

تنظیم بهینه رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

عباس صابری نوقابی^۱، استادیار؛ نادر هاتفی ترشیزی^۲، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - a.saberi@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - n.hatefi@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک روش بهینه‌سازی برای تعیین تنظیم نواحی حفاظتی رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها ارائه شده است. امپدانس دیده‌شده توسط رله دیستانس به عوامل زیادی از جمله شرایط وقوع خطا، تغییر ساختار شبکه، خطای اندازه‌گیری و شرایط بهره‌برداری وابسته است؛ بنابراین، در بسیاری از موارد امکان تنظیم رله با حضور این عوامل به‌طوری که هماهنگی و حساسیت کامل برقرار باشد، امکان‌پذیر نیست. در این مقاله ضرایب حساسیت و هماهنگی به ترتیب بر اساس تعداد عملکردها به‌ازای خطاهای داخل و خارج ناحیه به‌صورت نسبی تعریف شده است. سپس مسئله تنظیم رله دیستانس به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مدل گردیده که تابع هدف آن، مجموع وزن‌دار ضرایب حساسیت و هماهنگی است. همچنین با توجه به این‌که هر عدم قطعیت توسط تابع توزیع احتمالی متفاوتی مدل‌سازی شده است، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای اعمال آن عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده گردیده است. در انتها، روش اشاره‌شده به شبکه دارای ۱۴ شین IEEE اعمال گردیده و تنظیمات به‌دست‌آمده با نتایج روش سنتی مقایسه شده است. همچنین اثر تغییر وزن ضریب حساسیت و هماهنگی بر تنظیمات نواحی مختلف رله دیستانس بررسی و تحلیل گردیده است.

واژه‌های کلیدی: تنظیم بهینه رله دیستانس، ضریب حساسیت، ضریب هماهنگی، شبیه‌سازی مونت کارلو، الگوریتم ژنتیک.

Optimal Setting of Distance Relay considering Uncertainties

Abbas Saberi Noghabi¹, Assistant Professor; Nader Hatefi Torshizi², PhD Student

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: a.saberi@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: n.hatefi@birjand.ac.ir

Abstract: This paper presents an optimization method for setting the distance relay zones considering uncertainties. The impedance seen by the distance relay depends on many factors, including fault conditions, changes in the network topology, measurement error and the operation condition; so, in many cases it is not possible to set the relay in the presence of uncertainties that caused coordination and sensitivity completely. In this paper, the coefficient of sensitivity and coordination defined as proportion of number of internal and external faults of zone respectively. Then the problem of distance relay setting is modeled as an optimization problem where the objective function is a weighted sum of sensitivity and coordination coefficient. Since the uncertainties are modeled by a probability distribution function differently, Monte Carlo simulation method is used to apply them. The Genetic algorithm is used to solve the optimization problem. Finally, the method has been applied to IEEE 14 bus test system and obtained settings have been compared with result of traditional methods. Also, the effects of coefficients weight variation of sensitivity and coordination on settings of distance relay zones have been analyzed.

Keywords: Optimal setting of distance relay, Sensitivity coefficient, Coordination coefficient, Monte Carlo simulation, Genetic algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۸ و ۱۳۹۳/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۹

نام نویسنده مسئول: عباس صابری نوقابی

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

۱- مقدمه

رله‌های دیستانس به‌عنوان حفاظت اصلی در شبکه انتقال و فوق توزیع استفاده می‌شود. این نوع رله‌ها با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در ابتدای خط امیدانس خط را محاسبه نموده و با مقایسه آن با امیدانس تنظیم رله فرمان عملکرد یا عدم عملکرد را صادر می‌نمایند.

بدیهی است هر عاملی که باعث وقوع خطا در جریان و ولتاژ اندازه‌گیری شده گردد، باعث عملکرد نادرست رله دیستانس خواهد شد. تغییرات در شرایط بهره‌برداری شبکه، تغییرات ساختار شبکه، تغییرات در شرایط وقوع خطا و همچنین خطاهای مربوط به ترانسفورماتورهای حفاظتی از جمله عواملی هستند که باعث ایجاد خطا در جریان و ولتاژ دیده‌شده توسط رله دیستانس گردیده و می‌تواند عملکرد نادرست رله را به‌همراه داشته باشد.

به‌منظور رفع این مشکل در روش معمول تنظیم رله دیستانس به‌صورت محافظه‌کارانه درصدی از امیدانس خطوط انتخاب شده تا در صورت وقوع خطا خارج خط تداخل در عملکرد رله‌ها رخ ندهد [۱]. برخی مقالات در جهت رفع این مشکل، حفاظت تطبیقی را پیشنهاد کرده‌اند. در مراجع [۷-۲] تنظیمات رله دیستانس به‌صورت تطبیقی تحت شرایط تغییرات بار، نوسان توان و مقاومت خطا صورت پذیرفته است. در مرجع [۸] چندین نوع مشخصه عملکردی در رله برای شرایط سیستمی متفاوت جهت رفع خطای ناشی از بارهای دینامیکی پیشنهاد شده است. مشکل عمده این دو راهکار هزینه بالا آن‌ها است. همچنین در نظر گرفتن برخی عدم قطعیت‌ها همانند اندازه مقاومت خطا و دقت ترانس‌های حفاظتی، به‌راحتی امکان‌پذیر نیست.

برخی دیگر از مقالات به‌دنبال یافتن یک پاسخ مقاوم در برابر تمام این عدم قطعیت‌ها بوده‌اند؛ اما یافتن یک پاسخ که هماهنگی و حساسیت کامل رله دیستانس را ایجاد کند، در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نیست. در مراجع [۹-۱۳] هماهنگی و حساسیت رله دیستانس به‌صورت احتمالی تعریف گردیده و با حداکثر کردن این احتمال، تنظیمات بهینه رله به‌دست آمده است. در مقالات [۹، ۱۰] احتمال وقوع خطا به‌صورت تابع توزیع احتمال یکنواخت و گوسی در نظر گرفته‌شده است. در مرجع [۱۱] نیز از یک روش احتمالی برای تنظیم رله دیستانس استفاده گردیده است. در مرجع [۱۲] احتمال عدم هماهنگی و عدم حساسیت برای رله دیستانس تعریف و تنظیم آن به‌نحوی تعیین گردیده که این احتمالات حداقل گردد. در مرجع [۱۳] عدم قطعیت‌ها در مسئله تنظیم بهینه رله دیستانس به‌صورت احتمالی مدل گردیده است. همچنین عدم قطعیت‌ها بر اساس تابع هدف تعریف‌شده اولویت‌بندی گردیده است.

در این مقاله مسئله تنظیم بهینه رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل گردیده است. برای این منظور ابتدا عدم قطعیت‌های تأثیرگذار بر تنظیم رله دیستانس شامل شرایط وقوع خطا، تغییر ساختار شبکه، خطای اندازه‌گیری و شرایط بهره‌برداری بررسی گردیده و از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مدل‌سازی

آن استفاده گردیده است. در ادامه، ضرایب حساسیت و هماهنگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به‌ترتیب بر اساس تعداد عملکردها به‌ازای خطاهای داخل و خارج ناحیه به‌صورت نسبی تعریف شده است. ضرایب حساسیت و هماهنگی برای ناحیه اول، دوم و سوم رله دیستانس تعریف گردیده و تابع هدف مسئله بهینه‌سازی به‌صورت مجموع وزن‌دار آن ضرایب برای هر ناحیه تعریف گردیده است. در ادامه، از روش الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی به‌منظور تعیین تنظیم بهینه نواحی مختلف رله‌های دیستانس استفاده گردیده است. در انتها نتایج به یک شبکه نمونه اعمال گردیده و روش پیشنهادی ارزیابی گردیده است.

۲- عدم قطعیت‌ها در تنظیم رله دیستانس

عدم قطعیت‌هایی که بر تنظیم رله دیستانس تأثیرگذار هستند را می‌توان به چهار دسته زیر تقسیم نمود:

الف: تغییر شرایط بهره‌برداری شبکه همانند تغییر تولید، تغییر بار و تغییر ضریب قدرت باعث تغییر ولتاژ شین قبل از وقوع خطا گردیده و بر امیدانس دیده‌شده توسط رله تأثیرگذار است. تغییرات این عوامل در طول یک دوره زمانی با معلوم بودن منحنی بار قابل استخراج است.

ب: تغییر ساختار شبکه همچون خروج خطوط و واحدهای تولیدی باعث تغییر امیدانس شبکه گردیده و بر جریان و ولتاژ اتصال کوتاه تأثیرگذار است.

ج: نوع خطا، مقاومت خطا و مکان وقوع به‌شدت بر امیدانس دیده‌شده توسط رله دیستانس تأثیرگذار است.

د: خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ و جریان نیز بر امیدانس دیده‌شده توسط رله تأثیرگذار است. خطای ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان بر اساس کلاس دقت آن‌ها تعیین می‌گردد.

با در نظر گرفتن تمامی این عدم قطعیت‌ها، امیدانس معادل دیده‌شده از دیدگاه رله دیستانس (Z_{seen}) مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد [۱۲]:

$$Z_{seen} = F(COC, CNS, FC, EMD) \quad (1)$$

که در این رابطه، COC تغییرات شرایط بهره‌برداری، CNS تغییرات ساختار شبکه، FC شرایط وقوع خطا و EMD خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری است.

در نتیجه برای هر ترکیبی از عدم قطعیت‌ها ولتاژ محل خطا و جریان خطای عبوری از رله دیستانس محاسبه گردیده و امیدانس دیده‌شده توسط رله (Z_{seen}) محاسبه می‌گردد.

۳- فرمول‌بندی مسئله

در این قسمت ابتدا با تعریف دو شاخص هماهنگی و حساسیت، تابع هدف به‌صورت مجموع ضرایب وزن‌دار شاخص‌های فوق تعریف شده است. در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو سیستم به‌همراه کلیه عدم قطعیت‌ها شبیه‌سازی شده و در انتها با اعمال روش ژنتیک مسئله بهینه‌سازی حل شده است.

۳-۱- تعریف ضرایب حساسیت و هماهنگی

رله دیستانس باید به نحوی تنظیم گردد که به ازای تمامی خطاهای داخل ناحیه حفاظتی عملکرد داشته (حساسیت کامل) و به ازای تمامی خطاهای خارج ناحیه حفاظتی عملکرد نداشته باشد (هماهنگی کامل)؛ اما در عمل با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها پیدا کردن چنین تنظیمی که حساسیت و هماهنگی کامل برای نواحی مختلف رله دیستانس را به همراه داشته باشد، امکان‌پذیر نیست. به عبارت دیگر در برخی موارد ممکن است رله به ازای خطاهای خارجی عملکرد داشته باشد (عدم هماهنگی) و یا به ازای خطاهای داخلی عملکرد نداشته باشد (عدم حساسیت).

در این مقاله، مسئله تنظیم بهینه نواحی حفاظتی رله‌های دیستانس به نحوی تعریف گردیده است که احتمال هماهنگی و حساسیت حداکثر گردد. برای این منظور ابتدا ضرایب هماهنگی و حساسیت تعریف گردیده، سپس تابع هدف بیان می‌گردد.

با توجه به این که رله دیستانس به ازای درصدی از خطاهای داخلی عملکرد دارد، ضریب حساسیت K_S به صورت نسبت تعداد عملکردهای رله به تعداد کل خطاها طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$K_S = \frac{N_S}{N_{T_S}} \quad (2)$$

که در آن، N_S تعداد خطاهای داخل ناحیه حفاظتی است که رله عملکرد دارد و N_{T_S} تعداد کل خطاهای داخل ناحیه حفاظتی است.

در ادامه به دلیل متفاوت بودن خطای داخلی برای نواحی مختلف رله دیستانس، N_S و N_{T_S} برای هر یک از نواحی سه‌گانه رله دیستانس تعریف می‌گردد.

ناحیه اول: با توجه به این که خطی که رله ابتدای آن قرار گرفته، ناحیه اول رله دیستانس است، تعداد کل خطاهای داخل خط رله (خطاهای داخلی) N_{T_1} و تعدادی از آن خطاها که رله به ازای آن‌ها عملکرد دارد N_S خواهد بود (امپدانس دیده شده توسط رله از امپدانس تنظیم ناحیه اول رله کوچک‌تر می‌باشد).

ناحیه دوم: این ناحیه می‌بایست مابقی خط که توسط ناحیه اول پوشش داده نشده را کامل پوشش دهد، لذا حساسیت آن مشابه ناحیه اول تعریف می‌شود. البته هماهنگی آن با هماهنگی ناحیه اول متفاوت خواهد بود.

ناحیه سوم: این ناحیه به عنوان حفاظت پشتیبان تمام خطوط بعدی عمل می‌کند. بنابراین N_{T_3} تعداد کل خطاهای داخل اولین خطوط متصل به خط اصلی رله بوده و N_S تعدادی از این خطاها است که ناحیه سوم رله به ازای آن‌ها عملکرد دارد (یعنی امپدانس معادل اندازه‌گیری شده از امپدانس تنظیم ناحیه سوم رله کوچک‌تر باشد).

ضریب هماهنگی K_C برای خطاهای خارجی مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$K_C = \frac{N_C}{N_{T_C}} \quad (3)$$

که در آن، N_C تعداد خطاهای خارج ناحیه حفاظتی است که رله عملکرد ندارد و N_{T_C} تعداد کل خطاهای خارج ناحیه حفاظتی است. در ادامه به دلیل متفاوت بودن خطای خارجی برای تنظیم نواحی مختلف رله دیستانس، N_C و N_{T_C} برای هر یک از نواحی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

ناحیه اول: با توجه به این که خطای خارج خط اصلی به عنوان خطای خارجی در ناحیه اول رله دیستانس شناخته می‌شود، N_{T_C} تعداد کل خطاهای واقع شده در اولین خطوط متصل به خط اصلی رله می‌باشد. همچنین N_C تعدادی از این خطاها است که رله به ازای آن عملکرد ندارد (امپدانس دیده شده توسط رله از امپدانس تنظیم ناحیه اول رله بزرگ‌تر است).

ناحیه دوم: این رله باید پشتیبان ناحیه اول رله‌های اولین خطوط بعدی باشد در حالی که به ازای خطاهای داخل ناحیه دوم رله‌های این خطوط عملکرد نداشته باشد. لذا N_{T_C} تعداد کل خطاهای واقع شده در اولین خطوط بعدی و خارج ناحیه اول رله‌های آن خطوط بوده و N_C تعدادی از این خطاها است که رله خط اصلی به ازای آن‌ها عملکرد ندارد (امپدانس‌های فوق از امپدانس تنظیم ناحیه دوم رله خط اصلی بزرگ‌تر باشد).

ناحیه سوم: این ناحیه باید پشتیبان ناحیه دوم رله خط بعدی باشد، به طوری که به ازای خطاهای داخل ناحیه سوم رله‌های خطوط بعدی نباید عملکرد داشته باشد. لذا N_{T_C} تعداد کل خطاهای واقع شده در دومین خطوط بعدی و خارج ناحیه دوم رله‌های اولین خطوط بعدی بوده و N_C تعدادی از این خطاها است که رله به ازای آن‌ها عملکرد ندارد (امپدانس‌های فوق از امپدانس تنظیم ناحیه سوم رله خط اصلی بزرگ‌تر باشد).

۳-۲- تابع هدف

تنظیم ایده‌آل برای نواحی مختلف رله دیستانس تنظیمی است که به ازای تمامی عدم قطعیت‌ها در شرایط مختلف وقوع خطا در شبکه، ضرایب هماهنگی و حساسیت برابر یک گردد. امام یافتن چنین پاسخی در عمل امکان‌پذیر نیست. لذا تابع هدف در این مقاله حداکثر کردن مجموع وزن‌دار این دو ضریب مطابق رابطه زیر تعریف گردیده است.

$$MAX F = W_1 \times K_S + W_2 \times K_C \quad (4)$$

که در این رابطه ضرایب وزنی W_1 و W_2 به ترتیب مربوط به اهمیت هماهنگی و حساسیت می‌باشد. با تغییر هر یک از این ضرایب به نحوی که همواره مجموع ضرایب یک باشد، می‌توان اهمیت هماهنگی و حساسیت را تغییر داد.

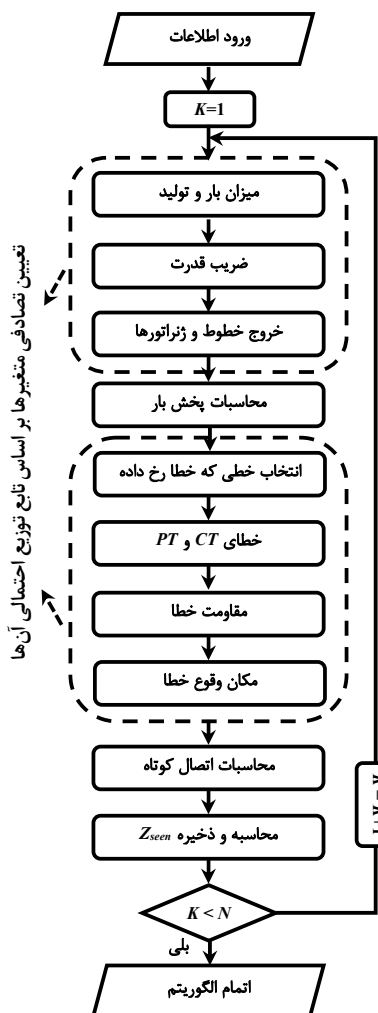
با توجه به این که K_C و K_S برای هر ناحیه متفاوت تعریف گردیده، تابع هدف نیز برای هر ناحیه رله دیستانس متفاوت خواهد بود. لذا امکان متفاوت بودن ضرایب W_1 و W_2 برای نواحی حفاظتی مختلف رله وجود دارد. به عنوان مثال در تنظیم ناحیه اول یک رله دیستانس، اهمیت هماهنگی از حساسیت بیشتر بوده در حالی که در

تصادفی تعیین گردیده است. اندازه بار و تولید به صورت تصادفی بر اساس منحنی تداوم بار سالیانه انتخاب گردیده و برای ضریب قدرت یک تابع توزیع نامتقارن انتخاب گردیده است. در ادامه با توجه به نرخ خروج خطوط و واحدها، خروج یا عدم خروج خطوط و واحدها تعیین گردیده است.

پس از اعمال این سه عدم قطعیت به سیستم، پخش بار انجام شده و ولتاژ شین‌ها قبل از وقوع اتصال کوتاه محاسبه و ذخیره شده است. در بخش دوم الگوریتم شکل ۲ عدم قطعیت‌های مربوط به خطا به صورت تصادفی تعیین گردیده است. ابتدا خطی از شبکه که خطا در آن واقع شده تعیین می‌گردد. برای این منظور با توجه به احتمال عدم دسترس پذیری هر خط و رابطه (۵) احتمال وقوع خطا در هر خط محاسبه شده و با تولید یک عدد تصادفی (بین صفر تا ۱)، خطی که خطا در آن واقع شده تعیین می‌گردد.

$$P_{L_i} = \frac{FOR_i}{\sum_{k=1}^{N_L} FOR_k} \quad (5)$$

P_{L_i} احتمال خروج خط i ام و FOR_i نرخ خروج خط i ام و N_L تعداد خطوط شبکه می‌باشد.



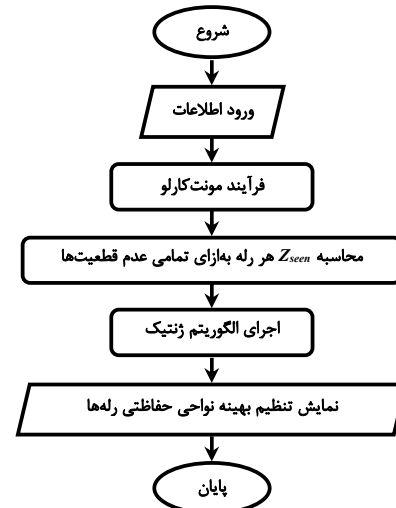
شکل ۲: الگوریتم شبیه‌سازی مونت کارلو

تنظیم ناحیه دوم، حساسیت اهمیت بیشتری خواهد داشت. همچنین، تابع هدف برای هر رله شبکه می‌تواند متفاوت تعریف گردد.

۴- الگوریتم پیشنهادی تنظیم بهینه رله‌ها

در این بخش از ترکیب روش شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین تنظیم بهینه رله‌های دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها استفاده گردیده است. الگوریتم کلی پیشنهادی در شکل ۱ آورده شده است.

در این الگوریتم ابتدا توسط فرآیند مونت کارلو عدم قطعیت‌ها مدل‌سازی گردیده و امیدانس دیده‌شده توسط هر رله به‌زای خطا در نقاط مختلف شبکه محاسبه گردیده است.



شکل ۱: الگوریتم کلی پیشنهادی

سپس با معلوم بودن امیدانس خطای دیده‌شده، تنظیمات بهینه نواحی مختلف رله دیستانس با استفاده از الگوریتم ژنتیک با هدف حداکثر کردن تابع هدف محاسبه گردیده است.

۴-۱- شبیه‌سازی مونت کارلو

الگوریتم ارائه‌شده برای روش مونت کارلو بدین صورت است که ابتدا توابع احتمالی هر عدم قطعیت تولید شده و سپس طی هر تکرار مقادیر هر کدام از عدم قطعیت‌های مذکور با توجه به تابع توزیع احتمال مربوطه، به صورت تصادفی تعیین می‌شوند. شکل ۲ الگوریتم بیان‌شده را نمایش می‌دهد.

در ابتدای الگوریتم اطلاعات شبکه شامل اطلاعات شین‌ها و خطوط و واحدهای تولیدی و همچنین اطلاعات عدم قطعیت‌ها شامل تابع توزیع احتمال، مقدار متوسط و انحراف معیار آن‌ها فراخوانی شده است. سپس تکرار مونت کارلو شروع شده و با توجه به تغییرات عدم قطعیت‌ها و تابع توزیع احتمالی آن‌ها، یک مقدار تصادفی برای هر کدام محاسبه شده است.

در ابتدای فرآیند مونت کارلو، عدم قطعیت‌های قبل وقوع خطا شامل اندازه بار، اندازه تولید، ضریب قدرت و ساختار شبکه به صورت

بوده، فرآیند الگوریتم ژنتیک برای محاسبه تنظیم بهینه ناحیه اول هر رله مستقل اجرا گردیده و تنظیم بهینه ناحیه اول تمامی رله‌ها به دست می‌آید.

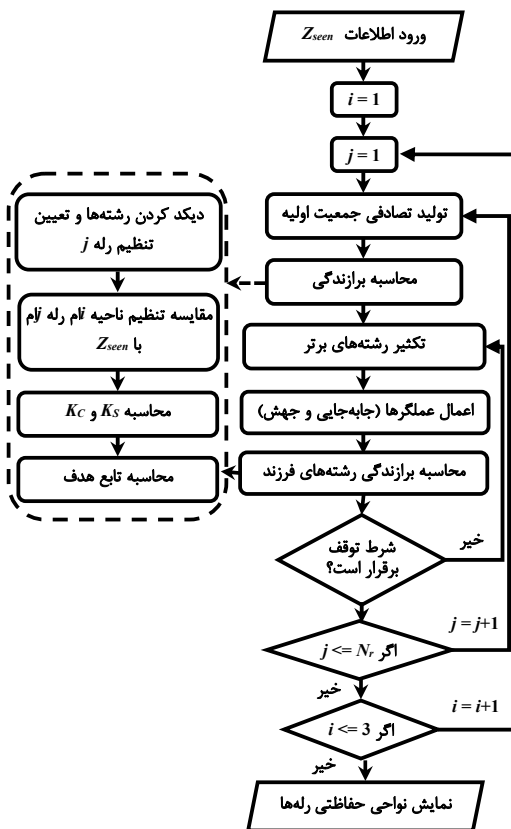
بدیهی است برای تنظیم ناحیه دوم و سوم رله‌ها مجدداً فرآیند الگوریتم ژنتیک برای هر رله تکرار گردیده تا تنظیمات بهینه تمامی رله‌ها با معلوم بودن تنظیمات نواحی اول آن‌ها به دست آید.

۴-۲-۲- اعمال الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت، فرآیند کلی الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین تنظیم بهینه نواحی سه‌گانه هر رله مطابق شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۱: رشته ژنتیک پیشنهادی برای تنظیم ناحیه اول یک رله

مقاومت ناحیه اول رله				راکتانس ناحیه اول رله			
۱	۱	۰	...	۰	۱	۰	۱



شکل ۳: الگوریتم پیشنهادی

در ابتدا، نتایج امپدانس خطای دیده‌شده توسط هر رله به‌ازای تمام عدم قطعیت‌ها که توسط شبیه‌سازی مونت‌کارلو در بخش قبل به دست آمد، به‌عنوان ورودی به الگوریتم ژنتیک پیشنهادی اعمال می‌گردد. در این الگوریتم Z شماره رله و i شماره ناحیه حفاظتی آن رله می‌باشد. در

در ادامه خطای ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان به‌صورت توزیع احتمالی نرمال مدل‌سازی گردیده است. همچنین با توجه به تغییرات نامتقارن مقاومت خطا، تابع توزیع ویبول انتخاب گردیده است. در انتها، مکان وقوع خطا نیز به‌صورت یکنواخت در طول خط در نظر گرفته شده است.

با معلوم بودن اندازه هر یک از عدم قطعیت‌ها محاسبات اتصال کوتاه انجام شده و جریان‌های اتصال کوتاه خطوط، ولتاژ شین‌ها و امپدانس معادل خطای دیده‌شده از دید رله همان خط و رله‌های اولین و دومین خطوط قبل رله اصلی خط محاسبه و ذخیره شده است.

گام‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو آن‌قدر تکرار می‌گردد تا توابع توزیع احتمال هر یک از عدم قطعیت‌ها با بیشترین دقت مدل‌سازی گردد. در انتها برای هر خط یک سری امپدانس معادل خطای دیده‌شده توسط رله‌ها در بانک اطلاعاتی Z_{seen} ذخیره گردیده است. این اطلاعات برای هر رله شامل دو بخش است:

- ۱- امپدانس دیده‌شده به‌ازای خطا در داخل ناحیه حفاظتی رله
- ۲- امپدانس دیده‌شده به‌ازای خطا در خارج ناحیه حفاظت رله

۴-۲-۴ الگوریتم ژنتیک

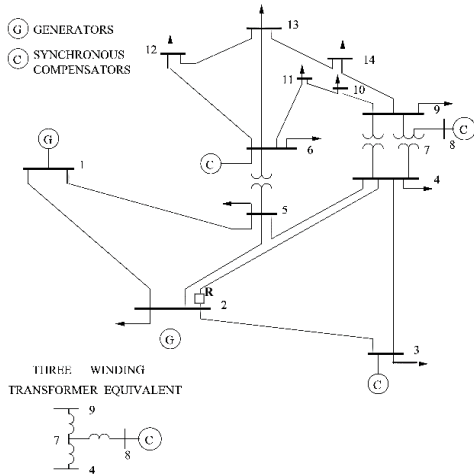
تنظیمات رله دیستانس باید به‌نحوی تعیین شود که با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌های بیان‌شده در بخش ۴-۱، تابع هدف حداکثر گردد. در این بخش الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله بهینه‌سازی پیشنهاد گردیده است.

روند اجرایی الگوریتم ژنتیک به این‌صورت است که پس از تولید رشته ژنتیک اولیه، یک تابع برازندگی برای رشته‌ها بر اساس میزان ارزش آن‌ها (از طریق سنجش با معیار تابع هدف) تعریف می‌گردد. سپس عملگرهای جاب‌جایی و جهش به رشته‌های والد اعمال شده تا رشته‌های ژنتیک فرزند تولید شوند. در ادامه، همه افراد جمعیت جدید از طریق مقایسه مقدار برازندگی مربوطه، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. چنانچه شرایط خاتمه فراهم باشد، الگوریتم پایان می‌پذیرد و در غیر این‌صورت جمعیت موجود به‌عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۲-۴-۱ کدگذاری متغیرها

متغیر مسئله بهینه‌سازی که همان امپدانس تنظیم رله می‌باشد، بایستی به‌شکل رشته ژنتیک کدگذاری گردد. در این مقاله از کدگذاری باینری استفاده شده است. تعداد بیت‌های مورد استفاده برای کدگذاری متغیرها، به‌دقت مورد نظر برای متغیرها وابسته است. در جدول ۱ یک نمونه رشته ژنتیک پیشنهادی برای تنظیم ناحیه اول یک رله آورده شده است.

در این شکل بخش اول مقاومت ناحیه اول رله و بخش دوم راکتانس ناحیه اول رله را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه برای ناحیه دوم و سوم رله دیستانس می‌توان یک رشته مطابق شکل بالا انتخاب نمود. با توجه به این‌که تنظیم ناحیه یک تمامی رله‌ها مستقل از همدیگر



شکل ۴: شبکه مورد مطالعه

۵-۱- اعمال شبیه‌سازی مونت کارلو

در این بخش الگوریتم مونت کارلو شکل ۲ به شبکه نمونه اعمال گردیده است.

برای این شبکه منحنی تداوم بار برای ۸۷۳۶ ساعت سال با توجه به داده‌های مرجع [۱۵] مدل‌سازی گردیده و با توجه به سطوح بار به‌دست‌آمده و اطلاعات حالت پایه، سطح تولید هر واحد نیز مشخص گردیده است. بازه تغییرات ضریب قدرت بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ و مقدار متوسط آن ۰/۹، مقاومت خطا بین ۰ تا ۱۰ اهم و مقدار متوسط آن ۱ اهم در نظر گرفته شده است [۱۲]. از تابع توزیع نامتقارن و بی‌بیل برای شبیه‌سازی منحنی احتمالی ضریب قدرت و مقاومت خطا استفاده گردیده است [۱۶]. نرخ خروج هر خط و واحد تولیدی مطابق مرجع [۱۵] در نظر گرفته شده است.

کلاس دقت ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری و انحراف معیار مربوطه $\mu = 1^{PU}$ و $\sigma_r = 0.03$ و $\sigma_l = 0.05$ منظور گردیده و از تابع توزیع احتمال نرمال برای شبیه‌سازی آن استفاده گردیده است.

با معلوم بودن تابع توزیع عدم قطعیت‌ها، فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو یک میلیون بار تکرار گردیده و برای هر یک از نواحی حفاظتی رله دیستانس مورد مطالعه دو دسته امپدانس به‌ازای خطا داخل و خارج ناحیه حفاظتی رله محاسبه گردیده است.

تابع توزیع چگالی احتمال امپدانس خطاهای داخل و خارج ناحیه حفاظتی اول رله R به‌ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. در تنظیم ناحیه حفاظتی اول این رله، خطاهای داخل ناحیه شامل خطاهایی است که داخل خط ۲-۴ رخ داده و خطاهای خارج ناحیه شامل خطاهای واقع شده در خطوط ۳-۴ و ۴-۵ می‌باشد.

مطابق شکل ۵، متوسط امپدانس خطاهای واقع شده داخل ناحیه حفاظتی اول رله برابر $Z_{mean} = R + jX = 1.2695 + j0.0831$ و انحراف معیار $\sigma = 1.1008$ می‌باشد.

ادامه با معلوم بودن i و z الگوریتم ژنتیک برای تعیین تنظیم بهینه ناحیه i رله z اجرا می‌گردد.

در ادامه یک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی انتخاب شده است. این جمعیت مجموعه‌ای از رشته‌های ژنتیک پیشنهادی بوده که حاوی تنظیم ناحیه حفاظتی نام رله می‌باشد. سپس برای محاسبه برازندگی هر رشته، ابتدا بایستی هر رشته رمزگشایی گردیده تا مقدار مقاومت و راکتانس تنظیمی رله به‌دست آید. سپس امپدانس دیده‌شده توسط رله زبه‌ازای خطاهای داخلی و خارجی ناحیه i رله (Z_{seen})، با مقاومت و راکتانس تنظیمی به‌دست‌آمده از رشته‌های ژنتیک مقایسه گردیده و ضرایب K_C و K_S برای ناحیه i رله زبه‌دست می‌آید. با معلوم بودن این ضرایب، تابع هدف و تابع برازندگی برای این رشته محاسبه می‌گردد. سپس محاسبه برازندگی برای تمامی رشته‌های جمعیت تکرار می‌گردد.

با توجه به مقادیر برازندگی به‌دست‌آمده برای هر رشته، رشته‌های برتر (رشته‌های دارای مقدار برازندگی بیشتر) انتخاب و تکثیر گردیده و عملگرهای جابجایی و جهش به رشته‌ها اعمال گردیده تا رشته‌های فرزند در نسل بعدی ایجاد گردد. همچنین در هر تکرار تعدادی از بهترین رشته‌ها ذخیره شده تا بهترین رشته حذف نگردد.

این فرآیند آن‌قدر تکرار می‌گردد تا شرط توقف الگوریتم برقرار گردد. در این مقاله شرط توقف الگوریتم تغییر نکردن جواب به‌ازای تعداد تکرارهای ثابت در نظر گرفته شده است.

با اتمام این مرحله، تنظیم بهینه ناحیه اول رله یک تعیین می‌شود. حال بایستی این مراحل برای ناحیه اول سایر رله‌ها تکرار گردد. سپس این مراحل به‌ترتیب برای تعیین تنظیمات بهینه نواحی دوم و سوم تمامی رله‌ها با در نظر گرفتن امپدانس مشخصه نواحی اول و دوم تکرار می‌شود.

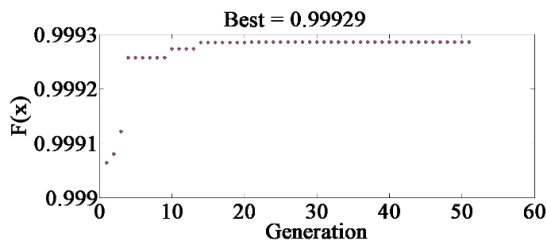
۵- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور اعمال و ارزیابی روش پیشنهادی از شبکه ۱۴ شینه IEEE مطابق شکل ۴ استفاده گردیده است. این شبکه دارای ۱۶ خط و ۳۲ رله دیستانس می‌باشد. اطلاعات مربوط به امپدانس خطوط، بارها و ضرایب قدرت آن‌ها و اطلاعات مربوط به واحدهای تولیدی در مرجع [۱۴] آورده شده است.

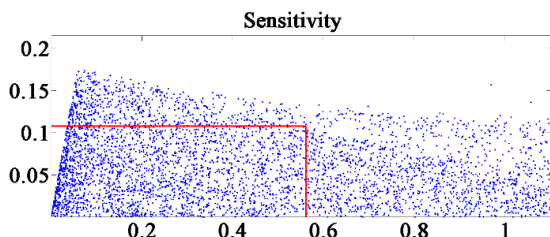
الگوریتم پیشنهادی در این مقاله به رله ابتدای خط ۲-۴ (رله R) مطابق شکل، اعمال گردیده است. برای این رله، خط اصلی، خط ۲-۴ و اولین خطوط بعدی، خطوط ۳-۴ و ۴-۵ و دومین خطوط بعدی، خطوط ۲-۳ و ۳-۴ می‌باشند. حفاظت اصلی خط ۲-۴ و حفاظت پشتیبان خطوط بعدی آن بر عهده رله R می‌باشد. بدیهی است الگوریتم پیشنهادی در این مقاله به‌طور مشابه به سایر رله‌ها این شبکه نیز قابل اعمال خواهد بود.

مشاهده می‌گردد پس از حدوداً ۱۵ تکرار جواب بهینه به‌دست آمده است. در این شکل محور افقی تعداد تکرار و محور عمودی اندازه تابع هدف را نشان می‌دهد. نتایج تنظیم بهینه ناحیه یک رله دیستانس با اجرای الگوریتم ژنتیک مقدار $Z = 0.562 + j0.107$ و تابع هدف 0.9928 به‌دست آمده است.

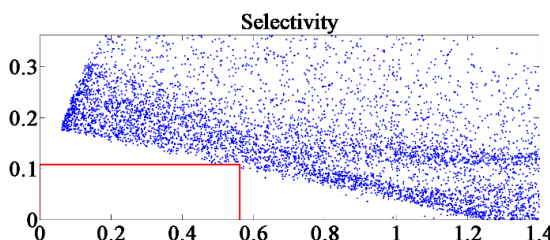
امپدانس‌های اندازه‌گیری‌شده توسط رله R با توجه به نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌ازای خطای داخل خط اصلی رله به‌صورت نقطه‌ای در شکل ۸ آورده شده است. در این شکل همچنین تنظیم بهینه ناحیه اول رله دیستانس R که از الگوریتم ژنتیک به‌دست آمد به‌صورت مستطیلی نشان داده شده است. تعداد کل خطاها در این شکل ۸۰۲۵ عدد بوده که تعداد ۲۲۹۰ خطا داخل ناحیه حفاظتی قرار گرفته و ضریب حساسیت رله 0.285 به‌دست آمده است. در شکل ۹ امپدانس‌های اندازه‌گیری‌شده توسط رله R به‌ازای خطای خارج خط اصلی رله آورده شده است.



شکل ۷: روند همگرایی الگوریتم ژنتیک و مقدار بهینه تابع هدف

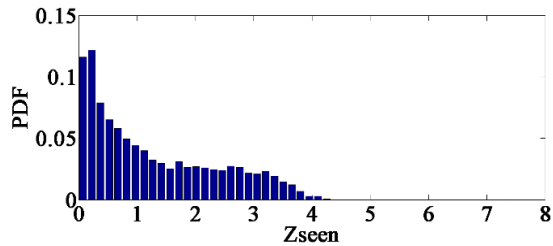


شکل ۸: امپدانس‌های اندازه‌گیری‌شده رله R به‌ازای خطاهای داخل ناحیه حفاظتی اول

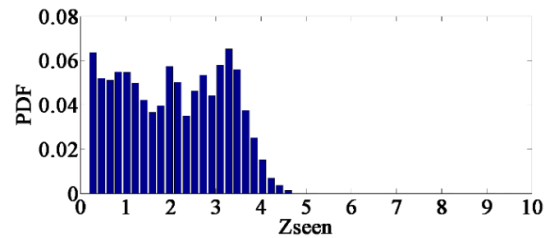


شکل ۹: امپدانس‌های اندازه‌گیری‌شده رله R به‌ازای خطاهای خارج ناحیه حفاظتی اول

تعداد کل خطاها در این شکل ۱۷۹۵۹ عدد بوده که تعداد ۱۷۹۵۹ خطا خارج ناحیه حفاظتی قرار گرفته و ضریب هماهنگی رله ۱ به‌دست آمده است.



شکل ۵: تابع توزیع احتمال امپدانس خطاهای داخل ناحیه حفاظتی اول



شکل ۶: تابع توزیع احتمال امپدانس خطاهای خارج ناحیه حفاظتی اول

لازم به ذکر است، امپدانس خط ۴-۲ که حفاظت اصلی آن به عهده رله R است برابر $Z = 0.05811 + j0.17632$ می‌باشد.

مطابق شکل ۶، متوسط امپدانس خطاهای واقع شده خارج ناحیه حفاظتی اول رله برابر $Z_{mean} = 2.0364 + j0.1854$ و انحراف معیار $\sigma = 1.1640$ می‌باشد. همچنین متوسط امپدانس خطاهای واقع شده داخل ناحیه حفاظتی دوم رله برابر $Z_{mean} = 1.6818 + j0.0960$ و انحراف معیار $\sigma = 1.0431$ و متوسط امپدانس خطاهای واقع شده خارج ناحیه حفاظتی دوم رله برابر $Z_{mean} = 2.1380 + j0.1900$ و انحراف معیار $\sigma = 1.0757$ می‌باشد.

متوسط و انحراف معیار امپدانس خطاهای واقع شده داخل ناحیه حفاظتی سوم رله برابر $Z_{mean} = 2.0126 + j0.1835$ ، $\sigma = 1.1855$ و به‌ازای خطاهای واقع شده خارج ناحیه حفاظتی سوم برابر $Z_{mean} = 3.5365 + j0.5333$ ، $\sigma = 3.9221$ می‌باشد.

۵-۲- اعمال الگوریتم ژنتیک

در این قسمت با توجه به امپدانس‌های خطا به‌دست آمده در بخش قبل توسط شبیه‌سازی مونت‌کارلو، الگوریتم پیشنهادی ژنتیک به رله مورد نظر اعمال گردیده است. تعداد بیت‌های رشته‌های ژنتیک ۱۰ بیت در نظر گرفته شده که ۵ بیت مربوط به X و ۵ بیت مربوط به R می‌باشد. احتمال جابه‌جایی و جهش به ترتیب ۰/۷ و ۰/۱ و تعداد اعضای جمعیت ۲۰۰ انتخاب گردیده است.

۵-۲-۱- تنظیم ناحیه حفاظتی اول

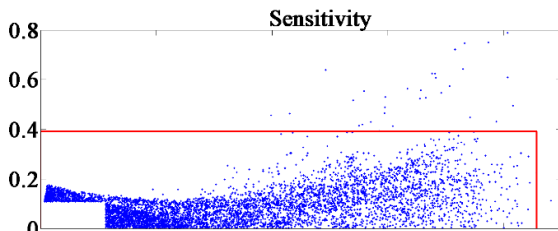
با توجه به این‌که در تنظیم ناحیه حفاظتی اول رله دیستانس هماهنگی بین رله‌ها از اهمیت بسیار بیشتری نسبت به حساسیت برخوردار است، ضرایب وزنی $W_1 = 0.01$ و $W_2 = 0.99$ انتخاب گردیده است. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل ۷ آورده شده است.

رله، به تنظیمات ناحیه اول رله‌های خطوط بعدی (۳-۴ و ۴-۵) نیز مورد نیاز است که در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این که ناحیه دوم رله R باید مابقی خط ۴-۲ را به‌طور کامل تحت پوشش قرار دهد، لذا ضریب وزنی حساسیت ۰/۹ انتخاب گردیده تا اهمیت حساسیت بسیار بیشتر از هماهنگی گردد. با اجرای الگوریتم ژنتیک برای ناحیه دوم رله، تنظیم بهینه آن برابر $Z = 4.286 + j0.391$ به‌دست آمده است.

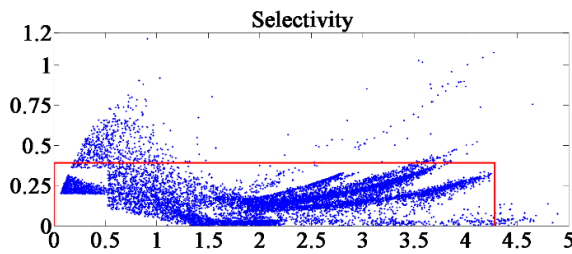
امپدانس‌های اندازه‌گیری‌شده توسط رله R با توجه به نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌ازای خطای داخل خط اصلی رله به‌همراه تنظیم بهینه ناحیه دوم رله در شکل ۱۰ آورده شده است. تعداد کل خطاها در این شکل ۵۷۳۵ عدد بوده که تعداد ۵۶۹۸ خطا داخل ناحیه حفاظتی قرار گرفته و ضریب حساسیت رله ۰/۹۹۴ به‌دست آمده است. در شکل ۱۱ امپدانس اندازه‌گیری‌شده توسط رله R به‌ازای خطای خارج خط اصلی رله R و خارج ناحیه اول رله خط بعدی به‌همراه تنظیم بهینه ناحیه دوم رله R آورده شده است. تعداد کل خطاها در این شکل ۱۱۱۶۱ عدد بوده که تعداد ۷۱۷ خطا خارج ناحیه حفاظتی قرار گرفته و ضریب هماهنگی رله ۰/۰۶۴ به‌دست آمده است.

جدول ۳: تنظیمات ناحیه حفاظتی اول رله‌های خطوط بعدی خط اصلی

	R	X
Relay 4-3	۰/۴۶۴۳۲۱	۰/۱۸۵۷۲۸
Relay 4-5	۱/۸۲۳۰۷	۰/۰۲۴۴۳۷۹



شکل ۱۰: امپدانس‌های اندازه‌گیری‌شده رله R به‌ازای خطاهای داخل ناحیه حفاظتی دوم



شکل ۱۱: امپدانس‌های اندازه‌گیری‌شده رله R به‌ازای خطاهای خارج ناحیه حفاظتی دوم

برای ناحیه دوم نیز الگوریتم ژنتیک به‌ازای ضرایب وزنی مختلف اجرا گردیده و نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. مطابق این جدول به‌ازای ضریب وزنی ۰/۹۹ برای حساسیت رله، حساسیت کامل

نتایج به‌دست‌آمده از ضرایب حساسیت و هماهنگی و همچنین شکل‌های بالا به‌وضوح نشان می‌دهد با توجه به این که وزن هماهنگی در تابع هدف بسیار بیشتر در نظر گرفته شده، پاسخ به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک هماهنگی کامل برای ناحیه یک رله R با توجه به تمامی عدم قطعیت‌ها ایجاد کرده است. همچنین در کنار برقراری هماهنگی تقریباً کامل، در فرآیند الگوریتم ژنتیک، حساسیت نیز تا حد ممکن حداکثر گردیده است.

در جدول ۲ تنظیم بهینه ناحیه اول رله R به‌همراه تابع هدف و ضرایب حساسیت و هماهنگی به‌ازای مقادیر مختلف ضریب وزنی آورده شده است.

جدول ۲: تنظیم بهینه ناحیه حفاظتی اول رله R به‌ازای ضرایب وزنی متفاوت

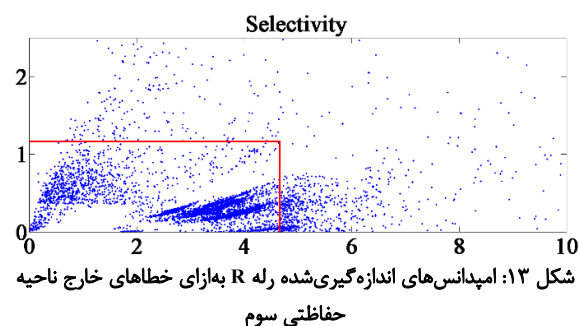
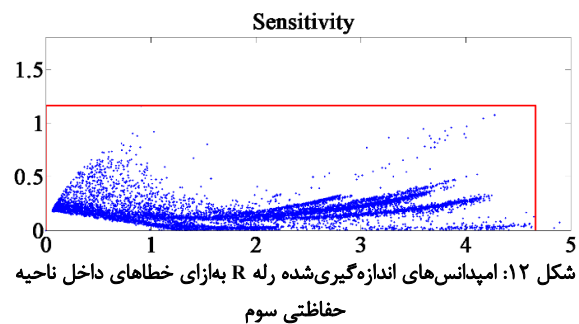
W_1	W_2	R	X	N_{Tc}	N_C	K_C	N_{Ts}	N_S	K_S	F
۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۵۶۲	۰/۱۰۸	۱۷۹۵۹	۱۷۹۵۹	۱	۸۰۲۵	۲۲۹۰	۰/۲۸۵	۰/۹۹۳
۰/۱	۰/۹	۰/۶۶۵	۰/۱۱۲	۱۷۹۵۹	۱۷۹۱۰	۰/۹۹۷	۸۰۲۵	۲۶۹۵	۰/۳۳۶	۰/۹۳۱
۰/۲	۰/۸	۰/۷۶۳	۰/۱۲۲	۱۷۹۵۹	۱۷۷۳۹	۰/۹۹۸	۸۰۲۵	۳۱۵۴	۰/۳۹۳	۰/۸۶۹
۰/۳	۰/۷	۱/۰۵۶	۰/۱۲۲	۱۷۹۵۹	۱۷۱۳۸	۰/۹۵۴	۸۰۲۵	۳۸۸۶	۰/۴۴۴	۰/۸۱۳
۰/۴	۰/۶	۱/۰۹	۰/۱۳۲	۱۷۹۵۹	۱۶۸۵۲	۰/۹۳۸	۸۰۲۵	۴۱۲۰	۰/۵۱۳	۰/۷۶۸
۰/۵	۰/۵	۳/۸۰۷	۰/۱۲۲	۱۷۹۵۹	۱۳۱۰۰	۰/۷۲۹	۸۰۲۵	۶۳۵۰	۰/۷۹۱	۰/۷۱۶
۰/۶	۰/۴	۳/۸۱۲	۰/۱۴۲	۱۷۹۵۹	۱۱۶۷۳	۰/۶۵	۸۰۲۵	۶۸۶۳	۰/۸۵۵	۰/۷۷۳
۰/۷	۰/۳	۴/۱۳	۰/۱۶۱	۱۷۹۵۹	۱۰۲۵۶	۰/۵۷۱	۸۰۲۵	۷۲۲۸	۰/۹۰۱	۰/۸۰۲
۰/۸	۰/۲	۴/۱۳	۰/۱۸۱	۱۷۹۵۹	۸۸۶۴	۰/۴۹۴	۸۰۲۵	۷۴۳۶	۰/۹۲۷	۰/۸۴
۰/۹	۰/۱	۴/۲۳۳	۰/۲۵۹	۱۷۹۵۹	۴۰۹۷	۰/۲۲۸	۸۰۲۵	۷۸۵۱	۰/۹۷۸	۰/۹۰۳
۰/۹۹	۰/۰۱	۴/۴۰۹	۱/۱۵۸	۱۷۹۵۹	۶۱	۰/۰۰۳	۸۰۲۵	۸۰۲۵	۱	۰/۹۹

با توجه با نتایج بالا هرچه ضریب وزنی هماهنگی کاهش یابد، تنظیمات ناحیه یک رله دیستانس بزرگ‌تر گردیده و بالطبع ضریب هماهنگی کاهش و ضریب حساسیت افزایش یافته است. به‌ازای ضریب وزنی ۰/۰۱ برای هماهنگی، حساسیت کامل ($K_S = 1$) برای ناحیه یک رله دیستانس به‌دست آمده است.

بدیهی است طراح سیستم حفاظتی بر اساس اهمیتی که برای هماهنگی و حساسیت قائل است، می‌تواند یکی از جواب‌های جدول ۲ را انتخاب نماید. اما در تنظیم ناحیه حفاظتی اول رله دیستانس، هماهنگی اهمیت بیشتری دارد تا تداخل عملکردی با رله‌های دیستانس سایر خطوط نداشته باشد. لذا سطر اول این جدول به‌عنوان بهترین تنظیم ناحیه اول رله R پیشنهاد می‌گردد.

۵-۲-۲- تنظیم ناحیه حفاظتی دوم

در تنظیم ناحیه دوم رله R، خطاهای داخل خط اصلی (خط ۴-۲) و خارج ناحیه اول همان رله، به‌عنوان ناحیه حفاظت اصلی رله بوده که برای محاسبه ضریب حساسیت ناحیه دوم رله استفاده گردیده است. خطاهای خطوط بعدی و خارج ناحیه اول رله خطوط بعدی، به‌عنوان ناحیه حفاظت پشتیبان رله بوده و برای محاسبه ضریب هماهنگی استفاده می‌گردد. لازم به‌ذکر است برای تعیین تنظیم بهینه ناحیه دوم



در شکل ۱۳ امیدانس اندازه‌گیری‌شده توسط رله R به‌ازای خطای خارج دو خط بعدی رله و خارج ناحیه دوم رله خطوط بعدی به‌همراه تنظیم بهینه ناحیه سوم رله دیستانس آورده شده است. تعداد کل خطاها در این شکل ۵۹۱۸ عدد بوده که تعداد ۱۰۴۴ خطا خارج ناحیه حفاظتی قرار گرفته و ضریب هماهنگی رله ۰/۱۱۷۶ به‌دست آمده است.

۳-۵- مقایسه نتایج با روش سنتی

به‌منظور نشان دادن اهمیت روش پیشنهادی در این قسمت نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی با روش سنتی مقایسه گردیده است. در روش سنتی، درصدی از امیدانس خط به‌عنوان امیدانس تنظیمی نواحی رله دیستانس در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان نمونه در این روش، برای تنظیم ناحیه اول رله ۴-۲، ۸۰٪ امیدانس خط $(Z_{set1} = 0.8 \times (0.05811 + z \cdot 0.17632))$ در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۱۴ امیدانس اندازه‌گیری‌شده توسط رله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به‌ازای خطاهای داخل خط اصلی رله R آورده شده است. همچنین تنظیمات به‌دست‌آمده از روش سنتی و روش پیشنهادی در این شکل نشان داده شده است.

مشاهده می‌گردد ضرایب هماهنگی در هر دو روش یکسان و برابر ۱ بوده است. به این معنا که به‌ازای تمام خطاهای خارج ناحیه، رله عملکرد نداشته است. اما در صورت استفاده از تنظیمات روش پیشنهادی، تعداد خطاهایی که رله به‌درستی عملکرد دارد ۲۲۹۰ خطا بوده و ضریب حساسیت ۰/۲۸۵۴ می‌باشد. در صورتی که در روش سنتی تعداد خطاهایی که رله به‌درستی عملکرد دارد ۳۶۶ خطا بوده و ضریب حساسیت ۰/۱۵۹۸ بوده است. بنابراین به‌وضوح اهمیت روش پیشنهادی نسبت به روش سنتی مشخص گردیده است.

به‌طور مشابه ضرایب حساسیت و هماهنگی نواحی مختلف رله R برای دو روش سنتی و روش پیشنهادی در جدول ۶ آورده شده است.

برقرار گردیده است. با کاهش ضریب وزنی حساسیت اندازه تنظیمات رله کاهش یافته، ضریب حساسیت کاهش و ضریب هماهنگی افزایش می‌یابد. تابع هدف نیز ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در انتخاب تنظیم ناحیه حفاظتی دوم نیز پیشنهاد می‌شود تنظیمی با بیشترین حساسیت یا به‌عبارتی سطر اول جدول ۴ انتخاب گردد.

جدول ۴: تنظیم ناحیه حفاظتی دوم رله R به‌ازای ضرایب وزنی متفاوت

W_1	W_2	R	X	N_{Tc}	N_C	K_C	N_{Ts}	N_S	K_S	F
۰/۹۹	۰/۰۱	۴/۴۰۹	۱/۱۵۸	۱۱۱۶۱	۴۳	۰/۰۰۴	۵۷۳۵	۵۷۳۴	۱	۰/۹۹
۰/۹	۰/۱	۴/۲۸۶	۰/۳۹۱	۱۱۱۶۱	۷۱۷	۰/۰۶۴	۵۷۳۵	۵۶۹۸	۰/۹۹۴	۰/۹۰۱
۰/۸	۰/۲	۴/۲۳۳	۰/۳۳۵	۱۱۱۶۱	۳۴۸۲	۰/۳۱۲	۵۷۳۵	۵۴۴۴	۰/۹۵۳	۰/۸۲۵
۰/۷	۰/۳	۴/۱۵۴	۰/۱۷۶	۱۱۱۶۱	۵۷۹۰	۰/۵۱۹	۵۷۳۵	۵۱۰۳	۰/۸۹	۰/۷۷۹
۰/۶	۰/۴	۴/۱۲۵	۰/۱۶۱	۱۱۱۶۱	۶۴۳۳	۰/۵۷۶	۵۷۳۵	۴۹۳۷	۰/۸۶۱	۰/۷۴۷
۰/۵	۰/۵	۳/۸۶۱	۰/۱۴۲	۱۱۱۶۱	۷۳۴۱	۰/۶۵۸	۵۷۳۵	۴۵۷۷	۰/۷۹۸	۰/۷۲۸
۰/۴	۰/۶	۱/۷۹۴	۰/۱۵۲	۱۱۱۶۱	۹۸۱۰	۰/۸۷۹	۵۷۳۵	۳۱۸۶	۰/۵۵۶	۰/۷۵
۰/۳	۰/۷	۱/۳	۰/۱۵۲	۱۱۱۶۱	۱۰۵۷۵	۰/۹۴۷	۵۷۳۵	۲۴۴۵	۰/۴۲۶	۰/۷۹۱
۰/۲	۰/۸	۱/۰۸	۰/۱۵۲	۱۱۱۶۱	۱۰۸۷۰	۰/۹۷۴	۵۷۳۵	۲۰۲۱	۰/۳۵۲	۰/۸۵
۰/۱	۰/۹	۰/۹۶۸	۰/۱۳۳	۱۱۱۶۱	۱۱۰۳۵	۰/۹۸۹	۵۷۳۵	۱۵۳۸	۰/۲۶۸	۰/۹۱۷
۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۵۲۳	۰/۱۹۶	۱۱۱۶۱	۱۱۱۶۱	۱	۵۷۳۵	۶۶۲	۰/۱۱۵	۰/۹۹۱

۵-۲-۳- تنظیم ناحیه حفاظتی سوم

در تنظیم ناحیه سوم رله، خطاهای داخل خطوط ۳-۴ و ۴-۵ و خارج ناحیه دوم رله اصلی به‌عنوان ناحیه حفاظت اصلی رله R بوده که برای محاسبه ضریب حساسیت ناحیه دوم رله R استفاده گردیده است. خطاهای دو خط بعد و خارج ناحیه دوم رله خطوط بعدی، به‌عنوان ناحیه حفاظت پشتیبان رله بوده و برای محاسبه ضریب هماهنگی استفاده گردیده است. همچنین، برای تعیین تنظیم بهینه ناحیه سوم رله، تنظیمات ناحیه دوم رله‌های خطوط بعدی (۳-۴ و ۴-۵) نیز موردنیاز است که در جدول ۵ آورده شده است.

با توجه به این که ناحیه سوم رله باید تمام خط اصلی و خطوط بعدی را به‌طور کامل به‌عنوان حفاظت پشتیبان تحت پوشش قرار دهد، لذا ضریب وزنی حساسیت ۰/۹ انتخاب شده است تا اهمیت حساسیت بسیار بیشتر از هماهنگی شود. با اجرای الگوریتم ژنتیک برای ناحیه سوم رله، تنظیم بهینه آن برابر $Z = 4.668 + z \cdot 1.163$ به‌دست آمده است.

امیدانس‌های اندازه‌گیری‌شده توسط رله R با توجه به نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌ازای خطای داخل خط اصلی رله R و خطوط بعدی به‌همراه تنظیم بهینه ناحیه سوم رله دیستانس در شکل ۱۲ آورده شده است. تعداد کل خطاها در این شکل ۹۱۴۴ عدد بوده که تعداد ۹۱۳۹ خطا داخل ناحیه حفاظتی قرار گرفته و ضریب حساسیت رله ۰/۹۹۹ به‌دست آمده است.

جدول ۵: تنظیمات ناحیه حفاظتی دوم رله‌های خطوط بعدی خط اصلی

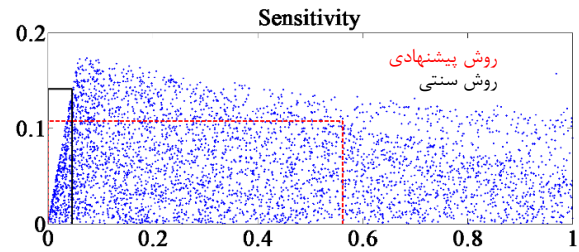
	R	X
Relay 4-3	۴/۶۲۴۰	۰/۴۲۴۴۴
Relay 4-5	۳/۱۹۰۲	۰/۱۹۲۶۷

گردید. در روش پیشنهادی تنظیم بهینه با توجه به درصد اهمیتی که طراح برای حساسیت یا هماهنگی قائل است قابل تغییر است، نتایج نشان داد با تغییر ضرایب وزنی در روش پیشنهادی می‌توان تنظیمی برای ناحیه اول رله دیستانس تعیین نمود که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها هماهنگی کامل ایجاد گردد. به‌طور مشابه برای ناحیه دوم نیز می‌توان تنظیمی را به‌دست آورد که حساسیت کامل را ایجاد کند. همچنین نتایج روش پیشنهادی با روش‌های سنتی مقایسه گردید و اهمیت روش پیشنهادی در تعیین تنظیمات بهینه رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها مشخص گردید.

مراجع

- [1] S. Horowitz, and A. Phadke, "Third zone revisited," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 23-29, 2006.
- [2] B. Stedall, P. Moore, A. Johns, J. Goody, and M. Burt, "An investigation into the use of adaptive setting techniques for improved distance back-up protection," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 757-762, 1996.
- [3] E. Sorrentino, E. Rojas, and J. Hernandez, "Method for setting the resistive reach of quadrilateral characteristics of distance relays," *Universities Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of the 44th International*, pp. 1-5, 2009.
- [4] J.M. Cho, C.H. Jung, and J.O. Kim, "Adaptive setting of digital relay for transmission line protection," *TENCON IEEE Region 10*, pp. 1-6, 2005.
- [5] M. Gilany, B.E. Hasan, and O. Malik, "The Egyptian electricity authority strategy for distance relay setting: problems and solutions," *Electric Power Systems Research*, vol. 56, pp. 89-94, 2000.
- [6] Y. Xia, K. Li, and A. David, "Adaptive relay setting for stand-alone digital distance protection," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 480-491, 1994.
- [7] Z. Zhizhe, and C. Deshu, "An adaptive approach in digital distance protection," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 135-142, 1991.
- [8] A. Sarwade, P. Katti, and J. Ghodekar, "Advanced distance relay characteristics suitable for dynamic loading," *IPEC, Conference Proceedings*, pp. 509-514, 2010.
- [9] E. Sexton, and D. Crevier, "A linearization method for determining the effect of loads, shunts and system uncertainties on line protection with distance relays," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 4439-4447, 1981.
- [10] J. Pinto de Sa, J. Afonso, and R. Rodrigues, "A probabilistic approach to setting distance relays in transmission networks," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 681-686, 1997.
- [11] W.H. Zhang, M.S. Choi, S.J. Lee, I.H. Lim, and S.J. Rim, "A probabilistic method based protectability evaluation of distance relay in transmission networks," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 3, pp. 346-353, 2008.
- [12] E. Sorrentino, and V. De Andrade, "Optimal-probabilistic method to compute the reach settings of distance relays," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1522-1529, 2011.

همچنین مشاهده می‌شود با اعمال روش پیشنهادی جهت تنظیم ناحیه دوم که حساسیت رله اهمیت بیشتری دارد، از تعداد ۵۷۳۵ خطا، رله R به‌ازای ۵۶۹۸ خطا عملکرد درست داشته و ضریب حساسیت ۰/۹۹۴ نتیجه شده است. در حالی که در روش سنتی فقط ۹۷ خطا با ضریب حساسیت ۰/۱۶۹ با عملکرد درست رله مواجه شده است. همچنین به‌طور مشابه در تنظیم ناحیه سوم نیز در روش پیشنهادی از تعداد ۹۱۴۴ خطا، رله به تعداد ۹۱۳۹ خطا عملکرد درست داشته و ضریب حساسیت ۰/۹۹۹ به‌دست آمده است. در حالی که در روش سنتی رله فقط در مقابل ۲۰۹ خطا با ضریب حساسیت ۰/۰۲۲۹ به‌درستی عمل کرده است.



شکل ۱۴: امیدانس‌های اندازه‌گیری‌شده رله R به‌ازای خطاهای داخل ناحیه حفاظتی اول و تنظیمات روش سنتی و پیشنهادی

جدول ۶: مقایسه ضرایب حساسیت و هماهنگی به‌ازای روش سنتی و روش پیشنهادی برای نواحی مختلف رله R

	R	X	N_{Tc}	N_c	K_c	N_{Ts}	N_s	K_s	F	
ناحیه اول	روش پیشنهادی	۰/۵۶۲	۰/۱۰۸	۱۷۹۵۹	۱۷۹۵۹	۱	۸۰۲۵	۲۲۹۰	۰/۳۸۵۴	۰/۹۹۲۸
	روش سنتی	۰/۰۴۶	۰/۱۴۱	۱۷۹۵۹	۱۷۹۵۹	۱	۸۰۲۵	۳۶۶	۰/۱۵۹۸	۰/۹۹۲۴
ناحیه دوم	روش پیشنهادی	۴/۲۸۶	۰/۳۹۱	۱۱۱۶۱	۷۱۷	۰/۰۶۴	۵۷۳۵	۵۶۹۸	۰/۹۹۴	۰/۹۰۰۶
	روش سنتی	۰/۰۶۵	۰/۱۹۷	۱۱۱۶۱	۱۱۱۶۱	۱	۵۷۳۵	۹۷	۰/۰۱۶۹	۰/۱۱۵۲
ناحیه سوم	روش پیشنهادی	۴/۶۶۸	۱/۱۶۳	۵۹۱۸	۱۰۴۴	۰/۱۷۶	۹۱۴۴	۹۱۳۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۱
	روش سنتی	۰/۰۸۲	۰/۲۶۳	۵۹۱۸	۵۹۰۰	۰/۹۹۷	۹۱۴۴	۲۰۹	۰/۰۲۲۹	۰/۰۳۲۶

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا عوامل تأثیرگذار بر تنظیم رله دیستانس بررسی گردیده و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها دو ضریب حساسیت و هماهنگی به‌صورت نسبی تعریف گردید. در ادامه به‌منظور تعیین تنظیم بهینه رله دیستانس تابع هدف مسئله به‌صورت مجموع وزن‌دار این دو ضریب تعریف گردیده و مسئله تنظیم بهینه رله دیستانس به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل گردید.

شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده گردید و برای هر یک از عدم قطعیت‌ها تابع چگالی احتمال متفاوت در نظر گرفته شد. از الگوریتم ژنتیک نیز برای حل مسئله بهینه‌سازی ایجادشده به‌منظور تعیین تنظیم بهینه نواحی رله دیستانس استفاده گردید. در انتها روش پیشنهادی به شبکه ۱۴ شینه IEEE اعمال

- a microgrid in real-time digital simulator,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 925-933, 2012.
- [15] P. Subcommittee, “IEEE reliability test system,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, pp. 2047-2054, 1979.
- [16] M. Hasegawa, and Y. Yanagitani, “Analysis of contact resistance data with Weibull distribution function,” *Electrical Contacts, Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on*, pp. 344-349, 2008.
- [۱۳] عباس صابری نوقابی و نادر هاتفی ترشیزی، ”روش احتمالی تنظیم رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها،“ *اولین کنفرانس علوم مهندسی، ایده‌های نو، موسسه آموزش عالی آیندگان، ۱۳۹۳.*
- [14] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A.M. Khambadkone, and H.N. Aung, “Multiagent system for real-time operation of