Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 1-18

Vol. 11/ No. 3/ Fall 2022
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Optimal Adaptive Protection of Active Distribution Networks Using Optimized Selection of Standard Characteristics for Directional Overcurrent Relays Considering Limits of Setting Groups' Number

Hamed Hashemi-Dezaki[1], Assistant Professor, Mohammad Shamsi[2], M.Sc. Student
1- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.
Email: hamed.hashemi@kashanu.ac.ir
2- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.
Email: mohammad.shamsi@grad.kashanu.ac.ir

Abstract:

Changes in configurations of distribution networks due to the outages of any upstream substations or distributed generations (DGs) are one of the essential challenges in the design of active distribution networks (ADNs). Changes in network topologies affect protective schemes and might lead to coordination constraint violations in different operation modes and configurations. It is inevitable to appear some coordination constraint violations if only the base grid-connected operation mode and configuration are considered in optimal protection settings. Adaptive protective schemes have several advantages compared to those using only one setting group, and their speed would be more desired. Although different research works have been done in the literature on adaptive protective schemes, there is a research gap in considering the limited number of setting groups for directional overcurrent relays (DOCRs), besides other aspects of ADNs and adaptive schemes. Indeed, adaptive protection schemes, which need numerous setting groups for various configurations and operation modes, would not be useful and satisfying. This research tries to fill this gap by proposing a new optimized adaptive protection system, considering various network configurations, by the limited number of setting groups. Since the proposed optimal settings for DOCRs are applied to a limited number of setting groups, it would be practical. The independent activated and assigned setting groups for DOCRs in the introduced protective scheme facilitate the satisfaction of protection coordination constraints and concerns regarding the speed of the protection system. Optimizing the standard relay characteristics in the proposed method is another contribution. Test results of applying the proposed method on the distribution portion of the IEEE 30-bus test system highlight the advantages of this study. The optimization problem is simulated and solved in DIgSILENT and MATLAB environments. Also, the genetic algorithm (GA) is used to solve the introduced optimization problem, which is implemented in the MATLAB environment. Simulation results infer that a 54.27% improvement in the operating time of the protection system is achievable through applying the proposed method compared to available adaptive ones because of optimizing the relay characteristics. The advantages of smart selection of relay curve types in the proposed method, considering the limits in the number of setting groups, are more important than other schemes based on the base grid-connected mode and configuration of the ADNs. Moreover, the results highlight the advantages of the proposed protective scheme compared to the non-adaptive scheme, using only one setting group corresponding to all configurations and operation modes.

Keywords: Active distribution networks (ADNs), Adaptive protection, Different operation modes, Different network configurations, Directional overcurrent relays (DOCRs), Optimal selection of standard, relay characteristics, Setting groups, Genetic algorithm (GA)

Submit date: 2022/02/06
Accepted date: 2022/06/19

Corresponding author Name: Hamed Hashemi-Dezaki
Corresponding author address: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

Iranian Electric Industry Journal **Vol. 11 / No. 3/ Fall 2022**
Quality & Productivity **ISSN 2322-2344**
ص.ص ۱۸-۱ **EISSN 2717-1639**

حفاظت تطبیقی بهینه شبکه‌های توزیع فعال با انتخاب منحنی‌مشخصه استاندارد بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار و درنظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

نوع مطالعه: پژوهشی

محمد شمسی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد، حامد هاشمی دزکی[۲]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران
– mohammad.shamsi@grad.kashanu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران
– hamed.hashemi@kashanu.ac.ir

چکیده: تغییر در آرایش شبکه‌های توزیع ناشی از خروج یکی از پست‌های بالادست یا منابع تولید پراکنده، یکی از چالش‌های اساسی طراحی شبکه‌های توزیع خواهد بود که تاثیر بسزایی در طرح‌های حفاظتی و نقض قیود هماهنگی در حالات مختلف بهره‌برداری خواهد گذاشت. درصورت عدم توجه به پیکربندی‌های شبکه، بروز نقض قیدهای هماهنگی در سایر پیکربندی‌های شبکه ناشی از خروج یکی از منابع تولید یا پست‌های بالادست اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. طرح‌های حفاظت تطبیقی نسبت به طرح‌هایی که تنها از یک گروه‌تنظیم حفاظتی استفاده می‌نمایند، برتری داشته و سرعت عملکرد بهتری خواهند داشت. از خلاءهای تحقیقاتی که کم‌تر به آن‌ها توجه شده است، محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم نسبت به حالات بهره‌برداری است. رویکرد ارائه‌شده در این مقاله، حفاظت تطبیقی با درنظرگرفتن آرایش‌های مختلف شبکه با بهره‌مندی از قابلیت گروه‌های تنظیم مختلف رله‌های اضافه‌جریان است. با توجه به محدودیت در مورد تعداد گروه‌تنظیم‌های موجود در رله‌های تجاری، در طرح پیشنهادی تنظیمات بهینه‌ی رله‌های اضافه‌جریان برای حالات مختلف شبکه با درنظرگرفتن تعداد محدود گروه‌های تنظیم رله‌ها به‌دست خواهد آمد. یکی از مزایا و نوآوری‌های روش پیشنهادی، بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه‌ی رله‌های حفاظتی در کنار بهینه‌سازی تنظیمات زمانی و جریانی است که در طرح‌های حفاظت تطبیقیِ پیشین کم‌تر به آن توجه شده بود. افزایش زمان طرح حفاظت تطبیقی ناشی از اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی نسبت به شرایطی که تعداد گروه‌های تنظیمی محدود نباشد، به میزان ۵۳/۷۹٪ است. این میزان افزایش در زمان‌عملکرد سیستم حفاظتی در کنار عملیاتی- بودن طرح حفاظتی پیشنهادی، مزایای روش ارائه‌شده در این مقاله را برجسته می‌سازد. ضمناً نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE دلالت بر برتری قابل توجه ۵۴/۲۷٪ در زمان‌عملکرد سیستم حفاظتی نسبت به طرح‌های حفاظت تطبیقی با منحنی‌مشخصه پیش‌فرض دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع فعال، حفاظت تطبیقی، حفاظت بهینه، پیکربندی‌های مختلف شبکه، رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار، انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه استاندارد، محدودیت گروه‌های تنظیم مختلف رله‌ها، الگوریتم ژنتیک، DIgSILENT.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر حامد هاشمی دزکی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

علائم و اختصارات

c	شاخص پیکربندی‌های مختلف شبکه
i	شاخص رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار اصلی
j	شاخص رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار پشتیبان
N_c	مجموع تعداد پیکربندی‌های شبکه
T_c	مجموع زمان‌عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در پیکربندی cاُم
SG	گروه‌تنظیم‌های رله‌های حفاظتی که به پیکربندی‌های مختلف تخصیص داده می‌شود.
CS^s	منحنی‌مشخصه بهینه‌شده در sاُمین گروه‌تنظیم
TDS^s	تنظیم‌زمانی در sاُمین گروه‌تنظیم
PCS_i^s	تنظیم‌جریانی رله iاُم در sاُمین گروه‌تنظیم
$t_{i,c}$	زمان‌عملکرد رله اصلی iاُم در پیکربندی cاُم
$t_{j,c}$	زمان‌عملکرد رله پشتیبان j اُم در پیکربندی cاُم
A_i^c	مقدار ضریب A برای رله iاُم در پیکربندی cاُم
B_i^c	مقدار ضریب B برای رله iاُم در پیکربندی cاُم
s	شاخص بیانگر گروه‌های تنظیم
TDS_i^c	تنظیم‌زمانی رله iاُم در پیکربندی cاُم
I_f^c	مقدار جریان‌خطا در پیکربندی cاُم
N_{SG}	حداکثر تعداد گروه‌تنظیم رله‌های حفاظتی
CS_i^c	منحنی‌مشخصه بهینه‌شده رله iاُم در پیکربندی cاُم
TDS_i^c	تنظیم‌زمانی رله iاُم در پیکربندی cاُم
PCS_i^c	تنظیم‌جریانی رله iاُم در پیکربندی cاُم
CS_i^s	منحنی‌مشخصه بهینه‌شده رله iاُم در sاُمین گروه‌تنظیم
TDS_i^s	تنظیم‌زمانی رله iاُم در sاُمین گروه‌تنظیم
PCS_i^s	تنظیم‌جریانی رله iاُم در sاُمین گروه‌تنظیم
CTI	فاصله زمانی هماهنگی
TDS_i	تنظیم‌زمانی رله iاُم
$TDS_i^{\min}$	مقدار تنظیم‌زمانی کمینه رله iاُم
$TDS_i^{\max}$	مقدار تنظیم‌زمانی بیشینه رله iاُم
PCS_i	تنظیم‌جریانی رله iاُم
$PCS_i^{\min}$	مقدار تنظیم‌جریانی کمینه رله iاُم
$PCS_i^{\max}$	مقدار تنظیم‌جریانی بیشینه رله iاُم

۱- مقدمه

تجهیزات سیستم‌قدرت و انرژی الکتریکی معمولاً از قیمت بالایی برخوردار می‌باشند، لذا حفاظت از سیستم‌قدرت و تجهیزات آن در مقابل خطرات از اهمیت بسیاری برخوردار است (Mahboubkhah, Talavat et al. 2020, Jazayeri, Shahgholian et al. 2021). یکی از این خطرات، خطرات ناشی از اتصال‌کوتاه می‌باشد که باعث ایجاد جریان بسیار بالایی، بالاتر از ظرفیت تجهیزات، می‌شود که در صورت قطع‌نشدن این جریان، صدمات زیادی به شبکه وارد می‌شود (ghanbari, gandomkar et al. 2020, Rahimi, Fani et al. 2020)؛ لذا برای حافظت شبکه در مقابل اتصال‌کوتاه نیاز به حفاظت‌هایی می‌باشد تا خطرات را تشخیص داده، دستور قطع را صادر کنند و از صدمات جلوگیری شود (El-Naily, Saad et al. 2020, Yazdaninejadi, Nazarpour et al. 2020). رله‌های اضافه‌جریان شامل رله‌های حافظتی جهت‌دار و غیرجهت‌دار به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌قدرت به‌عنوان وسایل اصلی حفاظتی استفاده می‌شوند، زیرا قابل‌اعتماد و مقرون به‌صرفه هستند (Alam, Das et al. 2020). عموماً خواسته‌های طرح‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع متداول و شبکه‌های توزیع فعال و شبکه‌های هوشمند انرژی الکتریکی در سطح توزیع با رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار پاسخ داده می‌شود. باید بیان نمود که طرح‌های حفاظتی مانند استفاده از رله‌های دیفرانسیل و رله‌های مبتنی بر امپدانس نیز در مراجعی مانند (Kazemi Karegar and Abbasi 2019) ارائه شده است. با این‌وجود، این طرح‌های حفاظتی نسبت به طرح‌های حفاظتی مبتنی بر رله‌های اضافه‌جریان نیاز به تغییرات گسترده در شبکه حفاظت فعلی سیستم‌های توزیع خواهند داشت که در عمل، استفاده از آن‌ها را محدود خواهد ساخت.

در کنار تمام مزایایی که منابع تولید پراکنده دارند، استفاده از منابع در شبکه‌های توزیع و تبدیل شبکه‌های توزیع به شبکه‌های توزیع فعال، چالش‌هایی را برای طرح‌های حفاظتی ایجاد می‌نماید (Alam, Das et al. 2020, Elmitwally, Kandil et al. 2020). با تغییر آرایش و پیکربندی شبکه، ناشی از اتصال یا عدم‌اتصال منابع تولیدپراکنده یا پست‌های بالادست، چالش‌های جدیدی برای سیستم‌های حفاظتی نمایان می‌شود (Mahboubkhah, Talavat et al. 2020, Sadeghi, Dastfan et al. 2021). از سویی، عدم‌استفاده از قابلیت‌های بهره‌برداری شبکه‌های توزیع فعال به‌صورت متصل‌به‌شبکه، جزیره‌ای و ... نیز مطلوب نیست. از این‌رو، درصورت ایجاد تغییرات در آرایش شبکه، مقدار و جهت جریان‌خطا دچار تغییر می‌شود (Amraee, Ranjbar et al. 2018). در چنین مواقع، هماهنگی حفاظتی نیز ممکن است دچار اختلال شود (Urdaneta, Perez et al. 1997, Nascimento, Brito et al. 2020).

حفاظت شبکه‌های توزیع فعال با درنظرگیری شرایط مختلف بهره‌برداری و برای جلوگیری از نقض قیود هماهنگی در شرایط مختلف،

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. راهکارها و روش‌های مختلفی مبتنی بر بسترهای مخابراتی و یا اندازه‌گیری محلی توسط رله‌ها در کارهای پیشین پیشنهاد شده است. برای مثال، نویسندگان در (Elmitwally, Kandil et al. 2020) با استفاده از محدودکننده جریان‌خطا سعی بر ایجاد هماهنگی حفاظتی در شرایط مختلف شبکه و بهبود عملکرد سیستم حفاظتی نموده‌اند.

یک راه‌حل مناسب دیگر برای حل مشکلات هماهنگی حفاظتی در ریزشبکه‌ها، استفاده از لینک‌های گسترده مخابراتی است (۲۰۱۷). ازین‌رو نویسندگان در (Sharaf, Zeineldin et al. 2018, Alam 2019, Darabi, Bagheri et al. 2020) طرح‌های حفاظتی مبتنی بر لینک‌های مخابراتی را پیشنهاد داده‌اند. از سوی دیگر، در مقالاتی مانند (Saleh, Zeineldin et al. 2017, Entekhabi-Nooshabadi, Hashemi-Dezaki et al. 2021)، روشی برای هماهنگی رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار با درنظرگیری آرایش‌های مختلف شبکه، مبتنی بر اختصاص یک گروه‌تنظیم به رله‌ها ارائه شده است؛ عیب این روش افزایش زمان‌عملکرد رله‌ها به‌دلیل افزایش قیود هماهنگی حفاظتی پیکربندی‌های مختلف شبکه است. در شبکه‌های توزیع فعال که درجه هوشمندی و بستر مخابراتی پایین باشد، این رویکرد می‌تواند برتری عملیاتی داشته باشد. اما از سوی دیگر، اگر بسترهای مخابراتی برای پیاده‌سازی طرح‌های نوین در دسترس باشد، می‌تواند به زمان‌عملکرد و سرعت بهتری از طرح‌های حفاظتی در سیستم‌های حفاظتی مبتنی بر ارتباط مخابراتی دست یافت.

حفاظت تطبیقی، یکی از مطلوب‌ترین رویکردها برای رفع مشکل هماهنگی حفاظتی شبکه‌های توزیع فعال در آرایش‌های مختلف است، که در بسیاری از مقالات به آن توجه شده است (Alam 2019). در حفاظت تطبیقی، لزوم پایش آرایش و پیکربندی شبکه و تخصیص گروه‌تنظیم مربوط به آن آرایش ضروری است. در طرح‌های حفاظتی تطبیقی، تعداد قیود هماهنگی مسئله افزایش پیدا نکرده و امکان دست‌یابی به طرح‌های حفاظتی سریع تسهیل می‌شود.

در مطالعات قبلی در زمینه حفاظت تطبیقی، محدودیت‌های موجود در مورد تعداد گروه‌تنظیم‌های رله‌های حفاظتی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. برای این‌که یک طرح حفاظت تطبیقی به‌سادگی قابل پیاده‌سازی باشد، انتخاب تعداد گروه‌تنظیم مختلف به‌تعداد گروه‌های تنظیم محدود در رله‌های تجاری ضروری است. اگرچه انتخاب تنظیمات پویا با تعداد گروه‌های تنظیم محدود نیز شدنی است، اما قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی را با چالش مواجه می‌سازد. در شرایطی که تعداد حالات بهره‌برداری بیشتر از تعداد گروه‌های تنظیم بیشتر باشد، باید راه‌حلی برای تخصیص گروه‌تنظیم یا تنظیم‌های مناسب به آرایش‌های مختلف پیشنهاد داد. در (Samadi and Mohammadi Chabanloo 2020) روشی مناسب مبنی بر حفاظت تطبیقی شبکه‌های توزیع فعال با درنظرگیری پیکربندی‌های مختلف شبکه به‌کمک اعمال تعداد گروه‌های تنظیم محدود به رله‌ها ارائه کرده‌اند. ترکیبی از تنظیمات مختلف در گروه‌های تنظیم مختلف برای هر آرایش خاص در (Samadi and Mohammadi Chabanloo 2020) توسعه داده شده است. در واقع، به‌جای اینکه در یک آرایش بهره‌برداری خاص، تمام رله‌های اضافه‌جریان از یک گروه‌تنظیم مشخص و یکسان استفاده کنند، به هر رله، یک تنظیم از یکی از گروه‌های تنظیمی تخصیص داده می‌شود. با چنین رویکردی، می‌توان با پیاده‌سازی منطق حفاظتی هوشمندتری، سرعت عملکرد سیستم حفاظتی و عدم تطابق تعداد گروه‌های تنظیم و حالات بهره‌برداری شبکه را حل نمود.

یکی دیگر از انواع روش‌های مناسب جهت کارآیی بهتر سیستم‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع، انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه رله است. درصورت بهره‌مندی از این راهکار، علاوه بر تنظیمات جریانی و زمانیِ رله‌های اضافه‌جریان، نوع منحنی‌مشخصه رله نیز بهینه خواهد شد و سبب ایجاد طرح‌های حفاظتی بهینه با زمان‌عملکرد کمتری می‌شود؛ رویکرد نویسندگان در (Ahmadi, Karami et al. 2017, Aghdam, Karegar et al. 2019, Alam 2019, Yazdaninejadi, Nazarpour et al. 2020) همین مبنا بوده است. در (Narimani and Hashemi-Dezaki 2021)، انتخاب منحنی‌مشخصه بهینه برای رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار با منحنی قطع اصلی و کمکی و درنظرگیری قیود پایداری گذرای منابع تولیدپراکنده پیشنهاد شده است. در پژوهش مذکور، نشان داده شده است که انتخاب منحنی‌مشخصه بهینه نسبت به تعیین یک مشخصه پیش‌فرض برای رله‌های حفاظتی می‌توان زمان‌عملکرد طرح‌های حفاظتی را بهبود داد.

در جدول (۱)، مرور منابع و مقایسه نقاط قوت و شاخص‌های فنی آن‌ها ارائه شده است. با توجه به جدول (۱)، دریافت می‌شود که خلأ تحقیقاتی در مطالعات انجام‌شده، عدم بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه‌ی رله‌های اضافه‌جریان در کنار طرح حفاظتی تطبیقی با درنظرگیری تعداد محدود گروه‌های تنظیم است. این مقاله، طح حفاظت تطبیقی نوینی را پیشنهاد خواهد داد که توسعه‌یافته روش بیان‌شده در (Samadi and Mohammadi Chabanloo 2020) با کمک انتخاب منحنی‌مشخصه بهینه استاندارد است.

در جدول شماره (۱)، روش‌های بهینه‌سازی GA (genetic algorithm)، ILP (integer linear programming)، seeker، MEFO (modified electromagnetic field optimization)، PSO & GA (particle swarm optimization & genetic algorithm) و PSO-ILP به‌ترتیب بیانگر الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، الگوریتم جست‌وجوگر، روش بهینه‌سازی میدان الکترومغناطیسی اصلاح‌شده، روش ترکیبیِ استفاده از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات و هم‌چنین بهره‌گیری از الگوریتم ازدحام ذرات و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به‌صورت یکپارچه می‌باشد.

در طرح پیشنهادی هماهنگی حفاظتی تطبیقی، تمام آرایش‌های مختلف شبکه ناشی از وصل یا قطع‌بودن منابع تولیدپراکنده یا پست‌های بالادست درنظر گرفته خواهد شد. متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

پیشنهادی، تنظیم‌جریانی، تنظیم‌زمانی و نوع منحنی‌مشخصه‌ی رله‌ها می‌باشند. همان‌گونه که بیان شد، برای هر رله، ۳ گروه‌تنظیم مختلف لحاظ خواهد شد. درنظرگرفتن ۳ گروه‌تنظیم برای هر رله بر اساس مشخصات رله‌های حفاظتی عددی تجاری می‌باشد. سپس ترکیب‌های مختلفی از این تنظیم‌ها برای آرایش‌های مختلف شبکه پیشنهاد می‌گردد. سرعت بهینه طرح حفاظتی و رعایت قیود هماهنگی حفاظتی در تمام آرایش‌های محتمل شبکه از مزایای روش پیشنهادی است.

روش پیشنهادی مبنی بر استفاده از حفاظت تطبیقی به‌همراه محدودیت تعداد گروه‌تنظیم بر روی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE اجرا می‌گردد. برای استخراج نتایج مربوط به مطالعات پخش‌بار و اتصال‌کوتاه به‌عنوان ورودی‌های مسئله بهینه‌سازی، از نرم‌افزار DIgSILENT بهره گرفته شده است. با کمک الگوریتم ژنتیک در MATLAB، مسئله‌ی بهینه‌سازی نیز پیاده‌سازی و حل خواهد شد.

جدول (۱): خلاصه مرور منابع و کارهای انجام شده در زمینه حفاظت شبکه‌های توزیع فعال

مرجع	سال	نوع رله		لینک مخابراتی	منابع تولیدپراکنده	پایداری منابع تولیدپراکنده	ابزار بهینه‌سازی	إعمال گروه‌تنظیم محدود	انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه
		اضافه‌جریان	اضافه‌جریان جهت‌دار						
(Alam 2019)	۲۰۱۹	×	✓	✓	✓	×	GA	×	×
Darabi, Bagheri et al. (2020)	۲۰۲۰	×	✓	✓	✓	✓	GA	×	×
Sharaf, Zeineldin et al. (2018)	۲۰۱۸	×	✓	✓	✓	×	-	×	×
Aghdam, Karegar et al. (2019)	۲۰۱۹	×	✓	×	✓	✓	ILP	×	✓
Ahmadi, Karami et al. (2017)	۲۰۱۷	✓	×	×	✓	✓	GA	×	✓
(Alam 2019)	۲۰۱۹	×	✓	×	✓	×	GA	×	✓
Yazdaninejadi, (Nazarpour et al. 2020	۲۰۲۰	×	✓	×	✓	✓	seeker	×	✓
Bouchekara, Zellagui et al. 2017	۲۰۱۷	×	✓	×	✓	×	MEFO	×	×
Chandra and Pradhan (2020	۲۰۲۰	×	×	×	✓	✓	-	×	×
(Pico, Celeita et al. 2016)	۲۰۱۶	×	✓	×	✓	✓	-	×	×
Narimani and Hashemi-(Dezaki 2021	۲۰۲۱	×	✓	×	✓	✓	PSO & GA	×	✓
Samadi and Mohammadi (Chabanloo 2020	۲۰۲۰	✓	✓	×	✓	×	PSO-ILP	✓	×
روش پیشنهادی		×	✓	×	✓	×	GA	✓	✓

نتایج به‌دست‌آمده دلالت بر برتری روش پیشنهادی با کمک حفاظت تطبیقی به‌همراه محدودیت تعداد گروه‌تنظیم و انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه رله‌ها دارد. درضمن گفتنی است که در مطالعات انجام-شده‌ی این مقاله، بر روی خروج پست‌های بالادست و حالات مختلف بهره‌برداری ناشی از خروج هر یک از پست‌ها در کنار آرایش متصل به شبکه و جزیره‌ای تمرکز شده است.

مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های موجود مانند روش ارائه شده در (Samadi and Mohammadi Chabanloo 2020)، نشان می‌دهد که انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه استاندارد برای رله‌های حفاظتی اضافه‌جریان جهت‌دار یک راهکار مناسب و از سوی دیگر عملیاتی است. عملیاتی‌بودن طرح پیشنهادی، انتخاب منحنی‌مشخصه استاندارد به‌سادگی بر روی تمام رله‌های تجاری است که نیاز به توسعه بستر نرم‌افزاری داخلی رله‌ها نخواهد داشت.

در ادامه، در فصل دوم مقاله، بیان مسئله و ضرورت انجام مسئله تشریح می‌شود. در فصل سوم و چهارم نیز، روش پیشنهادی و نتایج پیاده‌سازی آن ارائه خواهد شد. و در انتها و در فصل پنجم، جمع‌بعدی و نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

۲- بیان مسئله

قابلیت تغییر در پیکربندی شبکه‌های توزیع فعال، ناشی از اتصال منابع تولیدپراکنده یا پست‌های بالادست، باعث بروز تغییرات در اندازه و جهت جریان اتصال‌کوتاه خواهد شد؛ بنابراین در چنین شرایط، هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه‌جریان تنها مبتنی بر شبکه پایه و

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

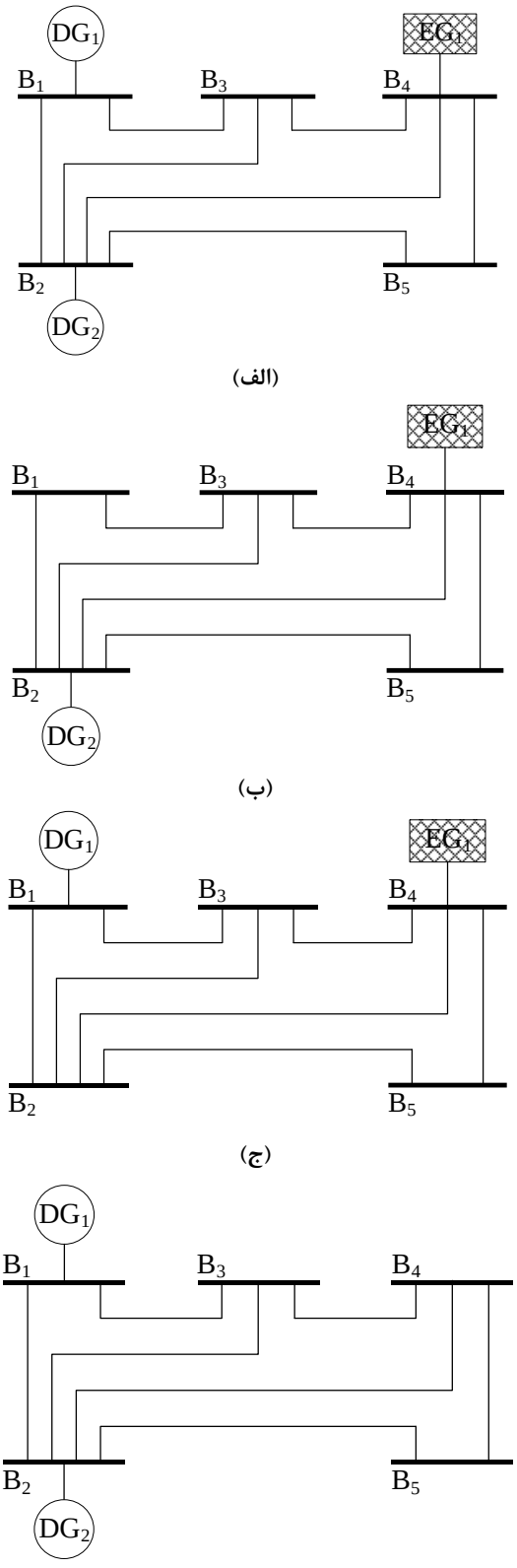
حالت بهره‌برداری متصل‌به‌شبکه دچار اختلال می‌شود. استفاده از قابلیت گروه‌تنظیم رله‌های اضافه‌جریان در طرح‌های حفاظتی تطبیقی، یکی از روش‌های پیشنهادی برای غلبه بر مشکلات هماهنگی حفاظتی ناشی از تغییر در آرایش و پیکربندی شبکه است. بنابراین، جهت حفاظت شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبکه‌ها در پیکربندی‌های مختلف شبکه، نیاز به گروه‌تنظیم به‌تعداد آرایش‌های مختلف شبکه است. به دلیل تعداد محدود گروه‌تنظیم رله‌های اضافه‌جریان، تخصیص یک گروه‌تنظیم به هر پیکربندی شبکه امکان‌پذیر نیست.

برای توصیف بهترِ مسئله‌ی فوق، شبکه ۵ شین نشان‌داده‌شده در شکل (۱) را به‌عنوان یک شبکه ساده نشان داده شده است؛ برقراری اتصال شبکه با منابع تولیدپراکنده و پست بالادست، منجر به چهار پیکربندی مختلف شبکه خواهد شد. در چنین شرایطی، اگر رله‌های حفاظتی تنها ۳ گروه‌تنظیم مختلف داشته باشند، پیاده‌سازی طرح حفاظت تطبیقی بدون درنظرگیری محدودیت تعداد گروه‌های تنظیم شدنی نیست. برای حل این مشکل، دو رویکرد مختلف می‌توان داشت، یکی خوشه‌بندی حالات مختلف بهره‌برداری و کاهش تعداد خوشه‌ها به کم‌تر از تعداد گروه‌های تنظیمی یا ترکیبی از تنظیم رله‌ها در گروه‌های تنظیم مختلف در هر آرایش است. رویکرد دوم در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. رویکرد دوم از لحاظ اینکه ترکیب‌های مختلفی از تنظیم‌های رله‌ها در گروه‌های تنظیم مختلف را می‌توان انتخاب نمود و به هر آرایش تخصیص داد، برتری‌هایی دارد.

با وجود مزایای روش پیشنهادی بر اساس ترکیبی از تنظیم رله‌ها در گروه‌های تنظیم مختلف و اعمال آن برای آرایش‌های مختلف شبکه، امکان رعایت قیود هماهنگی حفاظتی با توجه محدودیت تعداد گروه‌های تنظیمی با چالش مواجه است. هر راهکاری که بتواند فضای شدنی را گسترش داده و سرعت عملکرد طرح و امکان رعایت قیود هماهنگی را تسهیل کند، مورد توجه خواهد بود. یکی از نوآوری‌های این پژوهش نسبت به کارهای ارائه شده پیشین مانند آن‌چه در (Samadi and Mohammadi Chabanloo 2020) بیان شده است، بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه رله‌های حفاظتی اضافه‌جریان جهت‌دار است. در این مطالعه، حفاظت تطبیقی با درنظرگیری تعداد گروه‌های تنظیم محدود و انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه توسعه داده خواهد شد. درنظرگیری آرایش‌های مختلفی از قبیل خروج یکی از پست‌های بالادست یا منابع تولید پراکنده در کنار حالات بهره‌برداری متصل‌به‌شبکه و جزیره‌ای نیز از دیگر مزایای این مقاله خواهد بود.

۳- روش پیشنهادی

برای بهینه‌سازی طرح‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع فعال، توابع هدف مختلفی ارائه شده است (Darabi, Bagheri et al. 2020, Andruszkiewicz, Lorenc et al. 2022). مجموع زمان‌عملکرد رله‌های اصلی یا اختلاف زمانی رله‌های اصلی و پشتیبان یا مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان، نمونه‌هایی از توابع هدف مورداستفاده برای بهینه‌سازی طرح‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبکه‌ها می‌باشد. در این مقاله، مجموع زمان‌عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در تمام حالات مختلف بهره‌برداری به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده است. در رابطه (۱)، تابع هدف پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل (۱): شبکه‌ی ۵ شین نمونه با تمرکز بر نشان‌دادن تعداد حالات مختلف بهره‌برداری بیشتر از تعداد گروه‌تنظیم رله‌ها

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

$$OF = \sum_{c=1}^{N_C} T_c\left(SG, CS^s, TDS^s, PCS_i^s\right) = \sum_{c=1}^{N_C}\left(\sum_{i=1}^{N_{PR}} t_{i,c} + \sum_{j=1}^{N_{BR}} t_{j,c}\right) \quad (۱)$$

در تابع هدف نشان‌داده‌شده در (۱) برای حفاظت تطبیقی شبکه‌های توزیع فعال، c و s به‌ترتیب بیانگر شاخص پیکربندی‌های مختلف سیستم و گروه‌های تنظیم رله می‌باشند. هم‌چنین، i بیانگر شماره رله اصلی در پیکربندی مربوطه، N_{PR}، j و N_{BR} بیانگر تعداد رله‌های اصلی، شماره رله پشتیبان در پیکربندی مربوطه و تعداد رله‌های پشتیبان است. درضمن CS، TDS و I_b متغیرهای بهینه‌سازی تابع هدف می‌باشند که به اندازه تعداد گروه‌های تنظیم حفاظتی تکرار خواهند شد.

برای محاسبه زمان‌عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان، تنظیم‌زمانی و جریانی تخصیص‌داده‌شده مربوط به آرایش موردمطالعه به‌همراه ضرایب مشخصه‌های استاندارد انتخابی لحاظ خواهند شد. در رابطه (۲)، نحوه محاسبه زمان‌عملکرد رله اصلی در یک آرایش از آرایش‌های شبکه نشان داده شده است. نحوه محاسبه زمان‌عملکرد رله‌های پشتیبان نیز به‌شکل مشابه انجام خواهد شد. برای محاسبه زمان‌عملکرد رله‌ها، در این مقاله از منحنی‌مشخصه استاندارد اشاره‌شده در IEC 60255 استفاده شده است. از سایر استانداردها مانند IEEE نیز برای منحنی‌مشخصه و تعیین زمان‌عملکرد رله‌ها می‌توان استفاده نمود (Fatemi and Samet 2020, Mishra, Pradhan et al. 2020).

$$t_{i,c} = \frac{A_i^c \times TDS_i^c}{\left(\frac{I_f^c}{PCS_i^c}\right)^{B_i^c} - 1} \quad (۲)$$

در رابطه‌ی شماره‌ی (۲)، I_f مقدار خطای دیده‌شده، PCS تنظیم‌جریانی، TDS تنظیم‌زمانی و A و B نیز مقادیر تعیین‌کننده‌ی نوع منحنی‌مشخصه‌ی رله می‌باشند.

رله‌های اضافه‌جریان دارای یکی از منحنی‌مشخصه‌های معکوس استاندارد کاهشی معمولی (NI)، خیلی کاهشی (VI) یا فوق‌العاده کاهشی (EI) هستند؛ مقادیر A و B باتوجه به نوع منحنی‌مشخصه‌ی رله مطابق جدول (۲) اعمال خواهد شد (Alam, Das et al. 2020).

جدول (۲): پارامترهای انواع منحنی‌مشخصه‌های استاندارد رله‌های اضافه‌جریان (Alam, Das et al. 2020)

تنظیم بهینه منحنی‌مشخصه (CS)	نوع منحنی‌مشخصه	A	B
۱	NI	۰/۱۴	۰/۰۲
۲	VI	۱۳/۵	۱
۳	EI	۸۰	۲

در جدول شماره (۲) و به‌طور کلی در این نوشتار، نوع منحنی مشخصه با اعداد ۱، ۲ و ۳ مشخص و تعیید گردیده است؛ که به‌ترتیب متناظر منحنی مشخصه‌های معکوس استاندارد کاهشی معمولی (NI)، خیلی کاهشی (VI) یا فوق‌العاده کاهشی (EI) هستند.

در مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی، بخشی از متغیرهای تصمیم مربوط به تخصیص یکی از گروه‌تنظیم‌های رله‌ها برای هر رله در یک آرایش خاص و حالت بهره‌برداری است. ضمناً در هر گروه‌تنظیم، تنظیم‌زمانی و جریانی و منحنی‌مشخصه بهینه قرار دارد. در رابطه (۳)، تخصیص یکی از گروه‌های تنظیم (که تعداد آن محدود است) به یکی از آرایش‌های شبکه که عموماً تعداد آن از تعداد گروه‌های تنظیم بیشتر است، نشان داده شده است.

$$\exists s \in SG = \{1, 2, ..., N_{SG}\} \ni \begin{cases} CS_i^c = CS_i^s \\ TDS_i^c = TDS_i^s \\ PCS_i^c = PCS_i^s \end{cases} \quad (۳)$$

انتخاب ضرایب منحنی‌مشخصه استاندارد بر اساس متغیر تصمیم مربوطه در مسئله بهینه‌سازی نیز به‌شکل زیر پیاده‌سازی خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} A_i^c \\ B_i^c \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0.14 \\ 0.02 \end{bmatrix} & CS_i^c = 1 \\ \begin{bmatrix} 13.5 \\ 1 \end{bmatrix} & CS_i^c = 2 \\ \begin{bmatrix} 80 \\ 2 \end{bmatrix} & CS_i^c = 3 \end{cases} \quad (۴)$$

از جمله مزایای روش پیشنهادی، درنظرگیری تمام پیکربندی‌های مختلف شبکه، اعمال تعداد محدودِ گروه‌تنظیم به شبکه‌ی توزیع و هم‌چنین بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه‌ی رله‌های اضافه‌جریان علاوه بر به‌دست‌آوردن تنظیمات زمانی و جریانی است.

در طرح‌های حفاظتی برای پیشگیری از تداخل عملکرد رله‌های حفاظتی اصلی و پشتیبان، ضروری است که یک فاصله زمانی کافی بین زمان‌عملکرد رله‌ی اصلی و پشتیبان، که به‌عنوان فاصله زمانی هماهنگی (CTI) شناخته می‌شود، درنظر گرفته شود؛ مقدار فاصله هماهنگی حفاظتی بین ۰/۲ تا ۰/۳ لحاظ می‌شود (ElSayed and Elattar 2021, Khatua and Mukherjee 2021). در مطالعات انجام‌شده در این مقاله، مقدار ۰/۳ ثانیه به‌عنوان کمینه فاصله زمانی هماهنگی رله‌های حفاظتی درنظر گرفته شده است. در رابطه (۵)، نمایش ریاضی قیود هماهنگی حفاظتی در مسئله بهینه‌سازی نشان داده شده است. همان‌گونه که در رابطه نیز قابل مشاهده است، هماهنگی تمامی رله‌های اصلی و پشتیبان در تمام آرایش‌ها و حالات بهره‌برداری ضروری است.

$$t_{j,c} - t_{i,c} \geq CTI \quad (۵)$$

از دیگر محدودیت‌هایی که در مسئله بهینه‌سازی باید به آن توجه داشت، محدودیت تنظیم‌زمانی و جریانی رله‌های اضافه‌جریان بر اساس

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

مشخصات سازندگان رله است. هم‌چنین تعیین شرایط کران پایین و بالای تنظیم‌جریانی برای جلوگیری از عملکرد رله‌ها در شرایط بهره‌برداری عادی و هم‌چنین پوشش حداکثری خطاها و یا تمامی خطاهای پایین‌دست رله ضروری است. قیود مربوط به تنظیمات زمانی و جریانی رله‌ها در (۶) و (۷) نشان داده شده است.

$$TDS_i^{\min} \le TDS_i \le TDS_i^{\max} \quad (۶)$$

$$PCS_i^{\min} \le PCS_i \le PCS_i^{\max} \quad (۷)$$

در تعیین مقدار جریان‌تنظیم کمینه، علاوه بر محدودیت‌های تنظیم‌ها قابل اعمال به رله، باید بار بیشینه و اضافه‌بار مجاز لحاظ شود. در غیر این‌صورت، ممکن است رله در شرایط عادی، بار شبکه را قطع نموده و عملکرد ناخواسته رله مشاهده شود. مقدار کران پایین برای تنظیمات جریانی رله‌های اضافه‌جریان بر اساس جریان بیشینه بار تعیین خواهند شد. ضمناً در تعیین مقدار کران بالای تنظیم‌جریانی نیز، جریان‌خطای کمینه باید منظور شود؛ به‌نحوی که سنجش جریان اتصال‌کوتاه به‌ازای خطا در دورترین فاصله نسبت به رله موردنظر (۹۹٪ خط) قرار دارد، صورت می‌گیرد. درصورتی‌که تنظیم‌جریانی از خطای کمینه در پایین‌دست رله بیشتر باشد، رله حفاظتی، خطای حداقلی را تشخیص نداده و عملکردی در این شرایط ندارد.

در روش پیشنهادی، ابتدا لازم است اطلاعات شبکه موردمطالعه استخراج گردد. تعیین بار بیشینه عبوری از خطوط و رله‌های متناظر برای تعیین تنظیم‌جریانی و کران‌های تنظیم‌جریانی ضروری است. برای انجام مطالعات پخش توان می‌توان راهکارهای مختلفی را انتخاب نمود. در این مقاله، از DIgSILENT برای انجام مطالعات پخش توان استفاده شده است. هم‌چنین، مطالعات اتصال‌کوتاه برای تعیین جریان‌خطای عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش‌های مختلف شبکه ضروری است. توانمندی‌های نرم‌افزار DIgSILENT برای انجام مطالعات اتصال‌کوتاه نیز از دیدگاه عملی و فنی مطلوب است. اگرچه از سایر نرم‌افزارها یا پیاده‌سازی مطالعات پخش توان و اتصال‌کوتاه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB یا ... می‌توان بهره برد.

پس از استخراج اطلاعات مورد نیاز مانند نتایج پخش توان و اتصال‌کوتاه، این اطلاعات به MATLAB ارسال خواهد شد. ضمناً مسئله بهینه‌سازی در محیط MATLAB پیاده‌سازی خواهد شد. الگوریتم فرابتکاری انتخابی در این مقاله نیز الگوریتم ژنتیک خواهد بود. در شکل (۲)، روندنمای پیاده‌سازی روش پیشنهادی مبتنی بر ارتباط نرم‌افزارهای DIgSILENT و MATLAB نشان داده شده است.

پس از حل مسئله بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک، نتایج و تنظیم‌های بهینه به رله‌ها در شبیه‌سازی DIgSILENT اعمال شده و مطالعات هماهنگی حفاظتی انجام خواهد شد. صحت‌سنجی نتایج و تنظیم‌های بهینه برای اطمینان از رعایت قیود هماهنگی حفاظتی در آرایش‌های مختلف شبکه یکی از مزایای این مطالعه می‌باشد. اطمینان از بهینه سراسری در مسئله بهینه‌سازی و حل آن نیز باید در دستورکار قرار گیرد، زیرا یکی از نگرانی‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فرابتکاری، به‌دست‌آمدن کمینه‌های محلی به‌جای کمینه‌های سراسری است.

۴- نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، از بخش توزیع شبکه‌ی ۳۰ شینِ IEEE براساس اطلاعات ذکرشده در (Elmitwally, Kandil et al. 2020) و [۱۷] در ۲ مطالعه موردی بدون منابع تولید پراکنده و در حضور ۱۱ منبع تولید پراکنده استفاده شده است. نمایش تک‌خطی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE مطالعه موردی اول در شکل (۳) شان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است. این شبکه از طریق ۳ پست بالادست درحال تغذیه می‌باشد. از آن‌جایی که آرایش‌های مختلف شبکه موردمطالعه در روش پیشنهادی مورد تأکید است. حالت پایه و اتصال شبکه توزیع از طریق هر ۳ پست بالادست و خروج هر یک از پست‌های بالادست در تنظیمات طرح حفاظتی تطبیقی پیشنهادی درنظر گرفته شده است.

برای حفاظت شبکه توزیع نمونه، ۳ گروه‌تنظیم مختلف برای رله‌های حفاظتی اضافه‌جریان جهت‌دار درنظر گرفته شده است. طرح حفاظت تطبیقی با درنظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم (۳ گروه‌تنظیم) و حالات بهره‌برداری مختلف (۴ آرایش در این شبکه ناشی از حالت پایه و خروج یکی از پست‌های بالادست) در ۴ سناریو موردمطالعه قرار گرفته است.

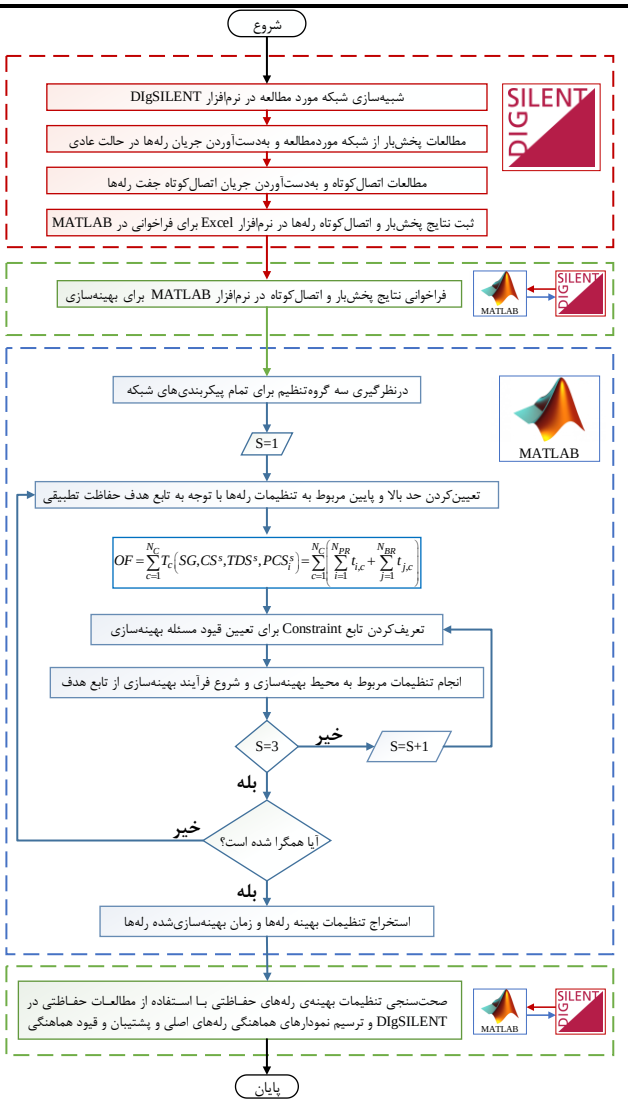
- سناریوی اوّل: بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه رله‌های حفاظتی
- سناریوی دوم: استفاده از منحنی‌مشخصه EI برای تمامی رله‌ها به‌صورت پیش‌فرض
- سناریوی سوم: استفاده از منحنی‌مشخصه VI برای تمامی رله‌ها به‌صورت پیش‌فرض
- سناریوی چهارم: استفاده از منحنی‌مشخصه NI برای تمامی رله‌ها به‌صورت پیش‌فرض

در جدول (۳)، مجموع زمان‌عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان (تابع هدف پیشنهادی) طرح‌های حفاظتی برای آرایش‌های مختلف شبکه‌ی موردمطالعه به‌کمک روش تطبیقی با بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه و نیز یکسان‌بودن منحنی‌مشخصه در سناریوهای مختلف مقایسه شده است.

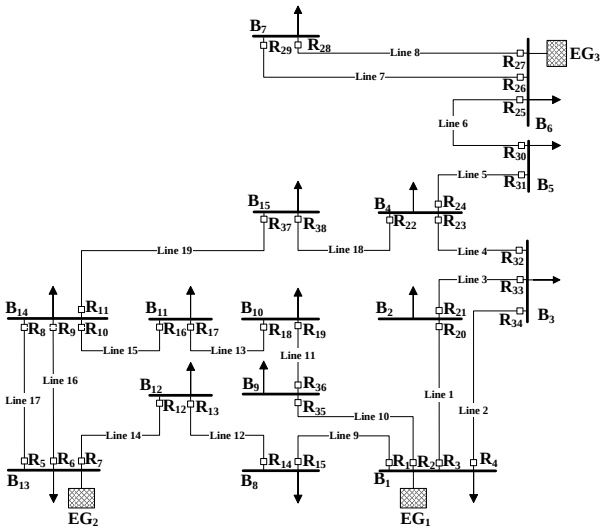
در شکل (۵) نیز نمودار همگرایی حل مسئله‌ی بهینه‌سازی حفاظت تطبیقی با بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه و منحنی‌مشخصه پیش‌فرض در سناریوهای مختلف قابل مشاهده است. منحنی همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که همگرایی در جواب‌های بهینه حاصل شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]



شکل (۲): روندنمای روش پیشنهادیِ پیاده‌سازی‌شده در MATLAB و DIgSILENT



شکل (۳): نمایش تک‌خطی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE دربرگیرنده ۳ پست بالادست (Elmitwally, Kandil et al. 2020)

جدول (۳): مقایسه‌ی نتایج طرح‌های حفاظت تطبیقی شبکه‌ی موردمطالعه در سناریوهای مختلف

سناریو	مجموع زمان عملکرد رله‌ها (ثانیه)
سناریوی اوّل- بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه (روش پیشنهادی)	۶۱۸/۶۳۶
سناریوی دوم- درنظرگرفتن منحنی‌مشخصه‌ی VI برای رله‌ها	۱۳۵۲/۸۶
سناریوی سوم- درنظرگرفتن منحنی‌مشخصه‌ی EI برای رله‌ها	۱۵۵۸/۷۶
سناریوی چهارم-درنظرگرفتن منحنی‌مشخصه‌ی NI برای رله‌ها	۱۷۵۶/۹۶

با توجه به نتایج جدول شماره‌ی (۳) دریافت می‌شود که درصورت درنظرگرفتن منحنی‌مشخصه‌ی ثلبت برای رله‌های اضافه‌جریان، منحنی‌مشخصه‌ی VI بهترین انتخاب است؛ مجموع زمان‌عملکرد در این حالت (۱۳۵۲/۸۶ ثانیه) نسبت به حالت بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه (۶۱۸/۶۳۶ ثانیه)، ۵۴/۲۷ درصد بیشتر است و این حاکی از برتریِ روش پیشنهادی بر روش ارائه‌شده در (Samadi and Mohammadi Chabanloo 2020) است.

در شکل (۴)، نمودارهای همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی در طرح حفاظت تطبیقی بدون اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی آورده شده است. با استفاده از نمودارهای شکل (۴)، مقایسه‌ای میان روش تطبیقی بدون محدودیت در تعداد گروه‌تنظیم با روش پیشنهادی مبتنی بر حفاظت تطبیقی با درنظرگرفتن محدودیت گروه‌تنظیم صورت گرفته است. نتایج این مقایسه در جدول شماره (۴) قابل مشاهده است.

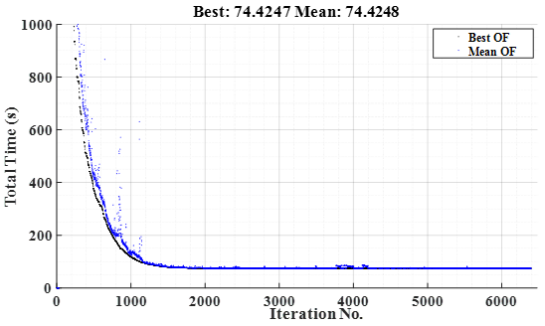
افزایش زمان طرح حفاظت تطبیقی ناشی از اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی نسبت به شرایطی که تعداد گروه‌های تنظیمی محدود نباشد، به میزان ۵۳/۷۹٪ است. به‌دلیل افزایش معمول و قابل‌قبول زمان عملکرد نسبت به روش تطبیقی بدون درنظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم رله‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که راه‌حل اعمال تنظیمات مختلف و مستقل از گروه‌های تنظیمی برای آرایش‌های مختلف بر اساس روش پیشنهادی، روش موثر و مفیدی خواهد بود.

برتری روش پیشنهادی و ارائه راهکار بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه رله‌ها در طرح حفاظت تطبیقی با درنظرگیری محدودیت تعداد گروه‌های تنظیم بر اساس نتایج مقایسه‌ای قابل استنتاج است. بهبود زمان‌عملکرد و افزایش فضای شدنی حل مسئله برای شبکه‌هایی که تعداد حالات بهره‌برداری زیادی داشته باشند، برجسته‌تر خواهد بود.

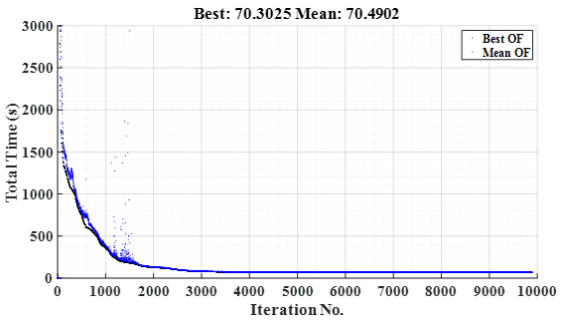
در ادامه نتایج بهینه‌سازی‌شده‌ی بر اساس روش پیشنهادی ارائه شده است؛ سه‌دسته گروه‌تنظیم برای شبکه‌ی موردمطالعه در جدول (۵) قابل‌مشاهده است. در این جدول، تنظیمات زمانی، جریانی و منحنی‌مشخصه بهینه رله‌های موجود در شبکه موردمطالعه، نشان داده شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

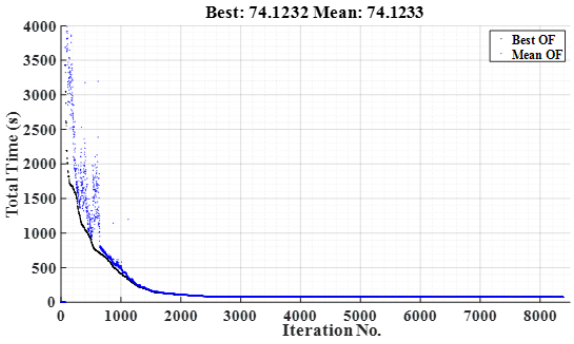
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]



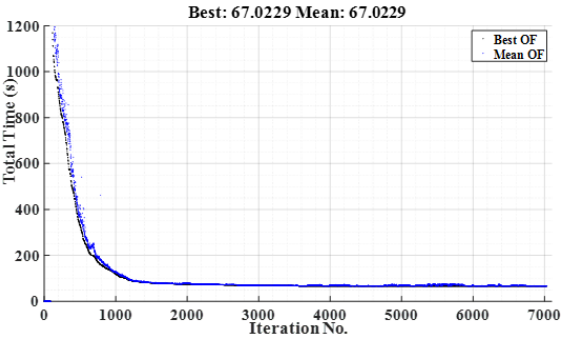
(الف)



(ب)

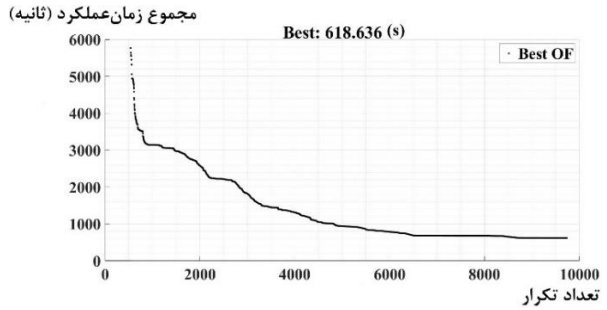


(ج)

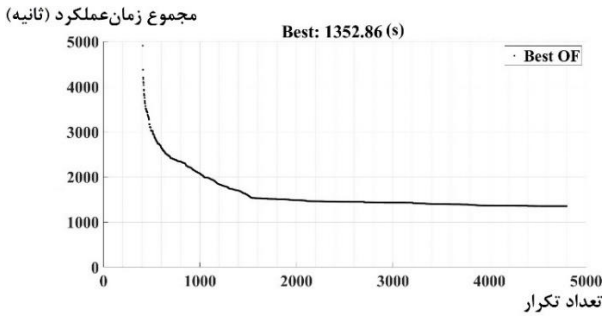


(د)

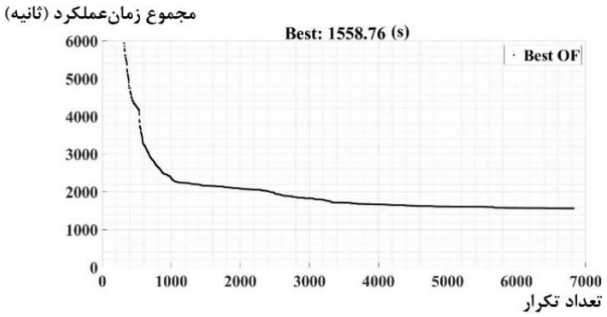
شکل(۴): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی حفاظت تطبیقی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE: (الف) گروه‌تنظیم مربوط به حالت پایه، (ب) گروه‌تنظیم حالت خروج پست بالادست ۱، (ج) گروه‌تنظیم حالت خروج پست بالادست ۲ و (د) گروه‌تنظیم حالت خروج پست بالادست ۳



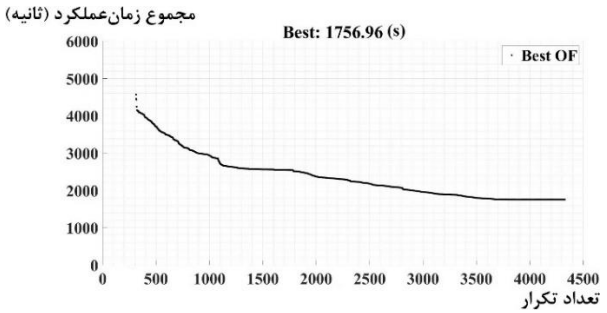
(الف) انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه



(ب) منحنی‌مشخصه VI برای تمامی رله‌ها



(ج) منحنی‌مشخصه EI برای تمامی رله‌ها



(د) منحنی‌مشخصه NI برای تمامی رله‌ها

شکل (۵): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی شبکه موردمطالعه نشان داده‌شده در شکل (۳) در سناریوهای مختلف (بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه و استفاده از منحنی‌مشخصه یکسان و پیش‌فرض برای تمامی رله‌ها)

در جدول (۵)، تنظیمات بهینه در ۳ گروه‌تنظیم مجزا نشان داده شده است. همان‌گونه که در روش پیشنهادی نیز توضیح داده شد، تنظیم‌جریانی، تنظیم‌زمانی و نوع منحنی‌مشخصه برای هر رله در گروه-

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

تنظیم مربوطه بهینه شده است. این گروه‌های تنظیم برای آرایش‌های مختلف و به‌صورت متفاوت برای رله‌های حفاظتی فعال خواهد شد. فعال‌شدن هر گروه‌تنظیم در آرایش مربوطه نیز بر اساس متغیر تصمیم تعریف‌شده، امکان تخصیص تنظیم بهینه به رله‌ها با درنظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم را فراهم می‌کند.

جدول (۵): گروه‌تنظیم‌های مختلف بهینه‌ی رله‌های اضافه‌جریان برای شبکه‌ی موردمطالعه نشان‌داده شده در شکل (۳) در روش پیشنهادی با انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه برای رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت تطبیقی با درنظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

شماره رله	گروه‌تنظیم اوّل			گروه‌تنظیم دوم			گروه‌تنظیم سوم		
	TMS	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه	*TMS*	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه	*TMS*	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه
۱	۰/۱۶۱	۲۱۷۲/۹۱۲	۱	۲/۰۱۲	۱۶۲۶/۷۴۹	۳	۰/۲۵۰	۲۳۱۴/۴۳۲	۲
۲	۱/۰۹۸	۲۳۷۵/۵۹۰	۳	۲/۰۴۲	۲۳۵۹/۶۶۳	۳	۱/۱۲۶	۵۷۷/۵۷۷	۲
۳	۲/۰۱۶	۵۲۶۷/۹۲۳	۳	۱/۲۸۵	۱۴۳۰/۲۸۷	۳	۰/۳۷۰	۱۱۴۳/۸۷۸	۲
۴	۱/۸۸۹	۱۲۱۱/۴۶۰	۳	۰/۹۴۴	۱۱۶۹/۲۶۴	۳	۰/۸۱۸	۷۴۴/۲۶۰	۲
۵	۱/۴۹۵	۴۹۲/۱۷۱۰	۳	۲/۵۳۶	۳۷۴/۹۰۵۶۶	۳	۰/۱۹۷	۵۶۲/۱۹۷	۳
۶	۱/۵۸۱	۱۶۷۹/۳۳۳	۳	۱/۹۴۴	۱۶۳۳/۱۹۴	۳	۰/۲۱۴	۸۹۹/۳۴۲	۱
۷	۰/۸۵۵	۱۷۰۹/۰۱۲	۳	۰/۱۸۴	۸۱۸/۲۲۷	۲	۱/۲۹۴	۹۲۴/۵۹۳	۳
۸	۲/۲۱۸	۵۸۱/۵۳۰۰	۳	۱/۸۱۸	۳۸۰/۲۹۰	۳	۰/۱۱۶	۴۴۵/۶۳۵	۱
۹	۰/۹۵۸	۱۱۴۱/۵۷۱	۳	۰/۱۱۶	۹۱۴/۲۵۹	۳	۰/۰۳۷	۱۰۳۲/۴۱۲	۱
۱۰	۰/۵۵۰	۱۴۰۶/۸۴۹	۳	۱/۲۱۴	۱۶۳۷/۰۵۵	۳	۰/۲۲۹	۱۲۷۸/۰۲۸۳	۲
۱۱	۰/۹۲۶	۲۰۲۰/۴۲۴	۳	۱/۲۸۸	۱۶۱۳/۰۸۴۵	۳	۱/۴۴۵	۵۶۵/۵۰۷۶۴	۳
۱۲	۲/۵۸۵	۷۶۸/۷۲۱۸	۳	۲/۵۸۳	۷۶۴/۴۳۶	۳	۰/۳۶۸	۷۹۶/۰۸۶۷	۲
۱۳	۱/۲۵۵	۸۷۸/۴۰۷۵	۳	۰/۰۸۶	۱۲۵۷/۷۶۲	۱	۰/۳۶۹	۱۲۶۹/۴۵۷	۳
۱۴	۰/۴۹۸	۱۴۸۲/۴۰۸	۳	۰/۱۸۹	۱۰۹۲/۰۸۰	۳	۰/۸۱۶	۹۶۸/۰۰۷	۳
۱۵	۱/۷۷۰	۶۰۲/۴	۲	۰/۱۱۱	۶۰۲/۴	۳	۱/۰۸۶	۶۰۲/۴	۳
۱۶	۰/۵۴۳	۴۶۱/۵۰۹	۲	۲/۶۳۶	۶۷۵/۹۰۷	۳	۱/۱۹۵	۱۰۲۳/۱۳۶	۳
۱۷	۰/۸۶۷	۱۵۶۹/۶۸۵	۳	۰/۹۶۳	۴۷۲/۰۰۴	۳	۱/۰۶۲۶	۱۵۵۴/۸۸۳	۳
۱۸	۲/۴۹۸	۱۳۲۳/۵۳۲	۳	۰/۲۱۸	۱۱۳۱/۷۴۶	۱	۰/۲۴۷	۱۱۳۹/۵۲۷	۲
۱۹	۱/۹۳۸	۶۲۲/۶۵۷	۲	۰/۷۶۱	۱۱۵۶/۴۲۶	۳	۰/۴۴۰	۵۰۶/۷۳۴۷	۲
۲۰	۱/۲۴۹	۹۱۹/۷۴۲	۳	۰/۶۴۱	۸۲۶/۵۵۷	۳	۰/۱۷۷۶	۸۶۴/۴۲۶	۱
۲۱	۰/۸۷۷	۱۸۶۴/۴۸۷	۳	۱/۳۳۷	۱۰۵۷/۵۴۱	۳	۰/۲۴۵	۱۳۶۶/۷۸۷	۲
۲۲	۰/۳۵۴	۶۴۹/۶۹۶	۳	۱/۰۰۴	۱۰۲۶/۸۶۰	۳	۰/۶۹۷	۵۱۹/۲۲۵	۳
۲۳	۱/۰۶۰	۱۰۶۲/۲۹۹	۳	۲/۳۰۰	۱۲۳۸/۴۸۳	۳	۰/۳۳۰	۶۲۸/۲۷۶	۲
۲۴	۰/۳۲۵	۵۲۰/۱۶۳	۳	۱/۶۰۷	۷۹۲/۲۹۱	۳	۲/۲۷۴	۱۸۲۸/۶۰۸	۳
۲۵	۱/۳۷۸	۴۵۳/۶	۳	۰/۷۸۹	۴۵۳/۶	۳	۲/۰۲۱	۴۵۳/۶	۳
۲۶	۰/۶۵۴	۳۲۹/۲۷۴	۳	۰/۱۴۷	۳۴۲/۰۲۸۰	۲	۱/۶۸۱	۶۳۰/۷۵۷	۳
۲۷	۲/۲۲۵	۲۷۷/۹۱۶	۳	۱/۴۲۱	۲۵۶/۶۰۴	۳	۰/۳۶۴	۱۸۷/۲۸۶	۳
۲۸	۱/۸۶۲	۱۰۰/۸	۳	۱/۲۴۹	۱۰۰/۸	۳	۰/۰۶۷۸	۱۰۰/۸	۳
۲۹	۱/۴۵۸	۱۴۵/۲	۳	۰/۶۷۵	۱۴۵/۲	۳	۰/۰۴۸۸	۱۴۵/۲	۳
۳۰	۰/۳۹۰	۱۳۱۰/۱۸۹	۳	۲/۳۱۸	۱۰۴۷/۵۹۹	۳	۰/۱۸۹	۴۵۳/۶۱۳	۲
۳۱	۱/۳۶۷	۴۵۳/۶	۳	۱/۶۱۴	۴۵۳/۶	۳	۰/۴۷۵	۴۵۳/۶	۳
۳۲	۰/۷۵۰	۱۹۷۴/۴۳۸	۳	۰/۲۲۲	۱۹۰۲/۷۸۸	۳	۰/۱۴۹	۱۵۸۵/۱۸۳	۳
۳۳	۱/۴۱۴	۲۳۳۴/۰۸۵	۳	۰/۱۵۴	۱۳۷۴/۴۱۰	۲	۰/۷۹۶	۱۱۶۰/۰۱۱	۳
۳۴	۰/۰۱۵	۶۳۲/۵۲۷	۲	۱/۷۸۰	۶۵۶/۳۲۹	۳	۰/۲۳۴	۳۹۷/۰۴۷	۲
۳۵	۲/۱۹۰	۴۷۱/۶۹۳	۳	۰/۳۷۹	۴۶۴/۲۱۹	۳	۰/۳۱۷	۴۶۷/۷۳۹	۲
۳۶	۱/۷۰۶	۱۱۰۶/۱۵۲	۲	۰/۲۳۴	۱۳۹۰/۰۰۷	۱	۱/۶۰۷	۱۴۷۵/۴۰۷	۳
۳۷	۲/۳۱۹	۱۲۵۶/۶۷۶	۳	۱/۲۲۸	۱۰۹۴/۳۲۱	۳	۰/۱۷۲	۹۷۳/۴۷۱	۱
۳۸	۱/۴۶۳	۹۵۷/۰۳۰	۳	۲/۳۸۴	۹۷۵/۳۱۰	۳	۰/۳۶۷	۶۸۷/۹۲۴	۲

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

جدول (۴): مقایسه نتایج طرح حفاظت تطبیقی بدون درنظر گرفتن محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی و روش پیشنهادی با درنظرگرفتن محدودیت گروه‌تنظیم رله‌ها برای شبکه ۳۰ شین IEEE نشان‌داده شده در شکل (۳)

مجموع زمان‌عملکرد رله‌های اضافه‌جریان در تمام آرایش‌ها (ثانیه)		افزایش زمان عملکرد روش پیشنهادی نسبت به روش تطبیقی (درصد)
طرح حفاظت تطبیقی بدون محدودیت در تعداد گروه‌تنظیم	روش پیشنهادی	
۲۸۵/۸۷۳	۶۱۸/۶۳۶	۵۳/۷۹

بررسی نتایج و تنظیم‌های بهینه نشان می‌دهد که بر اساس نیاز شبکه و برای دست‌یابی به زمان بهینه و رعایت قیود هماهنگی حفاظتی در آرایش‌های مختلف، انتخاب منحنی‌مشخصه‌های متفاوت ضروری است. هم‌چنین در جداول شماره‌ی (۶)-(۹) تنظیمات اعمالی به رله‌ها در پیکربندی‌های مختلف نشان داده شده است؛ بدیهی است که این تنظیمات برگرفته از داده‌های موجود در جدول (۵) است.

تنظیمات بهینه رله‌های حفاظتی در حالت پایه بر اساس روش پیشنهادی و سناریوی اول نشان می‌دهد که هر رله در این آرایش براساس یکی از ۳ گروه‌تنظیم پیشنهادی بهینه فعال خواهد شد. عدم یکسان‌بودن گروه‌تنظیم اعمال‌شده برای این آرایش نشان می‌دهد که ترکیب متفاوتی از گروه‌های تنظیم شرایط برای دست‌یابی به نتایج بهتر را فراهم می‌آورد.

برای تعداد زیادی از رله‌ها، منحنی‌مشخصه EI پیشنهاد شده است. امّا از سایر منحنی‌های مشخصه استاندارد مانند NI یا VI نیز برای رله‌ها در آرایش پایه باید استفاده نمود. در جدول (۷)، تنظیمات بهینه رله‌ها در حالتی که پست بالادست (۱) از مدار خارج شده باشد، پیشنهاد شده است.

تنظیمات بهینه برای رله‌ها در آرایش دوم و ناشی از خروج پست بالادست شماره (۱) مطابق جدول بالا با آرایش پایه متفاوت است. این نتایج نشان می‌دهد که ارائه طرح حفاظتی تطبیقی برای کاهش زمان‌عملکرد رله‌ها و رعایت قیود هماهنگی حفاظتی در شرایطی که آرایش و حالت بهره‌برداری شبکه تغییر می‌کند، ضروری است.

در جدول‌های (۸) و (۹) نیز، تنظیمات بهینه رله‌ها در حالتی که به‌ترتیب پست‌های بالادست (۲) و (۳) از مدار خارج شده باشد، پیشنهاد شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که شرایطی مشابه آرایش اول برای رله‌ها در چنین شرایط پیشنهاد شده است.

بر اساس تنظیمات بهینه‌ی به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی، زمان‌عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان شبکه‌ی موردمطالعه در آرایش‌های پایه و سایر آرایش‌ها و حالات بهره‌برداری (قطع پست‌های بالادست) را می‌توان به‌دست آورد. بررسی نتایج زمان‌عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در حالات مختلف بهره‌برداری دلالت بر هماهنگی حفاظتی و عدم نقض قیود هماهنگی دارد.

جدول (۶): تنظیمات بهینه رله‌های اضافه‌جریان شبکه‌ی موردمطالعه با آرایش پایه بر اساس سناریوی اول

شماره رله	*TMS*	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه	گروه‌تنظیم بهینه فعال
۱	۰/۲۵۰	۲۳۱۴/۴۳۳	۲	۳
۲	۱/۱۲۶	۵۷۷/۵۷۸	۲	۳
۳	۱/۲۸۵	۱۴۳۰/۲۸۷	۳	۲
۴	۰/۸۱۸	۷۴۴/۲۶۰	۲	۳
۵	۰/۱۹۸	۵۶۲/۱۹۸	۳	۳
۶	۰/۲۱۵	۸۹۹/۳۴۳	۱	۳
۷	۱/۲۹۵	۹۲۴/۵۹۳	۳	۳
۸	۰/۱۱۷	۴۴۵/۶۳۵	۱	۳
۹	۰/۰۳۸	۱۰۳۲/۴۱۳	۱	۳
۱۰	۰/۲۲۹	۱۲۷۸/۰۲۸	۲	۳
۱۱	۱/۴۴۵	۵۶۵/۵۰۸	۳	۳
۱۲	۰/۳۶۹	۷۹۶/۰۸۷	۲	۳
۱۳	۰/۰۸۶	۱۲۵۷/۷۶۲	۱	۲
۱۴	۰/۸۱۶	۹۶۸/۰۰۸	۳	۳
۱۵	۰/۱۱۲	۶۰۲/۴	۳	۲
۱۶	۰/۵۴۴	۴۶۱/۵۱۰	۲	۱
۱۷	۰/۹۶۴	۴۷۲/۰۰۵	۳	۲
۱۸	۰/۲۴۸	۱۱۳۹/۵۲۸	۲	۳
۱۹	۰/۴۴۰	۵۰۶/۷۳۵	۲	۳
۲۰	۰/۱۷۸	۸۶۴/۴۲۶	۱	۳
۲۱	۰/۲۴۶	۱۳۶۶/۷۸۸	۲	۳
۲۲	۰/۶۹۸	۵۱۹/۲۲۶	۳	۳
۲۳	۰/۳۳۱	۶۲۸/۲۷۶	۲	۳
۲۴	۰/۳۲۵	۵۲۰/۱۶۳	۳	۱
۲۵	۲/۰۲۱	۴۵۳/۶	۳	۳
۲۶	۰/۱۴۷	۳۴۲/۰۲۸	۲	۲
۲۷	۰/۳۶۴	۱۸۷/۲۸۶	۳	۳
۲۸	۰/۰۶۸	۱۰۰/۸	۳	۳
۲۹	۰/۰۴۹	۱۴۵/۲	۳	۳
۳۰	۰/۱۸۹	۴۵۳/۶۱۴	۲	۳
۳۱	۰/۴۷۶	۴۵۳/۶	۳	۳
۳۲	۰/۱۴۹	۱۵۸۵/۱۸۳	۳	۳
۳۳	۰/۷۹۶	۱۱۶۰/۰۱۲	۳	۳
۳۴	۰/۰۱۵	۶۳۲/۵۲۷	۲	۱
۳۵	۰/۳۱۷	۴۶۷/۷۳۹	۲	۳
۳۶	۰/۲۳۴	۱۳۹۰/۰۰۷	۱	۲
۳۷	۰/۱۷۲	۹۷۳/۴۷۲	۱	۳
۳۸	۰/۳۶۷	۶۸۷/۹۲۴	۲	۳

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

جدول (۷): تنظیمات بهینه رله‌های اضافه‌جریان شبکه‌ی موردمطالعه با قطع پست بالادست شماره (۱) بر اساس سناریوی اول

شماره رله	*TMS*	I_b(A)	نوع منحنی مشخصه	گروه‌تنظیم بهینه فعال
۱	۰/۱۶۲	۲۱۷۲/۹۱۲	۱	۱
۲	۱/۱۲۶	۵۷۷/۵۷۸	۲	۳
۳	۰/۳۷۰	۱۱۴۳/۸۷۸	۲	۳
۴	۰/۸۱۸	۷۴۴/۲۶۰	۲	۳
۵	۰/۱۹۸	۵۶۲/۱۹۸	۳	۳
۶	۰/۲۱۵	۸۹۹/۳۴۳	۱	۳
۷	۱/۲۹۵	۹۲۴/۵۹۳	۳	۳
۸	۱/۸۱۸	۳۸۰/۲۹۱	۳	۲
۹	۰/۰۳۸	۱۰۳۲/۴۱۳	۱	۳
۱۰	۰/۲۲۹	۱۲۷۸/۰۲۸	۲	۳
۱۱	۱/۴۴۵	۵۶۵/۵۰۸	۳	۳
۱۲	۰/۳۶۹	۷۹۶/۰۸۷	۲	۳
۱۳	۰/۳۷۰	۱۲۶۹/۴۵۸	۳	۳
۱۴	۰/۱۹۰	۱۰۹۲/۰۸۱	۳	۲
۱۵	۱/۰۸۶	۶۰۲/۴	۳	۳
۱۶	۰/۵۴۴	۴۶۱/۵۱۰	۲	۱
۱۷	۰/۹۶۴	۴۷۲/۰۰۵	۳	۲
۱۸	۰/۲۱۹	۱۱۳۱/۷۴۷	۱	۲
۱۹	۰/۴۴۰	۵۰۶/۷۳۵	۲	۳
۲۰	۰/۱۷۸	۸۶۴/۴۲۶	۱	۳
۲۱	۰/۲۴۶	۱۳۶۶/۷۸۸	۲	۳
۲۲	۰/۶۹۸	۵۱۹/۲۲۶	۳	۳
۲۳	۰/۳۳۱	۶۲۸/۲۷۶	۲	۳
۲۴	۰/۳۲۵	۵۲۰/۱۶۳	۳	۱
۲۵	۲/۰۲۱	۴۵۳/۶	۳	۳
۲۶	۰/۱۴۷	۳۴۲/۰۲۸	۲	۲
۲۷	۰/۳۶۴	۱۸۷/۲۸۶	۳	۳
۲۸	۰/۰۶۸	۱۰۰/۸	۳	۳
۲۹	۰/۰۴۹	۱۴۵/۲	۳	۳
۳۰	۰/۱۸۹	۴۵۳/۶۱۴	۲	۳
۳۱	۰/۴۷۶	۴۵۳/۶	۳	۳
۳۲	۰/۱۴۹	۱۵۸۵/۱۸۳	۳	۳
۳۳	۰/۱۵۵	۱۳۷۴/۴۱۱	۲	۲
۳۴	۰/۲۳۴	۳۹۷/۰۴۷	۲	۳
۳۵	۰/۳۸۰	۴۶۴/۲۱۹	۳	۲
۳۶	۰/۲۳۴	۱۳۹۰/۰۰۷	۱	۲
۳۷	۰/۱۷۲	۹۷۳/۴۷۲	۱	۳
۳۸	۰/۳۶۷	۶۸۷/۹۲۴	۲	۳

عـلاوه بـر مطالعـات مـوردی اول، روش پیشـنهادی بـر روی یـک شـبکه بـا حـالات بهـره‌بـرداری بیشـتر نیـز اعمـال گردیـده اسـت. در شـکل (۶)، بخـش توزیـع شـبکه ۳۰ شـین IEEE طبـق اطلاعـات منـدرج در [۱۷] کـه دربرگیرنـده ۱۱ منبـع تولیدپراکنـده عـلاوه بـر ۳ پسـت بالادسـت شـبکه مـورد مطالعـه در شـکل (۳) اسـت، نشـان داده شـده اسـت. شـبکه مـوردنظر از طریـق ۳ پسـت بالادسـت تغذیـه مـی‌شـود و نیـز دارای ۱۱ منبـع تولیدپراکنـده اسـت. در روش پیشـنهادی، آرایـش‌هـای مختلـف شـبکه‌ی موردمطالعـه مـورد بررسـی قـرار مـی‌گیـرد؛ لـذا حالـت پایـه و اتصـال شـبکه توزیـع از طریـق ۳ پسـت بالادسـت و هـم‌چنـین ۱۱ منـابع تولیدپراکنـده و خـروج هـر یـک از پسـت‌هـای بالادسـت و منـابع تولیدپراکنـده در تنظیمـات طـرح حفـاظتی تطبیقـی پیشنهادی لحاظ شده است.

جدول (۸): تنظیمات بهینه رله‌های اضافه‌جریان شبکه‌ی موردمطالعه با قطع پست بالادست شماره (۲) بر اساس سناریوی اول

شماره رله	*TMS*	I_b(A)	نوع منحنی مشخصه	گروه‌تنظیم بهینه فعال
۱	۰/۲۵۰	۲۳۱۴/۴۳۳	۲	۳
۲	۱/۱۲۶	۵۷۷/۵۷۸	۲	۳
۳	۱/۲۸۵	۱۴۳۰/۲۸۷	۳	۲
۴	۰/۸۱۸	۷۴۴/۲۶۰	۲	۳
۵	۰/۱۹۸	۵۶۲/۱۹۸	۳	۳
۶	۰/۲۱۵	۸۹۹/۳۴۳	۱	۳
۷	۰/۱۸۵	۸۱۸/۲۲۸	۲	۲
۸	۰/۱۱۷	۴۴۵/۶۳۵	۱	۳
۹	۰/۱۱۶	۹۱۴/۲۶۰	۳	۲
۱۰	۰/۲۲۹	۱۲۷۸/۰۲۸	۲	۳
۱۱	۱/۴۴۵	۵۶۵/۵۰۸	۳	۳
۱۲	۰/۳۶۹	۷۹۶/۰۸۷	۲	۳
۱۳	۰/۰۸۶	۱۲۵۷/۷۶۲	۱	۲
۱۴	۰/۸۱۶	۹۶۸/۰۰۸	۳	۳
۱۵	۰/۱۱۲	۶۰۲/۴	۳	۲
۱۶	۰/۵۴۴	۴۶۱/۵۱۰	۲	۱
۱۷	۰/۹۶۴	۴۷۲/۰۰۵	۳	۲
۱۸	۰/۲۴۸	۱۱۳۹/۵۲۸	۲	۳
۱۹	۰/۴۴۰	۵۰۶/۷۳۵	۲	۳
۲۰	۰/۱۷۸	۸۶۴/۴۲۶	۱	۳
۲۱	۰/۲۴۶	۱۳۶۶/۷۸۸	۲	۳
۲۲	۰/۶۹۸	۵۱۹/۲۲۶	۳	۳
۲۳	۰/۳۳۱	۶۲۸/۲۷۶	۲	۳
۲۴	۰/۳۲۵	۵۲۰/۱۶۳	۳	۱
۲۵	۲/۰۲۱	۴۵۳/۶	۳	۳
۲۶	۰/۱۴۷	۳۴۲/۰۲۸	۲	۲
۲۷	۰/۳۶۴	۱۸۷/۲۸۶	۳	۳
۲۸	۰/۰۶۸	۱۰۰/۸	۳	۳
۲۹	۰/۰۴۹	۱۴۵/۲	۳	۳
۳۰	۰/۱۸۹	۴۵۳/۶۱۴	۲	۳
۳۱	۰/۴۷۶	۴۵۳/۶	۳	۳
۳۲	۰/۱۴۹	۱۵۸۵/۱۸۳	۳	۳
۳۳	۰/۷۹۶	۱۱۶۰/۰۱۲	۳	۳
۳۴	۰/۰۱۵	۶۳۲/۵۲۷	۲	۱
۳۵	۰/۳۱۷	۴۶۷/۷۳۹	۲	۳
۳۶	۰/۲۳۴	۱۳۹۰/۰۰۷	۱	۲
۳۷	۰/۱۷۲	۹۷۳/۴۷۲	۱	۳
۳۸	۰/۳۶۷	۶۸۷/۹۲۴	۲	۳

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

جدول (۹): تنظیمات بهینه رله‌های اضافه‌جریان شبکه‌ی موردمطالعه با قطع پست بالادست شماره (۳) بر اساس سناریوی اول

شماره رله	*TMS*	I_b(A)	نوع منحنی مشخصه	گروه‌تنظیم بهینه فعال
۱	۰/۲۵۰	۲۳۱۴/۴۳۳	۲	۳
۲	۱/۱۲۶	۵۷۷/۵۷۸	۲	۳
۳	۱/۲۸۵	۱۴۳۰/۲۸۷	۳	۲
۴	۰/۹۴۵	۱۱۶۹/۲۶۵	۳	۲
۵	۰/۱۹۸	۵۶۲/۱۹۸	۳	۳
۶	۰/۲۱۵	۸۹۹/۳۴۳	۱	۳
۷	۱/۲۹۵	۹۲۴/۵۹۳	۳	۳
۸	۰/۱۱۷	۴۴۵/۶۳۵	۱	۳
۹	۰/۰۳۸	۱۰۳۲/۴۱۳	۱	۳
۱۰	۰/۲۲۹	۱۲۷۸/۰۲۸	۲	۳
۱۱	۱/۴۴۵	۵۶۵/۵۰۸	۳	۳
۱۲	۰/۳۶۹	۷۹۶/۰۸۷	۲	۳
۱۳	۰/۰۸۶	۱۲۵۷/۷۶۲	۱	۲
۱۴	۰/۸۱۶	۹۶۸/۰۰۸	۳	۳
۱۵	۰/۱۱۲	۶۰۲/۴	۳	۲
۱۶	۰/۵۴۴	۴۶۱/۵۱۰	۲	۱
۱۷	۰/۹۶۴	۴۷۲/۰۰۵	۳	۲
۱۸	۰/۲۴۸	۱۱۳۹/۵۲۸	۲	۳
۱۹	۰/۴۴۰	۵۰۶/۷۳۵	۲	۳
۲۰	۰/۱۷۸	۸۶۴/۴۲۶	۱	۳
۲۱	۰/۲۴۶	۱۳۶۶/۷۸۸	۲	۳
۲۲	۰/۳۵۵	۶۴۹/۶۹۶	۳	۱
۲۳	۰/۳۳۱	۶۲۸/۲۷۶	۲	۳
۲۴	۰/۳۲۵	۵۲۰/۱۶۳	۳	۱
۲۵	۰/۷۸۹	۴۵۳/۶	۳	۲
۲۶	۰/۱۴۷	۳۴۲/۰۲۸	۲	۲
۲۷	۰/۳۶۴	۱۸۷/۲۸۶	۳	۳
۲۸	۰/۰۶۸	۱۰۰/۸	۳	۳
۲۹	۰/۰۴۹	۱۴۵/۲	۳	۳
۳۰	۰/۱۸۹	۴۵۳/۶۱۴	۲	۳
۳۱	۰/۴۷۶	۴۵۳/۶	۳	۳
۳۲	۰/۱۴۹	۱۵۸۵/۱۸۳	۳	۳
۳۳	۰/۷۹۶	۱۱۶۰/۰۱۲	۳	۳
۳۴	۰/۰۱۵	۶۳۲/۵۲۷	۲	۱
۳۵	۰/۳۱۷	۴۶۷/۷۳۹	۲	۳
۳۶	۰/۲۳۴	۱۳۹۰/۰۰۷	۱	۲
۳۷	۰/۱۷۲	۹۷۳/۴۷۲	۱	۳
۳۸	۰/۳۶۷	۶۸۷/۹۲۴	۲	۳

در جداول (۱۰)-(۱۲)، تنظیمات بهینه در ۳ گروه‌تنظیم مجزا بریا شبکه مورد مطالعه دوم نشان داده شده است. همان‌گونه که بیان شد، تنظیم‌جریانی، تنظیم‌زمانی و نوع منحنی‌مشخصه برای هر رله در گروه‌تنظیم مربوطه به‌صورت بهینه حاصل شده است.

جدول (۱۰): گروه‌تنظیم منتخب اوّل بهینه‌ی رله‌های اضافه‌جریان برای شبکه‌ی مطالعاتی دوم نشان داده‌شده در شکل (۶) در روش پیشنهادی برای رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت تطبیقی با اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

شماره رله	*TMS*	I_b(A)	نوع منحنی مشخصه
۱	۱/۴۶۹	۲۳۶۹/۰۹۵	۳
۲	۱/۵۷۸	۱۹۱۲/۲۵۰	۳
۳	۱/۹۱۱	۲۵۵۰/۶۹۱	۳
۴	۲/۱۲۴	۷۹۳/۸۹۵	۳
۵	۰/۷۹۷	۱۱۷۵/۵۱۴	۳
۶	۲/۲۸۹	۸۸۲/۹۳۳	۳
۷	۰/۹۳۹	۲۰۸۰/۰۵۴	۳
۸	۰/۰۴۰	۱۶۲۹/۰۳۱	۳
۹	۰/۶۹۱	۸۲۶/۹۸۲	۳
۱۰	۱/۵۱۵	۱۳۳۷/۸۸۲	۳
۱۱	۲/۰۹۶	۱۹۳۱/۶۵۵	۳
۱۲	۰/۷۱۷	۱۳۸۶/۷۵۳	۳
۱۳	۱/۲۷۸	۱۷۵۶/۵۴۳	۳
۱۴	۱/۲۵۶	۱۴۳۷/۳۸۴	۳
۱۵	۱/۰۴۱	۱۳۹۸/۵۹۷	۳
۱۶	۱/۲۲۱	۱۳۷۱/۷۰۱	۳
۱۷	۱/۴۶۵	۱۰۷۱/۲۴۰	۳
۱۸	۰/۹۱۲	۱۸۱۷/۹۸۱	۳
۱۹	۰/۴۲۹	۱۸۶۵/۸۳۷	۳
۲۰	۰/۳۸۷	۱۰۴۵/۹۵۶	۱
۲۱	۰/۶۳۰	۳۱۱۷/۵۲۲	۳
۲۲	۰/۶۳۴	۱۰۴۴/۷۳۴	۲
۲۳	۰/۹۸۹	۱۷۷۹/۳۷۰	۳
۲۴	۱/۵۶۲	۱۹۱۶/۶۰۳	۳
۲۵	۱/۲۴۰	۱۵۷۳/۶۶۴	۳
۲۶	۰/۳۶۱	۵۵۰/۱۲۸	۳
۲۷	۰/۱۹۲	۷۱۵/۳۵۷	۳
۲۸	۲/۳۷۷	۵۹۶/۴۹۰	۳
۲۹	۲/۱۳۹	۱۸۶/۴۰۸	۳

در شکل (۷) نمودار همگرایی حل مسئله‌ی بهینه‌سازی حفاظت تطبیقی بادرنظرگیری محدودیت گروه‌تنظیم با بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه برای شبکه مورد مطالعه در شکل (۶) قابل مشاهده است. منحنی همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی نمایان‌گر این است که همگرایی در جواب‌های بهینه حاصل شده است.

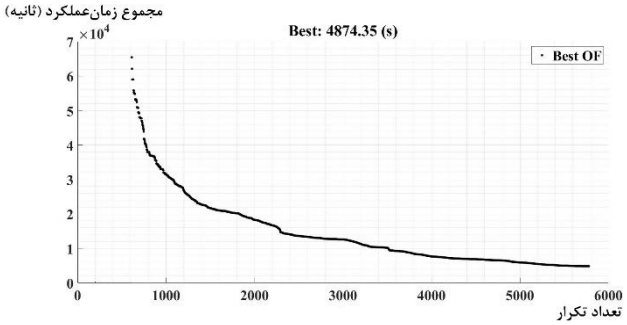
در جدول (۱۳)، گروه‌تنظیم منتخب فعال‌شده از بین ۳ گروه‌تنظیم آورده شده در جداول (۱۰)-(۱۲) برای رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار در پیکربندی‌های مختلف سیستم درج شده است. نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی شبکه مورد مطالعه دوم در حضور منابع تولیدپراکنده نیز مزایای روش پیشنهادی را تایید نموده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

جدول (۱۱): گروه‌تنظیم منتخب دوم بهینه‌ی رله‌های اضافه‌جریان برای شبکه‌ی مطالعاتی دوم در روش پیشنهادی برای رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت تطبیقی با اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

شماره رله	*TMS*	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه
۱	۰/۵۳۲	۱۲۴۴/۲۷۷	۳
۲	۱/۲۱۶	۱۲۲۴/۴۴۱	۳
۳	۱/۱۵۴	۲۳۰۷/۰۰۹	۳
۴	۰/۲۳۷	۹۶۳/۱۵۳	۱
۵	۱/۷۶۴	۳۴۲/۷۹۷	۳
۶	۲/۰۱۶	۶۱۵/۰۰۶	۳
۷	۱/۹۷۰	۲۱۳۰/۹۵۷	۳
۸	۰/۱۲۲	۲۰۹۸/۰۳۵	۳
۹	۲/۴۰۱	۱۰۴۲/۹۱۰	۳
۱۰	۰/۵۸۷	۱۲۰۷/۴۹۹	۲
۱۱	۱/۵۹۷	۱۲۴۹/۴۹۳	۳
۱۲	۱/۷۴۸	۱۱۱۴/۷۸۷	۳
۱۳	۱/۵۳۴	۱۳۷۱/۸۱۶	۳
۱۴	۱/۴۶۲	۱۵۵۰/۶۱۸	۳
۱۵	۱/۴۴۶	۱۳۳۳/۲۴۹	۳
۱۶	۱/۰۰۷	۱۸۶۲/۷۳۳	۳
۱۷	۲/۰۰۵	۱۵۷۰/۷۶۰	۳
۱۸	۰/۸۶۸	۲۹۹۳/۲۵۳	۳
۱۹	۱/۴۷۰	۱۳۹۴/۲۷۲	۳
۲۰	۱/۱۳۸	۹۱۵/۰۵۵	۳
۲۱	۰/۳۴۶	۱۳۵۸/۶۱۳	۱
۲۲	۱/۷۹۹	۱۶۸۹/۹۰۹	۳
۲۳	۰/۲۱۶	۱۴۲۵/۱۱۸	۱
۲۴	۲/۳۴۱	۱۹۷۰/۰۳۰	۳
۲۵	۱/۶۸۷	۱۴۱۸/۵۹۹	۳
۲۶	۰/۶۵۲	۱۱۹۷/۹۵۹	۳
۲۷	۱/۴۷۸	۴۳۲/۸۷۸	۳
۲۸	۰/۶۹۱	۱۰۳/۰۹۳	۲
۲۹	۰/۲۶۵	۱۸۶/۴۰۸	۲



شکل (۷): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی مورد مطالعاتی دوم در بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه

پس از استخراج زمان‌عملکرد رله‌های حفاظتی بر اساس نتایج بهینه و بررسی هماهنگی حفاظتی و قیود انتخاب‌پذیری سیستم حفاظتی تطبیقی پیشنهادی، مطالعات حفاظتی برای صحت‌سنجی نتایج بهینه و روش پیاده‌سازی شده در DIgSILENT انجام گردید. نتایج به‌دست آمده از مطالعات حفاظتی دلالت بر صحت نتایج و رعایت قیود هماهنگی حفاظتی در حالات مختلف بهره‌برداری دارد.

جدول (۱۲): گروه‌تنظیم منتخب سوم بهینه‌ی رله‌های اضافه‌جریان برای شبکه‌ی مطالعاتی دوم در روش پیشنهادی برای رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت تطبیقی با اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

شماره رله	*TMS*	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه
۱	۱/۸۴۴	۲۲۷۱/۸۳۰	۳
۲	۰/۳۹۷	۲۲۹۶/۹۴۶	۲
۳	۰/۳۲۱	۱۶۲۵/۱۵۸	۳
۴	۱/۶۸۴	۵۸۴/۸۸۷	۱
۵	۱/۷۹۶	۱۶۸۱/۶۷۰	۳
۶	۰/۳۴۱	۵۲۱/۳۵۱	۲
۷	۰/۹۳۸	۹۰۹/۴۸۱	۳
۸	۰/۳۴۰	۹۸۲/۴۵۲	۱
۹	۲/۲۸۴	۲۱۰/۴۰۴	۳
۱۰	۰/۳۱۴	۱۵۵۹/۹۳۱	۱
۱۱	۰/۸۸۵	۷۸۸/۱۳۲	۲
۱۲	۰/۲۰۲	۷۴۶/۵۴۳	۱
۱۳	۰/۳۹۱	۱۴۵۷/۵۵۲	۲
۱۴	۰/۴۳۱	۹۳۱/۷۴۶	۲
۱۵	۰/۳۲۴	۱۱۷۹/۴۵۶	۳
۱۶	۰/۴۰۷	۷۵۶/۹۸۴	۲
۱۷	۰/۲۲۱	۱۷۵۸/۱۶۷	۲
۱۸	۰/۳۰۷	۱۱۷۵/۳۹۰	۲
۱۹	۰/۵۸۶	۱۱۵۳/۱۵۷	۱
۲۰	۲/۴۵۱	۷۶۵/۱۶۱	۲
۲۱	۰/۳۴۶	۸۶۳/۵۹۵	۱
۲۲	۰/۸۲۳	۳۵۲/۹۷۲	۱
۲۳	۰/۹۴۲	۱۲۷۵/۱۸۲	۱
۲۴	۰/۱۲۱	۱۵۴۷/۱۲۸	۱
۲۵	۰/۲۸۰	۱۴۶۱/۵۳۶	۱
۲۶	۰/۶۵۴	۷۲۵/۶۲۲	۲
۲۷	۰/۳۵۱	۷۴۲/۵۱۸	۱
۲۸	۱/۴۲۵	۳۹۳/۷۴۹	۳
۲۹	۱/۴۲۰	۱۸۶/۴۰۸	۳

در شکل (۸)، برای نمونه، منحنی عملکرد رله‌های حفاظتی ۸ و ۶ در شبکه موردمطالعه اوّل نشان داده شده است. در این شبکه موردمطالعه، رله ۸، رله اصلی و رله ۶، رله پشتیبان خواهد بود. مطالعات حفاظتی در تمام حالات بهره‌برداری و بر اساس طرح حفاظت تطبیقی بهینه و فعال‌سازی گروه‌تنظیم‌های مختلف برای ۴ آرایش موردمطالعه، دلالت بر رعایت قیود هماهنگی حفاظتی دارد.

در شکل (۹) نیز، منحنی عملکرد رله‌های حفاظتی ۸ و ۱۶ در شبکه موردمطالعه دوم نشان داده شده است. در این شکل، رله ۸، رله اصلی و رله ۱۶، رله پشتیبان خواهد بود. در شبکه مطالعاتی دوم، به‌عنوان نمونه چهار پیکربندی به‌صورت تصادفی برگزیده شد و صحت‌سنجی این آرایش‌ها در شکل (۹) گزارش گردید.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

اوّلین نتیجه‌ای که از منحنی عملکرد رله‌های مذکور در هر دو شبکه مطالعاتی بر اساس مطالعات حفاظتی در DIgSILENT با تنظیم‌های بهینه طرح حفاظتی تطبیقی پیشنهادی می‌توان گرفت، رعایت قیود هماهنگی در تمام حالات بهره‌برداری است. این نتایج نشان می‌دهد که درنظرگیری تمام حالات بهره‌برداری و حفاظت تطبیقی باعث شده است یک طرح حفاظتی سریع حاصل شود، درحالی‌که ناهماهنگی حفاظتی ایجاد نگردد. درصورتی‌که اگر تنظیمات حفاظتی بهینه تنها بر اساس آرایش بهره‌برداری پایه استخراج گردد، امکان عدم هماهنگی رله‌ها در دیگر آرایش‌های بهره‌برداری محتمل است.

از دیگر نتایجی که از منحنی هماهنگی حفاظتی نشان‌داده‌شده در شکل (۵) می‌توان گرفت، تغییر در جریان اتصال‌کوتاه عبوری رله‌ها در آرایش‌های مختلف بهره‌برداری است. خروج پست‌های بالادست یا منابع تولیدپراکنده، سطح اتصال‌کوتاه و جریان‌خطای عبوری از رله‌های مختلف را باعث می‌شود. این تغییرات، به‌هم‌خوردن هماهنگی حفاظتی را به‌دنبال خواهد داشت.

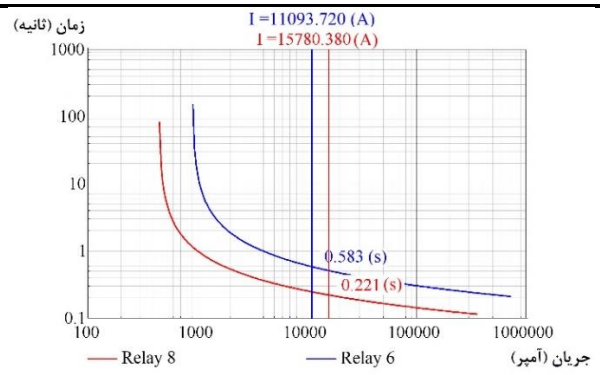
مقایسه نتایج نشان می‌دهد برای دو رله مذکور، در آرایش بهره‌برداری سوم و ناشی از خروج پست بالادست شماره (۲)، تغییر شدیدی در جریان اتصال‌کوتاه عبوری از رله اصلی و پشتیبان ایجاد شده است. با این‌جود، همچنان رله‌های اصلی و پشتیبان در این حالت بهره‌برداری با یکدیگر هماهنگ بوده و فاصله زمانی هماهنگی کافی برقرار مانده است.

جدول (۱۳): گروه‌تنظیم فعال‌شده در پیکربندی‌های مختلف شبکه مطالعاتی دوم

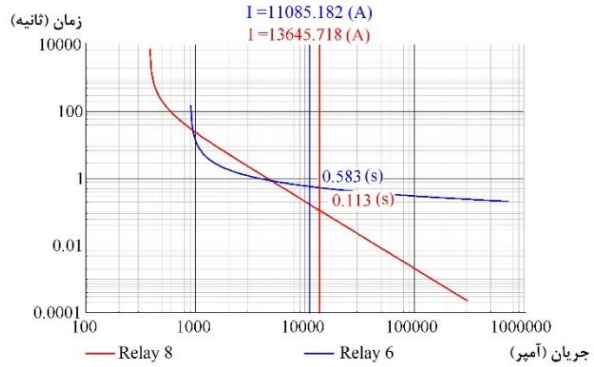
شماره رله	آرایش پایه	خروج پست بالادست (۱)	خروج پست بالادست (۲)	خروج پست بالادست (۳)	خروج منبع تولید پراکنده (۲)	خروج منبع تولید پراکنده (۳)	خروج منبع تولید پراکنده (۴)	خروج منبع تولید پراکنده (۵)	خروج منبع تولید پراکنده (۶)	خروج منبع تولید پراکنده (۷)	خروج منبع تولید پراکنده (۸)	خروج منبع تولید پراکنده (۹)	خروج منبع تولید پراکنده (۱۰)	خروج منبع تولید پراکنده (۱۲)	خروج منبع تولید پراکنده (۱۴)
۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۴	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۲	۳
۵	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۶	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۷	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۸	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۳
۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۰	۲	۳	۳	۲	۲	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۳
۱۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۵	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۶	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۷	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۱	۳	۳	۲	۲	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۳
۲۲	۳	۳	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۱	۳	۱	۳
۲۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۵	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۶	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۷	۳	۳	۱	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۳	۳
۲۸	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۹	۲	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

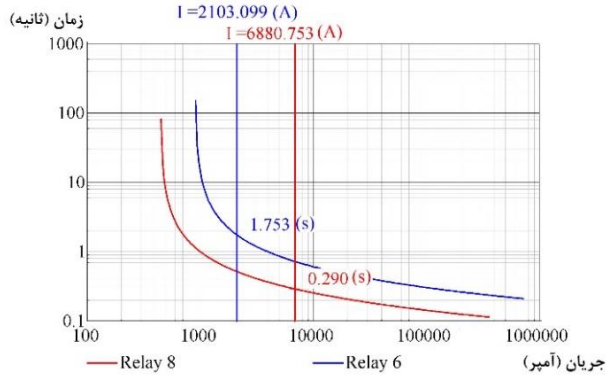
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]



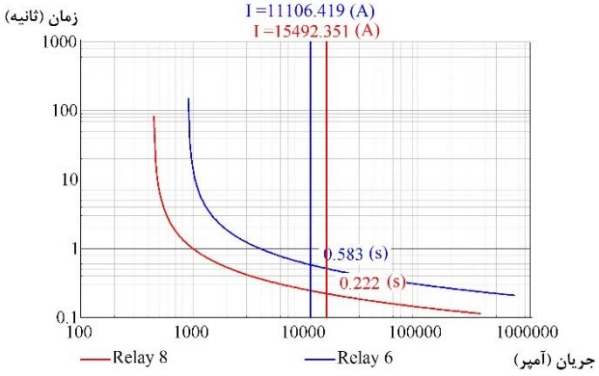
(الف) آرایش پایه و اتصال تمامی پست‌های بالادست



(ب) آرایش دوم و خروج پست بالادست شماره (۱)

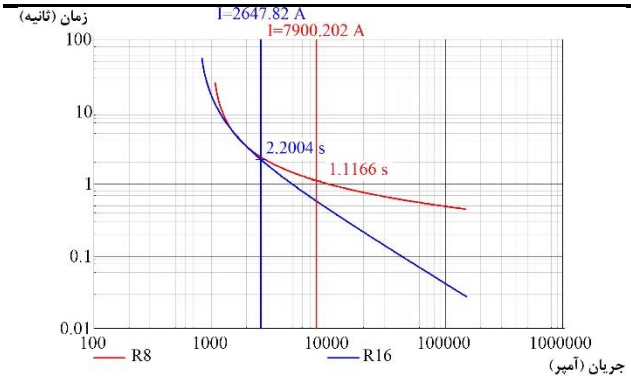


(ج) آرایش سوم و خروج پست بالادست شماره (۲)

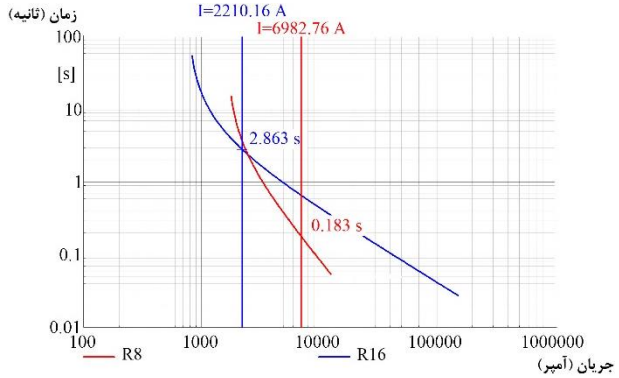


(د) آرایش چهارم و خروج پست بالادست شماره (۳)

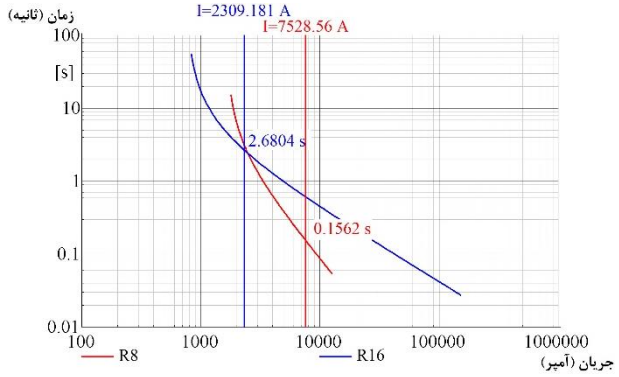
شکل (۸): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۸ و پشتیبان ۶ از شبکه‌ی موردمطالعه اول در آرایش‌های مختلف بر اساس مطالعات حفاظتی در DIgSILENT بر اساس تنظیمات بهینه در سناریوی اوّل



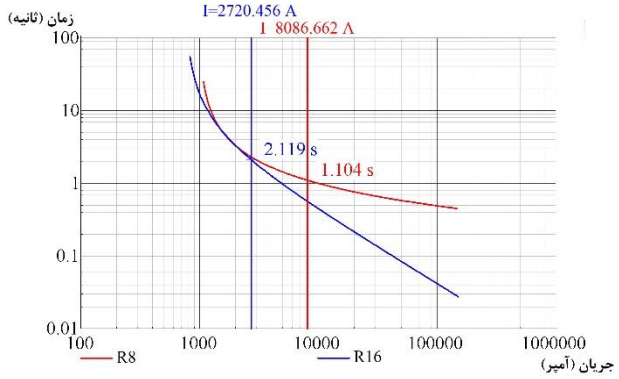
(الف) آرایش پایه و اتصال تمامی پست‌های بالادست



(ب) خروج پست بالادست شماره (۱)



(ج) خروج منبع تولیدپراکنده شماره (۵)



(د) خروج منبع تولیدپراکنده شماره (۱۴)

شکل (۹): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۸ و پشتیبان ۱۶ از شبکه‌ی موردمطالعه دوم در آرایش‌های مختلف بر اساس مطالعات حفاظتی در DIgSILENT بر اساس تنظیمات بهینه انتخاب منحنی‌مشخصه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

انطباق محاسبات برای زمان‌عملکرد رله‌های حفاظتی بر اساس روش پیشنهادی و شرایط شبیه‌سازی بر اساس کتابخانه رله‌های حفاظتی و سایر مدل‌های عملیاتی برای شبکه توزیع و سیستم قدرت در DIgSILENT، مزایای روش پیشنهادی و صحت محاسبات را تأیید می‌نماید. این مطالعات اطمینان کافی ایجاد می‌نماید که انحرافی در محاسبات زمان‌عملکرد رله‌های و مسئله بهینه‌سازی نسبت به شرایط واقعی ایجاد نشده است.

از دیگر مزایای روش پیشنهادی می‌توان به عملیاتی‌بودن آن در شبکه‌های واقعی اشاره نمود. اگرچه زمان‌عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در طرح پیشنهادی نسبت به حالتی که محدودیتی در تعداد گروه‌های تنظیم وجود نداشته باشد، بیشتر است؛ امّا مشکل طرح‌هایی که محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی را اعمال نمی‌نمایند، عدم عملیاتی‌بودن آن‌ها بر اساس محدودیت رله‌ها است.

۵- نتیجه‌گیری

از جمله چالش‌های اساسی در حفاظت شبکه‌های توزیع، تغییر در آرایش شبکه‌ها ناشی از خروج منابع تولیدپراکنده یا پست‌های بالادست می‌باشد. تغییرات در پیکربندی شبکه‌های توزیع سبب تغییر در اندازه و جهت جریان اتصال‌کوتاه خواهد شد؛ لذا استخراج تنظیمات بهینه رله‌ها بر اساس پیکربندی پایه منجر به نقض قیدهای هماهنگی متعددی در حالات و پیکربندی‌های دیگر شبکه می‌شود؛ بنابراین لازم است تنظیماتی به شبکه اعمال شود که در پیکربندی‌های مختلف صدق کند.

یکی از روش‌های پیشنهادی برای غلبه بر مشکلات هماهنگی حفاظتی ناشی از تغییر در آرایش و پیکربندی شبکه، بهره‌مندی از قابلیت گروه‌تنظیم رله‌های اضافه‌جریان در قالب طرح‌های حفاظت تطبیقی است. یکی دیگر از چالش‌های بررسی‌شده در این مقاله، موضوع محدودیت در تعداد گروه‌تنظیم‌های رله‌های اضافه‌جریان است. این محدودیت، سبب عدم توانایی در تخصیص یک گروه‌تنظیم به هر پیکربندی شبکه می‌شود. در این مقاله سعی شد تعداد گروه‌تنظیم‌های اختصاص‌یافته به پیکربندی‌های مختلف شبکه، به تعداد گروه‌تنظیم‌های موجود در رله‌های تجاری باشد؛ که غالباً رله‌های اضافه‌جریان دارای ۳ گروه‌تنظیم هستند. افزایش زمان عملکرد رله‌های حفاظتی بدون لحاظ نمودن تعداد گروه‌های تنظیمی محدود رله‌ها نسبت به روش پیشنهادی با اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی، به میزان ۵۳/۷۹٪ است. از آن‌جایی که افزایش زمان عملکرد با تعداد گروه‌های تنظیم محدود در بازه منطقی و قابل‌قبول قرار دارد؛ می‌توان استنتاج نمود که راه‌حل اعمال تنظیمات مختلف و مستقل از گروه‌های تنظیمی برای آرایش‌های مختلف بر اساس روش پیشنهادی، روش موثر و مفیدی خواهد بود.

از دیگر مزایای روش پیشنهادی که کمک شایانی به تسریعِ طرح حفاظتی و پشتیبانی از تمامی آرایش‌های شبکه را می‌کند، بهینه‌سازی منحنی‌مشخصه رله‌های حفاظتی علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی است. نتایج به‌دست آمده دلالت بر ۵۴/۲۷٪ بهبود در زمان‌عملکرد رله‌های حفاظتی با انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه نسبت به حالت استفاده از منحنی‌مشخصه یکسان برای تمامی رله‌ها و به‌صورت پیش‌فرض دارد که برتری روش پیشنهادی را برجسته می‌سازد.

مراجع

Aghdam, T. S., H. K. Karegar and H. H. Zeineldin (2019). "Optimal Coordination of Double-Inverse Overcurrent Relays for Stable Operation of DGs." IEEE Transactions on Industrial Informatics **15**(1): 183-192.

Ahmadi, S.-A., H. Karami and B. Gharehpetian (2017). "Comprehensive coordination of combined directional overcurrent and distance relays considering miscoordination reduction." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **92**: 42-52.

Alam, M. N. (2019). "Adaptive Protection Coordination Scheme Using Numerical Directional Overcurrent Relays." IEEE Transactions on Industrial Informatics **15**(1): 64-73.

Alam, M. N .(2019) "Overcurrent protection of AC microgrids using mixed characteristic curves of relays." Computers & Electrical Engineering **74**: 74-88.

Alam, M. N., B. Das and V. Pant (2020). "Protection coordination scheme for directional overcurrent relays considering change in network topology and OLTC tap position." Electric Power Systems Research **185**: 106395.

Amraee, T., A. Ranjbar and B. Mozaffari (2018). "Multi-Stage Under Frequency Load Shedding Relay in Islanded Distribution Systems." ku-energy **7**(4): 2-11.

Andruszkiewicz, J., J. Lorenc, B. Staszak, A. Weychan and B. Zięba (2022). "Overcurrent protection against multi-phase faults in MV networks based on negative and zero sequence criteria." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **134**: 1074.

Bouchekara, H. R. E. H., M. Zellagui and M. A. Abido (2017). "Optimal coordination of directional overcurrent relays using a modified electromagnetic field optimization algorithm." Applied Soft Computing **54**: 267-283.

Chandra, A. and A. K. Pradhan (202" .(٠Model-free angle stability assessment using wide area measurements." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **120**: 105972.

Darabi, A., M. Bagheri and G. B. Gharehpetian (2020). "Highly reliable overcurrent protection scheme for highly meshed power systems." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **119**: 105874.

El-Naily, N., S. M. Saad and F. A. Mohamed (2020). "Novel approach for optimum coordination of overcurrent relays to enhance microgrid earth fault protection scheme." Sustainable Cities and Society **54**: 102006.

Elmitwally, A., M. S. Kandil, E. Gouda and A. Amer (2020). "Mitigation of DGs Impact on Variable-Topology Meshed Network Protection System by Optimal Fault Current Limiters Considering Overcurrent Relay Coordination." Electric Power Systems Research **186**: 106417.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]

Rahimi, M., B. Fani, M. Moazzami, M. Dehghani and G. Shahgholian (2020). "An Online Free Penetration Multi-Stage Fuse Saving Protection Scheme in Distribution Systems with Photovoltaic Sources." ieijqp **9**(2): 24-35.

Sadeghi, M. H., A. Dastfan and Y. Damchi (2021). "Robust and adaptive coordination approaches for co-optimization of voltage dip and directional overcurrent relays coordination." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **129**: 106850.

Saleh, K. A., H. H. Zeineldin and E. F. El-Saadany (2017). "Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N $-$1 Contingency." IEEE Transactions on Industrial Informatics **13**(5): 2270-2278.

Samadi, A. and R. Mohammadi Chabanloo (2020). "Adaptive coordination of overcurrent relays in active distribution networks based on independent change of relays' setting groups." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **120**: 106026.

Sharaf, H. M., H. H. Zeineldin and E. El-Saadany (2018). "Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays." IEEE Transactions on Smart Grid **9**(1): 143-151.

Urdaneta, A. J., L. G. Perez and H. Restrepo (1997). "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering dynamic changes in the network topology ". IEEE Transactions on Power Delivery **12**(4): 1458-1464.

Yazdaninejadi, A., D. Nazarpour and S. Golshannavaz (2020). "Sustainable electrification in critical infrastructure: Variable characteristics for overcurrent protection considering DG stability." Sustainable Cities and Society **54**: 102022.

ElSayed, S. K. and E. E. Elattar (2021). "Hybrid Harris hawks optimization with sequential quadratic programming for optimal coordination of directional overcurrent relays incorporating distributed generation." Alexandria Engineering Journal **60**(2): 2421-2433.

Entekhabi-Nooshabadi, A. M., H. Hashemi-Dezaki and S. A. Taher (2021). "Optimal microgrid's protection coordination considering N-1 contingency and optimum relay characteristics." Applied Soft Computing **98**: 106741.

Fatemi, S. S. and H. Samet (2020). "Considering DGs Voltage Protection in Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays to Minimize the Energy Not Supplied." IEEE Systems Journal: 1-9.

Ghanbari, M., M. Gandomkar and J. Nikoukaar (2020). "Decreasing Distribution Generation Effects on Grid Short Circuit Level Using Superconducting Fault Current Limiter Through Updating Relays Set-Points." ieijqp **9**(3): 28-40.

Hosseini, S. A., H. Askarian-Abyaneh, S. H. H. sadeghi, F. Razavi (2017). "Evaluation of effectiveness of uncertainty in communication links on the adaptive protection schemes." ieijqp **6**(1): 8-19.

Jazayeri, S. A., G. Shahgholian, B. Fani and M. Moazzam (2021). "Hierarchical Protection Scheme Based on Multi-Agent Systems in Distributed Networks in the Presence of Distributed Generation Resources." jiaeee **18**(2): 93-106.

Kazemi Karegar, H. and A. Abbasi (2019). "appropriation of differential protection for optimal protection of active distribution networks under different configurations." ieijqp **7**(2): 113-121.

Khatua, S. and V. Mukherjee (2021). "Adaptive overcurrent protection scheme suitable for station blackout power supply of nuclear power plant operated through an integrated microgrid." Electric Power Systems Research **192**: 106934.

Mahboubkhah, A., V. Talavat and M. Beiraghi (2020). "Considering transient state in interconnected networks during fault for coordination of directional overcurrent relays." Electric Power Systems Research **186**: 106413.

Mishra, P., A. K. Pradhan and P. Bajpai (2020). "A Positive Sequence Relaying Method for Solar Photovoltaic Integrated Distribution System." IEEE Transactions on Power Delivery: 1-1.

Narimani, A. and H. Hashemi-Dezaki (2020). "Optimal stability-oriented protection coordination of smart grid's directional overcurrent relays based on optimized tripping characteristics in double-inverse model using high-set relay." International Journal of Electrical Power & Energy Systems **133**: 107249.

Nascimento, J. P., N. S. D. Brito and B. A. Souza (2020). "An adaptive overcurrent protection system applied to distribution systems." Computers & Electrical Engineering **81**: 106545.

Pico, J. D., D. Celeita and G. Ramos (2016). "Protection Coordination Analysis Under a Real-Time Architecture for Industrial Distribution Systems Based on the Std IEEE 242-2001." IEEE Transactions on Industry Applications **52**(4): 2826-2833.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.4.0]