




## The Optimal Design of HVDC Transmission Lines for the Improvement of Reactive Power Distribution Using Genetic Algorithm

Ali Mohammadi

Assistance Prof. Department of Electrical and Computer Engineering, Vahdat Institute of Higher Education, Torbat-e Jam, Iran.. Email: [a.mohammadi98@yahoo.com](mailto:a.mohammadi98@yahoo.com)

Article Info	ABSTRACT
<p><b>Article type:</b> Research Article</p> <p><b>Article history:</b> Received 2022 Apr 1 Received in revised form 2022 May 3 Accepted 2022 May 11 Published online 2022 Sep 16</p> <p><b>Keywords:</b> AC-DC System, Genetic Algorithm, HVDC Transmission Lines, Integrated Reactive Power.</p>	<p>The proposed control scheme in this paper is based on the design of an optimal load distribution of reactive power for High-Voltage Direct-Current systems (HVDCs). The purpose is to monitor and implement appropriate operations to create a balance in the power and eliminate the voltage or current that has exceeded the permissible limit. Two-terminal HVDC transmission lines are of the most important elements of the power system. The optimization of reactive power distribution for power systems is defined based on the minimization of power loss under equal and unequal constraints. The problem of optimizing the reactive power distribution in integrated AC-DC power systems in the form of HVDC lines is generalized with regard to the control specifications for power transmission. In this paper, the problem is solved using Genetic Optimization Algorithm (GA). The validation, efficiency and the effectiveness of the proposed method are measured by comparing the results of the GA and those obtained by previous researches. Results indicate the effectiveness of the proposed method in the optimization of power distribution and the design of HVDC lines</p>
<p><b>Cite this article:</b> Mohammadi, A. (2022). The Optimal Design of HVDC Transmission Lines for the Improvement of Reactive Power Distribution Using Genetic Algorithm. <i>Engineering Management and Soft Computing</i>, 8 (1). 138-150. DOI: <a href="https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1326">https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1326</a></p>	
	<p>© The Author(s) DOI: <a href="https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1326">https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1326</a></p>
<p>Publisher: University of Qom</p>	

## طراحی بهینه خطوط انتقال HVDC جهت بهبود پخش توان راکتیو با استفاده از الگوریتم ژنتیک

علی محمدی 

مربی، مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی وحدت، تربت جام، ایران. رایانامه: [mohammadi@vahdat.ac.ir](mailto:mohammadi@vahdat.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	طرح کنترلی ارائه شده برای پیاده‌سازی در این مقاله بر اساس طرح پخش بار بهینه توان راکتیو برای سیستم‌های جریان مستقیم-ولتاژ بالا (HVDC) است. هدف، نظارت و انجام عملیات مناسب جهت ایجاد تعادل توان و حذف ولتاژ یا جریانی است که از حد مجاز تخطی کرده باشد. خطوط انتقال HVDC دو ترمیناله یکی از مهم‌ترین المان‌های سیستم قدرت هستند. بهینه‌سازی پخش توان راکتیو برای سیستم‌های قدرت، مبتنی بر کمینه‌سازی تلفات توان در پرتو تحقق قیود تساوی و نامساوی تعریف می‌شود. مسئله بهینه‌سازی پخش توان راکتیو در سیستم‌های قدرت یکپارچه AC-DC به صورت خطوط HVDC با در نظر گرفتن مشخصات کنترلی انتقال توان تعمیم یافته است. در این مقاله، این مسئله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA) حل شده است. اعتبارسنجی، کارایی و اثربخشی روش پیشنهادی با استفاده از مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم GA و نتایج گزارش شده توسط مراجع گذشته مهیا می‌شود که بیانگر موفقیت روش پیشنهادی در بهینه‌سازی پخش توان و طراحی خطوط HVDC است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۱۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۲۵	
کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، توان راکتیو، خطوط انتقال HVDC، سیستم یکپارچه AC-DC.	

استناد: محمدی، علی (۱۴۰۱). «طراحی بهینه خطوط انتقال HVDC جهت بهبود پخش توان راکتیو با استفاده از الگوریتم ژنتیک». مدیریت مهندسی و رایانش

نرم، دوره ۱ (۱). صص: ۱۵۰-۱۳۸. <https://doi.org/10.22091/jemsc.2019.1326>



© نویسنده گان.

ناشر: دانشگاه قم

## ۱) مقدمه

پخش بهینه توان راکتیو<sup>۱</sup> یکی از معضلات سیستم‌های انرژی است که علوم زیادی در مدت طولانی سعی در حل آن دارند (سیاح، ۲۰۱۸؛ لنین و همکاران، ۲۰۱۵؛ پراساد و همکاران، ۲۰۱۷). در این راستا مسئله عمده، کمینه‌سازی تلفات توان در یک شبکه انرژی است. به عبارت دیگر، هدف ما کمینه‌سازی تابع هدف سیستم انرژی است که همان تلفات توان است. به طور همزمان، تابع هدف کل سیستم تحت قیود تساوی و نامساوی کمینه می‌شود. قیود تساوی و نامساوی در یک سیستم صرفاً AC تعادل توان باس‌ها و قیود فیزیکی سیستم انرژی می‌باشد. تمامی قیود باید محقق شده و در عین حال تلفات توان کل سیستم کمینه شود.

تاکنون روش‌های متعددی برای حل مسئله پخش بهینه توان راکتیو در سیستم‌های صرفاً AC استفاده شده است که به دو دسته روش‌های عددی و ابتکاری تقسیم می‌شوند. بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات گذشته، روش‌های ابتکاری نسبت به روش‌های عددی برتری دارند (لی و همکاران، ۲۰۱۳؛ یاپیک و ستیکایا، ۲۰۱۶؛ راجان و مالاکارا، ۲۰۱۵). در مطالعه راجا و مالاکاران (۲۰۱۵) یک الگوریتم هیبریدی جدید با ترکیب الگوریتم کرم شب تاب (FA<sup>۲</sup>) و روش ساده نلدر-مید (NM<sup>۳</sup>) برای حل مسائل مربوط به پخش بهینه توان راکتیو سیستم‌های قدرت ارائه شده است. به عقیده راجا و مالاکاران (۲۰۱۵) مسئله مذکور جنبه بسیار مهم در عملکرد سیستم قدرت است و نوعی مشکل بهینه‌سازی غیرخطی و غیرمحدب به شمار می‌رود که شامل هر دو نوع متغیر کنترل پیوسته و گسسته نیز می‌باشد. از این رو، در مطالعه راجا و مالاکاران (۲۰۱۵) روشی مبتنی بر جستجوی محلی کارآمد به نام NM در معماری داخلی الگوریتم FA اصلی پیشنهاد و به واسطه الگوریتم پیشنهادی (HFA) از همگرایی زودرس روش استاندارد FA پیشگیری شده است. روش پیشنهادی برای تعیین تنظیمات بهینه ولتاژهای ژنراتور، موقعیت شیر در ترانسفورماتور لغزانه و خروجی VAR خازن‌های شنت برای بهینه‌سازی دو تابع هدف مختلف هدف مورد بر روی دو سیستم آزمون IEEE استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲) پیشینه پژوهش

کمینه‌سازی تلفات توان در یک شبکه توزیع واقعی توسط حل مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو در مطالعه یاپیک و ستیکایا (۲۰۱۶) توصیف شده است. رویکرد پیشنهادی مبتنی بر به کارگیری یک الگوریتم کرم شب تاب بی‌نظم (CFA<sup>۴</sup>) جدید و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO<sup>۵</sup>) برای کمینه‌کردن اتلاف توان در شبکه توزیع واقعی ارائه و مسئله با اتلاف‌های توان حداقل با استفاده از مقدار بهینه توان راکتیو حاصل شده است به طوری که فرمول‌بندی مسئله مورد مطالعه مقاله، شامل محدودیت‌های دقیق از جمله محدودیت‌های ولتاژ و مرز خازن لحاظ شده است. به زعم لی و همکاران (۲۰۱۳) پخش توان راکتیو بهینه یک مشکل انشعابی در توسعه تدریجی مسئله جریان توان بهینه است. در این مطالعه اظهار شده است که روش تکامل دیفرانسیل (DE<sup>۶</sup>) یک الگوریتم تکاملی مناسب برای حل مشکل پخش توان بهینه است، اما برای اجتناب از همگرایی زود هنگام نیاز به اندازه جمعیت نسبتاً بالایی دارد که باعث افزایش زمان همگرایی الگوریتم می‌شود. از سوی

<sup>۱</sup> Optimal Reactive Power Distribution

<sup>۲</sup> Firefly Algorithm (FA)

<sup>۳</sup> Nelder-Mead (NM)

<sup>۴</sup> Chaotic Firefly Algorithm (CFA)

<sup>۵</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

<sup>۶</sup> Differential Evolution (DE)

دیگر، با توجه به اثبات توانایی جستجوی سراسری مطلوب الگوریتم مصنوعی زنبور عسل ( $ABC^7$ )، یکپارچه‌سازی مزایای مربوط به DE و ABC منجر به ارائه یک الگوریتم ترکیبی به نام DE-ABC جهت غلبه بر ضعف DE در نیازمندی به جمعیت بزرگ و تقویت توانایی جستجوی سراسری شده است. در نهایت، اثربخشی روش مفروض به واسطه شبیه‌سازی بر روی حالت‌های آزمون سیستم‌های IEEE ۱۴، ۳۰ و ۵۷ باسه واکاوی شده است.

از جمله مزایای مهم روش‌های ابتکاری<sup>۸</sup> می‌توان به همگرایی به حل بهینه در زمان کوتاه‌تر بدون به دام افتادن در بهینه محلی اشاره نمود. با توجه به این که در سالیان اخیر مصرف انرژی سریعاً افزایش پیدا کرده است، نیاز است که ظرفیت تولید توان نیز افزایش پیدا کند که این امر ممکن است سبب اضافه بار خطوط انتقال شود. بدین ترتیب، حتی اغتشاشات کوچک نیز می‌تواند سبب خروج بخشی از سیستم انرژی از حالت سنکرونیزم<sup>۹</sup> گردد. این بخش از سیستم انرژی باید به صورت مجدد برنامه‌ریزی گردد تا از موقعیت‌های نامطلوب اجتناب شود و پیوستگی بهره‌برداری حفظ شود.

در سالیان اخیر، برنامه‌ریزان سیستم قدرت سعی در برنامه‌ریزی مجدد سیستم‌های قدرت نموده تا بتوانند توان بیشتری را از طریق خطوط HVDC<sup>۱۰</sup> انتقال دهند. انتقال توان از طریق خطوط HVDC مزایای زیادی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به عدم انتقال توان راکتیو از این خطوط و تلفات انرژی کمتر نسبت به خطوط انتقال طولانی سیستم‌های AC اشاره کرد. علاوه بر این، توان لحظه‌ای در مجاورت سیستم‌های AC قابلیت کنترل با خطوط HVDC را دارند. بنابراین خطوط HVDC برای پایداری سیستم‌های توان الکتریکی نیز استفاده می‌شوند (آیونی و همکاران، ۲۰۱۵). به تازگی تحقیقات زیادی برای درک مدل‌های خطوط HVDC انجام شده است (سیاح، ۲۰۱۸؛ آیان و کلیچ، ۲۰۱۶). مطالعه (آیان و کلیچ، ۲۰۱۶) تحقیقی حاوی یک تکنیک حل برای پخش توان بهینه سیستم‌های قدرت HVDC با استفاده از الگوریتم جستجوی عقب‌گرد ( $BSA^{11}$ ) ارائه می‌دهد. روش BSA از سری الگوریتم‌های تکاملی ( $EA^{12}$ ) مبتنی بر جمعیت است و برخلاف اکثر الگوریتم‌های فرا ابتکاری<sup>۱۳</sup>، به شرایط اولیه حساس نیست. الگوریتم پیشنهادی در مطالعه آیان و کلیچ (۲۰۱۶) به سه سیستم آزمون مختلف (سیستم آزمون ۵ باسه، ۹ باسه WSCC و ۳۹ باسه New England) اعمال شده است.

همچنین مطابق مطالعه (سیاح، ۲۰۱۸)، مسئله گسیل توان راکتیو بهینه یکی از مهم‌ترین توابع سیستم‌های مدیریت انرژی مدرن است که برای اطمینان از شرایط عملیاتی پایدار و مطمئن شبکه‌های برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این که در حال حاضر، سیستم‌های HVDC به علت مزایای اقتصادی و فنی، به طور گسترده در سیستم‌های برق قدرت مدرن مورد استفاده قرار می‌گیرند، پیوستن لینک DC پیچیدگی بیشتری را به محاسبات مسئله اعمال می‌کند. لذا سیاح (۲۰۱۸) یک الگوریتم تفاضل تکاملی پیشرفته مؤثر با استراتژی جهش جدید برای حل مسئله همراه یک لینک انتقال HVDC دو ترمیناله پیشنهاد کرده است. عملکرد استراتژی پیشنهادی بر روی دو سیستم هیبریدی AC-DC مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از سیستم آزمون ۳۹ باسه New England و شبکه الکتریکی مقیاس بزرگ و عملی ۱۱۴ باسه الجزایر. در مسئله پخش بهینه توان راکتیو سیستم‌های یکپارچه AC-DC، محدودیت‌های لینک DC در مسئله لحاظ می‌شوند. به طور کلی دو روش اساسی برای حل معادلات پخش بار وجود دارد. روش اول، روش متوالی است (پرز و همکاران، ۲۰۱۷؛ سانچز و همکاران، ۲۰۱۸). در این روش، معادلات AC

<sup>7</sup> Artificial Bee Colony (ABC)

<sup>8</sup> Heuristic Methods

<sup>9</sup> Synchronization Mode

<sup>10</sup> A High-Voltage Direct-Current (HVDC) Electric Power Transmission System

<sup>11</sup> Backtracking Search Algorithm (BSA)

<sup>12</sup> Evolutionary Algorithm (EA)

<sup>13</sup> Meta-Heuristic

و DC به صورت جداگانه و با استفاده از تکرارهای پی در پی حل می‌شوند. اگر چه پیاده‌سازی روش متوالی آسان است، اما در موقعیت‌های مشخصی دارای معضلاتی در مسئله همگرایی می‌باشد. روش دوم، روش یکپارچه است (فنگ و همکاران، ۲۰۱۳). در این مقاله از روش اول استفاده شده است.

شایان ذکر است که الگوریتم ژنتیک (GA<sup>۱۴</sup>) یک روش ابتکاری است که مبتنی بر انتخاب محلی است. اساس منطقی این الگوریتم مبتنی بر حیات موجودات قوی در طبیعت است. این الگوریتم شامل مراحل مختلفی از قبیل جمعیت اولیه، تابع هدف، انتخاب، جهش، تلفیق و معیار پایان‌پذیری می‌باشد. در این مقاله، الگوریتم GA مفروض برای حل مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو در سیستم‌های یکپارچه AC-DC استفاده می‌شود.

در ادامه مقاله، در بخش روش شناسی پژوهش مدلسازی ریاضی مسئله مورد مطالعه به طور کامل تشریح می‌شود. در ادامه الگوریتم ژنتیک به صورت مختصر بیان می‌شود. سپس نتایج و تحلیل‌های مربوطه نیز در بخش یافته‌های پژوهش گزارش می‌شوند. نتیجه‌گیری و پیشنهادها نیز پایان بخش مقاله حاضر است.

### ۳) روش شناسی پژوهش

#### ۳-۱) مدل‌سازی مسئله مورد مطالعه

قبل از تحلیل سیستم انتقال DC لازم است که مدل انتقال DC و مبدل‌ها ارائه شوند. در مدل ارائه شده فرضیاتی به شرح زیر وجود دارد (فنگ و همکاران، ۲۰۱۳):

۱) مقدار هارمونیک پایه ولتاژ و جریان سیستم‌های AC متعادل است.

۲) از دیگر هارمونیک‌ها جز هارمونیک اصلی صرف‌نظر می‌شود.

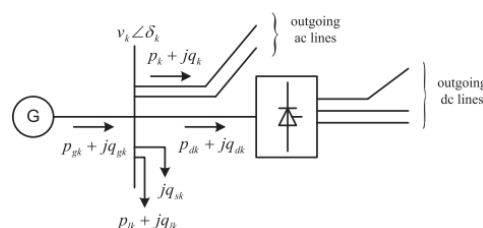
۳) از ریبیل‌های موجود در جریان و ولتاژ DC صرف‌نظر می‌شود.

۴) ترستورهای استفاده شده در مبدل‌ها دارای کلیدهای ایده‌آل می‌باشند.

۵) از جریان بی‌باری ترانسفورماتور مبدل‌ها و تلفات صرف‌نظر می‌شود.

یک باس AC دارای ژنراتور، خطوط AC، جبران‌سازهای موازی و مبدل است که در شکل ۱ نشان داده شده است

(به همراه روابط (۱) و (۲)).



شکل ۱. نمایش باس AC که به خطوط انتقال DC وصل شده است (فراهانی و رشیدی، ۲۰۱۷)

$$p_{gk} = p_{lk} + p_{dk} + p_k \quad \text{رابطه ۱}$$

$$q_{gk} + q_{sk} = q_{lk} + q_{dk} + q_k \quad \text{رابطه ۲}$$

<sup>14</sup> Genetic Algorithm (GA)

که در آن‌ها  $p_{gk}$  میزان تولید توان اکتیو در باس  $k$  ام،  $p_{lk}$  بار اکتیو باس  $k$  ام،  $p_{dk}$  توان اکتیو انتقالی به لینک DC از باس  $k$  ام،  $p_k$  توان اکتیو انتقالی به خط AC از باس  $k$  ام،  $q_{gk}$  میزان تولید توان راکتیو در باس  $k$  ام،  $q_{lk}$  بار راکتیو باس  $k$  ام،  $q_{dk}$  توان جذب شده توسط مبدل در باس  $k$  ام،  $q_k$  توان راکتیو انتقالی به خط AC از باس  $k$  ام و  $q_{sk}$  جبران‌ساز موازی در باس  $k$  ام می‌باشد. برای باس یکسوساز مطابق روابط (۳) و (۴) داریم:

$$p_{dk} = p_r \quad \text{رابطه (۳)}$$

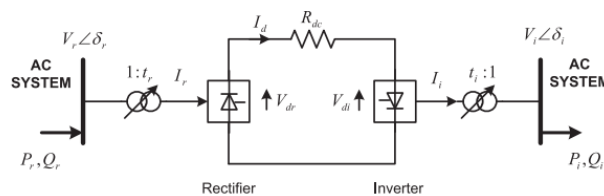
$$q_{dk} = q_r \quad \text{رابطه (۴)}$$

و برای باس اینورتر نیز طبق روابط (۵) و (۶) داریم:

$$P_{dk} = -P_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Q_{dk} = Q_i \quad \text{رابطه (۶)}$$

شماتیک اصلی یک خط انتقال HVDC دو ترمیناله که باس‌های یکسوساز (r) و اینورتر (i) را به هم متصل می‌کند، در شکل ۲ نشان داده شده است. معادلات اصلی مبدل که رابطه بین متغیرهای AC و DC را تشریح می‌کند، در مطالعه احمد و همکاران (۲۰۱۷) ارائه شده است. متغیرهای ارائه شده در شکل ۲ شامل  $v_r$  ولتاژ AC خط به خط اولیه در سمت یکسوساز،  $v_i$  ولتاژ AC خط به خط اولیه در سمت اینورتر،  $\varphi_r$  زاویه فاز سمت یکسوساز،  $\varphi_i$  زاویه فاز سمت اینورتر،  $i_r$  جریان AC سمت یکسوساز،  $i_i$  جریان AC سمت اینورتر،  $v_{dr}$  ولتاژ لینک DC سمت یکسوساز،  $v_{di}$  ولتاژ لینک DC سمت اینورتر،  $i_d$  جریان مستقیم و  $t$  نرخ تپ ترانسفورماتور<sup>۱۵</sup> است.



شکل ۲. نمایش خط انتقال HVDC دو ترمیناله (احمد و همکاران، ۲۰۱۷)

معادلات مربوط به بهره‌برداری یکسوساز یک مبدل را می‌توان به صورت روابط (۷) و (۸) بیان کرد:

$$v_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} t_r v_r \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$v_{dr} = v_{dor} \cos \alpha - r_{cr} i_d \quad \text{رابطه (۸)}$$

در روابط فوق،  $v_{dor}$  ولتاژ مستقیم بی‌باری ایده‌آل،  $\alpha$  زاویه آتش<sup>۱۶</sup> و  $r_{cr}$  مقاومت کموتاسیون<sup>۱۷</sup> معادل است که برای دروپ ولتاژ حاصل از همپوشانی کموتاسیون<sup>۱۸</sup> به کار گرفته می‌شود و با راکتانس کموتاسیون<sup>۱۹</sup> رابطه مستقیم دارد  $r_{cr} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} x_{cr}$ . توان اکتیو سمت یکسوساز از طریق رابطه (۹) تعیین می‌شود:

<sup>15</sup> Rate of Transformer Tap

<sup>16</sup> Angle of Fire

<sup>17</sup> Resistance Commutation

<sup>18</sup> Overlapping Commutation

<sup>19</sup> Reactance Commutation

$$p_r = v_{dr} i_d \quad \text{رابطه (۹)}$$

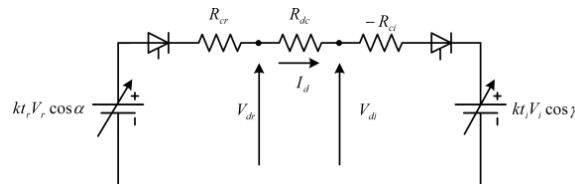
از آنجا که می توان از تلفات مبدل و ترانسفورماتور صرف نظر کرد ( $p_r = p_{ac}$ )، توان راکتیو سمت یکسوساز به شکل رابطه (۱۰) تعیین می شود:

$$q_r = |p_r \tan \rho_r| \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در رابطه (۱۰)،  $\rho_r$  زاویه فاز بین ولتاژ AC و جریان AC پایه است و با صرف نظر از همپوشانی کموتاسیون به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می شود:

$$\rho_r = \cos^{-1} \left( \frac{v_{dr}}{v_{dor}} \right) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

مدار معادل لینک HVDC دو ترمیناله در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مدار معادل لینک HVDC دو ترمیناله (کاندر و همکاران، ۱۹۹۴)

روابط مربوط به بهره برداری اینورتر مبدل به صورت روابط (۱۲) تا (۱۶) تعریف می شود:

$$v_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} t_i v_i \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$v_{di} = v_{doi} \cos \gamma - r_{ci} i_d \frac{3\sqrt{2}}{\pi} t_i v_i \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$p_i = v_{di} i_d \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$q_i = |p_i \tan \rho_i| \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\rho_i = \cos^{-1} (v_{di} / v_{doi}) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در رابطه (۱۳)،  $\gamma$  زاویه خاموشی است. رابطه بین ولتاژهای دو سر لینک DC مطابق رابطه (۱۷) بیان می شود:

$$v_{dr} = v_{di} + r_{dc} i_d \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در رابطه فوق،  $r_{dc}$  مقاومت لینک DC است.

برای حل مسئله بهینه سازی پخش توان راکتیو در سیستم های HVDC، باید متغیرها و تابع هدف تعیین شوند. متغیرهای کنترلی در واقع همان متغیرهای بهینه سازی هستند که پس از اجرای الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه آنها استخراج می شود. متغیرهای کنترلی در نظر گرفته شده برای این مسئله، شامل متغیرهای DC سیستم AC-DC هستند:

$$u = [u_{DC}] \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$u_{DC} = [p_{dr}, p_{di}, q_{dr}, q_{di}, t_r, t_i, \alpha, \gamma, v_{dr}, v_{di}, i_d] \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

برای بروزرسانی توان‌های اکتیو و راکتیو یکسوساز و اینورتر باس، از روابط (۲۰) و (۲۱) استفاده می‌شود. برای باس یکسوساز داریم:

$$p_{load}^{update} = p_{load} + p_r \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$q_{load}^{update} = q_{load} + q_r$$

$$p_{load}^{update} = p_{load} - p_r \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$q_{load}^{update} = q_{load} - q_r$$

تابع هدف برای هر ذره در فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک به صورت رابطه (۲۲) بیان می‌شود که در آن  $q_{gi}^{lim}$ ،  $p_{slack}^{lim}$  بیانگر محدودیت‌های متغیرهای مربوطه می‌باشند. پارامترهای  $k_4$ ،  $k_3$ ،  $k_2$ ،  $k_1$ ،  $k_5$ ،  $k_6$ ،  $k_7$ ،  $k_8$ ،  $k_9$  و  $k_{10}$  به ترتیب وزن‌های جریمه تلفات توان، توان حقیقی خروجی باس اسلک، توان راکتیو خروجی باس‌های ژنراتور، اندازه ولتاژ باس‌های بار، نسبت تبدیل مؤثر ترانسفورماتور در بخش‌های اینورتر و یکسوساز، زاویه سمت یکسوساز، زاویه سمت اینورتر، ولتاژ مستقیم یکسوساز و ولتاژ مستقیم اینورتر می‌باشند (مطابق رابطه (۲۲)).

$$F_i = k_1 p_{loss} + k_2 |p_{slack} - p_{slack}^{lim}| + k_3 \sum_{i=1}^{N_g} |q_{gi} - q_{gi}^{lim}| + k_4 \sum_{i=1}^{N_l} |v_{li} - v_{li}^{lim}| \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$+ k_5 |t_r - t_r^{lim}| + k_6 |t_i - t_i^{lim}| + k_7 |\alpha - \alpha^{lim}| + k_8 |\lambda - \lambda^{lim}| + k_9 |v_{dr} - v_{dr}^{lim}| + k_{10} |v_{di} - v_{di}^{lim}|$$

در رابطه (۲۲)،  $p_{loss}$  به شکل رابطه (۲۳) تعریف می‌شود:

$$p_{loss} = \sum_{i=1}^{N_g} g_i - \sum_{j=1}^N p_j \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

برای کمینه‌سازی تابع هدف کلی که در رابطه (۲۲) آمده است، از الگوریتم GA استفاده می‌شود (هوک و همکاران، ۱۹۹۵).

#### ۴) الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک روش بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت جاندار (موجودات زنده) است. از الگوریتم GA در طبقه‌بندی‌ها به عنوان یک روش عددی جستجوی مستقیم و تصادفی یاد می‌شود. این الگوریتم، رویکردی مبتنی بر تکرار دارد و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده و با تقلید از تعدادی از فرآیندهای مشاهده شده در تکامل طبیعی اختراع شده است و به طور مؤثر از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می‌کند تا راه‌حل‌های جدید و بهبود یافته ایجاد کند. الگوریتم GA در مسائل متنوعی نظیر بهینه‌سازی، شناسایی و کنترل سیستم، پردازش تصویر و مسائل ترکیبی، تعیین توپولوژی و آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های مبتنی بر تصمیم و قاعده به کار می‌رود.

الگوریتم ژنتیک، جستجوی اصلی را در فضای پاسخ به اجرا می‌گذارد. این الگوریتم با تولید نسل<sup>۲۰</sup> آغاز می‌شوند که وظیفه ایجاد مجموعه نقاط جستجوی اولیه به نام «جمعیت اولیه<sup>۲۱</sup>» را بر عهده دارند و به طور انتخابی یا تصادفی تعیین می‌شوند. از آنجا که الگوریتم‌های ژنتیک برای هدایت عملیات جستجو به طرف نقطه بهینه از روش‌های آماری استفاده می‌کنند، در

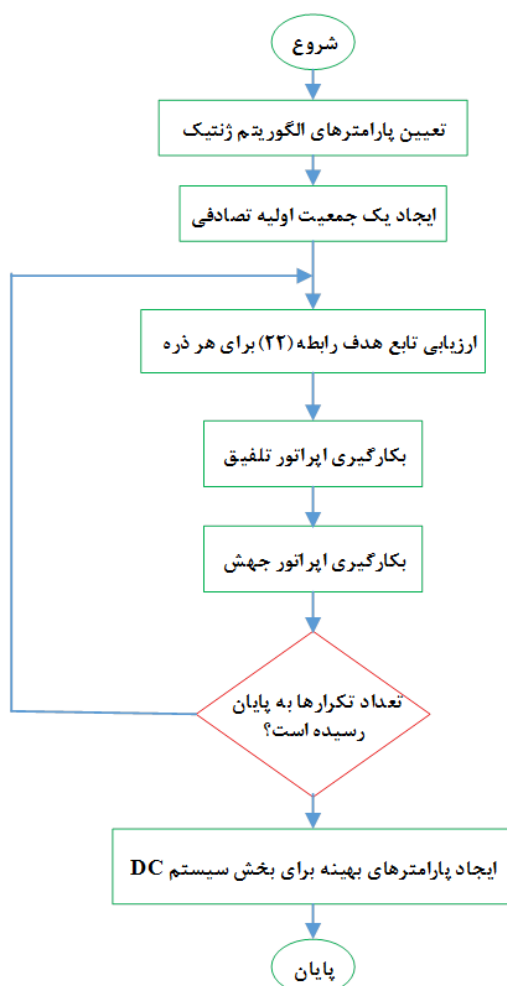
<sup>20</sup> Seeding

<sup>21</sup> Initial Population



فرآیندی که به انتخاب طبیعی وابسته است، جمعیت موجود به تناسب برازندگی افراد آن برای نسل بعد انتخاب می‌شود. سپس عملگرهای ژنتیکی شامل نظیر تلفیق، جهش و دیگر عملگرهای احتمالی اعمال شده و جمعیت جدید به وجود می‌آید. پس از آن، جمعیت جدیدی جایگزین جمعیت پیشین می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد. معمولاً جمعیت جدید برازندگی بیشتری دارد؛ این بدان معناست که از نسلی به نسل دیگر جمعیت بهبود می‌یابد. هنگامی جستجو نتیجه‌بخش خواهد بود که به حداکثر نسل ممکن رسیده باشد، همگرایی حاصل شده باشد یا معیارهای توقف برآورده شده باشند.

فلوچارت حل مسئله مورد مطالعه در این مقاله توسط الگوریتم ژنتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق روند اجرایی الگوریتم در فلوچارت شکل ۴، با شروع اجرای GA ابتدا مقادیر پارامترهای کنترلی اولیه نظیر اندازه جمعیت تصادفی اولیه، مقادیر حداقل و حداکثر متغیرهای مسئله مورد طراحی و تعداد تکرارهای الگوریتم تعیین می‌شوند. سپس یک جمعیت اولیه از افراد به طور اتفاقی و بدون در نظر گرفتن معیار خاصی انتخاب می‌شود. برای تمامی کروموزوم‌های (افراد، ذره) نسل صفر مقدار برازندگی با توجه به تابع هدف محاسبه می‌شود. سپس با مکانیزم‌های مختلف تعریف شده برای عملگر انتخاب، زیرمجموعه‌ای از جمعیت اولیه انتخاب و عملیات تلفیق و جهش در صورت لزوم با توجه به صورت مسئله اعمال خواهد شد.



شکل ۴. نمایش ساده فلوچارت الگوریتم ژنتیک (تقوی و سیفی، ۲۰۱۲)

حال باید افرادی که مکانیزم الگوریتم ژنتیک بر آن‌ها اعمال شده است، با افراد جمعیت اولیه (نسل صفر) از لحاظ مقدار برازندگی مقایسه شوند که در نهایت افرادی باقی خواهند ماند که بیشترین مقدار برازش را داشته باشند. چنین افرادی در مقام یک مجموعه به عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعدی الگوریتم به شمار می‌روند. هر مرحله تکرار الگوریتم یک نسل جدید را ایجاد می‌کند که با توجه به اصلاحاتی که در آن صورت پذیرفته است، رو به سوی تکامل خواهد داشت. این رویه بهینه‌سازی الگوریتم تا همگرایی به حداقل بهینه ممکن یا احراز هر یک از شروط توقف ادامه یافته و در نهایت مقادیر تخمینی بهینه برای متغیرهای مسئله استخراج می‌شود.

## ۵) یافته‌های پژوهش

مشخصات لینک DC برای سیستم ۱۴ باسه تست در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات مربوط به الگوریتم GA نیز در جدول ۲ لیست شده‌اند. مقادیر کنترلی جدول ۲ مبتنی بر فضای پاسخ مسئله مورد نظر و با توجه به حصول حداکثر بهره‌وری و همگرایی مطلوب الگوریتم ژنتیک اتخاذ شده است. به طوری که به دلیل تعدد متغیرهای طراحی، تعداد جمعیت بالا و از طرفی مقدار تکرارهای الگوریتم در جهت کاهش نسبی زمان اجرا، شبیه‌سازی کم و برابر با ۵۰ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مقادیر نرخ تلفیق (همبری<sup>۲۲</sup>) و جهش نیز مطابق با مکانیزم عملکردی الگوریتم زیستی اتخاذ شده است؛ به نحوی که یک مصالحه مطلوب بین مفاهیم کاوش<sup>۲۳</sup> و بهره‌وری<sup>۲۴</sup> در طول فرایند اجرایی الگوریتم برقرار و نتایج بهینه با حداقل‌های سراسری<sup>۲۵</sup> در فضای حل مسئله مورد نظر حاصل شود.

جدول ۱. مشخصات لینک DC سیستم ۱۴ باسه تست

پارامتر	یکسوساز	اینوتر
شماره باس	۵	۴
راکتانس کموتسیون (پریونیت)	۰/۱۲۶۰	۰/۰۷۲۷۵
مقاومت لینک DC (پریونیت)	۰/۰۰۳۳۴	-----

جدول ۲. مشخصات الگوریتم GA

پارامتر	مقدار
اندازه جمعیت	۲۰۰
تعداد تکرارها	۵۰
احتمال تلفیق	۰/۹۵
احتمال جهش	۰/۳

باید توجه داشت که با توجه به این که الگوریتم ژنتیک از مجموعه روش‌های تکاملی مبتنی بر جمعیت است، لذا اندازه جمعیت<sup>۲۶</sup> نقش بسزایی در قدرت الگوریتم در جستجوی نقاط بهینه دارد؛ به طوری که اندازه جمعیت کم موجب

<sup>۲۲</sup> Crossover

<sup>۲۳</sup> Exploration

<sup>۲۴</sup> Exploitation

<sup>۲۵</sup> Global minimum

<sup>۲۶</sup> Population size

همگرایی زودرس الگوریتم به پاسخ بهینه محلی و نامطلوب و در مقابل نیز اندازه جمعیت خیلی زیاد می‌تواند امکان همگرایی دیر هنگام و افزایش زمان اجرای الگوریتم را به دنبال داشته باشد. بنابراین، تعیین یک نرخ تلفیق و جهش مناسب نیز از جمله موارد مهم و اساسی در فرایند بهینه‌سازی با استفاده از این نوع از الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی است که باید در مسئله مورد نظر به درستی لحاظ گردد.

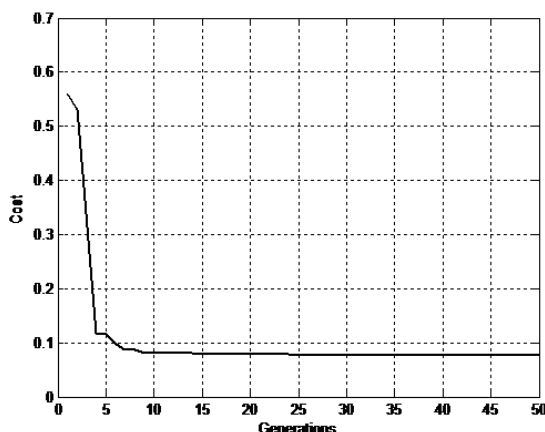
در این مقاله و در راستای افزایش قدرت همگرایی الگوریتم در بهره‌وری نقاط بهینه سراسری و مطلوب، مقدار احتمال تلفیق زیاد و برابر با ۰/۹۵ و جهت افزایش قدرت کاوش الگوریتم و جستجوی کامل فضای حل و فرار از نقاط بهینه محلی احتمالی و جلوگیری از گیر افتادن در نقاط حداقل نامطلوب، مقدار احتمال جهش برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است. البته این مقدار در مقایسه با سایر پژوهش‌های مشابه به نسبت زیاد است ولی این استراتژی کنترلی الگوریتم مبتنی بر فضای چالشی حل مسئله مورد مطالعه در این مقاله و تعدد متغیرهای طراحی آن است که نتایج شبیه‌سازی متعدد، صحت این تنظیمات و سایر ملاحظات مورد نظر را تأیید می‌کند.

جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل برای سیستم DC

متغیر	الگوریتم ژنتیک	سرجایا و آیر، ۲۰۱۰	سیاح و هامودا، ۲۰۱۹
$P_{dr}$	۰/۶۴۱۸	۰/۵۰۰۰	۰/۶۹۸۸
$P_{di}$	۰/۵۲۲۵	۰/۴۹۹۵	۰/۶۹۸۶
$Q_{dr}$	۰/۳۳۳۱	۰/۱۶۲۶	۰/۱۵۱۱
$Q_{di}$	۰/۲۶۲۲	۰/۱۵۵۳	۰/۱۵۵۵
$t_r$	۱/۰۸۴۰	۰/۹۷۲۲	۱/۰۳۸۳
$t_i$	۰/۹۲۳۷	۰/۹۶۰۵	۱/۱۳۸۷
$\alpha$	۱۰/۰۸۲۴	۱۰/۰۲۱۶	۹/۹۰۰۵
$\gamma$	۱۵/۴۸۹۷	۱۲/۹۵۸۵	۱۰/۰۰۷۵
$V_{dr}$	۱/۴۱۱۱	۱/۳۰۱۲	۱/۴۹۹۸
$V_{di}$	۱/۲۱۲۶	۱/۳۰۰۰	۱/۴۹۹۳
$i_d$	۰/۳۶۱۴	۰/۳۸۴۲	۰/۴۶۵۹

پس از اجرای الگوریتم، پارامترهای بهینه حاصل از الگوریتم برای مشخصات بخش DC سیستم و مقادیر حاصل از تحقیقات (سرجایا و آیر، ۲۰۱۰) و (سیاح و هامودا، ۲۰۱۹) در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج برگرفته از مرجع (سیاح و هامودا ۲۰۱۹) مبتنی بر تشابه کلی مسئله مورد مطالعه جاری با مرجع مورد نظر است و از نقطه نظر تعداد باس با یکدیگر تمایز دارند. نتیجه حاصل برای تلفات توان اکتیو بر اساس مرجع (سرجایا و آیر ۲۰۱۰) ۰/۰۹۲۵ است در حالی که نتیجه حاصل توسط الگوریتم ژنتیک مقدار ۰/۰۷۵۴۷۶ حاصل شده است که نشان از برتری الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

علاوه بر این، منحنی همگرایی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مسئله مفروض در شکل ۵ ترسیم شده است. این منحنی ترسیم چگونگی جستجوی راه‌حل بهینه سراسری و دستیابی به حداقل سطح برازندگی در فضای حل مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو در سیستم‌های یکپارچه AC-DC را نشان می‌دهد.



شکل ۵. منحنی همگرایی الگوریتم GA

همان‌طور که از منحنی شکل ۵ مشخص است، الگوریتم پیشنهادی با یک قدرت مانور اولیه خوب پیش از تکرار ۵ به صورت مؤثر فضای جستجو را کاوش و به نسبت به سمت نقطه بهینه حرکت کرده است و نهایتاً در حدود تکرار ۲۵ به سطح برازندگی اش همگرا شده است. این رویه حکایت از صحت و موفقیت الگوریتم در همگرایی به پاسخ بهینه سراسری صرفاً در کمتر از ۵۰٪ تعداد تکرارهای آن دارد. با توجه به تعدد متغیرهای طراحی و از طرفی چالش بهینه‌سازی هدف طراحی مسئله مذکور، این عملکرد الگوریتم از جهت حصول پاسخ بهینه سراسری، سرعت و ضمانت همگرایی، سرعت اجرا و دقت و صحت پاسخ‌ها و راه‌حل‌های پیشنهادی قابل قبول می‌باشد. برآورد کلی نتایج جدول ۳ همراه با شکل ۵، تصدیق عملکرد و بهره‌وری رویکرد پیشنهادی مقاله را نشان می‌دهند.

## ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو یک سیستم قدرت AC-DC توسط الگوریتم ژنتیک حل شد. برای نشان دادن میزان اعتبار، کارایی و اثربخشی الگوریتم، مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو یک سیستم یکپارچه AC-DC پیاده‌سازی شد. با توجه به نتایج به دست آمده توسط الگوریتم و مقایسه آن با نتایج عددی مرجع معرفی شده، مشخص شد که مقدار تلفات توان اکتیو توسط الگوریتم به مقدار کمتری ختم می‌شود. علاوه بر این، الگوریتم نسبت به روش‌های عددی دارای سرعت بالاتری برای حل مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که در مقایسه با دیگر روش‌های موجود، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک دارای سرعت و قابلیت اطمینان مطلوبی در همگرایی مسئله به مقدراری بهینه است. در کارهای آتی می‌توان الگوریتم ژنتیک را با دیگر روش‌های ابتکاری مورد مقایسه قرار داد و برای مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو سیستم‌های HVDC چند ترمیناله در مقیاس کلان استفاده نمود.

## منابع

- Ahmed, H. M. A., Eltantawy, A. B., & Salama, M. M. A. (2017). A generalized approach to the load flow analysis of AC–DC hybrid distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), 2117–2127. DOI:[10.1109/TPWRS.2017.2720666](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2720666)
- Aouini, R., Marinescu, B., Kilani, K. Ben, & Elleuch, M. (2015). Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 278–286. DOI:[10.1109/PESGM.2015.7274585](https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7274585)
- Ayan, K., & Kılıç, U. (2016). Optimal power flow of two-terminal HVDC systems using backtracking search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 326–335. DOI:[10.1016/j.ijepes.2015.11.071](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.071)
- Feng, W., Tjernberg, L. B., Mannikoff, A., & Bergman, A. (2013). A new approach for benefit evaluation of multiterminal VSC–HVDC using a proposed mixed AC/DC optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(1), 432–443. DOI:[10.1109/TPWRD.2013.2267056](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2267056)
- Fernández-Pérez, J.-C., Cerezo, F. M. E., & Rodríguez, L. R. (2017). On the convergence of the sequential power flow for multiterminal VSC AC/DC systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), 1768–1776. DOI:[10.1109/TPWRS.2017.2720740](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2720740)
- Feshki Farahani, H., & Rashidi, F. (2017). An improved teaching-learning-based optimization with differential evolution algorithm for optimal power flow considering HVDC system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(3), 35505. DOI:[10.1063/1.4989828](https://doi.org/10.1063/1.4989828)
- Houck, C. R., Joines, J., & Kay, M. G. (1995). A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation. *Ncsu-Ie Tr*, 95(09), 1–10. DOI: [10.4236/jcc.2019.77013](https://doi.org/10.4236/jcc.2019.77013)
- Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (1994). *Power system stability and control* (Vol. 7). McGraw-hill New York. DOI: [10.4236/jcc.2019.77013](https://doi.org/10.4236/jcc.2019.77013)
- Lenin, K., Reddy, B. R., & Suryakalavathi, M. (2015). Upgraded harmony search algorithm for solving optimal reactive power dispatch problem. *International Journal of Mathematics Research*, 4(1), 42–52. Doi:[10.18488/journal.24/2015.4.1/24.1.42.52](https://doi.org/10.18488/journal.24/2015.4.1/24.1.42.52)
- Li, Y., Wang, Y., & Li, B. (2013). A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 52, 25–33. DOI:[10.1016/j.ijepes.2013.03.016](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.03.016)
- Prasad, D., Mukherjee, A., & Mukherjee, V. (2017). Application of chaotic krill herd algorithm for optimal power flow with direct current link placement problem. *Chaos, Solitons & Fractals*, 103, 90–100. DOI:[10.1016/j.chaos.2017.05.037](https://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.05.037)
- Rajan, A., & Malakar, T. (2015). Optimal reactive power dispatch using hybrid Nelder–Mead simplex based firefly algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 66, 9–24. DOI:[10.1016/j.ijepes.2014.10.041](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.041)
- Sanchez, S., Garces, A., Bergna-Diaz, G., & Tedeschi, E. (2018). Dynamics and stability of meshed multiterminal hvdc networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(3), 1824–1833. DOI:[10.1109/TPWRS.2018.2889516](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2889516)
- Sayah, S. (2018). Modified differential evolution approach for practical optimal reactive power dispatch of hybrid AC–DC power systems. *Applied Soft Computing*, 73, 591–606. DOI:[10.1016/j.asoc.2018.08.038](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.08.038)
- Sayah, S., & Hamouda, A. (2019). Optimal power flow solution of integrated AC-DC power system using enhanced differential evolution algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(2), e2737. DOI:[10.1002/etep.2737](https://doi.org/10.1002/etep.2737)
- Sreejaya, P., & Iyer, S. R. (2010). Optimal reactive power flow control for voltage profile improvement in AC-DC power systems. *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, 1–6. IEEE. DOI:[10.3390/en17030749](https://doi.org/10.3390/en17030749)
- Taghavi, R., & Seifi, A. (2012). Optimal reactive power control in hybrid power systems. *Electric Power Components and Systems*, 40(7), 741–758. DOI:[10.1080/15325008.2012.658597](https://doi.org/10.1080/15325008.2012.658597)
- Yapıcı, H., & Çetinkaya, N. (2016). Reactive Power Optimization with Chaotic Firefly Algorithm and Particle Swarm Optimization in a Distribution Subsystem Network. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, 12(1), 71–78. DOI:[10.37917/ijeee.12.1.7](https://doi.org/10.37917/ijeee.12.1.7)