

## ارایه شاخصی جدید به منظور کاهش قیود در مساله هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیتها

عباس صابری نوقابی<sup>۱</sup> جواد ساده<sup>۲</sup> حبیب رجبی مشهدی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری- گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران  
abbsaberi@gmail.com

۲- دانشیار- گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران  
sadeh@um.ac.ir

۳- دانشیار- گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران  
h\_mashhadi@um.ac.ir

**چکیده:** مساله هماهنگی رله‌های اضافه جریان در شبکه‌های واقعی و بزرگ با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان وقوع خطا به یک مساله بهینه سازی بزرگ با تعداد بسیار زیادی قید تبدیل می گردد. در این مقاله فرمولبندی جدیدی از مساله هماهنگی رله‌های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختار شبکه و مکان وقوع خطا ارایه گردیده است. به منظور حل این مساله بهینه سازی شاخص جدیدی جهت شناسایی قیود نامساوی غیر فعال در مساله هماهنگی رله‌های اضافه جریان ارایه گردیده است. شاخص پیشنهادی برای هر زوج رله به صورت نسبت تغییرات جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله اصلی به تغییرات جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله پشتیبان تعریف می گردد. از مهمترین ویژگیهای شاخص پیشنهادی، مستقل بودن آن از نوع مشخصه رله اضافه جریان و تنظیمات زمان و جریان آن می‌باشد. براساس این تعریف برای رله‌های اضافه جریان با مشخصه استاندارد IEC ثابت می‌شود که شاخص پیشنهادی قادر است فعال یا غیر فعال بودن قیود مساله هماهنگی را بدون حل مساله هماهنگی تعیین کند. نتایج عددی روی دو شبکه ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE نشان داده تعداد قیود مساله هماهنگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختار شبکه و مکان خطا به شدت افزایش می یابد اما بخش عمده ای از این قیود به کمک شاخص پیشنهادی قابل حذف یا جایگزینی با دیگر قیود مساله هماهنگی می باشند. نتایج ارایه شده نشان می‌دهد که تعداد قیود هماهنگی در این دو شبکه با اعمال روش پیشنهادی بیشتر از ۹۰ درصد کاهش یافته است.

**کلمات کلیدی:** هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان، کاهش قیود، عدم قطعیت، تغییر ساختار شبکه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۸/۶/۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۰/۴/۵

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر جواد ساده

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - مشهد - میدان آزادی - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده‌ی مهندسی - گروه برق

## ۱- مقدمه

رله های اضافه جریان به طور وسیعی در حفاظت سیستم های توزیع، فوق توزیع و انتقال به کار می رود. در سیستم های توزیع حفاظت اصلی برعهده رله اضافه جریان بوده اما در سیستم فوق توزیع و انتقال معمولاً این رله ها به عنوان حفاظت پشتیبان مورد استفاده قرار گرفته و حفاظت اصلی برعهده رله های دیستانس است. مساله هماهنگی بهینه رله های اضافه جریان عبارتست از تعیین تنظیم جریان<sup>۱</sup> ( $I_p$ ) و ضریب تنظیم زمانی<sup>۲</sup> ( $TDS$ ) این رله ها به نحوی که سیستم حفاظتی دارای حساسیت و انتخابگری مطلوب بوده و در حداقل زمان ممکن قسمتی که خطا در آن واقع شده از سایر قسمت های شبکه جدا گردد.

مساله هماهنگی رله های اضافه جریان همواره با عدم قطعیهایی در شرایط سیستم مواجه می گردد. ساختار شبکه به دلایلی همچون وقوع حادثه<sup>۳</sup>، تغییر دینامیکی<sup>۴</sup> ساختار شبکه به دلیل عملکرد سایر رله های شبکه، توسعه شبکه، تعمیرات و غیره در معرض تغییرات قرار دارد [۴-۱]. علاوه بر این در حل مساله هماهنگی مکان وقوع خطا نیز به طور قطعی مشخص نبوده بلکه سیستم حفاظتی می بایست به ازای تمام نقاط داخل ناحیه حفاظت اصلی و پشتیبان عملکرد مطلوب داشته و تداخلی در عملکرد رله ها رخ ندهد. از آنجایی که در نظر گرفتن تمام نقاط داخل ناحیه حفاظتی در حل مساله هماهنگی رله های اضافه جریان امکان پذیر نیست، لذا معمولاً چند مکان خاص از ناحیه حفاظتی به منظور بررسی شرایط هماهنگی بین زوج رله های اصلی/پشتیبان در نظر گرفته می شود [۵].

معمولاً هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن یک ساختار مشخص از سیستم انجام می شود در صورتی که تغییر ساختار شبکه و مکان خطا باعث تغییر جریان اتصال کوتاه گردیده و می تواند باعث عملکرد نادرست رله های اضافه جریان گردد. به منظور رسیدن به یک پاسخ مقاوم در مقابل عدم قطعیتها برای مساله هماهنگی رله های اضافه جریان می بایست قیود هماهنگی زوج رله های اصلی/پشتیبان برای تمامی ساختارهای شبکه و مکانهای متفاوت وقوع خطا در فرمولبندی مساله هماهنگی لحاظ گردد. در مراجع [۷ و ۶] عدم قطعیت در ساختار شبکه و شرایط خطا در مساله هماهنگی لحاظ گردیده و از روشهای الگوریتم تکاملی<sup>۵</sup> (EA) و الگوریتم ترکیبی ژنتیک<sup>۶</sup> (GA) برای حل مساله در شبکه های کوچک استفاده گردیده است.

در شبکه های واقعی و بزرگ مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیتها به یک مساله بهینه سازی بزرگ با تعداد بسیار زیادی قید تبدیل می گردد و حل آن با روشهای معمول بسیار وقت گیر و مشکل می گردد، در صورتی که بخش عمده ای از این قیود در مساله هماهنگی بی تاثیر بوده و قابل حذف هستند. به منظور کاهش ابعاد و قیود مساله هماهنگی در مراجع [۸-۱۰] روشهای متفاوتی پیشنهاد گردیده است. در مرجع [۸] با در نظر گرفتن قیود مربوط به بخش آنی رله اضافه جریان و قیود مربوط به هماهنگی بین رله های اضافه جریان و دیستانس تعداد قیود مساله افزایش یافته است. به منظور

کاهش قیود از یک تکنیک فیلترینگ برای حذف یا تلفیق قیود مساله قبل از حل آن به روش برنامه ریزی خطی<sup>۷</sup> استفاده گردیده است. در مرجع [۹] با استفاده از کرانه های بالا و پایین ضریب تنظیم زمانی رله ها، یک ناحیه پاسخ ممکن<sup>۸</sup> برای زوج رله های اصلی/پشتیبان تعریف می گردد. سپس با فرض خطی بودن معادله مشخصه رله نسبت به ضریب تنظیم زمانی رله و معلوم بودن تنظیم جریان رله ها، ناحیه پاسخ قابل قبول<sup>۹</sup> برای قیود هماهنگی مشخص می گردد. با تعیین نقاط اشتراک ناحیه پاسخ ممکن و ناحیه پاسخ قابل قبول برای قیود هماهنگی، قیود اضافی و قیودی که باعث واگرا شدن مساله می گردند تعیین شده و از لیست قیود مساله هماهنگی حذف می گردند. علاوه بر این در صورتی که به ازای هر زوج رله بیشتر از یک قید وجود داشته باشد، با توجه به اشتراک یا عدم اشتراک نواحی پاسخ قابل قبول این قیود در داخل ناحیه پاسخ ممکن می توان برای حذف یا عدم حذف برخی از این قیود تصمیم مناسبی اتخاذ نمود. الگوریتم جدیدی در مرجع [۱۰] به منظور انتخاب بهینه ضرایب تنظیم جریانی رله ها با هدف کاهش اثر قیود هماهنگی بر زمان عملکرد رله های اضافه جریان ارائه گردیده است. روشهای ارائه شده در این مراجع با فرض معلوم بودن معادله مشخصه رله اضافه جریان و ضرایب آن قابل اعمال است.

در این مقاله ابتدا فرمولبندی جدیدی از مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از ساختار شبکه و مکان وقوع خطا ارائه گردیده است. در شبکه های واقعی و بزرگ مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن این عدم قطعیتها به یک مساله بهینه سازی بزرگ با تعداد بسیار زیادی قید تبدیل می گردد. به منظور کاهش قیود مساله هماهنگی، در این مقاله شاخص جدیدی به منظور تعیین قیود غیر فعال ایجاد شده به دلیل وجود عدم قطعیت در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان ارائه گردیده است. شاخص پیشنهادی مستقل از نوع مشخصه رله و ضرایب تنظیم زمانی و جریانی رله ها، برای هر زوج رله به صورت نسبت تغییرات جریانه های اتصال کوتاه عبوری از رله اصلی به تغییرات جریانه های اتصال کوتاه عبوری از رله پشتیبان تعریف می گردد. برای تمامی رله های اضافه جریان که مشخصه آنها از استاندارد IEC تبعیت می کند، اثبات گردیده که شاخص پیشنهادی می تواند غیر فعال بودن قیود را به درستی تشخیص دهد. ساختار شبکه و مکان وقوع خطا ایجاد می گردد، محاسبه گردیده و در صورتی که شاخص پیشنهادی عدد کوچکتر از یک اخذ کرده باشد، ثابت شده است که آن قید قابل حذف یا جایگزینی با قیود موجود در مساله هماهنگی خواهد بود. نتایج عددی روی دو شبکه ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE نشان داده است که تعداد قیود مساله هماهنگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختار شبکه و مکان خطا به شدت افزایش می یابد اما بخش عمده ای از این قیود دارای شاخص کوچکتر از یک بوده و با روش پیشنهادی قابل حذف یا جایگزینی با دیگر قیود مساله هماهنگی می باشند. تعداد قیود هماهنگی در دو شبکه ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE با

اعمال روش پیشنهادی به ترتیب ۹۱،۲۵ و ۹۱،۲۲ درصد کاهش یافته است.

## ۲- مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیتها

در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان، هدف تعیین تنظیم جریان و ضریب تنظیم زمانی رله هاست به گونه ای که اولاً خطای ایجاد شده در هر نقطه از شبکه در کمترین زمان ممکن رفع گردیده و ثانیاً تداخلی در عملکرد رله های اصلی و پشتیبان ایجاد نگردد. مساله هماهنگی رله های اضافه جریان به صورت مساله بهینه سازی زیر تعریف می گردد:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad J(X) \\ & \text{s.t.} : \\ & C_m(X) = t_j - t_i - CTI \geq 0 \\ & \forall (i, j) \in \Omega \quad m = 1, 2, \dots, n_{BP} \end{aligned} \quad (1)$$

به نحوی که بردار حالت  $X$  مجموعه متغیرهای بهینه سازی مساله شامل تنظیمات جریان ( $I_p$ ) و ضریب تنظیم زمانی ( $TDS$ ) رله های موجود در شبکه بوده و  $C_m(X)$  قید هماهنگی مساله برای  $m$  امین زوج رله اصلی/پشتیبان بوده در حالی که  $n_{BP}$  تعداد زوج رله های اصلی/پشتیبان می باشد.  $t_j$  و  $t_i$  به ترتیب زمان عملکرد رله اصلی  $i$  و رله پشتیبان  $j$  بوده و زوج رله  $(i, j)$  به مجموعه زوج رله های اصلی/پشتیبان ( $\Omega$ ) تعلق دارد.  $CTI$  نیز حداقل فاصله زمانی هماهنگی مورد نیاز برای جلوگیری از تداخل عملکرد رله های اصلی و پشتیبان می باشد.  $J(\cdot)$  تابع هدف در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان است. معمولاً در بسیاری از مراجع این تابع، مجموع زمان عملکرد رله های اصلی به ازای خطا در جلوی آنها در نظر گرفته شده است.

معادله مشخصه رله اضافه جریان زمان عملکرد رله را به صورت تابعی از تنظیم جریان و ضریب تنظیم زمانی رله نمایش می دهد. معادلات متفاوتی برای برازش منحنی مشخصه رله اضافه جریان پیشنهاد گردیده تا علاوه بر ساده بودن، نسبت به منحنی مشخصه واقعی رله خطای کمتری داشته باشد. در این مقاله استاندارد IEC مطابق رابطه (۲) برای نمایش مشخصه رله های اضافه جریان استفاده گردیده است.

$$\begin{aligned} t_i &= TDS_i \times f(M_i) \\ f(M_i) &= \frac{k_1}{M_i^{k_2} - 1} \quad M_i = \frac{I_i}{I_{pi}} \end{aligned} \quad (2)$$

در این رابطه  $TDS_i$  و  $I_{pi}$  به ترتیب ضریب تنظیم زمانی و تنظیم جریان رله  $i$ ام،  $I_i$  جریان خطای عبوری از این رله و  $M_i$  نسبت جریان اتصال کوتاه عبوری از رله  $i$ ام به جریان تنظیم آن رله می باشد. این نسبت همواره می بایست بزرگتر از یک باشد تا رله اضافه جریان عملکرد داشته باشد. ضرایب  $k_1$  و  $k_2$  نوع مشخصه رله اضافه جریان (کاهشی، بسیار کاهشی و شدیداً کاهشی) را نمایش می دهد.

مساله هماهنگی رله های اضافه جریان همواره با عدم قطعیتهایی در شرایط سیستم مواجه می گردد. ساختار شبکه به دلایلی همچون وقوع حادثه، تغییر دینامیکی ساختار شبکه به دلیل عملکرد سایر رله های شبکه، توسعه شبکه، تعمیرات شبکه و سایر عوامل غیر قابل پیش بینی در معرض تغییرات قرار دارد [۴-۱۱]. علاوه بر این در حل مساله هماهنگی مکان وقوع خطا نیز به طور قطعی مشخص نبوده بلکه سیستم حفاظتی می بایست به ازای تمام نقاط داخل ناحیه حفاظت اصلی و پشتیبان سیستم عملکرد مطلوب داشته و تداخلی در عملکرد رله ها رخ ندهد. تغییر در ساختار شبکه و مکان خطا باعث تغییر ماتریس امپدانس شبکه گردیده و تغییر جریان اتصال کوتاه عبوری از رله های اصلی و پشتیبان را به همراه دارد. بنابراین زمان عملکرد رله های اصلی و پشتیبان تغییر کرده و می تواند باعث ایجاد عدم هماهنگی در عملکرد رله های اضافه جریان گردد. به منظور رسیدن به یک پاسخ مقاوم در مقابل عدم قطعیتها می-بایست قیود هماهنگی مربوط به تمامی این عدم قطعیتها در فرمولبندی مساله هماهنگی لحاظ گردد. لذا مساله هماهنگی رله های اضافه جریان در حالت کلی با در نظر گرفتن عدم قطعیتها ناشی از تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان خطا به صورت زیر فرمولبندی می گردد.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \quad J(X, S, K) \\ & \text{s.t.} : \\ & C_m(X, s, k) = t_j^{s,k} - t_i^{s,k} - CTI \geq 0 \\ & \forall (i, j) \in \Omega^s, \quad m = 1, 2, \dots, n_{BP}^s \\ & \forall s \in S, \quad \forall k \in K \end{aligned} \quad (3)$$

در این رابطه  $S$  مجموعه گسسته از تمامی ساختارهای ممکن برای شبکه مورد نظر بوده و  $s$  یکی از ساختارهای این مجموعه است.  $K$  شامل مجموعه نقاط داخل ناحیه حفاظت اصلی رله  $i$  می باشد. حفاظت اصلی ناحیه  $K$  برعهده رله اصلی  $i$  و حفاظت پشتیبان این ناحیه برعهده رله های پشتیبان  $j$  می باشد.  $C_m(X, s, k)$  قید هماهنگی مساله برای  $m$  امین زوج رله اصلی/پشتیبان در ساختار  $s$  و به ازای خطا در نقطه  $k$  از ناحیه حفاظت اصلی رله  $i$  می باشد.  $n_{BP}^s$  و  $\Omega^s$  به ترتیب تعداد و مجموعه زوج رله های اصلی و پشتیبان در ساختار  $s$  بوده و  $t_j^{s,k}$  و  $t_i^{s,k}$  به ترتیب زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان در ساختار  $s$  و به ازای خطا در مکان  $k$  می باشد.

عدم قطعیت در ساختار شبکه و مکان خطا باعث می گردد در شبکه های واقعی و بزرگ مساله هماهنگی رله های اضافه جریان رابطه (۳) به یک مساله بهینه سازی بزرگ با تعداد بسیار زیادی قید تبدیل گردد، در صورتی که بخش عمده ای از این قیود در مساله هماهنگی غیر فعال بوده و قابل حذف هستند. به منظور کاهش ابعاد مساله در بخش بعدی شاخص جدیدی با هدف تشخیص قیود اضافی در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان ارائه گردیده است.

### ۳- آرایه شاخص پیشنهادی

در نظر گرفتن تغییرات ساختار شبکه و مکان خطا در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان، به ازای هر زوج رله اصلی/پشتیبان تعداد قیود بسیار زیادی را به مساله بهینه سازی می افزاید در صورتی که ناحیه پاسخ قابل قبول تعداد زیادی از این قیود با یکدیگر همپوشانی دارد. به منظور تعیین قیود اضافی در ادامه شاخص جدیدی مستقل از نوع و ضرایب مشخصه رله و تنظیمات رله آرایه می گردد.

فرض کنید برای یک زوج رله اصلی/پشتیبان  $(i, j)$  دو قید هماهنگی در دو حالت متفاوت از ساختار شبکه و مکان خطا مطابق روابط (۴) و (۵) تعریف گردد.

$$\begin{aligned} C_m(X, s, k) &= t_j - t_i - CTI \\ &= TDS_j \times f(M_j) - TDS_i \times f(M_i) - CTI \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} C_m(X, s', k') &= t'_j - t'_i - CTI \\ &= TDS_j \times f(M'_j) - TDS_i \times f(M'_i) - CTI \end{aligned} \quad (۵)$$

در این روابط  $M_j$  و  $M_i$  به ترتیب نسبت جریان خطای عبوری از رله اصلی  $i$  و رله پشتیبان  $j$  به جریان تنظیم آنها در ساختار  $s$  و مکان خطا  $k$  بوده و  $M'_j$  و  $M'_i$  پارامترهای مشابهی در ساختار  $s'$  و مکان خطا  $k'$  می باشد. شاخص جدید برای دو قید روابط (۴) و (۵) به صورت رابطه (۶) تعریف می گردد.

$$PI = \frac{\Delta I_i}{\Delta I_j} \quad (۶)$$

که  $\Delta I_i$  و  $\Delta I_j$  از روابط زیر محاسبه می گردد:

$$\Delta I_i = \frac{M'_i - M_i}{M_i} = \frac{\frac{I'_i}{I_{p_i}} - \frac{I_i}{I_{p_i}}}{\frac{I_i}{I_{p_i}}} = \frac{I'_i - I_i}{I_i} \quad (۷)$$

$$\Delta I_j = \frac{M'_j - M_j}{M_j} = \frac{\frac{I'_j}{I_{p_j}} - \frac{I_j}{I_{p_j}}}{\frac{I_j}{I_{p_j}}} = \frac{I'_j - I_j}{I_j} \quad (۸)$$

با توجه به روابط (۷) و (۸)،  $\Delta I_i$  و  $\Delta I_j$  مستقل از تنظیم جریان رله بوده و در نتیجه شاخص  $PI$  نیز مستقل از تنظیم جریان رله بوده و تنها برحسب جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله های اصلی و پشتیبان تعریف می گردد.

اکنون با توجه به شاخص پیشنهادی  $PI$  در ادامه به کمک چند قضیه ریاضی نشان داده شده است که در شرایطی که  $PI \leq 1$  باشد یکی از قیود روابط (۴) یا (۵) قابل حذف هستند.

قضیه ۱: برای تابع محدب و نزولی  $f(x) = \frac{k_1}{x^{k_2} - 1}$  در صورتی که  $I < a < b$  و  $I < a < c$  باشد، آنگاه:

$$\frac{a \leq c}{b \leq d} \Rightarrow \frac{f(a)}{f(b)} > \frac{f(c)}{f(d)} \quad (۹)$$

اثبات این قضیه در پیوست مقاله آورده شده است.

قضیه ۲: اگر برای دو قید هماهنگی متناظر با یک زوج رله مطابق روابط (۴) و (۵)،  $PI \leq 1$ ،  $\Delta I_j < 0$ ،  $M'_j < M'_i$  باشد آنگاه اگر  $C_m(X, s, k) \geq 0$  باشد در نتیجه  $C_m(X, s', k') > C_m(X, s, k)$  خواهد بود. لذا قید رابطه (۵) را می-توان حذف کرد.

اثبات:

$$PI \leq 1, \Delta I_j < 0 \Rightarrow \Delta I_j \leq \Delta I_i \Rightarrow \frac{M'_j}{M'_i} \leq \frac{M_j}{M_i} \quad (۱۰)$$

$$\Delta I_j < 0 \Rightarrow M'_j < M_j \quad (۱۱)$$

با توجه به صورت قضیه  $M'_j < M'_i$  بوده لذا به کمک روابط (۱۰) و (۱۱) و قضیه ۱ در صورت جایگزینی  $M'_j$ ،  $M'_i$ ،  $M_j$ ،  $M_i$  به ترتیب با  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  نتیجه می گردد:

$$\frac{f(M'_j)}{f(M'_i)} > \frac{f(M_j)}{f(M_i)} \Rightarrow \frac{f(M'_j) - f(M_j)}{f(M'_i) - f(M_i)} > \frac{f(M_j)}{f(M_i)} \quad (۱۲)$$

از طرفی:

$$\begin{aligned} C_m(X, s, k) &\geq 0 \\ &\Rightarrow TDS_j \times f(M_j) - TDS_i \times f(M_i) \geq CTI > 0 \quad (۱۳) \\ &\Rightarrow \frac{f(M_j)}{f(M_i)} > \frac{TDS_i}{TDS_j} \end{aligned}$$

از روابط (۱۲) و (۱۳) می توان نتیجه گرفت:

بودن جریان تنظیم رله ها نقض نگردیده است اما در شبکه ۳۰ شینه IEEE برای تعداد بسیار کمی از قیود این شرط نقض گردیده است. بنابراین با توجه به توضیحات بالا می توان نتیجه گرفت که اگر برای دو قید هماهنگی متناظر با یک زوج رله  $PI \leq 1$  باشد یکی از دو قید با توجه به علامت  $\Delta I_j$  قابل حذف خواهد بود (بجز در مواردی نادری که شرط  $M'_j < M'_i$  نقض گردد)، اما اگر  $PI > 1$  باشد هیچ یک از قیود حذف نمی گردند.

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی

به منظور کاهش قیود مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیتها در ساختار شبکه و مکان خطا به کمک شاخص پیشنهادی، در این بخش الگوریتم پیشنهادی مطابق شکل (۱) ارائه گردیده است.

در این الگوریتم یک ساختار و مکان خطا در ابتدا به عنوان شرایط پایه در نظر گرفته شده و سایر ساختارها و مکانهای خطا به عنوان شرایطی جدید با شرایط پایه از دیدگاه جریان اتصال کوتاه عبوری از زوج رله اصلی/پشتیبان مقایسه گردیده اند. شرایط پایه در این مقاله ساختار اصلی شبکه در صورتی که تمامی خطوط در مدار باشند و اتصال کوتاه سه فاز متقارن جلوی رله اصلی در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل (۱) در قست ابتدای الگوریتم جریان خطای عبوری از زوج رله های اصلی/پشتیبان ( $I_j$  و  $I_i$ ) در شرایط پایه برای تمامی زوج رله ها محاسبه و ذخیره می گردد. در ادامه با تغییر ساختار شبکه ( $s$ ) و تغییر مکان خطا ( $k$ ) شرایط جدیدی برای جریان خطای عبوری از هر زوج رله ایجاد گردیده و جریانهای خطای عبوری از زوج رله های اصلی/پشتیبان ( $I'_j$  و  $I'_i$ ) مجددا در شرایط جدید محاسبه می گردد. بنابراین متناظر با هر زوج رله در شرایط جدید یک قید هماهنگی ایجاد می گردد. در صورتی که قید شرایط پایه مطابق رابطه (۴) و قید شرایط جدید مطابق رابطه (۵) در نظر گرفته شود، شاخص  $PI$  برای این دو قید محاسبه گردیده و سه حالت زیر می تواند ایجاد گردد:

۱. اگر  $PI \leq 1$  و  $\Delta I_j < 0$  و  $M'_j < M'_i$  باشد مطابق قضیه ۲ قید شرایط جدید حذف می گردد.
۲. اگر  $PI \leq 1$  و  $\Delta I_j > 0$  و  $M'_j < M'_i$  باشد مطابق قضیه ۳ قید شرایط پایه حذف می گردد و قید شرایط جدید جایگزین آن قید می گردد. در این حالت جریان خطای عبوری از زوج رله ها در شرایط جدید ( $I'_j$  و  $I'_i$ ) نیز جایگزین جریان خطای در شرایط پایه ( $I_j$  و  $I_i$ ) می گردند.
۳. اگر  $PI > 1$  باشد قید شرایط جدید باید به لیست قیود شرایط پایه اضافه گردد. در این حالت به تعداد قیود شرایط پایه یک واحد اضافه گردیده تا در تکرارهای بعدی این قید نیز ملاک مقایسه قرار گیرد.

$$\begin{aligned} \frac{f(M'_j) - f(M_j)}{f(M'_i) - f(M_i)} &> \frac{TDS_i}{TDS_j} \\ \Rightarrow (TDS_j \times f(M'_j) - TDS_i \times f(M'_i)) - \\ (TDS_j \times f(M_j) - TDS_i \times f(M_i)) &> 0 \\ \Rightarrow (TDS_j \times f(M'_j) - TDS_i \times f(M'_i) - CTI) - \\ (TDS_j \times f(M_j) - TDS_i \times f(M_i) - CTI) &> 0 \\ \Rightarrow C_m(X, s', k') - C_m(X, s, k) &> 0 \\ \Rightarrow C_m(X, s', k') > C_m(X, s, k) &\geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

تعبیر ساده‌ای از بیان ریاضی این قضیه را می توان چنین ارائه کرد که اگر در قید مربوط به شرایط جدید، جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان کاهش یابد اما کاهش قدرمطلق جریان اتصال کوتاه عبوری از رله پشتیبان بیشتر از رله اصلی باشد، آنگاه زمان عملکرد رله پشتیبان افزایش بیشتری نسبت به زمان عملکرد رله اصلی خواهد داشت و بنابراین تفاضل زمان عملکرد رله پشتیبان و اصلی افزایش یافته و عدم هماهنگی رخ نمی دهد.

**قضیه ۳:** اگر برای دو قید هماهنگی متناظر با یک زوج رله مطابق روابط (۴) و (۵)،  $M'_j < M'_i$  و  $\Delta I_j > 0$ ،  $PI \leq 1$  باشد آنگاه اگر  $C_m(X, s', k') \geq 0$  باشد در نتیجه  $C_m(X, s, k) > C_m(X, s', k')$  حذف می گردد. اثبات این قضیه مشابه قضیه ۲ می باشد.

به طور مشابه تعبیر ساده‌ای از قضیه ۳ به این صورت است که اگر در قید مربوط به شرایط جدید، جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان افزایش یابد اما افزایش قدرمطلق جریان اتصال کوتاه عبوری از رله پشتیبان کمتر از رله اصلی باشد، آنگاه زمان عملکرد رله پشتیبان کاهش کمتری نسبت به زمان عملکرد رله اصلی خواهد داشت و بنابراین تفاضل زمان عملکرد رله پشتیبان و اصلی افزایش یافته و عدم هماهنگی رخ نمی دهد.

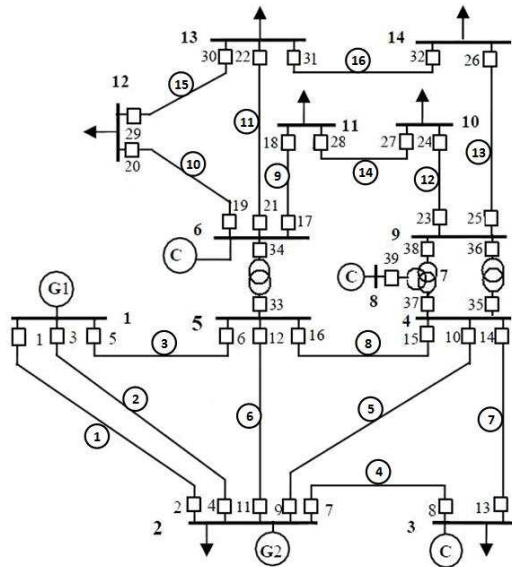
در فضایی بالا شاخص  $PI$  و شرط  $\Delta I_j > 0$  مستقل از تنظیمات جریان رله هاست اما شرط  $M'_j < M'_i$  به تنظیمات جریان رله ها وابسته می باشد. از طرف دیگر نتایج عددی روی دو شبکه نمونه نشان داده است که در تمامی ساختارهای شبکه و به ازای تمامی نقاط داخل ناحیه حفاظتی، همواره جریان خطای عبوری از رله اصلی از جریان خطای عبوری از رله پشتیبان بزرگتر می باشد تنها در شرایطی که رله اصلی و پشتیبان در روی یک فیدر شعاعی قرار داشته باشند این دو جریان خطا می توانند برابر گردند. اما با توجه به اینکه ضرایب  $M$  علاوه بر جریان خطا به تنظیمات جریان رله ها نیز وابسته است، امکان نقض شرط  $M'_j < M'_i$  در موارد خاص وجود دارد. نتایج عددی نشان داده است که در شبکه ۱۴ شینه IEEE هیچگاه این شرط با توجه به متفاوت

## ۵- نتایج عددی

به منظور بررسی میزان تاثیر شاخص پیشنهادی بر کاهش قیود مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعيتها، الگوریتم پیشنهادی به دو شبکه نمونه ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE اعمال گردیده است. تمامی خطوط و ترانسهای این شبکه با رله های اضافه جریان با مشخصه کاهشی مطابق استاندارد IEC ( $k_1=0.14$ ) و ( $k_2=0.04$ ) حفاظت گردیده است. در این مقاله ساختار اصلی شبکه و خطا جلوی رله اصلی به عنوان شرایط پایه در نظر گرفته شده و خروج تک به تک خطوط به عنوان عدم قطعیت در ساختار شبکه و خطای سه فاز متقارن در شین دور رله اصلی به عنوان عدم قطعیت در شرایط خطا در نظر گرفته شده است.

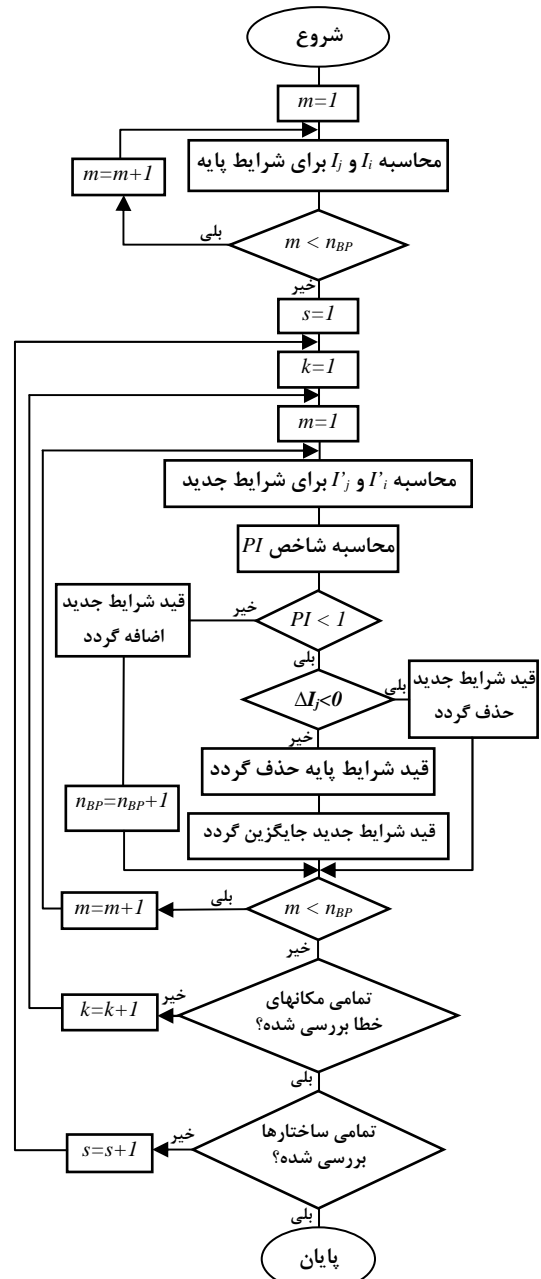
### ۵-۱- شبکه ۱۴ شینه IEEE

شبکه ۱۴ شینه IEEE شامل دو بخش ۱۳۲ و ۳۳ کیلوولت بوده که توسط سه ترانسفورماتور به یکدیگر متصل شده اند. این شبکه مطابق شکل (۲) دارای ۱۶ خط، ۲ ژنراتور، ۳ کندانسور سنکرون و ۳۹ رله اضافه جریان است. تنظیمات جریان این رله ها با توجه به حداکثر جریان بار، تنظیمات روی رله ها و نسبت ترانسفورماتور جریان تعیین گردیده [۱۱] و در ستون دوم و پنجم جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه ۱۴ شینه IEEE

تعداد زوج رله های اصلی/پشتیبان در ساختار اصلی این شبکه ۱۰۵ عدد می باشد. بنابراین بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در مساله هماهنگی تعداد قیود هماهنگی مساله تنها ۱۰۵ قید خواهد بود. با در نظر گرفتن عدم قطعیت های اشاره شده در ساختار شبکه و مکان خطا تعداد قیود مساله هماهنگی به ۲۲۳۹ قید افزایش می یابد. به منظور حذف قیود اضافی از بین این قیود، الگوریتم پیشنهادی به شبکه ۱۴ شینه اعمال گردیده و نتایج زیر حاصل شده است:



شکل (۱): الگوریتم پیشنهادی به منظور اعمال شاخص پیشنهادی به مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعيتها

این فرآیند برای تمامی زوج رله ها در ساختارهای متفاوت و به ازای مکانهای مختلف خطا تکرار گردیده تا کل قیودی که به دلیل وجود عدم قطعیت در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان ایجاد می گردند مورد بررسی قرار گرفته و قیود اضافی آنها حذف یا جایگزین گردد. در نهایت می توان از روشهای بهینه سازی برای حل مساله هماهنگی رله های اضافه جریان کلی که ابعاد آن به صورت قابل توجهی کاهش یافته استفاده کرد.

- جریان خطای عبوری از رله اصلی در تمامی ساختارها و به ازای تمامی مکانهای خطا بزرگتر از جریان خطای عبوری از رله پشتیبان بوده است. همچنین با توجه به تنظیمات جریان رله مطابق جدول (۱)، برای تمامی زوج رله های اصلی/پشتیبان و در تمامی ساختارها  $M'_j < M'_i$  بوده است. لذا تنظیمات جریان جدول (۱) در فرآیند کاهش قیود بی تاثیر بوده است.
- تعداد قیود مساله هماهنگی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ۱۰۵ قید بوده که با در نظر گرفتن عدم قطعیت در ساختار شبکه و مکان خطا می بایست تعداد ۲۱۳۴ قید به تعداد قیود مساله اضافه گردد. اما با اعمال شاخص پیشنهادی از بین ۲۱۳۴ قید تعداد ۲۰۴۳ (۹۵٫۷ درصد) قید دارای شاخص  $PI \leq 1$  بوده و با توجه به علامت  $\Delta I_j$  و قضایای ۲ و ۳ در حالت های ۱ و ۲ قرار گرفته و حذف یا جایگزین گردیده اند. فقط تعداد ۹۱ (۴٫۳ درصد) قید دارای شاخص  $PI > 1$  بوده که این قیود به انتهای لیست قیود شرایط پایه اضافه گردیده اند. بنابراین در مجموع تعداد قیود مساله هماهنگی با در نظر گرفتن عدم قطعیتها ۲۲۳۹ (۲۱۳۴+۱۰۵) قید بوده که با اعمال شاخص پیشنهادی به تعداد ۱۹۶ (۱۰۵+۹۱) قید کاهش یافته است (۹۱٫۲۵ درصد کاهش قیود).
- همچنین از مجموع ۱۹۶ قید باقیمانده تعداد ۱۴۵ قید به ازای خطا در جلوی رله و ۵۱ قید به ازای خطا در شین دور رله اصلی فعال گردیده اند.

جدول (۱): تنظیمات جریان و زمان رله های اضافه جریان در شبکه ۱۴

شینه IEEE

شماره رله	$I_p(A)$	TDS	شماره رله	$I_p(A)$	TDS
1	450	0.0921	21	700	0.3959
2	500	0.1805	22	140	0.3847
3	450	0.0920	23	900	0.3585
4	500	0.1803	24	300	0.3887
5	200	0.2783	25	400	0.4634
6	400	0.0869	26	250	0.3763
7	900	0.0732	27	400	0.3879
8	400	0.1450	28	600	0.3360
9	600	0.1419	29	350	0.4925
10	500	0.0732	30	300	0.3384
11	600	0.1424	31	400	0.3778
12	300	0.1292	32	300	0.4198
13	100	0.6130	33	200	0.3210
14	500	0.0951	34	900	0.2728
15	800	0.1663	35	300	0.1128
16	800	0.0926	36	400	0.2599
17	500	0.4626	37	600	0.0500
18	300	0.3415	38	500	0.0500
19	800	0.3962	39	800	0.4669
20	100	0.3596			

با توجه به مشخصه رله اضافه جریان رابطه (۱۲)، با معلوم بودن تنظیم جریان رله، زمان عملکرد رله ها به صورت تابع خطی از ضریب تنظیم زمانی رله (TDS) بدست می آید. لذا مساله هماهنگی رله های

اضافه جریان به یک مساله برنامه ریزی خطی تبدیل گردیده و از نرم افزار Matlab برای حل این مساله استفاده گردیده است. مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیتها در دو حالت حل گردیده است. در حالت اول بدون در نظر گرفتن روش پیشنهادی کاهش قیود یعنی با در نظر گرفتن تمامی ۲۲۳۹ قید، مساله حل گردیده و در حالت دوم با در نظر گرفتن الگوریتم پیشنهادی کاهش قیود یعنی با در نظر گرفتن ۱۹۶ قید مساله برنامه ریزی خطی حل گردیده است. نتایج دو حالت کاملا مشابه بوده که این نتایج در ستون سوم و ششم جدول (۱) آورده شده است.

### ۵-۲- شبکه ۳۰ شینه IEEE

این شبکه نیز شامل دو بخش ۱۳۲ و ۳۳ کیلوولت بوده و دارای ۷۶ رله اضافه جریان می باشد. تعداد قیود مساله هماهنگی در ساختار اصلی شبکه و به ازای خطا جلوی رله اصلی (شرایط پایه) ۱۶۰ قید متناظر با تعداد زوج رله های اصلی پشتیبان می باشد. با در نظر گرفتن عدم قطعیتها ناشی از تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان خطا در شبکه ۳۰ شینه تعداد قیود هماهنگی به ۶۰۳۱ قید افزایش می یابد. با اعمال الگوریتم پیشنهادی شکل (۱) تعداد قیود مساله به ۵۲۹ قید کاهش یافته است (۹۱٫۲۲ درصد کاهش قیود). به عبارت دیگر از تعداد کل قیود مساله هماهنگی با در نظر گرفتن عدم قطعیتها، تعداد ۵۵۰۲ قید دارای شاخص  $PI \leq 1$  بوده و با توجه به قضایای ۲ و ۳ حذف و یا جایگزین گردیده است. تنها تعداد ۳۶۹ قید دارای شاخص  $PI > 1$  بوده که به مجموعه قیود اضافه گردیده اند. در این شبکه نیز مشابه شبکه قبلی جریان خطای عبوری از رله اصلی در تمامی ساختارها و به ازای تمامی مکانهای خطا بزرگتر از جریان خطای عبوری از رله پشتیبان بوده اما با توجه به تنظیمات جریان رله ها، برای تعداد ۱۵۵ قید، شرط  $M'_j < M'_i$  نقض گردیده است. لذا در شبکه ۳۰ شینه IEEE، تنظیمات جریان در فرآیند کاهش قیود تاثیر (ضعیفی) داشته است.

مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیتها یکبار بدون در نظر گرفتن روش پیشنهادی کاهش قیود یعنی با در نظر گرفتن تمامی ۶۰۳۱ قید مساله حل گردیده و بار دیگر با اعمال الگوریتم پیشنهادی کاهش قیود یعنی با در نظر گرفتن ۵۲۹ قید حل گردیده است. نتایج دو حالت برای شبکه ۳۰ شینه IEEE نیز کاملا مشابه بوده که در ستونهای ۲، ۴ و ۶ جدول (۲) آورده شده است.

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله عدم قطعیت ناشی از تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان خطا در مساله هماهنگی بهینه رله های اضافه جریان مدل گردید. در نظر گرفتن عدم قطعیتها باعث می گردد به ازای هر زوج رله تعداد زیادی قید نامساوی به مساله هماهنگی اضافه گردد که بخش عمده ای از آنها غیر فعال می باشند. در این مقاله به منظور شناسایی و حذف قیود غیر فعال، شاخص جدیدی ارائه گردید. این شاخص مستقل از نوع مشخصه

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{a^2 - (b+c)a + bc}{a} + 1 - 1 + bc - bc > 0 \\ &\Rightarrow (1 - b + bc - c) + (a - bc - 1 + \frac{bc}{a}) > 0 \\ &\Rightarrow (c-1)(b-1) > (\frac{bc}{a} - 1)(a-1) \\ &\Rightarrow \frac{(c-1)(b-1)}{(a-1)} > (\frac{bc}{a} - 1) \end{aligned} \quad (16)$$

از طرفی چون  $\frac{a}{b} \leq \frac{c}{d}$  لذا  $\frac{bc}{a} \geq d$  ، بنابراین رابطه (۱۶) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{(c-1)(b-1)}{(a-1)} > (d-1) \Rightarrow \frac{(a-1)}{(b-1)} < \frac{(c-1)}{(d-1)} \quad (17)$$

برای نامساوی های زیر می توان نوشت:

$$\begin{aligned} &1 < a < b, 1 < a < c, \frac{a}{b} \leq \frac{c}{d} \\ &\Rightarrow 1 < a^{k_2} < b^{k_2}, 1 < a^{k_2} < c^{k_2}, \frac{a^{k_2}}{b^{k_2}} \leq \frac{c^{k_2}}{d^{k_2}} \end{aligned} \quad (18)$$

با توجه به بخش اول اثبات قضیه و رابطه (۱۸) داریم:

$$\begin{aligned} &\frac{(a^{k_2} - 1)}{(b^{k_2} - 1)} < \frac{(c^{k_2} - 1)}{(d^{k_2} - 1)} \\ &\Rightarrow \frac{\frac{k_1}{(a^{k_2} - 1)}}{\frac{k_1}{(b^{k_2} - 1)}} > \frac{\frac{k_1}{(c^{k_2} - 1)}}{\frac{k_1}{(d^{k_2} - 1)}} \Rightarrow \frac{f(a)}{f(b)} > \frac{f(c)}{f(d)} \end{aligned} \quad (19)$$

## مراجع

- [1] Abdelaziz A. Y., Talaat H. E. A., Nosseir A. I., Hajjar Ammar A., "An Adaptive Protection Scheme for Optimal Coordination of Overcurrent Relays", Electric Power Systems Research, Vol.-61, pp.1-9, 2002.
- [2] Orduna E., Garcés F., Handschin E., "Algorithmic-Knowledge-Based Adaptive Coordination in Transmission Protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.-18, No.-1, pp. 61- 65, January 2003.
- [3] Urdaneta A. J., Perez L. G., Harold Restrepo, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Dynamic Changes in the Network Topology", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.-12, No.- 4, pp. 1458-1463, October 1997.
- [4] Urdaneta A. J., Resterpo H., Sanchez J., Fajardo J., "Coordination of Directional Overcurrent Relays Timing using Linear Programming", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.-11, No.-1, pp.122-129, January 1996.
- [5] Damborg M. J., Ramaswami R., Venkata S. S., Postforoosh J. M., "Computer Aided Transmission Protection System Design Part I: Algorithms", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 1, January 1984.
- [6] So C. W., Li K. K., "Time coordination method for power system protection by evolutionary algorithm", IEEE

رله و تنظیمات رله فقط به جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله اصلی و پشتیبان وابسته است. برای رله های اضافه جریان با مشخصه استاندارد IEC نشان داده شد که شاخص پیشنهادی قادر است فعال یا غیر فعال بودن قیود مساله هماهنگی را بدون حل مساله هماهنگی تعیین کند. نتایج اعمال این شاخص روی دو شبکه استاندارد ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE نشان داد بیشتر از ۹۰ درصد قیودی که به دلیل تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان خطا ایجاد گردیده اند، حذف یا جایگزین شده اند. روش پیشنهادی، مسیر را برای مواجهه با عدم قطعیت های مختلف در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان در شبکه های واقعی و بزرگ هموار ساخته و درک عمیق تری از چگونگی تاثیر گذاری این عدم قطعیتها بر پاسخ بهینه مساله هماهنگی فراهم می سازد.

جدول (۲): تنظیمات زمان رله های اضافه جریان در شبکه ۳۰ شینه

شماره رله	TDS	شماره رله	TDS	شماره رله	TDS
1	0.2622	27	0.4752	53	0.8627
2	0.3093	28	0.1869	54	0.5320
3	0.2797	29	0.7416	55	0.8204
4	0.1298	30	0.3351	56	0.5902
5	0.4571	31	0.6868	57	0.7073
6	0.2812	32	0.3587	58	0.6637
7	0.2241	33	0.5072	59	0.4005
8	0.2343	34	0.3199	60	0.6876
9	0.2105	35	0.7460	61	0.0500
10	0.1430	36	0.6550	62	0.0500
11	0.3855	37	0.8262	63	0.2711
12	0.3142	38	0.5494	64	0.8133
13	0.3941	39	0.6681	65	0.4153
14	0.4567	40	0.6837	66	0.1053
15	0.3825	41	0.3615	67	0.2441
16	0.2012	42	0.6111	68	0.0500
17	0.2338	43	0.7373	69	0.2130
18	0.1705	44	0.2797	70	0.0500
19	0.5302	45	0.6583	71	0.1225
20	0.6301	46	0.4149	72	0.1056
21	0.6520	47	0.7786	73	0.4110
22	0.2379	48	0.1806	74	0.3378
23	0.4395	49	0.7480	75	0.6753
24	0.2925	50	0.4842	76	0.2418
25	0.0500	51	0.6394		
26	0.0500	52	0.2957		

## پیوست

اثبات قضیه ۱:

ابتدا ثابت می کنیم اگر  $1 < a < b, 1 < a < c$  و  $\frac{a}{b} \leq \frac{c}{d}$  آنگاه:

$$\frac{(a-1)}{(b-1)} < \frac{(c-1)}{(d-1)}$$

$$a < b, a < c \Rightarrow \frac{(a-b)(a-c)}{a} > 0 \quad (15)$$

با ساده سازی، فاکتور گیری و استفاده از فرضیات قضیه، از رابطه بالا خواهیم داشت:



- Transaction Industry Application, Vol. 36, No. 5, pp. 1235-1240, Sept. 2000.
- [7] Saberi Noghahi A., Sadeh J., Rajabi Mashhadi H., "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA", accepted to published in IEEE Transactions on Power Delivery.
- [8] Urdaneta A. J., Pérez L. G., Gómez J. F., Feijoo B., González M., "Presolve Analysis and Interior Point Solutions of the Linear Programming Coordination Problem of Directional Overcurrent Relays", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.-23, Issue-8, pp. 819-825, November 2001.
- [9] Kazemi Karegar H., Askarian Abyaneh H., Ohis V., Meshkin M., "Pre-processing of the optimal coordination of overcurrent relays", Electric Power Systems Research, Vol. 75, pp. 134-141, Aug. 2005.
- [10] Ezzeddine M., Kaczmarek R., "Reduction of effect of coordination constraints in the linear optimization of operating times of overcurrent relays", in Proc. 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Ajaccio, pp. 707-712, May 2008.
- [11] Zeineldin H. H., El-Saadany E. F., Salama M. M. A., "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization", Electric Power Systems Research, Vol.76, pp.988-995, 2006.

## زیر نویس ها

---

- 1- Current Setting
- 2- Time Dial Setting
- 3- Contingency
- 4- Dynamic Change
- 5- Evolutionary Algorithm
- 6- Hybrid Genetic Algorithm
- 7- Linear Programming
- 8- Possible Solution Area (PSA)
- 9- Feasible Solution Area (FSA)