

جایابی و اندازه‌دهی بهینه محدودکننده‌های جریان خطا در شبکه انتقال با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی ازدحام ذرات وجست وجوی گرانشی

رضا اسلامی^{۱*}، حمید ارلنی زاده^۲

۱- استادیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی سهند

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴)

چکیده

با توجه به آنکه صنعت برق به‌عنوان زیرساخت سایر زیرساخت‌های کشور، اهمیت بالایی دارد، بنابراین یکی از اقداماتی که در جهت پدافند غیرعامل می‌توان به آن اشاره کرد، افزایش قابلیت اطمینان از عملکرد صحیح برنامه‌های حفاظتی در شبکه انتقال برق هست. یکی از این روش‌ها، استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا (FCL) در شبکه انتقال است. در سامانه‌های قدرت، فواید فنی و اقتصادی به‌کارگیری FCL، به نوع، تعداد، مکان‌های نصب و پارامترهای بهینه محدودکننده‌ها وابسته است. در این مقاله تعداد، مکان و امپدانس FCLها در شبکه برای رسیدن به اهداف مختلفی از جمله کاهش سطح اتصال کوتاه تعیین می‌شود، سپس با استفاده از یک الگوریتم فرا ابتکاری به نام الگوریتم ترکیبی جستجوی گرانشی و ازدحام ذرات PSO-GSA کمترین تعداد محدودکننده‌ها به همراه مکان‌های نصب و پارامتر بهینه هر محدودکننده در دو مرحله محاسبه می‌شود. در ادامه الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی با الگوریتم‌های ژنتیک، PSO و GSA مقایسه می‌گردد. مطالعات عددی که برای مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌ها GA، PSO و GSA انجام شد، نشان داده است که این الگوریتم به جای نصب تعداد بیشتر محدودکننده جریان خطا، با افزایش امپدانس آن به‌صورت بهینه ضمن کاهش هزینه کل نصب این تجهیزات عملکرد بهتری به لحاظ کاهش سطح اتصال کوتاه باس‌ها دارد و زودتر به نقطه بهینه همگرا می‌شود.

کلیدواژه‌ها: محدودکننده جریان خطا، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم جست و جوی گرانشی، کاهش سطح اتصال کوتاه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی GSA، PSO و GA

Optimal Placement and Sizing for Fault Current Limiters in the Transmission Network Using the Hybrid Optimization Algorithm of Particle Swarm and Gravity Search

R. Eslami^{*}, H. Arlanizadeh

Sahand University of Technology

(Received: 18/12/2021, Accepted: 15/07/2022)

Abstract

Considering the high importance of the electricity industry as the infrastructure of other infrastructures of the country, increasing the reliability of the correct operation of the protection programs in the electricity transmission network is considered as one of the measures that can be mentioned in the direction of passive defense. One of these methods is the use of fault current limiters (FCL) in the transmission network. In power systems, the technical and economic benefits of using FCL depend on the type, number, installation locations and optimal parameters of limiters. In the present study, the number, location and impedance of FCLs in the network are determined to achieve various goals such as reducing the short circuit level, then, the minimum number of limiters along with the installation locations and the optimal parameter of each limiter are calculated in two steps using a meta-heuristic algorithm, called the Hybrid Optimization algorithm (PSOGSA) (Combination of the Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO) and Gravitational Search Algorithm (GSA)). In the following, the proposed meta-heuristic algorithm is compared with genetic algorithms, PSO and GSA. According to the results of the numerical studies conducted to compare the proposed algorithm with GA, PSO and GSA algorithms, the proposed hybrid algorithm instead of installing more fault current limiters, by increasing its impedance optimally while reducing the total cost of installing this equipment; has better performance in terms of reducing the short circuit level of buses and it converges to the optimal point faster.

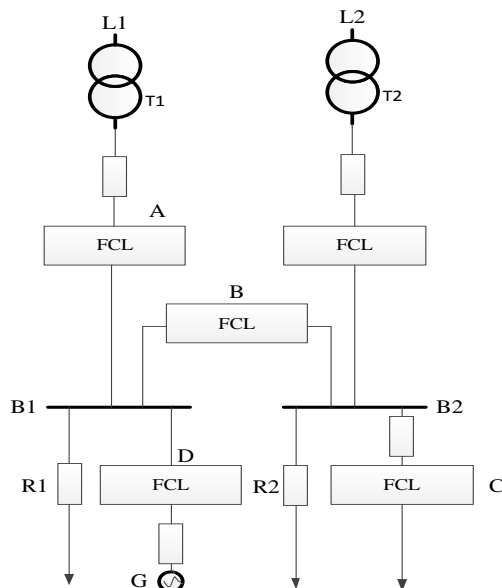
Keywords: Fault Current Limiter, Particle Swarm Optimization Algorithm, Gravitational Search Algorithm, Short Circuit Level Reduction, GSA, PSO, and GA Optimization Algorithms

۱. مقدمه

شبکه نیاز به تجهیزاتی دارد که توانایی تحمل این جریان را داشته باشند و برای قطع این جریان نیازمند کلیدهای قدرت با قدرت قطع بالا هستند که هزینه‌های سنگینی به سامانه تحمیل می‌کند.

محدود کننده‌های جریان خطا (FCL) تجهیزاتی هستند که برای فائق آمدن شبکه قدرت بر شرایط حاد گذرا (اضافه جریان‌های شدید) در دهه‌های اخیر مطرح شده‌اند. FCL به‌طور سری با سایر تجهیزات شبکه در مدار قرار گرفته و وظیفه محدود کردن جریان اتصال کوتاه مدار را قبل از رسیدن به مقدار حداکثر خود دارند به‌طوری که توسط کلیدهای قدرت موجود قابل قطع باشند. این تجهیزات، در حالت عادی مقاومت کمی در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهند ولی پس از وقوع اتصال کوتاه و در لحظات اولیه شروع جریان، مقاومت آن‌ها یک باره بزرگ شده و از بالا رفتن جریان اتصال کوتاه جلوگیری می‌کنند. با توجه به شکل (۱)، موقعیت یک FCL باید به گونه‌ای انتخاب شود تا بیشترین کاربرد را دارا باشد. برای داشتن عملکرد مقاوم و قابلیت اطمینان در سامانه‌های قدرت لازم است جریان‌های خطا در سامانه به مقدار پایین‌تری محدود شوند.

در زمینه ارائه ساختارهای جدید محدود کننده‌های جریان خطا و نیز مکان، تعداد و سایز مناسب آن‌ها در شبکه، همچنین تأثیر آن‌ها بر عملکرد شبکه، گزارش‌های زیادی به چاپ رسیده است که در مجموع اهمیت استفاده از آن‌ها در شبکه‌های قدرت جدید نشان داده می‌شود. صفایی و همکاران [۴]، از محدود کننده جریان خطای پل برای مقابله با مشکلات جریان خطای بالا استفاده کرده‌اند، به گونه‌ای که این محدودساز جریان خطا دارای ظرفیت بالا برای استفاده در شرایط خطای سنگین و تغییر ناگهانی بار هست.



شکل ۱. موقعیت‌های مختلف FCL در شبکه

بحث تشخیص خطاهای رخ داده در شبکه‌های قدرت با توجه به اهمیت استراتژیک شبکه‌های قدرت و هزینه‌های بالای تجهیزات به کار رفته در آن، از اولویت و اهمیت بالاتری برخوردار است. بنابراین اسلامی و همکاران در کنار بسیاری دیگر از محققین در زمینه تشخیص خطا [۳-۱] کارهای متعددی انجام داده‌اند. در همین راستا یک محدود کننده جریان خطا^۱ دستگاهی است که جریان اتصال کوتاه (در شبکه انتقال و توزیع قدرت) را در حین خطا تشخیص می‌دهد و آن را محدود می‌کند. به‌طور سنتی محدود کننده جریان خطا در سامانه‌های انتقال توسعه داده شده‌اند، اما بعد از ایجاد تغییرات در سامانه‌های توزیع در دو دهه اخیر، محدود کننده جریان خطا در سامانه‌های توزیع نیز کاربرد زیادی پیدا کرده است. دلایل کاربرد محدود کننده جریان خطا در سامانه‌های توزیع به وجود آمدن تغییرات توسعه‌ای و ساختاری در این سامانه‌ها است که به چند نمونه در زیر اشاره می‌شود:

۱- نفوذ منابع تولید پراکنده و در نتیجه افزایش سطح اتصال کوتاه این شبکه‌ها؛

۲- توسعه شبکه‌های توزیع جدیدتر با ساختارهای حلقوی و شبکه‌ای؛

۳- توسعه شبکه‌های میکروگرید.

در سامانه‌های قدرت، فواید فنی و اقتصادی به کارگیری FCL، به نوع، تعداد، مکان‌های نصب و پارامترهای بهینه محدود کننده-ها وابسته است. همچنین تعداد FCL‌های مورد استفاده در شبکه رابطه مستقیمی با سطح اتصال کوتاه و هزینه شبکه خواهد داشت. پارامترهای یک FCL نیز امپدانس آن و نوع آن خواهد بود. همچنین مهم‌ترین عامل محدود کننده‌کنندگی جریان خطا یک FCL یعنی امپدانس آن باید به گونه‌ای انتخاب شود تا وظیفه آن به بهترین حالت ممکن انتخاب شود. توسعه روزافزون سامانه‌های توزیع انرژی الکتریکی و همچنین افزایش به هم پیوستگی در شبکه‌های قدرت به دلیل نیاز به بالا بودن ظرفیت آن‌ها منجر به افزایش سطح اتصال کوتاه و جریان‌های خطای بزرگ‌تر و در نتیجه ازدیاد گرمای حاصله ناشی از عبور جریان القایی زیاد در ژنراتورها، ترانسفورماتورها و سایر تجهیزات و همچنین کاهش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. در زمان اتصال کوتاه صرف نظر از آسیبی که به خاطر بروز قوس الکتریکی به نقطه اتصال کوتاه وارد می‌شود، جریان‌های عظیمی که از ژنراتورها به طرف نقطه عیب جاری می‌شود سبب وارد شدن تنش‌های دینامیکی و حرارتی بالا به تجهیزات قدرت از قبیل خطوط هوایی، کابل‌ها، ترانسفورماتورها و کلیدهای قدرت می‌شود. عبور چنین جریانی از

¹ Fault Current limiter (FCL)

یانگ و همکاران [۲۱]، با استفاده از الگوریتم بهبود یافته ژنتیک، منطق فازی و الگوریتم PSO در دو مرحله به کاهش فضای جستجو، جایابی و انتخاب بهینه امپدانس FCL پرداخته که این مرجع تنها گزارشی بوده که به این ترتیب به این مسئله نگاه کرده و در مقایسه‌ای در انتهای آن، برتری جایابی دو مرحله‌ای را بر دیگر مقالات موجود نشان داده است. محمودیان و همکاران [۲۲]، نیز توابع هدف قابلیت اطمینان و کاهش سطح اتصال کوتاه را به‌عنوان اهداف مد نظر الگوریتم بهینه‌سازی (که الگوریتم‌های ژنتیک و PSO چند هدفه بوده)، در نظر گرفته است.

آلاریفیو همکاران [۲۳]، عنوان کرده‌اند که متغیرهای طراحی یک FCL به شرح زیر است:

(۱) مکان، (۲) اندازه، (۳) محل و اندازه، (۴) تعداد و مکان، (۵) تعداد، محل و اندازه، (۶) اندازه و نوع و (۷) اندازه و پارامترهای FCL. مکان FCL نقطه‌ای از یک سامانه قدرت است که در آن FCL متصل خواهد شد و دو نوع رویکرد قابل بررسی است: ارزیابی همه گره‌های شبکه بدون هیچ پیش فرضی انجام می‌شود [۲۴]. بدخشان [۲۵]، بیان کرده است که مکان بهینه برای FCL ها در یک شبکه قدرت دارای چندین مزیت است که شامل افزایش قابلیت اطمینان و امنیت سامانه، کاهش جریان خطا و افت ولتاژ، بهبود شرایط عبور از خطا از طریق قابلیت و افزایش اتصال انرژی تجدید پذیر هست. طیبی و همکاران [۲۶] با ارائه یک الگوریتم جدید آسیب‌پذیرترین شین در یک شبکه هوشمند را در برابر حملات سایبری تخمین حالت زده‌اند. در این مقاله نیز، با توجه به پیچیدگی‌های موجود از الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری استفاده می‌شود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. معرفی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

الگوریتم اجتماع ذرات که به اختصار PSO^1 نامیده می‌شود یکی از الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت است که از پرواز پرندگان و یا زنبورها در طبیعت برای یافتن غذا الهام گرفته است. نحوه ارتباط بین الگوریتم اجتماع پرندگان با یک دسته از جواب‌های تصادفی شروع به کار می‌کند سپس برای یافتن جواب مسئله بهینه‌سازی در فضای مسئله، با به‌روز کردن نسل‌ها به جستجو می‌پردازد. هر ذره به‌صورت چند بعدی با دو مقدار x_i^d و v_i^d که به ترتیب معرف وضعیت مکانی و سرعت مربوط به بعد d ام از i امین ذره هستند تعریف می‌شود. در هر مرحله از حرکت جمعیت، هر ذره با دو مقدار بهترین به‌روز می‌شود. که اولین مقدار، بهترین جواب

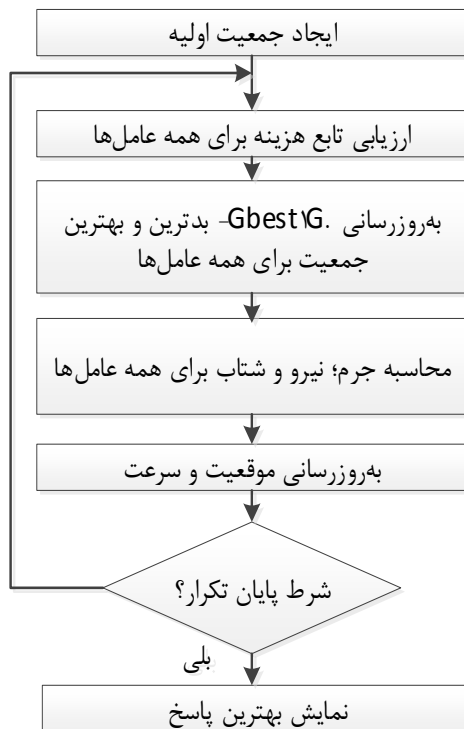
یادی و همکارانش [۵]، مزایای اقتصادی استفاده از FCL از نوع ابررسانا را بیان نمودند و با جزئیات ارائه کردند؛ آن‌ها اثبات کرده‌اند که با توجه به هزینه‌هایی نصب ادوات جدید، استفاده از محدودسازهای جریان خطا با در نظر گرفتن هزینه سوخت و... صرفه اقتصادی دارد. اکبری فرد و همکارانش [۶]، انواع مدل‌های FCL را در شبکه فوق توزیع نمونه‌ای در برزیل بررسی نمودند و با توجه به قرارگیری شبکه‌ای صنعتی دارای صنایع فولاد در این سامانه، بررسی اقتصادی و فنی قابل توجه‌ای انجام داده‌اند. قنبری و همکاران [۷]، محدود کننده جریان خطا حالت جامدی را معرفی نموده‌اند که برای اتصال شبکه بالادست و پایین‌دست در سامانه‌های صنعتی کارا هست. دومرک و همکارانش [۸ و ۹]، محدود کننده جریان خطا ابررسانایی را که توسط شرکت نکسان ساخته شده است، بررسی نمودند و استفاده آن در شبکه‌ای عملی را ارزیابی کرده‌اند. در این گزارش شبکه فشار متوسطی در انگلستان شبیه‌سازی گردیده و در شرایط شبیه‌سازی و عملی FCL را آزمایش و ارزیابی نموده است. با توجه به این موضوع که عملکرد محدود کننده جریان خطا به تعداد و مکان آن بستگی دارد، تنگ و همکاران [۱۰]، با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند این مهم انجام پذیرفته است. طراحی و جایابی محدود کننده جریان خطا در سامانه توزیع حلقوی توسط هونگسومبوت و همکاران [۱۱]، صورت گرفته است. بلر و همکاران [۱۲]، محدود کننده جریان خطای مقاومتی را در شبکه صنعتی با ولتاژ 11KV بررسی نموده و نشان داده‌اند که می‌توان با قرار دادن FCL بین دو باس بار تغذیه شده از دو فیدر مجزا، قابلیت اطمینان شبکه را تا حد قابل قبولی بالا برد. نمونه عملی محدودساز جریان خطای استفاده شده، توسط Ye و همکاران [۱۳]، گزارش داده شده و حالت گذرا بریکرها و کلیدهای قدرت به هنگام حضور FCL و بدون آن‌ها بررسی گردیده است. گزارش چاپ شده‌ای در سال ۲۰۱۴ مکان و تعداد FCL را در شبکه واقعی در قسمتی از کشور ایران بررسی کرده و میزان کاهش و محدودسازی جریان خطا این FCL را با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند بهینه نموده است [۱۴]. طراحی و استفاده از محدودسازهای جریان خطا در شبکه توزیع بوشهر، توسط هاشم تمار [۱۵]، ارائه شده و عملکرد آن را با استفاده از شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داده است. بهرامیان و همکارانش [۱۶]، با استفاده از الگوریتم PSO به جایابی بهینه محدود کننده جریان خطا پرداخته به گونه‌ای که توابع هدف‌های اقتصادی، قابلیت اطمینان و تلفات را برای کمینه کردن انتخاب نموده است. Didier و همکاران [۱۷]، جایابی بهینه FCL را برای بهبود پایداری سامانه انجام داده‌اند. Jo, Yu و شهریاری و همکاران [۱۸-۲۰]، مسائل حفاظتی شبکه را همراه با محدودیت‌های اقتصادی درهم آمیخته و محدود کننده جریان خطا را برای بهبود مشکلات قبل مکان‌یابی نموده‌اند. همچنین

¹ Particle Swarm Optimization

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t).M_{ij}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (6)$$

که در آن‌ها، $rand_j$ عدد تصادفی در فاصله $[0-1]$ هست، $G(t)$ ثبات گرانشی در زمان t بر اساس معادله بالا است و m_j حجم عامل j است که یک مقدار کم برای پیشگیری از انحراف تا صفر است و $R_{ij}(t)$ فاصله اقلیدسی بین دو عامل i و j است که طبق $R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_2$ تعریف می‌شود. بهتر است توجه کرد که در اینجا R در عوض R^2 در معادله قبل استفاده شده است؛ زیرا طبق آزمایش‌های بیان شده در R نتایجی بهتر از R^2 می‌دهد. در رابطه قبل K_{best} سری اولیه عوامل k با بهترین میزان تناسب و بزرگ‌ترین حجم است. در واقع می‌توان گفت که K_{best} یک تابع زمان هست که تا K_0 در آغاز رسیده با گذشت زمان برای بهبود اجرای GSA توسط کنترل ایجاد و اکتشاف کاهش می‌یابد. در اینجا K_0 تا n قرار گرفته (تعداد کل عوامل) به صورت طولی تا ۱ کاهش می‌یابد.

ترکیب دو الگوریتم PSO و GSA باعث می‌شود سرعت همگرایی به مراتب افزایش یافته و احتمال رخداد بهینه محلی کاهش یابد. فلوجارت الگوریتم ترکیبی PSO-GSA در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم ترکیبی PSO-GSA

با استفاده از شتاب به‌دست آمده در الگوریتم GSA از رابطه (۵) و ترکیب آن با رابطه (۱) از الگوریتم PSO به رابطه (۷) می‌رسید.

از لحاظ شایستگی است که تاکنون برای هر ذره به‌طور جداگانه به‌دست آمده است که این مقدار p_{best} نامیده می‌شود. مقدار بهترین دیگری که توسط الگوریتم اجتماع پرنندگان به‌دست می‌آید، بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام ذره‌ها در میان جمعیت به‌دست آمده است این مقدار بهترین کلی است و g_{best} نام دارد. بعد از یافتن دو مقدار g_{best} و p_{best} ، سرعت و مکان جدید هر ذره طبق روابط زیر به‌روز می‌شود:

$$V_i^{k+1} = WV_i^k + c_1 r_1 (p_{best_i}^k - X_i^k) + c_2 r_2 (g_{best_i}^k - X_i^k) \quad (1)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (2)$$

که در روابط بالا، W ، وزن اینرسی، r_1 و r_2 عوامل یادگیری است. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم، مقدار نهایی سرعت هر ذره $V_{id} \in [-V_{max}, V_{min}]$ محدود می‌شود.

الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA^۱) نیز یکی از جدیدترین الگوریتم‌های جستجوی اکتشافی جمعیت محور هست. در GSA یک موقعیت یک عامل در فضای تحقیق توسط ۲ شاخص مشخص می‌گردد:

۱- موقعیت آن (x_i) و

۲- سرعت (v_i) .

در این روش سرعت و موقعیت جدید عامل i طبق روابط (۳) و (۴) خواهد شد.

$$v_i^d(t+1) = rand_i \cdot v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (3)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (4)$$

که در آن‌ها، v_i سرعت عامل i در بعد d هست که فاصله حرکت این عامل را از موقعیت کنونی آن نشان می‌دهد، x_i^d موقعیت عامل i را نشان داده و t عدد تکرار هست و $rand_i$ متغیر تصادفی یکنواخت در فاصله $[0-1]$ است. این عدد تصادفی استفاده می‌شود تا خصوصیات تصادفی را به جستجو بدهد و تنوع و احتمال رسیدن به مطلوبیت کلی را افزایش دهد. در معادله قبل a_i^d شتاب عامل i در بعد d بوده و می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$a_i^d(t) = \frac{\sum_{j \in K_{best}, j \neq i} rand_j F_{ij}^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (5)$$

^۱ Gravitational Search

قدرت است [۹]. پخش بار گوس سایدل فقط برای شبکه‌های حلقوی قابل اجراست و برای شبکه‌های شعاعی همگرا نمی‌شود. از طرف دیگر پخش بار پسر-پیشرو فقط برای شبکه‌های شعاعی قابل استفاده است؛ اما پخش بار نیوتن رافسون قابلیت حل هر دو شبکه شعاعی و حلقوی را دارد.

در گام بعدی، آنالیز اتصال کوتاه شبکه شامل بررسی شرایط اتصال کوتاه در نقاط مختلف شبکه انجام می‌گیرد. در تمامی باس‌های شبکه، اتصال کوتاه سه فاز بدون مقاومت (شبیه‌سازی بدترین شرایط وقوع یک اتصال کوتاه) شبیه‌سازی شده است و جریان عبوری از خطوط شبکه با استفاده از پخش بار نیوتن رافسون در تمامی حالات محاسبه خواهد شد. برای مثال در شبکه ۳۰ باس استاندارد، در تمامی ۳۰ باس شبکه یک اتصال کوتاه سه فاز بدون مقاومت شبیه‌سازی شده است و جریان عبوری از تمامی خطوط در هر حالت محاسبه می‌گردد.

در گام نهمی روند مکان‌یابی FCL، اقدام به تشکیل یک ماتریس احتمال می‌شود. با استفاده از این ماتریس احتمال تجزیه و تحلیل نتایج آن، مکان‌های کاندید نصب FCL انتخاب خواهد شد. این ماتریس (که قابلیت پیاده‌سازی در هر سامانه حلقوی و شعاعی را دارا هست) به صورت زیر ساخته می‌شود:

با توجه به نتایج گام قبل، در هر حالت خطا در سامانه جریان خطوط مشخص خواهد بود. این جریان برای هر خط و در هر حالت، ممکن است از جریان در حالت عادی شبکه بیشتر و یا کمتر باشد. در صورت بیشتر بودن جریان خطا از جریان حالت عادی برای یک خط در هر حالت، یک شاخص بر همین اساس تعریف می‌شود. این شاخص برای هر خط بدین صورت تعریف می‌شود که تفاضل جریان خطا از جریان حالت عادی در هر حالت محاسبه و برای تمامی حالات با هم جمع می‌شود. رابطه ریاضی آن به صورت زیر است:

$$\Delta I_N = \sum_{i=1}^M I_{fault,i} - I_{normal,i} \quad (9)$$

(if $I_{fault} \geq I_{normal}$)

به طوری که N شماره خط در سامانه تحت مطالعه، M تعداد حالات بیشتر بودن جریان در هر حالت خطا از جریان در حالت نرمال، i شماره هر حالت بیشتر بودن جریان خطا از جریان حالت عادی شبکه، I_{fault} بیانگر جریان خطا در هر حالت خطا، I_{normal} بیانگر جریان خطا در حالت عادی است.

پس از مشخص شدن شاخص ΔI_N ، باید به دنبال شاخصی باشید که مکان‌یابی FCL را دقیق‌تر سازد. در حالت بیشتر بودن جریان خطا از جریان حالت عادی، دو حالت ایجاد می‌شود که آیا

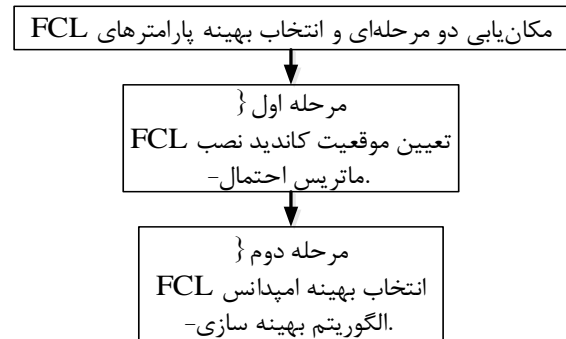
$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c'_1 \times rand \times a_i(t) + c'_2 \times rand \times (g_{best} - x_i(t)) \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $v_i(t)$ سرعت عامل در تکرار t ام، c'_1 و c'_2 ضرایب وزنی، w تابع وزنی بین صفر و یک، $rand$ یک مقدار تصادفی در محدوده صفر و یک، $a_i(t)$ شتاب عامل i در تکرار t ام و g_{best} بهترین راه‌حل است. بعد از مشخص شدن رابطه (۷)، در هر تکرار، موقعیت هر ذره به صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (8)$$

۲-۲. روش پیشنهادی برای جایابی و اندازه‌دهی بهینه FCLها

روش پیشنهادی از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول، مکان‌یابی FCL به وسیله تعریف یک ماتریس احتمال صورت می‌پذیرد. در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی GSA، اندازه بهینه امپدانس FCL با توجه به تابع هدف تعریف شده انتخاب خواهد گردید. شکل (۳) روند کلی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



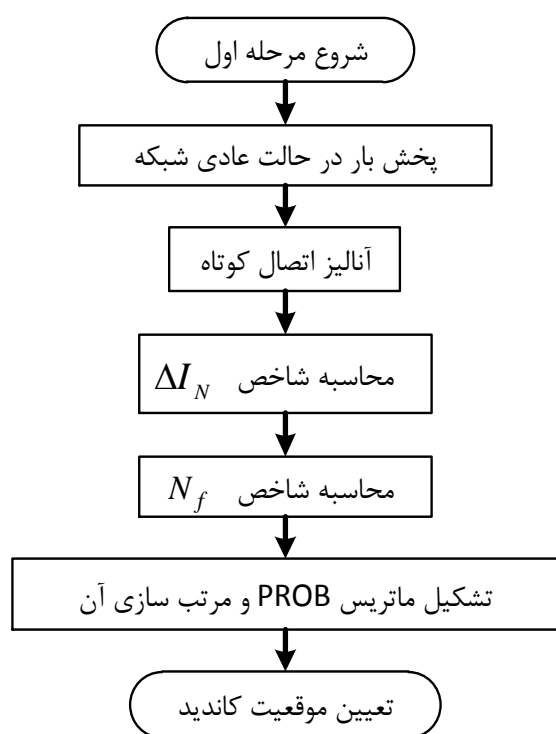
شکل ۳. روند کلی روش پیشنهادی

۲-۲-۱. مرحله اول: مکان‌یابی FCLها

با توجه به اینکه یک FCL می‌تواند سطح اتصال کوتاه شبکه را به وسیله وارد کردن یک امپدانس در شرایط خطا کاهش دهد، موقعیت‌های انتخابی استفاده از FCL نیز به همین موضوع مرتبط خواهد شد. بیشینه جریان اتصال کوتاه قابل قطع توسط یک کلید قطع مدار یا بریکر (CB) در شبکه حد مشخصی دارد. این بیشینه جریان قابل قطع توسط بریکر در مراجع مختلف، ۷ الی ۱۰ برابر جریان نامی شبکه عنوان شده است [۴، ۷، ۱۱ و ۱۹].

روند مرحله اول روش پیشنهادی با محاسبه پخش بار در حالت عادی شبکه شروع خواهد شد. روش پخش بار مورد استفاده در این مقاله روش نیوتن رافسون مرسوم در شبکه‌های

بحرانی‌ترین شین و محتمل‌ترین خط برای نصب محدود کننده انتخاب شده‌اند. انتخاب تعداد FCLها با توجه شرایط شبکه و طراحان آن خواهد بود که در مراجع مختلف به صورت معمول این تعداد مشخص شده است [۱۴-۱۱]. شکل (۴)، فلوجارت مرحله اول روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. فلوجارت مرحله اول روش پیشنهادی

۲-۲-۲. مرحله دوم: اندازه بهینه امپدانس FCLها

پس از مشخص شدن محل‌های کاندید نصب FCL، در مرحله دوم روش پیشنهادی به دنبال پیدا کردن اندازه بهینه امپدانس FCLهای انتخاب شده است. هدف نهایی انتخاب بهینه امپدانس هر FCL، کاهش سطح اتصال کوتاه کل شبکه است. در این مقاله تابع هدف انتخاب شده به دنبال پیدا کردن مقدار امپدانس بهینه هر FCL است به گونه‌ای که سطح اتصال کوتاه شبکه کاهش یابد. این کاهش سطح اتصال کوتاه در واقع به معنای آن است که بریکرهای تمامی خطوط در تمامی حالات وقوع خطا در هر نقطه‌ای از شبکه قادر به قطع جریان اتصال کوتاه باشند. پس در نتیجه می‌توان از شاخص معرفی شده در رابطه (۱۹) یعنی ΔI_N در محاسبه تابع هدف استفاده نمود.

همچنین از جهت دیگر، هر چقدر که امپدانس انتخاب شده FCL کمتر باشد، هزینه مصرفی این FCL کمتر خواهد بود در حالی که این مقدار امپدانس باید حداقل مقداری را برای کاهش

این جریان از بیشینه جریان قابل قطع بریکر بیشتر است یا کمتر؟ اگر جریان کمتر از حد قابل قطع بریکر باشد، توسط بریکر قابل شناسایی و قطع بوده و برای سامانه مشکلی ایجاد نخواهد کرد؛ اما اگر جریان از حد قطع بریکر بیشتر باشد، باعث ایجاد آسیب می‌شود. در نتیجه باید برای بیشتر شدن اهمیت این حالت شاخصی تعریف شود. این شاخص که N_f نام دارد، بیانگر تعداد حالات بیشتر شدن جریان خط در هر حالت خطا از بیشینه جریان قابل قطع توسط بریکر است. بیشینه جریان قابل قطع هر بریکر در این مقاله، ۷/۵ برابر جریان حالت عادی انتخاب می‌شود [۱۰].

$$N_f = \text{number of fault current exceeds the CB rated current} \quad (10)$$

پس از مشخص شدن دو شاخص ΔI_N و N_f برای هر خط، ماتریس احتمال (Probability matrix) کاندید نصب FCL در سامانه تشکیل می‌شود. درایه‌های این ماتریس از ترکیب دو شاخص معرفی شده در روابط (۱۹) (در حالت نرمالیزه) و (۲۰) تشکیل می‌شود. ترکیب شدن این دو شاخص با استفاده از عملگر ضرب هست، بدین صورت که برای هر خط هر دو شاخص در هم ضرب خواهند شد. علت این ضرب مشخص شدن میزان تأثیر شاخص دوم در شاخص اول است. ماتریس احتمال یک ماتریس سطری یا ستونی هست که در صورت ستونی در نظر گرفته شدن، دارای N سطر و ۱ ستون است. رابطه ریاضی این ماتریس در رابطه (۱۱) مشخص شده است.

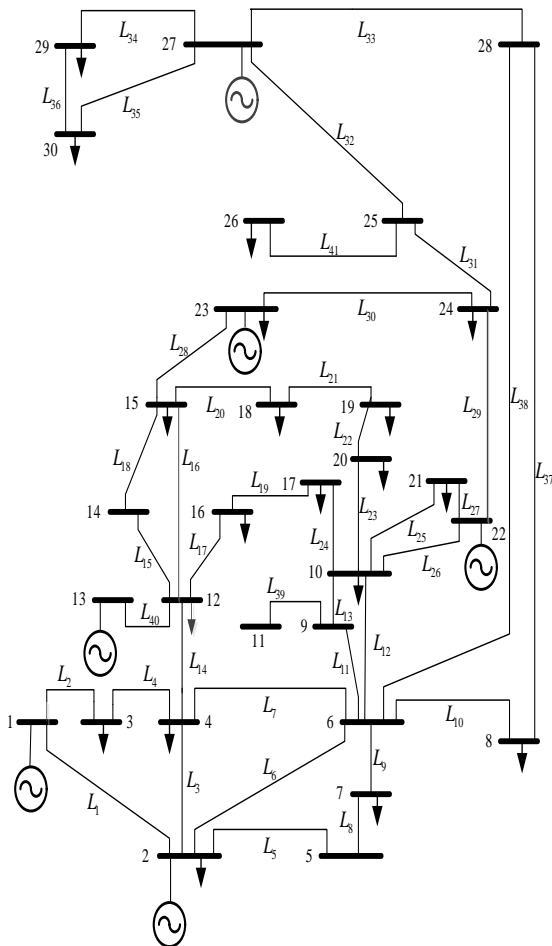
$$PROB = \begin{bmatrix} N_{f1} \times \Delta I_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ N_{fN} \times \Delta I_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

پس از مشخص شدن ماتریس $PROB$ ، باید با توجه به مقادیر درایه‌های آن در مورد موقعیت نصب FCL تصمیم‌گیری شود. برای این منظور درایه‌های این ماتریس از زیاد به کم مرتب‌سازی می‌شوند. بیشترین مقدار در میان درایه‌های مرتب شده از زیاد به کم ماتریس $PROB$ ، بیانگر محتمل‌ترین خط برای نصب FCL است. علت این امر وجود دو شاخص است: ۱- تعداد خطوط دچار افزایش جریان و مقدار این افزایش که خود سختی و شدت را نیز در درون خود دارد و ۲- سختی و شدت افزایش جریان از لحاظ قدرت قطع کلید (افزایش جریان خطا بیشتر از مقدار جریان قطع کلید) است که این معیار به هم ضرب شده‌اند. بنابراین تعداد خطوط با افزایش جریان خطا به همراه مقدار افزایش و تعداد خطوطی که مقدار افزایش جریان خطای آن‌ها از قدرت قطع کلید مربوطه بیشتر است به عنوان شاخص

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی

بدین منظور قدم به قدم همراه با اجرای روش پیشنهادی در سامانه ۳۰ باس استاندارد پیش می‌رویم. در اولین گام با استفاده از پخش بار به روش نیوتون رافسون، جریان تمامی خطوط در حالت عادی مشخص می‌شود. شکل (۷) نتایج جریان عبوری از خطوط حاصل از پخش بار در شبکه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، جریان خطوط ۱، ۲ و ۴ بیشتر از سایر خطوط است. بیشترین جریان عبوری مربوط به خط ۱ با مقداری بیش از ۰/۰۴۵ کیلو آمپر است.



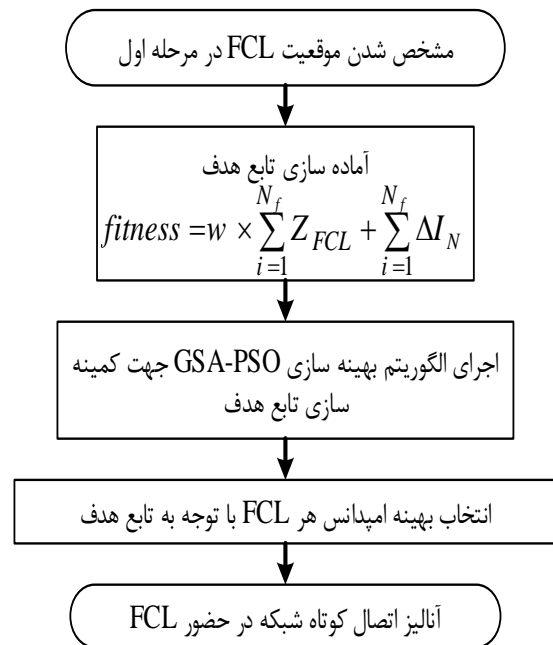
شکل ۶. دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۰ باس IEEE

بعد از مشخص شدن جریان‌های تمامی خطوط در حالت عادی، به‌منظور آنالیز اتصال کوتاه و شبیه‌سازی بدترین حالت وقوع خطا، یک خطای سه فاز بدون مقاومت بر تمامی باس‌های شبکه اعمال می‌شود. در واقع در این حالت تعداد ۳۰ خطای سه فاز در نقاط مختلف شبکه خواهید داشت که با استفاده از آن، آنالیز اتصال کوتاه در گام دوم صورت پذیرد.

جریان اتصال کوتاه وارد شبکه کند. با توجه به مطالب فوق، تابع هدف استفاده شده در این مقاله در رابطه (۱۲) معرفی شده است.

$$fitness = w \times \sum_{i=1}^{N_f} Z_{FCL} + \sum_{i=1}^{N_f} \Delta I_N \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، w فاکتور وزنی هست که برای بالانس کردن و متعادل‌سازی دو ترم استفاده شده در رابطه تابع هدف، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین Z_{FCL} بیانگر امپدانس FCL در محل‌های انتخاب شده است. بقیه سمبل‌های استفاده شده نیز در قسمت قبل توضیح داده شده‌اند. هدف این مقاله، کمیته‌سازی رابطه (۱۲) و استفاده از الگوریتم ترکیبی PSO-GSA است. بعد از پیدا شدن جواب بهینه توسط الگوریتم PSO-GSA، شبکه همراه با FCL‌های انتخاب شده در موقعیت‌های مناسب همراه با اندازه بهینه امپدانس مورد نظر مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. شکل (۵) فلوجارت مرحله دوم روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

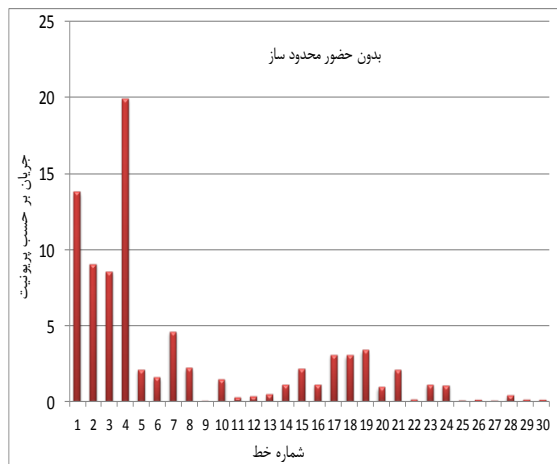


شکل ۵. فلوجارت مرحله دوم روش پیشنهادی

سامانه ۳۰ باس استاندارد IEEE، همان‌طور که در شکل (۶) نمایش داده شده است، جهت اعمال روش پیشنهادی انتخاب می‌شود. این سامانه، یک شبکه انتقال حلقوی است [۱۱]. علت انتخاب این سامانه جهت شبیه‌سازی، حلقوی بودن و پیچیدگی سامانه است. این سامانه دارای ۶ ژنراتور، ۳۲ خط انتقال و ۲۰ بار متصل به باس است. این سامانه با د نظر گرفتن موارد قبل، طول خطوط ارتباط، اطلاعات مربوط به این خطوط شامل سطح مقطع و جنس هادی در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی می‌شود.

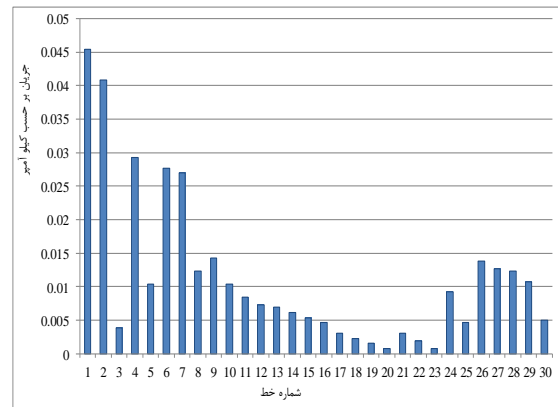
افزایش جریان خطا حتی تا مقداری نزدیک ۲۰PU شده است. همچنین در این شکل دیده می‌شود که جریان خطا در خطوط ۱ الی ۴ از بیشینه جریان قابل قطع توسط بریکرها بیشتر بوده و در این حالت، بریکرها قادر به قطع جریان نخواهند بود. در نتیجه این حالت باعث اضافه شدن یک شماره به تعداد شاخص N_f برای این چهار خط خواهد شد؛ اما در دیگر خطوط این جریان از حد قطع بریکرها کمتر بوده و باعث ایجاد مشکل نمی‌شود. یکی دیگر از مشاهدات این حالت، کمتر شدن جریان خطا ۹ نسبت به حالت عادی شبکه هست (در این حالت جریان خطا KA ، ۰/۰۱۳ است). در دیگر خطوط جریان عبوری افزایش یافته و در محاسبه شاخص ΔI_N برای خطوط مذکور مؤثر است.

پس از آنالیز حالت عادی شبکه و حالت اتصال کوتاه شبکه، در گام‌های بعد به دنبال پیدا کردن موقعیت مناسب نصب FCL هستیم. همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، ابتدا به دنبال پیدا کردن شاخص ΔI_N و سپس شاخص N_f برای هر خط بوده و سپس با توجه به نتایج آن، به دنبال تشکیل ماتریس $PROB$ هستیم.



شکل ۸. جریان تمامی خطوط شبکه ۳۰ باس IEEE در حالت خطا بر باس ۳ (بدون حضور FCL)

جدول (۲) بیانگر نتایج مرحله اول روش پیشنهادی در سامانه ۳۰ باس IEEE است. در این جدول نتایج دو شاخص معرفی شده و درایه مربوطه ماتریس احتمال برای هر خط نشان داده شده است. نتایج این جدول از این جهت حائز اهمیت است که در تعدادی از خطوط شاخص N_f صفر بوده و نتایج درایه ماتریس احتمال برای آن‌ها صفر خواهد بود. همچنین در این جدول درایه ماتریس احتمال خطوط ۱، ۲ و ۹ از سایر اعداد بیشتر است. در صورتی که هدف انتخاب سه خط به‌عنوان خطوط کاندید نصب FCL در نظر گرفته شوند، سه خط مذکور کاندیدای محل نصب FCL خواهند بود [۲۱ و ۲۲].



شکل ۷. جریان تمامی خطوط شبکه ۳۰ باس IEEE در حالت عادی جدول (۱) مشخصات اولیه شبکه مورد مطالعه قبل از اعمال روش پیشنهادی را مشخص کرده است.

جدول ۱. مشخصات اولیه شبکه قبل از روش پیشنهادی

شماره باس	ولتاژ (KV)	سطح اتصال کوتاه (PU)	شماره باس	ولتاژ (KV)	سطح اتصال کوتاه (PU)
۱	۱۳۲	۴/۵۴۱۳	۱۶	۳۳	۳/۲۸۲۶
۲	۱۳۲	۵/۳۳۰۹	۱۷	۳۳	۳/۸۱۳۲
۳	۱۳۲	۶/۲۸۰۵	۱۸	۳۳	۲/۷۰۲۵
۴	۱۳۲	۶/۷۴۲۷	۱۹	۳۳	۲/۷۴۷۸
۵	۱۳۲	۵/۰۶۵	۲۰	۳۳	۲/۹۱۳۶
۶	۱۳۲	۴/۹۸۶۵	۲۱	۳۳	۳/۹۷۱۷
۷	۱۳۲	۴/۷۱۲۳	۲۲	۳۳	۳/۹۴۳۱
۸	۱۳۲	۴/۸۷۹۵	۲۳	۳۳	۲/۷۳۲۲
۹	۱۳۲	۴/۸۹۲۳	۲۴	۳۳	۳/۱۵۰۶
۱۰	۳۳	۴/۷۳۲۹	۲۵	۳۳	۲/۴۱۹۸
۱۱	۳۳	۲/۶۲۹۸	۲۶	۳۳	۱/۱۴۸۹
۱۲	۳۳	۲/۲۵۵۲	۲۷	۳۳	۲/۷۳۱۸
۱۳	۳۳	۲/۸۴۷۲	۲۸	۱۳۲	۶/۰۳۴۸
۱۴	۳۳	۲/۶۲۳۹	۲۹	۳۳	۱/۴۲۲۴
۱۵	۳۳	۲/۵۴	۳۰	۳۳	۱/۳۰۱۳

در شکل (۸) جریان تمامی خطوط برای خطای سه فاز اعمالی بر باس ۳ نمایش داده شده است. این جریان از آن جهت برای نمایش انتخاب شده که در میان ۳۰ حالت ممکن بر اساس مشاهدات جدول (۲)، بدترین حالت بوده و در خط ۴ باعث

جدول ۲. نتایج مرحله اول روش پیشنهادی در سامانه ۳۰ باس IEEE

خط	N_f	ΔI	PROB	خط	N_f	ΔI	PROB	خط	N_f	ΔI	PROB
۱	۱۶	۵/۶۲۲	۸۳/۹۵	۱۲	۰	۰/۷۴۲	۰	۲۳	۰	۰/۶۵۹	۰
۲	۱۱	۱/۹۸۴	۲۱/۸۲	۱۳	۰	۰/۶۴۳	۰	۲۴	۱	۰/۹۴۲	۰/۹۴۲
۳	۱	۰/۳۲۷	۰/۳۲۷	۱۴	۰	۰/۳۸۴	۰	۲۵	۱	۰/۲۶۹	۰/۲۶۹
۴	۳	۰/۹۷	۲/۹۱	۱۵	۱	۰/۶۹۸	۰/۶۹۸	۲۶	۷	۰/۴۶۱	۳/۲۲
۵	۱	۰/۲۳	۰/۲۳	۱۶	۰	۰/۵۷۱	۰	۲۷	۶	۰/۳۵۲	۲/۱۲
۶	۳	۰/۹۳	۳/۷۹	۱۷	۱	۰/۸۹۲	۰/۸۹۲	۲۸	۵	۰/۲۸۹	۱/۴۴
۷	۳	۰/۹۰	۲/۷	۱۸	۰	۰/۷۴۹	۰	۲۹	۴	۰/۱۹۲	۰/۷۶۸
۸	۰	۰/۵۴۸	۰	۱۹	۰	۰/۸۰۶	۰	۳۰	۳	۰/۵۲۹	۱/۵۸
۹	۸	۰/۵۹۶	۴/۷۶	۲۰	۲	۰/۷۷۶	۱/۵۵	۳۱	۱	۰/۹۱۲	۰/۹۱۲
۱۰	۰	۰/۴۱۲	۰	۲۱	۱	۰/۸۲۳	۰/۸۲۳	۳۲	۲	۰/۴۸۷	۰/۹۷۴
۱۱	۰	۰/۳۶۷	۰	۲۲	۱	۰/۶۲۹	۰/۶۲۹				

شبکه است. پس از انتخاب مقادیر جدول (۳)، شبکه در حالت حضور این ۳ تجهیز FCL آنالیز خواهد شد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، تجهیز FCL بر حالت عادی شبکه تأثیر نخواهد داشت و تنها به هنگام وقوع خط وارد عمل شده و امیدانس محدود کننده را به امیدانس شبکه اضافه می‌کند. در نتیجه شبکه جدید تنها در حالت اتصال کوتاه تحلیل خواهد شد و حالت عادی آن مانند حالت عادی شبکه بدون حضور FCL است.

جدول ۳. نتایج مرحله دوم روش پیشنهادی در سامانه ۳۰ باس IEEE

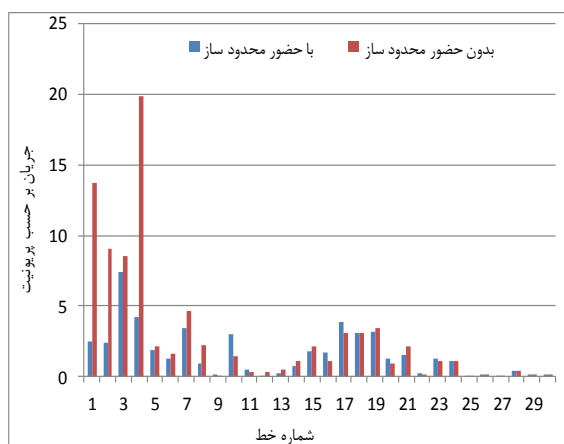
خط	امیدانس FCL (PU)
۱	۰/۵۴۶
۲	۰/۲۶۷
۹	۰/۱۴۷

شکل (۹) نشان دهنده تعداد تکرار و همگرایی تابع هدف پیشنهادی است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، بعد از ۹۰ تکرار به جواب بهینه خود رسیده است. در این شکل دیده می‌شود الگوریتم بهینه‌سازی PSO-GSA توانسته از بهینه محلی فرار کند و در مقدار بهینه جدید، باعث کمینه شدن تابع هدف گردد. شکل (۱۰) نشان دهنده جریان تمامی خطوط در حالت وقوع خط در باس ۳ (بدترین حالتی که جریان آن در حالت عادی در شکل (۸) نمایش داده شد) پس از حضور ۳ FCL در موقعیت‌های خطوط ۱، ۲ و ۹ با امیدانس مشخص شده در جدول (۳) است.

پس از مشخص شدن خطوط ۱، ۲ و ۹ به‌عنوان خطوط مناسب جهت نصب FCL، مرحله اول روش پیشنهادی پایان می‌پذیرد. در مرحله دوم روش پیشنهادی، اقدام به پیدا کردن اندازه بهینه این سه FCL انتخاب شده در خطوط ۱، ۲ و ۹ خواهیم کرد. همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، تابع هدف پیشنهادی (رابطه ۱۲) برای این سه خط نوشته شده است و همراه با هم اجرا می‌شود. فاکتور وزنی برای هر خط متناسب با شاخص ΔI آن انتخاب می‌شود به گونه‌ای که دو ترم موجود در تابع هدف با هم در تعادل قرار بگیرند. این فاکتور وزنی برای خطوط ۱، ۲ و ۹ به ترتیب مقادیر ۰/۱۵، ۰/۱۲ و ۰/۲ انتخاب می‌شود.

پس از مشخص شدن خطوط ۱، ۲ و ۹ به‌عنوان خطوط مناسب جهت نصب FCL، مرحله اول روش پیشنهادی پایان می‌پذیرد. در مرحله دوم روش پیشنهادی، اقدام به پیدا کردن اندازه بهینه این سه FCL انتخاب شده در خطوط ۱، ۲ و ۹ خواهیم کرد. همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، تابع هدف پیشنهادی (رابطه ۱۲) برای این سه خط نوشته شده و همراه با هم اجرا می‌شود. فاکتور وزنی برای هر خط متناسب با شاخص ΔI آن انتخاب می‌شود به گونه‌ای که دو ترم موجود در تابع هدف با هم در تعادل قرار بگیرند. این فاکتور وزنی برای خطوط ۱، ۲ و ۹ به ترتیب مقادیر ۰/۱۵، ۰/۱۲ و ۰/۲ انتخاب می‌شود. این مقادیر بر اساس نتایج خروجی توابع هدف تعریف شده انتخاب می‌شود (در انتخاب مقادیر سعی می‌کنیم مقادیر دو ترم در حدود هم‌دیگر قرار گیرند).

پس از اجرای تابع هدف برای سه خط کاندید در شبکه مورد مطالعه، مقادیر نشان داده شده در جدول (۳) به‌دست خواهند آمد. این مقادیر نشان دهنده امیدانس هر FCL بر حسب پریونیت



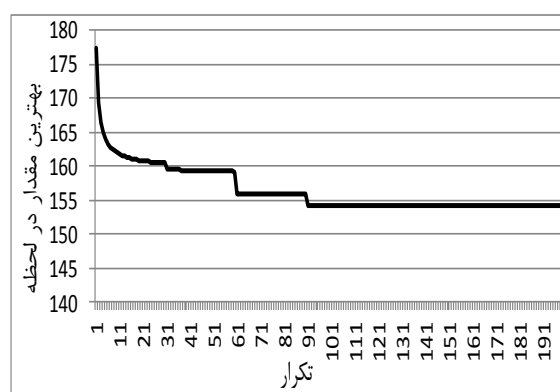
شکل ۱۱. جریان مقایسه‌ای تمامی خطوط شبکه ۳۰ باس IEEE در

حالت خطا بر باس ۳

در شکل (۱۱) خط ۴ که در واقع خط هدف برای کاهش سطح اتصال کوتاه هست، طبیعی است اثر زیادی از نصب محدود کننده جریان خطا داشته باشد. همچنین به دلیل تغییر در مقدار ماتریس امپدانس باس بعد از افزوده شدن FCL طبق رابطه زیر، ممکن است برخی از مقادیر قطر اصلی ماتریس امپدانس کاهش جزئی داشته باشند که این امر موجب افزایش جریان اتصال کوتاه آن‌ها خواهد شد. اما این افزایش هرگز منجر به افزایش تا حد قدرت قطع کلید مربوطه نخواهد بود چرا که کمتر بودن جریان اتصال کوتاه خطوط بعد از نصب محدود کننده جریان خطا از مقدار قدرت قطع کلید آن‌ها جزو قیود مسئله بوده و قطعاً رعایت خواهد شد.

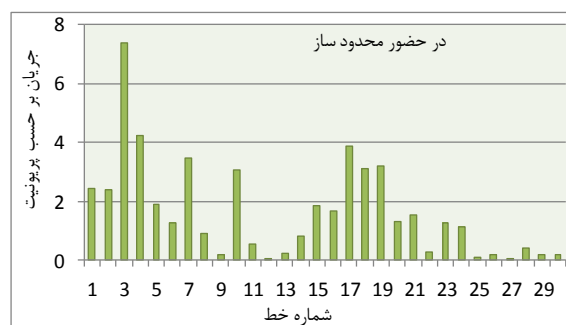
۲-۳. مقایسه با روش‌های PSO و GSA

بدین منظور تابع هدف سه FCL انتخاب شده در موقعیت‌های ۱، ۲ و ۹ به وسیله این روش‌های PSO و GSA دوباره اجرا خواهند شد. برتری الگوریتم ترکیبی PSO-GSA در مقایسه با دو الگوریتم PSO و GSA، قدرت آن در فرار از جواب بهینه محلی و رسیدن به مقدار بهینه سراسری است. الگوریتم ترکیبی PSO-GSA به وسیله نیرویی عمل کند که دیگر عوامل جستجو به همدیگر اعمال می‌کند، اما تغییر جهت فضای جستجو در الگوریتم PSO برای رسیدن به جواب بهینه تنها با دو عامل P_{best} و g_{best} صورت می‌پذیرد. در نتیجه تنها دو عامل در رسیدن به جواب مؤثر می‌باشند. یک تفاوت دیگر این الگوریتم، به‌روز شدن فاصله بین جواب‌ها است. در الگوریتم ترکیبی PSO-GSA فاصله جواب کنونی در جواب بعدی مؤثر است اما در دو الگوریتم PSO و GSA، روند به این صورت نیست. الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم PSO-GSA دارای مشکلات زیادی است. یکی از این مشکلات ضعیف بودن آن در همگرایی به جواب بهینه و گیر کردن در جواب بهینه محلی است.



شکل ۹. روند همگرایی تابع هدف پیشنهادی با استفاده از الگوریتم PSO-GSA

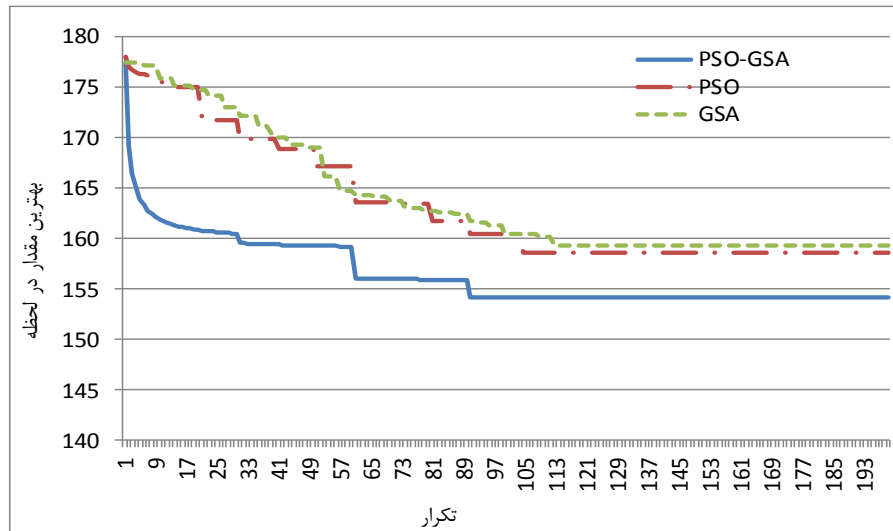
در شکل (۹)، دیده می‌شود که بیشینه جریان خطا در خط ۳ رخ داده که از مقدار بیشینه جریان قابل قطع توسط بریکر کمتر است. در نتیجه این جریان توسط بریکر قابل قطع خواهد بود و شبکه در مقابل اتصال کوتاه به وقوع پیوسته حفاظت می‌شود. همچنین در این شکل دیده می‌شود که سطح اتصال کوتاه به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و جریان خطا در تمامی خطوط به مقدار قابل قطع توسط بریکرها رسیده است. این نتیجه نشانگر صحت و دقت روش پیشنهادی هست که حتی در بدترین حالت، حضور FCL توانسته کارساز باشد و سطح اتصال کوتاه شبکه به حد قابل قبولی کاهش دهد. نکته جالب توجه در این حالت کاهش جریان اتصال کوتاه در خط ۴ هست که در حالت بدون حضور FCL مقداری در حدود ۲۰PU را دارا بود اما در این حالت به مقداری کمتر از ۲PU کاهش یافته است. این کاهش قابل توجه نشان دهنده موقعیت‌های مناسب FCL‌های پیشنهادی است. شکل (۱۱) مقایسه جریان‌های خطوط در شکل‌های (۸ و ۱۰) را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌گردد که هیچ یک از خطوط شبکه در اثر خطای رخ داده در باس ۳ که بدترین خطای شبکه (دومین رتبه سطح اتصال کوتاه و اولین رتبه افزایش جریان نسبت به جریان نامی) جریانی بیشتر از ۷/۵ برابر جریان نامی (ظرفیت قطع کلید قدرت) ندارند که این صحت عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد



شکل ۱۰. جریان تمامی خطوط شبکه ۳۰ باس IEEE در حالت خطا بر باس ۳ (در حضور FCL)

بهینه همگرا شده و هم جواب بهینه کمتری در مقایسه با دو روش دیگر دارد.

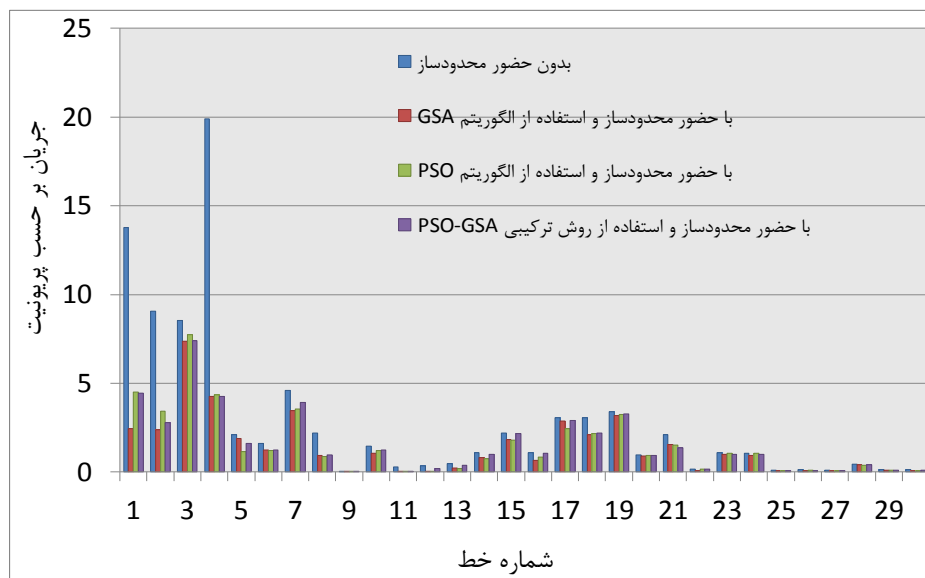
شکل (۱۲) روند تعداد تکرار و همگرایی این سه الگوریتم را در مقایسه با هم نشان می‌دهد. همان‌طوری که در این شکل مشخص است، الگوریتم ترکیبی PSO-GSA هم زودتر به نقطه



شکل ۱۲. مقایسه همگرایی و مقادیر تابع هدف پیشنهادی با استفاده از سه الگوریتم PSO-GSA و PSO و GSA

نمایش می‌دهد. در هر دو شکل مشخص است که الگوریتم ترکیبی PSO-GSA در مقایسه با دو روش دیگر، کارسازتر بوده و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، مقایسه این سه روش در حالت آنالیز اتصال کوتاه را نمایش می‌دهند. شکل (۱۲) مقایسه سه روش در حضور FCL بهینه‌سازی شده در حالت خطا در باس ۳ را نمایش داده و شکل (۱۳) مقایسه‌ای بین حالت عادی و ۳ حالت قبل را

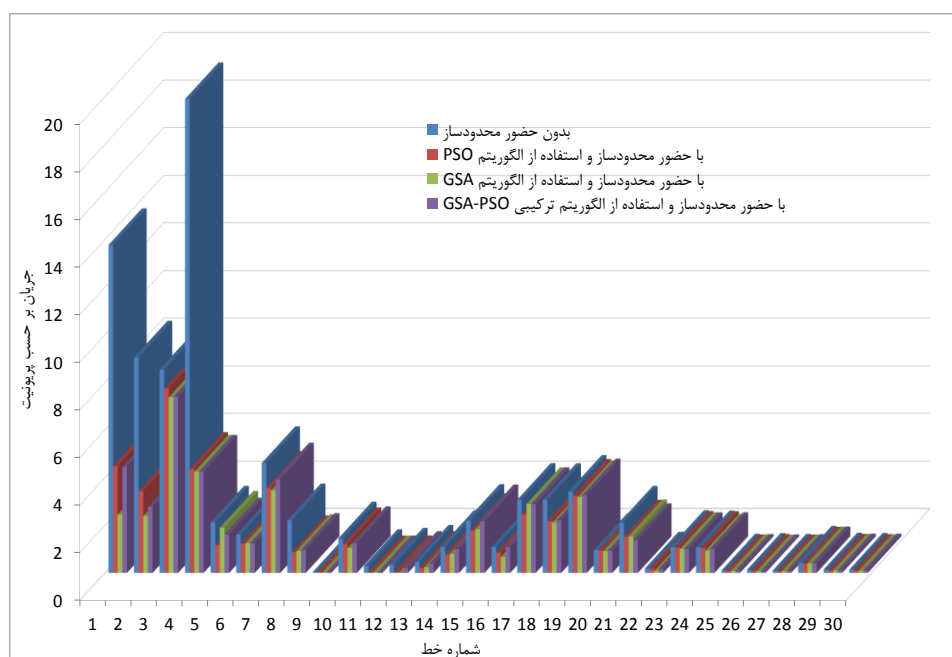


شکل ۱۳. مقایسه آنالیز اتصال کوتاه شبکه در وقوع خطا بر باس ۳ با استفاده از سه الگوریتم PSO-GSA و PSO و GSA

ژنتیک در جدول (۴) نمایش داده شده است. از نتایج این جدول می‌توان دریافت که به‌طور کلی روش پیشنهادی عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. دلیل این برتری، بیشتر شدن میزان امیدانس و در نتیجه بیشتر شدن هزینه و تأثیر ناچیز بر کاهش جریان اتصال کوتاه است.

۳-۳. مقایسه با الگوریتم ژنتیک

در مقایسه با روش ژنتیک، تابع هدف سه FCL انتخاب شده توسط مرحله اول روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شوند. نتایج مقایسه‌ای بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی توسط دو روش PSO-GSA و الگوریتم



شکل ۱۴. مقایسه آنالیز اتصال کوتاه شبکه در وقوع خطا بر باس ۳ با نمایش سه بعدی

محدود کننده جریان خطا در واقع ضمن داشتن هزینه کمتر، مقدار کاهش بیشتری در جریان‌های خطوط شبکه در اثر وقوع اتصال کوتاه در باس‌های شبکه دارد.

۵. مراجع

- [1] Eslami, R.; Sadeghi, S. H. H.; Askarian-Abyaneh, H.; Nasiri, A. "A Novel Method for Fault Detection in Future Renewable Electric Energy Delivery and Management Microgrids, Considering Uncertainties in Network Topology"; *Electr. Power Compon. Syst.* 2017, 45, 1118-1129.
- [2] Eslami, R.; Hosseini, S. A. "Presenting New Triple Methods for Fault Detection, Location, and Its Identification in DC Microgrid"; *IJST-T Electr. Eng.* 2020, 44, 849-860.
- [3] Eslami, R.; Sadeghi, S. H. H.; Askarian-Abyaneh, H. "fault Detection in Microgrids Using Positive, Negative and Zero Sequences of Voltage and Current Waveforms Considering Uncertainties of Network Topology"; *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity* 2018, 6, 107-121.
- [4] Safaei, A.; Zolfaghari, M.; Gilvanejad, M.; Gharehpetian, G. B. "A Survey on Fault Current Limiters: Development and Technical Aspects"; *Int. J. Elec. Power* 2020, 118, 105729.
- [5] Yadav, K.; Priyadarshi, A.; Shankar, S.; Rathore, V. "Study of Fault Current Limiter-A Survey"; *Innov. Elec. Electron. Eng.* 2021, 97-113.
- [6] Akbari Foroud, A.; Barzegar-Bafrooei, M.; Niasati, M.; Ashkezari, J. "On the Advance of SFCL: A Comprehensive Review"; *IET Gener. Transm.* 2019, 13.
- [7] Ghanbari, T.; Farjah, E. "Development of an Efficient Solid-State Fault Current Limiter for Microgrid"; *IEEE Trans. Power Deliv.* 2012, 27, 1829-1834.

جدول ۴. نتایج مقایسه‌ای دو الگوریتم PSO-GSA و ژنتیک

روش الگوریتم	امپدانس FCL (پریونیت) مشخص شده در خطوط			بیشترین میزان کاهش جریان خطا (%)
	۱	۲	۹	
PSO-GSA	۰/۵۴۶	۰/۲۶۷	۰/۱۴۷	۷۴
ژنتیک	۰/۸۷۳	۰/۴۲۹	۰/۱۸۳	۷۱

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و ارائه روشی جهت مکان‌یابی FCL و انتخاب اندازه بهینه امپدانس آن در دو مرحله استفاده از الگوریتم ترکیبی PSO-GSA پرداخته شد. با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که حضور FCL با قابلیت محدودسازی جریان خطا و بهبود شرایط سطح اتصال کوتاه شبکه، باعث کاهش جریان عبوری از خطوط می‌شود. در نتیجه، احتمال وقوع آسیب‌های جبران‌ناپذیر در شبکه تا حد قابل قبولی کاهش یافته و تمامی بریکرهای شبکه قدرت قطع جریان خطا را در وقوع بدترین حالات خطا را دارا خواهند بود و در نتیجه باعث افزایش سطح اتصال کوتاه شبکه می‌شوند. به منظور بررسی بیشتر روش پیشنهادی با سه الگوریتم PSO، GSO و ژنتیک مقایسه گردید. نتایج عددی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی به جای افزایش تعداد محدود کننده‌های جریان خطا با افزایش امپدانس از طریق تعداد کمتری

- [18] Yu, P.; Venkatesh, B.; Yazdani, A.; Singh, B. N. "Optimal Location and Sizing of Fault Current Limiters in Mesh Networks Using Iterative Mixed Integer Nonlinear Programming"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2016, 31, 4776-4783.
- [19] Jo, H. C.; Joo, S. K. "Superconducting Fault Current Limiter Placement for Power System Protection Using the Minimax Regret Criterion"; *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2015, 25, 1-5.
- [20] Shahriari, S. A. A.; Varjani, A. Y.; Haghifam, M. R. "Cost Reduction of Distribution Network Protection in Presence of Distributed Generation Using Optimized Fault Current Limiter Allocation"; *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2012, 43, 1453-1459.
- [21] Yang, H. T.; Tang, W. J.; Lubicki, P. R. "Placement of Fault Current Limiters in a Power System Through a Two-Stage Optimization Approach"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 33, 131-140.
- [22] Mahmoudian, A.; Niasati, M.; Khanesar, M. A. "Multi Objective Optimal Allocation of Fault Current Limiters in Power System"; *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2017, 85, 1-11.
- [23] Alaraifi, S.; El Moursi, M. S. "Design Considerations of Superconducting Fault Current Limiters for Power System Stability Enhancement"; *IET Gener. Transm.* 2017, 11, 2155-2163.
- [24] Guo, C.; Ye, C.; Ding, Y.; Lin, Z.; Wang, P. "Risk-Based Many-Objective Configuration of Power System Fault Current Limiters Utilising NSGA-III"; *IET Gener. Transm.* 2020, 14, 5646-5654.
- [25] Badakhshan, M. "Flux-Lock Type of Superconducting Fault Current Limiters: A Comprehensive Review"; *Physica C Supercond. PHYSICA C.* 2018, 547, 51-54.
- [26] Tayebi, A. H.; Sharifi, R.; Salemi, A. H.; Faghihi, F. "Presentation of an Algorithm for Identification of the Most Vulnerable Bus in Electric Smart Grid Through Cyber-Attack Based on State Estimation"; *J. Adv. Defense Sci. & Technol.* 2020, 11, 391-401.
- [8] Dommerque, R.; Krämer, S.; Hobl, A.; Böhm, R.; Bludau, M.; Bock, J.; Klaus, D.; Piereder, H.; Wilson, A.; Krüger, T.; Pfeiffer, G.; Pfeiffer, K.; Elschner, S. "First Commercial Medium Voltage Superconducting Fault Current Limiters: Production, Test and Installation"; *Supercond Sci. Technol.* 2010, 23, 034020.
- [9] Samet, H. "Optimal Allocation of Fault Current Limiters and Distributed Generations in the Presence of Remote Controllable Switches"; *J. Electr. Syst.* 2014, 10, 149-155.
- [10] Teng, J. H.; Lu, C. N. "Optimum Fault Current Limiter Placement with Search Space Reduction Technique"; *IET Gener. Transm.* 2010, 4, 485-494.
- [11] Hongesombut, K.; Mitani, Y.; Tsuji, K. "Optimal Location Assignment and Design of Superconducting Fault Current Limiters Applied to Loop Power Systems"; *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2003, 13, 1828-1831.
- [12] Blair, S. M.; Booth, C. D.; Burt, G. M.; Bright, C. G. "Application of Multiple Resistive Superconducting Fault Current Limiters for Fast Fault Detection in Highly Interconnected Distribution Systems"; *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013, 28, 1120-1127.
- [13] Ye, L.; Campbell, A. "Case Study of HTS Resistive Superconducting Fault Current Limiter in Electrical Distribution Systems"; *Electr. Power Syst. Res.* 2007, 77, 534-539.
- [14] Golzarfar, A.; Sedighi, A. R.; Asadi, A. "Optimal Placement and Sizing of Fault Current Limiter in a Real Network: A Case Study"; *Int. J. Eng.* 2015, 28, 402-409.
- [15] Najafi, M.; Hoseynpoor, M. "Design and Application of Fault Current Limiter in Iran Power System Utility"; *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 2013, 7, 276-280.
- [16] Bahramian Habil, H.; Azad Farsani, E.; Askarian abyaneh, H. "A Novel Method for Optimum Fault Current Limiter Placement Using Particle Swarm Optimization Algorithm"; *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2015, 25, 2124-2132.
- [17] Didier, G.; Leveque, J.; Rezzoug, A. "A Novel Approach to Determine the Optimal Location of SFCL in Electric Power Grid to Improve Power System Stability"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2012, 28, 978-984.