Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 21 No. 4, 2024
DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.176

Presenting a New Protection Scheme for Active Distribution Networks considering Two-level Fault Current

Salar Rashaei[1] , Amin Yazdaninejadi[2]

[1] MSc Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, I.R. Iran
s.rashaei@sru.ac.ir,
[2]Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, I.R. Iran
a.yazdaninejadi@sru.ac.ir

Abstract:
Fast and selective protection brings more security, reliability and stability in power systems. Accomplishing this task by directional overcurrent relays is one of the main challenges in the active distribution network. Due to the presence of two-level fault currents, conventional methods fail to meet selectivity requirements. Tackling this issue renders the need for using the dynamic model for relays operation, which may result in miscoordination or increase the operation time of relays in large scale networks. Therefore, in this article, a new protection coordination approach is presented based on employment of the dynamic model of relays operation and using some modification in this model. The presented model simplifies the optimization space of problem and provides fast-response protection. On the other hand, this model of the operation model may cause mal-operation in normal conditions. Therefore, a new logic is also devised that can be implemented based on numerical relays. Since this logic requires to employ numerical relay, the proposed method is modeled techno-economically to provide fast and selective protection with the minimum number of numerical relays. This model is formulated as a multi-objective optimization problem and TOPSIS algorithm is used as a decision-making approach. Results are discussed in depth.

Keywords: **New protection logic, Techno-economic model, TOPSIS decision approach, Two-level fault current.**

Article Type: Research

Received: 19. 08. 2023

Revised: 07. 10. 2023

Accepted: 20. 11. 2023

Corresponding author: Amin Yazdaninejadi

Corresponding author's address: Lavizan, Elec. Eng. Dep., Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

Copyright © 2024 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

Changing the network topology may cause relays coordination fails to meet selectivity tasks. Opening the switch on the other side of the line during a fault may change the short circuit level and increases the current passing through the relay, which may disturb the coordination between the main and backup relays. In reference [1], in the worst conditions of the network topology, in which the short-circuit current has the highest value, protection coordination process is performed. However, using this method in interconnected networks may cause difficulties in satisfying selectivity constraints due to the intersect among some curves [2]. In [3], a method based on the use of the dynamic model for overcurrent relays operations besides considering the two-level fault current is presented. The presented scheme in [3] can meet the pointed problem associated with the change of the network topology during the fault. However, due to being closer to the real conditions by considering the two-level fault current, increasing the protection constraints and considering the dynamic model, the presented solutions lead to an increase in the operation time of the relays.

In interconnected and multisource networks, owing to the presence of two-level fault currents, the conventional protection based on overcurrent relays cannot meet selective protection requirements. On the other hand, addressing this problem calls the need for employing dynamic model for directional overcurrent relays operation. Using this model may result in miscoordination or increase the operation time of relays in large scale networks. Therefore, presenting a new protection scheme to meet this challenging task seems to be of essence. In this study, at the outset, the abovementioned problem is unveiled. Then, a new protection scheme for addressing this problem is devised.

2. Contributions

In this paper, a new protection coordination method based on numerical relays is presented to meet this problem. This method is presented based on a modified dynamic model for relays which helps to meet the constraints associated with two level fault currents. The use of this new model simplifies protection coordination and makes protection faster. The coefficients of new model along with other protection settings are determined during the optimization process. Using these new coefficients in the performance model of the relays may cause them to work incorrectly in some network operation conditions. Therefore, in this study, a new protection logic is also presented with the ability to be implemented on numerical relays. Since this method requires the use of numerical relays, in the continuation of this article, the proposed method is modeled in a technical-economical way so that with the minimum number of numerical relays, fast and selective protection can be provided. Finally, this model is formulated as a multi-objective optimization problem and TOPSIS algorithm [4] is used for decision making. Studies have been conducted on IEEE 14-bus test network and the results have been fully discussed.

3. Procedures

In line with the implementation of the proposed approach, the following steps are conducted in this study:

1. Executing protection coordination based on the conventional approach;
2. Testing this approach with two level fault currents;
3. Executing protection coordination based on the proposed approach;
4. Testing this approach with two level fault currents;
5. Formulating the proposed approach throughout a techno-economic model;
6. Testing this techno-economic model with two level fault currents;

Likewise, the same simulation steps are also followed. At the outset, the coordination between the relays is first investigated by the conventional method and in the conditions of fast operation of the remote relay, in order to show the ineffectiveness of this method for two-level currents. In the following, the method based on the modified dynamic model to solve the mentioned problem is examined. Finally, in order to test the reduction of the operation time of the relays and meeting selectivity tasks, the proposed method based on the use of techno-economic model is tested.

4. Findings

This paper, first, unveils that relays coordination with conventional approaches can not meet the selectivity constraints for probable changes in the network topology during faults. Then, a new modified dynamic operation model for overcurrent relays is devised to tackle this challenging tasks. Afterward, the proposed approach is formulated based on a techno-economic model. Based on this approach, the key findings of the paper are as follows:

- Protection coordination with two-level fault current is done;
- A new protection coordination approach is presented by using new dynamic model;
- A new logic has been presented to implement the proposed method based on numerical relays;
- The presented method is also modeled in a technical-economical way;
- Selectivity constraints are fully met and relays operation times are diminished significantly.

5. Conclusion

This article showed that due to the presence of two-level fault currents, coordination with common methods is not possible. Solving this problem requires the use of the dynamic model of relays, which also causes lack of coordination or increases the operation time of relays in large networks. Therefore, in this paper, a new method for coordinating relays was presented. In this method, considering the dynamic model of the relays and

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

introducing the new variable K in the model related to the operation time of the relays, it was tried to provide quick protection in addition to estimating the coordination between the relays. Although this factor simplifies the optimization space and provides faster protection, it may cause erroneous performance under normal network conditions. Therefore, to cover this problem, a new logic with the ability to be implemented in numerical relays was presented. Since this method requires the use of numerical relays, the proposed method was modeled in a techno-economic way to provide fast and selective protection with the minimum number of numerical relays. According to the results, it was observed that this method can introduce a selective protection. Also, the operation time of the relays also shows a significant reduction, so that the minimal use of numerical relays compared to the state without numerical relays reduces the value of the objective function from 15.607 seconds to 10.988 seconds, in other words, the total operation time of the relays is a significant reduction of 29.5 Finds a percentage.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و یکم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۱۷۶-۱۸۴

DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.176

ارائه یک طرح حفاظتی جدید برای شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن جریان خطای دو سطحی

سالار رشائی[۱]، امین یزدانی نژادی[۲]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران

s.rashaei@sru.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران

a.yazdaninejadi@sru.ac.ir

چکیده: حفاظت سریع و انتخاب‌گر، امنیت، قابلیت اطمینان و پایداری بیشتری را برای شبکه‌های قدرت به ارمغان می‌آورد. دستیابی به این هدف با استقرار رله‌های جریان‌زیاد جهت‌دار یکی از چالش‌های اصلی در شبکه‌های توزیع فعال می‌باشد. به علت وجود جریان‌های خطای دوسطحی، هماهنگی حفاظتی با روش‌های متداول امکان‌پذیر نمی‌باشد. حل این مشکل نیازمند استفاده از مدل دینامیکی رله‌ها است که آن نیز در شبکه‌های بزرگ باعث عدم هماهنگی و یا افزایش زمان عملکرد رله‌ها می‌شود. بنابراین، در این مقاله هماهنگی حفاظتی جدیدی با لحاظ مدل دینامیکی رله‌ها و معرفی یک متغیر جدید K در مدل مربوط به زمان عملکرد رله‌ها ارائه می‌شود. این ضریب فضای بهینه‌سازی را ساده کرده و حفاظت سریع‌تری ارائه می‌دهد. ضرایب جدید در مدل عملکرد رله‌ها ممکن است باعث عملکرد اشتباه در شرایط عادی شبکه شود. بنابراین، یک منطق جدید با قابلیت پیاده‌سازی در رله‌های عددی ارائه می‌شود. همچنین از آنجایی که این روش نیازمند بکارگیری رله‌های عددی است، روش پیشنهادی به صورت فنی-اقتصادی مدل می‌شود تا با حداقل تعداد رله عددی، حفاظتی سریع و انتخاب‌گر ارائه شود. این مدل به صورت مسئله بهینه‌سازی چند هدفه فرموله شده است. برای تصمیم‌گیری نیز از الگوریتم تاپسیس استفاده می‌شود. نتایج به صورت عمیق بحث شده است.

کلمات کلیدی: منطق حفاظتی جدید، حفاظت فنی-اقتصادی، الگوریتم تصمیم‌گیری تاپسیس، جریان خطای دوسطحی

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امین یزدانی نژادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – خیابان شعبانلو – دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی – دانشکده مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۳ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

توسعه تولیدات‌پراکنده و ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی در شبکه‌های توزیع، باعث شده این شبکه‌ها از حالت سنتی خود خارج شوند که آن نیز باعث شارش دو سویه توان در خطوط شبکه می‌گردد [۱]. لذا در این شبکه‌ها از رله‌های جریان‌زیاد جهتی استفاده می‌شود. با هماهنگی این رله‌ها می‌توان حفاظت مناسبی را در شبکه‌های توزیع فعال ایجاد کرد به نحوی که جداسازی حداقل بخش شبکه در هنگام وقوع خطا در کمترین زمان ممکن انجام شود.

هماهنگی رله‌های جریان‌زیاد در شبکه‌های بهم پیوسته به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده شناخته می‌شود. مطالعات زیادی برای رسیدن به حفاظتی انتخاب‌گر و سریع انجام شده است. مرجع [۲] نشان می‌دهد که رله‌ها به صورت زنجیروار به یکدیگر وابسته‌اند. در [۳] سعی شده است با شکستن حلقه‌ها، راه‌حلی برای حل مشکل هماهنگی در شبکه‌های بهم پیوسته ارائه کنند. در [۴] یک روش تحلیلی برای یافتن نقاط شکست ارائه شده است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای هماهنگی به دو دسته روش‌های ریاضی و مبتنی بر تکرار طبقه‌بندی می‌شوند. در روش‌های ریاضی، برنامه نویسی خطی در [۵]، برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح مختلط در [۶]، برنامه‌نویسی باینری در [۷] و برنامه نویسی درجه دوم در [۸] استفاده شده است. در [۹-۱۲] به روش‌های مبتنی بر تکرار پرداخته شده است. برای نمونه، در مقاله [۹] الگوریتم ژنتیک و در مرجع [۱۰] تکامل تفاضلی پیشرفته استفاده شده است. همچنین الگوریتم‌های ترکیبی در [۱۳-۱۴] استفاده شده‌اند. در [۱۵]، تابع جریمه مناسب برای استفاده در روش‌های مبتنی بر تکرار ارائه می‌شود. در این مطالعات هماهنگی بین رله‌ها بهبود یافته است، اما بهبودهای حاصله چشمگیر نبوده و بسیاری از محدودیت‌های عملی نادیده گرفته شده‌اند. با توسعه رله‌های عددی، روش‌های جدیدی برای هماهنگی ارائه شده است. در مرجع [۱۶]، منحنی‌های غیراستاندارد برای کاهش زمان عملکرد رله‌ها استفاده شده‌اند. همچنین به‌کارگیری منحنی تکه‌ای خطی از دیگر روش‌های هماهنگی، که در [۱۷] معرفی شده است. بر پایه رله‌های عددی، استفاده از دو منحنی مشخصه (تنظیم دوگانه) برای یک رله واحد با تنظیمات مستقل در مرجع [۱۸] پیشنهاد شده است که در آن استفاده از بستر مخابراتی نیز ضروری است. در این مطالعات زمان عملکرد رله‌ها به صورت مطلوبی کاهش یافته است ولی تغییر توپولوژی شبکه حین خطا دیده نشده است. استفاده از روش‌های حفاظتی مبتنی بر رله‌های عددی نیازمند مطالعه فنی-اقتصادی است که در هیچکدام از این مراجع مورد مطالعه قرار نگرفته است.

تغییر توپولوژی شبکه ممکن است باعث اختلال در هماهنگی رله‌ها شود. بازشدن کلید سمت دیگر خط در حین خطا باعث تغییر سطح اتصال کوتاه و افزایش جریان عبوری از رله می‌شود که این تغییر جریان عبوری ممکن است هماهنگی بین رله اصلی و پشتیبان را دچار اخلال کند. در مرجع [۱۹] در بدترین شرایط توپولوژی شبکه که در این حالت جریان اتصال کوتاه بالاترین مقدار را داراست هماهنگی حفاظتی انجام می‌شود. اما استفاده از این روش در شبکه‌های بهم پیوسته به دلیل برخورد برخی منحنی‌ها با هم ممکن است برآورد کردن قیود انتخاب‌گری را با مشکل مواجه سازد [۲۰]. در [۲۱]، روشی بر مبنای استفاده از مدل دینامیکی رله‌های جریان‌زیاد با در نظرگرفتن جریان خطای دوسطحی ارائه شده است. اگرچه مشکل مربوط به نادیده گرفتن تغییر توپولوژی شبکه در حین خطا توسط مدل دینامیکی ارائه شده حل می‌شود، اما به علت نزدیک شدن به شرایط واقعی با در نظرگیری جریان خطای دوسطحی، افزایش قیود حفاظتی و در نظرگیری مدل دینامیکی، راه‌حل‌های ارائه شده منجر به افزایش زمان عملکرد رله‌ها می‌شود.

بنابراین، در این مقاله، یک روش هماهنگی حفاظتی جدید مبتنی بر رله‌های عددی ارائه شده است تا این مشکل را برطرف سازد. این روش با لحاظ مدل دینامیکی رله‌ها و معرفی متغیر جدیدی به نام K در مدل مربوط به زمان عملکرد رله‌ها ارائه می‌شود. استفاده از این ضریب فضای بهینه‌سازی هماهنگی حفاظتی را ساده می‌کند و باعث می‌شود حفاظت سریع‌تری ارائه گردد. این ضرایب همراه با دیگر تنظیمات حفاظتی در طول پروسه بهینه‌سازی مشخص می‌شوند. بهره‌گیری از این ضرایب جدید در مدل عملکرد رله‌ها ممکن است باعث عملکرد اشتباه آن‌ها در شرایط عادی بهره‌برداری شبکه شود. بنابراین در این مطالعه، یک منطق جدید حفاظتی بر پایه ضرایب ارائه شده و با قابلیت پیاده‌سازی بر روی رله‌های عددی پیشنهاد می‌شود. از آنجایی که این روش نیازمند به کارگیری رله‌های عددی است، در ادامه این مقاله، روش پیشنهادی به صورت فنی-اقتصادی مدل می‌شود تا با حداقل تعداد رله عددی، بتوان حفاظتی سریع و انتخاب‌گر ارائه نمود. در نهایت، این مدل به صورت مسئله بهینه‌سازی چند هدفه فرموله شده است و برای تصمیم‌گیری نیز از الگوریتم تاپسیس استفاده می‌شود. مطالعات روی شبکه تست ۱۴ باسه IEEE انجام شده و نتایج به صورت کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نوآوری‌های مقاله به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- هماهنگی حفاظتی با جریان خطای دوسطحی انجام شده است؛
- یک روش هماهنگی حفاظتی جدید با استفاده از ضرایب جدید در مدل عملکردی رله ارائه شده است؛
- منطق جدیدی برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی و جلوگیری از عملکرد اشتباه رله‌ها در شرایط عادی شبکه ارائه شده است؛
- روش ارائه شده به صورت فنی- اقتصادی نیز مدل شده است؛

بخش دوم مشکل عدم هماهنگی بین رله‌ها را در صورت عملکرد سریع رله دوردست با استفاده از روش متداول بیان می‌کند. همچنین، مدل دینامیکی رله برای حل این مشکل و روش پیشنهادی در این بخش آورده شده است. بخش سوم فرمولاسیون مربوط به طرح پیشنهادی به صورت فنی-اقتصادی و الگوریتم تصمیم‌گیری تاپسیس را بیان می‌کند. در بخش چهارم بررسی عمیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته است. نتیجه‌گیری در بخش پنجم ارائه شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

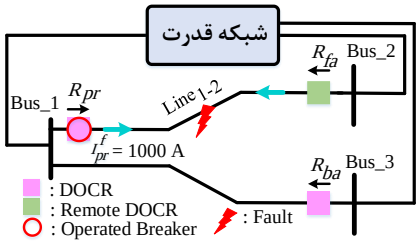
۲- طرح حفاظتی ارائه شده

این قسمت به مشکل جریان خطای دوسطحی می‌پردازد. سپس حفاظت پشنهادی بر مبنای مدل دینامیکی و استفاده از ضرایب جدید معرفی می‌شود. در ادامه منطق پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- هماهنگی رله‌ها با جریان خطای دوسطحی

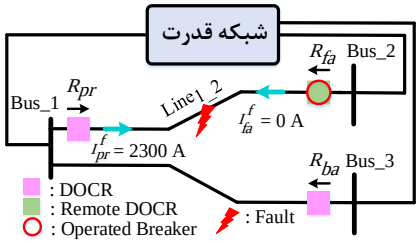
در این بخش، برای بررسی هماهنگی رله‌ها در شرایط عملکرد سریع رله دوردست مطالعاتی بر مبنای شبیه‌سازی انجام شده است. شکل (۱) یک شبکه قدرت ساده را نشان می‌دهد که برای خطای اتفاق افتاده در خط $Line_{1-2}$ بدون در نظرگیری تغییرات در توپولوژی شبکه در طول مدت خطا، هماهنگی حفاظتی بین رله اصلی (R_{pr}) و رله پشتیبان (R_{ba}) برقرار شده است و معادله (۱) که محدودیت حفاظتی بین رله اصلی و پشتیبان را نشان می‌دهد، برآورد می‌شود. در این رابطه t_{ba} و t_{pr} زمان عملکرد رله پشتیبان و اصلی است. I_{pr}^{f} و I_{pr}^{s} به ترتیب جریان دیده شده توسط این رله‌ها برای خطا روی خط است. همچنین CTI فاصله زمانی هماهنگی بین رله‌ها است.

$$t_{ba}(I_{ba}^{f})-t_{pr}(I_{pr}^{f})\geq CTI \qquad (۱)$$

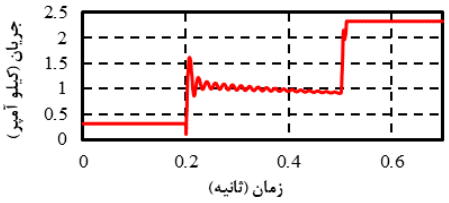


شکل (۱): نمایش یک نمونه شبکه قدرت قبل از عمل رله R_{fa}

در نظر بگیرید که به هنگام رخداد خطا، رله R_{fa} رله دوردست زودتر از رله R_{pr} عمل کند و جریان خطای عبوری از رله R_{pr} از ۱۰۰۰ آمپر به ۲۳۰۰ آمپر افزایش یابد که در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل موج جریان خطا نیز در شکل (۳) آورده شده است. شکل (۳) دوسطحی بودن جریان را برای قبل از عملکرد رله دوردست (I_{pr}^{f}) و بعد از عملکرد رله دوردست (I_{pr}^{s}) نشان می‌دهد.



شکل (۲): نمایش یک نمونه شبکه قدرت بعد از عمل رله R_{fa}

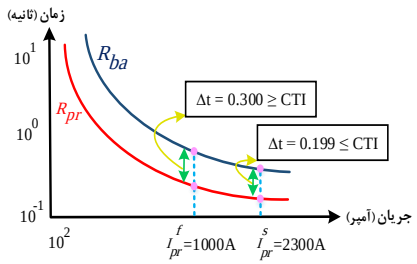


شکل (۳): جریان اتصال کوتاه دوسطحی عبوری از رله R_{pr}

در این قسمت با استفاده از مدل متداول مربوط به عملکرد رله که در رابطه (۲) آورده شده است نشان داده می‌شود که انتخابگری حفاظتی بین رله‌ها می‌تواند در شرایطی که توضیح داده شد دچار مشکل شود. اکنون با استفاده از معادله (۲) زمان عملکرد رله‌ها بر اساس جریان عبوری از رله اصلی بدست آورده می‌شود [۲۱]. این اطلاعات همراه با منحنی مشخصه رله‌ها در شکل (۴) منعکس شده است.

$$t=(A\times TDS)\Big/\left(\left(I^{f}/I_{p}\right)^{B}-1\right) \qquad (۲)$$

در معادله (۲)، A و B ثابت‌های منحنی مشخصه رله مربوطه، TDS و I_p به ترتیب تنظیم زمانی و تنظیم جریانی رله مورد استفاده و I^f نیز جریان اتصال کوتاه دیده شده توسط رله می‌باشد. در شکل (۴) رله‌ها بر اساس جریان اتصال کوتاه I^f هماهنگ شده‌اند که بعد از عمل رله دوردست، جریان اتصال کوتاه به I^s تغییر پیدا می‌کند. همانگونه که مشاهده می‌شود، فاصله زمانی بین زمان عملکرد رله‌های R_{pr} و R_{ba} کمتر از CTI است که وجود عدم هماهنگی بین رله اصلی و پشتیبان را نمایان می‌سازد. بنابراین عملکرد سریع رله دوردست، هماهنگی حفاظتی بین رله‌ها با روش متداول را می‌تواند دچار اختلال کند. لذا استفاده از روشی مبنی بر بکارگیری مدل دینامیکی رله‌ها با درنظرگیری جریان خطای دوسطحی مورد نیاز است.



شکل (۴): عدم هماهنگی بین رله‌ها با افزایش جریان اتصال کوتاه

۲-۲- طرح حفاظتی و منطق پیشنهادی

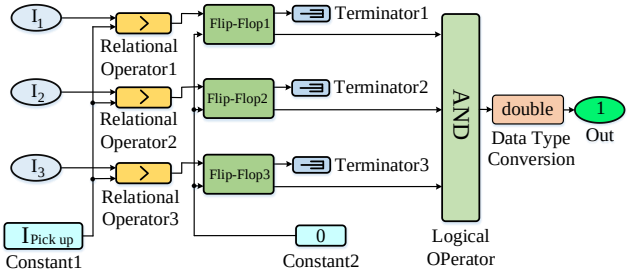
در این مقاله، طرحی جدید بر مبنای استفاده از قابلیت‌های رله عددی در راستای ساده‌سازی فضای بهینه‌سازی مطرح می‌شود. در این طرح، ضریب جدید K به عنوان ضریب جریان خطا در مدل عملکرد رله جریان‌زیاد معرفی و در مسئله بهینه‌سازی قیود مناسب آن ایجاد می‌شود. با حل مسئله بهینه‌سازی مقدار این ضریب همراه با تنظیمات بهینه زمانی و جریانی برای محاسبه زمان عملکرد رله‌ها بدست می‌آید.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

اگر مدل متداول برای عملکرد رله در نظر گرفته شود، با لحاظ ضریب جدید K، مدل به صورت زیر خواهد بود.

$$t = \left(A \times TDS\right) \Big/ \left(\left(K \times I^{f} / I_{p}\right)^{B} - 1\right) \qquad (۳)$$

با توجه به تاثیر ضریب K بر مقدار جریان دیده شده توسط رله، ممکن است به علت بزرگ بودن ضریب K از مقدار ۱، در شرایط عادی شبکه، مقدار جریان دیده شده افزایش یافته و باعث عملکرد اشتباه رله شود. همچنین ممکن است به علت کوچک بودن ضریب K از مقدار ۱ در شرایط خطا، مقدار جریان دیده شده از جریان خطا کمتر شده و باعث عدم عملکرد رله در زمان خطا شود. لذا در این قسمت برای جلوگیری از عملکرد اشتباه رله، منطقی مطابق شکل (۵) ارائه شده است. طبق منطق پیشنهادی، مقایسه‌ای بین جریان‌های خط و جریان تنظیمی انجام می‌گیرد که در صورت بزرگ بودن جریان خط از جریان تنظیمی رله باید طبق زمان تنظیمی که با لحاظ ضریب K بدست آمده است، عمل کند. بنابراین این ضریب فقط زمانی اعمال خواهد شد که در شبکه خطا وجود داشته باشد و در شرایط عادی شبکه هیچ عملکرد اشتباهی از سمت رله رخ نمی‌دهد. از طرفی برای جلوگیری از عدم عملکرد رله در شرایط خطا، مقدار حداقل این ضریب ۱ در نظر گرفته می‌شود. لذا در حین خطا این روش فقط باعث عملکرد سریع‌تر رله خواهد شد و باعث تاخیر یا عدم عملکرد رله نمی‌شود. انتخاب‌گری در این طرح با لحاظ قیود لازم در حضور ضریب K در فرآیند بهینه‌سازی برآورد می‌شود که در قسمت‌های بعدی توضیح داده شده است. مطابق با منطق پیشنهادی، مقایسه‌ای بین جریان‌های خطوط با جریان تنظیمی رله انجام می‌گیرد که خروجی مقایسه‌گر و مقدار ثابت صفر به عنوان ورودی‌های فلیپ فلاپ در نظر گرفته می‌شوند. با بزرگ بودن مقدار جریان عبوری از خطوط نسبت به جریان تنظیمی رله، خروجی مقایسه‌گر برابر با ۱ خواهد بود که در نهایت خروجی فلیپ فلاپ نیز برابر با ۱ می‌شود. در صورتیکه برای هر ۳ خط شبکه این حالت اتفاق بیوفتد رله خطا را تشخیص داده و عمل می‌کند.



شکل (۵): منطق پیشنهادی برای پیاده‌سازی طرح ارائه شده

۳- فرمولاسیون مسئله و روش تصمیم‌گیری

ابتدا مسئله هماهنگی برای جریان‌های دو سطحی به صورت مدل بهینه‌سازی چند هدفه فرمول‌بندی می‌شود. در این فرمولاسیون رله جریان‌زیاد به صورت دینامیکی مدل شده و ضرایب جدید نیز در مدل عملکردی رله اضافه شده‌اند. همچنین برای برآورد ساختن انتخاب‌گری، قیود مناسب ایجاد شده‌اند. در نهایت الگوریتم تاپسیس به عنوان تصمیم‌گیر برای تعیین نقطه بهینه معرفی شده است.

۳-۱- فرمولاسیون

حل مسئله بهینه‌سازی برای برقراری هماهنگی حفاظتی بین رله‌ها الزامی می‌باشد. در این مسئله توابع هدف به صورت زیر می‌باشند. رابطه (۴) تابع هدف اول مربوط به حداقل‌سازی مجموع زمان عملکرد رله اصلی تعریف می‌شود.

$$Minimize(T) = \sum_{p=1}^{P} t_{pr}^{p} \qquad (۴)$$

در این رابطه، T معادل مجموع زمان عملکرد رله‌ها و اندیس p بیانگر موقعیت خطا می‌باشد. تابع هدف دوم برای کاهش تعداد رله‌های عددی استفاده شده در شبکه مطابق رابطه (۵) لحاظ می‌شود که در این رابطه نیز اندیس h بیانگر شماره رله مورد نظر می‌باشد.

$$Minimize(Z) = \sum_{h=1}^{H} u_{h} \qquad (۵)$$

در این رابطه، Z معادل تعداد رله‌های عددی به کار رفته در شبکه می‌باشد. مقدار u_h نیز برای حالتی که رله (h) یک رله متداول باشد برابر با صفر و برای حالتی که رله (h) یک رله عددی باشد برابر با یک لحاظ می‌شود. برای حل مسئله بهینه‌سازی با اهداف مطرح شده، قیود مسئله نیز بدین صورت تعریف می‌شوند که رابطه (۶) بیانگر محدوده قابل قبول برای تنظیم جریانی رله‌ها است که مقدار آن بایستی بین $I_{p_{\min}}^{h}$ و $I_{p_{\max}}^{h}$ قرار بگیرد. رابطه (۷) محدوده قابل قبول تنظیم زمانی هر یک از رله‌ها را مشخص می‌کند که مقدار آن باید بین $TDS_{\min}^{h}$ و $TDS_{\max}^{h}$ باشد. در رابطه (۸) نیز CTI برابر مقداری ثابت مطابق با استاندارد لحاظ شده است. مطابق رابطه (۹) محدوده قابل قبول برای ضریب K بین $K_{\min}^{h}$ و $K_{\max}^{h}$ در نظر گرفته شده است.

$$I_{p_{\min}}^{h} \le I_{p}^{h} \le I_{p_{\max}}^{h} \qquad (۶)$$

$$TDS_{\min}^{h} \le TDS^{h} \le TDS_{\max}^{h} \qquad (۷)$$

$$\Delta t^{p} = t_{bc}^{p} - t_{pr}^{p} - CTI \ge 0 \qquad (۸)$$

$$K_{\min}^{h} \le K^{h} \le K_{\max}^{h} \qquad (۹)$$

برای محاسبه زمان عملکرد رله‌ها با لحاظ جریان خطای دوسطحی از مدل دینامیکی رله استفاده می‌شود. مطابق مرجع [۲۱] معادلات مدل دینامیکی رله جریان‌زیاد در روابط (۱۰) و (۱۱) بیان شده است که رابطه (۱۱) همان رابطه مربوط به محاسبه زمان عملکرد رله می‌باشد. در این معادلات، $I(t)$ به عنوان جریان خطای لحظه‌ای عبوری از رله در نظر گرفته می‌شود. همچنین مطابق رابطه (۱۰) رله جریان‌زیاد زمانی عمل می‌کند که مقدار انتگرال در این رابطه برابر با ۱ باشد.

$$\int_{0}^{t} \frac{1}{F(I(t))} dt = 1 \quad I(t) > I_{p} \qquad (۱۰)$$

$$F(I(t)) = TDS \times \left(A \Big/ \left(\left(I(t)/I_{p}\right)^{B} - 1\right)\right) \qquad (۱۱)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

$I(t)$ برای رله R_{pr} به صورت رابطه (۱۲) بیان می‌شود که در این رابطه t_{fa} زمان عملکرد رله دوردست می‌باشد.

$$I_{pr}(t)=\begin{cases} I_{pr}^{f} & 0<t<t_{fa} \\ I_{pr}^{s} & t_{fa}<t \end{cases} \quad (۱۲)$$

با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۱۰)، رابطه (۱۳) به صورت زیر بدست می‌آید که در این رابطه F_{pr}^{f} و F_{pr}^{s} به ترتیب زمان عملکرد رله برای جریان خطای I_{pr}^{f} و I_{pr}^{s} می‌باشد که هر کدام به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) تعریف می‌شوند.

$$\int_{0}^{t_{fa}}\frac{1}{F_{pr}^{f}}dt+\int_{t_{fa}}^{t_{pr}}\frac{1}{F_{pr}^{s}}dt=1 \quad (۱۳)$$

$$F_{pr}^{f}=TDS_{pr}\times\left(A\Big/\left(\left(I_{pr}^{f}/I_{p_{pr}}\right)^{B}-1\right)\right) \quad (۱۴)$$

$$F_{pr}^{s}=TDS_{pr}\times\left(A\Big/\left(\left(I_{pr}^{s}/I_{p_{pr}}\right)^{B}-1\right)\right) \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۰) به صورت رابطه (۱۶) بازنویسی شده و زمان عملکرد رله با لحاظ جریان خطای دوسطحی به صورت رابطه (۱۷) بدست می‌آید.

$$\left(t_{fa}/F_{pr}^{f}\right)+\left(\left(t_{pr}-t_{fa}\right)/F_{pr}^{s}\right)=1 \quad (۱۶)$$

$$t_{pr}=(1-\frac{F_{pr}^{s}}{F_{pr}^{f}})\times t_{fa}+F_{pr}^{s} \quad (۱۷)$$

در رابطه (۱۷) زمان عملکرد رله R_{fa} (t_{fa}) به TDS_{fa} بستگی دارد که با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است. برای نشان دادن وابستگی زمان عملکرد رله R_{pr} (t_{pr}) به TDS_{pr} و TDS_{fa} رابطه (۱۷) به فرم رابطه (۲۱) بازنویسی می‌شود که M_{pr}، $M_{pr}^{'}$ و M_{fa} به ترتیب به صورت روابط (۱۸) تا (۲۰) تعریف می‌شوند. همچنین زمان عملکرد رله R_{ba} نیز به صورت رابطه (۲۲) بدست می‌آید که مطابق این رابطه t_{ba} نیز به TDS_{ba} و TDS_{fa} وابسته می‌باشد.

$$M_{pr}=A\Big/\left((K_{pr}.I_{pr}^{f}/I_{p_{pr}})^{B}-1\right) \quad (۱۸)$$

$$M_{pr}^{'}=A\Big/\left((K_{pr}.I_{pr}^{s}/I_{p_{pr}})^{B}-1\right) \quad (۱۹)$$

$$M_{fa}=A\Big/\left((K_{fa}.I_{fa}^{f}/I_{p_{fa}})^{B}-1\right) \quad (۲۰)$$

$$t_{pr}=TDS_{pr}\times M_{pr}^{'}+TDS_{fa}\times M_{fa}(1-\frac{M_{pr}^{'}}{M_{pr}}) \quad (۲۱)$$

$$t_{ba}=TDS_{ba}\times M_{ba}^{'}+TDS_{fa}\times M_{fa}(1-\frac{M_{ba}^{'}}{M_{ba}}) \quad (۲۲)$$

به منظور هماهنگی بین رله اصلی R_{pr} و رله پشتیبان R_{ba} با لحاظ عملکرد سریع رله دوردست R_{fa}، معادله هماهنگی به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود. طبق معادله، اختلاف زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان علاوه بر TDS_{pr} و TDS_{ba} به TDS_{fa} نیز بستگی دارد.

$$t_{ba}-t_{pr}=\left(TDS_{ba}\times M_{ba}^{'}\right)-\left(TDS_{pr}\times M_{pr}^{'}\right)+\left(TDS_{fa}\times\left(M_{fa}(\left(M_{pr}^{'}/M_{pr}\right)-\left(M_{ba}^{'}/M_{ba}\right))\right)\right) \quad (۲۳)$$

۳-۲- الگوریتم تصمیم‌گیری

الگوریتم تاپسیس یک تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب جواب بهینه می‌باشد. جواب بهینه باید کمترین فاصله اقلیدسی را از حل ایده آل مثبت و بیشترین فاصله اقلیدسی را از حل ایده آل منفی داشته باشد. حل ایده آل مثبت، ترکیبی از بهترین مقدار هر هدف در حل‌های بهینه می‌باشد. در مقابل، حل ایده آل منفی ترکیبی از بدترین مقدار هر هدف در حل‌های بهینه می‌باشد. از ویژگی‌های این الگوریتم این است که به مشخصه‌ها بر اساس اهمیت آن‌ها وزنی اختصاص داده می‌شود که در این مسئله وزن برابری برای هر دو هدف لحاظ می‌شود. این الگوریتم شامل مراحل زیر است [۲۲].

مرحله ۱) نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم‌گیری با m سطر و n ستون طبق رابطه (۲۴) است [۲۲]. همچنین اندیس‌های i و j به ترتیب مربوط به شماره سطر و ستون در ماتریس تصمیم‌گیری می‌باشند.

$$F_{ij}=f_{ij}\Big/\left(\sum_{i=1}^{m}f_{ij}^{2}\right)^{0.5} \quad (۲۴)$$

مرحله ۲) ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده وزنی مطابق رابطه (۲۵) با ضرب هر ستون در وزن آن (w_j) بدست می‌آید.

$$v_{ij}=F_{ij}\times w_{j} \quad (۲۵)$$

مرحله ۳) این مرحله تعیین گزینه ایده آل مثبت (A^{+}) و گزینه ایده آل منفی (A^{-}) است. بهترین مقدار برای هدف حداکثرسازی، بزرگترین مقدار در ستون ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده است. همچنین بهترین مقدار برای هدف کمینه سازی، کوچک‌ترین مقدار در ستون ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده است. از نظر ریاضی، حل ایده‌آل مثبت و منفی به ترتیب با رابطه (۲۶) و (۲۷) بدست می‌آید که در این روابط، J مجموعه‌ای از مشخصه‌هایی از جنس سود و $J^{'}$ مجموعه‌ای از مشخصه‌هایی از جنس هزینه می‌باشند.

$$\begin{aligned} A^{+}=\{&(Max_{i}(v_{ij})\mid j\in J).(Min_{i}(v_{ij})\mid j\in J^{'})\mid \\ &i\in 1,\cdots,m\}=v_{1}^{+},v_{2}^{+},v_{3}^{+},\cdots,v_{j}^{+},\cdots,v_{n}^{+}\} \end{aligned} \quad (۲۶)$$

$$\begin{aligned} A^{-}=\{&(Min_{i}(v_{ij})\mid j\in J).(Max_{i}(v_{ij})\mid j\in J^{'})\mid \\ &i\in 1,\cdots,m\}=v_{1}^{-},v_{2}^{-},v_{3}^{-},\cdots,v_{j}^{-},\cdots,v_{n}^{-}\} \end{aligned} \quad (۲۷)$$

مرحله ۴) فاصله اقلیدسی بین هر گزینه با گزینه‌های ایده آل مثبت و ایده آل منفی با استفاده از روابط (۲۸) و (۲۹) محاسبه می‌شوند.

$$i=1,2,3,...,m \quad (۲۸)$$

$$So_{i-}=(\sum_{j=1}^{n}(v_{ij}-v_{j}^{-})^{2})^{0.5} \quad i=1,2,3,...,m \quad (۲۹)$$

مرحله ۵) رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از رابطه (۳۰) انجام می‌گیرد.

$$C_{i}=So_{i-}\Big/\left(So_{i-}+So_{i+}\right) \quad (۳۰)$$

در نهایت نقطه بهینه دارای بیشترین مقدار C خواهد بود.

۴- شبکه تست و نتایج عددی

در راستای پیاده‌سازی طرح پیشنهادی، مراحل انجام شبیه‌سازی مطابق فلوچارت ارائه شده در شکل (۶) است. همانگونه که مشاهده

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

می‌شود ابتدا به بررسی هماهنگی بین رله‌ها با روش متداول و در شرایط عملکرد سریع رله دوردست پرداخته می‌شود تا ناکارآمدی این روش برای جریان‌های دو سطحی نشان داده شود. در ادامه روش مبنی بر لحاظ مدل دینامیکی برای حل مشکل یاد شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، به جهت کاهش زمان عملکرد رله‌ها روش پیشنهادی بر مبنای استفاده از ضریب جریان خطا شبیه‌سازی شده و نتایج آن مطالعه می‌شود. لازم به ذکر است که طرح پیشنهادی به صورت اقتصادی مدل شده است تا تعداد رله‌های عددی مورد استفاده در این طرح حداقل گردند.

شکل (۶): نمایش مراحل شبیه‌سازی

۴-۱- شبکه تست

در این بخش، کارآمدی هر یک از روش‌های مطرح شده، با شبیه‌سازی روی بخش توزیع سیستم ۱۴ باسه استاندارد IEEE مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تمامی رله‌های موجود در شبکه، منحنی مشخصه زمان کاهشی نرمال در نظر گرفته شده است. در راستای محاسبه تنظیمات زمانی، جریانی و ضریب K برای هر یک از رله‌ها، در قیود مسئله بهینه‌سازی مقادیر $TDS^{h}_{\min}$ و $TDS^{h}_{\max}$ به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۳/۲، مقادیر $I^{h}_{p_{\min}}$ و $I^{h}_{p_{\max}}$ نیز به ترتیب برابر با ۱/۱ و ۱/۳ برابر جریان بار، مقادیر $K^{h}_{\min}$ و $K^{h}_{\max}$ نیز به ترتیب برابر با ۱ و ۲۴ لحاظ می‌شود. مقدار CTI نیز برای برقراری قیود هماهنگی برابر با ۰/۲ لحاظ شده است.

۴-۲- نتایج عددی

در این بخش، نتایج همه روش‌های مطرح شده، مورد بررسی قرار می‌گیرند. ابتدا نتایج روش متداول بررسی می‌شود. سپس هماهنگی با لحاظ مدل دینامیکی و روش مبتنی بر استفاده از ضریب جدید ارائه می‌شود. نهایتا به تحلیل نتایج مدل فنی-اقتصادی پرداخته شده است.

۴-۲-۱- نتایج روش متداول

در این قسمت، هماهنگی رله‌ها با روش متداول مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا با حل مسئله بهینه‌سازی به روش متداول بر مبنای جریان خطای تک‌سطحی، تنظیمات بهینه زمانی و جریانی برای رله‌ها بدست آمده است. با تنظیمات بهینه، زمان‌های عملکرد برای جفت رله‌ها مطابق جدول (۱) محاسبه شده است. این زمان‌ها با لحاظ عملکرد سریع رله دوردست بدست آمده‌اند. زیرا در دو طرف خط با توجه به جریان خطا و تنظیمات متفاوت، رله‌های دو سمت خط با هم عمل نخواهندکرد. عملکرد سریع‌تر رله دوردست باعث می‌شود در طول خطا میزان جریان خطای دیده شده توسط رله تغییر کند و زمان‌های بدست آمده در این دو حالت متفاوت خواهند بود. یعنی رله‌ها با توجه به تغییر جریان خطا زمان عمکرد متفاوتی نشان می‌دهند. برای بررسی این موضوع می‌توان Δtهای جدول (۱) را مورد تحلیل قرار داد. مقدار نامنفی Δt در این جدول، بیانگر وجود هماهنگی بین رله‌ها و مقدار منفی Δt بیانگر وجود عدم هماهنگی می‌باشد. لذا این روش برای شبکه‌های حلقوی مناسب به نظر نمی‌رسد.

جدول (۱): زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان با روش متداول

جفت رله	موقعیت خطا	رله اصلی	رله پشتیبان	$t_{primary}$	t_{backup}	Δt
۱	FP1	R1	R9	۰/۸۵۶۰	۱/۰۵۵۷	**-۰/۰۰۰۳**
۳	FP1	R1	R9	۰/۸۵۷۲	۱/۰۵۶۴	**-۰/۰۰۰۷**
۸	FP2	R13	R15	۲/۱۱۳۳	۲/۳۸۴۱	۰/۰۷۰۸
۱۳	FP4	R6	R8	۱/۴۶۲۵	۱/۶۵۵۸	**-۰/۰۰۶۷**
۱۵	FP5	R5	R6	۱/۳۶۶۸	۱/۵۴۷۸	**-۰/۰۱۸۹**
۱۶	FP5	R5	R6	۱/۳۶۸۶	۱/۵۵۶۷	**-۰/۰۱۱۹**
۱۸	FP7	R8	R3	۱/۵۵۶۰	۱/۸۱۵۷	۰/۰۵۹۷
۲۰	FP8	R8	R3	۱/۳۷۴۱	۱/۵۶۸۷	**-۰/۰۰۵۴**

۴-۲-۲- نتایج استفاده از مدل دینامیکی

وجود ناهماهنگی بین رله‌ها در روش قبل باعث ناکارآمدی آن بوده و لذا از مدل دینامیکی در این قسمت استفاده می‌شود. در این قسمت هماهنگی بین رله‌ها به صورت بهینه و با لحاظ مدل دینامیکی برای عملکرد رله‌ها انجام شده است. بعد از انجام پروسه بهینه‌سازی، با لحاظ جریان خطای دوسطحی، تنظیمات بهینه رله‌ها بدست آمده و تمامی مقادیر بهینه در قیود مسئله بهینه‌سازی صدق می‌کنند. تنظیمات بهینه نیز در بازه‌های مناسب مربوط به خود قرارگرفته‌اند. با این تنظیمات و خطاهای دوسطحی، زمان عملکرد رله‌ها مطابق جدول (۲) بدست می‌آید. با بررسی مقدار Δt برای خطاهای مختلف مشخص می‌شود که هماهنگی بین همه جفت رله‌ها با توجه به مقدار نامنفی Δt برآورده شده است. در این روش مجموع زمان عملکرد رله‌ها برابر با ۱۵/۶۰۷ ثانیه می‌باشد. همانگونه که مشخص است با لحاظ مدل دینامیکی علاوه بر حل مشکل عدم هماهنگی، زمان عملکرد رله‌ها نیز کاهش می‌یابد. اما همچنان می‌توان علاوه بر برآورد ساختن قیود انتخاب‌گری، حفاظتی سریع‌تری نیز ارائه کرد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

جدول (۲): زمان عملکرد رله‌ها با استفاده از مدل دینامیکی

جفت رله	موقعیت خطا	رله اصلی	رله پشتیبان	$t_{primary}$	t_{backup}	Δt
۱	FP1	R1	R9	۰/۴۴۱۲	۰/۶۷۴۱	۰/۰۳۲۹
۳	FP1	R1	R9	۰/۴۳۹۴	۰/۶۷۲۷	۰/۰۳۳۴
۸	FP2	R13	R15	۰/۶۰۱۳	۰/۸۰۱۳	۰
۱۳	FP4	R6	R8	۰/۴۱۸۲	۰/۶۵۸۰	۰/۰۳۹۸
۱۵	FP5	R5	R6	۰/۶۱۶۳	۰/۸۱۶۳	۰
۱۶	FP5	R5	R6	۰/۶۱۹۷	۰/۸۱۹۷	۰
۱۸	FP7	R8	R3	۰/۶۳۵۲	۰/۸۸۱۸	۰/۰۵۶۶
۲۰	FP8	R8	R3	۰/۵۵۹۷	۰/۷۶۱۳	۰/۰۰۱۶

۴-۲-۳- نتایج مدل فنی-اقتصادی پیشنهادی

در این بخش به هماهنگی رله‌ها با استفاده از روش پیشنهادی مبنی بر به‌کارگیری ضریب K با لحاظ جریان خطای دوسطحی پرداخته می‌شود. این ضریب در کنار جریان خطا اعمال شده و به صورت یک متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

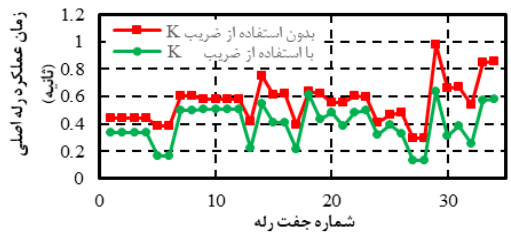
جدول (۳): تنظیم بهینه رله‌ها با روش پیشنهادی

شماره رله	پارامترها			شماره رله	پارامترها		
	TDS	I_p	K		TDS	I_p	K
R1	۰/۲۱۸	۱۷۴/۲	۱	R9	۳/۲	۱۴۶/۳	۱/۶
R2	۰/۱۰۴	۴۰۶/۹	۱	R10	۰/۴۰۷	۱۷۴/۲	۱
R3	۰/۳	۱۷۲/۹	۱	R11	۰/۳۶۶	۳۱/۹	۲۴
R4	۰/۱	۱۲۳/۲	۲۴	R12	۰/۹۷۹	۳۷/۷	۱
R5	۰/۱۸۸	۲۱۸/۴	۱	R13	۰/۱	۳۴۴/۳	۲۳
R6	۰/۱	۱۴۴/۳	۱/۱	R14	۳/۲	۱۲۷/۴	۱
R7	۳/۲	۸۸/۴	۱	R15	۰/۱۲۵	۱۲۷/۴	۱
R8	۰/۲۳۷	۸۸/۴	۱	R16	۲/۴۵۷	۲۱۸/۴	۱

بعد از اجرای پروسه بهینه‌سازی، مقادیر بهینه برای تنظیمات زمانی، جریانی و ضریب K از طریق حل این مسئله بهینه‌سازی مطابق جدول (۳) بدست می‌آید. با توجه به تنظیمات بدست آمده و با استفاده از روش پیشنهادی زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان مطابق جدول (۴) بدست می‌آید همانگونه که مشاهده می‌شود، با توجه به مقدار نامنفی Δtها برای تمامی موقعیت‌های خطا، می‌توان نتیجه گرفت که هماهنگی حفاظتی بر اساس روش پیشنهادی برای تمامی جفت رله‌ها برقرار می‌باشد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که زمان عملکرد رله‌ها به صورت چشمگیری کاهش داشته است. در این روش مجموع زمان عملکرد رله‌ها برابر با ۱۰/۹۷۱ ثانیه می‌باشد که نسبت به حالت قبل ۲۹/۷ درصد کاهش یافته است. ولی باید به این موضوع توجه داشت که در این روش باید تمامی رله‌ها به رله‌های عددی تغییر یابند تا این کاهش صورت گیرد و این موضوع نیازمند هزینه زیادی است. لذا در ادامه به نتایج حاصله از مدل فنی-اقتصادی پرداخته خواهد شد تا با بهینه تعداد رله‌ها به هدف مطلوب برسیم. همانگونه که قبلا بیان شد در پیاده‌سازی روش پیشنهادی نیاز به تغییر رله‌ها و استفاده از رله‌های عددی است. در این مرحله مدل فنی-اقتصادی اجرا می‌شود تا کمینه مقدار رله‌های عددی مشخص گردد. نمودار پارتو حاصله در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل محور افقی نمودار، بیانگر میزان استفاده از رله‌های عددی (برحسب درصد) و محور عمودی نمودار، بیانگر مقدار تابع هدف مسئله بهینه‌سازی (حداقل‌سازی مجموع زمان عملکرد رله‌ها) می‌باشد.

جدول (۴): زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان بر اساس روش پیشنهادی

جفت رله	موقعیت خطا	رله اصلی	رله پشتیبان	$t_{primary}$	t_{backup}	Δt
۱	FP1	R1	R9	۰/۳۳۹۹	۷/۵۲۷۵	۶/۹۸۷۶
۳	FP1	R1	R9	۰/۳۴۰۰	۷/۵۲۶۲	۶/۹۸۶۳
۸	FP2	R13	R15	۰/۴۹۶۵	۱/۰۸۸۳	۰/۳۹۱۸
۱۳	FP4	R6	R8	۰/۲۲۶۲	۰/۴۵۹۴	۰/۰۳۳۲
۱۵	FP5	R5	R6	۰/۴۰۷۲	۰/۶۰۷۲	۰
۱۶	FP5	R5	R6	۰/۴۱۰۷	۰/۶۱۰۷	۰
۱۸	FP7	R8	R3	۰/۶۱۱۶	۰/۸۸۸۸	۰/۰۷۷۲
۲۰	FP8	R8	R3	۰/۴۸۶۴	۰/۷۰۵۳	۰/۰۱۸۹

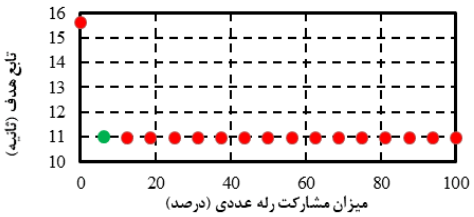


شکل (۷): مقایسه زمان عملکرد رله‌های اصلی

زمان عملکرد رله اصلی با استفاده از مدل دینامیکی و روش پیشنهادی بر مبنای استفاده از ضریب جدید K در شکل (۷) نشان داده شده است که کاهش زمان عملکرد رله با استفاده از روش پیشنهادی نتیجه‌گیری می‌شود. با توجه به نمودار پارتو، با افزایش تعداد رله‌های عددی به کار رفته در شبکه، مجموع زمان عملکرد رله‌ها کاهش پیدا می‌کند. استفاده حداقلی از رله‌های عددی نسبت به حالت بدون رله عددی باعث کاهش مقدار تابع هدف از ۱۵/۶۰۷ ثانیه به ۱۰/۹۸۸ ثانیه می‌شود. به عبارتی، مجموع زمان عملکرد رله‌ها کاهش چشمگیر ۲۹/۵ درصدی پیدا می‌کند. همانگونه که از نمودار نیز مشخص است کاهش زمان عملکرد رله‌ها از درصد خاصی به بعد زیاد نیست و نمودار به اشباع می‌رسد. لذا در این مرحله لازم است با استفاده از یک تصمیم‌گیر، مقدار بهینه برای این مسئله مشخص گردد. به عبارت بهتر، استفاده از رله‌های عددی هزینه‌بر خواهد بود که برای رسیدن به یک نقطه بهینه، مسئله به صورت یک تابع چند هدفه تعریف شده است و با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری تاپسیس نقطه موردنظر بدست می‌آید. این راه‌حل به صورت مربع سبز رنگ در شکل (۸) مشخص شده است. نتایج الگوریتم تاپسیس مطابق جدول (۵) می‌باشد. در این مسئله نقطه دوم که بیانگر مشارکت یک رله عددی در شبکه موردنظر می‌باشد با دارا بودن بیشترین مقدار C در الگوریتم تاپسیس به عنوان نقطه بهینه جهت مصالحه بین زمان عملکرد رله‌ها و هزینه معرفی شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]



شکل (۸): نمودار پارتو

جدول (۵): نتایج الگوریتم تاپسیس برای انتخاب نقطه بهینه

C	تابع هدف	میزان مشارکت (٪)	C	تابع هدف	میزان مشارکت (٪)
۰/۴۷	۱۰/۹۷۱	۵۶/۲۵	۰/۸۱	۱۵/۶۰۷	۰
۰/۴۲	۱۰/۹۷۱	۶۲/۵	**۰/۹۴**	**۱۰/۹۸۸**	**۶/۲۵**
۰/۳۶	۱۰/۹۷۱	۶۸/۷۵	۰/۸۸	۱۰/۹۷۶	۱۲/۵
۰/۳۲	۱۰/۹۷۱	۷۵	۰/۸۲	۱۰/۹۷۳	۱۸/۷۵
۰/۲۷	۱۰/۹۷۱	۸۱/۲۵	۰/۷۶	۱۰/۹۷۱	۲۵
۰/۲۴	۱۰/۹۷۱	۸۷/۵	۰/۷۰	۱۰/۹۷۱	۳۱/۲۵
۰/۲۱	۱۰/۹۷۱	۹۳/۷۵	۰/۶۴	۱۰/۹۷۱	۳۷/۵
۰/۱۹	۱۰/۹۷۱	۱۰۰	۰/۵۸	۱۰/۹۷۱	۴۳/۷۵
			۰/۵۳	۱۰/۹۷۱	۵۰

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله نشان داد که به علت وجود جریان‌های خطای دوسطحی هماهنگی با روش‌های متداول امکان‌پذیر نیست. حل این مشکل نیازمند استفاده از مدل دینامیکی رله‌ها است که آن نیز در شبکه‌های بزرگ باعث عدم هماهنگی و یا افزایش زمان عملکرد رله‌ها می‌شود. بنابراین، در این مقاله یک روش جدید برای هماهنگی رله‌ها ارائه شد. در این روش با لحاظ مدل دینامیکی رله‌ها و معرفی متغیر جدید K در مدل مربوط به زمان عملکرد رله‌ها سعی شد تا علاوه بر برآوردسازی هماهنگی بین رله‌ها، حفاظتی سریع ارائه شود. اگرچه این ضریب فضای بهینه‌سازی را ساده کرده و حفاظت سریع‌تری ارائه می‌دهد ولی ممکن است باعث عملکرد اشتباه در شرایط عادی شبکه شود. لذا برای پوشش این ایراد، یک منطق جدید با قابلیت پیاده‌سازی در رله‌های عددی ارائه گردید. از آنجایی که این روش نیازمند به کارگیری رله‌های عددی است، روش پیشنهادی به صورت فنی-اقتصادی مدل شد تا با حداقل تعداد رله عددی، حفاظتی سریع و انتخاب‌گر ارائه شود. با توجه به نتایج مشاهده شد که این روش می‌تواند یک حفاظت انتخاب‌گر معرفی نماید. همچنین زمان عملکرد رله‌ها نیز کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد به طوریکه استفاده حداقلی از رله‌های عددی نسبت به حالت بدون رله عددی باعث کاهش مقدار تابع هدف از ۱۵/۶۰۷ ثانیه به ۱۰/۹۸۸ ثانیه می‌شود به عبارتی مجموع زمان عملکرد رله‌ها کاهش چشمگیر ۲۹/۵ درصدی پیدا می‌کند.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گرنت شماره۴۹۸۷ مورخ ۱۴۰۲/۰۳/۰۶ انجام گردیده است.

مراجع

[1] R. Jafari, Gevorg B. Gharehpetian, "Compensation of DGs impact on overcurrent protection system of smart micro-grids". 2013.

[2] Baghery A, Aghaei H, Shamsi M, Abedi M, Hashemi-Dezaki H. Optimal Combined and Adaptive Protection of Active Distribution Networks Considering Different System Topologies Incorporating Optimal Selection of Standard Relay Curves. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2022; 19 (4) :223-239

[3] Chen, M., et al. "Minimum break relay dependency set approach for coordination of directional relays in multi-loop networks", IET GTD, vol. 11, no. 5, 2017.

[4] Ataee-Kachoee A, Hashemi-Dezaki H, Ketabi A. Protection Coordination of Microgrids Using Dual Setting Directional Overcurrent Relays Based on Optimal Operating Characteristics and Curve Breakpoints. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (2) :111-130

[5] R. Mohammadi Chabanloo, et al. "A fast numerical method for optimal coordination of overcurrent relays in the presence of transient fault current", IET GTD, vol. 12, no. 2, 2018.

[6] M. Ghotbi, et al. "Mixed-integer linear programming method for coordination of overcurrent and distance relays incorporating overcurrent relays characteristic selection", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 110, no. 1, 2019.

[7] R. Corrêa, et al. "Online coordination of directional overcurrent relays using binary integer programming", Electric Power Systems Research, vol. 127, no. 1, 2015.

[8] A. Vasileios et al. "A novel quadratically constrained quadratic programming method for optimal coordination of directional overcurrent relays", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 1, 2015.

[9] N. Sethembiso, et al. "Effects of particle swarm optimization and genetic algorithm control parameters on overcurrent relay selectivity and speed", IEEE Access, vol. 10, no. 1, 2022.

[10] sh. Meng Yen, et al. "A two stage fault current limiter and directional overcurrent relay optimization for adaptive protection resetting using differential evolution multi-objective algorithm in presence of distributed generation", EPSR, vol. 190, no. 1, 2021.

[11] A. Yazdaninejadi, et al. "A new protection algorithm for tackling the impact of fault-resistance and cloud energy storage on coordination of recloser-fuse protection", IET GTD, vol. 17, no.8, 2022.

[12] H. Ebrahimi, et al. "An ENS-Oriented voltage protection scheme for inverter-based generators in active distribution networks", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no .4, 2022.

[13]Vasconcelos, Luis Henrique Pereira, et al. "Hybrid optimization algorithm applied to adaptive protection in distribution systems with distributed generation", EPSR, vol. 202, no. 1, 2022.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]

[14] M. Sadeghi, et al. “Optimal placement and sizing of hybrid superconducting fault current limiter for protection coordination restoration of the distribution networks in the presence of simultaneous distributed generation”, EPSR, vol. 201, no. 1, 2021.

[15] A.Yazdaninejadi, et al. “A dynamic objective function for communication-based relaying: Increasing the controllability of relays settings considering N-1 contingencies”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 116, no. 1, 2020.

[16] A. Yazdaninejadi, Gevork B. Gharehpetian, “Protection coordination of directional overcurrent relays: new time current characteristic and objective function”. IET GTD 12, no. 1, 2018.

[17] M. Ojaghi, et al. “Piece–wise linear characteristic for coordinating numerical overcurrent relays”, IEEE PWRD, vol. 32, no. 1, 2016.

[18] A. Yazdaninejadi, et al. “Dual-setting directional over-current relays: An optimal coordination in multiple source meshed distribution networks”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 86, no. 1, 2017.

[19] T. Amraee, “Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm”, IEEE PWRD, vol. 27, no. 3, 2012.

[20] L. Ying, et al. “Detecting and solving the coordination curve intersection problem of overcurrent relays in subtransmission systems with a new method”, EPSR, vol. 95, no. 1, 2013.

[21] N. Mohammadzadeh, et al. “Optimal coordination of directional overcurrent relays considering two-level fault current due to the operation of remote side relay”, EPSR, vol. 175, no. 1, 2019.

[22] Zh. Wang, “Application and analysis of methods for selecting an optimal solution from the Pareto-optimal front obtained by multiobjective optimization”, Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 56, no. 2, 2017.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-02-17]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.147]