

## یک روش احتمالی به منظور تنظیم بهینه رله‌های اضافه جریان ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

عباس صابری نوقابی<sup>۱</sup>، استادیار؛ حامد بدرسیمایی<sup>۲</sup>، کارشناس ارشد؛ محسن فرشاد<sup>۳</sup>، دانشیار

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 - badr\_hamed@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - mfarshad@birjand.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله یک روش جدید به منظور تعیین تنظیم بهینه واحد آنی و واحد تأخیری رله اضافه جریان ترکیبی با مدل‌سازی احتمالی عدم قطعیت‌ها ارائه گردیده است. عدم قطعیت‌های خطای اندازه‌گیری، شرایط بهره‌برداری سیستم و شرایط وقوع خطا به صورت احتمالی مدل گردیده و از روش مونت کارلو برای محاسبه بازه جریان خطای عبوری از رله‌ها استفاده شده است. برای واحد آنی رله دو شاخص احتمالی حساسیت و انتخاب‌گری تعریف گردیده و مسئله تعیین تنظیم بهینه واحد آنی رله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف گردیده است. تابع هدف این مسئله حداکثر کردن شاخص احتمال حساسیت و قید آن برقراری انتخاب‌گری کامل است. سپس از یک روش بازه‌ای برای حل این مسئله بهینه‌سازی و تعیین تنظیمات بهینه بخش تأخیری رله‌ها استفاده شده است. همچنین مسئله تعیین تنظیم بهینه واحد تأخیری رله نیز با مدل‌سازی احتمالی عدم قطعیت‌ها به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی گردیده و از یک روش ترکیبی ژنتیک-مونت کارلو برای حل آن استفاده شده است. نتایج عددی در دو شبکه نمونه ۸ شینه و ۱۴ شینه IEEE نشان داد در صورت استفاده از روش پیشنهادی ناحیه بیشتری از طول خط به صورت آنی حفاظت گردیده و باقی‌مانده خط توسط واحد تأخیری در حداقل زمان ممکن و با انتخاب‌گری کامل حفاظت خواهد گردید.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم مونت کارلو-ژنتیک، انتخاب‌گری، تنظیم بهینه، حساسیت، رله اضافه جریان ترکیبی، عدم قطعیت.

## A Probabilistic Method to Determine the Optimal Setting of Combined Overcurrent Relays considering Uncertainties

A. Saberi Noughabi<sup>1</sup>, Assistant Professor; H. Badrsimaei<sup>2</sup>, MSc; M. Farshad<sup>3</sup>, Associate Professor

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: badr\_hamed@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mfarshad@birjand.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a new method is presented to determine the optimal settings of instantaneous unit and delay unit of combined overcurrent relay using probabilistic modeling of uncertainties. The uncertainties such as measurement error, operating conditions of system and fault conditions, are modelled probabilistically and use the Monte-Carlo method to determine the interval fault current passing through the relays. Two probabilistic sensitivity and selectivity indexes are defined for instantaneous unit of relay and the problem of determine the optimal setting of instantaneous unit is formulated as an optimization problem. The objective function of this problem is maximize the probabilistic sensitivity index and the complete selectivity is as constraint. Then, an interval method is used to solve this optimization problem and determine the optimal settings of instantaneous unit of relays. Also, using probabilistic modeling of uncertainties, the problem of determine the optimal settings of delay unit is formulated as an optimization problem and a hybrid Genetic Algorithm-Monte Carlo method has been used to solve it. The numerical results in two 8-bus and 14-bus IEEE test system showed that if using the proposed method, the more area of line is protected instantaneously and the remaining line has been protected by delay unit in minimum possible time and with complete selectivity.

**Keywords:** Combined overcurrent relay, genetic-monte carlo algorithm, optimal setting, selectivity, sensitivity, uncertainty.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۵

نام نویسنده مسئول: عباس صابری نوقابی

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

## ۱- مقدمه

رله‌های اضافه جریان به‌طور وسیعی در شبکه‌های توزیع و فوق توزیع کاربرد دارد. رله اضافه جریان ترکیبی<sup>۱</sup> مجهز به دو واحد آنی و تأخیری است. بخش ابتدای خط که جریان خطای بالاتری دارد به‌وسیله واحد آنی رله ترکیبی حفاظت گردیده و باقی‌مانده خط توسط واحد تأخیری رله بر اساس یک مشخصه عملکردی معکوس زمانی حفاظت می‌گردد. استفاده از رله ترکیبی در مقایسه با رله اضافه جریان معمولی باعث کاهش زمان عملکرد سیستم حفاظتی می‌شود [۱]. رله اضافه جریان ترکیبی دارای سه تنظیم شامل تنظیم جریان واحد آنی ( $I_{inst}$ )<sup>۲</sup>، تنظیم جریان واحد تأخیری ( $I_{set}$ )<sup>۳</sup> و ضریب تنظیم زمان واحد تأخیری ( $TMS$ )<sup>۴</sup> است. این تنظیمات باید به‌نحوی تعیین گردند که اولاً بخش بیشتری از خط توسط واحد آنی حفاظت گردد، ثانیاً زمان عملکرد واحد تأخیری حداقل گردیده و ثالثاً تداخلی در عملکرد واحدهای آنی و تأخیری رله‌های اصلی و پشتیبان رخ ندهد [۱].

مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان در حالت کلی به یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با تعداد قیود زیاد تبدیل می‌گردد [۲]. تاکنون روش‌های زیادی برای حل این مسئله پیشنهاد گردیده است [۸-۲]. در [۳] یک روش تحلیلی به‌همراه یک الگوریتم عددی برای حل این مسئله استفاده شده است. در صورتی که تنظیم جریان رله معلوم فرض گردد، مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی<sup>۵</sup> (LP) تبدیل گردیده و از روش سیمپلکس<sup>۶</sup> برای حل آن استفاده گردیده است [۴]. در [۵] یک بخش جدید به تابع هدف مسئله هماهنگی اضافه گردیده تا عدم هماهنگی رله‌های اضافه جریان رفع شده و از روش الگوریتم ژنتیک<sup>۷</sup> برای حل آن مسئله استفاده شده است. در [۸-۶] مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح<sup>۸</sup> فرمول‌بندی شده و از روش برنامه‌ریزی درجه دوم با قیود درجه‌دو<sup>۹</sup>، روش بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی<sup>۱۰</sup> و الگوریتم جستجوگر<sup>۱۱</sup> برای حل آن استفاده شده است. این روش‌ها در شبکه‌های بزرگ با سرعت و دقت مناسبی به جواب بهینه مطلق همگرا شده است.

برای یک رله اضافه جریان با مشخصه معکوس زمانی، زمان عملکرد رله به‌شدت به جریان خطای عبوری از آن رله وابسته است [۱]. بنابراین هر عاملی که بر جریان خطای عبوری از رله تأثیرگذار باشد، می‌تواند باعث ایجاد عدم هماهنگی در کارکرد رله‌های اضافه جریان شود. تغییر شرایط بهره‌برداری شبکه، تغییر ساختار شبکه، تغییر شرایط وقوع اتصال کوتاه و همچنین خطاهای مربوط به تجهیزات اندازه‌گیری و حفاظتی از مهم‌ترین عواملی هستند که می‌توانند بر جریان خطای عبوری از رله اضافه جریان تأثیرگذار باشند. در [۹] از یک روش تطبیقی<sup>۱۲</sup> برای حل مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان در شبکه توزیع با توجه به تغییر ساختار شبکه و تغییر شرایط بهره‌برداری استفاده گردیده است. در این طرح حفاظت

تطبیقی، با تغییر توپولوژی شبکه، محاسبات پخش بار و اتصال کوتاه انجام شده و مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان فرمول‌بندی می‌گردد. سپس از الگوریتم کلونی مورچگان<sup>۱۳</sup> برای حل این مسئله استفاده گردیده و تنظیمات بهینه به‌دست‌آمده به رله‌ها اعمال می‌گردد. در [۱۰]، یک روش غیرتطبیقی برای حل مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختار شبکه پیشنهاد گردیده و از روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای حل آن استفاده شده است. در [۱۱]، یک روش بازه‌ای<sup>۱۴</sup> برای مدل‌سازی عدم قطعیت در ساختار شبکه در مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ارائه شده است. در [۱۲] یک روش احتمالی برای تنظیم بهینه رله اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مکان خطا و خطای ترانسفورماتورهای جریان ارائه شده است. در این مقاله یک شاخص احتمالی برای ارزیابی عملکرد صحیح و عملکرد ناصحیح رله اضافه جریان ارائه شده است. در [۱۳]، مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان با مدل‌سازی عدم قطعیت مکان خطا و مقاومت خطا فرمول‌بندی شده و از روش الگوریتم تکاملی<sup>۱۵</sup> برای حل مسئله استفاده شده است. اثر اشباع ترانسفورماتور جریان بر هماهنگی رله‌های اضافه جریان در شبکه توزیع در [۱۴] بررسی شده است. در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها باعث می‌گردد، تعداد قیود مسئله هماهنگی رله اضافه‌های جریان به‌شدت افزایش یابد. لذا در [۱۵]، شاخصی جهت شناسایی قیود غیرفعال در مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ارائه شده است. به کمک این شاخص، قبل از حل مسئله هماهنگی، قیود غیرفعال شناسایی گردیده و از مسئله حذف می‌شوند.

در این مقاله ابتدا مدل‌های احتمالی مربوط به عدم قطعیت‌های مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ترکیبی معرفی شده است. سپس از روش مونت کارلو برای محاسبه بازه تغییرات جریان اتصال کوتاه عبوری از رله‌ها با در نظر گرفتن توابع توزیع احتمال عدم قطعیت‌ها استفاده گردیده است. در ادامه دو شاخص احتمالی بر اساس فلسفه حساسیت<sup>۱۶</sup> و انتخاب‌گری<sup>۱۷</sup> رله‌های اضافه جریان تعریف شده است. مسئله تعیین تنظیم بهینه واحد آنی رله اضافه جریان ترکیبی بر اساس این دو شاخص احتمالی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی ارائه گردیده و از یک روش بازه‌ای برای حل این مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. مسئله تعیین تنظیمات بهینه زمان و جریان واحد تأخیری رله‌های اضافه جریان ترکیبی در شرایط عدم قطعیت نیز به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی گردیده و از یک الگوریتم ترکیبی مونت کارلو-ژنتیک برای حل آن استفاده شده است. نتایج عددی روی دو شبکه نمونه ۸ شینه و ۱۴ شینه IEEE نشان داد با به‌کارگیری فرمول‌بندی‌های جدید، حساسیت و انتخاب‌گری سیستم حفاظت اضافه جریان ترکیبی نسبت به روش‌های معمول بهتر شده است.

$$\text{Min } J(X) = \sum_{i=1}^N t_i^{F_3}$$

subject to:

$$C_m(X) = t_j^{F_3} - t_i^{F_3} - CTI \geq 0 \quad (2)$$

$$C'_m(X) = t_j^{F_1} - t_{inst} - CTI \geq 0$$

$$m = 1, 2, \dots, n_{BP}$$

در این رابطه،  $J(X)$  تابع هدف در مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ترکیبی،  $N$  تعداد رله‌های اضافه جریان شبکه و بردار  $X$  متغیرهای مسئله شامل ضرایب تنظیم زمان ( $TMS$ ) و تنظیم جریان ( $I_{set}$ ) واحد تأخیری رله‌ها است.  $m$  و  $n_{BP}$  به ترتیب شماره و تعداد زوج رله‌های اصلی-پشتیبان است.  $C_m(X)$  و  $C'_m(X)$  به ترتیب قیود هماهنگی برای  $m$  امین زوج رله اصلی-پشتیبان به ازای خط در نقاط  $F_1$  و  $F_3$  است.  $CTI^{19}$  فاصله زمانی هماهنگی به منظور جلوگیری از تداخل واحد تأخیری رله پشتیبان با واحدهای آنی و تأخیری رله اصلی است.  $t_j^{F_3}$  و  $t_i^{F_3}$  به ترتیب زمان عملکرد واحدهای تأخیری رله اصلی  $i$  و رله پشتیبان  $j$  به ازای خطی در نقطه  $F_3$  بوده و  $t_j^{F_1}$  نیز زمان عملکرد واحد تأخیری رله پشتیبان  $j$  ام به ازای خط در نقطه  $F_1$  است.  $t_{inst}$  نیز زمان عملکرد واحد آنی رله‌های ترکیبی است. زمان عملکرد واحد تأخیری رله اضافه جریان ترکیبی تابعی از تنظیم جریان و تنظیم زمان رله و همچنین تابعی از جریان خطای عبوری از رله است.

### ۳- بررسی احتمالی عدم قطعیت‌ها

با توجه به این که زمان عملکرد رله اضافه جریان به جریان خطای عبوری از رله وابسته بوده در ادامه ابتدا به بررسی و مدل‌سازی عدم قطعیت‌های تأثیرگذار بر جریان خطا پرداخته شده و سپس الگوریتم مونت کارلو برای محاسبه بازه تغییرات جریان خطا با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها پیشنهاد شده است.

#### ۳-۱- معرفی و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها

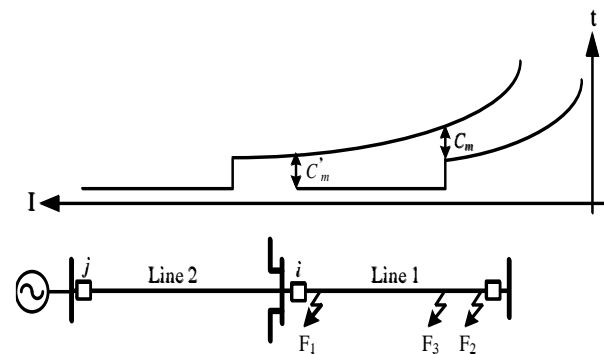
عدم قطعیت‌های تأثیرگذار بر جریان خطای عبوری از رله اضافه جریان ترکیبی شامل موارد زیر است:

**بار شبکه:** تغییر بار شبکه و تولید واحدهای سیستم باعث تغییر ولتاژ شین قبل از وقوع خطا گردیده و بر اندازه جریان خطا تأثیرگذار است. اندازه بار در طول یک دوره سالیانه تغییر کرده و به کمک منحنی تداوم بار سالیانه (LDC) نمایش داده می‌شود. با توجه به این که احتمال وقوع هر یک از سطوح بار یکسان است، برای بار شبکه تابع توزیع احتمال یکنواخت با توجه به منحنی LDC انتخاب گردید است. همچنین تغییرات منحنی LDC برای تمامی بارها یکسان در نظر گرفته شده است.

**امپدانس تجهیزات سیستم قدرت:** اندازه‌گیری و محاسبات امپدانس خطوط، ترانسفورماتورها و ژنراتورهای سیستم قدرت همواره دارای خطا بوده است. تغییر مقدار امپدانس تجهیزات سیستم قدرت به‌طور مستقیم بر ماتریس امپدانس شبکه و نهایتاً جریان خطای

## ۲- مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ترکیبی

رله اضافه جریان ترکیبی شامل دو واحد آنی و تأخیری است. واحد تأخیری دارای یک مشخصه معکوس زمانی بوده و واحد آنی آن مستقل از جریان خطا، در کمترین زمان ممکن عملکرد است. در شکل ۱، یک زوج رله ترکیبی شامل رله اصلی  $i$  و رله پشتیبان  $j$  به همراه مشخصه عملکرد این رله‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱: یک زوج رله‌های اضافه جریان ترکیبی به همراه مشخصه آن‌ها [۱۶].

از ابتدای خط Line 1 تا نقطه  $F_3$  توسط واحد آنی رله ترکیبی  $i$  و مابقی خط توسط واحد تأخیری رله  $i$  حفاظت شده است. بنابراین تنظیم جریان واحد آنی رله  $i$  مطابق رابطه (۱) برابر جریان اتصال کوتاه عبوری از آن رله به ازای خط در نقطه  $F_3$  انتخاب می‌گردد.

$$I_{inst}^i = I_{f_i}^{F_3} \quad (1)$$

در این رابطه،  $I_{f_i}^{F_3}$  جریان اتصال کوتاه عبوری از رله  $i$  به ازای خطا در نقطه  $F_3$  بوده و  $I_{inst}^i$  تنظیم جریان بخش آنی رله ترکیبی  $i$  است.

تنظیمات واحد تأخیری رله اضافه جریان ترکیبی باید به نحوی تعیین شود که اولاً قسمتی از شبکه که دچار خطا شده در کوتاه‌ترین زمان ممکن از دیگر قسمت‌های شبکه جدا شده و ثانیاً هیچ تداخلی در عملکرد رله‌های اصلی-پشتیبان رخ ندهد. بنابراین تابع هدف در مسئله هماهنگی واحد تأخیری رله‌های اضافه جریان ترکیبی به صورت مجموع زمان عملکرد واحد تأخیری رله‌های اصلی در نظر گرفته می‌شود [۱]. همچنین قیود هماهنگی بخش تأخیری برای رله اصلی  $i$  و رله پشتیبان  $j$  به ازای خطا در نقاط  $F_1$  و  $F_3$  لحاظ می‌گردد [۱]. بدیهی است با توجه به مشخصه معکوس زمانی رله‌های اضافه جریان، اگر هماهنگی در این دو نقطه برقرار باشد، هماهنگی رله‌های اصلی پشتیبان به ازای خطا در تمام نقاط خط Line 1 برقرار خواهد بود [۱]. بنابراین مسئله هماهنگی واحد تأخیری رله‌های اضافه جریان ترکیبی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود [۱۶].

بعد طریقه پیاده‌سازی رابطه (۳) و محاسبه جریان بازه‌ای رابطه (۴)، به کمک فرآیند مونت کارلو، آورده شده است.

### ۳-۲- محاسبه جریان خطای بازه‌ای به روش مونت کارلو

با استفاده از فرآیند مونت کارلو بازه تغییرات جریان خطای عبوری از رله‌های اضافه جریان ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها مطابق گام‌های ذیل محاسبه می‌گردد:

- ۱- ورود اطلاعات شبکه، رله‌ها و عدم قطعیت‌ها
- ۲- تعیین بار شبکه: با استفاده از تابع توزیع احتمال یکنواخت یکی از ساعات سال به صورت تصادفی انتخاب شده و مقدار بار شین‌ها در آن ساعت بر اساس منحنی LDC استخراج می‌گردد. همچنین اطلاعات توان تولیدی واحدها بر اساس اطلاعات بار تعیین می‌شود.
- ۳- تعیین امپدانس تجهیزات شبکه: امپدانس خطوط، ترانسفورماتورها و ژنراتورهای شبکه به صورت تصادفی با توجه به توزیع احتمال نرمال تعیین می‌گردد.
- ۴- اجرای برنامه پخش بار: با اجرای پخش بار ولتاژ شین‌های شبکه قبل وقوع خطا محاسبه می‌گردد.
- ۵- تعیین مکان خطا: ابتدا با توجه به احتمال وقوع خطا در هر خط، تعیین می‌گردد در کدام خط شبکه خطا رخ داده است. سپس با تولید یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۰, ۱] درصدی از طول خط که خطا در آن مکان رخ داده تعیین می‌شود.
- ۶- تعیین مقاومت خطا: مقاومت خطا به صورت تصادفی با توجه به توزیع احتمال ویبول تعیین می‌گردد.
- ۷- اجرای برنامه اتصال کوتاه: با معلوم بودن ولتاژ قبل خطا، امپدانس شبکه، مکان وقوع خطا و مقاومت خطا برنامه اتصال کوتاه متقارن اجرا شده و جریان اتصال کوتاه عبوری از خطوط شبکه (جریان اولیه CTها) تعیین می‌شود.
- ۸- خطای اندازه‌گیری ترانسفورماتور جریان: خطای CT به صورت تصادفی بر اساس تابع توزیع نرمال تعیین گردیده و جریان‌های اتصال کوتاه عبوری از ثانویه ترانسفورماتور جریان یا جریان عبوری از رله اضافه جریان محاسبه و ذخیره می‌گردد.
- ۹- شرط توقف: گام‌های ۲ الی ۸ آن قدر تکرار می‌شوند تا شرط توقف برقرار گردد. شرط توقف می‌تواند تعداد تکرار مشخص برای فرآیند مونت کارلو یا حد مشخصی برای ضریب پراکندگی باشد.

با اجرای الگوریتم مونت کارلو برای هر رله، تابع توزیع احتمال تجمعی جریان خطا و همچنین کران بالا و پایین جریان خطای عبوری از آن رله (رابطه (۴)) به دست می‌آید. این جریان‌های بازه‌ای در تنظیم واحد آنی و تأخیری رله اضافه جریان ترکیبی استفاده خواهد شد.

عبوری از رله اضافه جریان تأثیرگذار است. با توجه به ماهیت تصادفی تغییرات امپدانس، تابع توزیع احتمال نرمال برای مدل‌سازی احتمالی آن استفاده گردیده است.

**مکان وقوع خطا:** مکان وقوع خطا ماهیت تصادفی دارد و می‌تواند هر نقطه از طول خط باشد. تغییر مکان وقوع خطا باعث تغییر در امپدانس تونن دیده‌شده از محل خطا و در نتیجه تغییر در اندازه جریان اتصال کوتاه عبوری از خطوط شبکه می‌گردد. این عدم قطعیت بیشترین تأثیر را بر جریان خطای عبوری از رله‌های اضافه جریان دارد. در شرایط استاندارد احتمال وقوع خطا در هر نقطه از طول خط با هم برابر بوده، بنابراین از تابع توزیع احتمال یکنواخت برای مدل‌سازی مکان وقوع خطا استفاده گردیده است. همچنین احتمال وقوع خطا در هر خط شبکه برابر نسبت طول آن خط به مجموع طول خطوط شبکه انتخاب شده است.

**مقاومت خطا:** در عمل مقدار مقاومت خطا به‌طور قطعی مشخص نیست. در محاسبه جریان اتصال کوتاه، مقاومت خطا به امپدانس تونن دیده‌شده از محل خطا اضافه می‌گردد، بنابراین تغییر در اندازه مقاومت خطا نیز باعث تغییر جریان خطای عبوری از رله‌ها می‌شود. تابع توزیع احتمال برای مقاومت خطا، تابع احتمال ویبول در نظر گرفته شده است [۱۲].

**خطای اندازه‌گیری ترانسفورماتورهای جریان:** به دلیل غیرایده‌آل بودن ترانسفورماتورهای حفاظتی جریان، در عمل خطا در اندازه و زاویه جریان ثانویه ترانسفورماتور وجود دارد. خطا در اندازه جریان، باعث تغییر جریان عبوری از رله اضافه جریان گردیده و ممکن است منجر به عدم هماهنگی گردد. با توجه به ماهیت تصادفی خطای ترانسفورماتور جریان، تابع توزیع احتمال نرمال با مقدار متوسط صفر برای مدل‌سازی احتمالی خطای CT استفاده شده است.

مجموعه تمام عدم قطعیت‌های تأثیرگذار بر جریان خطای عبوری از رله‌های اضافه جریان ترکیبی شامل: بار شبکه ( $P_i$ )، امپدانس تجهیزات سیستم قدرت ( $z$ )، مکان وقوع خطا ( $x$ )، مقاومت خطا ( $R_f$ ) و خطای اندازه‌گیری ترانسفورماتور جریان ( $e$ ) در رابطه (۳) به صورت مجموعه  $U$  آورده شده است.

$$U = \{u \mid u \in \{P_i, z, x, R_f, e\} \ \& \ u_{\min} \leq u \leq u_{\max}\} \quad (3)$$

در این رابطه،  $U$  مجموعه تمامی عدم قطعیت‌ها و  $u$  یکی از انواع عدم قطعیت‌های اشاره‌شده در بالا بوده و  $u_{\min}$  و  $u_{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار آن عدم قطعیت است.

با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌ها، جریان خطای عبوری از رله  $i$  مطابق رابطه (۴) به صورت یک عدد بازه‌ای خواهد بود.

$$\bar{I}_i^U = [I_{f_i}^{\min}, \dots, I_{f_i}^{\max}] \quad (4)$$

در این رابطه  $I_{f_i}^{\min}$  و  $I_{f_i}^{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر جریان خطای عبوری از رله  $i$  با در نظر گرفتن تمام عدم قطعیت‌ها است. در بخش

۱- فضای حساسیت واحد آنی ( $F_{sen}$ ): فضای خطاهای داخلی که واحد آنی رله به‌ازای آن‌ها به‌درستی عمل خواهد کرد.

۲- فضای عدم حساسیت واحد آنی ( $F_{unsel}$ ): فضای خطاهای داخلی که واحد آنی رله به‌ازای آن‌ها عملکردی نخواهد داشت. در این حالت واحد تأخیری وظیفه رفع این دسته از خطاها را بر عهده دارد که در بخش بعد این مسئله بررسی شده است.

بنابراین با توجه به فضای خطاهای داخلی رله، شاخص CTP به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$CTP = \frac{n(F_{sen})}{n(F_{in})} \quad (5)$$

که  $n(F_{in})$  و  $n(F_{sen})$  به‌ترتیب تعداد عضوهای مجموعه فضاهای  $F_{in}$  و  $F_{sen}$  است.

مطابق شکل ۲، فضای خطاهای خارج ناحیه تحت حفاظت رله ( $F_{out}$ ) نیز به دو قسمت تقسیم می‌گردد:

۱- فضای انتخاب‌گری واحد آنی ( $F_{sel}$ ): فضای خطاهای خارجی که واحد آنی رله به‌ازای آن‌ها به‌درستی عملکردی نخواهد داشت.

۲- فضای عدم انتخاب‌گری واحد آنی ( $F_{unsel}$ ): فضای خطاهای خارجی که واحد آنی رله به‌ازای آن‌ها عملکرد دارد.

بنابراین با توجه به فضای خطاهای خارجی رله، شاخص NUTP به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$NUTP = \frac{n(F_{sel})}{n(F_{out})} \quad (6)$$

که  $n(F_{out})$  و  $n(F_{sel})$  به‌ترتیب تعداد عضوهای مجموعه فضاهای  $F_{out}$  و  $F_{sel}$  است.

#### ۴-۲- فرمول‌بندی مسئله تنظیم واحد آنی

با توجه به تعاریف دو شاخص CTP و NUTP، واضح است بهترین تنظیم برای واحد آنی رله اضافه جریان ترکیبی در صورتی حاصل می‌گردد که هر دو شاخص برابر یک گردد. ولی به‌دلیل وجود عدم قطعیت‌ها این دو شاخص نمی‌توانند به‌طور هم‌زمان یک باشند. از آنجایی که انتخاب‌گری رله از اهمیت بیشتری نسبت به حساسیت آن برای واحد آنی برخوردار است (زیرا در صورت از دست رفتن انتخاب‌گری ممکن است ناحیه بزرگ‌تری از شبکه قطع گردد)؛ بنابراین واحد آنی به‌نحوی تنظیم می‌گردد که رله به‌ازای تمام خطاهای خارجی عملکرد نداشته باشد (انتخاب‌گری کامل) و به‌ازای حداکثر خطاهای داخلی عملکرد داشته باشد (حساسیت حداکثر). لذا مسئله تعیین تنظیم بهینه واحد آنی رله ترکیبی  $i$  به‌صورت مسئله بهینه‌سازی رابطه (۷) پیشنهاد شده است.

$$\begin{aligned} & \text{MAX } CTP_i(I_{inst}^i) \\ & \text{subject to} \\ & NUTP_i(I_{inst}^i) = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

#### ۴- مسئله تنظیم بهینه واحد آنی رله ترکیبی

به‌منظور جلوگیری از تداخل در عملکرد رله‌های اصلی-پشتیبان، واحد آنی رله ترکیبی نباید به‌ازای خطای خارج از ناحیه حفاظتی رله عمل کند. لذا در روش‌های معمول برای ایجاد یک حاشیه اطمینان، ناحیه تحت پوشش واحد آنی رله برابر ۸۰٪ طول خط لحاظ می‌گردد. بر این اساس تنظیم جریان واحد آنی رله برابر جریان اتصال کوتاه عبوری از رله به‌ازای خطا در ۸۰٪ طول خط تعیین می‌شود [۱]. اما با توجه به رابطه (۴) جریان خطای عبوری از رله اضافه جریان ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها یک عدد قطعی نبوده و در یک بازه تغییر می‌کند. لذا انتخاب جریان اتصال کوتاه به‌ازای خطا در ۸۰٪ طول خط نمی‌تواند ملاک مناسبی برای تنظیم واحد آنی رله ترکیبی باشد. در این بخش یک فرمول‌بندی جدید برای مسئله تنظیم واحد آنی رله‌های اضافه جریان ترکیبی با توجه به فلسفه حساسیت و انتخاب‌گری سیستم حفاظت ارائه گردیده تا با وجود عدم قطعیت‌ها، یک تنظیم بهینه و مقاوم برای واحد آنی رله‌های اضافه جریان ترکیبی به‌دست آید.

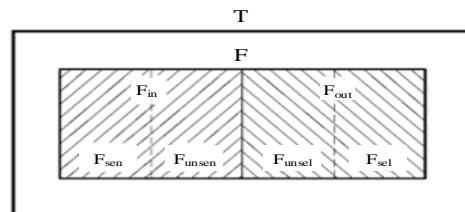
#### ۴-۱- فلسفه حساسیت و انتخاب‌گری

توانایی عملکرد واحد آنی به‌ازای خطاهای داخل ناحیه حفاظتی رله معرف حساسیت آن واحد بوده و توانایی عدم عملکرد واحد آنی به‌ازای خطاهای خارج از ناحیه حفاظتی رله معرف انتخاب‌گری آن واحد است. بر این اساس دو شاخص احتمالی پیشنهاد می‌گردد.

**احتمال عملکرد صحیح (CTP):** احتمال عملکرد واحد آنی رله اضافه جریان ترکیبی به‌ازای خطاهای داخل ناحیه حفاظتی.

**احتمال عدم عملکرد ناخواسته (NUTP):** احتمال عدم عملکرد واحد آنی رله اضافه جریان ترکیبی به‌ازای خطاهای خارج از ناحیه حفاظتی.

در شکل ۲ فضای کل خطاهای واقع شده بر سیستم قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، به‌صورت فضای کل مستطیل T نشان داده شده است. در این فضا  $F_{in}$  مجموع خطاهای واقع شده در داخل ناحیه تحت حفاظت رله و  $F_{out}$  مجموع خطاهای واقع شده در خارج از آن ناحیه تعریف گردیده است.



شکل ۲: فضای خطاهای داخل و خارج ناحیه حفاظت رله.

مطابق شکل ۲، فضای خطاهای داخل ناحیه تحت حفاظت رله ( $F_{in}$ ) به دو قسمت تقسیم می‌گردد:

۲- مکان خطا: بزرگ‌ترین جریان خطای خارج از ناحیه حفاظتی به‌ازای خطا در ابتدای خط بعدی (شین انتهایی خط تحت حفاظت رله) رخ می‌دهد.

۳- مقاومت خطا: بیشترین جریان اتصال کوتاه به‌ازای خطا با مقاومت صفر است.

بنابراین در الگوریتم مونت کارلو بخش ۳-۲ مکان خطا شین انتهایی خط، مقاومت خطا صفر و خطای CT حداکثر خطای مثبت منظور می‌گردد. اما سایر عدم قطعیت‌ها همچون بار شبکه و امیدانس خطوط شبکه در فرآیند مونت کارلو تعیین می‌گردد. لذا الگوریتم مونت کارلو برای هر یک از رله‌های شبکه اعمال گردیده و حداکثر جریان خطای خارجی عبوری از تمامی رله‌ها به‌دست می‌آید. این جریان خطا به‌عنوان تنظیم بهینه واحد آنی رله‌ها انتخاب می‌شود.

### ۵- مسئله تنظیم بهینه واحد تأخیری

در این بخش مسئله هماهنگی بهینه واحد تأخیری رله‌های اضافه جریان ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها فرمول‌بندی شده و یک الگوریتم ترکیبی ژنتیک و مونت کارلو برای حل آن پیشنهاد شده است.

### ۵-۱- فرمول‌بندی مسئله تنظیم واحد تأخیری

به‌منظور رسیدن به یک پاسخ مقاوم برای تنظیم بخش تأخیری رله ترکیبی می‌بایست قیود هماهنگی مربوط به تمامی عدم قطعیت‌ها در فرمول‌بندی مسئله هماهنگی لحاظ شود. بنابراین مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ترکیبی (رابطه (۲)) در حالت کلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها مطابق رابطه (۱۲) فرمول‌بندی می‌گردد.

$$\text{Min } J(X, U) = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{u \in U} P^u \times t_i^u \right)$$

subject to:

$$\begin{aligned} C_m(X, u) = t_j^u - t_i^u - CTI \geq 0 \quad \forall u \in U \quad | \quad I_{f_i}^u < I_{inst}^i \\ C'_m(X, u) = t_j^u - t_{inst} - CTI \geq 0 \quad \forall u \in U \quad | \quad I_{f_i}^u > I_{inst}^i \\ m = 1, 2, \dots, n_{BP} \end{aligned} \quad (12)$$

که  $U$  مجموعه تمامی عدم قطعیت‌ها بوده و  $u$  یک حالت از عدم قطعیت‌ها است.  $P^u$  احتمال وقوع حالت  $u$  است.  $t_j^u, t_i^u$  به ترتیب زمان‌های عملکرد رله‌های اصلی  $i$  و رله پشتیبان  $j$  در حالت  $u$  است.  $I_{f_i}^u$  جریان خطای عبوری از رله اصلی  $i$  و  $I_{inst}^i$  تنظیم جریان واحد آنی آن رله است.

در رابطه (۱۲) دو دسته قیود  $C_m$  و  $C'_m$  منظور گردیده است. دسته اول قیود  $(C_m(X, u))$  مطابق شکل (۱) برای خطاهای بعد از نقطه  $F_3$  تا نقطه  $F_2$  بوده که واحد تأخیری رله ترکیبی  $i$  باید به‌عنوان حفاظت اصلی و واحد تأخیری رله ترکیبی  $j$  باید به‌عنوان حفاظت پشتیبان عمل کند. با توجه به این‌که این دسته از قیود مربوط به هماهنگی بخش تأخیری رله اصلی-پشتیبان است، لذا باید به‌ازای جریان‌های خطای کوچک‌تر از جریان تنظیم بخش آنی رله در نظر

در این رابطه تنظیم جریان واحد آنی رله  $i$  ام  $(I_{inst}^i)$  متغیر مستقل مسئله است. بنابراین مطابق مسئله بهینه‌سازی (۷)، تنظیم جریان واحد آنی رله  $i$  باید به‌نحوی انتخاب گردد که CTP حداکثر گردیده و NUTP برابر یک گردد. مسئله (۷) به‌صورت مستقل برای هر یک از رله‌ها حل گردیده و تنظیم بهینه واحد آنی آن رله به‌دست می‌آید. در ادامه یک روش بازه‌ای برای حل این مسئله پیشنهاد شده است.

### ۴-۳- روش حل بازه‌ای مسئله تنظیم واحد آنی

با استفاده از الگوریتم مونت کارلو، بازه جریان‌های اتصال کوتاه عبوری از هر رله به‌ازای خطاهای داخلی و خارجی محاسبه گردیده و مطابق روابط (۸) و (۹) به ترتیب به‌صورت اعداد بازه‌ای  $\bar{I}_{f_{int}}$  و  $\bar{I}_{f_{ext}}$  نشان داده می‌شود.

$$\bar{I}_{f_{int}} = [I_{f_{int}}^{\min}, \dots, I_{f_{int}}^{\max}] \quad (8)$$

$$\bar{I}_{f_{ext}} = [I_{f_{ext}}^{\min}, \dots, I_{f_{ext}}^{\max}] \quad (9)$$

به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها حداکثر جریان خطا خارجی  $(I_{f_{ext}}^{\max})$  از حداقل جریان خطای داخلی  $(I_{f_{int}}^{\min})$  بزرگ‌تر است. لذا اشتراکی میان این اعداد بازه‌ای وجود دارد، به‌طوری‌که اگر  $\bar{I}_f$  مجموعه کل جریان‌های خطای داخلی و خارجی برای یک رله باشد، خواهیم داشت:

$$\bar{I}_f^U = [I_{f_{ext}}^{\min}, \dots, I_{f_{int}}^{\min}, \dots, I_{f_{ext}}^{\max}, \dots, I_{f_{int}}^{\max}] \quad (10)$$

از قید مسئله بهینه‌سازی (۷) می‌توان نتیجه گرفت که تنظیم جریان واحد آنی  $(I_{inst})$  باید از تمام جریان‌های خطاهای خارجی بزرگ‌تر انتخاب گردد تا واحد آنی رله به‌ازای هیچ‌یک از جریان‌های خطاهای خارجی عملکرد نداشته باشد (NUTP برابر یک گردد). لذا  $I_{inst}$  باید از  $I_{f_{ext}}^{\max}$  بزرگ‌تر باشد. بنابراین با توجه به رابطه (۱۰) تنظیم جریان واحد آنی رله باید مطابق رابطه (۱۱) انتخاب گردد تا قید مسئله (۷) رعایت شود.

$$I_{inst} \in [I_{f_{ext}}^{\max}, \dots, I_{f_{int}}^{\max}] \quad (11)$$

از طرف دیگر هر چه  $I_{inst}$  کوچک‌تر انتخاب گردد، واحد آنی به‌ازای تعداد خطاهای داخلی بیشتری عملکرد داشته و شاخص CTP افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به تابع هدف (۷) و بازه تغییرات مجاز  $I_{inst}$  (مطابق رابطه (۱۱))، پاسخ مسئله بهینه‌سازی رابطه (۷) خواهد بود.  $I_{inst}^{\max} = I_{f_{ext}}^{\max}$

با تغییر اندازه عدم قطعیت‌ها جریان خطا نیز تغییر می‌کند، اما برای برخی از عدم قطعیت‌ها مشخص است که بیشترین جریان خطای خارجی  $(I_{f_{ext}}^{\max})$  به‌ازای چه اندازه‌ای از آن عدم قطعیت‌ها رخ می‌دهد. این موارد در ادامه آورده شده است.

۱- خطای ترانسفورماتور جریان: بدیهی است در صورتی که حداکثر خطای مثبت CTها لحاظ شود، بیشترین جریان خطای عبوری از رله محاسبه می‌شود.

در این رابطه  $X_{TMS}$  بردار ضرایب تنظیم زمانی رله‌ها و  $A^U$  ماتریس ضرایب خطی مشخصه زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان به‌ازای تمامی عدم‌قطعیت‌ها است. هر سطر ماتریس  $A^U$  شامل دو ضریب، یکی ضریب خطی زمان عملکرد رله اصلی ( $a_i^u$ ) و دیگری ضریب خطی زمان عملکرد رله پشتیبان ( $a_j^u$ ) برای حالت عدم‌قطعیت  $u$  است. تعداد سطرهای  $A^U$  برابر با تعداد حالاتی از عدم‌قطعیت‌ها بوده که جریان خطای عبوری از رله اصلی از تنظیم جریان بخش آنی رله کوچک‌تر بوده است ( $I_{fi}^u < I_{inst}^i$ ). تعداد ستون این ماتریس برابر  $N$  است. هر سطر ماتریس  $A^U$  برخلاف ماتریس  $A^U$  تنها دارای یک عنصر بوده و آن عنصر ضریب خطی زمان عملکرد رله پشتیبان  $j$  ( $t_j^u$ ) برای هر یک از حالات عدم‌قطعیت  $u$  بوده است. تعداد سطرهای ماتریس  $A^U$  برابر با تعدادی از حالت‌های عدم‌قطعیت است جریان خطای عبوری از رله اصلی از تنظیم جریان بخش آنی رله بزرگ‌تر بوده است ( $I_{fi}^u > I_{inst}^i$ ). بردار  $C^U$  شامل ضرایب خطی زمان عملکرد رله‌های اصلی ( $c_i^U$ ) به‌ازای تمام حالات ممکن از مجموعه عدم‌قطعیت‌های  $U$  است.  $\overline{CTI}$  بردار ستونی است، که تعداد سطرهای آن با تعداد سطرهای ماتریس  $A^U$  برابر بوده و تمامی عناصر آن مقدار  $CTI$  است. تعداد سطرهای بردار ستونی  $\overline{CTI}$  نیز با تعداد سطرهای ماتریس  $A^U$  برابر بوده و عناصر آن مقدار  $CTI + t_{inst}$  دارند. طرح مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ترکیبی در قالب ارائه‌شده، امکان رسیدن به یک پاسخ مقاوم را فراهم نموده که به‌ازای مجموعه عدم‌قطعیت‌ها، هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان حفظ گردیده و زمان عملکرد رله‌ها به حداقل ممکن برسد. در صورت استفاده از فرآیند مونت‌کارلو برای پیاده‌سازی عدم‌قطعیت‌ها، تعداد قیود مسئله هماهنگی (مجموعه  $U$ ) و بنابراین تعداد سطرهای ماتریس‌های  $A^U$  و  $A^{U'}$  به‌شدت افزایش خواهد یافت. لذا حل مسئله با این ابعاد بزرگ حتی در فرم خطی (۱۸) نیز بسیار مشکل است. با توجه به این‌که بسیاری از قیود مسئله با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها ممکن است اضافی باشد، در مرجع [۹] یک روش برای کاهش قیود مسئله، مستقل از تنظیمات زمان رله‌ها ارائه شده است. در این مقاله از روش آن مرجع برای حذف قیود اضافی مسئله و کاهش ابعاد مسئله برنامه‌ریزی خطی استفاده شده است.

#### ۵-۲- الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

در این قسمت یک الگوریتم ترکیبی مونت‌کارلو-ژنتیک مطابق شکل ۳ برای حل مسئله بهینه‌سازی رابطه (۱۲) به‌منظور تعیین تنظیمات بهینه واحد تأخیری رله‌های اضافه جریان ارائه گردیده است. این الگوریتم دارای دو بخش اعمال الگوریتم مونت‌کارلو و حل مسئله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک بوده که در ادامه ابتدا الگوریتم مونت‌کارلو ارائه شده و سپس الگوریتم بهینه‌سازی ارائه گردیده است.

گرفته شود ( $I_{fi}^u < I_{inst}^i$ ). دسته دوم قیود ( $C_m'(X, u)$ ) هماهنگی میان واحد تأخیری رله  $j$  و واحد آنی رله  $i$  را تضمین می‌کند. لذا باید به‌ازای جریان‌های خطاهایی در نظر گرفته شود که رله  $i$  به‌صورت آنی عمل کرده است. لذا شرط  $I_{fi}^u > I_{inst}^i$  لحاظ گردیده است.

اگر تنظیم جریان واحد تأخیری رله اضافه جریان ترکیبی ( $I_{set}$ ) از قبل مشخص باشد و مشخصه عملکرد آن به‌صورت مشخصه استاندارد IEC فرض شود، در آن‌صورت زمان عملکرد رله اضافه جریان ترکیبی  $i$  مطابق رابطه (۱۳) به‌صورت رابطه خطی نسبت به ضریب تنظیم زمانی ( $TMS$ ) آن رله به‌دست می‌آید [۱۱].

$$t_i^u = F_i(TMS_i, I_{set_i}, I_{fi}^u) = f_i(I_{set_i}, I_{fi}^u) \times TMS_i = a_i^u \times TMS_i \quad (13)$$

که در آن:

$$a_i^u = f_i(I_{set_i}, I_{fi}^u) = \frac{K_1}{M_i^{K_2} - 1} \quad \& \quad M_i = \frac{I_{fi}^u}{I_{set_i}} \quad (14)$$

در این رابطه پارامترهای  $K_1$  و  $K_2$  به نوع مشخصه معکوس زمانی واحد تأخیری بستگی دارند. ضریب خطی  $a_i^u$  با معلوم بودن جریان خطای عبوری از رله و تنظیم جریان رله، به‌صورت یک عدد ثابت تعیین می‌گردد.

با جایگزینی  $t_i^u$  از رابطه (۱۳) در تابع هدف مسئله (۱۲)، این تابع هدف مطابق رابطه (۱۵) به‌شکل خطی تبدیل خواهد شد.

$$J(X, U) = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{u \in U} P^u \times a_i^u \right) \times TMS_i = \sum_{i=1}^N c_i^U \times TMS_i \quad (15)$$

بنابراین برای رله  $i$  با معلوم بودن تنظیم جریان رله و جریان خطای عبوری از رله به‌ازای تمامی حالات عدم‌قطعیت‌ها و همچنین احتمال وقوع هر یک از عدم‌قطعیت‌ها، مقدار ضریب خطی  $c_i^U$  مستقل از  $TMS_i$  قابل‌محاسبه است.

با جایگزینی زمان عملکرد رله اصلی  $i$  ( $t_i^u$ ) و زمان عملکرد رله پشتیبان  $j$  ( $t_j^u$ ) در قیود هماهنگی مسئله (۱۲)، این قیود به‌صورت خطی روابط (۱۶) و (۱۷) به‌دست می‌آید [۱۱].

$$C_m(X, u) = a_j^u \times TMS_j - a_i^u \times TMS_i - CTI \quad (16)$$

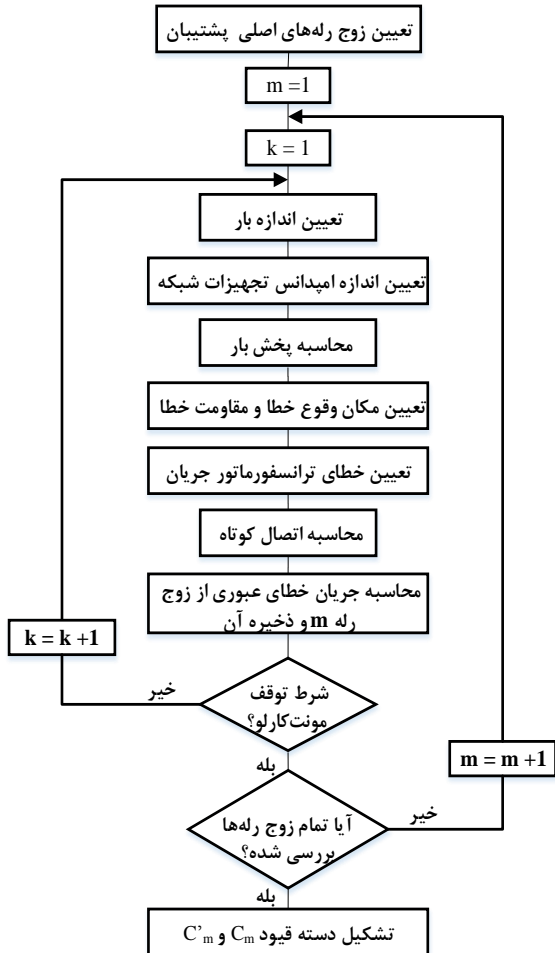
$$C_m'(X, u) = a_j^u \times TMS_j - t_{inst} - CTI \quad (17)$$

که در این رابطه  $a_i^u$  و  $a_j^u$  به‌ترتیب ضرایب خطی زمان عملکرد رله اصلی  $i$  و رله پشتیبان  $j$  برای حالت عدم‌قطعیت  $u$  است.

بنابراین در این شرایط مسئله هماهنگی رابطه (۱۲) با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها به یک مسئله برنامه‌ریزی خطی استاندارد مطابق رابطه (۱۸) تبدیل می‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{Min } J(X, U) &= (C^U)^T X_{TMS} \\ \text{subject to:} \\ C(X, U) &= A^U X_{TMS} \geq \overline{CTI} \\ C'(X, U) &= A'^U X_{TMS} \geq \overline{CTI}' \end{aligned} \quad (18)$$

مونت کارلو مطابق شکل ۴ تکرار گردیده تا دو دسته قیود  $C'_m$  و  $C_m$  برای تمامی زوج رله‌ها تشکیل گردد. بنابراین مسئله بهینه‌سازی غیرخطی رابطه (۱۲) تشکیل گردیده که تعداد قیود این مسئله با توجه به تعداد زیاد تکرار مونت کارلو به شدت افزایش یافته است.

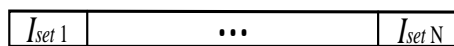


شکل ۳: الگوریتم ترکیبی پیشنهادی.

الگوریتم مونت کارلو بخش ۳-۲ تنها به منظور تعیین تغییرات جریان خطای عبوری از رله‌های اصلی در شرایط عدم قطعیت‌ها ارائه گردید و به کمک آن تنظیم جریان بخش آبی رله‌ها به دست آمد. اما در این بخش به منظور تعیین دسته قیود  $C'_m$  و  $C_m$  برای هر زوج رله اصلی-پشتیبان مجدداً الگوریتم مونت کارلو پیشنهاد گردیده و در شکل ۴ آورده شده است.

شکل ۴: الگوریتم مونت کارلو به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها.

در بخش دوم الگوریتم شکل ۳ برای حل این مسئله بهینه‌سازی غیرخطی از الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی مرجع [۱۰] استفاده شده است. در این روش تنظیمات جریان رله‌ها ( $I_{set}$ ) به عنوان متغیرهای الگوریتم ژنتیک به صورت شکل ۵ کدگذاری گردیده است.



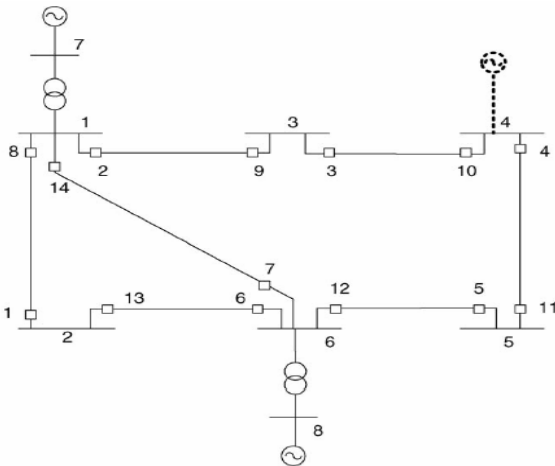
شکل ۵: رشته مورد استفاده در بهینه‌سازی ژنتیک [۱۰].

این رشته دارای  $N$  خانه است که  $N$  تعداد رله‌های شبکه بوده و در هر خانه تنظیم جریان مربوط به آن رله قرار دارد. در ابتدای الگوریتم ژنتیک مطابق شکل ۳، جمعیت اولیه به صورت تصادفی تعیین می‌گردد. با معلوم بودن جمعیت اولیه، تنظیمات جریان رله‌ها برای هر رشته معلوم خواهد بود. بنابراین برای هر رشته ژنتیک

در شکل ۴، شماره زوج رله اصلی-پشتیبان بوده و  $k$  تکرار مونت کارلو است. مطابق الگوریتم شکل ۴، برای زوج رله  $m$ ، با توجه به تابع توزیع احتمال هر یک از عدم قطعیت‌ها، یک مقدار تصادفی برای هر یک از عدم قطعیت‌ها محاسبه می‌گردد. با معلوم بودن عدم قطعیت بار شبکه و امپدانس تجهیزات شبکه، پخش بار انجام شده و ولتاژ تمامی شین‌ها قبل وقوع خطا محاسبه می‌گردد. سپس عدم قطعیت مکان وقوع خطا، مقاومت خطا و خطای اندازه‌گیری ترانسفورماتور جریان با توجه به تابع توزیع احتمال آن‌ها اعمال گردیده و محاسبات اتصال کوتاه انجام می‌شود. در ادامه جریان خطای عبوری از زوج رله اصلی-پشتیبان  $m$  محاسبه و ذخیره می‌گردد. با توجه به این که جریان خطای عبوری از رله اصلی کمتر یا بیشتر از جریان تنظیم بخش آبی رله باشد، مطابق رابطه (۱۲)، در یکی از دو دسته قیود  $C'_m$  یا  $C_m$  قرار می‌گیرد. تکرار مونت کارلو برای زوج رله  $m$  آن قدر تکرار می‌گردد تا تابع توزیع احتمال هر یک از عدم قطعیت‌ها با بیشترین دقت مدل‌سازی گردد. برای سایر زوج رله‌های اصلی-پشتیبان نیز فرآیند



شبکه از شین ۴ به یک شبکه دیگر با ظرفیت اتصال کوتاه ۴۰۰ مگاوات آمپر متصل گردیده است [۲].



شکل ۶: دیاگرام تک خطی شبکه ۸ شینه IEEE [۲].

جدول ۱: اطلاعات خطوط شبکه ۸ شینه IEEE

خط	طول (km)	راکتانس (Ω/km)	مقاومت (Ω/km)
۱-۲	۱۰۰	۰/۰۵۰۰	۰/۰۰۴۰
۱-۳	۷۰	۰/۰۷۱۴	۰/۰۰۵۷
۳-۴	۸۰	۰/۰۵۶۳	۰/۰۰۵۰
۴-۵	۱۰۰	۰/۰۴۵۰	۰/۰۰۵۰
۵-۶	۱۱۰	۰/۰۴۰۹	۰/۰۰۴۵
۲-۶	۹۰	۰/۰۵۰۰	۰/۰۰۴۴
۱-۶	۱۰۰	۰/۰۵۰۰	۰/۰۰۵۰

جدول ۲: اطلاعات ترانسفورماتورهای قدرت شبکه ۸ شینه IEEE

خط	راکتانس (p.u)	ولتاژ ثانویه (kV)	ولتاژ اولیه (kV)	توان نامی (MVA)
۷-۱	۰/۰۴	۱۵۰	۱۰	۱۵۰
۸-۶	۰/۰۴	۱۵۰	۱۰	۱۵۰

جدول ۳: اطلاعات ژنراتورهای شبکه ۸ شینه IEEE

راکتانس (p.u)	ولتاژ اولیه (kV)	توان نامی (MVA)	شین
۰/۱۵	۱۰	۱۵۰	۷
۰/۱۵	۱۰	۱۵۰	۸

جدول ۴: اطلاعات بار شبکه ۸ شینه IEEE

شین	توان راکتیو (MVAR)	توان اکتیو (MW)
۲	۲۰	۴۰
۳	۴۰	۶۰
۴	۴۰	۷۰
۵	۵۰	۷۰

### ۶-۱-۱- محاسبه تنظیم بهینه واحد آبی رله ترکیبی

در این قسمت تنظیم واحد آبی رله‌های ترکیبی شبکه نمونه ۸ شینه به دو صورت زیر محاسبه شده است:

با معلوم بودن تنظیمات جریان رله‌ها و معلوم بودن دسته قیود  $C_m$  یا  $C'_m$ ، مسئله بهینه‌سازی غیرخطی رابطه (۱۲) به یک مسئله بهینه‌سازی خطی مطابق رابطه (۱۸) تبدیل می‌گردد. با توجه به این که تعداد قیود دسته‌های  $C_m$  و  $C'_m$  با توجه به تعداد زیاد تکرار مونت کارلو به شدت افزایش یافته است، در ادامه از الگوریتم کاهش قیود مرجع [۱۵] استفاده گردیده و قیود اضافی مسئله قبل از حل آن حذف شده است. مسئله برنامه‌ریزی خطی رابطه (۱۸) برای هر رشته ژنتیک به کمک روش سیمپلکس حل شده و تنظیمات زمان برای تمامی رله‌ها محاسبه می‌شود. با معلوم بودن تنظیمات جریان و زمان برای تمامی رله‌ها تابع هدف و مقدار برازندگی برای هر رشته محاسبه می‌گردد. این فرآیند برای تمامی رشته‌های جمعیت تکرار گردیده و در ادامه رشته‌هایی که مقدار برازندگی بیشتری دارند، انتخاب شده و با اعمال عملگرهای ژنتیک شامل تقاطع و جهش، جمعیت جدید تولید گردد. سپس الگوریتم ژنتیک برای جمعیت جدید تکرار می‌شود. این روند تا رسیدن به جواب نهایی ادامه می‌یابد. معیار همگرایی این فرآیند تغییر نکردن جواب به‌ازای تعداد تکرار مشخص است.

### ۶- نتایج عددی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در این مقاله از دو شبکه ۸ شینه و ۱۴ شینه IEEE استفاده شده است. خطوط این دو شبکه نمونه با رله‌های اضافه جریان ترکیبی با مشخصه عملکرد معمولی مطابق استاندارد IEC حفاظت گردیده است ( $K_1 = 0/14$ ,  $K_2 = 0/2$ ). زمان عملکرد واحد آبی رله‌ها برابر ۱۰ میلی ثانیه است.  $TMS$  رله‌ها بین ۰/۱ تا ۱ بوده و  $I_{set}$  رله‌ها ۸ مقدار گسسته شامل ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲ و ۲/۲۵ آمپر است. مقدار CTI انتخابی برای هر دو شبکه ۰/۳ ثانیه در نظر گرفته شده است.

تغییرات بار ساعتی برای هر دو شبکه بر اساس بار شبکه ۲۴ شینه IEEE-RTS و بر مبنای بار پایه شبکه مورد مطالعه است [۱۷]. تغییرات مقاومت و راکتانس خطوط به صورت تابع توزیع احتمال نرمال به ترتیب با انحراف معیار ۰/۰۰۷ و ۰/۰۳۵ نسبت به مقادیر مبنای شبکه در نظر گرفته شده است. نوع خط سه فاز متقارن و مکان خطا به صورت توزیع یکنواخت در کل خط در نظر گرفته شده است. اندازه مقاومت خطا ( $R_f^{max}$ ) بین ۰ تا ۶/۵ اهم با توزیع احتمال ویبول ( $\alpha=1/8$ ,  $\beta=1/6$  و  $\nu=0$ ) در نظر گرفته شده است. برای CTها تابع توزیع احتمال نرمال با  $\delta=0/17$  در نظر گرفته شده و تعداد تکرار مونت کارلو ۱۰۰۰۰ بار در نظر گرفته شده است.

### ۶-۱- شبکه ۸ شینه IEEE

این شبکه مطابق شکل ۶ دارای ۱۴ رله اضافه جریان ترکیبی است. اطلاعات این شبکه شامل اطلاعات خطوط، ترانسفورماتورها، ژنراتورها و اطلاعات بار شبکه به ترتیب در جداول ۱ تا ۴ آورده شده است. این

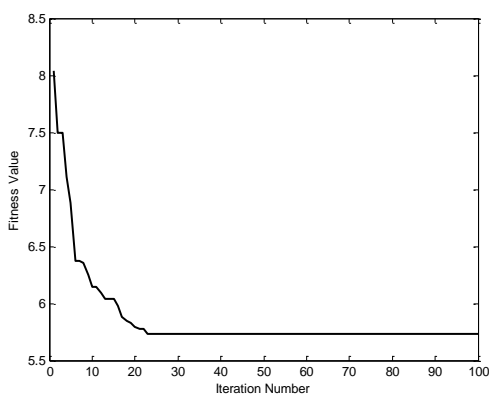
با معلوم بودن بازه تغییرات جریان خطای عبوری از رله‌ها، مسئله تعیین تنظیم بهینه واحد آنی رله ترکیبی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطابق رابطه (۷) فرمول‌بندی گردیده است. با حل این مسئله به کمک روش بازه‌ای پیشنهادی، حداکثر جریان خطای خارجی به عنوان تنظیم بهینه واحد آنی رله‌های اضافه جریان ترکیبی تعیین شده و در ستون پنجم جدول ۵ آورده شده است.

با معلوم بودن تنظیم بهینه واحد آنی، فضای حساسیت واحد آنی (F<sub>sen</sub>) مشخص شده و شاخص احتمال عملکرد صحیح (CTP) قابل محاسبه است. همچنین فضای انتخاب‌گری واحد آنی (F<sub>set</sub>) و شاخص احتمال عدم عملکرد ناخواسته (NUTP) برای هر یک از رله‌ها تعیین می‌شود. مقادیر شاخص‌های CTP و NUTP برای تنظیمات روش معمول و روش بهینه‌سازی پیشنهادی در جدول ۵ آورده شده است.

با توجه به نتایج جدول ۵ مشخص است، شاخص NUTP واحد آنی رله ترکیبی برای هر دو روش معمول و پیشنهادی برابر یک است؛ اما در صورت استفاده از روش پیشنهادی شاخص CTP نسبت به روش معمول بیشتر شده است. به عبارتی تنظیمات هر دو روش پیشنهادی و معمول انتخاب‌گری کامل ایجاد کرده است، اما حساسیت در روش پیشنهادی بیشتر از روش معمول است. همچنین تنظیم جریان واحد آنی در روش پیشنهادی کمتر از روش معمول است. به عبارت دیگر با اعمال تنظیمات روش پیشنهادی برای واحد آنی رله‌های ترکیبی شبکه ۸ شینه، ناحیه بیشتری از خطوط شبکه به طور کامل تحت پوشش واحد آنی رله‌ها قرار گرفته است.

#### ۶-۱-۲- محاسبه تنظیم بهینه واحد تأخیری رله ترکیبی

در این بخش الگوریتم ترکیبی پیشنهادی بخش ۵-۲ به شبکه نمونه ۸ شینه اعمال شده است. در این شرایط با در نظر گرفتن تمام عدم قطعیت‌ها فرآیند مونت کارلو مطابق شکل ۴ اعمال گردیده و دسته قیود  $C_m$  و  $C'_m$  برای هر یک از زوج رله‌های اصلی-پشتیبان محاسبه شده و مسئله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مطابق رابطه (۱۲) تبدیل گردیده است. در ادامه روش ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی مطابق الگوریتم شکل ۳ به مسئله بهینه‌سازی اعمال شده است. تعداد تکرار ژنتیک ۱۰۰ و تعداد اعضای جمعیت ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷: مشخصه همگرایی الگوریتم ژنتیک ترکیبی.

الف: روش معمول: در این روش تنظیم جریان واحد آنی رله ترکیبی برابر جریان خطا در ۸۰٪ طول خط در نظر گرفته شده و در ستون دوم جدول ۵ نتایج آن آورده شده است.

#### جدول ۵: تنظیم جریان واحد آنی به همراه مقادیر شاخص‌های احتمالی در روش معمول و روش بهینه‌سازی پیشنهادی

شماره رله	روش پیشنهادی			روش معمول		
	$I_{inst}$	CTP	NUTP	$I_{inst}$	CTP	NUTP
۱	۱۵۵۹	۰/۷۶۸	۱	۱۱۵۷	۰/۹۴۶	۱
۲	۴۲۷۲	۰/۷۶۶	۱	۴۱۲۳	۰/۸۴۶	۱
۳	۲۷۱۲	۰/۷۴۴	۱	۲۶۲۹	۰/۸۲۲	۱
۴	۲۷۳۰	۰/۷۲۳	۱	۲۶۴۶	۰/۷۹۹	۱
۵	۱۴۵۲	۰/۷۴۳	۱	۱۳۱۵	۰/۸۲۰	۱
۶	۳۹۳۳	۰/۷۶۶	۱	۳۶۹۳	۰/۸۷۰	۱
۷	۲۶۶۳	۰/۷۶۳	۱	۲۱۸۸	۰/۹۳۳	۱
۸	۳۶۹۷	۰/۷۴۹	۱	۳۴۰۶	۰/۸۹۶	۱
۹	۱۴۴۸	۰/۷۵۰	۱	۱۲۸۰	۰/۸۵۲	۱
۱۰	۲۸۱۸	۰/۷۱۳	۱	۲۷۴۳	۰/۸۰۶	۱
۱۱	۲۸۳۳	۰/۷۴۶	۱	۲۷۶۰	۰/۸۳۲	۱
۱۲	۴۴۲۷	۰/۷۸۰	۱	۴۳۰۸	۰/۸۳۶	۱
۱۳	۱۴۹۶	۰/۷۷۰	۱	۱۱۴۰	۰/۹۴۷	۱
۱۴	۲۶۳۲	۰/۸۰۹	۱	۲۱۴۸	۰/۹۴۲	۱

ب: روش بهینه‌سازی پیشنهادی: در این بخش ابتدا الگوریتم مونت کارلو پیشنهادی در قسمت ۳-۲ به شبکه نمونه ۸ شینه اعمال شده است. به کمک این الگوریتم با اعمال تمامی عدم قطعیت‌ها با توجه به توزیع احتمال آن‌ها، جریان خطای عبوری از رله‌های اضافه جریان شبکه برای دو حالت محاسبه شده است. حالت اول به‌ازای خطاهای داخلی (خطاهای داخل خط اصلی رله) و حالت دوم به‌ازای خطاهای خارجی (خطاهای خارج خط اصلی رله) است. در جدول ۶ کران بالا و پایین جریان خطای عبوری از رله‌های اضافه جریان شبکه نمونه به‌ازای دو حالت خطای داخلی و خطای خارجی آورده شده است.

#### جدول ۶: بازه تغییرات جریان خطاهای داخلی و خارجی رله‌ها

رله	$\bar{I}_{f_{int}}$	$\bar{I}_{f_{ext}}$
۱	[۱۰۳۵ ۳۲۹۳]	[۱۴۶ ۱۱۵۷]
۲	[۳۸۳۶ ۵۶۹۸]	[۲۳۱۷ ۴۱۲۳]
۳	[۲۴۴۰ ۳۵۰۴]	[۱۱۱۳ ۲۶۲۹]
۴	[۲۴۲۴ ۳۵۲۹]	[۱۰۱۱ ۲۶۴۶]
۵	[۹۹۵ ۲۷۷۴]	[۴۳۵ ۱۳۱۵]
۶	[۳۳۹۳ ۵۷۰۱]	[۹۷۷ ۳۶۹۳]
۷	[۲۰۰۱ ۴۷۹۵]	[۲۵۲ ۲۱۸۸]
۸	[۳۲۰۰ ۵۱۸۰]	[۹۶۹ ۳۴۰۶]
۹	[۱۰۳۶ ۲۶۸۳]	[۱۲۲ ۱۲۸۰]
۱۰	[۲۵۸۷ ۳۳۹۳]	[۹۶۹ ۲۷۴۳]
۱۱	[۲۶۱۷ ۳۴۶۶]	[۱۱۸۹ ۲۷۶۰]
۱۲	[۳۹۶۰ ۶۰۸۴]	[۲۴۰۲ ۴۳۰۸]
۱۳	[۱۰۳۳ ۳۰۴۵]	[۱۷۳ ۱۱۴۰]
۱۴	[۱۹۳۶ ۵۵۷۶]	[۶۶۵ ۲۱۴۸]

**جدول ۸: مقایسه بازه تغییرات اندازه قیود هماهنگی در روش معمول و روش پیشنهادی**

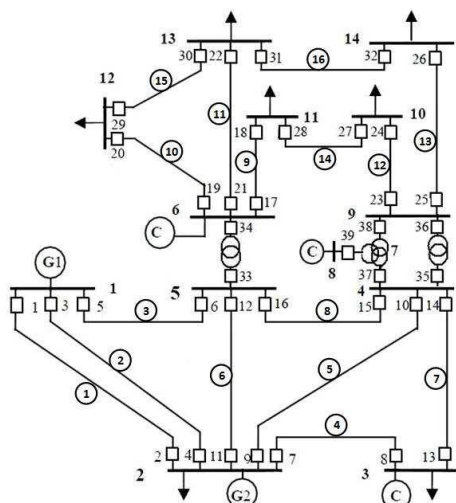
رله اصلی	رله پیشنهادی	بازه تغییرات $C_m$		بازه تغییرات $C'_m$	
		روش معمول	روش پیشنهادی	روش معمول	روش پیشنهادی
۱	۶	[۰/۰۵۹ - ۰/۲۶۵]	[۰/۰۸۴ - ۰/۲۹۶]	[۰/۱۸۳ - ۰/۶۹۴]	[۰/۱۶۳ - ۰/۶۴۱]
۴	۳	[-۰/۱۲۶ - ۰/۲۷۴]	[۰/۰۰۹ - ۰/۴۵۶]	[-۰/۱۴۵ - ۰/۲۵۸]	[۰/۰۱۵ - ۰/۵۴۲]
۱۲	۱۴	[-۰/۰۸۴ - ۰/۴۷۱]	[۰/۰۰۵ - ۰/۵۶۷]	[۰/۰۹۲ - ۰/۶۳۵]	[۰/۱۲۱ - ۰/۷۵۲]

مقایسه نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد، در صورت استفاده از تنظیمات روش پیشنهادی بازه تغییرات قیود هماهنگی همواره بزرگ‌تر از صفر بوده و هیچ‌گونه عدم هماهنگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها رخ نمی‌دهد، در صورتی که اگر از تنظیمات روش معمول استفاده گردد کران پایین بازه تغییرات برای برخی قیود هماهنگی جدول ۴ منفی گردیده که به صورت پررنگ در جدول نشان داده شده است. لذا برای این قیود در صورت وقوع عدم قطعیت‌ها هماهنگی از دست خواهد رفت.

**۶-۲- شبکه ۱۴ شینه IEEE**

شبکه ۱۴ شینه IEEE شامل دو بخش ۱۳۲ و ۳۳ کیلوولت بوده که توسط سه ترانسفورماتور به یکدیگر متصل شده‌اند. این شبکه مطابق شکل ۸ با ۳۹ رله اضافه جریان ترکیبی حفاظت می‌شود. برای این شبکه نیز مشابه شبکه نمونه قبل، الگوریتم مونت کارلو به تمامی رله‌های اصلی اعمال گردیده و کران بالا و پایین جریان خطای عبوری از رله‌ها به‌ازای دو حالت خطای داخلی و خطای خارجی محاسبه گردیده است.

با معلوم بودن جریان خطای بازه‌ای، مسئله بهینه‌سازی رابطه (۷) به کمک روش بازه‌ای پیشنهادی حل شده و تنظیمات بهینه بخش آنی رله‌های اضافه جریان ترکیبی به دست آمده است. این تنظیمات بهینه در جدول ۹ آورده شده است. شاخص NUTP برای تمامی رله‌ها یک بوده یعنی تنظیمات به دست آمده انتخاب‌گری کامل را دارد. همچنین شاخص CTP برای واحد آنی هر رله در جدول ۹ آورده شده است.



شکل ۸: دیاگرام تک خطی شبکه ۱۴ شینه IEEE [۱۵].

بر اساس این شکل الگوریتم ژنتیک پس از حدوداً ۲۴ تکرار همگرا گردیده است. نتایج تنظیمات بهینه واحد تأخیری رله‌های ترکیبی برای شبکه نمونه ۸ شینه با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌ها در جدول ۷ آورده شده است. علاوه بر این در جدول ۷ نتایج تنظیمات بهینه واحد تأخیری رله‌ها بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها آورده شده است.

**جدول ۷: تنظیم جریان و زمان واحد تأخیری رله‌های اضافه جریان ترکیبی**

رله	بدون وجود عدم قطعیت‌ها		با وجود عدم قطعیت‌ها	
	$TMS$	$I_{set}$	$TMS$	$I_{set}$
۱	۰/۱۰۰۰	۲۴۰	۰/۱۰۰۰	۳۰۰
۲	۰/۱۸۰۵	۵۴۰	۰/۲۱۸۸	۵۴۰
۳	۰/۱۳۷۴	۳۶۰	۰/۱۶۹۵	۳۶۰
۴	۰/۱۰۵۴	۴۲۰	۰/۱۰۳۳	۵۴۰
۵	۰/۱۰۳۴	۱۲۰	۰/۱۰۰۰	۲۴۰
۶	۰/۱۰۲۵	۵۴۰	۰/۱۰۰۷	۵۴۰
۷	۰/۱۳۲۴	۳۶۰	۰/۱۶۴۲	۳۶۰
۸	۰/۱۰۱۶	۵۴۰	۰/۱۱۴۷	۵۴۰
۹	۰/۱۰۲۳	۱۲۰	۰/۱۰۳۳	۲۰۰
۱۰	۰/۱۰۰۰	۴۸۰	۰/۱۰۰۰	۵۴۰
۱۱	۰/۱۰۳۵	۵۴۰	۰/۱۲۲۷	۵۴۰
۱۲	۰/۱۷۶۸	۵۴۰	۰/۲۱۰۳	۵۴۰
۱۳	۰/۱۰۳۴	۲۴۰	۰/۱۰۰۰	۳۶۰
۱۴	۰/۱۳۵۶	۳۶۰	۰/۱۷۰۲	۳۶۰
تابع هدف	۴/۵۹۵۲		۵/۷۳۲۴	

مقایسه نتایج جدول نشان می‌دهد تنظیمات زمان بهینه رله‌ها در حالت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها بزرگ‌تر از حالت بدون عدم قطعیت است. البته واضح است که تنظیمات حالت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها پاسخ مقاومی در برابر تمامی عدم قطعیت‌ها ایجاد خواهد کرد.

به منظور نشان دادن اهمیت فرمول بندی ارائه شده در رسیدن به یک پاسخ مقاوم، در ادامه برای سه قید هماهنگی فاصله زمانی هماهنگی بررسی گردیده است. برای این منظور بازه تغییرات قیود هماهنگی  $C_m$  و  $C'_m$  با در نظر گرفتن تمامی عدم قطعیت‌ها در دو حالت محاسبه گردیده است. در حالت اول تنظیمات جریان و زمان ستون دوم و سوم جدول ۷ (تنظیماتی که از روش‌های معمول بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به دست آمده است) منظور گردیده و در حالت دوم تنظیمات جریان و زمان ستون‌های چهار و پنج جدول ۷ (تنظیماتی که از روش پیشنهادی با وجود عدم قطعیت‌ها به دست آمده است) منظور گردیده است. نتایج مقایسه این دو حالت در جدول ۸ آورده شده است.

روش کاهش قیود برای حل آن استفاده شد. برای شبکه ۸ شینه تنظیمات بخش تأخیری برای دو حالت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها مقایسه گردید و نشان داده شد که پاسخ به دست آمده از حالت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، هماهنگی کامل بین زوج رله‌های اصلی-پشتیبان را در تمامی شرایط ایجاد می‌کند.

### مراجع

[1] J. L. Blackburn, and T. J. Domin, *Protective Relaying, Principles and Applications*, 3rd ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

[2] H. Zeineldin, E. El-Saadany, and M. Salama, "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, pp. 988-995, 2006.

[3] A. Mahari, and H. Seyedi, "An analytic approach for optimal coordination of overcurrent relays," *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 7, no. 7, pp. 674-680, 2013.

[4] A. J. Urdaneta, H. Restrepo, S. Marquez, and J. Sanchez, "Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 1, pp. 122-129, 1996.

[5] F. Razavi, H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadi, and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination," *Electric Power System Research*, vol. 78, pp. 713-72, 2008.

[6] V. Papaspiliotopoulos, G. Korres, and N. Maratos, "A novel quadratically constrained quadratic programming method for optimal coordination of directional overcurrent relays," *IEEE Transaction on Power Delivery*, DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2455015, 2015.

[7] F. Albasri, A. Alroomi, and J. Talaq, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1810-1820, 2015.

[8] T. Amraee, "Coordination of directional overcurrent relays using seeker algorithm," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1415-1422, 2012.

[9] M. Y. Shih, C. A. Castillo Salazar, and A. Conde Enriquez, "Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimization," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 14, pp. 2040-2049, 2015.

[10] A. Saberi Noghahi, J. Sadeh, and H. Rajabi Mashhadi, "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA," *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1857-1863, 2009.

[11] A. S. Noghahi, J. Sadeh, and H. Rajabi Mashhadi, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming," *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 25, no. 3, 2010.

[12] W. H. Zhang, S. J. Lee, and M. S. Choi, "Protectability evaluation for overcurrent relay based on a probabilistic method," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 44-48, 2011.

[13] C. W. So and K. K. Li, "Time coordination method for power system protection by evolutionary algorithm,"

جدول ۹: تنظیمات بهینه رله‌های اضافه جریان ترکیبی در شبکه ۱۴ شینه IEEE

رله	$I_{inst}$	CTP	TMS	$I_{set}$	رله	$I_{inst}$	CTP	TMS	$I_{set}$
۱	۲۲۴۸	۰/۸۷۲	۰/۱۵۲۱	۴۲۰	۲۱	۳۲۰۷	۰/۸۴۵	۰/۲۵۲۴	۵۴۰
۲	۲۵۳۱	۰/۹۲۱	۰/۲۱۶۴	۴۸۰	۲۲	۱۵۵۴	۰/۸۹۲	۰/۳۴۱۶	۱۲۰
۳	۲۱۰۴	۰/۸۶۵	۰/۱۵۱۱	۴۲۰	۲۳	۳۳۷۰	۰/۷۸۵	۰/۳۶۹۴	۵۴۰
۴	۲۶۵۱	۰/۹۲۳	۰/۲۱۵۵	۴۸۰	۲۴	۱۹۲۸	۰/۸۸۵	۰/۲۴۸۸	۳۰۰
۵	۱۶۴۹	۰/۸۴۷	۰/۳۲۰۴	۲۴۰	۲۵	۲۱۵۷	۰/۷۸۵	۰/۳۳۲۹	۳۶۰
۶	۱۹۴۰	۰/۷۶۳	۰/۱۳۶۹	۳۶۰	۲۶	۱۸۶۲	۰/۸۹۲	۰/۲۳۵۴	۳۰۰
۷	۳۶۸۹	۰/۹۳۱	۰/۱۳۷۳	۵۴۰	۲۷	۲۴۱۵	۰/۸۷۹	۰/۲۴۶۷	۳۶۰
۸	۲۴۲۱	۰/۷۵۸	۰/۱۸۴۴	۳۶۰	۲۸	۲۸۴۳	۰/۸۵۲	۰/۲۳۴۹	۵۴۰
۹	۳۱۱۰	۰/۸۷۳	۰/۱۸۲۱	۵۴۰	۲۹	۳۱۴۰	۰/۸۹۱	۰/۳۵۷۳	۳۰۰
۱۰	۲۷۰۴	۰/۹۰۱	۰/۱۲۹۰	۵۴۰	۳۰	۲۸۹۴	۰/۷۹۴	۰/۲۲۵۴	۳۰۰
۱۱	۲۸۸۱	۰/۷۲۸	۰/۱۸۳۶	۵۴۰	۳۱	۳۱۱۷	۰/۸۶۰	۰/۲۳۶۱	۳۶۰
۱۲	۱۷۷۳	۰/۹۲۰	۰/۱۶۵۵	۳۰۰	۳۲	۲۷۰۰	۰/۸۸۰	۰/۳۱۱۴	۳۰۰
۱۳	۱۳۸۴	۰/۸۹۵	۰/۵۴۸۰	۱۲۰	۳۳	۲۵۳۰	۰/۷۱۵	۰/۲۱۰۷	۲۴۰
۱۴	۲۵۹۹	۰/۸۲۹	۰/۱۵۶۴	۴۸۰	۳۴	۳۸۴۱	۰/۷۷۸	۰/۳۱۱۷	۵۴۰
۱۵	۳۴۷۱	۰/۷۷۸	۰/۱۸۲۹	۵۴۰	۳۵	۲۶۰۱	۰/۸۴۱	۰/۱۹۴۶	۳۰۰
۱۶	۳۵۹۴	۰/۸۷۴	۰/۱۵۱۸	۵۴۰	۳۶	۳۶۹۴	۰/۹۵۵	۰/۳۰۰۸	۳۶۰
۱۷	۲۸۹۰	۰/۷۷۹	۰/۳۴۴۷	۵۴۰	۳۷	۳۳۲۰	۰/۸۵۶	۰/۱۰۰۰	۵۴۰
۱۸	۱۸۰۶	۰/۹۴۵	۰/۲۳۶۶	۳۰۰	۳۸	۲۹۴۵	۰/۸۳۶	۰/۱۰۰۰	۴۸۰
۱۹	۳۴۲۲	۰/۷۹۵	۰/۲۵۳۱	۵۴۰	۳۹	۳۶۵۰	۰/۸۰۸	۰/۳۴۶۵	۵۴۰
۲۰	۱۲۴۷	۰/۸۲۶	۰/۲۳۸۴	۱۲۰					

در ادامه به منظور تعیین تنظیمات بهینه بخش تأخیری رله‌ها، ابتدا الگوریتم مونت کارلو اعمال شده و دسته قیود  $C'_m$  و  $C_m$  محاسبه گردیده است. سپس با اعمال الگوریتم ترکیبی پیشنهادی شکل ۳، تنظیمات بهینه بخش تأخیری رله‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به دست آمده است. تنظیمات بهینه جریان و زمان بخش تأخیری رله‌ها برای شبکه ۱۴ شینه IEEE در جدول ۹ آورده شده است.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله عدم قطعیت‌های ناشی از تغییر پارامترهای شبکه و تغییر شرایط خطا در مسئله تنظیم بهینه واحدهای آنی و تأخیری رله‌های اضافه جریان ترکیبی به صورت احتمالی مدل گردید. در ادامه دو شاخص احتمال عملکرد صحیح و احتمال عدم عملکرد ناخواسته برای واحد آنی رله ترکیبی ارائه شد. به کمک این شاخص‌ها مسئله تنظیم جریان واحد آنی رله در شرایط عدم قطعیت‌ها برای دو شبکه ۸ شینه و ۱۴ شینه IEEE به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی گردید و برای حل آن یک روش بازه‌ای ارائه شد. با حل این مسئله بهینه‌سازی، تنظیمات بهینه بخش آنی رله‌های ترکیبی برای هر دو شبکه به دست آمده و نشان داده شده است که این تنظیمات نسبت به تنظیمات به دست آمده از روش معمول طول بیشتری از خطوط را تحت حفاظت بخش آنی رله‌ها قرار می‌دهد بدون آنکه هیچ‌گونه تداخلی در عملکرد رله‌ها رخ دهد. همچنین مسئله تنظیم واحد تأخیری رله ترکیبی در شرایط عدم قطعیت‌ها به صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با تعداد قیود بسیار زیاد فرمول‌بندی گردید و از ترکیب روش ژنتیک و

- [۱۶] عباس صابری نوقایی، جواد ساده، حبیب رجیب مشهدی، «هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان در شبکه‌ای با ساختارهای متفاوت به کمک یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی»، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ۱۳۸۵.
- [14] L. A. Kojovic, "Impact of current transformer saturation on overcurrent protection operation," *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, no. 1, pp. 1078-1083, 2002.
- [17] R. Billinton, and S. Jonnavithula, "A test system for teaching overall power system reliability assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 1670-1676, 1996.
- [۱۵] عباس صابری نوقایی، جواد ساده، حبیب رجیب مشهدی، «ارائه شاخص جدید به منظور کاهش قیود در مسئله هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها»، *مجله انجمن مهندسیین برق و الکترونیک ایران*، سال ۲، شماره ۲، ۱۳۹۰.

#### زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Combined overcurrent relay
- <sup>2</sup> Current setting of instantaneous unit
- <sup>3</sup> Current setting of delay unit
- <sup>4</sup> Time multiplier setting
- <sup>5</sup> Linear Programming (LP)
- <sup>6</sup> Simplex Method
- <sup>7</sup> Genetic Algorithm
- <sup>8</sup> Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)
- <sup>9</sup> Quadratically Constrained Quadratic Programming (QCQP)
- <sup>10</sup> Biogeography-Based Optimization
- <sup>11</sup> Seeker Algorithm
- <sup>12</sup> Adaptive Method
- <sup>13</sup> Ant Colony Algorithm
- <sup>14</sup> Interval Method
- <sup>15</sup> Evolutionary Algorithm
- <sup>16</sup> Sensitivity
- <sup>17</sup> Selectivity
- <sup>18</sup> Coordination Time Interval
- <sup>19</sup> Correct trip probability (CTP)
- <sup>20</sup> No unwanted trip probability (NUTP)