تخصیص حفاظت دیفرانسیل برای هماهنگی حفاظتی بهینه شبکه‌های توزیع فعال تحت پیکربندی‌های مختلف

علی عباسی[1] ، دانشجوی دکتری، حسین کاظمی کارگر[2]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
Al_abbasi@sbu.ac.ir –

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
H_kazemi@sbu.ac.ir –

چکیده: عدم قطعیت در وضعیت اتصال تولیدات پراکنده و ساختار شبکه موجب پیچیدگی تنظیم رله های اضافه جریان در شبکه توزیع شده است. با افزایش تعداد حالات بهره‌برداری فضای جستجوی مسئله به شدت محدود و حتی پوچ شده، به گونه ای که دیگر نتوان به مجموعه یکتا از تنظیماتی که برای تمام حالات معتبر هستند، دست یافت. با استفاده از حفاظت دیفرانسیل در برخی از فیدرها و رفع آنی خطا می‌توان قیود مسئله را تخفیف داد و فضای جستجو را از حالت پوچی خارج کرد. حفاظت دیفرانسیل باید با کمترین تعداد و در مکان‌های مناسب نصب شود تا قیود ناسازگار حذف گردند. بدین منظور روش جدیدی مبتنی بر فیلتر اضافی و با توجه به ماهیت حفاظت دیفرانسیل و تأثیر آن بر هماهنگی برای شناسایی قیود ناسازگار پیشنهاد شده است. خروجی این روش، مجموعه‌ای از خطوط کاندید برای نصب حفاظت دیفرانسیل و در نتیجه همگرایی هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان است. این روش برای شبکه توزیع فعال حلقوی مورد مطالعه، شبیه سازی شده و نتایج نشان می دهند که روش پیشنهادی با انتخاب مناسب مکان حفاظت دیفرانسیل این امکان را فراهم می کند تا با تنظیم واحد برای همه رله‌ها، هماهنگی حفاظتی همواره برقرار باشد.

واژه های کلیدی: هماهنگی بهینه حفاظتی، رله اضافه جریان، حفاظت تطبیقی، تنظیم بهینه، فیلتر افزایشی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۱۰/۰۲

نام نویسنده‌ی مسئول : حسین کاظمی کارگر

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران- دانشگاه شهید بهشتی- دانشکده برق و کامپیوتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

۱- مقدمه

هماهنگی رله های اضافه جریان یکی از موضوعات پژوهشی مورد توجه در سیستم‌های قدرت است. حفاظت اضافه جریان به عنوان حفاظت پشتیبان در شبکه انتقال و حفاظت اصلی در شبکه توزیع بایستی خطا را در کمترین زمان ممکن با رعایت انتخابگری رفع نماید. تنظیم بهینه رله های اضافه جریان به دو روش هندسی با تکیه بر نقاط شکست [۱-۲] و بهینه سازی صورت می گیرد. در روش‌های بهینه سازی زمان عملکرد رله‌ها برای خطاهای مختلف در سیستم تحت قید هماهنگی حفاظتی حداقل می شود [۳-۷]. روش‌های مختلف بهینه سازی چون ژنتیک، فاخته، نظام ذرات، تکاملی و غیره جهت تنظیم بهینه استفاده شده است. در اکثر مقالات هماهنگی حفاظتی برای یک پیکربندی و توپولوژی ثابت صورت گرفته است.

تولیدات پراکنده DG در شبکه توزیع علاوه بر تاثیرات حفاظتی خاص خود [۸-۹] که موجب عدم هماهنگی و حساسیت رله ها می شوند، فرض پیکربندی ثابت در تنظیم رله‌ها را نا معتبر می کند. بسته به حالت‌های مختلف قطع و وصل تولیدات پراکنده الگوهای مختلفی از جریان‌های بار و اتصال کوتاه ایجاد می شود. تنظیمات رله‌ها باید به گونه‌ای باشد که تحت شرایط مختلف بهره‌برداری (قطع و وصل تولیدات پراکنده و خروج خطوط) هماهنگی حفاظتی برقرار باشد.

چند روش مختلف در این زمینه در مقالات بکار رفته است. در [۱۰-۱۲] هماهنگی حفاظتی با در نظر گرفتن توپولوژی‌های مختلف انجام شده است. این امر باعث می شود تا زمان عملکرد رله‌ها به دلیل قیود زیاد به شدت بالا رود. همچنین از FCL برای محدود کردن مشارکت در خطای DGها استفاده می شود تا جریان خطا به هنگام قطع و وصل تولیدات پراکنده تغیرات زیادی نداشته باشد [۱۳-۱۶].

حفاظت تطبیقی که به منظور پاسخ مناسب به تغیرات دینامیکی شبکه ارائه شده است راه حل دیگری در این زمینه است. حفاظت تطبیقی به دو دسته آفلاین و آنلاین تقسیم می شود. در حفاظت تطبیقی آنلاین، رله با استفاده از اطلاعات توپولوژی شبکه و کلیدهای قدرت، تنظیمات مناسب را برای شرایط بهره‌برداری جدید محاسبه می نماید [۱۷-۱۹]. حال آنکه در روش آفلاین تنظیمات حالت‌های بهره‌برداری مختلف از قبل محاسبه و تحت عنوان گروه‌های تنظیم مختلف در رله ذخیره شده است. رله گروه تنظیم مناسب را بسته به شرایط بهره‌برداری از حافظه انتخاب و فعال می نماید [۲۰-۲۴].

مشکل اصلی حفاظت تطبیقی آفلاین محدود بودن گروه‌های تنظیم رله‌ها است که نمی توان برای هر شرایط بهره‌برداری یک گروه تنظیم تعریف کرد. در [۲۵-۲۶] حفاظت تطبیقی بهینه برای پیکربندی‌های مختلف با در نظر گرفتن محدودیت در گروه تنظیم انجام شده است. بالغ بر صد شرایط بهره‌برداری مختلف به صورت بهینه توسط چهار گروه تنظیم پوشش داده شده است. از شاخص پیشنهادی و به همراه روش‌های خوشه بندی برای تعیین توپولوژی‌های تحت پوشش هر گروه تنظیم استفاده شده است.

چنانچه حالات بهره‌برداری بسیار زیاد باشد، نمی توان با یک و چند گروه تنظیم به هماهنگی حفاظتی دست یافت. در این صورت در برخی از حالات رله‌های پشتیبان سریع‌تر فرمان قطع را صادر خواهند کرد. برای رفع مشکل بایستی قیود مسئله کاهش داده شود. این کاهش قیود را می توان از طریق برقراری لینک مخابراتی بین جفت رله‌های مشکل دار و یا حفاظت دیفرانسیل پیاده کرد.

حفاظت دیفرانسیل یک حفاظت واحد بوده که به خطاهای خارج ناحیه واکنش نشان نمی دهد. کاربرد حفاظت دیفرانسیل در شبکه‌های توزیع فعال با توجه به مشکلات حفاظتی گسترش یافته است [۲۷]. با نصب حفاظت دیفرانسیل بر روی یک فیدر و رفع آنی خطا، قید هماهنگی تخفیف می یابد و درجه آزادی مسئله بهبود می یابد.

در این مقاله به تاثیر حفاظت دیفرانسیل دیفرانسیل بر هماهنگی رله های اضافه جریان پرداخته شده است و حضور لینک دیفرانسیل به همراه رله های اضافه جریان و تاثیر آن بر هماهنگی به صورت تحلیلی بحث شده است. سپس با توجه به نقش حفاظت دیفرانسیل سعی شده است تا بهترین مکان برای نصب حفاظت دیفرانسیل انتخاب شود. بایستی سعی شود تا حفاظت دیفرانسیل بر روی فیدرهای مناسب و تأثیر گذار نصب شود تا هماهنگی حفاظتی همگرا شود. هدف از نصب لینک دیفرانسیل می تواند رفع ناهماهنگی ناشی از تنظیمات یکسان رله ها در مدهای مختلف یا بیشترین کاهش در زمان عملکرد رله ها باشد. روش پیشنهادی بر اساس فیلترهای افزایشی ارایه شده است تا قیود هماهنگی که بیشترین ناسازگاری را دارند، با توجه به کارکرد حفاظت دیفرانسیل تعیین شوند. این مجموعه قیود ناسازگار شناسایی شده، کاندیداهای مناسب جهت نصب حفاظت دیفرانسیل را دربر دارند به نحوی که انتخابگری بین همه رله‌ها در همه مدها برقرار باشد و بیشترین کاهش در زمان عملکرد رله ها رخ دهد. بدین منظور هماهنگی حفاظتی در یک شبکه توزیع حلقوی پیشنهادی CIGREE و برای حالات بهره‌برداری مختلف انجام شده است. سپس مکان لینک دیفرانسیل با استفاده از روش پیشنهادی تعیین شد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که روش پیشنهادی به خوبی عمل کرده و تنظیمات جدید رله‌ها خطا در همه مدها را با رعایت انتخابگری قطع می کند.

ساختار این مقاله بدین شرح است: در بخش دوم، هماهنگی حفاظتی بهینه در شبکه‌های توزیع فعال بیان شده و تأثیر عدم قطعیت در بهره-برداری شبکه بر روی قیود هماهنگی حفاظتی بررسی شده است. تأثیر حفاظت دیفرانسیل بر روی قیود ناشی از شرایط مختلف بهره‌برداری در بخش سوم تشریح شده است. روش پیشنهادی به منظور تخصیص بهنه حفاظت دیفرانسیل و رفع مشکلات ناشی از تداخل با تکیه بر فیلتر افزایشی در بخش چهارم آمده است. نتایج شبیه‌سازی روش

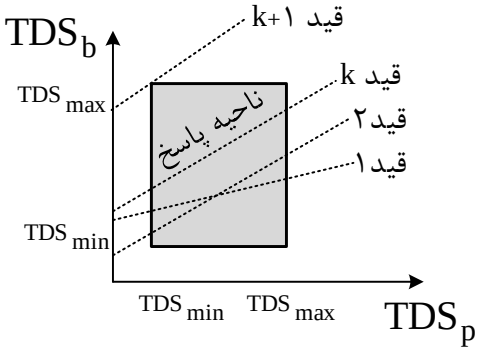
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

پیشنهادی بر شبکه تغییر یافته CIGREE در بخش پنجم ذکر شده است.

۲- هماهنگی بهینه رله‌های شبکه‌های توزیع

هماهنگی بهینه رله‌های اضافه‌جریان در شبکه‌های قدرت همواره یکی از موضوعات پژوهشی در سیستم قدرت است که می‌توان آن را به شکل یک مسئله بهینه سازی مقید تفسیر کرد. هدف افزایش حساسیت رله‌ها با کاهش زمان رفع خطا و با رعایت قید هماهنگی بین زوج رله‌های اصلی-پشتیبان است[۲۹].



شکل (۱): حذف فضای پاسخ در نتیجه قیود زیاد

قطع و وصل تولیدات پراکنده و خروج خط باعث می‌شود تا الگوهای جریان بار و جریان خطا در شبکه تحت تاثیر قرار بگیرند. تنظیمات بهینه رله‌ها بایستی به نحوی صورت گیرد که برای همه حالات، هماهنگی حفاظتی برقرار باشد. هماهنگی حفاظتی با درنظر گرفتن پیکربندی‌های مختلف را می‌توان به صورت (۱) و (۲) بیان کرد.

$$Minimize\,OF = \sum_{m=1}^{M} w_m \sum_{n=1}^{N} t_{mn} \qquad (۱)$$

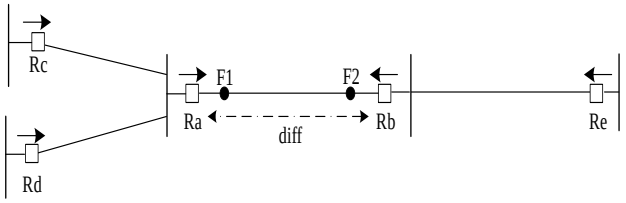
$$t_{nq} - t_n \geq CTI \quad \forall n, q \in \Omega \qquad (۲)$$

که m نشان دهنده حالات مختلف بهره‌برداری، w_m ضریب وزنی عملکرد در حالت بهره‌برداری m و M تعداد کل حالات بهره‌برداری است. t_{mn} بیانگر زمان عملکرد رله nام در حالت بهره‌برداری mام برای خطای نزدیک و N تعداد کل رله‌ها است. t_{nq} زمان عملکرد رله پشتیبان q به ازای خطای جلوی رله اصلی n و Ω مجموعه متشکل از زوج رله‌های اصلی و پشتیبان است. هم چنین مقادیر مجاز I_p و TDS برای رله‌های اضافه‌جریان به شرح (۳) و (۴) است. $\max(I_{load}|_{\{op\}_m})$ بیشترین جریان بار عبوری به ازای حالات بهره‌برداری مختلف است.

$$1.2 \times \max(I_{load}|_{\{op\}_m}) \leq I_p \leq 2 \times \max(I_{load}|_{\{op\}_m}) \qquad (۳)$$

$$TDS_{min} \leq TDS \leq TDS_{max} \qquad (۴)$$

معمولا تعداد حالات بهره‌برداری شبکه با توجه به خروج خطوط و وضعیت تولیدات پراکنده خیلی زیاد است که به همین دلیل اکثرا از معیار N-1 استفاده می‌شود. ممکن است تعدد قیود مسئله باعث شود که نتوان به یک تنظیم بهینه دست یافت تا همه قیود مسئله ارضاء شود. در این صورت هماهنگی بین برخی رله‌های اصلی و پشتیبان در بعضی از شرایط بهره‌برداری وجود نخواهد داشت. شکل (۱) این پدیده را برای یک زوج رله اصلی-پشتیبان نشان می‌دهد که با افزایش قیود مسئله، فضای جستجو کاملا از بین رفته و به یک فضای پوچ تبدیل می‌شود. به ازای قیدهای یک تا k، ناحیه پاسخ وجود دارد درحالی که با اضافه شدن قید $k+1$، ناحیه پاسخ از میان می‌رود. البته لازم به ذکر است که شیب خطوط قید برای زوج رله‌های اصلی-پشتیبان با توجه



شکل (۲): شبکه نمونه

به متفاوت بودن جریان آستانه رله می‌تواند بزرگتر یا کوچکتر از یک نیز باشد [۲۸].

با استفاده از حفاظت دیفرانسیل می‌توان برخی از قیودی را که منجر به حذف فضای مسئله می‌شوند، بی تأثیر کرد. حفاظت دیفرانسیل باید در جاهایی نصب شود که بدترین قیود را بلا اثر کند.

۳- تاثیر حفاظت دیفرانسیل بر قیود هماهنگی

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، تعدد قیود هماهنگی ممکن است منجر به واگرایی مسئله هماهنگی حفاظتی بهینه شود. یکی از راه‌حل های مناسب در این زمینه، بکارگیری حفاظت دیفرانسیل در برخی از خطوط و فیدرها است. تخصیص حفاظت دیفرانسیل بایستی به نحو مناسب انجام شود تا همگرایی هماهنگی حفاظتی بازیابی شود.

حفاظت دیفرانسیل یک حفاظت واحد است که مستقل از تغییرات توپولوژی شبکه است و خطا را به سرعت تشخیص می‌دهد. این حفاظت به دامنه جریان خطا حساس نیست و لذا در شبکه‌های توزیع فعال کاربرد دارد. البته این نوع حفاظت به دلیل لینک مخابراتی سنکرون بین دو رله، گران است. برای تشریح تأثیر حفاظت دیفرانسیل، قسمتی از یک شبکه در شکل (۲) رسم شده است. قیود هماهنگی بین رله‌های نشان داده شده به ازای خطاهای F1 و F2 در (۵-۸) ذکر شده است. لازم به ذکر است که از روش برنامه‌ریزی خطی در این مقاله استفاده می‌شود.

$$\alpha_1 TDS_c - \alpha_2 TDS_a \geq CTI \qquad (۵)$$

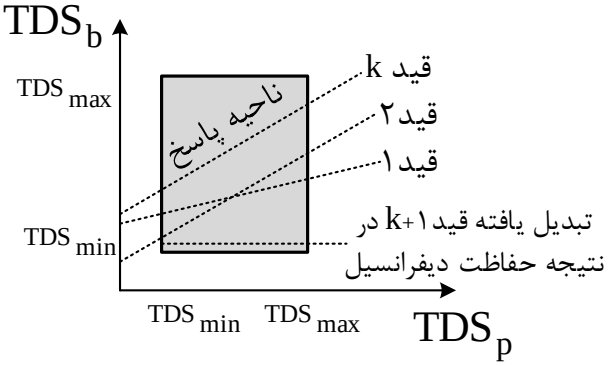
$$\alpha_3 TDS_d - \alpha_2 TDS_a \geq CTI \qquad (۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

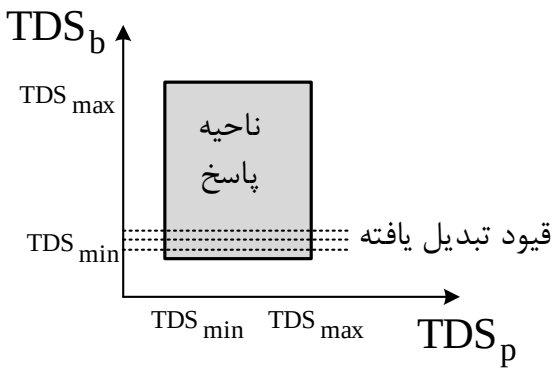
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

$$\alpha_5 TDS_e - \alpha_4 TDS_b \geq CTI \quad (۷)$$

در صورتی که در رله های Ra و Rb علاوه بر حفاظت اضافه جریان از حفاظت دیفرانسیل نیز استفاده گردد زمان رفع خطاهای F1 و F2 آنی رفع می شود و روابط (۵-۷) به روابط (۸-۱۰) تبدیل می شود. در این روابط t_{diff} زمان عملکرد حفاظت دیفرانسیل است که معمولا بین ۲۰ تا ۳۰ میلی ثانیه است.



شکل (۳): بازیابی فضای مساله با حفاظت دیفرانسیل



شکل (۴): تبدیل یافته قیود شرایط بهرهبرداری مختلف با حفاظت دیفرانسیل

$$TDS_c \geq \frac{1}{\alpha_1}(CTI + t_{diff}) \quad (۸)$$

$$TDS_d \geq \frac{1}{\alpha_3}(CTI + t_{diff}) \quad (۹)$$

$$TDS_e \geq \frac{1}{\alpha_5}(CTI + t_{diff}) \quad (۱۰)$$

استفاده از حفاظت دیفرانسیل سبب می شود تا قیود هماهنگی بین رله های پشتیبان و زوج رله اصلی دیفرانسیل حذف شود و به یک قید حد پایین در رله های پشتیبان تبدیل شود. هر چه ضریب α بیشتر باشد حد پایین TDS کاهش یافته و ناحیه پاسخ بزرگتر می شود. این امر در شکل (۳) رسم شده است. فرض شده است که حفاظت دیفرانسیل قید k+1 و نه همه قیود را حذف می‌کند. همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، ناحیه پاسخ دوباره احیاء شده است. چون حفاظت دیفرانسیل واحد است بنابراین قید هماهنگی در همه شرایط بهره‌برداری تحت تاثیر قرار می گیرد که این امر در شکل (۴) رسم شده است.

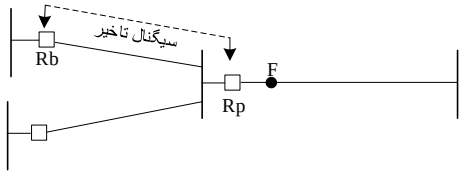
در صورت خرابی لینک مخابراتی دیفرانسیل، حفاظت کماکان عمل کرده و خطا رفع می‌شود. اما هماهنگی در رفع خطا برقرار نبوده و ناحیه بزرگتری بی برق خواهد بود که براحتی و با مقایسه رله‌های تریپ دهنده، ناحیه اصلی خطا بدست می‌آید.

البته استفاده از سیگنالهای اینترتریپ و تاخیر بین رله‌ها نیز می‌تواند باعث افزایش درجه آزادی مسئله و کاهش زمان عملکرد رله‌ها شود. تاثیر سیگنال تاخیر را می‌توان به صورت یک CTI کاهش یافته نشان داد. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، به ازای خطای F که رله Rp می‌بیند، یک سیگنال تاخیر به رله پشتیبان ارسال می‌شود تا عملکرد آن با تاخیر t_d صورت گیرد. اگر مدت زمان پردازش، ارسال و دریافت سیگنال T باشد، دراین صورت، $T_d = CTI - T$ و کافی است تا بین دو رله اصلی و پشتیبان رابطه (۱۱) برقرار باشد.

$$T_b - T_p > kT \quad (۱۱)$$

در این رابطه، k یک ضریب اطمینان در بازه ۱.۲ تا ۱.۵ است. در حقیقت، سیگنال تاخیر باعث می شود تا CTI جدید که باید در قیود هماهنگی و تنظیم بهینه بکار رود، از CTI به kT کاهش یابد.

تاثیر اینترتریپ نیز مشابه حفاظت دیفرانسیل است با این تفاوت که در این حالت زمان رفع خطا t_{diff}در روابط ۸-۱۰ بایستی با $t_{intertrip}$ جایگزین شود که عموما در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌ثانیه است.



شکل(۵): تاثیر سیگنال تاخیر بر هماهنگی حفاظتی

حفاظت دیفرانسیل باید در فیدرهایی استفاده شود که موجب همگرایی حفاظتی شود. نحوه جایابی حفاظت دیفرانسیل در بخش بعدی توضیح داده شده است.

۴- تخصیص حفاظت دیفرانسیل با فیلتر افزایشی

تخصیص حفاظت دیفرانسیل باید به گونه‌ای باشد که همگرایی هماهنگی حفاظتی را در بر داشته باشد. بدین منظور بایستی قیودی که تداخل دارند، شناسایی شوند. بدین منظور می‌توان از روش فیلتر افزایشی استفاده کرد. این روش در ادامه تشریح شده است.

۴-۱- روش فیلتر افزایشی

روش فیلتر افزایشی یکی از روش‌های به کار رفته جهت جداسازی قیود در یک مسئله بهینه سازی مقید است [۲۷]. چنانچه جوابی برای بهینه سازی خطی پیدا نشد نشانگر این است که بین قیود مختلف

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

تداخل وجود دارد. این روش مجموعه‌ای از قیود را که موجب بی‌جوابی مسئله است، شناسایی می‌کند. با حذف یک یا چند قید از این مجموعه مسئله دارای پاسخ می شود. این روش به شرح زیر است: C مجموعه کل قیود(بدون جواب)، T مجموعه قید در حال بررسی فعلی و I مجموعه قید مسبب بی جوابی شناسایی شده اکنون است.

مرحله صفر) $T=\varnothing, I=\varnothing$

مرحله اول) مجموعه T را برابر I قرار دهید: $T=I$

مرحله دوم) قید C_i را به T اضافه کن.

مرحاه سوم) جواب داشتن T را بررسی کن. اگر جواب داشت دوباره به مرحله دوم بازگرد. در غیر این صورت وارد مرحله چهارم شوید.

مرحله سوم) قید C_i را به I اضافه کن.

مرحله چهار) اگر I جواب داشت به مرحله اول بازگردید در غیر اینصورت به مرحله پنجم بروید.

مرحله پنج) خاتمه الگوریتم و چاپ I

خروجی این روش، مجموعه قیودی است که منجر به تهی شدن فضای مسئله می‌شود. ممکن است برای یافتن جواب همه قیود I یا برخی از آنها حذف شود. استفاده از این روش باعث می‌شود تا تعداد معینی از خط‌ها یا فیدرها برای نصب حفاظت دیفرانسیل انتخاب شوند.

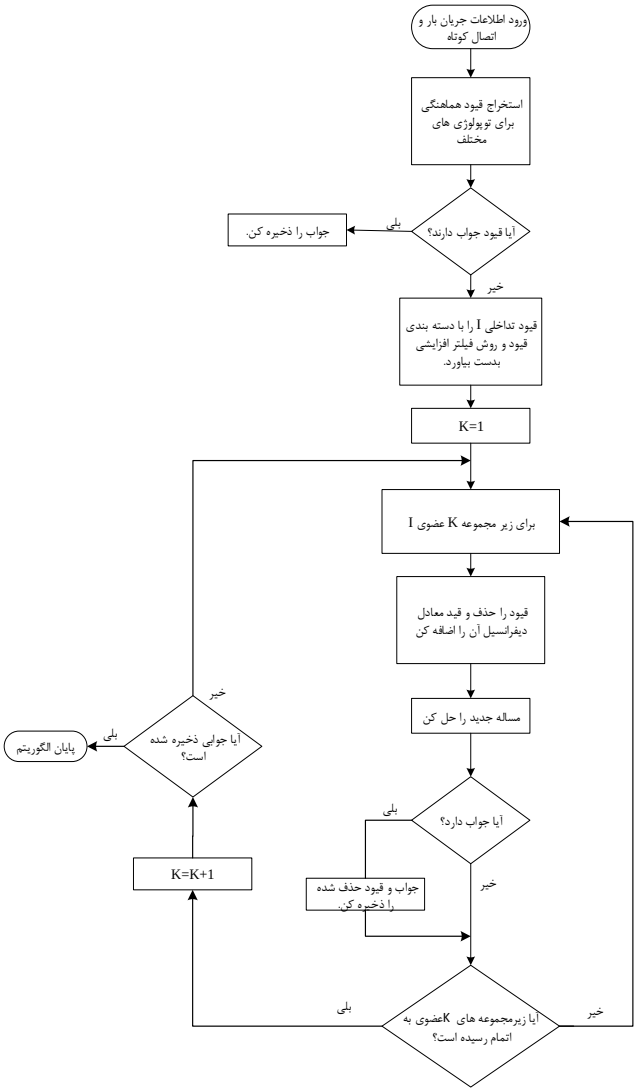
برای افزایش سرعت حل مساله می‌توان قیدها را در گروه‌های k تایی بررسی کرد. این حالت از بررسی قیود بویژه برای تخصیص حفاظت دیفرانسیل مناسب است. زیرا که با نصب حفاظت دیفرانسیل در یک خط، قیود هماهنگی بین رله‌های پشتیبان و رله‌های اصلی دو سر خط حذف می‌شود. برای مثال، روابط (۵-۷) که برای شبکه شکل (۲) بیان شده‌اند، یک دسته را تشکیل می‌دهند. لذا برای یک شبکه با یک خط، قیدهای هماهنگی به یک گروه تقسیم می‌شوند.

۴-۲- روش پیشنهادی

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، حفاظت دیفرانسیل باعث می‌شود تا قیود هماهنگی بین زوج رله‌های اصلی-پشتیبان حذف شده و با یک قید حد پایین جایگزین شوند. این امر سبب می‌شود تا قیود تا حدی تخفیف یابند و فضای جستجوی مسئله افزایش یابد. فلوچارت روش پیشنهادی جهت تخصیص حفاظت دیفرانسیل به منظور جلوگیری از حذف ناحیه پاسخ در شکل (۶) رسم شده است.

در صورتی که مساله تنظیم بهینه برای توپولوژی‌های مختلف جواب نداشته باشد، با دسته بندی قیود و روش فیلتر افزایشی مجموعه قیود I شناسایی می‌شود. برای اینکه حفاظت دیفرانسیل کمتری نصب شود، زیرمجموعه‌های I با شروع از تک عضوی، دو عضوی و الی آخر بررسی می‌شوند. در هر مرحله قیود متعلق به زیرمجموعه I در حال بررسی حذف شده و با قیود حد پایین TDS نظیر روابط (۸-۱۰) جایگزین می‌شوند.

در صورتی که مساله جواب داشت، روش پیشنهادی دیگر زیرمجموعه‌های k+1 عضوی رو بررسی نمی‌کند و با اتمام بررسی زیرمجموعه‌های k عضوی متوقف می‌شود. در صورتی با نصب تعداد یکسان حفاظت دیفرانسیل در جاهای مختلف، مساله به جواب رسید،



شکل (۶): روش پیشنهادی جهت تخصیص حفاظت دیفرانسیل

آن جوابی انتخاب می‌شود که منجر به زمان‌های عملکردی پایین‌تری می‌شود. روش‌های مختلفی در نرم‌افزارهای تخصصی برای تعیین وضعیت جواب مساله بهینه‌سازی خطی وجود دارد، که با استفاده از آنها می‌توان به راحتی جواب داشتن مساله بهینه‌سازی مقید رو تعیین کرد.

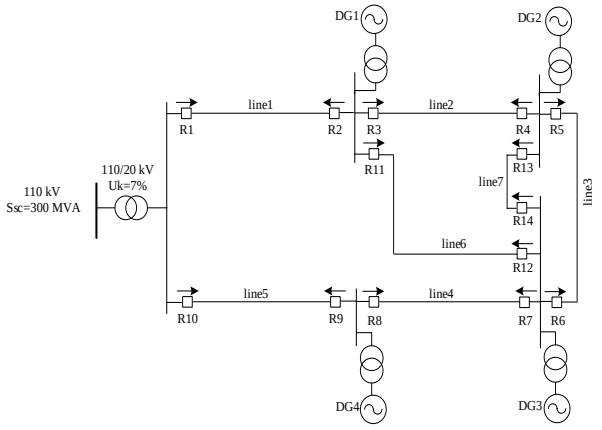
۵- نتایج شبیه‌سازی

روش پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع حلقوی که توسط سیگره پیشنهاد شده است، پیاده شده است. شمای کلی شبکه پیشنهادی در شکل (۷) آمده است. این شبکه توزیع برق‌رسانی به چند شهر کوچک را بر عهده دارد. اطلاعات کامل شبکه در جدول (۱) آمده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

به منظور تنظیم بهینه رله‌ها مطالعات پخش بار و اتصال کوتاه شبکه مورد مطالعه در نرم افزار دیگسایلنت DigSilent صورت گرفت.



شکل (۷): شبکه مورد مطالعه

جدول (۱): اطلاعات شبکه

ردیف	تجهیز	مشخصات
۱	شبکه بالادستی	110 kV, 330 MVA
۲	ترانس HV/MV	110/20 kV, Uk=7%
۳	DG1+ ترانس DG1	3 kV, 4 MVA, X'd=0.14 pu 20/3 kV, 2.4 MVA, Uk=6%
۴	DG2+ ترانس DG2	3 kV, 3 MVA, X'd=0.14 pu 20/3 kV, 3 MVA, Uk=6%
۵	DG3+ ترانس DG3	3 kV, 4 MVA, X'd=0.14 pu 20/3 kV, 4 MVA, Uk=6%
۶	DG4+ ترانس DG4	3 kV, 5 MVA, X'd=0.14 pu 20/3 kV, 5 MVA, Uk=6%
۷	Line 1	2.39+j1.538
۸	Line 2	0.32+j0.16
۹	Line 3	0.84+j0.3
۱۰	Line 4	0.6+j0.36
۱۱	Line 5	1.74+j1.74
۱۲	Line 6	0.33+j0.18
۱۳	Line 7	0.68+j0.28
۱۴	Load 1	4.75+j1.56 MVA
۱۵	Load 2	3.8+j1.249 MVA
۱۶	Load 3	2.85+j0.936 MVA
۱۷	Load 4	2.85+j0.936 MVA
۱۸	Load 5	1.9+j0.624 MVA
۱۹	Load 6	3.8+j1.249 MVA

DG شبکه فوق از ۴ تولید پراکنده و ۷ خط تشکیل شده است. تعداد توپولوژی‌های مورد بررسی برابر ۱۲ حالت است که از ترکیب (خروج صفر+خروج یک + خروج خط) بدست می‌آید. جریان آستانه رله در ۱/۲ بیشترین جریان بار به ازای توپولوژی‌های مختلف تنظیم شده است.

۵-۱- هماهنگی حفاظتی برای توپولوژی اصلی

در این بخش، هماهنگی حفاظتی فقط برای یک توپولوژی و با در نظر گرفتن جریان‌های اتصال کوتاه با فرض در مداربودن همه خطوط و DGها انجام شده است. تنظیمات بهینه رله‌ها در جدول (۲) آمده است. زمان رفع خطا به ازای تنظیمات بهینه برای چند نمونه خطا در جدول (۳) ذکر شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هماهنگی حفاظتی بین جفت رله‌های پشتیبان و اصلی برقرار است.

جدول (۲): تنظیمات رله ها برای توپولوژی اصلی

رله	جریان آستانه(kA)	TDS
R1	0.1176	0.4143
R2	0.1176	0.05
R3	0.0636	0.4894
R4	0.0636	0.5209
R5	0.0384	0.4553
R6	0.0384	0.5745
R7	0.12	0.1578
R8	0.12	0.4629
R9	0.12	0.05
R10	0.12	0.497
R11	0.0624	0.5112
R12	0.0624	0.4681
R13	0.0504	0.4291
R14	0.0504	0.5717

جدول (۳): زمان عملکرد برخی رله‌ها

	خطا جلو R3		خطا جلو R5		خطا جلو R11	
	Tp	Tb	Tp	Tb	Tp	Tb
توپولوژی۱	0.8172	1.0672, 1.073	0.6465	1.1719, 0.9102	0.8230	1.0730, 1.0730

۵-۲- هماهنگی حفاظتی برای همه توپولوژی‌ها

تنظیم رله‌ها برای یک توپولوژی ثابت باعث می‌شود تا هماهنگی حفاظتی بین رله‌ها و انتخابگری حفاظتی به هنگام خروج خطوط و DGها از بین رود.

مسئله یکبار دیگر و برای همه جریان‌های اتصال کوتاه در پیکربند-های مختلف حل شد. به دلیل قیود زیاد و تغییرات شدید اتصال کوتاه، جواب یکتایی برای تنظیمات رله‌ها وجود ندارد. برای نشان دادن این موضوع، حد بالای TDS افزایش داده شد تا TDSهای مناسب برای تنظیمات رله‌ها بدست آید. مقادیر این TDSها در جدول (۴) گزارش شده است. در این جدول، مقادیر TDS تعدادی از رله‌ها از حد بالا فراتر رفته است تا هماهنگی بین جفت رله‌های اصلی و پشتیبان برقرار باشد.

روش پیشنهادی فیلتر اضافی که متناسب با مزایای حفاظت دیفرانسیل تغییریافته است، مطابق با فلوچارت شکل (۵) به منظور شناسایی قیدهای ناسازگار اجرا شد. خروجی روش پیشنهادی عبارت است از هماهنگی بین قیود پشتیبان خط ۲، خط ۳ و خط ۶ . بدین ترتیب کاندیداهای نصب حفاظت دیفرانسیل، خطوط ۲، ۳ و ۶ هستند. این روش کمک کرد تا فضای جستجوی مساله از ۱۲۸ حالت به ۸

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

حالت کاهش یابد. پاسخ‌پذیر بودن مسئله در طی اجرای روش پیشنهادی ۱۴ بار بررسی شد که لذا کل حالات بررسی شده به ۱۷ خواهد رسید که کمتر از ۲۸ حالت (زیرمجموعه های تک عضوی و دو عضوی هفت خط مختلف شبکه) است. این اختلاف برای یک شبکه کوچک توزیع است و کارآیی روش برای شبکه‌های بزرگتر که تعداد خطوط زیادی دارند، بهتر و ملموس‌تر خواهد بود. در ادامه، تاثیر نصب حفاظت دیفرانسیل در کاندیداهای محل نصب مدل شد و مسئله برای هشت زیر مجموعه کاندیداها حل شد. نتایج نشان می‌دهد که با یک

جدول (۴): تنظیمات بهینه برای همه توپولوژیها بدون محدودیت TDS

رله	جریان آستانه(kA)	TDS
R1	0.1176	0.858
R2	0.1176	0.05
R3	0.0636	1.0557
R4	0.0636	1.047
R5	0.0384	1.0299
R6	0.0384	1.2856
R7	0.12	0.1616
R8	0.12	0.9125
R9	0.12	0.05
R10	0.12	1.0094
R11	0.0624	1.0248
R12	0.0624	1.0401
R13	0.0504	1.0125
R14	0.0504	1.2008
کل زمان		210.64

جدول(۵): TDS رله ها برای همه توپولوژی ها

رله	نصب حفاظت دیفرانسیل در خط۲	نصب حفاظت دیفرانسیل در خط۶
R1	0.6865	0.6451
R2	0.05	0.05
R3	0.8179	0.8179
R4	0.1958	0.8086
R5	0.7158	0.7158
R6	0.9064	0.9064
R7	0.1616	0.1616
R8	0.6724	0.6724
R9	0.05	0.05
R10	0.7693	0.7693
R11	0.7604	0.7604
R12	0.8309	0.1956
R13	0.7498	0.7498
R14	0.7855	0.7855
کل زمان	138.087	138.17

جدول(۶): TDS رله ها با نصب دیفرانسیل در دو خط

رله	نصب حفاظت دیفرانسیل در خط۷و۲	نصب حفاظت دیفرانسیل در خط۳و۲
R1	0.3148	0.3148
R2	0.05	0.05
R3	0.3906	0.3985
R4	0.3956	0.3956
R5	0.2916	0.2916
R6	0.05	0.4353
R7	0.1616	0.1616
R8	0.2466	0.2466
R9	0.05	0.05
R10	0.3435	0.3435
R11	0.3022	0.3022
R12	0.1956	0.1956
R13	0.2867	0.2867
R14	0.4051	0.05
کل زمان	61.1103	61.2838

لینک حفاظت دیفرانسیل می‌توان هماهنگی حفاظتی در توپولوژی-های مختلف را برقرار کرد. خروجی نهایی روش پیشنهادی به شرح جدول (۵) است.

جدول (۷): زمان عملکرد رله‌ها با نصب دیفرانسیل در خط ۷و۲

	خطا جلو R3		خطا جلو R5		خطا جلو R11	
	Tp	Tb	Tp	Tb	Tp	Tb
توپولوژی۱	0.6523 0	0.4459, 0.8153	0.4140	0.8304, 0.7265	0.4865	0.8149, 0.8153
توپولوژی۳	0.6718 0	0.7995, 0.4244	0.4490	1.1626, 0.7694	0.4925	0.8505, 0.8153
توپولوژی۵	0.7265 0	0.8121, 0.5398	0.4169	0.8102, 0.7421	0.5016	0.9375, 0.8119
توپولوژی۸	0.6562 0	0.8153, 0.4557	0.4257	0.8304, 0.7304	0.4956	0.8663, 0.8246

۵-۳- تاثیر جریان آستانه بر قیود ناسازگار

در بخش قبلی فرض شده است که جریان آستانه رله‌ها در مقدار مشخصی تنظیم شده است. جریان آستانه رله را می‌توان از یک بازه مانند رابطه (۳) انتخاب کرد. تاثیر جریان آستانه به صورت تغییر ضرایب α متناظر با هر رله به صورت تصادفی مدل شد بدین ترتیب که این ضرایب در یک عدد تصادفی در بازه (۱,۲) ضرب شدند. روش پیشنهادی دویست بار برای مقادیر جدید α اجرا شد که نتایج به شرح جدول (۸) است. همانطور که مشاهده می شود، قیود ناسازگار شناسایی شده وابستگی چندانی به جریانهای آستانه ندارند. چنانچه جریانهای استانه در بازه وسیعی تغییر یابند، انتظار داریم که همانند ۸۳ حالت، همگرایی حاصل شده و قیود ناسازگار از بین بروند. هرچند در این حالت، استفاده از دیفرانسیل در محل قیود ۲-۳-۶ بیشترین کاهش در زمان عملکرد رله ها را در بر خواهد داشت که در بخشهای بعدی بدان پرداخته شده است.

جدول(۸): قیود شناسایی شده به ازای تغییرات جریان آستانه

تعداد حالات	قیود شناسایی شده
۸۳	همگرایی حاصل شد(بدون قید ناسازگار)
۹۹	۶-۳-۲
۱۸	۱-۶-۳-۲

۵-۴- تخصیص دو لینک دیفرانسیل

در این بخش، تاثیر نصب لینک دیفرانسیل با تعداد بیشتر بر روی زمان عملکرد حفاظتی تعیین شده است. هماهنگی حفاظتی برای حالات مختلف نصب دو عدد حفاظت دیفرانسیل در خطوط حل شده است و نتایج آن در شکل (۸) منعکس شده است. همانطور که دیده می‌شود

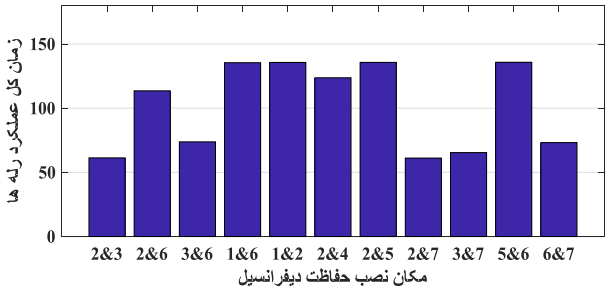
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

کاهش زمان عملکرد رله‌ها به شدت به مکان نصب حفاظت دیفرانسیل وابسته است. همانطور که دیده می‌شود، روش فیلتر افزایشی به خوبی توانسته است مکان‌های نصب مناسب را تعیین نماید. زمان عملکرد برای چهار جواب (۲+۳، ۲+۷ و ۳+۷) تقریبا در کمترین مقدار قرار دارد. البته طول خطوط نیز عامل تاثیر گذاری در نصب حفاظت دیفرانسیل و هزینه آن است که می‌تواند به عنوان یک فاکتور اضافی در تخصیص بهینه لینک حفاظت دیفرانسیل به کار رود.

۶- نتیجه

قیود مختلف هماهنگی در مدهای متفاوت بهره‌برداری شبکه توزیع منجر به واگرایی مسئله هماهنگی حفاظتی که یک بهینه‌سازی مقید است، می‌شود. حفاظت دیفرانسیل نقش به سزایی در کاهش و تخفیف قیود دارد و می‌تواند قیود مسئله رو به نحو مناسب تغییر دهد تا پاسخی برای آن پیدا شود. روش پیشنهادی مبتنی بر فیلتر افزایش قادر است تا مکان لینک‌های دیفرانسیل را به صورت موثر تعیین کند تا مشکل تداخل قیود حل شود. این روش با طی تکرارهای کمتر و زمانهای کمتر، بهترین مکان‌های نصب حفاظت دیفرانسیل را در خروجی خود ارایه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده توانایی و کارآیی روش پیشنهادی به منظور مکان‌یابی حفاظت دیفرانسیل و کاهش عملکرد رله‌های اضافه‌جریان هستند.



شکل (۸): زمان عملکرد رله‌ها به ازای مکانهای مختلف حفاظت دیفرانسیل

مراجع

[1] H. Sharifian, H. Askarian Abyaneh, S. Salman, R. Mohammadi, and F. Razavi, "*Determination of the minimum break point set using expert system and genetic algorithm*," IEEE Trans. Power Del., vol. 25, no. 3, pp. 1284–1295, Jul. 2010.

[2] Q. Yue, F. Lu, W. Yu, and J. Wang, "*A novel algorithm to determine minimum break point set for optimum cooperation of directional protection relays in multi loop networks*," IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1114–1119, Jul. 2006.

[3] W. K. A. Najy, H. H. Zeineldin and W. L. Woon, "*Optimal protection coordination for microgrids with grid-Connected and islanded capability*, " *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 60, no. 4, pp. 1668-1677, April 2013.

[4] D. Saha, A. Datta and P. Das, "*Optimal coordination of directional overcurrent relays in power systems using Symbiotic Organism Search Optimization technique*," *IET Gener. Transmiss. Distrib*, vol. 10, no. 11, pp. 2681-2688, 8 4 2016.

[5] J. Radosavljevic and M. Jevtic, "*Hybrid GSA-SQP algorithm for optimal coordination of directional overcurrent relays*," *IET Gener. Transmiss. Distrib*, vol. 10, no. 8, pp. 1928-1937, 5 19 2016.

[6] F. A. Albasri, A. R. Alroomi and J. H. Talaq, "*Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms,* " *IEEE Trans. Power Del*., vol. 30, no. 4, pp. 1810-1820, Aug. 2015.

[7] K. A. Saleh, H. H. Zeineldin, A. Al-Hinai and E. F. El-Saadany, "*Optimal coordination of directional overcurrent relays using a new time–current–voltage characteristic,* " *IEEE Trans. Power Del*., vol. 30, no. 2, pp. 537-544, April 2015.

[8] B. Hussain, S. Sharkh, and S. Hussain, "*Impact studies of distributed generation on power quality and protection setup of an existing distribution network*," in Proc. Int. SPEEDAM, 2010, pp. 1243–1246.

[9] N. Nimpitiwan, G. T. Heydt, R. Ayyanar, and S. Suryanarayanan, "*Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators*," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 634–641, Jan. 2007

[10] *A. S. Noghabi, H. R. Mashhadi and J. Sadeh, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming," IEEE Trans. Power Del., vol. 25, no. 3, pp. 1348-1354, July 2010.*

[11] *K. A. Saleh, H. H. Zeineldin and E. F. El-Saadany, "Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N $-$1* Contingency," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2270-2278, Oct. 2017.

[12] A. S. Noghabi, J. Sadeh and H. R. Mashhadi, "*Considering Different Network Topologies in Optimal Overcurrent Relay Coordination Using a Hybrid GA*," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1857-1863, Oct. 2009.

[13] T. Ghanbari and E. Farjah, "*Unidirectional Fault Current Limiter: An Efficient Interface Between the Microgrid and Main Network*," *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 28, no. 2, pp. 1591-1598, May 2013.

[14] H. C. Jo and S. K. Joo, "*Superconducting Fault Current Limiter Placement for Power System Protection Using the Minimax Regret Criterion*," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, pp. 1-5, June 2015.

[15] B. Li, C. Li, F. Guo and Y. Xin, "*Overcurrent Protection Coordination in a Power Distribution Network With the Active Superconductive Fault Current Limiter*," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 24, no. 5, pp. 1-4, Oct. 2014.

[16] W. K. A. Najy, H. H. Zeineldin and W. L. Woon, "*Optimal Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capability*," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 4, pp. 1668-1677, April 2013.

[17] V. A. Papaspiliotopoulos, G. N. Korres, V. A. Kleftakis and N. D. Hatziargyriou, "*Hardware-In-the-Loop Design and Optimal Setting of Adaptive Protection Schemes for Distribution Systems With Distributed Generation*," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 393-400, Feb. 2017.

[18] S. Shen *et al*., "*An Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With DGs Based on Optimized Thevenin Equivalent Parameters Estimation*," in *IEEE*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]

Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 411-419, Feb. 2017.

[19] S. Sheng, K. K. Li, W. L. Chan, X. Zeng, D. Shi and X. Duan, "*Adaptive Agent-Based Wide-Area Current Differential Protection System*," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 5, pp. 2111-2117, Sept.-Oct. 2010.

[20] Ustun, T.S, Ozansoy C. Zayegh A, "*Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to IEC 61850-7-420*", IEEE Trans. Power Systems, vol. 27, no. 3, pp. 1560-1567, Aug. 2012

[21] Khederzadeh, M., "*Adaptive setting of protective relays in microgrids in grid connected and autonomous operation*", Proceedings of the 11th international conference on developments in power systems protection. (DPSP2012), April 2012

[22] Duong M.B, Keng-Yu L, Shi-Lin C, "*Investigate dynamic and transient characteristics for islanded/grid-connected operation modes of microgrid and develop a Fast-Scalable-Adaptable fault protection algorithm*", 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), on, pp. 1-6, April 2014

[23] [9] Hsieh S.C., Chen, C.S., Tsai C.T, Hsu C.T. and Lin C.H., "*Adaptive relay setting for distribution systems considering operation scenarios of wind generators*," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 50, no. 2, pp. 1356-1363, March-April 2014.

[24] Shih M.Y., CastilloSalazar C.A. and Conde Enríquez A., "*Adaptive directional overcurrent relay coordination using ant colony optimization*," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, no. 14, pp. 2040-2049, 11 5 2015.

[25] M. Ojaghi and V. Mohammadi, "*Use of Clustering to Reduce the Number of Different Setting Groups for Adaptive Coordination of Overcurrent Relays*," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PP, no. 99, pp. 1-1.

[26] Reza Mohammadi, Meysam Farrokhifar, Hossein Askarian Abyaneh and Ehsan Khoob, "*Optimal Coordination of Overcurrent Relays in the Presence of Distributed Generation Using an Adaptive Method*", J Electr. Eng. Technol., 2016.

[27] John W. Chinneck, "*Feasibility and Infeasibility in Optimization: Algorithms and Computational Methods*", Springer, 2008.

[28] Hossein Kazemi Karegar,Hossein Askarian Abyaneh,Vivian Ohis and Matin Meshkin, "*Pre-processing of the optimal coordination of overcurrent relays*", Electric Power Systems Research., Vol: 75, no. 2, pp. 134-141, Aug. 2005.

[۲۹] ر. م. چبنلو، "بکارگیری بهینه FCL در طراحی سیستم حفاظت شبکه توزیع مجهز به تولید پراکنده"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۰.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.10.6]