

مدل سازی و شبیه سازی آرایه های فتوولتائیک (PV) و دنبال کننده حداکثر توان (MPPT) برای یک سیستم فتوولتائیک (PV) متصل به شبکه

احسان رسولی^۱ احسان مراد^۲ الناز پور بافرانی^۳ گئورک قره پتیان^۴ غلامحسین ریاحی دهکردی^۵

۱ دانشگاه صنعتی امیر کبیر – Rasouli.e@aut.ac.ir

۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران – Ehsan.Morad@srbiau.ac.ir

۳ دانشگاه صنعتی امیر کبیر – Elnaz_pourbaferani@aut.ac.ir

۴ دانشگاه صنعتی امیر کبیر – grptian@aut.ac.ir

۵ دانشگاه صنعتی امیر کبیر – gholam@aut.ac.ir

چکیده: سیستم قدرت فتوولتائیک (PV) به علت شرایط خاص آن از جمله میزان آلودگی بسیار کم و طبیعت پایدار آن به علت عمر پایدار خورشید، انتظار می رود به عنوان مهمترین منبع انرژی تجدید پذیر مطرح شود زیرا منبع تمام انرژی های تجدید پذیر به جز زمین گرمایی و تا حدودی جزر و مد، انرژی خورشید می باشد. از این رو یافتن حداکثر توان جهت بهره بری هر چه بیشتر یکی از مباحث مورد علاقه صنعت انرژی خورشیدی است، در این مقاله به بررسی مدل های سلول خورشیدی و روش های دنبال کننده حداکثر توان و مقایسه آنها پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: فتوولتائیک، انرژی تجدید پذیر، دنبال کننده حداکثر توان، مدل های سلول خورشیدی

این مدل میزان تابش و دما را به عنوان پارامترهای ورودی دریافت کرده و به عنوان خروجی نمودارهای (I-V) و (P-V) را

نتیجه

می دهد. بوسیله (MPPT) حداکثر توان DC از آرایه های فتوولتائیک (PV) قابل دستیابی خواهد بود.

۴ فهرست علائم و اختصارات

K	ثابت بولتزمن (برحسب ژول/کلوین) (۱.۳۸۰۶۵۰۳e-۲۳)
q	بار الکتریکی یک الکترون (بر حسب کولن) (۱.۶۰۲۱۷۶۴۶e-۱۹)
n	ضریب ایده آلی دیود
E_g	انرژی باند گپ (برای سیلیکون کریستال) (۱.۱۲eV)
N_s	تعداد سلولهای سری شده

۴ مقدمه

استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر در سال های اخیر به سرعت در حال رشد بوده است، در این میان انرژی خورشید یکی از منابع در دسترس و نوید بخش می باشد. طراحان جهت دستیابی به بهترین نتیجه قبل از نصب سیستم PV نیاز به یک مدل دقیق جهت شبیه سازی دارند مدلی که تمام شرایط استاندارد و عملیاتی را در نظر بگیرد. مدل سازی سیستم PV یکی از بخش های مهم در بحث الکترونیک قدرت است، به گونه ای رفتار الکتریکی سیستم PV را می توان در ترکیب با این عناصر مورد بررسی قرار داد. در این مقاله، یک مدل جامع، معتبر و کاربر پسند از آرایه های فتوولتائیک (PV) و دنبال کننده حداکثر توان (MPPT) بصورت مدل ریاضی و مداری ارائه شده است.

شکل (۱): مدل ایده آل سلول خورشیدی

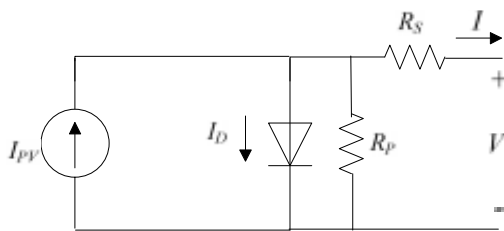
$$I = I_{PV} - I_D \quad (1)$$

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\alpha V_T}\right) \right] - 1 \quad (2)$$

این مدل برای کامل کردن منحنی مشخصه ($I-V$) تنها به سه پارامتر جریان اتصال کوتاه (I_{SC})، ولتاژ مدار باز (V_{OC}) و ضریب ایده آلی دیود نیاز داشت. برای بهبود عملکرد این مدل یک مقاومت سری R_S در مدار اضافه می شود.

هنگامی که سلول خورشیدی در معرض تغییرات دما قرار بگیرد به خصوص در دمای بالا، به میزان زیادی دقت خود را از دست می دهد. به همین منظور مدل (R_P) معرفی شد تا دقت مدل در دمای بالا افزایش یابد.

در واقع مدل (R_P) نسبت به مدل (R_S) شامل یک مقاومت شنت اضافی است که در مراجع زیادی از جمله [۲] معرفی شده است. شکل مداری این مدل در شکل (۲) نشان داده شده است، عملکرد این مدل توسط رابطه (۳) بیان می شود.

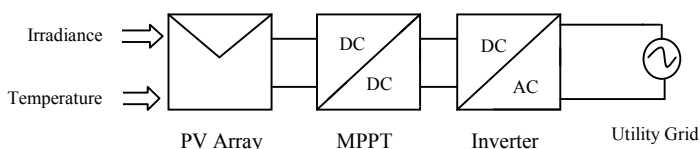


شکل (۲): مدل (R_P) سلول خورشیدی

$$I = I_{PV} - I_D - \left(\frac{V + IR_S}{R_P} \right) \quad (3)$$

۴ سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

سیستم فتوولتائیک (PV) متصل به شبکه توان تولید شده از آرایه های فتوولتائیک (PV) را به شبکه منتقل می کند. بلوک دیاگرام این سیستم در شکل (۳) قابل مشاهده است.

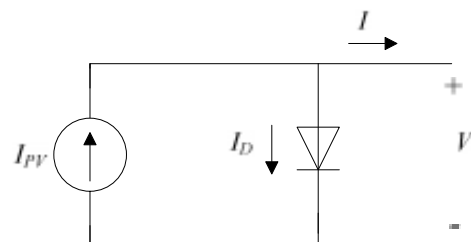


T	دما بر حسب درجه سلسیوس
G	ضریب مقدار تابش (۱ برابر است با ۱۰۰۰ وات بر مترمربع)
I_{ph}	جریان حاصل از تابش
I	جریان اشباع دیود
N_S	تعداد سلولهای متصل شده به صورت سری
a	ضریب ایده آلی دیود
R_S	مقاومت سری (در مدار معادل)
R_P	مقاومت موازی (در مدار معادل)
$I_{ph,n}$	جریان نامی حاصل از تابش در شرایط نرمال
G	مقدار تابش
G_n	مقدار نامی تابش
T	دمای سلول
T_n	دمای نامی سلول
K_i	نسبت جریان اتصال کوتاه به ضریب حرارتی
$I_{o,n}$	جریان نامی اشباع دیود
$V_{OC,n}$	ولتاژ نامی مدار باز
$V_{t,n}$	ولتاژ حرارتی نامی سلول
I_{SC}	جریان اتصال کوتاه در شرایط نرمال
N_{pp}	تعداد ماژولهای فتوولتائیک موازی شده
N_{ss}	تعداد ماژولهای فتوولتائیک سری شده

۴ مدل سازی سلول خورشیدی

شبهه سازی سلول PV شامل بدست آوردن منحنی مشخصه های ($I-V$) و ($P-V$) است، هدف از این کار تطبیق منحنی مشخصه های مدل شبهه سازی با منحنی مشخصه های سلول واقعی تحت شرایط محیطی مختلف می باشد.

معمول ترین روش، استفاده از مدار معادل الکتریکی است که اصولاً بر مبنای مدل دیودی است. مدل های بسیاری توسط پژوهشگران متعددی ارائه شده است که ساده ترین مدل، مدل تک دیودی است. این مدل شامل یک منبع جریان مستقل، موازی با یک دیود می باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است، رابطه ریاضی بیانگر عملکرد این مدل نیز توسط روابط (۲ و ۱) بیان می شود [۱].



$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (6)$$

جریان نامی اشباع دیود ($I_{0,n}$) نیز توسط رابطه (۷) بیان می شود [۴].

$$I_{0,n} = \frac{I_{SC,n}}{\left[\exp \left(\frac{V_{OC,n}}{aV_{t,n}} \right) \right] - 1} \quad (7)$$

شکل (۳) : بلوک دیاگرام سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

یک آرایه (PV) از ترکیب سری و موازی ماژولهای فتوولتائیک تشکیل شده است لذا رابطه (۴) که برای یک سلول بود توسط رابطه (۸) برای یک آرایه دوباره تعریف می شود لذا داریم [۴]، [۵]:

$$I = N_{pp} I_{pv} - N_{pp} I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{V_t a N_{ss}} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_p \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (8)$$

بسیاری از پارامترهای ارائه شده در این معادله از طریق دیتاشیت ارائه شده در کاتالوگ کارخانه سازنده بدست می آیند که در جدول (۲) نمونه آن نشان داده شده است.

جدول (۲): مشخصات ماژول فتوولتائیک استفاده شده

(ساخت شرکت Mitsubishi)

Open circuite voltage (V_{oc})	۲۲ V
Short circuite current (I_{sc})	۷.۳۶ A
Maximum power Voltage (V_{mp})	۱۷.۶ V
Maximum Power current (I_{mp})	۶.۴۸ A
Maximum Power (P_{max})	۲۰۰ W
Temperature Coefficient of I_{sc} (K_i)	۰.۰۵۷ $^{\circ}C$
Temperature Coefficient of V_{oc} (K_v)	-۰.۳۴۶ $^{\circ}C$

اگرچه مدل های پیچیده تری هم وجود دارد که برای دقت و صحت بیشتر، بیش از یک دیود در مدل خود استفاده می کنند [۶] ولی بعلت عملکرد خیلی خوب مدل تک دیودی و داشتن ویژگی های ارزشمندی چون سادگی و دقت و اینکه بوسیله بسیاری از محققین در پژوهش های پیشین، مورد استفاده قرار گرفته است، مدل تک دیودی انتخاب شده است. [۴] و [۱۰].

در این شکل آرایه های فتوولتائیک (PV) ادوات نیمه هادی می باشند که از نور خورشید توان الکتریکی DC تولید می کنند. آرایه های فتوولتائیک (PV)، از ترکیب سری و موازی ماژولهای فتوولتائیک (PV) تشکیل شده اند. انرژی تولید شده بوسیله آرایه های فتوولتائیک (PV) وابسته به برخی پارامترها از جمله دما و میزان تابش می باشد. آرایه های (PV) جهت دستیابی به حداکثر توان به دنبال کننده حداکثر توان (MPPT) متصل شده است، این کار از طریق تغییر ولتاژ کاری آرایه (PV) انجام می شود و بعد از آن توان الکتریکی DC تولیدی بوسیله اینورتر تبدیل به توان الکتریکی AC شده و به شبکه منتقل می شود.

۴ روابط ریاضی حاکم بر آرایه (PV)

مدار معادل یک سلول خورشیدی در شکل (۲) نشان داده شده است [۳] و توسط رابطه (۴) قابل بیان است:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{V_t a}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (4)$$

جریان حاصل از تابش I_{ph} بصورت خطی به میزان تابش بستگی داشته و توسط رابطه (۵) تحت تاثیر میزان دما قرار می گیرد [۳].

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{ph,n} + K_i (T - T_n)] \quad (5)$$

جریان اشباع دیود (I_0) نیز وابسته به دما می باشد که توسط رابطه (۶) قابل بیان است [۴].

۵ دنبال کننده حداکثر توان (MPPT)

بوسیله MPPT حداکثر توان الکتریکی ممکن از آرایه (PV) حاصل می شود، این کار با جابجایی نقطه کار الکتریکی آرایه (PV) انجام می گیرد. MPPT اساساً یک مبدل DC-DC می باشد.

این مبدل سطح ولتاژ کاری را جهت رسیدن به مقدار (Vmp) و دستیابی به حداکثر توان (Pmp) تغییر می دهد. سطح ولتاژ کاری از طریق تغییر سیکل وظیفه (duty cycle) انجام می شود. سیگنال کنترلی مدولاسیون پهنای باند (PWM)، به گیت ترانزیستور مبدل DC-DC اعمال می شود. جهت انجام این کار دو روش وجود دارد :

۵ روش P&O (Perturbation & Observation)

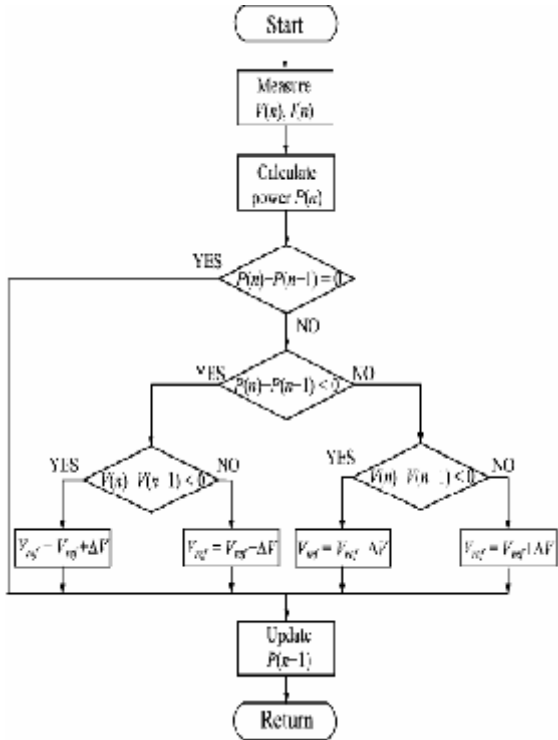
نحوه عملکرد الگوریتم به صورت زیر می باشد.

الف ایجاد تغییر در نقطه کار

ب اندازه گیری P و V

ج مقایسه P جدید با P قدیم با توجه به V ها در نتیجه مشخص می شود که شیب منفی است یا مثبت و آیا به MPP نزدیک می شود.

اشکال این روش این است که ، تغییرات ناگهانی تابش، این روش را با نوسان مواجه می سازد.



شکل (۵) : فلوجارت روش P&O [۴]

۴ IncCon (Incremental Conductance)

نحوه عملکرد این الگوریتم به صورت زیر می باشد.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d}{dV}(VI) = I + V \frac{dI}{dV} \quad (9)$$

در محل MPP داریم

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} = \text{هدایت} \quad (10)$$

در نقاط سمت چپ MPP داریم :

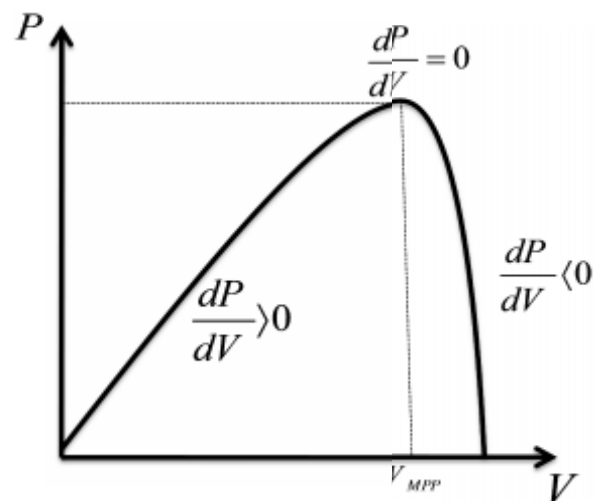
$$\frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (11)$$

در نقاط سمت راست MPP داریم :

$$\frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (12)$$

چون اندازه گیری ΔI و ΔV تقریبی است، برقراری شرط مشکل خواهد بود.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (13)$$



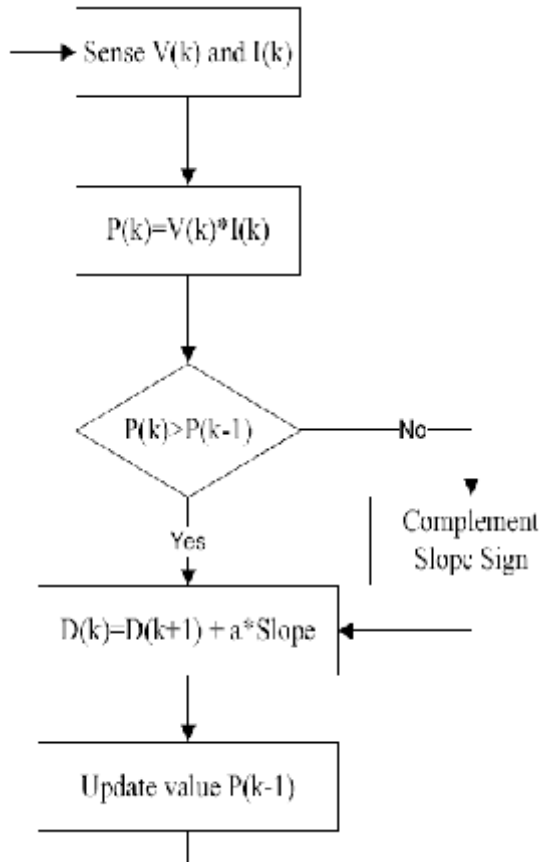
شکل (۴) : اثر تغییرات نقطه کار جهت دستیابی به نقطه کار بهینه

توان (MPP) برسد و این برخلاف حالتی است که توان کاهش پیدا می کند.

جهت اصلاح شرط داریم :

$$Abs\left(\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V}\right) < E \quad (14)$$

در شکل ۶ فلوجارت این روش نشان داده شده است

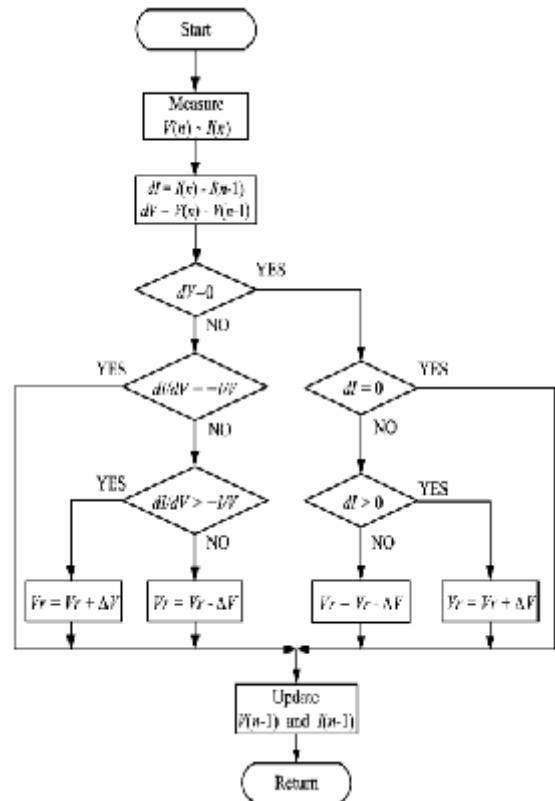


شکل (۷) : فلوجارت الگوریتم (HC) [۴]

لازم به یاد آوری است که در این مدل مقدار (Im) با حل معادله معادل بدست می آید و این در حالی است که مقادیر (Iph) و (Io) با استفاده از معادلات (۵) و (۶) بدست می آیند. سایر پارامترهای مدل با استفاده از دیتا شیت کارخانه سازنده بدست می آیند و باید قبل از اجرای شبیه سازی آن ها را محاسبه کرد.

۶ مدل شبیه سازی

آرایه (PV) با استفاده از یک مدل سازی ریاضی مدل شده است. شکل (۸) مدل مداری این مدل را در نرم افزار Matlab/Simulink را نشان می دهد.

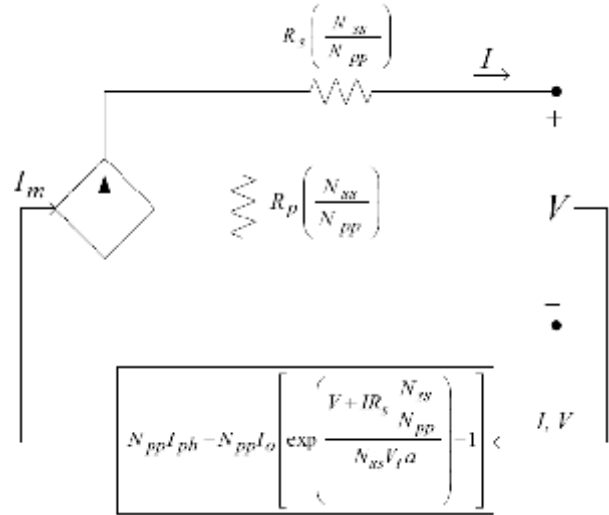


شکل (۶) : الگوریتم روش IncCon [۴]

روش دیگر استفاده از الگوریتم (HC) است که برای کنترل سیکل وظیفه (duty cycle) مبدل مورد استفاده قرار می گیرد. اصول تئوری حاکم بر این روش مانند روش P&O می باشد زیرا هر دو روش بر اساس مقادیر قبل و لحظه ای توان عملکرد خود را تنظیم می کنند. شکل (۷) فلوجارت این الگوریتم را نشان می دهد [۱۱]. در الگوریتم پیشنهادی، با نمونه گیری از جریان و ولتاژ آرایه (PV)، توان عبوری محاسبه می شود.

در این الگوریتم، 'شیب' جهت تغییرات سیکل وظیفه (duty cycle) را نشان می دهد، بنابراین D با مقادیر ۱ یا ۰ مشخص شده و 'a' میزان و اندازه انحراف را مشخص می کند. اگر توان افزایش پیدا کند، جهت سیکل وظیفه (duty cycle) در همان جهت حفظ می شود تا به مقدار نقطه حداکثر

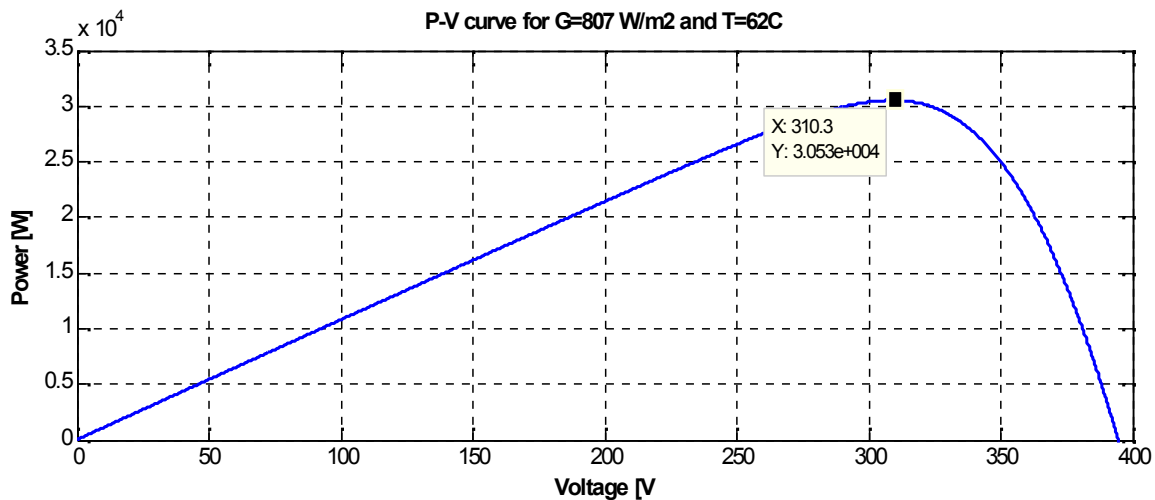
$P_{max}=30.53W$ حداکثر توان خروجی از ماژول تحت آن شرایط محیطی می باشد. شکل ۱۱ مدل را در حالی که MPPT به آن متصل است را نشان می دهد. که در حالت اول، دنبال کننده حداکثر توان با الگوریتم HC استفاده شده است. همان طوری که در شکل ۱۰ نشان داده شده است سیکل وظیفه روند کاهشی خود را تا رسیدن به نقطه توان حداکثر (MPP) حفظ کرده است. همانطور که مشاهده می شود شکل موج سیکل وظیفه (duty cycle) و توان خروجی PV دچار نوسان شده است. در شکل ۱۰ همانطور که مشاهده می شود توان به مقدار ماکزیمم خود رسیده و در حال نوسان است و این بدان معنی است که به نقطه توان حداکثر (MPP) رسیده است. در ادامه MPPT را با استفاده از روش IncCon جهت بهبود نوسانات انجام داده و نتایج در شکل (۱۳) آورده شده اند. در این قسمت MPPT بعد از ثانیه ۰.۲ به مدار اعمال شده است.



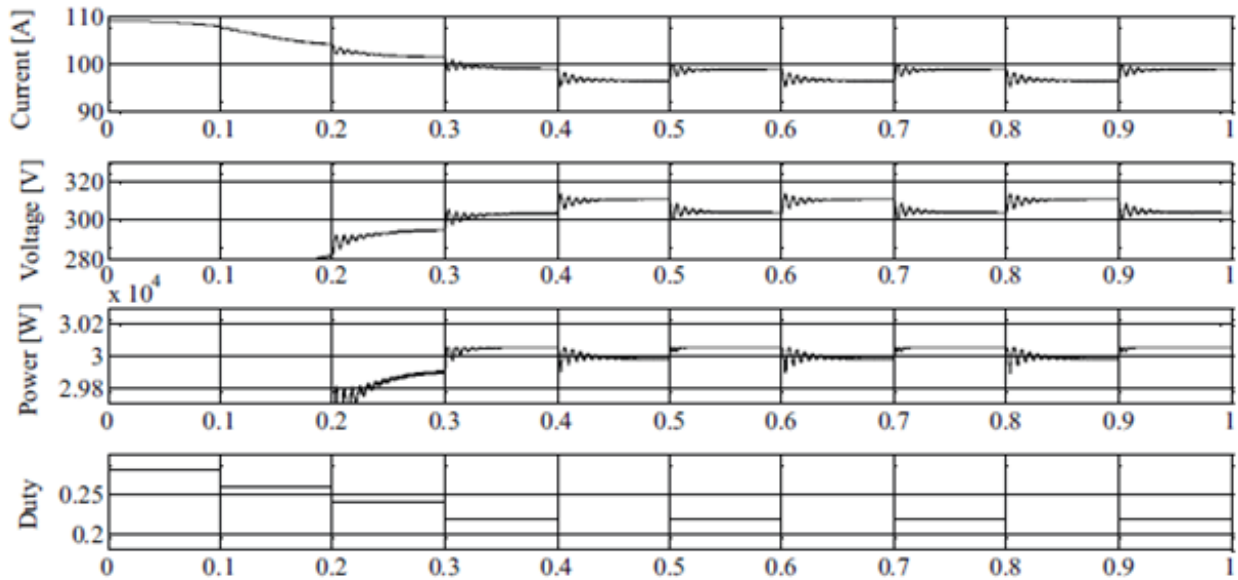
شکل(۸): مدل سازی ریاضی آرایه (PV)

۴ نتایج حاصل از شبیه سازی

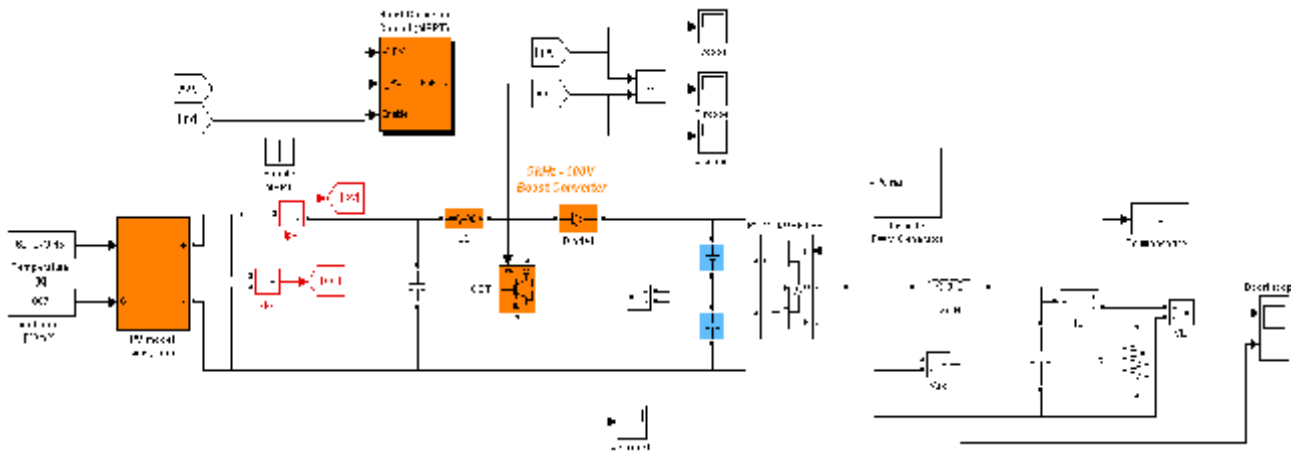
در شکل ۹ نمودار (P-V)، ماژول PV برای شرایط بدون اعمال بار به ماژول نشان داده شده است. و مشخص است که



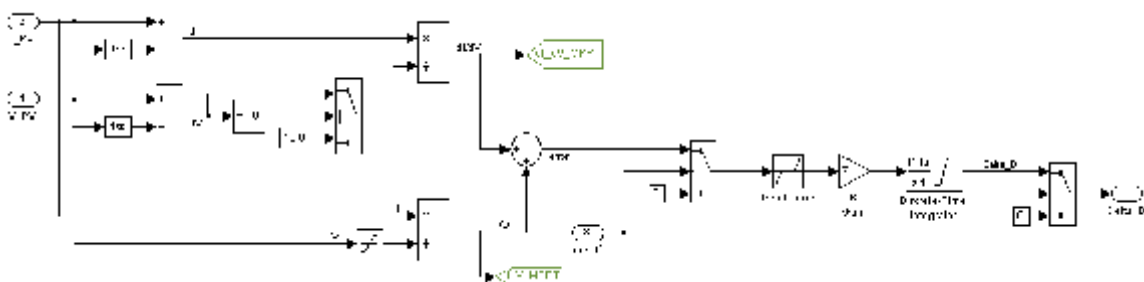
شکل(۹): منحنی مشخصه در تابش ۸۰۷ وات بر متر مربع و دمای ۶۲ درجه سانتیگراد



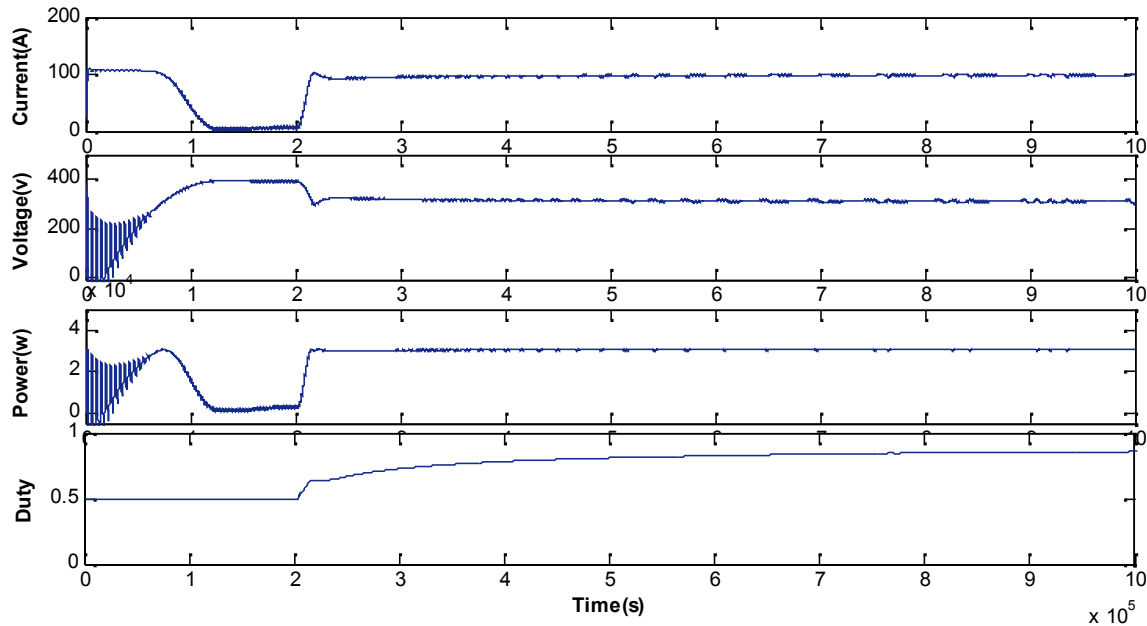
شکل (۱۰): خروجی حاصل از MPPT ارائه شده در تابش ۸۰۷ وات بر متر مربع و دمای ۶۲ درجه سانتیگراد با الگوریتم HC [۷]



شکل (۱۱): مدل سیمولینک استفاده شده در این شبیه سازی



شکل (۱۲): مدل سیمولینک روش IncCon



شکل (۱۳): خروجی حاصل از MPPT ارائه شده در تابش 807 وات بر متر مربع و دمای 62 درجه سانتیگراد با الگوریتم IncCon

همانطور که مشاهده می شود نوسانات توان خروجی تقریباً از بین رفته اند. ولی در شکل جریان و ولتاژ همچنان نوساناتی مشاهده می شود. در شکل (۱۱) مدل سیمولینک این روش آورده شده است.

مراجع

- [۱] N.D. Benavides, P.L. Chapman, Modeling the effect of voltage ripple on the power output of photovoltaic modules, IEEE Trans. Ind. Electron. ۵۵(۷). (۲۰۰۸). ۲۶۳۸-۲۶۴۳.
- [۲] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R. Filho, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, IEEE Trans. Power Electron. ۲۴(۵) (۲۰۰۹) ۱۱۹۸-۱۲۰۸.
- [۳] X. Weidong, W. G. Dunford, and A. Capel, "A novel modeling method for photovoltaic cells," in Power Electronics Specialists Conference
- [۴] T.Chung Yu, Y.Cheng Lin, "A study on Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems", Lunghwa University of Science and Technology, Pages ۲۷-۳۶, ۲۰۱۲
- [۵] R. F. Coelho, F. Concer, and D. C. Martins, "A proposed photovoltaic module and array mathematical modeling destined to simulation," in Industrial Electronics, ۲۰۰۹. ISIE ۲۰۰۹. IEEE International Symposium
- [۶] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics

A نتیجه

در این مطالعه یکی از مدل های توسعه یافته برای یک سیستم فتوولتائیک (PV) متصل به شبکه بررسی شده است. شبیه سازی مدل در محیط Matlab/Simulink انجام شده است. نتایج در حالی که MPPT به آرایه PV متصل است بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که این دنبال کننده قادر است حداکثر توان آرایه PV را تشخیص دهد. در این مقاله سه روش بررسی شده و دو روش از نظر شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. لذا از نتایج قابل مشاهده است که روش IncCon دارای نوسان کمتر و سرعت بیشتری در مقایسه با روش HC می باشد.

simulation studies," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. ۱۴۶, pp. ۱۹۳-۲۰۰,

- [۷] G. Farivar and B. Asaei, "Photovoltaic module single diode model parameters extraction based on manufacturer datasheet parameters," in Power and Energy (PECon), ۲۰۱۰ IEEE International Conference on, pp. ۹۲۹-۹۳۴.
- [۸] K. V. K. Reddy, M.V. Kumar and R. Kiranmayi, "Modeling and a MPPT method for solar cells," Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. ۳, ۲۰۰۸.
- [۹] H. L. Tsai, C. S. Tu, and Y. J. Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink," Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science ۲۰۰۸, ۲۰۰۸.
- [۱۰] R. C. Campbell, "A Circuit-based Photovoltaic Array Model for Power System Studies," in Power Symposium, ۲۰۰۷. NAPS '۰۷. ۳۹th North American, ۲۰۰۷, pp. ۹۷-۱۰۱.
- [۱۱] X. Weidong and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in Power Electronics Specialists Conference, ۲۰۰۴. PESC ۰۴. ۲۰۰۴ IEEE ۳۵th Annual, ۲۰۰۴ pp. ۱۹۵۷-۱۹۶۳ Vol.۳