ردیابی حداکثر توان خروجی در آرایههای خورشیدی تحت شرایط سایه جزیی با استفاده از الگوریتمهای تکاملی

اسماعيل بهمني'، محسن احمدنيا' و حسين شريفزاده"

^۱کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، esi64bahmani@gmail.com **^۲نویسنده مسئول**، استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ahmadniamohsen85@gmail.com ^۳استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار،



DOR: 20.1001.1.23223146.1401.9.2.5.3

نشربه سامانه مای غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۹ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۱

صفحات ۱۱۶ الی ۱۳۳

ISSN: 2322-3146 http://journals.sut.ac.ir/jnsee

چکیدہ

واژههای کلیدی

بهینهسازی گرگ خاکستری، ردیابی نقطه بیشینه توان، شرایط سایه جزیی، فتوولتاییک.

استخراج توان بیشینه بویژه با شرایط سایه جزیی یکی از مهمترین مسایل در استفاده از یک سیستم فتوولتاییک است. تحت شرایط سایه جزیی، مشخصه توان -ولتاژ آرایه های فتوولتاییک دارای چندین نقطه بیشینه محلی است. یک روش ردیابی بیشینه توان در سیستم های فتوولتاییک می بایست امکان ردیابی سریع و دقیق نقطه بیشینه سراسری در حین شرایط سایه جزیی را فراهم آورد تا تلفات توان و نوسانات حالت ماندگار را کمینه کند. در این پژوهش یک الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان برای یک سیستم فتوولتاییک تحت شرایط سایه جزیی با استفاده از تکنیک بهینه سازی گرگ خاکستری ارایه شده است. الگوریتم گرگ خاکستری یک روش بهینه سازی جدید است که محدودیت هایی از قبیل ردیابی ضعیف، نوسانات حالت دایمی و حالت گذرای نامطلوب در تکنیک های آشفتن و مشاهده و بهینه سازی از دحام ذرات را بر طرف می کند. الگوریتم پیشنهادی بر مبنای الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری روی یک سیستم فتوولتاییک در محیط نرمافزار متلب پیاده سازی شد تا کارایی آن نابات گردد. عملکرد طرح پیشنهادی با دو تکنیک ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای الگوریتم بهینه سازی روش فاخته و الگوریتم بهینه سازی از دحام ذرات را بر طرف می کند. الگوریتم بهینه سازی الگوریتم فاخته و الگوریتم بهینه سازی از دحام ذرات را بر طرف می کند. الگوریتم بینه یادی بر مبنای الگوریتم و دریابی نقطه بیشینه توان پیشنهادی بادو می دارت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که عملکرد تکنیک بر تری دارد بطوریکه مقادیر بیشینه فراحهش، زمان نشست و نوسانات ماند گار را به تر تیب تا ۱۵۹/۵۶، %66.67



DOR: 20.1001.1.23223146.1401.9.2.5.3

Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering Vol.9, No.2 Autumn and Winter 2022 ISSN: 2322 – 3146 http://journals.sut.ac.ir/jnsee

Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Arrays under Partial Shading Conditions Using Evolutionary Algorithms

Esmaeil Bahmani¹, Mohsen Ahmadnia² and Hossein Sharifzadeh³

¹MS, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, esi64bahmani@gmail.com.

²Corresponding Author, Assistant Prof., Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, ahmadniamohsen85@gmail.com.

³Assistant Prof., Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, sharifzadeh.hossein@gmail.com.

ABSTRACT

Keywords

grey wolf optimization GWO), maximum power Dint tracking (MPPT),

ছিrtial shading conditions [편SC), 관

photovoltaic (PV).

Extracting maximum power, especially with partial shading conditions, is one of the most critical issues in using a photovoltaic system. Under partial shading conditions, the power-voltage characteristic of photovoltaic arrays has several local maximum points. A maximum power point tracking method for photovoltaic systems should enable fast and accurate tracking of the global maximum during partial shading conditions to minimize power losses and steady-state fluctuations. This research presents an algorithm for tracking the maximum power point in a photovoltaic system under partial shading conditions using the gray wolf optimization technique. The gray wolf algorithm is a new optimization method that overcomes limitations such as poor tracking, steady-state fluctuations, and undesirable transients in perturb and observe and particle swarm optimization techniques. The proposed algorithm based on the gray wolf optimization algorithm is implemented on a photovoltaic system in MATLAB software to prove its efficiency. The performance of the proposed design is compared with two maximum power point tracking techniques based on cuckoo search and particle swarm optimization. The simulation results show that the performance of the proposed maximum power point tracking technique is superior to the compared designs in terms of speed and steady-state stability of the response, so that it reduces the values of maximum overshoot, settling time, and sustained fluctuations up to 40.91%, 66.67% and 59.1% respectively.

۱- مقدمه

رویکرد جهانی برای کاهش مصرف سوختهای فسیلی، صنایع را به حرکت به سمت استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر سوق میدهد. انرژی خورشیدی با توجه به عواملی از قبیل دسترسی فراگیر، تولید پاک و سهولت اجرا یکی از مهمترین منابع انرژی به شمار می آید. علاوه بر آن، سیستمهای فتوولتاییک دارای کمترین تاثیر روی محیطزیست از نظر تولید صدا و آلودگی است. موثرترین روش براي بهبود عملكرد سيستمهاي فتوولتاييك، اجراي الگوريتمهاي كنترلي است بطوريكه سيستم حتى تحت شرايط غيرخطي در نقطه کاری بهینه خود کار می کند. این تکنیک به کنترل ردیایی نقطه بیشینه توان شناخته می شود [1]. تکنیکهای ردیابی نقطه بیشینه توان به کمک مبدلهای DC-DC پیادهسازی می شوند تا نقطه کاری سیستم فتوولتاییک را در نقطه بیشینه توان سراسری قرار دهند. سلول فتوولتاييک در شرايط سايه جزيي همانند يک بار عمل مي کند و بنابراين توليد کانونهاي داغ محلي را بهمراه دارد. اين پديده مي تواند بازده ماژول را تا ۲۳ درصد كاهش دهد [۲]. براي اجتناب از توليد كانون داغ، مي توان از ديودهاي كنار گذر در جهت وارون و موازی با ماژول بهره گرفت. این آرایش در برخی مواقع به تغییر مشخصهی ماژول فتوولتاییک و ایجاد نقاط بیشینه چندگانه منجر میشود. در حین شرایط سایه جزیی، نقطه بیشینه توان سراسری به متغیرهایی از قبیل ولتاژ، دمای سلول و شدت تابش بستگی دارد و بنابراین می تواند در هر جایی روی مشخصه توان–ولتاژ قرار گیرد. به منظور بهبود کارایی الگوریتمهای ردیابی نقطه بیشینه توان در ساخت و طراحی مبدلها، مطالعات مختلفی روی کاهش تلفات توان خروجی و صدمه به سلولهای فتولتاییک ناشی از شرايط سايه جزيي و تغييرات سريع شدت تابش متمركز شدهاند [۵–۳]. از آنجاييكه سيستم فتوولتاييك در شرايط سايه جزيي داراي ديناميكهاي متغير با زمان است، طراحي الگوريتم رديابي نقطه بيشينه توان براي سيستمهاي فتوولتاييك بايستي با مشخصههايي از قبيل رديابي نقطه بيشينه توان سراسري در شرايط مختلف از قبيل وجود سايه، افت سلول فتوولتاييك، تطبيق پذيري با تغيير مشخصههاي توان–ولتاژ در آرایه فتوولتاییک و رفتار ردیابی هموار مجهز باشد.

تکنیکهای ردیابی نقطه بیشینه توان زیادی در ادبیات موضوع پیشنهاد شدهاند که از جنبههای متعددی از قبیل دقت، پیچیدگی، سرعت ردیابی، اقتصادی بودن و سازو کار عملکرد الگوریتم با یکدیگر تفاوت دارند. اکثر الگوریتمهای ردیابی نقطه بیشینه توان سازگار با شرایط سایه جزیی بر مبنای الگوریتمهای مرسوم از قبیل تپهنوردی^۱، آشفتن و مشاهده^۲، هدایت افزایشی^۲، الگوریتمهای ردیابی نقطه بیشینه توان مستقیم و الگوریتمهای بر مبنای محاسبات نرم قرار دارند که در آنها سازو کاری به منظور شناسایی وقوع سایه جزیی و ردیابی نقطه بیشینه توان سراسری به الگوریتم اصلی اضافه شده است. روش آشفتن و مشاهده، که در عمل مورد استفاده قرار می گیرد، از کمترین پیچیدگی و بار محاسباتی برخوردار است و بیشتر در معرض نوسانات دایمی حول مقدار بیشینه قرار دارد. در روش تپهنوردی از یک انحراف در نسبت کاری مبدل توان و در روش آشفتن و مشاهده از یک انحراف در ولتا روش ها دارای نوساناتی است که به افت توان میزم می مود. در [۸] دو پارامتر تاثیرگذار در الگوریتم آشفتن و مشاهده، به نام نرخ روش ها دارای نوساناتی است که به افت توان میز می می و در رامتر تاثیرگذار در الگوریتم آشفتن و مشاهده، به نام نرخ

¹ Hill Climbing

² Perturb & Observe

³ Incremental Conductance

پیشنهاد شد ولی قادر به حذف کامل نوسانات نیست. در هر دو روش آشفتن و مشاهده و هدایت افزایشی در بازههای زمانی با شرایط جوی متغیر، ردیابی نقطه بیشینه توان حاصل نمیشود.

مطالعات زیادی به بهبود روش مرسوم آشفتن و مشاهده در ادبیات موضوع اختصاص داده شده است [۱۳–۱۱]. در [۱۱] یک تکنیک آشفتن و مشاهده ناحیه-ثابت برای بهبود پاسخ حالت ماندگار و ردیابی سریع و بدون نوسان نقطه بیشینه توان سیستم فتوولتاییک بدون حسگرهای اضافی پیشنهاد شد. در این تکنیک، منحنیهای توان-ولتاژ ماژول به چندین ناحیه با ولتاژهای مرزی یکتا برای شرایط شدت تابش مختلف تقسیم بندی شد. در این روش از ترکیب اندازه گام تطبیقی و ثابت به منظور بهبود عملکرد استفاده شد. در [۱۳]، با افزودن مومنتوم به الگوریتم تهاوردی، سرعت ردیابی نقطه بیشینه توان بهبود یافت در حالیکه نوسانات حول نقطه بیشینه به مقدار قابل قبول محدود شد. چندین الگوریتم هدایت افزایشی بهبودیافته نیز به منظور افزایش دقت ردیابی نقطه بیشینه توان با وجود سطوح تابش و بار با تغییرات سریع پیشنهاد شدهاند [۱۰]. به منظور حصول پاسخ سریع، یک قانون ساده مثلثاتی در [۱۷] برای ار تباط بین خط بار و منحنی ولتاژ-جریان معرفی شد. یک کنترل کننده دینامیکی ردیابی نقطه بیشینه توان برای سیستمهای فتوولتاییک با تغییرات سریع در شرایم می نه در [۱۸] پیشنهاد شده در این کندی کنیادی دینامیکی ردیابی نقطه بیشینه توان برای سیستم موای مرولتای در یک شرایط کاری مشخص بهره می برد.

در سالهای اخیر، استفاده از تکنیکهای هوشمند از قبیل منطق فازی و شبکه عصبی در ساختار الگوریتمهای ردیابی نقطه بیشینه توان متداول شده است بطوریکه دقت ردیابی بالایی در شرایط تابش متغیر حاصل می شود. این روش ها نبازمند مدارهای کنترلی پیچیده، حسگرهای اضافی و پردازش دادههای بزرگ در فر آیند آموزش هستند [۱۹]. کنترل منطق فازی یک تکنیک جالب است که برای ردیابی نقطه بیشینه توان به اطلاعات سیستم و دادههای آموزش نیازی ندارد [۲۰-۲]. عدم نیاز به دادههای آموزشی پارامترهای یک حسن برای منطق فازی به شمار آید ولی در نقطه مقابل، بایستی به طریقی پارامترهای آن را تنظیم کرد. تنظیم دستی پارامترهای منطق فازی به افزایش مدت-زمان طراحی و پاسخ غیربهینه منجر می شود. برای غلبه بر این مشکل، در [۲۰] پارامترهای کنترلی منطق فازی با استفاده از الگوریتم حاصلخیزی زمینهای کشاورزی بهبودیافته ا بطور بهینه تنظیم شد. شبکه عصبی دارای سرعت ردیابی دادههای ورودی و بیشینه توان در عالب دادههای خروجی مورد استفاده قرار می گیرند. علاوه بر آن در [۲۳] گزارش شده است که دادههای ورودی و بیشینه توان در غالب دادههای خروجی مورد استفاده قرار می گیرند. علاوه بر آن در [۳۲] گزارش شده است که بالاتری است ولی برای بهبود دقت ردیابی سیتی دادههای بزرگی برای آموزش در دسترس باشد [۲۲]. شدت تابش و دما در غالب در برخی از شرایط خاص، این امکان وجود دارد که تخمین نقطه بیشینه توان توسط الگوریتم شبکه عصبی دارای دقت کافی نباشد. در برخی از تکنیکهای هیبرید، سرعت ردیابی سریع روشهای کلاسیک از قبیل آشفتن و مشاهده و هدایت افزایشی با قابلیت تعیین بیشینه سراسری الگوریتم های هوشمند همانند کنترل منطق فازی، هوش گروه و شبکههای عصبی با یکدیگر ترکیب شدهاند [۲۴]. بیشینه سراسری الگوریتم های هوشمند همانند کنترل منطق فازی، هوش گروه و شبکههای عصبی با یکدیگر ترکیب شدهاند [۲۴]. می هر برخی از مینه میرید، سرعت ردیابی سریع روش های و مور گروه و شبکههای عصبی با یکدیگر ترکیب شدهاند [۲۴]. میورنس ای میراین در آبای الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی ازدحام ذرات و رقابت استعماری در فر آیند آموزش

¹ Improved farmland fertility optimization

الگوریتمهای مستقیم و مدل-مبنا به علت دقت و سرعت ردیابی بالا مورد توجه قرار گرفتهاند. در [۲۵] یک روش تحلیلی جدید پیشنهاد شد که در آن نقطه بیشینه سراسری با فرمول بندی ریاضیاتی پیچیدهای ردیابی می شود. بعد از تعیین حدس اولیه برای جریان فوتون، چندین معادله بایستی به منظور دستیابی به نقطه بیشینه سراسری برای هر رشته با استفاده از روند تکراری حل شود. عیب بزرگ چنین رهیافتی را می توان اینطور بیان کرد که تضمینی برای همگرایی تمام این معادلات به پاسخ صحیح وجود ندارد. این شرایط حتی در یک ماژول فتوولتاییک با چندین رشته پیچیده تر خواهد شد، زیرا حدس های اولیه جریانهای فوتون روی پاسخ نهایی تاثیر گذار است و بار محاسباتی زیادی را به پردازنده وارد می کند. الگوریتم پیشنهادی در [۲۶] دارای رهیافت ریاضیاتی ساده-تری است، اما عملکرد مطلوب از نظر دقت ردیابی نقطه بیشینه سراسری حاصل نمی شود. الگوریتم پیشنهادی در [۲۷] نیز از بازده پایین در برخی از نقاط کاری رنج می برد و به دلیل پیچیدگی، برای کاربر دهای نیازمند ردیابی سریع مناسب نیست. نویسندگان در بیشینه سراسری تضمین نمی شود و تلفات توان قابل ملاحظه در عین فرای کاربر دهای نیازمند ردیابی سریع مناسب نیست. نویسندگان در تری است، اما عملکرد مطلوب از نظر دقت ردیابی نقطه بیشینه سراسری حاصل نمی شود. الگوریتم پیشنهادی در [۲۷] نیز از بازده پایین در برخی از نقاط کاری رنج می برد و به دلیل پیچیدگی، برای کاربر دهای نیازمند ردیابی سریع مناسب نیست. نویسندگان در نقلی سراسری تضمین نمی شود و تلفات توان قابل ملاحظه در حین فر آیند تقسیم اجتناب ناپذیر است. اما همگرایی به نقطه بیشینه سراسری در تمام شرایط امکان پذیر نیست.

همانطور که بطور خلاصه ذکر شد، کارهای بسیاری برای بهبود سرعت و دقت ردیابی نقطه بیشینه توان سراسری اختصاص داده شده است ولی با وجود پیشرفتهای حاصله، اکثر این الگوریتمها دارای اشکالاتی از قبیل سرعت و دقت ردیابی کم، نوسانات منغیر سریع با محدودیت مواجه می کند. به منظور کاهش این عوامل نامطلوب، می توان از الگوریتمهای تکاملی به عنوان راههای جایگزین بهره گرفت که دارای قابلیت کار با توابع هزینه غیرخطی هستند. روش های بهینهسازی فراابتکاری متعددی از قبیل بهینهسازی ازدحام ذرات ^۲ [۲۰–۳۰]، الگوریتم کرم شب تاب [۲۳–۲۱]، الگوریتم کلونی زنبور عسل [۳۳]، الگوریتم بهینهسازی از دحام سالپ ایندماه ذرات ^۲ [۲۱–۳۰]، الگوریتم کرم شب تاب [۲۳–۲۱]، الگوریتم کلونی زنبور عسل [۳۳]، الگوریتم بهینهسازی از دحام سالپ استفاده قرار گرفته اند. یک الگوریتم فرابتکاری به نام بهینهسازی کو گ^ی خاکستری^۴ اخیرا توسط میر جلیلی و همکاران توسعه داده مینداز ۲۵] که از شیوه حمله گرگهای خاکستری برای شکار طعمه الهام گرفته است. کارهای متعددی در زمینهی استفاده از الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری در ادبیات موضوع گزارش شده است که به علت مقاومت بیشتر و همگرایی سریع تر، توجه قابل ملاحظه-شد [۳۵] که از شیوه حمله گرگهای خاکستری برای شکار طعمه الهام گرفته است. کارهای متعددی در زمینهی استفاده از الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری در ادبیات موضوع گزارش شده است که به علت مقاومت بیشتر و همگرایی سریع تر، توجه قابل ملاحظه-مای را نسبت به تکنیکهای دیگر بهینهسازی به خود جلب کرده است. علاوه بر آن، نیاز به پارامترهای قابل تنظیم و اپراتورهای کمتر در مقایسه با رهیافتهای تکاملی دیگر، روند طراحی را تسریع می کند [۳۵]. بعد از بررسی کامل ادبیات موضوع، دریافت شد که ای را نسبت به تکنیکهای دیگر بهینه سازی به خود جلب کرده است. علاوه بر آن، نیاز به پارامترهای قابل تنظیم و اپراتورهای کمتر در مقایسه با رهیافتهای تکاملی دیگر، روند طراحی را تسریع می کند [۳۵]. بعد از بررسی کامل ادبیات موضوع، دریافت شد که پژوهش از الگوریتم مذکور برای طراحی ری نوما طراحی را دریابی نقطه بیشینه توان مورد استفاده قرار نگرفته است. بابراین، در این

¹ Dividing rectangles optimization algorithm

² Particle Swarm Optimization

³ Slime mold

⁴ Grey Wolf Optimization

گرفته شد و عملکرد ردیابی آن با تکنیکهای ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات [۳۰] و جستجوی فاخته [۳۶] مورد مقایسه قرار گرفت.

ادامه مقاله به این ترتیب سازماندهی شده است: مدل سیستمهای فتوولتاییک و توصیف سیستم با وجود سایه جزیی در بخش ۲ توصیف شده است. الگوریتم پیشنهادی ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای بهینهسازی گرگ خاکستری در بخش ۳ و نتایج شبیهسازی در بخش ۴ آورده شده است. در پایان، بخش ۵ به نتیجه گیری اختصاص دارد.

۲- مشخصه های یک سیستم فتوولتاییک در شرایط سایه جزیی

۲-۱- مشخصههای اساسی یک سلول فتوولتاییک

به منظور بررسی عملکرد سیستم بایستی مدار معادل یک سلول فتوولتاییک در دسترس باشد. دو مدل برای سلول فتوولتاییک به نامهای مدل یک-دیودی و مدل دو-دیودی در ادبیات موضوع وجود دارد [۲]. برای توصیف مشخصههای یک سلول فتوولتاییک می توان از فیزیک نیمههادی بهره گرفت. دیود واقعی با یک منبع جریان موازی با دو دیود ایده آل مدل می شود. دیودهای ایده آل اساسا جریان نشتی حاصل از پدیدههای انتشار و بازتر کیب بار را توصیف می کنند. مقاومت داخلی ماژول فتوولتاییک با یک مقاومت موازی و مقاومت اتصالات سیستم با یک مقاومت سری مدل می شود. در حالت کلی، مقاومت سری سیستم از مقاومت موازی کوچک تر است. مقادیر این مقاومتها بطور معمول با استفاده از تکنیکهای برازش منحنی یا تکنیکهای گرافیکی محاسبه می شود. در محدوده ولتاژ کاری بالا می توان از مولفه جریان بازتر کیب بار در مقابل مولفه جریان انتشار در جریان نشتی صرفنظر کرد که در این صورت، مدل دو-دیودی به مدل یک-دیودی در شکل (۱) تبدیل می شود. رابطه بین جریان و ولتاژ سلول مدل یک-دیودی در ادامه آورده شده است:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV + qR_sI}{N_s k_s T \alpha} - 1\right) \right] - \frac{V + R_sI}{R_p}$$
(Y1)



شكل ١. مدل يك-ديودى يك سلول فتوولتاييك [2].

که در آن V و I به ترتیب نماد ولتاژ و جریان سلول، I_{pv} جریان تولید سلول، R_s مجموع مقاومتهای حاصل از تمام اجزای در مسیر جریان، R_p مقاومت موازی اتصال N - P، I_0 جریان اشباع، lpha ضریب ایده آلی دیود، k_s ثابت بولتزمان، q بار یک الکترون، T دما بر حسب درجه کلوین و N_s تعداد سلولهای سری در ماژول است. در محدوده ولتاژ کاری پایین، مولفه جریان حاصل از پدیده بازترکیب، درصد بیشتری از جریان نشتی سلول را تشکیل میدهد و به منظور بهبود دقت مدل بایستی لحاظ شود. برای این منظور، مطابق با شکل (۲)، یک دیود دیگر موازی با منبع جریان در مدل وارد می شود. به این ترتیب، رابطه بین جریان و ولتاژ در مدل (۷۱) به رابطه (۷۲) اصلاح می شود:

$$I = I_{pv} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{qV + qR_{s}I}{N_{s}k_{s}T\alpha_{1}} - 1\right) \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{qV + qR_{s}I}{N_{s}k_{s}T\alpha_{2}} - 1\right) \right] - \frac{V + R_{s}I}{R_{p}}$$
(YY)
$$I_{D1} \downarrow I_{D2} \downarrow \qquad R_{s} I \downarrow V$$

شكل ٢. مدل دو-ديودي يك سلول فتوولتاييك [2].

که در آن I₀₁ و I₀₂ به ترتیب جریان اشباع دیود اول (برای مولفه جریان انتشار) و دیود دوم (برای مولفه جریان بازترکیب) و a₁ و a₂ به ترتیب ضریب ایدهآلی دیود اول و دیود دوم است.

۲-۲- توصيف سيستم

یک آرایه فتوولتاییک از چندین ماژول با اتصال سری-موازی تشکیل یافته است تا مقادیر ولتاژ و جریان بالاتری حاصل شود. در شرایط سایه جزیی، به علت وجود دیودهای کنارگذر، چندین نقطه بیشینه محلی و یک نقطه بیشینه سراسری در منحنی مشخصه ولتاژ-توان (V – P) ظاهر می شود. ماژول دارای شرایط سایه جزیی، به جای تولید توان، همانند یک بار عمل می کند و وجود دیود کنارگذر موازی با هر ماژول فتوولتاییک، احتمال بروز کانون داغ را در این شرایط کاهش می دهد. طبق شکل (۳) و شکل (۴)، دو آرایه مختلف فتوولتاییک در این پژوهش در نظر گرفته شده است. پیکربندی اول دارای چهار ماژول سری (پیکربندی (4S) و دو الگوی سایه متفاوت است که منحنی های ولتاژ-توان آنها در شکل (۳) نشان داده است. پیکربندی دوم دارای دو گروه ماژول سری-موازی (پیکربندی 2329) است که منحنی های ولتاژ-توان آنها در شکل (۳) نشان داده است. پیکربندی دوم دارای دو (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. پیکربندی 4S تحت الگوهای سایه مختلف. (الف) الگوی 1، (ب) الگوی 2 و (ج) منحنیهای P_V در شرایط سایه جزیی.



شکل ٤. پیکربندی 2S2P تحت الگوهای سایه مختلف. (الف) الگوی 3، (ب) الگوی 4 و (ج) منحنیهای P_V در شرایط سایه جزیی.

۳- الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری و کاربرد آن در طراحی ردیابی نقطه بیشینه توان

۳-۱- بهینهسازی گرگ خاکستری

الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری از سلسله مراتب رهبری و شیوه شکار گرگ های خاکستری در طبیعت الهام گرفته است [۳۵]. گرگ های خاکستری در بالای زنجیره ی غذایی قرار می گیرند و به زندگی گروهی تمایل دارند. چهار نوع از گرگ های خاکستری از قبیل آلفا (۵)، بتا (β)، دلتا (δ) و امگا (۵) برای شبیه سازی سلسله مراتب رهبری بکار گرفته می شوند. به منظور مدل سازی ریاضیاتی سلسله مراتب اجتماعی گرگ ها در طراحی بهینه سازی گرگ خاکستری، بهترین پاسخ در غالب آلفا (۵) در نظر گرفته می شوند. جایگاه دوم و سوم بهترین پاسخ ها به ترتیب بتا (β) و دلتا (δ) نامیده می شوند. بقیه پاسخ های ممکن در گروه امگا (۵) جایدهی می شوند. سه گام اصلی الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری شامل تعقیب و ردیابی، محاصره و حمله به طعمه است که برای طراحی این الگوریتم پیاده سازی می شوند. گرگ های خاکستری شامل تعقیب و ردیابی، محاصره و رفتار محاصره توسط معادلات زیر مدل می شود:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}_p(t) \right| \tag{YT}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}.\vec{D}$$
(VF)

که در آنها t نماد تکرار فعلی، A ،D و C نماد بردارهای ضرایب، X_p بردار موقعیت طعمه و X بردار موقعیت گرگ خاکستری است. بردارهای A و C طبق رابطههای زیر محاسبه می شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}\cdot\vec{r}_1 - \vec{a} \tag{Va}$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \tag{(V9)}$$

که در آن مقدار *a* در حین اجرای الگوریتم بطور خطی از 2 به 0 کاهش مییابد و ₁ و ₂ بردارهای تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [0,1] هستند. شکار بطور معمول توسط گرگ آلفا (رهبر گروه) هدایت می شود و گرگ های بتا و دلتا از گرگ آلفا پیروی می کنند که ممکن است گاهی در شکار شرکت کنند. دلتا و امگا از گرگ های مجروح در گروه مراقبت می کنند. بنابراین، آلفا با داشتن دانش بهتر در مورد مکان طعمه به عنوان پاسخ کاندید در نظر گرفته می شود. هنگامی که طعمه از حرکت می ایستد، گرگ های خاکستری شکار را با حمله به آن به پایان می رسانند.

-۲-۳ کاربرد الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری برای ردیابی نقطه بیشینه توان

بلو ک-دیاگرام طرح ردیابی نقطه بیشینه توان پیشنهادی برای سیستم فتوولتاییک در شکل (۵) نشان داده شده است. پارامترهای Vpv و Ipv از طریق حسگرهایی تحت سنجش قرار می گیرند و توان خروجی مطلوب بر مبنای این سنجش ها و نسبت کاری (موقعیت هر گرگ) در کنترل کننده محاسبه می شود. شکل (۶) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل ۵. بلوک دیاگرام طرح ردیابی نقطه بیشینه توان پیشنهادی.



شكل ٦. فلوچارت الگوريتم پيشنهادي

پايان

اسماعیل بهمنی، محسن احمدنیا و حسین شریفزاده

ردیابی حداکثر توان خروجی در آرایههای خورشیدی تحت شرایط سایه جزیی با استفاده از الگوریتمهای تکاملی

در شرایط سایه جزیی، منحنی ولتاژ-توان توسط چندین ناحیه با نقطه بیشینه محلی و یک نقطه بیشینه سراسری تقسیم بندی می شود. بایستی دقت شود هنگامی که گرگها به نقطه بیشینه توان دست می یابند، بر دارهای ضرایب همبستگی آنها تقریبا برابر با صفر می شود. در روش پیشنهادی، الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری با کنترل چرخه کاری مستقیم ترکیب شده است، یعنی در نقطه توان بیشینه، چرخه کاری در یک مقدار ثابت حفظ می شود و بدین ترتیب نوسانات موجود در تکنیکهای ردیابی نقطه بیشینه توان مرسوم را کاهش می دهد و به علت کاهش افت توان، بازده سیستم را نیز بهبود می بخشد. به منظور پیاده سازی طرح ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای بهینه سازی گرگ خاکستری، چرخه کاری **b** در غالب یک گرگ خاکستری تعریف می شود. بنابراین، رابطهی (۷۴) را می توان طبق رابطهی (۷۷) اصلاح کرد:

$$d_i(k+1) = d_i(k) - A.D \tag{W}$$

بنابراین، تابع شایستگی الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری طبق رابطهی (۷۸) فرمولبندی میشود:

$$P(d_i^k) > P(d_i^{k-1}) \tag{VA}$$

که در آن P نماد توان، d چرخه کاری، i شماره گرگ خاکستری فعلی و k شماره تکرار فعلی است.

٤- نتايج و بحث

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان فراابتکاری بر مبنای بهینهسازی گرگ خاکستری، عملکرد آن با الگوریتم های جستجوی فاخته و بهینهسازی ازدحام ذرات مورد مقایسه قرار گرفت. تمام الگوریتم های مذکور تحت شرایط سایه جزیی و میزان تابش با تغییرات سریع برای پیکربندی های 4S و 2S2P پیاده سازی شد. برای مطالعات شبیه سازی، پارامترهای مدل یک-دیودی ماژول فتوولتاییک در شرایط نامی به این قرار اتخاد شده اند: 200W = 2008 V_{max} عرفی مطالعات شبیه سازی، پارامترهای مدل یک-دیودی ماژول فتوولتاییک در شرایط نامی به این قرار اتخاد شده اند: 200W = 2008 V_{max} و میزان تابش با تغییرات سریع برای پیکربندی های 25 و 200 یک-دیودی ماژول فتوولتاییک در شرایط نامی به این قرار اتخاد شده اند: 200W = 2008 V_{max} و 2008 V_{ac} = 200 V_{mp} = 26.3V V_{mp} = 26.3V V_{mp} و 26.3V V_{mp} = 25.4Hz V_{out} = 300V V_{in} = (0 - 130 V) V_{ac} و ریپل ولتاژ خروجی V_{max} = 200 V_{max} = 25 V_{max} = 25 V_{max} = 25 V_{max} = 200 V_{ac} V_{ac} - 200 V_{ac} = 200 V_{ac} = 200 V_{ac} - 200 V_{ac} = 200 V_{ac} - 200 V_{ac} = 200 V_{ac} V_{ac} = 200 V_{ac} = 200

در شکل (۷) نمودار توان-ولتاژ مربوط به الگوریتم گرگ خاکستری آورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، این منحنی دارای چهار نقطهی بیشینه محلی و یک نقطهی بیشینه سراسری است. بیشینه های محلی در نقاط با توان 40.5، 72.4 78.1 و 48.6 واقع شدهاند و نقطهی بیشینه سراسری نیز در ولتاژ 62 و توان 85.1 بدست آمده است.



شکل ۷. منحنی توان-ولتاژ آرایه فتوولتاییک با الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری

نتایج مربوط به ولتاژ، جریان و توان خروجی حاصل از اِعمال سه الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری، جستجوی فاخته و بهینهسازی ازدحام ذرات در شکل (۸) تا شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل پروفایل ولتاژ حاصل از سه الگوریتم مذکور را نشان می دهد. با توجه به شکل مذکور، الگوریتم گرگ خاکستری قادر است با نوسانات کمتری نسبت به دو الگوریتم دیگر، نقاط ولتاژ را ردیابی کند. میانگین فراجهش ها و فرونشت ها و همچنین زمان فرونشست با توجه به این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم دیگر، نقاط ولتاژ می باشد. طبیعی است که دنبال کردن سریع تر با نوسانات کمتر و دقت بالاتر، کیفیت بالاتر توان خروجی را نتیجه خواهد داد. یک فرونشست به میزان %24 در ابتدای بازه شبیه سازی در زمان 8 مشاهده می شود. در این زمان، الگوریتم جست و جو به میزان 10% بهتر عمل کرده است. البته همچنان در زمان 8 ماه مشاهده می شود. در این زمان، الگوریتم جست و جو به میزان 20% بهتر عمل کرده است. البته همچنان در زمان 8 0.4 به مشاهده می شود. در این زمان، الگوریتم جست و جو به میزان 20% بهتر عمل کرده است. البته همچنان در زمان 8 0.4 به مشاهده می شود. در این زمان، الگوریتم جست و جو به میزان 20% بهتر عمل کرده است. البته همچنان در زمان 8 0.4 به مشاهده می شود. در این زمان، الگوریتم جست و حو به میزان 20% بهتر عمل کرده است. البته همچنان در زمان 8 0.4 به مشاهده می شود. در این زمان، الگوریتم جست و حو به میزان 20% می باشد. نتایج عددی مربوط به پروفایل ولتاژ در جدول (۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که زمان نشست با 20% لحاظ شده است یعنی زمانی که خروجی برای اولین بار به بازه %5± مقدار نهایی می رسد و در این بازه باقی می ماند.



شکل ۸. پروفایل ولتاژ

بيشينه فراجهش (٪)	يشينه فراجهش (٪) كمينه فرونشست (٪)		نوسانات دايمي (٪)		
13	24	0.2	1		
20	20	0.4	1.6		
24	26	0.35	2.1		
	ييشينه فراجهش (٪) 13 20 24	بيشينه فراجهش (٪) كمينه فرونشست (٪) 24 13 20 20 26 24	رمان نشست (ثانیه) بیشینه فراجهش (//) کمینه فرونشست (//) زمان نشست (ثانیه) 0.2 24 13 0.4 20 20 0.35 26 24		

جدول ۱. مقایسه عددی برای پروفایل ولتاژ.

اگرچه الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری بهتر از جستجوی فاخته و الگوریتم جستجوی فاخته بهتر از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات عمل کرده است، ولی برای مثال جستجوی فاخته زمان نشست طولانی تری نسبت به الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در یک لحظه خاص داشته است ولی به طور متوسط، عملکرد این الگوریتم از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بهتر بوده است. در شرایط استفاده عادی، عملکرد متوسط بیشتر مورد توجه است ولی در شرایط خاص، مثل وجود بارهای حساس، این مقادیر بیشینه و کمینه می تواند بسیار مهم باشد.

پروفایل جریان خروجی آرایه برای الگوریتمهای مورد بررسی در شکل (۹) داده شده است. مانند پروفایل ولتاژ، میزان نوسانات و کیفیت متفاوت برای جریان خروجی آرایه نیز با توجه به الگوریتمهای مورد بررسی مشاهده می شود. مشخص است که جریان خروجی آرایه برای الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات کمتر از دو الگوریتم دیگر است که توان خروجی کمتر را به همراه دارد. در این حالت متوسط جریان خروجی و نوسانات قابل ارزیابی و مقایسه است. همانطور که دیده می شود، مقدار متوسط جریان برای الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری و جستجوی فاخته تقریبا مشابه است. از نظر میزان نوسانات و سرعت پاسخ، الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری بهترین عملکرد و کوتاه ترین زمان نشست را دارا می باشد و بدترین نتیجه نیز از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات حاصل می شود. نتایج عددی مربوط به پروفایل جریان در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۹. پروفایل جریان خروجی.

اسماعیل بهمنی، محسن احمدنیا و حسین شریفزاده

نوسانات دايمي (٪)	زمان نشست (ثانيه)	كيمنه فرونشست (٪)	بيشينه فراجهش (٪)	کمیت
				الگوريتم
0.9	0.12	21	11	بھینەسازى گرگ خاكسترى
1.1	0.32	16	18	جستجوى فاخته
2.2	0.34	14	22	بهينهسازي ازدحام ذرات

جدول ۲. مقایسه عددی برای پروفایل جریان.

پیرو نتایج قبلی مربوط به ولتاژ و جریان، می توان انتظار داشت که توان خروجی با الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری بهتر از دو الگوریتم دیگر باشد و الگوریتم بهینه سازی از دحام ذرات به ضعیف ترین نتیجه ختم شود. پروفایل توان خروجی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، خروجی توان حاصل از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری کمترین نوسان را ثبت می کند و توان خروجی با الگوریتم بهینه سازی از دحام ذرات دارای نوسانات نسبتا بزرگی است که به افزایش افت توان، کاهش سرعت پاسخ و کاهش بازده سیستم فتوولتاییک منجر می شود. با توجه به شکل (۱۰)، بعد از زمان ۲ 2.5، که نوسانات توان حاصل از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری و جستجوی فاخته به مقداری کوچکی می رسد، توان حاصل از الگوریتم بهینه سازی از دحام درات، نوسانات بزرگی را تجربه می کند. مقایسه عددی پروفایل توان خروجی در جدول (۳) خلاصه شده است. با توجه به (۳)، مقادیر بیشینه فراجهش، زمان نشست و نوسانات ماندگار الگوریتم پیشنهادی به ترتیب تا ۱۹۹0، هرا0.60% و 19.50% کاهش را نسبت به طرحهای مورد مقایسه نشان می دهد. علاوه بر آن، یک مقایسه کمی بین روش های مختلف ردیابی نقطه بیشینه توان با مهمگرایی سریع در جدول (۴) آورده شده است.



شكل ١٠. توان خروجي.

جدول ٥. مقایسه عددی برای پروفایل توان.

-	نوسانات دايمي (./)	زمان نشست (ثانیه)	كمينه فرونشست (٪)	بيشينه فراجهش (٪)	كميت
_					الگوريتم
	0.9	0.11	21	13	بهینهسازی گرگ خاکستری
	1.1	0.30	16	18	جستجوى فاخته
	2.1	0.33	21	22	بهينەسازى ازدحام ذرات

	روش پیشنهادی	مرجع [32]	مرجع [15]	بھینەسازی ازدحام ذرات	آشفتن و مشاهده	نوع کمیت
-	خيلى تند	تند	تند	متوسط	کند	سرعت رديابي
	كم	متوسط	متوسط	بالا	کم	نوسانات گذراي توان
	خيلى دقيق	خیلی دقیق	خيلى دقيق	دقيق	کم	دقت رديابي
	بلى	بلى	بلى	بلى	خير	همگرایی به بیشینه سراسری
	1	2	1	6	1	تعداد پارامترهای تنظیم
	صفر	صفر	صفر	صفر	بزرگ	نوسانات حالت ماندگار
	بالا	بالا	بالا	بالا	کم	بازده توان
	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	کم	پیچیدگی پیادەسازی
	خوب	خوب	خوب	خوب	ضعيف	پاسخ دینامیکی

جدول ٤. مقایسه طرح پیشنهادی با تکنیکهای دیگر ردیابی نقطه بیشینه توان تحت شرایط سایه جزیی.

نتایج حاصل حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری است. هرچند در صورت بررسی نقطه به نقطه، در مواردی الگوریتم جستجوی فاخته کمینه فرونشست مناسب تری دارد. ولی در کل، الگوریتم بهینهسازی گرگ خاکستری کارایی بهتری از خود نشان میدهد. دلیل این امر می تواند به نحوه جست و جوی این الگوریتم مربوط شود زیرا بیشتر از دو الگوریتم دیگر بر اکتشاف و استخراج استوار است. فاز اکتشاف به بهبود سرعت همگرایی منجر می شود و از گیرکردن در نقاط بهینهی محلی جلو گیری می کند. فاز استخراج نیز دقت پاسخ را افزایش میدهد.

٥- نتیجه گیری

در این مقاله یک رهیافت محاسبه فراابتکاری جدید به نام بهینه سازی گرگ خاکستری به منظور طراحی الگوریتم استخراج توان بیشینه برای سیستم های فتوولتاییک برای کار در شرایط سایه جزیی پیشنهاد شد. برای ارزیابی کارایی این تکنیک ردیابی نقطه بیشینه توان جدید (ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری)، عملکرد آن با دو تکنیک ردیابی نقطه بیشینه توان موجود بر مبنای روش جستجوی فاخته و بهینه سازی از دحام ذرات مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل، دریافت شد که ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای بهینه سازی گرگ خاکستری)، عملکرد آن با دو تکنیک ردیابی نقطه بیشینه بهتری از نظر سرعت همگرایی به نقطه بیشینه سراسری و نوسانات کمتر حالت ماندگار است.

مراجع

- [1] A. F. Mirza, M. Mansoor, K. Zhan and Q. Ling, "High-efficiency swarm intelligent maximum power point tracking control techniques for varying temperature and irradiance," Energy, vol. 228, 2021.
- [^Y] A. Ballaji, R and et.al., "Design & Development of MPPT Using PSO With Predefined Search Space Based on Fuzzy Fokker Planck Solution," IEEE Access, pp. 80764-80783, 2022.
- [^r] H. Patel and V. Agarwal, "Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 4, p. 302–310, 2008.
- [2] M. Etezadinejad, B. Asaei, S. Farhangi and A. Anvari-Moghaddam, "An Improved and Fast MPPT Algorithm for PV Systems Under Partially Shaded Conditions," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 13, no. 2, pp. 732-742, 2022.
- [°]S. Hosseini, S. Taheri, M. Farzaneh, and H. Taheri, "A high-performance shade-tolerant MPPT based on current-mode control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10327-10340, 2019.
- [7] B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 4, no. 1, p. 89–98, 2013.
- [V] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 1, p. 21–31, 2012.
- [^]M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Operating characteristics of the P&O algorithm at high perturbation frequencies for standalone PV systems," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 30, no. 1, p. 189–198, 2015.
- [4] I. Mandourarakis, V. Gogolou, E. Koutroulis, and S. Siskos, "Integrated Maximum Power Point Tracking System for Photovoltaic Energy Harvesting Applications," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 8, pp. 9865-9875, 2022.
- [1] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 4, no. 1, p. 108–117, 2013.
- [1]N. Swaminathan, N. Lakshminarasamma, and Y. Cao, "A Fixed Zone Perturb and Observe MPPT Technique for a Standalone Distributed PV System," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 1, pp. 361-374, 2022.
- [1^{*}]V. Kumar and M. Singh, "Derated Mode of Power Generation in PV System Using Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, no. 5, pp. 1183-1192, 2021.
- [17]G. A. Raiker, U. Loganathan, and S. Reddy, "Current Control of Boost Converter for PV Interface With Momentum-Based Perturb and Observe MPPT," IEEE Transactions on Industry Applications , vol. 57, no. 4, pp. 4071-4079, 2021.
- [15]K. S. Tey and S. Mekhilef, "Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, p. 5384–5392, 2014.
- [1°]K. S. Tey and S. Mekhilef, "Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast changing solar irradiation level," Solar Energy, vol. 101, p. 333– 342, 2014.
- [17] M. Alsumiri, "Residual Incremental Conductance Based Nonparametric MPPT Control for Solar Photovoltaic Energy Conversion System," IEEE Access, vol. 7, pp. 87901-87906, 2019.

- [17] T. K. Soon and S. Mekhilef, "A fast converging MPPT technique for photovoltaic system under fast varying solar irradiation and load resistance," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 11, no. 1, p. 176– 186, 2015.
- [1A] R. Kotti and W. Shireen, "Efficient MPPT control for PV systems adaptive to fast changing irradiation and partial shading conditions," Solar Energy, vol. 114, p. 397–407, 2015.
- [19]M. Fathi and J. Amiri Parian, "Intelligent MPPT for photovoltaic panels using a novel fuzzy logic and artificial neural networks based on evolutionary algorithms," Energy Reports, vol. 7, pp. 1338-1348, 2021.
- [*•]T. Hai, J. Zhou and K. Muranaka, "An efficient fuzzy-logic based MPPT controller for gridconnected PV systems by farmland fertility optimization algorithm," Optik, vol. 267, 2022, 169636.
- [^Y]R. Chaibi, R. EL Bachtiri, K. El Hammoumi and M. Yagoubi, "Photovoltaic System's MPPT Under Partial Shading Using T-S Fuzzy Robust Control," IFAC-PapersOnLine, vol. 55, no. 12, pp. 214-221, 2022.
- [^{YY}]M. Leelavathi and V. Suresh Kumar, "Deep neural network algorithm for MPPT control of double diode equation based PV module," Materials Today: Proceedings, vol. 62, no. 7, pp. 4764-4771, 2022.
- [^Y^r] S. Rizzo and G. Scelba, "ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions," Applied Energy, vol. 145, pp. 124-132, 2015.
- [⁷[£]]A. Tavakoli and M. Forouzanfar, "A self-constructing Lyapunov neural network controller to track global maximum power point in PV systems," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, no. 6, 2020.
- [^Y°]Y. Mahmoud and E. F. El-Saadany, "Fast power-peaks estimator for partially shaded PV systems," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 1, pp. 206-217, 2016.
- [^{Y7}] A. Xenophontos and A. M. Bazzi, "Model-Based maximum power curves of solar photovoltaic panels under partial shading conditions," IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 8, no. 1, pp. 233-238, 2018.
- [YV]M. Arjun, V. V. Ramana, R. Viswadev, and B. Venkatesaperumal, "An iterative analytical solution for calculating maximum power point in photovoltaic systems under partial shading conditions," IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 66, no. 6, pp. 973-977, 2019.
- [^{YA}]T. L. Nguyen and K. Low, "A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3456-3467, 2010.
- [Y^q]S. Moballegh and J. Jiang, "Modeling, prediction, and experimental validations of power peaks of PV arrays under partial shading conditions," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 1, pp. 293-300, 2014.
- [*•]K. Ishaque, Z. Salam, M. Amjad, and S. Mekhilef, "An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 8, p. 3627–3638, 2012.
- [^r]A. F. Sagonda and K. A. Folly, "A comparative study between deterministic and two meta-heuristic algorithms for solar PV MPPT control under partial shading conditions," Systems and Soft Computing, vol. 4, 2022, 200040.
- [^{**}]K. Sundareswaran, S. Peddapati, and S. Palani, "MPPT of PV systems under partial shading conditions through a colony of flashing fireflies," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 29, no. 2, p. 463–472, 2014.
- [""]D.J. Krishna Kishore, M.R. Mohamed, K. Sudhakar and K. Peddakapu, "Swarm intelligence-based MPPT design for PV systems under diverse partial shading conditions," Energy, vol. 265, 2023.

- [^r[£]] M. Mansoor, A. F. Mirza, Q. Ling and M. Y. Javed, "Novel Grass Hopper optimization based MPPT of PV systems for complex partial shading conditions," Solar Energy, vol. 198, pp. 499-518, 2020.
- [^{ro}]S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," Adv. Eng. Software, vol. 69, p. 46–61, 2014.
- [^{*7}]D.A.Nugraha, K.L.Lian and Suwarno, "A Novel MPPT Method Based on Cuckoo Search Algorithm and Golden Section Search Algorithm for Partially Shaded PV System," Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 42, no. 3, pp. 173-182, 2019.
- [^{\u03c6}]B. Yang and et al., "Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of PV systems under partial shading condition," Journal of Cleaner Production, vol. 268, 2020.