

تنظیم بهینه نواحی رله دیستانس با الگوسازی احتمالی عدم قطعیت‌ها

محمد شعبانی^۱، عباس صابری نوقابی^۲، محسن فرشاد^۳

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

powerengineerpay@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

a.saberi@birjand.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

mfarshad@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روش جدیدی به منظور تعیین تنظیم بهینه رله‌های دیستانس با الگوسازی احتمالی عدم قطعیت‌های مؤثر ارائه شده است. برای الگوسازی عدم قطعیت‌ها، برای هر یک از عدم قطعیت‌ها، توابع چگالی متناظر با آن‌ها ارائه شده است و بر اساس این، توزیع احتمالی امیدانس دیده شده از رله دیستانس به کمک فرآیند مونت کارلو به دست آمده است. نواحی سه‌گانه رله دیستانس باید به نحوی تنظیم شود که به ازای خطاهای داخلی، عملکرد داشته باشد (حساسیت) و به ازای خطاهای خارجی، عملکردی نداشته باشد (همه‌انگي). بر اساس این، برای هر یک از نواحی سه‌گانه رله دیستانس، شاخص احتمالی حساسیت و همه‌انگي به صورت مستقل تعریف شده‌اند. در ادامه، سناریوهای مختلف برای حداکثرکردن شاخص حساسیت یا همه‌انگي ارائه شده‌اند. در نهایت، با توجه به اهمیت بیشتر همه‌انگي نسبت به حساسیت، سناریوی حداکثرکردن حساسیت به همراه همه‌انگي کامل پیشنهاد شده است. بر اساس این سناریو، مسئله تعیین تنظیم بهینه هر یک از نواحی رله دیستانس به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با هدف حداکثرکردن شاخص حساسیت و برقراری قید همه‌انگي تعریف شده است. با توجه به غیرخطی بودن فرمول‌بندی‌های ارائه شده، از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله‌ها استفاده شده است. روش پیشنهادی به شبکه ۳۹ شینه IEEE، اعمال شده و مزیت فرمول‌بندی ارائه شده برای هر یک از نواحی سه‌گانه رله دیستانس ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: تنظیم احتمالی، حساسیت، رله دیستانس، عدم قطعیت، همه‌انگي، مونت کارلو

۱- مقدمه

خطوط انتقال و فوق توزیع به کار گرفته می‌شود. این رله قادر است با اندازه‌گیری امیدانس در محل نصب رله، مکان وقوع خطا را تشخیص دهد و در صورت خطاداشتن در ناحیه حفاظتی، عملکرد مناسب داشته باشد.

رله‌های دیستانس می‌باید به نحوی تنظیم شوند که به ازای خطا در داخل ناحیه حفاظتی رله، عملکرد داشته باشند (حساسیت رله) و به ازای خطا در خارج ناحیه حفاظتی رله، عملکرد نداشته باشند (همه‌انگي رله). برای رسیدن به این منظور، باید امیدانس اندازه‌گیری شده با رله دقیق باشد؛ اما وجود برخی از عدم قطعیت‌ها در شبکه به بروز خطا در اندازه‌گیری امیدانس با رله‌های دیستانس منجر می‌شوند. این

با گسترش شبکه‌های قدرت و پیچیدگی آن، حفاظت سریع و ایمن اجزای شبکه بیش از پیش اهمیت یافته است. حفاظت دیستانس حفاظت اصلی و پشتیبان است که در

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۲/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۲/۱۴

نام نویسنده مسئول: عباس صابری نوقابی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رله دیستانس به دو روش معمول و روش تنظیم احتمالی تعیین می‌شوند.

در روش‌های معمول، یک حاشیه اطمینان (به‌طورمثال، ۱۰ تا ۲۰ درصدی برای تنظیم نواحی رله) به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شده است تا احتمال عملکرد اشتباه رله کاهش یابد. برای مثال، تنظیم ناحیه اول رله‌های دیستانس در روش‌های معمول، ۸۰ درصد امیدانس خط در نظر گرفته می‌شود [۶].

در روش‌های احتمالی با توجه به تابع توزیع احتمال هر یک از عدم قطعیت‌ها، تنظیمات رله دیستانس به نحوی تعیین می‌شود که رله، بیشترین ناحیه را تحت پوشش قرار دهد و دوم، تداخلی در عملکرد نواحی مختلف رله رخ ندهد.

تنظیم احتمالی یک رله دیستانس چهارضلعی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مؤثر بر عملکرد آن، در [۷] آورده شده است. در این مقاله، پس از الگوسازی احتمالی عدم قطعیت‌ها، با توجه به شاخص‌های حساسیت و هماهنگی، یک تابع هدف وزن‌دار تعریف شده است. سپس با جست‌وجوی تمامی حالات ممکن، تنظیمی برای رله دیستانس چهار ضلعی ارائه شده است که احتمال حساسیت و هماهنگی حداکثر شود.

تأثیر خروج واحدهای تولیدی بر عملکرد رله دیستانس در [۸] نشان داده شده است. خروج واحدهای تولیدی بر اساس یک پیشامد و یا از نوع خروج‌های برنامه‌ریزی شده برای تعمیر و نگهداری هستند. خروج واحدها باعث تغییر سطح اتصال کوتاه شبکه شده است و از این‌رو باعث عملکرد اشتباه رله می‌شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که با خروج یک واحد تولیدی متصل به شبکه ممکن است خطایی که بیرون یکی از نواحی بوده است، به اشتباه درون آن ناحیه دیده شود.

در مرجع [۹] عدم قطعیت‌هایی مانند خطای اندازه‌گیری، مکان خطا و امیدانس خطا، عوامل تأثیرگذاری هستند که بر روی رله دیستانس شناسایی شده‌اند و به‌صورت توابع توزیع یکنواخت و توزیع گوسی مدل شده‌اند. سپس تغییرات احتمال حساسیت و هماهنگی به ازای تنظیمات مختلف رله

عدم قطعیت‌ها شامل: مکان وقوع خطا، نوع خطا، مقاومت خطا، خطای تجهیزات اندازه‌گیری و تغییر ساختار شبکه هستند که در [۳، ۱] این عدم قطعیت‌ها بررسی شده است.

با توجه به تأثیر عدم قطعیت‌ها بر عملکرد رله‌های دیستانس، برای تنظیم این رله، دو روش تطبیقی و غیر تطبیقی پیشنهاد می‌شود. در روش تطبیقی به یک شبکه مخابراتی نیاز است که به‌صورت لحظه‌ای و مداوم، اطلاعات شبکه برای رله ارسال شوند تا در صورت تغییر در شرایط شبکه، تنظیمات رله نیز تغییر کنند؛ از این‌رو، علاوه بر وجود شبکه‌های مخابراتی، رله دیستانس هم باید به اصلاح تنظیمات خود قادر باشد که البته در رله‌های دیجیتال، این امکان وجود دارد.

در مرجع [۴] یک روش تطبیقی برای رله‌های دیستانس بر اساس تخمین خطای گذرای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی ارائه شده است. خطاهای گذرای CVT بر مقدار امیدانس اندازه‌گیری شده با رله تأثیرگذار بوده است و می‌تواند باعث شود خطای رخ داده در یک ناحیه رله، به اشتباه در ناحیه دیگر اندازه‌گیری شود. در این مقاله با بررسی سیگنال ولتاژ سمت ثانویه ترانسفورماتور، میزان خطای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی تخمین زده شده و سپس بر امیدانس اندازه‌گیری شده با رله اعمال شده است.

تنظیم تطبیقی رله‌های دیستانس در خطوط انتقال و در حضور نیروگاه بادی، در [۵] آورده شده است. میزان توان تولیدی نیروگاه بادی، امیدانس منابع تولید، بار شبکه و سطح ولتاژ آن بر عملکرد رله‌ها تأثیر می‌گذارند. در این مقاله یک طرح تطبیقی پیشنهاد شده است تا با اندازه‌گیری این عوامل، تنظیمات رله دیستانس به‌صورت لحظه‌ای تعیین شوند.

به طور کلی، اجرای طرح‌های تطبیقی از یک سو، هزینه بالایی دارد و از سوی دیگر، در نظر گرفتن برخی از عدم قطعیت‌ها، مانند مقاومت خطا و خطا در تجهیزات اندازه‌گیری در آن به راحتی امکان‌پذیر نیست؛ از این‌رو، طرح‌های غیر تطبیقی پیشنهاد شده است. در روش‌های غیر تطبیقی، تنظیمات رله به نحوی تعیین می‌شوند که در برابر عدم قطعیت‌های شبکه مقاوم باشد و باعث عملکرد اشتباه رله نشود. در روش‌های غیر تطبیقی، تنظیمات نواحی

عملکرد اشتباه رله شوند. در ادامه، عدم قطعیت‌ها و الگوسازی احتمالی آنها بررسی شده‌اند.

۲-۱- مکان خطا

یکی از انواع عدم قطعیت‌های مؤثر بر عملکرد رله دیستانس، مکان خطا است. با تغییر مکان وقوع خطا در شبکه، امیدانس اندازه‌گیری‌شده با رله نیز تغییر خواهد کرد. بدیهی است با فاصله‌گرفتن مکان خطا از محل رله، امیدانس اندازه‌گیری‌شده با رله نیز افزایش خواهد یافت.

با توجه به اینکه معمولاً امکان وقوع خطا در هر نقطه از خطوط یکسان است؛ بنابراین، در این مقاله عدم قطعیت مکان وقوع خطا با یک تابع توزیع یکنواخت الگوسازی شده است.

۲-۲- نوع خطا

یک خط انتقال در معرض انواع خطاهای سه فاز، دو فاز و تک‌فاز است. با توجه به اینکه امیدانس خطای اندازه‌گیری‌شده با رله به ازای انواع خطاها متفاوت است، نوع خطا نیز ممکن است بر روی عملکرد رله تأثیر داشته باشد. نحوه اندازه‌گیری امیدانس به ازای خطاهای مختلف در [۱۲] آورده شده است. در [۱۳] احتمال وقوع خطای سه فاز، خطای دو فاز، دو فاز به زمین، و خطای تک‌فاز به زمین به ترتیب برابر ۵٪، ۱۵٪، ۱۰٪ و ۷۰٪ در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله نیز از این مقادیر با احتمال وقوع انواع خطاها استفاده شده‌ند.

۲-۳- امیدانس خطا

امیدانس خطا معمولاً شامل امیدانس ناشی از قوس الکتریکی، امیدانس دکل و امیدانس مقاومت زمین است. این امیدانس بیشتر از نوع اهمی است. در واقع، خطاهای فازی امیدانس خطا، همان امیدانس ناشی از قوس الکتریکی، و خطاهای فاز به زمین، امیدانس خطا ناشی از قوس الکتریکی، امیدانس دکل و مقاومت زمین است.

با توجه به اینکه مقادیر امیدانس خطا همواره مثبت است، برای الگوسازی آن از تابع توزیع ویبول استفاده شده

امیدانسی به بررسی شده‌اند و در نهایت نیز تنظیم بهینه رله با توجه به تغییرات این شاخص‌ها تعیین شده است.

در مرجع [۱۰] تنظیم بهینه رله دیستانس با در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری ارائه شده است. در این مقاله، تنظیمات بهینه به نحوی تعیین شده‌اند که رله در مواقع لزوم به درستی عملکرد داشته باشد و در شرایط غیرلزوم، عملکرد نداشته باشد؛ بنابراین، دو شاخص عملکرد درست و عدم عملکرد ناخواسته برای رله دیستانس تعریف شده است.

در مرجع [۱۱] امیدانس دیده‌شده با رله دیستانس آنالیز شده و یک تعریف صریح برای نواحی حفاظتی رله دیستانس براساس حساسیت و هماهنگی ارائه شده است. بر اساس این تعاریف، تنظیم بخش مقاومتی رله چهارضلعی تعیین شده است.

در این مقاله، تنظیم بهینه رله دیستانس با الگوسازی احتمال عدم قطعیت‌ها با هدف حداکثرکردن حساسیت و هماهنگی رله ارائه شده است. عدم قطعیت‌های مؤثر بر عملکرد رله دیستانس شامل مکان خطا، نوع خطا، امیدانس خطا، خطای تجهیزات اندازه‌گیری، تغییر شرایط بهره‌برداری و ساختار شبکه بوده‌اند که به صورت احتمالی، الگوسازی شده‌اند. در ادامه، شاخص‌های احتمالی حساسیت و هماهنگی برای هر یک از نواحی رله دیستانس به صورت مستقل بیان شده‌اند. مسئله تنظیم بهینه رله دیستانس برای هر یک از نواحی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با هدف حداکثرکردن احتمال حساسیت و برقراری هماهنگی کامل تعریف شده است. سپس با ترکیب روش مونت‌کارلو و الگوریتم ژنتیک و معلوم‌بودن توابع چگالی احتمالی هر یک از عدم قطعیت‌ها، مسئله بهینه‌سازی برای هر ناحیه، حل و تنظیمات بهینه آنها محاسبه شده است. نتایج روش پیشنهادی به شبکه ۳۹ شینه IEEE اعمال شده است.

۲- الگوسازی احتمالی عدم قطعیت‌ها

رله‌های دیستانس براساس امیدانس اندازه‌گیری‌شده با رله، عملکرد یا عدم‌عملکرد دارند. وجود برخی عدم قطعیت‌ها ممکن است باعث تغییر این امیدانس و نهایتاً

تغییر جریان خطا شده است که نهایتاً باعث ایجاد خطا در امیدانس اندازه‌گیری شده با رله دیستانس خواهد شد.

تغییرات بار سیستم قدرت را معمولاً با منحنی تداوم بار نشان می‌دهند. در منحنی تداوم بار به میزان تعداد ساعات یکسال (۸۷۶۰ ساعت) نقطه بار در نظر گرفته می‌شود. البته به منظور ساده‌سازی، معمولاً منحنی تداوم بار در سه سطح بار (مثلاً کم باری، میان باری و پر باری) در نظر گرفته می‌شود. بر اساس این، احتمال وقوع هر یک از این سطوح بار بر اساس مدت زمان تداوم هر یک از این سطوح، به صورت یک جدول احتمالی بیان می‌شود.

در این مقاله از تغییرات بار پیشنهادی در [۱۵] استفاده شده است. برای الگوسازی بار، سه سطح بار انتخاب شده که این سطوح بار به همراه احتمالات آن در جدول (۱) آورده شده است. در ستون اول، نسبت سطح بار به حداکثر بار شبکه آورده شده است. همچنین احتمال اینکه هر یک از این سطوح در طول یک سال چه میزان در مدار بوده‌اند، در ستون دوم این جدول آورده شده است.

جدول (۱): الگوسازی تغییرات بار

نسبت سطح بار به حداکثر بار شبکه	احتمال سطح بار
۰/۴۴۰	۰/۱۱۴
۰/۷۸۳	۰/۷۳۰
۱	۰/۱۵۶

۲-۶- خروج واحدهای تولید

چنانچه یکی از واحدهای تولیدی به صورت ناگهانی و یا برنامه‌ریزی شده از مدار خارج شود، به دلیل تغییر سطح اتصال کوتاه، جریان خطا، کاهش و امیدانس دیده شده با رله تغییر می‌یابد؛ از این رو، خروج ژنراتورها نیز در امیدانس دیده شده با رله دیستانس تأثیر می‌گذارد.

در این مقاله، نرخ خروج واحد با احتمال خروج واحد لحاظ شده است. رابطه (۲) نرخ خروج اجباری یک واحد را نشان می‌دهد.

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{m + r} \quad (2)$$

در رابطه فوق، U نرخ خروج واحد، λ نرخ انتقال واحد از حالت عملکرد به حالت خرابی، μ نرخ انتقال واحد از

است [۱۴]. فرمول ریاضی تابع توزیع ویبول در رابطه (۱) آورده شده است.

$$y = ABx^{B-1}e^{-Ax^B} \quad (1)$$

در این رابطه، پارامترهای A و B مقادیری هستند که توزیع ویبول براساس آن تعریف می‌شود. رنج تغییرات امیدانس خطا برای خطاهای فاز به زمین در بازه ۰ تا ۳۰ اهم و درمورد خطاهای سه فاز و دو فاز در بازه ۰ تا ۵ اهم فرض شده‌اند. برای الگوسازی این بازه‌ها برای خطاهای فاز این پارامترها به صورت $A=7.25$ و $B=1.69$ ، و برای خطاهای فاز به زمین به صورت $A=7.65$ و $B=1.25$ در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۴- خطای تجهیزات اندازه‌گیری

با توجه به سطح ولتاژ بالای خطوط شبکه انتقال، برای کاهش جریان و ولتاژ شبکه به مقادیر مجاز استفاده شده در رله‌ها و سایر تجهیزات، از ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ حفاظتی استفاده می‌شود. وجود هر خطایی در این ترانسفورماتورها به بروز خطا در محاسبات امیدانس دیده شده با رله منجر خواهد شد.

کلاس دقت ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ حفاظتی به ترتیب در استانداردهای IEC 60044-1 و IEC 60044-5 آورده شده است. در این مقاله از ترانسفورماتور جریان با کلاس دقت 5P10 و ترانسفورماتور ولتاژ با کلاس دقت 3P استفاده شده است. همچنین برای الگوسازی عدم قطعیت خطای تجهیزات اندازه‌گیری در این مقاله، تابع توزیع نرمال پیشنهاد شده است؛ از این رو، برای ترانسفورماتور جریان، یک تابع توزیع نرمال با انحراف معیار $\sigma=0.016$ و متوسط $\mu=0$ ، و برای ترانسفورماتور ولتاژ، یک تابع توزیع نرمال با انحراف معیار $\sigma=0.01$ و متوسط $\mu=0$ پیشنهاد شده است.

۲-۵- تغییر شرایط بهره‌برداری

میزان تغییر بار در سیستم قدرت باعث تغییر توان انتقالی خطوط می‌شود؛ در نتیجه، ولتاژ شین‌ها نیز تغییر می‌کند. اگرچه تغییر ولتاژ صورت گرفته کم است، باعث

$$P_{s1} = \frac{Z_{s1}}{Z_{t1}} \quad (3)$$

در رابطه فوق Z_{s1} بیان‌کننده تعداد خط‌هایی است که در خط اصلی رله A روی داده و امیدانس آن درون ناحیه اول رله دیده شده است. همچنین Z_{t1} مجموع خط‌های روی داده در داخل خط اصلی است.

از سوی دیگر، تمامی خط‌هایی که در خطوط مجاور رله (غیر از خط اصلی) روی داده و امیدانس دیده شده با رله A خارج از ناحیه حفاظتی اول رله A قرار گرفته است، هماهنگی این ناحیه تعریف می‌شود. در رابطه (۴) شاخص احتمال هماهنگی ناحیه اول رله دیستانس بیان شده است.

$$P_{c1} = \frac{Z_{c1}}{Z_{t11}} \quad (4)$$

در رابطه فوق، Z_{t11} تعداد کل خط‌های رخ داده در خطوط مجاور رله A بوده و Z_{c1} نیز تعدادی از این خط‌هاست که خارج از ناحیه اول رله دیستانس دیده شده است.

۳-۲- شاخص‌های احتمال حساسیت و

هماهنگی ناحیه دوم

وظیفه ناحیه حفاظتی دوم رله دیستانس، پوشش کامل باقیمانده خط اصلی با یک تأخیر زمانی است. به عبارت دیگر، هدف از این ناحیه، عملکرد در مقابل خط‌های واقع شده در باقیمانده خط اصلی است که با ناحیه اول حفاظت نشده است. به منظور جلوگیری از تداخل عملکرد ناحیه اول و دوم رله دیستانس، ناحیه دوم این رله، عملکرد تأخیری دارد. همچنین تنظیم این ناحیه باید به نحوی باشد که با ناحیه دوم رله‌های خطوط بعدی تداخل نداشته باشد.

در رابطه (۵) شاخص حساسیت ناحیه دوم رله A بیان شده است. طبق این رابطه، تمام خط‌هایی که در داخل خط اصلی رله A روی داده و امیدانس آن درون ناحیه حفاظتی دوم رله اصلی دیده شده است، حساسیت این ناحیه تعریف شده است.

$$P_{s2} = \frac{Z_{s2}}{Z_{t1}} \quad (5)$$

حالت خرابی به حالت عملکرد، t مدت زمان تعمیر واحد تولیدی و m مدت زمان در مدار بودن المان است. مقدار نرخ خروج، احتمال در مدار نبودن یک واحد در طول یک باره زمانی را نشان می‌دهد.

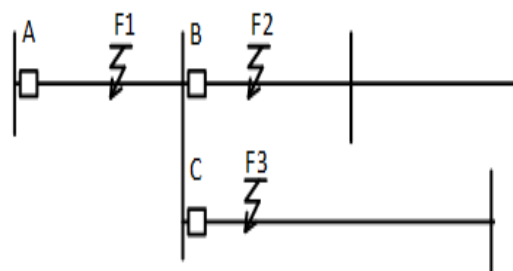
۳- شاخص‌های احتمالی پیشنهادی

نواحی سه‌گانه یک رله دیستانس می‌باید به نحوی تنظیم شود که به ازای خطای موجود در داخل ناحیه حفاظتی، عملکرد صحیحی داشته باشد (حساسیت)، و به ازای خط‌های خارج از ناحیه حفاظتی خود هیچ‌گونه عملکردی نداشته باشد (هماهنگی). طبق این تعاریف برای هر یک از نواحی سه‌گانه رله دیستانس، شاخص‌های حساسیت و هماهنگی پیشنهاد می‌شود.

۳-۱- شاخص‌های احتمال حساسیت و

هماهنگی ناحیه اول

وظیفه ناحیه حفاظتی اول رله دیستانس، عملکرد آنی در مقابل خط‌های واقع شده در خط اصلی و عدم عملکرد در مقابل خط‌های رخ داده در خطوط مجاور است. مطابق شکل (۱)، ناحیه اول رله دیستانس (A) می‌باید به ازای خطای $F1$ عملکرد، و به ازای خط‌های $F2$ و $F3$ هیچ‌گونه عملکردی نداشته باشد.



شکل (۱): وقوع خطا در خط اصلی و خطوط مجاور

مطابق تعریف فوق، تعداد خط‌هایی که در داخل خط اصلی رله A روی داده و امیدانس معادل دیده شده با این رله، داخل ناحیه حفاظتی اول قرار گرفته، حساسیت ناحیه اول تعریف شده است. بر اساس این، شاخص احتمال حساسیت ناحیه اول رله دیستانس به صورت رابطه (۳) بیان شده است.

از سوی دیگر، خطاهایی که در دو خط بعد از رله اصلی و خارج از ناحیه حفاظتی دوم رله‌های خطوط مجاور روی داده است، در صورتی که بیرون از ناحیه سوم رله خط اصلی دیده شود، هماهنگی این ناحیه تعریف می‌شود. مطابق تعریف فوق، شاخص احتمال در نظر گرفته شده برای هماهنگی ناحیه سوم به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$P_{c3} = \frac{Z_{c3}}{Z_{t4}} \quad (۸)$$

در رابطه فوق، Z_{t4} بیان‌کننده تعداد خطاهایی است که در دو خط بعد از رله اصلی و خارج از ناحیه حفاظتی دوم رله‌های خطوط مجاور روی داده است. Z_{c3} نیز تعدادی از این خطاها است که بیرون از ناحیه سوم رله خط اصلی دیده شده است.

۴- فرمول‌بندی مسئله

تنظیمات بهینه رله دیستانس برای نواحی سه‌گانه باید به نحوی تعیین شود که نخست، هماهنگی کامل ایجاد شود و دوم، حساسیت نیز حداکثر شود. در برخی از نواحی رله دیستانس امکان رسیدن به حساسیت و هماهنگی کامل به صورت توأم فراهم می‌شود؛ اما در برخی از نواحی نیز امکان رسیدن به این شرایط مهیا نیست که در این صورت، ایجاد هماهنگی کامل در اولویت است (زیرا با از دست رفتن هماهنگی، بخش بزرگ‌تری از شبکه جدا می‌شود) و حساسیت نیز حداکثر خواهد شد.

از سوی دیگر، تنظیمات رله دیستانس به نوع مشخصه آن بستگی دارد. در رله‌های چهار ضلعی، تنظیم رله بر روی محور R و X طور مستقل امکان‌پذیر است و این امر باعث بهبود مشخصه مقاومتی رله در مقایسه با سایر مشخصه‌های رله دیستانس می‌شود؛ از این رو، این مشخصه امکان در نظر گرفتن مقاومت قوس یا مقاومت خط را به‌طور مؤثری فراهم می‌آورد.

۴-۱- ناحیه اول

برای تعیین تنظیم بهینه ناحیه اول رله دیستانس چهار سناریوی زیر وجود دارد:

در رابطه فوق، Z_{t1} مطابق رابطه (۳) تعداد کل خطاهایی است که در خط اصلی رله A رخ داده است. همچنین Z_{s2} نیز بیان‌کننده تعداد خطاهایی است که در خط اصلی روی داده و امیدانس آن درون ناحیه حفاظتی دوم رله دیستانس A دیده شده است.

تعداد خطاهایی که خارج از ناحیه حفاظتی اول رله‌های خطوط مجاور روی داده است (درون ناحیه حفاظتی دوم) و همچنین خارج از ناحیه دوم رله اصلی دیده شود، هماهنگی ناحیه دوم تعریف می‌شود. در رابطه (۶) شاخص احتمال هماهنگی برای ناحیه دوم بیان شده است.

$$P_{c2} = \frac{Z_{c2}}{Z_{t2}} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، Z_{t2} بیان‌کننده مجموع تعداد خطاهایی است که با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌ها، خارج از ناحیه حفاظتی اول رله‌های خطوط مجاور دیده شده است. همچنین Z_{c2} نیز تعدادی از این خطاها است که خارج از ناحیه دوم رله خط اصلی (رله A) اندازه‌گیری شده است.

۳-۳- شاخص‌های احتمال حساسیت و

هماهنگی ناحیه سوم

ناحیه حفاظتی سوم رله می‌باید پشتیبان کامل رله‌های خطوط بعدی باشد؛ بنابراین، این ناحیه باید در برابر تمامی خطاهای واقع شده در خطوط مجاور بعدی عملکرد داشته باشد. به‌منظور جلوگیری از تداخل عملکرد، این ناحیه یک تأخیر زمانی بیشتر از ناحیه دوم دارد. همچنین ناحیه سوم رله دیستانس باید در برابر خطاهای درون ناحیه سوم رله‌های خطوط مجاور عملکردی نداشته باشد.

در رابطه (۷) شاخص احتمال حساسیت در نظر گرفته شده برای ناحیه سوم آورده شده است. در این رابطه، Z_{s3} بیان‌کننده تعداد خطاهایی است که در خطوط مجاور بعدی روی داده باشد و امیدانس آن، درون ناحیه سوم رله خط اصلی دیده شده است. همچنین Z_{t3} نیز مجموع خطاهای روی داده در خطوط مجاور بعدی است.

$$P_{s3} = \frac{Z_{s3}}{Z_{t3}} \quad (۷)$$

کامل پوشش دهد و نیز تداخلی با ناحیه دوم رله‌های خطوط مجاور نداشته باشد، آن‌گاه احتمال حساسیت و هماهنگی، یک خواهد شد. برای رسیدن به این هدف، این ناحیه می‌باید به نحوی تنظیم شود که امیدانس تنظیم آن از حداکثر امیدانس دیده‌شده در خط اصلی، بیشتر و از حداقل امیدانس دیده‌شده در خطوط مجاور و خارج از ناحیه اول رله‌های آن خطوط، کمتر باشد؛ بنابراین واضح است که بازه‌ای از تنظیمات برای ناحیه دوم رله دیستانس وجود خواهد داشت که احتمال حساسیت و هماهنگی، یک باشند. بنابراین، در این مقاله فرمول‌بندی رابطه (۱۱) برای تعیین تنظیم بهینه ناحیه دوم پیشنهاد می‌شود. در این فرمول‌بندی احتمال حساسیت و هماهنگی به‌صورت قید در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} & \max X_{r2} \\ & \text{Subject to: } \begin{cases} P_{s2} = 1 \\ P_{c2} = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

به عبارت دیگر، در فرمول‌بندی اشاره‌شده، هدف، به دست آوردن بزرگترین تنظیمی است که حساسیت و هماهنگی کامل را داشته باشد. با توجه به اینکه هرچه مقدار X_{r2} بزرگ‌تر باشد، ناحیه دوم رله دیستانس طول بیشتری از خطوط بعدی را به‌عنوان پشتیبان پوشش می‌دهد، بنابراین در این فرمول‌بندی تابع هدف به‌صورت حداکثرکردن X_{r2} در نظر گرفته شده است.

در شرایطی خاص، زمانی که امیدانس خطوط مجاور نسبت به خط اصلی کم باشد، نمی‌توان انتظار داشت که تنظیمی وجود داشته باشد که هر دو شاخص احتمال حساسیت و هماهنگی هم‌زمان یک باشند. به عبارت دیگر، حداکثر امیدانسی که به ازای خط اصلی به دست می‌آید، از حداقل امیدانس دیده‌شده به ازای خط در خارج از ناحیه اول رله‌های مجاور بیشتر است. در این موارد، تابع هدف رابطه (۱۲) برای تنظیم بهینه این ناحیه پیشنهاد می‌شود.

$$\begin{aligned} & \max P_{s2} \\ & \text{Subject to: } P_{c2} = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

در تابع هدف پیشنهادی، هماهنگی و تداخل‌نداشتن با ناحیه دوم رله‌های دیگر اهمیت بیشتری دارد؛ بنابراین،

- سناریوی اول: حداکثرکردن شاخص هماهنگی
- سناریوی دوم: حداکثرکردن شاخص حساسیت
- سناریوی سوم: حداکثرکردن هر دو شاخص حساسیت و هماهنگی
- سناریوی چهارم: حداکثرکردن حساسیت به همراه هماهنگی کامل

در سناریوی اول، ممکن است بسیاری از خطاهای روی‌داده در خط اصلی توسط رله دیده نشوند. همچنین در سناریوی دوم نیز ممکن است بسیاری از خطاهای روی‌داده در خطوط مجاور، به اشتباه با رله اندازه‌گیری شوند. در سناریوی سوم، مسئله تنظیم بهینه ناحیه اول رله دیستانس به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، مطابق رابطه (۹)، تبدیل می‌شود.

$$\begin{cases} \max P_{s1} \\ \max P_{c1} \end{cases} \quad (9)$$

با حل این مسئله، مجموعه‌ای از تنظیمات بهینه رله دیستانس به‌عنوان جواب به دست می‌آیند. با توجه به اهمیتی که طراح برای حساسیت و هماهنگی قائل است، جواب مد نظر از بین مجموعه جواب‌های موجود، انتخاب و تنظیم R_{r1} و X_{r1} مرتبط با آن تعیین می‌شود.

مطابق شکل (۱) از بین رفتن هماهنگی باعث می‌شود تا به ازای خطاهای $F2$ یا $F3$ ، رله خط اصلی (رله A) به جای رله‌های خطوط مجاور عمل کند و در نتیجه، خط اصلی و خط بعدی قطع شوند. به عبارت دیگر، از بین رفتن هماهنگی باعث می‌شود تا در صورت وقوع خطا، ناحیه بزرگتری از شبکه جدا شود. بر اساس این، در این مقاله سناریوی چهارم پیشنهاد می‌شود. این سناریو مطابق رابطه (۱۰) فرمول‌بندی شده است.

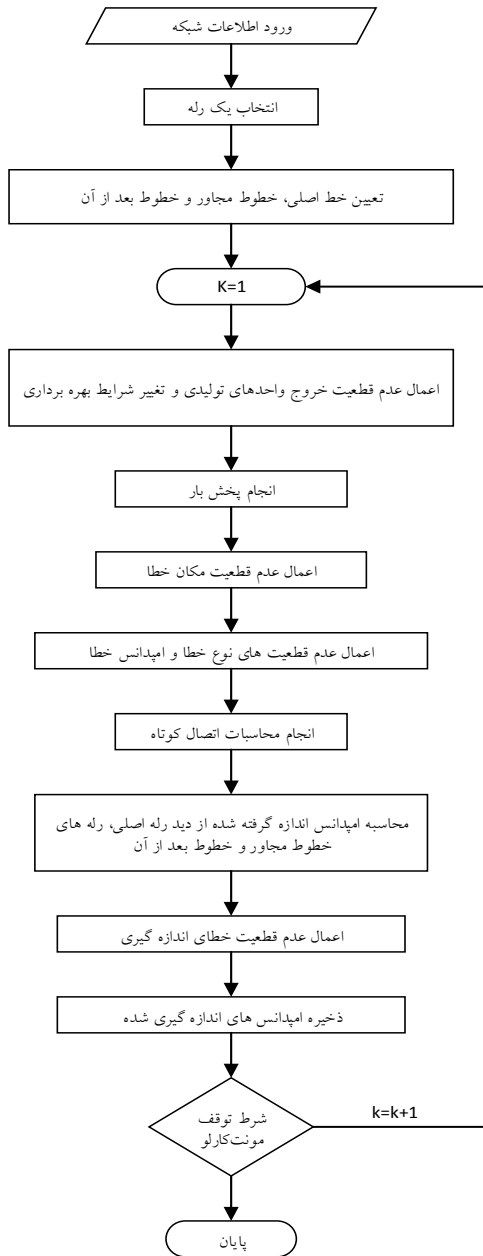
$$\begin{aligned} & \max P_{s1} \\ & \text{Subject to: } P_{c1} = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه فوق، هدف حداکثرکردن شاخص حساسیت ناحیه اول رله دیستانس بوده و هماهنگی نیز به‌صورت یک قید در مسئله لحاظ شده است (هماهنگی کامل).

۴-۱- ناحیه دوم

شاخص‌های احتمال حساسیت و هماهنگی در بخش قبل به نحوی تعریف شد که اگر ناحیه دوم، رله خط اصلی را

آن رله خط اصلی، خطوط مجاور و خطوط بعد از آنها، تعیین و فرآیند مونت کارلو شروع می‌شود.



شکل (۲): الگوریتم محاسبه امیدانس‌های اندازه‌گیری شده با رله

در ابتدای فرآیند مونت کارلو، عدم قطعیت خروج واحدهای تولیدی و تغییر شرایط بهره‌برداری اعمال می‌شوند. برای اعمال عدم قطعیت خروج واحدهای تولیدی با فرض وقوع یک پیشامد در شبکه، ابتدا به تعداد ژنراتورها عدد تصادفی، تولید و سپس با نرخ خروج هر یک از آنها مقایسه می‌شود. در صورتی که این مقدار کمتر از نرخ خروج

هماهنگی، یک قید تعریف می‌شود و شاخص حساسیت نیز حداکثر می‌شود.

۴-۲- ناحیه سوم

برخلاف ناحیه دوم، برای ناحیه سوم تنظیمی یافت نمی‌شود که در آن هر دو شاخص حساسیت و هماهنگی، یک باشند. با توجه به اهمیت بیشتر هماهنگی برای رله دیستانس، فرمول‌بندی رابطه (۱۳) به منظور تعیین تنظیم بهینه ناحیه سوم رله دیستانس پیشنهاد می‌شود.

$$\begin{aligned} \max P_{s3} \\ \text{Subject to: } P_{c3} = 1 \\ R_{r3} < R_L \text{ or } X_{r3} < X_L \end{aligned} \quad (13)$$

در رابطه فوق، R_L و X_L به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی امیدانس بار است. در این فرمول‌بندی، علاوه بر قید هماهنگی، برای جلوگیری از عملکرد رله در برابر امیدانس بار، قید دیگری نیز اضافه شده است. این قید تضمین می‌کند که امیدانس بار همواره خارج از تنظیم ناحیه سوم رله قرار داشته باشد.

۵- روش پیشنهادی

در این بخش، ابتدا به کمک فرآیند مونت کارلو و با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌ها و توابع چگالی احتمالی هر یک از آنها، امیدانس دیده‌شده با رله دیستانس، محاسبه و ذخیره می‌شود. در مرحله بعد مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی برای هر یک از نواحی رله دیستانس با کمک الگوریتم ژنتیک حل می‌شود و تنظیم بهینه نواحی مختلف رله دیستانس به دست می‌آید.

۵-۱- الگوریتم مونت کارلو

در شکل (۲) الگوریتم مونت کارلو پیشنهادی برای محاسبه و ذخیره امیدانس‌های اندازه‌گیری شده با رله با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌ها آورده شده است. در ابتدای الگوریتم، اطلاعات شبکه شامل اطلاعات خطوط، شین‌ها و توابع چگالی احتمالی هر یک از عدم قطعیت‌ها وارد می‌شوند. سپس یک رله، انتخاب و برای

$$Z_{ap} = \frac{V_R(1 + \varepsilon_V)}{I_R(1 + \varepsilon_I)} \quad (14)$$

در رابطه فوق، Z_{ap} امپدانس اندازه‌گیری شده با رله و I_R و V_R به ترتیب ولتاژ محل رله و جریان رله است. همچنین ε_V و ε_I نیز اعداد تصادفی هستند که براساس توابع چگالی پیشنهادی در بخش ۲-۴ ایجاد شده‌اند.

مراحل فوق، آنقدر تکرار می‌شوند تا تابع چگالی کاملی برای امپدانس دیده‌شده با رله به دست آید. امپدانس‌های به‌دست‌آمده به ازای خطا در خط اصلی، خطوط مجاور و خطوط بعد از آنها در متغیرهای جداگانه ذخیره می‌شوند تا در بخش بعدی از آنها به‌عنوان ورودی الگوریتم بهینه‌سازی برای تنظیم بهینه نواحی مختلف رله دیستانس استفاده شود.

۵-۲- الگوریتم بهینه‌سازی

در بخش قبل، مسئله تعیین تنظیم بهینه نواحی مختلف رله دیستانس به چندین مسئله بهینه‌سازی تبدیل شد. برای حل این مسائل غیرخطی و مقید از الگوریتم‌های هوشمند استفاده می‌شود. در این مقاله از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه ژنتیک استفاده شده است [۱۶، ۱۷]

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های جست‌وجوی تصادفی و برگرفته از طبیعت است. فرآیند این الگوریتم به نحوی است که ابتدا یک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شود. این جمعیت مجموعه‌ای از رشته‌های ژنتیک پیشنهادی است که حاوی تنظیم یک ناحیه رله دیستانس هستند. سپس برای محاسبه برازندگی هر رشته، ابتدا باید هر رشته رمزگشایی شود تا مقدار مقاومت و راکتانس تنظیمی رله به دست آید. در ادامه با معلوم‌بودن تنظیمات رله و امپدانس دیده‌شده با رله که از بخش قبل به دست آمده است، احتمال حساسیت و هماهنگی برای آن ناحیه محاسبه می‌شود. سپس تابع هدف برای هر رشته ژنتیک، محاسبه و برازندگی آن تعیین می‌شود. با توجه به مقادیر برازندگی هر رشته، رشته‌های برتر (رشته‌هایی با مقدار برازندگی بیشتر)، انتخاب و عملگرهای جابه‌جایی و جهش به آنها اعمال می‌شود تا رشته‌های فرزند در نسل بعدی ایجاد شود. همچنین در هر تکرار، تعدادی از بهترین رشته‌ها ذخیره

یک واحد باشد، آن واحد از مدار خارج می‌شود. همچنین به‌منظور بررسی تغییرات شرایط بهره‌برداری، یک عدد تصادفی (بین صفر و یک) به‌صورت یکنواخت، تولید و سپس با احتمالات سطوح بار مقایسه می‌شود که به‌صورت تابع توزیع تجمعی تعریف شده‌اند و یکی از این سطوح انتخاب می‌شود. سپس این سطح بار به بارهای شبکه اعمال می‌شود. به دلیل وابسته‌بودن میزان تولید واحدهای تولیدی به میزان بار موجود در شبکه، پس از محاسبه و معلوم‌شدن سطح بار انتخابی و همچنین با معلوم‌شدن حضورداشتن یا نداشتن هر یک از واحدهای تولیدی، مقدار تولید هر واحد نیز اصلاح می‌شود.

در مرحله بعد، محاسبات پخش بار اجرا می‌شود تا ولتاژ شین‌ها قبل از خطا محاسبه شود. همچنین برای الگوسازی عدم‌قطعیت مکان خطا، ابتدا یکی از خطوط مرتبط با رله (خط اصلی یا خطوط مجاور) انتخاب می‌شود. بدیهی است برای تنظیم نواحی مختلف رله به وجود خطا در خط اصلی تا دست‌کم دو خط بعد از آن نیاز است. سپس به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت، مکان وقوع خطا در آن خط تعیین می‌شود.

برای الگوسازی عدم‌قطعیت نوع خطا، ابتدا احتمال وقوع نوع خطا با توجه به احتمال هر یک به‌صورت یک تابع توزیع تجمعی تعریف می‌شوند. سپس با ایجاد یک عدد تصادفی و مقایسه آن با این توزیع تجمعی تعریف‌شده، یکی از خطاهای سه فاز متقارن، فاز به فاز، دو فاز به زمین و یا خطای تک‌فاز به زمین انتخاب می‌شود. عدم‌قطعیت امپدانس خطا نیز با توجه به توابع چگالی پیشنهادی در بخش ۲-۳ به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود.

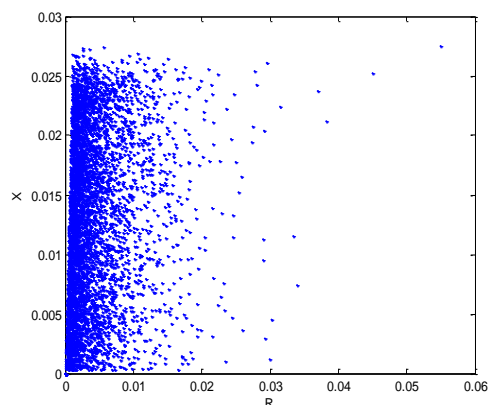
با معلوم‌بودن مکان خطا، نوع خطا و امپدانس خطا، محاسبات اتصال کوتاه انجام می‌شود و ولتاژ محل نصب رله و جریان عبوری از رله به دست می‌آید و امپدانس دیده‌شده با رله محاسبه می‌شود.

در آخرین مرحله از فرآیند تکرار مونت‌کارلو خطای تجهیزات اندازه‌گیری با توجه به توابع چگالی احتمالی آنها، به‌صورت تصادفی تولید می‌شود و در رابطه پیشنهادی (۱۴) قرار می‌گیرد. سپس امپدانس به‌دست‌آمده ذخیره می‌شود.

در این بخش، تنظیمات بهینه سه ناحیه رله دیستانس R_1 تعیین می‌شود. بدیهی است رله‌های دیگر شبکه به‌طور مشابه تنظیم خواهند شد. چون تنظیم این رله به رله‌های خطوط دیگر نیز وابسته است، رله‌های خطوط بعدی نیز به صورت R_2 ، R_3 و R_4 نشان داده شده‌اند. همچنین خط اصلی رله R_1 با L_1 ، خط مجاور با L_2 و خطوط بعدی آن نیز به ترتیب با L_{31} و L_{32} نشان داده شده‌اند.

۶-۱- اعمال الگوریتم مونت کارلو

در ابتدا الگوریتم مونت کارلو پیشنهادی در بخش ۵-۱ اعمال شده است و امپدانس اندازه‌گیری شده با رله R_1 به ازای خط در خط اصلی (L_1)، خط مجاور (L_2) و خطوط بعد از آن (L_{31} و L_{32}) ذخیره شده است. تعداد تکرار مونت کارلو ۲۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب امپدانس‌های اندازه‌گیری شده با رله R_1 را به ازای خط در خط اصلی (L_1)، خط مجاور (L_2) و خطوط بعد از آن (L_{31} و L_{32}) را بر حسب پریونیت نشان می‌دهند. نقاط نشان داده شده در این شکل‌ها بیان‌کننده امپدانس دیده شده با رله R_1 هستند. همچنین محور افقی بیان‌کننده قسمت حقیقی امپدانس و محور عمودی نیز بیانگر قسمت موهومی آن است.



شکل (۵): امپدانس دیده شده با R_1 به ازای خط در خط L_1 با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

می‌شوند تا بهترین آنها از بین نرود. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا شرط توقف الگوریتم برقرار شود. در این مقاله، شرط توقف الگوریتم، ثابت ماندن جواب‌ها به ازای تعداد تکرارهای تعیین شده است.

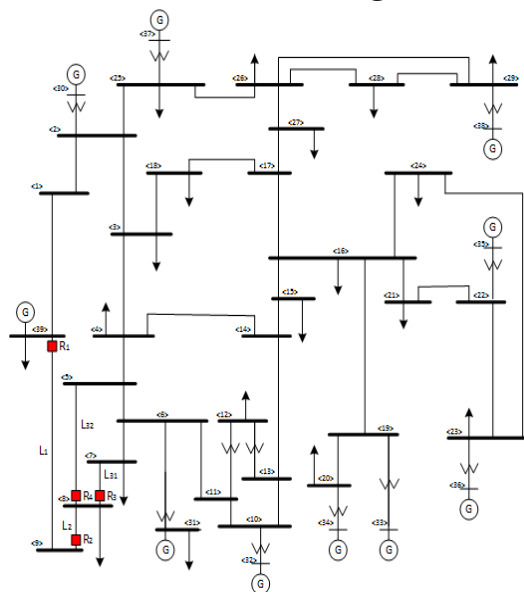
متغیرهای تصمیم در مسائل بهینه‌سازی برای هر یک از نواحی سه‌گانه رله دیستانس، همان تنظیمات نواحی مختلف آن هستند. با توجه به اینکه مشخصه چهار ضلعی برای رله دیستانس در نظر گرفته شده است، تنظیمات مشخصه مقاومتی (R_f) و مشخصه راکتانسی (X_f) رشته‌های ژنتیک پیشنهادی، در شکل (۳) آورده شده است.



شکل (۳): ساختار کروموزوم در الگوریتم بهینه‌سازی

۶-۲ نتایج عددی

برای اعمال روش پیشنهادی، شبکه ۳۹ شینه IEEE مطابق شکل (۴) در نظر گرفته شده است. این شبکه ۱۰ ژنراتور با مجموع تولید ۶۱۵۰ مگاوات، ۳۶ خط انتقال، ۱۲ ترانسفورماتور و ۱۹ بار دارد. ولتاژ شبکه ۳۴۵ کیلوولت و فرکانس آن نیز برابر ۶۰ هرتز است. همچنین این شبکه ۷۲ رله دیستانس با مشخصه چهار ضلعی دارد. سایر مشخصات این شبکه در مرجع [۱۸] آورده شده است.

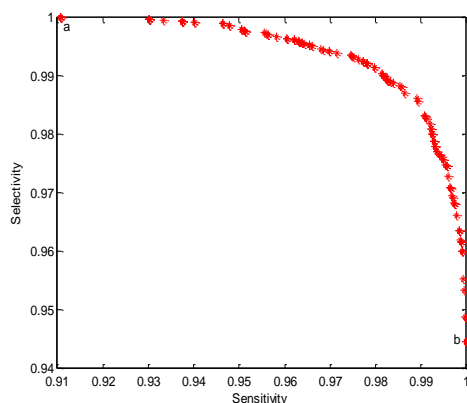


شکل (۴): شبکه ۳۹ شینه IEEE

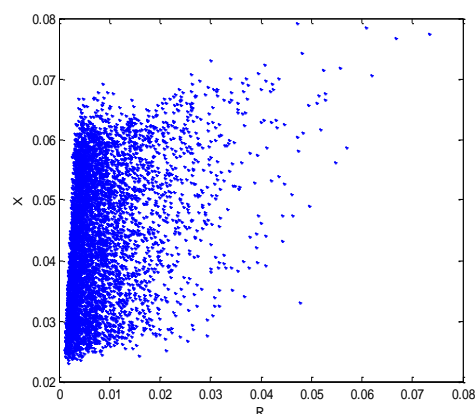
شرایط، مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌شود. با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه، مسئله بهینه‌سازی حل شده و مجموعه جواب‌های بهینه برای تنظیم ناحیه اول رله R_1 مطابق شکل (۸) حاصل شده است.

با توجه به اینکه در این سناریو، اهداف حداکثر کردن احتمال حساسیت و همچنین حداکثر کردن احتمال هماهنگی مدنظر بوده است، بنابراین، در شکل فوق، محور افقی، احتمال حساسیت و محور عمودی، احتمال هماهنگی را نشان می‌دهند. هر یک از نقاط این شکل بیان‌کننده یک جواب بهینه برای تنظیم ناحیه اول رله R_1 با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها است. طراح با توجه به اهمیتی که برای حساسیت و هماهنگی قائل است، می‌تواند یکی از این نقاط را انتخاب کند. برای مثال، اگر نقطه a انتخاب شود، هماهنگی کامل برقرار است؛ اما احتمال حساسیت 0.9107 خواهد بود. همچنین اگر نقطه b انتخاب شود، حساسیت کامل برقرار است؛ اما احتمال هماهنگی 0.9445 خواهد بود.

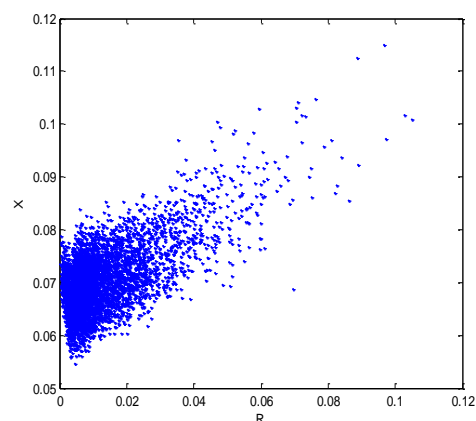
در سناریوی دوم، هدف، حداکثر کردن احتمال حساسیت است و احتمال هماهنگی نیز به صورت یک قید می‌باید یک شود؛ از این رو، مسئله بهینه‌سازی، یک مسئله تک‌هدفه بوده است و با اعمال الگوریتم ژنتیک به این مسئله نقطه بهینه آن به دست می‌آید. در این حالت تنظیم بهینه برای ناحیه اول، رله R_1 به صورت $Rr=0.0385$ pu و دقیقاً همان نقطه a در شکل (۸) است.



شکل (۸): مجموعه جواب حاصل از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی برای تنظیم ناحیه اول



شکل (۶): امیدانس دیده‌شده با R_1 به ازای خط در خط L_2 با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها



شکل (۷): امیدانس دیده‌شده با R_1 به ازای خط در خطوط L_{31} و L_{32} با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

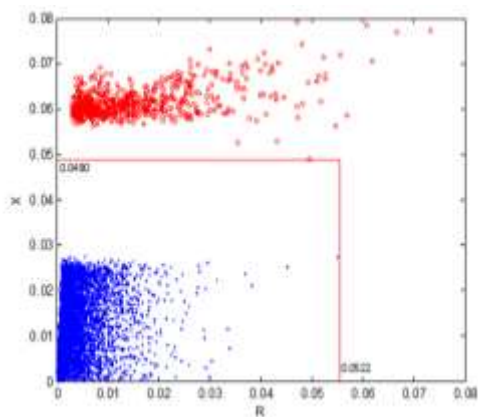
۶-۲- اعمال الگوریتم بهینه‌سازی

پس از ذخیره امیدانس‌های اندازه‌گیری شده با رله R_1 ، الگوریتم بهینه‌سازی برای هر یک از نواحی سه‌گانه رله دیستانس R_1 اجرا می‌شود. تعداد تکرارهای در نظر گرفته شده برای این الگوریتم بهینه‌سازی ۱۰۰۰، جمعیت اولیه ۲۰۰ و احتمال جابه‌جایی و جهش نیز به ترتیب برابر ۰/۸۵ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

۶-۲-۱- تنظیم بهینه ناحیه اول

در بخش ۴-۱ دو سناریو برای تنظیم بهینه ناحیه اول رله دیستانس پیشنهاد شد. در سناریوی اول، تابع هدف حداکثر کردن احتمال حساسیت و هماهنگی است. در این

تنظیمات بهینه به صورت $R_r=0.0596$ و $X_r=0.0427$ پرونیبت به دست آمده است.



شکل (۹): امیدانس دیده شده با R_1 به ازای خط در L_1 و خط در خارج از ناحیه اول R_2 به همراه تنظیم ناحیه دوم R_1

۶-۲-۳- تنظیم بهینه ناحیه سوم

امیدانس دیده شده با رله R_1 به ازای خط در خط L_2 با فرآیند مونت کارلو محاسبه شده و در شکل (۱۰) آورده شده است. همچنین امیدانس دیده شده با رله R_1 به ازای خط در خطوط L_{31} و L_{32} و خارج از ناحیه دوم رله R_2 با فرآیند مونت کارلو محاسبه و در شکل (۱۱) آورده شده است. با حل مسئله پیشنهادی (رابطه (۱۳)) به کمک الگوریتم ژنتیک، تنظیمات بهینه ناحیه سوم رله دیستانس R_1 به صورت $R_r=0.0683$ و $X_r=0.0693$ به دست آمده است. به ازای این پاسخ، احتمال حساسیت برابر 0.9861 و احتمال هماهنگی نیز یک است. درخور ذکر است امیدانس بار برابر $Z_L=0.12+0.06j$ بوده است که خارج از تنظیم پیشنهادی ناحیه سوم رله R_1 قرار دارد.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تنظیمات بهینه ناحیه سوم رله R_1 آورده شده است. با توجه به شکل (۱۰)، به ازای تنظیم پیشنهادی بسیاری از خط‌های روی داده در خط مجاور (L_2) پوشش داده شده است؛ اما درصدی از این خط‌ها نیز پوشش داده نشده است. همچنین مطابق شکل (۱۱) به ازای تنظیم پیشنهادی ناحیه سوم رله R_1 تمامی خط‌های روی داده در خارج از ناحیه دوم رله R_2 بیرون از این تنظیم دیده شده است (احتمال هماهنگی یک است).

با توجه به اینکه برای تنظیم نواحی بعدی رله R_1 ، به تنظیمات بهینه ناحیه اول رله‌های R_2 ، R_3 و R_4 نیاز است، سناریوی دوم پیشنهادی به این رله‌ها نیز اعمال شده و تنظیمات بهینه ناحیه اول آنها به دست آمده است. نتایج حاصل از تنظیم بهینه ناحیه اول این رله‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): تنظیم ناحیه اول رله‌های خطوط بعد

P_{c1}	P_{s1}	X_r (pu)	R_r (pu)	
1	0.8995	0.0342	0.0494	رله R_2
1	0.8523	0.0101	0.0262	رله R_3
1	0.9138	0.0258	0.0395	رله R_4

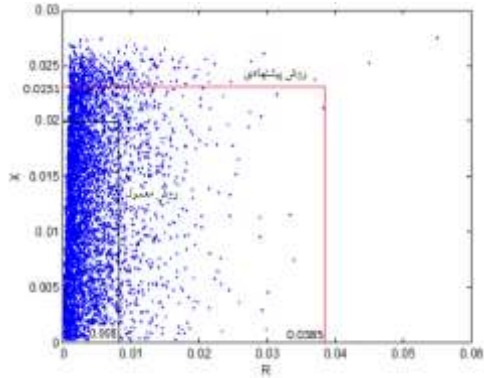
۶-۲-۶- تنظیم بهینه ناحیه دوم

امیدانس دیده شده با رله R_1 به ازای خط در خط L_1 و همچنین به ازای خط در خارج از ناحیه اول رله R_2 با فرآیند مونت کارلو محاسبه شده و در شکل (۹) یکجا آورده شده است. در این شکل، امیدانس اندازه‌گیری شده با رله R_1 به ازای خط در خط اصلی به صورت نقطه و امیدانس‌های خارج از ناحیه اول رله R_2 نیز به صورت دایره‌های توخالی نشان داده شده‌اند.

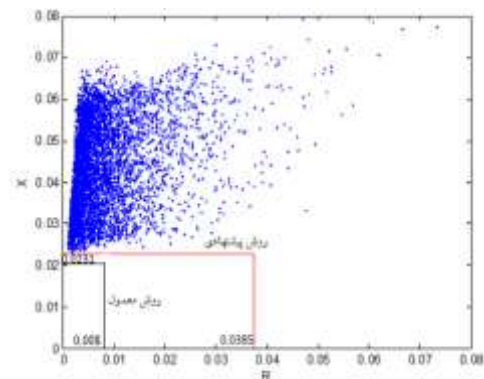
مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی برای تعیین تنظیم بهینه ناحیه دوم (رابطه (۱۱)) با کمک الگوریتم ژنتیک برای رله R_1 حل شده و تنظیم بهینه آن به صورت $R_r=0.0522$ و $X_r=0.0490$ به دست آمده است. این تنظیمات در شکل (۹) به صورت یک چهار ضلعی نشان داده شده است. در این شکل، به ازای تنظیم پیشنهادی برای ناحیه دوم تمامی خط‌های روی داده در خط اصلی پوشش داده شده (احتمال حساسیت یک است) و همچنین خط‌های خارج از ناحیه اول R_2 نیز بیرون مشخصه ناحیه دوم رله R_1 دیده شده است (احتمال هماهنگی یک است). همچنین تنظیمات ارائه شده در شکل (۹) بزرگ‌ترین تنظیمی است که به ازای آنها احتمال حساسیت و هماهنگی، یک است.

با توجه به اینکه برای تنظیم ناحیه سوم رله R_1 به تنظیمات ناحیه دوم رله R_2 نیاز است، فرآیند پیشنهادی برای تعیین تنظیم بهینه ناحیه دوم رله R_2 تکرار شده و

پیشنهادی نیز در این شکل‌ها آورده شده است.



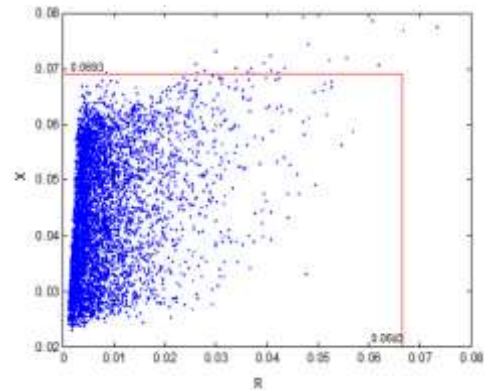
شکل (۱۲): امپدانس دیده‌شده با رله R_1 به ازای خط داخل خط L_1 به همراه تنظیمات روش سنتی و روش پیشنهادی



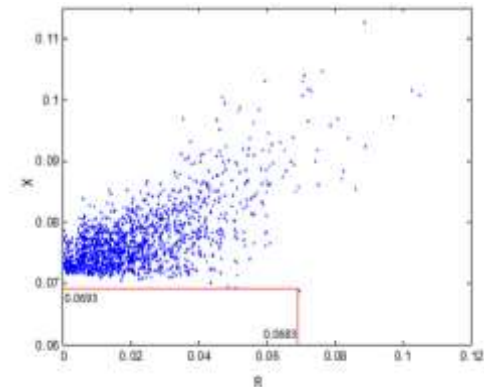
شکل (۱۳): امپدانس دیده‌شده با رله R_1 به ازای خط خارج خط L_1 به همراه تنظیمات روش سنتی و روش پیشنهادی

مطابق شکل (۱۲)، رله دیستانس به ازای خطای داخلی، در صورت استفاده از تنظیمات روش پیشنهادی، ناحیه بیشتری را پوشش آنی خواهد است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، ضرایب حساسیت در روش پیشنهادی و روش سنتی به ترتیب 0.9107 و 0.7251 هستند؛ بنابراین، ضریب حساسیت در روش پیشنهادی به مراتب بیشتر از روش سنتی است.

در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود به ازای خطاهای خارجی در صورت استفاده از هر یک از تنظیمات روش سنتی و پیشنهادی، هیچ خطایی در داخل این نواحی قرار ندارد و رله، عملکرد ندارد؛ بنابراین، شاخص هماهنگی در هر دو روش یک است. روش پیشنهادی، ناحیه بزرگ‌تری را پوشش داده است؛ اما هماهنگی در این روش نیز مشابه روش سنتی کامل است.



شکل (۱۰): امپدانس دیده‌شده با رله R_1 به ازای خط در خط L_2 به همراه تنظیم بهینه ناحیه سوم رله R_1



شکل (۱۱): امپدانس دیده‌شده با رله R_1 به ازای خط در خطوط L_{31} و L_{32} و خارج از ناحیه دوم رله R_2 به همراه تنظیم بهینه ناحیه سوم رله R_1

۶-۳- مقایسه نتایج با روش سنتی

در روش سنتی، تنظیم نواحی رله دیستانس به صورت درصدی از امپدانس خط اصلی و خطوط بعدی تعیین می‌شود. براساس روش سنتی، تنظیم ناحیه اول حدوداً ۸۰ درصد امپدانس خط اصلی انتخاب می‌شود؛ بنابراین، تنظیم ناحیه اول رله R_1 براساس روش سنتی $R_r=0.008$ pu و $X_r=0.02$ pu انتخاب می‌شود؛ در صورتی که براساس روش پیشنهادی $R_r=0.0385$ pu و $X_r=0.0231$ pu تعیین شد. در ادامه این دو تنظیم با یکدیگر مقایسه می‌شود.

امپدانس دیده‌شده با رله R_1 به ازای خط در داخل خط اصلی L_1 و خارج خط اصلی L_1 با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. همچنین تنظیمات روش سنتی و روش

فرمول‌بندی‌های ارائه‌شده، به‌خوبی حساسیت و هماهنگی لازم برای هر یک از نواحی رله دیستانس را براساس فلسفه حفاظتی آن ناحیه ایجاد کرده‌اند.

مراجع

- [1] Rodolakis, T. and Crevier, D., "Effect of Loads, Shunts and System Uncertainties on Short Circuit Relays Settings," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 12, pp. 4701-4709, 1981.
- [2] Sidhu, T. S., Baltazar, D. S., Palomino, R. M. and Sachdev, M. S., "A new approach for calculating zone-2 setting of distance relays and its use in an adaptive protection system," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, pp. 70-77, 2004.
- [3] Taghizadeh, M., Sadeh, J., Bashir, M. and Kamyab, E., "Effect of single phase to ground fault with arc resistance on the performance of distance relay," 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1-5, 2011.
- [4] He, B., Li, Y. and Bo, Z. Q., "An adaptive distance relay based on transient error estimation of CVT," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, pp. 1856-1861, 2006.
- [5] Dubey, R. K., Samantaray, S. R. and Panigrahi, B. K., "Adaptive distance relaying scheme for transmission network connecting wind farms," Electric Power Components and Systems, Vol. 42, pp. 1181-1193, 2014.
- [6] Ziegler, G., Numerical distance protection: principles and applications: John Wiley & Sons, 2011.
- [7] Sorrentino, E. and De Andrade, V., "Optimal-probabilistic method to compute the reach settings of distance relays," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, pp. 1522-1529, 2011.
- [8] Thongchai, P., Boonsang, S. and Kulworawanichpong, T., "Effect of Generator Outage Contingency on Distance Relay Operation," Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 2012, pp. 1-4.
- [9] Zhang, W.-H., Lee, S.-J. And Choi, M.-S., "A Probabilistic Approach to the Protection Capability Evaluation of Distance Relay in Transmission Systems," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, pp. 407-414, 2010.
- [10] Zhang, W. and Zhang Y., "Determination of optimal setting parameters of distance relay in transmission systems," IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver Colorado, July 2015, pp. 1-5.
- [11] Sorrentino, E., Rojas, E. and Hernández, J., "Method for setting the resistive reach of quadrilateral characteristics of distance relays,"

امپدانس ناحیه دوم رله R_1 در روش سنتی برابر امپدانس خط اصلی و ۵۰ درصد امپدانس کوتاه‌ترین خط بعدی محاسبه شده است ($R_r=0.0215 \text{ pu}$ و $X_r=0.04315 \text{ pu}$). ضرایب حساسیت و هماهنگی برای ناحیه دوم رله در صورت استفاده از هر یک از تنظیمات روش سنتی یا روش پیشنهادی برابر یک خواهد بود؛ یعنی در هر دو روش ناحیه دوم رله هماهنگی و حساسیت کامل را دارد؛ اما با توجه به اینکه امپدانس تنظیمی در روش پیشنهادی ($X_r=0.0522 \text{ pu}$ و $R_r=0.049 \text{ pu}$) بیشتر است؛ بنابراین، روش پیشنهادی، ناحیه بزرگ‌تری از خط بعدی را به‌عنوان حفاظت پشتیبان پوشش می‌دهد.

همچنین در صورت استفاده از روش سنتی برای تنظیم ناحیه سوم رله R_1 ضرایب حساسیت و هماهنگی به ترتیب 0.6821 و 1 خواهند بود؛ در صورتی که در روش پیشنهادی ضرایب حساسیت و هماهنگی به ترتیب 0.9861 و 1 بوده‌اند؛ در نتیجه، ناحیه سوم رله دیستانس در روش پیشنهادی ناحیه بزرگ‌تری از خطوط بعدی را به‌عنوان حفاظت پشتیبان، پوشش می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی به‌منظور تنظیم احتمالی رله‌های دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مؤثر بر عملکرد رله‌های دیستانس ارائه شده است. برای این منظور، ابتدا عدم قطعیت‌های مؤثر در عملکرد رله‌های دیستانس معرفی شده و سپس برای هر یک از آنها توابع احتمالی مناسبی تعریف شده است. سپس با تعریف احتمال حساسیت و هماهنگی برای هر یک از نواحی رله دیستانس، یک فرمول‌بندی ارائه شده است. تابع هدف و قیود هر یک از این فرمول‌بندی‌ها براساس فلسفه حفاظتی نواحی سه‌گانه رله دیستانس ارائه شده‌اند.

برای اعمال عدم قطعیت‌ها، از فرآیند تکرار مونت‌کارلو و برای حل مسئله بهینه‌سازی نواحی سه‌گانه رله دیستانس از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه و چندهدفه استفاده شده است.

روش پیشنهادی به یکی از رله‌های شبکه ۳۹ شینه IEEE اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد

- [15] Subcommittee, P., "IEEE reliability test system," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 2047-2054, 1979.
- [16] Zhou, M. and Sun, S., "Principle and application of genetic algorithm," National Defense Industry Press, Beijing, 1999.
- [17] Deb, K., Pratap, A., Agarwa, S. and Meyarivan, T., "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, pp. 182-197, 2002.
- [18] Pai, A., Energy function analysis for power system stability: Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] Tleis, N., Power systems modelling and fault analysis: theory and practice: Newnes, 2007.
- [13] Gonen, T., Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design: CRC Press, 2011.
- [14] Barnard, J. and Pahwa, A., "Determination of the impacts of high impedance faults on protection of power distribution systems using a probabilistic model," Electric power systems research, Vol. 28, pp. 11-18, 1993.
- Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, 2009, pp. 1-5.

