

ردیابی حداکثر توان در سیستم تولید توان خورشیدی بر پایه تقریبگر فازی تابع ولتاژ نقطه

کار با شدت تابش

حسن ایجادی^۱ و امین حاجی زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برق - دانشکده برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران

Hassan.Ijadi@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران

AminHajizadeh@Shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی به منظور ردیابی حداکثر توان در صفحات خورشیدی بر پایه منطق فازی ارائه شده است. اساس روش پیشنهاد شده در این مقاله بر پایه وجود رابطه بین شدت تابش و ولتاژ نقطه حداکثر توان است. با داشتن این رابطه، در هر لحظه با اندازه گیری شدت تابش، ولتاژ نقطه حداکثر توان قابل محاسبه است. این رابطه که دقت آن قابل تعریف است، با استفاده از روش تقریبگر تابع فازی بدون نیاز به داشتن مدل سلول خورشیدی در چند دوره آموزش به دست می آید. بی نیاز بودن از مدل صفحه خورشیدی از ویژگی های روش پیشنهادی است. به منظور صحه گذاری روش پیشنهادی، نتایج شبیه سازی ارائه شده است.

واژه های کلیدی: ردیابی حداکثر توان، صفحات خورشیدی، سیستم فازی، کنترل.

۱- مقدمه

می توان به سوخت رایگان و بدون آلایندهی آن اشاره نمود و از معایب آن می توان به هزینه اولیه بالا و بازده پایین سیستم اشاره کرد. هر سال سلول های تولیدی نسبت به سال های گذشته بازده بالاتر و قیمت پایین تر پیدا می کنند، ولی بازهم بازده پایین و قیمت نسبتا بالای هر سلول وجود دارد. ضعف علمی و تکنیکی در تبدیل به علت کمبود دانش و تجربه میدانی، متغیر و متناوب بودن مقدار انرژی به دلیل تغییرات جوی و فصول سال و جهت تابش موجب شده است که نتوانیم استفاده مناسبی از این موهبت خدایی به شکلی مناسب استفاده کنیم. از این رو، باید از آنچه در اختیار داریم، حداکثر بهره را ببریم. برای این منظور باید سیستم مکانیکی داشت که صفحات خورشیدی را در هر زمان در سمت نور مستقیم خورشید قرار دهد به این سیستم ردیاب خورشید^۲ گفته می شود [۴]. همچنین باید سیستم الکترونیکی داشت تا خروجی صفحات خورشیدی را در نقطه کاری مناسب که حداکثر توان انتقالی را داشته باشد قرار دهد. برای قرار دادن صفحات خورشیدی در نقطه

امروزه با گسترش صنعت و افزایش جمعیت نیاز به انرژی روز به روز افزایش می یابد. با توجه به اینکه انرژی های حاصل از سوخت فسیلی رو به پایان است، از این رو جهان نظر خود را به سمت انرژی های تجدید پذیر برده است. از انرژی های تجدید پذیر می توان به انرژی حاصل از نور خورشید اشاره نمود. انرژی حاصل از خورشید به دو صورت استفاده می شود [۱]. حالت اول استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف خانگی، صنعتی و نیروگاهی، و حالت دوم تبدیل مستقیم نور حاصل از پرتو های خورشید به الکتریسیته به واسطه سلول خورشیدی PV^۱ است. از مزیت های سلول خورشیدی

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۹/۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۱۰/۱۰

نام نویسنده مسؤول : امین حاجی زاده

نشانی نویسنده مسؤول : ایران - شاهرود - دانشگاه صنعتی شاهرود

- دانشکده برق و رباتیک

سیستم را مبنی بر مدل طراحی و اجرا می‌کنند، که می‌توان به منابع [۱۰-۱۱] اشاره نمود. مشکل اصلی این نوع روش‌ها نداشتن انعطاف با تغییر سلول خورشیدی با سلول دیگر است؛ به طوری که هر پیاده سازی مختص به همان سلول خورشیدی است که از پیش برای آن طراحی شده است. علاوه بر مشکل بیان شده یافتن مدل و پارامترهای سلول خورشیدی قبل از طراحی خود مشکل دیگری است. دسته سوم روش‌های مبتنی بر رابطه موجود بین نقطه کار و پارامترهای سلول خورشیدی است. از نمونه‌های این روش به سه روش مطرح می‌توان اشاره نمود:

روشی که از رابطه تقریباً خطی موجود بین جریان اتصال کوتاه و جریان نقطه کار بهره می‌برد، که به آن روش جریان اتصال کوتاه^۷ می‌گویند [۱۲].

روش دیگر که به نام ولتاژ مدار باز^۸ معروف است. اساس روش وجود تابع تقریباً خطی بین ولتاژ نقطه کار و ولتاژ مدار باز سلول است. قطع دوره ای برای اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز باعث از دست دادن توان در سیستم می‌شود [۱۳-۱۴]. برای مشکل قطع دوره ای روشی ارائه شده است [۱۵] که از یک سلول پایه به عنوان راهنما برای تشخیص رفتار کل پانل استفاده می‌گردد که مشکل جدید عدم قطعیت در اندازه‌گیری سلول پایه نسبت به کل پانل را به وجود می‌آورد. روشی دیگر [۱۶] خطی سازی را به سه ناحیه تقسیم کرده تا کارایی سیستم را بهبود بخشد.

مرجع [۱۷] با ذخیره تمام نقاط کار با شرایط محیطی مختلف در جدول جستجو، اقدام به یافتن ولتاژ نقطه کار بهینه می‌نماید.

در هر صورت، رابطه موجود بین نقطه کار و پارامتر کاملاً غیر خطی است و هرگونه تقریب زدن خطی، باعث ایجاد خطا در سیستم می‌شود. همچنین، رابطه خطی تقریب گرفته شده و یا جدول جستجو نیز با تغییر سلول خورشیدی تغییر می‌کند.

دسته چهارم روش‌های کنترل هوشمند است. در این نوع روش‌ها کنترل منطق فازی یا منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی به کار رفته است.

مرجع [۱۸] روش RCC را بهبود داده، شبکه عصبی موجود با توجه به رفتار سیستم به اعمال سیکل کاری، در

حداکثر توان مشکلاتی وجود دارد و آن غیر خطی بودن مشخصه خروجی سلول خورشیدی و همچنین تغییر پذیر بودن این مشخصه نسبت به تابش نور و حتی دمای سلول می‌باشد. از این رو باید سیستمی برای کنترل سلولهای خورشیدی در نظر گرفته که علاوه بر قرار دادن سلول خورشیدی در بهترین نقطه کار، در صورت تغییر این نقطه به واسطه شرایط آب و هوایی بتواند ردیابی مستمر نقطه حداکثر توان انتقالی سیستم را به سرعت یافته و سلول خورشیدی را در نقطه بهینه قرار دهد. این نوع یافتن و ردیابی مستمر را "ردیابی حداکثر توان انتقالی" MPPT^۳ می‌نامند.

تاکنون تکنیکهای مختلفی برای ردیابی حداکثر توان ارائه و اجرا گردیده است. اصول کلی روشها را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

دسته اول روش‌های هستند که یک الگوریتم پایه ای را دنبال می‌کنند. از این نوع روش‌ها می‌توان به روش آشفته و رعایت P&O^۴ [۵,۶,۷]، همچنین صعود تپه^۵ [۸] و رسانایی افزایشی^۶ INC [۹] نام برد.

اساس روش آشفته و رعایت بر ایجاد آشفته‌گی بر ولتاژ و مشاهده توان خروجی می‌باشد که در صورت افزایش توان آشفته‌گی را در همان مسیر نگاه می‌دارد و نیز در صورت کاهش توان آشفته‌گی بعدی را معکوس می‌کند. روش موفق آشفته و رعایت بدون نیاز به پارامترهای سلول خورشیدی، نقطه حداکثر توان را ردیابی می‌کند. اما از ایراد وارد بر این روش می‌توان به آشفته‌گی مستمر سیستم اشاره نمود، به گونه ای که حول نقطه حداکثر توان MPP با نوسانات کار می‌کند. اساس روش صعود تپه همانند آشفته و رعایت می‌باشد.

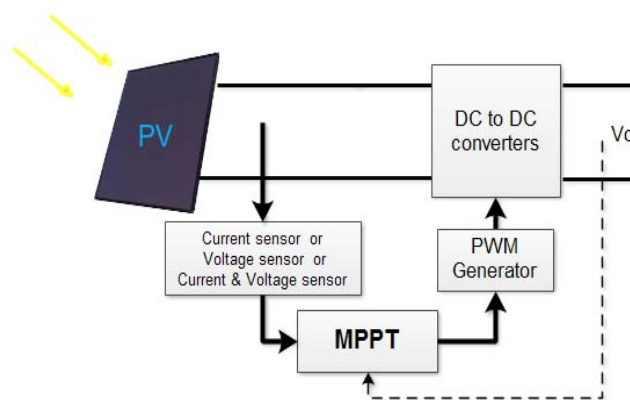
اساس روش رسانایی افزایشی بر صفر بودن مشتق توان نسبت به ولتاژ و یا نسبت به جریان در نقطه حداکثر توان است. و با انجام رسانایی لحظه ای با رسانایی افزایشی نقطه حداکثر توان یافت می‌شود.

دسته دوم روش‌های مبتنی بر مدل سازی سلول خورشیدی هستند. در این روش‌ها با مدل کردن سلول خورشیدی و برقراری روابط موجود در مدل ارائه شده ویژگی‌های سلول خورشیدی قابل پیش بینی خواهد بود و

اساس روش پیشنهاد شده در این مقاله بر پایه وجود رابطه بین شدت تابش و ولتاژ نقطه حداکثر توان است. با داشتن این رابطه، در هر لحظه با اندازه گیری شدت تابش، ولتاژ نقطه حداکثر توان قابل محاسبه و سیستم، خروجی را در ولتاژ نقطه حداکثر توان قرار می دهد. این رابطه که دقت آن قابل تعریف است، با استفاده از روش تقریبگر تابع فازی بدون نیاز به داشتن مدل سلول خورشیدی در چند دوره آموزش به دست می آید. نیاز نداشتن مدل سلول خورشیدی از قبل، عمومیت داشتن سیستم را نسبت به کارهایی که تاکنون انجام شده است، بالا میبرد.

۲- ساختار سیستم تولید توان خورشیدی

ساختار سیستم های تولید توان خورشیدی را به شیوه های مختلفی می توان پیاده سازی نمود. به طور کلی، این ساختارها مطابق شکل (۱) قابل نمایش است. این ساختار به سه بخش پانل خورشیدی، مبدل DC به DC و کنترل و ردیاب نقطه حداکثر توان قابل تقسیم است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم تولید توان خورشیدی

علت استفاده از مبدل افزایشده علاوه بر افزایش ولتاژ خروجی سیستم، متغیر بودن مقاومت ورودی مبدل با تغییر سیکل کاری سیگنال PWM اعمالی است. این ویژگی مبدل این قابلیت را می دهد که با تغییر سیکل کاری بتوان ولتاژ نقطه کار سلول خورشیدی را تغییر داد. [۱۶]

مرحله آتی خطای خروجی را کاهش می دهد و طی چندین نوسان خطا میرا می گردد.

مرجع [۲۲-۱۹] با کنترل فازی قرار داده شده در سیستم، عمل یافتن ولتاژ نقطه حداکثر توان را بهینه می کند. مرجع [۷] روش آشفته و رعایت را با استفاده از کنترل منطق فازی بهبود بخشیده است.

مرجع [۲۳] با استفاده از کنترل منطق فازی و شبکه عصبی و اندازه گیری شدت تابش و دما، ولتاژ نقطه کار را به دست می آورد.

روش های هوشمند به مدل سلول خورشیدی به کار رفته نیاز مبرم دارند که همین امر سیستم کنترلی را به استفاده در سلول خورشیدی طراحی شده محدود می کند.

به طور کل، نمی توان هیچ روشی را مطلقاً بهترین روش قلمداد کرد، درحالی که برای انتخاب سیستم ردیابی حداکثر توان ملاک های متفاوتی از قبیل هزینه ساخت، سرعت ردیابی، دقت نقطه یافت شده، سادگی پیاده سازی، عمومیت داشتن و... وجود دارد که هر روشی را در توان های مختلف می توان بهتر و مؤثرتر قلمداد کرد.

۲-۱- مبدل DC به DC

انواع مختلفی از مبدل های DC به DC وجود دارد، اما به علت پایین بودن ولتاژ خروجی سلول خورشیدی به طور معمول از مبدل افزایشده Boost ولتاژ، در ساختار سیستم تولید توان خورشیدی استفاده می گردد.

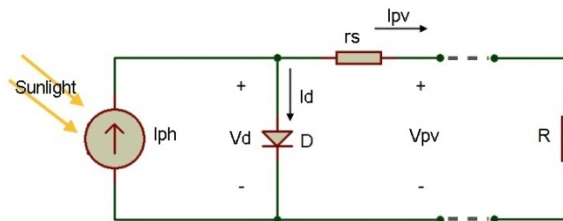
۲-۲- کنترل و ردیاب نقطه حداکثر توان

این بخش می تواند شامل سنسور ها ، تولید کننده موج PWM و سیستم پیاده کننده ردیابی نقطه حداکثر توان باشد. این بخش با دارا بودن سیستم کنترلی MPPT بسته به روش موجود با اندازه گیری پارامترهای مورد نیاز نقطه کار مناسب که همان نقطه حداکثر توان خروجی سلول خورشیدی است، یافت می کند. سپس با توجه به این شرایط با اعمال فرمان مناسب را تغییر سیکل کاری به مبدل موج PWM،

این مبدل ولتاژ خروجی سلول خورشیدی را به نقطه کار مناسب سوق می دهد.

۲-۳- مدل سلول خورشیدی

هر سلول خورشیدی را می توان با یک مدار معادل الکتریکی مدل نمود. مدل های مختلفی برای سلول خورشیدی بیان شده است که شکل (۲) یک نمونه از مدل های ارائه شده است.



شکل (۲): مدل سلول خورشیدی

برای ولتاژ نقطه حداکثر توان V_{mpp} باید از توان خروجی P_O نسبت به ولتاژ مشتق و برابر با صفر در نظر گرفت ، ولتاژ به دست آمده از این رابطه ، ولتاژ حداکثر توان است.

$$\frac{\partial P_O}{\partial V_{pv}} = 0 \Rightarrow V_{PV_{mpp}} = f_1(L, T_{cell}) \quad (3)$$

در نتیجه، رابطه ولتاژ نقطه حداکثر توان خروجی را می توان تابعی از شدت تابش L و دمای سلول T_{cell} دانست.

۳- عوامل تعیین کننده دمای سلول

به طور کل، می توان عوامل تعیین کننده دمای سلول خورشیدی را به سه نوع عامل تقسیم نمود:

- تابش
- تلفات الکتریکی
- رسانش گرمایی و همرفتی

تابش نوعی انتقال انرژی است که این انتقال انرژی از یک منبع انرژی (مثلا خورشید) به یک جسم دیگر (مثلا سلول خورشیدی) صورت می پذیرد. هر جسم مقداری از انرژی تابشی را جذب و مقداری از آن را انعکاس می دهد. انرژی تابشی جذب شده به انرژی دیگری تبدیل

رابطه ولتاژ خروجی با پارامترهای دیگر برای مدل ارائه شده به شکل زیر است :

$$V_{PV} = \frac{T_{cell}}{q/nk} \times \ln\left(\frac{I_{ph} - I_{PV} + I_S}{I_S}\right) - r_S I_{PV} \quad (1)$$

معرفی پارامترها در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): معرفی پارامترهای رابطه (۱)

پارامتر	معرفی
V_{PV}	ولتاژ خروجی سلول خورشیدی
I_{PV}	جریان خروجی سلول خورشیدی
T_{cell}	دمای سلول (کلوین)
q	بار یک الکترون
k	ثابت بولتزمن
n	فاکتور انتشار
I_S	جریان اشباع معکوس
I_{ph}	جریان وابسته به شدت تابش
r_S	مقاومت سری سلول

پارامتر I_{ph} ضریب از شدت تابش L است.

$$I_{ph} = \alpha_1 L \quad (2)$$

برای آن بیان داشت ، اما می توان آن را به صورت تقریبی تابعی از اختلاف دمای محیط و سلول خورشیدی ، سطح تماس و عبور جریان هوا در نظر گرفت.

با توجه به روابط (۷ و ۶) و با در نظر گرفتن رسیدن دمای سیستم به حالت تعادل می توان نوشت :

$$T_{cell} = g_3(Q, T_{Env}) = g_4(g_1, g_2, T_{Env}) \quad (8)$$

$$= g_5(L, V_{PV}, T_{cell}, T_{Env})$$

و از رابطه (۸) می توان نتیجه گرفت :

$$T_{cell} = g_6(L, V_{PV}, T_{Env}) \quad (9)$$

در حالت تعادل دمایی ، دمای سلول خورشیدی تابعی از شدت تابش ، ولتاژ خروجی و دمای محیط است.

۴- رابطه ولتاژ نقطه کار با شدت تابش

با قرار دادن رابطه (۹) در رابطه (۳) داریم :

$$V_{PVmpp} = f_1(L, g_6(L, V_{PV}, T_{Env})) \Rightarrow \quad (10)$$

$$V_{PVmpp} = f_2(L, T_{Env})$$

در نتیجه، می توان ولتاژ نقطه کار سلول خورشیدی را تابعی از شدت تابش و دمای محیط دانست.

با توجه به اینکه دمای محیط در بازه زمانی کوتاه (برای مثال، یک ساعت) تغییرات چندانی ندارد، در این بازه زمانی عددی ثابت در نظر گرفته، می شود بنابراین، می توان رابطه (۱۰) را به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی نمود:

$$V_{PVmpp} = f_3(L) \quad (11)$$

رابطه (۱۱) در صورتی دارای دقت قابل قبول است که در تابع f_3 دمای محیط و یا تاثیر دمای محیط لحاظ شده باشد.

۵- سیستم فازی به عنوان تقریبگر تابع

برخی از انواع سیستم های فازی را می توان به شکل فرمول غیر خطی بسته نوشت. این فرمول های بسته محاسبات سیستم های فازی را ساده می کنند و از جهت

می شود [۲]. در سلول خورشیدی مقداری از این انرژی تابشی جذب شده توسط عمل فتوولتائیک به انرژی الکتریسیته و مقدار دیگر آن به انرژی گرمایی تبدیل می گردد.

انرژی گرمایی ناشی از تابش که به صورت کامل جذب شود، به صورت رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$Q_L = A \times L \times t \Rightarrow Q_L = g_1(L) \times t \quad (4)$$

در رابطه (۴) انرژی گرمایی ناشی از تابش، A مساحت سطح و t زمان است.

مقداری از انرژی الکتریکی تولید شده در سلول به صورت توان الکتریکی P_{Lelc} به انرژی گرمایی تبدیل می گردد و برای مدل ارائه شده از سلول خورشیدی قابل محاسبه است.

$$P_{Lelc} = P_{rs} + P_D = r_s I_{PV}^2 + (V_{PV} + r_s I_{PV}) \times I_s (\exp(\frac{q(V_{PV} + r_s I_{PV})}{nkT_{cell}}) - 1) \quad (5)$$

انرژی گرمایی Q_{elc} برابر با توان P_{Lelc} در مدت زمان t است.

$$Q_{elc} = P_{Lelc} \times t \Rightarrow Q_{elc} = g_2(V_{PV}, T_{cell}) \times t \quad (6)$$

در نتیجه، انرژی گرمایی ناشی از تلفات الکتریکی تابعی از ولتاژ خروجی و دمای سلول در زمان می باشد. انرژی گرمایی یک جسم از فرمول (۷) محاسبه می شود [۲].

$$Q = mc(T_{cell} - T_{Env}) \quad (7)$$

در رابطه فوق m جرم ماده، c ظرفیت گرمایی ویژه و T_{Env} دمای محیط است.

مسئله رسانش گرمایی با وجود بزرگ بودن رسانایی گرمایی سلول خورشیدی قابل حل بوده، می توان با بزرگ بودن رسانش گرمایی، دمای تمام سلول را یکسان در نظر گرفت. انتقال گرما، یا به طور دقیقتر تبادل گرمای همرفتی توسط سیال هوا میان محیط و سلول خورشیدی به شرایطی همچون شکل فیزیکی خود سلول و حتی چگونگی نصب سلول خورشیدی بستگی دارد و نمی توان فرمول خاصی را

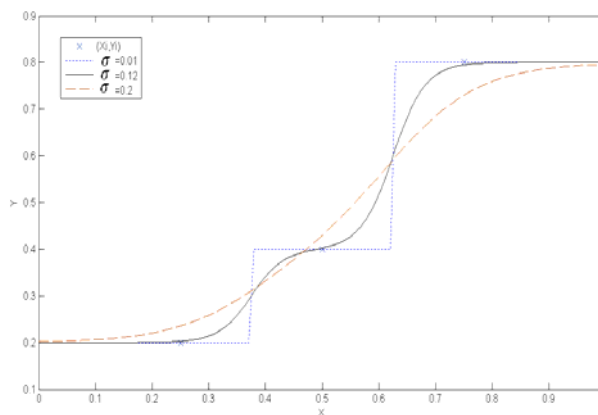
رابطه (۱۲) خوشه سازی تکمی را نشان می دهد. همچنین تابع فازی سازی از نوع گوسین است. در این رابطه با انتخاب مناسب پارامتر σ سیستم فازی بیان شده می توان n زوج ورودی - خروجی را با هر دقت داده شده تطبیق داد. σ کوچکتر باعث می شود خطای تطبیقی $|F(x_i) - y_i|$ کوچکتر، ولی $F(x)$ کمتر هموار گردد و اگر $F(x)$ هموار نباشد، ممکن است نتواند برای نقاطی که در مجموعه آموزش قرار ندارد، عمومیت داشته باشد. بنابراین σ باید به نحوی انتخاب شود که تعادلی را بین تطبیق و عمومیت به وجود آورد [۳].

برای نمونه، در صورتی که سه زوج مرتب از ورودی و خروجی برابر با $\{(0.25, 0.2), (0.5, 0.4), (0.75, 0.8)\}$ موجود باشد، تابع تقریبگر فازی این زوج های مرتب با سه سیگمای متفاوت به صورت شکل (۳) خواهد بود. شکل (۴) تابع فازی سازی ورودی و خروجی سه زوج مرتب نمونه به ازای سیگمای 0.12 رسم شده است.

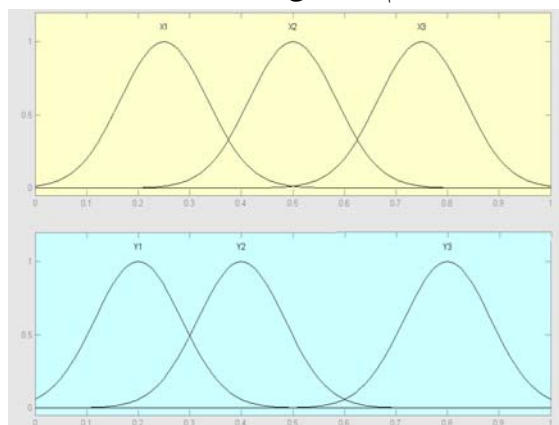
دیگر کار با سیستم فازی را به عنوان یک تابع تقریب فراهم می کنند [۳]. در طراحی سیستم های فازی انتخاب تعداد قواعد مناسب، بسیار مهم است، انتخاب تعداد زیاد قواعد، باعث پیچیده تر شدن سیستم فازی شده که ممکن است برای مسأله ضرورت نباشد و یا انتخاب تعداد محدودی قواعد باعث عدم پاسخ صحیح گردد [۳]. ایده اساسی روش سیستم فازی به عنوان تقریبگر تابع در زوج های ورودی - خروجی، استفاده از یک شیوه برای کنترل بهینه و مناسب است.

برای n زوج مرتب (x_i, y_i) که x_i ورودی ها و y_i خروجی های متناظر ورودی هستند، فرمول تابع تقریبگر فازی به صورت رابطه (۱۲) محاسبه می شود:

$$F(x) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \exp\left(-\left(\frac{x-x_i}{\sigma}\right)^2\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x-x_i}{\sigma}\right)^2\right)} \quad (12)$$



شکل (۳): رسم تقریب تابع فازی برای سه نقطه نمونه

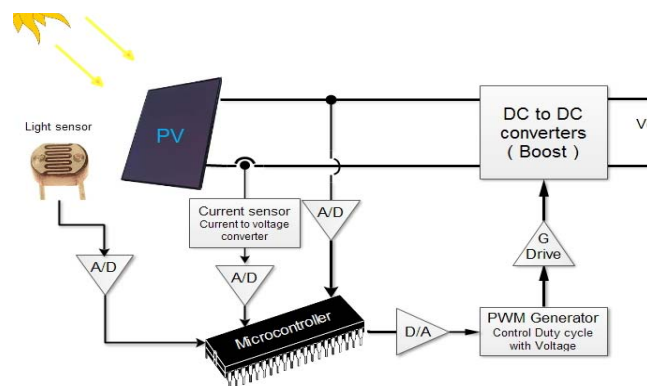


شکل (۴): توابع تعلق فازی به ازای سیگمای 0.12

همان سیگما، به عنوان سیگمای مناسب برای استفاده در تقریب تابع انتخاب می گردد.

۶- روش پیشنهادی ردیابی نقطه حداکثر توان

بلوک دیاگرام مدار پیشنهادی به صورت شکل (۵) است.



شکل (۵): بلوک دیاگرام مدار پیشنهادی

الگوریتم موجود برنامه در هر لحظه ولتاژ خروجی PV را با خواندن لحظه ای شدت تابش در ولتاژ محاسبه شده قرار می دهد.

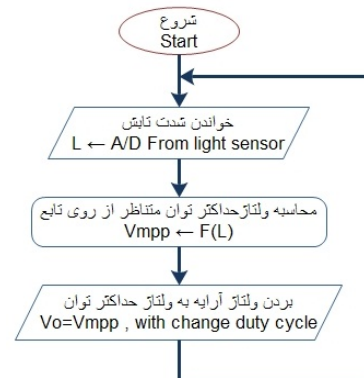
برای اجرا شدن الگوریتم بیان شده باید تابع $F(L)$ را برای سلول خورشیدی استفاده شده داشت و همچنین، این تابع باید برای هر سلول خورشیدی قابل استفاده باشد. در این مقاله با استفاده از سیستم فازی به عنوان تقریبگر فازی به ازای تعدادی از زوج های مرتب این تابع محاسبه می گردد.

برای به دست آوردن تابع $F(L)$ باید تعداد مناسبی از زوج های مرتب ولتاژ نقطه کار متناظر با شدت تابش (V_{MPPi}, L_i) را در اختیار داشت (در این مقاله این تعداد ۲۰ در نظر گرفته شده است. بدیهی است که افزایش تعداد نقاط محاسبات را طولانی تر و دقت را بالاتر می برد و در روش اصلی تغییری ایجاد نمی شود). برای این منظور باید هر V_{MPP} را در شدت تابش متناظر اندازه گیری کرد و به دست آورد.

برای یافتن V_{MPP} در تابش متناظر باید نقطه حداکثر توان یافت شود. این کار با تغییر ولتاژ خروجی به واسطه تغییر سیکل کاری مبدل PWM و اندازه گیری جریان عبوری و در نتیجه محاسبه توان برای ۱۰۰ نقطه و سپس

برای یافتن سیگمای مناسب روش های مختلفی ارائه شده است. در این مقاله، یافتن سیگما به این صورت است که مقدار اولیه سیگما بزرگ انتخاب می شود و سپس در چندین مرحله کاهش جزئی سیگما خطا را برای هر زوج مرتب اندازه گیری کرده و در صورتی که خطای موجود کوچکتر از خطای تعریف شده در ابتدای الگوریتم باشد،

این روش بر اساس اندازه گیری شدت تابش موجود، ولتاژ نقطه کار را بر اساس رابطه بین ولتاژ نقطه کار و شدت تابش محاسبه نموده، سپس با استفاده از مبدل Boost قرار گرفته شده در خروجی آرایه با تغییر سیکل کاری تولید کننده پالس PWM ولتاژ خروجی آرایه را در ولتاژ مطلوب که ولتاژ نقطه MPP است، قرار می دهد. هسته پردازنده اطلاعات سیستم، که یک میکرو کنترلر است، با گرفتن مقدار شدت تابش مقدار ولتاژ MPP را در نقطه حداکثر توان نگه می دارد. الگوریتم اجرایی برنامه در شکل (۶) آمده است.



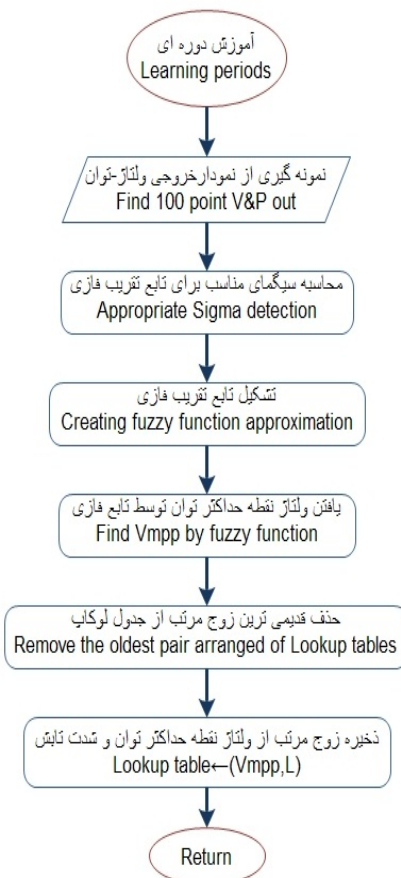
شکل (۶): چارت اجرایی برنامه

مثال، یک زوج مرتب هر روز در ساعت ۱۲ ظهر به روز گردد، در این حالت تفاوت دمایی ساعت ۱۲ در هر روز با روز قبل خود تغییر چندانی نخواهد داشت. در نتیجه برای زوج مرتب موجود دمای محیط نیز در نظر گرفته شده است. در این حالت مستقل بودن تابع ولتاژ نقطه کار از پارامتر دمای محیط تاثیر چندانی بر دقت محاسبات ولتاژ نقطه حداکثر توان نخواهد داشت.

مراحل بیان شده یادگیری دوره ای در چارت شکل (۷) آورده شده است.

به کمک استفاده از تابع تقریبگر فازی مشکل عدم دستیابی تابع $F(L)$ هموار گشت و همچنین، به کمک الگوریتم یادگیری دوره ای ایراد وارد شده بر تطبیق پیدا کردن سیستم با هر نوع PV نیز حل شده است.

باید در نظر داشت که در هر مرحله آموزش مدلی دقیقتر و بروزتر از سلول خورشیدی برای سیستم به وجود می آید و در صورت افزایش تعداد زوج های مرتب در جدول جستجو امکان دقیقتر شدن مدل سلول خورشیدی را به وجود می آورد.



شکل (۷): چارت اجرایی آموزش دوره ای

یافتن توان حداکثر و متعاقباً ولتاژ متناظر آن توسط تابع تقریب فازی با ۱۰۰ نقطه صورت می پذیرد. ولتاژ یافت شده همراه با شدت تابش موجود یک زوج مرتب به ما می دهد و این زوج مرتب در جدولی برای استفاده در تقریب زدن فازی تابع $F(L)$ ذخیره می شود.

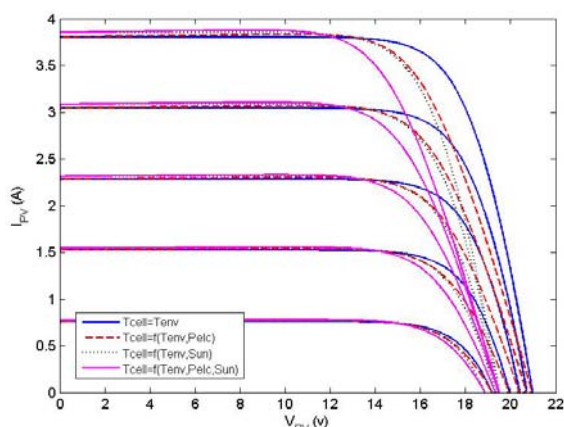
اکنون که برای شدت تابش های مختلف می توانیم ولتاژ نقطه کار در حداکثر توان خروجی را به دست بیاوریم، می توانیم جدول جستجو را کامل کرده، برای شدت تابش های مختلف نقطه کار مناسب را بیابیم، ولی هر تعداد زوج مرتب در جدول جستجو زیاد باشد، باز هم تمام شدت تابش ها را پوشش نمی دهد. برای این منظور بار دیگر با داشتن چندین زوج مرتب تابع تقریب فازی برای $F(L)$ تشکیل می دهیم و با توجه به اندازه گیری شدت تابش و قرار دادن شدت تابش در تابع تقریب فازی به وجود آمده از چندین زوج مرتب ولتاژ نقطه کار سلول خورشیدی یا همان V_{MPP} را به دست می آوریم و ولتاژ خروجی را با تغییر سیکل کاری در V_{MPP} ثابت نگاه می داریم و در هر لحظه با توجه به اندازه گیری شدت تابش جدید این عمل باز تکرار می شود. این نتیجه همان چارت اجرایی برنامه در شکل (۶) است؛ با این تفاوت که $F(L)$ تابع تقریب فازی است. الگوریتم بیان شده برای یافتن V_{MPP} تا زمانی می تواند با دقت بالا پاسخ گوی سیستم باشد که زوج های مرتب موجود در جدول جستجو ویژگی بهینه شدن و نو سازی داده را داشته باشد؛ یعنی توانایی یادگیری مستمر را دارا باشند. برای این منظور، در بازه های زمانی مشخص سیستم به الگوریتم یادگیری، پرس می کند.

الگوریتم یادگیری در ابتدا قدیمیترین زوج مرتب را شناسایی و حذف می کند و سپس به یافتن زوج مرتب جدید پرداخته، زوج مرتب جدید را در جدول ذخیره می کند. این امر علاوه بر بروز کردن داده ها باعث می گردد که در صورت رخداد تغییرات فیزیکی بر روی صفحه خورشیدی، از جمله سوختن تعدادی از سلول های صفحه و یا کهنه شدن و کثیفی، تابع تقریبگر فازی $F(L)$ با استفاده از ویژگی های جدید ساخته شود.

برای بهبود دقت $F(L)$ می توان الگوریتمی را در سیستم قرار داد که کم ارزش ترین زوج مرتب را تشخیص داده، اقدام به حذف آن به جای قدیمیترین زوج مرتب کند که ممکن است ارزش مناسبی در محاسبه تابع تقریب فازی داشته باشد، و یا برای داشتن خطای کمتر بر اثر تغییر دما، برای یادگیری ها ارزش زمانی در نظر گرفته شود. برای

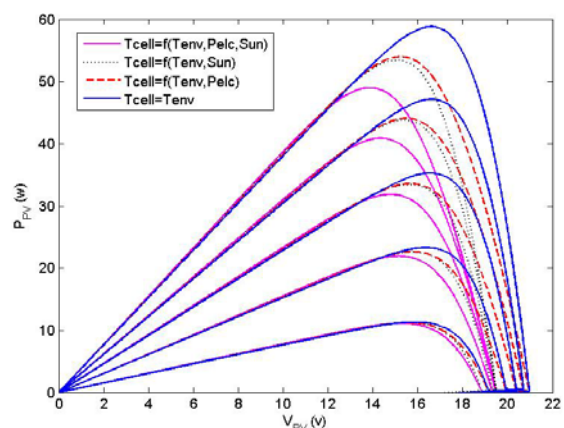
۷- شبیه سازی

در ابتدا به شبیه سازی رفتار صفحه خورشیدی به میزان شدت تابش اعمالی به آن، پرداخته شده است. صفحه خورشیدی به کار رفته در این مقاله MSX-60 محصول شرکت solarex است که مشخصات فنی آن در جدول (۲) آمده است. نتایج جدول در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و تابش $1kW/m^2 (=1sun)$ انجام گرفته است.



شکل (۸): تاثیر تابع دما نسبت به متغیرها بر نمودار ولتاژ-جریان

جریان



شکل (۹): تاثیر تابع دما نسبت به متغیرها بر نمودار ولتاژ-توان

منحنی مشخصه های رسم شده برای پنج حالت از شدت تابش بین 0.2 sun الی 1sun است و در هر شدت تابش اثر تغییر دما به واسطه وجود تاثیر توان الکتریکی و شدت تابش بر گرم شدن صفحه خورشیدی رسم شده است. منحنی ها این را بیان می کند که شدت تابش و توان الکتریکی که موجب گرم شدن صفحه خورشیدی می گردد حداکثر توان خروجی را تحت تاثیر قرار داده، مقدار آن را کاهش می دهد. علاوه بر این، ولتاژ نقطه کار بهینه را کوچکتر می کند.

الگوریتم آموزش دوره ای شکل (۷) سه مرحله، نمونه گیری ۱۰۰ نقطه، انتخاب سیگمای مناسب و تشکیل تابع تقریب فازی را دارد که منحنی مشخصه شکل (۱۰) تقریب تابع فازی با ۱۰۰ نقطه را نسبت به منحنی مشخصه واقعی

جدول (۲): مشخصات فنی MSX-60

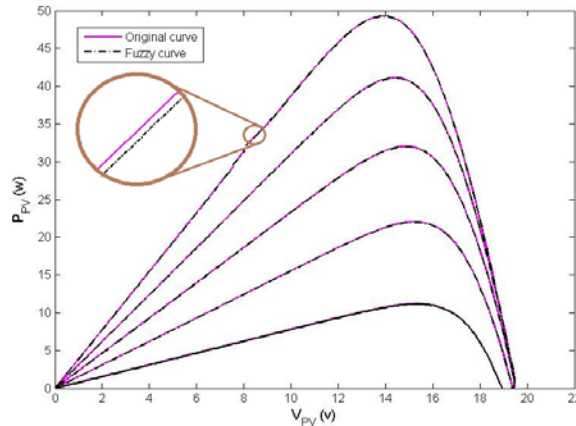
مشخصات	پارامتر	مقدار
حداکثر توان خروجی	P_{max}	60W
ولتاژ در حداکثر توان	V_{mp}	17.1V
جریان در حداکثر توان	I_{mp}	3.5A
جریان اتصال کوتاه	I_{sc}	3.8A
ولتاژ مدار باز	V_{oc}	21.1V
ضریب دمایی ولتاژ مدار باز	K_V	$-(80 \pm 10)mV/^\circ C$
ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه	K_I	$(0.065 \pm 0.015)\%/^\circ C$
ضریب دمایی توان	K_P	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^\circ C$
نرخ دمای سلول با محیط	NOCT	$47 \pm 2^\circ C$

در این شبیه سازی با رسم چندین منحنی مشخصه خروجی صفحه خورشیدی، چگونگی تاثیر گذاری رابطه بین توان الکتریکی تبدیل شده به گرما، توان جذب شده تابشی که مستقیماً به گرما تبدیل می شود و حداکثر توان بررسی خواهد شد.

نتیجه شبیه سازی نمودار ولتاژ-جریان خروجی در شکل (۸) و ولتاژ-توان صفحه خورشیدی در شکل (۹) آورده شده است.

بزند؛ بطوری که حداکثر مقدار خطا کمتر از $0,05$ وات در برابر صفحه خورشیدی 60 وات این شبیه سازی است. در نتیجه، منحنی تابع تقریب فازی را می توان خود منحنی اصلی ولتاژ-توان صفحه خورشید در نظر گرفت.

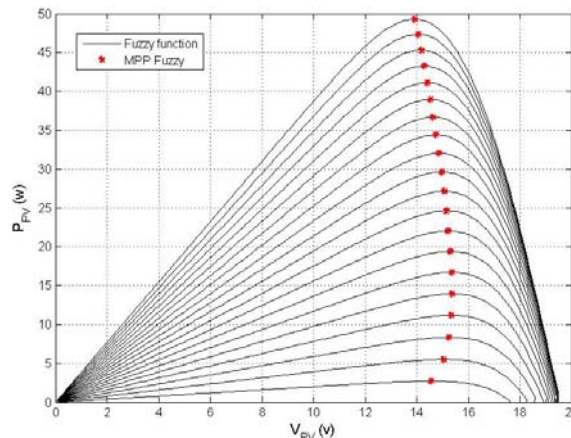
در پنج شدت تابش متفاوت از 0.2Sun تا 1Sun نشان می دهد. همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود، تابع تقریب فازی توانسته است به طور مناسبی منحنی را تقریب



شکل (۱۰): تابع تقریبگر فازی و نمودار اصلی از ولتاژ-توان

تقریب فازی منحنی ولتاژ-توان برای 20 شدت تابش مختلف از 0.05Sun تا 1Sun رسم و نقطه حداکثر توان یافت شده از این روش نشان داده شده است.

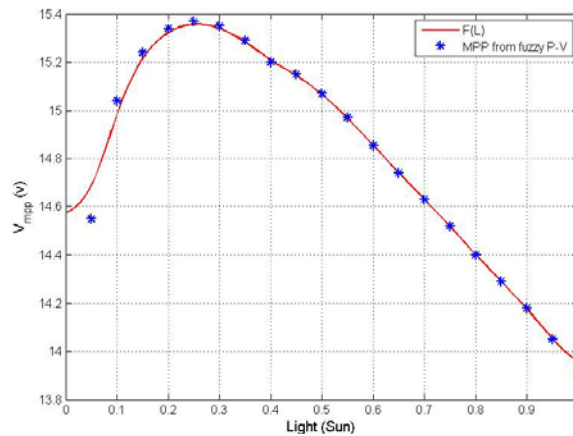
هدف از تشکیل تابع تقریب فازی از منحنی مشخصه ولتاژ-توان خروجی صفحه خورشیدی محاسبه حداکثر توان خروجی و ولتاژ متناظر آن و ذخیره زوج مرتب از V_{MPP} و شدت تابش در جدول جستجو است. شکل (۱۱)



شکل (۱۱): تابع تقریبگر فازی و نمودار اصلی از ولتاژ-توان

حداکثر توان یا همان $V_{MPP}=F(L)$ که مورد نیاز است رسید. منحنی مشخصه موجود در شکل (۱۲) بر اساس 20 زوج مرتب و همچنین، تابع تقریب فازی از 20 مرحله آموزش سیستم را نشان می دهد.

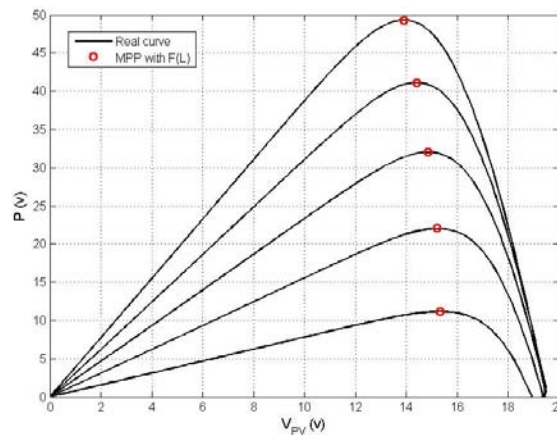
پس از یادگیری سیستم از زوج های مرتب ذخیره شده در جدول جستجو، می توان با تشکیل یک تابع تقریب فازی با یافتن سیگمای مناسب به روش کوچک بودن خطای تطبیقی یک رابطه بین شدت تابش و ولتاژ نقطه



شکل (۱۲): تابع تقریبگر فازی $V_{mpp}=F(L)$

وجود نداشته باشد و در نتیجه، تابع فازی با دقت کمتری نقطه برون یابی را یافت می کند. شکل (۱۳) نمونه تست برای ۵ شدت تابش مختلف و نقطه کاری را که سیستم تشخیص داده است، نشان می دهد.

همان طور که در محور شدت تابش مشاهده می شود تابع تقریب، تمام شدت تابش از 0Sun تا 1Sun را پوشش می دهد، در صورتی که در آموزش می تواند این گستردگی



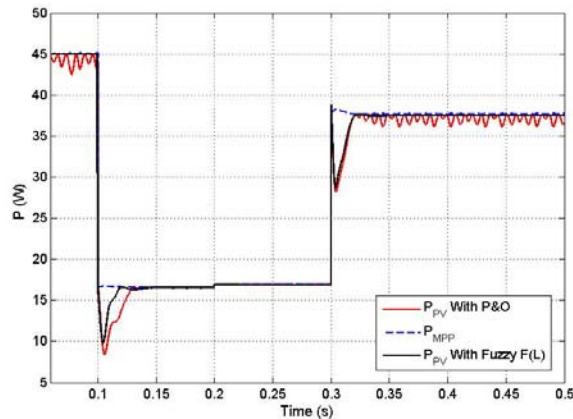
شکل (۱۳): ولتاژ نقطه حداکثر توان از تابع $V_{mpp}=F(L)$

هر میکروکنترلی قابل پیاده سازی است. برای بررسی چگونگی ردگیری سیستم پیشنهادی، شبیه سازی با اغتشاشات بزرگ در کنار روش کلاسیک P&O تحلیل شده است. سیستم شبیه سازی شده در ابتدا با دمای محیط 27°C و تابش 0.9 Sun شروع به کار می کند. اغتشاش اول در 0.1 ثانیه پس از شروع با اعمال اغتشاش تابش از 0.9 Sun به 0.3 Sun اعمال می گردد. اغتشاش دوم 0.1 ثانیه بعد؛ یعنی در 0.2 ثانیه با تغییر ناگهانی دمای محیط از 27°C به 20°C رخ می دهد، و در نهایت در لحظه 0.3 ثانیه تابش به 0.7 Sun افزایش می یابد. قابل ذکر است که این نوع اغتشاشات

مقدار ولتاژهای حداکثر توان انتقالی تشخیص داده شده توسط تابع تقریبگر فازی $V_{mpp}=F(L)$ توانسته است ولتاژ نقطه حداکثر توان واقعی را با خطای قابل قبول یافت کند. پس از آنکه سیستم دوره آموزش را به پایان می رساند سیستم به مرحله ردگیری می رود. ردگیری این روش بر اساس ایجاد ولتاژ مبنا و اعمال آن به کنترل کننده است. در این مقاله از کنترل کننده PI استفاده شده است. قابل بیان است که می توان کنترل کننده PI را به صورت دیجیتال در میکروکنترلر اجرا نمود که در روش پیشنهادی فرکاس PI دیجیتال 1 KHz در نظر گرفته شده است که به راحتی در

(۱۴) چگونگی ردگیری توان روش پیشنهادی و روش P&O را در کنار حداکثر توان قابل جذب نشان می‌دهد.

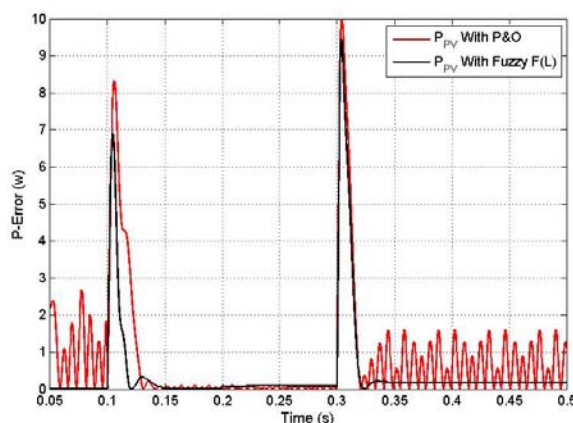
به هیچ وجه نمی‌تواند در واقعیت به این سرعت رخ دهد و آوردن این اغتشاشات با چنین سرعتی، جنبه بررسی چگونگی ردگیری سیستم در بدترین حالت را دارد. شکل



شکل (۱۴): ردگیری توان روش پیشنهادی و روش P&O

آموزش در دمای محیط 27°C پر شده است، روش پیشنهادی توانسته است در دمای 20°C نیز امر ردگیری را انجام دهد و سیستم در بدترین شرایط، خطایی کمتر از ۰.۵ وات را در حالت خروجی ۴۰ وات داراست. در صورتی که داده‌های آموزش بیشتر گردد، این خطا بسیار کمتر خواهد بود.

همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌گردد، علی‌رغم وجود اغتشاشات شدید و همچنین، تنها ۲۰ داده آموزش، روش پیشنهادی با سرعت نسبتاً بالایی امر ردگیری حداکثر توان را به خوبی انجام می‌دهد و هیچ‌گونه نوسانی حول نقطه حداکثر توان ندارد. شکل (۱۵) خطای عدم رسیدن به نقطه حداکثر توان برای روش پیشنهادی و روش P&O را نشان می‌دهد. در شکل مشاهده می‌گردد با اینکه داده‌های



شکل (۱۵): خطای ردگیری توان روش پیشنهادی و روش P&O

اساس روش پیشنهاد شده در این مقاله بر پایه وجود رابطه بین شدت تابش و ولتاژ نقطه حداکثر توان است. با داشتن این رابطه، در هر لحظه با اندازه‌گیری شدت تابش، ولتاژ

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی به منظور ردیابی حداکثر توان در صفحات خورشیدی بر پایه منطق فازی ارائه شده است.

- Ann. IEEE Power Electron, pp. 1957–1963 , 2004.
- [9] Fangrui Liu & Shanxu Duan & Fei Liu & Bangyin Liu & Yong Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems" IEEE Travs. Electron, Vol. 55, Jul. 2008.
- [10] N.Mutoh, T.Matuo. "Prediction-data-based maximum power point tracking for photovoltaic power generation system", In Proc. 33rd Annu. IEEE Power Electron, Spec. Conf., pp. 1489-1494, 2002.
- [11] T.Noguchi S.Togashi. "Short-current pulse-based adaptive maximum-power-point tracking for a photovoltaic power generation system", Electrical Engineering in Japan, Vol. 139, pp. 65-72, 2002.
- [12] S. Yuvarajan & S. Xu, "Photo-voltaic power converter with a simple maximum-power-point-tracker," in Proc. 2003 Int. Symp. Circuits Syst., pp. 399–402, 2003.
- [13] Ahmad, J,"A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays". IEEE International Conference on Software Technology and Engineering", pp. 247–250, 2010
- [14] Vladimir V. R. Scarpa & Simone Buso & Giorgio Spiazzi," Low-Complexity MPPT Technique Exploiting the PV Module MPP Locus Characterization" , IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 56, pp. 1531-1538, May 2009
- [15] Dondi D & Bertacchini A & Brunelli D & Larcher L & Benini L ,"Modeling and optimization of a solar energy harvester system for selfpowered wireless sensor networks", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, pp. 2759–2766, 2008
- [16] Yi-Hua Liu & Jia-Wei Huang ," A fast and low cost analog maximum power point tracking method for low power photovoltaic systems", Solar Energy, Vol. 85,pp. 2771–2780, 13 September 2011
- [17] J. Ghaisari,M. Habibi, A.Bakhshai, "An MPPT Controller Design for Photovoltaic (PV) Systems Based on the Optimal Voltage Factor Tracking", IEEE Electrical Power conferences, Canada 2007.
- [18] Kuei-Hsiang Chao & Meng-Huei Wang & Yu-Hsu Lee ," an extension neural network based incremental mppt method for a pv system " , International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guilin, 10-13 July, 2011
- [19] S. Lalounia & D. Rekiouaa & T. Rekiouaa & E. Matagne , "Fuzzy logic control of stand-alone photovoltaic system with battery storage" , Journal of Power Sources ,Vol. 193, pp.899–907 ,2009
- نقطه حداکثر توان قابل محاسبه خواهد بود. این رابطه که دقت آن قابل تعریف است، با استفاده از روش تقریبگر تابع فازی بدون نیاز به داشتن مدل سلول خورشیدی در چند دوره آموزش به دست می آید. بی نیاز بودن از مدل صفحه خورشیدی از ویژگی های روش پیشنهادی است. به منظور صخه گذاری روش پیشنهادی، نتایج شبیه سازی ارائه شده است و چگونگی ردگیری نقطه حداکثر توان در کنار روش P&O مورد بررسی شد. نتایج شبیه سازی دقت و سرعت روش پیشنهادی را نشان می دهد.
- ### مراجع
- [] سید مسعود، مقدس تفرشی، منابع تولید انرژی در قرن بیست و یکم ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۶.
- [] وانگ، لی ، سیستم های فازی و کنترل فازی ، ترجمه تشنه لب، محمد ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- [] هالیدی، دیوید و رزنیسک، روبرت و کرین، کنت، فیزیک (حرارت و شاره ها)، مترجمان: رضایی نیا، حمیدرضا و باغانی، خلیل و خوبشانی، فاطمه ، ویرایش پنجم، مشهد، انتشارات خراسان، ۱۳۸۵.
- [4] B.J. Huang & W.L. Ding & Y.C. Huang, " Long-term field test of solar PV power generation using one-axis3-position sun tracker", Solar Energy , Vol. 85, 1935–1944, 27 May 2011
- [5] L. Piegari & R. Rizzo, "Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking" IET Renew. Power Gener, Vol. 4, pp. 317–328, 2010.
- [6] N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, G. Spagnuolo, & M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method" IEEE Trans. Power Electron, 20, Jul. 2005.
- [7] Neil S. D'Souza & Luiz A.C. Lopes & XueJun Liu, " Comparative study of variable size perturbation and observation maximum power point trackers for PV systems" , Electric Power Systems Research, Vol. 80 , pp. 296–305 , 2010
- [8] W. Xiao & W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems" in Proc. 35th

- [20] F.Bouchafaa & D.Beriber & M.S.Boucherit , "Modeling and simulation of a grid connected PV generation system With MPPT fuzzy logic control" , International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 7th ,2010
- [21] Mohamed M. Algazara & Hamdy AL-monierb & Hamdy Abd EL-halima & Mohamed Ezzat El Kotb Salem , " Maximum power point tracking using fuzzy logic control " , Electrical Power and Energy Systems, Vol. 39, pp. 21-28, 2012.
- [22] I.H. Altasa & A.M. Sharaf , " A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems", Renewable Energy, Vol. 33, pp. 388–399, 2008.
- [23] Aymen Chaouachi & Rashad M. Kamel & Ken Nagasaka , " A novel multi-model neuro-fuzzy-based MPPT for three-phase grid-connected photovoltaic system" , Solar Energy, Vol. 84, pp. 2219–2229, 29 September 2010

زیر نویس ها:

-
- ¹ Photovoltaics
 - ² Solar Tracker
 - ³ Maximum Power Point Tracking
 - ⁴ Perturb & Observe
 - ⁵ Hill Climbing
 - ⁶ Incremental Conductance
 - ⁷ Fractional short circuit current
 - ⁸ Fractional open circuit voltage