u aktivnom sloju. Na primer, debljina ovih traka je važan faktor, s obzirom na to da od debljine zavisi njihova električna provodnost koja mora biti što veća, a sa druge strane poželjno je da one budu što tanje i time budu delimično transparentne za upadnu svetlost. Izrada ove "rešetkaste elektrode" bitno poskupljuje ceo proces proizvodnje fotonaponskih ćelija. Provodni oksidni sloj se lako nanosi u procesu proizvodnje, a pri izradi nekih tankoslojnih fotonaponskih ćelija (*the thin-film PV cells*), kao što su amorfne silicijumske i kadmijum-teluridne fotonaponske ćelije, obično se nanosi na sam provodni zaštitni sloj (staklo). Kod ovih ćelija provodni zaštitni sloj je ujedno i podloga na koju je nanet i tanki sloj aktivnog poluprovodnog materijala ("*upside down*" konstrukcija ćelije gde nema zadnje podloge, supstrata). Fotonaponski aktivni sloj može biti izrađen od različitih tipova poluprovodničkih materijala, nanetih ili složenih u različite strukture, da bi proizvedena fotonaponska ćelija imala što bolje performanse. Prema tome u kakvoj formi je materijal od kog je izrađeno mogu se razlikovati tri tipa fotonaponskih kola:

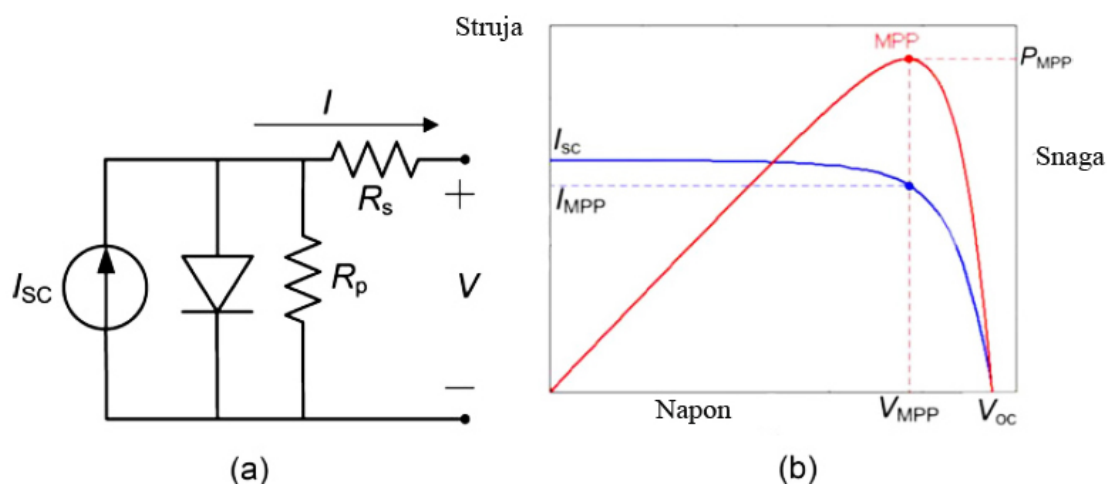
- monolitna silicijumska, gde silicijum može imati različite forme (monokristalni, mikrokristalni i amorfni silicijum);
- polikristalni tanki film (*polycrystalline thin films*), gde se najčešće koriste bakar-indijum-diselenid (*copper indium diselenide - CIS*), kadmijum-telurid (CdTe) i tanki film silicijuma (*thin-film silicon*);
- monokristalni tanki film (*single-crystalline thin film*), gde je važan galijum-arsenid (GaAs).

Strukturni dizajn fotonaponskih kola zavisi od ograničenja materijala koji se koristi u izradi fotonaponskih ćelija. Prema tome kako su ovi materijali složeni da bi se napravila solarna ćelija, mogu se razlikovati četiri strukture fotonaponskih kola:

- Homogeni spoj (*homojunction*);
- Heterospoj (*heterojunction*);
- p-i-n i n-i-p kola;
- višespojno kolo (*multijunction devices*).

### 2.3 Model fotonaponske ćelije

Solarna ćelija je najčešće korišćeni optički pretvarač. Na slici 2.4 prikazan je ekvivalentni električni model silicijumske solarne ćelije i njoj pridružene krive struje ( $I$ ) i snage ( $P$ ) u zavisnosti od napona ( $V$ ). Dioda modeluje p-n spoj. Paralelni otpornik, otpornosti  $R_p$  modeluje struju curenja spoja i ova vredost je generalno veoma visoka. Serijska otpornost  $R_s$  modeluje omski kontakt i povećanje ove vrednosti prouzrokuje opadanje nagiba  $I$ - $V$  krive u oblasti gde je napon približno konstantan. Nasuprot tome, opadanje  $R_p$  prouzrokuje povećanje nagiba  $I$ - $V$  krive u oblasti gde je struja približno konstantna. Struja kratkog spoja,  $I_{sc}$  se proporcionalno povećava sa povećanjem ulazne optičke snage.



Slika 2.4 (a) Ekvivalentni električni model, (b) Krive zavisnosti  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  solarne ćelije

Napon otvorenog kola  $V_{oc}$  se može smatrati konstantnim pri uslovima jakog osvetljavanja, dok je promenljiv pri uslovima slabog osvetljenja. Struja kratkog spoja  $I_{sc}$  se gotovo ne menja sa temperaturom dok  $V_{oc}$  linearno opada sa porastom temperature. Snaga  $P_{MPP}$  predstavlja tačku maksimalne generisane snage (skraćenica MPP potiče od *maximum power point*). Struja  $I_{MPP}$  i napon  $V_{MPP}$  su u tački maksimalne generisane snage.

Snaga brže opada desno od tačke MPP usled bržeg opadanja struje  $I$  u ovoj oblasti. Relacija koja povezuje struju i napon jedne solarne ćelije glasi:

$$I = I_{PH} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_S I}{n_d V_t}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_p}, \quad V_t = \frac{kT}{q} \quad (2.1)$$

$I_{PH}$  predstavlja fotogenerisanu struju koja se može aproksimirati strujom  $I_{SC}$ , pošto je vrednost  $I_{SC}$  unapred poznata i na taj je lakše izračunati  $I_0$ , struju saturacije diode. Naelektrisanje elektrona je  $q$ ;  $n_d$  je faktor koji za silicijumske diode uzima vrednosti između 1.2 i 1.8;  $K$  je Bolcmanova konstanta i  $T$  je temperatura solarne ćelije u Kelvinima. Da bi solarna ćelija imala očne gubitke manje od 1%, potrebno je da paralelna otpornost  $R_p$  ispunjava sledeći uslov

$$R_p \geq 100 \frac{V_{OC}}{I_{SC}}. \quad (2.2)$$

Sična je situacija i sa gubicima na serijskoj otpornosti, da bi solarna ćelija imala redne gubitke manje od 1% potrebno je da serijska otpornost ispunjava uslov

$$R_s \geq 0.01 \frac{V_{OC}}{I_{SC}}. \quad (2.3)$$

Kada se otpornosti  $R_p$  može zanemariti, tada se izraz (2.1) može zapisati u obliku:

$$I = I_{PH} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_S I}{n_d V_t}} - 1 \right) \approx I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_S I}{n_d V_t}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

gde su  $I_{SC}$  i  $I_0$  struja kratkog spoja i struja saturacije, respektivno. Struja  $I_0$  zavisi od materijala od kog je napravljena ćelija, kao i od nivoa dopirnosti. Posmatrajući kolo sa slike 2.1 pri otvorenim krajevima ( $I=0$ ), može se odrediti relacija koja povezuje  $I_0$  i  $V_{OC}$ :

$$I_0 = \frac{I_{SC}}{\frac{V_{OC}}{e^{n_d V_t}} - 1}, \quad (2.5)$$

a posle smene postaje

$$I \approx I_{SC} \left( 1 - \frac{e^{\frac{V+R_S I}{n_d V_t}} - 1}{\frac{V_{OC}}{e^{n_d V_t}} - 1} \right). \quad (2.6)$$

Vrednosti  $V_{OC}$  i  $I_{SC}$  su dostupne za određenu ćeliju, ili solarni panel na specifikaciji samog proizvoda, pa se na osnovu relacije 2.6 može dobiti strujno naponska karakteristika solarne ćelije pri jednom osvetljaju i na jednoj temperaturi. Da bismo dobili  $I$ - $V$  karakteristiku za različite nivoe osvetljenosti i pri različitim temperaturama, moramo uzeti u obzir i zavisnosti struje kratkog spoja  $I_{SC}$  i napona otvorene veze  $V_{OC}$  od temperature i osvetljenosti:

$$I_{SC}(T_{cell}, G) = \frac{G}{1000} \left[ I_{SCr} + \frac{dI_{SCr}}{dT} (T_{cell} - T_r) \right], \quad (2.7)$$

$$V_{OC}(T_{cell}, G) = \left[ V_{OCr} + \frac{dV_{OCr}}{dT} (T_{cell} - T_r) \right] \left[ 1 + \rho_{OC} \ln \frac{G}{G_{OC}} \ln \frac{G}{G_r} \right], \quad (2.8)$$

gde je  $T_{cell}$  temperatura ćelije u stepenima Celzijusovim;  $G$  je incidentna iradijansa u  $W/m^2$ ,  $dI_{SCr}/dT$  i  $dV_{OCr}/dT$  su strujni i naponski temperaturni koeficijenti, respektivno. Parametri  $I_{SCr}$  i  $V_{OCr}$  su struja kratkog spoja i napon otvorenog kola, respektivno, pri referentnoj iradijaciji  $G_r$  i referentnoj temperaturi ćelije  $T_r$ , dok  $\rho_{OC}$  i  $G_{OC}$  predstavljaju empirijski određene konstante koje modeluju varijaciju napona praznog hoda  $V_{OC}$  pri slaboj osvetljenosti.

Promena struje kratkog spoja sa temperaturom  $dI_{SC}/dT$  tipično ima veoma malu vrednost, dok je promena napona praznog hoda  $dV_{OC}/dT$  nezanemarljiva i negativna je. Tipične referentne vrednosti iradijancije i temperature su  $G_r = 1000 \text{ W/m}^2$  ( $= 100 \text{ mW/cm}^2$ ) i  $T_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , respektivno, a ove referentne vrednosti se često zovu i Standardnim Test Uslovima (STU), jer su u pitanju uslovi pri kojima proizvođač najčešće testira solarne panele. Vrednosti  $\rho_{OC} = -0.04$  i  $G_{OC} = 1000 \text{ W/m}^2$  su adekvatne za primenu kod većine solarnih modula.

Kada se direktno osvetljava, solarna ćelija dostiže temperature koje su iznad temperature ambijenta  $T_a$ . Stoga se temperatura ćelije  $T_{cell}$  može izračunati korišćenjem empirijskog parametra nominalna radna temperatura ćelije (Nominal Operation Cell Temperature-*NOCT*):

$$T_{cell} = T_a + \frac{NOCT - 20}{800 \text{ W/m}^2} G. \quad (2.9)$$

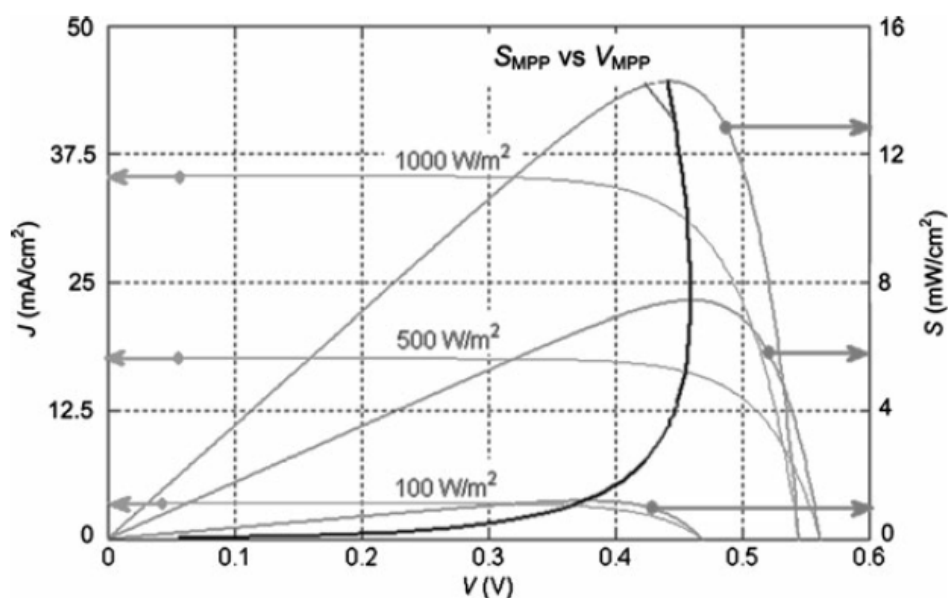
Parametar *NOCT* je temperatura ćelije koja je izložena iradijaciji od  $800 \text{ W/m}^2$  na temperaturi  $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  i pri brzini vetra od  $1 \text{ m/s}$ . Empirijski je utvrđeno da ovaj parametar za silicijumsku solarnu ćeliju uzima vrednosti između  $42 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $48 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Vrednosti parametara tipičnih industrijskih monokristalnih solarnih ćelija su:

$$J_{SCr} = 35 \text{ mA/cm}^2, \quad V_{OCr} = 0.6 \text{ V}, \quad \frac{dJ_{SC}}{dT} = 12.5 \left( \mu\text{A/cm}^2 \right) / ^\circ\text{C}, \quad \frac{dV_{OC}}{dT} = -2 \text{ mV} / ^\circ\text{C},$$

$$NOCT = 42 \text{ }^\circ\text{C} \text{ i } n_d = 1.5.$$

Na slici 2.5. je data zavisnost gustine struje  $J$  i gustine snage  $S$  u funkciji napona na generičkoj solarnoj ćeliji, kada je osvetljenost parametar.

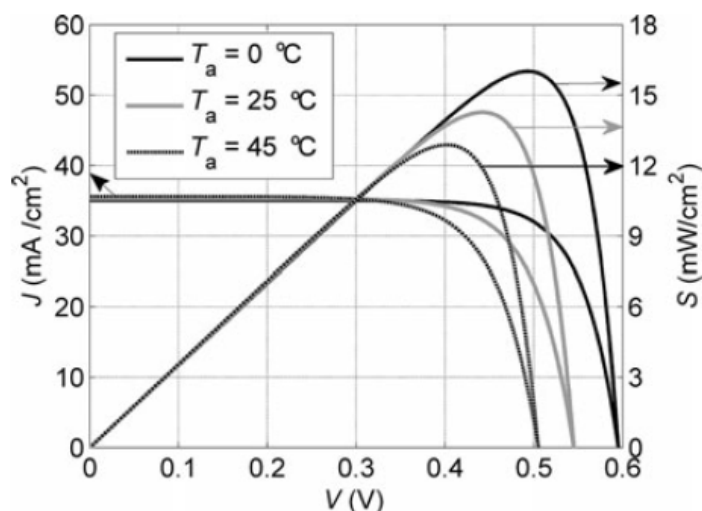


Slika 2.5. Generička  $J-V$  i  $S-V$  karakteristika za nekoliko vrednosti iradijancije  $G$  pri  $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  za jednu solarnu ćeliju.

Na istoj slici je data i karakteristika gustine MPP snage u funkciji napona  $V_{MPP}$ .

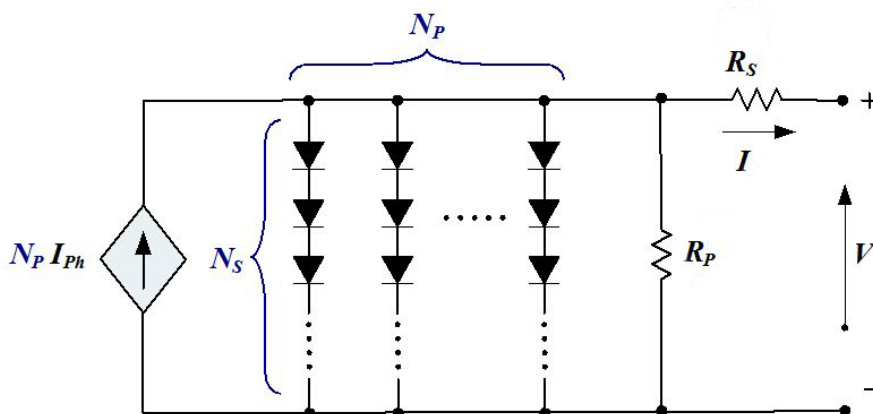
Na slici 2.6. prikazane su zavisnosti  $J-V$  i  $S-V$  za jednu solarnu ćeliju pri nekoliko vrednosti  $T_a$  i pri  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ . Kao što se može videti sa ove slike, i  $V_{OC}$  i  $S_{MPP}$  opadaju sa porastom temperature, dok se  $J_{SC}$  malo menja.





Slika 2.6. Generičke krive  $J-V$  i  $S-V$  pri  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  i pri nekoliko vrednosti temperature ambijenta  $T_a$  za jednu solarnu ćeliju.

Pošto jedna solarna ćelija proizvodi veoma malu snagu, veći broj solarnih ćelija treba vezati redno i paralelno u okviru jednog modula da bi se generisala veća snaga. Električna šema jednog solarnog modula je prikazana sa slici 2.5.



Slika 2.7. Ekvivalentni električni model modula, panela ili niza.

Izraz za izlaznu struju solarnog modula koji se sastoji od  $N_S$  redno i  $N_P$  paralelno vezanih solarnih ćelija se može napisati kao:

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \left( e^{\frac{V + R_S I}{N_S n_d V_t}} - 1 \right) - \frac{\frac{N_P V}{N_S} + R_S I}{R_P} \quad (2.10)$$

Struja  $I_{PH}$  se može aproksimirati strujom  $I_{SC}$  i zato se pri izradi simulacionog modela za  $I_{PH}$  može iskoristiti izraz 2.7. Izraz koji je korišćen pri izradi simulacionog modela za struju saturacije diode je

$$I_S = I_{0S} \left( \frac{T_{cell}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{kn_d} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{cell}} \right)}, \quad (2.11)$$

gde je ekvivalentna struja zasićenja

$$I_{0S} = \frac{I_{SC}}{e^{\frac{N_s n_d V_i}{V_{OC}}} - 1}. \quad (2.12)$$

U izrazu 2.11  $E_g$  je energetska procena poluprovodnika od kog je napravljena solarna ćelija.

U praktičnim primenama se strujno-naponska karakteristika prethodnog fizičkog modela može aproksimirati sledećom jednačinom

$$I(V) = I_{SC} \cdot (1 - C_1 \cdot (e^{\frac{V}{C_2 \cdot V_{OC}}} - 1)), \quad (2.13)$$

gde su:

$$C_1 = (1 - \frac{I_{MPP}}{I_{SC}}) \cdot e^{-\frac{V_{MPP}}{C_2 \cdot V_{OC}}}, \quad (2.14)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} - 1}{\ln(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{SC}})}, \quad (2.15)$$

$I_{SC} = I_{SC\_REF} \cdot (\Delta S + 1) \cdot (1 + a \cdot \Delta T)$  - struja kratkog spoja solarnog panela pri datim atmosferskim uslovima,

$I_{MPP} = I_{MPP\_REF} \cdot (\Delta S + 1) \cdot (1 + a \cdot \Delta T)$  - struja u tački maksimalne snage solarnog panela pri datim atmosferskim uslovima,

$V_{OC} = V_{OC\_REF} \cdot (1 - c \cdot \Delta T) \cdot \ln(e + b \cdot \Delta S)$  - napon praznog hoda solarnog panela pri datim atmosferskim uslovima,

$V_{MPP} = V_{MPP\_REF} \cdot (1 - c \cdot \Delta T) \cdot \ln(e + b \cdot \Delta S)$  - napon u tački maksimalne snage solarnog panela pri datim atmosferskim uslovima,

$e = 2.7183$ ;  $a = 0.0025/^\circ C$ ;  $b = 0.5$ ;  $c = 0.0028/^\circ C$  - korekzione konstante,

$G = S, T$  - trenutni intenzitet osvetljenosti i temperature, respektivno,

$$\Delta G = \Delta S = \frac{S}{S_{REF}} - 1,$$

$$\Delta T = T - T_{REF}.$$

Vrednosti parametara su određene za solarni panel XC-128 firme XC3-Solar, a karakteristike ovog panela pri referentnim atmosferskim uslovima su:

$I_{SC\_REF} = 7.8A$  - struja kratkog spoja solarnog panela;

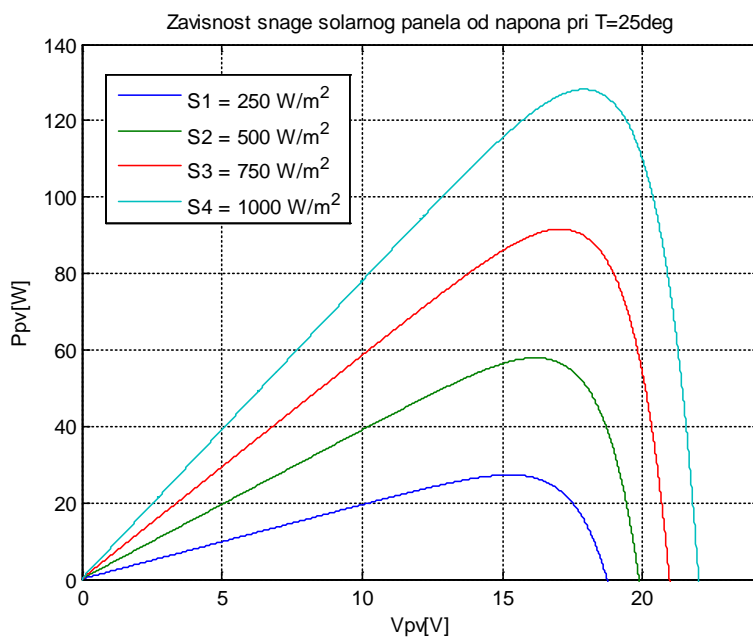
$I_{MPP\_REF} = 7.2A$  - struja u tački maksimalne snage solarnog panela;

$V_{OC\_REF} = 22V$  - napon praznog hoda solarnog panela;

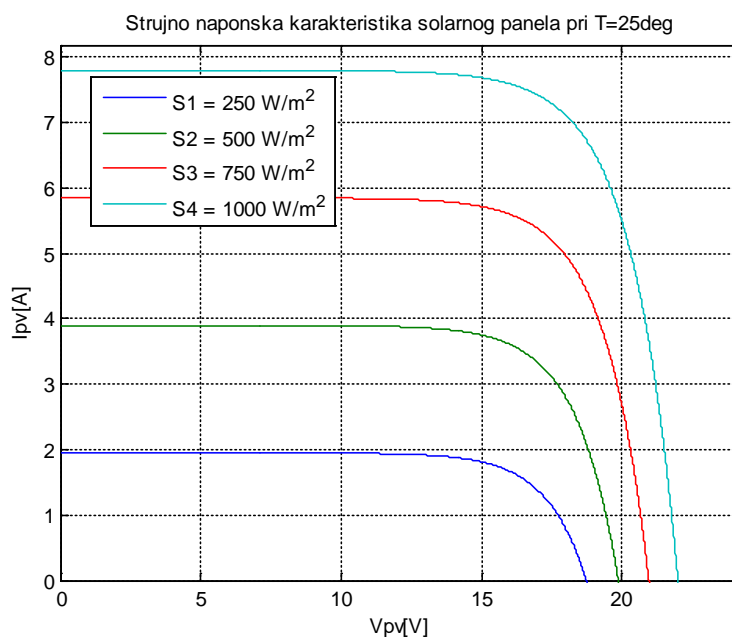
$V_{MPP\_REF} = 17.8V$  - napon u tački maksimalne snage solarnog panela;

$P_{MPP\_REF} = 128W$  - maksimalna snaga panela.

Na slikama 2.8 i 2.9 prikazane su zavisnost snage solarnog panela od napona i strujno-naponska karakteristika za četiri različite vrednosti osvetljenosti pri referentnoj atmosferskoj temperaturi. Sa porastom intenziteta osvetljenosti raste struja kratkog spoja, napon otvorene veze, kao i struja, napon i snaga u tački maksimalne snage solarnog panela.

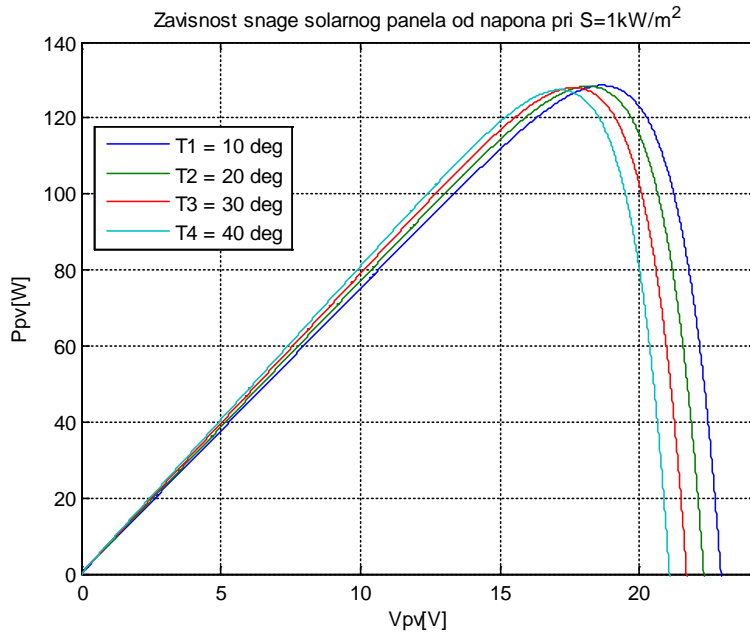


Slika 2.8. Zavisnost snage solarnog panela od napona i intenziteta osvetljenosti pri T=25°C.

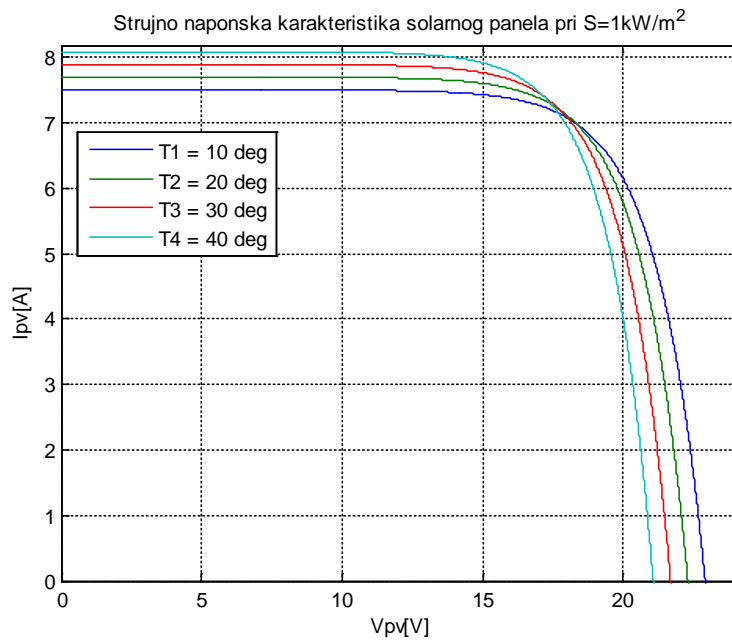


Slika 2.9. Strujno-naponska karakteristika solarnog panela u zavisnosti od intenziteta osvetljenosti pri T=25°C.

Na slikama 2.10. i 2.11. prikazane su zavisnost snage solarnog panela od napona i strujno-naponska karakteristika za četiri različite vrednosti temperature pri referentnom intenzitetu osvetljenosti. Pri porastu temperature raste struja kratkog spoja, dok napon otvorene veze opada. U tački maksimalne snage solarnog panela pri porastu temperature raste struja ali opada napon i snaga.



Slika 2.10. Zavisnost snage solarnog panela od napona i temperature pri  $S=1\text{kW/m}^2$ .



Slika 2.11. Strujno-naponska karakteristika solarnog panela u zavisnosti od temperature pri  $S=1\text{kW/m}^2$ .

### 3 MPPT algoritmi

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 moguća snaga. Da bi iz njih „izvlačili“ maksimalnu snagu, opterećenje mora stalno biti prilagođeno njihovoj radnoj tački, odnosno radna prava opterećenja mora da preseče tačku maksimalne snage solarnih panela. Cena koja se mora platiti je ubacivanje pretvarača energetske elektronike (DC/DC ili DC/AC) između solarnog panela i potrošača, koji imaju funkciju pronalaženja 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 algoritam, i on istovremeno određuje i radnu tačku energetskog pretvarača.

Postoje dve kategorije MPPT metoda : direktne i indirektne. Direktne metode često nazivaju pravim MPPT metodama. Da bi se izračunala snaga, potrebno je meriti napon i struju. Kod direktnih MPPT metoda, napon i struja se stalno mere, dok se kod indirektnih metoda vrši njihova procena na osnovu povremenog merenja napona i struje. Najpoznatiji direktni MPPT metod je *Perturb & Observe*. Jedan od najjednostavnijih indirektnih MPPT metoda je FOCV (*fractional open-circuit voltage*). U poređenju sa FOCV, P&O je svakako napredniji algoritam jer predstavlja pravi MPPT algoritam, ali po ceni kompleksnije realizacije kola.

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.

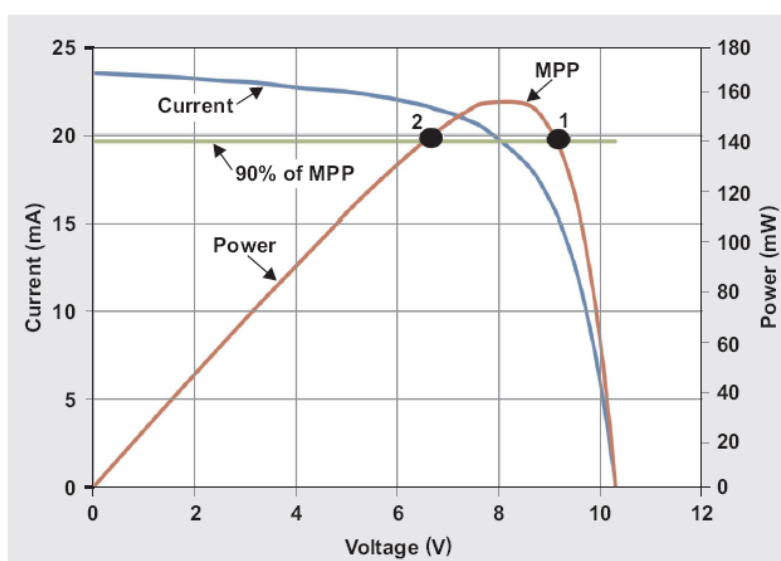
Solarni sistem napajanja se u opštem slučaju sastoji iz tri osnovna dela: solarni panel, energetski pretvarač i opterećenje (potrošač). Na slici 3.1. data je blok-šema solarnog sistema napajanja, koji ima ugrađenu MPPT funkciju. Akumulatorska baterija je indirektno uključena u okviru potrošača.

Slika 3.1 Blok-šema solarnog sistema napajanja sa MPPT kontrolom.

Promena referentne vrednosti ulaznog napona vrši se periodično sa periodom  $T_p$  čija se vrednost određuje tako da ulazni napon dostigne prethodno postavljenu referentnu vrednost u okviru jedne periode pri svim atmosferskim uslovima i pri svim opterećenjima na izlazu DC/DC konvertora. Vrednost periode  $T_p$  procenjuje se na osnovu vremena uspona sistema na step promenu referentne vrednosti ulaznog napona u MPPT režimu rada.

DC-DC konvertori su u širokoj upotrebi u fotonaponskim sistemima. Koriste se kao spona između fotonaponskog modula i potrošača. Konvertor mora biti odabran tako da modul radi u tački maksimalne snage kada se promene klimatski uslovi kao i za različite vrednosti rezistivnog potrošača. To znači da DC-DC konvertor mora biti korišćen sa MPPT kontrolerom u cilju smanjenja gubitaka u fotonaponskom sistemu. Da bismo doneli odluku o tome koji konvertor treba koristiti, treba razmotriti sve tri topologije osnovnih DC-DC konvertora i kako klimatski uslovi utiču na komponente samih konvertora. Kapacitivnost i induktivnost komponenata konvertora moraju biti tako dimenzionisane da bi se postigla maksimalna efikasnost konvertora. Optimizacija dizajna konvertora podrazumeva dva principa. Prvi je rad konvertora u kontinualnom režimu (CCM) u ustaljenom stanju, koji se postiže tako što je induktivnost kalema veća od određene granične induktivnosti, koju treba izvesti za svaki od konvertora. Drugi princip predstavlja ograničavanje talasnosti izlaznog napona DC-DC konvertora, što se postiže adekvatnom vrednošću izlaznog kondenzatora, koja treba da ima veću vrednost od određene granične kapacitivnosti za dati konvertor.

Prvo treba razmotriti slučaj kada je fotonaponski modul direktno spregnut sa rezistivnim potrošačem otpornosti  $R_{L1}$  (slika 3.2). Radna tačka prolazi kroz tačku 1. Za drugu vrednost otpornosti potrošača  $R_{L2}$  radna tačka će prolaziti kroz tačku 2. U ovom rasponu otpornosti potrošača, postoji samo jedna tačka za koju će fotonaponski modul raditi u tački maksimalne snage (MPP). To se dešava kada je otpornost potrošača jednaka optimalnoj vrednosti  $R_L = R_{opt}$ . Pošto je u praktičnim situacijama veoma teško odrediti fiksiranu otpornost potrošača, jer se sama radna tačka menja sa promenom klimatskih uslova.



Slika 3.2 Radna tačka solarnog panela za različite vrednosti otpornosti rezistivnih potrošača

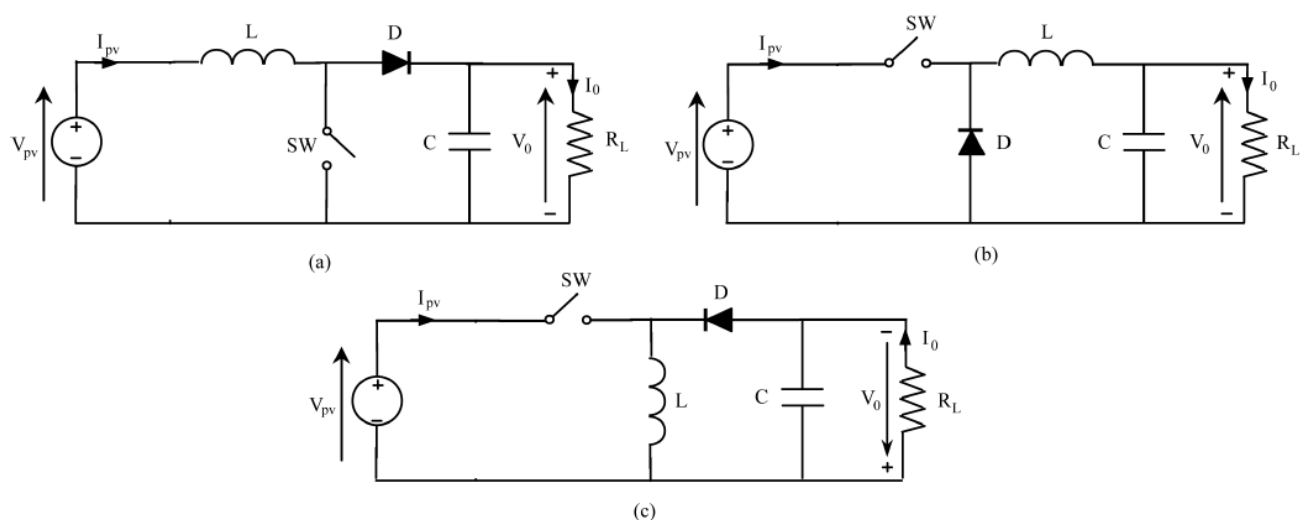
Da bismo prevazišli ovaj problem, moramo da koristimo algoritme za praćenje tačke maksimalne snage (MPPT). MPPT algoritmi mogu da mogu da povećaju efikasnost sistema na čak 97 % kada se pravilno optimizuju. Cilj MPPT algoritma je da prilagodi impedansu potrošača optimalnoj impedansi fotonaponskog modula. Kada se DC-DC konvertor nalazi između fotonaponskog modula i potrošača, radna tačka zavisi od impedanse koju vidi modul ( $R_{in}$ ), koja zavisi od dva parametra:  $R_L$  i faktora ispunjenosti  $D$ . Dakle, pri različitim vrednostima otpornosti potrošača, faktor ispunje  $D$  može da se menja da prilagodi  $R_{in}$  tako što će dostići vrednost  $R_{opt}$  pri različitim klimatskim uslovima.

Tačka maksimalne snage fotonaponskog modula se dinamički menja sa promenom iradijacije i temperature. Stoga, tačka maksimalne snage mora da se traži korišćenjem MPPT algoritma, koji se implementira u vidu MPPT kontrolera.

Optimalna otpornost je u stvari izlazna otpornost fotonaponskog modula i definiše se kao:

$$R_{opt} = \frac{V_{m,pv}}{I_{m,pv}}, \quad (3.1)$$

odnosno predstavlja odnos napona i struje modula u tački maksimalne snage. Kada se  $R_L$  poklopi sa vrednosti  $R_{opt}$  dešava se najveći prenos snage sa solarnog modula ka potrošaču.



Slika 3.3 Pregled osnovnih DC-DC konvertora

Najjednostavniji DC-DC konvertori koje možemo koristiti u fotonaponskom sistemu su buck, boost i buck-boost, čije su električne šeme prikazane na slici 3.3. Ovi konvertori zahtevaju minimalan broj elemenata: jedan kontrolisani prekidač, jednu diodu, jedan kalem i jedan kondenzator. Ovi konvertori ne obezbeđuju galvansku izolaciju između ulaza i izlaza, odnosno nemaju transformator. Korišćenjem ova tri konvertora moguće je obezbediti izlazni napon koji je manji od ulaznog napona, zatiim izlazni napon koji je veći od ulaznog napona, kao i izlazni napon koji je suprotnog znaka od ulaznog napona dok apsolutna vrednost napona može biti i manja i veća od apsolutne vrednosti ulaznog napona. Karakteristike parametara ovih konvertora su date u tabeli 3.1. Ovi izrazi su izvedeni pod pretpostavkom da konvertor uvek radi u kontinualnom režimu i da su komponente koje čine konvertore bez gubitaka.

Konvertor može da radi u dva različita režima rada: sa kontinualnum strujom induktivnosti i diskontinualnom strujom induktivnosti. Kontinualni režim rada (CCM) se dešava kada je struja kalema veća od nule tokom cele periode i ovaj režim rada je poželjan zbog visoke efikasnosti. U diskontinualnom režimu rada (DCM) struja kalema je u okviru periode tokom nekog intervala jednaka nuli. Diskontinualni režim rada nije poželjan jer su dinamičke karakteristike konvertora u ovom režimu smanjene.

Pri projektovanju konvertora je bitno pravilno određivanje induktivnosti kalema da bismo osigurali da kovertor radi u kontinualnom režimu. Induktivnost  $L_{bo}$  je granična vrednost induktivnosti  $L$  za koju, pri faktoru ispunjenosti  $D$ , konvertor radi u kontinualnom režimu. Kapacitivnost  $C$  omogućuje minimizaciju talasnosti izlaznog napona konvertora, pa je  $C_{bo}$  granična kapacitivnost pri kojoj se postiže željena talasnost izlaznog napona za dati faktor ispunjenosti  $D$ .

Parametar	Boost	Buck	Buck-boost
$A_v = \frac{V_o}{V_{pv}}$	$\frac{1}{1-D}$	$D$	$\frac{D}{1-D}$
$A_i = \frac{I_o}{I_{pv}}$	$1-D$	$\frac{1}{D}$	$\frac{1-D}{D}$
$R_{in}$	$(1-D)^2 R_L$	$\frac{R_L}{D^2}$	$\frac{(1-D)^2 R_L}{D^2}$
$L_{bo}$	$\frac{(1-D)^2 D R_L}{2f}$	$\frac{(1-D) R_L}{2f}$	$\frac{(1-D)^2 R_L}{2f}$
$C_{bo}$	$\frac{D V_o}{\Delta V_o R_L f}$	$\frac{(1-D) V_o}{8 \Delta V_o L f^2}$	$\frac{D V_o}{\Delta V_o R_L f}$

Tabela 3.1. Pregled relevantnih jednačina za osnovne DC-DC konvertore.

Dva najčešće korišćena načina kontrole DC/DC konvertora su pomoću impulsne širinske modulacije (PWM), odnosno impulsne frekvencijske modulacije (PFM). Prekidački konvertori na bazi PWM su u širokoj upotrebi, ali oni imaju manju efikasnost kod malih potrošača i u takvim primenama se predlaže i korišćenje impusne frekvencijske modulacije. Kod PWM modulacije je frekvencija konstantna, a aktivni nivo impulse je promenljivog trajanja i zavisi od potrošača.

PWM je tehnika kontrolisanja analognih kola preko digitalnih izlaza procesora (mikrokontrolera). Amplituda PWM signala je najčešće fiksna i nije od značaja, ali se u nekim slučajevima može koristiti za prenos dodatnih informacija. U opštem smislu PWM predstavlja način digitalnog kodiranja nivoa analognih signala, a korišćenjem brojača visoke rezolucije, pravougaoni signal se moduliše tako da predstavlja specifični nivo analognog signala.

Analogni naponi i struje se mogu koristiti za direktnu kontrolu uređaja, to je jako jednostavan i jasan način kontrole, ali nije uvek praktičan i isplativ. Analogna kontrola ima



razne mane kao što su velike dimenzije komponenata i njihova težina, promenljive karakteristike komponenata tokom vremena, velika potrošnja, grejanje, osetljivost na šum i sl. Digitalnim kontrolisanjem analognih kola, cena sistema za kontrolu i potrošnja energije se mogu drastično smanjiti jer PWM predstavlja ekonomičan, energetske efikasan i način imun na šum za kodiranje analognih signala. Mnogi današnji mikrokontroleri imaju ugrađene PWM periferije što dodatno olakšava implementaciju. Korišćenjem čisto digitalnog signala efekat šuma se minimalizuje, što je velika prednost u odnosu na analogni prenos i kontrolu.

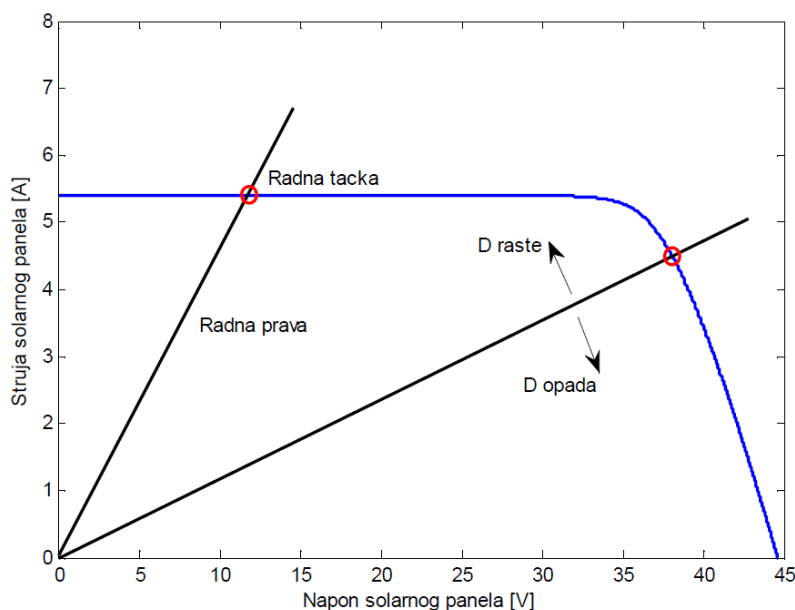
Temperatura ćelije u okviru jednog solarnog panela je manja pri manjoj iradijaciji. Takođe, temperatura i iradijacija se kontinuirano menjaju tokom dana, što za posledicu ima kontinuiranu promenu tačke maksimalne snage, pa faktor ispunjenosti mora stalno da se prilagođava da bi kontroler uspešno pratio tačku maksimalne snage. To takođe znači da će se granične vrednosti kapacitivnosti i induktivnosti ( $C_{bo}$ ,  $L_{bo}$ ) takođe promeniti jer su one odabrane za određenu vrednost faktora ispunjenosti, čime će konvertor raditi u diskontinualnom režimu i verovatno sa velikom talasnošću izlaznog napona, čime se smanjuje efikasnost konvertora.

### 3.1 Poremeti i prati (Perturb and Observe) algoritam

Ovaj algoritam se zasniva na stalnom poremećaju položaja radne tačke solarnog panela, s ciljem njenog približavanja tački maksimalne snage. Rezultat P&O algoritma je vrednost faktora ispunjenosti  $D$ , koji se vodi na kolo za upravljanje PWM signalima pomoću koga se reguliše rad DC-DC konvertora. Kada se koristi Buck-Boost DC-DC konvertor, radna prava, koja u preseku sa strujno-naponskom karakteristikom solarnog panela određuje radnu tačku, zavisi od dobijenog faktora ispunjenosti  $D$ ,

$$I_S = \frac{1}{R_o} \left( \frac{D}{1-D} \right)^2 V_S \quad (3.2)$$

Veličine  $I_S$  i  $V_S$  predstavljaju redom struju i napon solarnog panela, a  $R_o$  predstavlja otpornost opterećenja. Automatskim podešavanjem faktora ispunjenosti, 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 slici 3.4 pokazan je uticaj faktora ispunjenosti  $D$  na položaj radne tačke solarnog panela. Da bi se radna tačka pomerala ka tački maksimuma snage solarnog panela, mora se obezbediti stalno ažuriranje vrednosti faktora ispunjenosti. Merenjem struje i napona solarnog panela određuje se vrednost njegove trenutne snage, u trenutku  $k\Delta T$ , gde je  $\Delta T$  period ažuriranja faktora ispunjenosti. Trenutna snaga se poredi sa snagom izračunatom u prethodnom trenutku  $(k-1)\Delta T$ . Prati se promena izlazne snage do koje dolazi promenom napona, slika 3.5. Ukoliko se snaga povećava promenom napona, nastavlja se sa promenom napona u istom smeru, u suprotnom, ukoliko se usled promene napona snaga smanjila, napon se menja u suprotnom smeru. U zavisnosti od znaka promene snage i napona solarnog panela, faktor ispunjenosti se povećava ili smanjuje za unapred definisanu vrednost  $\Delta D$ . 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, što predstavlja manu algoritma.



Slika 3.4 Zavisnost položaja radne tačke solarnog panela od faktora ispunjenosti  $D$ .

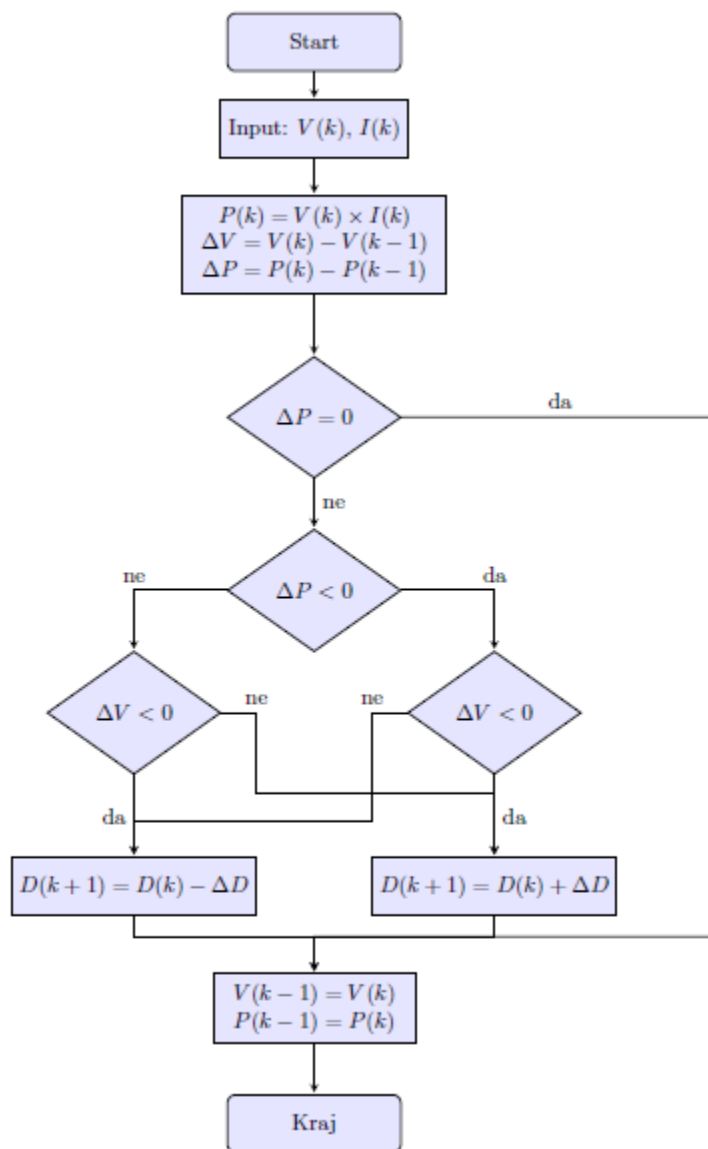
Najvažniji parametar koji utiče na efikasnost P&O algoritma je korak promene faktora ispunjenosti konvertora, koji direktno utiče na korak promene napona. Pri malom koraku, moguće je postići veliku preciznost u mirnoj radnoj tački, po cenu sporog reagovanja na promene maksimalne snage usled promene temperature i iradijanse. U slučaju velikog koraka, algoritam će brzo reagovati na promene, ali po cenu značajnih odstupanja u mirnoj radnoj tački. U opštem slučaju, može se uzeti neki srednji korak, koji bi dao solidne rezultate u bilo kom slučaju (ali optimalne rezultate ni u kom). Najveća mana algoritma je što usled brzih promena iradijanse ne može ispravno da proceni da li je promena snage posledica promene napona ili promene iradijanse, tako da se može desiti da algoritam izvrši nekoliko uzastopnih promena u smeru suprotnom od očekivanog i potpuni gubitak sinhronizacije sa maksimalnom vrednošću.

Zbog svoje jednostavnosti P&O algoritam je lako implementirati na različitim tipovima hardvera, kao što su mikrokontroleri, DSP procesori, što predstavlja njegovu veliku prednost. Međutim, osnovni nedostatak P&O algoritma je što je spor.

Na primer, posmatrajući sliku 3.5, ako se povećava napon solarnog panela, povećava se i izlazna snaga, pa sistem povećava radni napon sve dok izlazna snaga ne počne da opada. Kada se ovo desi, napon se spušta da bi se vratio na maksimalnu vrednost. Izlazna snaga osciluje oko vrednosti  $P_{MPP}$  sve dok se ne stabilizuje.

Kako bi se otklonile ove mane, jedno od mogućih rešenja je modifikovanje algoritma i uvođenje neke dodatne kontrolne logike kojom bi korak promene faktora ispunjenosti bio promenljiv tokom algoritamske obrade, ili kojom bi se uzeo u obzir neki dodatni parametar (npr. uticaj temperature i iradijanse).

U modifikovanom Perturbe & Observe algoritmu se mogu koristiti senzori za merenje temperature i iradijanse, kako bi se odredilo da li je do promene snage došlo samo usled promene napona ili su se promenile i vremenske prilike. Tako mogu da se izbegnu perturbacije u smeru suprotnom od očekivanog koje su se povremeno javljale kod nemodifikovanog algoritma. U statičkom režimu rada rezultati su identični kao kod običnog algoritma, a i u dinamičkom režimu običan algoritam ima jednaku brzinu kao i modifikovani. Stoga zaključujemo da se modifikovani algoritam, čiji su troškovi instalacije neznatno veći zbog neophodnosti ugradnje senzora za merenje temperature i iradijanse, može naći primenu u specifičnim uslovima brzopromenljivih vremenskih prilika.



Slika 3.5 Dijagram toka P&amp;O algoritma

### 3.1.1. Delta perturbe and observe (dP&O)

Primenom dP&O MPPT algoritma otklanja se nedostatak P&O MPPT algoritma koji se ogleda u činjenici da je potrebno ostvariti kompromis između brzine odziva sistema na promenu atmosferskih uslova i amplitude oscilacija ulaznog napona u ustaljenom stanju.

Ovaj algoritam se zasniva na periodičnoj promeni referentne vrednosti ulaznog napona za promenljivu vrednost koraka prema sledećoj jednačini:

$$V_{in\_ref}[k+1] = V_{in\_ref}[k] + \Delta V_{in\_ref}[k] = V_{in\_ref}[k] + M \cdot \frac{P_{in}[k] - P_{in}[k-1]}{V_{in}[k] - V_{in}[k-1]}$$

Vrednost parametra M određuje se na osnovu sledeće jednačine:

$$M \cdot \frac{\Delta P_{in}}{\Delta V_{in}} \Big|_{max} = \Delta V_{in\_ref\_max},$$

gde su:

$\left. \frac{\Delta P_{in}}{\Delta V_{in}} \right|_{max}$  - maksimalna vrednost izvoda ulazne snage po ulaznom naponu koja se ostvaruje pri samom pokretanju algoritma,

$\Delta V_{in\_ref\_max}$  - usvojena maksimalna vrednost koraka promene referentne vrednosti ulaznog napona.

Osobina dP&O MPPT algoritma jeste da korak promene referentne vrednosti ulaznog napona zavisi od izvoda ulazne snage po ulaznom naponu. Određivanjem M parametra na opisani način postiže se povećanje brzine odziva sistema na promenu atmosferskih uslova s obzirom da je korak promene referentne vrednosti ulaznog napona veći kada je veći izvod ulazne snage po ulaznom naponu, odnosno kada se radna tačka nalazi dalje od tačke u kojoj se ostvaruje maksimalna snaga solarnog panela. Osim prethodnog, izborom M parametra na opisani način postiže se i povećanje efikasnosti sistema u ustaljenom stanju s obzirom da je korak promene referentne vrednosti ulaznog napona manji kada je manji izvod ulazne snage po ulaznom naponu, odnosno kada se radna tačka nalazi u bliskoj okolini tačke u kojoj se ostvaruje maksimalna snaga solarnog panela.

### 3.1.2. Full Curve Evaluacija (FCE)

Putem FCE MPPT algoritma uklanja se nedostatak P&O MPPT algoritma koji se ogleda u činjenici da pri naglim promenama atmosferskih uslova može doći do pogrešnog određivanja smera promene referentne vrednosti ulaznog napona, odnosno do udaljavanja sistema od tačke u kojoj se ostvaruje maksimalna snaga solarnog panela.

Prethodno opisani nedostatak P&O MPPT algoritma otklanja se na taj način što se smer promene referentne vrednosti ulaznog napona u narednom koraku određuje na osnovu ispitivanja nagiba krive zavisnosti ulazne snage od ulaznog napona solarnog panela u tekućem koraku prema sledećim pravila:

-ukoliko je

$$P_{in}(V_{in\_ref}[k] - \Delta V_{in\_eval}) > P_{in}(V_{in\_ref}[k]) \text{ i}$$

$$P_{in}(V_{in\_ref}[k] + \Delta V_{in\_eval}) \leq P_{in}(V_{in\_ref}[k]), \text{ onda je}$$

$$V_{in\_ref}[k + 1] = V_{in\_ref}[k] - \Delta V_{in\_ref}.$$

-ukoliko je

$$P_{in}(V_{in\_ref}[k] - \Delta V_{in\_eval}) \leq P_{in}(V_{in\_ref}[k]) \text{ i}$$

$$P_{in}(V_{in\_ref}[k] + \Delta V_{in\_eval}) > P_{in}(V_{in\_ref}[k]), \text{ onda je}$$

$$V_{in\_ref}[k + 1] = V_{in\_ref}[k] + \Delta V_{in\_ref}.$$

-inače je

$$V_{in\_ref}[k + 1] = V_{in\_ref}[k],$$

pri čemu su:

$P_{in}(V_{in\_ref}[k] \pm \Delta V_{in\_eval})$  - Snage solarnog panela u dvema tačkama u kojima se vrši ispitivanje nagiba krive zavisnosti snage solarnog panela od napona,  $P_{in}(V_{in})$ ,

$P_{in}(V_{in\_ref}[k])$  - Snaga solarnog panela u  $k$ -tom koraku,

$V_{in\_ref}[k]$  i  $V_{in\_ref}[k + 1]$  - referentne vrednosti ulaznog napona u  $k$ -tom i  $(k + 1)$ -vom koraku, respektivno,

$\Delta V_{in\_eval}$  - korak promene referentne vrednosti ulaznog napona za potrebe ispitivanja nagiba krive zavisnosti  $P_{in}(V_{in})$ , i

$\Delta V_{in\_ref}$  - korak promene referentne vrednosti ulaznog napona za koga važi  $\Delta V_{in\_ref} > \Delta V_{in\_eval}$ .

Vremenski period u okviru koga se vrši ispitivanje nagiba krive zavisnosti ulazne snage od ulaznog napona mora biti kraće od brzine promene atmosferskih uslova, kako bi sve tri tačke u kojima se vrši ispitivanje ( $V_{in\_ref}[k] \pm \Delta V_{in\_eval}$  i  $V_{in\_ref}[k]$ ) pripadale krivoj koja odgovara za iste atmosferske uslove.

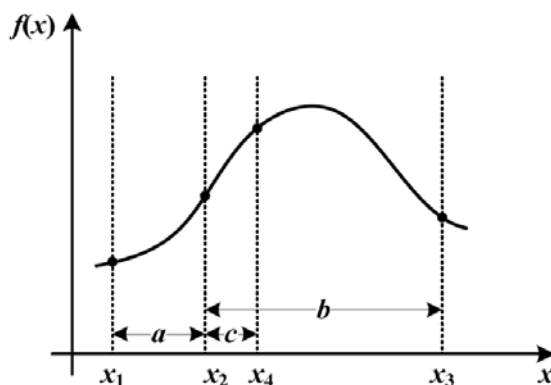
S obzirom da je korak promene referentne vrednosti ulaznog napona  $\Delta V_{in\_ref}$  konstantan, jasno je da se, kao i kod P&O algoritma, morao uspostaviti kompromis između brzine odziva sistema na promenu atmosferskih uslova i amplitude oscilacija ulaznog napona u ustaljenom stanju.

Osim prethodnog, nedostatak FCE algoritma ogleda se i u smanjenju brzine odziva sistema na promene atmosferskih uslova koje potiče usled toga što se pre svake izmene referentne vrednosti troši izvesno vreme na ispitivanje nagiba krive zavisnosti ulazne snage od ulaznog napona.

### 3.2 GSS algoritam

Jedan od novih MPPT algoritama u kome se koristi numerički metod traženja ekstrema funkcije je metod zlatnog preseka, skraćeno GSS (engl. *Golden Section Search*). Metod zlatnog preseka je poznati numerički metod koji se često koristi u algoritmima za optimizaciju određenih parametara.

Za funkciju kažemo da je unimodalna ukoliko na posmatranom intervalu argumenata sadrži samo jedan ekstremum (minimum ili maksimum). Algoritam zlatnog preseka je tehnika za pronalaženje ekstremuma unimodalne funkcije naizmeničnim sužavanjem intervala u kome se po pretpostavci ekstremum nalazi. Algoritam je dobio naziv po tome što računa vrednosti funkcije u tri tačke, čija rastojanja formiraju tzv. zlatni presek. Rad GSS algoritma za traženje maksimuma unimodalne funkcije  $f(x)$  može se objasniti na osnovu slike 3.6 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 3.6 Traženje maksimuma unimodalne funkcije  $f(x)$  pomoću GSS algoritma.

Početne tri tačke od kojih algoritam polazi su  $x_1$ ,  $x_2$  i  $x_3$ . Sledeći korak je računanje vrednosti funkcije  $f(x)$  u tačkama  $x_2$  i  $x_4$ . Nakon toga, porede se izračunate vrednosti funkcije

$f(x_4)$  i  $f(x_2)$ . Ako je  $f(x_4) > f(x_2)$ , kao na slici 3.6, 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 vrednosti, algoritam prestaje sa radom. Sa slike 3.6 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 obezbedilo, tačka  $x_4$  mora biti jednaka:

$$x_4 = x_1 + x_3 - x_2 \quad (3.3)$$

Međutim, ostaje pitanje gde 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 uvek konstantnim, izbegava 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 sledeći uslov:

$$\frac{b-c}{c} = \frac{b}{a} = \frac{a}{c} \quad (3.4)$$

Rešavajući prethodnu jednačinu, dobije se da je odnos  $b/a = \varphi$  jednak:

$$\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.618, \quad (3.5)$$

što predstavlja tzv. zlatni odnos.

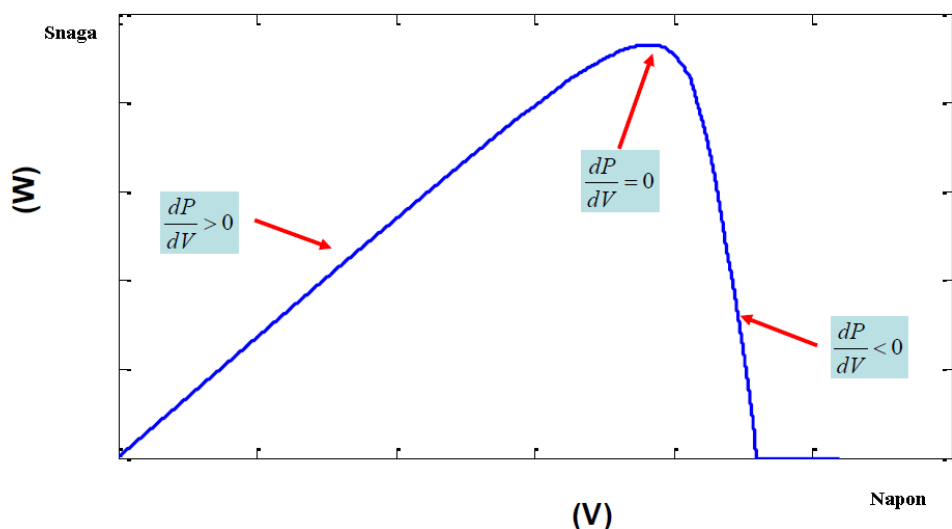
Koristeći odnos  $b/a = \varphi$  lako se dobije da je tačka  $x_2$  u početnom koraku (prvoj iteraciji) jednaka:

$$x_2 = \frac{x_1\varphi + x_3}{1+\varphi} \quad (3.6)$$

Opisani GSS algoritam se može upotrebiti za pronalaženje tačke maksimuma snage solarnog panela. U odnosu na sliku 3.6 i opisanu proceduru GSS algoritma, funkcija  $f(x)$  predstavlja snagu solarnog panela  $P_S$ , a njen argument  $x$  faktor ispunje D. Samo za jednu vrednost faktora ispunje D iz intervala  $[0, 1]$  postoji samo jedna tačka maksimuma snage solarnog panela, tako da je funkcija  $P_S(D)$  na ovom intervalu unimodalna i GSS algoritam se može primeniti. Primena GSS algoritma u MPPT postupku za solarne panele ilustrovana je na slici 15.

Početni interval faktora ispunje D je interval  $[0, 1]$ , koji predstavlja početni interval  $[x_1, x_3]$ . Nakon toga, računaju se vrednosti faktora ispunjenosti  $D=x_2$  i  $D=x_4$  pomoću (3.6) i (3.3), respektivno, i mere se i pamte njima odgovarajuće snage solarnog panela. Nakon svake iteracije sužava se interval faktora ispunjenosti u kome se nalazi maksimum snage solarnog panela. Algoritam kao rezultat daje vrednost faktora ispunje  $D=x_4$  nakon konačnog broja iteracija. Ukoliko se dese brze promene intenziteta sunčevog zračenja, potrebna vrednost faktora ispunjenosti 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 leve i desne strane, za određeni iznos. Nakon toga, GSS algoritam treba ponovo da počne sa radom, čime se računa nova vrednost faktora ispunje.





Slika 3.8. Kriva zavisnosti snage od napona solarnog generatora.

Na osnovu slike 3.8 se dolazi do osnove algoritma inkrementalne konduktanse, slika 3.9:

- u tački maksimalne snage (MPP) je  $\frac{dP}{dV} = 0$ .
- desno od MPP je  $\frac{dP}{dV} < 0$ ,
- levo od MPP je  $\frac{dP}{dV} > 0$ .

Infinitezimalne vrednosti  $dI$ ,  $dV$  i  $dP$  ne mogu biti izračunate, ali mogu biti aproksimirane vrednostima  $\Delta I$ ,  $\Delta V$ ,  $\Delta P$ :  $\Delta I = I_p - I_n$ ,  $\Delta V = V_p - V_n$ ,  $\Delta P = P_p - P_n$ , gde se indeks p odnosi na prethodno izmerenu vrednost, a indeks n na novoizmerenu vrednost.

Budući da je pri maksimalnoj snazi

$$0 = V \frac{dI}{dV} + I \frac{dV}{dV} \quad (3.8)$$

iz prethodne jednačine se dobija

$$\frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV}. \quad (3.9)$$

Ova jednačina izražava jednakost statičke provodnosti i dinamičke provodnosti (nagib I-V krive solarnog generatora) tj. u tački maksimalne snage apsolutna vrednost konduktanse mora biti jednaka apsolutnoj vrednosti inkrementa konduktanse.

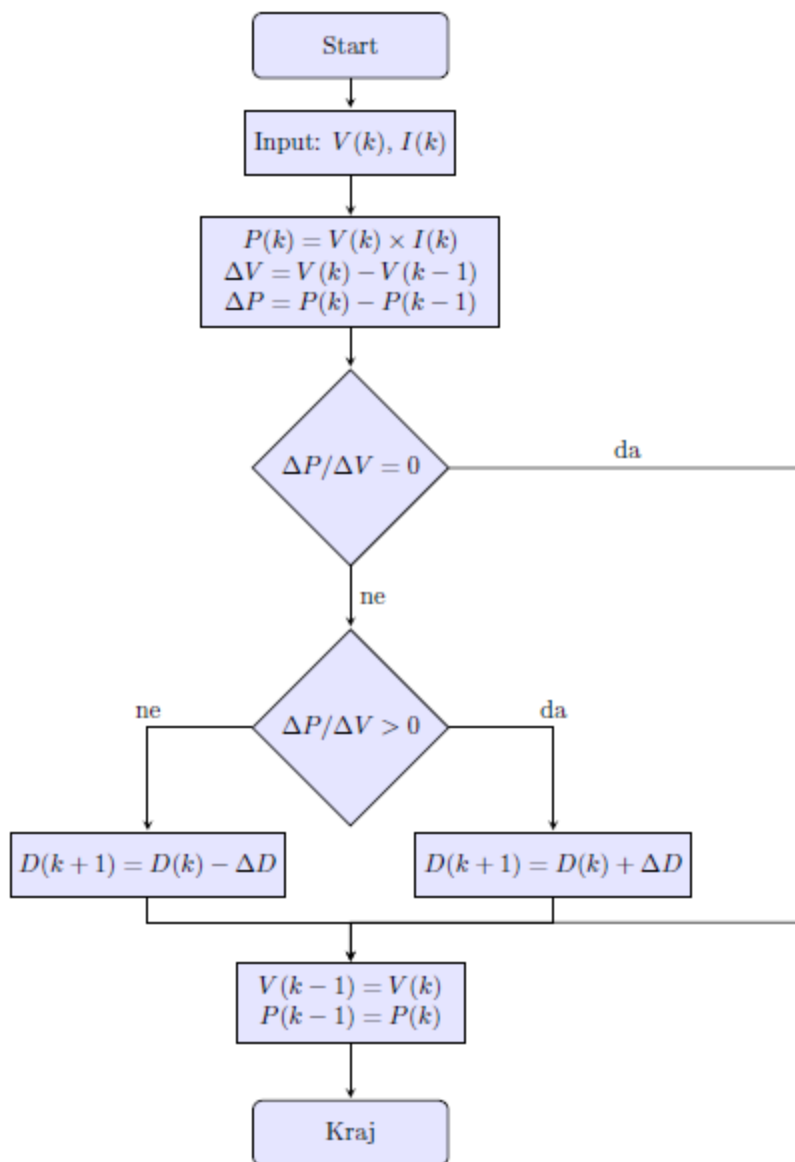
Na osnovu prethodnog se zaključuje da važi

- $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$  kada je radna tačka levo od MPP
- $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$  kada je radna tačka u MPP
- $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$  kada je radna tačka desno od MPP

Praćenjem trenutne vrednosti struje, napona i inkrementalne konduktanse moguće je praćenje tačke maksimalne snage. Moguće je i praćenje nekih drugih parametara, poput  $P$ ,  $dP/dt$ ,  $dV/dt$ ,  $dI/dt$ . Iako se algoritam zasniva na istim principima kao i Perturbe & Observe,



u nekim svojim varijacijama postiže bolje rezultate, naročito u uslovima brzo promenljivih vremenskih prilika, ali ima veću kompleksnosti izračunavanja.



Slika 3.9. Dijagram toka metoda inkrementalne konduktanse.

### 3.3.1. Ripple korelacija

Ripple korelacija predstavlja jednu od mogućih varijanti IC algoritma. Uspostavlja se veza između  $dP/dt$  i  $dV/dt$ , odnosno  $dP/dt$  i  $dI/dt$ , kako bi se  $dP/dt$  približio nuli, što važi u tački maksimalne snage. Može se pokazati da su proizvodi  $\frac{dP}{dt} \frac{dV}{dt}$  i  $\frac{dP}{dt} \frac{dI}{dt}$  pozitivni levo od

MPP, negativni desno, a jednaki nuli u MPP. Kriterijumi koji se koriste identični su onima kod Inkrementalne konduktanse samo su izraženi na drugi način, tako da ovaj algoritam prate iste vrline i mane kao i algoritam inkrementalne konduktanse (IC). Pored ovoga, važno je napomenuti da su niske prekidačke učestanosti potrebne, kako bi se detektovao dovoljno veliki ripple na osnovu koga se može doneti ispravna algoritamska odluka.

### 3.3.2. $\frac{dP}{dV}$ i $\frac{dP}{dI}$ feedback

Kod ove dve tehnike izračunava se nagib P-V odnosno P-I krive i ta informacija se prosledjuje kontroleru koji povratnom spregom ima zadatak da tu vrednost nagiba približi nuli, pošto je ona jednaka nuli u tačkici maksimalne snage. I ovu implementaciju karakterišu iste osobine kao i klasičan IC algoritam.

### 3.3.3. Slide Control

U primeni ovog algoritma koristi se buck-boost konvertor čija je prekidačka funkcija  $u$  definisana kao

$$u = \begin{cases} 0, & M \geq 0 \\ 1, & M < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

gde je

$$M = \frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I. \quad (3.11)$$

Algoritam se implementira primenom mikrokontroleru.

## 3.4. Hibridni MPPT algoritmi

S obzirom da se za MPPT kontrolu koriste mikrokontroleri i da većina algoritama ima neki nedostatak, u praksi se najčešće koriste hibridni MPPT algoritmi, koji predstavljaju kombinacije prethodno opisanih MPPT algoritama.

Najčešće je, zbog svoje brzine, u osnovi P&O MPPT algoritam. Jedan od načina je da se u hibridnom MPPT algoritmu koristi promenljiva vrednost koraka promene referentne vrednosti ulaznog napona na isti način kao i kod dP&O MPPT algoritma. Prethodnim se istovremeno postiže i povećanje brzina odziva sistema na promenu atmosferskih uslova i smanjenje oscilacija ulaznog napona u ustaljenom stanju, odnosno povećanje efikasnosti sistema u ustaljenom stanju.

Ovaj hibridni MPPT algoritam koristi isti postupak za određivanje smera promene referentne vrednosti ulaznog napona kao i kod FCE MPPT algoritma. Prethodnim se otklanja mogućnost da dođe do pogrešnog određivanja smera promene referentne vrednosti ulaznog napona u uslovima u kojima postoje nagle promene atmosferskih uslova, odnosno sprečava se pojava udaljavanja sistema od tačke u kojoj se ostvaruje maksimalna snaga solarnog panela. Promena referentne vrednosti ulaznog napona prema ovom hibridnom MPPT algoritmu ne vrši se strogo periodično sa periodom čija se vrednost određuje tako da ulazni napon dostigne prethodno postavljenu referentnu vrednost u okviru jedne periode pri svim atmosferskim uslovima i pri svim opterećenjima na izlazu DC/DC konvertora. Promena referentne vrednosti ulaznog napona vrši se u istom trenutku u kome ulazni napon dostigne prethodno postavljenu referentnu vrednost. Aperiodičnom promenom referentne vrednosti ulaznog napona postiže se najveća brzina odziva sistema za date atmosferske uslove i za dato opterećenje na izlazu DC/DC konvertora. Opisanim načinom aperiodične promene referentne vrednosti ulaznog napona smanjuje se uticaj usporavanja brzine odziva sistema na promene atmosferskih uslova koji potiče usled toga što se pre svake izmene referentne vrednosti troši izvesno vreme na ispitivanje nagiba krive zavisnosti ulazne snage od ulaznog napona.

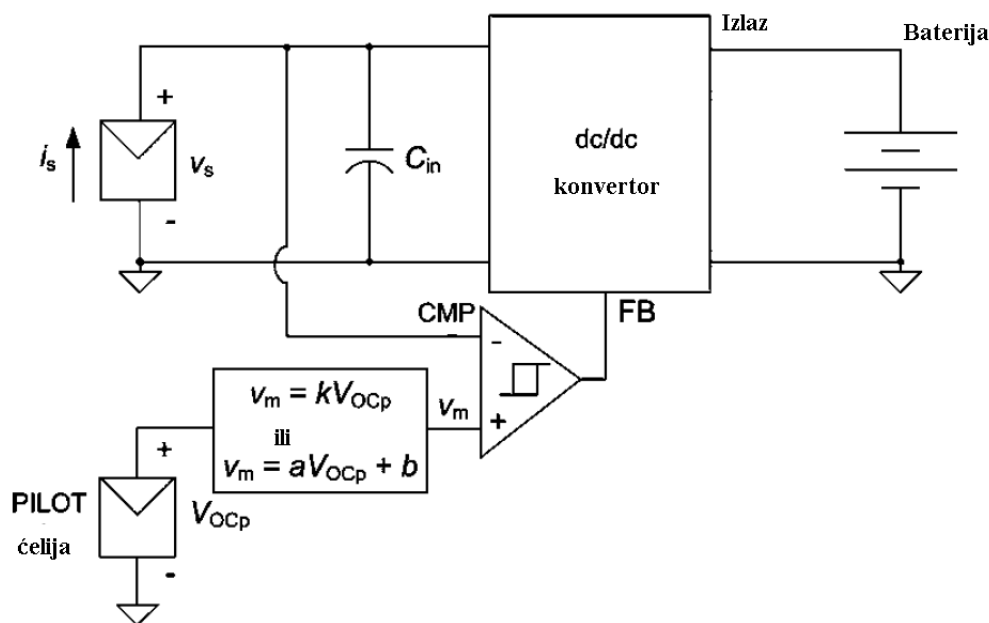
### 3.5. Frakcioni napon i frakciona struja

Postoje dve vrste MPPT algoritama, direktni i indirektni. Kod direktnih (true-MPPT) je uvek prisutna informacija o snazi na izlazu solarne ćelije, odnosno na ulazu DC-DC konvertora. Nasuprot njima indirektni MPPT algoritmi rade sa sistemom u otvorenoj sprezi, a koriste podatke u otvorenoj sprezi i matematičke funkcije za procenu tačke maksimalne snage. Primećeno je da postoji približno linearna relacija između napona u tački maksimalne snage  $V_{MPP}$  i napona otvorene veze  $V_{OC}$

$$V_{MPP} = k_1 V_{OC}. \quad (3.12)$$

Tokom kratkotrajnog prekida rada kola, meri se napon praznog hoda  $V_{OC}$ , a radni napon se izračunava prema (3.12.), i ovaj proces se periodično ponavlja. Iako je ovaj metod na prvi pogled jednostavan, problem se javlja prilikom preciznog određivanja koeficijenta proporcionalnosti  $k_1$  čije se vrednosti kreću u opsegu od 0.65 do 0.85, tako da radna tačka koja će biti postignuta primenom ovog algoritma ne predstavlja stvarnu MPP već samo njenu aproksimaciju. Takode, problem predstavlja nemogućnost praćenja kontinualnih promena iradijancije, poput promena sa konstantnim nagibom, usled nemogućnosti kontinuiranog izračunavanja napona  $V_{MPP}$ . Ipak, zbog izuzetne jednostavnosti, algoritam često nalazi svoju primenu. Napona praznog hoda se može određivati i pomoću pilot ćelije, neopterećene solarne ćelije istog tipa, kao što je prikazano na slici 3.10.

Još jedna metoda LOCV (Linear Open Circuit Voltage) je zasnovana na osnovu estimacije maksimalne tačke korisne snage pomoću linearne veze napona otvorene veze i MPPT napona.



Slika 3.10. Blok šema implementacije algoritama sa frakcionim naponom.

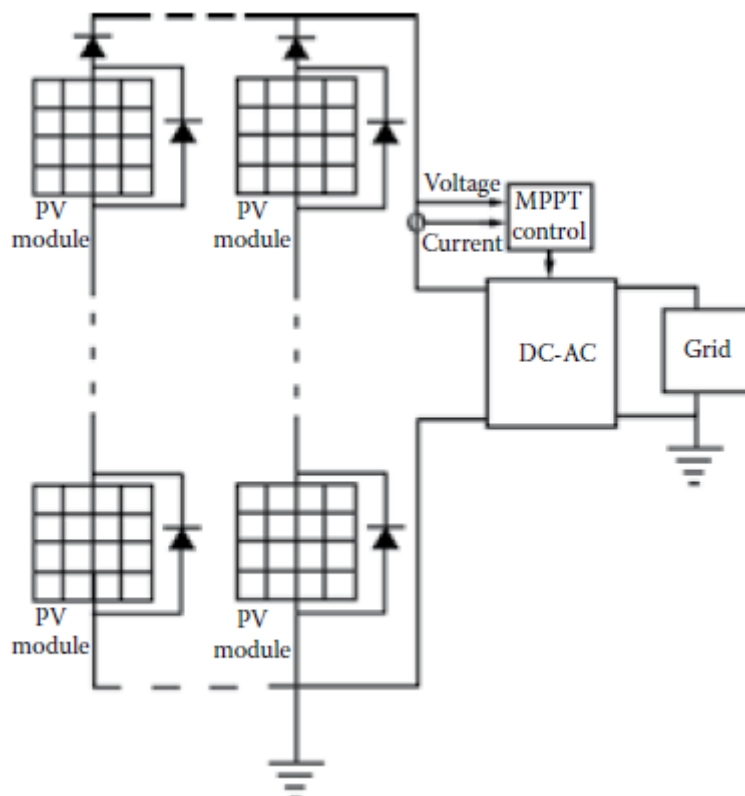
Slično kao kod algoritma koji koristi frakcioni napon, primećeno je da postoji približno linearna relacija između struje u tački maksimalne snage  $I_{MPP}$  i struje kratkog spoja  $I_{SC}$

$$I_{MPP} = k_2 I_{SC}. \quad (3.13)$$

Prednost indirektnih MPPT metoda u odnosu na direktne je u jednostavnosti i povećanoj efikasnosti. Nedostaci su u nedostatku povratne sprege po izlaznoj snazi i nemogućnosti praćenja snage u promenljivim uslovima parametara ambijenta.

#### 4. DISTRIBUIRANO PRAĆENJE TAČKE MAKSIMALNE SNAGE

Fotonaponski sistemi obično primenjuju metode praćenja tačke maksimalne snage na nivou polja (FMPP), to je zapravo praćenje tačke maksimalne snage (karakteristike zavisnosti snage od napona) celog polja koje se sastoji od paralelno vezanih fotonaponskih nizova, kao na slici 4.1. U slučaju smetnji, zbog oblaka, senki, prašine, starenja i slično, karakteristika zavisnosti snage od napona fotonaponskog polja može imati više od jednog maksimuma, što je posledica primene *bypass* dioda, pa se može desiti da MPPT algoritam ne uspe da obavi svoj zadatak i da dođe do smanjenja efikasnosti sistema. Čak i kada FMPP uspe da uhvati apsolutnu maksimalnu snagu polja, sa smetnjama na nekim njegovim delovima, ta snaga je manja od sume svih maksimalnih snaga koje dolaze od svakog dela polja ponaosob.



Slika 4.1 - Fotonaponski sistem priključen na mrežu sa DC/AC konvertorom.

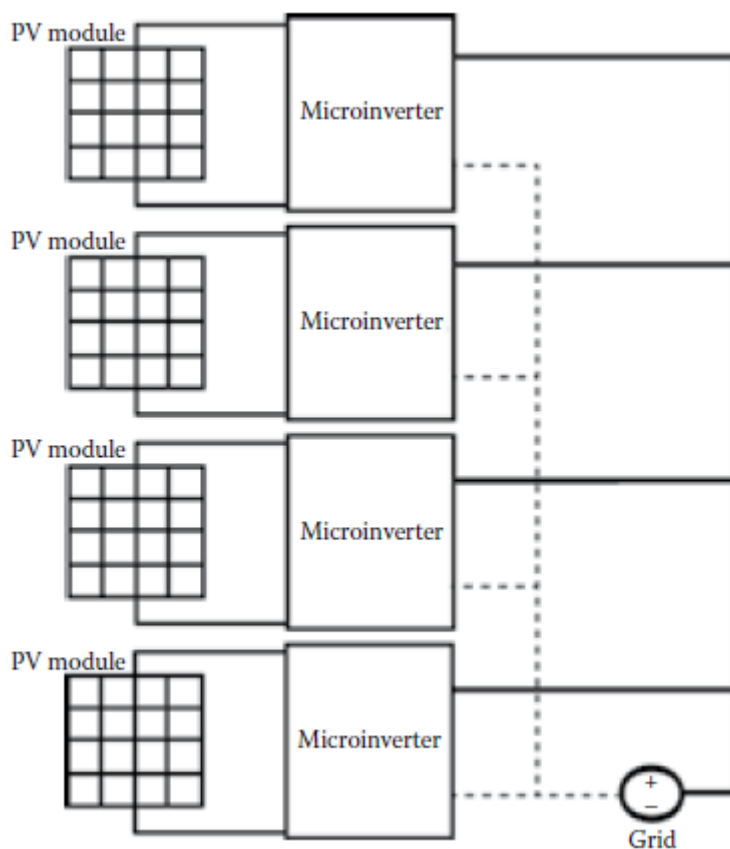
Rešenje za nedostatke fotonaponskih polja koja rade u neravnomernim uslovima je distribuirano praćenje tačke maksimalne snage (DMPPT). Koriste se dva pristupa, prvi se zasniva na primeni DC/AC konvertora po modulu, koji se nazivaju mikroinverterima i posebnim praćenjem tačke maksimalne snage za svaki modul. Drugi pristup se zasniva na primeni DC/DC konvertora koji prate tačku maksimalne snage za svaki modul i imaju centralizovani inverter.

##### 4.1. Distribuirano praćenje tačke maksimalne snage primenom mikroinvertera

Mikroinverter je uređaj koji konvertuje jednosmernu snagu iz jednog fotonaponskog modula u naizmjeničnu snagu, koja odgovara električnoj mreži, i obavlja praćenje tačke maksimalne snage za taj modul. Na slici 4.2 prikazan je način povezivanja mikroinvertera sa PV modulima i mrežom.

Prednosti korišćenja mikrokontrolera su te što skoro da nema gubitaka fotonaponske energije zbog neravnomernih uslova u kojima se nalaze delovi polja, sistem je moguće veoma lako proširiti, paralelnim dodavanjem mikroinvertera na naizmjeničnoj strani, treća prednost je što svaki modul radi nezavisno, tj. ako jedan otkáže, ostali nastavljaju da obezbeđuju snagu. Četvrta prednost je mala veličina sistema, koriste se standardni instalacioni materijali za naizmjenične sisteme, što

smanjuje cenu sistema i materijala, nema potrebe za nizovima dioda, tako da nema gubitaka na diodama.



Slika 4.2 - Povezivanje mikroinvertora sa fotonaponskim modulima i mrežom.

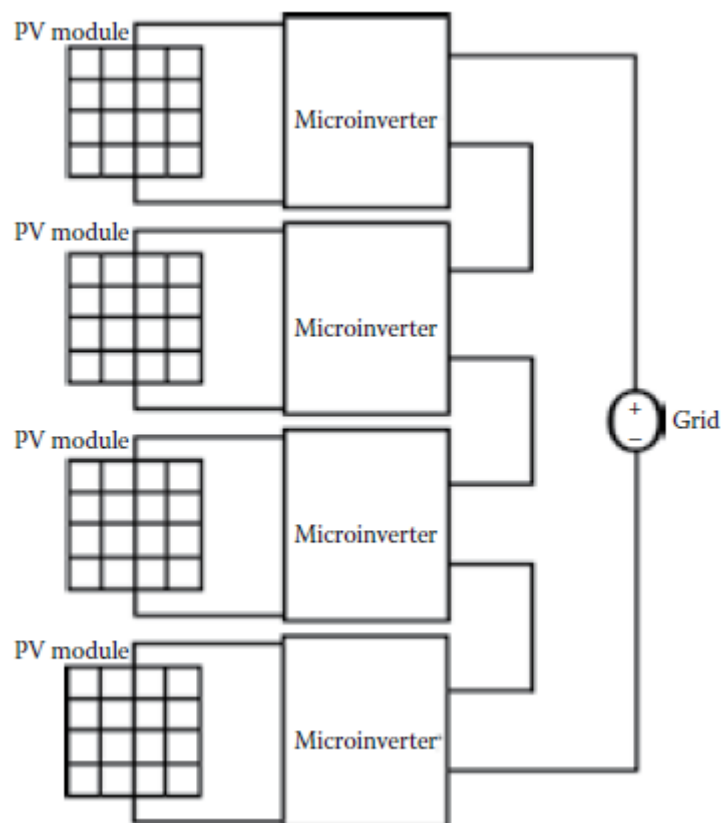
Nedostaci postoje, nizak nivo snage (150W - 250W), što u velikoj meri utiče na cenu, kako je cena veća po kWh što je niži nivo snage koji se proizvodi. Da bi se smanjila cena, pribegava se što masovnijoj proizvodnji. Još jedna poteškoća se javlja zbog neophodnosti povećanja napona sa niskog nivoa na izlazu iz modula do visokog nivoa naizmenične mreže, koji za Evropu iznosi 230Vrms. Problem postoji i u veku trajanja pojedinih delova. Smatra se da PV modul ima vek trajanja od oko 20 godina, a vremenski uslovi u velikoj meri utiču na to. Od svih pasivnih ili aktivnih elemenata, elektrolitski kondenzatori najpre otkazuju, sa starenjem kod njih se povećava i ekvivalentna serijska otpornost (ESR) i sa njom gubici. Iz tog razloga se kod invertorskih arhitektura koje ne zahtevaju visoke kapacitivnosti, koristi film tehnologija, koja obezbeđuje duži vek trajanja, dobru toplotnu i električnu stabilnost i manji ESR.

Naizmenični modul je kombinacija jednog fotonaponskog modula i jednog DC/AC konvertora, mikroinvertora, koja konvertuje svetlost u naizmeničnu snagu kada je priključena paralelno na mrežu.

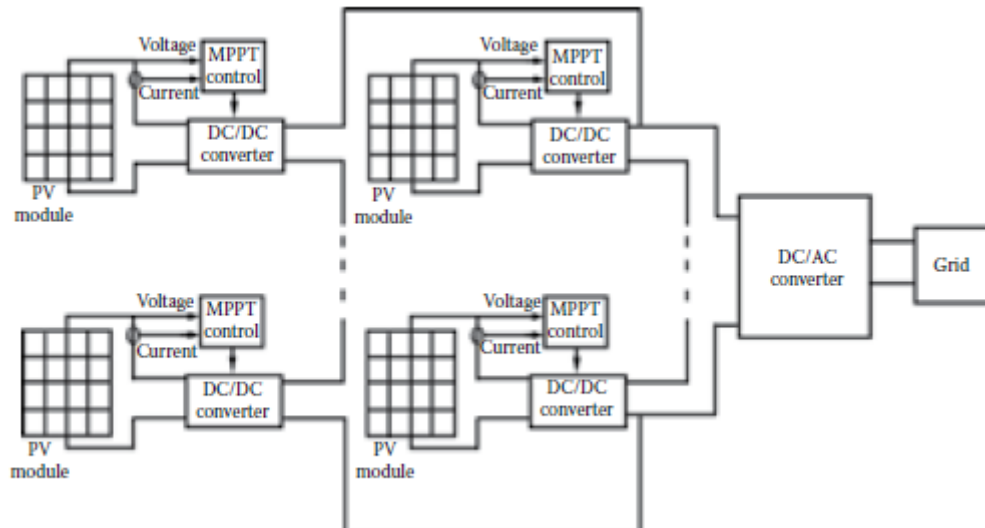
U teoriji, redna veza izlaznih portova mikroinvertora u cilju dobijanja 230V naizmeničnog napona je takođe moguća, slika 4.3. Međutim, još uvek ne postoje komercijalni uređaji koji koriste ovakav pristup.

#### 4.2. Distribuirano praćenje tačke maksimalne snage primenom DC/DC konvertora

Ovo je drugi način kojim se rešava problem neravnomernih delova fotonaponskog polja, dakle, modulu, se dodeljuje DC/DC konvertor, kojim se obavlja praćenje tačke maksimalne snage. Ovakav pristup prikazan je na slici 4.4.

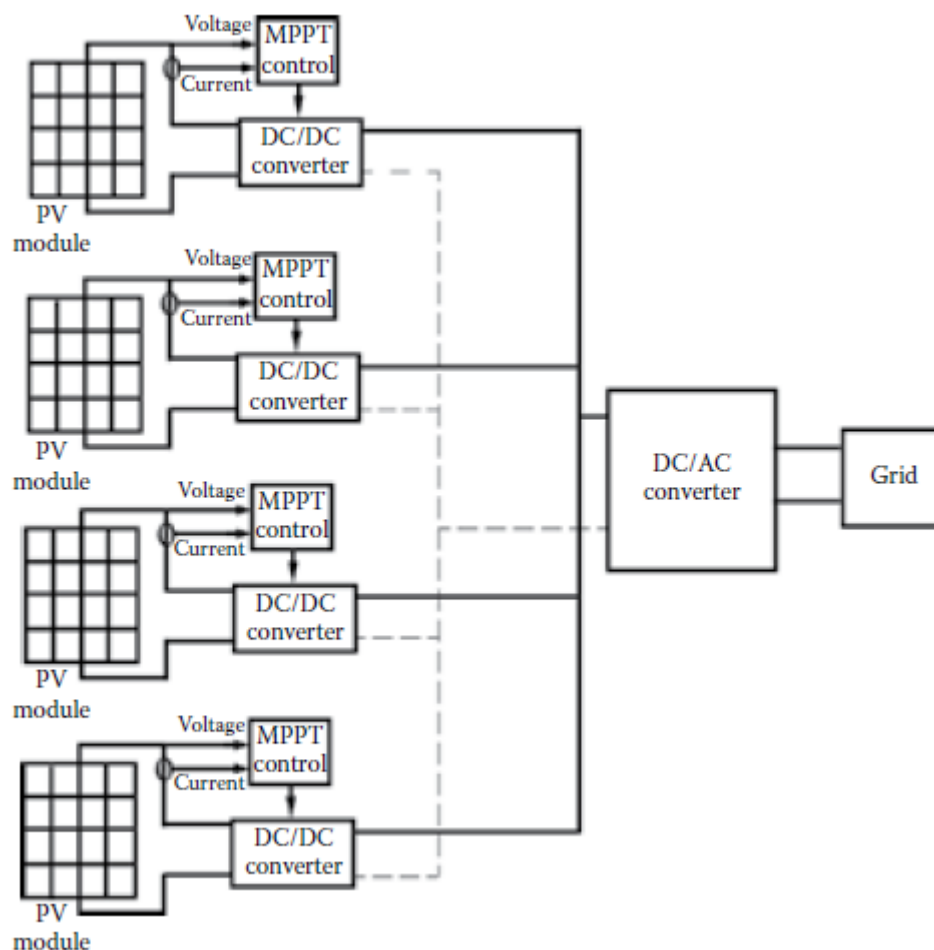


Slika 4.3. Umreženi PV sistem sa DMPPT i sa serijski povezanim mikroinverzorima.



Slika 4.4. Serijska veza DC/DC konvertora za praćenje tačke maksimalne snage.

Teorijski, šema sa slike 4.5. je takođe primenljiva, ali je neophodno izabrati DC/DC konvertore sa dva kontradiktorna uslova, visok stepen naponske konverzije ( na pimer od 30V do 350V) i sa druge strane visoka efikasnost konverzije. Pored toga je potrebno obezbediti i kolo za izjednačavanje struje paralelno povezanih konvertora. Prednost ovakvog načina je što se u zavisnosti od potrošnje pojedini, paralelno povezani konvertori mogu uključivati, odnosno isključivati, a sistem radi sa povećanom pouzdanošću.



Slika 4.5. Paralelna veza DC/DC konvertora za prećenje tačke maksimalne snage.

#### LITERATURA:

- [1] María Teresa Penella-López, Manuel Gasulla-Forner, *Powering Autonomous Sensors*, 2011.
- [2] J. Zhang; T. Wang; H. Ran, „A maximum power point tracking algorithm based on gradient descent method, ” *Power & Energy Society General Meeting*, 2009, pp.1-5, July 2009.
- [3] S. Kolsi, H. Samet, M. Ben Amar (2013), „Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer throughout a Clear Day, ” *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, 2, 27-34.
- [4] A. Pandey, N. Dasgupta, and A.K. Mukerjee, „High-Performance Algorithms for Drift Avoidance and Fast Tracking in Solar MPPT System, ” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, June, pp. 681-688, 2008.
- [5] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, „Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems ”, CRC Press, 2013.