Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 3, 2020
Research Paper

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

Samira Sadeghi [1], Navid Rezaei [2], Ali Hesami-Naghshbandy [3], Parham Moradi [4]
[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.

2252-083X/ © 2020 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.119289.1281

مقاله پژوهشی

ارائهٔ یک روش بهینه‌سازی چندهدفهٔ جدید مبتنی بر الگوریتم MOPSO-SQP به‌منظور هماهنگی رله‌های حفاظتی جریان زیاد در سیستم‌های قدرت

سمیرا صادقی [۱]، نوید رضایی [۲]، علی حسامی‌نقشبندی [۳]، پرهام مرادی [٤]

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

٤- 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. مسئلهٔ هماهنگی رله‌های جریان زیاد به‌دلیل تعداد زیاد متغیرها و ماهیت توابع هدف می‌تواند مسئلهٔ پیچیدهٔ بهینه‌سازی معرفی شود که به ارائهٔ 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، ارائهٔ یک مسئلهٔ ریاضی چندهدفه در بهینه‌سازی مسائل حفاظتی ضروری است. در همین راستا و برای پوشش این ضرورت‌ها، مقالهٔ 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 به‌کمک روش پیشنهادی چندهدفهٔ MOPSO-SQP، نقاط تنظیم بهینه استخراج شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها روی چند سیستم قدرت نمونه، پیاده‌سازی و با دقت تحلیل شده‌اند که نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهندهٔ کارایی الگوریتم پیشنهادی در تضمین هماهنگی بهینهٔ رله‌های حفاظتی جریان زیاد در سیستم قدرت‌اند.

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

۱- مقدمه

۱-۱- انگیزهٔ پژوهش

هدف اصلی در حفاظت سیستم‌های قدرت، شناسایی و جداسازی محل وقوع خطا در کمترین زمان ممکن است که رله‌های جریان زیاد (OC[۱]) به‌دلیل سادگی، اجرای آسان و مزایای اقتصادی رایج‌ترین رله‌های استفاده‌شده برای وظیفهٔ مذکورند [۳-۱]. ازجمله راه‌حل‌های مرسوم در سیستم‌های قدرت این است که در کنار رلهٔ اصلی از دست‌کم یک رلهٔ 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 به‌عنوان رلهٔ پشتیبان در شبکه‌های انتقال بالادست استفاده می‌شوند. هدف، برطرف‌کردن خطا در سریع‌ترین زمان ممکن است؛ اما اگر رلهٔ اصلی به هر دلیلی نتواند وظیفهٔ خود را به‌درستی انجام دهد، رلهٔ پشتیبان بلافاصله و با یک وقفهٔ زمانی از پیش تعیین شده با توجه به زمان عملکرد (OT[۲]) رلهٔ اصلی باید عمل کند. درواقع رلهٔ پشتیبان نباید قبل

---

[۱] تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱٤
نام نویسندهٔ مسئول: علی حسامی‌نقشبندی
نشانی نویسندهٔ مسئول: ایران - کردستان - سنندج - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی

از رلهٔ اصلی عمل کند؛ بنابراین، میان زمان عملکرد دو رله باید یک فاصلهٔ زمانی هماهنگی (CTI[۳]) در نظر گرفته شود که زمان تشخیص میان رلهٔ اصلی و پشتیبان باید کمتر از CTI باشد [٤,٥]. به‌طور معمول، OT رلهٔ پشتیبان بزرگ‌تر از مجموع OTهای رلهٔ اصلی و CB[٤] اصلی انتخاب می‌شود که هماهنگی رله‌های OC در مطالعات حفاظت را سبب می‌شود [٦]. رله‌های OC، ساختار ساده‌ای دارند؛ اما در صورت افزایش اندازه و پیچیدگی شبکهٔ قدرت به هم پیوسته، هماهنگی آنها بسیار محاسباتی می‌شود و حجم محاسبات افزایش می‌یابد و این بسیار زمان‌بر خواهد بود [۷].

۱-۲- پیشینهٔ پژوهش

در مسئلهٔ تنظیم رله‌های OC حفاظتی سیستم‌های قدرت پارامترهای اساسی شامل ضریب تنظیم زمانی (TSM[٥]) و ضریب تنظیم جریانی (PSM[٦]) باید محاسبه شوند که محدودهٔ 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 ۲۰۰٪ با گام‌های ۲۵٪ است. با محاسبهٔ این ضرایب، سیستم حفاظتی باید بخش‌های خطادار سیستم قدرت را به‌راحتی قطع کند. گفتنی است در رله‌های دیجیتال جدید امکان تنظیم پارامترها با گام‌های ۰/۰۱ فراهم شده است [۱۰-۸]. رله‌های جریان زیاد جهت‌دار (DOC[۷]) 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 رلهٔ پشتیبان برای یک یا چند رله در پایین‌دست خود عمل می‌کند یا چند رله، نقش رلهٔ پشتیبان را برای یک رلهٔ پایین‌دست 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 روش‌های بهینه‌سازی خطی سیمپلکس و دوگان سیمپلکس برای هماهنگی بهینهٔ 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[۸]) [۳,۱٦] و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO[۹]) [۱۷] ازجمله الگوریتم‌های تکاملی بسیار معروف‌اند که برای مسائل بهینه‌سازی مهندسی برق ازجمله حل مسئلهٔ هماهنگی رله‌های OC استفاده می‌شوند. در بعضی مواقع روش‌های بهینه‌سازی به نبود هماهنگی میان رله‌های اصلی و پشتیبان منجر می‌شوند؛ به‌طوری‌که اگر OT رلهٔ پشتیبان کوچک‌تر از OT رلهٔ اصلی باشد، یعنی رلهٔ پشتیبان زودتر از رلهٔ اصلی عمل کند، ازنظر مسئلهٔ هماهنگی پذیرفتنی نیست. مسئلهٔ مهم دیگری که در بهینه‌سازی باید مدنظر قرار گیرد، ارائهٔ تابع هدف (OF[۱۰]) مناسب در پیداکردن OT بهینه است. در صورتی که OT رله‌های اصلی و پشتیبان خیلی بزرگ باشد، موجب تحمل جریان خطای بیشتری توسط تجهیزات می‌شود که درنتیجه، 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 پیچیدهٔ 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 مسئلهٔ هماهنگی رله‌های جریان زیاد (OCRC[۱۱])، در مقالات زیادی الگوریتم‌های تکاملی مختلفی ازجمله الگوریتم ژنتیک ترکیبی (HGA[۱۲]) [۲۲]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۲۳]، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO[۱۳]) [۲٤]، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS[۱٤]) [۲٥] و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر (SOA[۱٥]) [۲٦] ازنظر دقت و کارایی بررسی و مقایسه شده‌اند.

بنابراین، OCRC یک مسئلهٔ بهینه‌سازی مقید محدب است که با روش‌های کلاسیک [۱۵-۱۳] و روش‌های مبتنی بر هوش تکاملی [۲٦-۲۲] حل می‌شود. در الگوریتم‌هایی با قابلیت بررسی یک تابع هدف، برای اینکه بتوان به‌صورت

هم‌زمان چند تابع هدف را بهینه کرد، باید کلیهٔ توابع هدف را با استفاده از ضرایب جریمه و وزن‌دهی ضرایب جریمه به یک هدف تبدیل کرد؛ سپس مسئلهٔ بهینه‌سازی را حل کرد که در هر تکرار یک مقدار مشخص برای تابع هدف به دست می‌آید [۳]. در الگوریتم‌های چندهدفه، کلیهٔ هدف‌ها به‌صورت جداگانه و به‌طور هم‌زمان عمل بهینه‌سازی را انجام می‌دهند که در صورت وجود دو هدف، یک جبههٔ 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 چندهدفهٔ مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات با استفاده از روش بهینه‌سازی برنامه‌سازی مربعی متوالی (SQP[۱۶]) 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 به‌صورت 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 ازنظر روش حل، الگوریتم پیشنهادی و شاخص‌های حفاظتی به‌صورت کلی مقایسه شده‌اند. با توجه به این جدول، جامعیت و نوآورانه‌بودن ساختار هماهنگی بهینهٔ پیشنهادی استنتاج می‌شود؛ زیرا این مقاله شاخص‌های بیشتری را در یک ساختار چندهدفه در نظر گرفته است.

جدول (۱): طبقه‌بندی و مقایسهٔ روش‌های حل مسئلهٔ OCRC

مرجع	ساختار توابع		روش حل		ارزیابی شاخص‌های حفاظتی				توانایی الگوریتم	
	تک‌هدفه	چندهدفه	کلاسیک	ابتکاری	کاهش ناهماهنگی‌ها	افزایش سلکتیویته	افزایش سرعت	افزایش قابلیت اطمینان	تعیین ضرایب وزنی توابع هدف	تعیین ضرایب منحنی مشخصه
[۲]	*			*	*					
[۳]	*			*	*				*	*
[٤]	*			*	*		*	*		
[٥]	*			*				*		
[۷]	*			*			*			
[۹]	*			*	*		*	*		
[۱۳]	*		*							
[۲٦]	*			*		*	*			
این مقاله		*		*	*	*	*	*		*

بخش‌های اصلی مقاله به این صورت است: در بخش دو، توصیف مدل و فرمولاسیون مسئلهٔ OCRC آورده شده و در بخش سه، الگوریتم چندهدفهٔ MOPSO-SQP[۱۷] پیشنهادی ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف (سیستم‌های آزمون قدرت با مقیاس کوچک و بزرگ) و مقایسه با روش‌های پیشین در بخش چهار به‌تفصیل آمده‌اند و در انتها نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنج بیان شده است.

۲- توصیف مدل و فرمولاسیون مسئلهٔ OCRC

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

۲-۱- تعریف مسئله و قیود

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

$$t_i = \frac{TSM_i \times A}{(I_{Fi}/CTR_i \times PS_i)^B - C} + D = \frac{TSM_i \times A}{(PSM_i)^B - C} + D \quad (۱)$$

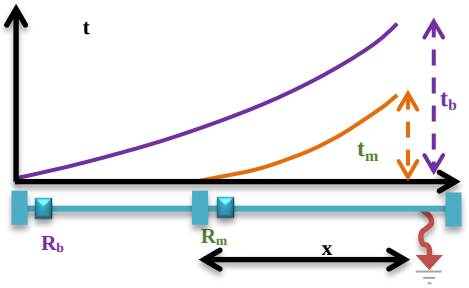
که در آن A، B، C و D ضرایب ثابت رله‌ها با توجه به نوع منحنی مشخصه در استانداردهای مختلف [۳۱] هستند. CTR_i[۱۸] نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان هر رله و I_{Fi} جریان خطا در ناحیهٔ حفاظتی رلهٔ مدنظر است. پارامتر PS_i نشان‌دهندهٔ جریان آستانه‌ای عملکرد رله در سمت اولیه و در $I_{pickup,i} = CTR_i \times PS_i$، پارامتر $I_{pickup,i}$ بیان‌کنندهٔ جریان متناظر تبدیل‌یافته با نسبت تبدیل CTR_i در سمت ثانویهٔ رله است. جریان $I_{pickup,i}$ باید بزرگ‌تر از حداکثر جریان بار ($I_{Lmax,i}$) پیوستهٔ ضرب‌شده در یک ضریب اطمینان (به‌طور معمول ۱/۳) و کوچک‌تر از حداقل جریان خطای شناسایی‌شده ($I_{Fmin,i}$) در ناحیهٔ حفاظتی رله (با توجه به نوع خطای نزدیک یا دور رله) باشد که در رابطهٔ (۲) نمایش داده شده است [۳۲]:

$$1.3I_{Lmax,i} \le I_{pickup,i} \le I_{Fmin,i} \quad (۲)$$

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

$$\Delta t_{mb} = t_{b,j} - t_{m,j} - CTI = \Delta t_j - CTI \ge 0 \quad (۳)$$

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



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

متغیرهای (بردارهای راه‌حلی) به‌دست‌آمده با الگوریتم پیشنهادی، باید در یک محدودهٔ مشخص قرار گیرند که به‌صورت (٤) و (٥) هستند:

$$TSM_{min} \le TSM_i \le TSM_{max} \quad (٤)$$

$$PSM_{min} \le PSM_i \le PSM_{max} \quad (٥)$$

براساس سطح اتصال کوتاه و توپولوژی شبکهٔ مدنظر، حدود بالا و پایین PSM با توجه به رابطهٔ (٦) تعریف می‌شود [۳۳]:

$$PSM_{min,i} = \max(0.5, \min(1.25\frac{I_{Lmax,i}}{CTR_i}, \frac{I_{Fmax,i}}{3CTR_i})) \quad (٦)$$
$$PSM_{max,i} = \min\left(2, \frac{2I_{Fmin,i}}{3CTR_i}\right)$$

پارامترهای $I_{Fmax,i}$ و $I_{Fmin,i}$ به‌ترتیب حداکثر و حداقل جریان خطا در ناحیهٔ حفاظتی رلهٔ i هستند و $I_{Lmax,i}$ حداکثر جریان بار است.

۲-۲- توابع هدف مسئله

تابع هدف اصلی به‌صورت سرعت کلی عملکرد تمام رله‌ها (مجموع زمان عملکرد رله‌ها) در برابر خطای نزدیک تعریف شده است [۳۰] که هدف آن کمینه‌کردن زمان عملکرد هر رله و درواقع افزایش سرعت عملکرد رله در مقابل خطای رخ‌داده در ناحیهٔ حفاظتی خودش است که به‌صورت (۷) بیان می‌شود:

$$OF_1 = \sum_{i=1}^{m} t_i \quad (۷)$$

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

مسئلهٔ OCRC به یک مسئلهٔ ریاضیاتی پیچیده و غیرعملی تبدیل می‌شود [۲۹,۳۰].

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

$$OF_2 = \sum_{i=1}^{m} (t_i)^2 \qquad (۸)$$

اگر تابع هدف OF_2، به‌تنهایی نوشته شود، مشکلاتی را ایجاد خواهد کرد. به دلیل اینکه هدف، کمینه‌سازی OF_2 است، ممکن است جواب بهینهٔ سراسری به دست نیاید و در بهینهٔ 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 درواقع مشخص نیست کدام‌یک 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 بهینهٔ رله‌ها را نیز به دست می‌آورند.

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

$$OF_3 = \sum_{j=1}^{mb} (\Delta t_j - \beta(\Delta t_j - |\Delta t_j|))^2 \qquad (۹)$$

در اینجا، mb تعداد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان است و β ضریب جریمهٔ هر ناهماهنگی محسوب می‌شود؛ زیرا Δt_j همیشه باید مثبت باشد که عملکرد رلهٔ اصلی قبل از رلهٔ پشتیبان را نشان دهد [۳٤]. در مقالات مختلف، ضریب جریمهٔ β را برابر ۱۰۰ در نظر می‌گیرند [۳]. در مرجع [۱٦] عبارت OF_3 به‌عنوان یک عبارت جریمهٔ 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.

$$\begin{aligned} OF_4 &= \mu_1 \sum_{j=1}^{mb} sgn(\Delta t_j - CTI) \\ &+ \mu_2 \frac{\sum_{j=1}^{mb} sgn(|\Delta t_j| - \Delta t_j)}{mb} \\ &+ \mu_3 \frac{\sum_{j=1}^{mb} sgn(\Delta t_j - CTI)}{mb} \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

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 این‌صورت تعریف شده است که برای $\Delta t_j > CTI$ و $\Delta t_j < CTI$ به‌ترتیب برابر صفر و یک باشد. همچنین مشاهده می‌شود Δt_j به‌صورت درجهٔ اول استفاده شده است که از گیرافتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری کند و بهینه‌ترین حالت ممکن را به دست بیاورد. در اینجا توابع علامت به‌صورت (۱۱) و (۱۲) هستند:

$$sgn(|\Delta t_j| - \Delta t_j) = \begin{cases} 1 & \Delta t_j < 0 \\ 0 & \Delta t_j \geq 0 \end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$sgn(\Delta t_j - CTI) = \begin{cases} 1 & \Delta t_j < CTI \\ 0 & \Delta t_j \geq CTI \end{cases} \qquad (۱۲)$$

در هماهنگی حفاظتی رله‌ها باید به این نکته توجه شود که علاوه بر اینکه رلهٔ پشتیبان نباید قبل از رلهٔ اصلی عمل کند، فاصلهٔ 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 به‌صورت 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 به‌گونه‌ای 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 ناحیهٔ تصمیم‌گیری چندمعیاره است که مسائل بهینه‌سازی ریاضیاتی با بیش از یک هدف را بررسی می‌کند؛ به‌طوری‌که کلیهٔ این هدف‌ها هم‌زمان با هم بهینه می‌شوند [۲۹-۲۷]. مراحل انجام الگوریتم چندهدفهٔ MOPSO به‌صورت زیر است [۳۵]:

۱) ایجاد جمعیت اولیه.

۲) جداکردن اعضای نامغلوب جمعیت اولیه و ذخیره‌کردن آنها در یک مخزن یا آرشیو.

۳) جدول‌بندی فضای هدف کشف‌شده.

٤) هر ذره از میان اعضای آرشیو یک رهبر انتخاب می‌کند و حرکت خود را انجام می‌دهد.

۵) بهترین خاطرهٔ شخصی هرکدام از ذرات به‌روز می‌شود.

- 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 نکند، یکی از این دو به‌طور تصادفی بهترین خاطره در نظر گرفته می‌شود.

٦) اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو اضافه می‌شوند.

۷) اعضای مغلوب آرشیو حذف می‌شوند.

۸) اگر تعداد اعضای آرشیو بیشتر از ظرفیت تعیین‌شدهٔ آن باشد، اعضای اضافی حذف می‌شوند و جدول‌بندی فضای هدف تجدید می‌شود.

۹) در صورتی که شرایط خاتمه محقق نشده است، باید به مرحلهٔ 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-Tuker و هم‌زمان با استفاده از ضرایب لاگرانژ برای لحاظ‌کردن قیدها، اقدام به حل مسئلهٔ بهینه‌سازی خواهد کرد [۳٦]. مسائل بهینه‌سازی غیرخطی به‌صورت (۱۳) بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} &Minimize\ f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &Subject\ to: h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, p \\ &\qquad g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \le 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ &\qquad x_i^l \le x_i \le x_i^l, \qquad\qquad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (۱۳)$$

که در روش SQP مسئلهٔ (۱۳)، به‌صورت (۱٤) حل می‌شود [۳۷,۳۸]:

$$\begin{aligned} &Minimize\ Q = \nabla f^T \Delta X + \frac{1}{2}\Delta X^T [\nabla^2 L]\Delta X \\ &Subject\ to: h_k + \nabla h_k^T \Delta X = 0, = 1, 2, \dots, \\ &\qquad g_j^T \Delta X \le 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (۱٤)$$

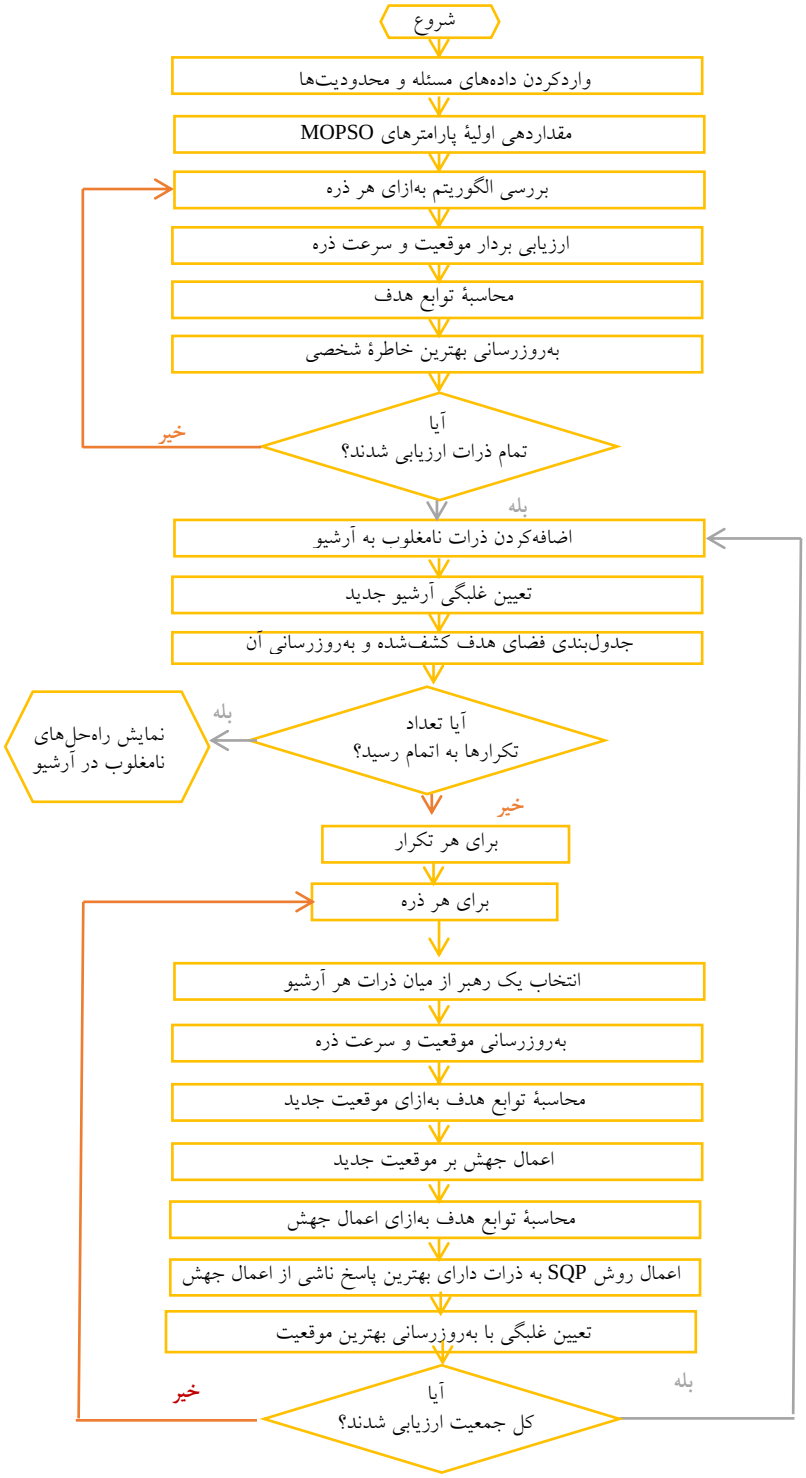
h_k ماتریس هیسیان است و تابع لاگرانژ به‌صورت فرمول (۱۵) خواهد بود:

$$\tilde{L} = f(X) + \sum_{k=1}^{p} \lambda_k h_k(X) + \sum_{j=1}^{m} \lambda_{p+j} g_j(X) \quad (۱۵)$$

در الگوریتم SQP در هر مرحله از تکرار، تقریبی از توابع لاگرانژ و هیسیان با استفاده از روش به‌روزآوری شبه‌نیوتون ساخته می‌شود. این کار برای تولید یک زیرمسئلهٔ درجهٔ دوم (درواقع یک معادله) است که برای انتخاب جهت جستجو، یک پیشنهاد محسوب می‌شود. روش SQP مبتنی بر حدس اولیه است و به‌طور معمول بهینهٔ 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 بهینهٔ 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.



شکل (۲): روندنمای الگوریتم پیشنهادی

متغیرهایی که با الگوریتم پیشنهادی SQP–MOPSO پیدا می‌شوند، به‌صورت $X = [TSM, PSM, Char_{Curve}]$ هستند که برای هر نسل در هر تکرار از الگوریتم، بردار راه‌حل به‌صورت X است. این بردار راه‌حلِ شامل سه نوع متغیر (برای تعداد m رله) به‌صورت زیر است:

$$TSM = [TSM_1, TSM_2, \dots, TSM_m]$$
$$PSM = [PSM_1, PSM_2, \dots, PSM_m$$
$$Char_{Curve} = [Char_{Curve_1}, Char_{Curve_2}, \dots, Char_{Curve_m}]$$

این سه نوع متغیر، به‌دنبال هم و به‌عنوان درایه‌های بردار راه‌حل در الگوریتم قرار می‌گیرند. متغیر $Char_{Curve}$ مشابه انواع استانداردها، 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 ازطریق الگوریتم پیشنهادی به دست 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 بهینهٔ سراسری 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.

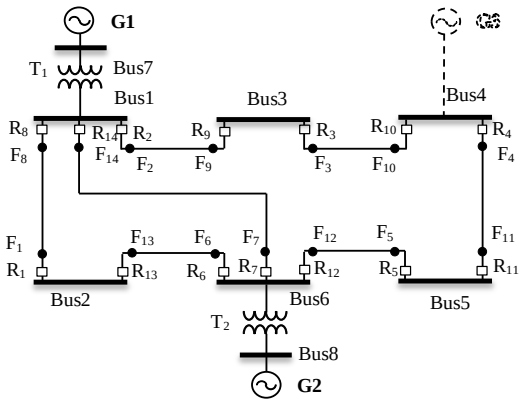
٤- شبیه‌سازی و نتایج

در بیشتر مقالات OCRC ارائه‌شدهٔ پیشین فقط TSM و PSM به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی محاسبه شده‌اند که ازطریق الگوریتم به دست می‌آیند و از ضرایب ثابت یک منحنی مشخصه در تعیین زمان عملکرد کلیهٔ رله‌ها استفاده شده است [۷]؛ اما در این مقاله هر سه نوع متغیر ازطریق الگوریتم به دست 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 مسئلهٔ OCRC بهینه در سیستم‌های قدرت ۸ شینه و ۳۰ شینهٔ IEEE بررسی شده‌اند. در کلیهٔ شبیه‌سازی‌ها، برنامه‌ها با کامپیوتری با مشخصات ریزپردازندهٔ Intel Corei5, 2.64 GHz، 4GB RAM و 750 GB hard disc و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2018a اجرا شده‌اند.

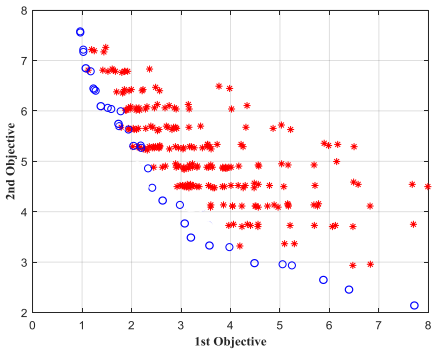
٤-١- سیستم آزمون ۱: سیستم ۸ شینهٔ IEEE

تمام داده‌های سیستم ۸ شینه (شکل ۳) در [٤٠] موجود است. در نتایج شبیه‌سازی این سیستم در مقایسه با نتایج الگوریتم چندهدفهٔ [۲۹]، متغیرهای TSM، PSM در حالت گسسته و OT بررسی شده‌اند و Δt_{mb} به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی این مطالعه با [۲٦,۲۹] 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 مقایسهٔ PSM با مرجع [۲۹]، از I_{Fi}/PS_i استفاده شده است. برای این سیستم، مقادیر پارامترهای منحنی مشخصه نیز به دست آمده‌اند. در جدول (٤) مقادیر متغیرهای پارامترهای A، B و C منحنی مشخصهٔ هر رله نشان داده شده‌اند. مقدار پارامتر D در رابطهٔ (۱) برابر صفر در نظر گرفته شده است.

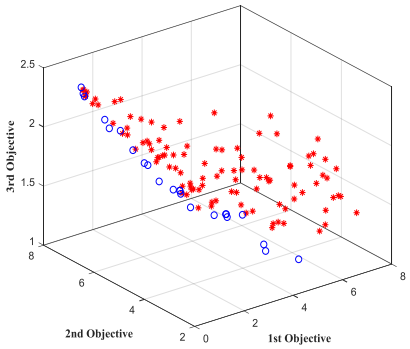


شکل (۳): سیستم ۸ شینهٔ IEEE [۳۹]

با اعمال الگوریتم پیشنهادی MOPSO-SQP به سیستم آزمون ۸ شینهٔ **IEEE**، جبههٔ پارتو بهینهٔ دوبعدی و سه‌بعدی در شبیه‌سازی‌ها به‌دست می‌آید. جبههٔ پارتو بهینهٔ دوبعدی در شکل (٤) نشان داده شده است که در آن مجموع وزنی روابط (۷) و (۸)، تابع هدف اول و رابطهٔ (۱۰)، تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. راه‌حل‌های بهینهٔ نامغلوب، به‌صورت دایره و راه‌حل‌های مغلوب با ستاره مشخص شده‌اند. شکل (٥) نیز جبههٔ پارتو بهینهٔ سه‌بعدی این سیستم را برای تابع هدف ناشی از مجموع وزنی روابط (۷) و (۸) به‌عنوان تابع هدف اول، رابطهٔ (۱۰)، تابع هدف دوم و رابطهٔ (۹)، تابع هدف سوم نشان می‌دهد.



شکل (٤): پارتو بهینهٔ دوبعدی در سیستم آزمون ۱



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

جدول (۲): مقادیر TSM، PSM و OT رله‌های اصلی در سیستم ۱

شماره رله	روش پیشنهادی مرجع [۲۹]			روش پیشنهادی این مقاله		
	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	۰/۲٤٤۷	۰/۱۰	۷۰۰	۰/۰۸۳۹
۳	۰/۲۰	٦۰۰	۰/۲۰۵۲	۰/۲۵	٦۰۰	۰/۱۹۱۳
٤	۰/۱۰	۸۰۰	۰/۰۹۷۹	۰/۱۵	٦۵۰	۰/۲۲۷۹
۵	۰/۰۵	۵۵۰	۰/۰۵۲۰	۰/۲۵	۲۵۰	۰/۰۳۲۸
٦	۰/۱۵	۵۵۰	۰/۱۵٦۱	۰/۱۰	۵۵۰	۰/۰٦٤٤
۷	۰/۱۵	٦۵۰	۰/۱۵۱۸	۰/۲۵	٦۵۰	۰/۰۹۵٦
۸	۰/۱۵	۵۵۰	۰/۱۵٦۱	۰/۱۰	۵۰۰	۰/۰۷۵۳
۹	۰/۰۵	۵٤۰	۰/۰۵۲۲	۰/۱۰	۵۰۰	۰/۰۹۹۳
۱۰	۰/۱۰	۵۵۰	۰/۱۰٤۱	۰/۲۰	۵۵۰	۰/۱۲۳۳
۱۱	۰/۲۰	٦۵۰	۰/۲۰۲۵	۰/۰۵	٦۵۰	۰/۰۵۵۳
۱۲	۰/۳۵	۵۵۰	۰/۳٦٤۳	۰/۱۵	٤۵۰	۰/۲۳۱۹
۱۳	۰/۱۰	٦۰۰	۰/۱۰۲٦	۰/۱۵	٦۰۰	۰/۱٤٤۸
۱٤	۰/۱۰	۸۰۰	۰/۰۹۷۹	۰/۱۰	٦۰۰	۰/۳٤٤۱
مجموع	۲/۰۵	–	۲/۰۹۳۱	۱/۹۵	–	۱/۷۸۳۰

جدول (۳): Δt_{mb} رله‌های اصلی و پشتیبان در سیستم ۱

شماره رله		روش پیشنهادی مرجع [۲۹]	روش پیشنهادی مرجع [۲٦]	روش پیشنهادی این مقاله
اصلی	پشتیبان			
۱	٦	۰/۰۳۸۰	۰/۲۲۵۰	۰/۰۲٤۷
۲	۱	۰/٤٤۹۳	۲/۸۸۰۰	۰/٦۱۵۲
۲	۷	۰/۰۰۲۰	۱/٤٤۰۰	۰/۰۵۰۲
۳	۲	۰/۱۹۱۱	۰/۱٦۱۰	۰/۰۷۷۱
٤	۳	۰/۱٤٦۹	۰/٤۱۱۰	۰/۲۲۱۹
۵	٤	۰/۱۳٤٦	۰/۰۳٦۰	۰/۰۳۳۹
٦	۵	–	–	۰/۰۵۵٤
٦	۱٤	۰/۳٤٤٦	۰/۳۳۷۰	۰/۲۲۰۹
۷	۵	–	–	۰/٤۱۱۵
۷	۱۳	۱/۰۰٦۱	۰/۵٦۵۰	۰/٦٦۷۰
۸	۷	۰/۳۳۳۸	۰/۳٤۵۰	۰/۱۰۹٦
۸	۹	–	–	۰/۲۳۸۵
۹	۱۰	۰/۲۲٦٦	۰/۰۷۵۰	۰/۱۲٤۰
۱۰	۱۱	۰/۱۵٦۸	۰/۲۵۰۰	۰/۰۷۱۳
۱۱	۱۲	۰/۰۳۵۱	۰/۱۸۹۰	۰/۰۱۹۸
۱۲	۱۳	۰/۵۸۱۱	۱/۵۵۰۰	۰/٤۲۲۰
۱۲	۱٤	۰/۰۳٤۹	۰/۱۳٦۰	۰/۰۲۹۵
۱۳	۸	۰/۱٦۳۷	۰/٤۲۰۰	۰/۱٤٦۷
۱٤	۱	۰/۹٤۱۵	۱/۲۲۰۰	۰/۸۸۹۰
۱٤	۹	–	–	۰/۰۵۵٦

جدول (٤): پارامترهای منحنی مشخصهٔ رله‌ها در سیستم ۱

شماره رله	A	B	C
۱	۸۸/۵۷۹٤	۱/۰۲۰٦	۰/٤۵۹۸
۲	۱۵۸/۰٦۷۵	۰/۸۰۰۳	۰/۷۰۲۷
۳	۱٤۵/۷۲۰۱	۰/۸۲۱۰	۰/٤۸۵۰
٤	۹۰/۱۱۰۸	۰/٦۳۲۹	۰/۹۹۸۰
۵	۱۰۷/٤۱۸۸	۱/۲۱۵۰	۰/۷۹۰٦
٦	۱۸۹/۹۲۲۰	۰/۹۰۱٦	۰/۵٦۰۷
۷	۷۵/۱۰۲۵	۰/۸۱٦۰	۰/۹۰۹۱
۸	۱۱۱/۸۲۰۰	۰/۸۰۵۲	۰/۵۵۵۰
۹	۱۹۵/۷۳۲۰	۰/۸۵۰۹	۰/۷٦۳۰
۱۰	۲۰۰/٤۹۸۰	۰/۹۱۷۰	۰/٦۵۵۳
۱۱	۱٦۱/۸۹۰۵	۰/۷۷۰۳	۰/٤۹۰۷
۱۲	۱۹۸/۰۰۱۵	۰/۸۱۰٤	۰/٤۳۹۵
۱۳	۱۷۰/۲۵۸۷	۰/۸۰۹۲	۰/٦۷۹۰
۱٤	۱٤٤/۱۹۱۹	۰/۵۸۷۳	۰/۹۱۱٦

٤-٢- سیستم آزمون ٢: سیستم ٣٠ شینهٔ IEEE

اثربخشی روش پیشنهادی برای سیستم قدرت ٣٠ شینه نیز ارزیابی شده است. داده‌های این سیستم در [٢٩] موجود است. در این سیستم، متغیرهای بهینه‌سازی شامل TSM و PSM در حالت پیوسته و پارامترهای منحنی مشخصه‌اند که TSM و PSM به‌همراه OT و Δt_{mb} به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی با [٧] مقایسه شده‌اند. نتایج مربوط به این سیستم در جدول‌های (٥) تا (٧) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در جدول (٧) مشاهده می‌شود، در [٧] تعداد ١٥ ناهماهنگی وجود دارد که در روش پیشنهادی فقط ٦ 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 مسئلهٔ OCRC در بسیاری از سیستم‌های قدرت اجراشدنی خواهد بود.

جدول (٥): مقادیر OT رله‌های اصلی در سیستم آزمون ٢

شماره رله	روش مرجع [٧]	روش پیشنهادی این مقاله	شماره رله	روش مرجع [٧]	روش پیشنهادی این مقاله
١	٠/٠٠٠٦	٠/٠٠٠٢	٢١	٠/٠٥٩٠	٠/٠١٩٣
٢	٠/٠٥٥٥	٠/٠٠٣٣	٢٢	٠/٠٥٨١	٠/٠٠٠١
٣	٠/٢٢٣٠	٠/٠٢١٧	٢٣	٠/٠٠١٠	٠/٢١٥٧
٤	٠/٨٤١٣	٠/٠٦٠٦	٢٤	٠/٠٢١٠	٠/٠٦٤٩
٥	٠/١١٣٢	٠/٠٠٠٧	٢٥	٠/١٨٣١	٠/٠٠١٧
٦	٠/٢٣٠٠	٠/٣٢١٢	٢٦	٠/٢٧٢٠	٠/٠٢٣٤
٧	٠/١٧٠٠	٠/٠٠٩٣	٢٧	٠/٥٠٣٦	٠/٥٩١١
٨	٠/٢٣٦١	٠/٢٧١٠	٢٨	٠/٠٥٧٧	٠/٠٤٤٦
٩	٠/٠٧٨٠	٠/٣٩٠٨	٢٩	٠/٤٩٨١	٠/٦١٠٠
١٠	٠/٠٨٧٣	٠/٠٥٤٠	٣٠	٠/٠٢٣١	٠/٠٦٣٩
١١	٠/٠١٤٨	٠/٠٠٤٩	٣١	٠/٠١٧٥	٠/٤١٢١
١٢	٠/١٧٠٢	٠/٠١٠٥	٣٢	٠/٠٨٧٦	٠/٠٠٢٢
١٣	٠/٢٢٧٧	٠/١٦٠١	٣٣	٠/٠٧٢٢	٠/٠٤٨٧
١٤	٠/٠٤٧٩	٠/٠٠٨٩	٣٤	٠/٠٥٩٥	٠/٠٨٢٦
١٥	٠/٢٠٩٢	٠/٠٣٥٨	٣٥	٠/٠٥٧٢	٠/٠١٢٩
١٦	٠٤٠٩	٠/٠٢١٩	٣٦	٠/٠١٢٣	٠/٠٠١٢
١٧	٠/٠٠٠٢	٠/١٧١٠	٣٧	٠/٥٩٣٤	٠/٠٣٤٤
١٨	٠/١١٢٣	٠/٠٠١٠	٣٨	٠/٠٥٨٩	٠/٠٠٠٣
١٩	٠/٠١١٩	٠/٠٠٥٦	٣٩	٠/٠٢١٥	٠/٠١٤٠
٢٠	٠/٠٤١٢	٠/١٤٥٨	مجموع	٤/٠١٧٣	٣/٩٣٢٢

جدول (٦): مقادیر TSM و PSM رله‌های اصلی در سیستم آزمون ٢

شماره رله	روش پیشنهادی مرجع [٧]		روش پیشنهادی این مقاله	
	TSM	PSM(A)	TSM	PSM(A)
١	١/٣٦	١٣٢/٥٠٢٥	٠/٣٨	٢١٥/٨١٢٣
٢	١/٢٦	٦١٧/٥٦٥٠	١/٤٢	٥١٤/٠٠٦٢
٣	١/٦٠	١٢٨/٧٩٧٥	١/٢١	١٣٨/٨٩٢٠
٤	٠/٥٧	٨٦/١٩٠٠	١/٠٦	٥٥/٧٨٤١
٥	٠/٥٨	١٣٦/٣٧٠٠	٠/٥٥	١١٩/٢٥٠٠
٦	١/١٣	٧٨/٦٥٠٠	٠/٢٦	٢٩٧/٣٦٥٦
٧	٠/١٩	٢٤٢/١٩٠٠	٠/٩٤	٦٠/٤٨٣٩
٨	٠/٧٢	١٠٦/١٤٥٠	٠/٢٩	٥١٧/٠٦٣٢
٩	٠/٨٨.	١٨٨/٥٠٠٠	٠/٣٨	١٠٦/٠٠٧٤
١٠	١/٦٤	٤٠٦/٦٤٠٠	٠/١٥	٣٥٦/٨٥٠٤
١١	١/٩١	٢٩٠/٣٥٥٠	١/٠٧	١٨٩/٧٥٩٣
١٢	١/٤٠	٧٦/٦٣٥٠	١/١٥	٩٨/٣٦٤١
١٣	١/٣١	١٥٩/٢٥٠٠	١/٤٢	١٤٤/٠٤٩٢
١٤	١/٦١	٢١٤/٦٩٥٠	٠/٦٤	٨٨/٦٠٠٩
١٥	١/٥٩	٧٢/٧٣٥٠	٠/٧٨	١١١/٢٠٥٤
١٦	١/٩٩	٧٨/٣٩٠٠	١/٨٣	٢٠٥/٩٦٢٠
١٧	٠/٩٩	٤٧/٦٤٥٠	١/٢٥	٨٢/٥٦١٩
١٨	٠/٧٦	١٠٦/٧٣٠٠	٠/٨٣	٤٣/١٧٨٥
١٩	٠/٦٩	١٧٨/١٠٠٠	٠/٤٠	٩٩/١٢٠٠
٢٠	٠/٠٩	٢٠٢/٣١٢٥	٠/٤١	١٧٦/٥٣١٧
٢١	٠/١١	٤١١/٧١٠٠	١/٠١	٣٢٨/٩٦٧١
٢٢	٠/١٠	٢٥٧/٥٩٥٠	٠/١٩	١٩٨/٠٦٤٨
٢٣	١/٤٦	١٨/٦٥٥٠	٠/٢٣	٤٥/٦٣٠٩
٢٤	١/٩٧	١٢٩/٢٨٥٠	٠/٦١	١٥٠/٩٧١٠
٢٥	٠/٤٢	١٧٠/٤٦٢٥	٠/١٠	١٣٨/٨١٠٥
٢٦	٠/٨٠	٧٨/٦٥٠٠	٠/٢٢	٨٢/١٦٤٩
٢٧	٠/٦٤	١٢١/٠٩٥٠	٠/١٣	١٦٢/١٧٨٠
٢٨	٠/٨٥	١٥٩/٢١٧٥	١/٠٠	١٠٤/٠٠٥٢
٢٩	٠/٩٩	١١٣/١٠٠٠	٠/٠٨	١٨٦/٢٣٠٧
٣٠	٠/٠٧	٢٠٣/٣٢٠٠	٠/٣٤	١٤٩/٨٢٦١
٣١	٠/٦٨	١٤٥/١٧٧٥	٠/٨٧	١٣٦/٤٥١٢
٣٢	٠/٦٤	٥١/٠٩٠٠	٠/٣٩	٦٨/٢٠٠٣
٣٣	٠/٩٠	١٥٩/٢٥٠٠	١/٢٧	١١٤/٦٥٠٧
٣٤	١/٤٧	١٠٧/٣٤٧٥	٠/٥١	١٧٤/٠٢٠٨
٣٥	١/٣٠	٦٠/٦١٢٥	٠/٤٧	٤٥/٢٦٧٣
٣٦	٢/٠٠	٧٨/٣٩٠٠	٠/٤٥	٦٧/٣٢٠٩
٣٧	١/٨٢	١٣٣/٤١٢٥	٠/٦٨	٨٨/١٦٨٠
٣٨	١/١٨	٨٠/٩٢٥٠	٠/٩٣	١٢٩/٣٩٢٦
٣٩	٠/٢٦	٤٢/٥١٠٠	٠/٥٠	٦٧/٨٣٠٠
مجموع	٣٩/٩٣	–	٢٦/٤٠	–

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

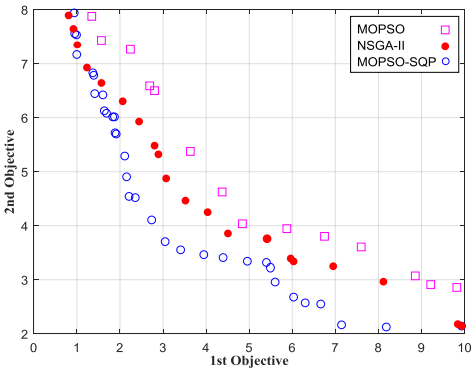
شماره رله		روش	شماره رله		روش	شماره رله		روش	روش
اصلی	پشتیبان	پیشنهادی مرجع [۷]	اصلی	پشتیبان	پیشنهادی مرجع [۷]	اصلی	پشتیبان	پیشنهادی این مقاله	پیشنهادی این مقاله
۲	۵	۰/۰۲۷۷	۱۶	۱۷	۰/۰۹۷۵	۲۹	۱۰	۰/۱۶۸۸	۰/۰۲۳۸
۲	۱۳	۰/۰۷۱۸	۱۶	۱۸	−۰۱۲۰	۲۹	۱۱	۰/۱۶۸۰	۰/۰۰۴۱
۲	۲۳	۰/۱۳۰۷	۱۸	۱۹	۰/۰۹۵۲	۳۰	۸	۰/۳۱۶۷	۰/۱۵۹۹
۳	۴	۰/۰۰۳۵	۱۸	۲۰	−۰/۰۰۲۷	۳۰	۹	۰/۴۵۱۳	۰/۲۹۷۰
۴	۲۹	−۰/۰۲۱۰	۱۹	۳۸	۰/۰۱۶۳	۳۰	۱۱	۰/۴۱۹۳	۰/۳۶۸۰
۵	۶	۰/۱۱۹۳	۲۰	۳۹	۰/۰۰۲۵	۳۱	۸	۰/۷۷۳۷	۰/۲۰۰۹
۶	۷	−۰/۰۲۷۰	۲۱	۱	۰/۰۱۹۱	۳۱	۹	۰/۹۰۷۰	۰/۶۶۵۶
۷	۲۸	−۰/۰۳۶۰	۲۱	۳	۰/۰۰۹۸	۳۱	۱۰	۰/۸۷۶۰	۰/۰۰۲۲
۸	۲۷	۰/۳۳۵۱	۲۲	۱	۰/۰۰۴۶	۳۲	۳۰	−۰/۱۷۸۰	۰/۰۰۰۰
۹	۲۴	−۰/۱۶۵۰	۲۲	۲	۰/۰۰۸۵	۳۳	۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۷۶
۱۰	۱۲	۰/۰۳۰۴	۲۴	۲۲	−۰/۲۱۹۰	۳۳	۲۱	۰/۰۶۹۲	۰/۰۵۸۳
۱۱	۱۴	۰/۲۱۳۱	۲۵	۱۳	۰/۰۰۰۰	۳۳	۲۳	۰/۱۰۰۱	۰/۸۲۹۳
۱۱	۳۲	۰/۲۵۲۵	۲۵	۲۱	۰/۰۲۷۵	۳۴	۳۱	۰/۰۱۵۱	۰/۰۲۸۱
۱۲	۱۴	−۰/۲۶۰۰	۲۵	۲۳	۰/۰۵۸۳	۳۴	۳۲	۰/۰۰۰۰	−۰/۰۱۵۵
۱۲	۳۱	−۰/۲۰۳۰	۲۶	۲۵	−۰/۰۱۷۰	۳۵	۳۳	−۰/۰۱۴۰	−۰/۰۰۸۸
۱۳	۱۵	۰/۰۰۰۰	۲۷	۲۶	۰/۰۵۰۶	۳۶	۳۴	۰/۰۹۷۶	۰/۰۵۴۸
۱۴	۱۶	−۰/۰۲۴۰	۲۸	۹	۰/۰۴۷۲	۳۶	۳۵	۰/۰۹۶۶	۰/۰۵۹۷
۱۴	۳۵	−۰/۰۴۴۰	۲۸	۱۰	۰/۰۰۰۰	۳۷	۱۷	۱/۰۴۵۰	۰/۶۲۳۱
۱۵	۱۶	۰/۰۲۱۳	۲۸	۱۱	۰/۰۰۰۰	۳۷	۳۶	۰/۳۱۲۱	۰/۸۴۶۴
۱۵	۳۴	۰/۰۰۲۳	۲۹	۸	۰/۰۸۱۳	۰/۰۶۸۷	–	–	–

مقایسهٔ سرعت اجرای الگوریتم و مقدار توابع هدف در روش پیشنهادی MOPSO-SQP و دو الگوریتم چندهدفهٔ MOPSO [۲۹] و NSGA-II [۴۱] به‌ازای ضرایب وزنی $a_1 =$ ۰/۳۹، $a_2 =$ ۰/۶۱، $\mu_1 =$ ۰/۳۱، $\mu_2 =$ ۰/۳۶ و $\mu_3 =$ ۰/۳۳ در جدول (۸) نشان داده شده‌اند. نتایج موجود در جدول بیان‌کنندهٔ برتری روش پیشنهادی بر دو روش ذکرشده در بالا است.

جدول (۸): مقایسهٔ میان الگوریتم‌های چندهدفه

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

همچنین، مقایسهٔ عملکرد روش پیشنهادی MOPSO-SQP با دو روش MOPSO و NSGA-II ازنظر جبههٔ پارتو در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مطلوبیت پاسخ‌های استخراج‌شده با روش MOPSO-SQP به‌وضوح دیده می‌شود.



شکل (٦): مقایسهٔ جبههٔ پارتو سه الگوریتم MOPSO، NSGA-II و MOPSO-SQP

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای حل مسئلهٔ هماهنگی بهینهٔ رله‌های جریان زیاد در شبکه‌های به هم پیوستهٔ قدرت، یک الگوریتم چندهدفهٔ مبتنی بر MOPSO-SQP پیشنهاد شده است که کارایی آن روی سیستم‌های قدرت مختلف بررسی شد. این الگوریتم پیشنهادی به‌همراه 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 به‌گونه‌ای 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 به‌خوبی نشان‌دهندهٔ کارآیی 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؛ به‌طوری‌که 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 مسئلهٔ هماهنگی رله‌های حفاظتی با توابع هدف مختلفی مواجه است، از نسل جدید بهینه‌سازی‌های مبتی بر چندین تابع هدف (many objective) در ابزار تصمیم‌گیری حفاظت می‌توان بهره گرفت.

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. Enríqueza, 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 combinedovercurrent 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.

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. Schloder, "*An efficient multiple shooting based reduced SQP strategy for largescale dynamic process optimization. Part 1: 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*

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*", 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.

[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)