

حفاظت ترکیبی و تطبیقی بهینه شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گیری پیکربندی‌های مختلف شبکه با انتخاب منحنی مشخصه استاندارد

بهینه رله‌های حفاظتی جریان زیاد

علی باقری^۱ حمیدرضا آقائی^۲ محمد شمس^۳ محمدمهدی عابدی^۴ حامد هاشمی دزکی^۵

۱- دانشجوی کارشناسی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران
alibaghery772@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران
hamidreza77amh@gmail.com

۳- دانشجوی کارشناسی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران
meldc59@gmail.com

۴- دانشجوی کارشناسی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران
mmabedy91@gmail.com

۵- استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران
hamed.hashemi@kashanu.ac.ir

چکیده: تغییر در پیکربندی شبکه‌های توزیع فعال یکی از چالش‌هایی است که طرح‌های حفاظتی را با مشکل مواجه می‌سازد. در صورتی که حفاظت بهینه تنها بر اساس پیکربندی پایه و اتصال تمامی منابع تولیدپراکنده با پست‌های فوق توزیع انجام شود، نقض قیود هماهنگی در پیکربندی‌هایی متفاوت با پیکربندی پایه اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این مقاله روش‌های حفاظتی ترکیبی و تطبیقی با در نظر گیری آرایش‌های مختلف شبکه پیشنهاد می‌گردد. در روش ترکیبی، یک گروه تنظیم حفاظتی برای رله‌های شبکه در نظر گرفته شده و با حل یک مسئله بهینه‌سازی واحد و در نظر گیری قیود هماهنگی تمامی آرایش‌های شبکه، تنظیمات بهینه استخراج می‌گردد. علی‌رغم مزایای روش ترکیبی، زمان عملکرد رله‌ها ناشی از کوچک شدن فضای شدنی مسئله بهینه‌سازی قابل توجه خواهد بود. از این رو، روش حفاظت تطبیقی با کمک گروه‌های تنظیمی مختلف و تفکیک مسئله بهینه‌سازی به چند مسئله و کاهش قیود هماهنگی در این مقاله ارائه می‌شود. نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی بر روی شبکه‌های ۸ شین و بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE دلالت بر برتری حفاظت تطبیقی دارد. یکی از دیگر مزایای روش پیشنهادی، بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی است که در حفاظت‌های تطبیقی پیشین کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. مقایسه نتایج بهینه‌سازی سیستم حفاظتی شبکه‌های ۸ شین و بخش توزیع ۳۰ شین IEEE دلالت بر کاهش چشم‌گیر زمان عملکرد رله‌های حفاظتی (به ترتیب برابر ۵۴/۹٪ و ۶۷/۵۵٪) در طرح حفاظت تطبیقی دارد که اهمیت مطالعات انجام شده در این مقاله را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های توزیع فعال، حفاظت ترکیبی، حفاظت تطبیقی، حفاظت بهینه، پیکربندی‌های مختلف شبکه، رله‌های جریان زیاد، انتخاب منحنی مشخصه استاندارد، الگوریتم ژنتیک، DIGSILENT
نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.223

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول: حامد هاشمی دزکی

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

۱- مقدمه

همانگی بهینه سیستم‌های حفاظتی نقش مهمی در طراحی شبکه‌های توزیع متداول داشته که با رویکرد استفاده از ریزشبکه‌ها و شبکه‌های هوشمند، اهمیت این موضوع افزایش می‌یابد [۱، ۲]. یکی از چالش‌های اساسی در حفاظت شبکه‌های توزیع، تغییر آرایش شبکه‌ها ناشی از اتصال منابع تولید پراکنده جدید یا پست‌های بالادست می‌باشد [۳، ۴]. با تغییرات در آرایش و پیکربندی شبکه‌های توزیع، اندازه و جهت جریان اتصال کوتاه دستخوش تغییر قرار می‌گیرد [۵، ۶]. تغییر در مقادیر و جهت جریان اتصال کوتاه، تنظیمات پایه را دچار مشکل کرده، هماهنگی رله‌ها برای تمام شرایط را پیچیده و یا حتی در بعضی موارد غیرممکن می‌سازد [۷، ۸].

در بسیاری از کارهای انجام‌شده در زمینه حفاظت بهینه رله‌های اضافه‌جریان مانند [۹-۱۱]، تنها آرایش و پیکربندی پایه شبکه برای استخراج تنظیمات بهینه رله‌ها مورد نظر بوده است. این فرض ساده‌کننده می‌تواند منجر به نقض قیدهای هماهنگی متعددی در حالات دیگر شبکه و پیکربندی‌هایی ناشی از تغییرات در آرایش شبکه را ایجاد نماید. از این رو در مقالاتی مانند [۱۲]، روشی برای هماهنگی رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار با در نظر گرفتن همه پیکربندی‌های مختلف شبکه ارائه شده است. در این روش یک گروه تنظیم به رله‌ها داده شده و هماهنگی حفاظتی برای رله‌های اصلی و پشتیبان با در نظرگیری تمامی آرایش‌های اصلی و ... با در نظرگیری خروج منابع تولید پراکنده یا پست‌های بالادست به دست آمده است. اگرچه با روش ارائه شده در مقالاتی مانند [۱۲، ۱۳]، نقض قیود هماهنگی حفاظتی در آرایش‌های مختلف شبکه اتفاق نمی‌افتد، اما عیب این روش افزایش زمان عملکرد رله‌ها به دلیل افزایش قیود هماهنگی حفاظتی آرایش‌های مختلف شبکه است.

یکی از روش‌هایی که در بسیاری از مقالات برای رفع مشکل هماهنگی حفاظتی شبکه‌های توزیع در حالات مختلف ارائه شده، حفاظت تطبیقی می‌باشد [۱۴]. در حفاظت تطبیقی، برای هر پیکربندی شبکه و یا گروهی از پیکربندی‌های مشابه، یک گروه تنظیم رله‌های حفاظتی فعال شده و تنظیمات مجزایی برای آن پیکربندی در نظر گرفته می‌شود. برای مثال، در [۱۵]، برای پیکربندی‌های مشابه شبکه یک گروه تنظیم در نظر گرفته شده است و ضمن کاهش تعداد گروه تنظیم‌های حفاظتی رله‌ها، حفاظت تطبیقی مناسب برای شبکه ارائه گردیده است. یکی دیگر از راهکارهای مورد استفاده برای بهبود سیستم‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع، انتخاب بهینه منحنی مشخصه رله است [۱۶، ۱۷]. با انتخاب بهینه منحنی مشخصه رله علاوه بر تنظیمات جریانی و زمانی رله‌های اضافه‌جریان می‌توان طرح‌های حفاظتی بهینه و مؤثرتری را پیشنهاد داد [۱۸].

تاکنون، حفاظت تطبیقی با کمک انتخاب بهینه منحنی مشخصه رله‌های اضافه‌جریان کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که

می‌توان با ترکیب مزایای حفاظت تطبیقی و انتخاب بهینه منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی، سرعت طرح‌های حفاظتی را ضمن رعایت تمامی قیود هماهنگی در شرایط مختلف بهبود بخشید. از این رو، در این مقاله، استفاده از قابلیت گروه‌های تنظیم مختلف رله‌های اضافه‌جریان برای حل مشکلات هماهنگی ناشی از تغییر پیکربندی شبکه با دیدگاه حفاظت تطبیقی ارائه می‌گردد. در طرح پیشنهادی هماهنگی حفاظتی تطبیقی، تنظیمات بهینه رله‌های اضافه‌جریان جهت‌دار برای حالات مختلف شبکه با در نظرگیری تنظیم جریانی و تنظیم زمانی و نوع منحنی مشخصه رله‌ها به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی، با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک اجرا خواهد شد.

هم‌چنین، حفاظت شبکه توزیع با در نظرگیری تمام پیکربندی‌های شبکه ناشی از وصل یا قطع بودن منابع تولید پراکنده یا پست‌های بالادست به کمک یک گروه تنظیم حفاظتی (حفاظت ترکیبی) با انتخاب بهینه منحنی مشخصه‌های رله‌ها با حفاظت تطبیقی مقایسه خواهد شد. تعداد نقاط کور و عدم حفاظت بخشی از خط‌های شبکه در این طرح حفاظتی ترکیبی ناشی از پیچیدگی بالای مسئله بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برخی از مهم‌ترین نوآوری‌های مطالعه انجام‌شده در این مقاله در مقایسه با کارهای تحقیقاتی موجود عبارتند از:

- بهینه‌سازی منحنی مشخصه استاندارد رله‌های حفاظتی در طرح حفاظت ترکیبی در مقایسه با روش ارائه شده در [۱۳]؛
- مقایسه طرح حفاظت تطبیقی و ترکیبی؛ و
- تعیین نقاط کور حفاظتی در طرح حفاظت ترکیبی در کنار محاسبه سرعت و زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی.

روش‌های پیشنهادی بر اساس به کارگیری حفاظت تطبیقی و هم‌چنین در نظرگیری یک گروه تنظیم حفاظتی بر روی شبکه‌های ۸ شین و ۳۰ شین IEEE پیاده‌سازی می‌گردد. برای استخراج نتایج پخش بار و اتصال کوتاه به عنوان ورودی‌های مسئله بهینه‌سازی، از نرم‌افزار DigSILENT استفاده شده است. مسئله بهینه‌سازی و حل آن با کمک الگوریتم ژنتیک نیز در MATLAB پیاده‌سازی گردیده است. نتایج به دست آمده دلالت بر مزایای روش پیشنهادی با کمک حفاظت تطبیقی و انتخاب بهینه منحنی مشخصه رله‌ها دارد. مقایسه هماهنگی حفاظتی با در نظرگیری تمامی پیکربندی‌ها و نقاط کور حفاظتی نیز لزوم پیاده‌سازی حفاظت تطبیقی را بیشتر نمایان می‌سازد.

لازم به ذکر است در مطالعات انجام‌شده این مقاله، به خروج پست‌های بالادست تمرکز شده است. در شرایطی که حالات مختلف و متعدد بهره‌برداری ناشی از توان خروجی منابع تولید پراکنده و ... مورد نظر باشد، با توجه به محدودیت‌های موجود در مورد گروه تنظیم‌های رله‌های حفاظتی واقعی، لازم است از راهکارهایی مانند خوشه‌بندی استفاده نمود. در شرایطی که تعداد حالات بهره‌برداری بیشتر از تعداد گروه‌های تنظیم رله‌های حفاظتی باشد، خوشه‌بندی شرایط شبکه

$$\text{Min} \left\{ \sum_{s=1}^p T_s \right\} = \text{Min} \left\{ \sum_{s=1}^p T_s (CS, TDS, I_b) \right\} \quad (1)$$

$$= \text{Min} \left\{ \sum_{s=1}^p \left(\sum_{i=1}^m t_{s,i} + \sum_{j=1}^n t_{s,j} \right) \right\} \quad (2)$$

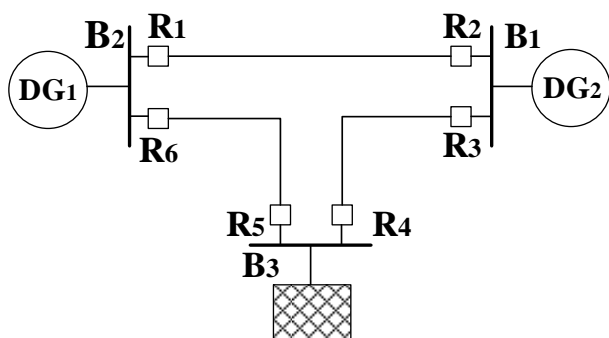
$$t_{s,j} - t_{s,i} \geq CTI \quad (2)$$

مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی باید با در نظر گیری قیود هماهنگی حفاظتی و فاصله زمانی کافی بین زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در پیکربندی‌های مختلف حل گردد [۲۳]. در نظر گیری تمامی پیکربندی‌ها از مزایای این روش هماهنگی حفاظتی شبکه‌های توزیع فعال خواهد بود. هم‌چنین بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های شبکه توزیع علاوه بر بهینه‌سازی تنظیمات زمانی و جریانی آن‌ها برای حصول نتایج بهتر یکی از دیگر مزایای روش پیشنهادی اول است.

در تابع هدف روش پیشنهادی اول مطابق (۱)، s بیانگر پیکربندی‌های مختلف سیستم و p تعداد تمامی پیکربندی‌ها خواهد بود. هم‌چنین، i نشان‌دهنده شماره رله اصلی در پیکربندی مربوطه، m بیانگر تعداد رله‌های اصلی، j بیانگر شماره رله پشتیبان در پیکربندی مربوطه و n متغیر مربوط به تعداد رله‌های پشتیبان است.

برای مثال، در شبکه ۳ شین شکل (۱)، s از ۱ تا ۴ برای دربرگرفتن تمام حالات شبکه تغییر می‌کند. اگرچه در این روش نقض قیود هماهنگی حفاظتی در آرایش‌های مختلف شبکه اتفاق نمی‌افتد، اما عیب آن افزایش زمان عملکرد رله‌ها به دلیل افزایش قیود هماهنگی حفاظتی آرایش‌های مختلف شبکه و افزایش تعداد نقاط کور حفاظتی می‌باشد. نقاط کور حفاظتی حالتی است که رله پشتیبان، خطای جلوی رله اصلی را در برخی از حالات نخواهد دید. دلیل این عدم حفاظت می‌تواند تغییر در جریان اتصال کوتاه در حالات غیر پایه و کاهش شدید آن و حتی در مقایسه با جریان بار در سایر پیکربندی‌ها باشد. هم‌چنین گاهی حذف یک یا چند حفاظت در پیکربندی‌های غیراصلی برای رسیدن به فضای شدنی و حل مسئله بهینه‌سازی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

بر اساس توضیحات ارائه‌شده برای روش پیشنهادی اول، روش دیگر برای حفاظت از شبکه توزیع مبتنی بر حفاظت تطبیقی ارائه می‌گردد. در حفاظت تطبیقی بهینه، برای هر پیکربندی شبکه یا چند پیکربندی تقریباً مشابه، یک گروه تنظیم برای رله‌های حفاظتی فعال شده و تنظیمات مجزایی برای آن پیکربندی در نظر گرفته می‌شود.



ضروری است. ضمناً این موضوع به‌عنوان یکی از کارهای آتی گروه تحقیقاتی و نویسندگان این مقاله مورد نظر می‌باشد.

۲- روش پیشنهادی

یکی از چالش‌های اساسی در حفاظت شبکه‌های توزیع، تغییر آرایش شبکه‌ها ناشی از خروج منابع تولید پراکنده (DG) یا پست‌های بالادست می‌باشد. با تغییرات در آرایش و پیکربندی شبکه‌های توزیع، اندازه و جهت جریان اتصال کوتاه دستخوش تغییر قرار می‌گیرد. تغییر در اندازه و جهت جریان اتصال کوتاه باعث عدم برقراری هماهنگی حفاظتی رله‌ها در سایر پیکربندی‌های شبکه می‌شود. در حقیقت استخراج تنظیمات بهینه رله‌ها بر اساس پیکربندی پایه منجر به نقض قیودهای هماهنگی متعددی در حالات و پیکربندی‌های دیگر شبکه می‌شود.

برای مثال، شبکه ۳ شین نشان داده شده در شکل (۱)، در صورتی که شبکه مانند شکل (۱_الف) در حال بهره‌برداری باشد، اتصال شبکه با منابع تولید پراکنده و پست بالادست برقرار بوده و شبکه در حالت پایه قرار دارد. با این حال امکان تغییر آرایش این شبکه ناشی از خارج شدن منابع تولید پراکنده و پست بالادست وجود دارد. در شکل (۱_ب) با خارج شدن منبع تولید پراکنده اول، در شکل (۱_ج) با خارج شدن منبع تولید پراکنده دوم و شکل (۱_د) با قطع ارتباط با شبکه بالادست تغییرات در آرایش شبکه به وجود می‌آید.

اگر هماهنگی حفاظتی تنها برای حالت پایه (شکل (۱_الف)) در نظر گرفته شود، در سایر پیکربندی‌ها با توجه به در نظر نگرفتن قیود هماهنگی مربوطه، امکان تداخل حفاظتی وجود دارد. در این مقاله راهکاری برای هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان مبتنی بر در نظر گیری همه پیکربندی‌های ممکن شبکه و حصول یک گروه تنظیم برای رله‌ها با دیدگاه رعایت قیود هماهنگی تمامی پیکربندی‌های شبکه ارائه می‌شود؛ با اعمال گروه تنظیم به‌دست آمده به رله‌ها هماهنگی حفاظتی برای شبکه پایه و هم‌چنین برای پیکربندی‌های دیگر شبکه برقرار می‌گردد.

توابع هدف مختلفی برای حفاظت بهینه از شبکه‌های توزیع فعال آمده است که یکی از رایج‌ترین توابع هدف، مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان با در نظر گیری قیود هماهنگی و به حداقل رساندن مقدار زمان عملکرد رله‌ها می‌باشد [۱۹، ۲۰]. تابع هدف روش پیشنهادی اول با در نظر گیری تمام پیکربندی‌های محتمل (حفاظت ترکیبی) به صورت رابطه (۱) خواهد بود.

در هر طرح حفاظتی باید یک فاصله زمانی کوتاه بین زمان عملکرد رله اصلی و رله پشتیبان حفظ شود که به عنوان فاصله زمانی هماهنگی (CTI) شناخته می‌شود [۲۱، ۲۲]. در (۲)، $t_{s,j}$ زمان عملکرد رله-پشتیبان، $t_{s,i}$ زمان رله اصلی و CTI فاصله هماهنگی حفاظتی است که مقدار آن بین ۰/۲ تا ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود.

رله می‌باشد. هم‌چنین، i بیانگر شماره رله اصلی در پیکربندی مربوطه، m و n بیانگر تعداد رله‌های اصلی، شماره رله پشتیبان در پیکربندی مربوطه و تعداد رله‌های پشتیبان است. ضمناً CS ، TDS و I_b متغیرهای بهینه‌سازی تابع هدف می‌باشند که به اندازه تعداد گروه‌های تنظیم حفاظتی تکرار خواهند شد.

برای پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی اول و دوم، از نظر ریاضی می‌توان زمان عملکرد رله‌ها را با توجه به شرایط وقوع خطا و مشخصات رله به صورت (۴) بیان کرد [۲۵، ۲۴].

$$t = \frac{A}{\left(\frac{I_f}{I_b}\right)^B - 1} TDS \quad (4)$$

در (۴)، I_f مقدار جریان خطای دیده‌شده، I_b تنظیم جریانی و TDS نشان‌دهنده‌ی تنظیم زمانی است. A و B نیز پارامترهای مشخص‌کننده نوع منحنی عملکردی رله می‌باشند. علاوه بر قیود هماهنگی حفاظتی، تنظیم زمانی و جریانی هر رله دارای محدودیت‌هایی بصورت (۵) و (۶) نیز می‌باشد [۲۸-۲۶].

$$TDS_{\min} \leq TDS_i \leq TDS_{\max} \quad (5)$$

$$I_{\min} \leq I_{b,i} \leq I_{\max} \quad (6)$$

پارامترهای استفاده‌شده در روابط (۵) و (۶) عبارتند از:

TDS_{\min}, TDS_{\max} : حداکثر و حداقل تنظیم زمانی رله‌ها

TDS_i : مقدار تنظیم زمانی i امین رله

I_{\min}, I_{\max} : مقدار حداکثر و حداقل تنظیم جریانی رله‌ها

$I_{b,i}$: مقدار تنظیم جریانی i امین رله

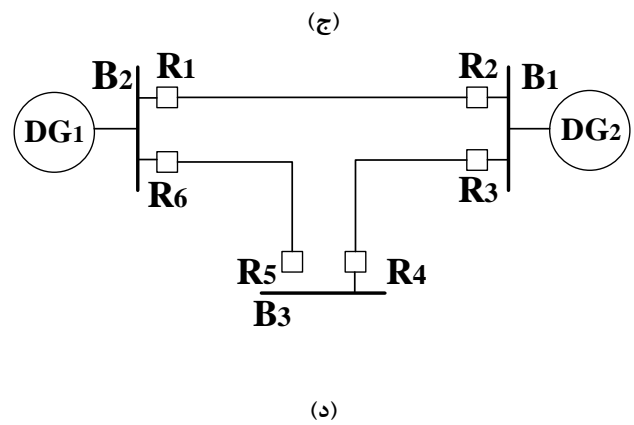
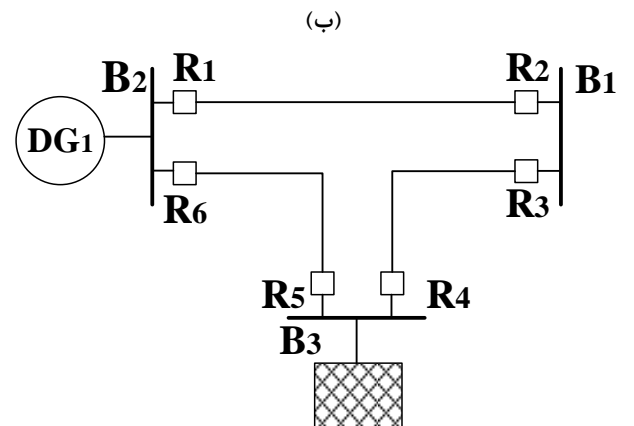
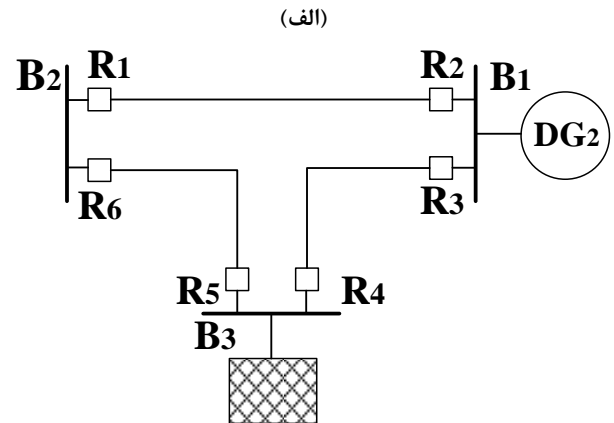
هر رله می‌تواند دارای یکی از منحنی‌های مشخصه معکوس استاندارد کاهشی معمولی (NI)، خیلی کاهشی (VI) یا فوق‌العاده کاهشی (EI) باشد؛ A و B پارامترهای ثابتی هستند که مقادیر آن با توجه به نوع منحنی مشخصه رله به صورت جدول (۱) لحاظ می‌گردد [۵]. ستون اول این جدول بیانگر متغیر بهینه‌سازی نوع منحنی (CS) است که با توجه متغیرهای مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی برابر با ۱، ۲ یا ۳ است که به ترتیب بیانگر منحنی NI، VI و EI خواهد بود.

مسائل بهینه‌سازی پیشنهادی برای هماهنگی حفاظتی بهینه شبکه‌های توزیع با در نظرگیری تمامی پیکربندی‌های شبکه و دستیابی به نقض قیود حداقلی و سریع‌ترین زمان ممکن با کمک الگوریتم ژنتیک حل خواهند شد.

جدول (۱): نوع منحنی مشخصه استاندارد رله‌های اضافه‌جریان [۵]

CS	نوع منحنی	A	B
۱	کاهشی معمولی (NI)	۰/۱۴	۰/۰۲
۲	بسیار کاهشی (VI)	۱۳/۵	۱
۳	شدیدا کاهشی (EI)	۸۰	۲

روندنمای پیاده‌سازی روش پیشنهادی و حل آن با کمک الگوریتم ژنتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۲)



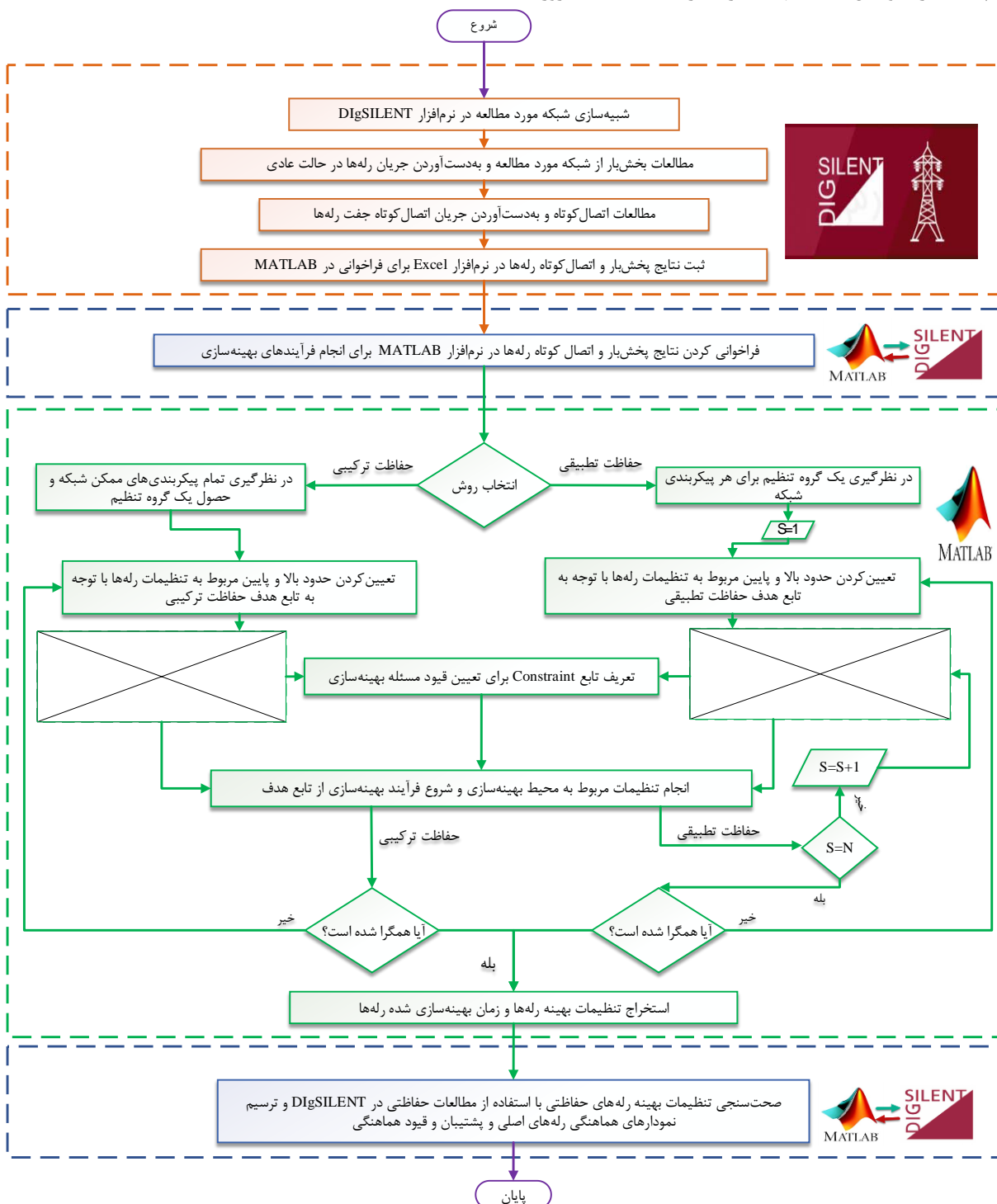
شکل (۱): شبکه ۳ شین با پیکربندی‌های مختلف

در روش پیشنهادی دوم مبتنی بر حفاظت تطبیقی بهینه مطابق (۳) [۱۵]، یک گروه تنظیم زمانی و جریانی و انتخاب مشخصه بهینه رله وجود ندارد و به اندازه تعداد گروه‌های تنظیم که ترجیحاً برابر تعداد پیکربندی‌های شبکه یا گروه پیکربندی‌های شبکه است خواهد بود.

$$\begin{aligned} \text{Min} \left\{ \sum_{s=1}^p T_s \right\} &= \text{Min} \left\{ \sum_{s=1}^p T_s (CS_s, TDS_s, I_{b_s}) \right\} \\ &= \text{Min} \left\{ \sum_{s=1}^p \left(\sum_{i=1}^m t_{s,i} + \sum_{j=1}^n t_{s,j} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

در تابع هدف نشان داده شده در (۳) برای حفاظت تطبیقی شبکه‌های توزیع فعال، s بیانگر پیکربندی‌های مختلف سیستم و گروه‌های تنظیم

قابل مشاهده است، ارتباط نرم‌افزار DigSILENT و MATLAB برای انجام مطالعات اتصال کوتاه و پخش بار در نرم‌افزار تخصصی سیستم‌های قدرت و حل مسئله بهینه‌سازی در MATLAB ضروری است. در پایان نیز، صحت‌سنجی نتایج بهینه‌سازی به‌دست آمده در DigSILENT دنبال خواهد شد.



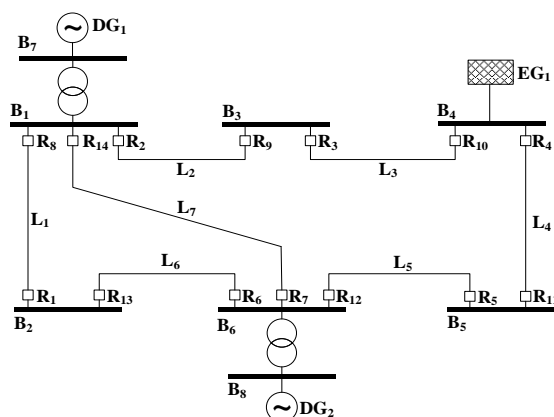
شکل (۲): روندنمای روش‌های پیشنهادی با استفاده از MATLAB و DigSILENT

۳- نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی

برای پیاده‌سازی دو روش پیشنهادی شبکه ۸ شین IEEE [۲۹] مطابق شکل (۳) و بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE [۳] مطابق

شکل (۴) انتخاب شده است. همان‌گونه که در مدل‌سازی روش پیشنهادی بیان شد، در دو روش حفاظت تطبیقی و حفاظت ترکیبی،

داده شده است. مقدار بهینه تابع هدف در این مسئله بهینه‌سازی ۵۶/۷۷۴ ثانیه می‌باشد. نمودار همگرایی نشان داده شده دلالت بر دستیابی به نتایج بهینه و اطمینان از بهینگی نتایج دارد.



شکل (۳): نمایش تک‌خطی شبکه ۸ شین IEEE [۲۹]

آرایش‌های مختلف شبکه در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته خواهند شد.

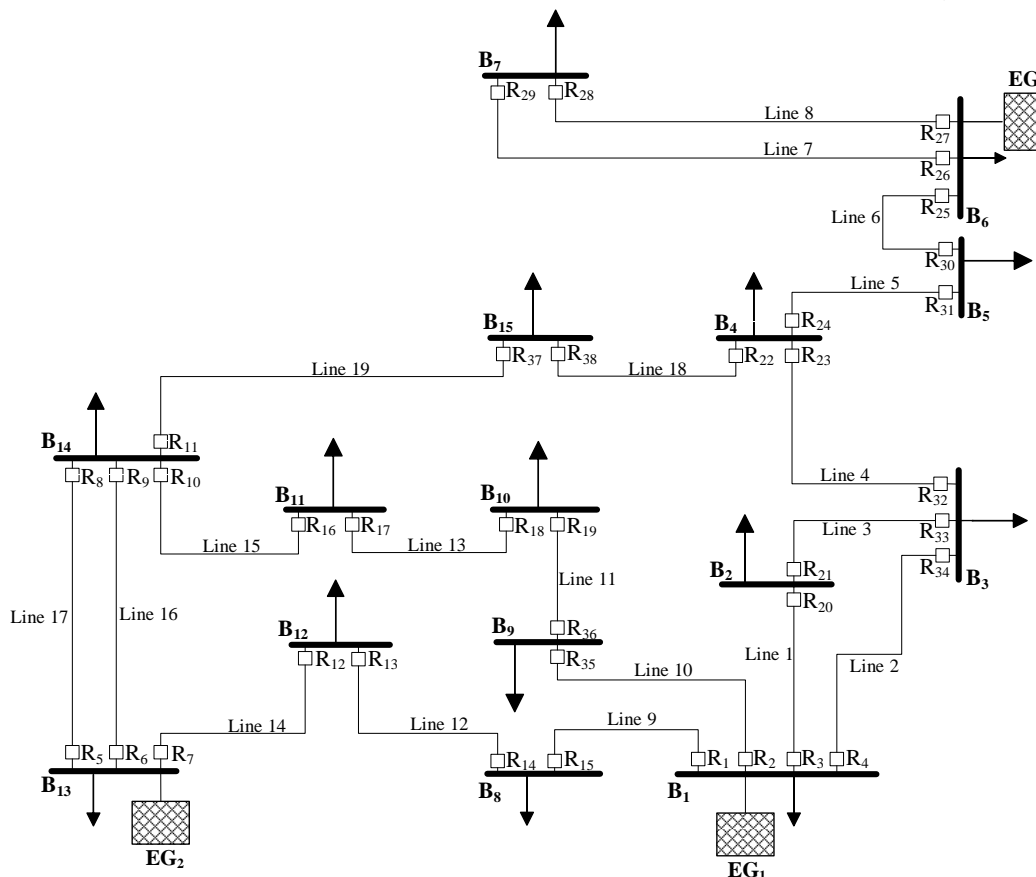
۳-۱- نتایج پیاده‌سازی روش ترکیبی بر روی شبکه ۸

شین IEEE

در این روش هماهنگی رله‌های اضافه‌جریان با در نظرگیری تمام پیکربندی‌های ممکن شبکه در حالت پایه، قطع پست بالادست و جزیره‌ای و هم‌چنین قطع اتصال منابع تولیدپراکنده، با یک گروه تنظیم به صورت ترکیبی انجام شده است. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است.

نتایج بهینه‌سازی پیشنهادی براساس روش ترکیبی برای شبکه ۸ شین IEEE در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول، تنظیمات زمانی، جریانی و منحنی مشخصه بهینه رله‌های شبکه نشان داده شده است. این تنظیمات برای رله‌ها اعمال شده و قابل تغییر بر اساس پیکربندی شبکه نخواهند بود.

نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی ترکیبی برای شبکه ۸ شین IEEE با در نظر گرفتن تمام پیکربندی‌های شبکه در شکل (۵) نشان



شکل (۴): نمایش تک‌خطی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE [۳]

هم‌چنین، بر اساس تنظیمات بهینه به دست آمده از روش پیشنهادی در حالت ترکیبی، زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان شبکه ۸ شین در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است. نتایج حالات قطع منابع

در حالت ترکیبی، بر اساس تنظیمات بهینه به دست آمده از روش پیشنهادی در حالت ترکیبی، زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان شبکه ۸ شین

تولیدپراکنده نیز مانند این دو حالت بر اساس تنظیمات بهینه استخراج شده و نتایج اتصال کوتاه قابل محاسبه و ارائه می‌باشد.

جدول (۲): نتایج تنظیمات بهینه رله‌های شبکه ۸ شین IEEE در

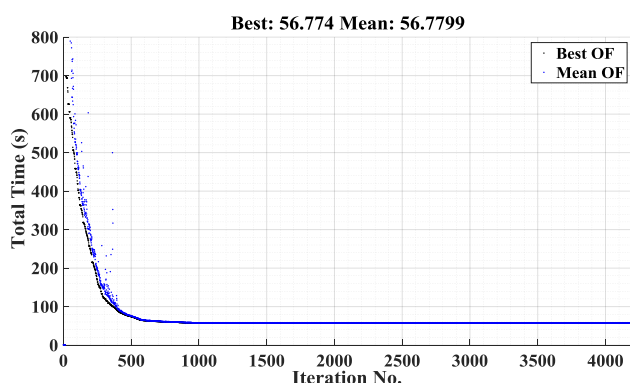
حفاظت ترکیبی			
رله	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی بهینه
۱	۰/۲۴۸	۱۱۱/۶۸۴	۲
۲	۰/۶۸۹	۴۰۴/۲۶۶	۳
۳	۰/۸۵۲	۱۶۹/۱۰۰	۳
۴	۰/۹۲۰	۱۰۰/۵۶۷	۲
۵	۰/۱۸۸	۷۸/۳۵۶	۱
۶	۰/۴۰۴	۲۷۱/۱۸۱	۳
۷	۰/۶۳۵	۱۴۷/۲۹۶	۳
۸	۰/۱۳۴	۳۶۳/۸۷۸	۳
۹	۰/۲۵۱	۳۹/۶۶۶	۱
۱۰	۰/۳۸۳	۲۱۳/۱۱۸	۲
۱۱	۰/۷۴۳	۲۲۳/۰۲۷	۳
۱۲	۰/۶۲۹	۳۰۲/۸۷۴	۳
۱۳	۰/۲۸۹	۱۰۷/۲۲۶	۳
۱۴	۰/۱۹۰	۲۶۲/۲۹۳	۲

جدول (۴): زمان عملکرد رله‌های شبکه ۸ شین IEEE در حالت جزیره‌ای بر اساس تنظیمات بهینه حفاظت ترکیبی

رله اصلی	زمان عملکرد (ثانیه)	رله پشتیبان	زمان عملکرد (ثانیه)	قید هماهنگی (ثانیه)
۱	۰/۲۷۲۷۴۶	۶	۱/۱۲۰۳۶۵	۰/۸۴۷۶۱۸
۲	۰/۵۴۵۶	۱	۱/۱۵۵۱۴۱	۰/۶۰۹۵۴۱
۲	۰/۵۴۵۶	۷	۱/۶۶۷۷۸۲	۱/۱۲۲۱۸۲
۳	۰/۴۲۹۱۱۷	۲	۰/۸۶۸۷۱۸	۰/۴۳۹۶۰۱
۴	۱/۱۷۷۴۵۳	۳	۱/۴۷۷۴۵۳	۰/۳
۵	۰/۶۰۱۴۰۵	۴	۲/۱۲۵۵۳۵	۱/۵۲۴۱۳
۶	۰/۴۰۵۹۲۲	۱۴	۱/۳۱۸۲۹۸	۰/۸۱۳۳۷۶
۶	۰/۴۰۵۹۲۲	۵	۱/۶۰۲۸۴۴	۱/۱۹۶۹۲۲
۷	۰/۲۶۵۳۳۳	۵	۱/۶۲۵۶۹۷	۱/۳۶۰۳۶۴
۷	۰/۲۶۵۳۳۳	۱۳	۱/۵۶۹۸۱۵	۱/۳۰۴۴۸۲
۸	۰/۲۴۵۵۹۸	۷	۱/۶۸۸۸۳۶	۱/۴۴۳۳۳۷
۸	۰/۲۴۵۵۹۸	۹	۱/۱۴۷۴۱۴	۰/۹۰۱۸۱۵
۹	۰/۵۸۷۸۷۹	۱۰	۲/۱۶۹۷۹۲	۱/۵۸۱۹۱۳
۱۰	۰/۷۴۱۶۴۶	۱۱	۱/۰۴۱۶۴۶	۰/۳
۱۱	۰/۶۱۸۰۱۳	۱۲	۰/۹۷۳۳۹۹	۰/۳۵۵۳۸۶
۱۲	۰/۶۴۴۷۶۷	۱۳	۱/۵۱۶۰۴	۰/۸۷۱۲۷۳
۱۲	۰/۶۴۴۷۶۷	۱۴	۱/۲۰۷۳۷۵	۰/۵۶۲۶۰۸
۱۳	۰/۱۴۱۲۸۸	۸	۰/۸۰۵۶۵۷	۰/۶۶۴۳۶۹
۱۴	۰/۳۷۹۴۲۱	۱	۱/۱۸۰۷۰۴	۰/۸۰۱۲۸۳
۱۴	۰/۳۷۹۴۲۱	۹	۱/۱۵۶۱۶۴	۰/۷۷۶۷۴۳

جدول (۳): زمان عملکرد رله‌های شبکه ۸ شین IEEE در حالت پایه

بر اساس تنظیمات بهینه حفاظت ترکیبی				
رله اصلی	زمان عملکرد (ثانیه)	رله پشتیبان	زمان عملکرد (ثانیه)	قید هماهنگی (ثانیه)
۱	۰/۱۷۴	۶	۰/۴۷۴	۰/۳۰۰
۲	۰/۳۴۰	۱	۰/۶۴۰	۰/۳۰۰
۲	۰/۳۴۰	۷	۰/۶۴۰	۰/۳۰۰
۳	۰/۲۹۵	۲	۰/۵۹۵	۰/۳۰۰
۴	۰/۴۹۶	۳	۱/۵۷۹	۱/۰۸۲
۵	۰/۴۰۱	۴	۰/۷۰۱	۰/۳۰۰
۶	۰/۱۷۷	۱۴	۰/۴۷۷	۰/۳۰۰
۶	۰/۱۷۷	۵	۰/۷۸۳	۰/۶۰۶
۷	۰/۱۱۲	۵	۰/۴۷۷	۰/۳۶۵
۷	۰/۱۱۲	۱۳	۰/۸۰۶	۰/۶۹۳
۸	۰/۱۱۲	۷	۰/۶۴۷	۰/۵۳۵
۸	۰/۱۱۲	۹	۰/۵۵۱	۰/۴۳۸
۹	۰/۴۵۱	۱۰	۰/۷۵۱	۰/۳۰۰
۱۰	۰/۳۷۷	۱۱	۱/۱۱۵	۰/۷۳۸
۱۱	۰/۵۲۴	۱۲	۰/۸۲۴	۰/۳۰۰
۱۲	۰/۴۷۸	۱۳	۰/۷۷۸	۰/۳۰۰
۱۲	۰/۴۷۸	۱۴	۰/۷۷۸	۰/۳۰۰
۱۳	۰/۰۶۷	۸	۰/۳۶۷	۰/۳۰۰
۱۴	۰/۲۵۱	۱	۰/۶۵۱	۰/۴۰۰
۱۴	۰/۲۵۱	۹	۰/۵۵۱	۰/۳۰۰

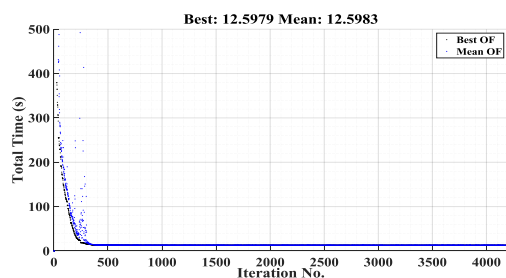


شکل (۵): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی حفاظت ترکیبی شبکه ۸ شین IEEE با کمک الگوریتم ژنتیک

ضمناً برای صحت‌سنجی نتایج بهینه‌سازی به‌دست‌آمده و اطمینان از رعایت قیود هماهنگی، هماهنگی حفاظتی در DigSILENT بر اساس نتایج و تنظیمات به‌دست‌آمده دنبال گردید. در شکل (۶)، برای نمونه، هماهنگی جفت رله‌های ۱ و ۶ در پیکربندی پایه شبکه نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۶) قابل مشاهده است، قید هماهنگی حفاظتی و فاصله زمانی هماهنگی رعایت شده است. در پیکربندی پایه، ۰/۳ ثانیه فاصله زمانی عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان مذکور می‌باشد.

هم‌چنین در شکل (۷)، هماهنگی حفاظتی رله‌های ۱ و ۶ در حالت جزیره‌ای (قطع پست بالادست) بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات

شکل (۸): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی حفاظت تطبیقی شبکه ۸ شین IEEE در حالت پایه با کمک الگوریتم ژنتیک



شکل (۹): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی حفاظت تطبیقی شبکه ۸ شین IEEE در حالت جزیره‌ای با کمک الگوریتم ژنتیک

زمان مجموع عملکرد رله‌های شبکه ۸ شین IEEE بر اساس توابع هدف ارائه شده در حالت پایه و جزیره‌ای به ترتیب برابر ۱۳/۰۰۲۶ ثانیه و ۱۲/۵۹۷۹ ثانیه می‌باشد. کاهش زمان عملکرد سیستم حفاظتی در روش تطبیقی نسبت به روش ترکیبی نیز بر اساس نتایج به دست آمده برجسته است. کاهش قیود مسئله بهینه‌سازی در هر مسئله بهینه‌سازی بر اساس پیکربندی موردنظر دستیابی به طرح حفاظتی سریع‌تر را ممکن ساخته است. همچنین از آنجایی که رله‌ها گروه‌های تنظیم مختلفی می‌گیرند، این روش عملیاتی نیز بوده و فاقد پیچیدگی‌های غیرکاربردی خواهد بود.

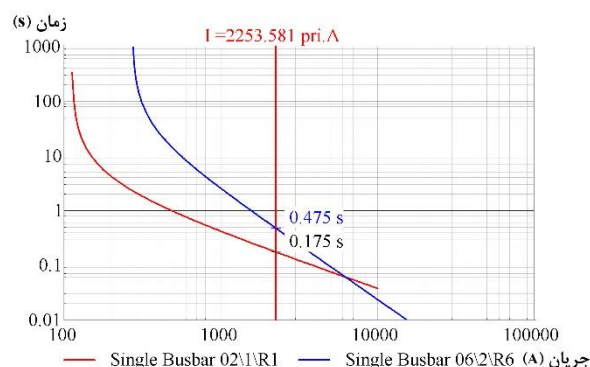
در جدول (۵) نیز تنظیمات بهینه رله‌های شبکه ۸ شین IEEE بر اساس روش پیشنهادی حفاظت تطبیقی و پیکربندی پایه آورده شده است. در حفاظت تطبیقی، تمامی رله‌ها از نوع EI انتخاب شده است. یکی از دلایل این موضوع، عدم تغییر عمده در جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها در حالت جزیره‌ای و پایه است، زیرا این گروه تنظیم تنها برای حالت پایه در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): نتایج تنظیمات بهینه رله‌های شبکه ۸ شین IEEE با

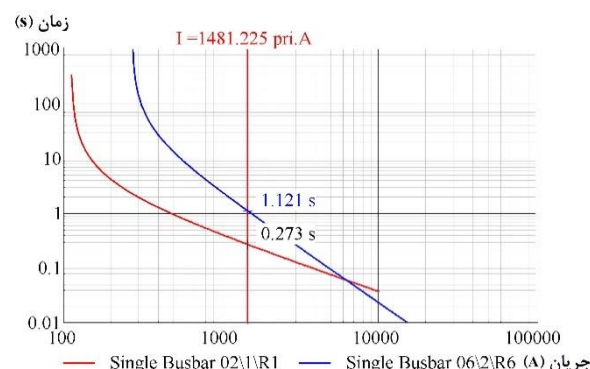
آرایش پایه در حفاظت تطبیقی

رله	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی
۱	۰/۲۸۳	۱۰۵/۵۳۴	۳
۲	۰/۲۳۲	۳۷۸/۹۸۱	۳
۳	۰/۵۷۶	۱۲۵/۹۵۴	۳
۴	۲/۲۵۱	۱۰۴/۲۸۶	۳
۵	۰/۰۹۶	۳۱۰/۲۰۱	۲
۶	۰/۰۴۷	۸۰۰/۰۱۲	۲
۷	۱/۱۵۴	۱۰۰/۰۸۶	۳
۸	۰/۱۰۸	۳۹۴/۴۷۸	۳
۹	۰/۳۱۹	۱۰۹/۲۴۸	۳
۱۰	۰/۵۵۰	۱۶۱/۱۱۴	۳
۱۱	۰/۱۶۹	۲۸۴/۰۸۹	۳
۱۲	۰/۲۵۱	۳۶۹/۵۸۴	۳
۱۳	۰/۱۷۹	۱۱۷/۷۹۶	۳
۱۴	۰/۲۲۷	۱۹۹/۲۱۹	۳

حفاظتی DIGSILENT نشان داده شده است. در شکل (۷)، فاصله زمانی بین رله‌های اصلی و پشتیبان برابر ۰/۸۴۸ ثانیه می‌باشد. دلیل اصلی افزایش فاصله هماهنگی رله‌های اصلی و پشتیبان در حالت جزیره‌ای ناشی از کاهش جریان اتصال کوتاه می‌باشد.



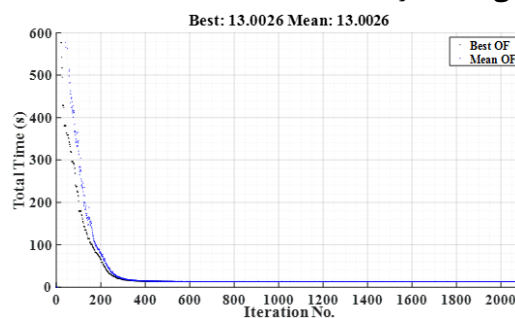
شکل (۶): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۱ و پشتیبان ۶ از شبکه ۸ شین در پیکربندی پایه و تنظیمات حفاظتی ترکیبی بهینه

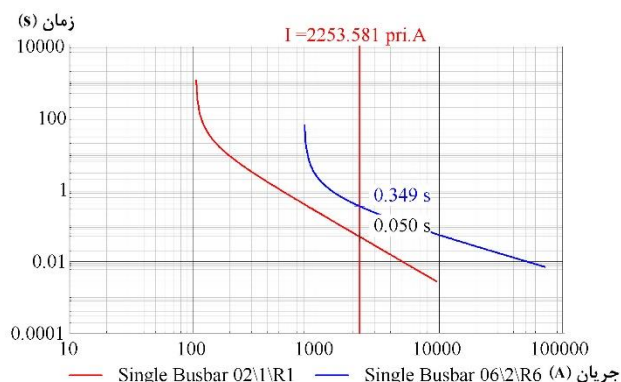


شکل (۷): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۱ و پشتیبان ۶ از شبکه ۸ شین در پیکربندی جزیره‌ای و تنظیمات حفاظتی ترکیبی بهینه

۳-۲- نتایج پیاده‌سازی روش حفاظت تطبیقی بر روی شبکه ۸ شین IEEE

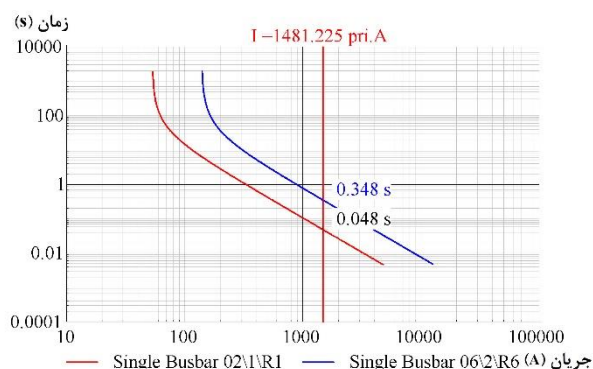
در روش حفاظت تطبیقی پیشنهادی، برای هر حالت شبکه و آرایش مربوطه، یک گروه تنظیم حفاظتی در نظر گرفته شده است. در شکل (۸) و (۹) به ترتیب نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی برای آرایش پایه و آرایش جزیره‌ای نشان داده شده است. نمودارهای نشان داده شده دلالت بر همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی و رسیدن به نتایج بهینه کلی مسئله دارد.





شکل (۱۰): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۱ و پشتیبان ۶ از شبکه ۸

شین در پیکربندی پایه و تنظیمات حفاظتی تطبیقی بهینه



شکل (۱۱): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۱ و پشتیبان ۶ از شبکه ۸

شین در پیکربندی جزیره‌ای و تنظیمات حفاظتی تطبیقی بهینه

جدول (۷): زمان عملکرد رله‌های شبکه ۸ شین IEEE در حالت پایه

بر اساس تنظیمات بهینه حفاظت تطبیقی

رله اصلی	زمان عملکرد (ثانیه)	رله پشتیبان	زمان عملکرد (ثانیه)	قید هماهنگی (ثانیه)
۱	۰/۰۵۰	۶	۰/۳۵۰	۰/۳۰۰
۲	۰/۲۳۴	۱	۰/۵۳۴	۰/۳۰۰
۲	۰/۲۳۴	۷	۰/۵۳۴	۰/۳۰۰
۳	۰/۱۱۰	۲	۰/۴۱۰	۰/۳۰۰
۴	۰/۲۸۶	۳	۰/۵۸۶	۰/۳۰۰
۵	۰/۲۵۵	۴	۰/۵۵۵	۰/۳۰۰
۶	۰/۱۷۷	۱۴	۰/۴۷۷	۰/۳۰۰
۶	۰/۱۷۷	۵	۰/۵۹۲	۰/۴۱۵
۷	۰/۰۹۴	۵	۰/۴۷۹	۰/۳۸۴
۷	۰/۰۹۴	۱۳	۰/۶۰۷	۰/۵۱۳
۸	۰/۱۰۷	۷	۰/۵۳۹	۰/۴۳۳
۸	۰/۱۰۷	۹	۰/۴۰۷	۰/۳۰۰
۹	۰/۱۰۸	۱۰	۰/۴۰۸	۰/۳۰۰
۱۰	۰/۱۱۶	۱۱	۰/۴۱۶	۰/۳۰۰
۱۱	۰/۱۹۴	۱۲	۰/۴۹۴	۰/۳۰۰
۱۲	۰/۲۸۶	۱۳	۰/۵۸۶	۰/۳۰۰
۱۲	۰/۲۸۶	۱۴	۰/۵۸۶	۰/۳۰۰
۱۳	۰/۰۵۰	۸	۰/۳۵۰	۰/۳۰۰
۱۴	۰/۰۸۴	۱	۰/۵۵۰	۰/۴۶۶
۱۴	۰/۰۸۴	۹	۰/۴۱۰	۰/۳۲۶

در جدول (۶) نیز تنظیمات بهینه رله‌های شبکه ۸ شین IEEE بر اساس روش پیشنهادی حفاظت تطبیقی و پیکربندی جزیره‌ای آورده شده است. در حفاظت تطبیقی برای حالات جزیره‌ای نیز، تمامی رله‌ها از نوع EI انتخاب شده است. یکی از دلایل این موضوع، عدم تغییر عمده در جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها در حالات جزیره‌ای و پایه است، زیرا این گروه تنظیم تنها برای حالت جزیره‌ای در نظر گرفته شده است.

جدول (۶): نتایج تنظیمات بهینه رله‌های شبکه ۸ شین IEEE با

آرایش جزیره‌ای و خروج پست بالادست در حفاظت تطبیقی

رله	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی
۱	۰/۴۶۹	۵۳/۰۶۲	۳
۲	۰/۱۷۲	۳۷۱/۲۵۵	۳
۳	۰/۵۱۴	۱۱۸/۳۷۸	۳
۴	۱/۰۹۶	۴۵/۰۸۲	۳
۵	۰/۰۵۱	۶۷/۵۱۳	۲
۶	۰/۴۸۹	۱۳۹/۰۸۱	۳
۷	۰/۲۳۳	۱۴۱/۷۵۰	۳
۸	۰/۲۷۷	۱۷۴/۱۷۱	۳
۹	۰/۱۱۲	۳۸/۴۰۰	۳
۱۰	۰/۲۳۵	۹۴/۱۴۷	۳
۱۱	۰/۵۸۹	۱۴۷/۴۶۷	۳
۱۲	۰/۶۶۰	۲۱۵/۶۲۴	۳
۱۳	۰/۳۱۳	۶۸/۲۹۰	۳
۱۴	۰/۳۵۴	۱۲۲/۰۵۶	۳

در جدول‌های (۷) و (۸) به ترتیب نتایج زمان عملکرد رله‌های شبکه ۸ شین بر اساس تنظیمات حفاظت تطبیقی بهینه پیشنهادی نشان داده شده است. در این جداول، رعایت قیود هماهنگی در حالات مختلف شبکه بررسی شده است. نتایج دلالت بر عدم وجود نقض قید حفاظتی و هماهنگی دارد.

مشابه صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده برای حفاظت ترکیبی، قیود هماهنگی در این روش نیز با کمک DigSILENT و مطالعات حفاظتی مربوطه بررسی گردید. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، نمودار هماهنگی حفاظتی رله‌های ۱ و ۶ در پیکربندی پایه و جزیره‌ای نشان داده شده است.

نتایج نشان داده شده دلالت بر رعایت قیود هماهنگی بر اساس تنظیمات بهینه به‌دست‌آمده دارد. همچنین کاهش زمان عملکرد رله‌های ۱ و ۶ در روش حفاظت تطبیقی نسبت به روش حفاظت ترکیبی قابل مشاهده می‌باشد. می‌توان استنتاج نمود که روش تطبیقی بر اساس استفاده از گروه‌های تنظیم رله‌های حفاظتی قابلیت بهتری در حفاظت سریع و رعایت قیود هماهنگی در پیکربندی‌های مختلف نشان می‌دهد. بهینه‌سازی مشخصه عملکرد رله‌ها نیز بر مزایای روش تطبیقی افزوده است.

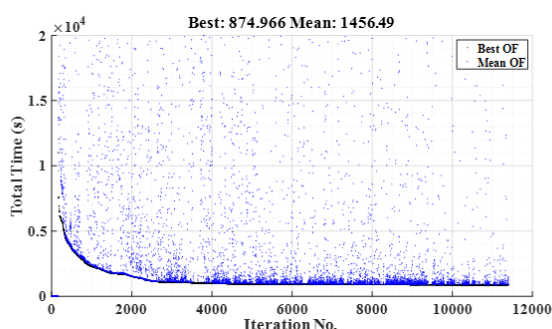
روش ترکیبی برای شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای قابل دستیابی است. همچنین ۳۱/۱۷۳۵ ثانیه (معادل ۵۴/۹۰۸٪) کاهش زمان عملکرد طرح حفاظتی برای تمام آرایش‌های شبکه و شرایط بهره‌برداری با پیاده‌سازی طرح حفاظت تطبیقی به جای حفاظت ترکیبی میسر است. نتایج مقایسه‌ای دلالت بر کارایی بسیار بالای طرح حفاظت تطبیقی نسبت به حفاظت ترکیبی دارد. از دیگر مزایای روش حفاظت تطبیقی می‌توان به عدم نقض قیود هماهنگی در کنار زمان و سرعت مطلوب آن اشاره کرد.

۳-۳- نتایج پیاده‌سازی روش حفاظت ترکیبی بر روی

بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE

روش حفاظت ترکیبی بر روی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نیز پیاده‌سازی گردید. در شکل (۱۲)، نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی ترکیبی با کمک الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. مقدار تابع هدف بهینه برابر ۸۷۴/۹۶۶ ثانیه به دست آمده است. همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی در شکل (۱۲) قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است از آنجایی که حل مسئله بهینه‌سازی ترکیبی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE دارای قیود بسیار و فضای شدنی محدودی است، حل مسئله بهینه‌سازی آن نیز دشوار می‌باشد. یکی از معایب روش ترکیبی در واقع کوچک‌بودن فضای شدنی و سخت‌بودن یافتن تنظیماتی واحد برای رعایت قیود هماهنگی در حالات بهره‌برداری مختلف شبکه است. این موضوع در شبکه‌های بزرگ‌تر دارای اهمیت بیشتری بوده و خود را نیز بیشتر نشان می‌دهد.

در جدول (۱۰) نیز تنظیمات بهینه رله‌های حفاظتی در روش ترکیبی برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در این شبکه نیز منحنی مشخصه بهینه در حفاظت ترکیبی متفاوت بوده و همگی از یک نوع و غالباً EI نمی‌باشد.



شکل (۱۲): نمودار همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی حفاظت ترکیبی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE با کمک الگوریتم ژنتیک

در بخش توزیع شبکه ۳۰ شین با کمک حفاظت ترکیبی، علاوه بر افزایش زمان تابع هدف و مجموع زمان عملکرد رله‌های حفاظتی، مشکل عدم دیدن خطا توسط برخی از رله‌های پشتیبان و اجبار به

جدول (۸): زمان عملکرد رله‌های شبکه ۸ شین IEEE در حالت

جزیره‌ای بر اساس تنظیمات بهینه حفاظت تطبیقی

رله اصلی	زمان عملکرد (ثانیه)	رله پشتیبان	زمان عملکرد (ثانیه)	قید هماهنگی (ثانیه)
۱	۰/۰۴۸	۶	۰/۳۴۸	۰/۳۰۰
۲	۰/۲۶۶	۱	۰/۵۶۶	۰/۳۰۰
۲	۰/۲۶۶	۷	۰/۵۶۶	۰/۳۰۰
۳	۰/۱۲۷	۲	۰/۴۲۷	۰/۳۰۰
۴	۰/۱۳۲	۳	۰/۴۳۲	۰/۳۰۰
۵	۰/۰۷۸	۴	۰/۳۷۸	۰/۳۰۰
۶	۰/۱۲۸	۱۴	۰/۶۴۹	۰/۵۲۱
۶	۰/۱۲۸	۵	۰/۴۲۸	۰/۳۰۰
۷	۰/۰۹۰	۵	۰/۴۳۶	۰/۳۴۶
۷	۰/۰۹۰	۱۳	۰/۶۶۳	۰/۵۷۳
۸	۰/۱۱۵	۷	۰/۵۷۴	۰/۴۵۹
۸	۰/۱۱۵	۹	۰/۴۳۳	۰/۳۱۸
۹	۰/۰۲۶	۱۰	۰/۳۲۶	۰/۳۰۰
۱۰	۰/۰۵۸	۱۱	۰/۳۵۸	۰/۳۰۰
۱۱	۰/۲۱۳	۱۲	۰/۵۱۳	۰/۳۰۰
۱۲	۰/۳۴۱	۱۳	۰/۶۴۱	۰/۳۰۰
۱۲	۰/۳۴۱	۱۴	۰/۶۴۱	۰/۳۰۰
۱۳	۰/۰۶۲	۸	۰/۳۶۲	۰/۳۰۰
۱۴	۰/۱۰۲	۱	۰/۵۸۵	۰/۴۸۳
۱۴	۰/۱۰۲	۹	۰/۴۴۳	۰/۳۴۱

در جدول (۹)، نتایج مقایسه‌ای زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی برای آرایش‌های مختلف شبکه ۸ شین IEEE با کمک روش ترکیبی و تطبیقی مقایسه شده است.

جدول (۹): مقایسه نتایج طرح حفاظت ترکیبی و تطبیقی شبکه ۸

شین IEEE

نتایج	طرح حفاظت تطبیقی	طرح حفاظت ترکیبی
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش اصلی شبکه (ثانیه)	۱۳/۰۰۲۶	۱۹/۹۱۲۴
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش شبکه با خروج پست بالادست (ثانیه)	۱۲/۵۹۷۹	۳۶/۸۶۱۵
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در تمام آرایش‌های مورد مطالعه (ثانیه)	۲۵/۶۰۰۵	۵۶/۷۷۴

همان‌گونه که در نتایج مقایسه‌ای جدول (۹) نشان داده شده است، زمان عملکرد طرح حفاظتی تطبیقی در آرایش پایه نسبت به طرح حفاظت ترکیبی، ۶/۹۰۹۸ ثانیه (معادل ۳۴/۷٪) بهبود یافته است. بهبود زمان عملکرد طرح حفاظت تطبیقی در شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای (خروج پست بالادست شماره ۱) نسبت به طرح حفاظت ترکیبی مشهودتر است. مقدار ۲۴/۲۶۳۶ ثانیه (معادل ۶۵/۸۲٪) بهبود و کاهش زمان عملکرد سیستم حفاظتی در روش تطبیقی نسبت به

حذف برخی از جفت رله‌ها بر اساس نتایج پخش بار و اتصال کوتاه در حالات مختلف بهره‌برداری وجود دارد.

جدول (۱۰): نتایج تنظیمات بهینه رله‌های بخش توزیع شبکه ۳۰ شین

IEEE بر اساس حفاظت ترکیبی

رله اصلی	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی
۱	۰/۸۲۸	۹۸۷/۰۰۸	۲
۲	۰/۹۲۱	۷۹۶/۰۲۱	۳
۳	۰/۲۲۷	۲۲۹۲/۶۰۵	۱
۴	۰/۵۵۸	۷۴۵/۴۱۱	۲
۵	۰/۴۶۲	۲۲۹/۲۳۵	۱
۶	۰/۲۵۰	۱۲۶۷/۴۳۷	۱
۷	۰/۵۲۲	۱۱۹۰/۶۶۶	۲
۸	۰/۱۰۲	۶۱۳/۲۱۸	۱
۹	۰/۴۳۵	۹۰۲/۹۲۶	۳
۱۰	۰/۴۷۳	۱۰۹۱/۳۳۵	۲
۱۱	۰/۳۰۹	۸۹۳/۲۵۱	۳
۱۲	۰/۴۶۰	۷۵۶/۱۶۷	۲
۱۳	۰/۶۳۰	۷۹۰/۷۵۴	۲
۱۴	۰/۴۴۱	۱۰۰۴/۶۹۳	۲
۱۵	۰/۴۶۲	۶۰۲/۴۰۰	۱
۱۶	۰/۲۴۳	۶۸۰/۱۳۰	۱
۱۷	۰/۳۶۰	۱۱۵۷/۷۸۶	۲
۱۸	۰/۶۸۰	۵۸۷/۶۶۶	۳
۱۹	۰/۸۷۶	۵۱۶/۰۷۸	۲
۲۰	۰/۱۰۸	۸۵۸/۰۰۸	۳
۲۱	۰/۴۳۲	۱۲۴۳/۹۹۹	۲
۲۲	۰/۳۷۹	۸۴۰/۸۴۹	۲
۲۳	۰/۲۵۶	۶۹۶/۱۸۴	۲
۲۴	۰/۴۱۳	۴۶۲/۸۶۹	۳
۲۵	۱/۶۴۲	۴۵۳/۶۰۰	۳
۲۶	۰/۴۰۵	۲۴۵/۱۳۳	۳
۲۷	۰/۰۸۰	۴۰۹/۵۴۴	۲
۲۸	۰/۰۶۵	۱۰۰/۸۰۰	۳
۲۹	۰/۰۴۹	۱۴۵/۲۰۰	۳
۳۰	۰/۰۶۵	۱۱۵۷/۰۲۵	۱
۳۱	۰/۶۰۳	۴۵۳/۶۰۰	۳
۳۲	۰/۴۸۳	۹۰۶/۴۲۸	۲
۳۳	۰/۰۸۶	۲۰۴۴/۲۲۰	۱
۳۴	۰/۲۰۲	۵۸۸/۰۰۱	۲
۳۵	۰/۷۹۰	۴۶۴/۶۰۱	۲
۳۶	۰/۵۱۲	۸۴۷/۷۹۴	۳
۳۷	۰/۵۷۴	۴۹۵/۱۵۶	۲
۳۸	۰/۷۴۲	۴۳۵/۷۶۱	۳

در برخی از حالات، جریان اتصال کوتاه عبوری رله (قطع پست‌های بالادست و حالات جزیره‌ای)، از جریان عبوری از رله در حالات دیگری از شبکه کوچک‌تر می‌گردد. در چنین شرایطی می‌توان دو انتخاب داشت. انتخاب اول از دست دادن حفاظت در آن شرایط و ایجاد یک نقطه کور در یکی از پیکربندی‌ها یا دیده‌شدن تمامی خطا و قطع بار در پیکربندی دیگر است. از آن جایی که قطع ناخواسته بار در شرایط سالم بسیار نامطلوب است، رویکرد ایجاد اجباری نقطه کور حفاظتی در اولویت خواهد بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در شبکه‌های کوچک مانند شبکه ۸ شین این مشکل وجود ندارد، اما در بخش توزیع شبکه ۳۰ شین و شبکه‌های بزرگ‌تر این مشکل قابل توجه می‌گردد.

در جدول (۱۱)، نقاط کور حفاظتی و خطاهایی که در زمان بسیار طولانی (بسیار بزرگ‌تر از ۳ ثانیه به عنوان زمان تحمل اتصال کوتاه توسط تجهیزات) توسط رله اصلی یا پشتیبان در پیکربندی پایه قطع شده‌اند نشان داده شده است.

در صورتی که روش ترکیبی با در نظرگیری تمامی پیکربندی‌های محتمل اعمال شود، ۱۴ نقطه کور و نامطلوب حفاظتی در آرایش پایه وجود خواهد داشت که جزئیات آن در جدول (۱۱) بیان شده است. در آرایش شبکه با خروج پست بالادست شماره ۱ نیز ۲۰ نقطه کور و نامطلوب حفاظتی اجتناب‌ناپذیر است. برای جلوگیری از اطناب در مقاله، سائز جزئیات مربوط به نقاط کور و نامطلوب حفاظتی در سایر آرایش‌ها بیان نشده است.

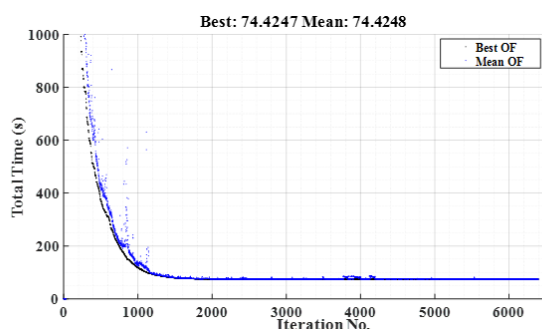
در شکل (۱۳)، نمونه‌ای از دیده‌نشدن خطا توسط رله‌های پشتیبان در حفاظت ترکیبی برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نشان داده شده است. در شکل (۱۳)، رله ۳، رله اصلی و رله ۳۴ رله پشتیبان بوده و بر اساس شرایط شبکه و مطالعات اتصال کوتاه، خطا جلوی رله ۳ توسط رله پشتیبان دیده نمی‌شود یا در زمانی بسیار طولانی قطع خواهد شد.

جدول (۱۱): نقاط کور و نامطلوب حفاظتی در بخش توزیع شبکه ۳۰

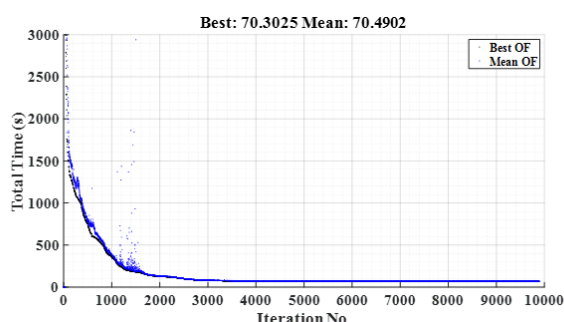
شین IEEE بر اساس حفاظت ترکیبی

رله اصلی	زمان رله اصلی (ثانیه)	رله پشتیبان	زمان رله پشتیبان (ثانیه)	قید هماهنگی (ثانیه)
۱	۰/۰۷۰	۲۰	۴/۲۲۵	۴/۲۲۵
۱	۰/۰۷۰	۳۴	۴/۰۳۵	۴/۰۳۵
۲	۰/۰۰۲	۲۰	۷/۰۵۲	۷/۰۵۲
۲	۰/۰۰۲	۳۴	۶/۱۶۱	۶/۱۶۱
۳	۰/۳۵۸	۳۴	x	x
۴	۰/۰۳۸	۲۰	x	x
۴	۰/۰۳۸	۳۵	۴/۰۶۸	۴/۰۶۸
۵	۰/۴۸۷	۹	۳۲/۸۲۱	۳۲/۸۲۱
۶	۰/۳۴۷	۸	x	x
۷	۰/۰۵۹	۹	۵/۷۷۱	۵/۷۷۱
۷	۰/۰۵۹	۸	x	x
۲۵	۰/۰۰۱	۲۸	x	x
۲۵	۰/۰۰۱	۲۹	x	x
۲۷	۰/۰۰۵	۳۰	۸/۹۰۴	۸/۸۹۹

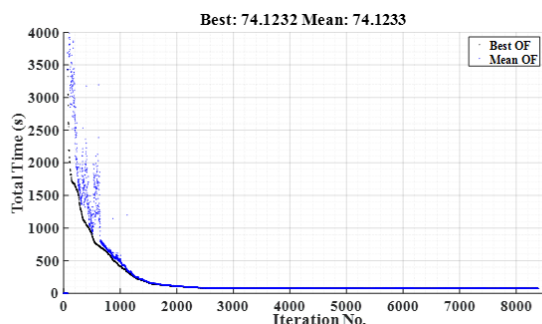
نقطه‌ی کور وجود دارد. نتایج به‌دست‌آمده مزایای روش پیشنهادی حفاظت تطبیقی در کاهش تعداد نقاط کور را تایید می‌نماید.



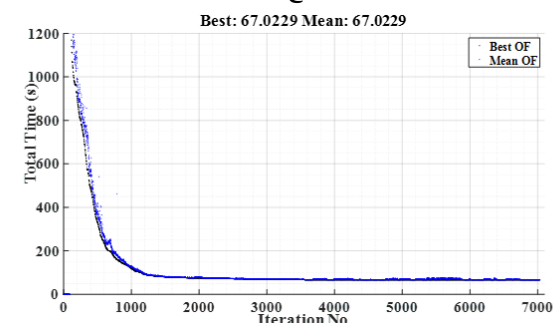
(الف)



(ب)

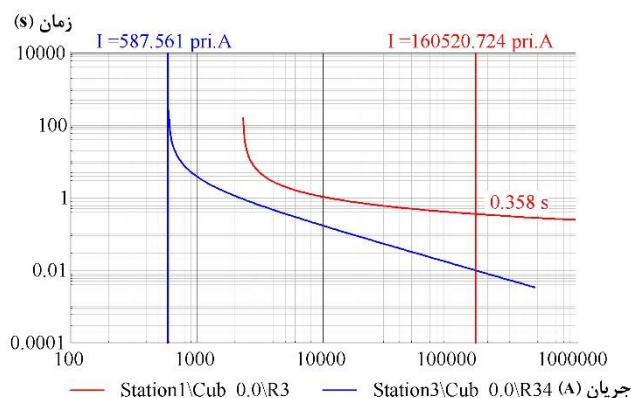


(ج)



(د)

شکل (۱۴): 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



شکل (۱۳): نمودار هماهنگی رله‌های اصلی ۳ و پشتیبان ۲۴ از بخش توزیع شبکه ۳۰ شین در پیکربندی پایه و تنظیمات حفاظتی ترکیبی

۳-۴- نتایج پیاده‌سازی روش حفاظت تطبیقی بر روی

بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE

روش پیشنهادی حفاظت تطبیقی با کمک منحنی مشخصه بهینه رله‌ها و بر اساس پیکربندی‌های مختلف بر روی بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE نیز پیاده‌سازی گردید. نمودارهای همگرایی حل مسئله بهینه‌سازی برای پیکربندی پایه و قطع یکی از پست‌های بالادست در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

زمان عملکرد سیستم حفاظتی در حالت پایه و دیگر حالات قطع یکی از پست‌های بالادست به ترتیب برابر ۷۴/۱۲۳۲، ۷۰/۳۰۲۵، ۷۴/۴۲۴۷ و ۶۷/۰۲۲۹ ثانیه می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده دلالت بر کاهش زمان عملکرد طرح حفاظتی تطبیقی نسبت به حفاظت ترکیبی دارد.

در جدول‌های (۱۲) - (۱۵)، تنظیمات بهینه رله‌های بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE بر اساس روش حفاظت تطبیقی آورده شده است. در روش حفاظت تطبیقی، اغلب منحنی بهینه انتخاب‌شده برای رله‌ها از نوع EI می‌باشد. با این وجود، تعدادی از مشخصه‌ها بر اساس ماهیت شبکه، شرایط بهره‌برداری و اتصال کوتاه در هر پیکربندی به‌صورت مجزا نیز اجباراً از نوع NI یا VI انتخاب شده است.

در حفاظت تطبیقی پیشنهادی، تعداد نقاط کور و زمان بالای رله پشتیبان به‌شدت کاهش یافت. با این وجود، تعداد محدود و معدودی از این پدیده ناشی از جریان اتصال کوتاه عبوری از رله پشتیبان وجود دارد.

در حالت تنظیمات مبتنی بر روش حفاظت تطبیقی، به‌دلیل اینکه یک گروه تنظیم برای هر حالت خروج پست بالادست در نظر گرفته شده است، تعداد نقاط کور در مقایسه با حالت ترکیبی کاهش چشم‌گیری دارد. تنها ۲ نقطه‌ی کور در روش تطبیقی برای حالت پایه وجود دارد که در مقایسه با روشی که همه پیکربندی‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود، این تعداد بسیار کاهش یافته است. همچنین با خروج پست بالادست شماره (۱)، شماره (۲) و شماره (۳) به‌ترتیب ۱۰ و ۹

در شکل (۱۵-الف)، زمان رله ۱ که رله اصلی است، در حالت بهره-برداری پایه و اتصال تمامی پست‌های بالادست برابر ۰/۰۰۵ ثانیه است. این عملکرد سریع رله ۱ در حفاظت تطبیقی بسیار مفید خواهد بود.

جدول (۱۳): تنظیمات بهینه رله‌های بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE با آرایش قطع پست بالادست شماره (۱) در حفاظت تطبیقی

شماره رله	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی
۱	۰/۱۶۶	۷۰۷/۱۳۱	۳
۲	۱/۴۲۷	۲۸۱/۲۲۷	۳
۳	۰/۳۰۸	۵۲۰/۷۹۰	۳
۴	۰/۱۵۷	۳۶۳/۲۰۹	۳
۵	۰/۴۲۶	۲۹۹/۲۷۷	۳
۶	۰/۰۶۸	۳۲۳۵/۷۵۶	۲
۷	۰/۰۶۹	۲۷۱۳/۰۳۱	۲
۸	۰/۰۱۱	۲۵۰/۲۹۸	۳
۹	۰/۰۱۰	۱۱۱۸/۴۶۸	۳
۱۰	۰/۱۵۹	۱۱۲۸/۶۸۶	۳
۱۱	۰/۶۴۸	۴۹۹/۰۲۴	۳
۱۲	۰/۰۱۱	۷۸۶/۲۷۶	۱
۱۳	۰/۳۱۹	۶۷۱/۵۵۱	۳
۱۴	۰/۰۶۹	۶۸۹/۳۱۷	۲
۱۵	۰/۲۵۵	۵۵۴/۴۲۸	۳
۱۶	۰/۰۳۵	۵۰۵/۵۷۷	۲
۱۷	۰/۶۳۰	۴۴۰/۷۹۴	۳
۱۸	۰/۱۴۹	۴۳۸/۸۵۶	۳
۱۹	۰/۱۵۵	۷۰۷/۱۴۶	۲
۲۰	۰/۱۹۹	۳۱۴/۳۱۰	۳
۲۱	۰/۲۵۹	۳۹۷/۸۶۴	۳
۲۲	۰/۰۶۳	۱۰۰۳/۹۹۲	۲
۲۳	۰/۴۲۶	۳۹۸/۶۸۶	۳
۲۴	۰/۰۳۷	۱۱۰۸/۵۵۴	۲
۲۵	۰/۱۱۴	۱۶۵۶/۸۴۱	۲
۲۶	۰/۶۰۹	۲۰۹/۲۵۲	۳
۲۷	۰/۰۵۹	۵۶۳/۹۰۷	۲
۲۸	۰/۰۴۹	۱۳۴/۸۲۵	۲
۲۹	۰/۰۵۸	۱۵۲/۷۳۶	۲
۳۰	۰/۰۲۸	۵۸۳/۹۷۹	۱
۳۱	۰/۱۰۳	۷۴۲/۵۴۲	۲
۳۲	۰/۵۱۳	۲۸۶/۱۰۱	۳
۳۳	۰/۸۰۱	۳۱۲/۴۷۸	۳
۳۴	۰/۱۲۱	۲۹۲/۳۳۲	۲
۳۵	۰/۱۱۲	۵۶۷/۷۱۲	۲
۳۶	۰/۲۴۵	۱۸۳/۵۴۱	۱
۳۷	۰/۰۵۶	۵۱۶/۷۴۸	۱
۳۸	۰/۰۸۲	۷۸۸/۵۹۳	۲

جدول (۱۲): تنظیمات بهینه رله‌های بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE با آرایش پایه در حفاظت تطبیقی

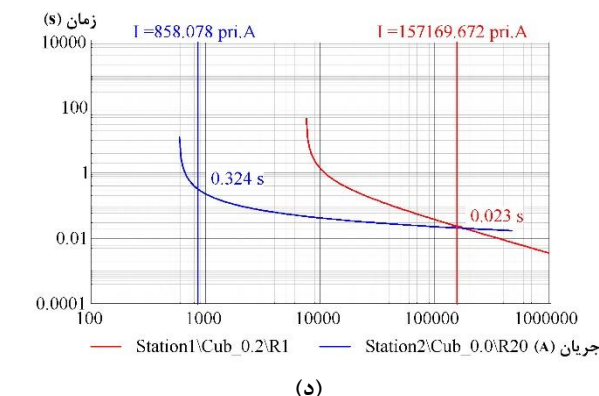
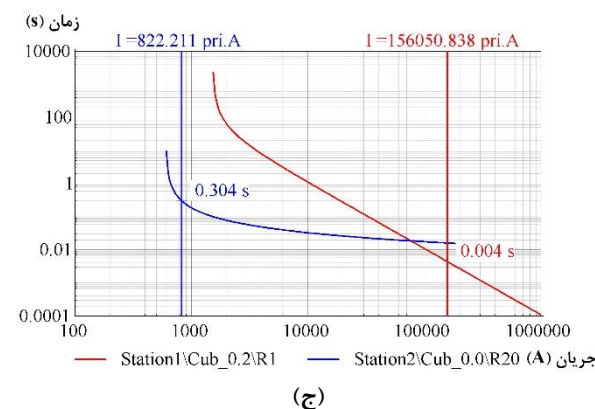
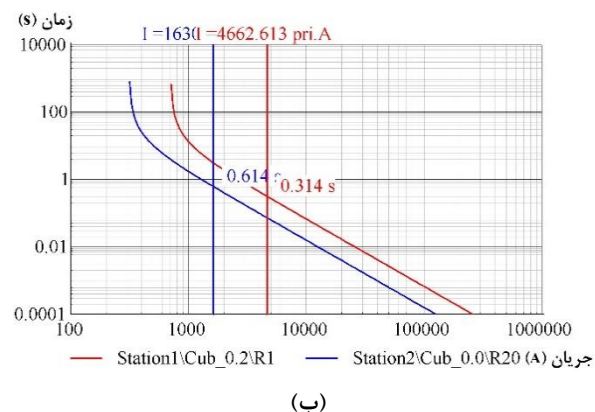
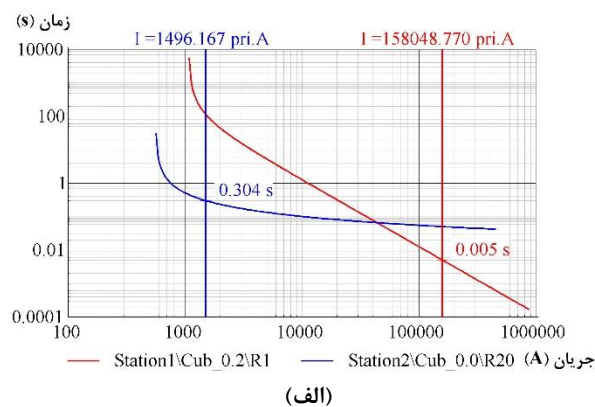
شماره رله	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی
۱	۱/۳۶۸	۱۰۷۶/۷۴۴	۳
۲	۰/۲۴۰	۱۳۷۱/۳۷۲	۳
۳	۰/۹۷۹	۱۵۱۹/۷۷۲	۳
۴	۰/۱۴۵	۲۲۳۲/۸۱۵	۲
۵	۰/۰۵۰	۱۰۳۸/۳۸۲	۲
۶	۱/۶۵۶	۵۹۴/۴۵۷	۳
۷	۰/۱۸۳	۱۳۴۹/۱۰۲	۳
۸	۰/۲۲۹	۷۸/۰۵۳	۳
۹	۰/۱۸۵	۳۳۸/۴۰۳	۳
۱۰	۲/۳۲۹	۳۰۰/۴۷۴	۳
۱۱	۰/۲۹۶	۷۳۱/۹۲۳	۳
۱۲	۰/۱۲۶	۵۱۷/۵۶۵	۳
۱۳	۰/۱۳۳	۸۸۵/۲۲۹	۳
۱۴	۰/۰۸۰	۱۵۴۴/۵۵۶	۲
۱۵	۰/۱۱۷	۵۷۲/۹۴۸	۳
۱۶	۰/۲۵۶	۳۱۸/۴۱۸	۳
۱۷	۰/۵۰۲	۴۶۷/۵۳۷	۳
۱۸	۰/۵۷۶	۳۷۹/۱۹۸	۳
۱۹	۰/۰۶۸	۱۰۴۷/۱۳۷	۲
۲۰	۰/۰۴۳	۵۶۰/۷۸۳	۱
۲۱	۰/۴۰۷	۱۵۲۰/۷۸۶	۳
۲۲	۰/۶۹۹	۳۲۰/۳۱۸	۳
۲۳	۰/۱۹۴	۶۴۵/۸۸۸	۳
۲۴	۰/۱۸۱	۴۸۰/۳۷۳	۳
۲۵	۱/۹۲۳	۳۵۵/۰۱۰	۳
۲۶	۰/۵۳۷	۲۱۲/۸۹۹	۳
۲۷	۰/۵۸۳	۱۵۷/۱۶۶	۳
۲۸	۰/۰۵۸	۱۰۶/۶۷۳	۳
۲۹	۰/۰۵۷	۱۵۲/۵۱۲	۲
۳۰	۰/۰۹۱	۲۷۹/۹۰۴	۳
۳۱	۰/۲۵۶	۴۴۰/۵۸۸	۳
۳۲	۰/۱۱۸	۱۲۰۴/۲۷۵	۳
۳۳	۰/۰۷۳	۳۰۲۵/۵۴۱	۲
۳۴	۰/۰۴۴	۳۶۶/۳۶۲	۱
۳۵	۰/۰۶۶	۴۶۵/۰۰۱	۲
۳۶	۰/۰۹۴	۱۶۲۶/۴۱۰	۲
۳۷	۰/۴۷۲	۲۲۹/۸۶۸	۳
۳۸	۰/۶۰۳	۲۸۸/۷۶۲	۳

صحت قیود هماهنگی حفاظتی نیز مشابه مطالعات قبلی در نرم‌افزار DigSILENT بررسی گردید. در شکل (۱۵)، نمودار هماهنگی رله-های ۱ و ۲۰ در آرایش‌های پایه، خروج پست‌های بالادست شماره ۱، شماره ۲ و شماره ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده دلالت بر رعایت قیود هماهنگی دارد.

هم‌چنین زمان عملکرد رله ۲۰ به‌عنوان رله پشتیبان در پیکربندی پایه برابر ۰/۳۰۴ ثانیه است. فاصله زمانی هماهنگی بین رله ۱ و ۲۰ رعایت شده است و از آن جایی که قیود مسئله محدود به هر حالت بهره‌برداری شده است، فاصله زمانی هماهنگی در مرز ناحیه شدنی بر اساس قیود هماهنگی حاصل شده است.

جدول (۱۴): تنظیمات بهینه رله‌های بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE با آرایش قطع پست بالادست شماره (۲) در حفاظت تطبیقی

شماره رله	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی
۱	۰/۵۸۳	۱۵۱۹/۹۰۶	۳
۲	۰/۰۹۵	۲۴۹۴/۸۶۰	۲
۳	۰/۹۲۶	۱۵۱۸/۲۳۲	۳
۴	۱/۲۷۴	۶۷۱/۰۷۲	۳
۵	۰/۳۸۶	۷۳/۲۹۰	۳
۶	۰/۵۶۵	۲۳۷/۰۸۹	۳
۷	۰/۲۰۴	۴۲۸/۷۹۱	۳
۸	۰/۰۴۷	۴۰۰/۵۵۰	۱
۹	۰/۱۰۴	۷۰۹/۵۵۱	۳
۱۰	۱/۰۳۱	۲۷۴/۶۳۸	۳
۱۱	۱/۱۶۷	۲۱۹/۳۴۳	۳
۱۲	۰/۶۲۵	۳۲۲/۹۲۸	۳
۱۳	۰/۰۷۸	۴۴۵/۸۴۵	۲
۱۴	۰/۱۱۳	۱۲۹۶/۱۷۴	۳
۱۵	۰/۰۱۰	۶۰۲/۴۰۰	۱
۱۶	۰/۴۱۳	۲۹۲/۱۶۲	۳
۱۷	۰/۱۱۷	۶۳۳/۹۱۳	۲
۱۸	۰/۰۳۸	۲۲۴۲/۲۸۱	۱
۱۹	۰/۰۲۹	۱۱۷۰/۳۵۹	۱
۲۰	۰/۰۱۴	۶۰۲/۹۷۵	۱
۲۱	۰/۲۰۷	۲۰۰۳/۴۶۳	۳
۲۲	۰/۹۰۶	۳۲۶/۴۸۱	۳
۲۳	۰/۱۹۱	۵۱۴/۵۹۳	۳
۲۴	۰/۱۳۱	۵۶۹/۴۰۰	۳
۲۵	۱/۰۳۲	۴۸۲/۶۰۶	۳
۲۶	۰/۷۹۷	۱۸۲/۷۱۷	۳
۲۷	۰/۴۳۹	۱۷۹/۲۷۲	۳
۲۸	۰/۰۴۴	۱۴۵/۳۸۱	۲
۲۹	۰/۰۲۹	۱۹۷/۶۱۵	۲
۳۰	۰/۰۶۰	۳۶۲/۶۷۴	۲
۳۱	۰/۴۰۱	۳۴۶/۲۹۷	۳
۳۲	۰/۱۰۳	۱۳۱۷/۹۱۱	۳
۳۳	۰/۳۴۳	۱۰۹۳/۷۹۱	۳
۳۴	۰/۰۲۳	۳۲۰/۴۳۴	۱
۳۵	۰/۰۱۷	۴۶۹/۷۶۰	۲
۳۶	۱/۰۲۱	۴۸۱/۵۱۰	۳
۳۷	۰/۱۱۹	۵۹۸/۰۱۲	۲
۳۸	۰/۱۵۹	۳۶۴/۷۵۱	۳



شکل (۱۵): نمودار هماهنگی رله‌های ۱ و ۲۰ با تنظیمات حفاظت تطبیقی بهینه در 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

یکی از نتایجی که از بررسی نمودارهای هماهنگی رله‌های ۱ و ۲۰ با کمک حفاظت تطبیقی بهینه و با به‌کارگیری چند گروه تنظیم می‌توان گرفت، کاهش زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان در حالات مختلف بهره‌برداری شبکه است. سرعت بسیار بالای رله اصلی و همچنین زمان مطلوب عملکرد رله پشتیبان از مزایای روش حفاظت تطبیقی بهینه است. تفکیک مسئله بهینه‌سازی، زیاد کردن فضای شدنی و تنظیمات قابل قبول بر اساس قیود هماهنگی، کاهش تعداد قیود مسئله و ... باعث شده است سرعت سیستم حفاظتی تطبیقی بدون بروز نقض قید در پیکربندی‌های مختلف افزایش یابد.

نتایج به‌دست‌آمده دلالت بر کارایی حفاظت تطبیقی پیشنهادی با گروه‌های تنظیم مختلف بر اساس پیکربندی‌های شبکه و همچنین بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی علاوه بر تنظیمات جریانی و زمانی رله‌ها دارد. همچنین مقایسه نتایج حفاظت تطبیقی و حفاظت ترکیبی نشان می‌دهد روش حفاظت تطبیقی روشی مناسب‌تر می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده کاهش چشم‌گیر در زمان عملکرد رله‌ها در روش حفاظت تطبیقی بهینه را نشان می‌دهد.

در جدول (۱۶)، نتایج مقایسه‌ای زمان عملکرد طرح‌های حفاظتی برای آرایش‌های مختلف شبکه با کمک روش ترکیبی و تطبیقی برای بخش توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که می‌توان زمان کل عملکرد رله‌های حفاظتی در تمام شرایط بهره‌برداری را با کمک روش تطبیقی به میزان ۵۹۱/۰۸۵۷ ثانیه (معادل ۶۷/۵۵٪) کاهش داد. این میزان کاهش زمان عملکرد طرح حفاظت تطبیقی در کنار عدم نقض قیود هماهنگی ناشی از تغییر در شرایط بهره‌برداری و آرایش شبکه، مزایای استفاده از حفاظت تطبیقی را برجسته نموده است. ضمناً مقایسه سایر زمان‌های عملکرد سیستم حفاظتی به تفکیک شرایط بهره‌برداری در جدول (۱۶) قابل مشاهده است.

جدول (۱۶): مقایسه نتایج طرح حفاظت ترکیبی و تطبیقی بخش

توزیع شبکه ۳۰ شین IEEE

نتایج	طرح حفاظت تطبیقی	طرح حفاظت ترکیبی
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش اصلی شبکه (ثانیه)	۷۲/۴۲۴۷	۱۹۰/۱۱۳۱
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش شبکه با خروج پست بالادست ۱ (ثانیه)	۷۰/۳۰۲۵	۲۴۵/۵۰۸۱
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش شبکه با خروج پست بالادست ۲ (ثانیه)	۷۴/۱۲۳۲	۲۲۰/۸۵۹۹
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در آرایش شبکه با خروج پست بالادست ۳ (ثانیه)	۶۷/۰۲۹۹	۲۱۸/۴۸۵۱
مجموع زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در تمام آرایش‌های مورد مطالعه (ثانیه)	۲۸۳/۸۸۰۳	۸۷۴/۹۶۶

زمان عملکرد رله ۱ در پیکربندی‌های ناشی از خروج پست بالادست شماره ۲ و شماره ۳ نیز بسیار سریع می‌باشد. در آرایش شبکه با خروج پست بالادست شماره (۱)، زمان عملکرد تفاوت معناداری با سایر پیکربندی‌ها و گروه‌های تنظیمی دارد. این اختلاف ناشی از تفاوت در جریان اتصال کوتاه عبوری از رله ۱ در پیکربندی ۲ نسبت به سایر پیکربندی‌ها دارد. با این وجود، در این پیکربندی نیز زمان عملکرد رله ۱ مناسب و سریع است.

جدول (۱۵): تنظیمات بهینه رله‌های بخش توزیع شبکه ۳۰ شین

IEEE با آرایش قطع پست بالادست شماره (۳) در حفاظت تطبیقی

شماره رله	TMS (s)	I_b (A)	نوع منحنی
۱	۰/۰۳۵	۷۴۹۸/۶۱۶	۲
۲	۰/۵۲۴	۸۹۰/۹۷۹	۳
۳	۰/۶۳۸	۱۸۴۵/۰۲۴	۳
۴	۱/۰۹۱	۷۳۷/۶۳۰	۳
۵	۰/۳۵۰	۳۲۸/۹۹۷	۳
۶	۰/۴۰۳	۱۱۹۷/۵۷۸	۳
۷	۰/۱۱۶	۱۶۸۴/۸۶۱	۳
۸	۰/۰۲۲	۳۴۸/۱۹۸	۱
۹	۰/۱۷۳	۳۲۹/۷۰۵	۳
۱۰	۰/۳۲۰	۷۸۵/۰۶۰	۳
۱۱	۰/۰۷۰	۱۵۲۰/۵۲۰	۳
۱۲	۰/۱۸۶	۴۲۷/۱۰۵	۳
۱۳	۰/۶۳۳	۴۱۱/۵۳۱	۳
۱۴	۰/۶۶۰	۵۰۵/۰۱۹	۳
۱۵	۰/۱۲۰	۵۶۴/۶۴۰	۳
۱۶	۰/۳۶۸	۳۱۱/۱۱۷	۳
۱۷	۰/۳۰۷	۵۷۴/۹۳۰	۳
۱۸	۰/۱۳۷	۷۶۴/۹۹۴	۳
۱۹	۰/۲۰۸	۵۰۷/۶۵۷	۳
۲۰	۰/۰۱۸	۵۸۷/۲۸۹	۱
۲۱	۰/۳۳۲	۱۶۱۱/۱۰۳	۳
۲۲	۰/۰۶۸	۱۰۱۰/۲۴۵	۲
۲۳	۰/۰۹۸	۵۸۵/۹۹۱	۲
۲۴	۰/۲۳۱	۴۸۶/۲۰۲	۳
۲۵	۱/۲۰۵	۲۴۶/۰۰۰	۲
۲۶	۰/۰۷۷	۱۸۷/۵۶۷	۳
۲۷	۰/۰۱۷	۳۲۹/۵۳۸	۳
۲۸	۰/۰۱۱	۱۰۰/۸۰۰	۳
۲۹	۰/۰۶۹	۱۴۵/۲۰۰	۲
۳۰	۰/۳۳۲	۲۴۶/۷۹۱	۳
۳۱	۱/۳۷۸	۲۴۶/۰۰۰	۳
۳۲	۰/۹۴۲	۴۹۴/۳۳۸	۳
۳۳	۰/۱۳۳	۱۶۸۱/۹۶۸	۳
۳۴	۰/۰۲۵	۳۳۲/۶۰۹	۱
۳۵	۰/۰۵۵	۵۳۰/۷۹۶	۲
۳۶	۰/۷۰۷	۵۳۷/۴۹۶	۳
۳۷	۰/۱۵۲	۳۴۹/۰۹۶	۳
۳۸	۱/۷۷۶	۱۹۱/۲۲۶	۳

۴- نتیجه‌گیری

تغییر در آرایش شبکه یکی از چالش‌هایی است که حفاظت شبکه‌های توزیع متداول، شبکه‌های توزیع فعال و شبکه‌های هوشمند توزیع را با چالش مواجه می‌سازد. در شبکه‌های توزیع فعال و شبکه‌های هوشمند، این مشکل برجسته‌تر است. با این وجود، مشکل مذکور در شبکه‌های متداول با چندین نقطه اتصال به پست‌های بالادست فوق توزیع وجود دارد. در این مقاله تلاش گردید روش‌های حفاظتی ترکیبی و تطبیقی با در نظرگیری آرایش‌های مختلف شبکه توسعه داده شود. در روش ترکیبی، یک گروه تنظیم حفاظتی برای رله‌های شبکه در نظر گرفته شده و با حل یک مسئله بهینه‌سازی واحد و در نظرگیری قیود هماهنگی تمامی آرایش‌های شبکه، تنظیمات بهینه استخراج گردید. اگرچه با پیاده‌سازی این روش ترکیبی، نقض قیود در حالات مختلف بهره‌برداری کاهش چشم‌گیری نسبت به روش‌های موجود بدون در نظرگیری تنها پیکربندی پایه خواهد داشت، اما زمان عملکرد رله‌ها ناشی از کوچک شدن فضای شدنی مسئله بهینه‌سازی قابل‌توجه خواهد بود. از این رو، روش حفاظت تطبیقی با کمک گروه‌های تنظیمی مختلف و تفکیک مسئله بهینه‌سازی به چند مسئله و کاهش قیود هماهنگی در ضمن در نظرگیری تمامی آرایش‌های شبکه پیشنهاد گردید. نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی دلالت بر برتری حفاظت تطبیقی دارد. یکی از دیگر مزایای روش پیشنهادی که دستیابی به طرح حفاظتی سریع و پشتیبانی از تمامی آرایش‌های شبکه را میسر ساخت، بهینه‌سازی منحنی مشخصه رله‌های حفاظتی علاوه بر تنظیمات زمانی و جریانی است.

مراجع

- considering change in network topology and OLTC tap position," *Electric Power Systems Research*, vol. 185, p. 106395, 2020/08/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106395>.
- [6] T. Amraee, A. Ranjbar, and B. Mozaffari, "Multi-Stage Under Frequency Load Shedding Relay in Islanded Distribution Systems," *ku-energy*, vol. 7, no. 4, pp. 2-11, 2018. [Online]. Available: <http://energy.kashanu.ac.ir/article-1-685-fa.html>.
- [7] J. P. Nascimento, N. S. D. Brito, and B. A. Souza, "An adaptive overcurrent protection system applied to distribution systems," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 81, p. 106545, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106545>.
- [۸] م. دودانگه، ن. غفارزاده، غ. شاهقلیان، ب. فانی، م. معظمی، "جایابی بهینه HTSFL با در نظر گرفتن امنیت، پایداری و هماهنگی رله‌های جریان زیاد و انتخاب هوشمند مشخصه رله جریان زیاد در شبکه‌های متصل به نیروگاه بادی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی"، *مجله مهندسی مهندسی و مدیریت انرژی*، ۱۰ (۲)، ۱۴-۱۳۹۹، ۲۵.
- [9] 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.
- [10] T. S. Aghdam, H. K. Karegar, and H. H. Zeineldin, "Transient Stability Constrained Protection Coordination for Distribution Systems With DG," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5733-5741, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2695378.
- [11] S. Jamali, H. Rezaei, and N. Rafie, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Synchronous DGs Transient Stability in Distribution Networks," *jiaeee*, vol. 14, no. 1, pp. 19-27, 2017. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-325-fa.html>.
- [12] 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>.
- [13] K. A. Saleh, H. H. Zeineldin, and E. F. El-Saadany, "Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N-1 Contingency," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 5, pp. 2270-2278, 2017, doi: 10.1109/TII.2017.2682101.
- [14] N. Hatefi Torshizi, H. Najafi, A. Saberi Noghahi, and J. Sadeh, "An adaptive characteristic for overcurrent relays considering uncertainty in presence of distributed generation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 128, p. 106688, 2021/06/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106688>.
- [15] A. Samadi and R. Mohammadi Chabanloo, "Adaptive coordination of overcurrent relays in active distribution networks based on independent change of relays' setting groups," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 120, p. 106026, 2020/09/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106026>.
- [16] E. Sorrentino and J. V. Rodríguez, "Effects of the curve type of overcurrent functions and the location of analyzed faults on the optimal coordination of directional overcurrent protections," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 88, p. 106864, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106864>.
- [1] M. Ghotbi-Maleki, R. M. Chabanloo, H. H. Zeineldin, and S. M. H. Miangafsheh, "Design of Setting Group-Based Overcurrent Protection Scheme for Active Distribution Networks Using MILP," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1185-1193, 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3027371.
- [۲] س. ع. جزایری، غ. شاهقلیان، ب. فانی، م. معظمی، "طرح حفاظت سلسله مراتبی مبتنی بر سیستم‌های چندعاملی در شبکه‌های توزیع و در حضور منابع تولید پراکنده"، *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، ۱۸ (۲)، ۱۳۹۸.
- [3] 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>.
- [4] A. Saberi, J. Sadeh, and H. Rajabi Mashhadi, "A New Index for Constraint Reduction in Relay Coordination Problem Considering Uncertainty," *jiaeee*, vol. 8, no. 2, pp. 59-67, 2011. [Online]. Available: <http://jiaeee.com/article-1-182-fa.html>.
- [5] M. N. Alam, B. Das, and V. Pant, "Protection coordination scheme for directional overcurrent relays

روز رسانی نقطه کار رله‌های اضافه جریان"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، ۹ (۳)، ۲۸-۴۰، ۱۳۹۹.

- [29] 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>.

- [17] M. Dodangeh and N. Ghaffarzadeh, "Optimal Location of HTS-FCLs Considering Security, Stability, and Coordination of Overcurrent Relays and Intelligent Selection of Overcurrent Relay Characteristics in DFIG Connected Networks Using Differential Evolution Algorithm," *ku-energy*, vol. 10, no. 2, pp. 14-25, 2020, doi: 10.22052/10.2.9.
- [18] 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>.
- [19] 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>.
- [20] 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>.
- [21] S. Khatua and V. Mukherjee, "Adaptive overcurrent protection scheme suitable for station blackout power supply of nuclear power plant operated through an integrated microgrid," *Electric Power Systems Research*, vol. 192, p. 106934, 2021/03/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106934>.
- [22] S. K. ElSayed and E. E. Elattar, "Hybrid Harris hawks optimization with sequential quadratic programming for optimal coordination of directional overcurrent relays incorporating distributed generation," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 2, pp. 2421-2433, 2021/04/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.12.028>.
- [23] 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>.
- [24] 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.
- [25] P. Mishra, A. K. Pradhan, and P. Bajpai, "A Positive Sequence Relaying Method for Solar Photovoltaic Integrated Distribution System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1-1, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3044330.
- [26] O. Akdag and C. Yeroglu, "Optimal directional overcurrent relay coordination using MRFO algorithm: A case study of adaptive protection of the distribution network of the Hatay province of Turkey," *Electric Power Systems Research*, vol. 192, p. 106998, 2021/03/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106998>.
- [27] K. A. Saleh and A. Mehrizi-Sani, "Harmonic Directional Overcurrent Relay For Islanded Microgrids With Inverter-Based DGs," *IEEE Systems Journal*, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.2980274.

[۲۸] قنبری مژگان، گندمکار مجید، نیکوکار جواد، "کاهش تاثیر منابع تولید پراکنده بر سطح اتصال کوتاه شبکه با استفاده از SFCL و به