

Presenting a New Multi-Objective Optimization Method Based on MOPSO-SQP Algorithm in Order to Coordinate the Protective Overcurrent Relays in Power Systems

Samira Sadeghi¹, Navid Rezaei², Ali Hesami-Naghshbandy³, Parham Moradi⁴

^{1, 2, 3, 4}. Dept. of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

hesami@uok.ac.ir, samira.sadeghi@eng.uok.ac.ir, n.rezaei@uok.ac.ir, p.moradi@uok.ac.ir

Abstract:

One of the important issues in coordination of protective relays is minimization of the time interval between the operation of main and backup overcurrent (OC) relays. Overcurrent relays coordination problem due to the large number of variables and the nature of the objective functions can be introduced as a complex optimization problem that necessitates the need for an efficient optimization method with appropriate accuracy and speed. Given that for the realization of protective purposes including increased relays operation speed, selectivity, support, reliability and stability, different objective functions can be described, therefore, providing a multi-objective mathematical problem in optimizing protective problems may be necessary. In this regard, this article due to the capabilities of the MOPSO, proposes a multi-objective optimization structure, in which the SQP by increasing the speed and not increasing the search space is added to MOPSO. In this paper, several objective functions are proposed based on protection goals and optimal adjustment points have been extracted using the proposed multi-objective MOPSO-SQP. The simulations have been implemented and carefully analyzed on several typical power systems. The simulation results confirm the efficiency of the proposed algorithm in ensuring the optimal coordination of protective overcurrent relays in power system.

Keywords: Multi objective algorithm, Optimal Pareto front, Overcurrent relays, Protective coordination.

ارائه یک روش بهینه‌سازی چندهدفه جدید مبتنی بر الگوریتم MOPSO-SQP به منظور

هماهنگی رله‌های حفاظتی جریان زیاد در سیستم‌های قدرت

سمیرا صادقی^۱، نوید رضایی^۲، علی حسامی‌نقشبندی^۳، پرهام مرادی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

samira.sadeghi@eng.uok.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

n.rezaei@uok.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

hesami@uok.ac.ir

۴- دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر - دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران

p.moradi@uok.ac.ir

چکیده: از مسائل مهم در هماهنگی رله‌های حفاظتی، کمینه‌سازی زمان قطع بین رله‌های جریان زیاد اصلی و پشتیبان است. مسئله هماهنگی رله‌های جریان زیاد به دلیل تعداد زیاد متغیرها و ماهیت توابع هدف می‌تواند مسئله پیچیده بهینه‌سازی معرفی شود که به ارائه روش بهینه‌سازی کارآمد با دقت و سرعت مطلوب نیاز دارد. با توجه به اینکه برای تحقق اهداف حفاظتی شامل افزایش سرعت عملکرد رله‌ها، سلکتیویته، پشتیبانی، قابلیت اطمینان و پایداری، توابع هدف مختلفی توصیف می‌شوند؛ بنابراین، ارائه یک مسئله ریاضی چندهدفه در بهینه‌سازی مسائل حفاظتی ضروری است. در همین راستا و برای پوشش این ضرورت‌ها، مقاله حاضر با توجه به قابلیت‌های روش MOPSO یک ساختار بهینه‌سازی چندهدفه را پیشنهاد می‌دهد و در آن روش SQP با افزایش سرعت و ثابت نگه داشتن فضای جستجو به MOPSO اضافه می‌شود. در این مقاله چند تابع هدف براساس اهداف حفاظتی پیشنهاد شده‌اند که به کمک روش پیشنهادی چندهدفه MOPSO-SQP، نقاط تنظیم بهینه استخراج شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها روی چند سیستم قدرت نمونه، پیاده‌سازی و با دقت تحلیل شده‌اند که نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی در تضمین هماهنگی بهینه رله‌های حفاظتی جریان زیاد در سیستم قدرت‌اند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم چندهدفه، جبهه پارتو بهینه، رله‌های جریان زیاد، هماهنگی حفاظتی

۱- مقدمه

رله‌های جریان زیاد (OC)^۱ به دلیل سادگی، اجرای آسان و مزایای اقتصادی رایج‌ترین رله‌های استفاده شده برای وظیفه مذکورند [۱-۳]. از جمله راه‌حل‌های مرسوم در سیستم‌های قدرت این است که در کنار رله اصلی از دست‌کم یک رله پشتیبان برای ایجاد حفاظت مطمئن و با قابلیت اطمینان بالا استفاده می‌شود؛ رله‌های جریان زیاد هم حفاظت اصلی برای شبکه‌های زیرانتقال و توزیع محسوب می‌شوند و هم به عنوان رله پشتیبان در شبکه‌های انتقال بالادست استفاده می‌شوند. هدف، برطرف کردن خطا در سریع‌ترین زمان ممکن است؛ اما اگر رله اصلی به هر دلیلی نتواند وظیفه خود را به درستی انجام دهد، رله پشتیبان بلافاصله و با یک

۱-۱- انگیزه پژوهش

هدف اصلی در حفاظت سیستم‌های قدرت، شناسایی و جداسازی محل وقوع خطا در کمترین زمان ممکن است که

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

نام نویسنده مسئول: علی حسامی‌نقشبندی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کردستان - سنندج - دانشگاه

کردستان - دانشکده مهندسی

روش‌های بهینه‌سازی خطی سیمپلکس و دوگان سیمپلکس برای هماهنگی بهینه رله‌های OC استفاده شده است [۱۵-۱۳]. روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی به مقادیر اولیه وابسته‌اند؛ به همین دلیل، ممکن است در بهینه‌های محلی به دام بیافتند. بنابراین در مطالعات جدیدتر، از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی بیشتر استفاده شده است که این روش‌ها در بیشتر موارد بسط داده شده‌اند. الگوریتم ژنتیک (GA^A) [۱۶، ۳] و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^A) [۱۷] از جمله الگوریتم‌های تکاملی بسیار معروف‌اند که برای مسائل بهینه‌سازی مهندسی برق از جمله حل مسئله هماهنگی رله‌های OC استفاده می‌شوند. در بعضی مواقع روش‌های بهینه‌سازی به نبود هماهنگی میان رله‌های اصلی و پشتیبان منجر می‌شوند؛ به طوری که اگر OT رله پشتیبان کوچک‌تر از OT رله اصلی باشد، یعنی رله پشتیبان زودتر از رله اصلی عمل کند، از نظر مسئله هماهنگی پذیرفتنی نیست. مسئله مهم دیگری که در بهینه‌سازی باید مدنظر قرار گیرد، ارائه تابع هدف (OF^1) مناسب در پیدا کردن OT بهینه است. در صورتی که OT رله‌های اصلی و پشتیبان خیلی بزرگ باشد، موجب تحمل جریان خطای بیشتری توسط تجهیزات می‌شود که در نتیجه، موجب خسارت به تجهیزات و کاهش طول عمر آنها خواهد شد؛ بنابراین با انتخاب OF مناسب، این مشکل رفع می‌شود [۱۸].

به‌طور کلی برای حل مسائل پیچیده مختلف در سیستم قدرت، الگوریتم‌های تکاملی گوناگونی استفاده شده‌اند که برخی از آنها شامل الگوریتم کلونی زنبور عسل [۱۹]، الگوریتم جستجوی گرانشی [۲۰] و الگوریتم ترکیبی جهش قورباغه‌ها [۲۱] هستند. همچنین، برای حل مسئله هماهنگی رله‌های جریان زیاد ($OCRC^1$)، در مقالات زیادی الگوریتم‌های تکاملی مختلفی از جمله الگوریتم ژنتیک ترکیبی (HGA^1) [۲۲]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۲۳]، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO^3) [۲۴]، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS^4) [۲۵] و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر (SOA^5) [۲۶] از نظر دقت و کارایی بررسی و مقایسه شده‌اند.

بنابراین، $OCRC$ یک مسئله بهینه‌سازی مقید محدب است که با روش‌های کلاسیک [۱۵-۱۳] و روش‌های مبتنی

وقفه زمانی از پیش تعیین شده با توجه به زمان عملکرد (OT^2) رله اصلی باید عمل کند. در واقع رله پشتیبان نباید قبل از رله اصلی عمل کند؛ بنابراین، میان زمان عملکرد دو رله باید یک فاصله زمانی هماهنگی (CTI^2) در نظر گرفته شود که زمان تشخیص میان رله اصلی و پشتیبان باید کمتر از CTI باشد [۴، ۵]. به‌طور معمول، OT رله پشتیبان بزرگ‌تر از مجموع OT ‌های رله اصلی و CB^1 اصلی انتخاب می‌شود که هماهنگی رله‌های OC در مطالعات حفاظت را سبب می‌شود [۶]. رله‌های OC، ساختار ساده‌ای دارند؛ اما در صورت افزایش اندازه و پیچیدگی شبکه قدرت به هم پیوسته، هماهنگی آنها بسیار محاسباتی می‌شود و حجم محاسبات افزایش می‌یابد و این بسیار زمان‌بر خواهد بود [۷].

۱-۲- پیشینه پژوهش

در مسئله تنظیم رله‌های OC حفاظتی سیستم‌های قدرت پارامترهای اساسی شامل ضریب تنظیم زمانی (TSM^o) و ضریب تنظیم جریان (PSM^1) باید محاسبه شوند که محدوده مجاز TSM و PSM براساس کاتالوگ فروشنده انتخاب می‌شود. همچنین، درجه‌بندی TSM در حالت گسسته به‌طور متداول از ۰/۰۵ تا ۱/۱ با گام‌های ۰/۰۵ و درجه‌بندی PSM در حالت گسسته به‌طور معمول از ۵۰٪ تا ۲۰٪ با گام‌های ۲۵٪ است. با محاسبه این ضرایب، سیستم حفاظتی باید بخش‌های خط‌آدار سیستم قدرت را به‌راحتی قطع کند. گفتنی است در رله‌های دیجیتال جدید امکان تنظیم پارامترها با گام‌های ۰/۰۱ فراهم شده است [۸-۱۰]. رله‌های جریان زیاد جهت‌دار (DOC^2) در سیستم‌های توزیع و به‌ویژه ریزشبکه‌های دارای ساختار مش ضعیف یا شعاعی استفاده می‌شوند که هماهنگی رله‌های DOC در این شبکه‌ها به‌آسانی انجام می‌شود؛ زیرا هر رله به‌عنوان رله پشتیبان برای یک یا چند رله در پایین دست خود عمل می‌کند یا چند رله، نقش رله پشتیبان را برای یک رله پایین دست دارند [۱۱، ۱۲].

با توجه به پیچیدگی‌های سیستم قدرت به هم پیوسته، امروزه از روش‌های بهینه‌سازی مختلف کلاسیک و تکاملی برای تنظیم پارامترهای زمانی و جریانی و هماهنگی میان رله‌ها استفاده می‌شود. در برخی مطالعات قدیمی‌تر از

روش بهینه‌سازی برنامه‌سازی مربعی متوالی (SQP) پیشنهاد شده است. در این مقاله، تابع هدف جدیدی نیز پیشنهاد شده است. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و با افزودن تابع هدف جدید، بعضی از اهداف حفاظتی ارتقا یافته‌اند که به صورت زیرند:

- بهبود سرعت عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان؛
 - کاهش ناهماهنگی‌های میان رله‌های اصلی و پشتیبان؛
 - افزایش سلکتیویته و کاهش خطای همپوشانی رله‌ها؛
 - امکان انتخاب بهترین منحنی مشخصه برای رله‌ها
- هم‌زمان با تنظیم پارامترهای TSM و PSM.

در جدول (۱) برخی مقاله‌های پیشین و این مقاله از نظر روش حل، الگوریتم پیشنهادی و شاخص‌های حفاظتی به صورت کلی مقایسه شده‌اند. با توجه به این جدول، جامعیت و نوآورانه‌بودن ساختار هماهنگی بهینه پیشنهادی استنتاج می‌شود؛ زیرا این مقاله شاخص‌های بیشتری را در یک ساختار چندهدفه در نظر گرفته است.

بر هوش تکاملی [۲۶-۲۲] حل می‌شود. در الگوریتم‌هایی با قابلیت بررسی یک تابع هدف، برای اینکه بتوان به صورت هم‌زمان چند تابع هدف را بهینه کرد، باید کلیه توابع هدف را با استفاده از ضرایب جریمه و وزن‌دهی ضرایب جریمه به یک هدف تبدیل کرد؛ سپس مسئله بهینه‌سازی را حل کرد که در هر تکرار یک مقدار مشخص برای تابع هدف به دست می‌آید [۳]. در الگوریتم‌های چندهدفه، کلیه هدف‌ها به صورت جداگانه و به طور هم‌زمان عمل بهینه‌سازی را انجام می‌دهند که در صورت وجود دو هدف، یک جبهه پارتو در فضای دوبعدی و در صورت وجود سه هدف، پارتو بهینه در فضای سه‌بعدی رسم می‌شود. همچنین، در الگوریتم‌های چندهدفه با بسط‌دادن الگوریتم تکاملی مدنظر، بیشتر از سه هدف بررسی می‌شوند [۲۹-۲۷].

۱-۳- اهداف و نوآوری‌های مقاله

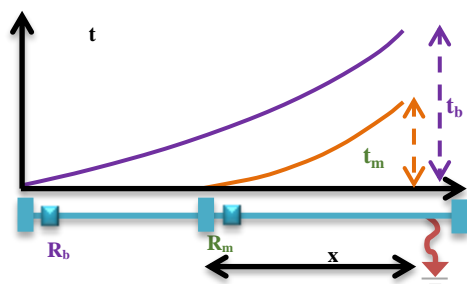
در این مقاله برای هماهنگی رله‌های جریان زیاد در سیستم‌های قدرت به هم پیوسته یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات با استفاده از

جدول (۱): طبقه‌بندی و مقایسه روش‌های حل مسئله OCRC

ردیف	ساختار توابع		روش حل		ارزیابی شاخص‌های حفاظتی			توانایی الگوریتم	
	تک‌هدفه	چندهدفه	کلاسیک	ابتکاری	کاهش	افزایش	افزایش قابلیت	تعیین ضرایب	تعیین ضرایب
[۲]	*		*		*				
[۳]	*		*		*			*	*
[۴]	*		*		*	*	*		
[۵]	*		*		*	*	*		
[۷]	*		*		*	*	*		
[۹]	*		*		*	*	*		
[۱۳]	*		*		*	*	*		
[۲۶]	*		*		*	*	*		
این مقاله	*		*		*	*	*	*	*

مختلف (سیستم‌های آزمون قدرت با مقیاس کوچک و بزرگ) و مقایسه با روش‌های پیشین در بخش چهارم به تفصیل آمده‌اند و در انتها نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم بیان شده است.

بخش‌های اصلی مقاله به این صورت است: در بخش دو، توصیف مدل و فرمولاسیون مسئله OCRC آورده شده و در بخش سه، الگوریتم چندهدفه MOPSO-SQP^{۱۷} پیشنهادی ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای



شکل (۱): هماهنگی یک جفت رله اصلی و پشتیبان [۳۰]

متغیرهای (بردارهای راه‌حلی) به‌دست آمده با الگوریتم پیشنهادی، باید در یک محدوده مشخص قرار گیرند که به صورت (۴) و (۵) هستند:

$$TSM_{min} \leq TSM_i \leq TSM_{max} \quad (4)$$

$$PSM_{min} \leq PSM_i \leq PSM_{max} \quad (5)$$

براساس سطح اتصال کوتاه و توپولوژی شبکه مدنظر، حدود بالا و پایین PSM با توجه به رابطه (۶) تعریف می‌شود [۳۳]:

$$PSM_{min,i} = \max(0.5, \min(1.25 \frac{I_{Lmax,i}}{CTR_i}, \frac{I_{Fmax,i}}{3CTR_i})) \quad (6)$$

$$PSM_{max,i} = \min(2, \frac{2I_{Fmin,i}}{3CTR_i})$$

پارامترهای $I_{Fmin,i}$ و $I_{Fmax,i}$ به ترتیب حداکثر و حداقل جریان خطا در ناحیه حفاظتی رله i هستند و $I_{Lmax,i}$ حداکثر جریان بار است.

۲-۲- توابع هدف مسئله

تابع هدف اصلی به صورت سرعت کلی عملکرد تمام رله‌ها (مجموع زمان عملکرد رله‌ها) در برابر خطای نزدیک تعریف شده است [۳۰] که هدف آن کمینه کردن زمان عملکرد هر رله و در واقع افزایش سرعت عملکرد رله در مقابل خطای رخ داده در ناحیه حفاظتی خودش است که به صورت (۷) بیان می‌شود:

$$OF_1 = \sum_{i=1}^m t_i \quad (7)$$

m تعداد رله‌ها و t_i زمان عملکرد هر رله اصلی است. در صورتی که هدف، پیدا کردن سرعت عملکرد بهینه مجزای هر رله باشد، با افزایش تعداد رله‌های یک سیستم،

۲- توصیف مدل و فرمولاسیون مسئله OCRC

در این بخش، مدل‌سازی ریاضی مسئله هماهنگی بهینه تشریح می‌شود.

۲-۱- تعریف مسئله و قیود

زمان عملکرد هر رله در صورت وقوع خطا در ناحیه حفاظتی رله به صورت (۱) است [۳۰]:

$$t_i = \frac{TSM_i \times A}{(I_{Fi}/CTR_i \times PS_i)^B - C} + D \quad (1)$$

$$= \frac{TSM_i \times A}{(PSM_i)^B - C} + D$$

که در آن A ، B ، C و D ضرایب ثابت رله‌ها با توجه به نوع منحنی مشخصه در استانداردهای مختلف [۳۱] هستند. CTR_i نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان هر رله و I_{Fi} جریان خطا در ناحیه حفاظتی رله مدنظر است. پارامتر PS_i نشان‌دهنده جریان آستانه‌ای عملکرد رله در سمت اولیه و در $I_{pickup,i} = CTR_i \times PS_i$ پارامتر $I_{pickup,i}$ بیان‌کننده جریان متناظر تبدیل یافته با نسبت تبدیل CTR_i در سمت ثانویه رله است. جریان $I_{pickup,i}$ باید بزرگ‌تر از حداکثر جریان بار ($I_{Lmax,i}$) پیوسته ضرب شده در یک ضریب اطمینان (به طور معمول $1/3$) و کوچک‌تر از حداقل جریان خطای شناسایی شده ($I_{Fmin,i}$) در ناحیه حفاظتی رله (با توجه به نوع خطای نزدیک یا دور رله) باشد که در رابطه (۲) نمایش داده شده است [۳۲]:

$$1.3I_{Lmax,i} \leq I_{pickup,i} \leq I_{Fmin,i} \quad (2)$$

برای تضمین عملکرد هماهنگ لازم است تأخیر زمانی معناداری در تنظیمات رله‌های اصلی و پشتیبان وارد شود که این مفهوم در رابطه (۳) بیان شده است:

$$\Delta t_{mb} = t_{b,j} - t_{m,j} - CTI = \Delta t_j - CTI \geq 0 \quad (3)$$

در اینجا Δt_{mb} فاصله زمانی بین زمان عملکرد هر جفت رله اصلی و پشتیبان، CTI فاصله زمانی هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان است. $t_{m,j}$ و $t_{b,j}$ به ترتیب زمان عملکرد رله‌های پشتیبان و اصلی‌اند. همچنین شکل (۱) محدودیت هماهنگی برای یک جفت رله اصلی و پشتیبان را به وضوح نشان می‌دهد [۳].

در این تابع، μ_1 ، μ_2 و μ_3 ضرایب وزنی تابع هدف‌اند که مجموع آنها برابر عدد یک است. عبارت $sgn(\Delta t_j - CTI)$ به این صورت تعریف شده است که برای $\Delta t_j > CTI$ و $\Delta t_j < CTI$ به ترتیب برابر صفر و یک باشد. همچنین مشاهده می‌شود Δt_j به صورت درجه اول استفاده شده است که از گیرافتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری کند و بهینه‌ترین حالت ممکن را به دست بیاورد. در اینجا توابع علامت به صورت (۱۱) و (۱۲) هستند:

$$sgn(|\Delta t_j| - \Delta t_j) = \begin{cases} 1 & \Delta t_j < 0 \\ 0 & \Delta t_j \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$sgn(\Delta t_j - CTI) = \begin{cases} 1 & \Delta t_j < CTI \\ 0 & \Delta t_j \geq CTI \end{cases} \quad (12)$$

در هماهنگی حفاظتی رله‌ها باید به این نکته توجه شود که علاوه بر اینکه رله پشتیبان نباید قبل از رله اصلی عمل کند، فاصله زمانی عملکرد این دو نیز باید بزرگ‌تر از CTI باشد؛ پس با قراردادن عبارت $\Delta t_j - CTI$ در تابع هدف جدید، مشاهده می‌شود که Δt_j باید به صورت مثبت به دست آید و همچنین، باید بیشتر از CTI باشد و چون هدف کمینه‌سازی این دو عبارت است، ضرایب μ_1 ، μ_2 و μ_3 به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که Δt_j عدد بزرگی نباشد. همچنین، چون تعداد جفت رله‌ها در مخرج عبارت‌های دوم و سوم تابع هدف در نظر گرفته شده است، مقدار ضرایب وزنی به تعداد جفت رله‌ها نیز مرتبط خواهد بود. در این مقاله با توجه به ارزش هر عبارت در هر تابع هدف و براساس ترجیح بهره‌بردار، از روش آزمون و خطا برای تعیین ضرایب وزنی استفاده شده است.

۳- الگوریتم‌های ارائه‌شده و الگوریتم

پیشنهادی

۳-۱- الگوریتم MOPSO

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، یک ناحیه تصمیم‌گیری چندمعیاره است که مسائل بهینه‌سازی ریاضیاتی با بیش از یک هدف را بررسی می‌کند؛ به طوری که کلیه این هدف‌ها هم‌زمان با هم بهینه می‌شوند [۲۹-۲۷]. مراحل انجام الگوریتم چندهدفه MOPSO به صورت زیر است [۳۵]:

مسئله OCRC به یک مسئله ریاضیاتی پیچیده و غیرعملی تبدیل می‌شود [۲۹،۳۰].

سایر توابع هدف مسئله OCRC در ادامه بیان می‌شوند. در تابع OF_2 نیز هدف افزایش سرعت عملکرد رله‌ها است.

$$OF_2 = \sum_{i=1}^m (t_i)^2 \quad (8)$$

اگر تابع هدف OF_2 ، به تنهایی نوشته شود، مشکلاتی را ایجاد خواهد کرد. به دلیل اینکه هدف، کمینه‌سازی OF_2 است، ممکن است جواب بهینه سراسری به دست نیاید و در بهینه محلی به دام افتاده باشد؛ برای مثال، اگر مجموع مجذور زمان‌های عملکرد برای دو رله برابر ۰/۷ در نظر گرفته شود، زمان عملکرد دو رله برابر ۰/۸ و ۰/۲۵ یا ۰/۵۸ و ۰/۶ به دست می‌آید که در واقع مشخص نیست کدام یک پاسخ مدنظر را پوشش می‌دهد [۳]. برای حل این معضل عبارت‌های OF_1 و OF_2 ، وزن‌دهی و یک تابع در نظر گرفته می‌شوند که زمان عملکرد بهینه رله‌ها را نیز به دست می‌آورند.

در تابع هدف OF_3 به صورت (۹) تعریف می‌شود که در آن هدف بهبود سلکتیویته است که عبارت‌های موجود در آن، محدودیت‌های بهینه‌سازی‌اند که به تابع هدف تبدیل شده‌اند:

$$OF_3 = \sum_{j=1}^{mb} (\Delta t_j - \beta(\Delta t_j - |\Delta t_j|))^2 \quad (9)$$

در اینجا، mb تعداد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان است و β ضریب جریمه هر ناهماهنگی محسوب می‌شود؛ زیرا Δt_j همیشه باید مثبت باشد که عملکرد رله اصلی قبل از رله پشتیبان را نشان دهد [۳۴]. در مقالات مختلف، ضریب جریمه β را برابر ۱۰۰ در نظر می‌گیرند [۳]. در مرجع [۱۶] عبارت OF_3 به عنوان یک عبارت جریمه کلی به OF_2 اضافه شده است.

تابع OF_4 موجود در (۱۰) که تابع هدف پیشنهادی مقاله است، علاوه بر بهبود سلکتیویته، خطای همپوشانی را کاهش می‌دهد و بهبود قابلیت اطمینان را سبب می‌شود.

$$OF_4 = \mu_1 \sum_{j=1}^{mb} sgn(\Delta t_j - CTI) + \mu_2 \frac{\sum_{j=1}^{mb} sgn(|\Delta t_j| - \Delta t_j)}{mb} + \mu_3 \frac{\sum_{j=1}^{mb} sgn(\Delta t_j - CTI)}{mb} \quad (10)$$

- (۱) ایجاد جمعیت اولیه.
- (۲) جداکردن اعضای نامغلوب جمعیت اولیه و ذخیره‌کردن آنها در یک مخزن یا آرشیو.
- (۳) جدول‌بندی فضای هدف کشف‌شده.
- (۴) هر ذره از میان اعضای آرشیو یک رهبر انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد.
- (۵) بهترین خاطره شخصی هرکدام از ذرات به‌روز می‌شود.

$$\text{Minimize } Q = \nabla f^T \Delta X + \frac{1}{2} \Delta X^T [\nabla^2 L] \Delta X$$

$$\text{Subject to: } h_k + \nabla h_k^T \Delta X = 0, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (14)$$

$$g_j^T \Delta X \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

h_k ماتریس هسیان است و تابع لاگرانژ به‌صورت فرمول (۱۵) خواهد بود:

$$\tilde{L} = f(X) + \sum_{k=1}^p \lambda_k h_k(X) + \sum_{j=1}^m \lambda_{p+j} g_j(X) \quad (15)$$

در الگوریتم SQP در هر مرحله از تکرار، تقریبی از توابع لاگرانژ و هسیان با استفاده از روش به‌روزآوری شبه‌نیوتون ساخته می‌شود. این کار برای تولید یک زیرمسئله درجه دوم (درواقع یک معادله) است که برای انتخاب جهت جستجو، یک پیشنهاد محسوب می‌شود. روش SQP مبتنی بر حدس اولیه است و به‌طور معمول بهینه محلی را جستجو می‌کند که با ادغام در MOPSO نتایج بهتری خواهد داشت [۳۹].

۳-۳- الگوریتم پیشنهادی

در الگوریتم پیشنهادی ابتدا الگوریتم MOPSO، جستجوی هم‌زمان کل فضای پاسخ را برای متغیرهای مدنظر مقاله انجام می‌دهد، توابع هدف را پس از به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات محاسبه می‌کند و پس از اعمال جهش بر ذرات، موقعیت نسبی هر ذره را در اختیار SQP قرار می‌دهد. در این حالت، SQP در بهینه محلی گرفتار نمی‌شود و جواب‌های بهتری به دست می‌آید. الگوریتم پیشنهادی MOPSO-SQP همچنین زمان کمتری را برای یافتن جواب بهینه لازم دارد؛ زیرا اگر در MOPSO تعداد ذرات بیشتری برای جستجوی کل فضای هدف در نظر گرفته شود، زمان یافتن جواب طولانی خواهد شد، اما در الگوریتم پیشنهادی با قراردادن الگوریتم SQP، پس از اعمال جهش موقعیت ذرات در الگوریتم MOPSO، با ایجاد مقادیر جدیدی از فضا و با همان تعداد ذرات، سرعت همگرایی، افزایش و احتمال واگرایی کاهش می‌یابد. فلوچارت مربوط به الگوریتم پیشنهادی مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است.

- اگر موقعیت جدید، بهترین خاطره را مغلوب کند، موقعیت جدید جای بهترین خاطره را می‌گیرد.
- اگر موقعیت جدید توسط بهترین خاطره مغلوب شد، هیچ کاری انجام نمی‌شود.
- اگر هیچ‌کدام همدیگر را مغلوب نکنند، یکی از این دو به‌طور تصادفی بهترین خاطره در نظر گرفته می‌شود.
- (۶) اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو اضافه می‌شوند.

- (۷) اعضای مغلوب آرشیو حذف می‌شوند.
- (۸) اگر تعداد اعضای آرشیو بیشتر از ظرفیت تعیین‌شده آن باشد، اعضای اضافی حذف می‌شوند و جدول‌بندی فضای هدف تجدید می‌شود.
- (۹) در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است، باید به مرحله ۳ بازگشت؛ در غیر این صورت، الگوریتم پایان می‌یابد.

۳-۲- الگوریتم SQP

الگوریتم SQP یکی از روش‌های بسیار مؤثر حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی مقید است. این الگوریتم، مبتنی بر شرایط Kuhn-Tucker و هم‌زمان با استفاده از ضرایب لاگرانژ برای لحاظ‌کردن قیدها، اقدام به حل مسئله بهینه‌سازی خواهد کرد [۳۶]. مسائل بهینه‌سازی غیرخطی به‌صورت (۱۳) بیان می‌شوند:

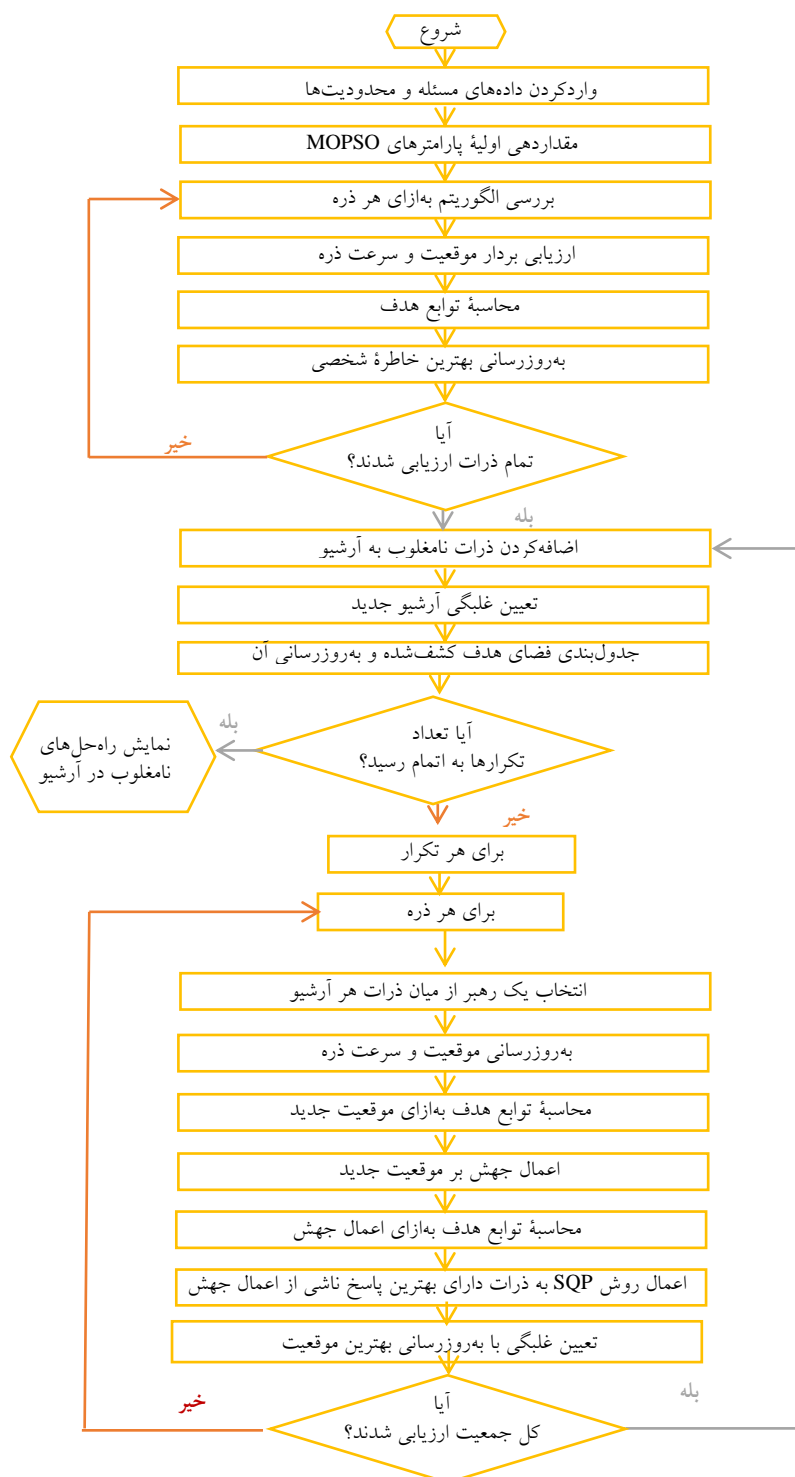
$$\text{Minimize } f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{Subject to: } h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (13)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

که در روش SQP مسئله (۱۳)، به‌صورت (۱۴) حل می‌شود [۳۷، ۳۸]:



شکل (۲): روندنمای الگوریتم پیشنهادی

راه‌حل به صورت X است. این بردار راه‌حل شامل سه نوع متغیر (برای تعداد m رله) به صورت زیر است:

$$TSM = [TSM_1, TSM_2, \dots, TSM_m]$$

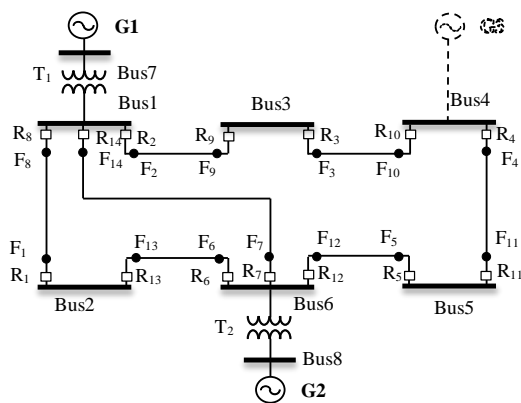
$$PSM = [PSM_1, PSM_2, \dots, PSM_m]$$

$$Char_{Curve} = [Char_{Curve_1}, Char_{Curve_2}, \dots, Char_{Curve_m}]$$

متغیرهایی که با الگوریتم پیشنهادی SQP-MOPSO

پیدا می‌شوند، به صورت $X = [TSM, PSM, Char_{Curve}]$ هستند که برای هر نسل در هر تکرار از الگوریتم، بردار

نتایج الگوریتم چندهدفه [۲۹]، متغیرهای PSM، TSM در حالت گسسته و OT بررسی شده‌اند و Δt_{mb} به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی این مطالعه با [۲۶، ۲۹] مقایسه شده است؛ مقادیر مربوطه در جدول‌های (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود مقادیر TSM و OT در مقایسه با روش پیشنهادی [۲۹] به‌طور مؤثری کاهش یافته‌اند. در اینجا برای مقایسه PSM با مرجع [۲۹]، از I_{Fi}/PS_i استفاده شده است. برای این سیستم، مقادیر پارامترهای منحنی مشخصه نیز به‌دست آمده‌اند. در جدول (۴) مقادیر متغیرهای پارامترهای A، B و C منحنی مشخصه هر رله نشان داده شده‌اند. مقدار پارامتر D در رابطه (۱) برابر صفر در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): سیستم ۸ شینه IEEE [۳۹]

با اعمال الگوریتم پیشنهادی MOPSO-SQP به سیستم آزمون ۸ شینه IEEE، جهت پارتو بهینه دویبعی و سه‌بعی در شبیه‌سازی‌ها به‌دست می‌آید. جهت پارتو بهینه دویبعی در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن مجموع وزنی روابط (۷) و (۸)، تابع هدف اول و رابطه (۱۰)، تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. راه‌حل‌های بهینه نامغلوب، به‌صورت دایره و راه‌حل‌های مغلوب با ستاره مشخص شده‌اند. شکل (۵) نیز جهت پارتو بهینه سه‌بعی این سیستم را برای تابع هدف ناشی از مجموع وزنی روابط (۷) و (۸) به‌عنوان تابع هدف اول، رابطه (۱۰)، تابع هدف دوم و رابطه (۹)، تابع هدف سوم نشان می‌دهد.

این سه نوع متغیر، به‌دنبال هم و به‌عنوان درایه‌های بردار راه‌حل در الگوریتم قرار می‌گیرند. متغیر $Char_{Curve}$ مشابه انواع استاندارد، شامل پارامترهای A، B، C و D است [۳۱]. شایان ذکر است از پارامترهای استاندارد مرجع [۳۱] می‌توان استفاده کرد و فقط متغیرهای TSM و PSM را از طریق الگوریتم پیشنهادی به‌دست آورد.

در مسائل چندهدفه، مفهوم پارتو به این صورت تعریف می‌شود که در آن فقط یک راه‌حل بهینه وجود ندارد؛ بلکه راه‌حل‌های متعددی وجود دارند که به‌طور بالقوه بهینه‌اند و هیچ‌کدام از راه‌حل‌ها را نمی‌توان بهینه‌سراسری مطلق در نظر گرفت؛ بنابراین، باید مناسب‌ترین راه‌حل با توجه به اولویت خاص کاربرد مدنظر انتخاب شود. در این مقاله با توجه به ارزش هر تابع هدف، با ایجاد بهترین مصالحه بین توابع هدف، بهترین راه‌حل توافقی انتخاب می‌شود.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

در بیشتر مقالات OCRC ارائه‌شده پیشین فقط TSM و PSM به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی محاسبه شده‌اند که از طریق الگوریتم به‌دست می‌آیند و از ضرایب ثابت یک منحنی مشخصه در تعیین زمان عملکرد کلیه رله‌ها استفاده شده است [۷]؛ اما در این مقاله هر سه نوع متغیر از طریق الگوریتم به‌دست می‌آیند. توابع هدف مدنظر این مقاله شامل مجموع وزنی روابط (۷) و (۸) (با ضرایب وزنی a_1 و a_2)، تابع هدف (۹) و تابع هدف پیشنهادی (۱۰) هستند که در الگوریتم قرار داده شده‌اند.

کارایی، صحت و دقت الگوریتم MOPSO-SQP پیشنهادی مقاله برای مسئله OCRC بهینه در سیستم‌های قدرت ۸ شینه و ۳۰ شینه IEEE بررسی شده‌اند. در کلیه شبیه‌سازی‌ها، برنامه‌ها با کامپیوتری با مشخصات ریزپردازنده Intel Core i5, 2.64 GHz RAM 4GB و 750 GB hard disc با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2018a اجرا شده‌اند.

۴-۱- سیستم آزمون ۱: سیستم ۸ شینه IEEE

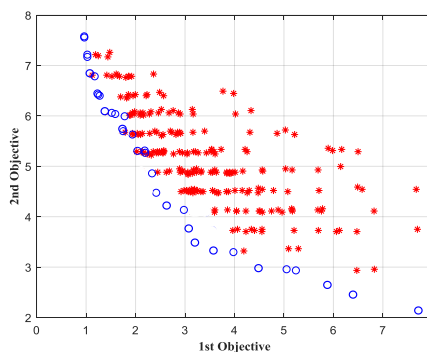
تمام داده‌های سیستم ۸ شینه (شکل ۳) در [۴۰] موجود است. در نتایج شبیه‌سازی این سیستم در مقایسه با

جدول (۳): رله‌های اصلی و پشتیبان در سیستم ۱

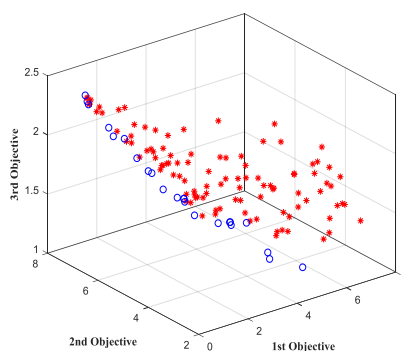
شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	روش پیشنهادی	روش پیشنهادی
		مرجع [۲۹]	مرجع [۲۶]
۱	۶	۰/۰۳۸۰	۰/۲۲۵۰
۲	۱	۰/۴۴۹۳	۲/۸۸۰۰
۲	۷	۰/۰۰۲۰	۱/۴۴۰۰
۳	۲	۰/۱۹۱۱	۰/۱۶۱۰
۴	۳	۰/۱۴۶۹	۰/۴۱۱۰
۵	۴	۰/۱۳۴۶	۰/۰۳۳۶
۶	۵	-	-
۶	۱۴	۰/۳۴۴۶	۰/۳۳۷۰
۷	۵	-	-
۷	۱۳	۱/۰۰۶۱	۰/۵۶۵۰
۸	۷	۰/۳۳۳۸	۰/۳۴۵۰
۸	۹	-	-
۹	۱۰	۰/۲۲۶۶	۰/۰۷۵۰
۱۰	۱۱	۰/۱۵۶۸	۰/۲۵۰۰
۱۱	۱۲	۰/۰۳۵۱	۰/۱۸۹۰
۱۲	۱۳	۰/۵۸۱۱	۱/۵۵۰۰
۱۲	۱۴	۰/۰۳۴۹	۰/۱۳۳۶
۱۳	۸	۰/۱۶۳۷	۰/۴۲۰۰
۱۴	۱	۰/۹۴۱۵	۱/۲۲۰۰
۱۴	۹	-	-

جدول (۴): پارامترهای منحنی مشخصه رله‌ها در سیستم ۱

شماره رله	A	B	C
۱	۸۸/۵۷۹۴	۱/۰۲۰۶	۰/۴۵۹۸
۲	۱۵۸/۰۶۷۵	۰/۸۰۰۳	۰/۷۰۲۷
۳	۱۴۵/۷۲۰۱	۰/۸۲۱۰	۰/۴۸۵۰
۴	۹۰/۱۱۰۸	۰/۶۳۲۹	۰/۹۹۸۰
۵	۱۰۷/۴۱۸۸	۱/۲۱۵۰	۰/۷۹۰۶
۶	۱۸۹/۹۲۲۰	۰/۹۰۱۶	۰/۵۶۰۷
۷	۷۵/۱۰۲۵	۰/۸۱۶۰	۰/۹۰۹۱
۸	۱۱۱/۸۲۰۰	۰/۸۰۵۲	۰/۵۵۵۰
۹	۱۹۵/۷۳۲۰	۰/۸۵۰۹	۰/۷۶۳۰
۱۰	۲۰۰/۴۹۸۰	۰/۹۱۷۰	۰/۶۵۵۳
۱۱	۱۶۱/۸۹۰۵	۰/۷۷۰۳	۰/۴۹۰۷
۱۲	۱۹۸/۰۰۱۵	۰/۸۱۰۴	۰/۴۳۹۵
۱۳	۱۷۰/۳۵۸۷	۰/۸۰۹۲	۰/۶۷۹۰
۱۴	۱۴۴/۱۹۱۹	۰/۵۸۷۳	۰/۹۱۱۶



شکل (۴): پارتو بهینه دویبعدی در سیستم آزمون ۱



شکل (۵): پارتو بهینه سه‌بعدی در سیستم آزمون ۱

جدول (۲): مقادیر OT، PSM، TSM و رله‌های اصلی در

سیستم ۱

شماره روش پیشنهادی مرجع [۲۹] روش پیشنهادی این مقاله

رله	TSM	PSM(A)	OT(s)	TSM	PSM(A)	OT(s)
۱	۰/۱۰	۵۰۰	۰/۱۰۵۸	۰/۰۵	۳۰۰	۰/۰۱۳۱
۲	۰/۲۵	۸۰۰	۰/۲۴۴۷	۰/۱۰	۷۰۰	۰/۰۸۳۹
۳	۰/۲۰	۶۰۰	۰/۲۰۵۲	۰/۲۵	۶۰۰	۰/۱۹۱۳
۴	۰/۱۰	۸۰۰	۰/۰۹۷۹	۰/۱۵	۶۵۰	۰/۲۲۷۹
۵	۰/۰۵	۵۵۰	۰/۰۵۲۰	۰/۲۵	۲۵۰	۰/۰۳۲۸
۶	۰/۱۵	۵۵۰	۰/۱۵۶۱	۰/۱۰	۵۵۰	۰/۰۶۴۴
۷	۰/۱۵	۶۵۰	۰/۱۵۱۸	۰/۲۵	۶۵۰	۰/۰۹۵۶
۸	۰/۱۵	۵۵۰	۰/۱۵۶۱	۰/۱۰	۵۰۰	۰/۰۷۵۳
۹	۰/۰۵	۵۴۰	۰/۰۵۲۲	۰/۱۰	۵۰۰	۰/۰۹۹۳
۱۰	۰/۱۰	۵۵۰	۰/۱۰۴۱	۰/۲۰	۵۵۰	۰/۱۲۳۳
۱۱	۰/۲۰	۶۵۰	۰/۲۰۲۵	۰/۰۵	۶۵۰	۰/۰۵۵۳
۱۲	۰/۳۵	۵۵۰	۰/۳۶۴۳	۰/۱۵	۴۵۰	۰/۲۳۱۹
۱۳	۰/۱۰	۶۰۰	۰/۱۰۲۶	۰/۱۵	۶۰۰	۰/۱۴۴۸
۱۴	۰/۱۰	۸۰۰	۰/۰۹۷۹	۰/۱۰	۶۰۰	۰/۳۴۴۱
مجموع	۲/۰۵	-	۲/۰۹۳۱	۱/۹۵	-	۱/۷۸۳۰

۴-۲- سیستم آزمون ۲: سیستم ۳۰ شینه IEEE

اثر بخشی روش پیشنهادی برای سیستم قدرت ۳۰ شینه نیز ارزیابی شده است. داده‌های این سیستم در [۲۹] موجود است. در این سیستم، متغیرهای بهینه‌سازی شامل TSM و PSM در حالت پیوسته و پارامترهای منحنی مشخصه‌اند که TSM و PSM به همراه OT و Δt_{mb} به دست آمده از این شبیه‌سازی با [۷] مقایسه شده‌اند. نتایج مربوط به این سیستم در جدول‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، در [۷] تعداد ۱۵ ناهماهنگی وجود دارد که در روش پیشنهادی فقط ۶ ناهماهنگی وجود دارد. با استفاده از روش پیشنهادی، زمان عملکرد رله‌ها در حین خطا و تعداد ناهماهنگی‌ها کاهش یافته است؛ بنابراین، روش پیشنهادی برای حل مسئله OCRC در بسیاری از سیستم‌های قدرت اجراشدنی خواهد بود.

جدول (۵): مقادیر OT رله‌های اصلی در سیستم آزمون ۲

شماره رله	روش پیشنهادی [۷]	روش پیشنهادی این مقاله	شماره رله	روش پیشنهادی [۷]	روش پیشنهادی این مقاله
۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۲۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
۲	۰/۰۵۵۵	۰/۰۰۳۳	۲۲	۰/۰۵۸۱	۰/۰۰۰۱
۳	۰/۲۲۳۰	۰/۰۲۱۷	۲۳	۰/۲۱۵۷	۰/۰۰۱۰
۴	۰/۸۴۱۳	۰/۰۶۰۶	۲۴	۰/۰۶۴۹	۰/۰۲۱۰
۵	۰/۱۱۳۲	۰/۰۰۰۷	۲۵	۰/۰۰۱۷	۰/۱۸۳۱
۶	۰/۲۳۰۰	۰/۳۲۱۲	۲۶	۰/۰۲۳۴	۰/۲۷۲۰
۷	۰/۱۷۰۰	۰/۰۰۹۳	۲۷	۰/۰۵۹۱	۰/۰۰۳۶
۸	۰/۲۳۶۱	۰/۲۷۱۰	۲۸	۰/۰۴۴۶	۰/۰۵۷۷
۹	۰/۰۷۸۰	۰/۳۹۰۸	۲۹	۰/۰۶۱۰	۰/۰۴۹۱
۱۰	۰/۰۸۷۳	۰/۰۵۴۰	۳۰	۰/۰۶۳۹	۰/۰۲۳۱
۱۱	۰/۰۱۴۸	۰/۰۰۴۹	۳۱	۰/۰۴۱۲۱	۰/۰۱۷۵
۱۲	۰/۱۷۰۲	۰/۰۱۰۵	۳۲	۰/۰۰۲۲	۰/۰۸۷۶
۱۳	۰/۲۲۷۷	۰/۱۶۰۱	۳۳	۰/۰۴۸۷	۰/۰۷۲۲
۱۴	۰/۰۴۷۹	۰/۰۰۸۹	۳۴	۰/۰۸۲۶	۰/۰۵۹۵
۱۵	۰/۲۰۹۲	۰/۰۳۵۸	۳۵	۰/۰۱۲۹	۰/۰۵۷۲
۱۶	۰/۰۰۹	۰/۰۲۱۹	۳۶	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۲۳
۱۷	۰/۰۰۰۲	۰/۱۷۱۰	۳۷	۰/۰۳۴۴	۰/۰۵۹۳۴
۱۸	۰/۱۱۲۳	۰/۰۰۱۰	۳۸	۰/۰۰۰۳	۰/۰۵۸۹
۱۹	۰/۰۱۱۹	۰/۰۰۵۶	۳۹	۰/۰۰۱۴۰	۰/۰۲۱۵
۲۰	۰/۰۴۱۲	۰/۱۴۵۸	مجموع	۴/۰۱۷۳	۳/۹۳۲۲

جدول (۶): مقادیر TSM و PSM رله‌های اصلی در سیستم

آزمون ۲

شماره رله	روش پیشنهادی مرجع [۷]	روش پیشنهادی این مقاله	PSM(A)	TSM	PSM(A)	TSM
۱	۱/۳۶	۱۳۲/۵۰۲۵	۰/۳۸	۲۱۵/۸۱۲۳	۱/۳۶	۲۱۵/۸۱۲۳
۲	۱/۲۶	۶۱۷/۵۶۵۰	۱/۴۲	۵۱۴/۰۰۶۲	۱/۲۶	۵۱۴/۰۰۶۲
۳	۱/۶۰	۱۲۸/۷۹۷۵	۱/۲۱	۱۳۸/۸۹۲۰	۱/۶۰	۱۳۸/۸۹۲۰
۴	۰/۵۷	۸۶/۱۹۰۰	۱/۰۶	۵۵/۷۸۴۱	۰/۵۷	۵۵/۷۸۴۱
۵	۰/۵۸	۱۳۶/۳۷۰۰	۰/۵۵	۱۱۹/۲۵۰۰	۰/۵۸	۱۱۹/۲۵۰۰
۶	۱/۱۳	۷۸/۶۵۰۰	۰/۲۶	۲۹۷/۳۶۵۶	۱/۱۳	۲۹۷/۳۶۵۶
۷	۰/۱۹	۲۴۲/۱۹۰۰	۰/۹۴	۶۰/۴۸۳۹	۰/۱۹	۶۰/۴۸۳۹
۸	۰/۷۲	۱۰۶/۱۴۵۰	۰/۲۹	۵۱۷/۰۶۳۲	۰/۷۲	۵۱۷/۰۶۳۲
۹	۰/۸۸	۱۸۸/۵۰۰۰	۰/۳۸	۱۰۶/۰۰۷۴	۰/۸۸	۱۰۶/۰۰۷۴
۱۰	۱/۶۴	۴۰۶/۶۴۰۰	۰/۱۵	۳۵۶/۸۵۰۴	۱/۶۴	۳۵۶/۸۵۰۴
۱۱	۱/۹۱	۲۹۰/۳۵۵۰	۱/۰۷	۱۸۹/۷۵۹۳	۱/۹۱	۱۸۹/۷۵۹۳
۱۲	۱/۴۰	۷۶/۶۳۵۰	۱/۱۵	۹۸/۳۶۴۱	۱/۴۰	۹۸/۳۶۴۱
۱۳	۱/۳۱	۱۵۹/۲۵۰۰	۱/۴۲	۱۴۴/۰۴۹۲	۱/۳۱	۱۴۴/۰۴۹۲
۱۴	۱/۶۱	۲۱۴/۶۹۵۰	۰/۶۴	۸۸/۶۰۰۹	۱/۶۱	۸۸/۶۰۰۹
۱۵	۱/۵۹	۷۲/۸۳۵۰	۰/۷۸	۱۱۱/۲۰۵۴	۱/۵۹	۱۱۱/۲۰۵۴
۱۶	۱/۹۹	۷۸/۳۹۰۰	۱/۸۳	۲۰۵/۹۶۲۰	۱/۹۹	۲۰۵/۹۶۲۰
۱۷	۰/۹۹	۴۷/۶۴۵۰	۱/۲۵	۸۲/۵۶۱۹	۰/۹۹	۸۲/۵۶۱۹
۱۸	۰/۷۶	۱۰۶/۱۳۰۰	۰/۸۳	۴۳/۱۷۸۵	۰/۷۶	۴۳/۱۷۸۵
۱۹	۰/۶۹	۱۷۸/۱۰۰۰	۰/۴۰	۹۹/۱۲۰۰	۰/۶۹	۹۹/۱۲۰۰
۲۰	۰/۰۹	۲۰۲/۳۱۲۵	۰/۴۱	۱۷۶/۵۳۱۷	۰/۰۹	۱۷۶/۵۳۱۷
۲۱	۰/۱۱	۴۱۱/۷۱۰۰	۱/۰۱	۳۲۸/۹۶۷۱	۰/۱۱	۳۲۸/۹۶۷۱
۲۲	۰/۱۰	۲۵۷/۵۹۵۰	۰/۱۹	۱۹۸/۰۶۴۸	۰/۱۰	۱۹۸/۰۶۴۸
۲۳	۱/۴۶	۱۸/۶۵۵۰	۰/۲۳	۴۵/۶۳۰۹	۱/۴۶	۴۵/۶۳۰۹
۲۴	۱/۹۷	۱۲۹/۲۸۵۰	۰/۶۱	۱۵۰/۹۷۱۰	۱/۹۷	۱۵۰/۹۷۱۰
۲۵	۰/۴۲	۱۷۰/۴۶۲۵	۰/۱۰	۱۳۸/۸۱۰۵	۰/۴۲	۱۳۸/۸۱۰۵
۲۶	۰/۸۰	۷۸/۶۵۰۰	۰/۲۲	۸۲/۱۶۴۹	۰/۸۰	۸۲/۱۶۴۹
۲۷	۰/۶۴	۱۲۱/۰۹۵۰	۰/۱۳	۱۶۲/۱۷۸۰	۰/۶۴	۱۶۲/۱۷۸۰
۲۸	۰/۸۵	۱۵۹/۲۱۷۵	۱/۰۰	۱۰۴/۰۰۵۲	۰/۸۵	۱۰۴/۰۰۵۲
۲۹	۰/۹۹	۱۱۳/۱۰۰۰	۰/۰۸	۱۸۶/۲۳۰۷	۰/۹۹	۱۸۶/۲۳۰۷
۳۰	۰/۰۷	۲۰۳/۳۲۰۰	۰/۳۴	۱۴۹/۸۲۶۱	۰/۰۷	۱۴۹/۸۲۶۱
۳۱	۰/۶۸	۱۴۵/۱۷۷۵	۰/۸۷	۱۳۶/۴۵۱۲	۰/۶۸	۱۳۶/۴۵۱۲
۳۲	۰/۶۴	۵۱/۰۹۰۰	۰/۳۹	۶۸/۲۰۰۳	۰/۶۴	۶۸/۲۰۰۳
۳۳	۰/۹۰	۱۵۹/۲۵۰۰	۱/۲۷	۱۱۴/۶۵۰۷	۰/۹۰	۱۱۴/۶۵۰۷
۳۴	۱/۴۷	۱۰۷/۳۴۷۵	۰/۵۱	۱۷۴/۰۲۰۸	۱/۴۷	۱۷۴/۰۲۰۸
۳۵	۱/۳۰	۶۰/۶۱۲۵	۰/۴۷	۴۵/۲۶۷۳	۱/۳۰	۴۵/۲۶۷۳
۳۶	۲/۰۰	۷۸/۳۹۰۰	۰/۴۵	۶۷/۳۲۰۹	۲/۰۰	۶۷/۳۲۰۹
۳۷	۱/۸۲	۱۳۳/۴۱۲۵	۰/۶۸	۸۸/۱۶۸۰	۱/۸۲	۸۸/۱۶۸۰
۳۸	۱/۱۸	۸۰/۹۲۵۰	۰/۹۳	۱۲۹/۳۹۲۶	۱/۱۸	۱۲۹/۳۹۲۶
۳۹	۰/۲۶	۴۲/۵۱۰۰	۰/۵۰	۶۷/۸۳۰۰	۰/۲۶	۶۷/۸۳۰۰
مجموع	۳۹/۹۳	-	۲۶/۴۰	-	۳۹/۹۳	-

جدول (۷): اختلاف زمانی عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان (Δt_{mb}) در سیستم آزمون ۲

شماره رله	روش پیشنهادی		روش اصلی		شماره رله	روش پیشنهادی		روش اصلی		
	پشتیبان	اصلی	پشتیبان	اصلی		پشتیبان	اصلی	پشتیبان	اصلی	
۲	۵	۰/۰۲۷۷	۱۰	۲۹	۱۷	۱۶	۰/۰۴۱۸	۰/۰۹۷۵	۰/۱۶۸۸	۰/۰۲۳۸
۲	۱۳	۰/۰۷۱۸	۱۱	۲۹	۱۸	۱۶	۰/۰۵۳۶	۰/۰۰۶۹	۰/۱۶۸۰	۰/۰۰۴۱
۲	۲۳	۰/۱۳۰۷	۸	۳۰	۱۹	۱۸	۰/۰۹۵۲	۰/۰۰۵۵	۰/۳۱۶۷	۰/۱۵۹۹
۳	۴	۰/۰۰۳۵	۹	۳۰	۲۰	۱۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۱۰۷	۰/۴۵۱۳	۰/۲۹۷۰
۴	۲۹	۰/۰۲۱۰	۱۱	۳۰	۳۸	۱۹	۰/۰۱۶۳	۰/۰۶۰۷۵	۰/۴۱۹۳	۰/۳۶۸۰
۵	۶	۰/۱۱۹۳	۸	۳۱	۳۹	۲۰	۰/۰۰۲۵	۰/۲۸۱۳	۰/۷۷۳۷	۰/۲۰۰۹
۶	۷	۰/۰۲۷۰	۹	۳۱	۱	۲۱	۰/۰۱۹۱	۰/۳۵۶۶	۰/۹۰۷۰	۰/۶۶۵۶
۷	۲۸	۰/۰۳۶۰	۱۰	۳۱	۳	۲۱	۰/۰۰۹۸	۰/۳۳۷۷	۰/۸۷۶۰	۰/۰۰۲۲
۸	۲۷	۰/۳۳۵۱	۳۰	۳۲	۱	۲۲	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۵۰	۰/۱۷۸۰	۰/۰۰۰۰
۹	۲۴	۰/۰۱۶۵۰	۵	۳۳	۲	۲۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۷۶
۱۰	۱۲	۰/۰۳۰۴	۲۱	۳۳	۲۲	۲۴	۰/۰۴۴۷	۰/۰۲۱۹۰	۰/۰۶۹۲	۰/۰۵۸۳
۱۱	۱۴	۰/۲۱۳۱	۲۳	۳۳	۱۳	۲۵	۰/۳۳۸۰	۰/۰۰۳۷	۰/۱۰۰۱	۰/۸۲۹۳
۱۱	۳۲	۰/۲۵۲۵	۳۱	۳۴	۲۱	۲۵	۰/۱۷۲۹	۰/۰۲۷۵	۰/۰۱۵۱	۰/۰۲۸۱
۱۲	۱۴	۰/۰۲۶۰	۳۲	۳۴	۲۳	۲۵	۰/۰۰۱۹	۰/۰۵۸۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۵۵
۱۲	۳۱	۰/۰۲۳۰	۳۳	۳۵	۲۵	۲۶	۰/۹۵۱۶	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۴۰	۰/۰۰۸۸
۱۳	۱۵	۰/۰۰۰۰	۳۴	۳۶	۲۶	۲۷	۰/۰۰۶۶	۰/۰۵۰۶	۰/۰۹۷۶	۰/۰۵۴۸
۱۴	۱۶	۰/۰۲۴۰	۳۵	۳۶	۹	۲۸	۰/۰۱۴۸	۰/۰۴۷۲	۰/۰۹۶۶	۰/۰۵۹۷
۱۴	۳۵	۰/۰۴۴۰	۱۷	۳۷	۱۰	۲۸	۰/۰۳۹۱	۰/۰۰۰۰	۱/۰۴۵۰	۰/۶۲۳۱
۱۵	۱۶	۰/۰۲۱۳	۳۶	۳۷	۱۱	۲۸	۰/۰۷۵۷	۰/۰۰۰۰	۰/۳۱۲۱	۰/۸۴۶۴
۱۵	۳۴	۰/۰۰۲۳	-	-	۸	۲۹	۰/۰۱۲۵	۰/۰۸۱۳	-	-

مقایسه سرعت اجرای الگوریتم و مقدار توابع هدف در روش پیشنهادی MOPSO-SQP و دو الگوریتم چندهدفه MOPSO [۲۹] و NSGA-II [۴۱] به ازای ضرایب وزنی $\mu_1 = 0/31$, $\mu_2 = 0/36$ و $\mu_3 = 0/33$ در جدول (۸) نشان داده شده‌اند. نتایج موجود در جدول بیان‌کننده برتری روش پیشنهادی بر دو روش ذکر شده در بالا است.

جدول (۸): مقایسه میان الگوریتم‌های چندهدفه

MOPSO-SQP	NSGA-II	MOPSO	الگوریتم‌های چندهدفه
۱۷۱/۶۵۰۶	۱۹۶/۰۷۷۲	۱۷۰/۲۳۶۵	سرعت اجرای الگوریتم (برحسب ثانیه)
۳/۴۲۶۹	۴/۵۷۸۱	۴/۸۹۰۱	مقدار اولین تابع هدف
۳/۳۶۵۰	۳/۷۷۳۰	۴/۰۱۵۶	مقدار دومین تابع هدف
۱/۳۰۵۳	۱/۸۶۶۵	۲/۱۷۵۰	مقدار سومین تابع هدف

همچنین، مقایسه عملکرد روش پیشنهادی MOPSO-SQP با دو روش MOPSO و NSGA-II از نظر جبهه پارتو در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مطلوبیت پاسخ‌های استخراج شده با روش MOPSO-SQP به‌وضوح دیده می‌شود.

مقایسه عملکرد روش پیشنهادی MOPSO-SQP با دو روش MOPSO و NSGA-II از نظر جبهه پارتو در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در

مراجع

[1] D. Birla, R. P. Maheshwari, and H. O. Gupta, "Time overcurrent relay coordination: A review", *Int. J. Emerging Elect. Power Syst.*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-13, 2005.

[2] S. A. Ahmadi, H. Karami, M. J. Sanjari, H. Tarimoradi, and G. B. Gharehpetian, "Application of hyperspherical search algorithm for optimal coordination of overcurrent relays considering different relay characteristics", *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, Vol. 83, No. 1, pp. 443-449, 2016.

[3] D. Solati-Alkaran, M. R. Vatani, M. J. Sanjari, and G. B. Gharehpetian, "Optimal overcurrent relay coordination in interconnected networks by using fuzzy-based GA method", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, No. 4, pp. 3091-3101, 2018.

[4] 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. Elect. Power Energy Syst.*, Vol. 61, pp. 620-628, 2014.

[5] T. R. Chelliah, R. Thangaraj, S. Allamsetty, and M. Pant, "Coordination of directional overcurrent relays using opposition based chaotic differential evolution algorithm", *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, Vol. 55, pp. 341-350, 2014.

[6] S. A. Ahmadi, H. Karami, and G. B. Gharehpetian, "Comprehensive coordination of combined directional overcurrent and distance relays considering miscoordination reduction", *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, Vol. 92, pp. 42-52, 2017.

[7] F. Razavi, H. Askarian-Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadi, and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 78, No. 4, pp. 713-720, 2008.

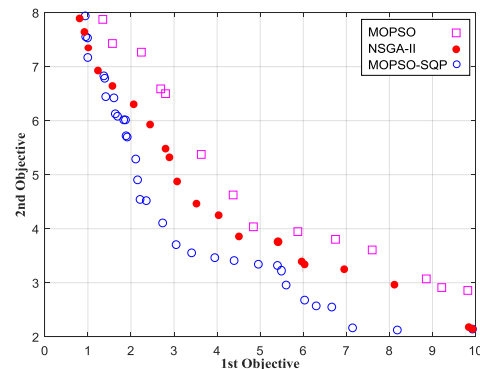
[8] A. Saberi Noughabi, H. Badrsimaei, and M. Farshad, "A Probabilistic Method to Determine the Optimal Setting of Combined Overcurrent Relays considering Uncertainties", *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, Vol. 47, No. 1, pp. 141-153, 2017.

[9] V. N. Rajput, F. Adelnia, and K. S. Pandya "Optimal coordination of directional overcurrent relays using improved mathematical formulation", *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 12, No. 9, pp. 2086-2094, 2018.

[10] C. A. C. Salazara, A. C. Enríquez, and S. E. Schaeffer, "Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 122, pp. 42-49, 2015.

[11] 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. Power Deliv.* Vol. 26, No. 3, pp. 1381-1391, Jul. 2011.

[12] M. Meskin, A. Domijan, and I. Grinberg, "Optimal co-ordination of overcurrent relays in the interconnected power systems using break points", *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 127, pp. 53-63, 2015.



شکل (۶): مقایسه جبهه پارتو سه الگوریتم MOPSO

MOPSO-SQP و NSGA-II

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، برای حل مسئله هماهنگی بهینه رله‌های جریان زیاد در شبکه‌های به هم پیوسته قدرت، یک الگوریتم چندهدفه مبتنی بر MOPSO-SQP پیشنهاد شده است که کارایی آن روی سیستم‌های قدرت مختلف بررسی شد. این الگوریتم پیشنهادی به همراه توابع هدف پیشنهادی علاوه بر اینکه سرعت عملکرد رله‌ها را بهبود بخشیده‌اند، اختلاف زمان عملکرد میان رله‌های اصلی و پشتیبان را کاهش داده‌اند. همچنین، ساختار بهینه‌سازی پیشنهادی به گونه‌ای است که بهبود سلکتیویته و تضمین عملکرد پشتیبانی، کاهش خطای همپوشانی رله‌ها، افزایش قابلیت اطمینان و پایداری بیشتر سیستم حفاظتی را سبب می‌شود. تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده روی سیستم‌های قدرت نمونه به خوبی نشان‌دهنده کارایی روش بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهادی در تحقق اهداف حفاظتی مزبور است. ساختار الگوریتم و تابع هدف پیشنهادی می‌تواند به سیستم‌های انشعاب‌دار مجهز به منابع تولید پراکنده نیز تعمیم داده شود؛ به طوری که در پژوهش‌های آتی می‌توان اثر تولیدات پراکنده بر هماهنگی رله‌های جریان زیاد را لحاظ کرد و جامعیت مدل پیشنهادی برای انواع شبکه‌های سیستم قدرت را نشان داد. با توجه به اینکه بهره‌بردار در مسئله هماهنگی رله‌های حفاظتی با توابع هدف مختلفی مواجه است، از نسل جدید بهینه‌سازی‌های مبتنی بر چندین تابع هدف (many objective) در ابزار تصمیم‌گیری حفاظت می‌توان بهره گرفت.

- domain ACO algorithm and an hybrid ACO algorithm", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 170, pp. 259-272, 2019.
- [25] V. N. Rajput, and K. S. Pandya, "Coordination of Directional Overcurrent Relays in the Interconnected Power Systems Using Effective Tuning of Harmony Search Algorithm", *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, Vol. 15, pp. 1-15, 2017.
- [26] T. Amraee, "Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 27, No 3, pp. 1415-1422, 2012.
- [27] R. Cheng, Y. Jin, K. Narukawa, and B. Sendhoff, "A multiobjective evolutionary algorithm using Gaussian process-based inverse modeling", *IEEE Trans. Evol. Comput.* Vol. 19, No. 6, pp. 838-856, 2015.
- [28] R. Cheng, Y. Jin, M. Olhofer, and B. Sendhoff, "A reference vector guided evolutionary algorithm for many-objective optimization", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol.20, No. 5, pp. 773-791, 2016.
- [29] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, and H. A. Talebi, "MOPSO/FDMT-based Pareto-optimal solution for coordination of overcurrent relays in interconnected networks and multi-DER microgrids", *IET Gener. Transm. Distrib.* Vol. 12 No. 12, pp. 2871-2886, 2018.
- [30] M. N. Alam, B. Das, and V. Pant, "An interior point method based protection coordination scheme for directional overcurrent relays in meshed networks", *Int. J. Elec. Power Energy Syst.*, Vol. 81, pp. 153-164, 2016.
- [31] IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, in IEEE PC37.112/D2, pp. 1-22, 2017.
- [32] J. M. Gers, and E. J. Holmes, "Protection of electricity distribution networks", 3rd ed. Institution of Engineering and Technology, 2011.
- [33] D. Solati-Alkaran, M. R. Vatani, M. J. Sanjari, G. B. Gharehpetian, and A. H. Yatim "Overcurrent relays coordination in interconnected networks using accurate analytical method and based on determination fault critical", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 30, No. 2, pp. 870-877, 2015.
- [34] R. Mohammadi, H. Askarian-Abyaneh, F. Razavi, and M. Al-Dabbagh, "Optimal relays coordination efficient method in interconnected power systems", *J. of Elect. Eng.*, Vol. 61, No. 2, pp. 75-83, 2010.
- [35] M. Reyes-Sierra, and C. A. Coello Coello, Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art, *International Journal of Computational Intelligence Research*. Vol. 2, No. 3, pp. 287-308, 2006.
- [36] S. R. Singiresu, "Engineering Optimization Theory and Practice", John Wiley & Sons, Fourth Edition, 2009.
- [37] D. B. Leineweber, I. Bauer, H. G. Bock, and J. P. Schlöder, "An efficient multiple shooting based reduced SQP strategy for largescale dynamic process optimization. Part I: theoretical aspects", [13] P. P. Bedeka, S. R. Bhide, and V. S. Kale, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using simplex method", *Electr. Power Component Syst.*, Vol. 38, No. 10, pp. 1175-1193, 2010.
- [14] A. J. Urdaneta, H. Resterbo, S. Marquez, and J. Sanchez, "Coordination of directional overcurrent relays timing using linear programming", *IEEE Trans. on Power Deliv.*, Vol. 11, No. 1, pp. 122-129, 1996.
- [15] A. 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, 1996.
- [16] Saberi-Noghabi, J. Sadeh, and H. Rajabi-Mashhadi, "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 24 No. 4, pp. 1857-1863, 2009.
- [17] H. h. Zeineldin, E. El-Saadany, and M. 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, 2006.
- [18] F. Adelnia, Z. Moravej, and M. Farzinfar, "A new formulation for coordination of directional overcurrent relays in interconnected networks", *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, Vol. 25, No. 1, pp. 120-137, Nov. 2013.
- [19] S. A. Taher, S. M. Nosratabadi, and M. R. Shibani, "Optimal Load Frequency Control Method Using Artificial Bee Colony Algorithm in Deregulated Power Systems in Including SMES", *Intelligence Systems in Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-43, 2011.
- [20] Z. Baniassadi, H. Nezamabadi, and M. Maghfoori Farsangi, "A multi-objective Solution of Gravitational Search Algorithm for Benchmark Functions and Placement of SVC", *Intelligence Systems in Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 59-78, 2011.
- [21] E. Bijami, A. Ebrahimi, and J. Askari, "A New Hybrid Shuffled Frog Leaping Algorithm to Solve Non-convex Economic Load Dispatch Problem", *Intelligence Systems in Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 35-52, 2011.
- [22] F. B. Bottura, W. M. S. Bernardes, M. Oleskovicz, and E. N. Asada, "Setting directional overcurrent protection parameters using hybrid GA optimizer", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 143, pp. 400-408, 2017.
- [23] M. M. Mansour, S. Mekhamer, and N. El-Kharbawe, "A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 22, No. 3, pp. 1400-1410, 2007.
- [24] A. E. L. Rivas, L. A. G. Pareja, and T. Abrão, "Coordination of distance and directional overcurrent relays using an extended continuous

- Applied Soft Computing J., Vol. 79, pp. 1-13, 2019.
- [40] N. Mohammadzadeh, R. Mohammadi-Chabanloo, and M. Ghotbi-Maleki, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering two-level fault current due to the operation of remote side relay", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 175, 2019.
- [41] Z. Moravej, F. Adelnia, and F. Abbasi, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using NSGA-II", *Electric Power Systems Research*, Vol. 119, pp. 228-236, 2015.
- Comput. Chem. Eng. Vol. 27, No. 2, pp. 157-166, 2003.
- [38] H. Liao, W. Wu, and D. Fang, "The reduced space Sequential Quadratic Programming (SQP) method for calculating the worst resonance response of nonlinear systems", *J. of Sound and Vibration*, Vol. 425, pp. 301-323, 2018.
- [39] S. T. P. Srinivas, and K. S. Swarup, "Application of improved invasive weed optimization technique for optimally setting directional overcurrent relays in power systems",

¹ Overcurrent (OC)

² Operation Time (OT)

³ Coordination Time Interval (CTI)

⁴ Circuit Breakers (CB)

⁵ Time Setting Multiplier (TSM)

⁶ Plug Setting Multiplier (PSM)

⁷ Directional Overcurrent (DO)

⁸ Genetic Algorithm (GA)

⁹ Particle Swarm Optimization (PSO)

¹⁰ Objective Function (OF)

¹¹ Overcurrent Relay Coordination (OCRC)

¹² Hybrid Genetic Algorithm (HGA)

¹³ Ant Colony Optimization (ACO)

¹⁴ Harmony Search (HS)

¹⁵ Seeker Optimization Algorithm (SOA)

¹⁶ Sequential Quadratic Programming (SQP)

¹⁷ Multi Objective Particle Swarm Optimization-Sequential Quadratic Programming (MOPSO-SQP)

¹⁸ Current Transformer Ratio (CTR)