

یک روش ردیابی حداکثر توان متغیر مبتنی بر منطق فازی برای سیستم‌های خورشیدی

محمد عابدینی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده

با توجه به هزینه‌های بالای نصب و نگهداری منابع فتوولتائیک، دریافت حداکثر توان از این سیستم‌ها امری مهم و ضروری است چراکه سبب بهبود کارایی آن‌ها می‌شود. به دلیل تغییر مشخصه خروجی واحدهای فتوولتائیک تحت تغییرات تابش، دما، اندازه‌ی بار و همچنین زاویه‌ی قرارگیری پنل‌ها، این سیستم‌ها به ندرت حول نقطه‌ی ماکزیم توان خود کار می‌کنند. تاکنون روش‌های مختلفی از قبیل افزایش رسانایی، خازن پارازیتی، شبکه‌ی عصبی و کنترل‌کننده‌ی منطق فازی برای ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان سیستم‌های فتوولتائیک ارائه شده است که معایبی همچون هزینه‌ی بالا، پیچیدگی بالا و قابلیت اطمینان پایین را دارا می‌باشند. در این مقاله یک کنترل‌کننده‌ی فازی برای ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان طراحی شده است تا ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان تحت شرایط تغییر دما و میزان تابش قابل استخراج باشد. جهت افزایش دقت کنترل پیشنهادی و نیز با توجه به ماهیت تغییر دما و تابش، از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری جهت تنظیم حدود توابع فازی استفاده شده است تا یک کنترل‌کننده مقاوم به دست آید به‌علاوه از یک کنترل‌کننده انتگرال تناسبی PI نیز در سمت بار استفاده شده که پارامترهای آن نیز جهت تنظیم ولتاژ بهینه توسط الگوریتم گرگ خاکستری محاسبه می‌شود. به‌منظور اعتبار(ادامه دارد)

عبارات و کلمات کلیدی: ردیابی نقطه‌ی حداکثر توان، کنترل فازی، بهینه‌سازی.

Email(s): dr_m_abedini@yahoo.com.

۱۴۰۲ انجمن سیستم‌های فازی ایران

Mathematics Subject Classification: 68T27 ; 03B52

سنجی مکانیسم پیشنهادی، این ساختار در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است که نتایج حاصل بیانگر کارایی مطلوب کنترل‌کننده‌ی Fuzzy-GWO در ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان منابع فتوولتائیک می باشد.

۱ مقدمه

سیستم‌های فتوولتائیک به علت مزایای زیادی که دارند، کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. عمر طولانی (حدود ۲۰ سال)، قابلیت نصب و راه‌اندازی در شرایط جغرافیایی ویژه مانند مناطق صعب‌العبور و کوهستانی، قابلیت استفاده در سیستم‌های متحرک، نگهداری آسان، عدم وابستگی به شبکه در نقاط دور دست و قابلیت استفاده به صورت متصل به شبکه همه مزایایی هستند که آینده درخشانی را برای استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک ترسیم می‌کنند. انرژی خورشیدی با استفاده از سلول‌های خورشیدی مستقیماً به انرژی الکتریکی dc تبدیل می‌شود، از آنجایی که یک سلول خورشیدی به تنهایی توان محدودی تولید می‌کند لذا لازم است که چندین سلول ترکیب شده و یک ماژول را فراهم کنند. سلول‌های فتوولتائیک تولیدکننده‌ی توان dc هستند، بنابراین برای اتصال آن‌ها به شبکه از مبدل‌های قدرت استفاده می‌شود. برای عملکرد مناسب این سیستم‌ها لازم است اینورترهایی طراحی شوند که توانایی تطبیق نرخ توان با نرخ توان ماکزیمم سلول‌های خورشیدی را داشته باشند و همچنین ماکزیمم ولتاژ و جریان از سلول‌های خورشیدی را بدون توجه به میزان تابش انجام شده فراهم کنند [۱]. مقدار انرژی دریافتی از سلول‌های خورشیدی به عوامل زیادی همچون زاویه‌ی قرارگیری پنل‌ها، شرایط جوی، میزان تابش، دما و ... وابسته است. در مورد وضعیت قرارگیری صفحات خورشیدی، باید بیان کرد که بهینه‌سازی این پارامتر وابسته به عوامل مکانیکی و مستلزم هزینه‌های زیادی می‌باشد. یکی از کم‌هزینه‌ترین و درعین حال مؤثرترین روش‌های دریافت بیش‌ترین توان از صفحات خورشیدی، ردیابی الکتریکی نقطه حداکثر توان می‌باشد که در شرایط جوی مختلف سعی در دریافت بیش‌ترین توان ممکن از سلول را دارد [۲]. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان سیستم‌های فتوولتائیک انجام شده است که در اینجا به برخی از آن‌ها اشاره شده است:

روش اغتشاش و مشاهده^۱ بر اساس ایجاد یک اغتشاش در ولتاژ آرایه خورشیدی و اندازه‌گیری تغییرات توان آن می‌باشد. سپس بر اساس علامت تغییرات توان، جهت تغییرات ولتاژ تعیین می‌شود. این روش نواقص زیادی دارد مانند سرعت تعقیب پایین و نوسان توان حول نقطه ماکزیمم توان، که سبب می‌شود برای تغییر سریع شرایط محیطی مساعد نباشد. متأسفانه به دلیل اغتشاشات همواره در حالت دائمی نوسان دارد که ممکن است سبب افزایش تلفات شود [۳] با این حال روش به دلیل آسانی و سادگی پیاده‌سازی در کنترلرهای ردیابی حداکثر^۲ توان بسیار استفاده می‌شود.

الگوریتم تپه نوردی یکی از قدیم‌ترین روش‌های ردیابی حداکثر توان در آرایه‌های خورشیدی می‌باشد. در این روش با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان، مقدار توان به دست می‌آید و زمان هدایت کلید بر اساس توان به دست آمده به گونه‌ای تغییر می‌کند که نقطه کار به ماکزیمم توان برسد [۴]. از روش‌های هوشمند مورد استفاده در ردیابی حداکثر توان، شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. این روش نیز می‌تواند به صورت ترکیبی با سایر روش‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۵]. در مرجع [۶] نیز از الگوریتم هدایت افزایشی^۳ جهت ردیابی حداکثر توان استفاده شده است که به علت سادگی در پیاده‌سازی و مقاوم بودن به تغییرات شرایط آب و هوایی بسیار کاربرد دارد. همچنین در مقالات بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی همچون الگوریتم ازدحام ذرات [۷]، الگوریتم ژنتیک [۸-۱۱] و الگوریتم استعماری جهت ردیابی حداکثر توان در آرایه‌های خورشیدی پیشنهاد شده است [۱۲]. الگوریتم ژنتیک به همراه شبکه عصبی مصنوعی و در [۱۳، ۱۴] به همراه روش اغتشاش و مشاهده تطبیقی مورد استفاده قرار گرفته است که منجر به کاهش نوسانات توان و فرا جهش شده است. در [۱۵ و ۱۶] یک کنترلر انتگرال تفاضلی و فازی باهدف کاهش خطای سیستم طراحی شده است. این کنترلر برای شناسایی و جداسازی خطایی که در هر کلید اینورتر رخ داده عملکرد مناسب داشته است و مزیت آن به حداقل رسیدن زمان بین اتفاق افتادن خطا و از بین رفتن آن است. در [۱۷] خروجی فتوولتائیک به موتور القایی سه فاز متصل شده است. عموماً در سیستم‌های فتوولتائیک جزیره شده، باید برق حاصل از سلول‌های فتوولتائیک باطری را شارژ کند و باطری به عنوان منبع

¹ Perturb and observe (P&O)

² Maximum power point tracking (MPPT)

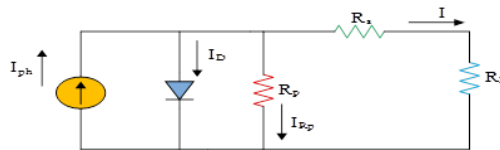
³ the Incremental Conductance (INC)

برای اینورتر باشد. باطری‌ها یک طبقه قدرت کمی دارند. پس با به کار بردن و طراحی یک دنبال کننده حداکثر توان جاسازی شده می‌توان بازده سیستم را بالا برد و هزینه سرمایه‌گذاری به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. در [۱۸] یک کنترل دو طبقه ردیابی نقطه حداکثر توان یک سیستم فتوولتائیک تحت شرایط ایزولاسیون، منحنی مشخصه سیستم را ارائه کردند که دارای سرعت ردیابی بالا و پیچیدگی الگوریتم نسبتاً پایینی بوده است. در [۱۹] روش جستجوی دو طبقه‌ای را ارائه کردند که دارای سرعت پایین و الگوریتمی آن دارای پیچیدگی متوسط داشت. در [۲۰] روشی برای ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان سلول‌های فتوولتائیک ارائه شده است که شامل اینوتری با سه شاخه‌ی یکسوکنده جهت کاهش تلفات کلیدزنی، تنها از شاخه‌ی مشترک اینوتر برای سویچینگ فرکانس شبکه استفاده شده است. در مراجع [۲۱، ۲۲] از کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI) و کنترل‌کننده‌های تناسبی-مشتقی (PD) برای ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان استفاده شده است. کنترل‌کننده‌ی PD فراجش را کم کرده ولی خطای حالت دائمی ماندگار را به‌خوبی بهبود نمی‌بخشد. کنترل‌کننده‌ی PI خطای حالت دائمی را کاهش داده ولی سبب افزایش فراجش و در نتیجه کاهش پایداری می‌شود. به منظور بهبود کنترل‌کننده‌های PD و PI روش‌های مختلفی ارائه شده است که یکی از این روش‌ها، روش کنترل فازی هست که به منظور رویارویی با اغتشاشات و نامعینی‌ها هست. بر این اساس روش PI-Fuzzy و PD-Fuzzy ارائه گردید [۲۳، ۲۴]. کنترل‌کننده‌ی PD-Fuzzy در بهبود خطای حالت ماندگار ضعیف عمل می‌کند بنابراین در عمل کنترل‌کننده‌ی PI-Fuzzy نسبت به کنترل‌کننده‌ی PD-Fuzzy کاربرد بیشتری دارد. کنترل‌کننده‌ی PI-Fuzzy عملکرد ضعیفی در پاسخ‌گذا برای سیستم‌های با مرتبه‌ی بالا دارد. کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر (PID) به‌طور گسترده‌ای در صنعت کاربرد دارد و یکی از روش‌های ساده‌ای کنترل به حساب می‌آید. از نظر تئوری این کنترل‌کننده می‌تواند پایداری سیستم را تضمین نماید و ردیابی خطای حالت ماندگار صفر، برای سیستم‌های خطی را انجام دهد [۲۵]. نوآوری در این مقاله، طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی برای ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان سیستم‌های فتوولتائیک است، به این صورت که برای یک سلول فتوولتائیک که متصل به اینورتر می‌باشد نرخ کلیدزنی اینورتر آن به روش مدولاسیون پهنای پالس با استفاده از کنترل فازی پیشنهاد شده در این مقاله تعیین می‌شود به نحوی که

بهترین نقطه توان انرژی خورشیدی را در شرایطی که دما و تابش تغییر می‌کند، دنبال کند. به علاوه، ازالگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری نیز جهت تنظیم کردن حدود توابع فازی جهت پاسخ‌دهی سریع سیستم به تغییرات شرایط محیطی همچون تابش و دما و نیز تعیین بهینه ضرایب کنترل‌کننده PI استفاده شده است که نتیجه آن مزایایی از قبیل عملکرد انعطاف‌پذیر، رابط کاربری مناسب و پیاده‌سازی ساده جهت ردیابی حداکثر توان آرایه‌های خورشیدی خواهد بود. ادامه مقاله به صورت زیر می‌باشد، مدل‌سازی سلول خورشیدی در قسمت دوم آورده شده است، ساختار کنترلر فازی برای ردیابی حداکثر نقطه توان در بخش سوم نمایش داده می‌شود و در نهایت مدل‌سازی و نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲ مدل‌سازی سلول خورشیدی

معادله‌ی کلاسیک سلول‌های خورشیدی، رابطه‌ی بین جریان و ولتاژ سلول فتوولتائیک را تشریح می‌کند که در آن از مقاومت‌های موازی در مدار معادل سلول خورشیدی صرف‌نظر شده است. در شکل (۱) مدل کلاسیک سلول‌های خورشیدی ارائه شده است [۲۶، ۲۷].



شکل ۱: مدل کلاسیک سلول خورشیدی

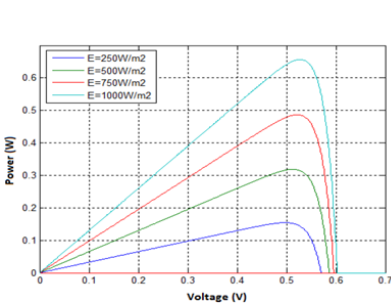
رابطه‌ی بین ولتاژ و جریان در مدل کلاسیک سلول خورشیدی در زیر آورده شده است.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_T}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V + R_s I}{R_p} \right] \quad (1)$$

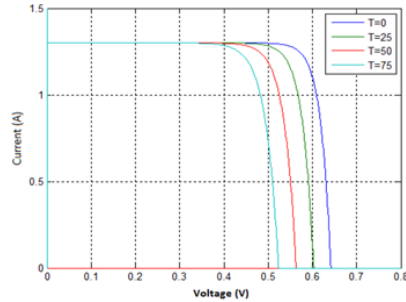
در این رابطه V ولتاژ دو سر بار، I جریان بار، I_{ph} جریان تولیدشده ناشی از تابش خورشید، I_0 جریان اشباع معکوس سلول خورشیدی، R_s مقاومت سری سلول فتوولتائیک و V_T ولتاژ حرارتی می‌باشد.

در شکل (۲) مشخصه‌ی IV سلول خورشیدی نشان داده شده است که سلول می‌تواند روی هر نقطه‌ی از منحنی داده شده حرکت کند و آن نقطه را به‌عنوان نقطه‌ی کار خود

انتخاب کند. دونقطه‌ی مهم روی این منحنی، ولتاژ مدارباز V_{oc} و اتصال کوتاه I_{sc} می‌باشد. ولتاژ مدارباز، ماکزیم ولتاژ در لحظه‌ای است که جریان صفر باشد و جریان اتصال کوتاه، ماکزیم جریانی است که ولتاژ متناظر با آن صفر است.

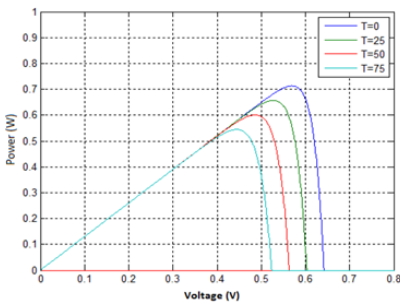


(ب) تاثیر تغییر تشعشع بر روی منحنی‌های ولتاژ-توان

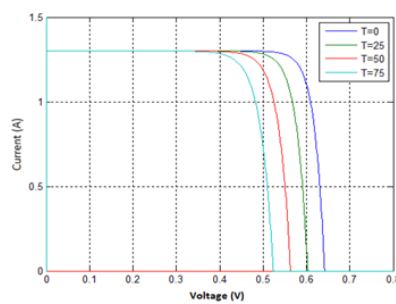


(آ) تاثیر تغییر تشعشع بر روی منحنی‌های ولتاژ-جریان

شکل ۲: (آ) منحنی‌های ولتاژ-جریان و (ب) ولتاژ-توان یک سیستم فتوولتائیک



(ب) تاثیر تغییر دما بر روی منحنی‌های ولتاژ-توان



(آ) تاثیر تغییر دما بر روی منحنی‌های ولتاژ-جریان

شکل ۳: تاثیر دما بر روی منحنی‌های توان و جریان در سیستم فتوولتائیک

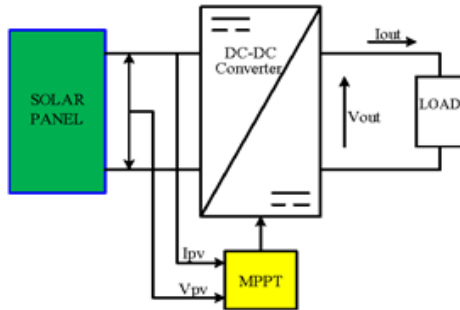
که شکل (۲) و (۳) مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان یک پنل خورشیدی را به ازای تابش‌های متفاوت نمایش داده می‌شود. همان‌گونه که از شکل دیده می‌شود افزایش شدت تابش سبب بالا رفتن جریان و به دنبال آن توان تولیدی پنل خواهد شد. شکل (۳)، تاثیر افزایش دما را بر روی پنل خورشیدی نمایش می‌دهد همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود افزایش دما سبب کاهش توان خروجی پنل می‌گردد.

۳ مدل سازی مؤلفه های سیستم های فتوولتائیک

در این قسمت، سیستم کنترلی پیشنهادی را مدل می کنیم که شامل کانورتر، مدل سازی کنترلر PI، روش کنترل فازی و روش بهینه سازی گرگ خاکستری^۴ جهت تنظیم حدود توابع فازی و کنترلر PI می باشد.

۱.۳ مدل سازی کانورتر در سیستم های فتوولتائیک

یک مبدل DC/DC بخش اصلی از هر سیستم MPPT را تشکیل می دهد. این مبدل بین بار و مدل فتوولتائیک به کار گرفته می شود که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: بلوک دیاگرام یک سیستم MPPT

با تغییر سیکل کاری می توان به نقطه ای ماکزیمم توان دست یافت. در حالتی که $V_i > V_o$ است مبدل مفروض به صورت یک مبدل Buck است در یک مبدل Buck رابطه ولتاژ خروجی عبارت است از:

$$V_o = D \times V_i \quad (۲)$$

V_o ولتاژ خروجی و V_i ولتاژ ورودی است و امپدانس انتقالی نیز برابر است با

$$R_o = D^2 \times R_i \quad (۳)$$

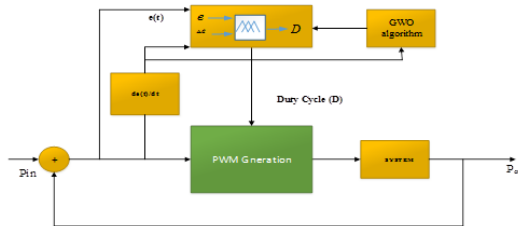
⁴ Gery wolf optimization (GWO)

R_o امپدانس خروجی و R_i امپدانس ورودی دیده شده توسط منبع می‌باشد. می‌توان با تغییر D مقاومت دیده شده توسط منبع را تغییر داد. اگر $V_o > V_i$ باشد مبدل مفروض به صورت یک مبدل بوست عمل خواهد کرد. رابطه ولتاژ خروجی در این مبدل عبارت است از:

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (4)$$

۲.۳ ساختار کنترل‌کننده فازی

ساختار ساده‌ی کنترل‌کننده‌ی فازی برای سیستم فتوولتائیک در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: ساختار یک کنترل‌کننده‌ی فازی

کنترل فازی برای ردیابی نقطه بیشینه تولید توان برپایه تنظیم سیکل کاری مربوط به کلیدزنی اینورتر جهت رسید به نقطه ماکزیمم توان پیشنهاد شده است. میزان تابش خورشید و دمایی سلول فتوولتائیک به عنوان دو متغیر آب و هوایی در نظر گرفته شده اند. زیرا که برپایه مطالب گفته شده در بخش ۱.۳، معادله (۴)، با تغییر مناسب D می‌توان ولتاژ خروجی را به نقطه بیشینه خود رساند که ساختار پیشنهادی در این مقاله برای بهبود عملکرد MPPT در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه پیشنهاد شده است. در قسمت بعد ساختار این کنترلر معرفی می‌گردد.

۳.۳ کنترلر فازی

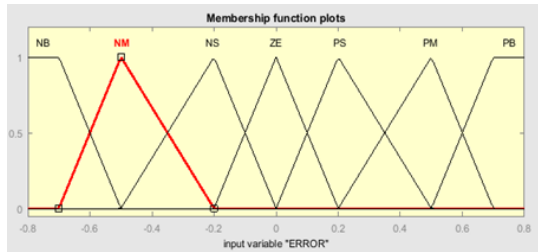
در این بخش یک کنترل‌کننده فازی با دو ورودی و یک خروجی طراحی می‌شود. در شکل ۵ ساختار پیاده‌سازی در محیط متلب آورده شده است. مزیت اصلی کنترل‌کننده فازی این

است که به اطلاعات دقیقی در مورد سیستم نیازی ندارد. جهت رسیدن به نقطه حداکثر توان، مقدار ولتاژ باید مطابق جدول (۱) در روش پیشنهادی براساس تغییرات ولتاژ و توان در منحنی ولتاژ-توان تغییر نماید توابع عضویت ورودی و خروجی نیز به ترتیب در

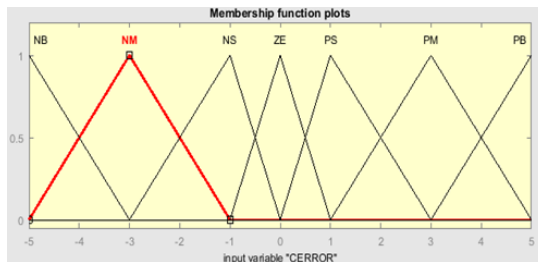
جدول ۱: تغییرات منحنی ولتاژ-توان جهت رسیدن به نقطه MPPT

ΔV	ΔP	V
+	+	افزایش
-	+	کاهش
+	-	کاهش
-	-	افزایش

شکل‌های (۶) تا (۸) نشان داده شده است.

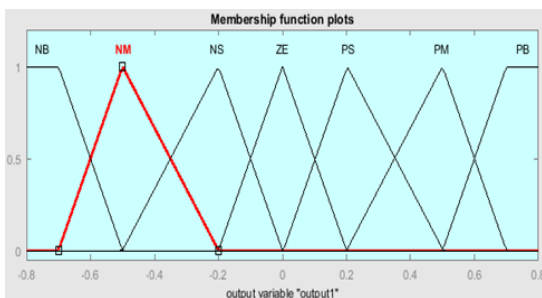


شکل ۶: تابع عضویت برای ورودی فازی خطا $e(t)$



شکل ۷: تابع عضویت برای ورودی فازی مشتق خطا $\frac{de(t)}{dt}$

ورودی سیستم کنترل‌کننده فازی شامل خطای سیستم $e(t)$ و تغییرات خطای سیستم $ce(t)$ می‌باشد که مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شوند:



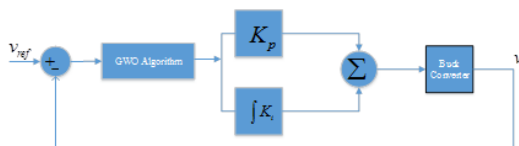
شکل ۸: تابع عضویت برای D

$$e(t) = \frac{\Delta p}{\Delta v} = \frac{p(t) - p(t - 1)}{v(t) - v(t - 1)} \quad (5)$$

$$ce(t) = e(t) - e(t - 1) \quad (6)$$

۴.۳ بهینه کردن پارامترهای کنترل‌کننده PI

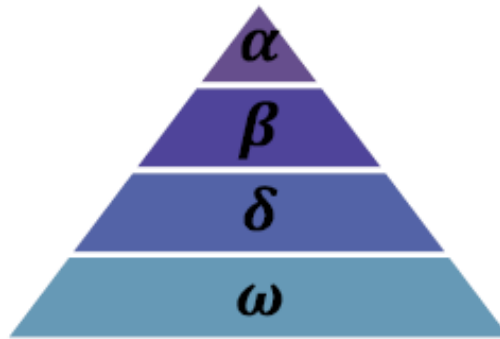
از کنترل‌کننده PI جهت تنظیم توان و ولتاژ خروجی در کانورتر باک جهت شارژ کردن باتری استفاده شده است. ساختار کنترل‌کننده PI در شکل (۹) نمایش داده شده است که از الگوریتم گرگ خاکستری به منظور مینیمم سازی تغییرات ولتاژ تحویلی به بار سیستم با تنظیم پارامترهای Kp و Ki استفاده شده است.



شکل ۹: بهینه کردن ضرایب کنترل‌کننده PI

۵.۳ الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری GWO یک الگوریتم متاهیورستیک است که از ساختار سلسله مراتبی و رفتار اجتماعی گرگ های خاکستری در هنگام شکار کردن الهام گرفته است [۳۰]. این الگوریتم مبتنی بر جمعیت بوده، فرآیند ساده ای دارد و به سادگی قابلیت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را دارد. گرگ های خاکستری به عنوان شکارچیان راس در نظر گرفته می شوند، که در بالای هرم زنجیره غذایی هستند. گرگهای خاکستری ترجیح می دهند در یک گروه زندگی کنند، هر گروه به طور متوسط ۵-۱۲ عضو دارد. همه اعضای این گروه دارای سلسله مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیق هستند و وظایف خاصی دارند. در هر گله از گرگ ها برای شکار کردن ۴ درجه وجود دارد که مانند شکل (۱۰) به صورت یک ساختار هرمی مدل می شود.



شکل ۱۰: سلسله مراتب اجتماعی گرگ ها [۳۰]

در بهینه سازی گرگ خاکستری، GWO مناسب ترین راه حل را به عنوان آلفا در نظر می گیریم ، و راه حل های دوم و سوم مناسب به ترتیب بتا و دلتا نامگذاری می شوند. بقیه راه حل ها امگا در نظر گرفته می شوند. در الگوریتم GWO ، شکار توسط α و β و δ هدایت می شود. راه حل ω از این سه گرگ پیروی می کند. وقتی شکار توسط گرگ ها احاطه شده و از حرکت بایستد حمله به رهبری گرگ α شروع می شود. مدل کردن این فرآیند با استفاده از کاهش بردار a انجام می شود. از آنجا که A برداری تصادفی در بازه $[2a - 2a]$ است، با کاهش a بردار ضرایب A هم کاهش می یابد. اگر $|A| < 1$ باشد، گرگ α به شکار نزدیک می شود و اگر $|A| > 1$ گرگ از شکار دور خواهد شد. الگوریتم

گرگ خاکستری الزام دارد که تمام گرگ‌ها موقعیت خود را برحسب موقعیت گرگ‌های α و β به روزرسانی کنند. مدل ریاضی رفتار محاصره در معادلات زیر ارائه شده است. که در روابط زیر t تکرار فعلی، A و C بردارهای ضریب هستند، Xp بردار موقعیت طعمه است و X بردار موقعیت گرگ خاکستری را نشان می‌دهد.

$$\vec{D} = |\vec{C} \bullet Xp(\vec{t}) - X(\vec{t})| \quad (۷)$$

$$X(t + ۱) = Xp(\vec{t}) - \vec{A} \bullet \vec{D} \quad (۸)$$

نحوه محاسبه دو بردار A و C در زیر آورده شده است:

$$\vec{A} = ۲ \times \vec{a} \times r_۱ - \vec{a} \quad (۹)$$

$$\vec{C} = ۲ \times r_۲ \quad (۱۰)$$

در روابط فوق $r_۱$ ، $r_۲$ بردارهای تصادفی بین ۰ تا ۱ می‌باشد و a یک ثابت خطی کاهش‌ی است که از ۲ به ۰ کاهش پیدا می‌کند. عملیات شکار معمولاً توسط α هدایت می‌شود. گرگ‌های β و δ ممکن است که گاه در شکار شرکت کنند. در مدل ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، ما فرض کردیم که آلفا، بتا و دلتا دانش بهتری در مورد موقعیت بالقوه طعمه دارند. سه راه حل اول بهترین ذخیره می‌شوند و عامل دیگر موظف است موقعیت‌های خود را مطابق با موقعیت بهترین عوامل جستجو مطابق با معادلات زیر به‌روز کند.

$$\vec{D}\alpha = |\vec{D}\alpha \times Xp(\vec{t})\alpha + \vec{X}| \quad (۱۱)$$

$$\vec{D}\beta = |\vec{C}\beta \times Xp(\vec{t})\beta + \vec{X}| \quad (۱۲)$$

$$\vec{D}\delta = |\vec{C}\delta \times Xp(\vec{t})\delta + \vec{X}| \quad (۱۳)$$

در روابط فوق $\vec{D}a$ ، $\vec{D}\beta$ و $\vec{D}\delta$ موقعیت گرگ‌های آلفا و بتا و دلتا می‌باشند. وقتی که گرگ‌ها شکار را گیر می‌اندازند، شکار کردن و حرکت کردن را متوقف می‌کنند. لذا جواب نهایی برای گرگ‌های α ، β و δ در هر به روزرسانی عبارت‌اند از:

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \quad (۱۴)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \quad (۱۵)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \quad (۱۶)$$

$$X(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (۱۷)$$

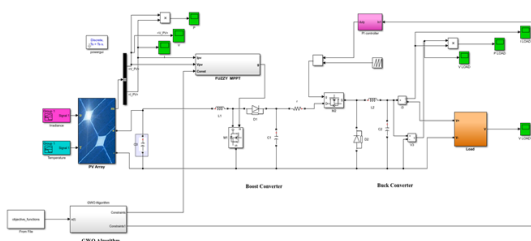
در این مقاله از الگوریتم گرگ خاکستری به منظور تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PI جهت تنظیم توان و ولتاژ مبدل باک و نیز تعیین حدود توابع فازی استفاده شده است. مرسوم است جهت به دست آوردن ضرایب کنترل‌کننده PI که در شکل (۹) نمایش داده شده است از روش زیگلر نیکولز استفاده می‌کنند که در آن K_P ضریب تناسبی و K_i ضریب انتگرالی تعیین می‌شوند اما در این مقاله از الگوریتم گرگ خاکستری جهت تعیین این ضرایب استفاده شده است. تابع هدف استفاده شده برپایه مینیم سازی انحراف ولتاژ سمت مبدل باک مطابق شکل (۹) خواهد بود. به علاوه جهت بهینه‌سازی حدود توابع فازی نیز تابع هدف مینیم کردن تغییرات خطای سیستم می‌باشد که در نهایت تابع هدف نهایی به صورت رابطه (۱۸) معرفی شده است:

$$J = \alpha |ce(t)| + \beta |\Delta v_{ref} - v_{buck}| \quad (۱۸)$$

که در رابطه (۱۸) مقدار α بیان‌کننده ضریب وزنی و برابر با 0.6 و نیز مقدار β برابر 0.4 می‌باشد.

۴ شبیه‌سازی

برای بررسی روش پیشنهادی بهبود ردیابی نقطه بیشینه توان، سیستم نشان داده شده در شکل (۱۱) در محیط سیمولینک متلب پیاده‌سازی شده است. اطلاعات مدل یاد شده در جدول (۲) آورده شده است.



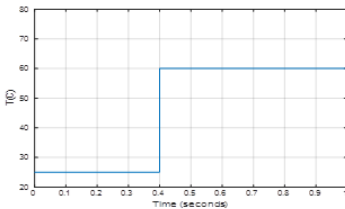
شکل ۱۱: ساختار سیستم پیاده‌سازی شده در محیط متلب

جدول ۲: اطلاعات سیستم مورد مطالعه

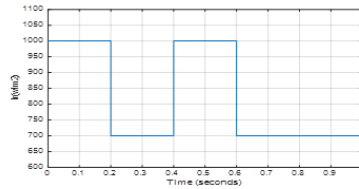
$75W$	توان سیستم فوتوولتائیک
$20V$	ولتاژ ماکزیمم
$3/4A$	جریان اتصال کوتاه
$1/6e^{-19}$	ثابت بولتزمن
۱۶	تعداد سلول‌های سری

۱.۴ سناریو اول بدون استفاده از کنترلر $Fuzzy - GWO$

برای انجام شبیه‌سازی دو سناریو استفاده از کنترلر فازی و عدم استفاده از آن در نظر گرفته شده است. تغییرات دما و شدت تابش به ترتیب در شکل $12a$ و $12b$ نشان داده شده است. در این سناریو حالت عدم استفاده از کنترلر $Fuzzy - GWO$ بررسی می‌شود. در این سناریو ولتاژ، جریان و توان خروجی دو سر بار محاسبه می‌شوند که به ترتیب در شکل‌های ۱۳ با در نظر گرفتن تغییر شدت تابش قابل‌رویت می‌باشد. همان‌طور



(ب) تغییرات دمای سیستم فتولتائیک



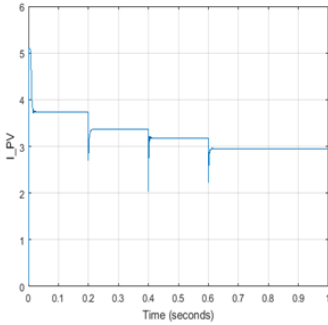
(آ) تغییرات تابش سیستم فتولتائیک

شکل ۱۲: تغییرات دما و تابش در سیستم فتولتائیک

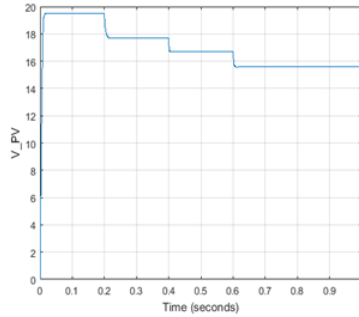
که مشاهده می‌شود با افزایش شدت تابش خورشید مقدار جریان و توان حاصل نیز افزایش می‌یابد و در شدت تابش نهایی که $\frac{W}{m^2}$ ۱۰۰۰ است مقدار جریان و توان حاصل از سیستم به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در ادامه ولتاژ، جریان و توان خروجی دو سر بار محاسبه می‌شوند که به ترتیب در شکل‌های ۱۴a تا ۱۴c با در نظر گرفتن تغییر شدت تابش قابل رؤیت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت تابش خورشید مقدار جریان و توان حاصل نیز افزایش می‌یابد و در شدت تابش نهایی که $\frac{W}{m^2}$ ۱۰۰۰ است مقدار جریان و توان حاصل از سیستم به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۲.۴ سناریو دوم با استفاده از کنترلر Fuzzy - GWO

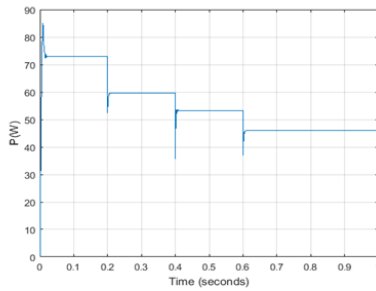
در سناریو دوم کنترلر Fuzzy-GWO به سیستم فتولتائیک اعمال می‌شود. مقدار تغییرات جریان و دما همچون حالت قبل به کنترل‌کننده فازی اعمال شده است. با نزدیک شدن نقطه کار سلول خورشیدی به نقطه کار بهینه، اندازه این پارامتر در یک بازه کوچک ویژه آن پنل قرار می‌گیرد، به این ترتیب با محاسبه این پارامتر در شرایط کاری مختلف می‌توان معیاری از میزان نزدیکی نقطه کار فعلی به نقطه کار بهینه داشت و با مقایسه مقدار فعلی و مقدار قبلی این پارامتر، جهت صحیح برای رسیدن به نقطه کار بهینه را تعیین کرد (جدول ۱). ردیاب نقطه بیشینه توان با کنترل فازی، نقطه ماکزیمم جریان و ولتاژ را اندازه گرفته و سپس این مقادیر را به منطق فازی داده تا خروجی بیشینه حاصل شود. خروجی فازی به ورودی مبدل بوست و باک و سپس به بار متصل می‌شود. در شکل (۱۵) نتایج بر اساس کنترل‌کننده Fuzzy-GWO نشان داده شده است و می‌توان مشاهده کرد که سطح ولتاژ و جریان و به تبع آن سطح توان دو سر بار در مقایسه با شکل



(ب) جریان خروجی پنل خورشیدی



(آ) ولتاژ خروجی پنل خورشیدی



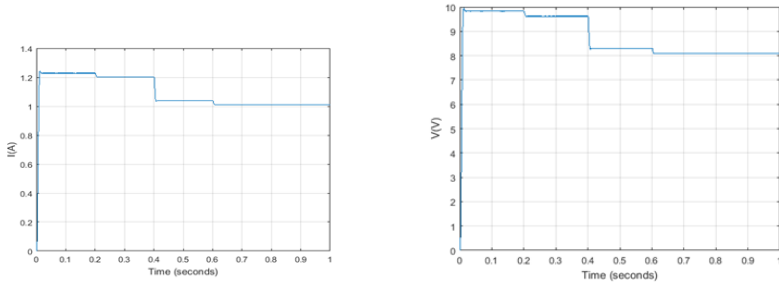
(ج) توان خروجی پنل خورشیدی

شکل ۱۳: نمودارهای ولتاژ، جریان و توان خروجی پنل خورشیدی

(۱۴) بعد اعمال کنترلر بهینه شده PI توسط الگوریتم گرگ خاکستری ثابت مانده است.

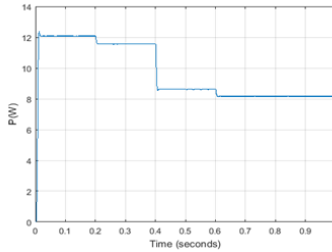
۳.۴ بحث و نتایج

نمودار همگرایی مربوط به سیکل کاری کلیدزنی اینورتر در شکل (۱۵) آورده شده است که مشاهده می‌شود کنترلر پیشنهادی به خوبی توانسته سیکل کاری مربوط به کلیدزنی اینورتر را کنترل نماید. در نتیجه توان بیشتری در مقایسه با حالتی که کنترلر به کارگرفته نشده بود به بار تحویل گردیده است با مقایسه جدول (۳) که در آن توان و ولتاژ دو سر بار نمایش داده شده است دیده می‌شود که با اعمال کنترل پیشنهادی سطح توان و ولتاژ پنل خورشیدی به ترتیب ۶۰ و ۴۲ درصد رشد را نمایش می‌دهد. در جدول (۳) نیز خلاصه‌ای از نتایج سیستم کنترلر پیشنهادی به ازای تغییر در دما و شدت تابش اعمالی به پنل خورشیدی نمایش داده شده است و در آن سطح توان بدست آمده از سلول، توان ماکزیمم



(ب) جریان خروجی بار

(آ) ولتاژ خروجی بار



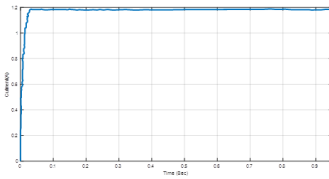
(ج) توان خروجی بار

شکل ۱۴: نمودارهای ولتاژ، جریان و توان دو سر بار

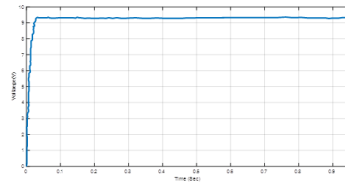
سلول، دقت ردیابی توان سلول، جریان و ولتاژ مبدل باک در آن مقایسه شده اند که نتایج نشان از دقت خوب روش پیشنهادی در ردیابی توان ماکزیم پنل خورشیدی می باشد. از جدول (۳) و شکل (۱۵) مشاهده می شود که دقت روش Mppt معرفی شده از ۹۳/۱ درصد تا ۹۹/۷ درصد تغییر می کند. به علاوه سطح ولتاژ تحویلی به بار نیز در انتهای سیستم در رنج ثابتی در تمامی چهار حالت فوق باقی می ماند. بنابراین کنترلر PI بهینه شده به خوبی توانسته تا در ولتاژ و جریان ثابتی باتری را شارژ نماید که این موضوع سبب افزایش بازده پنل خورشیدی خواهد شد. در جدول (۴) نیز مقایسه ای میان روش

جدول ۳: مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در دما و تابش های مختلف

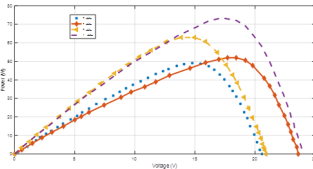
I_{buck}	V_{buck}	دقت	P_{PV}	P_{Mppt}	حالت ها
۱/۱۷۵	۹/۱۱	۹۹/۷۰	۶۸/۶W	۷۳/۵W	۲۵C ، ۱۰۰۰ $\frac{W}{m^2}$
۱/۱۶۷	۹/۱۲	۹۶/۷	۵۳/۸W	۶۱/۲W	۲۵C ، ۷۰۰ $\frac{W}{m^2}$
۱/۱۶۵	۹/۱۰	۹۳/۱	۶۱/۴W	۶۶/۲W	۶۰C ، ۱۰۰۰ $\frac{W}{m^2}$
۱/۱۶۴	۹/۰۸	۹۵/۴	۴۸/۳W	۴۸/۹W	۶۰C ، ۷۰۰ $\frac{W}{m^2}$



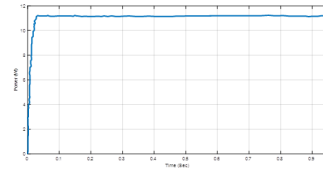
(ب) جریان خروجی بار



(آ) ولتاژ خروجی بار

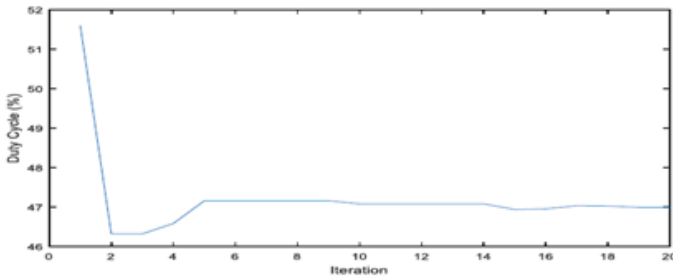


(د) مقایسه توان خروجی در چهار حالت



(ج) توان خروجی بار

شکل ۱۵: نمودارهای ولتاژ، جریان و توان دو سر بار با اعمال کنترلر پیشنهادی



شکل ۱۶: سیکل کاری مربوط به کلیدزنی اینورتر

پیشنهادی و روش های $P&O$ [۳]، روش ولتاژ مدار باز کسری (V_{mpp}) [۲۹]، روش جریان اتصال کوتاه کسری (I_{mpp}) [۲۸] و روش هدایت افزایشی (INC) [۶] در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و شدت تابش صورت $\frac{W}{m^2}$ ۱۰۰۰ صورت گرفته است لازم به ذکر است روش های بسیار متنوعی در این زمینه ارائه شده است که انتخاب این چهار روش به علت کاربردی بودن آنها از نقطه نظر روش های جستجوی $Mppt$ انتخاب شده است. با مشاهده جدول (۴) می توان دریافت که روش ردیابی ولتاژ مدار باز مدت زمان کمتری ۰.۳۸ ثانیه را به خود اختصاص داده است اما دقت آن در مقایسه با مابقی روش ها که ۸۰.۳۲ درصد بوده است کمتر خواهد بود، روش پیشنهادی اگرچه در مقایسه با روش ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه کسری زمان ردیابی بیشتری به خود اختصاص داده است

اما دقت آن ۹۹٫۷ درصد می باشد که توانسته به نقطه توان ماکزیمم ۷۳٫۵ وات دست یابد.

جدول ۴: مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش های مختلف

حالت ها	روش	زمان ردیابی (ثانیه)	دقت روش (درصد)	P_{Mpp}
۱	$P\&O$	۰٫۵۱	۹۸٫۱۲	$۷۰٫۱۵W$
۲	V_{mpp}	۰٫۳۸	۸۰٫۳۲	$۵۹٫۰۲W$
۳	I_{mpp}	۰٫۴۰	۸۲٫۹۴	$۵۷٫۱۶W$
۴	INC	۰٫۴۳	۹۶٫۷۲	$۶۸٫۵۳W$
۵	روش پیشنهادی	۰٫۴۵	۹۹٫۷۰	$۷۳٫۵W$

۵ نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر کنترل کننده ترکیبی $Fuzzy - GWO$ بر توان خروجی، جریان خروجی و ولتاژ سیستم فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفت. کنترل کننده $Fuzzy - GWO$ ، از قوانین و اصول زبان منطق فازی استفاده می کند که با تنظیم جداگانه ولتاژ و جریان به عنوان ورودی برای تطبیق کننده فازی جهت سازگاری در سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. برای بررسی ابتدا مدل شبیه سازی بدون کنترل کننده فازی ارائه و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفت. سپس به منظور بهبود فرآیند ردیابی نقطه بیشینه توان، مدل کنترل کننده $Fuzzy - GWO$ اعمال شد. با به کارگیری کنترل کننده $Fuzzy - GWO$ ، مبدل و ردیابی نقطه بیشینه توان به جذب حداکثر توان ممکن از ورودی ها می پردازند. به علاوه پارامترهای کنترلر PI نیز در سمت مصرف کننده جهت تنظیم ولتاژ توسط GWO بهینه گردید. در مجموع نتایج شبیه سازی نشان می دهد که سیستم پیشنهادی عملکرد قابل قبولی را تحت شرایط محیطی مختلف به نمایش می گذارد و توانایی ردیابی توان تا ۹۹٫۷ درصد را در مدت زمان ۰٫۴۵ ثانیه دارا می باشد به علاوه توان ثابتی را برای باتری به کمک کنترلر بهینه شده فراهم می آورد که سبب افزایش طول عمر باتری خواهد شد.

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است از دانشگاه آیت الله بروجردی جهت حمایت از این تحقیق با شماره گرنت ۱۴۰۱۰۰۰۷۵۴ - IR۰۱ - ۰۴ - تشکر و قدردانی نمود.

مراجع

- [1] M. N. I. Jamaludin, M. F. N. bin Tajuddin, J. Ahmed and T. Sengodan, "Hybrid Bio-Intelligence Salp Swarm Algorithm for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Photovoltaic Systems Under Gradual Change in Irradiance Conditions," 2021 Fourth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Erode, India, 2021, pp. 1-7.
- [2] H. Saber, A. E. Bendaouad, L. Rahmani and H. Radjeai, "A comparative study of the FLC, INC and P&O methods of the MPPT algorithm for a PV system," 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif, Algeria, pp. 2010-2015, 2022.
- [3] J. -Z. Yan, W. -H. Pan, H. -H. Wu, T. Hsu and C. -L. Wei, "Photovoltaic Energy Harvesting Chip With P&O Maximum Power Point Tracking Circuit and Novel Pulse-Based Multiplier," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 11, pp. 12867-12876, Nov. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.
- [4] B.N. Alajmi, K.H. Ahmed, S. J. Finney, and B.W. Williams, "Fuzzy-Logic-Control Approach of a Modified Hill-Climbing Method for Maximum Power Point in Microgrid Standalone Photovoltaic System," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 4, pp. 1022-1030, April 2011.
- [5] L. H. Pratomo, "Performance Analysis of Parallel PV Modules Using an MPPT Charge Controller," 2021 International Seminar on Application for Technology

- of Information and Communication (iSemantic), Semarangin, Indonesia, pp. 167-172,2021.
- [6] M. W. Rahman, C. Bathina, V. Karthikeyan, and R. Prasanth, "Comparative analysis of developed incremental conductance (IC) and perturb & observe (P&O) MPPT algorithm for photovoltaic applications," in 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), pp. 1–6, Coimbatore, India, 2020.
- [7] M. K. Gawande, S. G. Ghulaxe, T. R. Mahatme, A. S. Salvi and M. D. Bagewadi, "Modern approach for hybridization of PSO-INC MPPT methods for efficient solar power tracking," 2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangalore, India, 2021.
- [8] S. Paul, "Comparison of MPPT using GA-Optimized ANN employing PI controller with GA-Optimized ANN employing fuzzy controller for PV system," IET Chennai Fourth International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2013), Chennai, 2013, pp. 266-271,
- [9] H. Iles and Y. Mahmoud, "Improved MPPT Algorithm for Differential Power Processing PV Converters," IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-5,
- [10] H. W. Salih, S. Wang and B. S. Farhan, "A novel GA-PI optimized controller for MPPT based PV in a hybrid PV-diesel power system," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, China, 2015, pp. 1288-1293,
- [11] L. B. Prasad, S. Sahu, M. Gupta, R. Srivastava, L. Mozhui and D. N. Asthana, "An improved method for MPPT using ANN and GA with maximum power comparison through Perturb & Observe technique," 2016 IEEE Uttar Pradesh Sec-

- tion International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON), Varanasi, India, 2016, pp. 206-211,
- [12] A. Khalilnejad, A. Sundararajan and A. I. Sarwat, "Optimal design of hybrid wind/photovoltaic electrolyzer for maximum hydrogen production using imperialist competitive algorithm," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 40-49, January 2018.
- [13] S. R. Kiran, C. H. H. Basha, V. P. Singh, C. Dhanamjayulu, B. R. Prusty and B. Khan, "Reduced Simulative Performance Analysis of Variable Step Size ANN Based MPPT Techniques for Partially Shaded Solar PV Systems," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 48875-48889, 2022.
- [14] M. Ali et al., "Robust ANN-Based Control of Modified PUC-5 Inverter for Solar PV Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 4, pp. 3863-3876, July-Aug. 2021.
- [15] M. N. Ali, K. Mahmoud, M. Lehtonen and M. M. F. Darwish, "An Efficient Fuzzy-Logic Based Variable-Step Incremental Conductance MPPT Method for Grid-Connected PV Systems," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26420-26430, 2021.
- [16] F. -J. Lin, K. -C. Lu, T. -H. Ke, B. -H. Yang and Y. -R. Chang, "Reactive Power Control of Three-Phase Grid-Connected PV System During Grid Faults Using Takagi-Sugeno-Kang Probabilistic Fuzzy Neural Network Control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 9, pp. 5516-5528, Sept. 2015.
- [17] N. Benbaha, F. Zidani, M. S. N. Said, S. e. Boukebbous and H. Ammar, "Optimal energy control of induction motor standalone photovoltaic-battery pumping system," 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC), Batna, Algeria, pp. 622-628, 2017.

- [18] R. Muniraj, M. Ulaganathan, J. T. B. Deepanraj and S. C. "Design and Evaluation of MPPT Based Two Stage Battery Charging Scheme For A Solar PV Lighting System," 2022 International Conference on Innovations in Science and Technology for Sustainable Development (ICISTSD), Kollam, India, pp. 375-380, 2022.
- [19] H. Xu, X. Wang, L. Huang, J. Qian and J. Lou, "Research on Two-Stage Three-Phase Photovoltaic Grid-Connected System with MPPT," 2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, China, 2019.
- [20] J. Chang, W. Chang, and S. Chung, "Single-phase grid-connected PV system using three-arm rectifier-inverter," IEEE transactions on aerospace and electronic systems, vol. 42, pp. 211-219, 2006.
- [21] B. Babes, F. Albalawi, N. Hamouda, S. Kahla and S. S. M. Ghoneim, "Fractional-Fuzzy PID Control Approach of Photovoltaic-Wire Feeder System (PV-WFS): Simulation and HIL-Based Experimental Investigation," in IEEE Access, vol. 9, pp. 159933-159954, 2021.
- [22] W. Swiegers and J. H. Enslin, "An integrated maximum power point tracker for photovoltaic panels," in Industrial Electronics, 1998. Proceedings. ISIE'98. IEEE International Symposium on, 1998, pp. 40-44.
- [23] N. Mahmud, A. Zahedi and A. Mahmud, "A Cooperative Operation of Novel PV Inverter Control Scheme and Storage Energy Management System Based on ANFIS for Voltage Regulation of Grid-Tied PV System," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2657-2668, Oct. 2017.
- [24] Y.-T. Chen, Y.-C. Jhang, and R.-H. Liang, "A fuzzy-logic based auto-scaling variable step-size MPPT method for PV systems," Solar Energy, vol. 126, pp. 53-63, 2016.

- [25] S. Azali and M. Sheikhan, "Intelligent control of photovoltaic system using BPSO-GSA-optimized neural network and fuzzy-based PID for maximum power point tracking," *Applied Intelligence*, vol. 44, pp. 88-110, 2016.
- [26] O. Abdalla, H. Rezk, E.M. Ahmed, Wind driven optimization algorithm based global MPPT for PV system under non-uniform solar irradiance. *Sol. Energy*, 180, pp. 429-444, 2019.
- [27] M. Abdel-Salam, M.-T. El-Mohandes, M. Goda. An improved perturb-and-observe based MPPT method for PV systems under varying irradiation levels, *Sol. Energy*, 171, pp. 547-561, 2018.
- [28] T.Noguchi S.Togashi. "Short-current pulsebased adaptive maximum-power-point tracking for a photovoltaic power generation system", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 139, pp. 65-72, 2002.
- [29] 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.
- [30] Saremi S, Mirjalili SZ, Mirjalili SM, Evolutionary population dynamics and grey wolf optimizer. *Neural Comput Appl* 26(5):1257-1263, 2015.