

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

اسماعیل بهمنی^۱، محسن احمدنیا^۲ و حسین شریف‌زاده^۳

^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،

sharifzadeh.hossein@gmail.com

چکیده

واژه‌های کلیدی

بهینه‌سازی گرگ خاکستری،

ردیابی نقطه بیشینه توان،

شرایط سایه جزئی،

فتوولتاییک.

استخراج توان بیشینه بویژه با شرایط سایه جزئی یکی از مهم‌ترین مسایل در استفاده از یک سیستم فتوولتاییک است. تحت شرایط سایه جزئی، مشخصه توان-ولتاژ آرایه‌های فتوولتاییک دارای چندین نقطه بیشینه محلی است. یک روش ردیابی بیشینه توان در سیستم‌های فتوولتاییک می‌بایست امکان ردیابی سریع و دقیق نقطه بیشینه سراسری در حین شرایط سایه جزئی 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 جزئی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی گرگ خاکستری ارائه شده است. الگوریتم گرگ خاکستری یک روش بهینه‌سازی جدید است که محدودیت‌هایی از قبیل ردیابی ضعیف، نوسانات حالت دائمی و حالت گذرای نامطلوب در تکنیک‌های آشفتن و مشاهده و بهینه‌سازی ازدحام ذرات را برطرف می‌کند. الگوریتم پیشنهادی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری روی یک سیستم فتوولتاییک در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد تا کارایی آن اثبات گردد. عملکرد طرح پیشنهادی با دو تکنیک ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که عملکرد تکنیک ردیابی نقطه بیشینه توان پیشنهادی نسبت به طرح‌های مورد مقایسه از نظر سرعت و پایداری حالت ماندگار پاسخ برتری دارد بطوریکه مقادیر بیشینه فراجش، زمان نشست و نوسانات ماندگار را به ترتیب تا 40.91%، 66.67% و 59.1% کاهش می‌دهد.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.2.5.3](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.2.5.3)

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

Esmail Bahmani¹, Mohsen Ahmadnia² and Hossein Sharifzadeh³

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

²**Corresponding 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

gray wolf optimization (GWO), maximum power point tracking (MPPT), partial shading conditions (PSC), 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 می‌آید. علاوه بر آن، سیستم‌های فتوولتاییک دارای کمترین تاثیر روی محیط‌زیست از نظر تولید صدا و آلودگی است. موثرترین روش برای بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک، اجرای الگوریتم‌های کنترلی است بطوریکه سیستم حتی تحت شرایط غیرخطی در نقطه کاری بهینه خود کار می‌کند. این تکنیک به کنترل ردیابی نقطه بیشینه توان شناخته می‌شود [۱]. تکنیک‌های ردیابی نقطه بیشینه توان به کمک مبدل‌های DC-DC پیاده‌سازی می‌شوند تا نقطه کاری سیستم فتوولتاییک را در نقطه بیشینه توان سراسری قرار دهند. سلول فتوولتاییک در شرایط سایه جزئی همانند یک بار عمل می‌کند و بنابراین تولید کانون‌های داغ محلی را به همراه دارد. این پدیده می‌تواند بازده ماژول را تا ۲۳ درصد کاهش دهد [۲]. برای اجتناب از تولید کانون داغ، می‌توان از دیودهای کنار 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 جزئی، نقطه بیشینه توان سراسری به متغیرهایی از قبیل ولتاژ، دمای سلول و شدت تابش بستگی دارد و بنابراین می‌تواند 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 فتوولتاییک ناشی از شرایط سایه جزئی و تغییرات سریع شدت تابش متمرکز شده‌اند [۳-۵]. از آنجاییکه سیستم فتوولتاییک در شرایط سایه جزئی دارای دینامیک‌های متغیر با زمان است، طراحی الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان برای سیستم‌های فتوولتاییک بایستی با مشخصه‌هایی از قبیل ردیابی نقطه بیشینه توان سراسری در شرایط مختلف از قبیل وجود سایه، افت سلول فتوولتاییک، تطبیق پذیری با تغییر مشخصه‌های 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 سازوکار عملکرد الگوریتم با یکدیگر تفاوت دارند. اکثر الگوریتم‌های ردیابی نقطه بیشینه توان سازگار با شرایط سایه جزئی بر مبنای الگوریتم‌های مرسوم از قبیل تپه‌نوردی^۱، آشفتن و مشاهده^۲، هدایت افزایشی^۳، الگوریتم‌های ردیابی نقطه بیشینه توان مستقیم و الگوریتم‌های بر مبنای محاسبات نرم قرار دارند که در آنها سازوکاری به منظور شناسایی وقوع سایه جزئی و ردیابی نقطه بیشینه توان سراسری به الگوریتم اصلی اضافه شده است. روش آشفتن و مشاهده، که در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرد، 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 ولتاژ کاری سیستم فتوولتاییک بهره گرفته می‌شود [۶-۹]. با وجود انحرافات دایمی در هر دو جهت، نقطه بیشینه توان در هر دوی این روش‌ها دارای نوساناتی است که به افت توان منجر می‌شود. در [۸] دو پارامتر تاثیرگذار در الگوریتم آشفتن و مشاهده، به نام نرخ انحراف و اندازه انحراف مورد بحث قرار گرفت. به منظور کاهش این نوسانات و بهبود بازده ماژول، روش هدایت افزایشی [۱۰]

^۱ Hill Climbing^۲ Perturb & Observe^۳ 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 [۱۱-۱۳]. در [۱۱] یک تکنیک آشفتن و مشاهده ناحیه-ثابت برای بهبود پاسخ حالت ماندگار و ردیابی سریع و بدون نوسان نقطه بیشینه توان سیستم فتوولتائیک بدون حسگرهای اضافی پیشنهاد شد. در این تکنیک، منحنی‌های توان-ولتاژ ماژول به چندین ناحیه با ولتاژهای مرزی یکتا برای شرایط شدت تابش مختلف تقسیم‌بندی شد. در این روش از ترکیب اندازه گام تطبیقی و ثابت به منظور بهبود عملکرد استفاده شد. در [۱۳]، با افزودن مومنتوم به الگوریتم تپه‌نوردی، 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 [۱۴-۱۶]. به منظور حصول پاسخ سریع، یک قانون ساده مثلثاتی در [۱۷] برای ارتباط بین خط بار و منحنی ولتاژ-جریان معرفی شد. یک کنترل‌کننده دینامیکی ردیابی نقطه بیشینه توان برای سیستم‌های فتوولتائیک با تغییرات سریع در شرایط تابش در [۱۸] پیشنهاد شد، که از یک تکنیک پایش برای تعیین قابلیت انتقال توان بیشینه‌ی ماژول در یک شرایط کاری مشخص بهره می‌برد.

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 می‌شود. این روش‌ها نیازمند مدارهای کنترلی پیچیده، حسگرهای اضافی و پردازش داده‌های بزرگ در فرآیند آموزش هستند [۱۹]. کنترل منطق فازی یک تکنیک جالب است که برای ردیابی نقطه بیشینه توان به اطلاعات سیستم و داده‌های آموزش نیازی ندارد [۲۰-۲۱]. عدم نیاز به داده‌های آموزشی می‌تواند 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 غیربهبوده منجر می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، در [۲۰] پارامترهای کنترلی منطق فازی با استفاده از الگوریتم حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی بهبودیافته^۱ بطور بهینه تنظیم شد. شبکه عصبی دارای سرعت ردیابی بالاتری است ولی برای بهبود دقت ردیابی بایستی داده‌های بزرگی برای آموزش در دسترس باشد [۲۲]. شدت تابش و دما در غالب داده‌های ورودی و بیشینه توان در غالب داده‌های خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر آن در [۲۳] گزارش شده است که 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 الگوریتم‌های هوشمند همانند کنترل منطق فازی، هوش گروه و شبکه‌های عصبی با یکدیگر ترکیب شده‌اند [۲۴]. علاوه بر آن، در [۱۹] از سه روش فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و رقابت استعماری در فرآیند آموزش شبکه عصبی بهره گرفته شد. مزایای هر دو روش در تکنیک‌های هیبرید وجود دارد ولی در نقطه مقابل، پیچیدگی ساختار و بار محاسباتی نیز افزایش می‌یابد.

^۱ 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 فرمول‌بندی ریاضیاتی پیچیده‌ای ردیابی می‌شود. 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 می‌توان 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 پیچیده‌تر خواهد شد، زیرا حدس‌های اولیه جریان‌های فوتون روی پاسخ نهایی تاثیرگذار است و بار محاسباتی زیادی را به پردازنده وارد می‌کند. الگوریتم پیشنهادی در [۲۶] دارای رهیافت ریاضیاتی ساده-تری است، اما عملکرد مطلوب از نظر دقت ردیابی نقطه بیشینه سراسری حاصل نمی‌شود. الگوریتم پیشنهادی در [۲۷] نیز از بازده پایین در برخی از نقاط کاری رنج می‌برد و به دلیل پیچیدگی، برای کاربردهای نیازمند ردیابی سریع مناسب نیست. نویسندگان در [۲۸] از الگوریتم بهینه‌سازی چهارگوش‌های تقسیم‌کننده^۱ برای دستیابی به نقطه بیشینه سراسری بهره گرفتند، اما همگرایی به نقطه بیشینه سراسری تضمین نمی‌شود و تلفات توان قابل ملاحظه در حین فرآیند تقسیم اجتناب‌ناپذیر است. روش پیشنهادی در [۲۹] از توصیف تجربی رابطه بین ولتاژ و جریان در حین وقوع سایه جزئی برای تخمین نقطه بیشینه توان استفاده می‌کند، اما ردیابی دقیق نقطه بیشینه سراسری در تمام شرایط امکان‌پذیر 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 دائمی حول مقدار بیشینه، افت توان حین جستجو، ساختار پیچیده و بار محاسباتی بالا هستند که کارایی آنها را در شرایط شدت تابش متغیر سریع با محدودیت مواجه می‌کند. به منظور کاهش این عوامل نامطلوب، می‌توان از الگوریتم‌های تکاملی به عنوان راه‌های جایگزین بهره گرفت که دارای قابلیت کار با توابع هزینه غیرخطی هستند. روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری متعددی از قبیل بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ [۳۰-۳۱]، الگوریتم کرم شب‌تاب [۳۱-۳۲]، الگوریتم کلونی زنبور عسل [۳۳]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام سالپ [۱]، بهینه‌سازی کپک مخاطی^۳ [۱] و الگوریتم بهینه‌سازی ملخ [۳۴] برای ردیابی نقطه بیشینه توان در سیستم‌های فتوولتاییک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یک الگوریتم فراابتکاری به نام بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۴ اخیراً توسط میرجلیلی و همکاران توسعه داده شد [۳۵] که از شیوه حمله گرگ‌های خاکستری برای شکار طعمه الهام گرفته است. کارهای متعددی در زمینه استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در ادبیات موضوع گزارش شده است که به علت مقاومت بیشتر و همگرایی سریع‌تر، توجه قابل ملاحظه-ای 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 می‌کند [۳۵]. بعد از بررسی کامل ادبیات موضوع، دریافت شد که الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری تا کنون برای طراحی ردیابی نقطه بیشینه توان مورد استفاده قرار نگرفته است. بنابراین، در این پژوهش از الگوریتم مذکور برای طراحی ردیابی نقطه بیشینه توان به منظور حصول عملکرد ردیابی بهینه با وجود سایه جزئی بهره

^۱ Dividing rectangles optimization algorithm

^۲ Particle Swarm Optimization

^۳ Slime mold

^۴ 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.

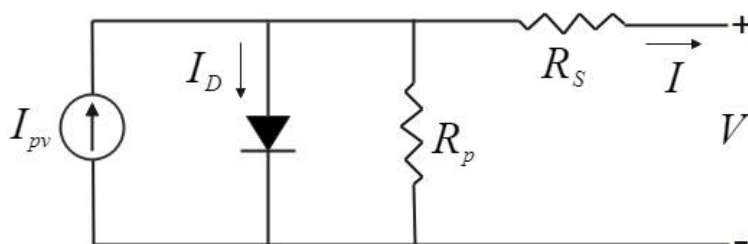
ادامه مقاله به این ترتیب سازماندهی شده است: مدل سیستم‌های فتوولتائیک و توصیف سیستم با وجود سایه جزئی در بخش ۲ توصیف شده است. الگوریتم پیشنهادی ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای بهینه‌سازی گرگ خاکستری در بخش ۳ و نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ آورده شده است. در پایان، بخش ۵ به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مشخصه‌های یک سیستم فتوولتائیک در شرایط سایه جزئی

۲-۱- مشخصه‌های اساسی یک سلول فتوولتائیک

به منظور بررسی عملکرد سیستم بایستی مدار معادل یک سلول فتوولتائیک در دسترس باشد. دو مدل برای سلول فتوولتائیک به نام‌های مدل یک-دیودی و مدل دو-دیودی در ادبیات موضوع وجود دارد [۲]. برای توصیف مشخصه‌های یک سلول فتوولتائیک می‌توان از فیزیک نیمه‌هادی بهره گرفت. دیود واقعی با یک منبع جریان موازی با دو دیود ایده‌آل مدل می‌شود. دیودهای ایده‌آل اساساً جریان نشتی حاصل از پدیده‌های انتشار و بازترکیب بار را توصیف می‌کنند. مقاومت داخلی مازول فتوولتائیک با یک مقاومت موازی و مقاومت اتصالات سیستم با یک مقاومت سری مدل می‌شود. در حالت کلی، مقاومت سری سیستم از مقاومت موازی کوچک‌تر است. مقادیر این مقاومت‌ها بطور معمول با استفاده از تکنیک‌های برازش منحنی یا تکنیک‌های گرافیکی محاسبه می‌شود. در محدوده ولتاژ کاری بالا می‌توان از مولفه جریان بازترکیب 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 می‌شود. رابطه بین جریان و ولتاژ سلول مدل یک-دیودی در ادامه آورده شده است:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV + qR_s I}{N_s k_s T \alpha} - 1 \right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (V1)$$

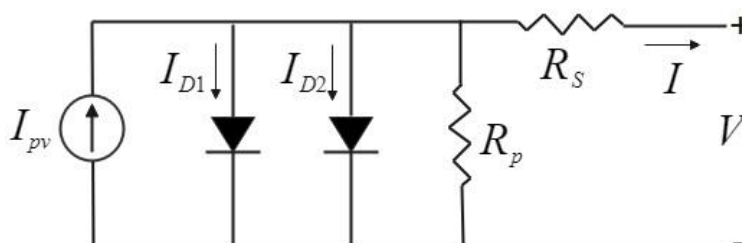


شکل ۱. مدل یک-دیودی یک سلول فتوولتائیک [2].

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 $P-N$ ، I_0 جریان اشباع، α ضریب ایده‌آلی دیود، k_s ثابت بولتزمن، q بار یک الکترون، T دما بر حسب درجه کلوین و N_s تعداد سلول‌های سری در مازول 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 می‌شود. به این ترتیب، رابطه بین جریان و ولتاژ در مدل (۷۱) به رابطه (۷۲) اصلاح می‌شود:

$$I = I_{pv} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{qV + qR_s I}{N_s k_s T \alpha_1} - 1 \right) \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{qV + qR_s I}{N_s k_s T \alpha_2} - 1 \right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (72)$$

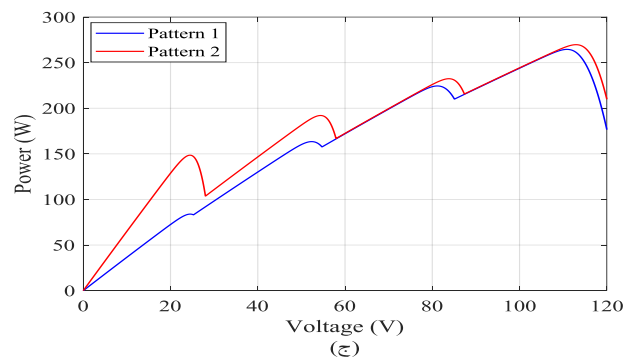
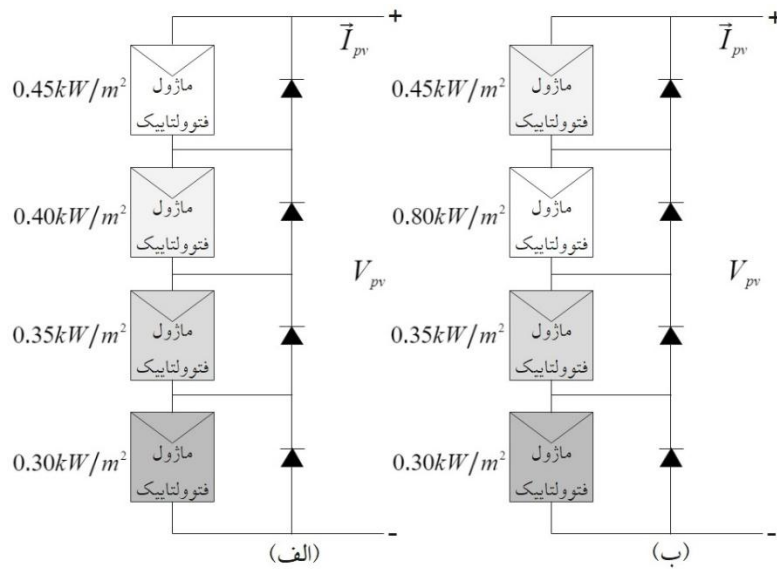


شکل ۲. مدل دو-دیودی یک سلول فتوولتاییک [2].

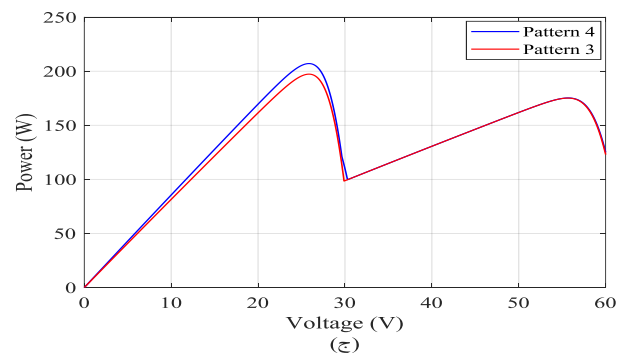
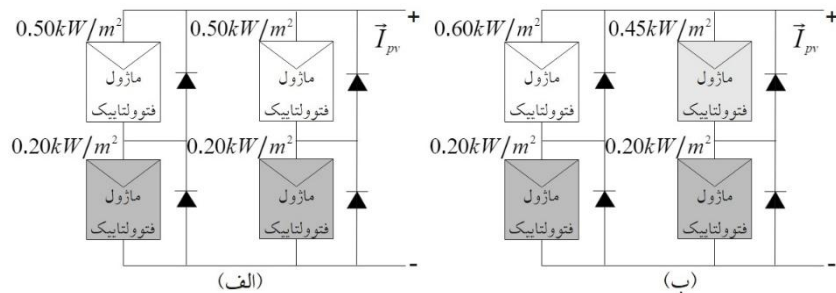
که در آن I_{01} و I_{02} به ترتیب جریان اشباع دیود اول (برای مولفه جریان انتشار) و دیود دوم (برای مولفه جریان بازترکیب) و α_1 و α_2 به ترتیب ضریب ایده‌آلی دیود اول و دیود دوم است.

۲-۲- توصیف سیستم

یک آرایه فتوولتاییک از چندین ماژول با اتصال سری-موازی تشکیل یافته است تا مقادیر ولتاژ و جریان بالاتری حاصل شود. در شرایط سایه جزئی، به علت وجود دیودهای کنارگذر، چندین نقطه بیشینه محلی و یک نقطه بیشینه سراسری در منحنی مشخصه ولتاژ-توان ($P - V$) ظاهر می‌شود. ماژول دارای شرایط سایه جزئی، به جای تولید توان، همانند یک بار عمل می‌کند و وجود دیود کنارگذر موازی با هر ماژول فتوولتاییک، احتمال بروز کانون داغ را در این شرایط کاهش می‌دهد. 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 منحنی‌های ولتاژ-توان آنها در شکل (۳) نشان داده است. پیکربندی دوم دارای دو گروه ماژول سری-موازی (پیکربندی 2S2P) است که تحت دو الگوی سایه مختلف قرار دارند و منحنی‌های ولتاژ-توان آنها در شکل (۴) نشان داده شده است.



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



شکل ۴. پیکر بندی 2S2P تحت الگوهای سایه مختلف. (الف) الگوی 3، (ب) الگوی 4 و (ج) منحنی‌های P_V در شرایط سایه جزئی.

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

۳-۱- بهینه‌سازی گرگ خاکستری

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری از سلسله‌مراتب رهبری و شیوه شکار گرگ‌های خاکستری در طبیعت الهام گرفته است [۳۵]. گرگ‌های خاکستری در بالای زنجیره‌ی غذایی قرار می‌گیرند و به زندگی گروهی تمایل دارند. چهار نوع از گرگ‌های خاکستری از قبیل آلفا (α)، بتا (β)، دلتا (δ) و امگا (ω) برای شبیه‌سازی سلسله‌مراتب رهبری بکار گرفته می‌شوند. به منظور مدل‌سازی ریاضیاتی سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌ها در طراحی بهینه‌سازی گرگ خاکستری، بهترین پاسخ در غالب آلفا (α) در نظر گرفته می‌شود. جایگاه دوم و سوم بهترین پاسخ‌ها به ترتیب بتا (β) و دلتا (δ) نامیده می‌شوند. بقیه پاسخ‌های ممکن در گروه امگا (ω) جایدهی می‌شوند. سه گام اصلی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری شامل تعقیب و ردیابی، محاصره و حمله به طعمه است که برای طراحی این الگوریتم پیاده‌سازی می‌شوند. گرگ‌های خاکستری در حین شکار به دور طعمه حلقه می‌زنند و رفتار محاصره توسط معادلات زیر مدل می‌شود:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}_p(t)| \quad (73)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (74)$$

که در آنها t نماد تکرار فعلی، $\vec{A}$ ، $\vec{D}$ و $\vec{C}$ نماد بردارهای ضرایب، $\vec{X}_p$ بردار موقعیت طعمه و $\vec{X}$ بردار موقعیت گرگ خاکستری است. بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ طبق رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

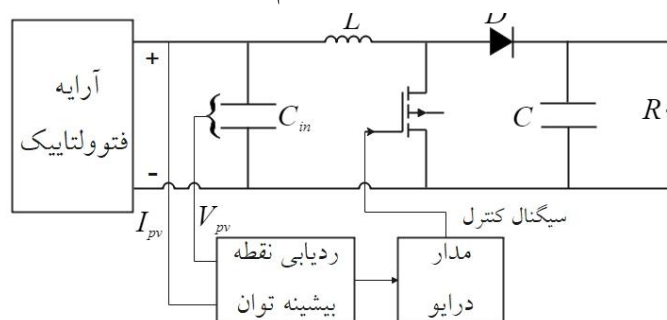
$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (75)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (76)$$

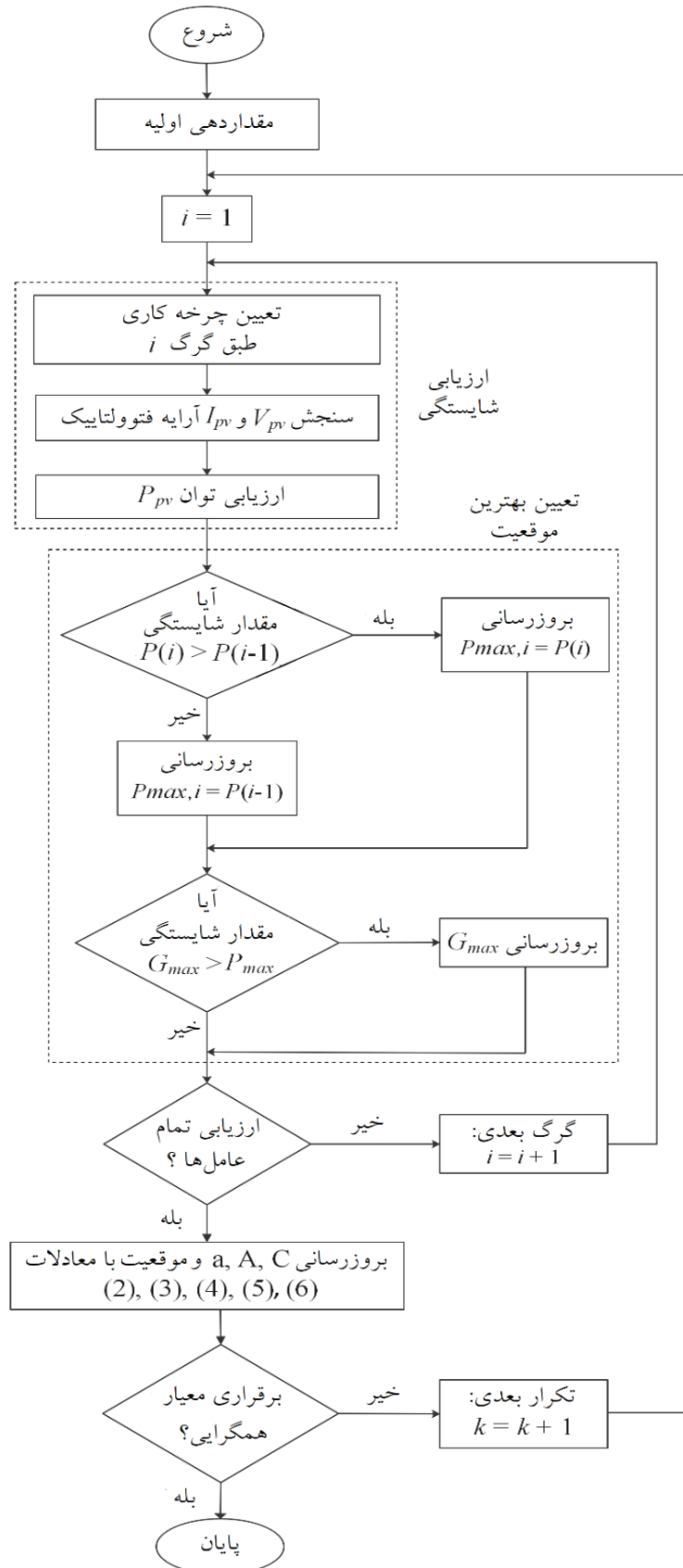
که در آن مقدار a در حین اجرای الگوریتم بطور خطی از 2 به 0 کاهش می‌یابد و r_1 و r_2 بردارهای تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ هستند. شکار بطور معمول توسط گرگ آلفا (رهبر گروه) هدایت می‌شود و گرگ‌های بتا و دلتا از گرگ آلفا پیروی می‌کنند که ممکن است گاهی در شکار شرکت کنند. دلتا و امگا از گرگ‌های معجروح در گروه مراقبت می‌کنند. بنابراین، آلفا با داشتن دانش بهتر در مورد مکان طعمه به عنوان پاسخ‌کننده در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که طعمه از حرکت می‌ایستد، گرگ‌های خاکستری شکار را با حمله به آن به پایان می‌رسانند.

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

بلوک-دیاگرام طرح ردیابی نقطه بیشینه توان پیشنهادی برای سیستم فتوولتاییک در شکل (۵) نشان داده شده است. پارامترهای V_{pv} و I_{pv} از طریق حسگرهایی تحت سنسجش قرار می‌گیرند و توان خروجی مطلوب بر مبنای این سنسجش‌ها و نسبت کاری (موقعیت هر گرگ) در کنترل‌کننده محاسبه می‌شود. شکل (۶) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.



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



شکل ۶. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

در شرایط سایه جزئی، منحنی ولتاژ-توان توسط چندین ناحیه با نقطه بیشینه محلی و یک نقطه بیشینه سراسری تقسیم‌بندی می‌شود. بایستی دقت شود هنگامی که گرگ‌ها به نقطه بیشینه توان دست می‌یابند، بردارهای ضرایب همبستگی آنها تقریباً برابر با صفر می‌شود. در روش پیشنهادی، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری با کنترل چرخه کاری مستقیم ترکیب شده است، یعنی در نقطه توان بیشینه، چرخه کاری در یک مقدار ثابت حفظ می‌شود و بدین ترتیب نوسانات موجود در تکنیک‌های ردیابی نقطه بیشینه توان مرسوم را کاهش می‌دهد و به علت کاهش افت توان، بازده سیستم را نیز بهبود می‌بخشد. به منظور پیاده‌سازی طرح ردیابی نقطه بیشینه توان بر مبنای بهینه‌سازی گرگ خاکستری، چرخه کاری d در غالب یک گرگ خاکستری تعریف می‌شود. بنابراین، رابطه‌ی (۷۴) را می‌توان طبق رابطه‌ی (۷۷) اصلاح کرد:

$$d_i(k+1) = d_i(k) - A \cdot D \quad (77)$$

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

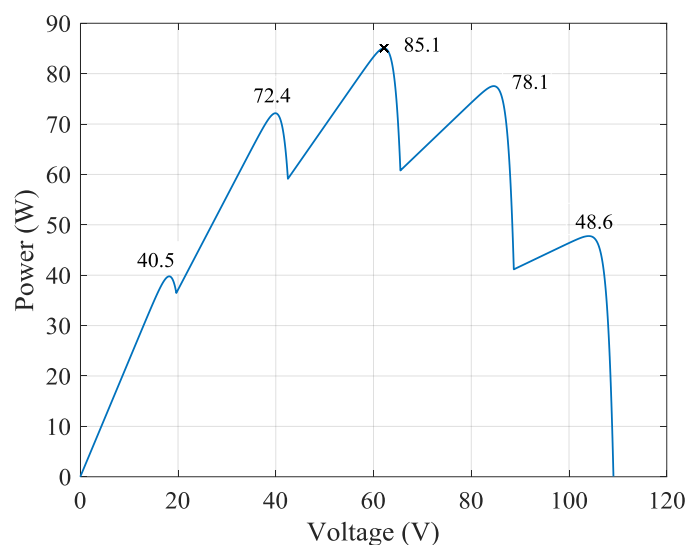
$$P(d_i^k) > P(d_i^{k-1}) \quad (78)$$

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

۴- نتایج و بحث

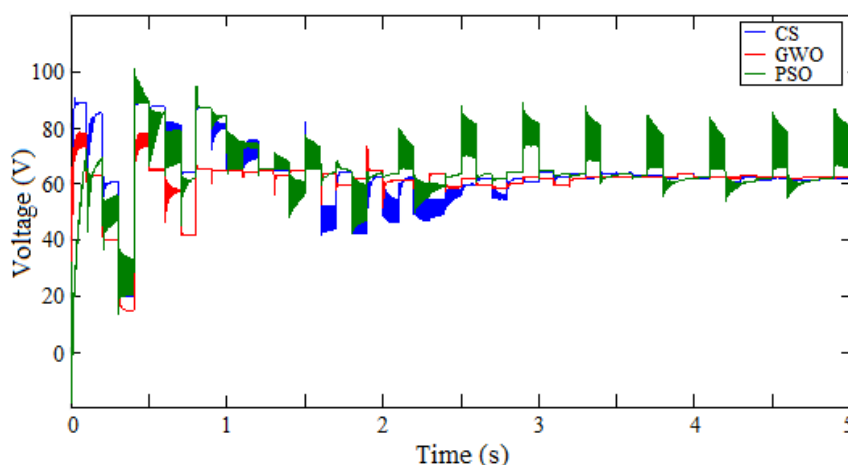
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ردیابی نقطه بیشینه توان فراابتکاری بر مبنای بهینه‌سازی گرگ خاکستری، عملکرد آن با الگوریتم‌های جستجوی فاخته و بهینه‌سازی ازدحام ذرات مورد مقایسه قرار گرفت. تمام الگوریتم‌های مذکور تحت شرایط سایه جزئی و میزان تابش با تغییرات سریع برای پیکربندی‌های $4S$ و $2S2P$ پیاده‌سازی شد. برای مطالعات شبیه‌سازی، پارامترهای مدل یک-دیودی مازول فتوولتائیک در شرایط نامی به این قرار اتخاذ شده‌اند: $I_{sc} = 8.21A$, $V_{oc} = 32.8V$, $P_{max} = 200W$, $V_{mp} = 26.3V$ و $I_{mp} = 7.61A$. اجزای مبدل مورد استفاده در شبیه‌سازی به این قرار انتخاب شده‌اند: $L = 10mH$, $f_s = 25kHz$, $V_{out} = 300V$, $V_{in} = (0 - 130V)$, $C = 330\mu F$, $C_{in} = 100\mu F$, $C_{1,max} = 2$, $\omega_{min} = 0.1$, $\omega_{max} = 1$. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به این ترتیب است: $c_{1,min} = 1$, $c_{1,max} = 2$, $c_{2,min} = 1$, $c_{2,max} = 2$ و پارامتر a در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بطور خطی از مقدار 2 به 0 کاهش می‌یابد.

در شکل (۷) نمودار توان-ولتاژ مربوط به الگوریتم گرگ خاکستری آورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، این منحنی دارای چهار نقطه‌ی بیشینه محلی و یک نقطه‌ی بیشینه سراسری است. بیشینه‌های محلی در نقاط با توان 72.4، 40.5 و 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 فتوولتائیک با الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

نتایج مربوط به ولتاژ، جریان و توان خروجی حاصل از اعمال 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 می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، الگوریتم گرگ خاکستری قادر است با نوسانات کمتری نسبت به دو الگوریتم دیگر، نقاط ولتاژ را ردیابی کند. میانگین فراجش‌ها و فرونشست‌ها و همچنین زمان فرونشست با توجه به این الگوریتم نسبت به دو الگوریتم دیگر کمتر می‌باشد. طبیعی است که دنبال کردن سریع‌تر با نوسانات کمتر و دقت بالاتر، کیفیت بالاتر توان خروجی را نتیجه خواهد داد. یک فرونشست به میزان 24% در ابتدای بازه شبیه‌سازی در زمان 0.4 s مشاهده می‌شود. در این زمان، الگوریتم جست و جو به میزان 10% بهتر عمل کرده است. البته همچنان در زمان 0.4s بدترین فرونشست مربوط به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است که حدود 26% می‌باشد. نتایج عددی مربوط به پروفایل ولتاژ در جدول (۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که زمان نشست با معیار 5% لحاظ شده است یعنی زمانی که خروجی برای اولین بار به بازه $\pm 5\%$ مقدار نهایی می‌رسد و در این بازه باقی می‌ماند.



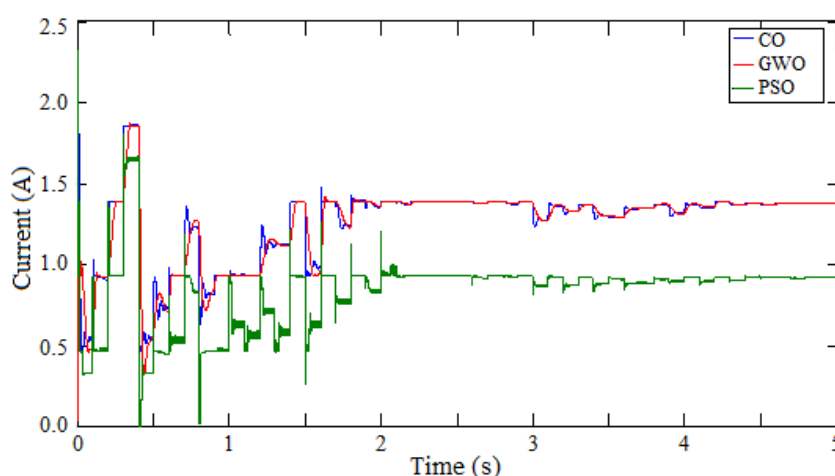
شکل ۸. پروفایل ولتاژ

جدول ۱. مقایسه عددی برای پروفایل ولتاژ.

کمیت	بیشینه فراجهش (%)	کمینه فرونشست (%)	زمان نشست (ثانیه)	نوسانات دایمی (%)
بهینه‌سازی گرگ خاکستری	13	24	0.2	1
جستجوی فاخته	20	20	0.4	1.6
بهینه‌سازی ازدحام ذرات	24	26	0.35	2.1

اگرچه الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهتر از جستجوی فاخته و الگوریتم جستجوی فاخته بهتر از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات عمل کرده است، ولی برای مثال جستجوی فاخته زمان نشست طولانی‌تری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در یک لحظه خاص داشته است ولی به طور متوسط، عملکرد این الگوریتم از الگوریتم بهینه‌سازی 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 می‌تواند 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 می‌شود. مشخص است که جریان خروجی آرایه برای الگوریتم بهینه‌سازی 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 می‌شود، مقدار متوسط جریان برای الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری و جستجوی فاخته تقریباً مشابه است. از نظر میزان نوسانات و سرعت پاسخ، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهترین عملکرد و کوتاه‌ترین زمان نشست را دارا می‌باشد و بدترین نتیجه نیز از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات حاصل می‌شود. نتایج عددی مربوط به پروفایل جریان در جدول (۲) آورده شده است.

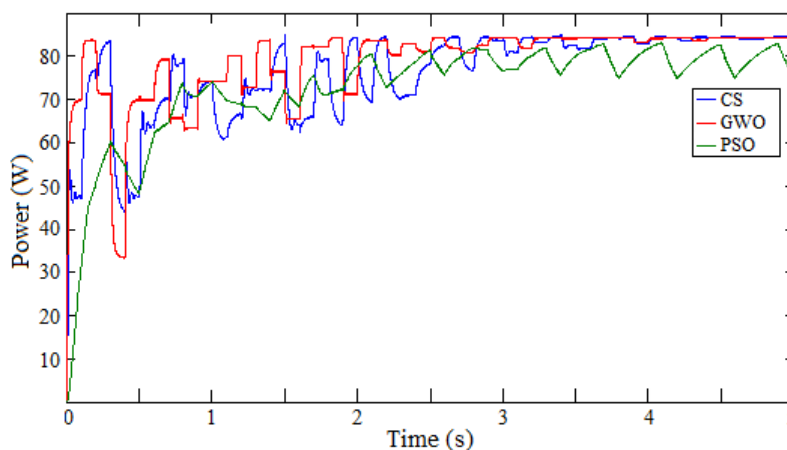


شکل ۹. پروفایل جریان خروجی.

جدول ۲. مقایسه عددی برای پروفایل جریان.

کمیت	بیشینه فراجش (%)	کیمنه فرونشست (%)	زمان نشست (ثانیه)	نوسانات دایمی (%)
الگوریتم				
بهینه‌سازی گرگ خاکستری	11	21	0.12	0.9
جستجوی فاخته	18	16	0.32	1.1
بهینه‌سازی ازدحام ذرات	22	14	0.34	2.2

پیرو نتایج قبلی مربوط به ولتاژ و جریان، می‌توان انتظار داشت که توان خروجی با الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهتر از دو الگوریتم دیگر باشد و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به ضعیف‌ترین نتیجه ختم شود. پروفایل توان خروجی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، خروجی توان حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری کمترین نوسان را ثبت می‌کند و توان خروجی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات دارای نوسانات نسبتاً بزرگی است که به افزایش افت توان، کاهش سرعت پاسخ و کاهش بازده سیستم فتوولتائیک منجر می‌شود. با توجه به شکل (۱۰)، بعد از زمان 2.5 s ، که نوسانات توان حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری و جستجوی فاخته به مقداری کوچکی می‌رسد، توان حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، نوسانات بزرگی را تجربه می‌کند. مقایسه عددی پروفایل توان خروجی در جدول (۳) خلاصه شده است. با توجه به (۳)، مقادیر بیشینه فراجش، زمان نشست و نوسانات ماندگار الگوریتم پیشنهادی به ترتیب تا 40.91% ، 66.67% و 59.1% کاهش را نسبت به طرح‌های مورد مقایسه نشان می‌دهد. علاوه بر آن، یک مقایسه کمی بین روش‌های مختلف ردیابی نقطه بیشینه توان با همگرایی سریع در جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۱۰. توان خروجی.

جدول ۵. مقایسه عددی برای پروفایل توان.

کمیت	بیشینه فراجش (%)	کیمنه فرونشست (%)	زمان نشست (ثانیه)	نوسانات دایمی (%)
الگوریتم				
بهینه‌سازی گرگ خاکستری	13	21	0.11	0.9
جستجوی فاخته	18	16	0.30	1.1
بهینه‌سازی ازدحام ذرات	22	21	0.33	2.1

جدول ۴. مقایسه طرح پیشنهادی با تکنیک‌های دیگر ردیابی نقطه بیشینه توان تحت شرایط سایه جزئی.

نوع / کمیت	آشفتن و مشاهده	بهینه‌سازی ازدحام ذرات	مرجع [15]	مرجع [32]	روش پیشنهادی
سرعت ردیابی	کند	متوسط	تند	تند	خیلی تند
نوسانات گذرای توان	کم	بالا	متوسط	متوسط	کم
دقت ردیابی	کم	دقیق	خیلی دقیق	خیلی دقیق	خیلی دقیق
همگرایی به بیشینه سراسری	خیر	بلی	بلی	بلی	بلی
تعداد پارامترهای تنظیم	1	6	1	2	1
نوسانات حالت ماندگار	بزرگ	صفر	صفر	صفر	صفر
بازده توان	کم	بالا	بالا	بالا	بالا
پیچیدگی پیاده‌سازی	کم	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
پاسخ دینامیکی	ضعیف	خوب	خوب	خوب	خوب

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 مناسب‌تری دارد. ولی در کل، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری کارایی بهتری از خود نشان می‌دهد. دلیل این امر می‌تواند 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 می‌شود و از گیر کردن در نقاط بهینه‌ی محلی جلوگیری می‌کند. فاز استخراج نیز دقت پاسخ را افزایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

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

مراجع

- [۱] 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 .
- [۲] 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 .
- [۳] 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 .
- [۴] 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 .
- [۵] 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 .
- [۶] 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 .
- [۷] 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 .
- [۸] 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 .
- [۹] 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 .
- [۱۰] 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 .
- [۱۱] 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 .
- [۱۲] 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 .
- [۱۳] 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 .
- [۱۴] 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 .
- [۱۵] 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 .
- [۱۶] M. Alsumiri, "Residual Incremental Conductance Based Nonparametric MPPT Control for Solar Photovoltaic Energy Conversion System," *IEEE Access* , vol. 7, pp. 87901-87906, 2019 .

- [۱۷] 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 .
- [۱۸] 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 .
- [۱۹] 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 .
- [۲۰] T. Hai, J. Zhou and K. Muranaka, "An efficient fuzzy-logic based MPPT controller for grid-connected PV systems by farmland fertility optimization algorithm," *Optik*, vol. 267, 2022, 169636 .
- [۲۱] 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 .
- [۲۲] 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 .
- [۲۳] S. Rizzo and G. Scelba, "ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions," *Applied Energy*, vol. 145, pp. 124–132, 2015 .
- [۲۴] 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 .
- [۲۵] 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 .
- [۲۶] 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 .
- [۲۷] 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 .
- [۲۸] 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 .
- [۲۹] 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 .
- [۳۰] 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 .
- [۳۱] 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 .
- [۳۲] 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 .
- [۳۳] 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 .

- [۳۴] 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 .
- [۳۵] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Adv. Eng. Software*, vol. 69, p. 46-61, 2014 .
- [۳۶] 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 .
- [۳۷] 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.