

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد صغمان (خوراسگان)

بکارگیری سیستم کنترلی MPPT براساس الگوریتم بهینه شده ی P&O جهت افزایش توان خروجی در سیستم های خورشیدی منفصل از شبکه

محمد رضا شیرین آبادی^۱، پریا فاضلی فرد^۲ و علی ملکیان^۳

^۱ سازمان آموزش فنی و حرفه ای کشور استان آ.شرقی و دانشگاه علمی کاربردی واحد ماشین سازی تبریز ، m.shirinabady@gmail.com

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، paria_fazeli67@yahoo.com

^۳ گروه ماشین سازی تبریز (MST) و دانشگاه علمی کاربردی واحد ماشین سازی تبریز، malekianmst@gmail.com

چکیده - به دلیل مشخصه غیرخطی جریان-ولتاژ ماژول خورشیدی برای استفاده بهینه از انرژی تولید شده ی این ماژول ها، باید نقطه ای انتخاب شود که بیشترین جریان و ولتاژ را داشته باشد. سیستم کنترلی MPPT براساس الگوریتم بهینه شده ی P&O در واقع نقطه توان حداکثر (MPP) را برای ماژول شناسایی می کند و موجب می شود تا در تغییرات سریع تابش نقطه MPP از دست داده نشود و حداکثر توان به بار تزریق گردد. معمولاً ولتاژ خروجی ماژول های فتوولتائیک پایین می باشد، لذا برای اتصال به بارهای مصرفی، نیاز به استفاده از مبدل افزایشده می باشد. سیستم کنترلی MPPT در حضور مبدل افزایشده با بازده بالا سبب می شود کارایی سیستم PV و توان حصولی از ماژول PV در هر لحظه در مقدار حداکثر خود باشد و توان خروجی سیستم PV افزایش یابد.

کلید واژه- الگوریتم P&O، مبدل افزایشده، MPPT، سیستم فتوولتائیک

DC افزایشده که کاربرد بیشتری در این زمینه دارد، به آن متصل می گردد. در ادامه به منظور افزایش توان دریافتی، سیستم کنترلی بر اساس الگوریتم بهینه شده P&O برای دستیابی به توان حداکثر پیشنهاد شده و بررسی می گردد.

۲- مدل سازی ماژول فتوولتائیک

یکی از رایجترین مدل هایی که برای ماژول فتوولتائیک مورد استفاده قرار می گیرد، مدل تک دیودی می باشد. در این مدل یک منبع جریان با یک دیود و مقاومت اهمی بصورت موازی هم قرار دارند. این مجموعه با یک مقاومت دوم بصورت سری قرار می گیرد. اغلب مقاومت موازی به دلیل مقدار بزرگ آن در مدل سازی در نظر گرفته نمی شود [4,5]. مدار شکل ۱ (الف) مدل یک سلول خورشیدی می باشد. با توجه به اینکه در شبیه سازی ها و معادل سازی ها با ماژول PV که متشکل از چندین سلول سری (Ns) و موازی (Np) است، سر و کار خواهیم داشت، بایستی معادلات ماژول PV را بدست آوریم. برای ماژول PV مدار معادل بصورت شکل ۱ (ب) خواهد بود.

۱- مقدمه

سلول های خورشیدی قادرند انرژی تشعشعی خورشید را با بازدهی معادل ۵ تا ۲۰ درصد مستقیماً به الکتریسیته تبدیل کنند. یکی از مشکلات اساسی انرژی خورشیدی آن است که پتانسیل دریافت آن روی سطح زمین بسیار کم است. با فرض آن که خط الراس خورشید در تراز دریا باشد، انرژی خورشیدی تنها با چگالی حدود ۰/۱ وات بر هر سانتی متر مربع قابل دریافت است که نتیجه آن گرانتر شدن تجهیزات لازم این سیستم ها می باشد [1,2].

از آنجایی که ظرفیت تولید انرژی الکتریکی با توجه به هزینه سنگین سرمایه گذاری در آن محدود می باشد، لذا افزایش میزان بهره وری و استفاده بهینه از ظرفیت موجود تاثیر بسیار مطلوبی در زمینه کاهش هزینه و سرمایه گذاری در بخشهای مختلف تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی به دنبال خواهد داشت [3].

توان خروجی پنل های خورشیدی وابسته به شدت تابش و دما می باشد، لذا دست یابی به ماکزیمم توان در کاربردهای فتوولتائیک یک امر اساسی و مهم بشمار می آید. در این مقاله ابتدا یک سلول خورشیدی مدل سازی شده و سپس مبدل DC-

$$I_{scr-cell} = I_{scr-mod} \times \frac{1}{N_p} \quad (6)$$

مقدار جریان اتصال کوتاه ماژول، $I_{scr-mod}$ به همراه ضریب حرارتی جریان اتصال کوتاه، $K_i \left(\frac{A}{0^\circ C}\right)$ در کاتالوگ ماژول PV داده می‌شود. مقادیر T_r و G_r به ترتیب دما و تابش مرجع معمولاً $T_r = 298K$ و $G_r = 1000 \frac{W}{m^2}$ می‌باشند. دومین پارامتری که نیاز به محاسبه دارد جریان اشباع معکوس دیود در دمای دلخواه T یعنی I_o میباشد:

$$I_o = I_{rs} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 e^{\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)} \quad (7)$$

در رابطه (7)، E_g انرژی باند گپ برای سلول PV در دمای دلخواه T می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید [8]:

$$E_g = [1 - 0.0002677(T - T_r)] E_{gr} \quad (9)$$

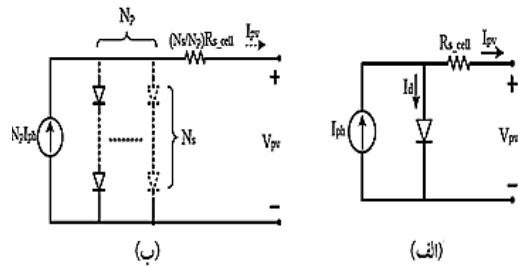
مقدار E_{gr} برای سلول PV برابر $E_{gr} = 1.121 eV$ بوده و برای سلول سیلیکونی آمورف برابر $E_{gr} = 1.6 eV$ می‌باشد. پارامتر مهم بعدی در رابطه (7) مقدار جریان I_{rs} بوده که از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [8]:

$$I_{rs} = \frac{I_{scr-mod}}{N_p \left(e^{\frac{qV_{oc-mod}}{N_s AKT}} - 1 \right)} \quad (10)$$

ولتاژ مدار باز ماژول، V_{oc-mod} نیز تحت شرایط استاندارد STC توسط سازنده اندازه‌گیری شده و در کاتالوگ ماژول PV مربوطه داده می‌شود.

۳- الگوریتم پیشنهادی P&O

اساس کار این الگوریتم بر مقایسه تغییرات توان و ولتاژ استوار است، بدین گونه که ابتدا از ولتاژ و جریان ماژول نمونه‌گیری می‌شود و تغییرات توان و تغییرات ولتاژ محاسبه می‌گردد. در صورتی که تغییرات توان و ولتاژ هردو مثبت و یا هردو منفی باشد، نقطه عملکرد در سمت چپ نقطه حداکثر توان (MPP) قرار دارد و برای رسیدن به این نقطه باید دوره کاری کلید (D) مبدل متصل به ماژول کاهش یابد تا ولتاژ افزایش یابد و در نتیجه نقطه عملکرد به نقطه حداکثر توان نزدیک شود. حال اگر تغییرات توان و تغییرات ولتاژ یکی مثبت و دیگری منفی باشد، الگوریتم در سمت راست نقطه حداکثر قرار دارد و برای



شکل ۱: الف) سلول PV، ب) ماژول PV

اغلب تولید کنندگان ماژول PV، به دلیل جریان نسبتاً بالای تولیدی توسط هر سلول N_p را برابر ۱ در نظر گرفته و مقدار N_s را بصورت استاندارد ۳۶ یا ۷۲ در نظر می‌گیرند، یعنی تعداد ۳۶ یا ۷۲ سلول PV را بصورت سری به هم متصل کرده و ماژول مورد نظر را تولید می‌کنند [6]. منبع جریان فتوکارنت، $N_p I_{ph}$ را که معادل جریان تولیدی اثر فوتوالکتریک بوده و با تابش خورشیدی، G رابطه مستقیم دارد، تولید می‌کند.

طبق قانون کیرشهف داریم:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_d \quad (1)$$

جریان دیود برای یک سلول، I_d برابر است با:

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{q(V_{pv} + (R_{s,cell} I_{pv}))}{AKT}} - 1 \right) \quad (2)$$

با فرض:

$$R_{s-mod} = R_{s,cell} \frac{N_s}{N_p} \quad (3)$$

و با استفاده از (۱) و (۲) داریم:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_o \left(e^{\frac{q(V_{pv} + (R_{s,cell} I_{pv}))}{AKT}} - 1 \right) \quad (4)$$

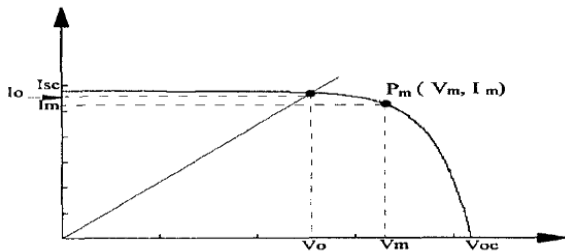
مقدار پارامتر A برای ساختارهای مختلف سلول PV متفاوت است و بر اساس تکنولوژی ساخت PV تعیین می‌شود [7].

برای جریان I_{ph} با استفاده از [۱] میتوان نوشت:

$$I_{ph} = [I_{scr-mod} + K_i (T - T_r)] \frac{G}{G_r} \quad (5)$$

در این رابطه، $I_{scr-cell}$ جریان اتصال کوتاه سلول می‌باشد. بنابراین برای پیدا کردن معادل آن برای یک ماژول PV از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



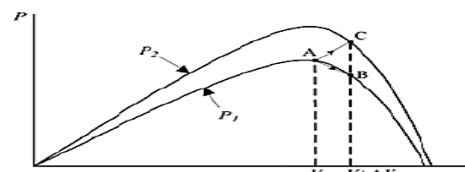
شکل ۳: منحنی ولتاژ جریان PV

حال اگر ماژول در حالت افزایش سریع تابش قرار گیرد، در اکثر مواقع، تغییرات ولتاژ و جریان همزمان مثبت می‌شود، و نیز اگر ماژول در حالت کاهش سریع تابش قرار گیرد، در اکثر مواقع، تغییرات ولتاژ و جریان همزمان منفی می‌شود، با توجه به دلایلی که ذکر شد می‌توان تا حدود زیادی از مشکل ردیابی اشتباه در اثر تغییرات سریع تابش را حل کرد. بدین گونه که اگر تغییرات توان و تغییرات ولتاژ مثبت باشند ولی تغییرات جریان منفی باشد، الگوریتم با کاهش دوره ی کاری مبدل، ولتاژ را افزایش می‌دهد، ولی اگر تغییرات توان، ولتاژ و جریان هر سه مثبت باشد از آنجا که علامت تغییرات ولتاژ و جریان همزمان مثبت می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که در وضعیت افزایش سریع تابش قرار گرفته و باید با افزایش دوره ی کاری مبدل، ولتاژ را کاهش داد تا از ردیابی اشتباه جلوگیری شود.

در حالت دیگر اگر تغییرات توان و ولتاژ منفی باشد، اما تغییرات جریان مثبت باشد، الگوریتم با کاهش دوره ی کاری مبدل، ولتاژ را افزایش می‌دهد و اگر تغییرات توان و ولتاژ و جریان هر سه منفی باشد از آنجا که علامت تغییرات ولتاژ و جریان همزمان منفی می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت در وضعیت کاهش سریع تابش قرار گرفته و باید با کاهش بیشتر دوره ی کاری مبدل، از افت زیاد ولتاژ که منجر به ردیابی اشتباه می‌شود، جلوگیری کرد. فلوجارت این روش در شکل ۴ نشان داده شده است:

رسیدن به این نقطه باید دوره کاری کلید (D) افزایش یابد تا ولتاژ کاهش یابد. این روند ادامه پیدا میکند تا اینکه الگوریتم به نقطه حداکثر توان برسد، سپس حول این نقطه نوسان می‌کند [1,6].

الگوریتم P&O در تغییرات سریع تابش عملکرد مناسبی نداشته و نقطه حداکثر توان را دنبال نمی‌کند. به عنوان مثال در حالت افزایش سریع تابش، مشکل از اینجا ناشی می‌شود که الگوریتم نمی‌تواند تشخیص دهد که افزایش توان در اثر تغییر تابش بوده و یا به دلیل حرکت روی منحنی تابش ثابت، است و لذا فرمان اشتباه صادر می‌شود. برای توضیح بیشتر همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، ابتدا الگوریتم در نقطه A حول نقطه ی حد اکثر توان در تابش ثابت قرار دارد، مطابق الگوریتم ونوسانی که حول نقطه حداکثر توان دارد، با یک تغییر به نقطه B میرسد و چون توان کاهش یافته و ولتاژ افزایش یافته، دوباره به نقطه A برمی‌گردد. حال اگر در حین حرکت از A به B، تابش بطور ناگهانی زیاد شود و در نقطه C قرار گیرد، چون توان افزایش یافته و ولتاژ هم افزایش یافته، ولتاژ را دوباره افزایش می‌دهد و اگر دوباره تابش زیاد شود، این روند ادامه پیدا می‌کند و از نقطه حداکثر توان دور می‌شود و مقداری توان از دست می‌رود [9,10].

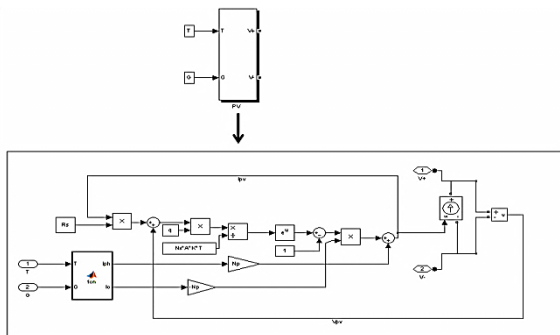


شکل ۲: انحراف الگوریتم P&O

برای حل این مشکل، همانطور که از منحنی جریان-ولتاژ در شکل ۳ برمی‌آید، در تابش ثابت و با افزایش (کاهش) ولتاژ، جریان کاهش (افزایش) می‌یابد و حاصلضرب تغییرات ولتاژ در تغییرات جریان منفی می‌شود:

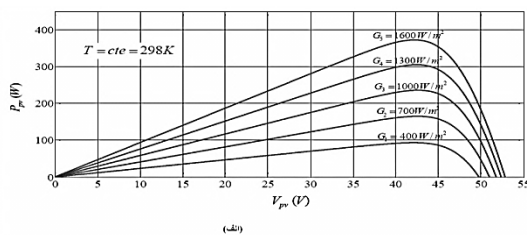
۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

برای تنظیم ولتای خروجی ماژول PV و همچنین ردیابی حداکثر توان قابل حصولی از ماژول، از مبدل BOOST با بار مقاومتی-خازنی استفاده شده است. مبدل پیشنهادی، وظیفه ی ردیابی حداکثر توان قابل حصول از پنل PV و قفل بر روی آن را بر عهده خواهد داشت. مدل سازی ماژول PV در محیط سیمولینک، در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست، خروجی بصورت جریان گرفته شده و به عنوان ورودی، به منبع جریان وابسته متصل شده است. دو سر منبع جریان نیز، به عنوان ولتاژ ماژول برای تاثیر در معادله برگردانده شده است. پارامترهای تابش (G) و دما (T) به عنوان متغیر در نظر گرفته شده اند به عبارتی، با تغییرات تابش و دما، خروجی ماژول PV تغییر خواهد کرد. بقیه پارامترها مقداری ثابت دارند.



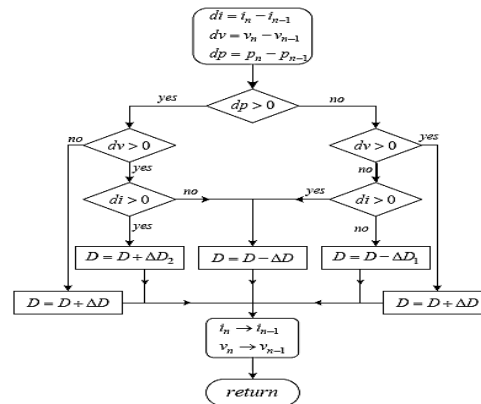
شکل ۶: شبیه سازی ماژول PV در متلب

برای تست عملکرد ماژول PV پس از تعیین تابش و دمای اختیاری، یک منبع ولتاژ وابسته با شکل موج ورودی شیب به دو سر $+V_{pv}$ و $-V_{pv}$ وصل شده و پس از اندازه گیری مقادیر جریان و ولتاژ ماژول PV، منحنی مربوطه در شکل ۷ رسم شده اند.



شکل ۷: منحنی مشخصه های ماژول PV به ازای تابش متغیر

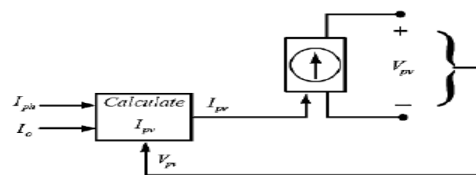
در شکل ۸ شبیه سازی مبدل DC/DC افزایشده متصل به پنل



شکل ۴: فلوجارت الگوریتم پیشنهادی P&O بهینه

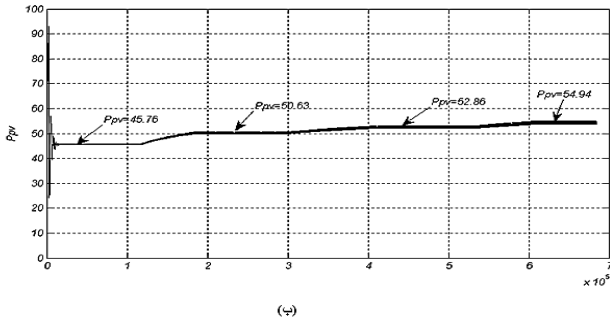
۴- شبیه سازی سیستم فتوولتائیک پیشنهادی

در این قسمت ساختار پیشنهادی برای مدل سازی PV و اعمال سیستم کنترلی MPPT و اعمال آن به یک مبدل مناسب، برای قفل کردن خروجی PV در مقدار حداکثر خود در محیط سیمولینک نرم افزار متلب مدلسازی می گردد. ماژول انتخاب شده برای شبیه سازی مدل VBHN235SE10 شرکت پاناسونیک می باشد [11]. با توجه به مشخصات ماژول انتخابی، جریانهای فوتوکارنت و اشباع معکوس دیود در محیط Embedded Function نرم افزار Matlab/SIMULINK شبیه سازی شده و خروجی I_{ph} و I_o دریافت شده است. با توجه به اینکه در هر لحظه، مقادیر G و T در حال تغییر می باشند، ورودی های متغیر برای محاسبه ی I_{ph} و I_o همان مقادیر G و T خواهند بود. پس از محاسبه جریانهای فتوولتائیک و جریان اشباع معکوس دیود، در این لحظه میتوان با جاگذاری مقادیر I_{ph} و I_o در معادله (۴)، خروجی ماژول فتوولتائیک را دریافت کرد. در این مقاله همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، خروجی ماژول فتوولتائیک به صورت منبع جریان در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: بلوک محاسبه مقدار جریان I_{pv}

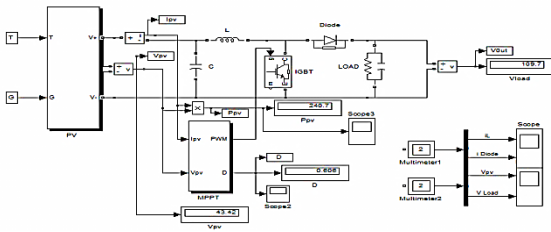
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



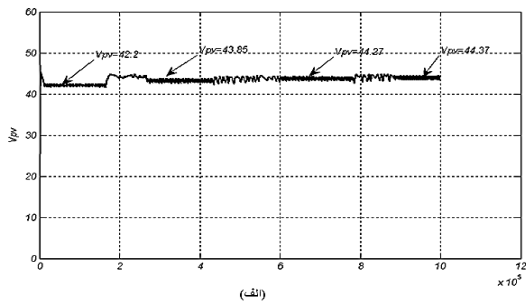
(ب)

شکل ۱۰: شکل موج های ولتاژ و توان خروجی ماژول pv متصل به مبدل افزایش دهنده بدون سیستم mppt. با اتصال سیستم فوق به سیستم ردیاب حداکثر توان بر اساس الگوریتم بهینه شده ی p&o مطابق شکل ۱۱ برای اثبات عملکرد صحیح سیستم، به ازای همان سیگنال متغیر تابش مورد بررسی قرار می دهیم.

MPPT Controllers using "Perturb & Observe" technique

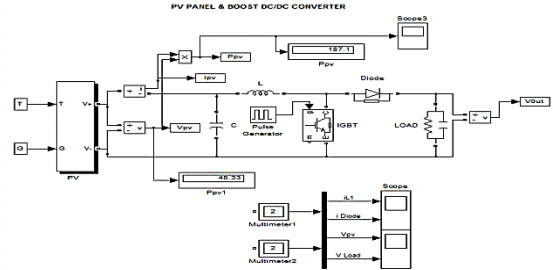


شکل ۱۱: مبدل DC/DC افزایش دهنده متصل به پنل PV با سیستم کنترلی MPPT. شکل موجهای ولتاژ و توان خروجی pv متصل به ردیاب پیشنهادی و مبدل افزایش دهنده در شکل ۱۲ نشان داده شده است:



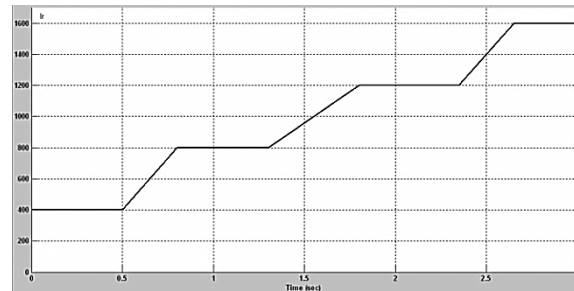
(الف)

PV بدون سیستم کنترلی MPPT آورده شده است:



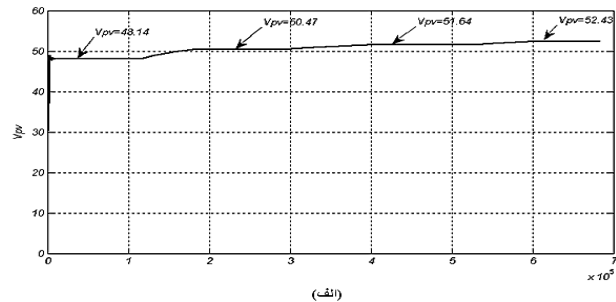
شکل ۸: مبدل DC/DC افزایش دهنده متصل به پنل PV

مطابق شکل ۸، برای فعال کردن سوئیچ مبدل افزایش دهنده از یک پالس مربعی با فرکانس 10KH و سیکل کاری $D=0/5$ استفاده شده است. مقدار مقاومت بار برابر ۵۰ اهم و مقدار ظرفیت خازن موجود در بار مقدار 25 میکروفاراد انتخاب شده است. سیگنال تابشی اعمالی به سیستم با تغییرات در شکل ۹ آورده شده است:



شکل ۹: سیگنال تابشی اعمالی به سیستم

شکل موجهای ولتاژ و توان خروجی pv در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

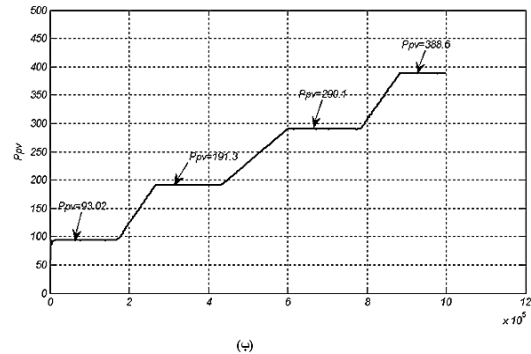


(الف)

از 54/94 به 388/4 افزایش پیدا کرده است. با تغییرات تابش سیستم کنترلی همچنان نقطه حداکثر توان را شناسایی می نماید و توان خروجی بصورت مداوم در حداکثر مقدار خود قرار می گیرد و توان تحویلی سیستم فتوولتائیک افزایش می یابد.

مراجع

- [1] Djamil Rekiou, Ernest Matagne, "optimization of Photovoltaic Power Systems", Springer, 2012
- [2] Roger A. Messenger, Jerry Ventre, "Photovoltaic Systems Engineering", 2 ed, Taylor & Francis e-Library, 2005 .
- [3] نشریه سازمان انرژی های نو ایران ، تیرماه ۱۳۹۱ ، سال ششم شماره ۲۷ .
- [4] S.Poshtkouhi , V.Palaniappan , M.Fard , O.Trescases , "IEEE Transactions on Power Electronics ", Nov.2012 , Vol. 27 , No.11 , pp.4656-46666.
- [5] R.Ramaprabha , B.L.Mathur , "Development of an Improved Model of SPV"
- [6] Mirjana Milosevic , "On the Control of Distributed Gentributed Generation in Power Systems" , Thesis for the Degree of Doctor of Technical Science , Swiss Federal Institut of Technology t Switzerland , 2007 .
- [7] Huan-Liang Tsai , Ci-Siang Tu , Yi-Jie Su , "Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink", The World Congress on Engineering and computer science , 22-24 October 2008 , USA .
- [8] W.de Soto , S.AKlein , W.A.Beckman , "Improvement and Validation of a model for photovoltaic array performance" , Elasevier Solar Energy , Janury 2006 , VOL80 , No.1 , pp.78-88
- [9] Vitor Femao Pires , Jose Fernando A.silva , "Teaching Nonlinear Modeling , simulation , and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK" , IEEE Transaction on Education , vol.45 , no.3 , August 2002 .
- [10] O.Wasynczuk , "Dynamic behavior of a class photovoltaic power systems , "IEEE Trans .Power App.Syst , Vol.102 , no.9 , pp.3031-3037 , sep.1893
- [11] "HIT photovoltaic Module VBHN235SE10" , VBHN235SE10 PV Module datasheet , Panasonic , 2012.



شکل ۱۲: شکل موج های ولتاژ و توان خروجی ماژول PV متصل به مبدل افزایشنده با سیستم mppt

با توجه به اشکال فوق میتوان گفت که بلوک کنترلی MPPT با نمونه برداری مداوم از ولتاژ و جریان پنل PV و محاسبه توان پنل، مقدار سیکل کاری مبدل DC-DC را طوری تنظیم می نماید تا توان خروجی در مقدار حداکثر خود قرار گیرد .

۵- نتیجه گیری

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، تابش خورشید از مقدار $400 \frac{W}{m^2}$ آغاز شده است. در ثانیه $t=0/5s$ به مقدار $800 \frac{W}{m^2}$ می رسد، تا زمان $t=1/3s$ این مقدار حفظ می شود. از لحظه $t=1/3s$ دوباره تابش شروع به افزایش می کند و در $t=1/8s$ به مقدار $1200 \frac{W}{m^2}$ می رسد از لحظه $t=2/35s$ تابش مجدداً افزایش یافته و در $t=2/65s$ به $1600 \frac{W}{m^2}$ می رسد و تا پایان شبیه سازی در این مقدار باقی می ماند. در شکل ۱۰ تغییرات ولتاژ و توان خروجی ماژول PV متصل به مبدل DC-DC بدون بلوک کنترلی آورده شده است. همانطور که در این شکلها مشاهده می شود تغییرات ولتاژ خروجی پنل زیاد و توان خروجی پنل پائین می باشد. اگر این نمودارها مقایسه شوند با نمودارهای شکل ۱۲ قدرت ردیابی سیستم کنترلی مشخص می شود. در تابش $800 \frac{W}{m^2}$ با تنظیم سیکل کاری مبدل، ولتاژ پنل به $43/85v$ رسیده است و این همان ولتاژی هست که نقطه MPP را مشخص می کند در این ولتاژ، توان پنل خورشیدی از $50/63$ به $191/3$ افزایش پیدا کرده است. در تابش $1200 \frac{W}{m^2}$ با تنظیم سیکل کاری مبدل، ولتاژ پنل به $44/27v$ و توان پنل خورشیدی از $52/86$ به $200/1$ افزایش پیدا کرده است. و در تابش $1600 \frac{W}{m^2}$ با تنظیم سیکل کاری مبدل، ولتاژ پنل به $44/37v$ و توان پنل خورشیدی