



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 2, 2022
Research Paper

PESA II Algorithm-Based Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in microgrid

Parviz Omid Bouroujeni¹, Saeed Abazari², Seyed Mohammad Madani³

¹ Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³ Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract:

This paper deals with the optimal set of directional overcurrent relays using intelligent methods when the problem has multi-objective functions with different constraints. Due to the linear and nonlinear constraints in the coordination of the directional overcurrent relays, the method used is based on Pareto Envelope-based Selection Algorithm to obtain optimal values of plug setting, time multiplier setting, and relay characteristic curve by considering all governing constraints setting parameters of the network primary and backup relays. In this study, there is a simultaneous time reduction between the performance of the main and backup relays. Besides, in this method, while solving a multi-objective function without the need for weight factors, a penalty function is used to check the correct coordination of the primary and backup relays. The proposed method is implemented in two different standard networks, i.e. 3-bus and modified IEEE 14-bus networks. The results show the efficiency of the method used and the optimality of the values compared to other algorithms.

Keywords: Optimization, Multi-objective function, Directional overcurrent relays, Intelligent methods, Relay characteristic



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.2021.126479.1440>



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 2, 2022
Research Paper

PESA II Algorithm-Based Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in microgrid

Parviz Omid Bouroujeni¹, Saeed Abazari², Seyed Mohammad Madani³

¹ Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³ Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract:

This paper deals with the optimal set of directional overcurrent relays using intelligent methods when the problem has multi-objective functions with different constraints. Due to the linear and nonlinear constraints in the coordination of the directional overcurrent relays, the method used is based on Pareto Envelope-based Selection Algorithm to obtain optimal values of plug setting, time multiplier setting, and relay characteristic curve by considering all governing constraints setting parameters of the network primary and backup relays. In this study, there is a simultaneous time reduction between the performance of the main and backup relays. Besides, in this method, while solving a multi-objective function without the need for weight factors, a penalty function is used to check the correct coordination of the primary and backup relays. The proposed method is implemented in two different standard networks, i.e. 3-bus and modified IEEE 14-bus networks. The results show the efficiency of the method used and the optimality of the values compared to other algorithms.

Keywords: Optimization, Multi-objective function, Directional overcurrent relays, Intelligent methods, Relay characteristic



2252-083X/ © 2022 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.2021.126479.1440>

مقاله پژوهشی

هماهنگی بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهتی در ریزشبه‌ها با استفاده از الگوریتم PESA II

پرویز امیدی بروجنی^۱، سعید ابازری^{۲*}، سید محمد مدنی^۳

۱- دانشجوی دکتری برق، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران

parvizomidi@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهرکرد - شهرکرد- ایران

abazari@eng.sku.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه اصفهان - اصفهان- ایران

m.madani@eng.ui.ac.ir

چکیده: در این مقاله به تنظیم بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهتی با استفاده از روش‌های هوشمند پرداخته شده است؛ البته هنگامی که مسئله دارای چندین تابع هدف با قیود مختلف است. با توجه به قیود خطی و غیرخطی در هماهنگ‌کردن رله‌های اضافه‌جریان جهتی، روش به‌کاررفته مبتنی بر الگوریتم انتخاب براساس شکل‌دهی پارتو و با هدف به دست آوردن مقادیر بهینه تنظیم ضریب زمان، تنظیم پیک جریان و نوع منحنی مشخصه رله است. در این مطالعه، به‌طور هم‌زمان کاهش زمانی بین عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان صورت می‌پذیرد. همچنین، علاوه بر حل یک تابع چندهدفه، بدون نیاز به فاکتورهای وزنی از یک تابع جریمه نیز برای بررسی هماهنگی صحیح رله‌های اصلی و پشتیبان استفاده شده است. روش پیشنهادی روی دو شبکه استاندارد مختلف اجرا شده که شامل شبکه ۳ باسه و شبکه اصلاح‌شده ۱۴ باسه *IEEE* است. نتایج به‌دست‌آمده کارایی روش به‌کاررفته و بهینه‌بودن مقادیر را نسبت به سایر الگوریتم‌های به‌کاررفته نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تابع چندهدفه، رله‌های اضافه‌جریان جهتی، روش‌های هوشمند، مشخصه رله

۱- مقدمه

اضافه‌جریان، یک نیاز ضروری در بهره‌برداری و طراحی سیستم توزیع به‌شمار می‌رود. ورود تولیدات پراکنده به سیستم قدرت، به‌ویژه در سطح توزیع، به‌طور چشمگیری باعث تغییر مشخصات جریان‌های خطا در مقایسه با سیستم‌های قبلی شده است. هدف اصلی در حفاظت سیستم‌های قدرت، شناسایی و جداسازی محل وقوع خطا در کمترین زمان ممکن است که رله‌های جریان زیاد (OC^1) به دلیل سادگی، اجرای آسان و مزایای اقتصادی، رایج‌ترین رله‌های استفاده‌شده برای وظیفه مذکورند [۱]. این امر باعث دگرگونی طرح‌های حفاظتی و الگوهای هماهنگی رله‌های اضافه‌جریان شده است. در این شبکه‌ها تجهیزات حفاظتی معمول، رله‌های جریان زیاد زمان معکوس‌اند که مقدار و گاهی جهت جریان خطا را حس می‌کنند. رله‌های پشتیبان برای تضمین امنیت شبکه و جلوگیری از آسیب‌رسیدن به تجهیزات استفاده می‌شوند [۲]. عمل نکردن رله‌های اصلی

رله‌های اضافه‌جریان، یکی از مهم‌ترین تجهیزات حفاظتی به‌شمار می‌آیند. رله‌های اضافه‌جریان به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم توزیع و حداقل‌سازی قطع بار در شبکه در مواقع غیرعادی و وقوع خطا، لازم است با یکدیگر هماهنگ شوند. این هماهنگی با هدف رسیدن کمترین آسیب و استرس به تجهیزات دچار خطا می‌شود و باید تا حد امکان بهینه شود؛ از این‌رو، هماهنگی رله‌های

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲

نام نویسنده مسئول: سعید ابازری

نشانی نویسنده مسئول: ایران- شهرکرد- دانشگاه شهرکرد - دانشکده مهندسی برق

رله‌های اضافه‌جریان جهتی از روش $PESA II^2$ برای هماهنگ‌کردن زمان عملکرد رله‌های اصلی و رله‌های پشتیبان به‌طور جداگانه استفاده شده است؛ بنابراین، در بخش دوم درباره الگوریتم $PESA II$ توضیح داده شده است. در بخش سوم، تعدادی از روش‌های هماهنگی رله‌های اضافه‌جریان جهتی، بررسی و نواقص آن توضیح داده شده‌اند. در بخش چهارم از الگوریتم $PESA II$ به همراه تابع هدف استفاده شده و در بخش پنجم، کارایی این روش در دو شبکه نمونه بررسی و تحلیل شده است.

۲- الگوریتم $PESA II$

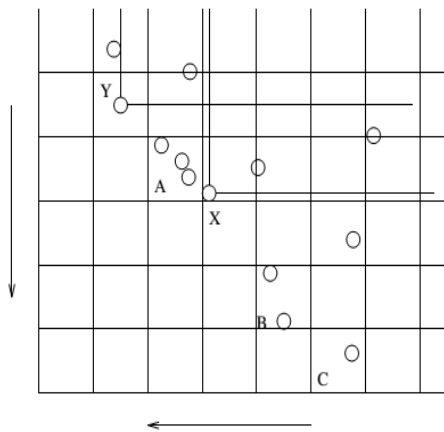
امروزه تعداد زیادی از تحقیقات براساس بهینه‌سازی چندهدفه - تکاملی انجام شده است [۲۷]. به طوری که بیشتر تکنیک‌های بهینه‌سازی براساس بهینه‌سازی پارتو روی مسئله‌های چندهدفه اعمال می‌شود. برخلاف روش‌های مرسوم، در روش‌های تکاملی چندهدفه این امکان وجود دارد که بیشتر از یک عنصر در مرحله اول انتخاب شود. روش استفاده شده در این تحقیق، الگوریتم انتخاب براساس شکل‌دهی پارتو ($PESA II$) است. در این الگوریتم، انتخاب به‌جای افراد که در $PESA$ انجام می‌شود، براساس انتخاب یک ناحیه صورت می‌گیرد [۲۸]؛ بنابراین، ابتدا یک ناحیه، انتخاب و از این ناحیه یک عنصر به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. این عمل باعث می‌شود روش مذکور نسبت به روش انتخاب اعضا، به‌تنهایی در رسیدن به جواب نهایی با اطمینان بیشتری عمل کند.

مراحل انجام الگوریتم $PESA II$ به‌صورت زیر است:

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آنها و ایجاد یک بایگانی خالی؛
- ۲- انتقال اعضای نامغلوب جمعیت به بایگانی و به‌روزرسانی تقسیم‌بندی‌ها؛
- ۳- حذف اعضای اضافی با توجه به تقسیم‌بندی‌ها و موقعیت‌های پاسخ؛
- ۴- بررسی شرایط خاتمه و ادامه‌دادن در صورت نیاز؛
- ۵- انتخاب والدین از بایگانی؛
- ۶- ایجاد جمعیت فرزندان با استفاده از جهش و تقاطع؛

در شرایط وقوع خطا، ضرورت هماهنگی آن را با رله‌های پشتیبان ایجاد می‌کند. هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان شامل انتخاب مناسب تنظیمات آنها است؛ به طوری که اصول اولیه حفاظتی، یعنی گزینش‌پذیری، قابلیت اطمینان و سرعت عملکرد تأمین شوند [۳]. مسئله هماهنگی رله‌های حفاظتی، یکی از مسائل بسیار مهم در حوزه حفاظت سیستم‌های قدرت است؛ به همین سبب، مدت‌ها است بحث حداقل‌کردن زمان عملکرد طرح حفاظتی مطرح شده است و مقالات متعددی در این راستا ارائه شده‌اند. در شبکه‌های حلقوی به‌هم‌پیوسته و بزرگ، هماهنگ‌کردن رله‌های اضافه‌جریان کار بسیار پیچیده‌ای است که معمولاً به دلیل غیرخطی بودن مشخصه رله‌ها و وجود قیود بسیار زیاد در مسئله بهینه‌سازی، نمی‌توان از روش‌های بهینه‌سازی معمولی استفاده کرد [۴،۵]. از جمله روش‌های استفاده‌شده برای بهینه‌سازی و هماهنگی رله‌های اضافه‌جریان مراجع [۶،۷] هستند که از تکنیک‌های خطی‌سازی مانند $SIMPLEX$ استفاده کرده‌اند. از تکنیک‌های برنامه‌ریزی غیرخطی ترکیبی مانند ($MINLP^3$) در مرجع [۸] و [۹] از روش برنامه‌ریزی خطی برای هماهنگ‌کردن رله‌ها، در مراجع [۱۰-۱۲] برای بهینه‌سازی هماهنگی رله‌ها از روش تکامل دیفرانسیل (DE^3)، در مرجع [۱۳] از روش برنامه‌ریزی خطی ترکیبی ($MILP^4$) و در مرجع [۱۴] از روش ژنتیک برای هماهنگی رله‌ها استفاده شده است. برای شبیه‌سازی هماهنگ‌کردن رله‌ها در مراجع [۱۵،۱۶] از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^5)، مرجع [۱۷] از روش الگوریتم کرم شبتاب (FA^6) و در مراجع [۱۸،۱۹] برای هماهنگ‌کردن رله‌های اضافه‌جریان شبکه از روش الگوریتم گرائش^۷ استفاده شده است. در مرجع [۲۰] از روش کلونی مورچه^۸ برای بهینه‌سازی رله‌های اضافه‌جریان استفاده شده است. همچنین، بعضی مراجع [۲۱] روش برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای (ILP^9) را برای هماهنگ‌کردن رله‌های شبکه به کار برده‌اند. در مراجع [۲۲-۲۶] از روش‌های ترکیبی برنامه‌ریزی خطی یا غیرخطی برای بهینه‌سازی بهتر هماهنگی رله‌ها استفاده شده است.

در این مقاله، به‌منظور بهینه‌کردن توابع چندهدفه برای به دست آوردن PS^{10} ، TMS^{11} و نیز منحنی مشخصه

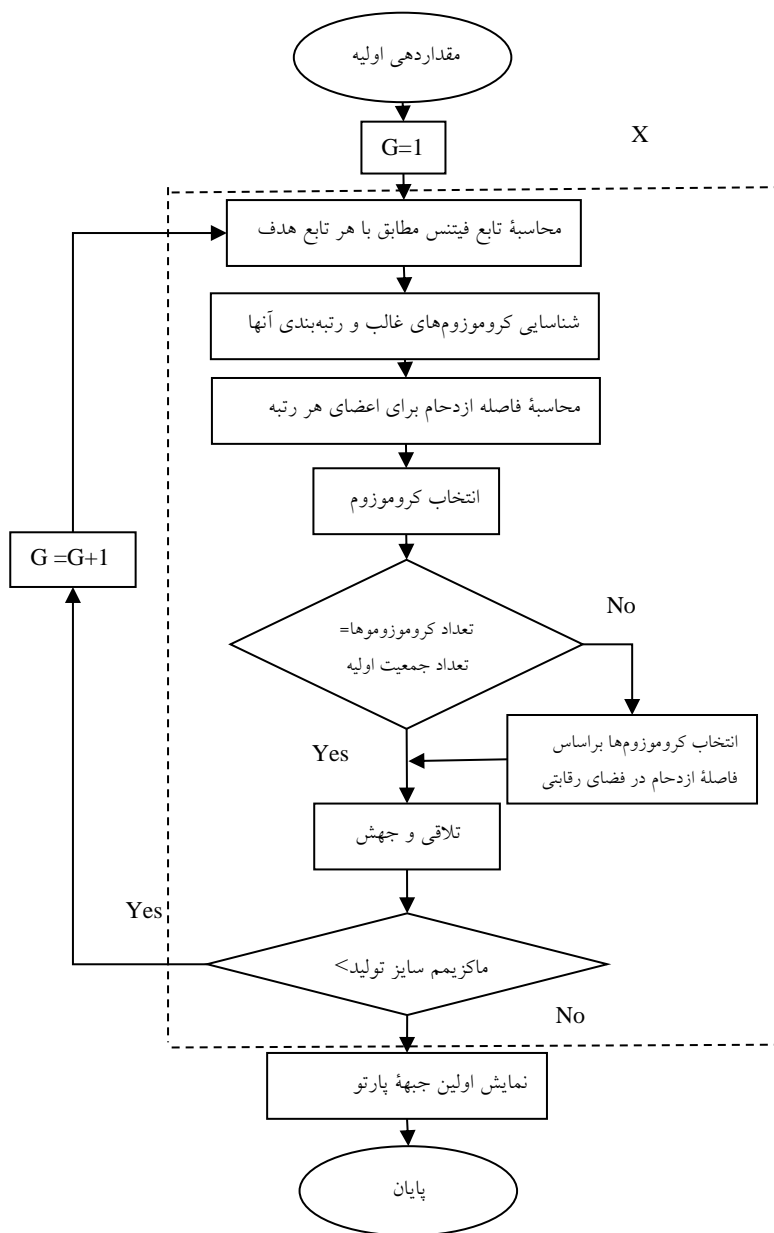


شکل (۱): ناحیه انتخابی و اعضای هر ناحیه [۲۸]

۷- ارزیابی جمعیت جدید (فرزندان).

شکل (۱) اعضای هر خانه و ناحیه‌ای را نمایش می‌دهد که اعضا در آن قرار دارد.

در شکل (۲) فلوجارت روش *PESA II* نشان داده شده است



شکل (۲): فلوجارت *PESA II*

۳- ساختار هماهنگ‌کردن رله‌های جهتی

هدف اصلی هماهنگ‌کردن رله‌های اضافه‌جریان جهتی، به دست آوردن TMS و PS برای هر رله است؛ بنابراین، لازم است تابع هدف $OF^{[۳]}$ در نظر گرفته شده برای هماهنگ‌کردن رله‌ها مینیمم شود. تابع هدف معمولاً به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود:

$$\min OF = \sum_{i=1}^m w_i \cdot t_i \quad (1)$$

در رابطه (۱)، t_i عبارت است از زمان عملکرد رله i برای خط l در w_i عبارت است از وزن در نظر گرفته شده برای زمان عملکرد R_i و m برابر است با تعداد رله‌های شبکه. تابع (۱) دارای دو مشکل اساسی است؛ یکی تأثیرناپذیری در اضافه‌کردن زمان هماهنگی رله‌ها ($CTI^{[۴]}$) در شبکه‌های بزرگ و دیگری ناهماهنگی رله‌ها است. برای غلبه‌کردن بر این دو مشکل، رابطه (۲) به عنوان OF برای هماهنگ‌کردن رله‌ها در نظر گرفته شده است [۲۹]:

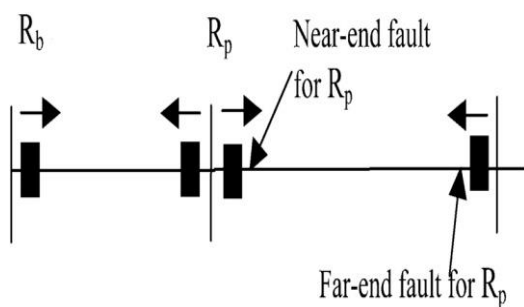
$$OF = \alpha_1 \sum_{i=1}^m t_i^2 + \alpha_2 \sum_{k=1}^n (\Delta t_{mbk} - \beta_2 (\Delta t_{mbk} - |\Delta t_{mbk}|))^2 \quad (2)$$

$$\Delta t_{mbk} = t_{bk} - t_{mk} - CTI$$

در رابطه (۲)، t_{bk} و t_{mk} به ترتیب برابر است با زمان عملکرد رله اصلی و رله پشتیبان، m و n به ترتیب برابر است با تعداد رله‌های اصلی و پشتیبان و k به هر یک از رله‌های اصلی و پشتیبان اشاره می‌کند. α_1 و α_2 برای کنترل وزنی تابع OF به کار می‌رود. برای ناهماهنگی از β_2 استفاده می‌شود. با توجه به تابع (۲)، اگر Δt منفی باشد، برای مقادیر مثبت β_2 مقدار تابع OF بزرگ‌تر از حالتی است که Δt منفی است. در [۳۰] از رابطه (۳) برای بهینه‌کردن تابع OF استفاده شده است.

$$OF = \alpha_1 \sum_{i=1}^m t_i^2 + \alpha_2 \sum_{k=1}^n (|\Delta t_{mbk} - \beta_2 (\Delta t_{mbk} - |\Delta t_{mbk}|)| \cdot t_{mk}^2 + (\Delta t_{mbk} + |\Delta t_{mbk}|) \cdot t_{bk}^2) \quad (3)$$

در نظر بگیرید Δt_{mbk} مثبت است، بنابراین، سومین بخش رابطه (۳) دارای ارزش می‌شود و این ارزش به دلیل ضریب t_{bk}^2 است؛ بنابراین، برنامه تلاش می‌کند تا زمان بهینه را بیشتر کاهش دهد تا از افزایش نامطلوب زمان بهینه رله اصلی جلوگیری کند. با توجه به اینکه در بیشتر رله‌های هوشمند، جریان PS ثابت در نظر گرفته می‌شود و مقدار بهینه زمان عملکرد به صورت یک تابع خطی از TMS در نظر گرفته می‌شود، نیاز به روشی است که از TMS و PS به صورت هم‌زمان به عنوان متغیر بهینه‌سازی استفاده شود و در نتیجه، باعث انتخاب بهترین مشخصه از رله‌های اضافه‌جریان برای هماهنگی بهتر شود. در بیشتر روش‌های موجود، مسئله هماهنگی رله‌ها براساس یک نقطه بحرانی (خطا در ابتدا یا انتهای خط) حل می‌شود؛ بنابراین، لازم است از روشی استفاده شود که خطا را در ابتدا و انتهای خط در نظر بگیرد. شکل (۳) نشان‌دهنده محل خطا در ابتدا و انتهای باس است.



شکل (۳): محل خطا در ابتدا و انتهای باس

۴- به‌کارگیری روش PESA II در حل

مسئله هماهنگ‌کردن رله‌ها

ساختار اصلی روش حل مسئله به روش PESA II در شکل (۴) نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۴)، کروموزوم‌ها به سه بخش تقسیم شده‌اند که شامل TMS

در این حالت، اگر رابطه (۵) برقرار نباشد، از رابطه (۹) استفاده می‌شود:

$$viol(i) = viol(i) + constant \quad (9)$$

عبارت $constant$ یک مقدار عددی مثبت ثابت فرضی است که برای جریمه در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقدار جریمه، مقادیر نقض‌کننده رابطه (۵) کنار گذاشته می‌شوند. در ادامه، با توجه به در نظر گرفتن خطا در ابتدا و انتهای باس برای بهینه‌کردن زمان عملکرد رله‌ها از توابع (۱۰) و (۱۱) و با در نظر گرفتن شرایط رابطه (۶) استفاده می‌شود؛ هر دو تابع به ترتیب مشخص‌کننده مینیمم زمان عملکرد رله‌های اصلی و رله‌های پشتیبان اند [۳۲]:

$$OF_1 = \min(\sum_{i=1}^{Np} t_i) \quad (10)$$

$$OF_2 = \min(\sum_{j=1}^{Nb} t_j) \quad (11)$$

که در این روابط، t_i و t_j به ترتیب زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان و Np و Nb به ترتیب تعداد رله‌های اصلی و پشتیبان اند. به علت اینکه مقادیر خطا در ابتدا و انتهای هر باس مدنظر است، لازم است مقادیر زیر مطابق با رابطه (۱۲) چک شوند [۳۲].

$$\begin{aligned} t_b(f_1) - t_p(f_1) &\geq CTI \\ t_b(f_2) - t_p(f_2) &\geq CTI \end{aligned} \quad (12)$$

مقادیر $t_b(f_i)$ و $t_p(f_i)$ به ترتیب زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در ابتدا و انتهای باس اند. CTI نیز مقدار ثابتی است که برای هماهنگ‌کردن زمان عملکرد بین رله‌های اصلی و پشتیبان در نظر گرفته می‌شود و مقدار آن بین ۰/۲ تا ۰/۵ است. برای هر رله حفاظتی زمان عملکرد t از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$t = \frac{\alpha \times TMS}{(I_f / I_p)^\beta - 1} \quad (13)$$

جریان پیک و $R^{1\circ}$ است. این نوع تقسیم‌بندی باعث می‌شود به راحتی کروموزوم‌ها مدیریت شوند [۱،۲].

TMS1.....TMSn			Ip1.....Ipn			Rc1.....Rcn		

شکل (۴): ساختار تقسیم‌بندی کروموزوم‌ها

تابع بهینه‌سازی به طور کلی به صورت رابطه (۴) در نظر گرفته می‌شود:

$$OF = \min(\sum_{i=1}^{Nr} t_i) \quad (4)$$

و جهت هر رله اصلی i و پشتیبان j مطابق با رابطه (۵) داریم:

$$(t_j - t_i) \geq CTI \quad (5)$$

در رابطه (۴)، Nr تعداد رله‌ها و t_i زمان عملکرد رله i ام است. در زمان پردازش مراحل بهینه‌سازی، ممکن است محدودیت در نظر گرفته شده در رابطه (۵) نقض شود؛ در این حالت، در این مقاله، مطابق با رابطه (۶) یک تابع جریمه برای در نظر گرفتن جریمه حالات نقض شده در نظر گرفته شده است.

$$OF_{penalized} = OF + PF \quad (6)$$

$OF_{penalized}$ مقدار تابع با در نظر گرفتن جریمه، OF تابع هدف مشخص شده در رابطه (۴) بدون در نظر گرفتن جریمه و PF تابع جریمه است. مقدار PF با رابطه (۷) مشخص می‌شود [۳۱]:

$$PF = \sum_{i=1}^{Nr} Viol(i) \quad (7)$$

برای تعیین مقادیر $Viol$ ابتدا مطابق با رابطه (۸):

$$viol[1:NR] = 0 \quad (8)$$

$$I_p^{\min} \leq I_p \leq I_p^{\max} \quad (۱۷)$$

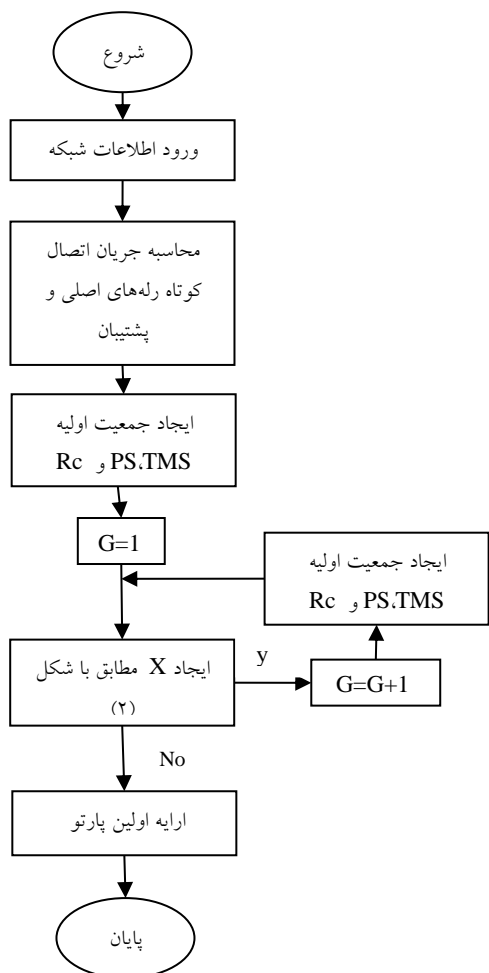
که در این رابطه I_p^{\min} و I_p^{\max} مقادیر مینیمم و ماکزیمم جریان تنظیمی رله‌اند.

بنابراین، مقدار PS مطابق با رابطه (۱۸) محدود می‌شود:

$$PS^{\min} \leq PS \leq PS^{\max} \quad (۱۸)$$

که مقدار آن بین دو حد مینیمم و ماکزیمم قرار می‌گیرد. به دلیل اینکه اطمینان حاصل شود رله در حالت عملکرد عادی عمل نمی‌کند، حداقل مقداری که جهت PS در نظر گرفته می‌شود، به اندازه‌ای است که رله تا ۱/۲۵ جریان بار عمل نکند [۳۳].

در شکل (۵) فلوچارت روش حل مسئله نشان داده شده است.



شکل (۵): فلوچارت روش حل مسئله

t عبارت است از زمان عملکرد رله، I_f عبارت است از جریان خطا عبوری از رله، I_p^{16} برابر است با جریان تنظیمی روی رله که بعد از آن، رله شروع به عملکرد می‌کند؛ α و β در جدول (۱) آمده‌اند:

جدول (۱): ضرایب به‌کاررفته در رابطه (۸)

Number of characteristic c (Rc)	Type of characteristic c	α	β	standard
1	Standard Inverse	14	0.02	IEC
2	Very Inverse	13.5	1	IEC
3	Extremely Inverse	80	2	IEC

همچنین، لازم است قیود به‌کاربرنده در مسئله هماهنگ‌کردن رله‌ها بهینه شوند. این قیود عبارت‌اند از:

۳-۱- مقدار TMS

این مقدار، زمان عملکرد رله‌ها را قبل از عملکرد آنها و وقتی جریان خطا برابر با مقدار تنظیم‌شده یا بزرگ‌تر از آن است، تنظیم می‌کند و با رابطه (۱۴) تعیین می‌شود:

$$TMS_{\min} \leq TMS \leq TMS_{\max} \quad (۱۴)$$

۳-۲- زمان عملکرد رله‌های اولیه:

برای اطمینان از اینکه زمان عملکرد رله‌های اولیه به‌درستی تنظیم‌شده است و خطا در زمان مناسب قطع می‌شود، از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود:

$$t_p^{\min} \leq t_p \leq t_p^{\max} \quad (۱۵)$$

مقدار PS مطابق با رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

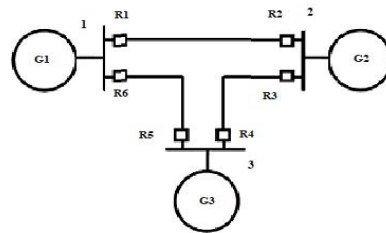
$$PS = \frac{I_p}{CTR} \quad (۱۶)$$

$CTR = \text{Current Transformer Ratio}$

همان‌طور که در بخش چهارم توضیح داده شد I_p جریانی است که از آن جریان به بعد، عملکرد رله مطابق با منحنی زمان - جریان است و لازم است مقدار آن با رابطه (۱۷) محدود شود:

۵- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

برای شبیه‌سازی روش پیشنهادشده از دو شبکه، یکی با ۳ باس مطابق با شکل (۶) و دیگری یک شبکه ۱۴ باسه اصلاح‌شده *IEEE* مطابق شکل (۷) استفاده شده است.



شکل (۶): شکل تک‌خطی شبکه با ۳ باس

شبکه دومی که با روش ارائه‌شده تحلیل شده، یک شبکه ۱۴ باس اصلاح‌شده *IEEE* مطابق با شکل (۷) است که در قسمت رنگی شده (قرمز رنگ) هماهنگی رله‌ها انجام می‌گیرد. این شبکه به منابع تولید پراکنده (DG'') با ظرفیت هر کدام ۵ مگاوات و راکتانس ۱۰٪ مجهز شده است. شبکه مطالعه‌شده از طریق دو ترانس بین باس‌های ۵، ۶، ۴ و ۷ به ترتیب به شبکه اصلی متصل است که از این طریق می‌تواند از شبکه اصلی، جدا و به صورت جزیره‌ای به کار خود ادامه دهد. برای حفاظت شبکه از ۱۶ عدد رله جریان‌یابی جهت‌ی و با منحنی استاندارد زمان - جریان معکوس مطابق با استاندارد *IEEE* استفاده شده که مشخصات این شبکه نیز مطابق با مرجع [۳۵] در محاسبات در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): جریان خطای عبوری از رله‌های اضافه‌جریان

اصلی و پشتیبان [۳۲]

رله اولیه	جریان خطا (A)		رله پشتیبان	جریان خطا (A)	
	خطا در ابتدا	خطا در انتها		خطا در ابتدا	خطا در انتها
۱	۵۰۹۶	۲۳۳۶	۵	۱۱۲۶	۴۰۱
۲	۳۰۷۵	۱۳۷۲	۴	۱۹۷۱	۴۹۰
۳	۳۲۵۹	۱۸۱۵	۱	۲۱۵۳	۹۵۶
۴	۳۹۲۱	۲۱۴۲	۶	۱۷۲۰	۵۳۳
۵	۳۸۰۸	۱۳۷۹	۳	۱۶۱۴	۲۵۴
۶	۵۴۵۴	۱۹۲۰	۲	۱۱۱۱	۷۸۳

جدول (۳): مقایسه *PS* و *TMS* راه‌حل پیشنهادی با روش

مرجع [۳۲]

Rela y no.	NSGA II			PESA II		
	PS	TMS (sec)	R _c	PS	TMS(sec)	R _c
۱	۰،۹۴	۰،۰۵۸	۱	۰،۹۵	۰،۰۵۶	۱
۲	۰،۸۲	۰،۰۲۳	۳	۰،۸۳	۰،۰۲۴	۳
۳	۰،۸۳	۰،۰۰۵	۳	۰،۸۰۲	۰،۰۰۱	۳
۴	۰،۶۶	۰،۰۰۹	۲	۰،۶۵	۰،۰۸۸۵	۳
۵	۱،۱۸	۰،۰۰۲	۲	۱،۱۵۴	۰،۰۲۴۲	۲
۶	۰،۹۸	۰،۰۰۵	۱	۰،۹۷۰	۰،۰۰۵۳	۱

شبکه (۶) دارای ۳ باس، ۳ خط، ۳ ژنراتور و ۶ عدد رله جهت‌ی است. نسبت تبدیل ترانس جریان ۵۰۰:۱، مقادیر *CTI* در نظر گرفته شده برای رله‌های اصلی و پشتیبان ۰/۲ و مقدار *TMS* بین ۰/۰۲۵ تا ۱/۲ در نظر گرفته شده است. اطلاعات این شبکه در مرجع [۳۴] بیان شده است. در جدول (۲)، جریان عبوری از رله‌ها در ابتدا و انتهای خط مشترک بین دو باس نشان داده شده است. مقادیر *PS* و مشخصات جریان - زمان (*Rc*) رله‌های اضافه‌جریان در شکل (۶) با استفاده از روش مرجع [۳۲] و راه‌حل پیشنهادی در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. با توجه به اطلاعات جدول (۲) و جدول (۳)، زمان عملکرد رله‌های این شبکه به دست می‌آید. در جدول (۴)، مقادیر زمان عملکرد رله‌های اصلی و مقایسه آن با روش مرجع [۳۲] نشان داده شده‌اند. به دلیل اینکه روش *PESA II* به‌طور جداگانه زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان را محاسبه می‌کند، زمان عملکرد آنها نسبت به حالت محاسبه‌شونده باهم کمتر شده است. همچنین، با توجه به اینکه از منحنی مناسب برای عملکرد رله‌ها استفاده شده، مشکل زمان عملکرد زیاد حل شده است. در جدول (۵) نیز مقایسه جواب تابع هدف راه‌حل پیشنهادی با مرجع [۳۲] نشان داده شده است. همان‌طور که از این جدول مشخص می‌شود استفاده از راه‌حل پیشنهادی، کل زمان عملکرد رله‌های شبکه را بهبود می‌دهد و کمتر می‌کند.

جدول (۴): مقایسه زمان مینیمم و ماکزیمم راه‌حل پیشنهادی

با روش مرجع [۳۲]

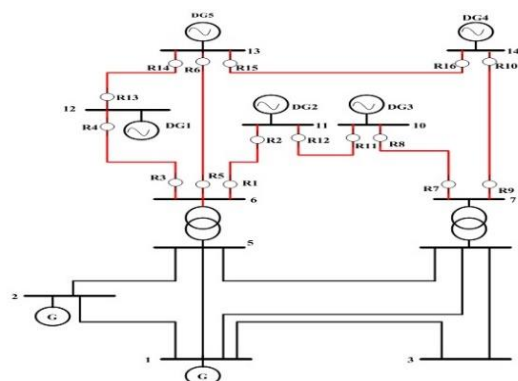
Relay no.	NSGA II		PESA II	
	t_{min} (sec)	t_{max} (sec)	t_{min} (sec)	t_{max} (sec)
۱	۰,۱۶	۰,۲۴۸	۰,۱۵۶	۰,۲۳۹
۲	۰,۰۴۱	۰,۲۲۳	۰,۰۳۵۶	۰,۲۲
۳	۰,۰۶۱	۰,۲۰۵	۰,۰۶۲۷	۰,۱۹۹
۴	۰,۱۰۸	۰,۲۱۴	۰,۰۴۹	۰,۱۶۳
۵	۰,۰۶۱	۰,۲۴۶	۰,۰۵۸	۰,۲۴۰۴
۶	۰,۱۵۹	۰,۲۸۳	۰,۱۴۲	۰,۲۷۷

جدول (۵): مقایسه تابع هدف راه‌حل پیشنهادی با مرجع [۳۲]

$OF = \sum_{i=1}^{N_r} t_i$	NSGA II (Sec)	PESA II (Sec)
		۲,۰۱۱۳

در هر حالت، روش PESA II با روش به‌کاررفته در مرجع [۳۲] مقایسه شده است. بهینه‌سازی در این حالت دارای ۴۸ متغیر کنترل شامل شانزده TMS (real)، شانزده PS (real) و شانزده R_c (integer) است. در جدول (۶) و (۷)، شبکه شکل (۷) در حالت اتصال به شبکه اصلی بررسی شده است. در جدول (۶)، مقادیر به‌دست‌آمده PS ، TMS و از طریق روش PESA II با روش مرجع [۳۲] مقایسه شده است. در جدول (۷) نیز مقادیر زمان‌های t^{min} و t^{max} در هر دو روش، محاسبه و نتایج باهم مقایسه شده‌اند. با توجه به جدول (۸)، روش استفاده‌شده در این مقاله باعث می‌شود زمان عملکرد رله‌ها در حالتی که اتصال کوتاه در ابتدا و انتهای خط رخ دهد، نسبت به روش مقایسه‌شده بهینه شود. همچنین، مطابق با جدول (۸)، نتایج به‌دست‌آمده از روش به کار رفته در این مقاله، باعث شد تابع هدف به‌صورت بهتری بهینه شود.

در جدول (۹) و جدول (۱۰)، نتایج حاصل از بررسی شبکه شکل (۷) در حالت جدا از شبکه اصلی بررسی شده‌اند. در جدول (۹) مقادیر به‌دست‌آمده TMS ، PS و R_c از طریق روش PESA II با روش مرجع [۳۲] مقایسه شده‌اند. در جدول (۱۰) نیز مقادیر زمان‌های t^{min} و t^{max} در هر دو روش، محاسبه و نتایج باهم مقایسه شده‌اند. مطابق با جدول (۱۱)، نتایج به‌دست‌آمده از روش به کار رفته در این مقاله، باعث شد تابع هدف به‌صورت بهتری بهینه شود. همچنین، این روش باعث شد تعادل بین زمان بهینه رله‌های اصلی و پشتیبان حفظ شود.



شکل (۷): شبکه ۱۴ باسه IEEE اصلاح‌شده

برای آزمودن اثرپذیری روش مذکور بر هماهنگ‌کردن رله‌های اضافه‌جریان، دو حالت برای این شبکه بررسی شده است: حالت اتصال به شبکه و حالت جدا از شبکه.

جدول (۶): مقایسه PS و TMS در حالت اتصال به شبکه اصلی

Relay no.	NSGA II			PESA II		
	PS	TMS (sec)	Rc	PS	TMS(sec)	Rc
۱	۰,۸۴۲۸	۰,۲۷۱	۱	۰,۸۳۱	۰,۲۲۶۸	۱
۲	۰,۸۳۹۲	۰,۱۱۸۶	۱	۰,۸۲۷۹	۰,۱۱۸۱	۲
۳	۰,۸۳۸۸	۰,۱۲۰۳	۲	۰,۸۲۷۴	۰,۱۲۰۱	۲
۴	۱,۴۸۳۲	۰,۱۱۵۸	۱	۱,۴۷۸	۰,۱۱۵۲	۱
۵	۰,۸۳۹۴	۰,۱	۲	۰,۸۳۹۶	۰,۱	۲
۶	۰,۸۲۹۲	۰,۱	۱	۰,۸۲۳۸	۰,۱	۱
۷	۰,۶۸۸۶	۰,۲۲۸۳	۱	۰,۶۶۱	۰,۲۲۳۷	۱
۸	۰,۸۵۰۲	۰,۲۰۸	۲	۰,۸۴۴۱	۰,۱۹۸۳	۲
۹	۰,۷۷۰۴	۰,۲۰۳۱	۱	۰,۷۱۲۸	۰,۱۹۲۴	۱
۱۰	۰,۸۲۳۷	۰,۲۵۷۱	۲	۰,۸۱۰۷	۰,۲۴۹۱	۲
۱۱	۰,۸۹۱۵	۰,۲۳۲۳	۱	۰,۸۸۲۶	۰,۲۲۵۳	۱
۱۲	۰,۸۷۲۲	۰,۱۹۸	۲	۰,۸۶۰۱	۰,۱۸۹۲	۲
۱۳	۰,۷۸۹۱	۰,۱۲۷	۱	۰,۷۶۵۵	۰,۱۱۸۴	۱
۱۴	۰,۶۹۵	۰,۲۰۹۵	۱	۰,۶۷۹۳	۰,۱۹۹۱	۱
۱۵	۰,۶۴۶۵	۰,۱	۲	۰,۶۳۹۴	۰,۱	۲
۱۶	۰,۹۳۸۵	۰,۱	۱	۰,۹۳۰۸	۰,۱	۱

جدول (۷): مقایسه زمان مینیمم و ماکزیمم در حالت متصل به شبکه اصلی

Relay no.	NSGA II		PESA II	
	(sec) t_{min}	(sec) t_{max}	(sec) t_{min}	(sec) t_{max}
۱	۰,۲۱۱۶	۰,۵۵۳۲	۰,۱۷۶۸	۰,۴۶۱
۲	۰,۲۲۳۷	۰,۴۷۹۸	۰,۰۴۵	۰,۳۴۹۵
۳	۰,۰۳۸۰۸	۰,۵۷۹۵	۰,۰۰۲۶۴	۰,۵۶۵
۴	۰,۱۲۵۲	۰,۵۱۱۶	۰,۱۲۴	۰,۵۰۲۸
۵	۰,۰۱۰۶	۰,۹۱۷۸	۰,۰۰۹۵۲	۰,۹۱۴
۶	۰,۲۷۳۷	۱,۵۹۶۵	۰,۲۷۳	۱,۵۷۱۶
۷	۰,۲۲۹۶	۰,۵۱۲۸	۰,۲۲۳۲	۰,۴۹۵۱
۸	۰,۰۴۷۸۸	۰,۳۱۸۸	۰,۰۴۵	۰,۳۰۱۳
۹	۰,۲۷۲۸	۰,۴۲۳۵	۰,۲۵۳۸	۰,۳۹۰۹
۱۰	۰,۰۱۶۹۸	۰,۲۷۵۶	۰,۰۱۶۱۲	۰,۲۶۱۹
۱۱	۰,۱۷۳۵	۰,۵۳۸۳	۰,۱۶۸	۰,۵۱۹۹
۱۲	۰,۰۱۳۳۵	۰,۴۶۳۳۵	۰,۰۱۲۵	۰,۴۳۳۶
۱۳	۰,۱۴۸۳	۰,۶۶۵۲	۰,۱۳۴۶	۰,۵۵۲۱
۱۴	۰,۲۲۸۵	۰,۵۲۷۷	۰,۲۱۶۲	۰,۴۹۷
۱۵	۰,۱۲۴۵۵	۰,۸۰۴۵	۰,۱۲۳۰	۰,۷۸۹
۱۶	۰,۲۴۹۸	۰,۸۵۳۲	۰,۲۴۹	۰,۸۴۸۶

هماهنگی بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهتی در ریزشبكة‌ها با استفاده از الگوریتم PESA II

جدول (۸): مقایسه تابع هدف در حالت اتصال به شبکه

$OF = \sum_{i=1}^{N_r} t_i$	NSGA II	PESA II
	۱۲,۴۰۸۴	۱۱,۵۲۵۷

جدول (۹): مقایسه PS و TMS در حالت جدا از شبکه اصلی

Relay no.	NSGA II			PESA II		
	PS	TMS (sec)	Rc	PS	TMS(sec)	Rc
۱	۰,۶۸۹۵	۰,۸۰۳۳	۱	۰,۶۸۰۷	۰,۷۹۲	۱
۲	۱,۲۹۵۳	۰,۴۶۶۱	۱	۱,۲۱۵۸	۰,۴۵۷۲	۱
۳	۰,۶۶۶۸	۰,۳۲۰۲	۱	۰,۶۶۱۱	۰,۳۱۸۴	۱
۴	۱,۲۹۲۱	۰,۵۳۰۲	۱	۱,۲۷۹۵	۰,۵۲۳۶	۱
۵	۰,۶۶۶۵	۰,۷۹۴۱	۱	۰,۶۵۸۳	۰,۷۹۰۵	۱
۶	۰,۶۶۶۷	۰,۹۹۹۳	۱	۰,۶۵۸۷	۰,۹۹۸۶	۱
۷	۰,۶۶۶۷	۰,۵۴۰۴	۱	۰,۸۵۸۸	۰,۵۳۹	۱
۸	۱,۶۴۰۳	۰,۳۵۱	۱	۱,۶۳۹۲	۰,۳۴۹۷	۱
۹	۱,۱۶۲۴	۰,۹۸	۱	۱,۱۳۸۲	۰,۹۷۶۵	۱
۱۰	۰,۶۷۴	۰,۴۸۹۷	۲	۰,۶۹۹۶	۰,۴۸۱	۲
۱۱	۱,۳۲۸۱	۰,۶۹۸	۱	۱,۳۱۹۵	۰,۶۹۰۵	۱
۱۲	۱,۴۸۸۷	۰,۵۰۸۶	۱	۱,۴۸۱	۰,۵	۱
۱۳	۰,۸۳	۰,۹۹۷۸	۱	۰,۸۲۸۶	۰,۹۹۳۷	۱
۱۴	۰,۹۵۴۴	۰,۵۴۲۵	۱	۰,۹۴۹۸	۰,۵۳۹۲	۱
۱۵	۰,۶۶۶۵	۰,۳۴۸۶	۱	۰,۶۵۸۶	۰,۳۴۱۱	۱
۱۶	۰,۶۶۶۶	۰,۹۱۵۷	۱	۰,۶۵۵۷	۰,۹۰۸	۱

جدول (۱۰): مقایسه زمان مینیمم و ماکزیمم در حالت جدا از شبکه اصلی

Relay no.	NSGA II		PESA II	
	(sec) t_{min}	(sec) t_{max}	(sec) t_{min}	(sec) t_{max}
۱	۰,۲۱۷۵	۰,۷۸۸۴	۰,۲۱۴۴	۰,۷۷۵۴
۲	۰,۳۵۸۴	۰,۸۱۵۳	۰,۳۴۹۱	۰,۷۸۶۴
۳	۰,۴۲۱	۰,۲۱۵۴	۰,۲۱۳۵	۰,۴۱۷۸
۴	۰,۵۶۲۱	۰,۳۲۳	۰,۳۱۸۲	۰,۵۵۴
۵	۰,۵۱۱۴	۱,۵۱۴۸	۰,۵۰۸	۱,۵۰۱۸
۶	۰,۲۱۴۶	۱,۳۵۰۲	۰,۲۱۴۱	۰,۳۴۶۸
۷	۰,۳۳۳	۰,۸۴۷۶	۰,۳۳۱۷	۰,۸۴۳۱
۸	۰,۳۶	۰,۸۵۸۲	۰,۳۵۸۶	۰,۸۵۵
۹	۰,۲۱۶۷	۰,۷۴۹۵	۰,۲۱۵۷	۰,۷۴۴۷
۱۰	۰,۰۲۲۵	۰,۶۱	۰,۰۲۱	۰,۶
۱۱	۰,۱۸۹۷	۰,۶۱۶۷	۰,۱۸۷۳	۰,۶۰۹۳
۱۲	۰,۴۵۳	۱,۱۲۹۷	۰,۴۴۴۷	۱,۱۰۸۱
۱۳	۰,۳۶۵۵	۰,۷۵۰۳	۰,۳۶۵۴	۰,۷۴۵۵
۱۴	۰,۳۱۴۸	۰,۸۱۸۷	۰,۲۹۷۳	۰,۸۱۲۷
۱۵	۰,۲۱۱۷	۱,۰۹۴۶	۰,۲۰۶۹	۱,۰۶۵۷
۱۶	۰,۳۲۵۳	۰,۸۲۹۴	۰,۳۲۲۴۱	۰,۸۲۱

مراجع

- [1] S.Sadeghi, N. Rezaei, AH.Naghshbandy,P. Moradi]"Presenting a New Multi-Objective Optimization Method Based on MOPSO-SQP Algorithm in Order to Coordinate the Protective Overcurrent Relaysin Power Systems," Computationalreghi Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 11, No. 3, pp.36-50,2020.
- [2] H. J. J. I. T. o. P. E. Laaksonen, "Protection principles for future microgrids," vol. 25, no. 12, pp. 2910-2918, 2010.
- [3] H.Sharaf, H.Zeineldin, and E. J. I. T. S. G. Saadany, "Protectioncoordination for microgrids with grid-connected and islanded capabilities using communication assisted dual setting directional overcurrent relays," vol. 9, pp. 143-151, 2018.
- [4] G. M. Padayattil, T. Thobias, J. Sebastian, M. Thomas, and G. J. P. T. Pathirikkat, "Hybrid Ring Microgrid with Coordinated Energy Management Scheme," vol. 25, pp. 793-800, 2016.
- [5] M. N. J. I. T. o. I. I. Alam, "Adaptive Protection Coordination Scheme using Numerical Directional Overcurrent Relays," 2018.
- [6] N. Banerjee, R. D. Narayanasamy, and O. G. Swathika, "Optimal coordination of overcurrent relays using two phase simplex method and particle swarm optimization algorithm," in Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), 2017 International Conference on, 2017, pp. 118-121: IEEE.
- [7] P. P. Bedekar, S. R. Bhide, V. S. J. E. P. C. Kale, and Systems, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using simplex method," vol. 38, no. 10, pp. 1175-1193, 2010.
- [8] J. Gholinezhad, K. Mazlumi, and P. Farhang, "Overcurrent relay coordination using MINLP technique," in Electrical Engineering (ICEE), 2011 19th Iranian Conference on, 2011, pp. 1-6: IEEE.
- [9] B. Chattopadhyay, M. Sachdev, and T. Sidhu, "An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 165-173, 1996.
- [10] Thangaraj, M. Pant, and K. Deep, "Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 23, no. 5, pp. 820-829, 2010..
- [11] J. Moirangthem, K. Krishnanand, S. S. Dash, R. J. I. G. Ramaswami, Transmission, and Distribution, "Adaptive differential evolution algorithm for solving non-linear coordination problem of directional overcurrent relays," vol. 7, no. 4, pp. 329-336, 2013.
- [12] R. Thangaraj, M. Pant, and K. J. E. A. o. A. I. Deep, "Optimal coordination of over-current relays using modified differential evolution algorithms," vol. 23,

جدول (۱۱): مقایسه تابع هدف در حالت جدا از شبکه

$OF = \sum_{i=1}^{N_i} t_i$	NSGA II	PESA II
	۱۸,۳۷۷۶	۱۷,۱۷۳۲

بنابراین، با توجه به محاسبات انجام شده، مشخص است روش *PESA II* به خوبی مقادیر حقیقی *TMS* و مقدار صحیح R_c را به دست می آورد که باعث می شود زمان های بهینه لازم برای هماهنگ کردن رله های اصلی و پشتیبان به دست آیند.

نتیجه گیری

در این مقاله، از یک رویکرد جدید برای هماهنگ کردن رله های اضافه جریان جهتی، استفاده و مسئله به صورت یک تابع بهینه چندهدفه فرموله شده است. با توجه به داشتن متغیرهای حقیقی (*PS*, *TMS*) و صحیح (R_c) از روش *PESA II* برای بهینه سازی پارامترهای مسئله استفاده شده است. روش به کاررفته با توجه به اینکه زمان خطا در ابتدا و انتهای خط را هم زمان محاسبه می کند، هماهنگی بین رله های اصلی و پشتیبان به صورت بهینه انجام می شود. همچنین، در حالتی که زمان رله پشتیبان کمتر از رله اصلی می شود، از یک تابع جریمه برای چک کردن محدودیت های مسئله استفاده می شود. از ویژگی های روش به کاررفته ایجاد هماهنگی بهینه بین رله های اصلی و پشتیبان آنها، همگرایی سریع و در نتیجه، روشی مناسب برای هماهنگ کردن رله های اضافه جریان جهتی است. در روش مذکور، تنظیمات رله های اضافه جریان جهتی شامل *PS* و *TMS* و نیز R_c به نحوی بهینه می شوند که زمان عملکرد رله های سیستم، حداقل و باعث شود تداخلی در عملکرد رله های اصلی و پشتیبان آنها ایجاد نشود. الگوریتم پیشنهادی روی دو شبکه با ۳ باس و ۱۴ باس اصلاح شده *IEEE* اعمال شده است؛ نتایج حاصل نشان دهنده مزایای این الگوریتم است.

- [24] S. Srinivas and K. S. Swarup, "A hybrid GA—Interval linear programming implementation for microgrid relay coordination considering different fault locations," in 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS), 2017, pp. 785-790: IEEE.
- [25] I. N. Trivedi, P. Jangir, A. Kumar, N. Jangir, R. Bhesdadiya, and R. Totlani, "A Novel Hybrid PSO-DA Algorithm for Global Numerical Optimization," in *Networking Communication and Data Knowledge Engineering*: Springer, 2018, pp. 287-298.
- [26] A. Wadood et al., "An Optimized Protection Coordination Scheme for the Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using a Nature-Inspired Root Tree Algorithm," vol. 8, no. 9, p. 1664, 2018.
- [27] B. Gadhvi, V. Savsani, and V. Patel, "Multi-objective optimization of vehicle passive suspension system using NSGA-II, SPEA2 and PESA-II," *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 361-368, 2016.
- [28] D. W. Corne, N. R. Jerram, J. D. Knowles, and M. J. Oates, "PESA-II: Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization," in *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 2001, pp. 283-290: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [29] A. J. Urdaneta, H. Restrepo, S. Marquez, and J. Sanchez, "Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 122-129, 1996.
- [30] B. Chattopadhyay, M. Sachdev, and T. Sidhu, "An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 165-173, 1996.
- [31] R. Benabid, M. Zellagui, A. Chaghi, and M. Boudour, "Optimal coordination of IDMT directional overcurrent relays in the presence of series compensation using differential evolution algorithm," in 3rd International Conference on Systems and Control, 2013, pp. 1049-1054: IEEE.
- [32] 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.
- [33] P.P. Bedekar, S.R. Bhide, Overcurrent relay coordination using the hybrid GANLP approach, *IEEE Trans. Power Deliv.* 26 (2011)109–119
- [34] A.J. Urdaneta, N. Ramon, L.J.P. Jimenez, Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems, *IEEE Trans. Power Deliv.* 3 (1988) 903–911,
- [35] Univ. Washington, Power Systems Test Case Archive, Seattle, WA.Mar.2006 [Online]. Available: <http://www.ee.washington.edu/research/>
- [13] Y. Damchi, M. Dolatabadi, H. R. Mashhadi, and J. J. E. P. S. R. Sadeh, "MILP approach for optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems," vol. 158, pp. 267-274, 2018.
- [14] P. P. Bedekar and S. R. Bhide, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 9, pp. 11286-11292, 2011.
- [15] H. Zeineldin, E. El-Saadany, and M. Salama, "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 11, pp. 988-995, 2006.
- [16] A. Wadood, C.-H. Kim, T. Khurshiad, S. G. Farkoush, and S.-B. J. E. Rhee, "Application of a Continuous Particle Swarm Optimization (CPSO) for the Optimal Coordination of Overcurrent Relays Considering a Penalty Method," vol. 11, no. 4, p. 869, 2018.
- [17] A. Tjahjono et al., "Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2575-2585, 2017.
- [18] A. Chawla, B. R. Bhalja, B. K. Panigrahi, M. J. E. P. C. Singh, and Systems, "Gravitational Search Based Algorithm for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using User Defined Characteristic," vol. 46, no. 1, pp. 43-55, 2018.
- [19] A. Srivastava, J. M. Tripathi, R. Krishan, and S. J. I. T. o. I. A. Parida, "Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using Gravitational Search Algorithm With DG Penetration," vol. 54, no. 2, pp. 1155-1165, 2018.
- [20] M. Y. Shih, C. A. C. Salazar, A. C. J. I. G. Enríquez, *Transmission, and Distribution*, "Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimisation," vol. 9, no. 14, pp. 2040-2049, 2015.
- [21] A. S. Noghabi, H. R. Mashhadi, and J. Sadeh, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Different Network Topologies Using Interval Linear Programming," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1348-1354, 2010.
- [22] V. N. Rajput, K. S. J. I. J. o. P. Pandya, and E. Conversion, "A hybrid improved harmony search algorithm-nonlinear programming approach for optimal coordination of directional overcurrent relays including characteristic selection," vol. 9, no. 3, pp. 228-253, 2018.
- [23] S. Srinivas and K. S. Swarup, "Optimal relay coordination for microgrids using hybrid modified particle swarm optimization—Interval linear programming approach," in *Power Symposium (NAPS), 2017 North American*, 2017, pp. 1-6: IEEE.

-
- ¹ Over Current
 - ² Mixed integer nonlinear programming
 - ³ Differential Evolution
 - ⁴ Mixed integer linear programming
 - ⁵ Particle Swarm Optimization
 - ⁶ Firefly Algorithm
 - ⁷ Gravitational
 - ⁸ Ant Colony
 - ⁹ Interval Linear Programming
 - ¹⁰ Plug setting
 - ¹¹ Time Multiplier Setting
 - ¹² Pareto Envelope-based Selection Algorithm II
 - ¹³ Objection Function
 - ¹⁴ Coordination Time Interval
 - ¹⁵ Relay curve
 - ¹⁶ Pick up Current
 - ¹⁷ Distributed Generation

