بهینه‌سازی ردیابی حداکثر توان در سیستم تولید توان خورشیدی مبتنی بر کنترل‌کننده فازی نوع دو در شرایط سایه جزئی با استفاده از الگوریتم جستجوی سنجاب

احسان زراسوندی حسینی[۱]، ابراهیم آقاجری*[۲]، سید محمدصادق غیاثی[۳]
۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، aghajari@iauahvaz.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۳۰

چکیده: امروزه توجه جهانی به سمت تولید انرژی از طریق منابع تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی جلب شده است. شرایط سایه جزئی مسائل چالش برانگیزی را برای ردیابی نقطه حداکثر توان ایجاد کرده است که شامل گرفتار شدن در نقاط حداکثر توان محلی، زمان ردیابی کند و نوسانات در توان تولید شده در طول زمان ردیابی است. بنابراین محققان به‌منظور غلبه بر مشکلات مربوط به شرایط سایه و مقابله با پیک‌های محلی، تکنیک‌های ترکیبی متنوعی مبتنی بر کنترل‌کننده‌های فازی و الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه کرده‌اند. در میان الگوریتم‌های فراابتکاری، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم گرگ خاکستری به دلیل اجرای آسان، سادگی و بار محاسباتی کم، از رایج‌ترین روش‌های بهینه‌سازی هستند. ولی اشکال این الگوریتم‌ها سرعت همگرایی کم و مشکل در تنظیم پارامترهای خودشان است و ممکن است تحت تغییرات سریع تابش خورشیدی و شرایط سایه در پیک‌های محلی گرفتار شوند. برای مقابله با این مشکلات در این پژوهش یک ساختار ترکیبی جدید مبتنی بر کنترل‌کننده فازی نوع دو و الگوریتم جستجوی سنجاب به‌کار گرفته شده است. کنترل‌کننده فازی نوع دو بجای کنترل کننده فازی معمولی استفاده شده است و بوسیله‌ی الگوریتم جستجوی سنجاب که بجای الگوریتم گرگ خاکستری به‌کار گرفته شده است، بهینه‌سازی و تنظیم می‌گردد. در این ساختار با اعمال چهار الگوی تابش، تأثیرگذاری کنترل‌کننده پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار متلب نشان می‌دهد که بازده روش پیشنهادی بطور میانگین حدود ۹۹٪ است و استفاده از روش پیشنهادی نسبت به عدم استفاده از آن موجب کاهش زمان نشست در حدود ۳۶٪، افزایش سرعت ردیابی حداکثر توان و کاهش نوسانات توان می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، سیستم‌های خورشیدی، کنترل‌کننده فازی نوع دو، شرایط سایه جزئی، توان خورشیدی، ردیابی حداکثر توان، الگوریتم جستجوی سنجاب

۱- مقدمه

امروزه با گسترش صنعت و افزایش تقاضای انرژی و ماهیت فرسایشی سوخت‌های فسیلی، توجه جهانی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر جلب شده است. منابع انرژی تجدیدپذیرمنابعی پایدار، پایان‌ناپذیر و بدون آلودگی هستند. سیستم‌های فتوولتاییک (PV)[۱] گسترش جهانی یافته‌اند و در مصارف مختلف اعم از نیروگاه‌های کم‌مصرف تا نیروگاه‌های مقیاس‌بزرگ، کاربرد دارند[۱]. توسعه منابع جدید انرژی مانند باد، آب، انرژی زمین گرمایی و خورشیدی در سراسر جهان به‌طور مداوم افزایش یافته است و بدلیل وجود معضل بحران انرژی و افزایش جمعیت، به موضوع مهمی تبدیل شده است. منابع انرژی تجدیدپذیر سهم مهم‌تری در کل انرژی مصرف شده در جهان پیدا کرده‌اند. پیش‌بینی می‌شود به دلیل چند مزیتی بودن انرژی خورشیدی، به ویژه هزینه عملیاتی کم و سازگاری با محیط زیست، به منبع محبوب انرژی تجدیدپذیر جهان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

تبدیل گردد. منابع فتوولتاییک امروزه به‌طور گسترده کاربردهای بسیاری از جمله شارژ باتری، سیستم گرمایش آب، سیستم برق ماهواره‌ای و... دارند. به‌عبارت دیگر یکی از امیدوارکننده‌ترین جایگزین‌ها برای منابع انرژی متعارف و از جمله مهم‌ترین سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و پایدار هستند[۲]. اخیراً یکی از چالش‌های اصلی محققان دستیابی به حداکثر توان از طریق انرژی‌های پاک است. فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی در زمینه بهره‌مندی از سیستم‌های PV و تلاش برای بهبود هرچه بیشتر در خصوص هزینه، کارایی، قابلیت اطمینان و بهره‌برداری کاربردی از آن‌ها انجام شده است. اما بازده سلول‌های فتوولتاییک بسیار پایین است و علاوه بر آن خروجی آرایه فتوولتاییک نیز کاملاً به شرایط محیطی و عملیاتی بستگی دارد. در میان تمام عوامل موثر بر توان خروجی آرایه PV، دمای محیط، جنس عایق، آلودگی، سایه و شدت تابش را می‌توان به عنوان عوامل مهم‌تر برشمرد. کاهش شدت تابش خورشید به دلیل هوای ابری و افزایش دمای محیط نیز از عوامل رایج کاهش توان خروجی یک پنل PV است. ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT)[۲] به معنای استخراج حداکثر توان ممکن از آرایه PV است که به دلیل غیر خطی بودن، منحنی مشخصه PV با چالش‌های زیادی همراه است. با این حال، تحت شرایط متغیر، ردیابی MPP پیچیده‌تر می‌شود و علت آن است که در شرایط تابش متغیر، چندین پیک محلی در منحنی مشخصه توان-ولتاژ وجود دارد. در شرایط سایه منحنی مشخصه P-V شامل یک پیک سراسری و چندین پیک محلی است که به صورت غیرخطی با این شرایط تغییر می‌کند. بنابراین چالشی را برای الگوریتم ردیابی ایجاد می‌کند که در آن، تکنیک‌های مذکور از نظر پیچیدگی، دقت و سرعت متفاوت هستند. هر روش را می‌توان بر اساس نوع متغیر کنترلی مورد استفاده طبقه‌بندی کرد، که شامل متغیرهای ولتاژ، جریان و سیکل وظیفه است[۲]. با توجه به موارد ذکر شده، چالش بزرگ سیستم‌های فتوولتاییک، بازدهی پایین و وابستگی آن‌ها به شدت تابش و دمای محیط است[۳]. به بیان دیگر سیستم‌های PV به شدت تحت تاثیر تغییرات شرایط محیطی به‌ویژه شرایط سایه هستند، که به‌طرز چشمگیری منجر به کاهش توان خروجی می‌شود. علاوه بر این در شرایط سایه به دلیل عدم وجود جریان یکسان سلول‌های PV، چندین پیک در مشخصه توان-ولتاژ ایجاد می‌شود که در نهایت فقط بالاترین پیک به عنوان نقطه حداکثر توان سراسری در نظر گرفته می‌شود[۴]. بنابراین در شرایط سایه ردیابی پیک سراسری برای استخراج حداکثر توان و تضمین عملکرد بهینه پنل PV امری ضروری است.

روش‌های مرسوم MPPT شامل آشوب و مشاهده(P&O)[۳] [۵]، تپه نوردی(HC)[۴] [۶] و رسانایی افزایشی(INC)[۵] [۷] تحت شرایط محیطی یکنواخت کارآمد هستند. بنابراین بدلیل پیک‌های محلی توان که در شرایط سایه جزئی حاصل می‌شوند، الگوریتم‌های مرسوم MPPT در دستیابی به پیک سراسری ناموفق هستند[۸]. بنابراین روش‌های مرسوم MPPT گزینه مطلوبی برای مدیریت سیستم‌های PV در شرایط سایه نیستند. مطالعات مختلفی برای حل این مشکل با معرفی تکنیک‌های بهینه‌سازی هوش مصنوعی همچون کنترل‌کننده منطق فازی، کنترل‌کننده فازی نوع دو (T2 FLC)[۶] و شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شده است[۱۰-۸]. در میان همه الگوریتم‌های فراابتکاری، بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۷] (PSO) و نسخه‌های اصلاح‌شده آن به دلیل اجرای آسان، سادگی و بار محاسباتی کم، رایج‌ترین روش‌های بهینه‌سازی هستند. از سوی دیگر، اشکال الگوریتم استاندارد SPSO سرعت همگرایی کم و مشکل در تنظیم پارامترهای خودش است و ممکن است تحت تاثیر تغییرات سریع تابش خورشیدی در پیک‌های محلی گرفتار شود[۱۱]. تکنیک‌های MPPT الهام‌گرفته از طبیعت و الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر هوش جمعی از جمله الگوریتم جستجوی سنجاب (SSA)[۸] نیز با مدیریت فرآیند جستجو در خصوص نزدیک شدن به جواب بهینه در فضای جستجو نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این الگوریتم‌ها مخصوص حل یک مساله خاص نیستند و در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی به‌ویژه موضوع MPPT کاربرد دارند. لذا برای دستیابی به نقطه حداکثر توان در شرایط سایه جزئی، می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر هوش جمعی بهره برد. در [۱۲] یک روش کنترلی مبتنی بر الگوریتم جستجوی سنجاب پرنده با هدف MPPT در شرایط سایه به‌کار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که مزایای تکنیک مذکور شامل نوسان کم و افزایش سرعت ردیابی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری است. که بدلیل سرعت بالای الگوریتم جستجوی سنجاب نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری است ولی از جمله معایب این روش نیز کاهش بازده در شرایط مختلف تابش و سایه است. در [۱۳] یک روش ترکیبی متشکل از الگوریتم فراابتکاری و هوش مصنوعی بکار گرفته شده است. تکنیک MPPT با استفاده از کنترل‌کننده فازی پیاده‌سازی شده است و پس از آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری[۹](GWO) تنظیم ضرایب مقیاس کنترل‌کننده فازی انجام شده است. طبق نتایج، تنظیم ضرایب مقیاس کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری منجر به بهبود عملکرد کنترل‌کننده فازی شده است ولی در مقایسه با الگوریتم جستجوی سنجاب سرعت همگرایی کمتر است. در [۱۴] تکنیک MPPT با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در شرایط سایه معرفی شده است. برای تنظیم ولتاژ لینک DC خروجی حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری به کنترل‌کننده PI اعمال شده است و نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب کنترل‌کننده است. از جمله معایب این روش استفاده از کنترل‌کننده PI است که منجر به کاهش سرعت ردیابی شده است. در [۱۵] تکنیک MPPT مبتنی بر کنترل‌کننده فازی نوع دو است که موجب افزایش بازده PV در شرایط سایه شده است. عملکرد مطلوب کنترل‌کننده فازی نوع دو در شرایط عدم قطعیت از جمله شرایط سایه مورد توجه محققان قرار گرفته است. بنابراین ایده بهبود کنترل‌کننده فازی نوع دو با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به ذهن متبادر می‌گردد که با توجه به افزایش سرعت الگوریتم جستجوی سنجاب نسبت به سایر الگوریتم‌ها می‌توان از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

الگوریتم مذکور برای بهبود کنترل‌کننده فازی بهره برد. در این مقاله یک روش ترکیبی متشکل از کنترل‌کننده فازی نوع دو و الگوریتم جستجوی سنجاب برای ردیابی حداکثر توان یک سیستم فتوولتاییک مستقل از شبکه در شرایط سایه استفاده شده است. برای بررسی دقیق‌تر، در جدول (۱) مقایسه تکنیک‌های مختلف ردیابی حداکثر توان در تحقیقات اخیر نشان داده شده است. ارزیابی کارآیی رویکرد پیشنهادی، با استفاده از نرم افزار متلب و از طریق شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در چهار الگوی تابش مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری روش پیشنهادی استفاده از کنترل‌کننده فازی نوع دو بجای کنترل‌کننده فازی معمولی و استفاده از الگوریتم جستجوی سنجاب بجای الگوریتم گرگ خاکستری است. تمرکز اصلی این پژوهش، بهبود ردیابی حداکثر توان خورشیدی از طریق کاهش زمان نشست و افزایش سرعت ردیابی در شرایط سایه جزئی است. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در قسمت دوم بررسی اجمالی سیستم انجام شده است. در قسمت سوم ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی بطور مفصل ارائه شده است و در قسمت چهارم و پنجم نیز به ترتیب شبیه‌سازی کنترل‌کننده پیشنهادی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

جدول(۱): مقایسه تکنیک های ردیابی حداکثر توان در تحقیقات اخیر

شماره	مرجع	روش کنترلی	تکنیکMPPT	مزایا	معایب
۱	[۱۱]	الگوریتم فراابتکاری	الگوریتم بهینه‌سازی ذرات(PSO)	• اجرای آسان • سادگی • بار محاسباتی کم	• سرعت همگرایی کم • مشکل در تنظیم پارامترها
۲	[۱۲]	الگوریتم فراابتکاری	الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی سنجاب(SSA)	• نوسان کم • افزایش سرعت ردیابی نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری	• نوسانات زیاد • کاهش بازده در شرایط سایه
۳	[۱۳]	ترکیب الگوریتم فراابتکاری و هوش مصنوعی	ترکیب فازی والگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری(GWO)	• نوسان کم • افزایش سرعت ردیابی حداکثر توان نسبت به روش فازی	• نوسانات زیاد • کاهش بازده در شرایط سایه
۴	[۱۴]	الگوریتم فراابتکاری	الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری(GWO)	• نوسان کم • بهبود ردیابی	• گرفتار شدن در بهینه‌های محلی • کاهش سرعت ردیابی در شرایط سایه
۵	[۱۵]	هوش مصنوعی	فازی نوع دو	• کاهش نوسان حول محور MPP	• کاهش بازده در شرایط سایه

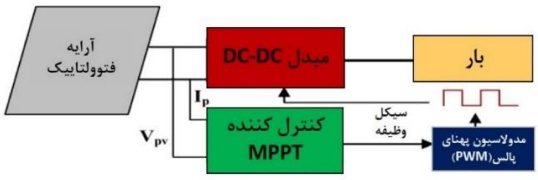
۲- سیستم خورشیدی مستقل از شبکه

یک سیستم خورشیدی مستقل از شبکه شامل آرایه‌های خورشیدی، مبدل DC-DC، بار و کنترل‌کننده MPPT است. برای درک بهتر این ساختار و نحوه ارتباط اجزای سیستم، بلوک‌دیاگرام سیستم خورشیدی مستقل از شبکه همراه با کنترل‌کننده MPPT در شکل (۱) نشان داده شده است.

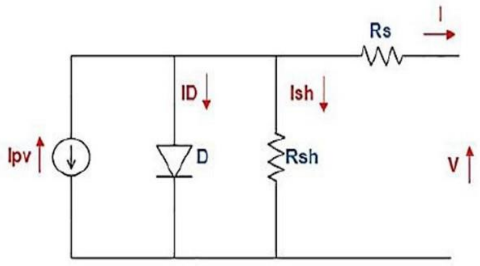
۲-۱-پنل فتوولتاییک

برای مطالعه رفتار سلول فتوولتاییک، می‌توان از طریق یک مدار الکتریکی آن را مدل‌سازی کرد که در شکل (۲) نشان داده شده است. سلول PV معمولا شامل یک منبع جریان (I_{ph}) است که از تبدیل تابش نور به الکتریسیته مدل‌سازی شده است. یک دیود که نشان‌دهنده پیوند PN است. مقاومت موازی R_{sh} و یک مقاومت سری به نام R_s است[۱۶]. جریان تولید شده توسط سلول فتوولتاییک از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد[۱۷]:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (۱)$$



شکل (۱): بلوک‌دیاگرام سیستم فتوولتاییک مستقل از شبکه همراه با کنترل‌کننده MPPT[۲]

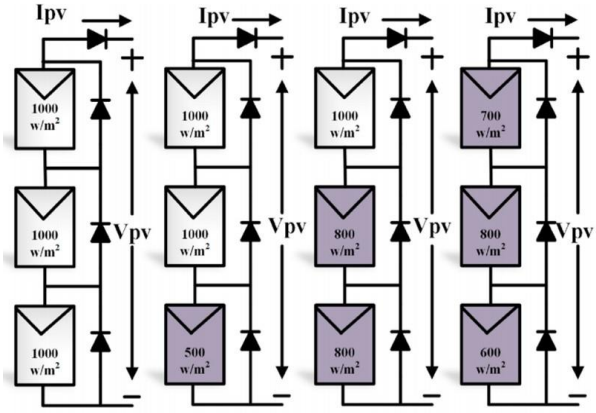


شکل (۲): مدار معادل سلول خورشیدی[۱۸]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

۲-۲-آرایه خورشیدی تحت شرایط سایه

جریان خروجی پنل خورشیدی به طور کامل وابسته به مقدار نور خورشید است و با شرایط موجود در تابش نور خورشید به صورت خطی تغییر می‌کند، بنابراین ملاحظات سایه هنگام طراحی و محل قرارگیری و نصب آرایه حائز اهمیت است. سیستم فتولتاییک پیشنهادی شامل سه آرایه خورشیدی بصورت سری با هم است، که بصورت اختصاری با نماد 3S نشان داده شده است. چهار الگوی تابش نیز برای بررسی صحت عملکرد کنترل‌کننده به‌کار گرفته شده است. در شکل (۳) شدت تابش و نحوه آرایش آرایه‌های خورشیدی همراه با دیودهای کنارگذر و مسدودکننده نشان داده شده است. دیودهای کنارگذر و مسدودکننده به منظور حفاظت از پنل‌ها و جلوگیری از ایجاد جریان برگشتی و تشکیل نقطه داغ، استفاده شده‌اند. آرایه‌های خورشیدی استفاده شده در این مقاله، از نوع Tata Power Solar Systems TP250MBZ با بیشینه توان ۲۴۹ وات است.



شکل (۳): پیکربندی 3s آرایه‌های خورشیدی تحت الگوهای مختلف تابش[۱۳]

۳-تکنیک MPPT پیشنهادی مبتنی بر کنترل‌کننده فازی نوع دو با الگوریتم جستجوی سنجاب

ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی یک تکنیک ترکیبی متشکل از کنترل‌کننده فازی نوع دو (T-2 FLC) و الگوریتم جستجوی سنجاب (SSA) است، به‌نحوی که ابتدا از جریان و ولتاژ آرایه PV نمونه برداری خواهد شد و با ضرب دو پارامتر نمونه‌گیری شده، توان PV محاسبه می‌گردد. پس از آن با استفاده از بلوک حافظه، توان لحظه قبل نیز تولید خواهد شد و در نهایت طبق روابط (۲) و (۳) از مرجع [۱۲]، به ترتیب تغییرات توان (ΔP) و تغییرات جریان (ΔI) محاسبه می‌گردد، سپس طبق مرجع [۱۵] با استفاده از رابطه (۴) مقدار خطا بدست می‌آید که یکی از ورودی‌های کنترل‌کننده فازی نوع دو است. ورودی دوم نیز تغییرات خطا است که طبق رابطه (۵) از مرجع [۱۵] بدست خواهد آمد. با استفاده از الگوریتم جستجوی سنجاب ضرایب K_u برای تنظیم ورودی‌ها و خروجی کنترل‌کننده فازی نوع دو تولید می‌گردد که تابع هدف آن کاهش خطا است. در نهایت سیکل وظیفه توسط کنترل‌کننده فازی نوع دو تولید خواهد شد و تغییرات سیکل وظیفه طبق رابطه (۶) از مرجع [۱۲] محاسبه می‌گردد و به گیت مبدل DC-DC اعمال می‌شود.

۳-۱- کنترل‌کننده فازی نوع دو

پروفسور لطفی‌زاده [۱۹] در سال ۱۹۷۵مفهوم GT2 FS را بر اساس نمایش ترکیبی از برش های عمودی سیستم فازی نوع دو بیان کرد. پس از آن در [۲۰] ماهیت مقادیر توابع عضویت و همچنین عملیات جبری در نظریه سیستم فازی نوع دو بررسی شد. یک سیستم فازی نوع دو دارای تعاریف و اصطلاحات جدیدی است برای تمایز، بین سیستم فازی نوع دو و نوع یک با یک علامت U بالای نام آن مجموعه مشخص می‌شود. مجموعه فازی نوع دو بصورت رابطه (۷) یا (۸) نمایش داده شود. در این روابط X مجموعه مرجع، x متغیر اولیه یا متغیر اصلی است. $\mu_\lambda(x)$ تابع عضویت ثانویه است.$J_x \subseteq [0,1]$ مجموعه‌ای از درجات عضویت اولیه است. u متغیر ثانویه و $f_x(u) \subseteq [0,1]$ درجه عضویت ثانویه است. پروفسور لطفی‌زاده در ابتدا سیستم فازی نوع دو را به صورت رابطه (۹) بیان کرد.

$$\Delta P = P(K) - P(K-1) \quad (۲)$$

$$\Delta I = I(K) - I(K-1) \quad (۳)$$

$$\mathrm{E} = \frac{\Delta P}{\Delta \mathrm{I}} \quad (۴)$$

$$\Delta E = E(K) - E(K-1) \quad (۵)$$

$$\Delta D = D(K) - D(K-1) \quad (۶)$$

$$A = \int_{x\epsilon X} \frac{\mu_\lambda(x)}{x} = \int_{x\epsilon X} \left[\int_{u\epsilon \mathrm{J}x} \frac{f_x(u)}{(u)}\right]/x \quad (۷)$$

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | \forall x \in X\} \quad (۸)$$

$$A = U_{\forall x \epsilon x} \mu_A(x) \quad (۹)$$

$$\mu_A(x) = \int_{\substack{u\in Jx \\ \mathrm{i}=1,2,\ldots \mathrm{N}}} \frac{\mu_A(x,u)}{(u)};\ \mu_A(x,u_i) = W_{x_i},\ 0 \le W_{x_i} \le 1$$

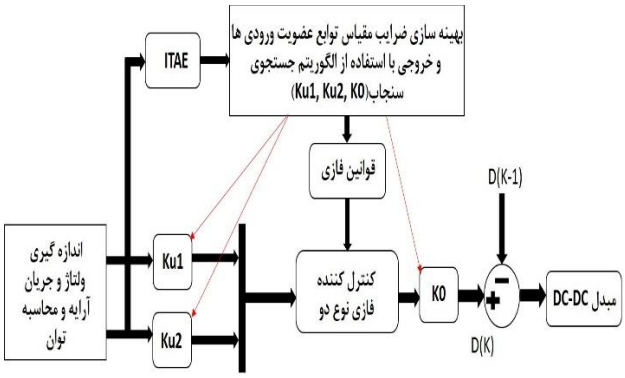
که در آن $\mu_A(x)$ تابع عضویت ثانویه یا برش عمودی است. W_{x_i} وزن‌های مربوط به متغیر ثانویه است. هرگاه همه درجات عضویت ثانویه در یک سیستم فازی نوع دو برابر یک باشد به آن مجموعه، سیستم فازی نوع دو فاصله‌ای گفته می‌شود. در غیر اینصورت به آن مجموعه فازی، GT2 FS گفته می‌شود. تابع عضویت یک مجموعه فازی نوع دو، سه بعدی است. رسم شکل سه بعدی تابع عضویت فازی نوع دو ساده نیست، اما برای داشتن تجسمی سه بعدی از آن، کشیدن دامنه دو بعدی که به آن اثر عدم قطعیت (FOU) تابع عضویت فازی نوع دو گفته می‌شود، می‌تواند مفید واقع شود. اثر عدم قطعیت به وسیله یک تابع عضویت بالایی (UMF) و یک تابع عضویت پایینی (LMF) محدود شده است. یکی از مزایای کنترل کننده فازی نوع دو، قابلیت انعطاف‌پذیری آن است. به دلیل اینکه این روش کنترلی بر پایه منطق فازی است، می‌تواند با

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

توجه به ورودی‌ها، خروجی‌های مختلفی تولید کند. کنترل‌کننده فازی نوع دو دارای دقت بالایی در کنترل است. این روش کنترلی با توجه به ورودی‌ها و شرایط مختلف، به دستیابی به یک خروجی دقیق و مطلوب کمک می‌کند. همچنین کنترل‌کننده فازی نوع دو قابلیت کنترل سیستم‌های پیچیده را دارد. با توجه به اینکه مسائل ردیابی حداکثر توان خورشیدی به دلیل پیچیدگی و تعداد زیاد متغیرها، سیستم‌هایی پیچیده هستند، کنترل‌کننده فازی نوع دو برای ردیابی حداکثر توان خورشیدی مناسب است[۲۱].

۳-۱-۱- کنترل‌کننده فازی نوع دو پیشنهادی

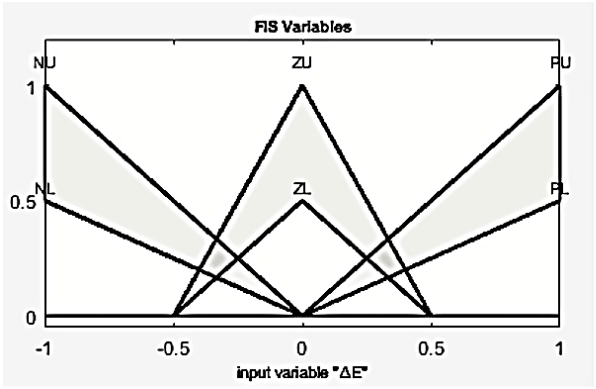
مرکز تصمیم‌گیری در این سیستم کنترلی مبتنی بر منطق فازی نوع دو فاصله‌ای است که مطابق با شکل (۴) شامل دو ورودی و یک خروجی است. ورودی های آن میزان خطا (E) و تغییرات خطا (ΔE) است، که در روابط (۴) و (۵) نشان داده شد. توابع عضویت انتخاب شده برای ورودی این کنترل‌کننده مطابق با شکل (۵) است و بطور کلی دارای سه برچسب N، Z و P است که به ترتیب معرف مقادیر منفی، صفر و مثبت هستند و هر تابع نیز دارای دو کران پایین و بالا است. خروجی نیز دارای یک تابع عضویت است که بیانگر سیکل وظیفه است و دارای پنج عبارت زبانی شامل بسیار منفی (NB)، کمی منفی (NS)، منفی (N)، صفر (Z)، کمی مثبت (PS)، بسیار مثبت (PB) و مثبت (P) است. هدف سیستم فازی ردیابی حداکثر توان است به نحوی که بتواند در شرایط سایه، GMPP را ردیابی کند. ردیابی پیک سراسری با استفاده از سیکل وظیفه شروع می‌گردد. ابتدا جریان و ولتاژ ورودی مبدل افزاینده DC-DC یعنی I_{PV} و V_{PV}، اندازه‌گیری می‌شوند تا بتوان، توان سیستم PV خورشیدی یعنی P(k) را محاسبه کرد و کنترل‌کننده بر اساس تغییرات توان، سیکل وظیفه را افزایش می‌دهد. سپس بر اساس اطلاعات توان فعلی و توان قبلی سیستم، و محاسبه میزان خطا و تغییرات خطا، کنترل‌کننده تصمیم می‌گیرد که سیکل وظیفه را افزایش یا کاهش دهد و این فرآیند تا زمان دستیابی به پیک سراسری ادامه خواهد یافت. قوانین پیشنهادی کنترل‌کننده فازی نوع دو در جدول (۲) آمده است. با توجه به اینکه کنترل‌کننده فازی دارای دو ورودی است و هر ورودی دارای سه برچسب، بنابراین تعداد ۹ قانون برای این کنترل‌کننده فازی می‌توان متصور شد. هریک از دارایه‌های جدول ذیل یک قاعده را تعریف می‌کند، تک تک این قوانین براساس هدف ردیابی حداکثر توان طراحی شده‌اند. به عنوان مثال قاعده ردیف یک شرایطی را بیان می‌کند که اگر خطا منفی و تغییرات خطا نیز منفی باشد، آنگاه سیکل وظیفه بسیار منفی است.



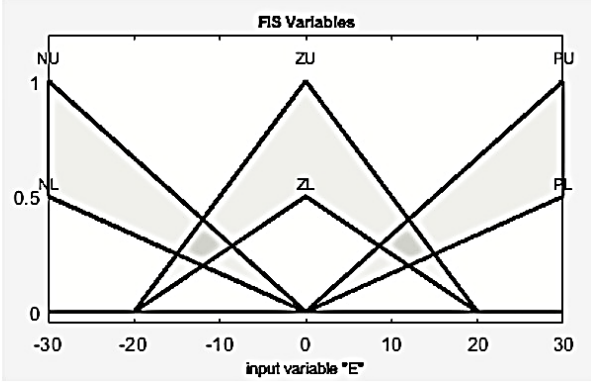
شکل (۴): بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی

جدول (۲): قوانین کنترل‌کننده فازی پیشنهادی

Rule	E	ΔE	D
1	N	N	NB
2	N	Z	NS
3	N	P	Z
4	Z	N	NS
5	Z	Z	Z
6	Z	P	NS
7	P	N	Z
8	P	Z	PS
9	P	P	PB



ب



الف

شکل (۵): توابع عضویت فازی نوع دو پیشنهادی، (الف)ورودی E، (ب) ورودی ΔE

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

۳-۲- الگوریتم جستجوی سنجاب

در سال ۲۰۱۹ طبق مرجع [۲۲] برای اولین بار الگوریتم فراابتکاری جستجوی سنجاب پرنده پیشنهاد شد که یکی از جدیدترین الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت و از دسته‌ی الگوریتم‌های هوش جمعی است. این الگوریتم از رفتار هوشمندانه سنجاب‌های پرنده جنوبی الهام‌گرفته است و روش حرکتی کارآمد آنها یعنی سر خوردن از یک موقعیت به موقعیت دیگر را تقلید می‌کند. سر خوردن یک مکانیسم موثر است که سنجاب‌ها از آن برای یافتن غذا و تعامل با یکدیگر استفاده می‌کنند. این رفتار شامل پریدن از شاخه‌ای به شاخه دیگر برای نزدیک شدن به موقعیت غذا و سپس قدم زدن تصادفی برای دستیابی به موقعیت دقیق غذا است. همچنین سنجاب‌های پرنده توسط ایجاد صداهای کم با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و از محیط تقریبی غذاهایی همچون بلوط و...، یکدیگر را آگاه می‌سازند. برای شبیه‌سازی دو رفتار مذکور نیز، به ترتیب از دو تئوری اساسی در حرکت ذرات، شامل پرواز لوی و قدم زدن تصادفی استفاده شده است. روندنمای جستجوی سنجاب در شکل (۶) نشان داده شده است.

۳-۲-۱- مقداردهی اولیه

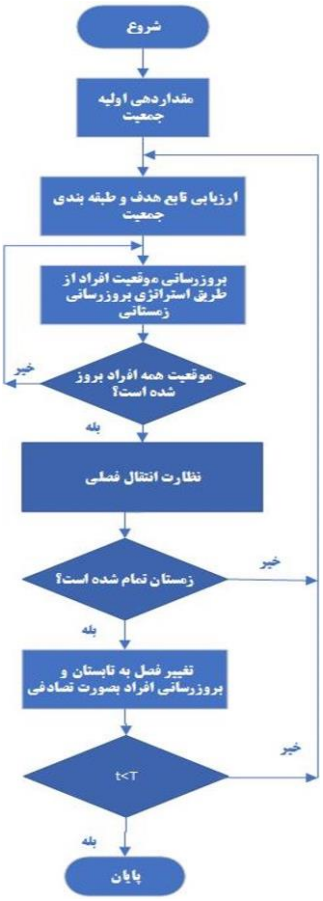
راه‌حل‌های اولیه در الگوریتم جستجوی سنجاب به طور تصادفی انتخاب می‌شوند به‌طوریکه N تعداد سنجاب‌ها در جنگل را نشان می‌دهد. موقعیت سنجاب پرنده i ام، را می‌توان بصورت یک بردار D بعدی بیان کرد، که در رابطه (۱۰) نشان داده شده است. که در آن i=1, 2,...N و D بعد فضای جستجو است. سنجاب می‌تواند در ابعاد یک، دو یا بالاتر سر بخورد. موقعیت اولیه به طور تصادفی با استفاده از معادله (۱۱) انتخاب می‌شود. که در آن j=1, 2,...D و S_{min} و S_{max} ابعاد حداقل و حداکثر موقعیت سنجاب در بعد j ام هستند. Rand نیز یک عدد توزیع شده یکنواخت در بازه [0,1] است[۱۲].

$$S_i = [s_{i1}, s_{i2}, s_{i3} \cdots S_{iD}] \qquad (۱۰)$$

$$s_{ij} = S_{min} + rand \times (S_{max} - S_{min}) \qquad (۱۱)$$

۳-۲-۲- طبقه‌بندی جمعیت

با در نظر گرفتن مسئله کمینه‌سازی الگوریتم فرض بر آن است که در هر درخت فقط یک سنجاب وجود داشته باشد، با فرض اینکه تعداد کل سنجاب‌ها N باشد، بنابراین N درخت در جنگل وجود دارد. N درخت شامل یک درخت هیکوری و N_{fs} تعداد درختان بلوط است به‌نحوی که N_{fs} بین ۱ تا N است. ($1<N_{fs}<N$) بقیه درختان معمولی هستند که بدون دانه های مغذی می‌باشند. درخت هیکوری بهترین منبع غذایی برای سنجاب‌ها است و درخت بلوط در جایگاه دوم قرار می‌گیرد.



شکل (۶): روندنمای جستجوی سنجاب[۱۲]

۳-۲-۳- بروزرسانی موقعیت‌ها

بر اساس رتبه‌بندی ارزش تابع هدف از جمعیت سنجاب‌ها به ترتیب صعودی، سه موقعیت ممکن است پیش بیاید. در هر موقعیت، اگر شکارچی غایب باشد، فرض می‌شود که سنجاب‌ها برای جستجوی غذای مطلوب خود به روش عادی سر می‌خورند. در غیر اینصورت، گام‌های کوچک به طور تصادفی انتخاب می‌شوند و به دنبال مکان‌هایی برای پنهان کردن می‌گردند. موقعیت جدید را می‌توان به شرح زیر بدست آورد:[۱۲]

موقعیت ۱: سنجاب پرنده روی درخت بلوط ممکن است به سمت درخت هیکوری سر بخورد. موقعیت را می‌توان مانند رابطه (۱۲) که در ذیل آمده است، بروزرسانی کرد: [۱۲]

$$S_a^{k+1} = \begin{cases} S_{at}^k + d_g.G.(S_{ht}^k - S_{at}^k) & ,R \geq P_r \\ random\ location & ,Otherwise \end{cases} \qquad (۱۲)$$

در این رابطه S^k_{at} و $S_{ht}{}^k$ موقعیت سنجاب‌هایی است که به ترتیب روی درخت بلوط و در یک گروه قرار دارند. K عدد تکرار فعلی است و مقدار D_g مسافت است که به طور تصادفی و از محدوده [۱/۱-۰/۵] انتخاب شده است. P_r احتمال حضور شکارچی است و Rیک عدد به طور تصادفی انتخاب شده از محدوده [۱-۰] است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

G نیز ثابت لغزشی است که به منظور توازن بین اکتشاف و بهره‌برداری در نظر گرفته شده است.

موقعیت ۲: سنجاب پرنده که در حال حاضر روی درخت معمولی قرار می‌گیرد ممکن است به سمت درخت بلوط سر بخورد، موقعیت جدید به صورت زیر طبق رابطه (۱۳) بدست می‌آید[۱۲].

$$S_{nt}^{k+1} = \begin{cases} S_{nt}^{k} + d_g.G.(S_{at}^{k} - S_{nt}^{k}) & ,R \geq P_r \\ random\ location & ,Otherwise \end{cases} \quad (۱۳)$$

موقعیت ۳: یک سنجاب پرنده تصادفی، که روی درخت معمولی قرار می‌گیرد مستقیما به داخل درخت هیکوری می‌لغزد موقعیت جدید به شرح زیر طبق رابطه (۱۴) بدست می‌آید[۱۲].

$$S_{nt}^{k+1} = \begin{cases} S_{nt}^{k} + d_g.G.(S_{ht}^{k} - S_{nt}^{k}) & ,R \geq P_r \\ random\ location & ,Otherwise \end{cases} \quad (۱۴)$$

۳-۲-۴- نظارت انتقال فصلی و بروزرسانی تصادفی

تغییرات آب و هوا و تغییرات فصل تاثیر زیادی بر رفتار جستجوی غذای سنجاب پرنده دارد آن‌ها در فصول سرد نسبت به فصول گرم فعالیت کمتری دارند. این پدیده در الگوریتم جستجوی سنجاب از طریق کنترل فصلی مدل‌سازی می‌شود. در صورت برآورده شدن شرایط پایش فصلی، $S_{cte}^{k} < S_{min}^{k}$ سنجاب‌هایی که نتوانسته‌اند به غذای مطلوب خود برسند و آن‌هایی که روی درختان معمولی هستند، به طور تصادفی جابه‌جا می‌شوند. S_{cte} نشان‌دهنده ثابت فصلی است. S_{min}^{k} حداقل مقدار ثابت فصلی است. مقادیر آن‌ها را می‌توان از طریق رابطه (۱۵) محاسبه کرد[۱۲].

$$s_{cte}^{k} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_a} \left(S_{at,i}^{k} - S_{ht}^{k}\right)^2} \quad (۱۵)$$

در این رابطه $S_{at,i}^{k}$ همان موقعیت i ام سنجاب است که به درخت بلوط رسیده است و در معادله (۱۲) تعریف شده است. N_a تعداد سنجاب‌های درختان بلوط است. K_m حداکثر تعداد کاراکتر است. مقدار S_{min}^{k} در معادله (۱۶) تاثیر مهمی در فرآیند اکتشاف و بهره‌برداری از الگوریتم دارد. مقادیر زیاد این پارامتر توانایی بالایی را برای اکتشاف فراهم می‌کند و مقادیر کم آن‌ها بهره‌برداری را بهبود می‌بخشد. وقتی شرایط پایش فصلی برآورده شود این پایان زمستان را تایید می‌کند. سنجاب‌های پرنده روی درختان بلوط برای جستجوی غذا فعال می‌شوند. آنها شروع به جستجوی مکان‌های جدید برای کاوش و جستجوی منابع غذایی دیگر می‌کنند و از این رو جابجایی تصادفی برای سنجاب‌ها باید بر اساس پروازهای لوی و قدم زدن تصادفی با استفاده از معادله (۱۷) اعمال شود. پرواز لوی نیز در معادله (۱۸) تعریف شده است[۱۲].

$$S_{m_{in}}^{k} = \frac{10E-6}{(365)^{k/(k_m/2.5)}} \quad (۱۶)$$

$$S_{nt}^{Neω} = S_{min} + Levy(x) \times (S_{max} - S_{min}) \quad (۱۷)$$

$$Levy(x) = 0.01 \times \frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (۱۸)$$

که در آن β یک ثابت است که ۱/۵ در نظر گرفته شده است. مقادیر u و v اعداد تصادفی از یک توزیع نرمال هستند با استفاده از توزیع نرمال: $u=N(0,\sigma^2_u)$, $v= N(0,\sigma^2_v)$ ، که $\sigma_v=1$ و σ_u با استفاده از تابع گامای انتگرال Γ مانند معادله (۱۹) محاسبه می‌شود[۱۲].

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin\left(\frac{\Pi\ \beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{1/\beta} \quad (۱۹)$$

۳-۳- تنظیم ضرایب مقیاس کنترل‌کننده فازی نوع دو با استفاده از الگوریتم جستجوی سنجاب

هدف از بهینه‌سازی ضرایب مقیاس کنترل کننده فازی نوع دو، دستیابی به پاسخ سریع و کاهش خطای حالت ماندگار است. مطابق رابطه (۲۰) انتگرال حاصل‌ضرب زمان در قدرمطلق خطا بیانگر شاخص ITAE از مرجع [۱۲] است و به عنوان تابع هدف الگوریتم جستجوی سنجاب در نظر گرفته شده است.

$$ITAE = \int_{0}^{\infty} t * |e(t)| dt \quad (۲۰)$$

۴- شبیه‌سازی

سیستم فتوولتاییک پیشنهادی در نرم افزار متلب مدل‌سازی شده است. آرایه‌های خورشیدی استفاده شده در این تحقیق از نوع Tata Power Solar Systems TP250MBZ با بیشینه توان ۲۴۹ وات است. عملکرد سیستم پیشنهادی شامل تحلیل توان PV تحت شرایط سایه مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده[۱۸]

پارامتر	مقدار	واحد
I_{sc}	۸/۸۳	آمپر
I_{mp}	۸/۳	آمپر
V_{oc}	۳۶/۸	ولت
V_{mp}	۳۰	ولت
P_m	۲۴۹	وات
C_1= C_2	۴۰۰	میکرو فاراد
L	۱/۱	میلی هانری
R	۵۳	اهم

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی

مطابق با شکل (۷) برای چهار الگوی تابش، نمودار جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ شامل یک پیک سراسری و تعدادی پیک محلی است و برای بررسی دقیق‌تر، در ادامه نمودارهای توان-ولتاژ آرایه PV به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

تفکیک هر الگوی تابش نمایش داده شده است.

۴-۱-۱- نتایج شبیه‌سازی طبق الگوی تابش شماره ۱

برای الگوی تابش شماره ۱ یعنی شدت تابش ۱۰۰۰-۱۰۰۰-۱۰۰۰-۱۰۰۰ نمودار توان-ولتاژ آرایه PV طبق شبیه‌سازی انجام شده در نرم افزار متلب، مطابق با شکل (۸) است و پیک سراسری توان برابر با ۷۴۷ وات شده است. لذا با توجه به معین شدن مقدار پیک سراسری، می‌توان عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را مورد ارزیابی قرار داد. به منظور مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، توان خروجی آرایه PV در مدل پیشنهادی با توان خروجی آرایه PV طبق دو روش دیگر شامل کنترل‌کننده فازی و کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری مقایسه شده است. مطابق با نتایج شبیه‌سازی در شکل (۹) تکنیک مبتنی بر کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری که با رنگ آبی نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۱ ثانیه به مقدار ماندگار رسیده است. ولی تکنیک پیشنهادی در این تحقیق که با رنگ قرمز نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۰۳ ثانیه، MPP را ردیابی کرده و با مقدار بازده ۹۹٪ به مقدار ماندگار ۷۴۰ وات رسیده است. بنابراین، تکنیک پیشنهادی در این تحقیق، با زمان نشست کمتر و با سرعت بیشتری به مقدار ماندگار خود رسیده است. همچنین نوسان توان حول محور MPP کاهش یافته است.

۴-۱-۲- نتایج شبیه‌سازی طبق الگوی تابش شماره ۲

در این سناریو برای الگوی تابش شماره ۲ یعنی شدت تابش ۵۰۰-۱۰۰۰-۱۰۰۰-۱۰۰۰ نمودار توان-ولتاژ آرایه PV بر اساس شبیه‌سازی انجام شده در نرم افزار متلب، مطابق با شکل (۱۰) است. در این الگو دو پیک شامل یک پیک محلی و یک پیک سراسری وجود دارد و پیک سراسری توان PV برابر با ۴۹۲ وات است. به منظور مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، توان خروجی آرایه PV در مدل پیشنهادی با توان خروجی آرایه PV طبق دو روش دیگر شامل کنترل‌کننده فازی و کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری مقایسه شده است. مطابق با نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد که تکنیک ترکیبی MPPT مبتنی بر کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری که با رنگ آبی نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۰۶ ثانیه، به مقدار ماندگار رسیده است. ولی تکنیک پیشنهادی در این تحقیق که با رنگ قرمز نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۰۲ ثانیه، MPP را ردیابی کرده و با مقدار بازده ۹۸٪ به مقدار ماندگار ۴۸۵ وات رسیده است. بنابراین بر اساس نتایج شبیه‌سازی، تکنیک پیشنهادی در این تحقیق، با زمان نشست کمتر و سرعت بیشتری به مقدار ماندگار رسیده است و این نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر روش پیشنهادی است. همچنین نوسان توان حول محور MPP کاهش چشمگیری داشته است.

۴-۱-۳- نتایج شبیه‌سازی طبق الگوی تابش شماره ۳

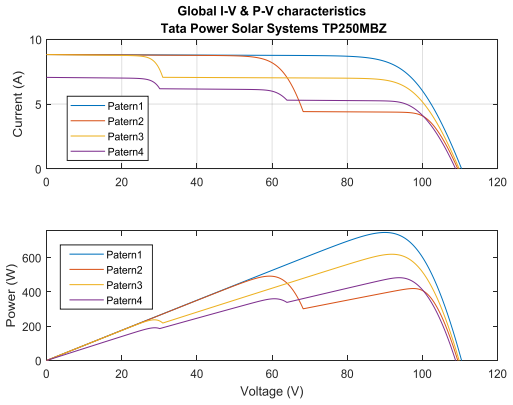
در این سناریو برای الگوی تابش شماره ۳ یعنی شدت تابش ۵۰۰-۸۰۰-۱۰۰۰ نمودار توان-ولتاژ آرایه PV طبق شبیه‌سازی انجام شده مطابق با شکل (۱۲) است. همانطوری که مشاهده می‌گردد، در این الگو دو پیک شامل یک پیک محلی و یک پیک سراسری وجود دارد. در این الگو، پیک سراسری توان PV برابر با ۶۱۹ وات است. به منظور مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، توان خروجی آرایه PV در مدل پیشنهادی با توان خروجی آرایه PV طبق دو روش دیگر شامل کنترل‌کننده فازی و کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری مقایسه شده است. مطابق با نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد که تکنیک ترکیبی MPPT مبتنی بر کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری که با رنگ آبی نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۱ ثانیه به مقدار ماندگار رسیده است. ولی تکنیک پیشنهادی در این تحقیق که با رنگ قرمز نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۰۳ ثانیه، MPP را ردیابی کرده است و با مقدار بازده۹۹٪ به مقدار ماندگار ۶۱۴ وات رسیده است. بنابراین بر اساس نتایج شبیه‌سازی، تکنیک پیشنهادی با زمان نشست به مراتب کمتر و سرعت بیشتر به مقدار ماندگار رسیده است. همچنین نوسان توان حول محور MPP کاهش یافته است.

۴-۱-۴- نتایج شبیه‌سازی طبق الگوی تابش شماره ۴

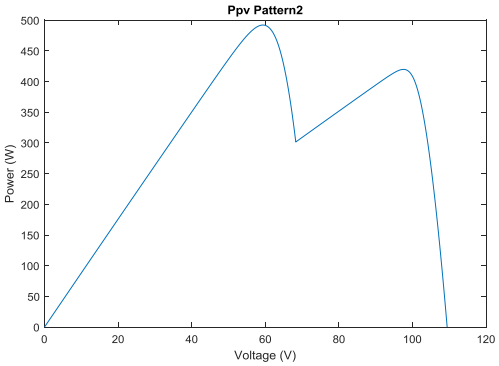
در این سناریو برای الگوی تابش شماره ۴ یعنی شدت تابش ۶۰۰-۸۰۰-۷۰۰ نمودار توان-ولتاژ آرایه PV طبق شبیه‌سازی انجام شده مطابق شکل (۱۴) است. در این الگو، سه پیک شامل دو پیک محلی و یک پیک سراسری وجود دارد و پیک سراسری توان برابر با ۴۸۳ وات است. به منظور مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، توان خروجی آرایه PV در مدل پیشنهادی با توان خروجی آرایه PV طبق دو روش دیگر شامل کنترل‌کننده فازی و کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری مقایسه شده است. مطابق با نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۱۵) مشاهده می‌گردد که تکنیک ترکیبی MPPT مبتنی بر کنترل‌کننده فازی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری که با رنگ آبی نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۱۳ ثانیه، به مقدار ماندگار رسیده است ولی طبق تکنیک پیشنهادی در این تحقیق که با رنگ قرمز نشان داده شده است، در مدت زمان ۰/۰۶ ثانیه، MPP ردیابی شده است و با مقدار بازده ۹۹٪ به مقدار ماندگار ۴۶۲ وات رسیده است. بنابراین بر اساس نتایج شبیه‌سازی، تکنیک پیشنهادی در این تحقیق با زمان نشست کمتر و سرعت بیشتر به مقدار ماندگار رسیده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

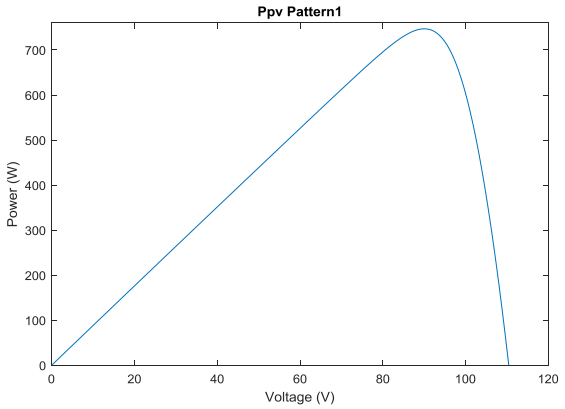
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023



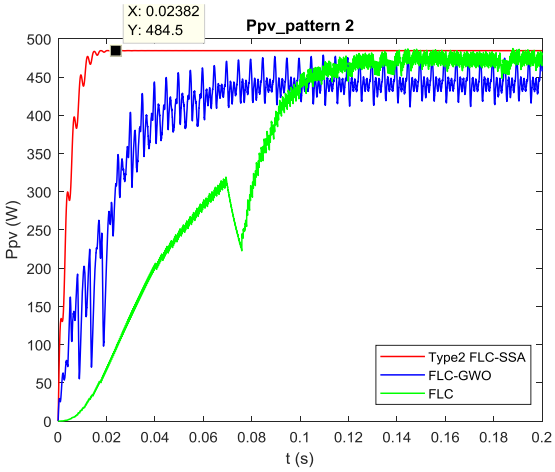
شکل (۷): نمودار جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ آرایه پیشنهادی برای ۴ الگوی تابش



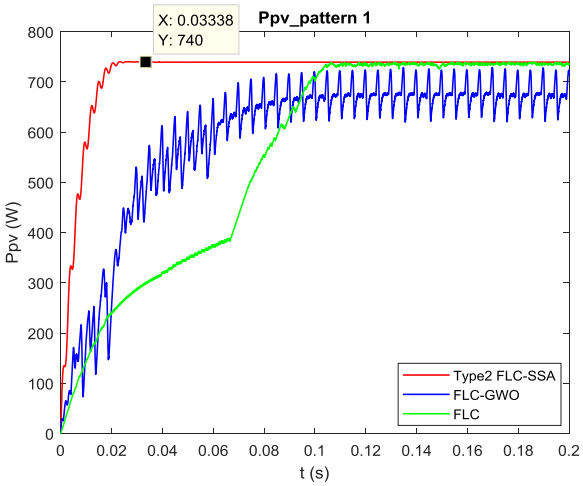
شکل (۱۰) : نمودار توان-ولتاژ آرایه PV طبق الگوی شماره ۲



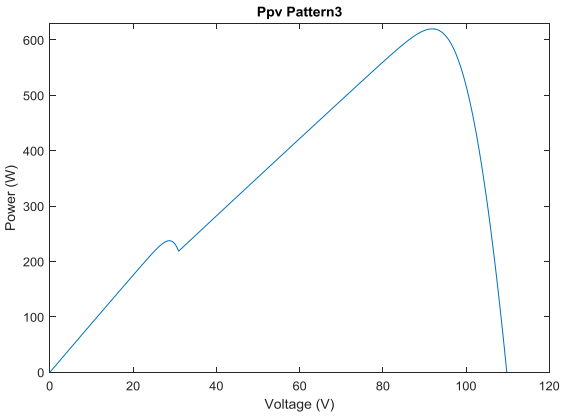
شکل (۸): نمودار توان-ولتاژ آرایه PV تحت الگوی شماره ۱



شکل (۱۱) : توان خروجی PV طبق روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر طبق الگوی شماره ۲

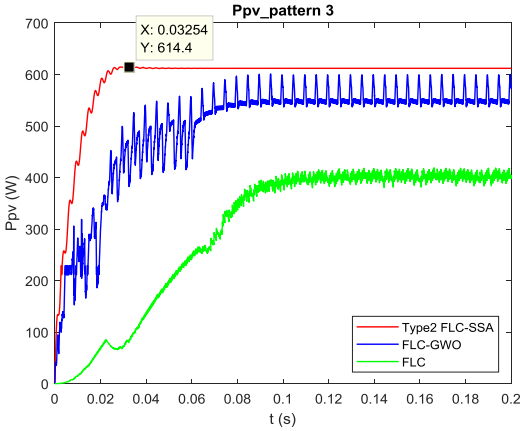


شکل (۹): توان خروجی PV طبق روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر طبق الگوی شماره۱

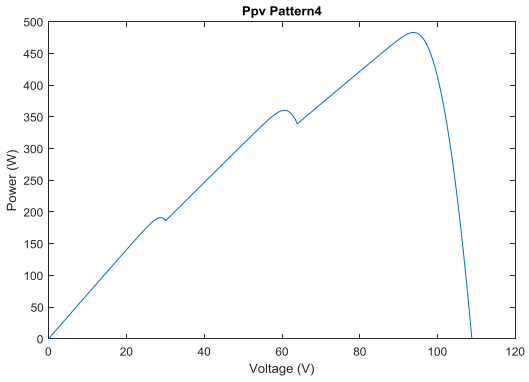


شکل (۱۲) نمودار توان-ولتاژ طبق الگوی شماره ۳

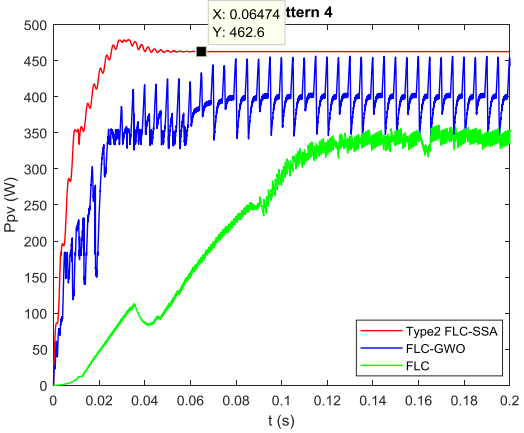
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]



شکل (۱۳) : توان خروجی PV روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر طبق الگوی شماره ۳



شکل (۱۴) : نمودار توان-ولتاژ طبق الگوی شماره ۴



شکل (۱۵) : توان خروجی PV روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر طبق الگوی شماره ۴

۴-۲- جدول مقایسه‌ای نتایج شبیه‌سازی

همانطوری که در بخش قبل نشان داده شد، توان خروجی تحت تاثیر چهار الگوی تابش مورد بررسی و تحلیل قرارگرفت و نشان داده شد که نتایج شبیه‌سازی طبق روش پیشنهادی به مراتب بهتر از روش‌های فازی و فازی-گرگ خاکستری است. به منظور بررسی دقیق‌تر، مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی در جدول (۴) نمایش داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

همانطوری که در بخش‌های قبل گفته شد، ردیابی حداکثر توان در شرایط سایه جزئی با موانعی مواجه است، که از جمله عدم قطعیت در پیش‌بینی شرایط آب و هوایی، تغییرات ناگهانی در شرایط سایه و عدم دقت در تخمین نقطه حداکثر توان را می‌توان اشاره کرد. برای حل این مشکلات، روش‌های ردیابی حداکثر توان پیشرفته‌ای به وجود آمده‌اند که با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و کنترل‌کننده‌های فازی، می‌توانند دقت ردیابی را بهبود بخشند. در این مقاله، خلاصه‌ای از روش‌های ردیابی حداکثر توان تحقیقات اخیر در شرایط سایه جزئی برای سیستم‌های فتوولتاییک ارائه شد همچنین در بخش شبیه‌سازی، یک بررسی مقایسه‌ای از روش‌های اخیر با روش پیشنهادی انجام شد تا بتوان دقت و کارایی هر یک از آن‌ها را با روش پیشنهادی مقایسه کرد. روش پیشنهادی در این پژوهش یک ساختار جدید مبتنی بر کنترل‌کننده فازی نوع دو و الگوریتم جستجوی سنجاب است. کنترل‌کننده فازی نوع دو بجای کنترل‌کننده فازی معمولی استفاده شد و از طریق الگوریتم فراابتکاری جستجوی سنجاب بهینه‌سازی و تنظیم گردید. دلیل استفاده از کنترل‌کننده فازی نوع دو بجای کنترل کننده فازی معمولی، مزیت کنترل‌کننده فازی نوع دو مبنی بر بهبود ردیابی و کاهش نوسانات است. الگوریتم جستجوی سنجاب نیز بجای الگوریتم گرگ خاکستری به‌کار گرفته شد و دلیل این انتخاب، مشکل الگوریتم گرگ خاکستری مبنی بر گرفتار شدن در پیک‌های محلی در شرایط سایه و افزایش سرعت الگوریتم جستجوی سنجاب در ردیابی است. نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار متلب نشان داد که بازده روش پیشنهادی برای چهار الگوی تابش بطور میانگین حدود ٪۹۹ است و موجب کاهش زمان نشست در حدود ٪۳۶، افزایش سرعت ردیابی حداکثر توان و کاهش نوسانات حول محور MPP گردید.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

جدول (۴) : مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی‌ها

الگوی تابش	روش کنترلی	زمان نشست(ثانیه)	نسبت زمان نشست روش پیشنهادی به روش-FLC GWO	توان خروجی طبق روش پیشنهادی PV(وات)	پیک سراسری(وات)	بازده
الگوی شماره ۱	FLC	۰/۱	۳۰٪	۷۴۰	۷۴۷	۹۹٪
	FLC-GWO	۰/۱				
	Type2 FLC-SSA	۰/۰۳				
الگوی شماره۲	FLC	۰/۱۲	۳۳٪	۴۸۵	۴۹۲	۹۸٪
	FLC-GWO	۰/۰۶				
	Type2 FLC-SSA	۰/۰۲				
الگوی شماره۳	FLC	۰/۱	۳۷٪	۶۱۴	۶۱۹	۹۹٪
	FLC-GWO	۰/۰۸				
	Type2 FLC-SSA	۰/۰۳				
الگوی شماره۴	FLC	۰/۱۳	۴۶٪	۴۶۲	۴۶۶	۹۹٪
	FLC-GWO	۰/۰۸				
	Type2 FLC-SSA	۰/۰۶				
میانگین بازده ۴ الگوی تابش			۹۹٪			

مراجع

[1] E. Rakhshani, K. Rouzbehi, A. J Sánchez, A. C. Tobar, and E. Pouresmaeil, "Integration of large scale PV-based generation into power systems: A survey," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1425, 2019.

[2] Y. Soufi, M. Bechouat, and S. Kahla, "Fuzzy-PSO controller design for maximum power point tracking in photovoltaic system," *International Journal of hydrogen energy*, vol. 42, no. 13, pp. 8680-8688, 2017.

[3] M. Seyedmahmoudian *et al.*, "State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems–A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 435-455, 2016.

[4] H. Labar and M. S. Kelaiaia, "Real time partial shading detection and global maximum power point tracking applied to outdoor PV panel boost converter," *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 1246-1254, 2018.

[5] G. Dileep and S. Singh, "Maximum power point tracking of solar photovoltaic system using modified perturbation and observation method," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 109-129, 2015.

[6] M. Lasheen and M. Abdel-Salam, "Maximum power point tracking using Hill Climbing and ANFIS techniques for PV applications: A review and a novel hybrid approach," *Energy conversion and management*, vol. 171 ,pp. 1002-1019, 2018.

[7] A. Safari and S. Mekhilef, "Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1154-1161, 2010.

[8] H. Rezk, A. Fathy, and A. Y. Abdelaziz, "A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 377-386, 2017.

[9] S. A. Rizzo and G. Scelba, "ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions," *Applied Energy*, vol. 145, pp. 124-132, 2015.

[10] S. Saravanan and N. R. Babu, "RBFN based MPPT algorithm for PV system with high step up converter ",*Energy conversion and Management*, vol. 122, pp. 239-251, 2016.

[11] A. Refaat, A.-E. Khalifa, M. M. Elsakka, Y. Elhenawy, A. Kalas, and M. H. Elfar, "A novel metaheuristic MPPT technique based on enhanced autonomous group Particle Swarm Optimization Algorithm to track the GMPP under partial shading conditions-Experimental validation," *Energy*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

Conversion and Management, vol. 287, p. 117124, 2023.
[12] D. Fares, M. Fathi, I. Shams, and S. Mekhilef, "A novel global MPPT technique based on squirrel search algorithm for PV module under partial shading conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 230, p. 113773, 2021.
[13] B. Laxman, A. Annamraju, and N. V. Srikanth, "A grey wolf optimized fuzzy logic based MPPT for shaded solar photovoltaic systems in microgrids," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 18, pp. 10653-10665, 2021.
[14] J. Jayaudhaya, D. Rajasekaran, J. Sumithra, J. Vinitha, and S. Karkuzhali, "Closed Loop Control of PV System Using Grey Wolf Optimization Algorithm under Partial Shading Condition," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 994, no. 1: IOP Publishing, p. 012011 .
[15] P. Verma, R. Garg, and P. Mahajan, "Asymmetrical interval type-2 fuzzy logic control based MPPT tuning for PV system under partial shading condition," *ISA transactions*, vol. 100, pp. 251-263, 2020.
[16] J. H. Agrawal and M. V. Aware, "Photovoltaic simulator developed in LabVIEW for evalution of MPPT techniques," in *2016 International conference on Electrical, Electronics, and optimization techniques (ICEEOT)*, 2016: IEEE, pp. 1142-1147 .
[17] I. V. Banu, M. Istrate, D. Machidon, and R. Pantelimon, "Study regarding modeling photovoltaic arrays using test data in matlab/simulink," *UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN SERIES C-ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE*, vol. 77, no. 2, pp. 227-234, 2015.
[18] A. Ibrahim, R. Aboelsaud, and S. Obukhov, "Improved particle swarm optimization for global maximum power point tracking of partially shaded PV array," *Electrical Engineering*, vol. 101, no. 2, pp. 443-455, 2019, doi: 10.1007/s00202-019-00794-w.
[19] L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I," *Information sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199-24 ,۹ .۱۹۷۵
[20] M. Mizumoto and K. Tanaka, "Some properties of fuzzy sets of type 2," *Information and control*, vol. 31, no. 4, pp. 312-340, 1976.
[21\] J. M. Mendel, "Type-2 fuzzy sets and systems: an overview," *IEEE computational intelligence magazine*, Vol. 2, No. 1, pp. 20-29, 2007.
[22] M. Jain, V. Singh, and A. Rani, "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm," *Swarm and evolutionary computation*, vol. 44, pp. 148-175, 2019.

رزومه



احسان زراسوندی حسینی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق -قدرت از دانشگاه آزاد واحد دزفول (۱۳۸۹) و کارشناسی ارشد مهندسی برق-سیستم‌های قدرت از دانشگاه آزاد واحد اهواز در سال ۱۴۰۱ سپری نموده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه محاسبات نرم، کنترل هوشمند، منطق فازی، سامانه‌های خورشیدی و میکروکنترل‌ها است.



ابراهیم آقاجری تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق-ابزاردقیق از دانشگاه پونا هند (۱۳۸۷) و دکتری مهندسی برق-الکترونیک از همان دانشگاه در سال ۱۳۹۴ سپری نموده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه محاسبات نرم، بینایی ماشین، کنترل هوشمند، سیستم‌های فازی، سامانه‌های خورشیدی، پردازش تصویر و خانه‌های هوشمند است و در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز است.



محمد صادق غیاثی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران(۱۳۸۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۹) و دکتری مهندسی برق با تمرکز بر حالت گذرا در سیستم‌های قدرت از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نموده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه حالت گذرا در سیستم‌های قدرت،کیفیت توان و سیستم‌های توزیع برق است. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

زیرنویس‌ها

[1] Photovoltaic
[2] Maximum Power Point Tracking
[3] Perturb and Observe
[4] Hill Climbing
[5] Incremental Conductance
[6] Type-2 Fuzzy Logic Controller
[7] Particle Swarm Optimization
[8] Squirrel Search Algorithm
[9] Grey Wolf Optimization

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023

Optimizing Tracking of Maximum Power in Solar Power Generation System Based on Type Two Fuzzy Controller in Partial Shading Condition Using Squirrel Search Algorithm

Ehsan Zarasvandi Hosseini[1], Ebrahim Aghajari[2*], Seyed Mohamad Sadegh Ghiasi[3]

1- Department of Electrical Engineering Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
*2- Department of Electrical Engineering Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
3- Department of Electrical Engineering Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract: Today, global attention has been drawn to energy production through renewable sources, especially solar energy. Partial shading conditions have created challenging issues for maximum power point tracking, including trapping at local maximum power points, slow tracking time, and fluctuations in power output during tracking time. Therefore, in order to overcome the problems related to shading conditions and deal with local peaks, researchers have presented various hybrid techniques based on fuzzy controllers and meta-heuristic algorithms. Among all meta-heuristic algorithms, particle swarm optimization and gray wolf algorithm are the most common optimization methods due to their easy implementation, simplicity and low computational load. But the drawbacks of these algorithms are the low convergence speed and the difficulty in adjusting their parameters, and they may be caught under the rapid changes of solar radiation and shading conditions in local peaks. To deal with these problems, a new hybrid structure based on type two fuzzy controller and squirrel search algorithm has been used in this research. The type two fuzzy controller is used instead of the normal fuzzy controller and it is optimized and adjusted by the squirrel search algorithm which is used instead of the gray wolf algorithm. In this structure, by applying four radiation patterns, the effectiveness of the proposed controller has been investigated. The simulation results in MATLAB software show that the efficiency of the proposed method is about 99% on average, And using the proposed method, compared to not using it, reduces the settling time by about 36%, increases the maximum power tracking speed, and reduction of power fluctuations is possible.

Keywords: Optimization, Photovoltaic Systems, Type Two Fuzzy Controller, Partial Shading Conditions, Solar Power, Maximum Power Tracking, Squirrel Search Algorithm

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.2.1.2]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 2- Summer 2023