

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

عباس صابری نوqابی<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  
abbsaber@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 درنظر گرفتن عدم قطعیت‌ها ناشی از تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان وقوع خطا به یک مساله بهینه سازی بزرگ با تعداد بسیار زیادی قید تبدیل می‌گردد. 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 می‌گردد. 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 فعلی یا غیر فعلی 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 می‌یابد اما بخش عمده ای از این قیود به کمک شاخص پیشنهادی قابل حذف یا جایگزینی با دیگر قیود مساله هماهنگی می‌باشد. 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 - دانشکده مهندسی - گروه برق



## ۱- مقدمه

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 کرناهای بالا و پایین ضرب 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 ضرب 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 گردد. 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 ارایه گردیده است. روشهای ارایه شده در این مراجع با فرض معلوم بودن معادله مشخصه رله اضافه جریان و ضرایب آن قابل اعمال است.

در این مقاله ابتدا فرمولیندی جدیدی از مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از ساختار شبکه و مکان وقوع خطا ارایه گردیده است. در شبکه های واقعی و بزرگ مساله هماهنگی رله های اضافه جریان با درنظر 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 فعل ایجاد شده به دلیل وجود عدم قطعیت در مساله هماهنگی رله های اضافه جریان ارایه 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 جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله اضافه جریان می باشد که این رله اضافه جریان ارایه گردیده است. در نظر گرفتن این شاخص پیشنهادی برای تمامی قیود جدید، که به دلیل عدم قطعیت در 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

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 بر عهده 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 بر عهده رله های دیستانس است. مساله هماهنگی بهینه رله های اضافه جریان عبارتست از تعیین تنظیم جریان<sup>۱</sup> ( $I_P$ ) و ضرب 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 خطأ در آن واقع شده از سایر قسمتهای شبکه جدا گردد.

مساله هماهنگی رله های اضافه جریان همواره با عدم قطعیتهایی در شرایط سیستم مواجه می گردد. ساختار شبکه به دلایل 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 باشد که از این 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].

معمولًا 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 باشد که قیود هماهنگی زوج رله های اصلی/پشتیبان برای تمامی ساختارهای شبکه و مکانهای متفاوت وقوع خطا در فرمولیندی مساله هماهنگی لحظه گردد. در مراجع [۶ و ۷] عدم قطعیت در ساختار شبکه و شرایط خطا در مساله هماهنگی لحظه 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

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:

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

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 تعداد زوج رله های اصلی/پشتیبان می باشد.  $t_i$  و  $t_j$  به ترتیب زمان عملکرد رله اصلی  $i$  و رله پشتیبان ز 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.  $J(X)$  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 خطای 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 برآش 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.

$$t_i = TDS_i \times f(M_i) \quad (2)$$

$$f(M_i) = \frac{k_1}{M_i^{k_2} - 1} \quad M_i = \frac{I_i}{I_{p_i}}$$

در این رابطه  $TDS_i$  و  $I_{p_i}$  به ترتیب ضریب تنظیم زمانی و تنظیم جریان رله  $i$ ،  $I_i$  جریان خطای عبوری از این رله و  $M_i$  نسبت جریان اتصال کوتاه عبوری از رله  $i$  به جریان تنظیم آن رله می باشد. این نسبت همواره می 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 قطعیتها می 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 [۴-۱]. علاوه بر این در حل مساله هماهنگی مکان وقوع خطای 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 خطای 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 باشد قیود هماهنگی مربوط به تمامی این عدم قطعیتها در فرمولیندی 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 خطای به صورت زیر فرمولیندی می گردد.

$$\text{Min} \quad J(X, S, K)$$

s.t :

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

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

عدم قطعیت در ساختار شبکه و مکان خطای 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 فعل 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 ارایه گردیده است.



### ۳- ارایه شاخص پیشنهادی

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

$$\frac{a}{b} \leq \frac{c}{d} \Rightarrow \frac{f(a)}{f(b)} > \frac{f(c)}{f(d)} \quad (9)$$

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)،  $M'_j < M'_i$  باشد آنگاه اگر  $\Delta I_j < 0$  و  $PI \leq 1$  باشد در نتیجه  $C_m(X, s, k) \geq 0$  خواهد بود. لذا قید رابطه (۵) را می-توان حذف کرد.

اثبات:

$$PI \leq 1, \Delta I_j < 0 \Rightarrow \Delta I_j \leq \Delta I_i \Rightarrow \frac{M'_j}{M'_i} \leq \frac{M_j}{M_i} \quad (10)$$

$$\Delta I_j < 0 \Rightarrow M'_j < M_j \quad (11)$$

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  $M_i$  به ترتیب با  $a, b, c, d$  نتیجه می‌گردد:

$$\frac{f(M'_j)}{f(M'_i)} > \frac{f(M_j)}{f(M_i)} \Rightarrow \frac{f(M'_j) - f(M_j)}{f(M'_i) - f(M_i)} > \frac{f(M_j)}{f(M_i)} \quad (12)$$

از طرفی:

$$\begin{aligned} C_m(X, s, k) &\geq 0 \\ &\Rightarrow TDS_j \times f(M_j) - TDS_i \times f(M_i) \geq CTI > 0 \quad (13) \\ &\Rightarrow \frac{f(M_j)}{f(M_i)} > \frac{TDS_i}{TDS_j} \end{aligned}$$

از روابط (۱۲) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت:

در نظر گرفتن تغییرات ساختار شبکه و مکان خطای در مساله هماهنگی رله‌های اضافه جریان، به ازای هر زوج رله اصلی/پشتیبان تعداد قیود بسیار زیادی را به مساله بهینه سازی می‌افزاید 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 ارایه می‌گردد.

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

$$\begin{aligned} C_m(X, s, k) &= t_j - t_i - CTI \\ &= TDS_j \times f(M_j) - TDS_i \times f(M_i) - CTI \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_m(X, s', k') &= t'_j - t'_i - CTI \\ &= TDS_j \times f(M'_j) - TDS_i \times f(M'_i) - CTI \end{aligned} \quad (5)$$

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 خطای بوده و  $M'_j$  و  $M'_i$  پارامترهای مشابهی در ساختار  $s'$  و مکان خطای  $k'$  می‌باشد. شاخص جدید برای دو قید روابط (۴) و (۵) به صورت رابطه (۶) تعریف می‌گردد.

$$PI = \frac{\Delta I_i}{\Delta I_j} \quad (6)$$

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

$$\Delta I_i = \frac{M'_i - M_i}{M_i} = \frac{\frac{I'_i}{I_{p_i}} - \frac{I_i}{I_{p_i}}}{\frac{I_i}{I_{p_i}}} = \frac{I'_i - I_i}{I_i} \quad (7)$$

$$\Delta I_j = \frac{M'_j - M_j}{M_j} = \frac{\frac{I'_j}{I_{p_j}} - \frac{I_j}{I_{p_j}}}{\frac{I_j}{I_{p_j}}} = \frac{I'_j - I_j}{I_j} \quad (8)$$

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 بر حسب جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان تعیین می‌گردد.

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.

بودن جریان تنظیم رله ها نقض نگردیده است اما در شبکه ۳۰ شینه IEEE برای تعداد بسیار کمی از قیود این شرط نقض نگردیده 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  $\Delta I_j$  قبل حذف خواهد بود (جز در مواردی نادری که شرط  $M'_j < M'_i$  نقض گردد)، اما اگر  $PI > 1$  باشد هیچ یک از قیود حذف نمی گردد.

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی

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

در این الگوریتم یک ساختار و مکان خطابه در ابتدا به عنوان شرایط پایه در نظر گرفته شده و سایر ساختارها و مکانهای خطابه 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 متقاضیان جلوی رله اصلی در نظر گرفته شده است.

مطابق شکل (۱) در قست ابتدای الگوریتم جریان خطای عبوری از زوج رله های اصلی/پشتیبان ( $I_i$  و  $I_j$ ) در شرایط پایه برای تمامی زوج رله ها محاسبه و ذخیره می گردد. در ادامه با تغییر ساختار شبکه (۵) و تغییر مکان خطابه (۶) شرایط جدیدی برای جریان خطای عبوری از هر زوج رله ایجاد گردیده و جریانهای خطای عبوری از زوج رله های اصلی/پشتیبان ( $I'_i$  و  $I'_j$ ) 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  $M'_j < M'_i$  باشد مطابق قضیه ۲ قید شرایط جدید حذف می گردد.
۲. اگر  $PI \leq 1$  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 ( $I'_i$  و  $I'_j$ ) نیز جایگزین جریان خطای در شرایط پایه ( $I_i$  و  $I_j$ ) می گردد.
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.

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

تعابیر 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 رله های اصلی و پشتیبان کاهش یابد اما کوتاه عبوری از رله اصلی باشد، آنگاه 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  $\Delta I_j > 0$  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 (۴) حذف می گردد.

اثبات این قضیه مشابه قضیه ۲ می باشد.

به طور مشابه تعابیر ساده‌ای از قضیه ۳ به این صورت است که اگر در قید مربوط به شرایط جدید، جریانهای اتصال کوتاه عبوری از رله های اصلی و پشتیبان افزایش یابد اما افزایش قدر مطلق 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 قضایای 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 خطابه می توانند برابر گردد. اما با توجه به اینکه ضرایب  $M$  علاوه بر جریان خطابه 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

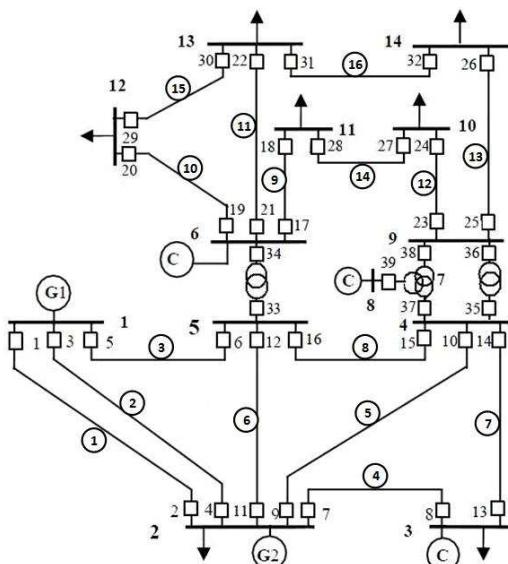


## ۵- نتایج عددی

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

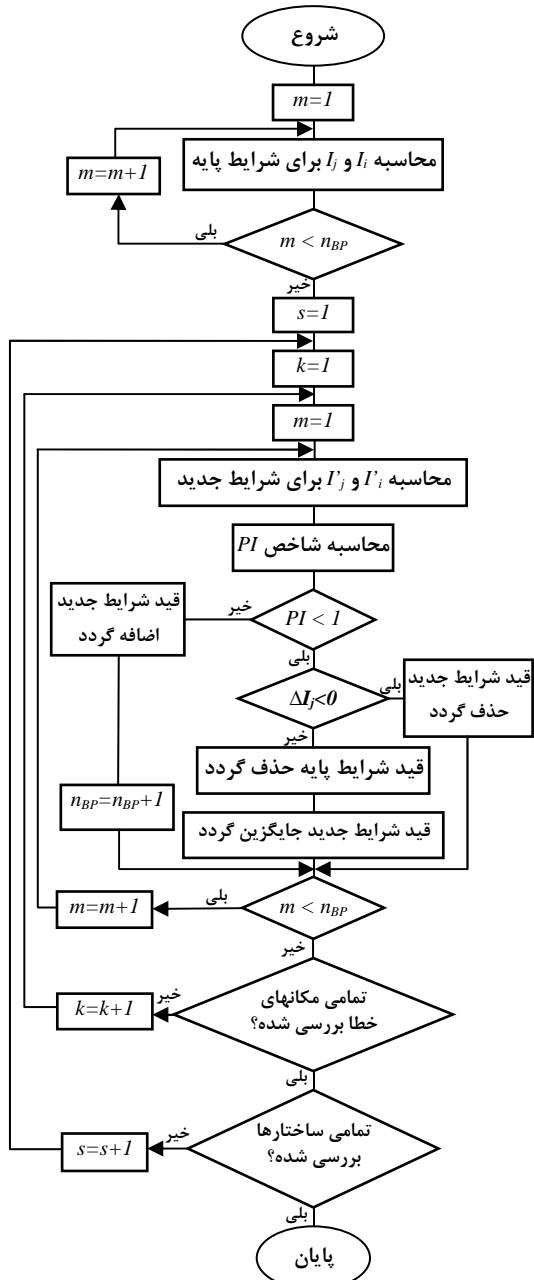
### ۱-۱- شبکه ۱۴ شینه IEEE

شبکه ۱۴ شینه IEEE شامل دو بخش ۱۳۲ و ۳۳ کیلولوت بوده که توسط سه ترانسفورماتور به یکدیگر متصل شده اند. این شبکه مطابق شکل (۲) دارای ۱۶ خط، ۲ ژنراتور، ۳ کنداسور 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 تکخطی شبکه ۱۴ شینه IEEE

تعداد زوج رله های اصلی/پشتیبان در ساختار اصلی این شبکه ۱۰۵ عدد می باشد. بنابراین بدون درنظر گرفتن عدم قطعیت در مساله هماهنگی تعداد قیود هماهنگی مساله تنها ۱۰۵ قید خواهد بود. با در نظر گرفتن عدم قطعیتهای 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 قطعیتها

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 گردد 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 خطابزرگتر 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 خطاب می باشد. عدد قیود مساله هماهنگی با اعمال شاخص پیشنهادی از بین ۲۱۳۴ قید به تعداد قیود مساله اضافه گردید. اما با اعمال شاخص پیشنهادی از بین ۲۱۳۴ قید تعداد ۹۵,۷ (درصد) قید دارای شاخص  $PI \leq 1$  بوده و با توجه به علامت  $\Delta I$  و قضایای ۲ و ۳ در حالتی 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 (۱۰۵+۲۱۳۴) 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 خط در جلوی رله و ۵۱ قید به ازای خط در شین دور رله اصلی فعال گردیده اند.

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

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

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

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله عدم قطعیت ناشی از تغییر ساختار شبکه و تغییر مکان خط در مساله هماهنگی بهینه 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.



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

از طرفی چون  $\frac{bc}{a} \geq d$  لذا  $\frac{a}{b} \leq \frac{c}{d}$  بنابراین رابطه (16) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

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

برای نامساوی‌های زیر می‌توان نوشت:

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

با توجه به بخش اول اثبات قضیه و رابطه (18) داریم:

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

## 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., Garces 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 عوری از رله اصلی و پشتیبان وابسته است. برای رله‌های اضافه جریان با مشخصه استاندارد IEC نشان داده شد که شاخص پیشنهادی قادر است فعل یا غیر فعل 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 خط ایجاد گردیده اند، حذف یا جایگزین شده اند. روش پیشنهادی، مسیر را برای مواجهه با عدم قطعیت‌های مختلف در مساله هماهنگی رله‌های اضافه جریان در شبکه‌های واقعی و بزرگ هموار ساخته و درک عمیق تری از چگونگی تاثیر گذاری این عدم قطعیت‌ها بر پاسخ بهینه مساله هماهنگی فراهم می‌سازد.

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

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

## پیوست

اثبات قضیه ۱:

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

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

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

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 Noghabi 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.

## زیرنویس‌ها

- 
- 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)



# A New Index for Constraint Reduction in Relay Coordination Problem Considering Uncertainty

A. Saberi Noghabi<sup>1</sup>

J. Sadeh<sup>2</sup>

H. Rajabi Mashhadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
abbsaberi@gmail.com

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
sadeh@um.ac.ir

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
h\_mashhadi@um.ac.ir

## Abstract:

In a realistic and large power system, the overcurrent relay coordination problem considering different network topologies and different location of faults is stated as an optimization problem with a large number of constraints. In this paper, a new index is proposed to detect and remove the inactive inequality constraints in relay coordination problem. This index is defined for each relay pairs, as the ratio of the variation of fault current passing through the primary relay to the variation of fault current passing through the backup relay. The proposed index is independent of the overcurrent relay characteristics and current and time multiplier settings of the relay, which is the most significant feature of this index. For IEC relay characteristic, it is shown that without solving the coordination problem, the proposed index can distinguish the active and inactive inequality constraints. The 14-bus and 30-bus IEEE test systems are used to verify the performance of the proposed index. The presented results show that greater than 90 percent of the inactive constraints can be detected and removed from the set of constraints by using the proposed index.

**Keywords:** Optimal Overcurrent Relay Coordination, Constraint Reduction, Uncertainty, Different Network Topologies

---

**Submission date:** 04 Sep., 2009

**Acceptance date:** 26 Jun., 2011

**Corresponding author:** Javad Sadeh

**Corresponding author's address:** Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.