

هماهنگی رله‌های جریان زیاد توسط الگوریتم جست‌وجوی ابر کره ارتقایافته با در نظر گیری منحنی مشخصه رله‌ها و جریان تنظیمی

امیررضا حسنی آهنگر، حامد نفیسی، حسین کرمی و گئورگ قره‌پتیان

رله باید در زمان عملکرد دو رله در نظر گرفته شود [۳] تا [۵] و زمان تشخیص میان رله اصلی و پشتیبان می‌بایست کمتر از CTI باشد. امروزه با در نظر گیری پیچیدگی‌های سیستم قدرت به هم پیوسته، از روش‌های بهینه‌سازی برای هماهنگی رله‌ها و تنظیم مناسب آنها استفاده می‌شود. به طور مثال در [۶] تا [۸] هماهنگی بهینه رله‌های جریان زیاد با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی خطی مانند سیمپلکس و سیمپلکس دوگانه انجام شده است. از آنجا که روش‌های بهینه‌سازی خطی وابستگی زیادی به مقادیر اولیه دارند و احتمال دارد که در نقاط مینیمم محلی محبوس شوند، از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی که در سال‌های اخیر به وجود آمده‌اند در این زمینه استفاده می‌شود. در [۹] هماهنگی رله‌های جریان زیاد با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی انجام شده است. الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) یکی از الگوریتم‌های تکاملی معروف بوده که برای حل این نوع مسئله به کار برده می‌شود. در [۱۰] و [۱۱] رله‌ها با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک تنظیم شده‌اند. الگوریتم تکاملی دیگری که در مسئله هماهنگی رله‌ها استفاده می‌شود بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ (PSO) می‌باشد که در [۱۲] هماهنگی حفاظتی با استفاده از روش PSO انجام شده است.

روش‌های ذکر شده بهبود مسئله هماهنگی را نشان می‌دهند. در مقاله‌های ذکر شده قبلی، منحنی مشخصه رله‌های جریان زیاد به صورت ثابت و تنها یک نوع خاص در طول روش بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شد. این نوع مسئله با واقعیت امر شاید سازگار نباشد. در مقاله پیش رو، انواع منحنی مشخصه‌ها و مقادیر ضرایب تنظیم زمانی^۴ (TSM) رله‌های جریان زیاد انتخاب شده تا مسئله هماهنگی رله‌های جریان زیاد با دقت و جزئیات بیشتری انجام شود و بتوان به نتایج بهتر و واقعی‌تری دست یافت. از روش‌های بهینه‌سازی زیادی در مسایل مهندسی قدرت استفاده می‌شود [۱۳] تا [۱۶]. در کنار کارایی الگوریتم‌های تکاملی، بعضی مواقع این الگوریتم‌ها به سمت مینیمم محلی حرکت کرده و همگرا نمی‌شوند و در نتیجه، وجود یک روش قدرتمند و کارا ضروری به نظر می‌رسد. در [۱۷] و [۱۸] الگوریتم جست‌وجوی هارمونی^۵ (HSA) استفاده شده تا برنامه‌ریزی سیستم انرژی یک خانه را بهینه نماید. در [۱۹] نیز از الگوریتم رقابتی استعماری برای تأثیر کارایی باتری‌ها بر روی سیستم مدیریت انرژی بهره گرفته شده است.

در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی جدیدی به نام جست‌وجوی ابر کره ارتقایافته^۶ (IHSS) استفاده می‌شود [۲۰]. این الگوریتم قابلیت آن را دارد که هم از متغیرهای گسسته و هم پیوسته استفاده نماید. الگوریتم فوق در

چکیده: کمینه‌نمودن اختلاف زمان عملکرد میان رله‌های جریان زیاد اصلی و پشتیبان یکی از موضوعات اساسی و مهم در مسئله هماهنگی رله‌های موجود در سیستم توزیع قدرت است. در این مقاله، علاوه بر یافتن مقادیر ضرایب تنظیم زمانی و در نظر گیری انواع منحنی مشخصه‌های مربوط به رله‌های جریان زیاد، جهت بررسی حالت جامع مسئله، جریان تنظیمی رله‌ها نیز برای بهبود بیشتر هماهنگی به طور هم‌زمان با دو مورد دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. یافتن میزان بهینه ضریب تنظیم زمانی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در مقاله‌های سالیان اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. اخیراً روش بهینه‌سازی جدیدی به نام الگوریتم جست‌وجوی ابر کره معرفی شده است. در این مقاله با ارتقای این الگوریتم بهینه‌سازی، از آن به عنوان کاربرد در یکی از مسایل مهندسی به نام مسئله هماهنگی رله‌های جریان زیاد استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه نمونه، کارایی الگوریتم جست‌وجوی ابر کره ارتقایافته را در مقایسه با نسخه اصلی آن نشان خواهد داد. به کارگیری الگوریتم ارتقایافته در کنار در نظر گیری جریان تنظیمی رله‌ها باعث می‌شود تا مسئله هماهنگی بهینه رله‌های جریان زیاد در مقایسه با کارهای گذشته بهبود یابد.

کلیدواژه: الگوریتم جست‌وجوی ابر کره، رله‌های جریان زیاد، ضریب تنظیم جریانی، ضریب تنظیم زمانی، منحنی مشخصه رله‌ها، هماهنگی حفاظتی.

۱- مقدمه

در مسئله حفاظت سیستم‌های قدرت، هدف اصلی شناسایی و به دنبال آن جداسازی ناحیه وقوع خطا در سریع‌ترین زمان ممکن است. در شبکه‌های توزیع، عمدتاً از رله‌های جریان زیاد برای برطرف نمودن خطای ایجاد شده استفاده می‌گردد. به منظور داشتن حفاظتی مطمئن و با قابلیت اطمینان بالا، استفاده نمودن از رله پشتیبان در کنار رله اصلی یکی از راه حل‌های مرسوم در شبکه‌های توزیع به شمار می‌رود [۱] و [۲]. در این راه حل، هدف برطرف نمودن خطا در خط مربوط در سریع‌ترین زمان ممکن با استفاده از رله اصلی است اما اگر رله اصلی در سیستم به هر دلیلی نتواند وظیفه خود را پس از زمان معینی به درستی انجام دهد، رله پشتیبان باید بلافاصله عمل نماید. در این روش، رله پشتیبان نباید قبل از رله اصلی عمل کند و در نتیجه، یک فاصله زمانی هماهنگی^۱ (CTI) میان دو

این مقاله در تاریخ ۶ مرداد ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۲۰ بهمن ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

امیررضا حسنی آهنگر (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، (email: hassaniahangar@aut.ac.ir).

حامد نفیسی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، (email: nafisi@aut.ac.ir).

حسین کرمی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، (email: h.karami@aut.ac.ir).

گئورگ قره‌پتیان، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، (email: grptian@aut.ac.ir).

2. Genetic Algorithm
3. Particle Swarm Optimization
4. Time Setting Multiplier
5. Harmony Search Algorithm
6. Improved Hyper-Spherical Search Algorithm

1. Coordination Time Interval

جدول ۱: منحنی مشخصه‌های رله جریان زیاد [۳۷].

| شماره مشخصه | نوع مشخصه | استاندارد | ضریب k | ضریب α | ضریب L |
|-------------|--------------------|-----------|----------|---------------|----------|
| ۱ | Short time inverse | Areva | ۰٫۰۵ | ۰٫۰۴ | ۰ |
| ۲ | Standard inverse | IEC | ۰٫۱۴ | ۰٫۰۲ | ۰ |
| ۳ | Very inverse | IEC | ۱۳٫۵ | ۱ | ۰ |
| ۴ | Extremely inverse | IEC | ۸۰ | ۲ | ۰ |
| ۵ | Long time inverse | Areva | ۱۲۰ | ۱ | ۰ |
| ۶ | Moderately inverse | ANSI/IEEE | ۰٫۰۵۱۵ | ۰٫۰۲ | ۰٫۱۱۴ |
| ۷ | Very inverse | ANSI/IEEE | ۱۹٫۶۱ | ۲ | ۰٫۴۹۱ |
| ۸ | Extremely inverse | ANSI/IEEE | ۲۸٫۲ | ۲ | ۰٫۱۲۱۷ |

ابریکه ارتقایافته، ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی هماهنگی حفاظتی خواهد بود.

با توجه به موارد ذکر شده نوآوری‌های مقاله پیش رو به شرح زیر است:
 (۱) استفاده از روش جدید و مؤثر بهینه‌سازی الگوریتم جست‌وجوی ابریکه ارتقایافته برای حل مسئله مهندسی بهینه‌سازی هماهنگی رله‌های جریان زیاد.
 (۲) استفاده از حالت جامع در نظرگیری جریان تنظیمی در کنار ضریب تنظیم زمانی و منحنی مشخصه رله‌ها به صورت هم‌زمان به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در بهبود مسئله هماهنگی رله‌های جریان زیاد در سیستم قدرت.

۲- تابع هدف مسئله هماهنگی رله‌های جریان زیاد

همان‌طور که در مسئله حفاظت سیستم‌های قدرت بیان می‌شود برای داشتن حفاظت مطمئن، رله پشتیبان نباید قبل از رله اصلی عملکرد داشته باشد و در نتیجه، قید هماهنگی میان رله‌های اصلی و پشتیبان به صورت (۱) خواهد بود

$$t_{b(OC)} - t_{m(OC)} \geq CTI \quad (1)$$

که در آن $t_{b(OC)}$ و $t_{m(OC)}$ به ترتیب زمان عملکرد رله‌های جریان زیاد اصلی و پشتیبان هستند و CTI فاصله زمانی هماهنگی می‌باشد. در روش‌های بهینه‌سازی، قید ذکر شده در (۱) با تابع هدف ترکیب می‌شود. در واقع تابع هدف مطلوب از دو جمله به همراه ضرایب وزنی متناسب با هر کدام از جملات تشکیل می‌شود. تابع هدف مورد استفاده در این مقاله مشابه [۱۱] بوده و به صورت (۲) بیان می‌شود

$$OF = \alpha_r \sum (t_i)^r + \alpha_v \sum (\Delta t_{mb} - \beta(\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|))^r \quad (2)$$

$$\Delta t_{mb} = t_b - t_m - CTI$$

که در فرمول‌های بالا t_i زمان عملکرد رله جریان زیاد i ام و Δt_{mb} اختلاف زمان عملکرد میان رله‌های اصلی و پشتیبان با فاصله زمانی هماهنگی برای خطای رخ داده شده در نزدیکی کلید قدرت است. α_r ، α_v و β نیز ضرایب وزنی مربوط هستند. زمان عملکرد رله‌های جریان زیاد با استفاده از (۳) می‌تواند محاسبه شود [۲]

$$t = TSM \left(\frac{k}{M^\alpha - 1} + L \right) \quad (3)$$

در (۳)، پارامترهای k ، α و L مقادیری ثابت بوده که به منحنی مشخصه رله بستگی دارد. در جدول ۱ مقادیر پارامترها برای انواع منحنی مشخصه‌ها بیان شده است. متغیر M در (۳) نسبت جریان اتصال کوتاه به جریان تنظیمی رله جریان زیاد می‌باشد که در (۴) آمده است [۳]

[۲۱] با روش‌های ژنتیک، PSO و HSA جهت بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی مقایسه شده است.

بهبود الگوریتم برای پیدا کردن روش‌های مناسب‌تر یکی از مواردی است که در ژورنال‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و در زمینه مهندسی، از کاربرد این روش‌ها استفاده می‌شود. به طور مثال [۲۲] یک روش بهینه‌سازی PSO اصلاح‌شده است که [۲۳] که مقاله پایه روش PSO می‌باشد را بهبود داده است.

از نمونه‌های دیگر در زمینه بهبود الگوریتم بهینه‌سازی می‌توان به [۲۴] اشاره نمود که یک روش بهینه‌سازی لانه مورچگان^۱ است که بهبودیافته روش اصلی می‌باشد که مربوط به [۲۵] است.

علاوه بر موارد فوق مقالات دیگری نیز وجود دارند که به همین ترتیب بهبودیافته روش‌های بهینه‌سازی می‌باشند و کاربرد آن در مسایل مهندسی وجود دارد. از این دسته می‌توان به [۲۶] تا [۲۸] اشاره نمود که به ترتیب ارتقایافته [۲۹] تا [۳۱] می‌باشند.

همچنین در بحث استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های ارتقایافته آنها در کاربرد مهندسی می‌توان به [۳۲] اشاره نمود که از الگوریتم بهینه‌سازی grey wolf در حل مسئله پخش بار اقتصادی استفاده نموده است. حل همین مسئله مهندسی با استفاده از روش ارتقایافته hybrid grey wolf در [۳۳] آمده است. به عنوان نمونه‌ای دیگر می‌توان از [۳۴] نام برد که در آن از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در حل مسئله پخش بار اقتصادی به همراه قیود آلودگی استفاده شده است. همچنین [۳۵] حل همین مسئله را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی modulated PSO که ارتقایافته الگوریتم اصلی بوده انجام داده است.

در این مقاله، الگوریتم جست‌وجوی ابریکه [۳۶] مبنای بحث قرار داده می‌شود تا با ارتقای آن، نتایج هماهنگی رله‌های جریان زیاد در یک شبکه نمونه بهبود داده شود. با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در مقاله مشاهده می‌شود که الگوریتم ارتقایافته نتایج بهتری نسبت به الگوریتم پایه خود و همچنین نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌دهد. شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه شش‌شینه در ۳ سناریو انجام می‌شود. در ابتدا خروجی یکی از مقالات که از روش HSS استفاده نموده است عنوان می‌شود [۳۶] و سپس در سناریوی دوم مقایسه روش HSS ارتقایافته با روش HSS انجام خواهد شد. همچنین در سناریوی سوم در کنار ضرایب تنظیم زمانی (TMS) و مشخصه رله‌ها، از جریان‌های تنظیمی رله‌ها نیز به عنوان متغیر مسئله استفاده نموده و به بهینه‌سازی مسئله مذکور پرداخته می‌شود. در ادامه نشان داده می‌شود که الگوریتم جست‌وجوی

است انتخاب شده‌اند. براى هر پاسخ كه ذره ناميده مى‌شود، تابع هدف محاسبه خواهد شد.

ج) نام‌گذاري مراكز كره

ذرات بر اساس مقدار تابع هدف محاسبه شده آنها به صورت صعودى مرتب مى‌شوند و بهترين ذرات با مقدار تابع هدف كمينه، به تعداد N_{SC} براى مراكز كره انتخاب مى‌شوند. در مسئله بهينه‌سازى N بعدى، ذرات با يك بردار $1 \times N$ به صورت $[p_1, p_2, \dots, p_N]$ نشان داده مى‌شوند كه p_i ها متغيرهاى تصميم و $f(p_1, p_2, \dots, p_N)$ مقادير تابع هدف به ازاي هر ذره هستند.

د) توزيع ذرات بين كره‌ها

تعداد N_{SC} از جمعيت ذره‌ها به عنوان SC ها (مراكز كره) انتخاب مى‌شوند، مابقي ذرات با توجه به غلبه SC ها كه به صورت معكوس با مقادير تابع هدف متناظر با آنها متناسب است، در ميان SC ها توزيع مى‌شوند. ميزان غلبه SC به صورت نرماليزه شده براى هر SC با (۶) تعريف مى‌شود

$$D_{SC} = \left| \frac{OFD_{SC}}{\sum_{i=1}^{N_{SC}} OFD_i} \right| \quad (6)$$

كه در آن OFD اختلاف تابع هدف براى هر SC بوده و با (۷) محاسبه مى‌شود

$$OFD_{SC} = f_{SC} - \max_{SC_s} \{f\} \quad (7)$$

رابطه (۸) تعداد اوليه ذرات متعلق به SC است كه به صورت تصادفى به وسيله هر SC از ذرات باقىمانده انتخاب شده است

$$\text{round}\{D_{SC} \times (N_{pop} - N_{SC})\} \quad (8)$$

۳-۱-۲ گام دوم: جستجو

يك ذره با جستجو در فضاى محدود شده به وسيله يك كره كه مركز آن با يك SC از قبل مشخص شده و شعاع r كه برابر فاصله بين ذره و مركز كره مى‌باشد، به دنبال يك پاسخ بهتر مى‌گردد. بنابراين مركز مختصات در مركز كره تنظيم مى‌شود. فرايند جستجو با تغيير پارامترهاى ذره در مختصات كروى يعنى r و θ انجام خواهد شد.

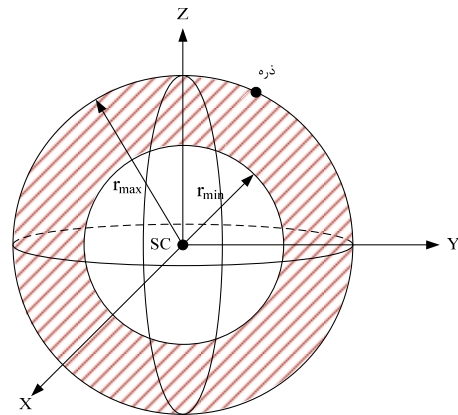
بايد توجه شود كه براى هر نقطه در فضاى N بعدى، $N-1$ زاويه در مختصات كروى وجود دارد. بنابراين در مسئله N بعدى $N-1$ زاويه (θ) وجود دارد كه تغيير هر کدام از آنها باعث جابه‌جايى ذره در فضاى جستجو مى‌شود. در الگوريتم HSS هر زاويه ذره به اندازه α راديان با احتمال Pr_{angle} تغيير داده مى‌شود. α در هر تكرار به صورت تصادفى با يك توزيع يكنواخت بين $(0, 2\pi)$ انتخاب مى‌شود.

بعد از مشخص نمودن زواياى ذرات، فاصله بين ذرات و SC متناظر با آنها به صورت تصادفى در بازه $[r_{min}, r_{max}]$ انتخاب مى‌شود كه r_{max} در يك كره N بعدى به صورت (۹) قابل محاسبه است

$$r_{max}^2 = \sum_{i=1}^N (P_{i,center} - P_{i,particle})^2 \quad (9)$$

موقعيت‌هاى ممكن ذره براى يك نمونه سه‌بعدى در شكل ۱ با فضاى هاشورزده نشان داده شده است.

در اين الگوريتم، هر ذره خود را با توجه به SC آن جستجو مى‌كند و عملگر فرايند جستجو با (۱۰) نشان داده مى‌شود



شكل ۱: فضاى جستجوى ممكن به صورت قسمت هاشورخورده.

$$M = \frac{I_{sc}}{I_{pickup}} \quad (4)$$

در بخش بعدى، الگوريتم بهينه‌سازى مورد استفاده در اين مقاله معرفى مى‌شود كه HSS يا DC-HSS نام دارد. اين الگوريتم TSM را در رنج عددى ۰.۰۵ تا ۲ (محدوده استاندارد) انتخاب مى‌كند و مشخصه رله را نيز با استفاده از ضرايب معرفى شده از جدول ۱ بر مى‌گزيند.

۳- معرفى الگوريتم جستجوى ابر كره (در حالت پيوسته و گسسته)

۳-۱-۳ HSS پيوسته

از ديده‌گاه كلّى، هر الگوريتم بهينه‌سازى فرايندى است براى بهتر نمودن مسائلى كه به صورت (۹) مدل‌سازى مى‌شوند. رابطه (۵) رابطه اصلى كمينه‌كردن تابع هزينه است كه داراى قيود مساوى و نامساوى است

$$\min \{f(x)\} \quad (5)$$

subject to : $g(x) \geq 0$ and $h(x) = 0$

در اين مقاله سعى مى‌شود براى حل (۵) از تمام قيود مطرح شده از الگوريتم جستجوى DC-HSS استفاده شود. استفاده از الگوريتم‌هاى جديد اين امکان را فراهم مى‌آورد تا از ظرفيت‌هاى آنها در مقايسه با ساير الگوريتم‌هاى فراابتكارى آگاهى پيدا کرده و روش‌هاى حل سريع و مطمئن‌ترى بياييم. مقدار $f(x)$ به مجموعه متغيرهاى تصميم بستگى دارد كه داراى يك محدوده حداقل و حداكثر است. فرايند الگوريتم HSS به پنج گام تقسيم‌بندى مى‌شود:

۳-۱-۱-۱ گام اول: مقداردهى اوليه ذرات

در گام اول الگوريتم HSS مقداردهى اوليه مى‌شود كه خود داراى چهار زيربخش است:

الف) مقداردهى اوليه پارامترها

تعدادى از پارامترهاى اين الگوريتم مانند N_{pop} (تعداد جمعيت اوليه)، N_{SC} (تعداد مراكز كره)، r_{min} ، r_{max} ، Pr_{angle} و N_{newpar} بايد توسط كاربر تعيين شوند كه در قسمت‌هاى بعد به تدرىج معرفى مى‌شوند.

ب) توليد جمعيت اوليه

الگوريتم HSS با تعداد N_{pop} پاسخ توليد شده تصادفى آغاز مى‌شود كه به صورت تصادفى از بازه $[X_{i,min}, X_{i,max}]$ كه داراى توزيع يكنواخت

$$AP = \left| \frac{NTOF}{\sum_{i=1}^{N_{SC}} NTOF_i} \right| \quad (۱۳)$$

بردار $AP = [AP_1, AP_2, \dots, AP_{N_{SC}}]$ برای تقسیم ذرات مذکور بر اساس AP آنها در بین SC ها تشکیل می‌شود و بدترین مجموعه (با بیشترین SOF)، ذرات با فضای جستجوی نامناسب خود را از دست خواهند داد. این ذرات از بین همه SC ها و بر اساس بردار AP آنها به دنبال SC جدید می‌گردند. اگر یک SC هیچ ذره‌ای نداشته باشد، این SC به یک ذره تغییر یافته و با استفاده از همین فرایند به دنبال یک SC جدید خواهد گشت.

۳-۱-۴ گام چهارم: تولید ذرات جدید

همان طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، بعد از فرایند جستجو احتمال آن وجود دارد که یک ذره به موقعیتی با مقدار تابع هدف کمتر از SC متناظر برسد. در صورت وقوع چنین اتفاقی که بعد از هر جستجو ممکن است اتفاق بیفتد، موقعیت SC و ذره عوض می‌شوند.

در این گام برای منعطف‌تر نمودن الگوریتم و جستجوی بهتر فضا، تعداد N_{newpar} از بدترین ذرات که نتوانسته‌اند به موقعیت مناسبی برسند، حذف شده و با همین تعداد ذره جدید تولید شده جایگزین خواهند شد. تعداد N_{newpar} خیلی زیاد نخواهد بود. این ذرات همانند آنچه در زیربخش چهارم از گام یک شرح داده شد به SC ها اختصاص می‌یابند.

۳-۱-۵ گام پنجم: آزمون همگرایی

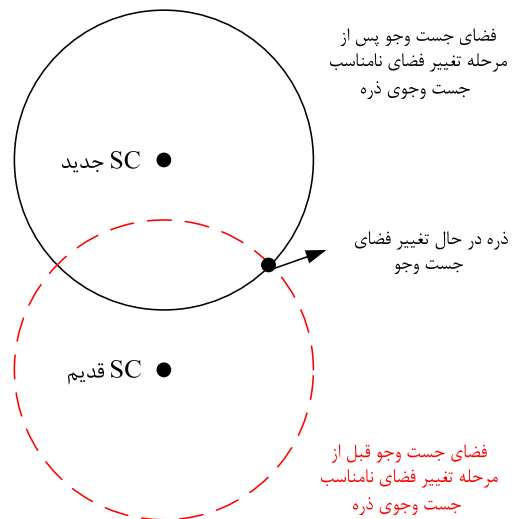
همه SC ها به استثنای بهترین آنها بعد از مدتی حذف خواهند شد و همه ذرات به بهترین SC اختصاص خواهند یافت. بنابراین اختلاف چندانی بین این SC و ذرات وجود نداشته و تقریباً مقدار تابع هدف و موقعیت یکسانی دارند. به محض رسیدن به یکی از شرایط زیر الگوریتم متوقف خواهد شد:

- الف) به حداکثر تعداد تکرارها برسد (در این مقاله، حداکثر تعداد تکرارها در شبیه‌سازی برابر ۳۰۰ است).
 - ب) اختلاف بین بهترین SC ها در دو تکرار مهم کمتر از مقدار آستانه شود (در این مقاله مقدار آستانه روی 10^{-6} تنظیم شده است).
- شکل ۳ روندنمای الگوریتم HSS را بر اساس گام‌های تشریح شده فوق نشان می‌دهد.

۳-۲-۳ HSS گسسته

HSS گسسته پیشنهادی (D-HSS) به این صورت است که اولین گام D-HSS همانند HSS پیوسته است که قبلاً شرح داده شد اما با تولید متغیرهای گسسته، تعداد N_{pop} پاسخ تولید شده تصادفی که به صورت تصادفی از بین متغیرهای گسسته $(X_{i_d, \min}, X_{i_d, \min} + 1, \dots, X_{i_d, \max} - 1, X_{i_d, \max})$ با توزیع یکنواخت، انتخاب شده‌اند. ذرات بر اساس مقادیر تابع هدف محاسبه شده آنها مرتب می‌شوند و بهترین ذرات (N_{SC}) برای تشکیل SC ها انتخاب می‌شوند. مابقی ذرات با توجه به DSC در بین SC ها توزیع می‌شوند.

در گام دوم D-HSS، فرایند جستجو فقط با استفاده از r_d (فاصله بین ذره و مرکز) انجام می‌شود. در D-HSS زاویه تعریف نمی‌شود. فاصله بین ذره و SC متناظر آن به صورت تصادفی در بازه $(r_{d, \min}, r_{d, \max})$ انتخاب می‌شود که $r_{d, \max}$ در یک کره N بعدی به صورت (۱۴) قابل محاسبه است



شکل ۲: تغییر فضای جستجوی نامناسب ذره.

$$Q[r_{\min}, r_{\max}, Pr_{angle}, SC] \quad (۱۰)$$

ذره بعد از جستجو در فضای کره خود، ممکن است به موقعیتی دست یابد که دارای مقدار تابع هدف کمتر از SC آن باشد. در این مواقع، برچسب‌های این ذره و SC عوض خواهند شد یعنی SC نقش ذره SC جدید را می‌گیرد که ذره قبلی بود. بعد از آن، الگوریتم به وسیله SC جدید در موقعیت جدید به جستجوی خود ادامه می‌دهد. این وضعیت در هر تکرار بعد از فرایند جستجو باید بررسی شود.

۳-۱-۳ گام سوم: تغییر فضای جستجوی نامناسب

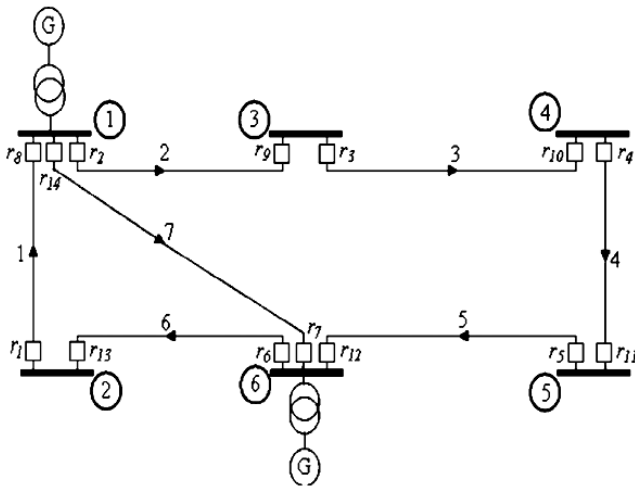
هر SC و ذرات آن، یک مجموعه ذرات را تشکیل می‌دهند. بعضی ذرات موجود در مجموعه کلی ذرات، مقدار تابع هدف (هزینه) بزرگی را دارند. بنابراین انتظار نمی‌رود که آنها بتوانند به مقدار کمینه نهایی برای تابع f برسند و یک فضای بی‌مورد را جستجو می‌کنند، بنابراین کره تحت جستجوی آنها باید عوض شود. ذرات نامناسب در یک فضای جستجو مانند شکل ۲ به SC های دیگر اختصاص می‌یابند. در ابتدا مجموعه‌های ذرات باید برای یافتن بدترین مجموعه که ذرات نامناسب را دارد بر اساس مقدار تابع هدف مجموعه SOF مرتب شوند. مجموعه SOF اساساً تحت تأثیر SC برای f است، مقدار تابع هدف ذرات نسبت به تابع هدف مرکز کره خیلی تأثیرگذار نیست. این واقعیت به وسیله تعریف SOF هر مجموعه با (۱۱) مدل می‌شود

$$SOF = f_{SC} + \gamma \text{mean}\{f_{particles \text{ of } SC}\} \quad (۱۱)$$

مقادیر کوچک γ باعث می‌شوند که SOF به وسیله تابع هدف SC تعیین شود و افزایش γ نقش ذرات را در تعیین SOF پررنگ‌تر می‌کند. مقدار γ در این مقاله ۰/۱ انتخاب شده است. فرایند بازیابی ذرات با فضای جستجوی نامناسب با انتخاب برخی از ذرات (به عنوان مثال یکی) با بیشترین SOF از کره‌ها و اختصاص آنها (آن) به سایر SC ها مدل می‌شود. به این منظور، اختلاف SOF برای هر مجموعه به صورت (۱۲) تعیین می‌شود

$$DSOF = SOF - \max_{groups} \{SOF \text{ of groups}\} \quad (۱۲)$$

با توجه به DSOF محاسبه شده، ذره به یکی از SC ها اختصاص می‌یابد. احتمال تخصیص هر SC به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود



شکل ۴: شبکه نمونه شش‌شینه.

۳-۳ روش ترکیبی HSS گسسته و پیوسته (DC-HSS)

DC-HSS ترکیبی از HSS پیوسته و گسسته است و هر یک از ذرات، متغیرهای پیوسته و گسسته دارند. در این الگوریتم، فرایند جستجوی قسمت پیوسته همانند آنچه که در HSS پیوسته اشاره شد، اجرا می‌شود و قسمت گسسته نیز همانند مراحل جستجوی D-HSS انجام خواهد شد.

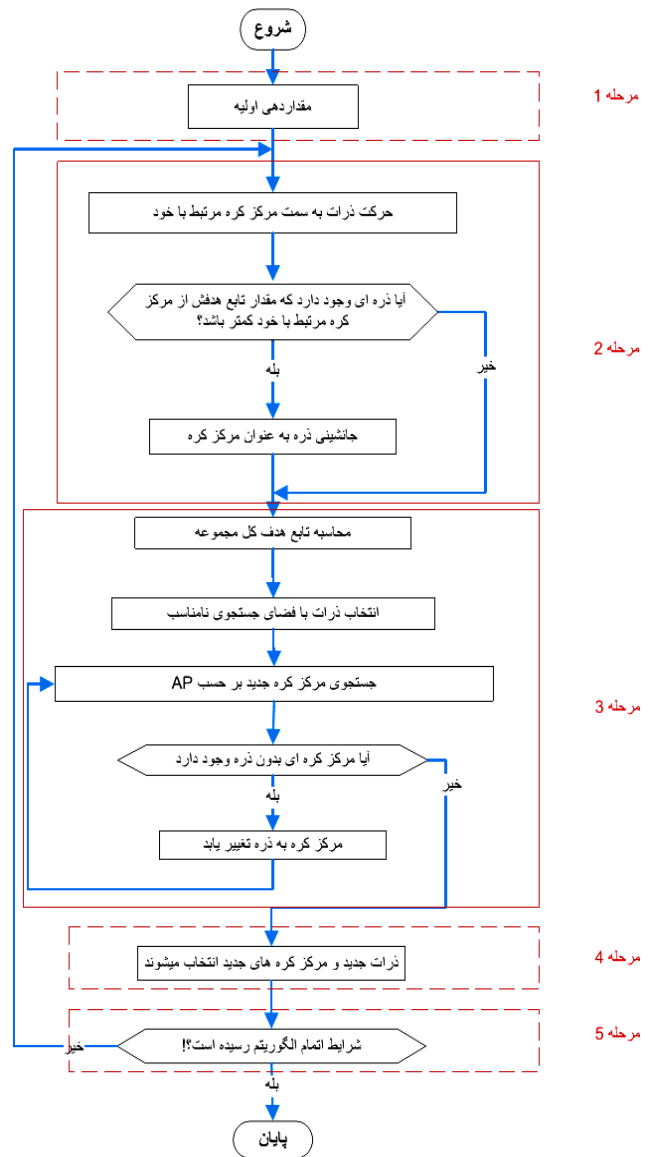
۳-۴ الگوریتم HSS ارتقا یافته (IHSS)

همان طور که در بخش‌های قبل ذکر شده بود در پروسه جست‌وجو دو پارامتر r و θ وجود دارند. عوض نمودن این پارامترها منجر به جست‌وجوی فضا با استفاده از ذره‌ها برای پیدانمودن موقعیت‌های بهتر می‌شود. این پروسه با استفاده از تغییر در روند حرکت ذره بهبود می‌یابد. پیشنهاد می‌شود که بعد از روند جست‌وجوی ذکر شده در الگوریتم HSS اصلی و تغییر موقعیت‌های ذرات با تغییر در مقادیر r و θ ، N_{subst} که تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری هر ذره است، که به طور مستقیم توسط متغیرهای تصمیم SC مربوط خود جایگزین شود.

به طور مثال فرض کنید که در یک مسئله پنج‌بعدی، بعد از پروسه جست‌وجوی HSS اصلی، یک ذره به صورت $[P_v, P_r, P_\theta, P_\theta, P_\theta]$ و یک SC به صورت $[SC_v, SC_r, SC_\theta, SC_\theta, SC_\theta]$ نشان داده شود. با در نظرگیری روند بهبود، ذره اشاره شده ممکن است N_{subst} (به طور مثال برابر با ۲) تعداد متغیرهای تصمیم خود با احتمال P_{subst} را جایگزین نماید و ذره جدیدی مانند $[SC_v, P_r, P_\theta, SC_\theta, P_\theta]$ تولید نماید که متغیرهای تصمیم اولین و چهارمین آن با متغیرهای اول و چهارم SC مربوط جانشین خواهند شد. اثرات این بهبود و تأثیر آن در قسمت شبیه‌سازی این مقاله بررسی می‌شود.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

برای بررسی روش پیشنهادی در مسئله هماهنگی حفاظتی رله‌های جريان زياد، سیستم نمونه شش‌شینه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سیستم یک شبکه نمونه بوده که در بسیاری از مقالات هماهنگی رله به عنوان یک شبکه نمونه مناسب و استاندارد از آن استفاده می‌شود که در شکل ۴ نشان داده شده است [۳۸] و [۳۹]. جدول ۲ جريان‌هاى نامی و تنظیمی رله‌های موجود در شبکه شش‌شینه را نشان می‌دهد. جريان‌های اتصال کوتاه مربوط به شین‌هایی که رله‌های اصلی و پشتیبان در آن نصب شده‌اند در جدول ۳ آمده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت که



شکل ۳: روندنمای الگوریتم HSS.

$$r_{d,max}^r = \sum_{i=1}^{N_d} (P_{i_d,center} - P_{i_d,particle})^r \quad (14)$$

احتمال دارد یک ذره به موقعیتی با مقدار تابع هدف کمتر از SC آن برسد. در صورت وقوع چنین اتفاقی، برچسب این ذره و SC ، همانند الگوریتم پیوسته عوض می‌شوند. گام سوم همانند الگوریتم HSS پیوسته است. مجموعه‌های ذرات بر حسب SOF مرتب می‌شوند. تعدادی از ذرات با فضای جستجوی نامناسب (برای مثال یکی) از بدترین کره با بیشترین SOF مطابق با DSOF و AP‌ها به SC ‌های دیگر تخصیص می‌یابند. اگر یک SC هیچ ذره‌ای نداشته باشد، این SC به ذره تبدیل شده و با استفاده از این فرایند به دنبال یک SC جدید می‌گردد.

در گام چهارم از الگوریتم D-HSS، تعداد N_{newpar} از بدترین ذرات گسسته که نمی‌توانند به موقعیت مناسبی برسند، حذف شده و به وسیله همین تعداد ذره گسسته که به صورت تصادفی تولید شده‌اند، جایگزین خواهند شد. این ذرات همان طور که در گام یک تشریح شد به SC ‌ها تخصیص می‌یابند.

در انتها نیز اگر یکی از وضعیت‌های تشریح شده در گام پنجم از HSS پیوسته محقق شود، الگوریتم متوقف خواهد شد.

جدول ۲: جریان‌های نامی و تنظیمی رله‌ها.

| شماره رله | جریان نامی | جریان تنظیمی | شماره رله | جریان نامی | جریان تنظیمی |
|-----------|------------|--------------|-----------|------------|--------------|
| ۱ | ۱۰۴ | ۱۲۴٫۸ | ۸ | ۱۰۹ | ۱۳۰٫۸ |
| ۲ | ۱۶۶ | ۱۹۹٫۲ | ۹ | ۱۱۸ | ۱۴۱٫۶ |
| ۳ | ۱۲۵ | ۱۵۰ | ۱۰ | ۱۱۰ | ۱۳۲ |
| ۴ | ۱۸۰ | ۲۱۶ | ۱۱ | ۱۳۵ | ۱۶۲ |
| ۵ | ۱۲۹ | ۱۵۴٫۸ | ۱۲ | ۱۲۲ | ۱۴۶٫۴ |
| ۶ | ۱۱۴ | ۱۳۶٫۸ | ۱۳ | ۱۲۵ | ۱۵۰ |
| ۷ | ۱۴۱ | ۱۶۹٫۲ | ۱۴ | ۱۶۶ | ۲۰۰٫۸ |

جدول ۳: جریان‌های اتصال کوتاه برای رله‌های اصلی و پشتیبان.

| رله اصلی | رله پشتیبان | جریان اتصال کوتاه رله اصلی | جریان اتصال کوتاه رله پشتیبان |
|----------|-------------|----------------------------|-------------------------------|
| ۲ | ۱ | ۵۴۲۸ | ۸۲۸ |
| ۱۴ | ۱ | ۴۱۸۴ | ۸۱۶ |
| ۳ | ۲ | ۳۵۰۵ | ۳۵۰۵ |
| ۴ | ۳ | ۱۷۶۹ | ۱۷۶۹ |
| ۵ | ۴ | ۱۱۰۳ | ۱۱۰۳ |
| ۶ | ۵ | ۴۹۳۶ | ۳۴۰ |
| ۷ | ۵ | ۴۱۸۴ | ۳۳۷ |
| ۱ | ۶ | ۲۶۸۲ | ۲۶۸۲ |
| ۲ | ۷ | ۵۴۲۸ | ۱۵۷۱ |
| ۸ | ۷ | ۴۹۳۳ | ۱۵۶۳ |
| ۱۳ | ۸ | ۲۵۸۹ | ۲۵۸۹ |
| ۸ | ۹ | ۳۶۵۵ | ۳۶۵۵ |
| ۱۴ | ۹ | ۴۱۸۴ | ۸۱۶ |
| ۹ | ۱۰ | ۵۴۳۱ | ۸۲۸ |
| ۱۰ | ۱۱ | ۲۵۸۹ | ۲۵۸۹ |
| ۱۱ | ۱۲ | ۳۶۵۵ | ۳۶۵۵ |
| ۷ | ۱۳ | ۱۴۸۴ | ۸۱۶ |
| ۱۲ | ۱۳ | ۵۴۳۱ | ۸۲۸ |
| ۶ | ۱۴ | ۴۹۳۶ | ۱۵۶۵ |
| ۱۲ | ۱۴ | ۵۴۳۱ | ۱۵۷۳ |

جدول ۴: پارامترهای روش DC-HSS.

| پارامترهای IHSS | مقدار |
|---------------------------|-------|
| تعداد تکرارها | ۵۰۰ |
| تعداد جمعیت (N_{pop}) | ۱۵۰ |
| N_{sc} | ۱۵ |
| r_{min} | ۰ |
| r_{max} | ٪۱۰۰ |
| Pr_{angle} | ٪۷۵ |
| N_{newpar} | ۵ |

رله‌های موجود از نوع اضافه جریان جهت‌دار می‌باشند. لذا در جدول ۳، رله‌های اصلی و پشتیبان بر همین اساس مشخص شده‌اند. به طور مثال رله ۲ پشتیبان رله ۳ است اما پشتیبان رله ۷ نیست.

با کمینه‌نمودن تابع هدف معرفی‌شده در بخش دوم مقاله، تنظیم بهینه برای هماهنگی حفاظتی به دست می‌آید. در این مقاله مسئله بهینه‌سازی هماهنگی رله‌های حفاظتی جریان زیاد در ۳ سناریو مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مقادیر پارامترهای روش بهینه‌سازی مانند تعداد تکرار، تعداد جمعیت اولیه و موارد دیگر به کار برده شده در مقاله در جدول ۴ آورده شده است.

پارامترهای تابع هدف (ضرایب وزنی) مربوط به سه سناریوی مختلف در جدول ۵ لیست شده است. در تمامی سناریوها، TSMها پیوسته بوده و مقادیر از ۰/۰۵ تا ۲ متغیر است. مشخصه رله‌ها مطابق با جدول ۱ و مقدار CTI نیز برابر ۰/۲ انتخاب می‌شود. ویژگی‌های هر سناریو به شرح زیر است:

۴-۱ سناریوی اول

در این حالت از خروجی‌های [۳۶] استفاده می‌شود که مسئله هماهنگی حفاظتی رله‌های جریان زیاد را با استفاده از روش الگوریتم جست‌وجوی ابرکره حل می‌کند. مقادیر ضرایب تنظیم زمانی رله‌ها در جدول ۶ آمده است. جدول ۷ زمان عملکردی هر یک از رله‌ها را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۸ اختلاف زمان عملکردی میان رله‌های اصلی و پشتیبان آورده شده است.

۴-۲ سناریوی دوم

در این سناریو از الگوریتم جست‌وجوی ابرکره ارتقایافته در حل مسئله بهینه‌نمودن هماهنگی رله‌های حفاظتی جریان زیاد استفاده می‌شود. اساس این الگوریتم و توضیحات مربوط به نحوه بهبود آن در بخش‌های قبلی آورده شده است. در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی این روش بر روی شبکه نمونه داده شده در جداول ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

جدول ۵: پارامترهای تابع هدف.

| شماره سناریو | α_1 و α_2 | β |
|--------------|-------------------------|---------|
| سناریوی اول | ۱ | ۱۰۰ |
| سناریوی دوم | ۱ | ۱۰۰ |
| سناریوی سوم | ۱ | ۱۰۰ |

جدول ۶ ضرایب تنظیم زمانی، جدول ۷ زمان عملکرد رله و جدول ۸ اختلاف زمان عملکرد میان رله اصلی و پشتیبان را نشان می‌دهد. این نکته قابل ذکر است که در حالت اول و دوم متغیرهای بهینه‌سازی شامل ضرایب تنظیم زمانی رله‌ها (TSM) و نوع منحنی مشخصه آنها است.

۴-۳ سناریوی سوم

در بخش آخر شبیه‌سازی، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی برای حل مسئله هماهنگی رله‌های جریان زیاد افزایش داده شده است به این صورت که علاوه بر TSMها و منحنی مشخصه رله‌ها، جریان‌های تنظیمی (Pickup Current) نیز در نظر گرفته می‌شود. در واقع این جریان‌ها به صورت ضربی از جریان بار خواهند بود که معمولاً بین ۱/۲ تا ۱/۳ قابل تغییر و تنظیم است. حال با استفاده از الگوریتم IHSS، مقدار بهینه این ضرایب برای هر رله نیز علاوه بر متغیرهای قبلی پیدا می‌شود. در واقع به صورت همزمان سه پارامتر مختلف رله جریان زیاد بهینه می‌شوند. نتایج حاصل از بهینه‌سازی در سناریوهای مختلف در جداول ۶ تا ۸ بیان شده است. همچنین مقادیر ضریب تنظیم جریانی به همراه جریان تنظیمی مربوط در این حالت در جدول ۹ آورده شده است.

همچنین در جداول ۶ و ۷ ستون GA مربوط به حل مسئله هماهنگی حفاظتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. هدف از آوردن این ستون مقایسه ۳ الگوریتم ژنتیک، جست‌وجوی ابرکره و ابرکره ارتقایافته است. با مقایسه سطر میانگین در جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که الگوریتم

جدول ۶: مقادير TSM و منحنى مشخصه رله‌ها.

| شماره رله | TSM (ضريب تنظيم زمانى رله) | | | | | |
|-----------|----------------------------|------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
| | GA | سناريوى اول [۳۶] | سناريوى دوم | سناريوى سوم | سناريوى اول [۳۶] | سناريوى دوم |
| ۱ | ۰,۴۴ | ۱,۸۵۰ | ۲,۰۰۰ | ۲,۰۰۰ | ۲,۰۰۰ | ۸ |
| ۲ | ۱,۰۱ | ۱,۳۱۰ | ۱,۲۵۴ | ۱,۴۵۳ | ۱,۳۱۰ | ۸ |
| ۳ | ۱,۲۲ | ۰,۹۱۰ | ۱,۲۳۷ | -۰,۸۵۱ | ۰,۹۱۰ | ۸ |
| ۴ | ۱,۸۰ | ۰,۳۸۰ | ۰,۳۳۵ | ۰,۲۱۶ | ۰,۳۸۰ | ۱ |
| ۵ | ۰,۲۸ | ۰,۴۴۰ | ۰,۰۶۷ | ۰,۰۵۱ | ۰,۴۴۰ | ۸ |
| ۶ | ۰,۷۳ | ۰,۳۶۰ | ۰,۰۸۸ | -۰,۵۸۰ | ۰,۳۶۰ | ۵ |
| ۷ | ۱,۸۹ | ۱,۳۳۰ | ۰,۴۸۳ | ۰,۱۴۱ | ۱,۳۳۰ | ۳ |
| ۸ | ۱,۵۸ | ۱,۳۹۰ | ۰,۱۷۷ | ۰,۶۵۰ | ۱,۳۹۰ | ۲ |
| ۹ | ۰,۳۹ | ۰,۵۳۰ | ۰,۱۰۰ | -۰,۰۶۴ | ۰,۵۳۰ | ۸ |
| ۱۰ | ۱,۳۹ | ۱,۲۷۰ | ۰,۵۲۷ | ۰,۳۹۸ | ۱,۲۷۰ | ۸ |
| ۱۱ | ۰,۵۵ | ۱,۰۷۰ | ۰,۵۳۳ | ۰,۸۸۵ | ۱,۰۷۰ | ۷ |
| ۱۲ | ۱,۲۰ | ۱,۶۶۰ | ۰,۸۵۷ | -۰,۱۷۳ | ۱,۶۶۰ | ۳ |
| ۱۳ | ۰,۹۴ | ۰,۶۸۰ | ۰,۵۹۷ | ۰,۲۰۵ | ۰,۶۸۰ | ۸ |
| ۱۴ | ۰,۲۵ | ۱,۳۰۰ | ۱,۰۷۸ | ۰,۴۰۷ | ۱,۳۰۰ | ۱ |
| میانگين | ۰,۹ | ۱,۱۰۶ | ۰,۶۶۷ | ۰,۵۷۷ | ۱,۱۰۶ | |

جدول ۸: اختلاف زمانى عملكرد رله‌هاى اصلى و پشتيبان.

| شماره رله | GA | t_{op} (زمان عملكرد) | | رله اصلى | رله پشتيبان | Δt_{mb} |
|-----------|------|------------------------|-------------|----------|-------------|-----------------|
| | | سناريوى اول [۳۶] | سناريوى دوم | | | |
| ۱ | ۰,۲۹ | ۰,۳۳۰ | ۰,۳۶۶ | ۲ | ۱ | -۰,۰۰۷ |
| ۲ | ۰,۸۶ | ۰,۴۶۰ | ۰,۴۴۴ | ۱۴ | ۱ | ۱,۰۰۳ |
| ۳ | ۰,۷۴ | ۰,۳۳۰ | ۰,۲۱۵ | ۳ | ۲ | ۰,۰۰۴ |
| ۴ | ۱,۰۶ | ۰,۲۱۰ | ۰,۱۹۱ | ۴ | ۳ | ۰,۰۲۳ |
| ۵ | ۰,۶۲ | ۰,۲۶۰ | ۰,۰۴۶ | ۵ | ۴ | ۰,۰۲۶ |
| ۶ | ۰,۵۹ | ۰,۴۴۰ | ۰,۳۰۰ | ۶ | ۵ | ۰,۰۱۲ |
| ۷ | ۰,۲۵ | ۰,۴۸۰ | ۰,۲۷۵ | ۷ | ۵ | ۰,۰۰۴ |
| ۸ | ۰,۵۸ | ۰,۴۴۰ | ۰,۳۳۰ | ۱ | ۶ | ۰,۱۲۹ |
| ۹ | ۰,۷۲ | ۰,۳۰۰ | ۰,۰۵۴ | ۲ | ۷ | ۰,۰۴۶ |
| ۱۰ | ۰,۲۹ | ۰,۲۴۰ | ۰,۱۰۳ | ۸ | ۷ | ۰,۰۰۷ |
| ۱۱ | ۰,۵۱ | ۰,۴۰۰ | ۰,۲۸۲ | ۱۳ | ۸ | ۰,۰۳۴ |
| ۱۲ | ۰,۴۵ | ۰,۵۳۰ | ۰,۳۲۰ | ۸ | ۹ | ۰,۰۵۱ |
| ۱۳ | ۰,۵۳ | ۰,۱۵۰ | ۰,۱۱۲ | ۱۴ | ۹ | ۰,۰۲۲ |
| ۱۴ | ۰,۵۵ | ۰,۵۰۰ | ۰,۴۱۵ | ۹ | ۱۰ | ۰,۰۶۰ |
| میانگين | ۰,۵۷ | ۰,۳۶۲ | ۰,۲۴۶ | ۱۰ | ۱۱ | ۰,۰۰۹ |
| ين | | | | ۱۱ | ۱۲ | ۰,۰۲۶ |
| | | | | ۷ | ۱۳ | ۰,۲۲۵ |
| | | | | ۱۲ | ۱۳ | ۰,۰۰۷ |
| | | | | ۶ | ۱۴ | ۰,۴۵۰ |
| | | | | ۱۲ | ۱۴ | ۰,۰۰۱ |
| | | | | ۱۲ | ۱۴ | ۰,۱۱۰ |

جدول ۷: زمان عملكرد رله‌هاى جريان زياد.

| شماره رله | GA | t_{op} (زمان عملكرد) | | رله اصلى | رله پشتيبان | Δt_{mb} |
|-----------|------|------------------------|-------------|----------|-------------|-----------------|
| | | سناريوى اول [۳۶] | سناريوى دوم | | | |
| ۱ | ۰,۲۹ | ۰,۳۳۰ | ۰,۳۶۶ | ۲ | ۱ | -۰,۰۰۷ |
| ۲ | ۰,۸۶ | ۰,۴۶۰ | ۰,۴۴۴ | ۱۴ | ۱ | ۱,۰۰۳ |
| ۳ | ۰,۷۴ | ۰,۳۳۰ | ۰,۲۱۵ | ۳ | ۲ | ۰,۰۰۴ |
| ۴ | ۱,۰۶ | ۰,۲۱۰ | ۰,۱۹۱ | ۴ | ۳ | ۰,۰۲۳ |
| ۵ | ۰,۶۲ | ۰,۲۶۰ | ۰,۰۴۶ | ۵ | ۴ | ۰,۰۲۶ |
| ۶ | ۰,۵۹ | ۰,۴۴۰ | ۰,۳۰۰ | ۶ | ۵ | ۰,۰۱۲ |
| ۷ | ۰,۲۵ | ۰,۴۸۰ | ۰,۲۷۵ | ۷ | ۵ | ۰,۰۰۴ |
| ۸ | ۰,۵۸ | ۰,۴۴۰ | ۰,۳۳۰ | ۱ | ۶ | ۰,۱۲۹ |
| ۹ | ۰,۷۲ | ۰,۳۰۰ | ۰,۰۵۴ | ۲ | ۷ | ۰,۰۴۶ |
| ۱۰ | ۰,۲۹ | ۰,۲۴۰ | ۰,۱۰۳ | ۸ | ۷ | ۰,۰۰۷ |
| ۱۱ | ۰,۵۱ | ۰,۴۰۰ | ۰,۲۸۲ | ۱۳ | ۸ | ۰,۰۳۴ |
| ۱۲ | ۰,۴۵ | ۰,۵۳۰ | ۰,۳۲۰ | ۸ | ۹ | ۰,۰۵۱ |
| ۱۳ | ۰,۵۳ | ۰,۱۵۰ | ۰,۱۱۲ | ۱۴ | ۹ | ۰,۰۲۲ |
| ۱۴ | ۰,۵۵ | ۰,۵۰۰ | ۰,۴۱۵ | ۹ | ۱۰ | ۰,۰۶۰ |
| میانگين | ۰,۵۷ | ۰,۳۶۲ | ۰,۲۴۶ | ۱۰ | ۱۱ | ۰,۰۰۹ |
| ين | | | | ۱۱ | ۱۲ | ۰,۰۲۶ |
| | | | | ۷ | ۱۳ | ۰,۲۲۵ |
| | | | | ۱۲ | ۱۳ | ۰,۰۰۷ |
| | | | | ۶ | ۱۴ | ۰,۴۵۰ |
| | | | | ۱۲ | ۱۴ | ۰,۰۰۱ |
| | | | | ۱۲ | ۱۴ | ۰,۱۱۰ |

جست‌وجوى ابركره ارتقا يافته نتايج بهتري نسبت به ۲ الگوريتم ديگر دارد. با توجه به جدول ۷ با مقايسه سناريوهاى اول و دوم مشخص مى‌شود كه ميانگين زمان‌هاى عملكردى در حالتى كه از الگوريتم جست‌وجوى ابركره ارتقا يافته استفاده مى‌شود كمتر است و هماهنگى بهتري به دست مى‌آيد. اين موضوع برترى روش IHSS را در بهينه‌سازى هماهنگى رله‌هاى جريان زياد نتيجه مى‌دهد. همچنين با مقايسه سناريوهاى دوم و سوم ملاحظه مى‌شود در شرايطى كه جريان تنظيمى رله‌ها نيز به عنوان متغير وارد بهينه‌سازى مسئله هماهنگى شده‌اند زمان عملكردى نسبت به دو سناريوى ديگر بهبود يافته است.

با توجه به جدول ۸ كه نشان‌دهنده قيد هماهنگى زمانى ميان رله‌ها مى‌باشد و اختلاف زمان عملكردى ميان رله‌ها را نشان مى‌دهد، مى‌توان دريافت كه در سناريوى سوم ميانگين اختلاف زمانى‌ها كمتر بوده و

جواب‌هاى بهتري نسبت به دو سناريوى اول و دوم نشان مى‌دهد. در دو سناريوى اول و دوم كه به ترتيب مربوط به الگوريتم HSS و IHSS بدون در نظرگيرى متغيربودن جريان تنظيمى است، جريان‌هاى تنظيمى برابر مقدار ثابت ۱/۲ برابر جريان بار قرار داده شده است. معمولاً در مسائلى هماهنگى حفاظتى رله‌هاى جريان زياد، ضريب جريان‌هاى تنظيمى رله‌ها بين دو عدد ۱/۲ تا ۱/۳ است. در سناريوى سوم، يعنى در حالتى كه از الگوريتم جست‌وجوى ابركره ارتقا يافته استفاده مى‌شود، ضريب

نتایج بهتری نسبت به الگوریتم پایه خود و همچنین نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌دهد.

مراجع

- [1] H. M. Sharaf, H. H. Zeineldin, D. K. Ibrahim, and E. A. EL-Zahab, "Proposed coordination strategy for meshed distribution systems with DG considering user-defined characteristics of directional inverse time overcurrent relays," *Int J. Electr Power Energy Syst*, vol. 65, pp. 49-58, Feb. 2015.
- [2] C. R. Chen and C. H. Lee, "Adaptive overcurrent relay coordination for off-peak loading in interconnected power system," *Int J. Electr Power Energy Syst*, vol. 63, pp. 140-144, Dec. 2014.
- [3] M. Farzinfar, M. Jazaeri, and F. Razavi, "A new approach for optimal coordination of distance and directional over-current relays using multiple embedded crossover PSO," *Int J. Electr Power Energy Syst*, vol. 61, pp. 620-628, Feb. 2014.
- [4] T. R. Chelliah, R. Thangaraj, S. Allamsetty, and M. Pant, "Coordination of directional overcurrent relays using opposition based chaotic differential evolution algorithm," *Int J. Electr Power Energy Syst*, vol. 55, pp. 341-350 Feb. 2014.
- [5] ع. صابری نوقایی، ح. بدرسیمایی و م. فرشاد، "یک روش احتمالی به منظور تنظیم بهینه رله‌های اضافه جریان ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صص. ۱۵۳-۱۴۱، بهار ۱۳۹۶.
- [6] P. P. Bedeka, S. R. Bhide, and S. K. Vijay, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using simplex method," *Electr Power Compon Syst*, vol. 38, no. 10, pp. 1175-1193, Jul. 2010.
- [7] A. J. Urdaneta, H. Resterbo, J. Sanchez, and J. Fajardo, "Coordination of directional overcurrent relays timing using linear programming," *IEEE Trans. on Power Deliv*, vol. 11, no. 1, pp. 122-129, Jan. 1996.
- [8] B. Chattopadhyay, M. S. Sachdev, and T. S. Sidhu, "An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," *IEEE Trans. on Power Deliv*, vol. 11, no. 1, pp. 165-173, Jan. 1996.
- [9] C. W. So and K. K. Li, "Time coordination method for power system protection by evolutionary algorithm," *IEEE Trans. on Ind Appl*, vol. 36, no. 5, pp. 1235-1240, Oct. 2000.
- [10] C. W. So, K. K. Li, K. T. Lai, and K. Y. Fung, "Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination," in *Proc. Sixth Int. Conf. on Developments in Power System Protection*, pp. 66-69, Nottingham, UK, 25-27 Mar. 1997.
- [11] F. Razavi, H. Askarian Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadi, and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for O/C relays coordination," *Elect Power Syst Res*, vol. 78, pp. 713-720, 2008.
- [12] H. Zeineldin, E. El-Saadany, and M. A. Salama, "Optimal coordination of O/C relays using a modified particle swarm optimization," *Elect Power Syst Res*, vol. 76, no. 11, pp. 988-995, Apr. 2006.
- [13] K. Deb, F. Ruiz, M. Luque, R. Tewari, J. M. Cabello, and J. M. Cejudo, "On the sizing of a solar thermal electricity plant for multiple objectives using evolutionary optimization," *Appl Soft Comput*, vol. 12, no. 10, pp. 3300-3311, Oct. 2012.
- [14] K. Mahadevan and P. S. Kannan, "Comprehensive learning particle swarm optimization for reactive power dispatch," *Appl Soft Comput*, vol. 10, no. 2, pp. 641-652, Mar. 2010.
- [15] A. Khare and S. Rangnekar, "A review of particle swarm optimization and its applications in solar photovoltaic system," *Appl Soft Comput*, vol. 13, no. 5, pp. 2997-3006, May 2013.
- [16] J. Soares, T. Sousa, H. Morais, Z. Vale, B. Canizes, and A. Silva, "Application-specific modified particle swarm optimization for energy resource scheduling considering vehicle-to-grid," *Appl Soft Comput*, vol. 13, no. 11, pp. 4264-4280, Nov. 2013.
- [17] H. Karami, M. J. Sanjari, A. Tavakoli, and G. B. Gharehpetian, "Optimal scheduling of residential energy system including CHP system and storage device," *Electr Power Compon Syst*, vol. 41, no. 8, pp. 765-780, Apr. 2013.
- [18] H. Karami, M. J. Sanjari, S. Hadavi, S. H. Hosseini, and G. B. Gharehpetian, "Stochastic load effect on home energy system scheduling optimization," *Int Trans. Electr Energy Syst*, vol. 25, no. 10, pp. 2412-2426, Aug. 2015.
- [19] H. Karami, M. J. Sanjari, S. H. Hosseini, and G. B. Gharehpetian, "An optimal dispatch algorithm for managing residential distributed energy resources," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2360-2367, Sept. 2014.

جدول ۹: مقادیر جریان تنظیمی به دست آمده در سناریوی سوم.

| شماره رله | مقدار ضریب جریان تنظیمی | جریان تنظیمی (I_{pickup}) |
|-----------|-------------------------|-------------------------------|
| ۱ | ۱,۲۰۰ | ۱۲۴,۸ |
| ۲ | ۱,۳۰۰ | ۲۱۵,۸ |
| ۳ | ۱,۲۹۹ | ۱۶۲,۴ |
| ۴ | ۱,۲۹۳ | ۲۳۲,۷ |
| ۵ | ۱,۳۰۰ | ۱۶۷,۷ |
| ۶ | ۱,۲۴۰ | ۱۴۱,۴ |
| ۷ | ۱,۲۶۹ | ۱۷۸,۹ |
| ۸ | ۱,۲۸۶ | ۱۴۰,۱۷ |
| ۹ | ۱,۲۹۷ | ۱۵۳ |
| ۱۰ | ۱,۳۰۰ | ۱۵۴,۷ |
| ۱۱ | ۱,۳۰۰ | ۱۷۵,۵ |
| ۱۲ | ۱,۳۰۰ | ۱۵۸,۶ |
| ۱۳ | ۱,۲۰۱ | ۱۵۰,۱ |
| ۱۴ | ۱,۲۰۰ | ۱۹۹,۲ |
| میانگین | ۱,۲۷ | ۱۶۸,۲۱ |

جدول ۱۰: تعداد تکرار و زمان انجام محاسبات به طور میانگین.

| روش بهینه‌سازی | تعداد تکرار | زمان انجام محاسبات به طور میانگین |
|-------------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| الگوریتم جست‌وجوی ابرکره | ۵۰۰ | ۳,۱۹ |
| الگوریتم جست‌وجوی ابرکره ارتقایافته | ۵۰۰ | ۳,۳۷ |
| الگوریتم ژنتیک | ۵۰۰ | ۳,۰۱ |

جریان‌های تنظیمی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی قرار گرفته شده تا مقدار بهینه آنها برای هر رله به دست آید. در واقع جریان تنظیمی از ضریب جریان بار در مقادیر جدول ۹ به دست می‌آیند که در ستون مربوط در این جدول با توجه به مقادیر بار داده شده در شبکه نمونه به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که مقدار میانگین ضریب تنظیم جریانی مقدار ۱,۲۷ به دست آمده است در حالی که در دو سناریوی قبلی به صورت پیش‌فرض مقدار ثابت ۱,۲ در نظر گرفته می‌شد. این تغییر موجب بهبود در مقادیر اختلاف زمانی و زمان عملکرد نسبت به دو سناریوی قبلی شده است. همچنین در جدول ۱۰ زمان میانگین انجام محاسبات برای هر روش بهینه‌سازی آورده شده است. با توجه به جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که زمان انجام محاسبات چندان تفاوت نمی‌کند هرچند که الگوریتم ژنتیک زمان کمتری را به دست می‌دهد.

۵- نتیجه

در این مقاله، هماهنگی بهینه رله‌های جریان زیاد با در نظرگیری ضرایب تنظیم زمانی، منحنی مشخصه و ضرایب تنظیم جریانی رله‌ها به طور هم‌زمان به عنوان یک حالت جامع مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همان طور که در قسمت شبیه‌سازی و نتایج مقاله هم ذکر شد، با در نظر گرفتن مقادیر ضریب جریانی به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی، بهبود قابل ملاحظه‌ای در هماهنگی رله‌های جریان زیاد به دست می‌آید. همچنین مقالات بسیاری در مجلات مختلف به دنبال ارتقای الگوریتم‌های مختلف برای رسیدن به جواب بهتر هستند و در این مقاله، الگوریتم جست‌وجوی ابرکره را مبنای بحث قرار دادیم تا با ارتقای آن، نتایج هماهنگی رله‌های جریان زیاد را در یک شبکه نمونه بهبود بخشیم. با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در مقاله مشاهده شد که الگوریتم ارتقایافته

- [38] R. Mohammadi Chabanloo, H. Askarian Abyaneh, S. S. Hashemi Kamangar, and F. Razavi, "Optimal combined overcurrent and distance relays coordination incorporating intelligent overcurrent relays characteristic selection," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1381-1391, Jul. 2011.
- [39] H. Sharifian, H. A. Abyaneh, S. K. Salman, R. Mohammadi, and F. Razavi, "Determination of the minimum break point set using expert system and genetic algorithm," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1284-1295, Jul. 2010.
- امیررضا حسینی آهنگر** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانیده است. در حال حاضر دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر می باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شبکه‌های هوشمند، جزیره‌سازی کنترل شده شبکه قدرت، منابع تولید پراکنده است.
- حامد نفیسی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر می باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان طراحی و برنامه‌ریزی ریزشبکه، شبکه هوشمند، حفاظت سیستم‌های قدرت و سیستم‌های با اینرسی کم می باشد.
- حسین کومی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است و هم‌اکنون محقق پسادکتر در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر است. از ایشان بیش از ۳۰ مقاله کنفرانسی و بیست مقاله ژورنالی منتشر شده است. همچنین ایشان دارای سه اختراع داخلی و یک اختراع بین‌المللی است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان ترانسفورماتور قدرت، برنامه‌ریزی بهینه سیستم قدرت و حفاظت سیستم‌های قدرت است.
- گئورگ قره‌پتیان** در سال ۱۳۶۵ دوره کارشناسی مهندسی برق (قدرت) را در دانشگاه تبریز ظرف مدت سه سال و نیم و با کسب رتبه اول به اتمام رساند. وی درجه کارشناسی‌ارشد خود را نیز با کسب رتبه اول در سال ۱۳۶۸ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر (در زمینه قدرت) دریافت نمود و بلافاصله به عنوان مربی در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر مشغول به کار شد. نام‌برده در بهمن ماه سال ۱۳۷۰ وارد دوره دکتری دانشکده فنی دانشگاه تهران شد و بعد از گذراندن دوره آموزشی موفق به دریافت بورس دولت آلمان (DAAD) شد. ایشان دوره تحقیقاتی دکترای را از سال ۱۳۷۲ لغایت ۱۳۷۵ در دانشگاه صنعتی آخن آلمان گذراند و در بهار ۱۳۷۶ موفق به اخذ درجه دکتری مهندسی برق با درجه عالی از دانشکده فنی دانشگاه تهران شد. بعد از فارغ‌التحصیلی ایشان به عنوان استادیار فعالیت خود را در دانشگاه صنعتی امیرکبیر شروع کرد. در تاریخ ۱۳۸۳ به رتبه دانشیاری و در سال ۱۳۸۶ به رتبه استادی ارتقاء یافت. از ایشان بیش از ۱۰۰۰ مقاله منتشر شده است و در زمره یک درصد برتر دانشمندان و نخبگان علمی جهان با استناد به پایگاه استنادی طلا به‌داران علم تامسون رویترز (ISI-ESI) بر اساس فعالیت ده سال اخیر (۲۰۰۵-۲۰۱۵) و (۲۰۰۶-۲۰۱۶) می باشد. وی همچنین پژوهشگر برتر ایران منتخب انجمن انرژی ایران (IEA) در سال ۱۳۹۶ با توجه به میزان بالاترین استنادات ثبت شده در سامانه SciVal الزویر، پژوهشگر برتر ایران منتخب انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران (IAEEE) در سال ۱۳۸۹ و استاد نمونه کشور منتخب وزارت علوم تحقیقات و فناوری در سال ۱۳۸۷ بوده‌اند.
- [20] H. Karami, M. J. Sanjari, and G. B. Gharehpetian, "Hyper-spherical search (HSS) algorithm: a novel meta-heuristic algorithm to optimize nonlinear functions," *Neural Comput. Appl.*, vol. 25, no. 6, pp. 1455-1465, Nov. 2014.
- [21] M. J. Sanjari, H. Karami, A. H. Yatim, and G. B. Gharehpetian, "Application of hyper spherical search algorithm for optimal energy resources dispatch in residential microgrids," *Appl Soft Comput.*, vol. 37, pp. 15-23, Dec. 2015.
- [22] M. S. Kiran, "Particle swarm optimization with a new update mechanism," *Applied Soft Computing*, vol. 60, pp. 670-678, Nov. 2017.
- [23] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942-1948, Perth, Australia, 27 Nov.-1 Dec. 1995.
- [24] J. Yang and Y. Zhuang, "An improved ant colony optimization algorithm for solving a complex combinatorial optimization problem," *Applied Soft Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 653-660, 2010.
- [25] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle, "Ant colony optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 28-39, Nov. 2006.
- [26] P. Mohapatra, K. Nath Das, and S. Roy, "A modified competitive swarm optimizer for large scale optimization problems," *Applied Soft Computing*, vol. 59, pp. 340-362, Oct. 2017.
- [27] W. Long, J. Jiao, X. Liang, and M. Tang, "An exploration-enhanced grey wolf optimizer to solve high-dimensional numerical optimization," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 68, pp. 63-80, Feb. 2018.
- [28] S. Torabi and F. Safi-Esfahani, "Improved Raven Roosting Optimization algorithm (IRRO)," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 40, pp. 144-154, Jun. 2018.
- [29] R. Cheng and Y. Jin, "A competitive swarm optimizer for large scale optimization," *IEEE Trans. on Cybernetics*, vol. 45, no. 2, pp. 191-204, Feb. 2015.
- [30] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, Mar. 2014.
- [31] A. Brabazon, W. Cui, and M. O'Neill, "The raven roosting optimisation algorithm," *Soft Computing*, vol. 20, no. 2, pp. 525-545, Feb. 2016.
- [32] M. Pradhan, P. Kumar Roy, and T. Pal, "Grey wolf optimization applied to economic load dispatch problems," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 325-334, Dec. 2016.
- [33] T. Jayabarathi, T. Raghunathan, B. R. Adarsh, and P. Suganthan, "Economic dispatch using hybrid grey wolf optimizer," *Energy*, vol. 111, pp. 630-641, 15 Sept. 2016.
- [34] H. Vennila and T. Ruban Deva Prakash, "Particle swarm optimization technique for solving economic emission dispatch problems," *Procedia Engineering*, vol. 38, pp. 2009-2021, 2012.
- [35] V. Jadoun, N. Gupta, K. R. Niazi, and A. Swarnkar, "Modulated particle swarm optimization for economic emission dispatch," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 80-88, Dec. 2015.
- [36] S. A. Ahmadi, H. Karami, M. J. Sanjari, H. Tarimoradi, and G. B. Gharehpetian, "Application of hyper-spherical search algorithm for optimal coordination of overcurrent relays considering different relay characteristics," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 443-449, Dec. 2016.
- [37] IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays," in IEEE PC37.112/D2, pp. 1-22, Jan. 2017.