کاهش تأثیر منابع تولید پراکنده بر سطح اتصال کوتاه شبکه با استفاده از SFCL و به‌روزرسانی نقطه کار رله‌های اضافه جریان

مژگان قنبری[1] ، دانشجوی دکترا، مجید گندمکار [2]، دانشیار، جواد نیکوکار[3]، دانشیار

۱و۲ و۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه
m.ghanbari0@yahoo.com
m.gandomkar@iau-Saveh.ac.ir
j.nikoukaar@iau-Saveh.ac.ir

چکیده: **حفاظت از شبکه‌های قدرت در سطوح انتقال و توزیع، بر اساس رله‌های اضافه جریان به دلیل قابلیت تشخیص، پایداری، سرعت‌بالا، پشتیبان گیری و دقت مناسب در رفع خطا امری ضروری تلقی می‌شود. زمانی که منابع تولید پراکنده به شبکه قدرت متصل می‌شوند، نه‌تنها باعث افزایش قدرت اتصال کوتاه شبکه می‌گردند، بلکه نقطه کار رله‌های اصلی و پشتیبان را نیز دچار اختلال می‌کنند که منجر به قطع نواحی سالم شبکه خواهد شد. به‌منظور حفظ ایمنی و پایداری شبکه و جلوگیری از افزایش سطح توان تجهیزات موجود، از ادوات محدودکننده جریان خطا با تکنولوژی ابررسانا (SFCL) استفاده می‌شود تا جریان اتصال کوتاه را در سیکل‌های ابتدایی خود، به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. اما استفاده از محدودکننده‌ها نیز، ممکن است به عملکرد نادرست رله‌ها و عدم تشخیص جریان اتصال کوتاه بیانجامد. به‌منظور رفع مشکلات فوق، این مقاله یک مدل SFCL با ساختار مقاومتی و اندوکتانس کوپل ارائه می‌دهد که ضمن افزایش امپدانس مسیر خطا و کاهش جریان اتصال کوتاه، هماهنگی حفاظتی نیز به شکل بهینه بین رله‌های اصلی و پشتیبان‌های دور و نزدیک آن‌ها انجام شود. تابع هدف ارائه‌شده با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته کمینه می‌گردد و سه مطالعه موردی انجام خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان از برتری روش پیشنهادی در رفع خطا و حذف اختلال بین عملکرد رله‌ها در کمترین زمان ممکن دارند.**

واژه‌های کلیدی: حفاظت، رله‌های اضافه جریان، منابع تولید پراکنده، SFCL.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۴/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : مجید گندمکار

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

۱. مقدمه

حفاظت از سیستم قدرت به‌منظور پاک‌سازی خطاهای اتصال کوتاه احتمالی در حداقل زمان، بر مبنای استراتژی جدا کردن بخش‌های آسیب‌دیده از شبکه قدرت، استوار است. بنابراین هماهنگی بین وسایل حفاظتی مانند فیوزها، تجهیزات قطع و وصل‌کننده اتوماتیک[1]، ترانسفورماتورهای جریان[2] (CTs)، ترانسفورماتورهای ولتاژ[3] (PTs)، رله‌ها و ... باید به نحو مطلوبی و به دور از اختلال، پیاده‌سازی شود [۱]. در حال حاضر به کار بردن یک طرح حفاظتی بهینه با زمان عملکرد پایین، یکی از رایج‌ترین روش‌های حفاظتی در خطوط و امنیت تجهیزات کابل‌ها است. دستگاه‌های حفاظتی تشخیص‌دهنده اتصال کوتاه در شبکه‌های انتقال و توزیع، عموماً به شکل رله‌های زمان معکوس[4] در نظر گرفته و مشخصه‌های آنی آن‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند [۲]. رله‌ها، مستقل از این دسته‌بندی، باید با یکدیگر هماهنگ باشند تا کل زمان رفع خطا در شبکه را به حداقل برسانند و قابلیت اطمینان را به‌منظور کاهش خاموشی‌ها، بهبود بخشند. مفهوم هماهنگی حفاظتی با عبارت "جداسازی حداقل بخش‌های معیوب سیستم قدرت از نواحی سالم، با عدم تغییر قابل‌توجه در برنامه‌ریزی بهره‌برداری" معنا پیدا می‌کند. اگر هماهنگی رله‌ها به‌طور مطلوب انجام نشود، ممکن است موجب قطع خطوط یا تجهیزات غیر معیوب دیگر شوند که منجر به تاخیرات ناخواسته در انتقال برق مانند خاموشی‌های محلی یا خاموشی‌های سراسری گردد [۳-۵].

منابع تولید پراکنده[5] (DG) متصل به شبکه قدرت، مزایای زیادی ازجمله کاهش تراکم در خطوط، کنترل بهینه توان راکتیو، جبران ضریب قدرت، کاهش آلایندگی، افزایش راندمان شبکه، افزایش بهره‌وری انرژی، جبران هارمونیک، حداقل سازی تلفات توان اکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ را به ارمغان می‌آورند. پیل‌های سوختی، آرایه‌های فتوولتائیک، منابع ذخیره‌سازی انرژی، منابع زمین‌گرمایی و مزارع بادی نمونه‌هایی از DG های شناخته‌شده هستند. باوجود این مزایا، DG ها تأثیرات نامطلوبی بر روی سیستم حفاظتی و تنظیمات رله می‌گذارند که پدیده شارش توان معکوس، به دلیل تغییر در جهت شارش توان یا جریان و افزایش قدرت اتصال کوتاه نمونه‌هایی از آن دسته پیامدها هستند. این معایب وابسته به‌اندازه آن‌ها، مشخصات ذاتی، محل نصب و نوع اتصالشان نیز مرتبط خواهد شد [۶-۹].

تحقیقات زیادی در خصوص تعیین هماهنگی‌های بین رله‌های اضافه جریان[6] (OCRs) توسط محاسبات ریاضی و یا شبیه‌سازی‌های تجربی انجام‌شده است. اکثر رویکردهای موجود با استفاده از الگوریتم‌های ساده، با شبکه توزیع شعاعی و گاهی سنتی سر و کار دارند [۱۰]. اخیراً، توجه بسیار کمی به سیستم‌های توزیع مش‌بندی شده به همراه تأثیر نفوذ DG در هماهنگی حفاظتی آن‌ها اختصاص داده‌شده است. بسیاری از مطالعات در گذشته برای هماهنگ کردن رله‌های فعلی با استفاده از روش‌های مرسوم و کامپیوتری تکمیل شده‌اند، اما با این وجود بیشتر این هماهنگی را بدون DG در سیستم به پایان رسانیده‌اند [۱۱]. هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان بر اساس الگوریتم ژنتیک (GA) در [۱۲] توضیح داده می‌شود. در حقیقت، GA برای محاسبه ضریب تنظیم زمانی[7] (TDS) و زمان عملکرد رله با اختلاف زمانی مشخص بین آن‌ها[8] (CTI)، با در نظر گرفتن موقعیت بارگذاری سراسری و پیک محلی بکار گرفته می‌شود. یک تکنیک ترکیبی مبتنی بر GA و برنامه‌نویسی خطی[9] (LP) در [۱۳] پیشنهاد شده است تا راه‌حل بهینه کلی را در تنظیمات OCR پیدا کند. در روش پیشنهادی، الگوریتم GA برای محاسبه تنظیمات فعلی OCRs پیاده‌سازی می‌شود و سپس در هر تکرار، TDS ها با استفاده از روش LP مشخص می‌شوند. در [۱٤] یک طرح حفاظت تطبیقی بر اساس روش بهینه‌سازی کولونی مورچه‌ها[10] (ACO) برای حل مسئله هماهنگی حفاظتی معرفی می‌شود و نتایج شبیه‌سازی آن، در چند مطالعه موردی با الگوریتم GA مقایسه می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که روش ACO به تحلیل‌های مناسب‌تری نسبت به الگوریتم GA دست یافته‌است. یک روش هماهنگی حفاظتی OCR بر پایه الگوریتم تکاملی[11] (DE)، که از ترکیب آن با تکنیک فازی تطبیقی برای تنظیم بهینه رله استفاده می‌کند، در [۱۵] پیشنهاد شده‌است. نویسندگان در مرجع [۱٦]، ضمن رفع نقایص استراتژی ارائه‌شده در [۱۵]، الگوریتم تکاملی را برای محاسبه TDS بهینه معرفی نموده‌اند که این بهبودها، شامل موقعیت جمعیت آغازین و تغییر در برآورده کردن قیود مسئله بهینه‌سازی رخ داده است.

یکی از روش‌های مناسب برای کاهش جریان‌های اتصال کوتاه، استفاده از محدودکننده جریان خطا[12] (FCL) یا محدودکننده‌های

1 Recloser
2 Current Transformer
3 Potential Transformer
4 Inverse Time Relay
5 Distributed Generation

6 Over Current Relay
7 Time Dial Setting
8 Coordination Time Interval
9 Linear Programing
10 Ant Colony Optimization
11 Differential Evolution
12 Fault Current Limiter

جریان خطا با تکنولوژی ابررسانا[1] (SFCL) در سیستم‌های قدرت است . این تجهیزات بر استراتژی افزایش امپدانس مسیر شارش جریان و ایجاد افت ولتاژ قوی در خط استوار هستند. اگرچه استفاده از FCL بسیار پرهزینه است، اما مزایایی مانند کاهش افت ولتاژ در طول مدت‌زمان خطا، افزایش پایداری شبکه، حفظ سلامت تجهیزات حفاظتی علی‌الخصوص کلیدهای قدرت[2] و بهبود قابلیت اطمینان را به همراه خواهند داشت. بنابراین، مکان‌یابی مناسب این تجهیزات و کاهش تعداد آن‌ها مورداستفاده بسیار قابل‌توجه است. در [۱۷]، روش ضریب حساسیت برای تعیین جایگاه بهینه FCL بکار گرفته می‌شود که به دلیل افزایش تعداد این ادوات در شبکه، چندان کارا نیست. در [۱۸]، الگوریتم GA برای تخصیص بهینه FCL ها استفاده می‌شود که علاوه بر بی‌توجهی کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، مقادیر بهینه امپدانس FCL نیز در نظر گرفته نشده است. در [۱۹-۲۳] روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی مقدار FCL استفاده شده است که البته تأثیرات آن‌ها بر OCRs و ضریب نفوذ DG ها در نظر گرفته نشده است.

این مقاله، ضمن ارائه یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته برای بهینه‌سازی تنظیمات رله مانند TDS و جریان Ip، تأثیر امپدانس SFCL ها بر حساسیت رله در خطاهای اتصال کوتاه مختلف را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. سپس اثر نفوذ DG در شبکه قدرت نظر گرفته می‌شود و هماهنگی حفاظتی OCR با و بدون ادوات محدودکننده جریان خطا در سناریوهای مختلف سیستم قدرت انجام می‌شود. لذا به طور خلاصه نوآوری های این مقاله عبارتند از:

- کاهش مدت‌زمان اتصال کوتاه در مدار با استفاده از تجهیزات SFCL و جایگذاری مناسب آن‌ها در مطالعات موردی و شبکه‌های قدرت مختلف
- حذف تداخل رله‌های حفاظتی و SFCL ها در تغییر نقطه کار جدید سیستم
- بهینه‌سازی مدت‌زمان رفع خطا توسط رله‌های اصلی و پشتیبان توسط الگوریتم PSO بهبود داده شده با ضرایب دینامیک

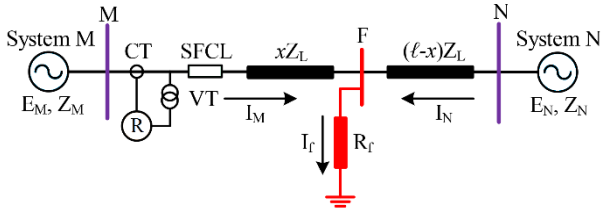
۲. مکانیزم عملکرد رله‌های دیستانس در حضور SFCL

معمولاً رله‌های دیستانس به‌منظور حفاظت از خطوط انتقال در مقابل خطاهای اتصال کوتاه به‌کاربرده می‌شوند. آن‌ها در مود امپدانسی، با اندازه‌گیری امپدانس خطا (Z_f) و مقایسه آن با امپدانس تنظیمی رله (Z_{relay}) به تشخیص محدوده خطا کمک می‌کنند که بدین منظور، از فازورهای ولتاژ و جریان هارمونیک اصلی استفاده می‌شود. روابط (۱) و (۲) در اندازه‌گیری امپدانس فاز به فاز و فاز به زمین مورداستفاده قرار می‌گیرند.

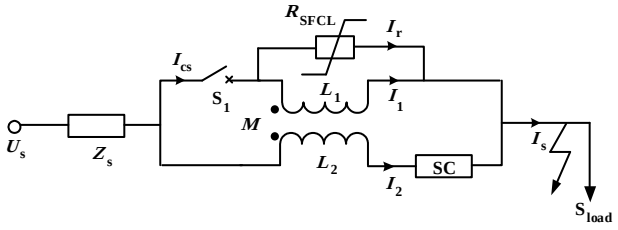
$$Z_{ph-gnd}=\frac{V_{relay}}{I_{relay}}=\frac{V_{ph}}{I_{ph}+\frac{Z_L^{(0)}-Z_L^{(+)}}{Z_L^{(+)}}I_0} \quad (۱)$$

$$Z_{ph-ph}=\frac{V_{relay}}{I_{relay}}=\frac{V_{ph-ph}}{I_{ph-ph}} \quad (۲)$$

که $Z_L^{(0)}$ و $Z_L^{(+)}$ به ترتیب امپدانس‌های خط انتقال در توالی صفر و مثبت می‌باشند. I_0 نیز جریان مؤلفه هموپولار[3] شبکه در نقطه خطا، Z_{ph-ph} امپدانس بین دو فاز و Z_{ph-gnd} امپدانس بین فاز و زمین با شرط $ph\in\{a,b,c\}$ می‌باشند. به‌منظور انجام مطالعات ریاضیاتی و فرمول‌بندی شبکه، فرض می‌شود که سیستم تحت مطالعه همان دیاگرام تک‌خطی نشان داده‌شده در شکل (۱) مدنظر قرار بگیرد. این مجموعه از دو شبکه قدرت، یک SFCL و یک خط انتقال واسط تشکیل شده است که SFCL به شین M متصل می‌باشد. دیاگرام عملکردی SFCL نیز در شکل (۲) آورده شده است.



شکل (۱): شبکه قدرت نمونه برای تنظیم روابط ریاضیاتی سیستم حفاظتی



شکل (۲): ساختار یک SFCL.

زمانی که خطایی در نقطه F و در خط انتقال به وقوع بپیوندد، ولتاژ پایانه‌های SFCL و امپدانس آن افزایش می‌یابند تا شرایط را کاهش جریان اتصال کوتاه فراهم کنند. در این وضعیت، ولتاژ شین M یا همان ولتاژ رله دیستانس برابر خواهد بود با:

$$V_M^{(+)}=V_{SFCL}^{(+)}+xZ_M^{(+)}I_M^{(+)}+R_fI_f^{(+)} \quad (۳)$$

[1] Superconducting Fault Current Limiter
[2] Circuit Breaker
[3] Hemopolar

به‌طور مشابه، روابط حاکم بر مؤلفه‌های منفی و صفر شبکه نیز، می‌توانند مشابه با معادله (۳) تعریف شوند. لذا خواهیم داشت:

$$V_M^{(-)} = V_{SFCL}^{(-)} + xZ_M^{(-)}I_M^{(-)} + R_f I_f^{(-)} \quad (۴)$$

$$V_M^{(0)} = V_{SFCL}^{(0)} + xZ_M^{(0)}I_M^{(0)} + R_f I_f^{(0)} \quad (۵)$$

در خطای تکفاز به زمین در خط انتقال، به‌عنوان مثال خطای اتصال کوتاه در فاز a یا I_{a-gnd} امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله با استفاده از رابطه (٦) محاسبه می‌شود:

$$Z_{a-gnd} = \frac{V_{M,a}}{I_{M,a} + \frac{Z_L^{(0)} - Z_L^{(+)}}{Z_L^{(+)}} I_{M,a}^{(0)}} \quad (۶)$$

که طبق ماتریس فورتسکیو[1]، ولتاژ فاز a در شین M برابر است با:

$$V_{M,a} = V_{M,a}^{(+)} + V_{M,a}^{(-)} + V_{M,a}^{(0)} \quad (۷)$$

با اعمال رابطه (۳) تا (۵) در رابطه (۷) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} V_{M,a} &= V_{SFCL}^{(+)} + V_{SFCL}^{(-)} + V_{SFCL}^{(0)} \\ &+x\left(Z_M^{(+)}I_{M,a}^{(+)} + Z_M^{(-)}I_{M,a}^{(-)} + Z_M^{(0)}I_{M,a}^{(0)}\right) \\ &+R_f\left(I_{f,a}^{(+)} + I_{f,a}^{(-)} + I_{f,a}^{(0)}\right) \end{aligned} \quad (۸)$$

از آنجایی که امپدانس توالی مثبت و منفی در خط انتقال برابر می‌باشند، پس $Z_L^{(+)} = Z_L^{(-)}$ خواهد بود. لذا رابطه (۸) به شکل (۹) به‌روزرسانی می‌شود.

$$\begin{aligned} V_{M,a} &= \underbrace{V_{SFCL}^{(+)} + V_{SFCL}^{(-)} + V_{SFCL}^{(0)}}_{V_{SFCL,a}} \\ &+x\left(Z_L^{(+)}I_{M,a} + Z_L^{(0)}I_{M,a}^{(0)} - Z_L^{(+)}I_{M,a}^{(0)}\right) \\ &+R_f\underbrace{\left(I_{f,a}^{(+)} + I_{f,a}^{(-)} + I_{f,a}^{(0)}\right)}_{I_{f,a}} \end{aligned} \quad (۹)$$

طبق اصل جمع آثار، جریان خطا از دو منبع M و N تغذیه می‌شود، یعنی $I_f = I_M + I_N$. پس خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} V_{M,a} &= V_{SFCL,a} + R_f\left(I_{M,a} + I_{N,a}\right) \\ &+x\left(Z_L^{(+)}I_{M,a} + Z_L^{(0)}I_{M,a}^{(0)} - Z_L^{(+)}I_{M,a}^{(0)}\right) \end{aligned} \quad (۱۰)$$

درنهایت، با جایگذاری روابط فوق در (٦) و ساده‌سازی، امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله در خطای تکفاز به زمین مطابق با رابطه (۱۱) خواهد بود و خواهیم داشت:

الف) Z_{sys}: این جمله همان امپدانس خط انتقال در شرایط ایمن است که در بهره‌برداری نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد. در اینجا، منظور از Z_{sys} امپدانس بین رله و نقطه اتصالی می‌باشد که رله طبق اندازه‌گیری آن، فرمان قطع[2] صادر شده و به کلیدهای قدرت ابلاغ می‌کند تا در اسرع وقت، به جداسازی قسمت آسیب دیده اقدام شود.

ب) ΔZ_{SFCL}: این جمله به تأثیر SFCL در شبکه و اندازه امپدانس آن در کاهش جریان اتصال کوتاه می‌پردازد. این جمله نه‌تنها بر ولتاژ پایانه‌های SFCL تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند در میزان شارش جریان اتصال کوتاه $I_M + I_N$ نیز نقش‌آفرینی کند. به‌علاوه طبق رفتار غیرخطی SFCL در شبکه در زمان رخداد خطا، ذات این امپدانس (اهمی، القایی یا ترکیبی از این دو نوع) می‌تواند تغییر کند و ولتاژ پایانه‌های SFCL را متعاقباً تحت تأثیر قرار دهد.

پ) ΔZ_{fault}: این جمله به تأثیر مقاومت خطا در زمان اتصال سیم‌های خط گرم به زمین می‌پردازد که ممکن است در شرایط مرطوب، صفر در نظر گرفته شود.

$$\begin{aligned} Z_{a-gnd} &= \underbrace{xZ_L^{(+)}}_{Z_{sys}} + \underbrace{\frac{V_{SFCL,a}}{I_{M,a} + \frac{Z_L^{(0)} - Z_L^{(+)}}{Z_L^{(+)}} I_{M,a}^{(0)}}}_{\Delta Z_{SFCL}} \\ &+ R_f \underbrace{\frac{I_{M,a} + I_{N,a}}{I_{M,a} + \frac{Z_L^{(0)} - Z_L^{(+)}}{Z_L^{(+)}} I_{M,a}^{(0)}}}_{\Delta Z_{fault}} \end{aligned} \quad (۱۱)$$

حال اگر خطای فاز به فاز رخ دهد، استخراج معادلات حاکم بر خطا به‌طور مشابه صورت می‌پذیرد و در اینجا با فرض برخورد فاز برق‌دار a به فاز b، تنها به ارائه رابطه نهایی اکتفا خواهد شد.

$$\begin{aligned} Z_{a-b} &= \underbrace{xZ_L^{(+)}}_{Z_{sys}} + \underbrace{\frac{V_{SFCL,a} - V_{SFCL,b}}{I_{M,a} - I_{M,b}}}_{\Delta Z'_{SFCL}} \\ &+ R_f \underbrace{\frac{I_{f,a} - I_{f,b}}{I_{M,a} - I_{M,b}}}_{\Delta Z'_{fault}} \end{aligned} \quad (۱۲)$$

که جملات $\Delta Z'_{SFCL}$ و $\Delta Z'_{fault}$ به ترتیب تأثیر امپدانس SFCL در خطای فاز به فاز و تأثیر امپدانس بین دو فاز در نقطه اتصالی را نشان می دهند.

۳. بررسی تأثیر DG بر جریان اتصال کوتاه

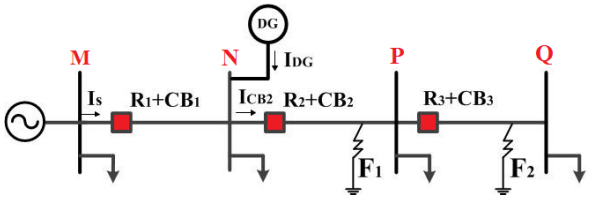
زمانی که DG ها به شبکه قدرت متصل می‌شوند، امپدانس تونن دیده‌شده از نقطه خطا کاهش یافته و درنتیجه، جریان تزریقی به نقطه معیوب به‌شدت افزایش می‌یابد. این جریان گذرنده از کلید، که ممکن است از نرخ عایقی و استقامت آن فراتر رود، مطابق آنچه در شکل (۲) ملاحظه می‌شود برابر خواهد بود با:

$$I_{CB2} = I_s + I_{DG} \quad (۱۲)$$

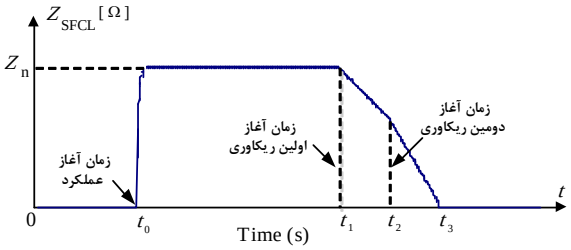
به‌علاوه، استفاده از DG ها در شبکه قدرت می‌تواند هماهنگی حفاظتی رله‌های موجود را بر هم بزند. به‌عنوان مثال، رله‌های OCR

[1] Fortescue
[2] Trip

شکل (۳) که R_1 تا R_3 نام‌گذاری شده‌اند، به‌منظور حفاظت از رخداد خطای F_1 و F_2 تنظیم‌شده‌اند. پس در زمان وقوع F_2، زمان عملکرد R_2 از زمان عملکرد R_1 طبق یک CTI مشخص بیشتر می‌باشد. این موضوع با اتصال یک DG به شین دوم تغییر می‌کند و باعث تغییر نقاط کار رله‌های حفاظتی خواهد شد. به دلیل تزریق سه بزرگی از جریان اتصال کوتاه توسط DG، زمان trip توسط رله‌های R_2 و R_3 کاهش می‌یابد که باعث تغییر در اندازه CTI جدید نیز خواهد شد. اگر CTI بین این دو رله کاهش یابد، ممکن است به عملکرد نادرست[1] آن‌ها در قطع نواحی سالم شبکه منجر شود. با توجه به اینکه عملکرد SFCL می‌تواند به ریکاوری‌های اولیه و ثانویه منجر شود، نمودار شکل (٤) این رخداد را تفسیر می‌کند.



شکل (۳): شبکه قدرت نمونه برای تفهیم اثر DG بر نقطه کار رله‌ها



شکل (٤): مشخصه ریکاوری SFCL.

٤. فرمول‌بندی مسئله

از آنجایی که برای تحقق بهترین حالت هماهنگی حفاظتی در ریز شبکه باید زمان عملکرد OCR ها مینیمم شود، لذا دو پارامتر I_P (جریان تنظیمی رله نسبت به اولیه ترانسفورماتور جریان آن) و ضریب تنظیم زمانی (TDS) در آن‌ها باید تعیین و بهینه شوند. تابع هدف تمامی زمان‌های عملکرد رله‌ها در شبکه با استفاده از رابطه (۱۳) مشخص می‌گردد:

$$minimize \sum_{i=1}^{N_{relays}} \sum_{j=1}^{N_{back-ups}} t_i^{op,m} + t_{ij}^{op,b} \qquad (۱۳)$$

که $t_i^{op,m}$ و $t_i^{op,b}$ به ترتیب نشان‌دهنده زمان عملکرد اصلی و پشتیبان i امین OCR است. در ادامه به بررسی قیود بهینه‌سازی پرداخته می‌شود.

[1] Mal-operation

٤-۱- هماهنگی زمان عملکرد OCR های اصلی و پشتیبان

زمان عملکرد OCR اصلی و پشتیبان به ترتیب طبق روابط (١٤) و (١٥) تعریف می‌شوند.

$$t_i^{op,m} = TDS_i\left(\frac{k}{M_i^n - 1} + k_0\right) \qquad (۱۴)$$
$$M_i = \frac{I_{f,i}^{max}}{I_{p,i}}$$

$$t_{ij}^{op,b} = TDS_b\left(\frac{k}{M_{ij}^n - 1} + k_0\right) \qquad (۱۵)$$
$$M_{ij} = \frac{I_{f,ij}^{max}}{I_{p,j}}$$

که اختلاف زمان عملکرد آن‌ها باید طبق رابطه (١٦) مشخص باشد.

$$t_{ij}^{op,b} - t_i^{op,m} \geq CTI_{ij} \qquad (۱۶)$$

در روابط فوق، $I_{f,i}^{max}$ و $I_{f,ij}^{max}$ به ترتیب ماکزیمم جریان خطای دیده‌شده توسط رله‌های اصلی (i ام) و پشتیبان (j ام) می‌باشند. CTI_{ij} نیز معمولاً حدود ۰/۳ تا ۰/۵ ثانیه انتخاب می‌گردد و ضرایب ثابت k، n و k_0 نیز طبق مشخصه ذاتی OCR مورداستفاده انتخاب خواهند شد.

٤-۲- قید محدودیت جریان I_P و TDS

این دو پارامتر اصلی رله‌ها همواره باید بین مقدار مینیمم و ماکزیمم خود باشند. پس داریم:

$$I_{p,i}^{min} \leq I_{p,i} \leq I_{p,i}^{max} \qquad (۱۷)$$

$$TDS_i^{min} \leq TDS_i \leq TDS_i^{max} \qquad (۱۸)$$

٤-۳- قید مکان قرارگیری SFCL ها

در این مطالعه، تجهیزات محدودکننده جریان خطا در شبکه قدرت و به‌منظور کاهش پیک اولیه جریان اتصال کوتاه مورداستفاده قرار می‌گیرند. مکان قرارگیری آن‌ها به حداکثر جریان اتصال کوتاه موجود در خطوط شبکه بستگی دارد که با تابع هدف زیر بیان خواهد شد:

$$\underset{l \epsilon L}{minimize} \quad \frac{\max I_f^l}{\max I_f} \quad ; \quad f \epsilon \{F_1, F_2, \dots, F_N\} \qquad (۱۹)$$

که پارامترهای I_f و I_f^l جریان‌های اتصال کوتاه قبل و بعد از مکان‌یابی بهینه SFCL در مکان l می‌باشند. L نیز مجموعه نقاط کاندید برای مکان قرارگیری محدودکننده‌های جریان خطا و f نیز، شماره خطاهای اتصال کوتاه هستند. باید دقت داشت که در این تابع هدف، قید ظرفیت جریان نیز مانند روابط (۲۰) و (۲۱) رعایت گردد.

$$I_{f,i}^{max,l} \leq I_{f,i}^{cap} \qquad (۲۰)$$

$$I_{f,ij}^{max,l} \le I_{f,ij}^{cap} \quad (۲۱)$$

که در آن، پارامترهای $I_{f,i}^{max,l}$ و $I_{f,ij}^{max,l}$ ماکزیمم جریان اتصال کوتاه دیده‌شده توسط رله‌های اصلی (i ام) و پشتیبان (j ام) نزدیک به SFCL قرار گرفته در مکان l می‌باشند. $I_{f,i}^{cap}$ و $I_{f,ij}^{cap}$ نیز ظرفیت جریان تجهیزات حفاظتی را نشان می‌دهند که نباید از جریان‌های اتصال کوتاه شبکه کمتر باشد. بنابراین، زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در حضور SFCL با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۳) به‌روزرسانی خواهند شد:

$$t_i^{op,m,l} = TDS_i^l\left(\frac{k}{M_{l,i}^n - 1} + k_0\right)$$
$$M_{l,i} = \frac{I_{f,i}^{max,l}}{I_{p,i}} \quad (۲۲)$$

$$t_{ij}^{op,b,l} = TDS_b^l\left(\frac{k}{M_{l,ij}^n - 1} + k_0\right)$$
$$M_{l,ij} = \frac{I_{f,ij}^{max,l}}{I_{p,j}} \quad (۲۳)$$

که در این صورت، CTI نیز به‌روز می‌گردد:

$$t_{ij}^{op,b,l} - t_i^{op,m,l} \ge CTI_{l,ij} \quad (۲۴)$$

در روابط (۲۲) تا (۲٤)، تمامی پارامترهای تعریف‌شده در قبل، با اندیس l ارائه‌شده‌اند که بیانگر تغییرات آن‌ها تحت قرارگیری SFCL در مکان l ام می‌باشد.

۵. الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم ازدحام ذرات[1] (PSO) یکی از شاخه‌های هوش جمعی می‌باشد که حوزه وسیعی از دانش هوش مصنوعی را شامل می‌شود. فرآیند جستجو بر اساس مفاهیم گفته‌شده را می‌توان به این صورت شرح داد که یک دسته از افراد یک اجتماع، به دنبال بهینه کردن یک تابع هدف خاص می‌باشند. هر فرد از این اجتماع بهترین جواب تاریخچه خود pbest و موقعیت کنونی خود را می‌داند. علاوه بر این هر فرد از بهترین جوابی که در تاریخچه جمعیت موجود است gbest مطلع می‌باشد. بردار حرکت اصلاح‌شده برای هر فرد را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۲٤]:

$$v_i^{k+1} = w_i v_i^k + c_1 * rand * \left(pbest - x_i^k\right) + c_2 * rand * (gbest - x_i^k) \quad (۲۵)$$

که در رابطه (۲۵)، v_i^k: بردار حرکت فرد i در تکرار k (تکرار جاری)، v_i^{k+1} : بردار حرکت اصلاح‌شده برای فرد i، rand : یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱، x_i^k : موقعیت جاری فرد i در تکرار k، pbest : بهترین جواب فرد i در تکرارهای مختلف، gbest : بهترین جواب در میان تمامی افراد جامعه، w_i : ضریب وزنی برای بردار سرعت فرد i و c_i : ضریب وزنی برای هر مؤلفه می‌باشند. با استفاده از معادلات فوق یک بردار حرکت که به‌طور مشخص به pbest و gbest نزدیک می‌شود را می‌توان محاسبه نمود. موقعیت جاری هر فرد را می‌توان با استفاده از رابطه زیر اصلاح نمود:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (۲۶)$$

در [۲۵] برای اینکه از همگرایی PSO اطمینان حاصل شود از ضریب انقباض استفاده‌شده است و بردار حرکت اصلاح به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$v_{i+1}^{k+1} = k^*(w^* v_i + \varphi_1 * rand(pbest - x_i^k) + \varphi_2 * rand(gbest - x_i^k)) \quad (۲۷)$$

که در رابطه بالا w و φ_1 و φ_2 همان ضرایب وزنی می‌باشند. متغیر k، ضریب انقباض برحسب φ_1 و φ_2 می‌باشد که می‌توان به شکل زیر نمایش داد:

$$k = \frac{2}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}\right|} \quad (۲۸)$$

انتخاب مناسب w باعث ایجاد یک تعادل بین جستجوی عام و محلی می‌شود. عموماً ضریب اینرسی w با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (۲۹)$$

که در رابطه (۲۹)، پارامتر iter شماره تکرار مسئله و $\text{iter}_{\max}$ حداکثر تعداد تکرارها را نمایش می‌دهد. حال به‌منظور بهبود عملکرد الگوریتم PSO، یک ضریب جدید به رابطه (۲۵) افزوده می‌گردد. لذا الگوریتم PSO قدیم به الگوریتم IPSO[2] تغییر نام پیدا می‌کند. لذا ضرایب سرعت به فرم رابطه (۳۰) در می‌آیند:

$$v_i^{k+1} = w\, v_i^k + c_1 r_1\left(P_{best_i}{}^k - x_i^k\right) + c_2 r_2\left(G_{best_i}{}^k - x_i^k\right) + c_3 r_3\left(I_{best_i}{}^k - x_i^k\right) \quad (۳۰)$$

که $I_{best_i}{}^k$ بهترین پاسخی است که توسط هر ذره در تکرارها حاصل می‌گردد. c_3 نیز ضریب وزنی متناسب با آن است. همچنین r_3 نیز یک عدد تصادفی در بازه ۰ تا ۱ می‌باشد. عملکرد این برنامه (و هر برنامه دیگری) تنها وابسته به تنظیم صحیح این ضرایب می‌باشد. در الگوریتم PSO سنتی، معمولاً ضرایب روی ۲ تنظیم می‌شدند. یکی از نقطه‌ضعف این تنظیم، ثابت بودن ضرایب است. یعنی اگر ضریب c_2 از ۲ بیشتر شود، اکثر مواقع پاسخ‌ها در اکسترمم محلی به دام می‌افتند.

[1] Particle Swarm Optimization

[2] Improved PSO

در الگوریتم ارائه‌شده پیشنهادی، ضرایب پویا می‌باشند و با روابط (۳۱) محاسبه می‌گردند.

$$c_1 = c_{1i} + \frac{c_{1f} - c_{1i}}{iter_{max}} * iter$$
$$c_2 = c_{2i} + \frac{c_{2f} - c_{2i}}{iter_{max}} * iter \quad (۳۱)$$

این موضوع باعث می‌شود تا ذره‌ها در ابتدا مجبور شوند تمامی فضای مسئله را برای یافتن پاسخ جست‌وجو کنند. پس از گذشت کمی از حرکت ذره‌ها، به‌روز کردن ضرایب آن‌ها را مجبور می‌کند تا با سرعت بیشتری به بهینه سراسری همگرا شوند. در شروع برنامه (تکرارهای ابتدایی)، ذره‌ها بسیار از نقطه بهینه فاصله دارند. لذا افزود یک جمله جدید به‌سرعت حرکت آن‌ها، همگرایی ذره‌ها را بهبود می‌بخشد. لذا ضریب c_3 را این‌چنین محاسبه می‌کنیم:

$$c_3 = c_1 \left(1 - e^{-c_2.iter}\right) \quad (۳۲)$$

که در روابط فوق، $iter$ نشان‌دهنده شماره تکرار و $iter_{max}$ همان تکرار ماکزیمم می‌باشند. با تنظیم ضرایب فوق‌الذکر به‌صورت: $c_{1i} = 1.75\,, c_{1f} = 0.5\,, c_{2i} = 0.5\,, c_{2f} = 2$ ، بهینه‌سازی آغاز خواهد شد.

٦. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله سه مطالعه موردی کاملاً مختلف بررسی می‌شود. در مطالعه موردی اول، تأثیر عملکرد SFCL بر ریز شبکه و محدودسازی جریان اتصال کوتاه در هر دو حالت بهره‌برداری مستقل و متصل به شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مطالعه موردی به‌منظور ارزیابی مدل ارائه‌شده SFCL و ارزیابی عملکرد OCR ها در جداسازی قسمت‌های خطادار شبکه می‌باشد. مطالعه موردی دوم به کاهش جریان اتصال کوتاه در شبکه‌های شعاعی با و بدون حضور DG و SFCL می‌پردازد. در مطالعه مورد سوم نیز، مبحث مکان‌یابی SFCL ها با و بدون DG در شبکه و تأثیر آن‌ها بر عملکرد سیستم حفاظتی ارائه خواهد شد. هدف از مطالعه مورد دوم، بررسی کاهش زمان پاسخ به خطا توسط OCR ها در حضور منابع تولید پراکنده (تشدیدکننده جریان اتصال کوتاه) و ادوات محدودکننده جریان خطا می‌باشد.

٦-١- مطالعه موردی اول

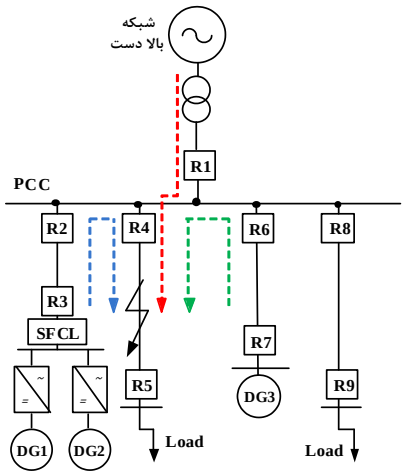
شبکه قدرت نشان داده‌شده در این مرحله در شکل (۵) آورده و مشخصات آن نیز در جدول (۱) مشخص گردیده است. در این سیستم فرض می‌شود که DG ها بتوانند از انواع مختلف تکنولوژی تولیدی مانند فتوولتائیک، بادی و ... بهره ببرند و کنترل توان اکتیو و راکتیو با شبکه و بارهای تحت نظارت خود انجام دهند. مدل SFCL پیاده‌سازی شده در نقطه اتصال مشترک منابع تولید پراکنده DG1 و DG2 همان شماتیک مداری شکل (۲) با ساختار ریکاوری شکل (٤) می‌باشد. مشخصات این تجهیز نیز در جدول (۲) آورده شده است. اگر ریز شبکه به شبکه بالادست متصل باشد و خطای متقارن سه فاز به زمین در لحظه t = 1 s و مابین R4 و R5 رخ دهد، در این صورت جریان خطا از سه‌نقطه تغذیه خواهد شد. ۱) از سمت شبکه بالادست؛ ۲) از سمت منابع DG سمت چپ خطا؛ ۳) از سمت منابع DG سمت راست خطا. نمودارهای شکل (٦) و (۷)، جریان و ولتاژ خطا را در پایانه DG1 و DG2 به تصویر کشیده‌اند. پیک جریان خطا در این حالت به حدود ۲۹۷۰ آمپر در غیاب SFCL می‌رسد که در صورت استفاده از SFCL، به حدود ۱۳۳۰ آمپر کاهش پیدا می‌کند. اگر از SFCL استفاده نشود، ولتاژ DG ها تا حدود ۱۳ درصد مقدار نامی خود کاهش می‌یابد و رله OCR محافظ آن‌ها، trip خواهد داد. در زمانی که در سیستم از SFCL بهره‌برداری شود، اگرچه این دستگاه نمی‌تواند جریان کشیده شده از شبکه بالادست را محدود کند، اما جریان تزریقی از سمت DG ها را کاهش خواهد داد. این ویژگی در شکل (۸) و در شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای آورده شده است. همان‌گونه که از شکل (۸) بر می‌آید، جریان خطا تنها در حداکثر دو سیکل ابتدایی با اندکی افزایش محسوس قابل اندازه‌گیری خواهد بود. در سایر لحظات و با افزایش ناگهانی ولتاژ و امپدانس SFCL، جریان به‌شدت کاهش یافته و ولتاژ پایانه DG ها نیز، تنها ۲۱ درصد افت می‌کند. این افت ولتاژ مشاهده‌شده تنها در سیکل‌های ابتدایی رخ می‌دهد و SFCL مانع اضافه جریان شدن منابع تولید پراکنده خواهد شد. درنتیجه، پس از افزایش ۳۳ درصدی جریان در پیک اول $\left(I_{SC}^{pu} = 1.03\ pu\right)$، OCR ها قسمت خطادار را از شبکه خارج کرده و باعث عدم خاموشی در سایر نقاط سالم شبکه می‌گردند. لذا عملکرد آن طبق روش پیشنهادی اعتبارسنجی می‌شود.

جدول (۱): مشخصات ریزشبکه تحت ارزیابی در مطالعه موردی اول

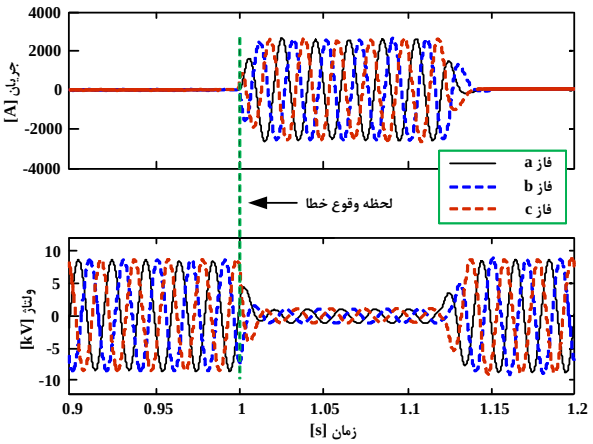
پارامتر	مقدار
ولتاژ مؤثر سیستم	۱۰ kV (rms)
فرکانس خط	۵۰ Hz
مجموع بارها	۳۰۰ kW
امپدانس خطوط انتقال	۰/۲۴ + j ۰/۳۱ Ohm/km
طول خطوط انتقال	۲ km
ظرفیت منبع DG1	۱۸۰ kW
ظرفیت منبع DG2	۱۰۰ kW
ظرفیت منبع DG3	۹۰ kW

جدول (۲): مشخصات SFCL

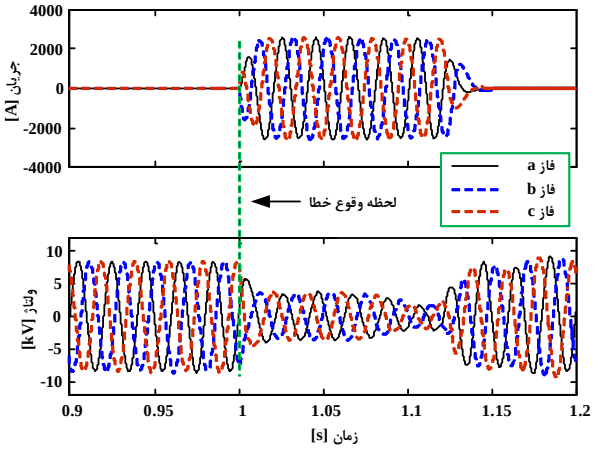
پارامتر	مقدار
اندوکتانس اولیه	۱۱۰ mH
ضریب کوپل به نسبت سیم‌پیچ	۰/۹۹ به ۰/۵
R_{SC}	۱۰ ohm



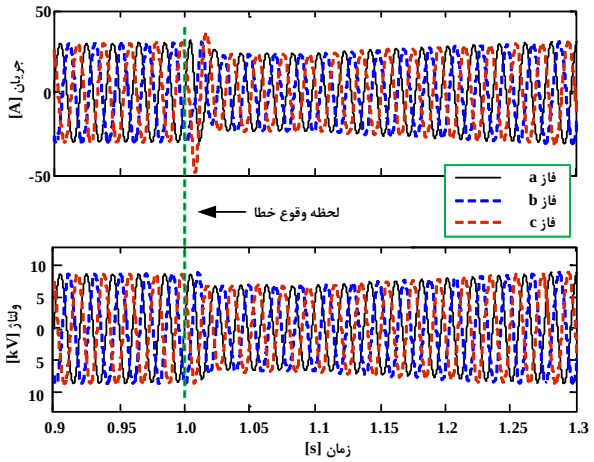
شکل (۵): ریز شبکه تحت ارزیابی در مطالعه مورد اول.



شکل (٦): نمودار جریان تزریق‌شده به خطا و ولتاژ DG ها بدون استفاده از SFCL در حالت متصل به شبکه.

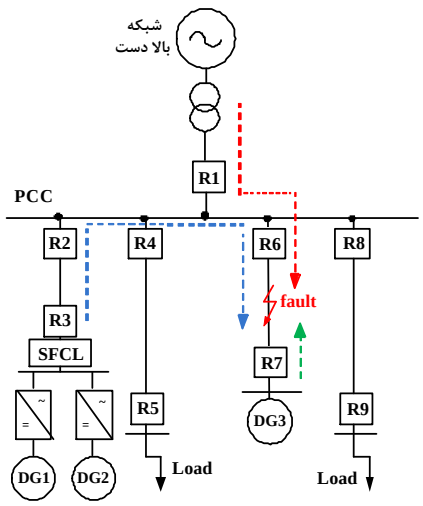


شکل (۷): نمودار جریان تزریق‌شده به خطا و ولتاژ DG ها با استفاده از SFCL در حالت متصل به شبکه.



شکل (۸): نمودار جریان تزریق‌شده به خطا و ولتاژ DG ها با استفاده از SFCL در حالت جدا از شبکه بالادست.

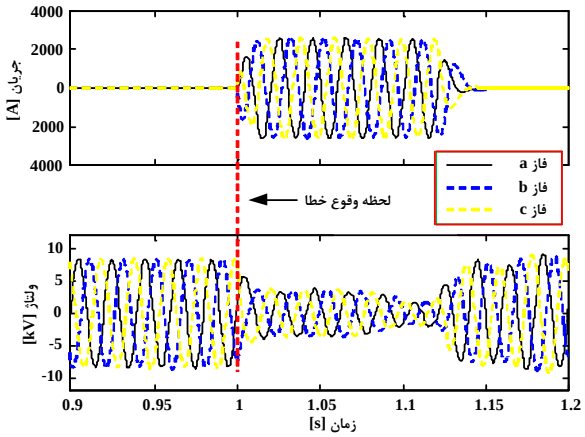
حال اگر مکان خطا به فیدرهای مجاور انتقال یابد، به دلیل اینکه بازهم بین دو رله متوالی قرار می‌گیرد و از طریق سه DG و شبکه بالادست تغذیه می‌شود، تغییر چندانی در نتایج به وجود نخواهد آمد. به‌عنوان نمونه اگر خطا بین‌بین رله‌های R6 و R7 قرار بگیرد، نمودار شبکه تحت مطالعه به وضعیت شکل (۹) تغییر پیدا خواهد کرد و همچنین، نمودارهای جریان و ولتاژ منابع در حالات متصل و ایزوله شده از شبکه بالادست نیز در شکلهای (۱۰) و (۱۱) به تصویر کشیده می شود.



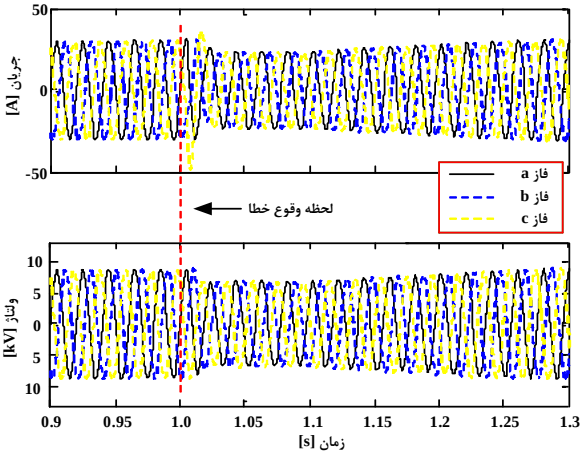
شکل (۹): ریز شبکه تحت ارزیابی در مطالعه مورد اول، حالت دوم.

٦-۲- مطالعه موردی دوم

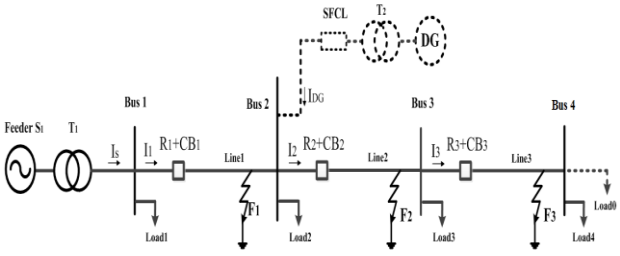
بلوک دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت تحت مطالعه در شکل (۱۲) نشان داده‌شده است. مشخصات خطوط، بارها و فیدرهای این شبکه نیز در جدول (۳) نشان داده می‌شود. پارامتر CTI در این مطالعه موردی ۰/۲۵ ثانیه در نظر گرفته خواهد شد. نتایج پخش بار و توزیع جریان اتصال کوتاه نیز به ترتیب در جداول (٤) و (٥) آورده شده‌اند.



شکل (۱۰): نمودار جریان تزریق‌شده به خطا و ولتاژ DG ها با استفاده از SFCL در حالت متصل به شبکه.



شکل (۱۱): نمودار جریان تزریق‌شده به خطا و ولتاژ DG ها با استفاده از SFCL در حالت جدا از شبکه بالا دست.



شکل (۱۲): بلوک دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت تحت مطالعه در مطالعه موردی دوم.

جدول (۳): مشخصات شبکه تحت ارزیابی در مطالعه موردی دوم

پارامتر	مقدار
ولتاژ مؤثر سیستم	۲۵ kV (rms)
فرکانس خط	۶۰ Hz
ظرفیت هر بار	۰/۷ + j ۰/۲ MVA
امپدانس خطوط انتقال	۰/۶۵ + j ۰/۶۵ Ohm/km
طول خطوط انتقال	۲ km
ظرفیت DG	۶۵۰ kVA

جدول (٤): نتایج پخش بار شبکه تحت ارزیابی در مطالعه موردی دوم

شماره شین	ولتاژ (پریونیت)
شین ۱	۱/۰۳۸
شین ۲	۱/۰۰۶
شین ۳	۰/۹۸۵۵
شین ۴	۰/۹۸۰۹

جدول (۵): توزیع جریان شبکه تحت ارزیابی در مطالعه موردی دوم

شماره شین / خطا	جریان بار کامل [kA]	جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن [kA]
شین ۱ / F1	۰/۶۴۵	۴۵/۲۱
شین ۲ / F2	۰/۴۳۴	۱۴/۹۶
شین ۳ / F3	۰/۲۱۸	۸/۲۴

در حالت اول، تنظیمات OCR ها برای ارزیابی خطای F2 و F3، مطابق با جدول (٦) خواهد بود. اما زمانی که DG در شین ۲ به مدار متصل می‌گردد، توزیع جریان و تنظیمات قبلی رله‌های اضافه جریان، مطابق با آنچه در مقدمه تشریح شد، متفاوت خواهد بود. لذا جدول (۷) را می‌توان گویای این مسئله دانست که در آن، تحلیل شبکه با و بدون DG به همراه SFCL آورده شده است. در این جدول، CTI_{12} افزایش پیدا می‌کند، درحالی‌که CTI_{23} کاهش پیدا خواهد کرد و به ۰/۱۹ ثانیه می‌رسد که در محدوده قابل‌انتظار $0.2 < CTI < 0.5$ نخواهد بود. مقادیر بسیار کوچک برای CTI می‌تواند عملکرد نادرست سیستم حفاظتی را در هماهنگی OCR های اصلی و پشتیبان به دنبال داشته باشد. همچنین ازآنجایی‌که شکسته شدن استقامت عایقی تجهیزات در اثر جریان اتصال کوتاه تشدید شده توسط DG ها می‌تواند بسیار پرهزینه‌تر از نصب تعداد محدودی SFCL در شبکه باشد، لذا توجیه اقتصادی این طرح موفق آمیز خواهد بود.

جدول (۷) که جریان اتصال کوتاه گذرنده از کلیدهای قدرت را در حضور DG ها نشان می‌دهد بیان می‌کند که استفاده از DG، می‌تواند جریان خطا را از نرخ استقامت جریانی آن‌ها بالاتر ببرد و لذا، CB ها باید به‌روزرسانی شوند. تجهیز حفاظتی SFCL با DG به‌طور سری نصب‌شده تا بتواند جریان خطای تزریقی از سمت DG را به بهترین نحو کاهش دهد. این تجهیز ابررسانا که مقاومت آن بین ٤ تا ٥ اهم متغیر می‌باشد، در کاهش جریان شارش یافته بین دو شین متوالی نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. جدول (۸) نشان می‌دهد که عملکرد SFCL با و بدون DG به چه میزان بر جریان اتصال کوتاه بالادست و پایین‌دست شبکه مؤثر خواهد بود. این جدول که بر اساس اتصال کوتاه در شین بالادست تنظیم شده است، نشان می‌دهد که SFCL می‌تواند جریان شبکه پایین‌دست را کاهش دهد اما بر جریان شبکه

بالادست تأثیر چندانی ندارد. شکل (۱۳)، ارزیابی CTI ها را بین رله‌های مختلف به تصویر می‌کشد. زمانی که از DG استفاده شود، مقدار CTI کاهش می‌یابد که منجر به عملکرد نادرست کلیدها خواهد شد که با استفاده از SFCL، این مقدار به بالای ۰/۲ ثانیه خواهد رسید.

جدول (٦): تنظیمات رله‌های شبکه.

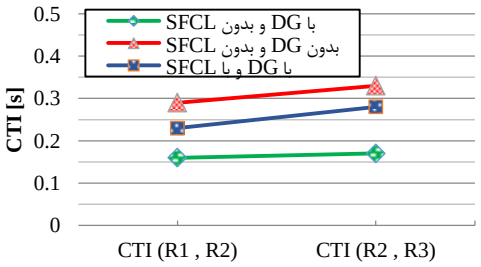
خطا	رله	با DG بدون SFCL		با DG و SFCL (R_{SFCL} = 4 Ω)		با DG و SFCL (R_{SFCL} = 5 Ω)	
		زمان عملکرد [s]	CTI [s]	زمان عملکرد [s]	CTI [s]	زمان عملکرد [s]	CTI [s]
F3	R3	0.136	0.190	0.138	0.199	0.140	0.201
	R2	0.326		0.337		0.341	
F2	R2	0.207	0.236	0.210	0.232	0.214	0.227
	R1	0.443		0.442		0.441	

جدول (۷): توزیع جریان شارش یافته در کلید در حالات مختلف

خطا	کلید	بدون DG [kA]	با DG [kA]	با DG و SFCL (RSFCL = 4.4 Ω)
F1	CB1	۱۲/۷۶	۱۳/۸۹	۷/۲۳
F2	CB2	۶/۸۸	۷/۲۴	۷/۰۶
F3	CB3	۴/۶۲	۵/۲۶	۵/۰۲

جدول (۸): توزیع جریان اتصال کوتاه شارش یافته در خطوط در حالات مختلف، زمانی که خطای تکفاز به زمین در فاز A اتفاق افتاده است.

خط	با DG و با SFCL [kA]	با DG و بدون SFCL [kA]
۱	۴۷/۱۶	۴۷/۱۶
۲	۱۴/۱۳	۱۴/۸۶
۳	۷/۸۱	۸/۰۳

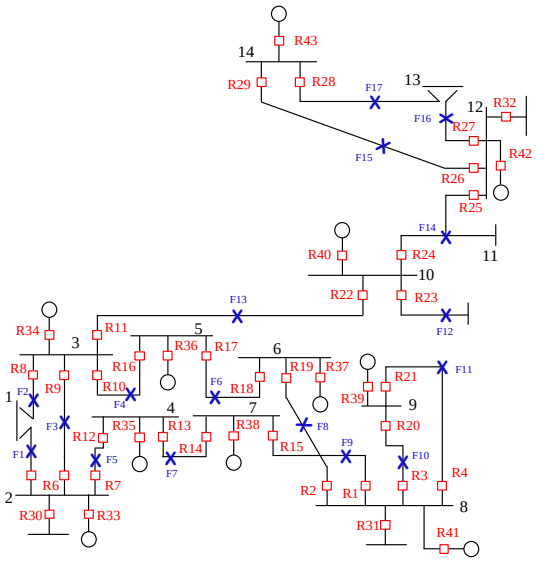


شکل (۱۳): نمودار مقایسه CTI در حالات مختلف بین رله‌ها.

در مطالعه موردی اول و در شکل (۸) عملکرد روش پیشنهادی در حالت جزیره‌ای بررسی‌شده است. در حالت متصل به شبکه به دلیل اینکه سطح اتصال کوتاه شبکه تحت بررسی بالا می‌باشد، لذا عملکرد SFCL ها ملموس‌تر بوده و تأثیر بیشتری بر کاهش جریان خطا خواهند گذاشت. لذا همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در شکل‌های (٦) و (۷)، جریان تزریق‌شده به نقطه خطا، بسیار بالا خواهد بود که البته سهم زیادی از این جریان را شبکه بالادست تأمین می‌کند و باعث کاهش شدید ولتاژ در پایانه‌های DG می‌شود. حال زمانی که ریز شبکه در حالت جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود، به دلیل پایین بودن سطح اتصال کوتاه شبکه، SFCL ها نیز با کاهش جریان تزریق‌شده از DG ها به سمت نقطه خطا، از کاهش بیش از ولتاژ پایانه منابع تولید پراکنده جلوگیری می‌کنند که در مقایسه با حالت متصل به شبکه، نشان از کاهش کارایی آن‌ها نیست. زیرا عملکرد SFCL ها به‌طور چشم‌گیری به مکان قرارگیری و جریان عبوری از آن‌ها وابسته است و به دلیل اینکه در این مطالعه موردی، SFCL ها در شین خروجی DG ها قرار گرفته‌اند، می‌توانند تنها سهم جریان تأمین‌شده از سوی DG ها را در زمان وقوع خطا کاهش دهند و عملاً تأثیری بر جریان تزریق‌شده از شبکه بالادست نخواهند گذاشت. به‌منظور بهبود کارایی روش در حالت متصل به شبکه و کاهش جریان، باید یک SFCL با اندازه بزرگ در شین PCC قرار داده شود تا جریان‌های خطای شبکه بالادست را محدود کند که البته این مورد، از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود.

٦-۳- مطالعه موردی سوم

شبکه توزیع ١٤ شینه IEEE بهبودیافته در شکل (١٤) نشان داده‌شده است. در این قسمت به‌منظور تحقق مکان‌یابی SFCL ها از الگوریتم IPSO پیشنهادی و مینیمم سازی تابع هدف استفاده شده است.



شکل (١٤): سیستم قدرت تحت مطالعه در مطالعه موردی سوم.

حال اگر SFCL در مکان‌های بهینه به مدار اضافه شود (مطابق جدول (۹))، جریان‌های اتصال کوتاه کاهش یافته و رله‌های پشتیبان کمتری در مدار حضور خواهند یافت. پارامترهای I_P و TDS های بهینه‌شده‌ی تمامی رله‌های موجود در این شبکه در جدول (۱۰) نشان داده می‌شود. جدول (۱۱) یک مقایسه نوعی بین حالات مختلف حفاظتی

در این شبکه انجام داده است. ملاحظه می‌گردد که در زمان حضور DG ها، جریان‌های اتصال کوتاه به‌شدت بالا می‌روند و لذا رله‌ها، باید در کمترین زمان ممکن واکنش نشان دهند و فرمان قطع صادر کنند.

جدول (۹): مکان بهینه و امپدانس SFCL ها.

شماره SFCL	شین کاندید	امپدانس [pu]
۱	۲	۲/۹۸۵۶
۲	۳	۲/۶۷۵۱
۳	۶	۲/۵۱۲۴
۴	۸	۱/۹۶۶۵
۵	۱۲	۲/۸۹۴۷

جدول (۱۰): پارامترهای I_P و TDS های بهینه شده.

Relay	TDS [S]	I_p(pu)	Relay	TDS [S]	I_p(pu)
1	0.1058	1.1403	23	0.2885	0.1001
2	0.1669	0.5884	24	0.1234	0.1931
3	0.1210	2.2671	25	0.0888	0.2720
4	0.1339	0.1630	26	0.2248	0.2246
5	0.1657	2.8736	27	0.0909	1.4657
6	0.2355	0.5187	28	0.0894	1.8057
7	0.1388	0.8531	29	0.0905	0.0604
8	0.1539	1.3619	30	0.0898	0.5493
9	0.2344	0.4033	31	0.2012	0.1410
10	0.1876	0.5894	32	0.0908	0.1326
11	0.1359	0.1905	33	0.3119	1.3549
12	0.1429	0.4841	34	0.1538	2.2956
13	0.1519	0.8357	35	0.0951	3.5994
14	0.1350	0.4400	36	0.0948	3.7709
15	0.1852	0.4561	37	0.0938	3.7448
16	0.1316	0.4409	38	0.1205	3.6449
17	0.1570	0.8790	39	0.0921	3.4159
18	0.1005	0.8873	40	0.1794	0.7988
19	0.1139	0.4814	41	0.1897	1.6656
20	0.1987	0.5148	42	0.1004	1.7602
21	0.2437	0.1693	43	0.1610	1.3536
22	0.1132	0.2626	Total	6.4234	49.1493

این موضوع به‌شدت به کاهش CTI ها و اختلال در سیستم حفاظتی شبکه کمک خواهد کرد. جدول (۱۲) زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان را در این شبکه نشان خواهند داد..

جدول (۱۱): مقایسه زمان عملکرد در حالات مختلف.

روش	زمان عملکرد کل	I_p کل
بدون DG بدون SFCL	۶/۹۶ ثانیه	۴۰/۶۴ پریونیت
بدون DG با SFCL	۶/۰۱ ثانیه	۳۳/۰۷ پریونیت
با DG بدون SFCL	۵/۹۵ ثانیه	۶۱/۵۵ پریونیت
با DG با SFCL	۶/۴۲ ثانیه	۴۹/۱۴ پریونیت

۷. نتیجه گیری

استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت، سطح اتصال کوتاه شبکه را بالا می‌برد و باعث افزایش جریان تزریق‌شده به نقاط خطادار سیستم خواهد شد. این پدیده هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و CTI آن‌ها به‌شدت کاهش پیدا خواهد کرد. این مقاله با مدل‌سازی یک محدودکننده جریان با ساختار مقاومتی و سلف کوپل، تأثیرات نامطلوب DG ها در شبکه را کاهش می‌دهد و هماهنگی حفاظتی جدیدی را برای OCR ها پیشنهاد می‌کند. نتایج خروجی و تحلیل‌های مطالعات موردی انجام‌شده در حالات مختلف شبکه قدرت حاکی از آن است که SFCL جریان شبکه پایین‌دست را به‌طور چشم‌گیری کنترل می‌کند. افزایش آنی امپدانس و ولتاژ پایانه‌های SFCL باعث ایجاد مسیری با امپدانس بالا می‌شود که جریان را در سیکل‌های ابتدایی به‌شدت محدود خواهد کرد. لذا جریان تزریق‌شده از سمت DG به نقطه اتصالی کاهش یافته و نرخ استقامت کلیدها نیز، تحت تنش قرار نمی‌گیرد. این موضوع به توسعه دیرهنگام شبکه قدرت کمک خواهد نمود. نتایج حاصل‌شده از مطالعه موردی سوم حاکی از آن است که در زمان استفاده از منابع تولید پراکنده و بدون به کاری گیری تجهیزات محدودکننده جریان خطا، توزیع جریان در شبکه به‌شدت بالا می‌رود که منجر به تنش مکانیکی تجهیزات خواهد شد. ازآنجایی‌که بهترین مکان برای قرارگیری ادوات محدودکننده جریان خطا، بین DG و پایانه خروجی آن می‌باشد، لذا استفاده از SFCL ها می‌تواند تا حد زیادی با بازگرداندن جریان اتصال کوتاه به حالت اولیه آن‌ها (جریان نامی) و حتی کمی پایین‌تر از آن، کمک شایانی بکند.

جدول (۱۲): زمان عملکرد OCR های اصلی و پشتیبان در مطالعه موردی سوم

Fault location	Primary1	Back-up 1	Back-up 2	Back-up 3	Back-up 4	Back-up 5	Back-up 6	Primary2	Back-up 1	Back-up 2	Back-up 3	Back-up 4
Fault 1	R5 1.2352	R9 2.3420	R12 1.3652	R30 1.9952	R33 1.2332							
Fault 2	R8 0.3770	R6 2.4692	R16 1.0253	R22 1.3365	R34 1.1255							
Fault 3	R6 0.4562	R12 0.8335	R30 0.7895	R33 1.1652				R9 0.3452	R16 0.5695	R22 0.5700	R34 0.7621	
Fault 4	R10 0.4952	R6 1.2500	R22 0.8562	R34 0.9823				R16 0.2741	R18 1.3362	R36 1.1215		
Fault 5	R7 0.3562	R9 1.2652	R30 1.2425	R33 1.2305				R12 0.3303	R14 0.7625	R35 0.7958		
Fault 6	R17 0.3758	R10 1.4885	R36 0.4506					R18 0.2445	R2 1.3625	R37 0.6402		
Fault 7	R13 0.3452	R7 1.9990	R35 0.7652					R14 0.3125	R1 1.2702	R38 1.0647		
Fault 8	R2 0.3552	R15 1.7985	R20 2.2652	R21 3.4700	R23 2.7520	R31 2.5952	R41 1.9741	R19 0.2452	R17 1.1652	R37 0.7852		
Fault 9	R1 0.2620	R19 0.6630	R20 0.6745	R21 0.7365	R23 0.8854	R31 0.4952	R41 0.5152	R15 0.3741	R13 1.1203	R38 0.5627		
Fault 10	R3 0.2442	R15 0.4944	R19 0.5701	R21 0.4542	R23 0.5102	R31 0.5752	R41 0.6852	R20 0.3854	R4 2.7622	R23 0.5585	R39 0.8965	
Fault 11	R4 0.2632	R15 0.8509	R19 1.1655	R20 0.4962	R31 0.8958	R41 0.9155		R21 0.3021	R3 1.1625	R39 0.6968		
Fault 12	R23 0.4365	R11 1.1452	R25 0.8602	R40 0.6400								
Fault 13	R11 0.2595	R6 2.3635	R16 1.9965	R34 1.8985				R22 0.3254	R4 2.1077	R21 1.9522	R25 1.3325	R40 0.895
Fault 14	R24 0.2435	R4 2.4852	R11 2.2788	R21 2.5365	R40 0.8301			R25 0.1625	R29 0.6955	R32 0.9201	R42 0.7632	
Fault 15	R26 0.4366	R24 1.2324	R32 3.7858	R42 1.1195				R29 0.1325	R43 1.9120			
Fault 16	R27 0.5012	R24 0.7102	R29 0.7236	R32 0.9778	R42 0.7365							
Fault 17	R28 0.6785	R26 3.1112	R43 0.8785									

مراجع

[1] J. Ma, C. Liu and J. S. Thorp, "A Wide-Area Backup Protection Algorithm Based on Distance Protection Fitting Factor," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 5, pp. 2196-2205, 2016.

[2] L. Zhenxing, Xi. Yin, Z. Zhang, and Y. Wang. "Study on power grid partition method for wide-area relaying protection." in *Elektronika ir elektrotechnika*, vol. 19, no. 3, pp. 17-22, 2013.

[3] I. Tarimer, and B. Kuca. "An Overview on the Protection Measures for Air-Port Protection in High Density Lightning Regions." in *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 10, pp. 29-32, 2013.

[4] V. Siozinys, and R. Urniezius. "Transmission line protection and fault location based on travelling wave measurement." in *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 9, pp. 21-24, 2013.

[5] H. Manafi, N. Ghadimi, M. Ojaroudi, and P. Farhadi. "Optimal placement of distributed generations in radial distribution systems using various PSO and DE algorithms." in *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 10, pp. 53-57, 2013.

[6] M. A. Ozcelik, A. S. Yilmaz, S. Kucuk, and M. Bayrak. "Efficiency in centralized DC systems compared with distributed DC systems in photovoltaic energy conversion." in *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 21, no. 6, pp. 51-56, 2015.

[7] A. Dogan, and M. Alci. "Simultaneous Optimization of Network Reconfiguration and DG Installation Using Heuristic Algorithms." in *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 25, no. 1, pp. 8-13, 2019.

[8] V. C. Nikolaidis, E. Papanikolaou and A. S. Safigianni, "A Communication-Assisted Overcurrent Protection Scheme for Radial Distribution Systems With Distributed Generation," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 114-123, Jan. 2016.

[9] M. Kanabar, V. Muthukrishnan, D. Patel, P. Parikh and M. Pilon, "Integrated asset monitoring, personnel safety, and reliability with next generation protection relays for distribution networks," in *CIRED - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1242-1245, 10 2017.

[10] M. N. Alam, "Adaptive Protection Coordination Scheme Using Numerical Directional Overcurrent Relays," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 64-73, Jan. 2019.

[11] T. S. Aghdam, H. Kazemi Karegar and H. H. Zeineldin, "Variable Tripping Time Differential Protection for Microgrids Considering DG Stability," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2407-2415, May 2019.

[12] H. Zhan *et al*., "Relay Protection Coordination Integrated Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Sources in Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 55-65, Jan. 2016.

[13] E. Dehghanpour, H. Kazemi Karegar, R. Kheirollahi and T. Soleymani, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Microgrids by Using Cuckoo-Linear Optimization Algorithm and Fault Current Limiter," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1365-1375, March 2018.

[14] N. El-Naily, S. M. Saad, T. Hussein and F. A. Mohamed, "A novel constraint and non-standard characteristics for optimal over-current relays coordination to enhance microgrid protection scheme," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 6, pp. 780-793, 26 3 2019.

[15] V. C. Nikolaidis, E. Papanikolaou and A. S. Safigianni, "A Communication-Assisted Overcurrent Protection Scheme for Radial Distribution Systems With Distributed Generation," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 114-123, Jan. 2016.

[16] S. F. Zarei and M. Parniani, "A Comprehensive Digital Protection Scheme for Low-Voltage Microgrids with Inverter-Based and Conventional Distributed Generations," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 441-452, Feb. 2017.

[17] J. Mateus, A. Leiria, M. Ferreira, P. Carvalho, M. Louro and B. Almeida, "Need for zero sequence voltage protection in MV networks with high levels of distributed generation," in *CIRED - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1313-1316, 10 2017.

[18] A. Esmaeili Dahej, S. Esmaeili and H. Hojabri, "Co-Optimization of Protection Coordination and Power Quality in Microgrids Using Unidirectional Fault Current Limiters," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5080-5091, Sept. 2018.

[19] Y. Kim, H. Jo and S. Joo, "Analysis of Impacts of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) Placement on Distributed Generation (DG) Expansion," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, June 2016, Art no. 5602305.

[20] J. Kim, J. Kim and S. Lim, "Study on Protection Coordination of a Flux-Lock-Type Superconducting Fault Current Limiter Using Switches," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, June 2016, Art no. 5602104.

[21] S. Kong, H. Jo, Y. Wi and S. Joo, "Optimization-Based Reconfiguration Method for Power System Incorporating Superconducting Fault Current Limiter Failure," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, June 2016, Art no. 5602204.

[22] D. Xia, Q. Qiu, Z. Zhang, S. Liu and Z. Xia, "Magnetic Field and Characteristic Analysis of the Superconducting Fault Current Limiter for DC Applications," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 3, pp. 1-5, April 2018, Art no. 5601405.

[23] H. Lei, J. Geng and B. K. Johnson, "Influence of Superconducting Fault Current Limiters on Traveling Wave Based Protection," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2019, Art no. 5602305.

[24] W. Hu and G. G. Yen, "Adaptive Multiobjective Particle Swarm Optimization Based on Parallel Cell Coordinate System," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 19, no. 1, pp. 1-18, Feb. 2015.

[25] B. Cao *et al*., "Distributed Parallel Particle Swarm Optimization for Multi-Objective and Many-Objective Large-Scale Optimization," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 8214-8221, 2017.