

MODEL PV PANELA BAZIRAN NA SPECIFIKACIJAMA KOJE DAJE PROIZVOĐAČ PV PANEL MODEL BASED ON DATASHEET VALUES

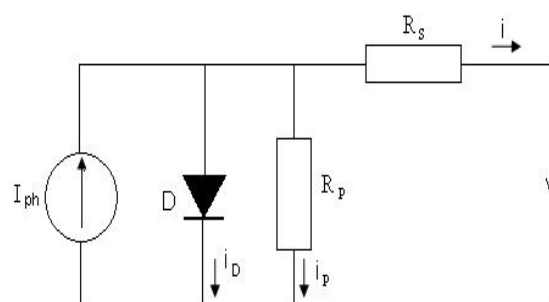
Marko Lalović, *Elektrotehnički fakultet u Istočnom Sarajevu*

Sadržaj - Ovaj rad predstavlja konstrukciju modela PV panela koristeći jedno-diodni peto-parametarski model, zasnovan na parametrima koje daje proizvođač. Model uzima u proračun serijsku i paralelnu otpornost panela. Prikazano je ekvivalentno kolo i osnovne jednačine PV ćelije/panela u standardnim testnim uslovima (STU, testni uslovi za mjerenje fotonaponske ćelije ili modula nominalne izlazne snage. Nivo zračenja je 1000 W/m^2 , pri sobnoj temperaturi od $25 \text{ }^\circ\text{C}$), kao i dobijanje parametara iz vrijednosti koje daje proizvođač. Temperaturna zavisnost tamne struje zasićenja je iskazana sa alternativnom formulom, koja daje bolju vezu sa vrijednostima koje daje proizvođač. Na osnovu ovih jednačina, model PV panela koji je u mogućnosti da predvidi ponašanje panela u različitim temperaturnim i radijacionim uslovima, je napravljen i testiran.

Abstract – This work presents the construction of a model for a PV panel using the single-diode five-parameters model, based exclusively on data-sheet parameters. The model takes into account the series and parallel (shunt) resistance of the panel. The equivalent circuit and the basic equations of the PV cell/panel in Standard Test Conditions (STC, the testing conditions to measure photovoltaic cells or modules nominal output power, irradiance level is 1000 W/m^2 , with room temperature of $25 \text{ }^\circ\text{C}$) are shown, as well as the parameters extraction from the data-sheet values. The temperature dependence of the cell dark saturation current is expressed with an alternative formula, which gives better correlation with datasheet values of the power temperature dependence. Based on these equations, a PV panel model, which is able to predict the panel behavior in different temperature and irradiance conditions, is built and tested.

1. UVOD

Danas širom svijeta u domenu upotrebe solarne energije vlada tendencija eksponencijalnog rasta, uprkos još uvijek relativno visokoj cijeni. Zajedno sa težnjom za manjom cijenom i većom efikasnošću uređaja, glavna motivacija istraživača je kontrolisanje PV invertora, da bi se postigla veća efikasnost i pouzdanost. Mogućnost predviđanja ponašanja solarne elektrane pri različitim zračenjima, temperaturama i stanjima opterećenja je veoma važno zbog dimenzioniranja PV elektrana i pretvarača, kao i zbog dizajniranja praćenja maksimalne snage i kontrolne strategije. Postoje brojne metode za dobijanje parametara panela. Većina metoda je bazirana na mjerenjima I-V krive ili drugih karakteristika panela. U ovom radu model fotonaponskog panela, baziran samo na vrijednostima koje daje proizvođač, je pogodan za on-line temperaturne i radijacione procjene i praćenje maksimalne snage. Ekvivalentno kolo je prikazano na slici 1.



Slika 1. Ekvivalentno kolo fotonaponske ćelije, jednodiodni model

Strujno naponska karakteristika PV panela je bazirana na sledećoj jednačini:

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

U gornjoj jednačini, V_t je naponski ekvivalent temperature:

$$V_t = \frac{A \cdot k \cdot T_{stc}}{e} \quad (2)$$

gdje su:

- I_{ph} – foto struja u STU
- I_o – tamna struja zasićenja u STU
- R_s – Serijska otpornost panela
- R_p – Paralelna otpornost panela
- A – faktor idealnosti diode

pet parametara modela, dok je k Boltzmanova konstanta, e je naelektrisanje elektrona, n_s je broj ćelija u panelu vezanih u seriju i T_{stc} (°K) temperatura u STU. U praksi se zanemaruje '-1' u jednačini (1), kao i u silicijumskim uređajima, tamna struja zasićenja je mnogo manja od eksponencijalnog izraza.

2. ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA PANELA NA OSNOVU PARAMETARA KOJE DAJE PROIZVOĐAČ

U cilju konstruisanja modela PV panela, postoji pet parametara koji se trebaju odrediti: I_{ph} , I_o , A , R_s i R_p . Svrha je da se nađu ovi parametri bez ikakvog mjerenja, koristeći samo podatke koje je dao proizvođač.

A. Početne jednačine

Jednačina (1) može biti napisana za tri ključne tačke V-I karakteristike: za tačku kratkog spoja, tačku maksimalne snage i tačku otvorenog kola.

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \cdot e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t}} - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \quad (3)$$

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_o \cdot e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t}} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{R_p} \quad (4)$$

$$I_{oc} = 0 = I_{ph} - I_o \cdot e^{\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (5)$$

gdje su:

- I_{sc} – struja kratkog spoja u STU
- V_{oc} – napon otvorenog kola u STU
- V_{mpp} – napon u tački maksimalne snage (TMS) u STU
- I_{mpp} – struja u TMS u STU
- P_{mpp} – snaga u TMS u STU
- k_i – temperaturski koeficijent struje kratkog spoja
- k_v – temperaturski koeficijent napona otvorenog kola

Gornji parametri su dati od strane proizvođača. Dodatna jednačina se može dobiti iz činjenice da je P-V karakteristika panela, u TMS, izvod snage po naponu i da je jednak nuli.

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{mpp}, I=I_{mpp}} = 0 \quad (6)$$

Do sad imamo četiri jednačine, ali zbog toga što postoji 5 parametara, potrebna je još jedna jednačina. Za ovu svrhu se može koristiti izvod struje po naponu u uslovima struje kratkog spoja, što je većinom određeno sa otpornošću R_p .

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} = -\frac{1}{R_p} \quad (7)$$

B. Dobijanje parametara

Od izraza struje kratkog spoja i napona otvorenog kola, mogu se izraziti foto struja I_{ph} i tamna struja zasićenja I_o :

$$I_{ph} = I_o \cdot e^{\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (8)$$

Umetanjem jednačine (8) u (3) dobije se:

$$I_{sc} = I_o \left(e^{\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} - e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t}} \right) + \frac{V_{oc} - I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \quad (9)$$

Drugi član u zagradama u gornjoj jednačini se može izostaviti, zato što je prvi član mnogo veći od njega. Onda jednačina (9) postaje:

$$I_{sc} = I_o \cdot e^{\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} + \frac{V_{oc} - I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \quad (10)$$

Rješavajući jednačinu (10) po I_o dobijemo:

$$I_o = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \right) e^{-\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} \quad (11)$$

Jednačine (8) i (11) se mogu umetnuti u (4), i dobije se:

$$I_{mpp} = I_{sc} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s - I_{sc} \cdot R_s}{R_p} - \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \right) \cdot e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s - V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} \quad (12)$$

Gornji izraz još uvijek sadrži tri nepoznata parametra: R_s , R_p i A . Izvod snage po naponu TMS može biti napisan na sledeći način:

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{mpp}, I=I_{mpp}} = \frac{d(IV)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} V \quad (13)$$

Sada je potrebno odrediti izvod jednačine (12) po naponu. Međutim jednačina (12) je transcendentna jednačina, i mora se riješiti numeričkom metodom da bi se izrazio I_{mpp} . Jednačina (12) se može napisati u sledećoj formi:

$$I=f(I, V) \quad (14)$$

Gdje je $f(I, V)$ desna strana jednačine (12). Diferenciranjem jednačine (14) dobije se:

$$dI = dI \frac{\partial f(I, V)}{\partial I} + dV \frac{\partial f(I, V)}{\partial V} \quad (15)$$

Izvod struje po naponu je:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\frac{\partial}{\partial V} f(I, V)}{1 - \frac{\partial}{\partial I} f(I, V)} \quad (16)$$

Iz jednačina (16) i (13) slijedi:

$$\frac{dP}{dV} = I_{mpp} + \frac{V_{mpp} \cdot \frac{\partial}{\partial V} f(I, V)}{1 - \frac{\partial}{\partial I} f(I, V)} \quad (17)$$

Iz gornje jednačine se dobije:

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{mpp}, I=I_{mpp}} = I_{mpp} - V_{mpp} \cdot \frac{\frac{I_{sc} \cdot R_p - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t \cdot R_p} \cdot e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s - V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} + \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{I_{sc} \cdot R_p - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t \cdot R_p} \cdot R_s \cdot e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s - V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} + \frac{R_s}{R_p}} \quad (18)$$

Sada postoje dvije jednačine, (12) i (18), sa tri nepoznate. Jednačina (7) se može iskoristiti za dobijanje treće jednačine. Iz jednačina (7) i (16) slijedi:

$$\left. \frac{1}{R_p} \right|_{I=I_{sc}} = \frac{\frac{I_{sc} \cdot R_p - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t \cdot R_p} \cdot e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s - V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} + \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{I_{sc} \cdot R_p - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s}{n_s \cdot V_t \cdot R_p} \cdot R_s \cdot e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s - V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} + \frac{R_s}{R_p}} \quad (19)$$

Sada je moguće odrediti sva tri promjenjiva parametra, R_s , A i R_p koristeći jednačine (12), (18) i (19). Ove jednačine se ne mogu riješiti analitički, one su riješene korištenjem numeričkih metoda. U ovom radu jednačine su riješene korišćenjem Newton-Raphson-ove metode (metoda tangente).

3. KONSTRUKCIJA KARAKTERISIKE MODELA PV PANELA

Ovaj odjeljak opisuje konstrukciju modela PV panela, slijedeći logiku implementacije u Matlabu.

A. Ulazni parametri

Ulazni parametri sadrže vrijednosti parametara koje daje proizvođač, kao i vrijednosti parametara koji su izračunati pomoću njih. Uzimajući u obzir konkretan slučaj BP-MSX 120 panela proizvedenog od strane British Petrol-a, ulazni podaci modela su:

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 3.87 \text{ A} & k_i &= (0.065 \pm 0.015) \% / ^\circ\text{C} \\ V_{oc} &= 42.1 \text{ V} & n_s &= 72; \\ I_{mpp} &= 3.56 \text{ A} & R_s &= 1366 \ \Omega \\ V_{mpp} &= 33.7 \text{ V} & R_p &= 0.4728 \ \Omega \\ P_{mpp} &= 120 \text{ W} & A &= 1.388 \\ k_v &= -(80 \pm 10) \text{ mV} / ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Svi ovi parametri su razmatrani u standardnim testnim uslovima, i dati su od strane proizvođača osim zadnja tri R_p , R_s i A koji se posebno izračunavaju kao što je prikazano u prethodnom odjeljku.

B. Izrazi za foto struju I_{ph} i tamnu struju zasićenja I_o

Prva jednačina u fazi konstrukcije modela je izraz za I_o iz (3) i I_{ph} iz (5), u STU.

$$I_o = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} \cdot R_s}{R_p} \right) e^{-\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} \quad (20)$$

$$I_{ph} = I_o \cdot e^{\frac{V_{oc}}{n_s \cdot V_t}} + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (21)$$

Da bi se uzeli u obzir efekti sredine, tj. temperature i zračenja, ove jednačine se moraju kompletirati odgovarajućim uslovima.

C. Zavisnost struje kratkog spoja i foto-struje od zračenja

Za obje se smatra da su proporcionalne zračenju.

$$\begin{aligned} I_{sc}(G) &= I_{sc} \cdot \frac{G}{G_{nom}} \\ I_{ph}(G) &= I_{ph} \cdot \frac{G}{G_{nom}} \end{aligned} \quad (22)$$

D. Zavisnost napona otvorenog kola od zračenja i temperature

Da bi se uključila zavisnost od zračenja u jednačinu za V_{oc} , napon otvorenog kola se može izraziti sledećom jednačinom izraženom iz (5):

$$V_{oc}(G) = \ln \left(\frac{I_{ph}(G) \cdot R_p - V_{oc}(G)}{I_o \cdot R_p} \right) \cdot n_s \cdot V_t \quad (23)$$

Gornja jednačina se mora riješiti numerički, koristeći Newton-Rapson-ov algoritam, rezultat se može naći nakon nekoliko iteracija. Napon otvorenog kola pokazuje linearnu zavisnost sa temperaturom.

$$V_{oc}(T) = V_{oc} + k_v(T - T_{stc}) \quad (24)$$

E. Zavisnost struje kratkog spoja od temperature.

Struja kratkog spoja PV panela zavisi linearno od temperature:

$$I_{sc}(T) = I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{k_i}{100} \cdot (T - T_{stc}) \right) \quad (25)$$

F. Temperaturna zavisnost tamne struje zasićenja

Prema Castaner-u i Silvestre-u, tamna struja zasićenja ne zavisi od zračenja, ali pokazuje veliku zavisnost od temperature. Sličan pristup je usvojio Rauschenbach. Castaner i Silvestre su dali formulu koja pokazuje nelinearnu zavisnost od temperature:

$$J_0 = B \cdot T^{XTI} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (26)$$

gdje je J_0 gustina tamne struje zasićenja, B i XTI su konstante nezavisne od temperature, i E_g je poluprovodnička širina energetskog opsega. Xiao et al je smatrao da tamna struja zasićenja zavisi i od zračenja i temperature, i dao je sledeću formulu za I_0 :

$$I_0(G, T) = \frac{I_{ph}(G, T)}{e^{\frac{V_{oc}(T)}{V_i(T)}} - 1} \quad (27)$$

Gow i Manning, i posle njih, Walker, su koristili kubnu zavisnost I_0 od temperature:

$$I_0(T) = I_0(T_1) \left(\frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{A}} \cdot e^{-\frac{e \cdot V_g}{nk} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (28)$$

gdje je $I_0(T_1)$ tamna struja zasićenja računata za datu referentnu temperaturu. V_g je širina energetskog opsega poluprovodnika.

G. Predloženi metod za određivanje $I_0(T)$

Ovaj metod se zasniva na korišćenja jednačine (21), tj. dodavanjem parametara koji zavise od promjena temperature kao što je prikazano na jednačini ispod:

$$I_0(T) = \left(I_{sc}(T) - \frac{V_{oc}(T) - I_{sc}(T) \cdot R_s}{R_p} \right) e^{-\frac{V_{oc}(T)}{ns \cdot V_i}} \quad (29)$$

H. Temperaturna zavisnost foto struje

Temperaturna zavisnost foto struje se može izraziti uvođenjem temperaturnih efekata u jednačinu (21):

$$I_{ph}(T) = I_0(T) \cdot e^{\frac{V_{oc}(T)}{ns \cdot V_i}} + \frac{V_{oc}(T)}{R_p} \quad (30)$$

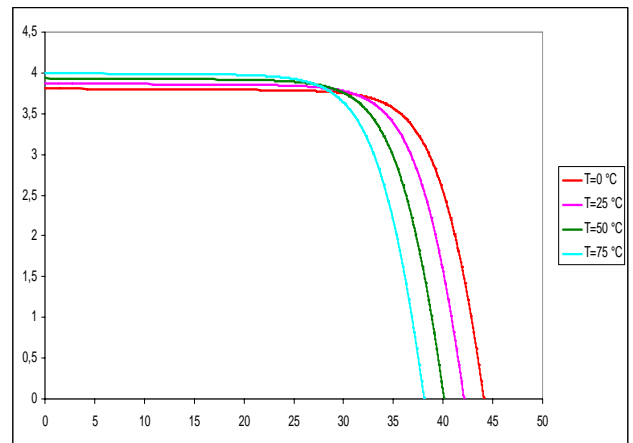
I. Puna karakteristika modela

Sada su sve zavisnosti parametara od temperature i zračenja iz jednačine (1) dati. Parametri u jednačinama (22), (23), (24), (25), (29), (30) se mogu ubaciti u (1) da bi se dobila V-I karakteristika PV panela, koji uzima u obzir uslove promjene temperature i zračenja.

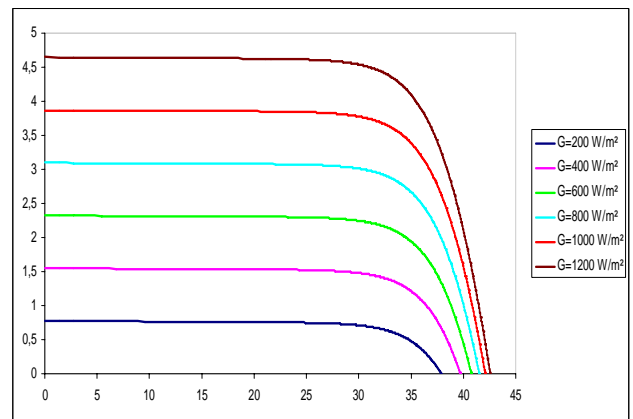
4. REZULTATI SIMULACIJE

Jednačine iz prethodnog odjeljka su implementovane u Matlab-u, u cilju verifikacije modela pri različitim temperaturnim uslovima i različitim uslovima radijacije. Rezultati su upoređeni sa karakteristikama koje je dao proizvođač.

Na sledeće dvije slike je prikazana V-I karakteristika u zavisnosti od promjena temperature i radijacije respektivno.



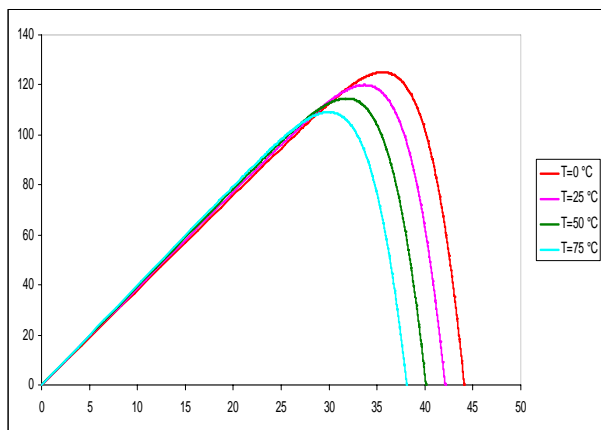
Slika 2. V-I karakteristika PV panela za četiri različite vrijednosti temperatura pri standardnoj radijaciji



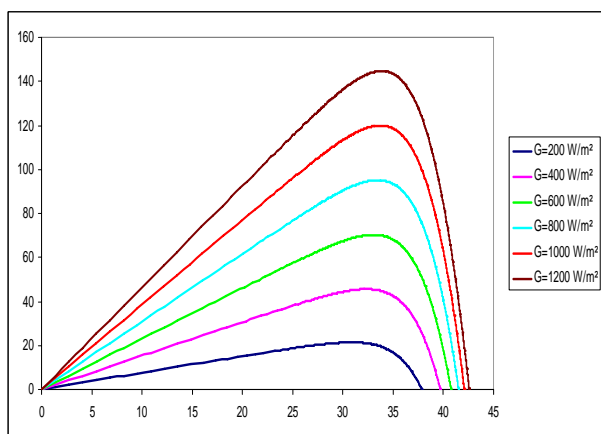
Slika 3. V-I karakteristika PV panela za šest različitih vrijednosti radijacije pri standardnoj temperaturi

Na gornjim slikama primjećuje se da struja kratkog spoja pokazuje linearnu zavisnost sa promjenom radijacije, dok se napon otvorenog kola povećava logaritamski sa promjenom radijacije.

Na sledeće dvije slike je prikazana V-P karakteristika u zavisnosti od promjena temperature i radijacije respektivno i na njima se vidi da snaga takođe pokazuje linearnu zavisnost sa promjenom radijacije.



Slika 4. V-P karakteristika PV panela za četiri različite vrijednosti temperature pri konstantnoj radijaciji



Slika 5. V-P karakteristika PV panela za šest različitih vrijednosti radijacija pri standardnoj temperaturi

5. ZAKLJUČAK

Model fotonaponskih panela, baziran na podacima koje daje proizvođač je razvijen i implementiran. Metod za dobijanje parametara panela iz podataka potrošača je prezentovan, i dobijene vrijednosti su iskorištene u implementaciji modela. Rezultati modela se vrlo dobro slažu sa specifikacijama koje daje proizvođač. Predložen je novi pristup za modeliranje temperature zavisnosti tamne struje zasićenja, i upoređen je sa drugim postojećim metodama. Rezultat daje bolja slaganja sa vrijednostima koje je do proizvođač.

LITERATURA

[1] Denzo Sera, Remus Teodorescu and Pedro Rodriguez "PV panel model based on datasheet v alues" 2007 IEEE

NAPOMENA:

Rad je urađen u sklopu projekta „**MODELIRANJE KOMPONENTI HIBRIDNIH SISTEMA NAPAJANJA**“, Ministarstvo nauke i tehnologije u Vladi RS, 2009. god., (Ugovor broj: 06/0-020/961-81/09 od 31.12.2009. god.)