

هماهنگی حفاظتی ریزشکه‌ها با استفاده از مشخصه‌های دوگانه رله‌های اضافه

جریان جهت‌دار بر اساس نوع منحنی و نقطه شکست بهینه

امیرحسین عطایی کجویی^۱ حامد هاشمی دزکی^۲ عباس کتابی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

ataee144@grad.kashanu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

hamed.hashemi@kashanu.ac.ir

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران

aketabi@kashanu.ac.ir

چکیده: تغییر در آرایش شبکه و حالات بهره‌برداری ریزشکه‌ها یکی از چالش‌های اساسی سیستم‌های حفاظتی است که می‌توان نقض قیود هماهنگی حفاظتی در برخی از شرایط را به‌دنبال داشته باشد. علیرغم مزایای متعدد طرح‌های مبتنی بر بستر ارتباطی و حفاظت تطبیقی، از آنجایی که این‌گونه طرح‌های حفاظتی نیاز به زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری داشته و از سویی ممکن است با مشکلات حملات سایبری یا خرابی سیستم‌های ارتباطی مواجه شوند، توسعه طرح‌های بی‌نیاز از بستر مخابراتی بسیار مورد توجه قرار دارد. در این مقاله، تلاش شده است روشی نوین بر اساس استفاده از رله‌های حفاظتی اضافه‌جریان با منحنی مشخصه دوگانه (دوسطحی) ارائه گردد که بدون نیاز به بستر مخابراتی برای حفاظت سریع ریزشکه در شرایط مختلف بهره‌برداری مناسب باشد. در پژوهش‌های ارائه شده موجود، خلاء تحقیقاتی در زمینه بهینه‌سازی نوع منحنی مشخصه بخش‌های مختلف منحنی عملکرد دوسطحی رله‌ها و نقطه شکست بهینه وجود دارد. در روش پیشنهادی، بهینه‌سازی نوع منحنی مشخصه بخش اول و بخش دوم رله-های حفاظتی و نقطه شکست در کنار تنظیمات جریانی و زمانی انجام می‌گیرد. از نرم‌افزار *DigSILENT* برای انجام مطالعات پخش توان و اتصال کوتاه استفاده شده و حل مسئله بهینه‌سازی در نرم‌افزار *MATLAB* با کمک الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شده است. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های ۸ شین *IEEE* و بخش توزیع شبکه ۳۰ شین *IEEE* به ترتیب ۱۲/۴۲٪ و ۹/۵۶ بهبود در زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی ایجاد نموده، که دلالت بر مزایای روش پیشنهادی دارد. نتایج نشان می‌دهد بهینه‌سازی نوع منحنی مشخصه و نقطه شکست، کارایی منحنی مشخصه دوسطحی برای حفاظت ریزشکه در شرایط مختلف بهره‌برداری را افزایش قابل توجهی خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: ریزشکه، رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار، هماهنگی حفاظتی بهینه، مشخصه دوگانه (دوسطحی)، شرایط مختلف بهره‌برداری، انتخاب بهینه نوع منحنی، منحنی مشخصه استاندارد

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.111

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول: حامد هاشمی دزکی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان

علائم و اختصارات

متغیرها و پارامترها	توضیحات	موقعیت استفاده
t_i	زمان عملکرد رله نام	رابطه (۱)
TDS_i	تنظیم زمانی رله نام	رابطه (۱)
$I_{SC,i}$	جریان اتصال کوتاه عبوری از رله نام	رابطه (۱)
$I_{p,i}$	تنظیم جریان رله نام	رابطه (۱)
A_i, B_i	ضرایب منحنی مشخصه استاندارد رله نام	رابطه (۱)
TDS_i^f	تنظیم زمانی بخش اول رله نام بامنحنی دوگانه	رابطه (۲)
$I_{p,i}^f$	تنظیم جریانی بخش اول رله نام بامنحنی دوگانه	رابطه (۲)
A_i^f, B_i^f	ضرایب منحنی مشخصه بخش اول رله نام بامنحنی دوگانه	روابط (۲ و ۳)
$I_{H,i}$	نقطه شکست (مرز بین دو بخش منحنی) رله حفاظتی نام	رابطه (۲)
TDS_i^s	تنظیم زمانی بخش دوم رله نام بامنحنی دوگانه	رابطه (۲)
$I_{p,i}^s$	تنظیم جریانی بخش دوم رله نام بامنحنی دوگانه	رابطه (۲)
A_i^s, B_i^s	ضرایب منحنی مشخصه بخش دوم رله نام بامنحنی دوگانه	روابط (۲ و ۴)
CS_i^f, CS_i^s	متغیر عدد صحیح بین ۱ تا ۳، برای تعیین نوع منحنی بخش اول و دوم رله‌های دوسطحی ارائه شده	روابط (۳ و ۴)
$O.F$	تابع هدف	رابطه (۶)
T_c	زمان کل عملکرد رله‌های در آرایش و توپولوژی‌های مختلف	رابطه (۶)
N_c	تعداد حالات بهره‌برداری مختلف ناشی از اتصال یا عدم اتصال پست‌های بالادست و منابع تولیدپراکنده	رابطه (۶)
$t_{c,i}$	زمان عملکرد نامین رله حفاظتی اصلی	رابطه (۶)
$t_{c,j}$	زمان عملکرد نامین رله حفاظتی پشتیبان	رابطه (۶)
N_p	تعداد رله‌های اصلی	رابطه (۶)
N_b	تعداد رله‌های پشتیبان	رابطه (۶)
CTI	حداقل فاصله زمانی هماهنگی بین رله اصلی و پشتیبان	رابطه (۷)
$I_{Load,i}^{max}$	حداکثر جریان بار عبوری از نامین رله حفاظتی	روابط (۸ و ۹)
$I_{SC,i}^{min}$	حداقل جریان خطای عبوری از نامین رله حفاظتی	روابط (۸ و ۹)
TDS_{min}	مقدار حداقل تنظیم زمانی	روابط (۱۰ و ۱۱)
TDS_{max}	مقدار حداکثر تنظیم زمانی	روابط (۱۰ و ۱۱)

تولیدپراکنده، چالش‌های جدیدی نیز برای ریزشبکه‌ها و شبکه‌های توزیع فعال به‌وجود آمده است [۵، ۶]. یکی از مهم‌ترین چالش‌های ریزشبکه‌ها، چالش‌های طرح‌های حفاظتی ریزشبکه در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه است [۷، ۸].

با توجه به اهمیت موضوع حفاظت شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی، ریزشبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند، تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است [۹]. کارهای انجام شده در زمینه حفاظت ریزشبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند در حضور منابع تولید پراکنده را می‌توان به دو دسته کلی روش‌های مبتنی بر سیستم‌های مخابراتی و روش‌های بی-

۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها مجموعه‌ای قابل کنترل از منابع تولید و مصرف‌کننده‌ها در شبکه توزیع با قابلیت بهره‌برداری در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای می‌باشند [۱، ۲]. از آنجایی که ریزشبکه‌ها می‌توانند در شرایط جزیره‌ای و متصل به شبکه بهره‌برداری شوند، می‌توانند تاثیر بسزایی در بهبود شاخص‌های سیستم توزیع انرژی الکتریکی مانند شاخص‌های قابلیت اطمینان و هزینه‌های بهره‌برداری داشته باشند [۳، ۴]. با این وجود، در کنار تمام مزایای ریزشبکه‌ها در حضور منابع

نیاز از بستر مخابراتی و مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محلی طبقه‌بندی نمود. در ادامه به بررسی برخی از مهم‌ترین مراجع و کارهای پیشین در حوزه طرح‌های حفاظتی مبتنی بر بسترهای مخابراتی (عموماً طرح‌های تطبیقی) و طرح‌های حفاظتی بدون نیاز به بستر مخابراتی (حفاظت ترکیبی و اعمال یک گروه تنظیم برای تمام حالات بهره‌برداری) پرداخته خواهد شد.

ابتدا، کارهای تحقیقاتی انجام‌شده در زمینه حفاظت ریز شبکه‌ها مبتنی بر سیستم مخابراتی مرور خواهد شد. بر اساس مرور منابع می‌توان بیان داشت یکی از راهکارهای مقابله با چالش‌های ریز شبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند در زمینه سیستم‌های حفاظتی ناشی از تغییر آرایش شبکه و شرایط بهره‌برداری، استفاده از حفاظت تطبیقی می‌باشد [۱۰]. در [۷]، یک طرح حفاظت تطبیقی برای همه‌انگهی حفاظتی از ریز شبکه‌های AC با استفاده از رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار ارائه شده است. طرح‌های حفاظت متداول، به طور کلی برای شبکه‌های شعاعی و در حالت شارش جریان به صورت یک طرفه از منبع تا بار، طراحی می‌شوند که ممکن است در صورت عدم تطابق با شرایط دینامیکی شبکه، عملکرد نامناسب یا بسیار ضعیفی از خود نشان دهند. از این جهت، یک طرح حفاظت تطبیقی مبتنی بر ارتباط‌های مخابراتی که قادر است تنظیمات خود را با توجه به در دسترس بودن منابع تولید و پیکربندی شبکه سازگار سازد، ارائه شده است. طرح ارائه شده در [۷] از یک واحد حفاظت مرکزی هوشمند برای به‌روزرسانی تنظیمات، براساس مطالعات و نتایج از پیش مشخص شده استفاده کرده است. در [۱۱] نیز روش جدیدی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان وقوع خطا ارائه گردیده است. در [۸]، یک رویکرد جدید برای همه‌انگهی حفاظت تطبیقی ریز شبکه‌های AC با استفاده از مشخصه‌های غیراستاندارد برای رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار، ارائه شده است. برای هر رله حفاظتی، سه متغیر بهینه‌سازی تنظیم زمانی، تنظیم جریانی و منحنی مشخصه غیر استاندارد در نظر گرفته شده است. چهار روش فراابتکاری برای حل مسئله همه‌انگهی بهینه در [۸] اجرا شده است که شامل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری (TLBO) و الگوریتم جهش قورباغه (SFLA) می‌باشند. در [۱۲]، رویکردی جدید در برنامه‌ریزی و همه‌انگهی حفاظتی رله با در نظر گرفتن نصب و راه‌اندازی منابع تولید پراکنده ارائه می‌گردد. مطالعات تطبیقی به منظور برجسته‌سازی مزایای روش پیشنهادی تحت سناریوهای متعددی انجام گرفته و همچنین کاربردهای محدودکننده‌ی جریان خطا در نظر گرفته شده است. راهکار پیشنهاد شده در [۱۳]، یک راه‌کار آفلاین، سریع، عملیاتی و ارزان‌قیمت مبتنی بر حفاظت تطبیقی بوده که همه‌انگهی حفاظتی را در هر ضریب نفوذ و مکان منابع تولید پراکنده تضمین می‌کند. در [۱۴]، با منظور کردن توپولوژی شبکه، پارامترهایی نظیر حفاظت پایلوت، دوری و نزدیکی به

منبع و ... را در نظر می‌گیرد و مجموعه نقاطی را به‌عنوان نقاط شکست در شبکه برای تبدیل مسئله از حالت حلقوی به شعاعی می‌دهد. اگرچه حفاظت تطبیقی راهکار مناسبی برای پاسخ به چالش‌های سیستم‌های حفاظتی ریز شبکه‌ها خواهد بود، نیاز به سیستم ارتباطی در طرح‌های تطبیقی یکی از محدودیت‌های این گروه روش‌های حفاظتی است. ایجاد بستر مخابراتی، احتمال وقوع مشکلات در سیستم ارتباطی و ...، پیاده‌سازی عملیاتی طرح‌های حفاظت تطبیقی را با محدودیت‌هایی مواجه می‌سازد. محدودیت‌های اشاره شده در ریز شبکه‌های هوشمند کم‌تر بوده و هرچه زیرساخت‌های ارتباطی و مخابراتی کم‌تر توسعه یافته باشد، این موضوع اهمیت بیشتری خواهد یافت. از این‌رو، در برخی از مراجع و کارهای گذشته، تلاش شده است، طرح‌های حفاظتی ارائه شود که عملکرد مناسب در شرایط مختلف بهره‌برداری داشته باشد و نیازی به بستر مخابراتی و تعیین شرایط سیستم از دیدگاه توپولوژی و ... در آن طرح‌ها نباشد [۱۵]، [۱۶].

پس از بررسی گروه اول از کارهای پیشین که از بستر مخابراتی استفاده کرده بودند، در ادامه بررسی مطالعات حفاظتی ریز شبکه‌ها بدون نیاز به بستر مخابراتی دنبال می‌گردد. در [۱۲]، حفاظت شبکه توزیع با اضافه شدن منابع تولید پراکنده و حفظ فاصله زمانی همه‌انگهی بین رله‌های حفاظتی با کمک یک گروه تنظیمات مورد مطالعه قرار گرفته است. طرح پیشنهادی ارائه شده در [۱۲] از رله‌هایی با مشخصه‌های استاندارد پایه‌گذاری شده است. یک طرح حفاظتی بی-نیاز از سیستم مخابراتی در [۱۷] برای حفاظت شبکه‌های هوشمند و شبکه‌های توزیع فعال پیشنهاد شده است. در روش معرفی شده در [۱۷]، از دو منحنی قطع اصلی و کمکی استفاده شده است تا ضمن رعایت قیود همه‌انگهی، قیود پایداری گذرای منابع تولید پراکنده از نوع ژنراتور سنکرون نیز برقرار شود. روش پیشنهاد شده با کمک مزایای مشخصه اصلی و کمکی، بدون نیاز به بستر مخابراتی عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. روش حفاظتی بدون نیاز به بستر مخابراتی و با به‌کارگیری مشخصه‌های وابسته به ولتاژ در [۱۸] معرفی شده است. در [۱۸]، تلاش شده است عملکرد سیستم حفاظتی با کمک مشخصه‌های حفاظتی وابسته به ولتاژ برای خطاهایی که جریان اتصال زیادی نداشته باشند را بهبود دهد.

مراجع [۱۶]، [۱۵] از جمله مقالاتی هستند که تلاش کرده اند، برای پاسخ به چالش‌های حفاظتی ریز شبکه‌ها و شبکه‌های توزیع فعال، یک روش حفاظتی بدون نیاز به بستر مخابراتی ارائه نماید. در [۱۶]، منحنی مشخصه دوگانه متشکل از دو سطح حفاظتی با تنظیمات جداگانه و یک نقطه شکست (مرز بین دو منحنی) معرفی شده است. از مزایای مشخصه دوگانه پیشنهادی می‌توان به عملکرد سریع رله در شرایط خطا جلوی رله (رفتار رله به‌عنوان حفاظت اصلی) و رعایت فاصله زمانی همه‌انگهی (رفتار رله به‌عنوان حفاظت پشتیبان) اشاره نمود. علیرغم تمام نوآوری‌ها و مزایای روش پیشنهادی در [۱۶]، بهینه‌سازی منحنی مشخصه دو بخش رله با مدل دوگانه و بهینه‌سازی

- افزایش قابلیت اطمینان طرح‌های حفاظتی و انعطاف‌پذیری در برابر تهدیدات سایبری به دلیل عدم نیاز به لینک ارتباطی در طرح پیشنهادی؛
- بهبود عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی با بهینه‌سازی منحنی مشخصه در مدل رله‌های دوگانه؛
- بهبود زمان عملکرد طرح حفاظتی با بهینه‌سازی نقطه شکست (مرز بین دو بخش منحنی) رله‌های دوگانه؛ و
- عدم نقض قیود هماهنگی حفاظتی بین رله‌های اصلی و پشتیبان در شرایط بهره‌برداری مختلف از قبیل شرایط پایه، شرایط جزیره‌ای، شرایط خروج یکی از منابع تولید پراکنده و خروج تمامی منابع تولید پراکنده.

روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های ۸ شین IEEE و بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE پیاده‌سازی شده است. در این مطالعه، از نرم-افزار DIGSILENT برای اجرای مطالعات پخش بار و اتصال کوتاه استفاده شده است. حل مسئله بهینه‌سازی بر اساس اطلاعات ورودی شبکه و ارتباط MATLAB و DIGSILENT با کمک الگوریتم ژنتیک دنبال شده است. هم‌چنین مطالعات حفاظتی بر اساس تنظیمات بهینه مبتنی بر روش پیشنهادی در نرم‌افزار DIGSILENT انجام گرفته است که یکی از مزایای مطالعه انجام شده در این مقاله خواهد بود. مقایسه نتایج به‌دست آمده با روش‌های موجود مانند [۱۶] دلالت بر کارایی روش پیشنهادی و بهبود طرح حفاظتی دارد. کاهش زمان عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی و عدم نقض قیود هماهنگی در حالات مختلف بهره‌برداری نسبت به روش‌های موجود، مزایای روش پیشنهادی را برجسته خواهد نمود.

نقطه شکست مطالعه نشده است. ضمناً در [۱۶]، حالات بهره‌برداری پایه (متصل به شبکه و اتصال تمامی منابع تولید پراکنده) و جزیره‌ای (خروج تمامی پست‌های بالادست) مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالی که، حالات مختلف بهره‌برداری مانند خروج یکی از منابع تولید پراکنده یا خروج تمامی منابع تولید پراکنده و بهره‌برداری در شرایط تغذیه کامل از طریق پست‌های بالادست بررسی نشده است.

در جدول (۱)، مرور منابع با دیدگاه استخراج خلاءهای تحقیقاتی موجود در زمینه حفاظت شبکه‌های توزیع فعال بیان شده است. در این مقاله، روش پیشنهادی به خلاءهای تحقیقاتی اشاره شده در مرور منابع و به‌ویژه آن‌چه در مورد روش ارائه شده در [۱۶] بیان شد، پاسخ خواهد داد. روش پیشنهادی این مقاله مبتنی بر حفاظت شبکه‌های توزیع فعال بدون نیاز به بستر مخابراتی است که عملیاتی کردن طرح پیشنهادی را برای تمامی شبکه‌های توزیع فعال هوشمند و شبکه‌هایی که از تجهیزات ارتباطی کم‌تری بهره می‌برند، کارایی خوبی خواهد داشت.

طبقه‌بندی کارهای انجام شده بر اساس در نظرگیری شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای، شرایط مختلف بهره‌برداری علاوه بر شرایط جزیره‌ای و یا بهینه‌سازی و عدم بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی نیز بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول (۱) امکان‌پذیر است.

اهداف اصلی و نوآوری‌های روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های حفاظتی ارائه شده در مرور منابع را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- کاهش زمان عملکرد سیستم حفاظتی با کمک منحنی مشخصه دوگانه بدون نیاز به لینک‌های ارتباطی؛

جدول (۱): خلاصه مرور منابع در زمینه حفاظت ریز شبکه‌ها

مرجع	سال انتشار	نوع مشخصه حفاظتی		نیاز به لینک مخابراتی	حفاظت در شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای	حفاظت تطبیقی	بهینه‌سازی منحنی مشخصه	تمام حالات بهره‌برداری محتمل	بهینه‌سازی نقطه شکست
		استاندارد	دوگانه						
[۷]	۲۰۲۱	✓		✓		✓		✓	
[۸]	۲۰۲۱		✓	✓		✓			
[۱۲]	۲۰۱۶	✓							
[۱۷]	۲۰۱۹		✓				✓		
[۱۸]	۲۰۲۰		✓						
[۱۶]	۲۰۲۰		✓		✓				
[۱۵]	۲۰۲۱		✓				✓	✓	
[۱۹]	۲۰۲۰		✓				✓		
[۲۰]	۲۰۲۰		✓	✓					
[۲۱]	۲۰۲۰		✓			✓			
[۲۲]	۲۰۱۹		✓	✓	✓	✓			
[۲۳]	۲۰۱۹		✓		✓				
[۲۴]	۲۰۱۹		✓	✓			✓		
[۲۵]	۲۰۱۹		✓	✓					
[۲۶]	۲۰۱۷		✓	✓	✓				
[۲۷]	۲۰۱۷		✓	✓		✓			
روش پیشنهادی	---		✓		✓		✓	✓	✓

حفاظتی و استفاده از موقعیت اتصال یا عدم اتصال پست‌های بالادست و منابع تولید پراکنده اشاره نمود.

برای به‌دست آوردن زمان عملکرد یک رله‌ی حفاظتی استانداردهای متفاوتی وجود دارد. یکی از استانداردهای شناخته شده که در ایران نیز، استانداردهای ملی بر اساس آن تدوین شده است، استاندارد IEC 60255-151 برای رله‌های حفاظتی اضافه‌جریان می‌باشد [۱۵]. در (۱)، بیان ریاضی زمان عملکرد رله بر اساس منحنی مشخصه‌های استاندارد آورده شده است [۲۸].

$$t_i = TDS_i \frac{A_i}{\left(\frac{I_{SC,i}}{I_{p,i}} \right)^{B_i} - 1} \quad (1)$$

در جدول (۲) ضرایب مربوط به منحنی مشخصه‌های استاندارد آورده شده است [۲۱].

جدول (۲): ضرایب مشخصه‌های استاندارد رله‌های اضافه‌جریان [۲۱]

ردیف	نوع منحنی	ضریب A	ضریب B
۱	کاهشی	۰/۱۴	۰/۰۲
۲	خیلی کاهشی	۱۳/۵	۱
۳	شدیداً کاهشی	۸۰	۲

بر اساس توضیحات ارائه شده و مدل ریاضی زمان عملکرد رله‌های یک سطحی، می‌توان مدل ریاضی زمان عملکرد رله با مشخصه‌های عملکرد دوگانه (دوسطحی) را مطابق آن چه در (۲) نشان داده شده است، بیان نمود.

$$t_i = \begin{cases} TDS_i^f \frac{A_i^f}{\left(\frac{I_{SC,i}}{I_{p,i}^f} \right)^{B_i^f} - 1} & I_{p,i} < I_{SC,i} < I_{H,i} \\ TDS_i^s \frac{A_i^s}{\left(\frac{I_{SC,i}}{I_{p,i}^s} \right)^{B_i^s} - 1} & I_{SC,i} \geq I_{H,i} \end{cases} \quad (2)$$

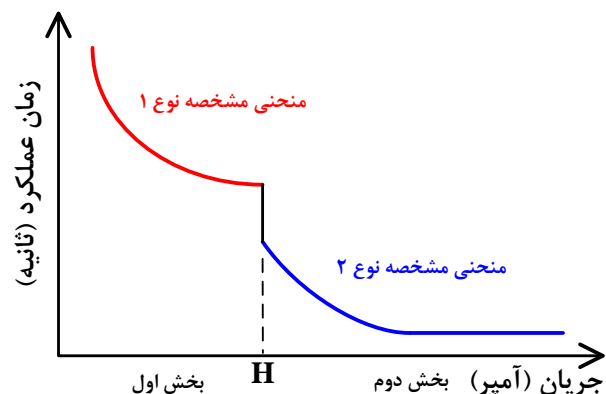
در (۲)، ضرایب منحنی مشخصه بخش ابتدایی رله‌های دوگانه پیشنهادی نیز بر اساس یک متغیر عددصحیح مشابه (۳) مشخص خواهد شد. بر اساس انتخاب نوع منحنی برای بخش اول هر رله، A_i^f و B_i^f مشخص خواهد شد.

مشابه آن چه برای بخش ابتدایی منحنی مشخصه رله دوسطحی پیشنهادی بیان شد، برای بخش دوم نیز می‌توان پیاده‌سازی نمود. ضرایب منحنی مشخصه بخش دوم رله‌های دوگانه پیشنهادی نیز بر اساس یک متغیر عددصحیح مطابق (۴) مشخص خواهد شد. بر اساس انتخاب نوع منحنی برای بخش دوم هر رله، A_i^s و B_i^s مشخص خواهد شد.

در ادامه، مدل‌سازی روش پیشنهادی در بخش ۲ و نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی در بخش ۳ بیان خواهد شد. در پایان نیز نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۴ تشریح می‌گردد.

۲- روش پیشنهادی

بر اساس آن چه بیان شد، ارائه یک طرح حفاظتی بدون نیاز به بستر مخابراتی برای شبکه‌های توزیع فعال با کمک رله‌های اضافه‌جریان حائز اهمیت می‌باشد. یکی از راهکارهایی که می‌توان چالش‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع فعال در شرایط بهره‌برداری مختلف را با آن مرتفع نمود، استفاده از منحنی مشخصه‌ای مانند شکل (۱) می‌باشد. منحنی مشخصه نشان داده شده در شکل (۱)، در [۱۶] پیشنهاد شده است.



شکل (۱): منحنی مشخصه دوگانه برای رله‌های اضافه‌جریان [۱۶]

در روش پیشنهادی، از مشخصه دوگانه (دوسطحی) برای عملکرد رله-های اضافه‌جریان استفاده خواهد شد که بر اساس یک نقطه شکست، منحنی عملکرد رله به دو بخش تقسیم شده و برای هر بخش از منحنی عملکرد رله می‌توان تنظیمات جریانی و زمانی مجزایی انتخاب نمود [۱۶]. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد بخش اول منحنی در زمان‌های عملکرد نسبتاً بالا و برای به‌کارگیری به‌عنوان رله پشتیبان حائز اهمیت است. در حالی که بخش دوم منحنی عملکرد رله برای خطاهای قابل ملاحظه و جریان‌های اتصال کوتاه بالا و با دیدگاه حفاظت اصلی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. به عبارت دیگر منحنی مشخصه دوگانه از دوسطح $I >$ و همچنین $I >>$ تشکیل شده است.

از آن جایی که رله‌های حفاظتی مورد استفاده در شبکه‌های توزیع، قابلیت تنظیم دو سطح یا بیشتر را دارند، عملیاتی نمودن طرح حفاظتی پیشنهادی نیز میسر خواهد بود. با چنین تنظیماتی در طرح حفاظت پیشنهادی ضمن رعایت قیود هماهنگی، می‌توان به زمان عملکرد سریع سیستم حفاظتی با در نظرگیری شرایط مختلف بهره‌برداری (جزیره‌ای، متصل به شبکه و یا خروج هر کدام از منابع تولید پراکنده) دست یافت. از مزایای روش پیشنهادی می‌توان به بی‌نیاز بودن از سیستم‌های ارتباطی و لینک‌های مخابراتی بین رله‌های

گرفته شده است. تابع هدف پیشنهادی نسبت به روش‌های موجودی که تنها حالت بهره‌برداری پایه را در نظر می‌گیرند حائز برتری بوده و در مجموع حالات محتمل بهره‌برداری عملکرد مطلوبی از خود نشان خواهد داد.

در طرح‌های حفاظتی، رعایت قیود هماهنگی و حداقل فاصله زمانی هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان، مطابق آن چه در (۷) بیان شده است، ضروری است [۳۴، ۳۵]. از این‌رو مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی برای دستیابی به یک طرح حفاظتی بهینه بر اساس تابع هدف ارائه شده در (۶) مقید به قیود هماهنگی برای تضمین تشخیص و انتخاب طرح حفاظتی خواهد شد.

$$t_{c,j} - t_{c,i} \geq CTI \quad (7)$$

همانگونه که در رابطه بالا نشان داده شده است، رعایت قیود هماهنگی در تمامی آرایش‌های شبکه و حالات بهره‌برداری در مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی در نظر گرفته خواهد شد. از این‌رو، نقض قیود هماهنگی در شرایط بهره‌برداری مختلف به‌وجود نمی‌آید. در مطالعات انجام شده در زمینه هماهنگی حفاظتی، مقدار حداقل فاصله زمانی هماهنگی بین ۰/۲ تا ۰/۵ ثانیه در نظر گرفته شده است [۳۶، ۳۷]. در این مقاله، مقدار ۰/۳ ثانیه برای حداقل فاصله زمانی هماهنگی فرض گردیده است.

قید دیگری که باید در حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی مدنظر قرار گیرد، کران‌های پایین و بالای تنظیمات جریانی رله‌های حفاظتی است. با توجه به رابطه‌های (۸) و (۹)، جریان تنظیمی هر رله باید بزرگتر از حداکثر جریان باری باشد که از آن رله می‌گذرد، تا مانع از قطع بارهای شبکه در صورت عبور جریانی برابر با جریان بار شبکه مدنظر گردد. همچنین، جریان تنظیمی باید کوچکتر از حداقل جریان خطایی که توسط رله مشاهده می‌شود، باشد.

$$1.2I_{Load,i}^{max} \leq I_{p,i}^f \leq I_{SC,i}^{min} \quad (8)$$

$$1.2I_{Load,i}^{max} \leq I_{p,i}^s \leq I_{SC,i}^{min} \quad (9)$$

در رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) نیز محدودیت‌های تنظیم زمانی برای رله‌های حفاظتی شبکه برای هر دو بخش اولیه و ثانویه ذکر شده است [۱۵].

$$TDS_{min} \leq TDS_i^f \leq TDS_{max} \quad (10)$$

$$TDS_{min} \leq TDS_i^s \leq TDS_{max} \quad (11)$$

در این مقاله، مقادیر TDS_{min} و TDS_{max} ، به‌ترتیب برابر با ۰/۵ و ۲ ثانیه برای هر رله در نظر گرفته خواهد شد. باید اشاره نمود کران بالا و پایین متغیرهای تصمیم و تنظیمات رله‌های حفاظتی نقش مهمی در نتایج بهینه‌سازی نهایی خواهند داشت. محدودیت هرچه بیشتر فضای شدنی در مسئله بهینه‌سازی، مقدار بهینه تابع هدف را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهد. از سوی دیگر، بر اساس محدودیت‌های فنی و ملاحظات مربوطه، امکان اعمال هرگونه کرانی برای متغیرهای تصمیم و تنظیمات رله‌های حفاظتی وجود ندارد. یکی از تنظیم‌های مهم رله‌های حفاظتی که در طرح حفاظتی بهینه، باید مقدار بهینه آن مشخص

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

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

همان‌گونه که در بیان ریاضی نوع انتخاب ضرایب منحنی مشخصه بخش‌های اول و دوم رله‌های اضافه‌جریان دوگانه بیان شده است، دو متغیر تصمیم مجزا برای این مورد لحاظ شده است. این بدین معنی است که می‌تواند نوع منحنی بخش اول با نوع منحنی بخش دوم متفاوت باشد. در صورتی که فرض شود یک نوع منحنی برای هر دو بخش اعمال می‌گردد، می‌توان تعداد متغیرهای تصمیم را کاهش داد. بر اساس توضیحات ارائه شده در مورد مدل ریاضی زمان عملکرد رله‌های دوسطحی مورد نظر، می‌توان زمان عملکرد را تابعی از متغیرهای تنظیمی زیر مطابق (۵) در نظر گرفت.

$$t_i = t_i(I_{p,i}^f, TDS_i^f, CS_i^f, I_H, I_{p,i}^s, TDS_i^s, CS_i^s) \quad (5)$$

سیستم‌های انرژی الکتریکی مدرن ایجاب می‌کنند که طرح‌های حفاظتی قابل اعتماد، سریع و همراه با قابلیت انتخاب مناسب داشته باشند. بنابراین زمان عملکرد رله‌های حفاظتی باید به‌اندازه لازم سریع باشد تا هماهنگی و قیود و محدودیت‌های حفاظتی برقرار گردد [۱۵، ۲۹]. لذا توابع هدف مختلفی در کارهای تحقیقاتی در حوزه حفاظت از سیستم قدرت، گزارش شده است [۳۰]. در بعضی از مراجع فقط مجموع زمان عملکرد رله‌های اولیه به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است [۸، ۲۲، ۳۱]. با توجه به این‌که زمان عملکرد رله‌های پشتیبان معمولاً به اندازه CTI از زمان عملکرد رله‌های اولیه بیشتر می‌باشد، این‌گونه توابع هدف نیز قابل قبول می‌باشد [۳۲]. در بعضی مراجع نیز اختلاف بین زمان عملکرد رله‌های اولیه و پشتیبان هدف می‌باشد. در نظرگیری مجموع زمان عملکرد رله‌های اولیه و پشتیبان یکی از متداول‌ترین توابع هدف برای سیستم حفاظتی می‌باشد [۱۲، ۱۷، ۱۸]. در این مقاله نیز از این نوع تابع هدف (مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان [۳۱، ۳۳]) که قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به توابع هدف دیگر دارد، مطابق رابطه (۶)، بهره گرفته شده است. با به حداقل رساندن مجموع زمان عملکرد رله‌های اولیه و پشتیبان مشروط به رعایت حداقل فاصله زمانی هماهنگی، سریع‌ترین طرح بدون هیچ نقض قیدی قابل دستیابی است.

$$O.F = \sum_{c=1}^{N_c} T_c(I_{p,i}^f, TDS_i^f, CS_i^f, I_H, I_{p,i}^s, TDS_i^s, CS_i^s) \quad (6)$$

$$= \sum_{c=1}^{N_c} \left(\sum_{i=1}^{N_p} t_{c,i} + \sum_{j=1}^{N_b} t_{c,j} \right)$$

در روش پیشنهادی، مجموع زمان عملکرد رله‌های حفاظتی اصلی و پشتیبان در حالات مختلف بهره‌برداری به‌عنوان تابع هدف در نظر

در پایان نیز، برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، مطالعات حفاظتی و بررسی قیود هماهنگی رله‌های حفاظتی در شرایط مختلف بهره‌برداری در DigSILENT انجام خواهد شد.

۳- نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی

روش پیشنهادی برای حفاظت ریز شبکه‌ها و شبکه‌های توزیع با کمک مشخصه دوگانه (دوسطحی) برای رله‌های اضافه‌جریان، ابتدا بر روی شبکه ۸ شین IEEE [۳۸] و سپس بر روی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE [۳۹، ۴۰] مطابق آن‌چه در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است، پیاده‌سازی می‌گردد.

شبکه ۸ شین IEEE شامل دو منبع تولید پراکنده مطابق شکل (۳) می‌باشد. همچنین بخش توزیع ارتقاء یافته شبکه ۳۰ شین IEEE شامل ۳ نقطه اتصال به شبکه بالادست از طریق ۳ پست فوق توزیع با ترانسفورماتورهای ۱۳۲/۳۳ کیلوولت و ظرفیت ۵۰ مگاوات آمپر می‌باشد. همچنین بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE مورد مطالعه دارای ۱۱ منبع تولید پراکنده در شین‌های (۲ تا ۱۰، ۱۲ و ۱۴) می‌باشد. این شبکه از ۱۴ شین و ۱۶ فیدر تشکیل شده است [۱۶]. ظرفیت منابع تولید پراکنده به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که در صورت بهره‌برداری حالت جزیره‌ای بتواند بار محلی را تأمین کند. منابع تولید پراکنده با ترانسفورماتورهای افزایشی ۳۳ / ۶/۶ کیلوولت کار می‌کنند.

در شبکه مورد مطالعه ۸ شین IEEE از ۱۴ رله‌ی اضافه‌جریان جهت‌دار در ابتدا و انتهای خطوط همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، استفاده شده که رله‌ها شامل یک یا دو پشتیبان می‌باشند و مجموعاً شامل ۲۰ جفت رله می‌باشد. همچنین در بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE از ۲۹ رله‌ی اضافه‌جریان جهت‌دار استفاده شده که رله‌ها شامل یک، دو، سه و یا چهار پشتیبان می‌باشند و مجموعاً شامل ۶۱ جفت رله هستند. از دیگر مفروضات انجام شده در این مقاله می‌توان به حداقل فاصله زمانی هماهنگی حفاظتی اشاره کرد که برابر ۰/۳ ثانیه برای بهینه‌سازی شبکه‌های مورد مطالعه انتخاب شده است.

شبکه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار DigSILENT پیاده‌سازی گردیده و مطالعات پخش توان و اتصال کوتاه در این نرم‌افزار انجام گرفته است. ضمناً از نرم‌افزار MATLAB و الگوریتم ژنتیک با ارتباط اطلاعات استخراج شده از نرم‌افزار DigSILENT، مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی حل گردیده است.

بر اساس تابع هدف بیان شده در بخش قبل، روش پیشنهادی در سناریوهای زیر مورد مطالعه قرار خواهد گرفت:

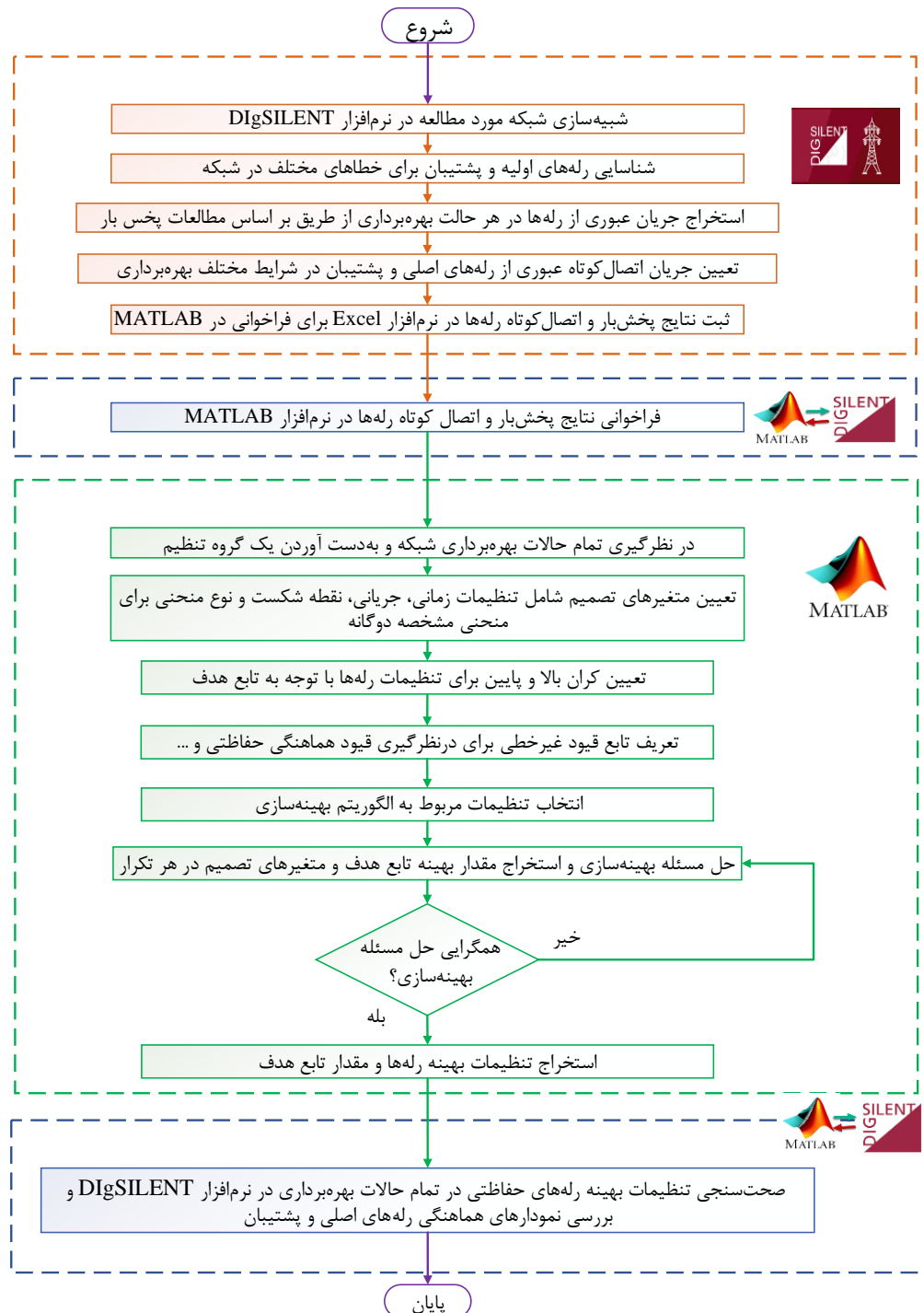
- سناریو اول: روش حفاظت متداول مبتنی بر مشخصه یک-سطحی و بهینه‌سازی تنظیمات زمانی و جریانی
- سناریو دوم: روش حفاظت مبتنی بر مشخصه دوگانه (دوسطحی) و بهینه‌سازی تنظیمات زمانی و جریانی هر دو بخش مشخصه رله‌های اضافه‌جریان مانند روش ارائه شده در [۱۶]

شود، تنظیم زمانی یا TDS می‌باشد. مقدار حداقل و حداکثر تنظیم زمانی در رله‌های الکترومکانیکی یا استاتیکی از نسل‌های قبلی رله‌های حفاظتی، محدودیت بیشتری داشته است. با ورود رله‌های عددی و نسل سوم، این محدودیت‌ها کم‌رنگ‌تر شده است. با این وجود، هر رله‌ای بر اساس مشخصات سازنده و تنظیمات قابل اعمال، یک سری بازه‌های مجازی برای تنظیم زمانی دارند. در مراجع مختلف، برای بازه تنظیم‌های زمانی رله‌های حفاظتی، اعداد مختلفی بیان شده است. برای مثال، در [۱۲]، تنظیم زمانی بین ۰/۰۵ تا ۱ فرض شده است. در مراجع دیگری، مقدار حداقل تنظیم زمانی ۰/۰۱ نیز لحاظ شده است. همچنین برای مقدار حداکثر تنظیم زمانی نیز بازه‌های مختلفی تا حتی ۵ مانند آن‌چه در [۱۵] اشاره شده، اختصاص داده شده است. در این مقاله، با فرض عددی بودن رله‌ها و امکان اعمال تنظیمات زمانی تا ۲، مسئله حل شده است. با این وجود، این موضوع کلیت روش پیشنهادی و مسئله را با چالش مواجه نمی‌سازد و در شرایطی که یک شبکه با محدودیت فنی بیشتری برای تنظیم زمانی مواجه باشد، می‌توان حل مسئله بهینه‌سازی با کران بالای کوچکتری مثلاً ۱ را دنبال نمود.

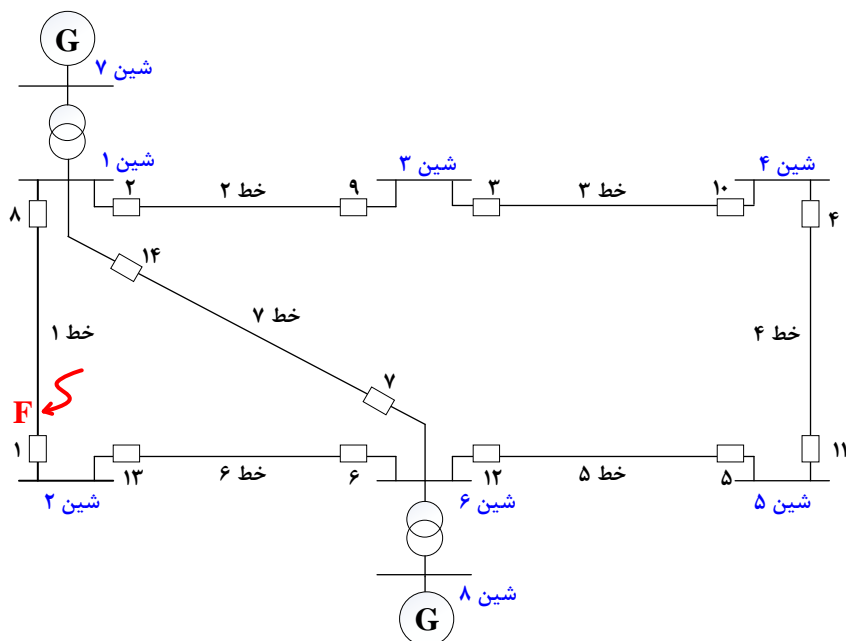
روند نامی روش بهینه‌سازی حفاظت پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. شبکه‌های مورد مطالعه در روش پیشنهادی، در نرم‌افزار DigSILENT پیاده‌سازی شده و جریان‌های خط و جریان‌های بار رله‌های حفاظتی در شرایط مختلف بهره‌برداری بر اساس مطالعات اتصال کوتاه و پخش توان استخراج خواهد شد. سپس این اطلاعات به نرم‌افزار MATLAB و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم حل مسئله بهینه‌سازی به‌عنوان اطلاعات ورودی مسئله داده خواهد شد. سپس نتایج بهینه با کمک حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص می‌گردد.

برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی، می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف استفاده نمود. به غیر از الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر مثل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری (TLBO) و الگوریتم جهش قورباغه (SFLA) و سایر الگوریتم‌های دیگر نیز قابل استفاده است [۸]. همچنین از الگوریتم‌های ترکیبی مثل GA-LP و PSO-LP نیز جهت بهینه‌سازی می‌توان استفاده نمود [۱۵]. از آنجایی که در مطالعات حفاظتی گذشته اشاره شده است که الگوریتم ژنتیک رفتار مطلوب و همگرایی مناسب دارد و همچنین می‌توان از جواب‌های بهینه سراسری با توجه به تعداد تکرار لازم مسئله بهینه‌سازی اطمینان حاصل نمود، برای بهینه‌سازی این مقاله الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، امکان استفاده از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز وجود دارد. ضمناً تأکید این مقاله بر بخش فنی مسئله و روش پیشنهادی مبتنی بر مشخصه‌های دوگانه و مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی است.

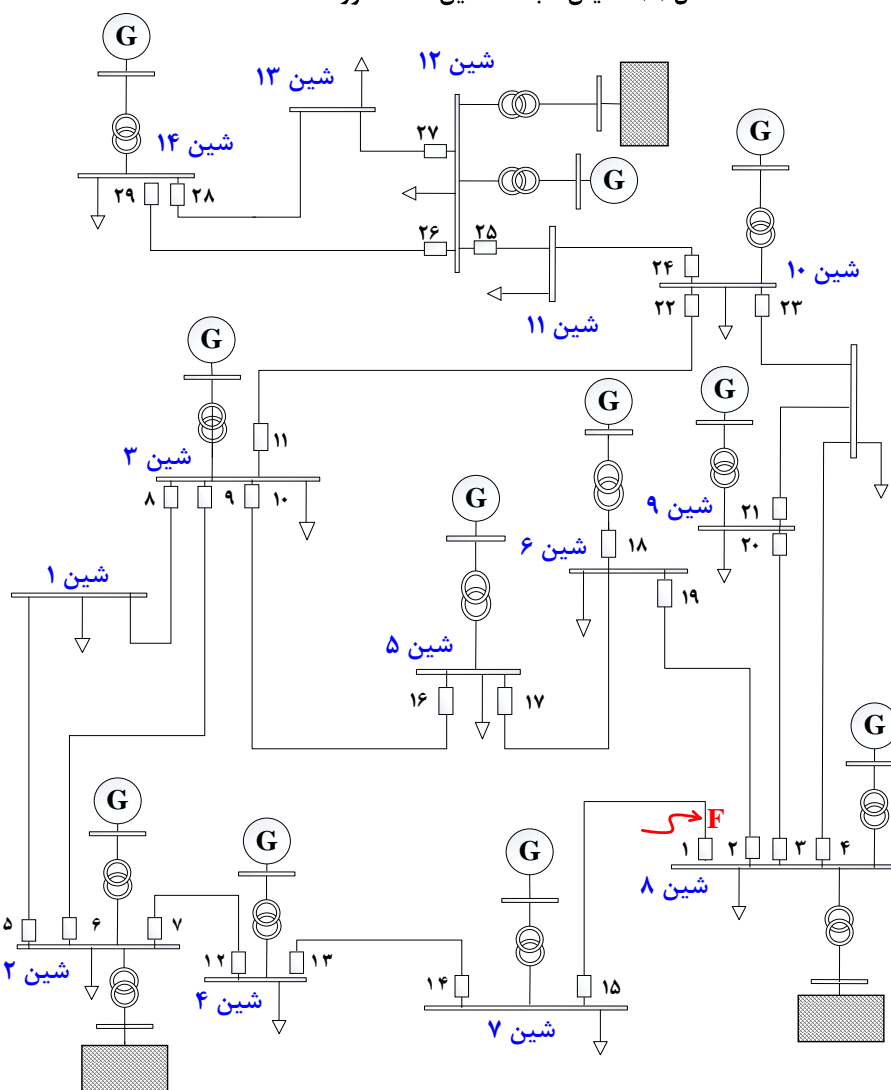
- سناریو سوم: روش حفاظت مبتنی بر مشخصه دوگانه (دوسطحی) و بهینه‌سازی تنظیمات زمانی و جریانی هر دو بخش مشخصه رله‌های اضافه‌جریان به همراه مقدار بهینه نقطه شکست (I_H)
- سناریو چهارم: روش حفاظت متداول مبتنی بر مشخصه یک‌سطحی و بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌ها علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی
- سناریو پنجم: روش حفاظت مبتنی بر مشخصه دوگانه (دوسطحی) و بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌ها علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی هر دو بخش مشخصه رله‌های اضافه‌جریان
- سناریو ششم: روش حفاظت مبتنی بر مشخصه دوگانه (دوسطحی) و بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌ها علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی هر دو بخش مشخصه و نقطه شکست (روش پیشنهادی)



شکل (۲): روندنمای روش پیشنهادی برای استخراج طرح حفاظتی بهینه با کمک منحنی مشخصه دوگانه (دوسطحی) رله‌های اضافه جریان

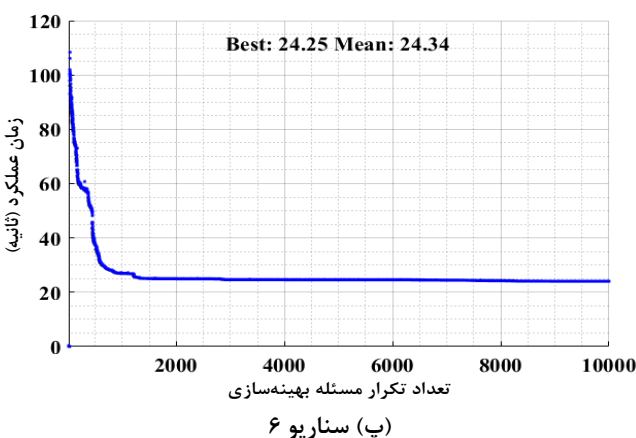
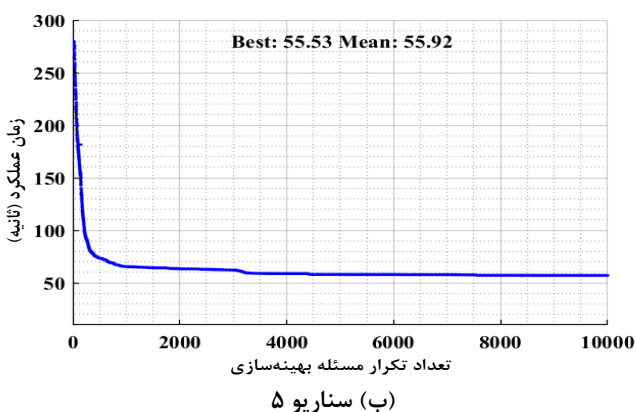
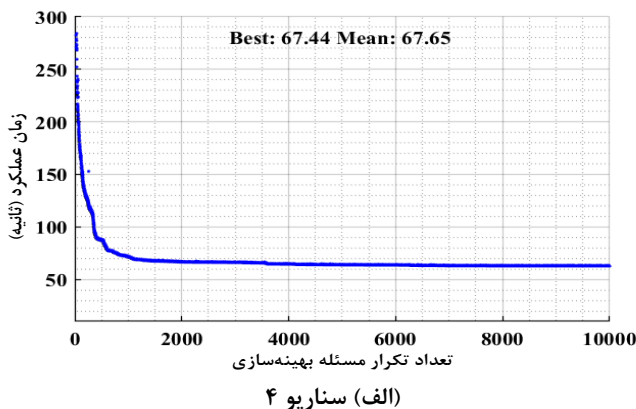


شکل (۳): نمایش شبکه ۸ شین IEEE مورد مطالعه [۳۸]



شکل (۴): نمایش تک خطی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE [۳۹، ۴۰]

مقاله) نشان می‌دهد ۳۰/۵۷ ثانیه (۵۲/۴۷٪) بهبود در زمان عملکرد نسبت به روش ارائه شده در [۱۶] ایجاد نمود. مقایسه سناریوهای ۴ تا ۶ نسبت به سناریوهای ۱ تا ۳ (بدون بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های اضافه‌جریان) دلالت بر بهبود زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی با انتخاب بهینه منحنی مشخصه دارد. مقایسه سناریوی ۶ و ۳ نشان می‌دهد در شرایطی که انتخاب بهینه منحنی مشخصه به متغیرهای تصمیم مانند تنظیمات زمانی و جریانی و نقطه شکست اضافه گردد، ۱۲،۴۲٪ بهبود در سرعت عملکرد سیستم حفاظتی قابل دستیابی است.



شکل (۵): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک برای شبکه ۸ شین IEEE در سناریوهای مختلف

در سناریوهای اول تا سوم، از منحنی مشخصه‌های پیش‌فرض استفاده شده و اما در سناریوهای چهارم تا ششم، انتخاب بهینه منحنی مشخصه نیز به متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی اضافه گردیده است. در سناریوهای اول و دوم که بر اساس روش‌های موجود پیاده‌سازی شده‌اند، تنها حالت بهره‌برداری متصل به شبکه و جزیره‌ای در قیود مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده است. در حالی که در سایر سناریوهای مورد اشاره، حالات مختلف بهره‌برداری شبکه از قبیل آرایش در حالت پایه (اتصال تمامی پست‌های بالادست و تمامی منابع تولید پراکنده)، قطع هر یک از منابع تولید پراکنده یا قطع تمامی منابع تولید پراکنده و همچنین حالت جزیره‌ای، با یک گروه تنظیم به صورت ترکیبی و بدون نیاز به بستر مخابراتی و طرح‌های حفاظت تطبیقی انجام شده است.

۳-۱- نتایج پیاده‌سازی طرح‌های حفاظتی بهینه بر روی شبکه ۸ شین IEEE

در جدول (۴)، نتایج بهینه‌سازی طرح‌های حفاظتی پیشنهادی در سناریوهای مختلف برای شبکه ۸ شین IEEE نشان داده شده است. همچنین در شکل (۵)، نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی در سناریوهای ۴ تا ۶ با کمک الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.

یکی از موضوعات مهمی که در زمینه حل مسائل بهینه‌سازی با روش‌های فراابتکاری مطرح است، اطمینان از دستیابی به جواب‌های بهینه سراسری و تکرارپذیری حل مسئله است [۱۵، ۴۱]. از اینرو، مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی برای سناریوهای مختلف به دلیل اطمینان از جواب بهینه، حداقل ۱۰ مرتبه اجرا گردید. نتایج ارائه شده بر اساس بهترین نتایج حاصله است. ضمناً مطالعات آماری حل مسئله بهینه‌سازی، تکرارپذیری حل مسئله و انحراف معیار قابل قبول در جواب‌های بهینه نهایی را نشان داده است. ضمناً تنظیمات الگوریتم ژنتیک بر اساس آنالیز حساسیت و ایجاد شرایط مناسب به منظور دستیابی به نتایج بهینه از دیدگاه همگرایی و مقدار نهایی تابع هدف تعیین شده است. در جدول (۳)، تنظیمات انتخاب شده برای الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه شده است.

همان‌گونه که در نتایج نشان داده شده مشهود است، منحنی مشخصه دوگانه (دوسطحی) کارایی بسیار بالایی نسبت به منحنی مشخصه متداول در حفاظت حالات مختلف بهره‌برداری از خود نشان می‌دهد. مقایسه نتایج سناریوی ۲ با سناریوی ۱ نشان می‌دهد می‌توان زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی را با منحنی مشخصه دوگانه (دوسطحی) به اندازه ۱۸/۵۶ ثانیه (۲۴/۱۶٪) کاهش داد. از دیگر نتایجی که می‌توان بر اساس مقایسه سناریوهای مختلف استنتاج نمود، اثربخشی نقطه شکست بهینه در افزایش سرعت طرح‌های حفاظتی است. مقایسه نتایج سناریوی ۳ (با نقطه شکست بهینه بر اساس روش پیشنهادی در این

جدول (۳): تنظیمات الگوریتم ژنتیک

ردیف	پارامتر	سناریو	مقدار	
			۸ شین IEEE	بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE
۱	اندازه جمعیت	اول	۲۰۰	۲۰۰
		دوم	۲۰۰	۲۰۰
		سوم	۲۰۰	۲۰۰
		چهارم	۱۰۰	۱۰۰
		پنجم	۱۰۰	۱۰۰
		ششم	۱۰۰	۱۰۰
۲	تعداد تکرار	اول	۱۰۰	۱۰۰
		دوم	۱۰۰	۱۰۰
		سوم	۱۰۰	۱۰۰
		چهارم	۱۰۰۰	۱۰۰۰
		پنجم	۱۰۰۰	۱۰۰۰
		ششم	۱۰۰۰	۱۰۰۰
۳	نرخ جابه‌جایی	اول تا ششم	۰/۸	۰/۸
۴	نرخ جهش	اول تا ششم	۰/۲	۰/۲
۵	تعداد متغیرهای تصمیم	اول	۲۸	۵۸
		دوم	۵۶	۱۱۶
		سوم	۷۰	۱۴۵
		چهارم	۴۲	۸۷
		پنجم	۸۴	۱۷۴
		ششم	۹۸	۲۰۳

جدول (۴): نتایج مقایسه‌ای طرح‌های حفاظتی بهینه در سناریوهای

مختلف برای شبکه ۸ شین IEEE

ردیف	سناریو	مقدار تابع هدف (ثانیه)
۱	اول	۷۶/۸۲
۲	دوم	۵۸/۲۶
۳	سوم	۲۷/۶۹
۴	چهارم	۶۷/۴۴
۵	پنجم	۵۵/۵۳
۶	ششم	۲۴/۲۵

۳-۲- نتایج پیاده‌سازی طرح‌های حفاظتی بهینه بر

روی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE

برای نشان دادن عملکرد مناسب روش پیشنهادی، بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نیز در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول (۵)، مقادیر تابع هدف و زمان عملکرد مجموع رله‌های حفاظتی در آرایش‌های مختلف شبکه نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نیز دلالت بر مزایای قابل توجه روش پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود دارد.

مقایسه نتایج سناریوی ششم (روش پیشنهادی مبتنی بر بهینه‌سازی نوع منحنی، نقطه شکست، تنظیمات جریانی و زمانی رله‌ها با مشخصه دوگانه) با سناریوی سوم نشان می‌دهد (۳۱/۷۱ ثانیه (۹/۵۶٪) بهبود در

زمان عملکرد طرح حفاظتی نسبت به روش‌های موجود حاصل شده است.

میزان بهبود زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی با منحنی مشخصه دوگانه، بهینه‌سازی منحنی مشخصه و ... در سناریوهای مختلف قابل مشاهده است.

جدول (۵): نتایج مقایسه‌ای طرح‌های حفاظتی بهینه در سناریوهای

مختلف برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE

ردیف	سناریو	مقدار تابع هدف (ثانیه)
۱	اول	۸۸۵/۹۸
۲	دوم	۶۳۱/۷۸
۳	سوم	۳۸۸/۰۳
۴	چهارم	۸۱۳/۵۰
۵	پنجم	۶۱۰/۳۳
۶	ششم	۳۵۶/۳۲

هم‌چنین، نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی در سناریوهای ۴ تا ۶ با کمک الگوریتم ژنتیک در شکل (۶) نشان داده شده است. نمودارهای نشان داده شده همگرایی مسائل بهینه‌سازی را تایید می‌کند.

نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی در سناریوهای ۴ و ۵ نسبت به سناریوی ۶ نشان می‌دهد که همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی با افزایش متغیرهای تصمیم دیرتر حاصل شده است. با این وجود، در تمامی سناریوهای ۴ تا ۶، همگرایی در کمتر از ۲۰۰۰ تکرار به دست آمده است.

تنظیمات بهینه رله‌های حفاظتی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE در سناریوی اول در جدول (۶) نشان داده شده است. هم‌چنین زمان عملکرد رله‌های حفاظتی در آرایش پایه شبکه با تنظیمات بهینه استخراج شده در سناریوی اول ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود زمان عملکرد رله‌های سیستم حفاظتی به علت حالات مختلف بهره‌برداری و قیود هماهنگی متناظر بالا می‌باشد.

در جدول (۷)، تنظیمات رله‌های حفاظتی با منحنی مشخصه دوگانه (دوسطحی) در سناریوی دوم نشان داده شده است. تنظیمات زمانی بخش اول و بخش دوم رله‌های حفاظتی در سناریوی دوم در جدول (۷) قابل مشاهده است. ضمناً مقدار تنظیم جریانی یکسان برای بخش اول و دوم منحنی عملکرد رله‌ها در نظر گرفته شده است که در نتایج ارائه شده دیده می‌شود. از نتایجی که با مقایسه سناریوی اول و دوم استنتاج می‌شود، اثر قابل توجه استفاده از منحنی مشخصه دوسطحی نسبت به رله‌های متداول یک‌بخشی است. علاوه بر مقدار تابع هدف محاسبه شده در سناریوی دوم که نشان‌دهنده بهبود موثر زمان عملکرد رله‌ها است، زمان عملکرد رله‌های حفاظتی در آرایش پایه نیز این موضوع را تایید می‌کند.

همان‌طور که در توضیح سناریوها بیان شد، در سناریوی سوم، نقطه شکست نیز علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی دو بخش منحنی عملکرد رله‌های حفاظتی دوگانه، بهینه می‌گردد. تنظیمات بهینه به دست آمده در سناریوی سوم برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE

دومین شبکه مورد مطالعه آورده شده است. در سناریوهای مذکور، نوع منحنی بخش اول و دوم یا تک‌بخش رله بر اساس منحنی‌های متداول رله بهینه شده است که در جداول قابل مشاهده است.

در نتایج ارائه شده در جدول (۹) مربوط به سناریوی ۴ بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE، منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی تک‌سطحی است و نوع منحنی به‌عنوان یکی از متغیرهای تصمیم از میان منحنی مشخصه‌های استاندارد انتخاب می‌گردد.

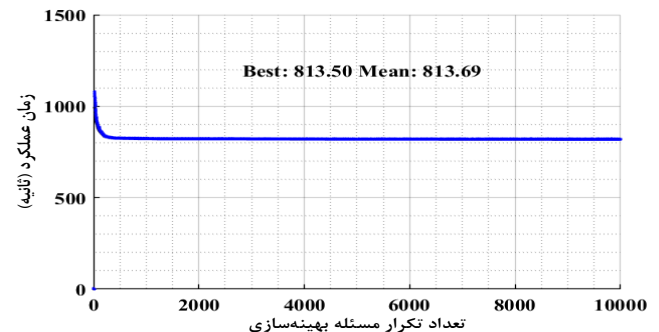
در سناریوی چهارم، نوع منحنی بهینه پیشنهادی برای رله‌های تک-بخشی و مشابه رله‌های متداول با منحنی مشخصه بدون نقطه شکست، خیلی کاهشی می‌باشد. کاهش زمان عملکرد از یک سو و رعایت فاصله هماهنگی حفاظتی بین رله‌های حفاظتی در حالات مختلف بهره‌برداری یکی از دلایلی است که منحنی خیلی کاهشی به‌عنوان خروجی مسئله بهینه‌سازی تعیین شده است.

جدول (۶): تنظیمات بهینه رله‌ها و زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان با آرایش پایه بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در سناریو اول

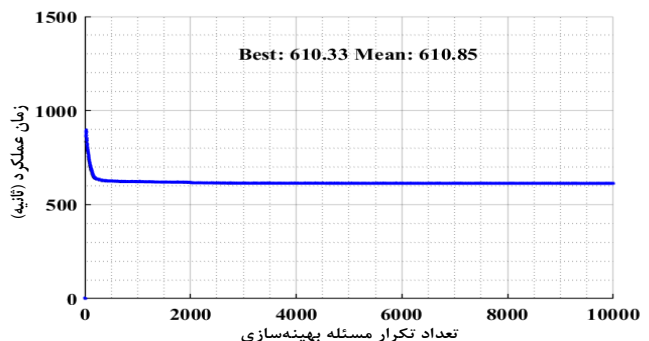
رله اصلی	TDS (s)	I_p (A)	زمان عملکرد رله اصلی (ثانیه)
۱	۱/۴۸۰	۱۰۸/۰۵۲	۲/۱۴۸
۲	۱/۳۶۴	۱۳۹/۰۰۰	۱/۹۶۱
۳	۱/۳۹۷	۸۱/۰۰۰	۱/۷۷۲
۴	۱/۴۲۹	۳۷/۰۰۰	۱/۵۵۱
۵	۱/۸۰۱	۲۰/۵۱۲	۱/۸۴۸
۶	۱/۷۸۲	۱۷/۰۰۰	۱/۷۶۹
۷	۱/۷۷۹	۴۲/۰۰۰	۲/۱۱۰
۸	۱/۴۶۸	۵۲/۰۵۸	۱/۹۰۲
۹	۱/۸۷۸	۱۷/۰۱۷	۱/۹۶۲
۱۰	۱/۸۹۶	۲۹/۰۲۰	۲/۲۲۲
۱۱	۱/۵۶۵	۲۳/۳۱۰	۱/۷۶۳
۱۲	۱/۴۹۹	۴۳/۰۰۲	۲/۰۶۹
۱۳	۱/۳۶۱	۹۱/۰۰۰	۲/۲۱۷
۱۴	۱/۳۷۲	۹۱/۰۰۰	۱/۹۸۷
۱۵	۱/۲۲۵	۱۰۸/۰۰۰	۲/۲۵۹
۱۶	۱/۴۳۷	۴۲/۱۸۰	۱/۹۱۴
۱۷	۱/۲۳۵	۱۲۴/۰۰۰	۲/۳۱۹
۱۸	۱/۲۳۹	۱۲۴/۰۰۰	۱/۸۹۷
۱۹	۱/۱۵۰	۱۳۹/۲۴۰	۲/۳۴۲
۲۰	۱/۲۳۲	۸۱/۲۴۳	۱/۸۸۹
۲۱	۱/۰۹۹	۱۲۷/۲۳۹	۱/۷۸۴
۲۲	۱/۸۵۵	۲۳/۰۱۳	۲/۱۱۲
۲۳	۱/۰۲۲	۱۳۷/۲۳۸	۱/۷۹۱
۲۴	۱/۰۱۴	۱۲۹/۰۰۰	۱/۶۳۰
۲۵	۱/۰۲۶	۱۲۹/۰۰۰	۱/۶۳۱
۲۶	۱/۲۶۲	۲۳/۰۰۲	۱/۳۶۶
۲۷	۱/۹۳۹	۱۰/۸۳۰	۱/۸۴۸
۲۸	۱/۲۰۲	۱۳/۰۰۱	۱/۴۷۰
۲۹	۱/۴۲۶	۲۳/۰۰۱	۲/۲۴۸

در جدول (۸) ارائه شده است. در سناریوی سوم، مقادیر متفاوت تنظیمات جریانی برای بخش اول و دوم منحنی عملکرد رله‌ها تعیین شده است. با کمک تنظیمات ارائه شده در جدول (۵) در سناریوی سوم مورد مطالعه، می‌توان زمان عملکرد سیستم حفاظتی در آرایش-های مختلف و حالات بهره‌برداری محتمل از ۶۳۱/۷۸ ثانیه (سناریو دوم) را به ۳۸۸/۰۳ ثانیه کاهش داد. این میزان کاهش موثر زمان عملکرد مزیت روش پیشنهادی در بهینه‌سازی نقطه شکست را نشان می‌دهد.

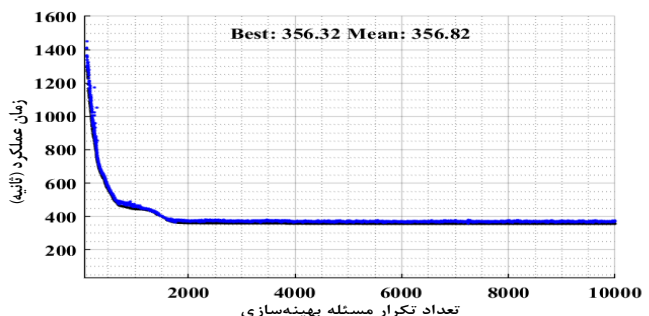
نتایج مطالعات حفاظتی بر اساس تنظیمات بهینه استخراج شده دلالت بر رعایت قیود هماهنگی و فاصله زمانی هماهنگی مناسب بین رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش‌های مختلف شبکه دارد. برای نمونه، هماهنگی رله‌های ۱ و ۱۹ در بخش توزیع شبکه ۳۰ شین بر اساس تنظیمات سناریوهای ۴ تا ۶ در شکل (۷) نشان داده شده است.



(الف) سناریو ۴



(ب) سناریو ۵



(پ) سناریو ۶

شکل (۶): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در سناریوهای مختلف در جدول‌های (۹) تا (۱۲)، نتایج تنظیمات بهینه رله‌های حفاظتی در سناریوهای ۴ تا ۶ برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE به‌عنوان

سازد. در حالی که، محدودیت‌ها و قیود هماهنگی، مانعی برای زمان عملکرد سریع رله‌ها برای جریان خطاهای قابل توجه نخواهند بود. بررسی نتایج سناریوی ششم از دیدگاه جریان‌های تنظیمی نیز نشان می‌دهد که میزان قابل توجهی تفاوت در مقدار بهینه جریان تنظیمی بخش اول و دوم منحنی عملکرد رله‌ها وجود ندارد. با این وجود، مطالعات انجام شده و بررسی‌هایی مقایسه‌ای نشان می‌دهد که اگرچه تفاوت زیادی در مقادیر جریان تنظیمی بخش اول و دوم وجود ندارد، اما زمانی که متغیرهای تصمیم مجزا برای این دو مورد انتخاب می‌گردد، مقدار تابع هدف و زمان عملکرد سیستم حفاظتی تا حدی بهبود می‌یابد.

جدول (۸): تنظیمات بهینه رله‌ها و زمان عملکرد رله‌های اصلی و

پشتیبان با آرایش پایه بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در سناریو سوم

زمان عملکرد (ثانیه)	I_P^s (A)	I_P^f (A)	I_H (A)	TDS^s (s)	TDS^f (s)	رله
۰/۳۴۶	۱۸۱/۳۱۱	۱۱۸/۹۸۷	۱۰۸/۶۹۷	۱/۹۶۹	۱/۱۲۲	۱
۰/۳۶۳	۲۱۲/۰۸۴	۱۵۲/۹۸۴	۱۳۹/۰۴۶	۱/۸۰۷	۰/۳۵۲	۲
۰/۲۲۹	۱۷۴/۰۶۶	۸۹/۱۳۴	۸۲/۱۶۸	۱/۴۷۱	۱/۶۵۷	۳
۰/۰۶۱	۴۰/۷۰۰	۴۱/۱۳۵	۳۷/۵۵۰	۱/۷۴۹	۰/۳۱۲	۴
۰/۱۴۸	۲۳۱/۰۷۳	۲۱/۵۷۹	۱۹/۰۱۶	۰/۵۷۱	۰/۳۲۱	۵
۰/۱۱۴	۱۹۹/۱۵۱	۱۸/۸۲۸	۱۸/۳۰۳	۰/۵۱۷	۰/۱۷۹	۶
۰/۴۰۴	۲۰۶/۸۳۱	۴۶/۸۷۷	۴۲/۳۴۲	۱/۵۷۸	۲/۰۰۰	۷
۰/۰۰۴	۵۷/۲۰۰	۵۷/۳۱۰	۴۹۷۹/۷۹۷	۰/۰۵۰	۰/۷۸۹	۸
۰/۱۸۴	۱۲۴/۵۶۶	۱۹/۳۷۵	۱۷/۱۱۲	۰/۹۸۸	۰/۳۰۷	۹
۰/۴۷۶	۲۱۸/۰۳۰	۳۱/۹۴۴	۲۹/۵۷۰	۱/۲۸۶	۱/۹۹۰	۱۰
۰/۲۲۱	۱۹۹/۵۴۳	۲۷/۳۵۸	۲۳/۰۸۶	۰/۶۵۳	۰/۱۸۸	۱۱
۰/۳۰۷	۶۶/۲۱۵	۴۷/۷۳۳	۴۲/۱۵۳	۱/۸۳۰	۱/۰۹۹	۱۲
۰/۵۹۶	۱۲۲/۲۰۰	۱۰/۱۳۲	۹۱/۴۵۱	۱/۹۸۰	۰/۵۵۴	۱۳
۰/۲۹۶	۱۰۱/۴۵۲	۱۰۰/۳۷۸	۹۱/۴۱۷	۱/۹۶۲	۱/۳۰۴	۱۴
۰/۶۱۹	۱۱۹/۰۸۳	۱۲۲/۴۷۴	۱۰۸/۰۳۳	۱/۵۷۲	۱/۴۸۴	۱۵
۰/۲۴۷	۱۱۰/۱۷۲	۴۶/۴۲۹	۴۴/۳۶۲	۱/۰۱۹	۱/۵۶۹	۱۶
۰/۶۹۳	۱۳۶/۴۹۰	۱۳۷/۷۵۶	۱۲۶/۴۳۰	۱/۶۴۸	۱/۰۵۳	۱۷
۰/۲۹۴	۱۴۰/۰۷۸	۱۳۶/۴۳۹	۱۲۴/۵۲۸	۱/۵۰۶	۱/۰۹۹	۱۸
۰/۶۶۵	۱۵۳/۰۴۶	۱۵۲/۹۷۶	۱۳۹/۴۰۸	۱/۱۹۴	۱/۱۲۶	۱۹
۰/۳۰۳	۸۹/۱۰۰	۹۰/۳۳۰	۸۱/۱۱۹	۱/۵۸۹	۱/۹۷۷	۲۰
۰/۲۰۳	۱۳۹/۷۰۰	۱۴۰/۰۵۳	۱۲۸/۶۱۷	۰/۸۴۲	۱/۵۷۲	۲۱
۰/۳۰۱	۱۳۹/۱۶۷	۲۵/۳۹۰	۲۳/۵۲۵	۱/۱۹۵	۰/۱۲۸	۲۲
۰/۲۹۴	۲۰۵/۷۳۸	۱۵۱/۳۵۰	۱۳۷/۲۶۸	۰/۶۵۶	۱/۱۳۵	۲۳
۰/۱۲۷	۱۴۱/۹۰۰	۱۴۲/۰۶۲	۱۲۹/۰۳۶	۰/۵۴۹	۰/۶۰۶	۲۴
۰/۱۶۹	۱۴۱/۹۰۰	۱۴۳/۱۸۱	۱۲۹/۱۰۱	۰/۷۶۱	۱/۸۲۷	۲۵
۰/۰۸۱	۳۰/۲۸۳	۲۵/۶۱۵	۲۳/۷۳۹	۱/۹۸۵	۰/۶۱۰	۲۶
۰/۰۸۰	۵۸/۸۵۷	۱۲/۰۳۸	۱۱/۲۴۱	۱/۰۳۳	۰/۷۰۹	۲۷
۰/۰۷۶	۱۵/۲۵۷	۱۴/۸۷۰	۱۳/۲۷۴	۱/۰۸۲	۰/۱۵۶	۲۸
۰/۴۱۲	۳۳/۷۲۴	۲۵/۵۱۵	۲۴/۱۴۶	۱/۴۳۵	۰/۸۰۰	۲۹

در جدول (۱۰) نیز نتایج مربوط به سناریوی ۵ ارائه شده است. هم-چنین، کامل‌ترین نتایج و تنظیمات بر اساس روش پیشنهادی در جدول (۱۱) برای سناریوی ششم بیان شده است. در نتایج ارائه شده، تنظیمات جریانی، تنظیمات زمانی، نقطه شکست و نوع منحنی بخش اول و دوم رله‌های دوگانه (دوسطحی) آورده شده است.

جدول (۷): تنظیمات بهینه رله‌ها و زمان عملکرد رله‌های اصلی و

پشتیبان با آرایش پایه بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در سناریو دوم

رله	TDS^s (s)	TDS^f (s)	I_P (A)	زمان عملکرد رله اصلی (ثانیه)
۱	۰/۱۹۵	۰/۱۹۴	۱۱۸/۸۶۵	۰/۰۲۲
۲	۰/۹۲۴	۰/۹۰۱	۱۵۲/۹۸۶	۰/۱۳۰
۳	۰/۴۶۴	۰/۱۱۷	۸۹/۱۰۴	۰/۰۰۹
۴	۱/۰۱۸	۰/۷۳۴	۴۰/۷۰۳	۰/۰۲۵
۵	۰/۲۸۸	۱/۱۴۲	۲۰/۹۷۳	۰/۰۲۶
۶	۰/۶۶۸	۰/۸۴۵	۱۸/۷۰۷	۰/۰۱۷
۷	۰/۵۵۰	۱/۲۴۷	۴۶/۳۱۸	۰/۰۷۰
۸	۰/۹۸۷	۰/۰۵۰	۵۷/۲۱۱	۰/۰۰۴
۹	۰/۶۸۴	۰/۴۶۶	۱۸/۷۰۲	۰/۰۱۳
۱۰	۰/۳۰۲	۰/۹۱۰	۳۲/۱۶۳	۰/۰۴۹
۱۱	۰/۷۹۱	۱/۲۱۴	۲۵/۳۰۰	۰/۰۵۱
۱۲	۰/۴۵۱	۰/۰۷۵	۴۶/۲۷۶	۰/۰۰۹
۱۳	۱/۲۳۸	۰/۷۴۳	۱۰۰/۱۸۰	۰/۱۸۳
۱۴	۰/۳۴۵	۰/۰۵۰	۱۰۰/۱۶۴	۰/۰۰۷
۱۵	۰/۲۰۹	۱/۴۲۰	۱۱۹/۲۱۱	۰/۵۶۰
۱۶	۰/۴۵۱	۰/۰۸۳	۴۶/۲۳۰	۰/۰۰۸
۱۷	۰/۴۲۷	۰/۰۶۵	۱۳۶/۴۶۷	۰/۰۲۷
۱۸	۰/۵۲۵	۱/۰۸۳	۱۳۶/۵۲۷	۰/۲۰۶
۱۹	۰/۱۴۴	۰/۶۸۶	۱۵۳/۵۰۱	۰/۳۸۴
۲۰	۱/۰۰۲	۰/۰۵۶	۸۹/۱۰۹	۰/۰۱۱
۲۱	۰/۳۵۷	۰/۰۷۳	۱۳۹/۷۳۸	۰/۰۱۸
۲۲	۱/۰۰۱	۰/۷۰۶	۲۵/۹۵۴	۰/۰۳۳
۲۳	۰/۵۳۱	۱/۱۰۴	۱۵۰/۷۱۴	۰/۳۶۰
۲۴	۰/۲۹۸	۰/۱۴۵	۱۴۲/۲۶۶	۰/۰۳۴
۲۵	۰/۳۶۹	۰/۳۰۰	۱۴۲/۱۷۹	۰/۰۶۷
۲۶	۰/۳۹۱	۰/۱۲۴	۲۵/۳۰۱	۰/۰۰۴
۲۷	۰/۳۵۳	۰/۳۱۷	۱۱/۸۹۶	۰/۰۰۵
۲۸	۰/۲۹۸	۰/۰۵۸	۱۴/۳۰۷	۰/۰۰۴
۲۹	۰/۷۴۰	۰/۰۵۰	۲۵/۶۱۷	۰/۰۱۱

بررسی نوع منحنی مشخصه بخش اول و دوم رله‌های پیشنهادی در سناریوی ششم نشان می‌دهد، بخش قابل توجهی از بخش دوم رله‌ها باید از نوع شدیداً کاهشی انتخاب گردند. اگرچه، بر اساس قیود هماهنگی و محدودیت‌های طرح‌های حفاظتی، منحنی تمامی بخش-های دوم رله‌های شبکه مورد مطالعه از نوع شدیداً کاهشی انتخاب نشده است. مطابق آن چه برای شبکه ۸ شین بیان شد، می‌توان نتیجه-گیری نمود که با توجه به ویژگی‌های منحنی مشخصه دوسطحی، بخش دوم مطلوبیت سیستم حفاظتی از دیدگاه سرعت را برآورده می-

در نمایش تک‌خطی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE، خطای مورد مطالعه از دیدگاه هماهنگی حفاظتی جلوی رله شماره ۱ نشان داده شده است. رله شماره ۱ رله اصلی بوده و رله ۱۹ به‌عنوان حفاظت پشتیبان رله ۱ و برای خطاهایی مانند خطای نشان داده شده در شکل (۴) عمل خواهد نمود. همان‌گونه که در شکل (۷) قابل مشاهده است، زمان عملکرد رله ۱۹ به‌عنوان رله پشتیبان به اندازه کافی نسبت به عملکرد رله اصلی در تمامی سناریوهای ارائه شده تأخیر دارد.

کاهش زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان برای جفت رله مذکور در سناریوی ۶ و سناریوی ۵ نسبت به سناریو ۴ که از رله با یک مشخصه عملکرد تک‌بخشی استفاده می‌کند، مشهود است. نتایج ارائه شده در شکل (۷) در کنار مزایای کمی تابع هدف محاسبه شده، کارایی منحنی مشخصه دوبخشی را نشان می‌دهد.

جدول (۱۰): تنظیمات بهینه رله‌ها و زمان عملکرد رله‌های اصلی و

پشتیبان با آرایش پایه بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در سناریو پنجم

رله	TDS^s (s)	TDS^f (s)	I_p (A)	CS^f	CS^s	زمان عملکرد (ثانیه)
۱	۰/۲۰۸	۰/۰۵۴	۱۲۰/۶۳۰	NI	EI	۰/۰۱۰
۲	۰/۱۸۴	۰/۳۹۰	۱۵۲/۹۶۵	EI	EI	۰/۰۰۳
۳	۰/۱۶۶	۰/۰۵۱	۱۷۳/۶۴۱	NI	EI	۰/۰۰۱
۴	۰/۰۹۶	۰/۰۵۴	۲۶۲/۰۸۶	EI	EI	۰/۰۰۱
۵	۰/۷۸۷	۰/۶۸۴	۱۷۰/۴۳۹	NI	EI	۰/۰۱۱
۶	۱/۰۲۴	۰/۴۳۲	۱۲۱/۶۴۱	NI	EI	۰/۰۰۳
۷	۰/۵۲۹	۰/۳۴۵	۴۱۰/۰۷۹	VI	EI	۰/۰۲۷
۸	۰/۶۵۵	۱/۲۰۳	۱۵۶/۹۱۹	EI	EI	۰/۰۳۱
۹	۰/۳۵۵	۱/۱۶۳	۱۸۷/۰۱	EI	EI	۰/۰۰۱
۱۰	۰/۱۳۲	۰/۲۴۷	۲۲۲/۵۱۶	EI	EI	۰/۰۱۵
۱۱	۰/۱۹۳	۰/۹۸۷	۹۰/۷۸۴	EI	EI	۰/۰۱۰
۱۲	۰/۲۲۲	۱/۳۲۳	۴۷/۶۲۱	EI	NI	۰/۰۰۸
۱۳	۰/۴۴۵	۰/۰۵۰	۳۵۹/۱۰۹	EI	VI	۰/۰۱۷
۱۴	۰/۲۵۶	۰/۰۶۴	۵۵۰/۱۲۳	NI	VI	۰/۰۱۸
۱۵	۰/۹۷۳	۰/۴۳۵	۲۰۰/۳۰۹	NI	EI	۰/۰۷۹
۱۶	۰/۲۰۶	۰/۱۲۳	۵۲/۶۴۸	EI	VI	۰/۰۰۱
۱۷	۰/۱۴۷	۰/۱۹۳	۱۳۸/۰۷۹	NI	NI	۰/۰۱۴
۱۸	۰/۱۳۷	۰/۰۷۰	۲۴۵/۸۴۱	EI	VI	۰/۰۰۴
۱۹	۰/۱۲۹	۰/۱۱۵	۱۵۳/۹۸۳	NI	EI	۰/۰۱۵
۲۰	۰/۳۵۴	۰/۰۵۵	۱۲۳/۰۳۲	VI	NI	۰/۰۰۲
۲۱	۰/۴۹۳	۰/۰۵۴	۱۴۲/۶۳۶	NI	NI	۰/۰۰۱
۲۲	۱/۱۹۹	۰/۱۴۲	۱۷۸/۳۹۲	NI	NI	۰/۰۰۶
۲۳	۱/۰۲۴	۰/۷۸۴	۱۷۷/۷۵۱	VI	NI	۰/۰۴۹
۲۴	۰/۴۰۴	۰/۶۵۶	۲۵۴/۷۸۸	EI	VI	۰/۰۴۸
۲۵	۰/۳۷۹	۰/۰۷۱	۲۵۵/۸۲۸	EI	VI	۰/۰۰۵
۲۶	۰/۸۱۹	۱/۴۱۵	۱۳۹/۹۳۳	EI	VI	۰/۰۲۲
۲۷	۰/۷۷۳	۰/۷۶۰	۵۶/۴۰۷	NI	NI	۰/۰۰۲
۲۸	۰/۳۳۲	۰/۳۱۳	۲۵/۶۳۳	EI	NI	۰/۰۰۲
۲۹	۰/۳۲۲	۰/۱۰۳	۷۱/۴۴۸	NI	VI	۰/۰۱۶

از مزایای روش پیشنهادی، می‌توان به امکان اعمال تنظیمات بهینه استخراج شده در تمامی سناریوهای مورد مطالعه به رله‌های واقعی مورد استفاده در سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع اشاره کرد، زیرا نیاز به مشخصه‌های غیر استاندارد یا تنظیماتی با تغییرات عمده سخت‌افزاری یا نرم‌افزاری ندارد.

با اعمال تنظیمات مذکور به رله‌های حفاظتی و بدون نیاز به گروه تنظیم‌های مختلف و بستر مخابراتی، می‌توان حفاظت مطلوب در حالات مختلف بهره‌برداری و آرایش‌های مختلف سیستم حاصل نمود. مشابه آن‌چه برای شبکه ۸ شین IEEE بیان شد، صحت‌سنجی تنظیمات بهینه به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نیز در دستور کار قرار گرفت. تنظیمات به‌دست آمده به رله‌های حفاظتی شبکه مورد مطالعه در DigSILENT اعمال شد و مطالعات هماهنگی حفاظتی دنبال گردید.

جدول (۹): تنظیمات بهینه رله‌ها و زمان عملکرد رله‌های اصلی و

پشتیبان با آرایش پایه بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در سناریو چهارم

رله اصلی	TDS (s)	I_p (A)	CS	زمان عملکرد (ثانیه)
۱	۱/۴۹۶	۲۷۰/۴۹۲	VI	۰/۳۹۵
۲	۰/۷۷۶	۵۳۸/۵۲۴	VI	۰/۴۰۵
۳	۱/۲۴۵	۲۱۲/۲۰۸	VI	۰/۲۳۷
۴	۰/۵۹۱	۱۲۵/۷۲۹	VI	۰/۰۶۳
۵	۰/۹۶۲	۱۶۲/۶۴۸	VI	۰/۱۷۵
۶	۰/۸۴۸	۱۴۴/۳۸۲	VI	۰/۱۳۴
۷	۱/۰۱۶	۳۶۱/۸۲۷	VI	۰/۴۶۱
۸	۰/۶۱۲	۲۶۷/۶۲۷	VI	۰/۲۵۹
۹	۱/۴۶۳	۹۹/۲۴۲	VI	۰/۲۱۷
۱۰	۱/۵۶۸	۲۱۴/۶۸۰	VI	۰/۵۷۱
۱۱	۰/۸۹۸	۱۵۵/۲۰۸	VI	۰/۲۳۵
۱۲	۱/۱۵۶	۱۱۳/۰۳۴	VI	۰/۳۳۴
۱۳	۱/۵۱۶	۱۸۲/۸۹۸	VI	۰/۶۹۱
۱۴	۰/۶۴۷	۳۴۵/۹۷۳	VI	۰/۳۴۲
۱۵	۱/۷۱۱	۱۲۴/۰۱۷	VI	۰/۷۰۳
۱۶	۰/۸۲۹	۱۵۱/۳۴۵	VI	۰/۲۷۸
۱۷	۱/۱۳۰	۲۲۶/۹۰۴	VI	۰/۸۰۶
۱۸	۰/۶۳۶	۳۶۳/۶۰۱	VI	۰/۳۳۰
۱۹	۰/۷۳۲	۲۶۳/۳۶۲	VI	۰/۷۲۴
۲۰	۱/۲۰۰	۱۲۹/۱۹۶	VI	۰/۳۳۴
۲۱	۰/۷۵۴	۱۶۹/۱۵۷	VI	۰/۲۲۱
۲۲	۱/۰۵۴	۱۸۶/۶۷۵	VI	۰/۳۵۹
۲۳	۰/۶۳۷	۲۳۳/۹۸۴	VI	۰/۳۲۷
۲۴	۰/۵۴۵	۱۴۱/۹۱۹	VI	۰/۱۲۷
۲۵	۰/۸۲۹	۱۴۳/۱۰۱	VI	۰/۱۸۵
۲۶	۰/۵۲۵	۱۰۱/۹۰۷	VI	۰/۰۷۴
۲۷	۰/۵۰۲	۱۱۶/۵۳۷	VI	۰/۰۷۸
۲۸	۰/۱۵۰	۷۸/۳۲۰	VI	۰/۰۵۵
۲۹	۱/۱۱۱	۴۵/۸۲۳	VI	۰/۴۳۷

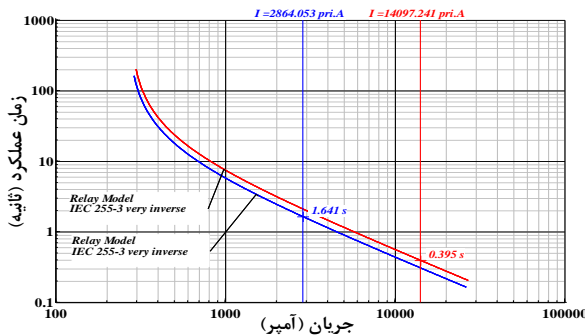
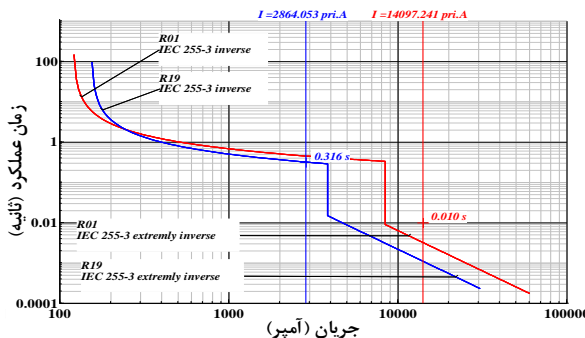
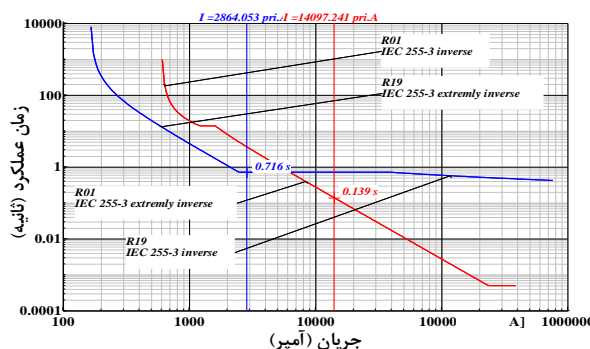
جدول (۱۱): تنظیمات بهینه رله‌ها و زمان عملکرد رله‌های اصلی و
پشتیبان با آرایش پایه بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در سناریو ششم

رله	TDS^s (s)	TDS^f (s)	I_H (A)	I_P^f (A)	I_P^s (A)	CS^f	CS^s
۱	۱/۳۸۸	۰/۵۷۳	۱۵۵۶/۲۵	۶۰۶/۷۴	۷۷۶/۳۱	NI	EI
۲	۰/۷۷۷	۰/۴۹۲	۷۲۱۰/۶۱	۲۵۴/۹۸	۹۲۳/۲۱	VI	EI
۳	۰/۱۹۸	۰/۳۰۴	۱۰۳۲۱/۲	۴۸۱/۸۶	۵۱۹/۳۸	NI	EI
۴	۰/۰۹۷	۰/۲۵۲	۴۴۱۱/۹۰	۲۷۴/۴۰	۴۷۹/۹۹	NI	EI
۵	۰/۱۳۱	۰/۶۲۶	۵۱۵۴/۱۴	۳۶۱/۴۴	۳۷۹/۱۴	VI	EI
۶	۰/۶۵۸	۱/۰۶۲	۲۹۱۰/۸۴	۸۰/۲۹	۱۴۶/۷۲	EI	EI
۷	۰/۹۶۵	۰/۶۶۲	۱۱۶۰/۸۸	۳۳۹/۱۵	۳۶۱/۶۲	NI	EI
۸	۰/۹۵۳	۰/۳۴۶	۲۳۲۹/۹۸	۱۱۰/۶۵	۴۵۱/۵۷	NI	EI
۹	۰/۴۰۸	۰/۵۲۶	۶۶۸۴/۸۵	۵۰/۹۵	۶۷/۷۱	VI	EI
۱۰	۰/۷۴۰	۰/۱۸۸	۴۴۶۳/۳۵	۳۳/۵۴	۸۵/۹۳	EI	EI
۱۱	۰/۴۱۱	۰/۳۳۶	۳۸۳۷/۴۵	۲۵/۳۰	۱۶۱/۶۴	EI	VI
۱۲	۰/۹۶۴	۰/۵۵۵	۱۶۲۶/۵۱	۱۳۲/۸۸	۲۶۵/۳۶	VI	VI
۱۳	۰/۳۵۰	۰/۰۷۹	۳۸۰۵/۱۳	۲۴۳/۱۶	۲۳۰/۰۴	VI	NI
۱۴	۰/۵۷۶	۰/۲۷۴	۱۶۷۴/۵۴	۱۷۳/۱۳	۶۴۱/۸۴	NI	EI
۱۵	۰/۶۱۱	۰/۸۹۷	۲۴۲۶/۵۰	۲۸۸/۴۹	۲۵۶/۹۰	VI	NI
۱۶	۰/۸۲۹	۰/۲۷۴	۱۴۴۶/۷۱	۱۲۲/۸۶	۴۰۰/۲۰	EI	VI
۱۷	۰/۶۶۰	۰/۷۱۸	۱۷۳۶/۸۱	۱۹۳/۰۸	۳۵۰/۰۱	EI	NI
۱۸	۱/۰۴۴	۱/۵۳۸	۳۸۴۰/۱۴	۲۵۹/۰۷	۳۱۳/۳۷	VI	VI
۱۹	۰/۴۵۱	۰/۴۹۳	۲۰۷۵/۹۲	۱۶۵/۲۷	۳۸۲/۱۹	EI	NI
۲۰	۰/۷۶۶	۱/۱۷۳	۱۶۶۳/۷۰	۱۲۰/۳۵	۱۴۴/۵۵	NI	EI
۲۱	۰/۱۳۲	۰/۰۹۷	۵۳۹۱/۸۴	۴۶۳/۸۲	۴۴۲/۹۶	VI	NI
۲۲	۱/۵۱۵	۰/۸۴۳	۱۹۴۷/۲۸	۹۵/۶۹	۲۲۸/۳۸	NI	VI
۲۳	۱/۵۰۳	۱/۲۵۷	۱۲۴۸/۳۶	۲۵۳/۲۹	۲۲۸/۱۶	NI	VI
۲۴	۰/۱۳۴	۰/۰۸۰	۴۵۲۱/۵۳	۲۷۱/۵۴	۱۹۷/۹۶	VI	EI
۲۵	۰/۳۱۶	۰/۷۸۴	۱۶۹۸/۶۱	۱۴۲/۹۰	۲۰۳/۹۳	NI	VI
۲۶	۰/۳۱۰	۰/۶۴۴	۲۲۸۳/۴۵	۱۴۵/۳۰	۱۶۴/۵۵	VI	NI
۲۷	۰/۵۳۶	۱/۰۸۹	۵۳۵۷/۱۷	۶۷/۸۰	۴۵/۸۹	VI	NI
۲۸	۰/۵۱۵	۰/۲۴۷	۱۲۱۹/۸۱	۲۴/۸۷	۷۰/۰۱	VI	VI
۲۹	۰/۳۸۶	۰/۳۹۷	۵۱۶/۶۸	۴۸/۹۹	۸۱/۲۸	NI	EI

۳-۳- آنالیز حساسیت

یکی از موضوعات تکمیلی که در بهینه‌سازی سیستم حفاظتی ریز شبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند به آن باید توجه داشت، بارهای موتوری است. دینامیک موتورهای القایی در ریز شبکه و شبکه‌های هوشمند در زمان بروز خطا و تغییر رفتار موتورهای القایی از حالت موتوری به حالت ژنراتوری باعث اختلال در هماهنگی سیستم حفاظتی می‌گردد. باید در نظر داشت که موتور یک المان چرخان است و رفتار استاتیکی از خود نشان نمی‌دهد. موتورها بسته به قدرت‌شان در لحظه اتصال کوتاه مانند ژنراتور می‌توانند به نقطه خطا جریان تزریق کنند. در بحث محاسبات جریان اتصال کوتاه مبحثی به نام Contribution Current یا سهم مشارکت موتورها در تغذیه جریان اتصال کوتاه در

نقطه رخداد خطا وجود دارد. به این معنا که الکتروموتورها به خاطر وجود پس‌ماند مغناطیسی می‌توانند میدان الکتریکی تولید و در شرایط اتصال کوتاه در شین‌های نزدیک، جریانی به نقطه خطا تزریق نمایند. از اینرو در مطالعات تکمیلی، آنالیز حساسیت بر روی رفتار سیستم حفاظتی بهینه پیشنهادی با تغییر بارهای استاتیکی به موتوری و تعداد نقض قیود هماهنگی پرداخته شده است.


الف) سناریو ۴

ب) سناریو ۵

ج) سناریو ۶

شکل (۷): منحنی هماهنگی رله‌های ۱ و ۱۹ بخش توزیع شبکه ۳۰

شین بر اساس مطالعات حفاظتی انجام شده در DigSILENT

برای آزمایش رفتار دینامیک موتورهای القایی در ریز شبکه در زمان بروز خطا و تغییر رفتار موتورهای القایی از حالت موتوری به حالت ژنراتوری، بار موتوری در بخش توزیع شبکه ۳۰ شین اضافه گردید. در مطالعه اول، بارهای استاتیکی شبکه در ۵ شین خارج گردید و بار معادل موتوری جایگزین در شین ۲ اضافه گردید. در مطالعه دوم نیز، علاوه بر بار موتوری مورد اشاره در شین ۲، بار واقع در شین ۶ را نیز خارج نموده و بار موتوری دیگری جایگزین آن گردید.

در شکل (۸)، نمونه‌ای از منحنی هماهنگی رله‌های حفاظتی در شرایط

که مشاهده می‌شود، ۶ نقض قید هماهنگی ناشی از رفتار دینامیکی بار موتوری متصل به شین ۲ حاصل شده است. هم‌چنین با زیاد شدن ضریب نفوذ بارهای موتوری در شین ۶، تعداد نقض قیود به ۱۰ مورد رسیده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد در ریز شبکه‌های صنعتی و ریز شبکه‌هایی با ضریب نفوذ بالای بارهای موتوری، ارائه روش‌های هماهنگی حفاظتی بهینه با در نظرگیری بارهای موتوری ضروری است. یکی از کارهای پیشنهادی نویسندگان، ارائه روش‌های هماهنگی حفاظتی برای ریز شبکه‌های دارای بارهای موتوری گسترده خواهد بود.

مقدار مقاومت خطا، نوع خطا (فازهای تحت خطا) و فاصله خطا تا محل رله از پارامترهای موثری هستند که می‌توانند بر عملکرد سیستم حفاظتی پیشنهادی اثر بگذارند. لذا در آنالیزهای حساسیت انجام شده، عملکرد سیستم حفاظتی نسبت به تغییرات در این پارامترها ارزیابی گردید. آنالیزهای حساسیت انجام شده نشان داد که عملکرد طرح پیشنهادی مقاومت خوبی نسبت به تغییر در پارامترهای مورد اشاره دارد. برای نمونه منحنی هماهنگی رله‌های ۱ و ۱۹ در حالات مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است.

بارگیری موتوری و عملکرد سیستم حفاظتی پیشنهادی نسبت به این تغییر و ضریب نفوذهای مختلف بارهای موتوری نشان داده شده است. در جدول (۱۲)، جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌های حفاظتی در آرایش پایه (متصل به شبکه و با اتصال تمامی منابع تولید پراکنده) در شرایط بدون بار موتوری و شرایطی که بار موتوری به آن اضافه شده است، برای هر دو مطالعه مذکور نشان داده شده است. تغییرات در جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها ناشی از بار موتوری شین ۲ بسیار زیاد نمی‌باشد. اما در حالی که بار شین ۶ نیز موتوری باشد، تفاوت قابل توجهی در جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها ناشی از رفتار دینامیکی بارهای موتوری مشاهده می‌گردد. نتایج نشان داده شده دلالت بر حساسیت ریز شبکه و شبکه هوشمند مورد مطالعه نسبت به بارهای موتوری دارد.

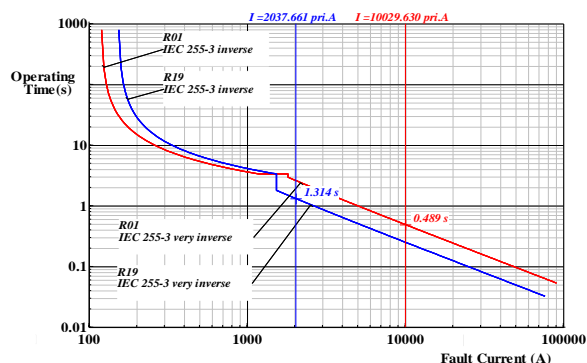
مطالعات حفاظتی بر اساس تنظیمات بهینه سناریوی ۳ در شرایط بهره‌برداری پایه (متصل به شبکه و اتصال تمامی منابع تولید پراکنده) برای دو حالت مورد اشاره انجام گردید. نتایج مطالعات انجام شده و زمان عملکرد رله‌ها، فاصله زمانی هماهنگی و تعداد نقض قیود ناشی از اضافه شدن بارهای موتوری در جدول (۱۳) بیان شده است. همان‌گونه

جدول (۱۲): جریان خطا رله‌های دارای نقض قید، در حالت اضافه شدن بار موتوری

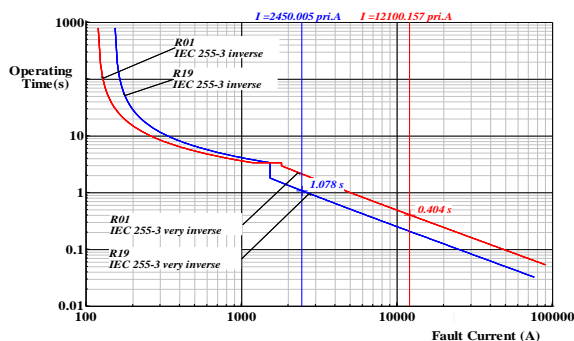
جفت رله‌های حفاظتی		جریان خطا در حالت بدون بار موتوری (آمپر)		جریان خطا در حالت بار موتوری در شین ۲ (آمپر)		جریان خطا در حالت بار موتوری در شین‌های ۲ و ۶ (آمپر)	
رله اصلی	رله پشتیبان	رله اصلی	رله پشتیبان	رله اصلی	رله پشتیبان	رله اصلی	رله پشتیبان
۱	۱۹	۱۴۰۹۷	۲۸۶۴	۱۴۲۳۷	۲۹۵۳	۱۶۰۵۸	۴۷۱۶
۳	۱۹	۱۵۲۳۶	۲۸۶۴	۱۵۵۱۸	۲۹۵۳	۱۷۳۲۶	۴۷۱۷
۱۹	۱۷	۳۸۶۱	۲۹۵۲	۳۹۴۸	۳۰۴۰	۶۴۹۸	۳۰۳۷
۱۸	۲	۹۸۳۶	۸۹۲۸	۹۹۴۵	۹۰۳۸	۱۲۴۶۸	۹۰۲۰
۱۶	۱۸	۶۲۴۵	۵۳۴۴	۶۲۹۷	۵۳۹۶	۷۰۶۵	۶۱۶۵
۶	۸	۱۲۴۴۴	۱۷۳۸	۱۴۸۴۵	۱۷۲۰	۱۵۰۱۷	۱۷۹۸
۷	۸	۱۱۱۲۵	۱۸۰۹	۱۳۶۴۱	۱۸۰۴	۱۳۷۷۳	۱۸۸۵
۱۰	۵	۸۱۷۱	۲۳۹۹	۸۵۸۸	۲۶۲۴	۸۷۲۰	۲۶۴۷
۱۰	۶	۸۱۷۱	۱۸۹۵	۸۵۸۸	۲۰۷۲	۸۷۲۰	۲۰۹۰
۱۳	۷	۵۶۰۵	۴۶۹۹	۶۰۶۱	۵۱۵۷	۶۱۰۶	۵۲۰۲

جدول (۱۳): زمان عملکرد و فاصله هماهنگی رله‌های دارای نقض قید، در حالت اضافه شدن بار موتوری

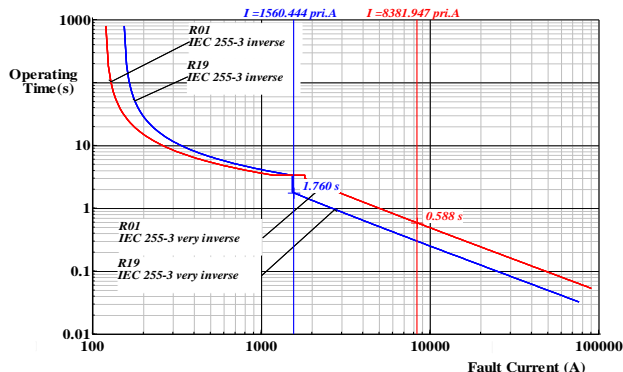
جفت رله هماهنگی		زمان عملکرد در حالت بار معمولی (ثانیه)		زمان عملکرد در حالت بار هماهنگی		زمان عملکرد در حالت بار موتوری در شین ۲ (ثانیه)		زمان عملکرد در حالت بار موتوری در شین‌های ۲ و ۶ (ثانیه)		فاصله هماهنگی (ثانیه)
رله اصلی	رله پشتیبان	رله اصلی	رله پشتیبان	رله اصلی	رله پشتیبان	رله اصلی	رله پشتیبان	رله اصلی	رله پشتیبان	
۱	۱۹	۰/۳۴۶	۰/۹۱۳	۰/۵۶۷	۰/۳۴۳	۰/۸۸۴	۰/۵۴۱	۰/۳۰۴	۰/۵۴۳	۰/۲۳۹
۳	۱۹	۰/۲۳۰	۰/۸۳۷	۰/۶۰۷	۰/۲۲۶	۰/۸۱۰	۰/۵۸۴	۰/۲۰۲	۰/۴۹۷	۰/۲۹۵
۱۹	۱۷	۰/۶۶۵	۰/۹۶۵	۰/۳۰۰	۰/۵۰۸	۰/۷۶۹	۰/۲۶۱	۰/۳۵۸	۰/۶۴۴	۰/۲۸۶
۱۸	۲	۰/۲۹۴	۰/۵۹۴	۰/۳۰۰	۰/۲۹۰	۰/۵۸۶	۰/۲۹۶	۰/۲۳۱	۰/۴۶۸	۰/۲۳۷
۱۶	۱۸	۰/۲۴۷	۰/۵۴۷	۰/۳۰۰	۰/۲۴۵	۰/۵۴۲	۰/۲۹۷	۰/۲۱۸	۰/۴۷۳	۰/۲۵۵
۶	۸	۰/۱۱۴	۰/۴۱۴	۰/۳۰۰	۰/۰۹۵	۰/۲۳۲	۰/۱۳۷	۰/۰۹۴	۰/۲۲۲	۰/۱۲۸
۷	۸	۰/۱۱۴	۰/۴۴۰	۰/۳۲۶	۰/۰۹۳	۰/۴۲۱	۰/۳۲۸	۰/۰۹۲	۰/۲۱۱	۰/۱۱۹
۱۰	۵	۰/۴۷۶	۰/۷۷۶	۰/۳۰۰	۰/۴۵۲	۰/۶۶۵	۰/۲۱۳	۰/۴۴۵	۰/۶۵۹	۰/۲۱۴
۱۰	۶	۰/۴۷۶	۰/۸۳۲	۰/۳۵۶	۰/۴۵۲	۰/۷۳۲	۰/۲۸۰	۰/۴۴۵	۰/۶۸۲	۰/۲۳۷
۱۳	۷	۰/۲۷۲	۰/۵۹۶	۰/۳۲۴	۰/۲۴۸	۰/۵۵۰	۰/۳۰۲	۰/۲۴۶	۰/۵۴۵	۰/۲۹۹
مجموع نقض قیودها		۰		۶		۱۰				



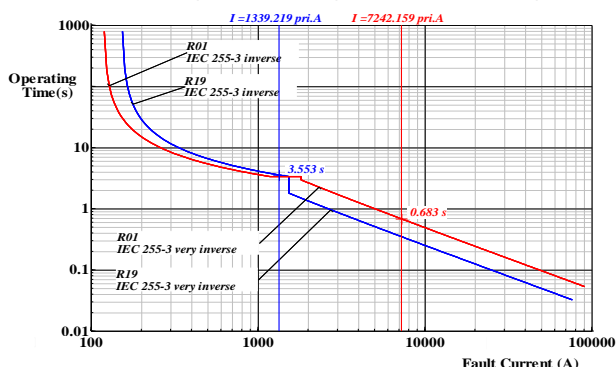
(الف) خطای ۳ فاز نزدیک به رله و با مقاومت ۱ اهم



(ب) خطای ۲ فاز نزدیک به رله و بدون مقاومت خطا



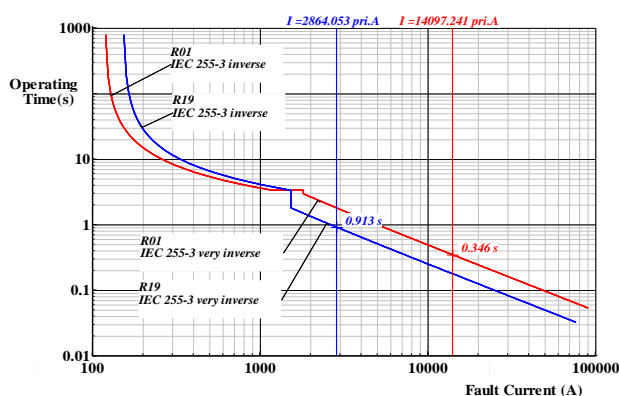
(ج) خطای ۳ فاز در شین دور رله و بدون مقاومت خطا



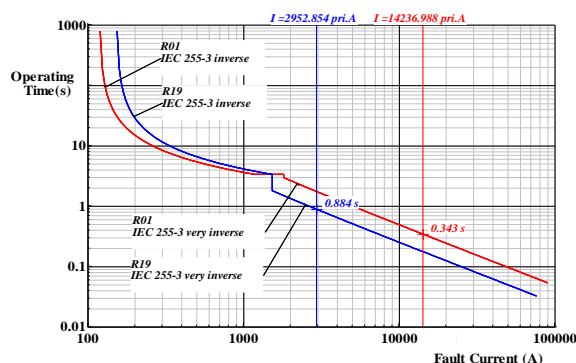
(د) خطای ۲ فاز در شین دور رله و بدون مقاومت خطا

شکل (۹): منحنی هماهنگی رله‌های ۱ و ۱۹ بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در آرایش پایه شبکه و ضریب نفوذ بارهای موتوری مختلف بر اساس تنظیمات بهینه سناریوی ۳

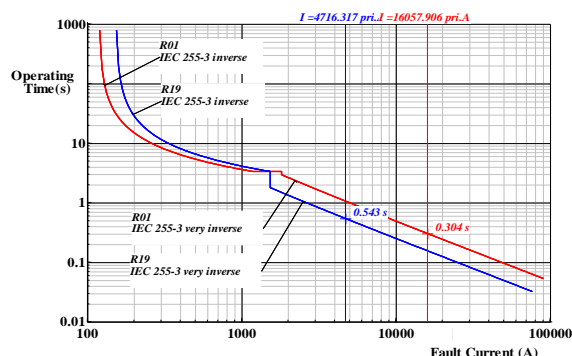
در جدول (۱۴)، ارزیابی سیستم حفاظتی در حالات مختلف بهره‌برداری با کمک تنظیمات بهینه مطابق سناریو ۲ نشان داده شده است.



(الف) بدون بار موتوری



(ب) با بار موتوری در شین ۲



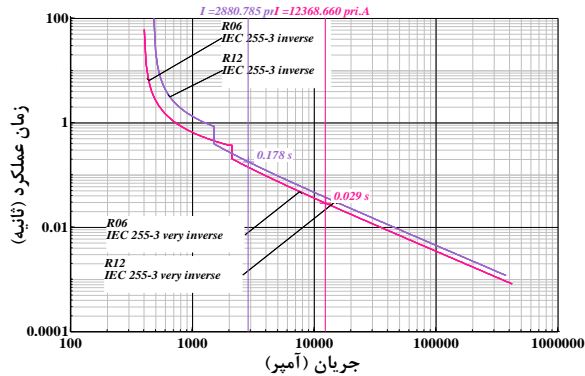
(ج) با بارهای موتوری در شین‌های ۲ و ۶

شکل (۸): منحنی هماهنگی رله‌های ۱ و ۱۹ بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در آرایش پایه شبکه و ضریب نفوذ بارهای موتوری مختلف بر اساس تنظیمات بهینه سناریوی ۳

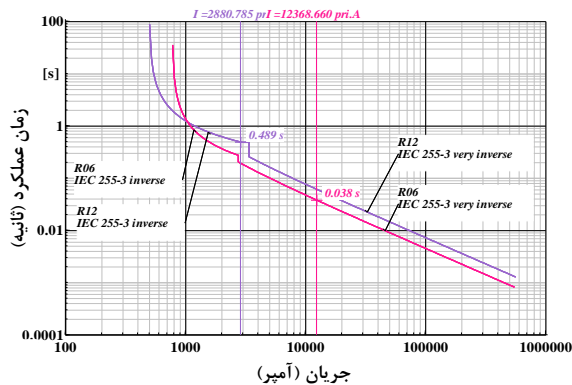
۳-۴- بحث و مقایسه تکمیلی

از دیگر مزایای روش پیشنهادی (سناریوی ۳) در مقایسه با روش‌های موجود (سناریوی ۲) می‌توان به کاهش نقض قیود هماهنگی در حالات مختلف بهره‌برداری اشاره کرد. لازم به ذکر است، در سناریوی ۲، تنها حالات متصل به شبکه و جزیره‌ای در قیود مسئله بهینه‌سازی لحاظ شده است. در حالی که در سناریوی ۳، تمام حالات بهره‌برداری ناشی از تغییر در آرایش تولید و قیود مربوطه در نظر گرفته شده است.

اعمال روش پیشنهادی، می‌توان بدون نیاز به بستر مخابراتی و تنها با یک تنظیمات واحد برای حالات مختلف بهره‌برداری شبکه، به یک طرح حفاظتی سریع و بدون نقض قیود هماهنگی حفاظتی دست یافت.



(الف) سناریو ۲



(ب) سناریو ۳

شکل (۱۰): منحنی هماهنگی رله‌های ۶ و ۱۲ بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در آرایش شبکه ناشی از خروج منبع تولید پراکنده شماره ۱۰

مراجع

- [1] R. Hemmati, H. Mehrjerdi, and S. M. Nosratabadi, "Resilience-oriented adaptable microgrid formation in integrated electricity-gas system with deployment of multiple energy hubs," *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, p. 102946, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102946>.
- [2] N. Nikmehr and S. Najafi Ravadanegh, "A heuristic Solution for Probabilistic Power Flow in Microgrids," *jiaeee*, vol. 13, no. 3, pp. 27-36, 2016. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-27-fa.html>.
- [3] J. Nelson, N. G. Johnson, K. Fahy, and T. A. Hansen, "Statistical development of microgrid resilience during islanding operations," *Applied Energy*, vol. 279, p. 115724, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115724>.
- [4] M. Setareh and H. Ghasemi, "Power Management in an Isolated Balanced Microgrid Considering Small Signal Stability and Dynamic Response," *jiaeee*, vol. 12, no. 1, pp. 1-12, 2015. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-120-fa.html>.
- [5] S. Jamali, H. Rezaei, and N. Rafie, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Synchronous DGs Transient Stability in

نتایج نشان می‌دهد تعداد نقض قیود هماهنگی در سناریوی ۲ برابر ۱۲ می‌باشد. تعداد قابل توجه نقض قید در شرایط مختلف بهره‌برداری، ضرورت استفاده از روش پیشنهادی را نمایان ساخته و کاهش نقض قیود هماهنگی یکی از مزایای مطالعه پیشنهادی در این مقاله نسبت به کارهای گذشته می‌باشد. ضمناً کاهش زمان عملکرد سیستم حفاظتی در تمام حالات نیز دلالت بر برتری روش پیشنهادی دارد. برای شفاف‌شدن هرچه بیشتر موضوع، در شکل (۱۰)، نمونه‌ای از نقض قیود هماهنگی ناشی از در نظرگیری تمام حالات بهره‌برداری در سناریوی ۲ نشان داده شده است.

جدول (۱۴): مقایسه تعداد نقض قیودهای حفاظتی و زمان عملکرد

حالات بهره‌برداری در بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE

حالت بهره‌برداری شبکه	سناریو دوم		سناریو سوم (روش پیشنهادی)
	تعداد نقض قیودها	زمان عملکرد (ثانیه)	زمان عملکرد (ثانیه)
متصل به شبکه	۰	۴۳/۶۱	۲۶/۸۲
جزیره‌ای	۰	۵۴/۶۶	۳۴/۱۷
خروج تمامی DGها	۳	۴۹/۸۸	۳۰/۱۴
خروج DG2	۰	۴۳/۷۷	۲۶/۹۵
خروج DG3	۱	۴۴/۰۶	۲۷/۴۹
خروج DG4	۲	۴۳/۹۲	۲۷/۷۸
خروج DG5	۱	۴۴/۰۲	۲۸/۲۱
خروج DG6	۰	۴۳/۹۵	۲۵/۹۱
خروج DG7	۰	۴۳/۹۳	۲۶/۹۱
خروج DG8	۰	۴۳/۷۶	۲۵/۹۳
خروج DG9	۱	۴۳/۹۹	۲۷/۹۸
خروج DG10	۱	۴۴/۲۶	۲۶/۸۷
خروج DG12	۱	۴۳/۶۸	۲۶/۵۴
خروج DG14	۲	۴۴/۲۹	۲۶/۳۳
مجموع تمامی حالات	۱۲	۶۳۱/۷۸	۳۸۸/۰۳

۴- نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های اساسی شبکه‌های توزیع فعال، ریز شبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند توزیع انرژی الکتریکی در حضور منابع تولید پراکنده، مشکلات حفاظتی ناشی از تغییر در آرایش شبکه و حالات مختلف بهره‌برداری می‌باشد. در این مقاله تلاش گردید با بهبود طرح‌های حفاظتی با بهره‌گیری از منحنی مشخصه دوگانه (دوسطحی)، راهکاری برای مرتفع نمودن چالش مذکور ارائه گردد. در روش پیشنهادی، بهینه‌سازی منحنی مشخصه بخش‌های مختلف مدل رله پیشنهادی و همچنین تعیین نقطه شکست بهینه پیشنهاد گردید. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های ۸ شین IEEE و بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نشان داد که می‌توان به ترتیب معادل ۱۲/۴۲٪ و ۹/۵۶٪ بهبود در زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی موجود ایجاد نمود. نتایج مقایسه‌ای دلالت بر مزایای روش پیشنهادی دارد. با

- [17] T. S. Aghdam, H. K. Karegar, and H. H. Zeineldin, "Optimal Coordination of Double-Inverse Overcurrent Relays for Stable Operation of DGs," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 183-192, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2808264.
- [18] A. A. Balyith, H. M. Sharaf, M. Shaaban, E. F. El-Saadany, and H. H. Zeineldin, "Non-Communication Based Time-Current-Voltage Dual Setting Directional Overcurrent Protection for Radial Distribution Systems With DG," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 190572-190581, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029818.
- [19] R. Tiwari, R. K. Singh, and N. K. Choudhary, "Optimal Coordination of Dual Setting Directional Over Current Relays in Microgrid With Different Standard Relay Characteristics," in *2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON)*, 28 Feb.-1 March 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9112883.
- [20] A. M. Nakhaee, E. Gadari, A. Khorsandi, and S. H. H. Sadeghi, "Simultaneous Application of Communication-Assisted Dual Setting DORs and Hybrid Cuckoo-Linear Algorithm in Optimizing FCL-Oriented Protection Schemes of Microgrids," in *2020 15th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS)*, 30-31 Dec. 2020, pp. 43-48, doi: 10.1109/IPAPS52181.2020.9375630.
- [21] K. Chheng, A. Priyadi, M. Pujiatara, and V. R. Mahindara, "The Coordination of Dual Setting DOCR for Ring System Using Adaptive Modified Firefly Algorithm," in *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 22-23 July 2020, pp. 44-50, doi: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163714.
- [22] M. N. Alam, "Overcurrent protection of AC microgrids using mixed characteristic curves of relays," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 74, pp. 74-88, 2019/03/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.01.003>.
- [23] M. Lwin, J. Guo, N. B. Dimitrov, and S. Santoso, "Stochastic Optimization for Discrete Overcurrent Relay Tripping Characteristics and Coordination," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 732-740, 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2751596.
- [24] N. El-Nailly, S. M. Saad, T. Hussein, and F. A. Mohamed, "A novel constraint and non-standard characteristics for optimal over-current relays coordination to enhance microgrid protection scheme," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 6, pp. 780-793, 2019, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5021>.
- [25] A. Yazdaninejadi, S. Golshannavaz, D. Nazarpour, S. Teimourzadeh, and F. Aminifar, "Dual-Setting Directional Overcurrent Relays for Protecting Automated Distribution Networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 730-740, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2821175.
- [26] S. T. P. Srinivas and K. S. Swarup, "Optimal relay coordination and communication based protection for microgrid," in *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, 1-5 July 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/TENCONSpring.2017.8070034.
- [27] S. A. Hosseini, H. Askarian-Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, "Evaluation of effectiveness of uncertainty in communication links on the adaptive protection schemes," *iejqip*, vol. 6, no. 1, pp. 8-19, 2017. [Online]. Available: <http://iejqip.ir/article-1-363-fa.html>.
- Distribution Networks," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 14, no. 1, pp. 19-27, 2017. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-325-fa.html>.
- [6] S. A. Jazayeri, G. Shahgholian, B. Fani, and M. Moazzami, "Hierarchical Protection Scheme Based on Multi-Agent Systems in Distributed Networks in the Presence of Distributed Generation Resources," *jiaeee*, vol. 18, no. 2, pp. 93-106, 2021, doi: 10.52547/jiaeee.18.2.93.
- [7] N. Hussain, M. Nasir, Y. Khayat, J. c. Vasquez, and J. Guerrero, "Coordinated Adaptive Directional Overcurrent Protection System for AC Microgrids," *electrical & electronic engineering*, 2021, doi: 10.20944/preprints202102.0288.v1.
- [8] S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. López-Lezama, and N. Muñoz-Galeano, "Adaptive protection coordination scheme in microgrids using directional over-current relays with non-standard characteristics," *Heliyon*, vol. 7, no. 4, p. e06665, 2021/04/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06665>.
- [9] S. A. Jazayeri, G. Shahgholian, B. Fani, and M. Moazzami, "Hierarchical Protection Scheme Based on Multi-Agent Systems in Distributed Networks in the Presence of Distributed Generation Resources," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 18, no. 2, pp. 93-106, 2021, doi: 10.52547/jiaeee.18.2.93.
- [10] H. Khalid and A. Shobole, "Existing Developments in Adaptive Smart Grid Protection: A Review," *Electric Power Systems Research*, vol. 191, p. 106901, 2021/02/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106901>.
- [11] A. Saberi, J. Sadeh, and H. Rajabi Mashhadi, "A New Index for Constraint Reduction in Relay Coordination Problem Considering Uncertainty," (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 8, no. 2, pp. 59-67, 2011. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-182-fa.html>.
- [12] H. L. and H. H. Zeineldin, "Planning the Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1642-1649, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2420711.
- [۱۳] ه. بیشه، ب. فانی، غ. شاهقلیان، "یک روش تطبیقی جدید برای حفاظت از شبکه توزیع با ضریب نفوذ بالای تولیدات پراکنده"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۴۹ (۴)، ۱۵۳۵-۱۵۴۵، زمستان ۱۳۹۸.
- [14] H. Askarian, H. Sharifian, R. Mohammadi Chabanloo, and F. Razavi, "A new method for determination of minimum break points using genetic algorithm," *jiaeee*, vol. 8, no. 2, pp. 45-58, 2011. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-181-fa.html>.
- [15] A. M. Entekhabi-Nooshabadi, H. Hashemi-Dezaki, and S. A. Taher, "Optimal microgrid's protection coordination considering N-1 contingency and optimum relay characteristics," *Applied Soft Computing*, vol. 98, p. 106741, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106741>.
- [16] H. Beder, B. Mohandes, M. S. E. Moursi, E. A. Badran, and M. M. E. Saadawi, "A New Communication-Free Dual Setting Protection Coordination of Microgrid," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 4, pp. 2446-2458, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3041753.

- [40] H. M. Sharaf, H. H. Zeineldin, and E. El-Saadany, "Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 143-151, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2546961.
- [41] A. Narimani and H. Hashemi-Dezaki, "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*, vol. 133, p. 107249, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107249>.
- [28] M. Ghotbi-Maleki, R. Mohammadi Chabanloo, H. Askarian Abyaneh, and M. Zamani, "Considering transient short-circuit currents of wind farms in overcurrent relays coordination using binary linear programming," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 131, p. 107086, 2021/10/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107086>.
- [29] M. N. Alam, S. Chakrabarti and A. K. Pradhan, "Protection of Networked Microgrids using Relays with Multiple Setting Groups," *IEEE Transactions on Industrial Informatics (Early Access)*, 2021, doi: 10.1109/TII.2021.3120151.
- [30] S. S. Fatemi and H. Samet, "Considering DGs Voltage Protection in Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays to Minimize the Energy Not Supplied," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 4037-4045, 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3001378.
- [31] E. Sorrentino and J. V. Rodríguez, "An efficient method to include the effect of radial feeders on optimal coordination of directional overcurrent protections," *Electric Power Systems Research*, vol. 191, p. 106858, 2021/02/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106858>.
- [32] N. Mohammadzadeh, R. Mohammadi Chabanloo, and M. Ghotbi Maleki, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering two-level fault current due to the operation of remote side relay," *Electric Power Systems Research*, vol. 175, p. 105921, 2019/10/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105921>.
- [33] M. H. Sadeghi, A. Dastfan, and Y. Damchi, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in distribution systems with DGs and FCLs considering voltage sag energy index," *Electric Power Systems Research*, vol. 191, p. 106884, 2021/02/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106884>.
- [34] S. S. Fatemi and H. Samet, "Considering DGs Voltage Protection in Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays to Minimize the Energy Not Supplied," *IEEE Systems Journal*, pp. 1-9, 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.3001378.
- [35] P. Naveen and P. Jena, "Adaptive Protection Scheme for Microgrid With Multiple Point of Common Couplings," *IEEE Systems Journal*, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.3039881.
- [36] A. Korashy, S. Kamel, T. Alquthami, and F. Jurado, "Optimal Coordination of Standard and Non-Standard Direction Overcurrent Relays Using an Improved Moth-Flame Optimization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87378-87392, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992566.
- [37] A. Korashy, S. Kamel, A.-R. Youssef, and F. Jurado, "Modified water cycle algorithm for optimal direction overcurrent relays coordination," *Applied Soft Computing*, vol. 74, pp. 10-25, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.10.020>.
- [38] K. Sarwagya, P. K. Nayak, and S. Ranjan, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in complex distribution networks using sine cosine algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 187, p. 106435, 2020/10/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106435>.
- [39] A. Elmitwally, M. S. Kandil, E. Gouda, and A. Amer, "Mitigation of DGs Impact on Variable-Topology Meshed Network Protection System by Optimal Fault Current Limiters Considering Overcurrent Relay Coordination," *Electric Power Systems Research*, vol. 186, p. 106417, 2020/09/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106417>.