

Improvement of Robust Coordination of Distance and Overcurrent Relays by Selecting Appropriate Performance Characteristics of Overcurrent Relays using Hybrid Algorithm of Genetic and Linear Programming

Yaser Damchi

Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering and Robotic, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
damchi@shahroodut.ac.ir

Abstract:

In transmission and sub-transmission systems, distance and overcurrent relays have a vital role in protection of transmission lines. Power systems have different topological uncertainties such as planned or unplanned line outages. Such uncertainties affect network impedance matrix, and the distribution and amplitude of fault currents through the relays leads to changes in the coefficients of coordination constraints. Therefore, mal-operation of relays and non-selective operation of protection system may occur. In order to have a robust coordination, coordination constraints from different topologies must be taken into account in the coordination problem. In such conditions, in order to satisfy all constraints, operating time of relays increases. In this paper, the selection of appropriate characteristic among standard characteristics for overcurrent relays is proposed to reduce the operating time of relays despite the existence of robust coordination. The proposed approach is tested on an 8-bus and the IEEE 14-bus test systems. Simulation results show that, by applying the proposed method to the coordination problem of distance and overcurrent relays, the operating time of relays, while maintaining their correct operation of relays, is significantly reduced, despite the network restructuring.

Keywords: Improvement of Robust Coordination, Distance and Overcurrent Relays, Appropriate Operating Characteristic.

بهبود هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان با انتخاب مشخصه عملکرد مناسب برای رله‌های اضافه جریان به کمک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی

یاسر دامچی

استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران

damchi@shahroodut.ac.ir

چکیده: رله‌های دیستانس و اضافه جریان، نقش کلیدی در حفاظت خطوط انتقال در سیستم‌های انتقال و فوق توزیع دارند. شبکه‌های قدرت، عدم قطعیت‌های ساختاری مختلفی دارند؛ از جمله این عدم قطعیت‌ها، خروج خطوط به صورت برنامه‌ریزی شده یا نشده است. در صورت وقوع این عدم قطعیت‌ها، ماتریس امپدانس شبکه و دامنه و توزیع جریان خطای عبوری از رله‌ها تغییر می‌کند که این تغییرات سبب تغییر ضرایب قیود هماهنگی می‌شود؛ بنابراین، امکان عملکرد نابه‌جای رله‌ها و انتخاب‌گر نبودن سیستم حفاظتی در اثر تغییرات این ضرایب وجود دارد. به منظور داشتن هماهنگی مقاوم، باید قیود هماهنگی ناشی از ساختارهای مختلف در مسئله هماهنگی لحاظ شود. در چنین شرایطی، زمان عملکرد رله‌ها به منظور ارضای تمامی قیود افزایش می‌یابد. در این مقاله، انتخاب مشخصه مناسب از بین مشخصه‌های استاندارد برای رله‌های اضافه جریان برای کاهش زمان عملکرد رله‌ها با وجود داشتن هماهنگی مقاوم پیشنهاد شده است. دیدگاه پیشنهادی روی سیستم‌های تست ۸ شینه و ۱۴ شینه IEEE ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که با اعمال دیدگاه پیشنهادی به مسئله هماهنگی رله‌های دیستانس و اضافه جریان، زمان عملکرد رله‌ها با حفظ عملکرد صحیح آنها، با وجود تغییر ساختار شبکه، به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بهبود هماهنگی مقاوم، رله‌های دیستانس و اضافه جریان، مشخصه عملکرد مناسب

۱- مقدمه

و حفاظت پشتیبان بر عهده رله اضافه جریان یا رله دیستانس است. به منظور داشتن عملکرد سریع و انتخاب‌گر این حفاظت‌ها، رله‌های دیستانس و اضافه جریان باید به شیوه مناسبی با یکدیگر هماهنگ شوند. گفتنی است در هماهنگی این رله‌ها معمولاً سه دسته پارامتر زمان عملکرد ناحیه دوم (T_{22}) رله‌های دیستانس، ضریب تنظیم زمانی (TMS) و تنظیم جریانی (I_{set}) رله‌های اضافه جریان تعیین می‌شوند.

امروزه با رشد و توسعه شبکه قدرت، عملکرد مناسب سیستم حفاظتی نقش حیاتی در حفظ قابلیت اطمینان و پایداری شبکه دارد. رله‌های دیستانس و اضافه جریان، حفاظت‌های کلیدی خطوط در سطوح انتقال و فوق توزیع محسوب می‌شوند. در شبکه‌های به هم پیوسته در سطوح ولتاژی مذکور، معمولاً حفاظت اصلی بر عهده رله دیستانس

فعالیت‌های فنی برنامه‌ریزی شده یا حوادث پیش‌بینی نشده در سیستم‌های قدرت واقعی می‌توانند ساختار شبکه را تغییر دهند. در اثر این تغییرات، ماتریس امپدانس شبکه تغییر می‌کند که در پی آن، دامنه و توزیع جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها و در نتیجه، ضرایب قیود هماهنگی نیز تغییر خواهند کرد؛ بنابراین، با تغییر ساختار

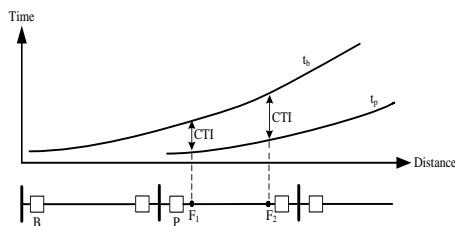
^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

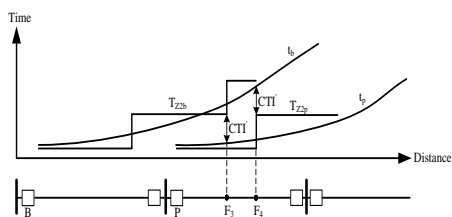
نام نویسنده مسئول: یاسر دامچی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی برق و رباتیک

[۲۰]، یک مشخصه جدید برای زمان عملکرد نواحی رله‌های دیستانس به منظور بهبود هماهنگی رله‌ها ارائه شده است. با توجه به مرور مطالعات انجام شده، یک راهکار به منظور داشتن عملکرد مناسب رله‌ها در صورت تغییر ساختار شبکه، انجام هماهنگی تطبیقی است؛ اما برای پیاده‌سازی این راهکار به بستر مخابراتی و دیجیتال بودن رله‌ها نیاز است. با توجه به اینکه در شبکه‌ها، الزاماً تمامی رله‌ها دیجیتال نیست یا بستر مخابراتی فراهم نیست، امکان انجام هماهنگی تطبیقی در کل شبکه میسر نخواهد بود. راهکار دیگر برای داشتن عملکرد مناسب سیستم حفاظتی در صورت تغییر ساختار شبکه، انجام هماهنگی مقاوم است؛ اما هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان، زمان عملکرد آنها را افزایش می‌دهد. با توجه به مطالعات، انتخاب مشخصه مناسب برای رله‌های اضافه جریان می‌تواند زمان عملکرد سیستم حفاظتی را کاهش دهد که این موضوع تاکنون در بحث هماهنگی مقاوم رله‌ها دیده نشده است. بنابراین، در این مقاله برای بهبود هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان، انتخاب مشخصه عملکرد مناسب برای رله‌های اضافه جریان، از بین مشخصه‌های استاندارد پیشنهاد می‌شود. برای ارزیابی دیدگاه پیشنهادی، از شبکه‌های ۸ شینه و ۱۴ شینه IEEE استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند زمان عملکرد رله‌ها با ارضای تمامی قیود هماهنگی ناشی از ساختارهای مختلف به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.



شکل (۱): نمایش انتخاب‌گر بودن رله‌های اضافه جریان



شکل (۲): نمایش انتخاب‌گر بودن رله‌های اضافه جریان و

دیستانس

شبکه، امکان هماهنگ‌نبودن رله‌های دیستانس و اضافه جریان برای رفع خطا در صورتی وجود دارد که این رله‌ها فقط با توجه به ساختار اصلی شبکه هماهنگ شوند؛ در نتیجه، به منظور داشتن هماهنگی مقاوم رله‌ها (عملکرد مناسب رله‌ها با وجود تغییر ساختار شبکه) باید تنظیمات رله‌ها با در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت‌ها در مسئله هماهنگی تعیین شوند.

مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان با لحاظ کردن تأثیر تغییر ساختار شبکه ناشی از اضافه‌شدن یک خط انتقال در مرجع [۱]، با در نظر گرفتن تأثیر خروج خط انتقال از شبکه در مراجع [۵-۲] و با لحاظ کردن تغییرات دینامیکی در توپولوژی شبکه در مرجع [۶] مدل‌سازی شده است. در مرجع [۷]، مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان در شبکه میکروگرید با در نظر گرفتن قیود هماهنگی ناشی از دو حالت عملکرد منابع تولید پراکنده شامل حالت وصل آنها به شبکه و عملکرد جزیره‌ای‌شان بیان شده است. در مرجع [۸]، تنظیمات رله‌های اضافه جریان در شبکه میکروگرید با لحاظ کردن تغییر ساختار شبکه تعیین شده‌اند. مسئله هماهنگی رله‌های دیستانس و اضافه جریان با در نظر گرفتن تغییر ساختار شبکه ناشی از خروج خطوط در مراجع [۹-۱۱] مدل‌سازی شده است. در مرجع [۱۲]، یک تابع هدف جدید برای هماهنگی تطبیقی رله‌های مذکور ارائه شده است.

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تعیین نوع مشخصه عملکرد رله‌ها برای بهبود هماهنگی رله‌ها انجام شده است. در مرجع [۱۳]، یک مشخصه ترکیبی برای رله‌های اضافه جریان و در مرجع [۱۴]، یک مشخصه غیراستاندارد برای مشخصه عملکرد این رله‌ها پیشنهاد شده است. مشخصه‌ای برحسب ولتاژ و جریان برای زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان، به منظور بهبود هماهنگی رله‌ها ارائه شده است [۱۵]. در مرجع [۱۶]، تغییر مشخصه رله‌های اضافه جریان با توجه به محل و دیستانس در هماهنگی این رله‌ها پیشنهاد شده است. انتخاب مشخصه عملکرد رله‌های اضافه جریان از بین مشخصه‌های استاندارد در مرجع [۱۷]، برای بهبود هماهنگی اضافه جریان و در مراجع [۱۸] و [۱۹]، برای بهبود هماهنگی رله‌های دیستانس و اضافه جریان مطرح شده است. در مرجع

۲- مسئله هماهنگی مقاوم رله‌ها

هدف در مسئله هماهنگی رله‌های دیستانس و اضافه جریان، به دست آوردن T_{z2} ، TMS و I_{set} رله‌ها است؛ به گونه‌ای که ضمن حداقل شدن مجموع زمان عملکرد سیستم حفاظتی، قیود هماهنگی نیز رعایت شوند. همچنین، به منظور داشتن عملکرد مناسب رله‌ها در صورت تغییر ساختار شبکه، باید قیود هماهنگی ناشی از ساختارهای مختلف در مسئله هماهنگی لحاظ شوند. شایان ذکر است زمان عملکرد رله‌ها به منظور رسیدن به هماهنگی مقاوم با رعایت تمامی قیود افزایش می‌یابد. در این مقاله، مسئله هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\min OF = \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{j=1}^m T_{z2j} \quad (1)$$

$$s. t. t_{bs}^{F1} - t_{ps}^{F1} \geq CTI \quad s \in S \quad (2)$$

$$t_{bs}^{F2} - t_{ps}^{F2} \geq CTI \quad s \in S \quad (3)$$

$$T_{z2b} - t_{ps}^{F3} \geq CTI \quad s \in S \quad (4)$$

$$t_{ps}^{F4} - T_{z2p} \geq CTI \quad s \in S \quad (5)$$

$$TMS_i^{min} \leq TMS_i \leq TMS_i^{max} \quad (6)$$

$$\max(I_{load_i}^{max}, I_{set_i}^{min}) \leq I_{set_i} \leq \min(I_{fault_i}^{min}, I_{set_i}^{max}) \quad (7)$$

$$T_{z2j}^{min} \leq T_{z2j} \leq T_{z2j}^{max} \quad (8)$$

با توجه به رابطه‌های (۲) تا (۸)، دو دسته قید باید در مسئله هماهنگی لحاظ شوند که قیود عملکرد موضعی و قیود مربوط به تنظیمات رله‌ها هستند. برای داشتن عملکرد موضعی سیستم حفاظتی، رله پشتیبان باید دست‌کم به اندازه CTI دیرتر از رله اصلی عمل کند. رابطه‌های (۲) و (۳) به ترتیب بیان‌کننده قیود موضعی بین رله‌های اضافه جریان اصلی و پشتیبان برای خطای جلوی رله اصلی و خطا در شینه دور رله اصلی در ساختارهای مختلف شبکه با توجه به شکل (۱) هستند. به عبارت دیگر، رله‌های اضافه جریان پشتیبان باید دست‌کم به اندازه یک CTI دیرتر از رله اضافه جریان اصلی، در صورت عملکرد داشتن این رله برای رفع خطا، فرمان قطع را برای کلید صادر کنند. رابطه (۴)، عملکرد موضعی بین ناحیه دوم رله‌های دیستانس پشتیبان و رله اضافه

جریان اصلی برای ساختارهای مختلف شبکه را با توجه به شکل (۲) تضمین می‌کند. همچنین، طبق رابطه (۵)، رله‌های اضافه جریان پشتیبان باید دست‌کم به اندازه یک CTI دیرتر از ناحیه دوم رله دیستانس اصلی در صورت عملکرد داشتن برای رفع خطا عمل کنند. روابط (۶) و (۷) به ترتیب بیان‌کننده محدودیت‌های ضریب تنظیم زمانی و تنظیم جریانی رله‌های اضافه جریان‌اند. با توجه به رابطه (۷)، تنظیم جریانی رله‌های اضافه جریان باید از حداکثر مقدار بین حداکثر جریان بار عبوری از رله و حداقل تنظیم جریانی ممکن بیشتر باشد. همچنین، تنظیم مذکور باید از حداقل مقدار بین حداقل جریان خطای عبوری از رله در جهت دید آن و حداکثر تنظیم جریانی ممکن کمتر باشد. رابطه (۸)، محدوده زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس را نشان می‌دهد.

مشخصه عملکرد رله‌های اضافه جریان نقش کلیدی در زمان عملکرد آنها دارد. توابع مختلفی برای مشخصه عملکرد رله‌ها وجود دارند که براساس استانداردهای IEC، ANSI/IEEE و AREVA به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شوند. در این رابطه، I_{fault_i} جریان خطای عبوری از نامین رله اضافه جریان است. همچنین، K ، α و β پارامترهای ثابت‌اند که با توجه به جدول (۱) انتخاب می‌شوند.

$$t_i = \left(\frac{K}{\left(\frac{I_{fault_i}}{I_{set_i}} \right)^\alpha - 1} + \beta \right) TMS_i \quad (9)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی میزان تأثیر راهکار پیشنهادی بر مسئله هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان، با لحاظ کردن قیود هماهنگی ساختارهای مختلف ناشی از خروج تکی خطوط، از دو شبکه ۸ شینه و ۱۴ شینه IEEE استفاده می‌شود. تنظیمات رله‌ها با این فرض تعیین شده‌اند که تنظیم زمانی رله‌های اضافه جریان، به صورت متغیری پیوسته و محدوده تغییرات آن ۰/۰۵ تا ۱/۱ است. CTI و CTI' برابر ۰/۲ ثانیه لحاظ شده‌اند. همچنین، مشخصه خیلی کاهشی IEC (مشخصه شماره ۳)، مشخصه عملکرد رله‌های اضافه جریان در حالت معلوم بودن مشخصه‌ها در نظر گرفته

شده است. برای انجام هماهنگی بین رله‌ها، جریان‌های خطا در شینه‌های نزدیک و دور رله‌های اضافه جریان، در انتهای ناحیه اول رله‌های دیستانس اصلی (۸۰٪ طول خط) و در ناحیه دوم رله‌های دیستانس پشتیبان (۵۰٪ طول کوتاه‌ترین خط مجاور در بین خطوطی که رله‌های دیستانس اصلی روی آنها واقع‌اند) تعیین شده‌اند.

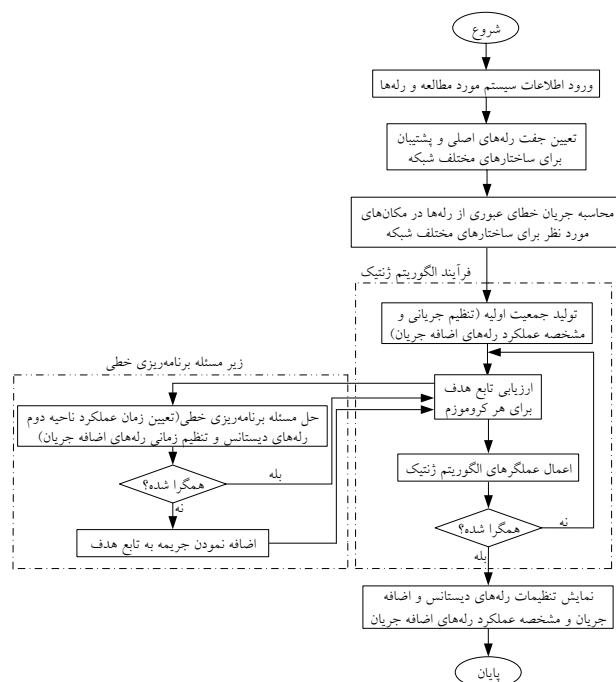
جدول (۱): انواع مشخصه عملکرد رله اضافه جریان [۱۸]

شماره مشخصه	نام مشخصه	نام استاندارد	K	α	β
1	Short Time Inverse	AREVA	0.05	0.04	0
2	Standard Inverse	IEC	0.14	0.02	0
3	Very Inverse	IEC	13.5	1	0
4	Extremely Inverse	IEC	80	2	0
5	Long Time Inverse	AREVA	120	1	0
6	Moderately Inverse	ANSI/IEEE	0.0515	0.02	0.114
7	Very Inverse	ANSI/IEEE	19.61	2	0.491
8	Extremely Inverse	ANSI/IEEE	28.2	2	0.1217

غیرخطی به مسئله بهینه‌سازی خطی تبدیل می‌شود. سپس در زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی، تابع هدف، زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس و تنظیم زمانی رله‌های اضافه جریان تعیین می‌شوند. در صورت نبود همگرایی زیرمسئله برای بعضی از کروموزم‌ها، یک مقدار بزرگ، به‌عنوان جریمه، به تابع هدف به‌منظور کاهش شانس انتخاب این کروموزم‌ها در فرایند انتخاب اضافه می‌شود. این زیرمسئله، چندین بار توسط بخش الگوریتم ژنتیک فراخوانی می‌شود. فرایند بهینه‌سازی با توجه به جمعیت نسل‌ها و ابعاد سیستم مطالعه‌شده، بعد از چند تکرار معین به پایان می‌رسد.

برای حل مسئله هماهنگی، از روش بهینه‌سازی ترکیبی الگوریتم‌های ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی ارائه‌شده در مراجع [۲] و [۹] با انجام اصلاحات لازم استفاده می‌شود. شکل (۳)، روندنمای الگوریتم ترکیبی را نشان می‌دهد. گفتنی است استفاده از الگوریتم ترکیبی، سرعت همگرایی مسئله هماهنگی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

توضیح اجمالی از این الگوریتم به شرح زیر است: در فرایند الگوریتم ژنتیک، در ابتدا کروموزم‌ها (تنظیم جریانی و مشخصه عملکرد هر رله اضافه جریان) به‌صورت تصادفی به‌عنوان جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند. با مشخص شدن پارامترهای مذکور، مسئله بهینه‌سازی



شکل (۳): الگوریتم ترکیبی اصلاح‌شده برای حل مسئله هماهنگی رله‌های دیستانس و اضافه جریان

۱-۳- شبکه ۸ شینه

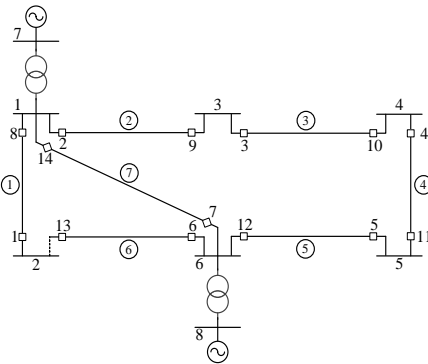
به منظور بررسی کارایی روش ترکیبی الگوریتم‌های

ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی، مسئله هماهنگی مقاوم رله‌های مذکور با انتخاب مشخصه مناسب برای رله‌های اضافه جریان به کمک روش ترکیبی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیبی توده ذرات (PSO) و برنامه‌ریزی خطی نیز حل شده است. جدول (۴)، تنظیمات به دست آمده برای رله‌ها را به کمک این الگوریتم نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴)، به کمک الگوریتم ترکیبی PSO و برنامه‌ریزی خطی، مقدار تابع هدف، مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان و متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس به ترتیب ۰/۷۶۴۸ و ۳/۶۸۴۰، ۱۴/۳۹۰۹، به ترتیب (۳)، به ترتیب ۱۴/۲۹۲۲، ۳/۶۷۹۱ و ۰/۷۵۸۱ ثانیه است. نتایج بالا نشان‌دهنده همگرایی مطلوب الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی است.

جدول (۲): تنظیمات مقاوم رله‌ها در شبکه ۸ شینه با در نظر گرفتن مشخصه شماره ۳ برای رله‌های اضافه جریان به کمک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی

شماره رله	تنظیم جریانی	ضریب تنظیم		زمان عملکرد ناحیه دوم
		زمانی	ضریب	
۱	۲	۰/۱۸۹۵		۱/۲۸۷۹
۲	۲/۵	۰/۴۳۰۱		۱/۴۷۶۴
۳	۲/۵	۰/۵۳۴۴		۰/۶۳۸۰
۴	۲/۵	۰/۰۶۴۵		۰/۸۷۸۴
۵	۱	۰/۱۴۲۰		۰/۹۱۱۹
۶	۲/۵	۰/۲۲۷۶		۱/۱۶۲۲
۷	۲/۵	۰/۳۲۵۵		۱/۲۰۶۸
۸	۲/۵	۰/۲۱۱۹		۱/۱۹۱۶
۹	۱/۵	۰/۱۳۴۷		۰/۹۳۸۳
۱۰	۲/۵	۰/۰۶۴۹		۰/۸۰۰۵
۱۱	۲/۵	۰/۳۱۲۶		۰/۶۰۹۴
۱۲	۲/۵	۰/۴۰۷۳		۱/۳۷۳۹
۱۳	۲	۰/۱۸۱۳		۱/۲۰۶۷
۱۴	۲/۵	۰/۳۲۷۴		۱/۱۲۸۸
۲۲/۳۲۳۸		مقدار بهینه تابع هدف		
۷/۵۱۳۰		مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان		
۱/۰۵۷۹		متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس		

شکل (۴)، نمودار تک خطی شبکه ۸ شینه را نشان می‌دهد که اطلاعات شبکه در مرجع [۲۱] ارائه شده است. این شبکه شامل هفت خط انتقال است که با ۱۴ رله دیستانس و ۱۴ رله اضافه جریان حفاظت می‌شود. نسبت تبدیل ترانسفورماتورهای جریان در مرجع مذکور موجود است. تعداد قیود موضعی برای این شبکه در ساختار اصلی ۸۰ قید است که با لحاظ کردن ساختارهای مختلف شبکه به ۴۸۰ قید افزایش می‌یابد. همچنین، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان برابر ۵۶ است.



شکل (۴): نمودار تک خطی شبکه ۸ شینه [۲۱]

تنظیمات رله‌ها با در نظر گرفتن مشخصه شماره ۳ و مشخصه‌های متفاوت برای مشخصه عملکرد رله‌های اضافه جریان به ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند. نتایج این جدول‌ها نشان می‌دهند مقدار تابع هدف، مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان و متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس برای سیستم مطالعه شده، با لحاظ کردن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان، به ترتیب از ۲۲/۳۲۳۸، ۷/۵۱۳۰ و ۱/۰۵۷۹ ثانیه به ۱۴/۲۹۲۲، ۳/۶۷۹۱ و ۰/۷۵۸۱ ثانیه با ارضای تمامی قیود هماهنگی کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر، پارامترهای مذکور با انتخاب مشخصه‌های استاندارد مناسب برای رله‌های اضافه جریان به ترتیب ۳۵/۹۷، ۵۱/۰۳، ۲۸/۳۳ درصد با حفظ عملکرد صحیح رله‌ها، در صورت تغییر ساختار، کاهش می‌یابند که مطلوب است. همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان در شکل (۵) ارائه شده است.

بهبود هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان با انتخاب مشخصه عملکرد مناسب برای ...

جدول (۴): تنظیمات مقاوم رله‌ها در شبکه ۸ شینه با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان به کمک الگوریتم ترکیبی PSO و برنامه‌ریزی خطی

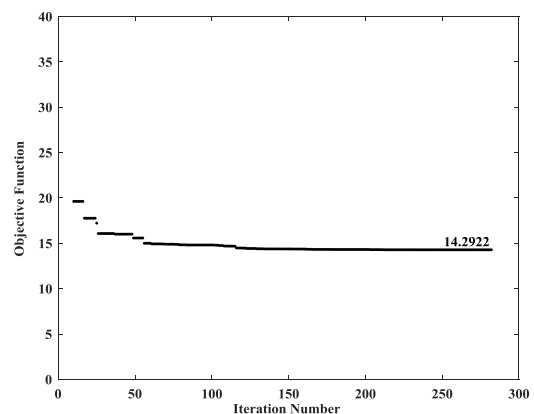
شماره انتخابی	ناحیه دوم	زمان عملکرد ضریب تنظیم	تنظیم جریانی	شماره رله
۴	۰/۹۵۹۸	۰/۰۹۳۶	۲	۱
۴	۱/۲۲۸۷	۰/۳۷۱۹	۲/۵	۲
۴	۰/۴۳۵۴	۰/۵۵۶۲	۲/۵	۳
۴	۰/۵۶۵۴	۰/۰۵۰۶	۱/۷۵	۴
۴	۰/۵۵۲۵	۰/۰۶۲۳	۱	۵
۴	۰/۸۰۵۰	۰/۱۲۱۷	۲/۵	۶
۴	۰/۸۶۴۲	۰/۲۱۹۷	۲/۵	۷
۴	۰/۸۷۹۲	۰/۱۸۸۸	۲	۸
۴	۰/۵۶۰۵	۰/۰۶۱۷	۱/۵	۹
۸	۰/۵۲۴۱	۰/۰۸۵۱	۲/۲۵	۱۰
۴	۰/۴۲۴۸	۰/۲۳۷۴	۲/۵	۱۱
۴	۱/۱۴۴۳	۰/۳۷۱۵	۲/۵	۱۲
۴	۰/۹۲۹۲	۰/۱۷۳۱	۱/۵	۱۳
۴	۰/۸۳۳۸	۰/۲۱۳۸	۲/۵	۱۴
مقدار بهینه تابع هدف				۱۴/۳۹۰۹
مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان				۳/۶۸۴۰
متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس				۰/۷۶۴۸

جدول (۳): تنظیمات مقاوم رله‌ها در شبکه ۸ شینه با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان به کمک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی

شماره انتخابی	ناحیه دوم	زمان عملکرد ضریب تنظیم	تنظیم جریانی	شماره رله
۴	۰/۹۶۰۷	۰/۰۹۳۷	۲	۱
۴	۱/۲۲۷۷	۰/۳۷۲۳	۲/۵	۲
۴	۰/۴۳۲۰	۰/۶۸۹۱	۲/۲۵	۳
۸	۰/۵۶۵۵	۰/۰۶۳۰	۲/۵	۴
۴	۰/۵۵۲۷	۰/۰۶۲۳	۱	۵
۴	۰/۸۰۵۵	۰/۱۲۱۸	۲/۵	۶
۴	۰/۸۶۵۰	۰/۲۲۰۷	۲/۵	۷
۴	۰/۸۸۴۱	۰/۱۱۱۶	۲/۵	۸
۴	۰/۵۵۷۸	۰/۰۵۹۵	۱/۵	۹
۸	۰/۵۱۲۲	۰/۰۶۶۵	۲/۵	۱۰
۴	۰/۴۱۹۵	۰/۲۳۳۵	۲/۵	۱۱
۸	۱/۱۲۸۸	۰/۸۴۶۸	۲/۵	۱۲
۴	۰/۸۸۹۰	۰/۰۹۴۳	۲	۱۳
۴	۰/۸۱۲۴	۰/۲۱۳۹	۲/۵	۱۴
مقدار بهینه تابع هدف				۱۴/۲۹۲۲
مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان				۳/۶۷۹۱
متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس				۰/۷۵۸۱

۲-۳- شبکه ۱۴ شینه IEEE

شبکه ۱۴ شینه IEEE شبکه دیگری است که برای ارزیابی دیدگاه پیشنهادی در بهبود هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان استفاده می‌شود و در شکل (۶) نشان داده شده است. این شبکه، پنج ماشین سنکرون، سه ترانسفورماتور قدرت و ۱۶ خط را شامل می‌شود که اطلاعات آن در مرجع [۲۲] ارائه شده است. از ۳۲ رله دیستانس و ۳۲ رله اضافه جریان برای حفاظت خطوط استفاده می‌شود. همچنین، تنظیم جریانی رله‌های اضافه جریان، متغیر گسسته انتخاب شده‌اند که بین ۲/۵ تا ۱۲/۵ آمپر با گام ۱/۲۵ آمپر تغییر می‌کند. دلیل این انتخاب آن است که جریان ثانویه ترانسفورماتورهای جریان برابر مقدار نامی ۵ آمپر است؛ نسبت تبدیل این ترانسفورماتورها در مرجع [۲۳] ارائه شده است. تعداد قیود موضعی شبکه با در نظر گرفتن ساختارهای مختلف، از ۱۸۶ قید به ۳۷۲۰ قید



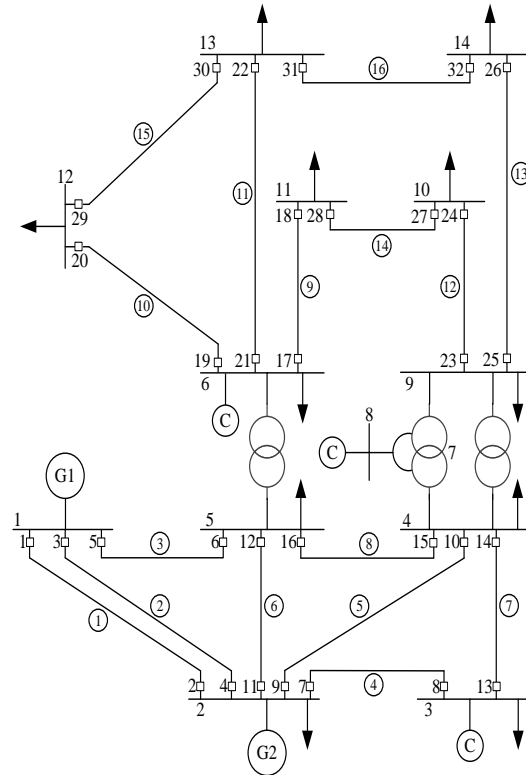
شکل (۵): همگرایی الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای شبکه ۸ شینه با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان

جدول (۵): تنظیمات مقاوم رله‌ها در شبکه ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن مشخصه شماره ۳ برای رله‌های اضافه جریان به کمک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی

شماره رله	تنظیم جریانی	ضریب تنظیم زمانی	زمان عملکرد ناحیه دوم
۱	۵	۰/۰۵۰۰	۰/۴۲۰۸
۲	۱۲/۵	۰/۰۵۸۱	۰/۴۲۲۸
۳	۵	۰/۰۵۰۰	۰/۴۲۰۸
۴	۱۲/۵	۰/۰۵۸۱	۰/۴۲۲۸
۵	۷/۵	۰/۰۵۰۰	۰/۵۹۵۳
۶	۱۰	۰/۰۵۰۰	۰/۴۲۰۸
۷	۷/۵	۰/۰۵۰۰	۰/۵۱۱۰
۸	۱۲/۵	۰/۰۸۴۱	۰/۴۰۶۶
۹	۸/۷۵	۰/۰۵۰۰	۰/۵۹۶۹
۱۰	۶/۲۵	۰/۰۵۶۳	۰/۴۲۰۸
۱۱	۱۲/۵	۰/۰۵۳۱	۰/۵۵۸۲
۱۲	۶/۲۵	۰/۰۵۳۳	۰/۴۲۰۸
۱۳	۱۲/۵	۰/۱۵۲۱	۰/۵۶۵۲
۱۴	۸/۷۵	۰/۰۵۰۹	۰/۳۹۰۱
۱۵	۸/۷۵	۰/۲۷۰۱	۰/۳۹۷۹
۱۶	۳/۷۵	۰/۱۷۸۵	۰/۳۶۸۷
۱۷	۱۲/۵	۰/۱۵۶۵	۰/۶۹۸۳
۱۸	۱۲/۵	۰/۰۷۵۶	۰/۴۹۳۴
۱۹	۱۲/۵	۰/۱۳۷۹	۰/۹۳۳۰
۲۰	۶/۲۵	۰/۱۳۵۹	۰/۵۰۱۲
۲۱	۱۲/۵	۰/۱۴۵۲	۰/۴۹۱۰
۲۲	۱۱/۲۵	۰/۱۰۹۵	۰/۵۶۲۶
۲۳	۱۲/۵	۰/۲۱۴۰	۰/۵۰۳۲
۲۴	۱۲/۵	۰/۲۱۴۶	۰/۵۴۳۶
۲۵	۱۲/۵	۰/۰۹۲۴	۰/۶۸۶۳
۲۶	۱۲/۵	۰/۱۹۹۸	۰/۵۹۱۷
۲۷	۱۲/۵	۰/۰۹۷۷	۰/۴۷۸۰
۲۸	۱۲/۵	۰/۲۱۵۸	۰/۵۴۶۵
۲۹	۱۲/۵	۰/۲۱۰۲	۰/۸۱۶۰
۳۰	۲/۵	۰/۳۶۳۸	۰/۴۳۰۸
۳۱	۱۰	۰/۱۲۰۸	۰/۸۹۵۵
۳۲	۱۲/۵	۰/۱۲۹۶	۰/۶۵۸۳
۲۲/۲۹۹۷	مقدار بهینه تابع هدف		
۵/۱۳۰۶	مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان		
۰/۵۳۶۴	متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس		

افزایش می‌یابد. همچنین، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان برابر ۱۲۸ است.

جدول‌های (۵) و (۶)، تنظیمات رله‌ها را به ترتیب با لحاظ کردن مشخصه شماره ۳ و مشخصه‌های متفاوت برای مشخصه عملکرد رله‌های اضافه جریان نشان می‌دهند. با توجه به نتایج این جدول‌ها، مقدار تابع هدف، مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان و متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس برای سیستم مطالعه‌شده، با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان، به ترتیب از ۲۲/۲۹۹۷، ۵/۱۳۰۶ و ۰/۵۳۶۴ ثانیه به ۱۶/۵۱۳۳، ۲/۳۰۸۸ و ۰/۴۴۳۹ ثانیه با ارضای تمامی قیود هماهنگی کاهش می‌یابند. کاهش پارامترهای مذکور به ترتیب معادل با ۲۵/۹۵، ۵۵ و ۱۷/۲۴ درصد است؛ بنابراین، با اعمال دیدگاه پیشنهادی به مسئله هماهنگی مقاوم رله‌ها، علاوه بر داشتن عملکرد مطلوب رله‌ها با تغییر ساختار شبکه، زمان عملکردشان نیز به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.



شکل (۶): نمودار تک خطی شبکه ۱۴ شینه IEEE [۲۲]

بهبود هماهنگی مقاوم رله‌های دیستانس و اضافه جریان با انتخاب مشخصه عملکرد مناسب برای ...

جدول (۶): تنظیمات مقاوم رله‌ها در شبکه ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان به کمک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی

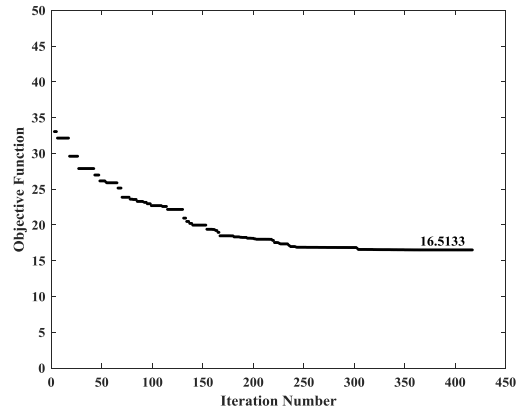
شماره رله	تنظیم جریانی	زمان عملکرد ضریب تنظیم زمانی	ناحیه دوم	انتخابی
۱	۵	۰/۰۵۰۰	۰/۳۶۳۸	۸
۲	۱۱/۲۵	۰/۰۵۰۳	۰/۳۹۸۶	۴
۳	۵	۰/۰۵۰۰	۰/۳۶۳۸	۸
۴	۱۱/۲۵	۰/۰۵۰۳	۰/۳۹۸۶	۴
۵	۷/۵	۰/۰۵۰۰	۰/۴۸۴۹	۴
۶	۱۰	۰/۰۵۰۰	۰/۳۰۰۰	۸
۷	۸/۷۵	۰/۰۵۰۰	۰/۳۹۰۷	۸
۸	۱۲/۵	۰/۰۷۶۱	۰/۳۴۷۰	۴
۹	۶/۲۵	۰/۰۵۰۰	۰/۵۰۹۱	۴
۱۰	۸/۷۵	۰/۰۵۰۰	۰/۳۶۳۸	۸
۱۱	۸/۷۵	۰/۰۶۱۵	۰/۴۶۶۷	۴
۱۲	۷/۵	۰/۰۶۰۲	۰/۳۶۳۸	۸
۱۳	۱۲/۵	۰/۱۳۳۰	۰/۴۸۳۲	۴
۱۴	۶/۲۵	۰/۰۶۲۳	۰/۳۲۷۷	۴
۱۵	۱۲/۵	۰/۱۴۰۳	۰/۳۰۰۰	۳
۱۶	۷/۵	۰/۰۵۲۲	۰/۳۰۰۸	۲
۱۷	۱۲/۵	۰/۱۰۵۶	۰/۵۱۲۴	۴
۱۸	۱۲/۵	۰/۱۳۶۱	۰/۳۹۷۸	۸
۱۹	۱۲/۵	۰/۰۸۳۴	۰/۸۲۱۱	۴
۲۰	۶/۲۵	۰/۲۵۶۴	۰/۳۹۷۸	۸
۲۱	۱۲/۵	۰/۳۲۵۵	۰/۳۸۱۰	۸
۲۲	۱۲/۵	۰/۰۵۹۲	۰/۳۸۵۰	۴
۲۳	۱۲/۵	۰/۲۳۹۳	۰/۳۹۴۴	۴
۲۴	۱۲/۵	۰/۲۷۳۶	۰/۴۱۵۹	۴
۲۵	۱۲/۵	۰/۰۵۵۱	۰/۵۸۸۷	۴
۲۶	۱۲/۵	۰/۴۳۰۳	۰/۴۷۶۸	۸
۲۷	۱۲/۵	۰/۰۶۷۱	۰/۴۰۱۱	۴
۲۸	۱۱/۲۵	۰/۲۲۲۲	۰/۴۵۲۷	۴
۲۹	۱۲/۵	۰/۱۷۶۵	۰/۷۲۲۹	۴
۳۰	۲/۵	۰/۳۱۰۶	۰/۳۲۲۷	۳
۳۱	۳/۷۵	۰/۶۱۱۵	۰/۷۸۴۲	۴
۳۲	۱۲/۵	۰/۲۵۵۲	۰/۵۸۹۷	۸
۱۶/۷۰۹۳	مقدار بهینه تابع هدف			
۲/۵۰۵۸	مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان			
۰/۴۴۳۹	متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس			

جدول (۷): تنظیمات مقاوم رله‌ها در شبکه ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان به کمک الگوریتم ترکیبی PSO و برنامه‌ریزی خطی

شماره رله	تنظیم جریانی	زمان عملکرد ضریب تنظیم زمانی	ناحیه دوم	انتخابی
۱	۵	۰/۰۵۰۰	۰/۳۶۳۸	۸
۲	۱۱/۲۵	۰/۰۵۰۳	۰/۳۹۸۶	۴
۳	۵	۰/۰۵۰۰	۰/۳۶۳۸	۸
۴	۱۱/۲۵	۰/۰۵۰۳	۰/۳۹۸۶	۴
۵	۷/۵	۰/۰۵۰۰	۰/۴۸۴۹	۴
۶	۱۰	۰/۰۵۰۰	۰/۳۰۰۰	۸
۷	۸/۷۵	۰/۰۶۰۴	۰/۳۸۷۲	۸
۸	۱۲/۵	۰/۰۷۶۱	۰/۳۴۷۰	۴
۹	۶/۲۵	۰/۰۵۰۰	۰/۵۰۹۱	۴
۱۰	۸/۷۵	۰/۰۵۰۰	۰/۳۶۳۸	۸
۱۱	۸/۷۵	۰/۰۶۱۵	۰/۴۶۶۷	۴
۱۲	۷/۵	۰/۰۶۰۲	۰/۳۶۳۸	۸
۱۳	۱۲/۵	۰/۱۳۳۰	۰/۴۸۳۲	۴
۱۴	۶/۲۵	۰/۰۶۲۳	۰/۳۲۷۷	۴
۱۵	۱۲/۵	۰/۱۴۰۳	۰/۳۰۰۰	۳
۱۶	۷/۵	۰/۰۵۲۲	۰/۳۰۰۸	۲
۱۷	۱۲/۵	۰/۱۰۵۶	۰/۵۱۲۴	۴
۱۸	۱۲/۵	۰/۱۳۶۱	۰/۳۹۷۸	۸
۱۹	۱۲/۵	۰/۰۸۳۴	۰/۸۲۱۱	۴
۲۰	۶/۲۵	۰/۲۵۶۴	۰/۳۹۷۸	۸
۲۱	۱۲/۵	۰/۳۲۵۵	۰/۳۸۱۰	۸
۲۲	۱۲/۵	۰/۰۵۹۲	۰/۳۸۵۰	۴
۲۳	۱۲/۵	۰/۲۳۹۳	۰/۳۹۴۴	۴
۲۴	۱۲/۵	۰/۲۷۳۶	۰/۴۱۵۹	۴
۲۵	۱۲/۵	۰/۰۵۵۱	۰/۵۸۸۷	۴
۲۶	۱۲/۵	۰/۴۳۰۳	۰/۴۷۶۸	۸
۲۷	۱۲/۵	۰/۰۶۷۱	۰/۴۰۱۱	۴
۲۸	۱۱/۲۵	۰/۲۲۲۲	۰/۴۵۲۷	۴
۲۹	۱۲/۵	۰/۱۷۶۵	۰/۷۲۲۹	۴
۳۰	۲/۵	۰/۳۱۰۶	۰/۳۲۲۷	۳
۳۱	۳/۷۵	۰/۶۱۱۵	۰/۷۸۴۲	۴
۳۲	۱۲/۵	۰/۲۵۵۲	۰/۵۸۹۷	۸
۱۶/۷۰۹۳	مقدار بهینه تابع هدف			
۲/۵۰۵۸	مجموع زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان			
۰/۴۴۳۹	متوسط زمان عملکرد ناحیه دوم رله‌های دیستانس			

۵- علائم و متغیرهای اختصاری

تابع هدف	OF
تعداد رله‌های اضافه جریان	n
تعداد رله‌های دیستانس	m
زمان عملکرد λ امین رله اضافه جریان	t_i
زمان عملکرد ناحیه دوم λ امین رله دیستانس	T_{Z2j}
زمان عملکرد رله اضافه جریان اصلی برای خط s	t_{ps}^{F1}
جلوی رله اصلی (نقطه $F1$) در ساختار s	t_{bs}^{F1}
زمان عملکرد رله اضافه جریان پشتیبان برای خط s	t_{bs}^{F1}
در جلوی رله اصلی (نقطه $F1$) در ساختار s	t_{ps}^{F2}
زمان عملکرد رله اضافه جریان اصلی برای خط s	t_{ps}^{F2}
شینه دور رله اصلی (نقطه $F2$) در ساختار s	t_{bs}^{F2}
در شینه دور رله اصلی (نقطه $F2$) در ساختار s	t_{bs}^{F2}
زمان عملکرد رله اضافه جریان پشتیبان برای خط s	t_{bs}^{F4}
ابتدای ناحیه دوم رله دیستانس اصلی در ساختار s	t_{ps}^{F3}
زمان عملکرد رله اضافه جریان اصلی برای خط s	t_{ps}^{F3}
انتهای ناحیه دوم رله دیستانس پشتیبان در ساختار s	T_{Z2p}
زمان عملکرد ناحیه دوم رله دیستانس اصلی	T_{Z2b}
زمان عملکرد ناحیه دوم رله دیستانس پشتیبان	TMS_i
ضریب تنظیم زمانی λ امین رله اضافه جریان	TMS_i^{min}
حداقل ضریب تنظیم زمانی λ امین رله اضافه جریان	TMS_i^{max}
حداکثر ضریب تنظیم زمانی λ امین رله اضافه جریان	T_{Z2j}^{min}
حداقل زمان عملکرد ناحیه دوم λ امین رله دیستانس	T_{Z2j}^{min}
حداکثر زمان عملکرد ناحیه دوم λ امین رله دیستانس	T_{Z2j}^{max}
تنظیم جریانی λ امین رله اضافه جریان	I_{set_i}
حداقل تنظیم جریانی λ امین رله اضافه جریان	$I_{set_i}^{min}$
حداکثر تنظیم جریانی λ امین رله اضافه جریان	$I_{set_i}^{max}$
حداقل جریان خطای عبوری از λ امین رله اضافه جریان	$I_{fault_i}^{min}$
حداکثر جریان بار عبوری از λ امین رله اضافه جریان	$I_{load_i}^{max}$
حداقل فاصله زمانی هماهنگی بین رله‌های اضافه	CTI
جریان اصلی و پشتیبان	CTI'
حداقل فاصله زمانی هماهنگی بین رله‌های اضافه	CTI'
جریان و دیستانس اصلی و پشتیبان	CTI'
مجموعه ساختارهای مختلف شبکه مطالعه شده	S



شکل (۷): همگرایی الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای شبکه ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن مشخصه‌های مختلف برای رله‌های اضافه جریان

شکل (۷) همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی را برای شبکه ۱۴ شینه IEEE نشان می‌دهد. همچنین، تنظیمات به دست آمده برای رله‌ها به کمک الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی توده ذرات و برنامه‌ریزی خطی در جدول (۷) نشان داده شده‌اند. با مقایسه نتایج تنظیمات جدول‌های (۵) و (۷)، نتیجه‌ای مشابه بخش قبل به دست می‌آید؛ برای مثال، تابع هدف به کمک الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی توده ذرات و برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی به ترتیب برابر ۱۶/۷۰۹۳ و ۱۶/۵۱۳۳ است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله هماهنگی رله‌های دیستانس و اضافه جریان با در نظر گرفتن ساختارهای مختلف شبکه ناشی از خروج خطوط انتقال مدل‌سازی شده است. به منظور کاهش زمان عملکرد سیستم حفاظتی با حفظ عملکرد موضعی در صورت تغییر ساختار شبکه، تعیین مشخصه عملکرد مناسب برای رله‌های اضافه جریان از بین مشخصه‌های استاندارد به عنوان راهکار پیشنهادی ارائه شده است. برای حل مسئله، از روش ترکیبی الگوریتم‌های ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که با اعمال راهکار پیشنهادی، هماهنگی مقاوم رله‌های مذکور با ارضای تمامی قیود هماهنگی به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابد.

مراجع

- [12] Z. Moravej, H. M. Ardebili, "A New Objective Function for Adaptive Distance and Directional Over-Current Relays Coordination", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 28, No. 9, pp. 1-12, September 2018.
- [13] C. Henville, B. Hydro, "Combined Use of Definite and Inverse Time Overcurrent Elements Assists in Transmission Line Ground Relay Coordination", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 925-932, July 1993.
- [14] T. Keil, J. Jager, "Advanced Coordination Method for Overcurrent Protection Relays Using Nonstandard Tripping Characteristics", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, pp. 52-57, January 2008.
- [15] K. A. Saleh, H. Zeineldin, A. Al-Hinai, E. El-Saadany, "Optimal Coordination Of Directional Overcurrent Relays Using a New Time-Current-Voltage Characteristic", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 30, No. 2, pp. 537-544, April 2015.
- [16] M. Khederzadeh, "Back-up Protection of Distance Relay Second Zone by Directional Overcurrent Relays With Combined Curves", in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 18-20 June 2006.
- [17] S. A. Ahmadi, H. Karami, M. J. Sanjari, H. Tarimoradi, G. B. Gharehpetian, "Application of Hyper-Spherical Search Algorithm for Optimal Coordination of Overcurrent Relays Considering Different Relay Characteristics", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 83, pp. 443 - 449, December 2016.
- [18] R. Chabanloo, H. A. Abyaneh, S., Kamangar, F. Razavi, "Optimal Combined Overcurrent and Distance Relays Coordination Incorporating Intelligent Overcurrent Relays Characteristic Selection", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 26, No. 3, pp. 1381-1391, July 2011.
- [19] M. G. Maleki, R. M. Chabanloo, M. R. Taheri "Mixed-integer Linear Programming Method for Coordination of Overcurrent and Distance Relays Incorporating Overcurrent Relays Characteristic Selection" *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 110, pp. 246 - 257, September 2019.
- [20] Y. Damchi, J. Sadeh, H. R. Mashhadi, "Optimal Coordination of Distance and Overcurrent Relays Considering a Non-Standard Tripping Characteristic for Distance Relays", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 6, pp.1448-1457, January 2016.
- [21] A. S. Braga, J. T. Saraiva, "Coordination of Overcurrent Directional Relays in Meshed Networks Using the Simplex Method", *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 16 May 1996.
- [22] R. D. Christie, "Power Systems Test Case Archive", in [online]. Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>.
- [23] H. E. A. Talaat, A. Y. Abdelaziz, A. I. Nousseir, A. A. Hajjar, "Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using Linear Programming", *3th Regional Conference for Arab CIGRE Countries*, 1999.
- [1] A. Urdaneta, H. Restrepo, S. Marquez, J. Sanchez, "Coordination of Directional Overcurrent Relays Timing Using Linear Programming", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 122-129, January 1996.
- [2] A. Noghabi, J. Sadeh, H. R. Mashhadi, "Considering Different Network Topologies in Optimal Overcurrent Relay Coordination Using a Hybrid GA", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 24, No. 4, pp. 1857-1863, October 2009.
- [3] A. Noghabi, H. R. Mashhadi, J. Sadeh, "Optimal Coordination Of Directional Overcurrent Relays Considering Different Network Topologies Using Interval Linear Programming", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, pp. 1348-1354, July 2010.
- [4] M. Yang, T. A. Liu, "Applying Hybrid PSO to Optimize Directional Overcurrent Relay Coordination in Different Network Topologies", *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2013, pp. 1-9, 2013.
- [5] M. H. Costa, R. R. Saldanha, M. G. Ravetti, E. G. Carrano, "Robust Coordination Of Directional Overcurrent Relays Using a Matheuristic Algorithm", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 11, No. 2, pp. 467-474, January 2017.
- [6] A. Urdaneta, L. Perez, R. Harold, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Dynamic Changes in the Network Topology", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, No. 4, pp. 1458-1463, October 1997.
- [7] Y. Damchi, J. Sadeh, H. R. Mashhadi, M. Bashir, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in a Micro-Grid System Using a Hybrid Particle Swarm Optimization", in *IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 16-20 October 2011.
- [8] K. A. Saleh, H. Zeineldin, E. El-Saadany, "Optimal Protection Coordination for Micro-Grids Considering N-1 Contingency", *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, Vol. 13, No. 5, pp. 2270-2278, March 2017.
- [9] Y. Damchi, J. Sadeh, H. R. Mashhadi, "Optimal Coordination of Distance and Directional Overcurrent Relays Considering Different Network Topologies", *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 231-240, September 2015.
- [10] Y. Damchi, J. Sadeh, H. R. Mashhadi, "Preprocessing of Distance and Directional Overcurrent Relays Coordination Problem Considering Changes in Network Topology", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 26, No. 1, pp. 32-48, January 2016.
- [11] Y. Damchi, J. Sadeh, H. R. Mashhadi, "Applying Hybrid Interval Linear Programming and Genetic Algorithm to Coordinate Distance and Directional Overcurrent Relays", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 44, No. 17, pp. 1935-1946, January 2016.