

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-Dezaki¹, Assistant Professor, Mohammad Shamsi², 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

حفاظت تطبیقی بهینه شبکه‌های توزیع فعال با انتخاب منحنی مشخصه استاندارد بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار و در نظرگیری 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. در صورت عدم توجه به پیکربندی‌های شبکه، بروز نقض قیودهای 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 گروه تنظیم 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 در نظر گرفتن 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 در نظر گرفتن تعداد محدود گروه‌های تنظیم رله‌ها به‌دست خواهد آمد. یکی از مزایا و نوآوری‌های روش پیشنهادی، بهینه‌سازی منحنی مشخصه‌ی رله‌های حفاظتی در کنار بهینه‌سازی تنظیمات زمانی و جریانی است که در طرح‌های حفاظت تطبیقی 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 زمان عملکرد 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 دلال بر برتری قابل توجه ۵۴/۲۷٪ در زمان عملکرد سیستم حفاظتی نسبت به طرح‌های حفاظت تطبیقی با منحنی مشخصه پیش فرض دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع فعال، حفاظت تطبیقی، حفاظت بهینه، پیکربندی‌های مختلف شبکه، رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار، انتخاب بهینه منحنی مشخصه 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.

علائم و اختصارات

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. 2021, Jazayeri, Shahgholian et al. 2020). یکی از این خطرات، خطرات ناشی از اتصال کوتاه 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 حفاظت شبکه در مقابل اتصال کوتاه 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 حفاظتی 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 متصل به‌شبکه، جزیره‌ای و ... نیز مطلوب نیست. از این‌رو، در صورت ایجاد تغییرات در آرایش شبکه، مقدار و جهت جریان خطا 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 در نظرگیری شرایط مختلف بهره‌برداری و برای جلوگیری از نقض قیود هماهنگی در شرایط مختلف،

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 زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در پیکربندی c ام
SG	گروه‌تنظیم‌های رله‌های حفاظتی که به پیکربندی‌های مختلف تخصیص داده می‌شود.
CS^s	منحنی مشخصه بهینه‌شده در s آمین گروه‌تنظیم
TDS^s	تنظیم‌زمانی در s آمین گروه‌تنظیم
PCS_i^s	تنظیم‌جریانی رله i ام در s آمین گروه‌تنظیم
$t_{i,c}$	زمان عملکرد رله اصلی i ام در پیکربندی c ام
$t_{j,c}$	زمان عملکرد رله پشتیبان j ام در پیکربندی c ام
A_i^c	مقدار ضریب A برای رله i ام در پیکربندی c ام
B_i^c	مقدار ضریب B برای رله i ام در پیکربندی c ام
s	شاخص بیانگر گروه‌های تنظیم
TDS_i^c	تنظیم‌زمانی رله i ام در پیکربندی c ام
I_f^c	مقدار جریان خطا در پیکربندی c ام
N_{SG}	حداکثر تعداد گروه‌تنظیم رله‌های حفاظتی
CS_i^c	منحنی مشخصه بهینه‌شده رله i ام در پیکربندی c ام
TDS_i^c	تنظیم‌زمانی رله i ام در پیکربندی c ام
PCS_i^c	تنظیم‌جریانی رله i ام در پیکربندی c ام
CS_i^s	منحنی مشخصه بهینه‌شده رله i ام در s آمین گروه‌تنظیم
TDS_i^s	تنظیم‌زمانی رله i ام در s آمین گروه‌تنظیم
PCS_i^s	تنظیم‌جریانی رله i ام در s آمین گروه‌تنظیم
CTI	فاصله زمانی هماهنگی
TDS_i	تنظیم‌زمانی رله i ام
TDS_i^{\min}	مقدار تنظیم‌زمانی کمینه رله i ام
TDS_i^{\max}	مقدار تنظیم‌زمانی بیشینه رله i ام
PCS_i	تنظیم‌جریانی رله i ام
PCS_i^{\min}	مقدار تنظیم‌جریانی کمینه رله i ام
PCS_i^{\max}	مقدار تنظیم‌جریانی بیشینه رله i ام

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، به جای اینکه در یک آرایش بهره‌برداری خاص، تمام رله‌های اضافه‌جریان از یک گروه تنظیم 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 کارایی بهتر سیستم‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع، انتخاب بهینه منحنی مشخصه رله است. در صورت بهره‌مندی از این راهکار، علاوه بر تنظیمات جریانی و زمانی رله‌های اضافه‌جریان، نوع منحنی مشخصه رله نیز بهینه خواهد شد و سبب ایجاد طرح‌های حفاظتی بهینه با زمان عملکرد کمتری می‌شود؛ رویکرد نویسندگان در (Ahmadi, Karami et al. 2017, Aghdam, Karegar et al. 2019, Alam 2019, Yazdaninejadi, Narimani 2020) همین مبنای بوده است. در (Nazarpour et al. 2020 and Hashemi-Dezaki 2021)، انتخاب منحنی مشخصه بهینه برای رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار با منحنی قطع اصلی و کمکی و در نظرگیری قیود پایداری گذرای منابع تولیدپراکنده پیشنهاد شده است. در پژوهش مذکور، نشان داده شده است که انتخاب منحنی مشخصه بهینه نسبت به تعیین یک مشخصه پیش‌فرض برای رله‌های حفاظتی می‌تواند زمان عملکرد 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 منحنی مشخصه رله‌های اضافه‌جریان در کنار طرح حفاظتی تطبیقی با در نظرگیری تعداد محدود گروه‌های تنظیم است. این مقاله، طرح حفاظت تطبیقی نوینی را پیشنهاد خواهد داد که توسعه‌یافته روش بیان‌شده در (Samadi and Mohammadi Chabanloo 2020) با کمک انتخاب منحنی مشخصه بهینه استاندارد است.

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

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

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 جریان خطا 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 در نظرگیری آرایش‌های مختلف شبکه، مبتنی بر اختصاص یک گروه‌تنظیم به رله‌ها ارائه شده است؛ عیب این روش افزایش زمان عملکرد رله‌ها به دلیل 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 زمان عملکرد 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 به تعداد 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 در نظرگیری پیکربندی‌های مختلف شبکه به کمک اعمال تعداد گروه‌های تنظیم محدود به رله‌ها ارائه

حفاظت تطبیقی بهینه شبکه‌های توزیع فعال با انتخاب منحنی مشخصه استاندارد بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار و در نظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

پیشنهادی، تنظیم‌جریانی، تنظیم‌زمانی و نوع منحنی مشخصه‌ی رله‌ها می‌باشند. همان‌گونه که بیان شد، برای هر رله، ۳ گروه تنظیم مختلف لحاظ خواهد شد. در نظر گرفتن ۳ گروه تنظیم 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 پخش بار و اتصال کوتاه 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

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

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، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

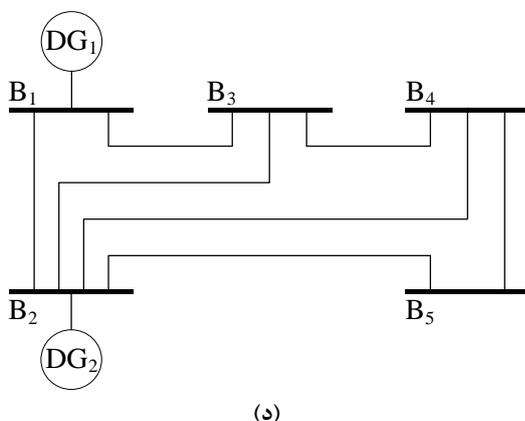
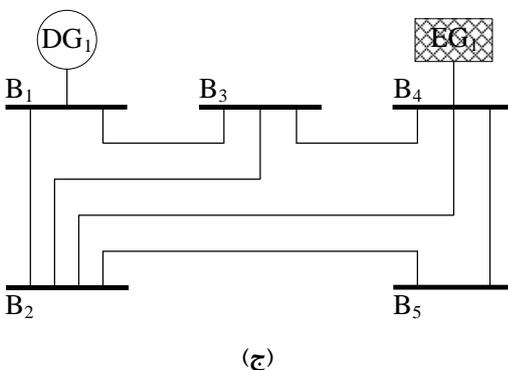
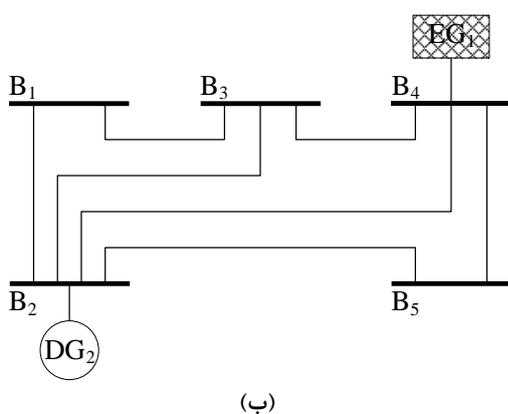
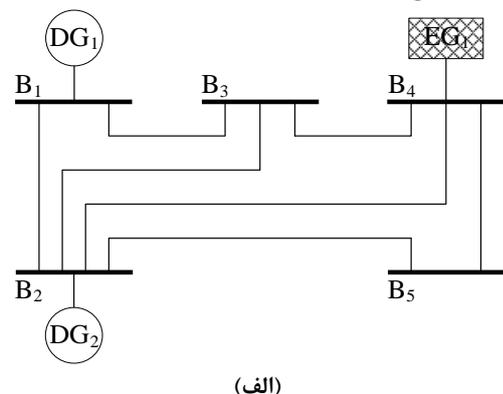
۲- بیان مسئله

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

نتایج به‌دست‌آمده دلالت بر برتری روش پیشنهادی با کمک حفاظت تطبیقی به‌همراه محدودیت تعداد گروه تنظیم و انتخاب بهینه منحنی مشخصه رله‌ها دارد. در ضمن 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 منحنی مشخصه استاندارد برای رله‌های حفاظتی اضافه‌جریان جهت‌دار یک راهکار مناسب و از سوی دیگر عملیاتی است. عملیاتی بودن طرح پیشنهادی، انتخاب منحنی مشخصه

می‌باشد. در این مقاله، مجموع زمان عملکرد 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 نشان دادن تعداد حالات مختلف بهره‌برداری بیشتر از تعداد گروه‌تنظیم رله‌ها

حالت بهره‌برداری متصل به شبکه 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 بهتر مسئله‌ی فوق، شبکه ۵ شین نشان داده شده 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 در نظرگیری 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 در نظرگیری تعداد گروه‌های تنظیم محدود و انتخاب بهینه منحنی‌مشخصه توسعه داده خواهد شد. در نظرگیری آرایش‌های مختلفی از قبیل خروج یکی از پست‌های بالادست یا منابع تولید پراکنده در کنار حالات بهره‌برداری متصل به شبکه 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 زمان عملکرد رله‌های اصلی یا اختلاف زمانی رله‌های اصلی و پشتیبان یا مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان، نمونه‌هایی از توابع هدف مورد استفاده برای بهینه‌سازی طرح‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبکه‌ها

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 به ترتیب 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 منحنی مشخصه 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.

$$\exists s \in SG = \{1, 2, \dots, N_{SG}\} \ni \begin{cases} CS_i^c = CS_i^s \\ TDS_i^c = TDS_i^s \\ PCS_i^c = PCS_i^s \end{cases} \quad (3)$$

انتخاب ضرایب منحنی مشخصه استاندارد بر اساس متغیر تصمیم مربوطه در مسئله بهینه‌سازی نیز به شکل زیر پیاده‌سازی خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} A_i^c \\ B_i^c \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0.14 \\ 0.02 \end{bmatrix} & CS_i^c = 1 \\ \begin{bmatrix} 13.5 \\ 1 \end{bmatrix} & CS_i^c = 2 \\ \begin{bmatrix} 80 \\ 2 \end{bmatrix} & CS_i^c = 3 \end{cases} \quad (4)$$

از جمله مزایای روش پیشنهادی، در نظرگیری تمام پیکربندی‌های مختلف شبکه، اعمال تعداد محدود گروه‌تنظیم به شبکه‌ی توزیع و همچنین بهینه‌سازی منحنی مشخصه‌ی 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 زمان عملکرد رله‌ی اصلی و پشتیبان، که به‌عنوان فاصله زمانی هماهنگی (CTI) شناخته می‌شود، در نظر 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 در نظر 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.

$$t_{j,c} - t_{i,c} \geq CTI \quad (5)$$

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

$$OF = \sum_{c=1}^{N_C} T_c (SG, CS^s, TDS^s, PCS_i^s) \quad (1)$$

$$= \sum_{c=1}^{N_C} \left(\sum_{i=1}^{N_{PR}} t_{i,c} + \sum_{j=1}^{N_{BR}} t_{j,c} \right)$$

در تابع هدف نشان‌داده‌شده در (۱) برای حفاظت تطبیقی شبکه‌های توزیع فعال، c و s به ترتیب 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. در ضمن CS ، TDS و I_b متغیرهای بهینه‌سازی تابع هدف می‌باشند که به اندازه تعداد گروه‌های تنظیم حفاظتی تکرار خواهند شد.

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

$$t_{i,c} = \frac{A_i^c \times TDS_i^c}{\left(\frac{I_f^c}{PCS_i^c} \right)^{B_i^c} - 1} \quad (2)$$

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

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

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

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

قرار گیرد، زیرا یکی از نگرانی‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فراابتکاری، به‌دست‌آمدن کمینه‌های محلی به‌جای کمینه‌های سراسری است.

۴- نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، از بخش توزیع شبکه‌ی ۳۰ شین 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) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است. این شبکه از طریق ۳ پست بالادست در حال تغذیه می‌باشد. از آن جایی که آرایش‌های مختلف شبکه مورد مطالعه 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 در نظر گرفته شده است.

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

- سناریوی اول: بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی
- سناریوی دوم: استفاده از منحنی مشخصه EI برای تمامی رله‌ها به‌صورت پیش‌فرض
- سناریوی سوم: استفاده از منحنی مشخصه VI برای تمامی رله‌ها به‌صورت پیش‌فرض
- سناریوی چهارم: استفاده از منحنی مشخصه NI برای تمامی رله‌ها به‌صورت پیش‌فرض

در جدول (۳)، مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان (تابع هدف پیشنهادی) طرح‌های حفاظتی برای آرایش‌های مختلف شبکه‌ی مورد مطالعه به‌کمک روش تطبیقی با بهینه‌سازی منحنی مشخصه و نیز یکسان‌بودن منحنی مشخصه در سناریوهای مختلف مقایسه شده است.

در شکل (۵) نیز نمودار همگرایی حل مسئله‌ی بهینه‌سازی حفاظت تطبیقی با بهینه‌سازی منحنی-مشخصه و منحنی مشخصه 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.

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.

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

$$PCS_i^{\min} \leq PCS_i \leq PCS_i^{\max} \quad (7)$$

در تعیین مقدار جریان تنظیم کمینه، علاوه بر محدودیت‌های تنظیم‌ها قابل اعمال به رله، باید بار بیشینه و اضافه‌بار مجاز لحاظ شود. در غیر این صورت، 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، جریان خطای کمینه باید منظور شود؛ به‌نحوی که سنجش جریان اتصال کوتاه به‌ازای خطا در دورترین فاصله نسبت به رله موردنظر (۹۹٪ خط) قرار دارد، صورت می‌گیرد. در صورتی که 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 مورد مطالعه 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 اتصال کوتاه برای تعیین جریان خطای عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش‌های مختلف شبکه ضروری است. توانمندی‌های نرم‌افزار DigSILENT برای انجام مطالعات اتصال کوتاه نیز از دیدگاه عملی و فنی مطلوب است. اگرچه از سایر نرم‌افزارها یا پیاده‌سازی مطالعات پخش توان و اتصال کوتاه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB یا ... می‌توان بهره برد.

پس از استخراج اطلاعات مورد نیاز مانند نتایج پخش توان و اتصال کوتاه، این اطلاعات به MATLAB ارسال خواهد شد. ضمناً مسئله بهینه‌سازی در محیط MATLAB پیاده‌سازی خواهد شد. الگوریتم فراابتکاری 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

جدول (۳): مقایسه‌ی نتایج طرح‌های حفاظت تطبیقی شبکه‌ی

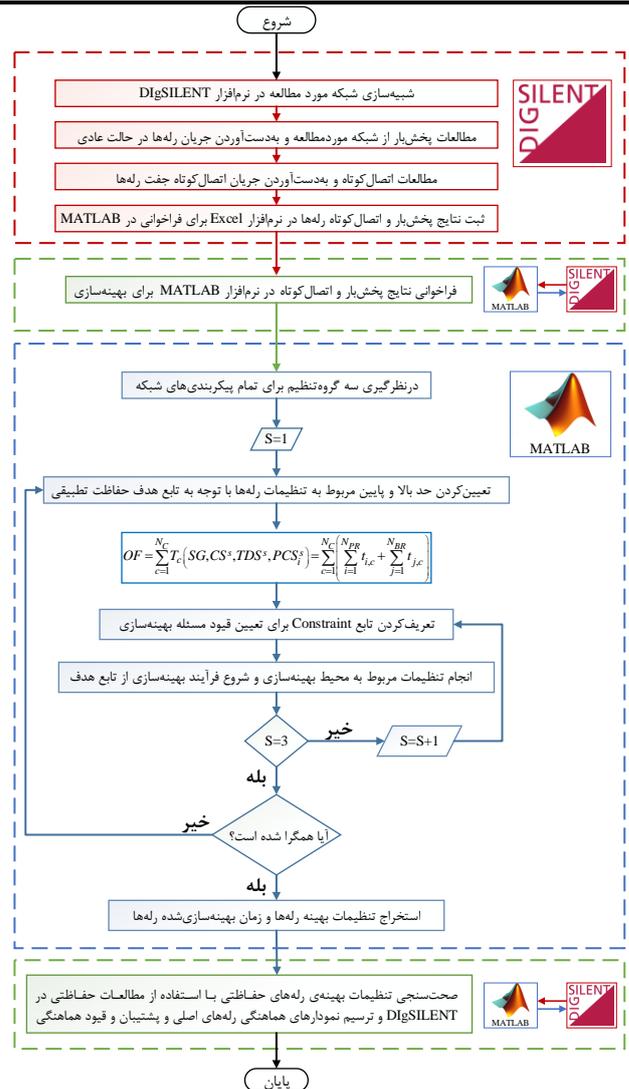
مورد مطالعه در سناریوهای مختلف	
مجموع زمان عملکرد رله‌ها (ثانیه)	سناریو
۶۱۸/۶۳۶	سناریوی اول- بهینه‌سازی منحنی مشخصه (روش پیشنهادی)
۱۳۵۲/۸۶	سناریوی دوم- در نظر گرفتن منحنی مشخصه‌ی VI برای رله‌ها
۱۵۵۸/۷۶	سناریوی سوم- در نظر گرفتن منحنی مشخصه‌ی EI برای رله‌ها
۱۷۵۶/۹۶	سناریوی چهارم- در نظر گرفتن منحنی مشخصه‌ی NI برای رله‌ها

با توجه به نتایج جدول شماره‌ی (۳) دریافت می‌شود که در صورت در نظر گرفتن منحنی مشخصه‌ی ثابت برای رله‌های اضافه‌جریان، منحنی مشخصه‌ی VI بهترین انتخاب است؛ مجموع زمان عملکرد در این حالت (۱۳۵۲/۸۶ ثانیه) نسبت به حالت بهینه‌سازی منحنی مشخصه (۶۱۸/۶۳۶ ثانیه)، ۵۴/۲۷ درصد بیشتر است و این حاکی از برتری 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)، مقایسه‌ی میان روش تطبیقی بدون محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی با روش پیشنهادی مبتنی بر حفاظت تطبیقی با در نظر گرفتن محدودیت گروه تنظیمی صورت گرفته است. نتایج این مقایسه در جدول شماره (۴) قابل مشاهده است.

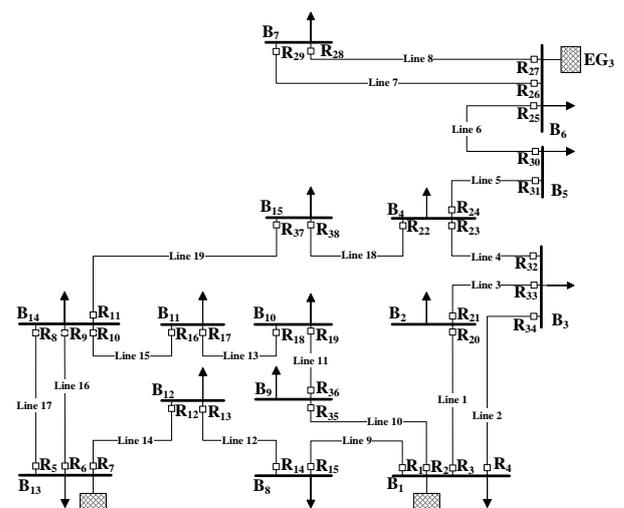
افزایش زمان طرح حفاظت تطبیقی ناشی از اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی نسبت به شرایطی که تعداد گروه‌های تنظیمی محدود نباشد، به میزان ۵۳/۷۹٪ است. به دلیل افزایش معمول و قابل قبول زمان عملکرد نسبت به روش تطبیقی بدون در نظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی رله‌ها، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که راه‌حل 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 منحنی مشخصه رله‌ها در طرح حفاظت تطبیقی با در نظرگیری محدودیت تعداد گروه‌های تنظیمی بر اساس نتایج مقایسه‌ای قابل استنتاج است. بهبود زمان عملکرد و افزایش فضای شدنی حل مسئله برای شبکه‌هایی که تعداد حالات بهره‌برداری زیادی داشته باشند، برجسته‌تر خواهد بود. در ادامه نتایج بهینه‌سازی شده‌ی بر اساس روش پیشنهادی ارائه شده است؛ سه‌دسته گروه تنظیمی برای شبکه‌ی مورد مطالعه در جدول (۵) قابل مشاهده است. در این جدول، تنظیمات زمانی، جریانی و منحنی مشخصه بهینه رله‌های موجود در شبکه مورد مطالعه، نشان داده شده است.

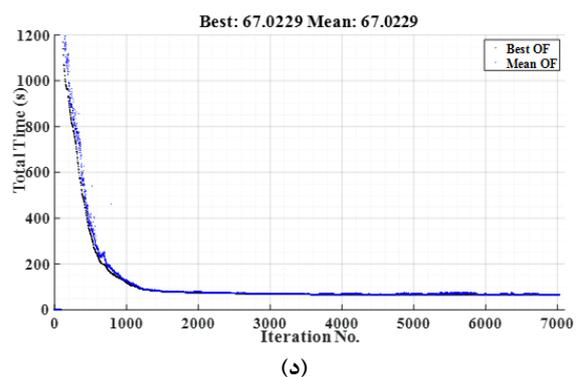
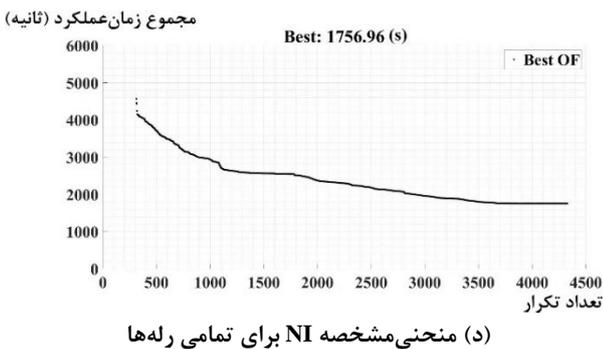
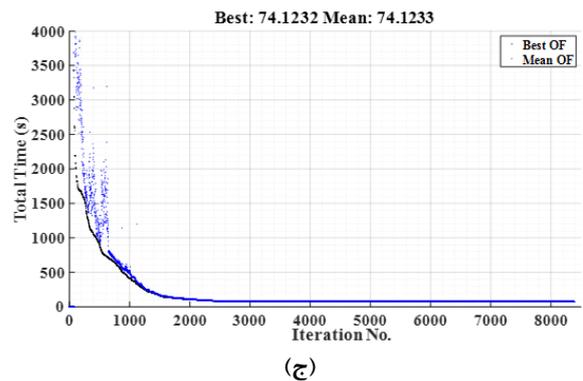
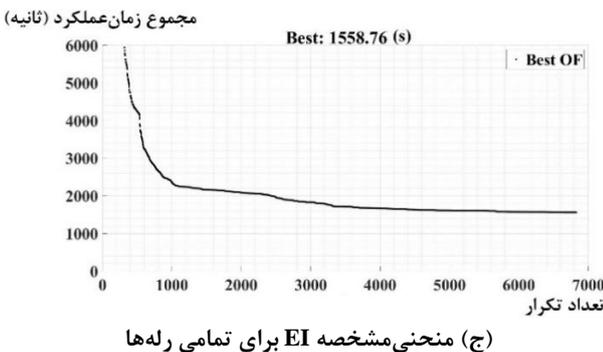
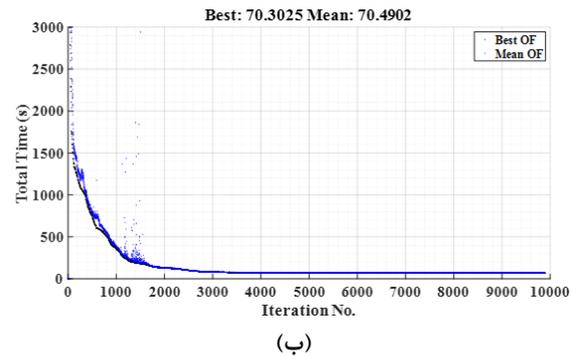
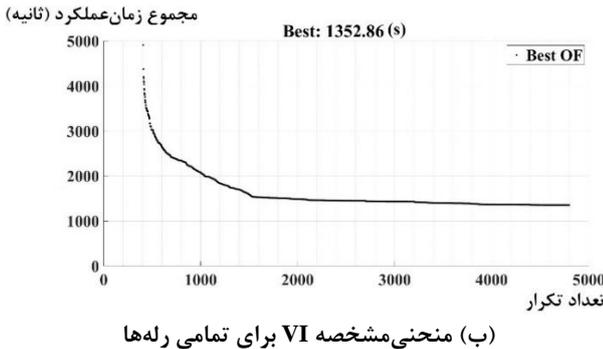
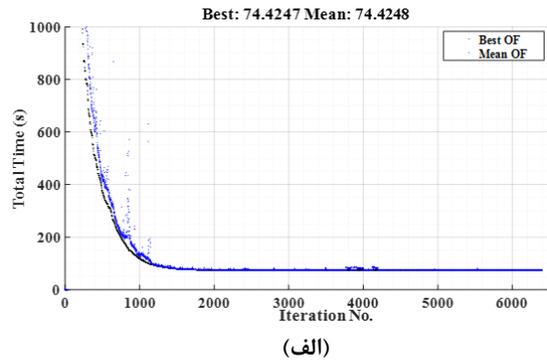
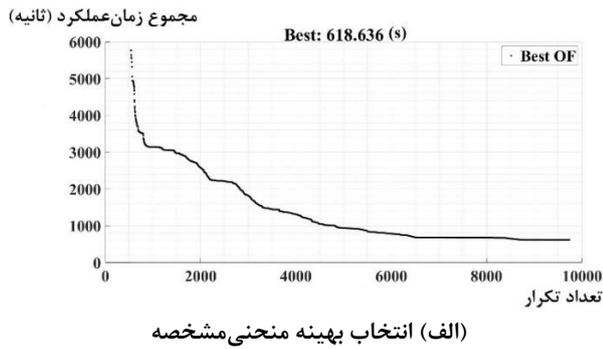


شکل (۲): روندنمای روش پیشنهادی پیاده‌سازی شده در

MATLAB و DigSILENT



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



شکل (۵): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی شبکه مورد مطالعه نشان داده شده در شکل (۳) در سناریوهای مختلف (بهینه‌سازی منحنی مشخصه و استفاده از منحنی مشخصه یکسان و پیش فرض برای تمامی رله‌ها)

در جدول (۵)، تنظیمات بهینه در ۳ گروه تنظیم مجزا نشان داده شده است. همان‌گونه که در روش پیشنهادی نیز توضیح داده شد، تنظیم جریانی، تنظیم زمانی و نوع منحنی مشخصه برای هر رله در گروه-

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

حفاظت تطبیقی بهینه شبکه‌های توزیع فعال با انتخاب منحنی مشخصه استاندارد بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار و در نظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

تنظیم مربوطه بهینه شده است. این گروه‌های تنظیم برای آرایش مربوطه نیز بر اساس متغیر تصمیم تعریف شده، برای آرایش‌های مختلف و به صورت متفاوت برای رله‌های امکان تخصیص تنظیم بهینه به رله‌ها با در نظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم را فراهم می‌کند.

جدول (۵): گروه تنظیم‌های مختلف بهینه رله‌های اضافه‌جریان برای شبکه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده در شکل (۳) در روش پیشنهادی با انتخاب بهینه منحنی مشخصه برای رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت تطبیقی با در نظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

شماره رله	گروه تنظیم اول			گروه تنظیم دوم			گروه تنظیم سوم		
	نوع منحنی مشخصه	$I_b(A)$	TMS	نوع منحنی مشخصه	$I_b(A)$	TMS	نوع منحنی مشخصه	$I_b(A)$	TMS
۱	۱	۲۱۷۲/۹۱۲	۰/۱۶۱	۳	۱۶۲۶/۷۴۹	۲/۰۱۲	۲	۲۳۱۴/۴۳۲	۰/۲۵۰
۲	۳	۲۳۷۵/۵۹۰	۱/۰۹۸	۳	۲۳۵۹/۶۶۳	۲/۰۴۲	۲	۵۷۷/۵۷۷	۱/۱۲۶
۳	۳	۵۲۶۷/۹۲۳	۲/۰۱۶	۳	۱۴۳۰/۲۸۷	۱/۲۸۵	۲	۱۱۴۳/۸۷۸	۰/۳۷۰
۴	۳	۱۲۱۱/۴۶۰	۱/۸۸۹	۳	۱۱۶۹/۲۶۴	۰/۹۴۴	۲	۷۴۴/۲۶۰	۰/۸۱۸
۵	۳	۴۹۲/۱۷۱۰	۱/۴۹۵	۳	۳۷۴/۹۰۵۶۶	۲/۵۳۶	۳	۵۶۲/۱۹۷	۰/۱۹۷
۶	۳	۱۶۷۹/۳۳۳	۱/۵۸۱	۳	۱۶۳۳/۱۹۴	۱/۹۴۴	۱	۸۹۹/۳۴۲	۰/۲۱۴
۷	۳	۱۷۰۹/۰۱۲	۰/۸۵۵	۲	۸۱۸/۲۲۷	۰/۱۸۴	۳	۹۲۴/۵۹۳	۱/۲۹۴
۸	۳	۵۸۱/۵۳۰	۲/۲۱۸	۳	۳۸۰/۲۹۰	۱/۸۱۸	۱	۴۴۵/۶۳۵	۰/۱۱۶
۹	۳	۱۱۴۱/۵۷۱	۰/۹۵۸	۳	۹۱۴/۲۵۹	۰/۱۱۶	۱	۱۰۳۲/۴۱۲	۰/۰۳۷
۱۰	۳	۱۴۰۶/۸۴۹	۰/۵۵۰	۳	۱۶۳۷/۰۵۵	۱/۲۱۴	۲	۱۲۷۸/۰۲۸۳	۰/۲۲۹
۱۱	۳	۲۰۲۰/۴۲۴	۰/۹۲۶	۳	۱۶۱۳/۰۸۴۵	۱/۲۸۸	۳	۵۶۵/۵۰۷۶۴	۱/۴۴۵
۱۲	۳	۷۶۸/۷۲۱۸	۲/۵۸۵	۳	۷۶۴/۴۳۶	۲/۵۸۳	۲	۷۹۶/۰۸۶۷	۰/۳۶۸
۱۳	۳	۸۷۸/۴۰۷۵	۱/۲۵۵	۱	۱۲۵۷/۷۶۲	۰/۰۸۶	۳	۱۲۶۹/۴۵۷	۰/۳۶۹
۱۴	۳	۱۴۸۲/۴۰۸	۰/۴۹۸	۳	۱۰۹۲/۰۸۰	۰/۱۸۹	۲	۹۶۸/۰۰۷	۰/۸۱۶
۱۵	۲	۶۰۲/۴	۱/۷۷۰	۳	۶۰۲/۴	۰/۱۱۱	۲	۶۰۲/۴	۱/۰۸۶
۱۶	۲	۴۶۱/۵۰۹	۰/۵۴۳	۲	۶۷۵/۹۰۷	۲/۶۳۶	۳	۱۰۲۳/۱۳۶	۱/۱۹۵
۱۷	۳	۱۵۶۹/۶۸۵	۰/۸۶۷	۳	۴۷۲/۰۰۴	۰/۹۶۳	۳	۱۵۵۴/۸۸۳	۱/۰۶۲۶
۱۸	۳	۱۳۲۳/۵۳۲	۲/۴۹۸	۳	۱۱۳۱/۷۴۶	۰/۲۱۸	۲	۱۱۳۹/۵۲۷	۰/۲۴۷
۱۹	۲	۶۲۲/۶۵۷	۱/۹۳۸	۲	۱۱۵۶/۴۲۶	۰/۷۶۱	۲	۵۰۶/۷۳۴۷	۰/۴۴۰
۲۰	۳	۹۱۹/۷۴۲	۱/۲۴۹	۳	۸۲۶/۵۵۷	۰/۶۴۱	۱	۸۶۴/۴۲۶	۰/۱۷۷۶
۲۱	۳	۱۸۶۴/۴۸۷	۰/۸۷۷	۳	۱۰۵۷/۵۴۱	۱/۳۳۷	۲	۱۳۶۶/۷۸۷	۰/۲۴۵
۲۲	۳	۶۴۹/۶۹۶	۰/۳۵۴	۳	۱۰۲۶/۸۶۰	۱/۰۰۴	۳	۵۱۹/۲۲۵	۰/۶۹۷
۲۳	۳	۱۰۶۲/۲۹۹	۱/۰۶۰	۳	۱۲۳۸/۴۸۳	۲/۳۰۰	۲	۶۲۸/۲۷۶	۰/۳۳۰
۲۴	۳	۵۲۰/۱۶۳	۰/۳۲۵	۳	۷۹۲/۲۹۱	۱/۶۰۷	۲	۱۸۲۸/۶۰۸	۲/۲۷۴
۲۵	۳	۴۵۳/۶	۱/۳۷۸	۳	۴۵۳/۶	۰/۷۸۹	۲	۴۵۳/۶	۲/۰۲۱
۲۶	۳	۳۲۹/۲۷۴	۰/۶۵۴	۳	۳۴۲/۰۲۸۰	۰/۱۴۷	۲	۶۳۰/۷۵۷	۱/۶۸۱
۲۷	۳	۲۷۷/۹۱۶	۲/۲۲۵	۳	۲۵۶/۶۰۴	۱/۴۲۱	۲	۱۸۷/۲۸۶	۰/۳۶۴
۲۸	۳	۱۰۰/۸	۱/۸۶۲	۳	۱۰۰/۸	۱/۲۴۹	۲	۱۰۰/۸	۰/۰۶۷۸
۲۹	۳	۱۴۵/۲	۱/۴۵۸	۳	۱۴۵/۲	۰/۶۷۵	۲	۱۴۵/۲	۰/۰۴۸۸
۳۰	۳	۱۳۱۰/۱۸۹	۰/۳۹۰	۳	۱۰۴۷/۵۹۹	۲/۳۱۸	۲	۴۵۳/۶۱۳	۰/۱۸۹
۳۱	۳	۴۵۳/۶	۱/۳۶۷	۳	۴۵۳/۶	۱/۶۱۴	۲	۴۵۳/۶	۰/۴۷۵
۳۲	۳	۱۹۷۴/۴۳۸	۰/۷۵۰	۳	۱۹۰۲/۷۸۸	۰/۲۲۲	۲	۱۵۸۵/۱۸۳	۰/۱۴۹
۳۳	۳	۲۳۳۴/۰۸۵	۱/۴۱۴	۳	۱۳۷۴/۴۱۰	۰/۱۵۴	۲	۱۱۶۰/۰۱۱	۰/۷۹۶
۳۴	۲	۶۳۲/۵۲۷	۰/۰۱۵	۲	۶۵۶/۳۲۹	۱/۷۸۰	۲	۳۹۷/۰۴۷	۰/۲۳۴
۳۵	۳	۴۷۱/۶۹۳	۲/۱۹۰	۳	۴۶۴/۲۱۹	۰/۳۷۹	۲	۴۶۷/۷۳۹	۰/۳۱۷
۳۶	۲	۱۱۰۶/۱۵۲	۱/۷۰۶	۲	۱۳۹۰/۰۰۷	۰/۲۳۴	۳	۱۴۷۵/۴۰۷	۱/۶۰۷
۳۷	۳	۱۲۵۶/۶۷۶	۲/۳۱۹	۳	۱۰۹۴/۳۲۱	۱/۲۲۸	۱	۹۷۳/۴۷۱	۰/۱۷۲
۳۸	۳	۹۵۷/۰۳۰	۱/۴۶۳	۳	۹۷۵/۳۱۰	۲/۳۸۴	۲	۶۸۷/۹۲۴	۰/۳۶۷

شبکه‌ی مورد مطالعه در آرایش‌های پایه و سایر آرایش‌ها و حالات بهره‌برداری (قطع پست‌های بالادست) را می‌توان به‌دست آورد. بررسی نتایج زمان عملکرد 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 مورد مطالعه

با آرایش پایه بر اساس سناریوی اول

شماره رله	TMS	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه	گروه تنظیم 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	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	۰/۳۳۴	۱۳۹۰/۰۰۷	۱	۲
۳۷	۰/۱۷۲	۹۷۳/۴۷۲	۱	۳
۳۸	۰/۳۶۷	۶۸۷/۹۲۴	۲	۳

جدول (۴): مقایسه نتایج طرح حفاظت تطبیقی بدون در نظر گرفتن محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیمی و روش پیشنهادی با در نظر گرفتن محدودیت گروه تنظیم رله‌ها برای شبکه ۳۰ شین IEEE نشان داده شده در شکل (۳)

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

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 منحنی مشخصه‌های 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 بر اساس یکی از ۳ گروه تنظیم پیشنهادی بهینه فعال خواهد شد. عدم یکسان بودن گروه تنظیم اعمال شده 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، منحنی مشخصه EI پیشنهاد شده است. اما 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 زمان عملکرد 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 به ترتیب 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 بهینه به‌دست آمده از روش پیشنهادی، زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان

موردنظر از طریق ۳ پست بالادست تغذیه می‌شود و نیز دارای ۱۱ منبع تولیدپراکنده است. در روش پیشنهادی، آرایش‌های مختلف شبکه‌ی مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ لذا حالت پایه و اتصال شبکه توزیع از طریق ۳ پست بالادست و هم‌چنین ۱۱ منبع تولیدپراکنده و خروج هر یک از پست‌های بالادست و منابع تولیدپراکنده در تنظیمات طرح حفاظتی تطبیقی پیشنهادی لحاظ شده است.

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

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

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

شماره رله	TMS	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه	گروه تنظیم 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	۲	۳
۱۵	۱/۰۸۶	۶۰۲/۴	۳	۳
۱۶	۰/۵۴۴	۴۶۱/۵۱۰	۱	۲
۱۷	۰/۹۶۴	۴۷۲/۰۰۵	۲	۳
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	۳	۲
۲۲	۰/۶۹۸	۵۱۹/۲۲۶	۳	۳
۲۳	۰/۳۳۱	۶۲۸/۲۷۶	۲	۳
۲۴	۰/۳۲۵	۵۲۰/۱۶۳	۱	۳
۲۵	۲/۰۲۱	۴۵۳/۶	۳	۲
۲۶	۰/۱۴۷	۳۴۲/۰۲۸	۲	۳
۲۷	۰/۳۶۴	۱۸۷/۲۸۶	۲	۳
۲۸	۰/۰۶۸	۱۰۰/۸	۲	۳
۲۹	۰/۰۴۹	۱۴۵/۲	۳	۲
۳۰	۰/۱۸۹	۴۵۳/۶۱۴	۲	۳
۳۱	۰/۴۷۶	۴۵۳/۶	۳	۲
۳۲	۰/۱۴۹	۱۵۸۵/۱۸۳	۳	۲
۳۳	۰/۱۵۵	۱۳۷۴/۴۱۱	۲	۲
۳۴	۰/۲۳۴	۳۹۷/۰۴۷	۳	۲
۳۵	۰/۳۸۰	۴۶۴/۲۱۹	۲	۳
۳۶	۰/۲۳۴	۱۳۹۰/۰۰۷	۱	۲
۳۷	۰/۱۷۲	۹۷۳/۴۷۲	۱	۳
۳۸	۰/۳۶۷	۶۸۷/۹۲۴	۲	۳

علاوه بر مطالعات موردی اول، روش پیشنهادی بر روی یک شبکه با حالات بهره‌برداری بیشتر نیز اعمال گردیده است. در شکل (۶)، بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE طبق اطلاعات مندرج در [۱۷] که دربرگیرنده ۱۱ منبع تولیدپراکنده علاوه بر ۳ پست بالادست شبکه مورد مطالعه در شکل (۳) است، نشان داده شده است. شبکه

جدول (۱۰): گروه تنظیم منتخب اول بهینه رله‌های اضافه‌جریان برای شبکه‌ی مطالعاتی دوم نشان داده شده در شکل (۶) در روش پیشنهادی برای رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت تطبیقی با اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

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

در شکل (۷) نمودار همگرایی حل مسئله‌ی بهینه‌سازی حفاظت تطبیقی بادرنگیری 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 فعال شده 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.

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

شماره رله	TMS	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه	گروه تنظیم 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.

حفاظت تطبیقی بهینه شبکه‌های توزیع فعال با انتخاب منحنی مشخصه استاندارد بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار و در نظرگیری محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

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 بهینه رله‌های اضافه‌جریان برای شبکه‌ی مطالعاتی دوم در روش پیشنهادی برای رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت تطبیقی با اعمال محدودیت در تعداد گروه‌های تنظیم

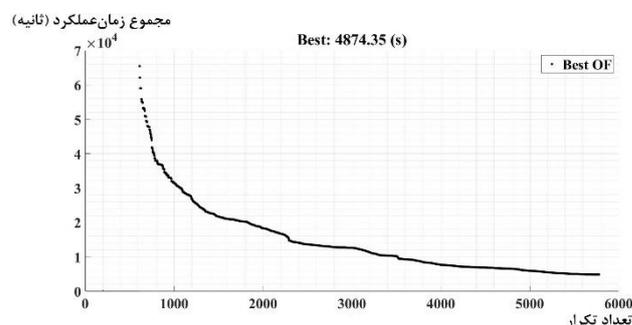
شماره رله	TMS	I_b (A)	نوع منحنی مشخصه
۱	۱/۸۴۴	۲۲۷۱/۸۳۰	۳
۲	۰/۳۹۷	۲۲۹۶/۹۴۶	۲
۳	۰/۳۲۱	۱۶۲۵/۱۵۸	۳
۴	۱/۶۸۴	۵۸۴/۸۸۷	۱
۵	۱/۷۹۶	۱۶۸۱/۶۷۰	۳
۶	۰/۳۴۱	۵۲۱/۳۵۱	۲
۷	۰/۹۳۸	۹۰۹/۴۸۱	۳
۸	۰/۳۴۰	۹۸۲/۴۵۲	۱
۹	۲/۲۸۴	۲۱۰/۴۰۴	۳
۱۰	۰/۳۱۴	۱۵۵۹/۹۳۱	۱
۱۱	۰/۸۸۵	۷۸۸/۱۳۲	۲
۱۲	۰/۲۰۲	۷۴۶/۵۴۳	۱
۱۳	۰/۳۹۱	۱۴۵۷/۵۵۲	۲
۱۴	۰/۴۳۱	۹۳۱/۷۴۶	۲
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

جدول (۱۱): گروه‌تنظیم منتخب دوم بهینه 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	۱۲۴۴/۳۷۷	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

در شکل (۸)، برای نمونه، منحنی عملکرد رله‌های حفاظتی ۸ و ۶ در شبکه مورد مطالعه اول نشان داده شده است. در این شبکه مورد مطالعه، 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 مورد مطالعه، دلالت بر رعایت قیود هماهنگی حفاظتی دارد.

در شکل (۹) نیز، منحنی عملکرد رله‌های حفاظتی ۸ و ۱۶ در شبکه مورد مطالعه 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.



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

پس از استخراج زمان عملکرد رله‌های حفاظتی بر اساس نتایج بهینه و بررسی هماهنگی حفاظتی و قیود انتخاب‌پذیری سیستم حفاظتی تطبیقی پیشنهادی، مطالعات حفاظتی برای صحت‌سنجی

تولید پراکنده، سطح اتصال کوتاه و جریان خطای عبوری از رله‌های مختلف را باعث می‌شود. این تغییرات، به هم خوردن هماهنگی حفاظتی را به دنبال خواهد داشت.

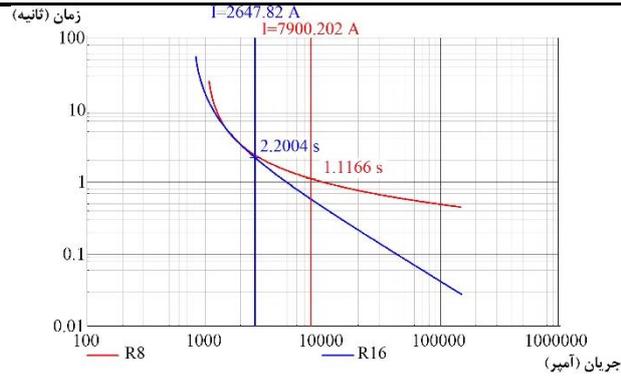
مقایسه نتایج نشان می‌دهد برای دو رله مذکور، در آرایش بهره‌برداری سوم و ناشی از خروج پست بالادست شماره (۲)، تغییر شدیدی در جریان اتصال کوتاه عبوری از رله اصلی و پشتیبان ایجاد شده است. با این‌جود، همچنان رله‌های اصلی و پشتیبان در این حالت بهره‌برداری با یکدیگر هماهنگ بوده و فاصله زمانی هماهنگی کافی برقرار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

اولین 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 در نظرگیری تمام حالات بهره‌برداری و حفاظت تطبیقی باعث شده است یک طرح حفاظتی سریع حاصل شود، در حالی که ناهماهنگی حفاظتی ایجاد نگردد. در صورتی که اگر تنظیمات حفاظتی بهینه تنها بر اساس آرایش بهره‌برداری پایه استخراج گردد، امکان عدم هماهنگی رله‌ها در دیگر آرایش‌های بهره‌برداری محتمل است.

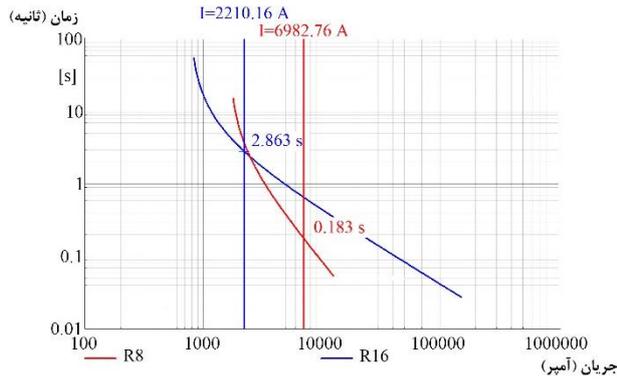
از دیگر نتایجی که از منحنی هماهنگی حفاظتی نشان داده شده در شکل (۵) می‌توان گرفت، تغییر در جریان اتصال کوتاه عبوری رله‌ها در آرایش‌های مختلف بهره‌برداری است. خروج پست‌های بالادست یا منابع

جدول (۱۳): گروه تنظیم فعال شده در پیکربندی‌های مختلف شبکه مطالعاتی دوم

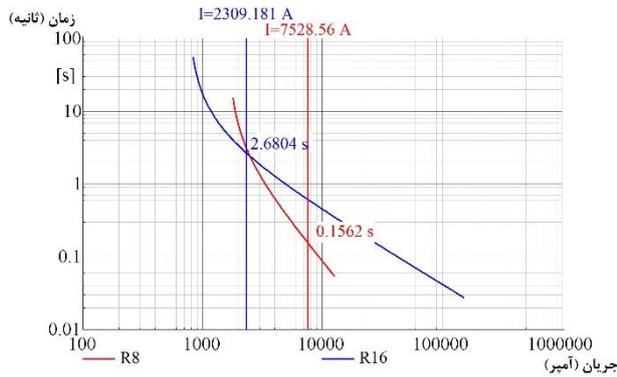
شماره رله	آرایش پایه	خروج پست بالادست (۱)	خروج پست بالادست (۲)	خروج پست بالادست (۳)	خروج منبع پراکنده (۲)	خروج منبع پراکنده (۳)	خروج منبع پراکنده (۴)	خروج منبع پراکنده (۵)	خروج منبع پراکنده (۶)	خروج منبع پراکنده (۷)	خروج منبع پراکنده (۸)	خروج منبع پراکنده (۹)	خروج منبع پراکنده (۱۰)	خروج منبع پراکنده (۱۲)	خروج منبع 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	۳	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	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲
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	۱	۳	۱	۳	۱	۳	۱	۳	۱	۳	۱
۹	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۰	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲
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	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۱	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۳
۲۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	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	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۷	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۸	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۹	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲



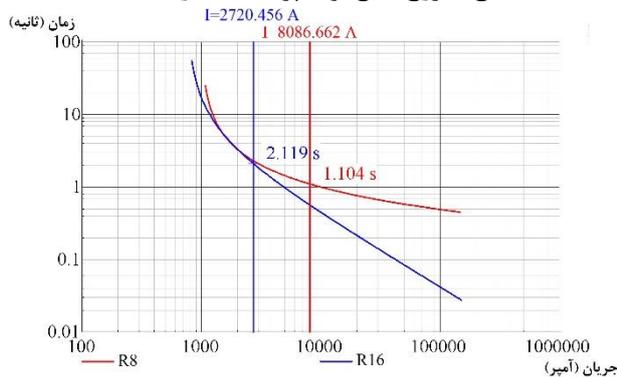
(الف) آرایش پایه و اتصال تمامی پست‌های بالادست



(ب) خروج پست بالادست شماره (۱)

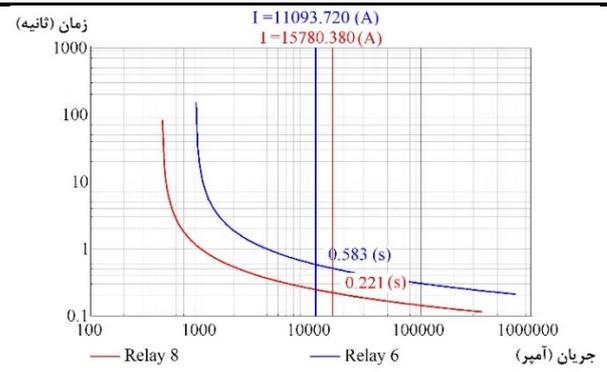


(ج) خروج منبع تولید پراکنده شماره (۵)

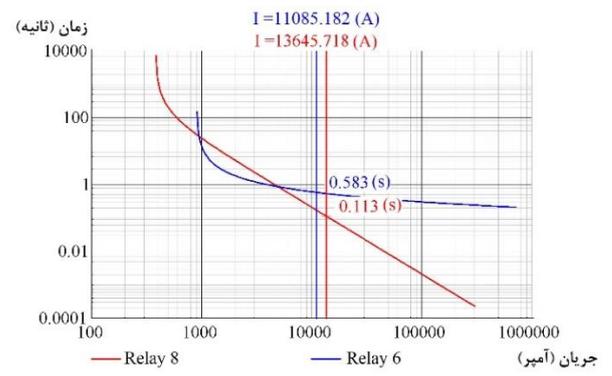


(د) خروج منبع تولید پراکنده شماره (۱۴)

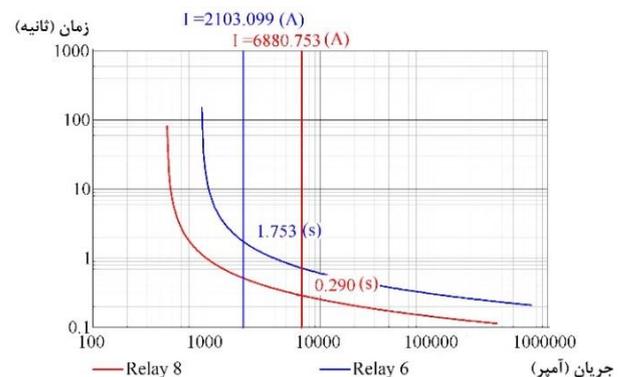
شکل (۹): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۸ و پشتیبان ۱۶ از شبکه‌ی مورد مطالعه دوم در آرایش‌های مختلف بر اساس مطالعات حفاظتی در DigSILENT بر اساس تنظیمات بهینه انتخاب منحنی مشخصه



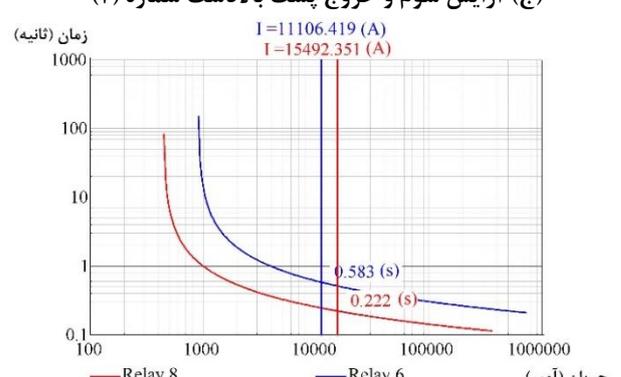
(الف) آرایش پایه و اتصال تمامی پست‌های بالادست



(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 مورد مطالعه اول در آرایش‌های مختلف بر اساس مطالعات حفاظتی در DigSILENT بر اساس تنظیمات بهینه در سناریوی اول

است. نتایج به دست آمده دلالت بر ۵۴/۲۷٪ بهبود در زمان عملکرد رله‌های حفاظتی با انتخاب بهینه منحنی مشخصه نسبت به حالت استفاده از منحنی مشخصه یکسان برای تمامی رله‌ها و به صورت پیش فرض 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.
- Bouchevara, 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 (2021). "Model-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.

انطباق محاسبات برای زمان عملکرد 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 زمان عملکرد 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 زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در طرح پیشنهادی نسبت به حالتی که محدودیتی در تعداد گروه‌های تنظیم وجود نداشته باشد، بیشتر است؛ اما 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 اتصال کوتاه 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 بررسی شده 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 اختصاص یافته 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 تنظیمی محدود در بازه منطقی و قابل قبول 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 تسریع طرح حفاظتی و پشتیبانی از تمامی آرایش‌های شبکه را می‌کند، بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی

- 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. Nikoukar (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.