

An Optimal Scheme for Coordination of Load Restoration and SPA Reduction Using TLBO Algorithm

Hadi Hoseinpour¹, PhD Student, Mohammadreza Esmaili², PhD, Amin Khodabakhshian¹, Professor

¹ Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Esfahan Regional Electric Company (EREC), Isfahan, Iran

Abstract:

One of the most important concerns for power system operators is how to execute the restoration process after having a blackout. In doing so, the parallel restoration is the most common method in which the desired islands are first formed and then the load of each section is restored separately at the same time. In the next step, the islands must be synchronized with having a minimum standing phase angle (SPA) between them. To do this, an optimal multi-objective scheme is defined in this paper in order to coordinate both load restoration and SPA reduction problems. The objective functions of the proposed model are the minimization of the static phase angle and the energy not supplied in which the desired constraints are also considered. For optimization process the teaching and learning optimization algorithm (TLBO) is used as a proposed technique and compared with some other intelligent algorithms. The simulations are performed by creating a connection between MATLAB software and DIGSILENT. The results obtained on the IEEE 39-bus power system show the efficiency of the proposed model.

Keywords: Power system restoration, Standing Phase Angle (SPA), Energy Not Supplied (ENS), Load restoration.

Received: 20 March 2022

Revised: 29 May 2022

Accepted: 15 June 2022

Corresponding Author: Mohammad Reza Esmaili, ismaili1360@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1958401.1008>



یک طرح بهینه جهت هماهنگی بازیابی بار و کاهش زاویه فاز ایستا با استفاده از الگوریتم TLBO

هادی حسین پور^۱، دانشجوی دکتری، محمدرضا اسماعیلی^۲، دکتری، امین خدابخشیان^۱، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- شرکت برق منطقه‌ای اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده: علیرغم وجود کلیه تجهیزات کنترلی و حفاظتی در یک سیستم قدرت، احتمال وقوع یک خاموشی امری اجتناب ناپذیر است. بنابراین، فرآیند بازیابی یکی از مهمترین دغدغه‌های بهره برداران سیستم است تا بتوانند در کمترین زمان ممکن خسارات ناشی از آن را کاهش دهند. در فرآیند بازیابی موازی ابتدا جزایر مورد نظر تشکیل شده و سپس بار هر جزیره به طور جداگانه و بصورت همزمان بازیابی می‌شود. در مرحله بعد، جزایر تشکیل شده با رعایت حداقل مقدار زاویه فاز ایستا با یکدیگر سنکرون شوند. برای انجام این کار، یک طرح چند هدفه بهینه در این مقاله تعریف شده است تا مسائل بازیابی بار و کاهش SPA را به طور هماهنگ بهینه سازی نماید. توابع هدف مدل پیشنهادی شامل به حداقل رساندن زاویه فاز ایستا و به حداقل رساندن انرژی تامین نشده است که با در نظر گرفتن محدودیت‌های مورد نظر بهینه می‌شوند. در این راستا از الگوریتم بهینه سازی آموزش و یادگیری (TLBO) به عنوان تکنیک پیشنهادی استفاده شده و با برخی از الگوریتم‌های هوشمند مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌ها با ایجاد ارتباط بین دو نرم‌افزار MATLAB و DIGSILENT انجام می‌شود. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کارایی مدل پیشنهادی برای دستیابی به اهداف ذکر شده است.

واژه های کلیدی: بازیابی سیستم قدرت، زاویه فاز ایستا، بازیابی بار، انرژی تامین نشده

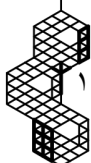
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدرضا اسماعیلی، ismaili1360@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1958401.1008>





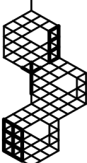
۱- مقدمه

بازیابی سیستم قدرت پس از بروز خاموشی سراسری یا جزئی یکی از مسائل مهم شبکه‌های قدرت می‌باشد. شناسایی و انجام پیکربندی مجدد شبکه به صورت اصولی باعث می‌شود تا شبکه به سرعت و به بهترین صورت ممکن بازیابی شده و مدت زمان خاموشی برای مشترکین به حداقل برسد [۱]. از آنجایی که وابستگی جوامع مدرن به انرژی الکتریکی به سرعت در حال افزایش می‌باشد، تقاضا برای دریافت مطمئن این انرژی حیاتی در حال افزایش است که این امر باعث پیچیده‌تر شدن عملکرد سیستم‌های قدرت و احتمال بروز خطا و خاموشی در شبکه می‌شود. بروز یک خاموشی سراسری در شبکه برق می‌تواند خسارات جبران ناپذیری به یک جامعه تحمیل نماید. از این رو یکی از مهمترین دغدغه‌های بهره برداران سیستم قدرت برگرداندن وضعیت سیستم به حالت عادی یا همان بازیابی سیستم قدرت می‌باشد [۲]. هدف نهایی در فرآیند بازیابی سیستم قدرت، بازیابی بار در کمترین زمان ممکن و کاهش خسارت‌های مربوط به مصرف کننده سیستم قدرت می‌باشد [۳]. تحقیقات متعددی در خصوص طراحی برنامه‌های بازیابی سیستم قدرت در سه بخش خودراه اندازی، پیکربندی و بازیابی بار توسط محققین ارائه گردیده است [۴-۶]. در مرجع [۴] یک روش مبتنی بر تئوری گراف ارائه شده است که در آن سیستم قدرت به صورت یک گراف در نظر گرفته شده و مسیرهای بازیابی از روی این گراف انتخاب می‌گردد. در مرجع [۵] یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی با در نظر گرفتن مسئله تعیین توالی حذف بار در آخرین مرحله از پیکربندی مجدد شبکه به کار گرفته شده است. در مرجع [۶] یک روش برای تخمین زمان بازیابی در تمامی فازهای بازیابی بر اساس تکنیک یادگیری ماشین ارائه شده است.

مرحله بازیابی بار در بخش‌های انتهایی برنامه بازیابی حساس‌ترین مرحله به شمار می‌رود. در این مرحله بهره برداران با دو چالش بزرگ شامل مساله کاهش انرژی تامین نشده و کاهش زاویه فاز ایستا در زمان سنکرون سازی جزایر روبرو هستند. مساله کاهش زاویه فاز ایستا در زمان سنکرون سازی دو زیرسیستم یکی از پیچیده‌ترین اقدامات در بهره برداری سیستم قدرت می‌باشد که میزان تولید و بار سیستم در نقاط مختلف شبکه به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی آن تاثیر گذار است [۷-۱۹]. لذا همواره تدابیری اتخاذ می‌شود تا زاویه فاز ایستا نیز کاهش یابد و عمل اتصال خطوط میان نواحی و یا باس ها امکان پذیر باشد [۷ و ۸]. اختلاف زاویه فاز ولتاژ بین دو باس در سیستم قدرت به عوامل مختلفی از جمله، ولتاژ نامی، حالت عملکرد شبکه و محل قرارگیری کلید قدرت مورد نظر بستگی دارد [۹]. معمولا این زاویه تحت شرایط بازیابی سیستم قدرت باید به مقدار ۲۰ درجه یا کم‌تر کاهش یابد. یکی از راهکارهای کاربردی کاهش اختلاف زاویه فاز ایستا، تغییر در مقدار توان تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت است [۱۰]. مساله کاهش SPA در مرجع [۱۱] از طریق برنامه ریزی تولید نیروگاه‌ها بدون نیاز به تغییر در بار حل شده است. در [۱۲]، به منظور کاهش زاویه فاز ایستا از یک استراتژی مبتنی بر خطی سازی و برنامه‌ریزی درجه دو استفاده شده که در آن توان تولیدی واحدها، پخش بار و محدودیت‌های زاویه فاز ایستا در نظر گرفته شده است. در [۱۳] روش مبتنی بر برنامه‌ریزی مجدد توان تولیدی سیستم قدرت به منظور کاهش زاویه فاز ایستا استفاده شده است. در [۱۴]، برای دستیابی به زاویه فاز ایستا مطلوب، ولتاژ ترمینال ژنراتور به عنوان متغیرهای کنترل در نظر گرفته شده است. در [۱۵] به بررسی تاثیر ادوات FACTs در کاهش زاویه فاز ایستا پرداخته شده است. مرجع [۱۶] امکان استفاده از UPFC^۱ را برای کاهش زاویه فاز ایستا در سیستم قدرت مورد بررسی قرار داده است. یکی از تجهیزات قابل کنترل در سیستم‌های قدرت الکتریکی که برای تغییر اختلاف زاویه فاز ایستا مورد استفاده قرار می‌گیرد، تپ ترانسفورماتورها است. با تغییر در ولتاژ شین‌های شبکه منجر به ایجاد تغییرات در زاویه فاز شین‌ها می‌گردد [۱۷]. در بسیاری از شرایط تغییر بیش از حد توان تولیدی ژنراتورهای شبکه در جهت دستیابی به حد مجاز اختلاف زاویه فاز ایستا فراهم نیست، به همین منظور پیشنهاد استفاده از برنامه حذف بار به عنوان راهکاری برای حل مشکل بیان شده مطرح می‌شود [۱۷]. در مرجع [۱۸] یک روش جدید برای کاهش SPA^۲ ارائه شده است که در آن برداشت بار و افزایش توان تولیدی به عنوان یک ابزار کنترلی در سیستم در نظر گرفته شده است.

در تحقیقات صورت گرفته مساله کاهش زاویه فاز ایستا بدون در نظر گرفتن مساله کاهش انرژی تامین نشده در حین فرآیند بازیابی بار مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با ارائه یک طرح چند هدفه دو مساله کاهش زاویه فاز ایستا و کاهش انرژی تامین نشده به طور همزمان در حین فرآیند بازیابی بار بهینه‌سازی می‌گردد. نوآوری های این تحقیق عبارتند از:

- هماهنگی دو مساله کاهش زاویه فاز ایستا و کاهش انرژی تامین نشده در حین فرآیند بازیابی بار.
- استفاده از روش هوشمند TLBO^۳ جهت بهینه سازی مساله پیشنهادی.
- استفاده از روش پارتو در انتخاب بهترین جواب مساله بهینه سازی



۲- فرمول بندی مساله پیشنهادی

از مجموعه فرآیند بازیابی سیستم قدرت، بازیابی بار با هدف کاهش زاویه فاز ایستا و انرژی تامین نشده صورت یک مسئله بهینه سازی مورد بررسی قرار می گیرد. میزان انرژی تامین نشده و ماکزیمم زاویه فاز ایستا به عنوان اهداف بهینه سازی در هر دو مسئله در نظر گرفته شده اند. محدودیت های مربوط به توان های اکتیو و راکتیو بارها، توان تولیدی NBSUها نیز در نظر گرفته شده اند. از آنجایی که در بازیابی شبکه متغیرها زیاد می باشند، جهت بهینه سازی از روش های فرا ابتکاری و روش های هوشمند استفاده می کنند [۲۰]. در این پژوهش، الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) جهت حل مسئله بهینه سازی پیشنهاد شده است و از الگوریتم های اجتماع ذرات (PSO)، ژنتیک (GA) و الگوریتم کرم شبتاب (FA) جهت مقایسه با الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی شبکه قدرت، بهینه سازی باید در نرم افزار متلب انجام شود و همچنین جهت جزیره سازی شبکه به منظور بازیابی بار و انجام پخش بار متوالی، باید از نرم افزار دیگسایلنت استفاده کرد، تا اطمینان حاصل نمود پاسخ بدست آمده نزدیک ترین پاسخ به حالت واقعی شبکه را دارد. براین اساس در این مقاله، با برقراری ارتباط بین این دو نرم افزار عمل بازیابی صورت گرفته است. در ادامه دو تابع هدف مجموع انرژی تامین نشده و ماکزیمم زاویه فاز ایستا معرفی و فرمول بندی آن ها ارائه می گردد.

کاهش زاویه فاز ایستا در زمان سنکرون سازی دو زیرسیستم به عنوان یکی از مهم ترین معیارها تلقی می شود. یکی از مهم ترین عوامل تاثیرگذار بر روی این معیار، مقدار توان اکتیو تزریق شده یا مصرف شده در هر باس بار می باشد. برای بررسی این موضوع، ساختار ساده ای از یک خط انتقال در شکل (۱) نشان داده شده است که در آن Z به عنوان امپدانس خط انتقال در نظر گرفته شده و از ادمیتانس خط انتقال صرف نظر شده است. در این شکل، ولتاژ انتهای خط انتقال به عنوان فازور مرجع $(U_r = U_r \angle 0)$ و ولتاژ ابتدای خط با اختلاف یک زاویه فاز θ $(U_s = U_s \angle \theta)$ نسبت به ولتاژ انتهای خط بصورت یک فازور پیش فاز در نظر گرفته شده است. توان ظاهری ارسالی از ابتدای خط و توان ظاهری دریافتی در انتهای خط به ترتیب بصورت $S_s = P_s + jQ_s$ و $S_r = P_r + jQ_r$ مفروض می باشند. بر این اساس، جریان عبوری از خط انتقال باعث افت ولتاژ در مسیر می شود که رابطه آن بر اساس مقادیر توان و ولتاژ سمت انتهای خط به صورت معادله (۱) نوشته می شود [۲۱].

$$\Delta U = Z I = \frac{P_r R + Q_r X}{U_r} + j \frac{P_r X - Q_r R}{U_r} = \Delta U_{re} + j \Delta U_{im} \quad (1)$$

که در آن ΔU_{im} و ΔU_{re} به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی افت ولتاژ مسیر می باشند. با توجه به معادله (۱) مقدار دامنه و زاویه فاز ولتاژ انتهای خط انتقال به صورت رابطه (۲) نوشته می شود:

$$U_s = \sqrt{(U_r + \Delta U_{re})^2 + \Delta U_{im}^2}, \quad \theta = \text{Arc tan} \left(\frac{\Delta U_{im}}{U_r + \Delta U_{re}} \right) \quad (2)$$

از آنجایی که در خطوط انتقال فشار قوی مقدار مقاومت در مقایسه با مقدار راکتانس بسیار کوچک تر می باشد، بنابراین می توان از مقدار مقاومت در معادل (۱) صرف نظر نمود و مقادیر افت ولتاژ حقیقی و موهومی را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta U_{re} \approx \frac{Q_r X}{U_r}, \quad \Delta U_{im} \approx \frac{P_r X}{U_r} \quad (3)$$

با توجه به روابط (۲) و (۳) مقدار زاویه فاز ابتدای خط انتقال (در سمت ارسال کننده توان) مطابق با معادله (۴) به دست می آید:

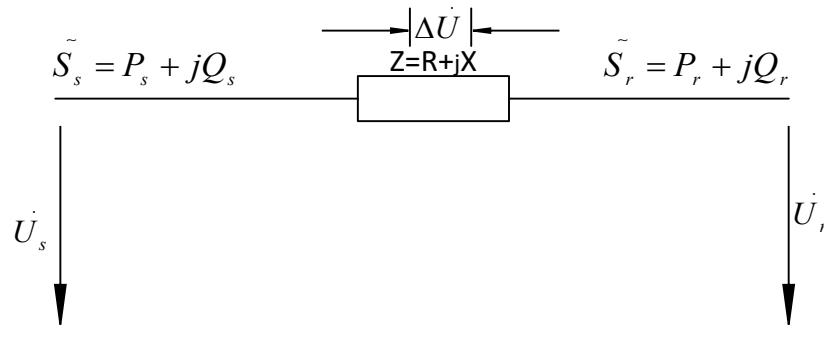
$$\theta = \text{Arc tan} \left(\frac{P_r}{\frac{U_r^2}{X} + Q_r} \right) \quad (4)$$

با فرض انجام کنترل ولتاژ در شبکه و ثابت ماندن توان راکتیو تزریقی در هر باس، تغییرات زاویه فاز $(\Delta \theta)$ به طور مستقیم متناسب با تغییرات توان اکتیو خواهد بود. مقدار تغییرات زاویه فاز در هر باس بار با توجه به معادله (۴) به شکل زیر خواهد بود:





$$\Delta\theta = \frac{\frac{U_{r_0}^2}{X} + Q_{r_0}}{\left(\frac{U_{r_0}^2}{X} + Q_{r_0}\right)^2 + P_{r_0}^2} \cdot \Delta P_r \quad (5)$$



شکل (۱): مدار معادل یک خط انتقال

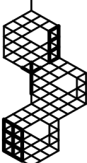
با توجه به رابطه (۵) می‌توان بیان نمود که یکی از موثرترین ابزارهای تغییر زاویه فاز ایستا مابین دو زیرسیستم، میزان بار بازیابی شده بر روی سیستم در هر مرحله از فرایند بارگذاری می‌باشد. بر این اساس اولین تابع هدف بصورت حداقل‌سازی بیشترین زاویه فاز ایستا (SPA) مابین زیرسیستم‌های تشکیل شده و قبل از عملیات سنکرون‌سازی زیرسیستم‌ها تعریف می‌شود. در این راستا، SPA بین دو باس انتهایی زیرسیستم‌های مجاور پس از اجرای عملیات پخش بار در هر دوره از فرایند بازیابی بار به‌دست می‌آید. برای حل این مساله، ابتدا بیشترین مقدار SPA در بین تمام خطوط ارتباطی بین زیرسیستم‌ها محاسبه می‌گردد. در نهایت، حداقل‌سازی این تابع هدف با کمک یک الگوریتم اجرا شده تا متغیرهای تصمیم‌گیری (مقدار بهینه بار قابل بازیابی به‌صورت بهینه به‌دست آیند. فرمول‌بندی تابع هدف به‌صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \min \left\{ f_1 = \max_{l_{ij}} (\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j) \right\} \\ \text{St} : \\ P_{g_n \min} \leq P_{g_n} \leq P_{g_n \max}, n = 1, 2, \dots, N \\ P_{l_d \min} \leq P_{l_d} \leq P_{l_d \max}, d = 1, 2, \dots, D \\ \theta_{ij} \leq \theta_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

که در معادله (۶)، پارامترهای θ_{ij} ، P_{g_n} ، $P_{g_n \max}$ ، $P_{g_n \min}$ ، P_{l_d} ، $P_{l_d \max}$ ، $P_{l_d \min}$ ، θ_{ij}^{\max} به‌ترتیب بیانگر خط انتقال l_{ij} مابین دو باس انتهایی i و j ، زاویه فاز ایستا بین دو باس انتهایی i و j ، توان تولیدی ژنراتور n ام، حداکثر توان تولیدی ژنراتور n ام، حداقل توان تولیدی ژنراتور n ام، توان مصرفی در باس d ام، حداکثر توان مصرفی در باس d ام، حداقل توان مصرفی در باس d ام و حداکثر مقدار زاویه فاز ایستا بین دو باس انتهایی i و j می‌باشند.

۲-۱- حداقل‌سازی مجموع انرژی تامین نشده (ENS)

دومین تابع هدف، حداقل‌سازی بیشترین مقدار مربوط به ENS می‌باشد، که با استفاده از الگوریتم ابتکاری بهینه‌سازی می‌شود تا متغیرهای تصمیم‌گیری (مقدار بهینه بار قابل بازیابی) به‌صورت بهینه به‌دست آیند. معادله مربوط به این تابع هدف در رابطه زیر آورده شده است:



$$\left\{ \begin{array}{l} \min \{ f_2 = \text{Max}_{s_i} (ENS) \} \\ \text{S.t. :} \\ T_{j_{\min}} \leq t_{j_{\text{start}}} \leq T_{j_{\max}} \\ P_{\text{igen-opt}}(t) \geq P_{j_{\text{start}}}(t), j = 1, 2, \dots, G \\ P_{g_{n\min}} \leq P_{g_n} \leq P_{g_{n\max}}, n = 1, 2, \dots, N \\ P_{l_{d\min}} \leq P_{l_d} \leq P_{l_{d\max}}, d = 1, 2, \dots, D \\ S_i \leq S_i^{\max} \end{array} \right. \quad (7)$$

در رابطه (7)، مقادیر مربوط به ENS به صورت یک معادله در رابطه (8) آورده شده است [21].

$$ENS = \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D (P_d^{\max} - P_d^t) * t \quad (8)$$

در رابطه (8)، پارامتر T, D, P_d^{\max} و P_d^t به ترتیب، نشان دهنده کل زمان بازیابی، کل بار موجود در سیستم، ماکزیمم بار قابل بازیابی و بار بازیابی شده در زمان t می باشند.

۲-۲- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه آموزش و یادگیری، مانند الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA، PSO یک روش مبتنی بر جمعیت است که گروهی از راه حل‌ها را برای ادامه فرآیند بهینه‌سازی پیاده‌سازی می‌کند. بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی نیاز به پارامترهای الگوریتم دارند که بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارند. GA به پارامترهای احتمال تقاطع، نرخ جهش و روش انتخاب، نیاز دارد. PSO به ضرایب یادگیری، تغییر وزن و حداکثر مقدار سرعت نیاز دارد. برخلاف سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی، TLBO به تنظیم پارامترهای الگوریتمی نیاز ندارد، بنابراین اجرای آن ساده‌تر می‌شود. TLBO مانند PSO از بهترین راه حل تکرار برای تغییر راه حل موجود در جمعیت استفاده می‌کند، در نتیجه نرخ همگرایی را افزایش می‌دهد. TLBO جمعیت را مانند ABC تقسیم نمی‌کند. همانند GA که از انتخاب، ادغام و جهش استفاده و ABC که از زنبورهای شاغل، تماشاگر و پیش‌اهنگی استفاده می‌کند، TLBO از دو مرحله مختلف معلم و دانش آموز و همچنین از مقدار متوسط جمعیت برای به روزرسانی راه حل استفاده می‌کند. در نتیجه نرخ همگرایی را افزایش می‌دهد. TLBO جمعیت را مانند ABC تقسیم نمی‌کند. همانند GA که از انتخاب، ادغام و جهش استفاده و ABC که از زنبورهای شاغل، تماشاگر و پیش‌اهنگی استفاده می‌کند، TLBO از دو مرحله مختلف معلم و دانش آموز و همچنین از مقدار متوسط جمعیت برای به روزرسانی راه حل استفاده می‌کند. در این پژوهش از الگوریتم TLBO به عنوان الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی استفاده شده است. شکل (۲) روند نمای روش پیشنهادی برای حل مسئله بازیابی بار را نشان می‌دهد. این روند نما دارای ۶ مرحله می‌باشد که عبارتند از (۱) دریافت داده‌ها؛ (۲) تعیین حدود متغیرها؛ (۳) فرمول‌بندی مسئله و محاسبه توابع هدف‌های بیش‌ترین زاویه فاز ایستا مابین زیرسیستم‌ها و همچنین انرژی تامین نشده؛ (۴) حل مسئله برنامه ریزی بازیابی بار (۵) چک کردن محدودیت‌های مسئله (۶) نتایج خروجی.

۳-۲- برقراری ارتباط بین نرم افزار متلب و دیگسایلنت

حل مسائل بهینه‌سازی در شبکه‌های قدرت، به دلیل گستردگی شبکه‌ها و پیاده‌سازی آن‌ها در محیط‌های پیچیده نرم افزاری، همواره یکی از دغدغه‌ها و چالش‌های پیش‌روی بهره‌برداران سیستم‌های قدرت بوده است. اگر چه انتقال اطلاعات از محیط نرم افزارهایی مانند DiGSILENT به محیط نرم افزاری مانند MATLAB، نیازمند تلاش و دقت فراوان است، اما از آن جا که بهینه‌سازی باید در محیط MATLAB انجام شود، بهترین راه مورد استفاده توسط محققان در زمان انجام مطالعات شبکه، انجام پخش بار در محیط نرم افزار دیگسایلنت و بهینه‌سازی توسط نرم افزار متلب می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است که از امکانات نرم افزارهای DiGSILENT و MATLAB به طور کامل استفاده کرده تا پاسخ‌های به دست آمده شبیه‌ترین پاسخ به حالت واقعی شبکه باشند. در این روش که از ارتباط بین دو نرم افزار استفاده شده است، مطالعات پخش بار در محیط نرم افزار DiGSILENT و انجام مراحل بهینه‌سازی در محیط

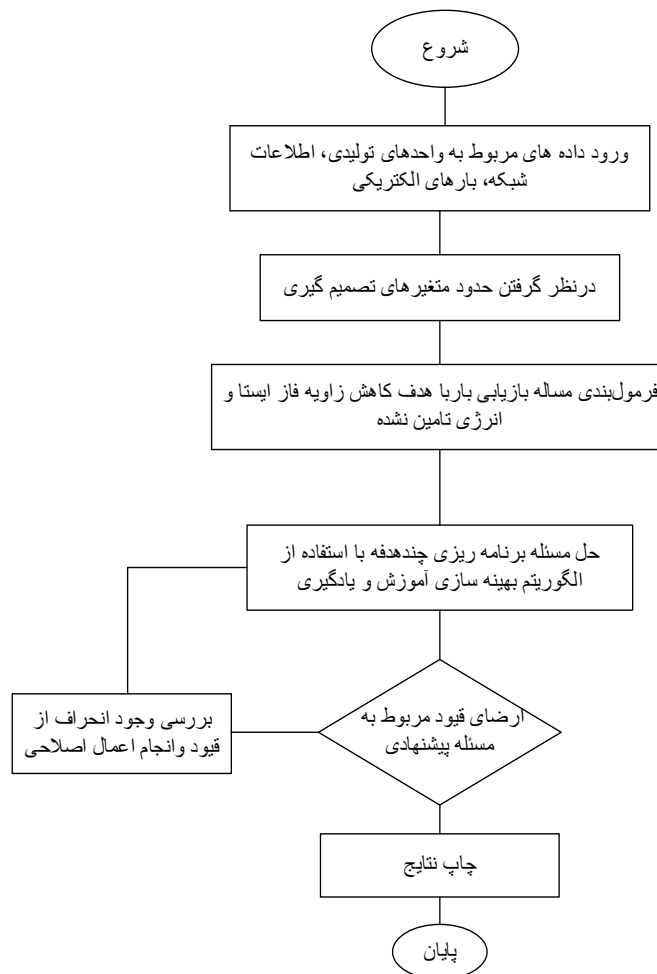




نرم افزار MATLAB انجام می‌گیرد. در این شرایط نیازمند هیچ گونه ساده سازی در مورد شبکه مورد مطالعه نیست و تمامی حالت‌ها، ناشی از حالت واقعی شبکه هستند. محیط برنامه نویسی نرم افزار Power Factory، "DPL" فضایی را برای انجام مکانیزه برخی از کارها فراهم می‌کند که ساختار استفاده شده در "DPL" شبیه ساختار دستوری زبان برنامه نویسی ++C است. در این پژوهش، با بازیابی بار به منظور دستیابی به اهدافی از جمله کاهش زاویه فاز ایستا و انرژی تامین نشده پرداخته شده است. مقدار توان بارهای شبکه (متغیرهای کنترلی) توسط الگوریتم بهینه سازی تولید شده و به محیط نرم افزار DigSILENT انتقال می‌یابند. در این محیط این متغیرها باید در درون یک بردار تعریف شده و در زمان استفاده فراخوانی شوند.

مراحل حل مسأله به شرح زیر است:

- مرحله اول: تولید جمعیت اولیه برای الگوریتم در محیط نرم افزار MATLAB
 - مرحله دوم: ثبت اطلاعات تولید شده در یک فایل واسط
 - مرحله سوم: خواندن اطلاعات در محیط DigSILENT در این مرحله اطلاعات ثبت شده در محیط واسط توسط نرم افزار DigSILENT خوانده شده (مقادیر توان بارها) و در یک بردار از پیش تعبیه شده ذخیره می‌شود.
 - مرحله چهارم: انجام محاسبات پخش بار و تعیین اطلاعات مورد نیاز
- در این مرحله با توجه به محل نصب منابع و همچنین، ظرفیت آن‌ها، شبکه آماده انجام محاسبات پخش بار است. پس از انجام محاسبات پخش بار، میزان زاویه فاز ایستا و میزان انرژی تامین نشده تعیین می‌شود.
- مرحله پنجم: انتقال نتایج پخش بار به محیط نرم افزار MATLAB



شکل (۲): روندنمای پیشنهادی روند حل مسئله بازیابی بار



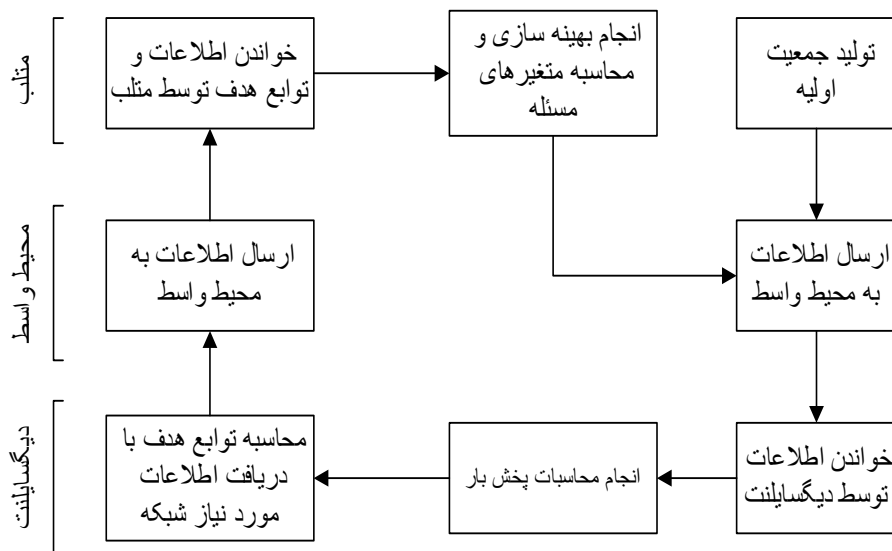
در این مرحله اطلاعات توسط یک فایل واسط به محیط نرم افزار MATLAB منتقل شده و اجازه ادامه محاسبات به این نرم افزار داده می شود. در طی روند حل مسئله بهینه سازی، هر زمان که نیاز به محاسبه تابع هدف باشد، مراحل بالا برای تعیین مقدار تابع هدف طی می شود. شکل (۳) مراحل بیان شده در بالا را به طور کلی نشان می دهد.

۳- شبیه سازی مساله پیشنهادی

در این بخش، مسائل ارائه شده به همراه روش های حل داده شده در بخش قبل بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باس اعمال می گردد و نتایج شبیه سازی آن ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند. دو تابع هدف مورد نظر در این پژوهش کاهش زاویه فاز ایستا و کاهش انرژی تامین نشده می باشند. جهت بررسی وجود یا عدم وجود تضاد بین توابع هدف، ابتدا به صورت مجزا هر کدام از توابع هدف (کاهش زاویه فاز ایستا (SPA) و کاهش انرژی تامین نشده (ENS) بهینه سازی گردیده و سپس نشان داده می شود که وجود تناقض بین این دو تابع هدف باعث می گردد که مسئله بازیابی بار به صورت چندهدفه و همزمان مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بهینه سازی تک هدفه نیز به عنوان مقادیر حدی در بهینه سازی چندهدفه مورد استفاده قرار می گیرد. بهینه سازی با برقراری اتصال بین دو نرم افزار دیگسایلنت (جهت پخش بار) و متلب (جهت بهینه سازی) صورت گرفته است.

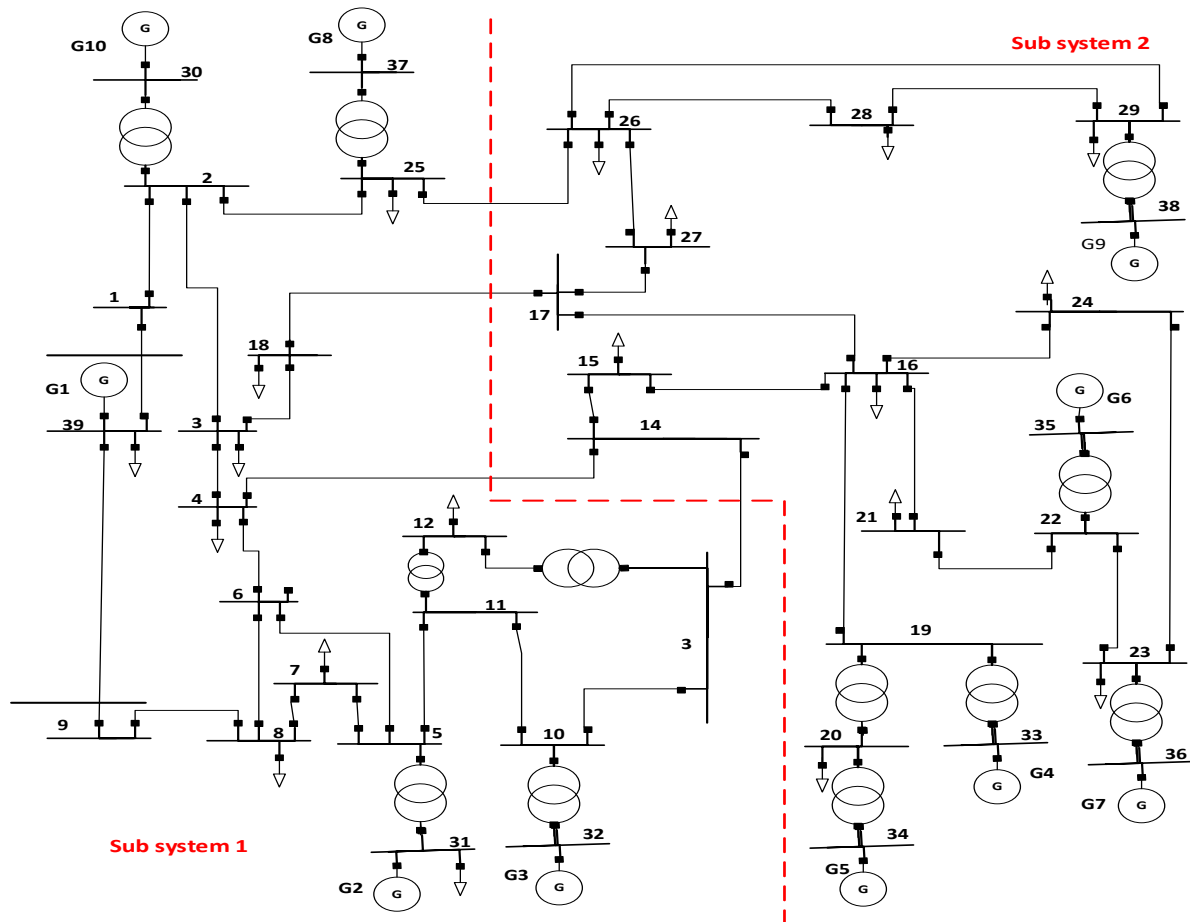
۱-۳- شبکه ۳۹ باس IEEE

شکل (۴) دیاگرام تک خطی شبکه استاندارد ۳۹ باس IEEE را نشان داده است. میزان تولید و بار کل شبکه ۳۹ باس به ترتیب برابر با 6140 MW و 6097 MW می باشد. از آنجایی که در هر زیر سیستم می بایست حداقل یک واحد خودراه انداز وجود داشته باشد، با توجه به مرجع [۲۰] سیستم تحت مطالعه دارای دو واحد خودراه انداز می باشد که معیاری برای انتخاب تعداد زیر سیستم ها می باشد. بر اساس مرجع [۲۰] با قطع خطوط ارتباطی بین باس های شماره ۲۵-۲۶، ۱۷-۱۸، ۴-۱۴ و ۱۳-۱۴ دو جزیره مجزا تشکیل می شود، که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۳): فرآیند کلی حل مسئله توسط لینک نرم افزار دیگسایلنت و متلب





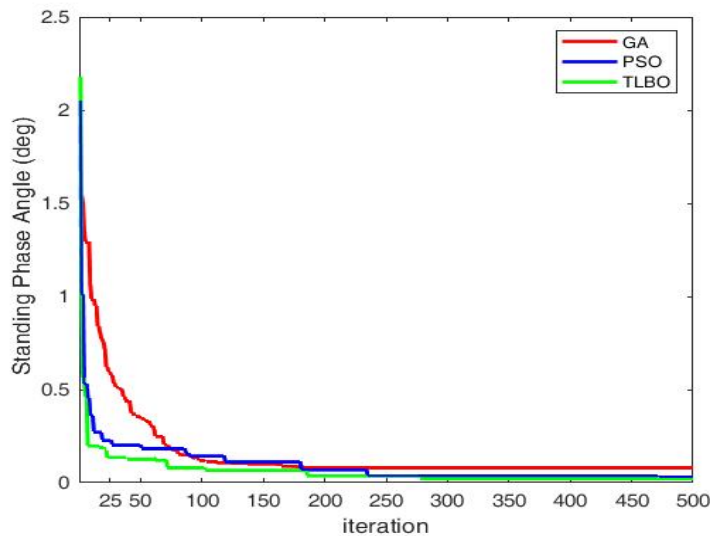
شکل (۴): شبکه استاندارد ۳۹ باس IEEE [۲۰]

۳-۲- کاهش زاویه فاز ایستا (SPA) و انرژی تامین نشده (ENS)

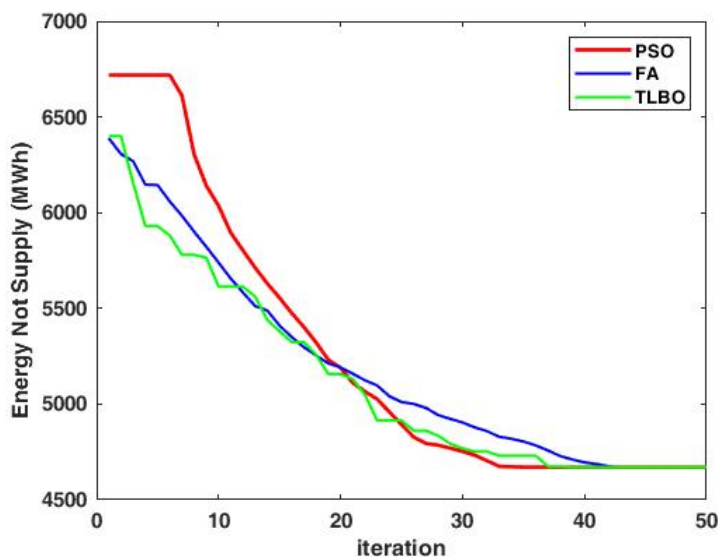
در این بخش، به منظور کاهش زاویه فاز ایستا و انرژی تامین نشده، توابع هدف (معادله (۶) و (۷)) به دو صورت تک‌هدفه و چندهدفه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله اول طراحی تک‌هدفه برای هر یک از توابع هدف بیان شده در بخش دوم مقاله (معادله (۶) و معادله (۷)) به صورت جداگانه انجام می‌شود تا مقادیر حدی مورد نیاز برای طراحی چندهدفه در مرحله دوم حاصل شود. سپس در مرحله دوم طراحی چندهدفه اجرا می‌گردد تا جواب‌های بهینه نهایی مساله (متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه) شامل توان اکتیو و راکتیو بارها به دست آید.

۳-۳- بهینه‌سازی توابع هدف به صورت تک‌هدفه

در این بخش توابع هدف بیان شده (معادله (۶) و (۷)) در طول فرآیند بازیابی بار بصورت جداگانه بهینه‌سازی می‌شوند. در این راستا، با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی مقادیر بهینه ماکزیمم زاویه فاز ایستا بین باس‌های شماره (۳-۱۴)، (۳-۱۴)، (۱۸-۱۷) و (۲۵-۲۶) و همچنین انرژی تامین نشده در ۱۰ مرحله بارگذاری محاسبه می‌گردند. همان‌طور که بیان شد، جهت بهینه‌سازی توابع هدف (معادله (۶) و (۷))، از الگوریتم آموزش و یادگیری (TLBO) استفاده می‌شود. به منظور بررسی عملکرد این الگوریتم با الگوریتم‌های ابتکاری دیگر از جمله PSO [۲۱]، GA [۲۲] و FA [۲۳] نیز مقایسه شده است که نتایج در ادامه آورده شده‌اند. با انجام بهینه‌سازی به صورت تک‌هدفه و در نظر گرفتن توابع هدف مربوطه، منحنی‌های همگرایی به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) نشان داده شده‌اند. مقادیر مربوط به توابع هدف محاسبه و نتایج این طراحی در جدول (۱) داده شده‌اند. این مقادیر به عنوان مقادیر حدی مورد نیاز در طراحی چندهدفه مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل (۵): مقایسه منحنی همگرایی کاهش زاویه فاز ایستا با استفاده از روش‌های مختلف



شکل (۶): مقایسه منحنی همگرایی کاهش انرژی تامین نشده با استفاده از الگوریتم‌های مختلف

جدول (۱): نتایج طراحی تک‌هدفه با استفاده از الگوریتم TLBO

نوع طراحی تک‌هدفه	SPA(deg)	ENS(MWh)
طراحی بر اساس تابع هدف ماکزیمم زاویه فاز ایستا(معادله ۶)	۰.۰۲	۸۳۷۱
طراحی بر اساس تابع هدف انرژی تامین نشده(معادله ۷)	۸.۱	۴۶۶۰

با انجام بهینه‌سازی در توابع هدف به‌صورت جداگانه، مقادیر بدست آمده برای هر یک از توابع هدف در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود به ازای بهینه‌سازی به‌صورت تک‌هدفه و با هدف کاهش ماکزیمم زاویه فاز ایستا مقادیر $ENS=8371MWh$ و $SPA=0/02deg$ و به ازای بهینه‌سازی به‌صورت تک‌هدفه و با هدف کاهش انرژی تامین نشده مقادیر $ENS=4660MWh$ و $SPA=8/1deg$ بدست آمده است. نتایج جدول نشان می‌دهند، بهینه‌سازی هر کدام از توابع هدف، تابع هدف دیگر را تضعیف می‌کند، یا به عبارتی دیگر با بهینه‌سازی هر کدام از توابع هدف، مقادیر بدست آمده در تابع هدف دیگر بدتر می‌شود. از این‌رو نتیجه می‌شود، این دو تابع هدف با هم در تعارض بوده و جهت دست‌یابی بهترین جواب بهینه برای تحقق هر دو هدف، باید





مسئله را چندهدفه حل نمود. برخلاف روش‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه، روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه منجر به یافتن تنها یک جواب بهینه نمی‌شوند، بلکه مجموعه‌ای از جواب‌ها را مشخص می‌کنند که تعادل مناسبی بین اهداف مختلف ایجاد می‌کنند. در ادامه، بهینه‌سازی چندهدفه توابع هدف مذکور توضیح داده شده است.

۳-۴- بهینه‌سازی مساله پیشنهادی به صورت چندهدفه

در این قسمت، طراحی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی (الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و یادگیری) بر روی سیستم مورد نظر انجام شده است تا بهینه‌ترین مقادیر مربوط به متغیرهای تصمیم‌گیری (توان‌های اکتیو و راکتیو بارها) با بهینه‌سازی هم‌زمان دو تابع هدف مورد نظر (معادله (۶) و معادله (۷)) حاصل شود. منحنی همگرایی پرتو استخراج شده از این طراحی در شکل (۷) ترسیم شده است. در شکل ۷ ستاره‌ها (قرمز و آبی رنگ) جواب‌های غالب در آخرین تکرار حل مسئله می‌باشند. سازگارترین جواب در بین تمام جواب‌ها با در نظر گرفتن درجه اهمیت هر یک از توابع هدف توسط تصمیم‌گیرنده (بهره‌بردار سیستم) انتخاب می‌گردد.

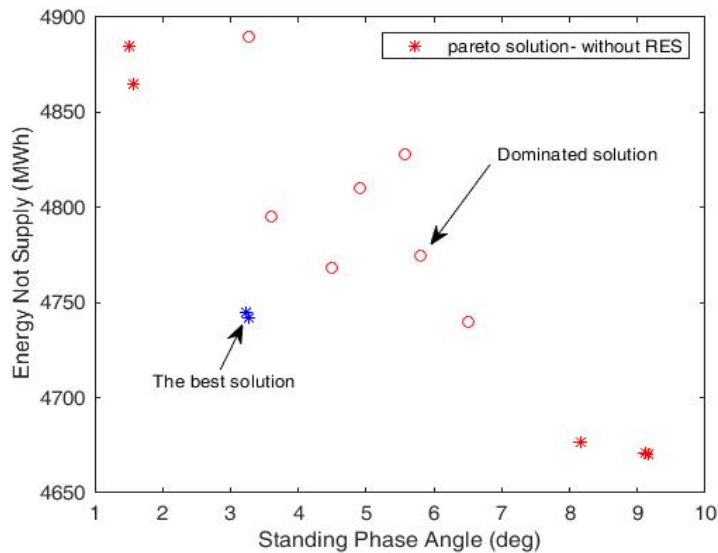
به منظور انتخاب یک جواب مطلوب، دو جواب متفاوت با در نظر گرفتن وزن‌های متفاوت برای توابع هدف مورد نظر به دست می‌آیند که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. پارامترهای W_1 و W_2 به ترتیب نشان دهنده وزن‌های دو تابع هدف حداقل زاویه فاز ایستا و حداقل انرژی تامین نشده می‌باشند. معیار انتخاب این ضرایب با توجه به شرایط سیستم و اولویت‌های بهره‌بردار می‌گردد. در این مقاله فرض بر آن است که برای طراح هر دو تابع هدف از اولویت یکسانی برخوردار می‌باشد. با توجه به جدول اختلاف مقدار انرژی تامین نشده با در نظر گرفتن ضرایب با مقدار مشابه 0.5 (۴۸۳۴ مگاوات ساعت) با ضرایب $W_1=0/3$, $W_2=0/7$ (۴۶۶۱ مگاوات ساعت) تنها حدود $3/5$ درصد است. از طرفی دیگر، حداقل مقدار زاویه فاز ایستا با در نظر گرفتن ضرایب مشابه 0.5 (۶درجه) در مقایسه با مقدار مشابه در ضرایب $W_1=0/3$, $W_2=0/7$ حدود 34 درصد کاهش داشته است. بنابراین، در نظر گرفتن ضرایب برابر علاوه بر کاهش 34 درصدی زاویه فاز ایستا، مقدار انرژی تامین نشده را در نزدیکی مقدار اولیه خود قرار می‌دهد. با در نظر گرفتن ضرایب $W_1=0/7$, $W_2=0/3$ مقدار انرژی تامین نشده 443 مگاوات ساعت نسبت به حالت دوم افزایش می‌یابد و زاویه فاز ایستا نیز حدود 40 درصد کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این مقاله وزن‌های در نظر گرفته شده برای توابع هدف موجود در طراحی به‌طور یکسان برابر با 0.5 ($W_1=W_2=0.5$) می‌باشد. به عبارتی دو تابع هدف از اهمیت یکسانی برخوردار هستند. اما تصمیم‌گیرنده (بهره‌بردار سیستم) بسته به شرایط و اهمیت هر کدام از توابع، ممکن است هر ضریب دلخواه دیگری در نظر بگیرد.

جدول (۲): نتایج مربوط به ضرایب متفاوت در طراحی چندهدفه

جواب غالب پرتو	ENS(MWh)	SPA(deg)
$(W_1=0/3, W_2=0/7)$	۴۶۶۱	۹/۱
$(W_1=0/4, W_2=0/6)$	۴۷۴۲	۸/۶
$(W_1=0/5, W_2=0/5)$	۴۸۳۴	۶
$(W_1=0/6, W_2=0/4)$	۵۰۵۱	۵/۶
$(W_1=0/7, W_2=0/3)$	۵۲۷۷	۳/۴

با در نظر گرفتن ضرایب یکسان برای همه توابع هدف، مطلوب‌ترین جواب در شکل (۷) به صورت ستاره آبی رنگ انتخاب می‌گردد که نتایج آن در جدول (جدول (۳)) آورده شده است. انتخاب سازگارترین جواب (ستاره آبی رنگ) به گونه‌ای انجام می‌شود که به ازای دو تابع هدف موجود در مسئله به‌طور هم‌زمان دارای مقادیر قابل قبول تری نسبت به دیگر جواب‌های غالب (ستاره‌های قرمز رنگ) باشند. در این جدول، مقدار بهینه (توان اکتیو و راکتیو) بارهای قابل بازیابی در مرحله دهم از بازیابی بار و مقادیر مربوط به توابع هدف نشان داده شده است. بر اساس جدول (۳)(۳)، مقادیر به دست آمده برای توابع هدف در طراحی چندهدفه مغایر با مقادیر مشابه در طراحی تک‌هدفه می‌باشد. زیرا، هر دو تابع هدف موجود در طراحی چندهدفه به‌طور هم‌زمان بهینه می‌گردند.





شکل (۷): منحنی همگرایی پرتو مبتنی بر TLBO

جدول (۳): نتایج طراحی چندهدفه با استفاده از روش پیشنهادی (TLBO)

مقادیر بهینه توان اکتیو و راکتیو بارها به ازای بهترین جواب

بار	شماره باس	PL(MW)	QI(MVAR)	بار	شماره باس	PL(MW)	QI(MVAR)
۱	۳	322	2/4	۱۱	۲۳	247/5	84/65
۲	۴	500	184	۱۲	۲۴	308/6	-92/58
۳	۷	233/8	84/17	۱۳	۲۵	224	47/04
۴	۸	522	175/91	۱۴	۲۶	139	16/96
۵	۱۲	0/91	10/68	۱۵	۲۷	281	75/31
۶	۱۵	320	152/96	۱۶	۲۸	205/22	27/5
۷	۱۶	329	32/24	۱۷	۲۹	283/5	26/65
۸	۱۸	11/38	2/16	۱۸	۳۱	0/35	0/18
۹	۲۰	628	102/99	۱۹	۳۹	1104	249/5
۱۰	۲۱	274	115/08				
SPA=6 deg							
ENS=4834 MWh							

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، طراحی فرآیند بهینه بازیابی بار با هدف کاهش زاویه فاز ایستا و انرژی تامین نشده و به صورت یک مدل چندهدفه فرمول بندی گردید. برای بهینه سازی این مسئله اساسی از یک الگوریتم ابتکاری با نام TLBO استفاده شده است. از آن جایی که مسئله به صورت چندهدفه معرفی شده، برای یافتن جواب بهینه از روش بهینه پرتو استفاده شده است. زیرا در این روش دو تابع هدف به طور همزمان بهینه می شوند. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۹ باس IEEE پیاده سازی و نتایج آن ضمن مقایسه با روش های دیگر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی حاکی از موثر بودن طرح پیشنهادی در خصوص در نظر گرفتن همزمان دو تابع هدف کاهش زاویه فاز ایستا و کاهش انرژی تامین نشده می باشد. با توجه به نتایج شبیه سازی استخراج شده از اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم مورد مطالعه، نتایج زیر ارائه می گردد:

- در نظر گرفتن همزمان دو تابع زاویه فاز ایستا و انرژی تامین نشده باعث می شود تا در مقادیر توان بالاتر و با زاویه فاز کمتری بتوان عمل سنکرون ساز را صورت داد. با توجه به نتایج مقدار زاویه فاز ایستا در برخی شرایط حتی تا ۴۰ درصد کاهش نشان می دهد که آمار بسیار مطلوبی است.
- استفاده از الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) و با یک ساختار ساده در قلب طراحی مورد نظر، حجم محاسباتی

- در فرآیند بهینه‌سازی را کاهش و سرعت همگرایی جواب را افزایش می‌دهد. با مقایسه انجام شده با الگوریتم‌های دیگر افزایش سرعت همگرایی به میزان تقریبی ۱۰ درصد قابل مشاهده می‌باشد.
- استفاده از روش بهینه پرتو در حل مساله پیشنهادی باعث می‌گردد تا تمامی توابع هدف موجود در مساله به‌طور هم‌زمان بهینه گردند و در نهایت با انتخاب سازگارترین جواب مقادیر مطلوب‌تری برای توابع هدف به‌دست آید. در بدترین شرایط با در نظر گرفتن ضرایب ۵۰ درصدی برای توابع هدف یک جواب مطلوب با میزان زاویه فاز ایستا ۶ درجه و انرژی تامین نشده ۴۸۳۴ مگاوات ساعت حاصل گردید.
- نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم ابتکاری پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به رقبای خود در بهینه‌سازی مساله پیشنهادی ارائه نمود.

مراجع

- [1] X. Zhou, H. Wang, Y. Ma, and Z. Gao, "research on power system restoration based on multi-agent systems," *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 4955–4960, 2018, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407989.
- [2] M. Adibi and L. Fink, "Power system restoration planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no.1, pp. 22–28, 1994, doi: 10.1109/59.317561.
- [3] J. Quirós-Tortós, P. Wall, L. Ding, and V. Terzija, "Determination of sectionalising strategies for parallel power system restoration: A spectral clustering-based methodology," *Electric Power Systems research*, vol. 116, pp. 381–390, 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2014.07.005.
- [4] A. A. Mota, L. T. M. Mota, and A. Morelato, "Visualization of power system restoration plans using CPM/PERT graphs," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1322–1329, 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.901118.
- [5] H. Qu, M. Yin, and S. Lin, "Load restoration optimization during last stage of network reconfiguration," in *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, pp. 1075–1079, 2014, doi: 10.1109/CICED.2014.6991870.
- [6] R. B. Duffey and T. Ha, "The probability and timing of power system restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no.1, pp. 3–9, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2203832.
- [7] V. Vittal, "Consequence and impact of electric utility industry restructuring on transient stability and small-signal stability analysis," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no.2, pp. 196–207, 2000, doi: 10.1109/5.823998.
- [8] M. Kheradmandi and M. Ehsan, "Dynamic analysis of transmission line connection in restoration of interconnected power systems," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No. 04CH37513)*, pp. 1624–1624, 2004, doi: 10.1109/CCECE.2004.1349720.
- [9] M. Adibi, "An Approach to Standing Phase Angle Reduction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no.1, pp. 470–478, 2000, doi: 10.1109/59.317576.
- [10] D. Hazarika and A. Sinha, "Standing phase angle reduction for power system restoration," *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, pp. 82–88, 1998, doi: 10.1049/ip-gtd:19981657.
- [11] H. Ye and Y. Liu, "A new method for standing phase angle reduction in system restoration by incorporating load pickup as a control means," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 664–674, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.05.039.
- [12] A. Ketabi, A. Ranjbar, and R. Feuillet, "New approach to standing phase angle reduction for power system restoration," *European transactions on electrical power*, vol. 12, no.4, pp. 301–307, 2002, doi: 10.1002/etep.4450120408.
- [13] S. Shahidehpour and H. Yamin, "A technique for the standing phase-angle reduction in power system restoration," *Electric Power Components and Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 377–286, 2004, doi: 10.1080/15325000590474393.
- [14] M. Kheradmandi and R. Feuillet, "Using voltage control for reducing standing phase angle in power system restoration," *Electric Power Systems research*, vol. 146, pp. 9–16, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.01.006.
- [15] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, and C. Angeles-Camacho, "FACTS: modelling and simulation in power networks," *John Wiley & Sons*, 2004.



- [16] D. Hazarika and S. Dey, "Investigating the Use of UPFC Device for Reduction of SPA in a Power System," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 99, pp. 479–491, 2018, doi: 10.1007/s40031-018-0338-4.
- [17] D. P. Kothari and I. Nagrath, "Modern power system analysis," *Tata McGraw-Hill Education*, 2003.
- [18] F. Qiu and P. Li, "An integrated approach for power system restoration planning," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no.7, pp. 1234–1252, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2696564.
- [19] A. Khodabakhshian, M. R. Esmaili, R. a. Hooshmand, and P. Siano, "Power system observability enhancement for parallel restoration of subsystems considering renewable energy resources," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 4, p.p. 1–19, 2019, doi: 10.1002/2050-7038.12303.
- [20] M. R. Esmaili, A. Khodabakhshian, R. a. Hooshmand, and P. Siano, "A new coordinated design of sectionalizing scheme and load restoration process considering reliability of transmission system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 102, pp. 23–37, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.04.017.
- [21] G. Lambert-Torres, H. Martins, M. Coutinho, C. Salomon, and F. Vieira, "Particle swarm optimization applied to system restoration," in *2009 IEEE Bucharest Power Tech*, pp. 1–6, 2009, doi: 10.1109/PTC.2009.5282090.
- [22] R. Yuan, J. Ling, Z. Zhang, Y. Ruan, and Y. Sheng, "A genetic algorithm method for standing phase angle reduction in power system restoration," *IEEE PES General Meeting*, pp. 1–6, 2010, doi: 10.1109/PES.2010.5589852.
- [23] A. M. El-Zonkoly, "Renewable energy sources for complete optimal power system black-start restoration," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no.6, pp. 531–539, 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0646.

زیر نویس ها

¹ Unified Power flow controller

² standing phase angle

³ Teaching and learning optimization algorithm

