

بهبود عملکرد و کارایی الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان در تغییرات سریع تابش

12-F-REN-2101

علی اکبر قسامی، اسما سلیمانی ساردو، دکتر سید محمد صادق زاده

دانشگاه شاهد

ایران

واژه‌های کلیدی: سیستم فتوولتائیک، مبدل با افزایش‌دهی بالا،

الگوریتم اصلاح شده ی هدایت افزایشی (INC)، الگوریتم بهبود یافته ی P&O

چکیده

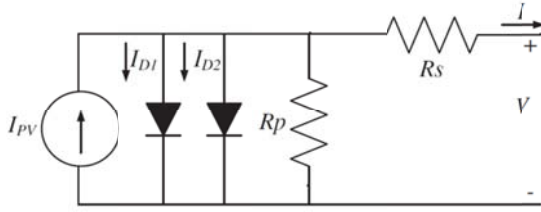
بدلیل مشخصه ی غیرخطی توان-ولتاژ آرایه خورشیدی، در ولتاژی خاص، می توان حداکثر توان را از آرایه دریافت کرد. تا کنون روش های مختلفی برای دست یابی به نقطه ی حداکثر توان پیشنهاد شده است. از جمله روش های رایج می توان به الگوریتم هدایت افزایشی (INC) و روش آشفتن یا مشاهده کردن (P&O) اشاره کرد. روش P&O بدلیل سادگی اجرا، در صنعت بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. اما این روش در تغییرات سریع تابش، از دنبال کردن نقطه حداکثر توان ناتوان است و دچار اشکال می شود. در این مقاله روشی برای حل این مشکل ارائه شده است. همچنین روش INC نیز که در ردیابی نقطه حداکثر توان در تغییرات سریع تابش بهتر از الگوریتم P&O عمل می کند، با روش پیشنهادی عملکرد مناسبتری خواهد داشت. برای آزمایش روش پیشنهادی، الگوریتم ها بر روی یک مبدل با افزایش‌دهی بالا در نرم افزار سیمولینک متلب پیاده شده است. نتایج شبیه سازی ردیابی نرم و بدون انحراف نقطه ی حداکثر توان، دریافت توان بیشتر و در نتیجه بهبود بازده را تایید می کند.

۱- مقدمه

با توجه به محدودیت سوخت های فسیلی و پدید آمدن بحران انرژی در سال های آتی، منابع تجدید پذیر مانند خورشید، باد و... از اهمیت ویژه ای برخوردار شده اند. در این بین، انرژی خورشیدی از سایر انرژی ها پیشی گرفته است. بطوری که طبق پیش بینی های انجام شده توسط انجمن صنعت فتوولتائیک اروپا (EPIA)¹ ظرفیت تولید توان فتوولتائیک به ۶۸۸ گیگا وات در سال ۲۰۲۰ خواهد رسید و ۱۲ درصد مصرف برق اروپا از این طریق بدست خواهد آمد. توسعه ی انواع سلول های خورشیدی و ادوات الکترونیک قدرت این روند رو به رشد را سرعت بخشیده است. در استفاده از این انرژی پاک باید ملاحظاتی مورد توجه قرار گیرد. خروجی توان سلول های فتوولتائیک با توجه به شرایط دمایی و تابشی، متغیر است. در نتیجه با الگوریتمی باید در تمام شرایط توان حداکثر را از آن استحصال کرد. تاکنون الگوریتم های متفاوتی برای ردیابی نقطه حداکثر توان ارائه شده است. در مرجع [۱] مروری کلی بر این روش ها انجام شده است. روش های هدایت افزایشی و روش P&O بدلیل

¹European Photovoltaic Industry Association

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱- مدار معادل الکتریکی سلول خورشیدی

در این مدل جریان خروجی سلول مطابق معادله زیر بدست می‌آید.

$$I = I_{PV} - I_{o1} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{\alpha_1 V_{T1}} \right) - 1 \right] - \quad (1)$$

$$I_{o2} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{\alpha_2 V_{T2}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right)$$

$$I_{PV} = (I_{PV-STC} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \quad (2)$$

$$I_{o1} = I_{o2} = I_0 = \frac{(I_{PV-STC} + K_i (T - T_{ref}))}{\exp \left[\frac{(V_{oc,STC} + K_v \Delta T)}{((\alpha_1 + \alpha_2)/P) V_T} \right] - 1} \quad (3)$$

که در آن:

I_{PV-STC} جریان اتصال کوتاه ماژول بر حسب آمپر، I_{o1} و I_{o2} جریان اشباع معکوس دیودها بر حسب آمپر است که بنا به مرجع [۵] می‌توان با یکدیگر برابر قرار داد، $\Delta T = T - T_{ref}$ که در آن T دمای نقطه کار سلول بر حسب کلونین و T_{ref} دما در شرایط استاندارد برابر با ۲۷۳ کلونین، α_1 و α_2 ضریب ایده آل دیودها هستند که مقدار α_1 برابر واحد است [۵] و مقدار α_2 برای بهترین تطابق بین شبیه سازی و منحنی دیتاشیت سلول برابر ۱/۲ در نظر گرفته شده است و $P = \alpha_1 + \alpha_2$.

$V_{T1,2}$ ولتاژ گرمایی است که برابر $N_s kT/q$ می‌باشد و در آن

$$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C} \text{ و } K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

و N_s تعداد سلول های سری ماژول را نشان میدهد. K_i ضریب حرارتی جریان فتوولتاییک برحسب $A/^\circ C$ و G

سادگی اجرا، عدم وابستگی به پارامترهای آرایه فتوولتاییک بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. همچنین کنترلر های فازی و عصبی نیز بدلیل توانایی کار با ورودی های غیر دقیق و عدم نیاز به مدل ریاضی دقیق سیستم و عملکرد مناسب در کاربردهای غیر خطی، برای به استفاده در ردیابی نقطه حداکثر توان سلول های خورشیدی مناسب است [۲]. اما این کنترلر ها بدلیل پیچیدگی اجرا کمتر مورد استفاده قرار گرفته اند. الگوریتم P&O به دو صورت آنالوگ و دیجیتال قابل پیاده سازی است. این الگوریتم به دلیل سادگی اجرا در صنعت بیشتر از سایر روش ها مورد استفاده قرار گرفته است. اما این روش در ردیابی نقطه حداکثر توان در تغییرات سریع تابش ناتوان است و بازده ی پایینی دارد [۳]. روش هدایت افزایشی بر پایه شیب منحنی توان-ولتاژ استوار است و برای اجرا به پیاده سازی دیجیتال نیازمند است. این روش مشکل ردیابی در تغییرات سریع را تا حدودی حل کرده است. در این مقاله روشی جدید پیشنهاد شده است که الگوریتم های P&O و هدایت افزایشی، تغییرات سریع تابش را مناسب تر و با انحراف کمتری ردیابی می کنند. این الگوریتم ها با استفاده از یک مبدل DC/DC با افزایشی بالا در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی کارایی بهتر و قابلیت اطمینان بالاتر الگوریتم های پیشنهادی را به اثبات می رساند.

۲- مدل سلول خورشیدی

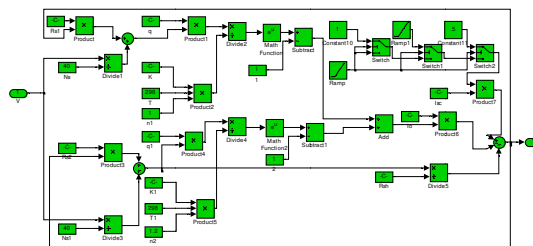
در این مقاله، ماژول مدلسازی شده یک ماژول ۱۰۰ وات ساخت شرکت فیبر نوری و کابل های شهید قندی، با ولتاژ مدار باز ۲۴/۳ ولت، جریان اتصال کوتاه ۵/۳ آمپر و ولتاژ حداکثر توان ۱۹/۶ ولت که از ۴۰ سلول سری تشکیل شده است. برای مدلسازی هر سلول از مدل دو دیودی استفاده شده است. شکل ۱ مدار معادل الکتریکی دو دیودی سلول را نشان می دهد که در آن، منبع جریان معرف اثر جریان نوری، R_p اثر جریان های نشتی و R_s مقاومت داخلی سلول را نشان می دهد [۴].

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

با تغییر ولتاژ از مقدار صفر تا ولتاژ مدار باز، نمودارهای جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ برای ماژول ۱۰۰ وات مورد استفاده در این مقاله بدست آمده و در شکل ۳ نمایش داده شده است. این نمودارها با اعمال شرایط مختلف دما و تابش در نرم افزار سیمولینک متلب بدست آمده‌اند.

همانطور که از نمودارهای مشخصه ماژول خورشیدی در شکل ۳ بر می آید، جریان و توان ماژول با افزایش دما و کاهش شدت تابش اشعه ی خورشید کاهش می یابد. با توجه به وابستگی توان به ولتاژ، باید الگوریتمی اجرا نمود تا با تغییر ولتاژ، بوسیله ی تغییر دوره ی کاری کلید مبدل DC/DC، شاخص توان در نقطه حداکثر مقدار خود نگه داشته شود.

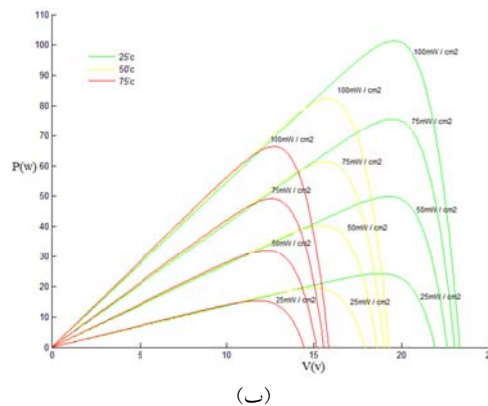
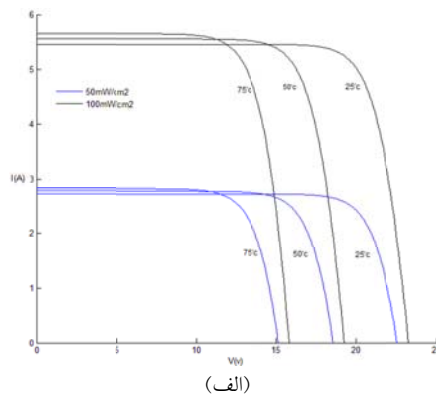
شدت تابش خورشید بر حسب mW/cm^2 و $G_{ref}=100mW/cm^2$ می باشد و ولتاژ مدار باز در شرایط استاندارد است. در این مدل با توجه به مقادیر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه و نقطه ماکزیمم توان که از دیتاشیت سلول بدست می آید و با استفاده از روش تکرار نیوتن رافسون مقادیر R_p و R_s محاسبه می شوند و در شبیه سازی مورد استفاده قرار می گیرند. مدل ماژول استفاده شده در نرم افزار سیمولینک متلب در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- سیمولینک ماژول فتوولتائیک در متلب

۳- الگوریتم ردیابی حداکثر توان P&O

اساس کار این الگوریتم بر مقایسه تغییرات توان و ولتاژ استوار است، بدین گونه که ابتدا از ولتاژ و جریان ماژول نمونه گیری می شود و تغییرات توان و تغییرات ولتاژ محاسبه می گردد. در صورتی که تغییرات توان و ولتاژ هر دو مثبت یا هر دو منفی باشد نقطه عملکرد در سمت چپ نقطه حداکثر توان قرار دارد و برای رسیدن به این نقطه باید دوره ی کاری کلید (D) 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 رسیدن به این نقطه باید دوره ی کاری کلید (D) افزایش یابد تا ولتاژ کاهش یابد. این روند ادامه پیدا می کند تا اینکه الگوریتم به نقطه ی حداکثر توان برسد. سپس حول این نقطه نوسان می کند. در شکل ۴ فلوجارت این الگوریتم آورده شده است.

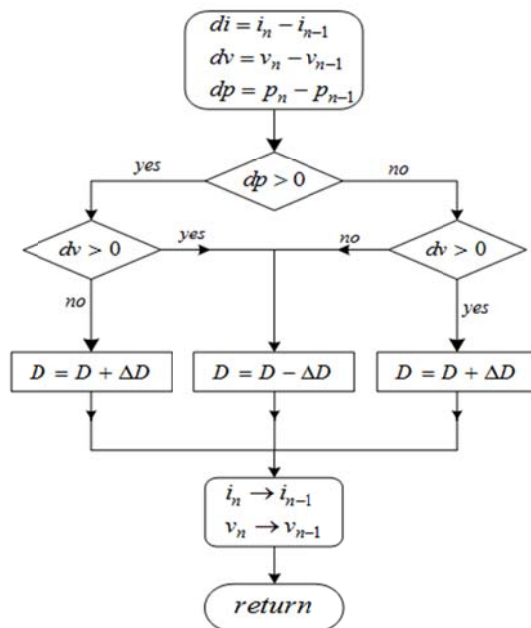


شکل ۳- مشخصه ماژول خورشیدی ۱۰۰ وات مورد استفاده در

مطالعه بازاء شرایط مختلف دما و تابش
(الف)جریان - ولتاژ (ب)توان - ولتاژ

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

نقطه **B** می‌رسد و چون توان کاهش یافته و ولتاژ افزایش یافته، دوباره به نقطه **A** بر میگردد. حال اگر در حین حرکت از **A** به **B**، تابش به طور ناگهانی زیاد شود و در نقطه **C** قرار گیرد، چون توان زیاد و ولتاژ هم زیاد شده، ولتاژ را دوباره زیاد می‌کند و اگر دوباره تابش زیاد شود، این روند ادامه پیدا می‌کند و از نقطه حداکثر توان دور می‌شود. در نتیجه مقداری توان را از دست می‌رود.

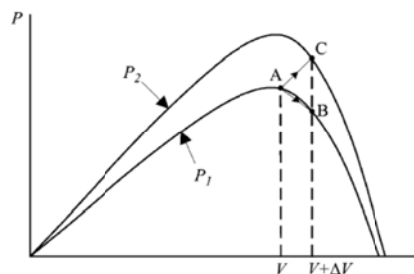


شکل ۴- الگوریتم P&O

۴- الگوریتم اصلاح‌شده‌ی ردیابی حداکثر توان P&O

مشکل شرح داده شده در بخش قبل را می‌توان به شرح زیر حل کرد. همانطور که از منحنی جریان-ولتاژ (شکل ۳) بر می‌آید، در تابش ثابت و با افزایش (کاهش) ولتاژ، جریان کاهش (افزایش) می‌یابد و حاصلضرب تغییرات ولتاژ در تغییرات جریان منفی می‌شود. حال اگر ماژول در حالت افزایش سریع تابش قرار بگیرد در اکثر مواقع، تغییرات ولتاژ و جریان همزمان مثبت می‌شود. همچنین اگر ماژول در حالت کاهش سریع تابش قرار بگیرد در اکثر مواقع تغییرات ولتاژ و جریان همزمان منفی می‌گردد. با توجه به سه نکته‌ای که در پاراگراف قبل بیان 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 کاری مبدل، ولتاژ را افزایش دهد ولی اگر تغییرات توان و ولتاژ و جریان هر سه مثبت باشد از آنجا که علامت تغییرات ولتاژ و جریان همزمان مثبت می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت در وضعیت افزایش سریع تابش قرار گرفته و باید با افزایش دوره کاری مبدل، ولتاژ را کاهش داد تا از ردیابی اشتباه جلوگیری شود. در حالتی دیگر اگر تغییرات توان و ولتاژ منفی باشد اما تغییرات جریان مثبت باشد الگوریتم با کاهش دوره کاری مبدل، ولتاژ را افزایش دهد ولی اگر تغییرات توان و ولتاژ و جریان هر سه منفی باشد از آنجا که علامت تغییرات ولتاژ و جریان همزمان منفی می‌باشد می‌توان

این الگوریتم در تغییرات سریع تابش عملکرد مناسبی نداشته و نقطه حداکثر توان را دنبال نمی‌کند. به عنوان مثال در حالت افزایش سریع تابش، مشکل از این جا ناشی می‌شود که الگوریتم نمی‌تواند تشخیص دهد که افزایش توان در اثر تغییر تابش بوده یا به دلیل حرکت روی منحنی تابش ثابت، است و در نتیجه فرمان اشتباه صادر می‌کند.



شکل ۵- انحراف الگوریتم P&O از نقطه حداکثر توان

برای توضیح بیشتر همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است [۶]، ابتدا الگوریتم در نقطه **A**، حول نقطه حداکثر توان در تابش ثابت قرار دارد. مطابق الگوریتم و نوسانی که حول نقطه حداکثر توان دارد، با یک تغییر به

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

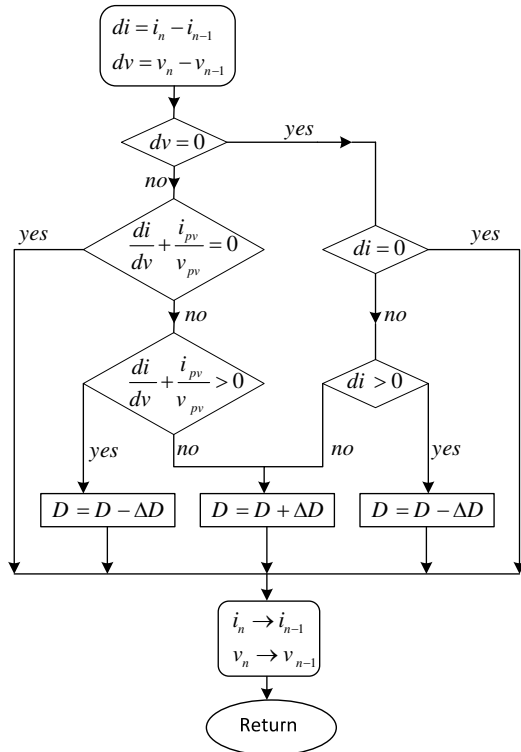
در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} > 0 \quad (5)$$

$$\frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} < 0 \quad (6)$$

$$\frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (7)$$

در شکل ۷ فلوچارت این الگوریتم آورده شده است.

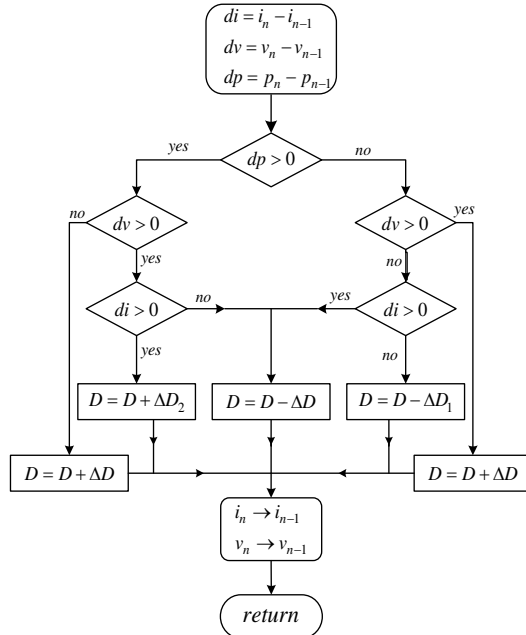


شکل ۷-الگوریتم هدایت افزایشی

۶-الگوریتم اصلاح شده هدایت افزایشی

الگوریتم هدایت افزایشی هر چند به نسبت الگوریتم P&O در ردیابی تابش های سریع بهتر عمل می کند، اما با این وجود در شرایط تغییرات سریع تابش تا حدود زیادی دچار اشتباه می شود. برای بهبود عملکرد الگوریتم هدایت افزایشی از سه نکته گفته شده در پاراگراف اول بخش سوم استفاده شده است. بدین گونه که اگر شیب مثبت و تغییرات ولتاژ مثبت باشند ولی تغییرات جریان منفی باشد الگوریتم با کاهش دوره کاری مبدل، ولتاژ را افزایش دهد ولی اگر شیب و تغییرات ولتاژ و جریان هر سه مثبت باشد از آنجا که علامت تغییرات ولتاژ و جریان

توان نتیجه گرفت در وضعیت کاهش سریع تابش قرار گرفته و باید با کاهش بیشتر دوره کاری مبدل، از افت زیاد ولتاژ که منجر به ردیابی اشتباه می شود جلوگیری کرد. فلوچارت این روش در شکل ۶ مشاهده می شود.



شکل ۶-فلوچارت الگوریتم پیشنهادی P&O

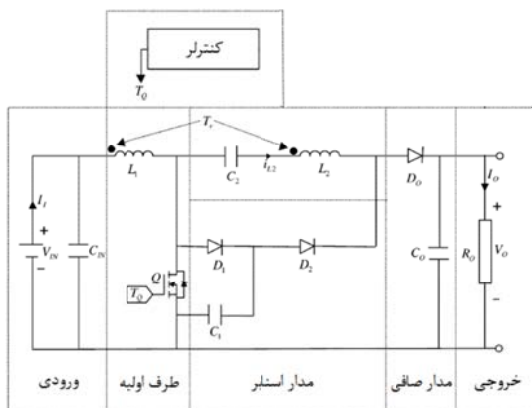
۵-الگوریتم هدایت افزایشی

الگوریتم هدایت افزایشی معمولی، براساس شیب منحنی عمل می کند [۷]. بدین ترتیب که با محاسبه ی شیب منحنی توان-ولتاژ، نقطه کار فعلی مشخص می شود. اگر این شیب مثبت بود، نقطه کار در سمت چپ منحنی است و برای رسیدن به نقط حداکثر توان، باید دوره ی کاری کلید (D) کاهش یابد. در صورت منفی بودن شیب، نقطه عملکرد در سمت راست نقطه ی حداکثر توان قرار دارد و باید دوره ی کاری کلید افزایش یابد. در شیب صفر نیز، حداکثر توان از ماژول گرفته می شود و به تغییر دوره ی کاری کلید نیازی نیست. با استفاده از معادلات زیر شیب محاسبه می شود.

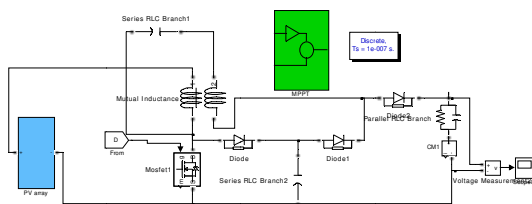
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (4)$$

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

این سطح ولتاژ بالا، از دو طریق سری کردن ماژول ها و استفاده از مبدل های DC/DC با افزایش توان بالا استفاده می شود. از آنجا که سری کردن ماژول های فتوولتاییک به دلیل عدم تطابق ماژول با یکدیگر و همچنین موضوع نیم سایه ها باعث کاهش توان خروجی ماژول ها می گردد [۸]، [۹] استفاده از مبدل های DC/DC با افزایش توان بالا توصیه می شود. در این راستا در این مقاله از یک مبدل DC/DC با افزایش توان بالا با سلف کوپل شده [۱۰]، استفاده گردیده است. این مبدل توانایی تبدیل ولتاژ ۱۲ ولت به ۴۰۰ ولت را داراست. از دیگر ویژگی های این مبدل می توان به بازده بالای آن اشاره نمود. شکل ۹ ساختار و شکل ۱۰ شبیه سازی آن در محیط سیمولینک را نشان می دهد.

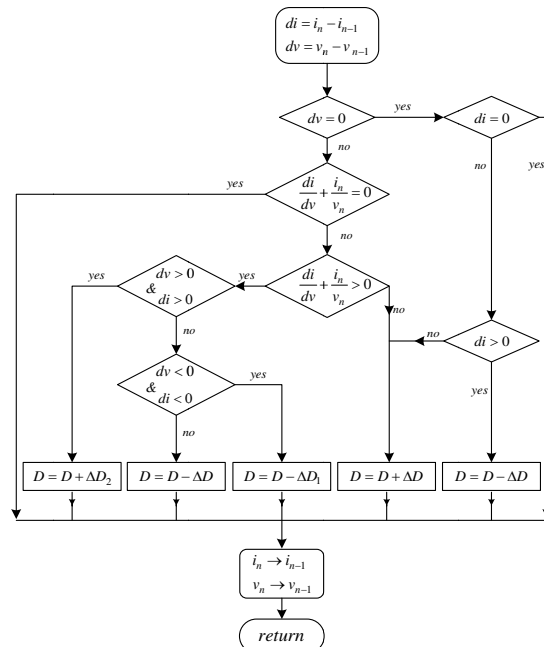


شکل ۹- مدل DC/DC با افزایش توان بالا و سلف کوپل شده



شکل ۱۰- شبیه سازی مبدل با افزایش توان بالا با سلف کوپل شده

همزمان مثبت می باشد می توان نتیجه گرفت در وضعیت افزایش سریع تابش قرار گرفته و باید با افزایش دوره کاری مبدل، ولتاژ را کاهش داد تا از ردیابی اشتباه جلوگیری شود. در حالتی دیگر اگر شیب مثبت و تغییرات ولتاژ منفی باشد اما تغییرات جریان مثبت باشد الگوریتم با کاهش دوره کاری مبدل، ولتاژ را افزایش دهد ولی اگر شیب و تغییرات جریان و ولتاژ هر دو منفی باشد از آنجا که علامت تغییرات ولتاژ و جریان همزمان منفی می باشد می توان نتیجه گرفت در وضعیت کاهش سریع تابش قرار گرفته و باید با کاهش بیشتر دوره کاری مبدل، از افت ولتاژ زیاد که منجر به ردیابی اشتباه می شود جلوگیری کرد. بدین ترتیب، ردیابی مناسبتری را شاهد خواهیم بود. فلوجارت این روش در شکل ۸ مشاهده می شود.



شکل ۸- الگوریتم اصلاح شده هدایت افزایشی

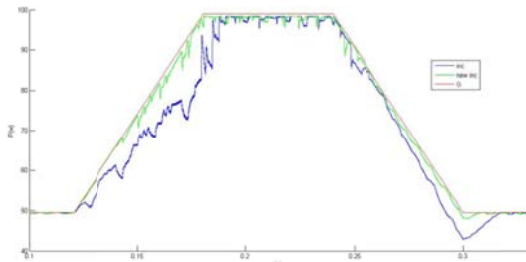
۷- نتایج شبیه سازی

از آنجا که هدف نهایی، انتقال انرژی تولید شده توسط ماژول ها به شبکه یا مصرف کننده خانگی با ولتاژ ۲۲۰ ولت متناوب می باشد، در نتیجه باید ولتاژ خروجی ماژول ها را به سطح مورد نیاز اینورتر رسانید. برای دستیابی به

همچنین الگوریتم ردیابی حداکثر توان به صورت دیجیتال پیاده سازی شده است تا به راحتی بتوان آن را در میکروکنترلر پیاده سازی نمود. برای آزمایش نحوه ی

بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق

شکل ۱۳ نیز به مقایسه نحوه ی عملکرد و ردیابی الگوریتم هدایت افزایشی و الگوریتم اصلاح شده هدایت افزایشی می پردازد. این شکل نیز بهبود الگوریتم و دریافت توان بیشتر و در نتیجه بازده بالاتر را نشان می دهد.

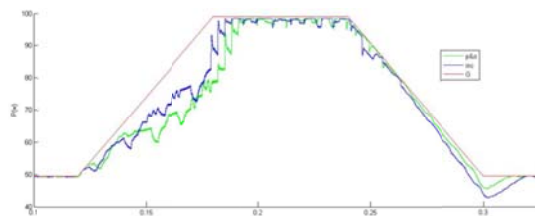


شکل ۱۳- مقایسه عملکرد الگوریتم هدایت افزایشی و الگوریتم اصلاح شده هدایت افزایشی

۸- نتیجه گیری

ماژول های خورشیدی در ولتاژ و توان مشخصی می توانند حداکثر توان خود را تولید کنند. الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان وظیفه ی نگهداری ماژول در نقطه ی حداکثر توان را بر عهده دارد. روش های هدایت افزایشی و P&O از جمله روش های رایج در این باب هستند که به دلیل پیاده سازی ساده، در عمل مورد استفاده قرار می گیرند. اما این دو روش، به ویژه روش P&O در تابش های سریع از ردیابی مناسب نقطه حداکثر توان ناتوان است. این دو الگوریتم در هنگام تغییرات سریع افزایش تابش نمی توانستند تشخیص دهند که تغییرات توان، بر اثر تغییر تابش است یا ناشی از حرکت در روی منحنی توان ثابت است و در نتیجه ردیابی دچار اختلال می شد و نقطه عملکرد از نقطه حداکثر توان دور می شود. در این مقاله با اصلاح الگوریتم های P&O و هدایت افزایشی این مشکل تا حد زیادی رفع گردیده است. الگوریتم پیشنهادی در نرم افزار سیمولینک متلب شبه سازی شده است و نتایج شبیه سازی ردیابی نرم و بدون انحراف را در تغییرات سریع تابش نمایش می دهد. بدین ترتیب در تغییرات سریع تابش نیز پانل در نقطه حداکثر خود کار می کند. در نتیجه از اتلاف توان جلوگیری شده و توان بیشتری در خروجی مشاهده گردید.

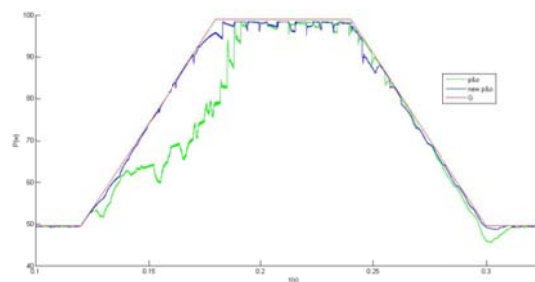
عملکرد الگوریتم ردیابی حداکثر توان در تغییرات سریع تابش، از تست دوزنقه استفاده شده است، بدین ترتیب که تابش در مدت ۶۰ میلی ثانیه، از مقدار اولیه ی w/m^2 ۵۰۰ به مقدار w/m^2 ۱۰۰۰ رسانده می شود. سپس به مدت ۶۰ میلی ثانیه تابش در مقدار w/m^2 ۱۰۰۰ ثابت نگه داشته می شود و دوباره در مدت ۶۰ میلی ثانیه به همان مقدار w/m^2 ۵۰۰ رسانده می شود. شکل ۱۱ نحوه ی ردیابی توان را با استفاده از الگوریتم P&O در مقایسه با الگوریتم هدایت افزایشی را نشان می دهد.



شکل ۱۱- مقایسه عملکرد الگوریتم هدایت افزایشی و P&O

همانطور که از شکل ۱۱ پیدا است، الگوریتم INC در مقایسه با الگوریتم P&O در تغییرات سریع تابش، عملکرد بهتری را از خود نشان می دهد. در شکل ۱۲، ردیابی حداکثر توان الگوریتم P&O و الگوریتم پیشنهادی و اصلاح شده P&O با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همانطور که در شکل نیز مشخص است، الگوریتم اصلاح شده عملکرد بهتری از خود نشان می دهد و انحراف و اتلاف توان کمتر و بازده بیشتری دارد.



شکل ۱۲- مقایسه عملکرد الگوریتم P&O و الگوریتم اصلاح شده ی P&O

فهرست مراجع

- [1] Trishan ESRAM, and Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007
- [2] M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato, "Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost converter , supplied PV system using fuzzy controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 4, pp. 749–758, Aug. 2003.
- [3] S. Jain and V. Agarwal, "A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems," *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 16–19, Mar. 2004.
- [4] Kashif Ishaque , Zainal Salam , Syafaruddin "A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model" .ELSEVIER, *Solar Energy* 85 (2011) 2217–2227
- [5] Chih-Tang, S., Noyce, R.N., et al., 1957. Carrier generation and recombination in P–N junctions and P–N junction characteristics. Proceedings of the IRE 45 (9), 1228–1243.
- [6] O. Wasynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 102, no. 9, pp. 3031–3037, Sep. 1983.
- [7] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, "A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation," in *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, 2001, pp. 1011–1014
- [8] T. Shimizu, O. Hashimoto, and G. Kimura, "A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 704–711, Mar. 2003.
- [9] R. J. Wai, C. Y. Lin, R. Y. Duan, and Y. R. Chang, "High-efficiency dc–dc converter with high voltage gain and reduced switch stress,"