Archive of SID

یک روش تطبیقی جدید برای حفاظت از شبکه توزیع با ضریب نفوذ بالای تولیدات پراکنده

هادی بیشه[۱]، کارشناسی‌ارشد؛ بهادر فانی[۲]، دانشیار؛ غضنفر شاهقلیان[۳]، دانشیار

۱- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند - واحد نجف‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی- نجف‌آباد- ایران- h.bisheh88@yahoo.com
۲- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی- نجف‌آباد- ایران- b.fani@pel.iaun.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی- نجف‌آباد- ایران- shahgholian@iaun.ac.ir

چکیده: رشد سریع منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع منجربه ایجاد چالش‌های جدیدی در هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان شده‌است. تاکنون، روش‌های تطبیقی مختلفی به‌منظور حل مشکل ناهماهنگی منابع تولید پراکنده ارائه شده‌است، اما با این وجود، ضریب نفوذ غیرقابل پیش‌بینی منابع DG نصب‌شده، اهمیت یک روش مستقل از ضریب نفوذ را برجسته می‌کند. این مطالعه یک راه‌کار آفلاین، سریع، عملیاتی و ارزان‌قیمت را ارائه می‌دهد که هماهنگی حفاظتی را در هر ضریب نفوذ و مکان منابع DG تضمین می‌کند. به این منظور، در ابتدا، در ضریب نفوذها و مکان‌های مختلف منابع DG، عمل‌کرد سیستم حفاظتی سنتی موردمطالعه قرار می‌گیرد که بدترین حالات ناهماهنگی مشخص شود. سپس، باتوجه‌به استانداردهای رله‌ها، منحنی مشخصه حفاظت پشتیبان به‌نحوی اصلاح می‌گردد که بتواند هماهنگی را در بدترین حالات حفظ کند. راه‌کار پیشنهادی برروی یک شبکه توزیع که به تعداد زیادی DG مجهز است، اعمال شده‌است. نتایج با موفقیت کارایی روش پیشنهادی را اثبات می‌کند. این حقیقت این روش را یک گزینه جذاب برای شبکه‌های توزیع همراه با منابع DG می‌کند.

واژه‌های کلیدی: حفاظت شبکه توزیع، ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده، هماهنگی رله‌های اضافه جریان.

A New Adaptive Method for Protection of Distribution System with High Penetration of Distributed Generations

H. Bisheh[1], Msc; B. Fani[2], Assistant Professor; G. Shahgholian[3], Associated Professor

1- Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, Email: h.bisheh88@yahoo.com
2- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, Email: b.fani@pel.iaun.ac.ir
3- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, Email: shahgholian@iaun.ac.ir

Abstract: The rapid growth of distributed generations (DG) in distribution grids brings new challenges in the protection coordination of overcurrent relays. So far, various adaptive techniques have been addressed to solve DG units' mis-coordination problem, however, the un-predictable penetration of installed DG units highlights the importance of a penetration-free methodology. This study presents a novel offline, quick, applicable and cheap solution which guarantees protection coordination for any penetration and location of DG units. To do so, first, under different DG penetration levels and locations, the conventional protection performance is studied to discover the worst mis-coordination cases. Next, according to relays standards, the characteristic curve of the back-up relay is modified such that it can maintain coordination in all worst cases. The proposed methodology is applied to a power distribution network equipped with numerous DG units. The results successfully prove the effectiveness of the proposed method. This fact makes this method an attractive option for distribution systems with DG units.

Keywords: Distribution network, photovoltaic system, coordination of the overcurrent relays, penetration of DG.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۷
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۰۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲
نام نویسنده مسئول: غضنفر شاهقلیان
نشانی نویسنده مسئول: ایران – نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف آباد- دانشگاه آزاد اسلامی

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر حضور منابع تولید پراکنده[1] (DG) در شبکه‌های توزیع به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته‌است. این منابع علاوه‌بر تأمین دیماند مصرف‌کنندگان، موجب بهبود پروفایل ولتاژ شبکه، افزایش قابلیت اعتماد، کاهش تلفات و همچنین آزادسازی ظرفیت شبکه‌های فوق توزیع می‌شوند [۴-۱]. هرچند در کشورهای مختلف تلاش‌هایی به‌منظور مدیریت نصب این منابع از لحاظ مقدار توان نامی، ضریب توان و محل نصب آنها شده‌است، اما با پیشرفت تکنولوژی و کاهش هزینه نصب منابع تولید پراکنده، مصرف‌کنندگان کوچک خانگی و تجاری نیز قادر به نصب این منابع شده‌اند.

همان گونه که در بالا به آن اشاره شد، حضور منابع تولید پراکنده در حالت بهره‌برداری عادی شبکه مزایای فراوانی برای مصرف‌کننده‌ها و همچنین شبکه به‌همراه دارد. زمانی‌که منابع DG به‌صورت توزیع‌شده برروی فیدر نصب می‌شود پروفایل جریان شبکه تغییر می‌کند. با وجود مزایای منابع تولید پراکنده، مشکلات مربوط به حضور آن‌ها در سطح شبکه‌های توزیع با توجه به روند روبه‌رشد استفاده از آن‌ها، امری غیرقابل‌چشم‌پوشی است.

از مهم‌ترین مشکلاتی که منابع تولید پراکنده ممکن است در شبکه به وجود آورند می‌توان به ایجاد شرایط جزیره‌ای و مشکلات کنترل ولتاژ و فرکانس، تغییر آرایش شبکه توزیع از حالت شعاعی به حلقوی، بازبست غیرسنکرون و همچنین ناهماهنگی حفاظتی، اشاره نمود. حضور این منابع باعث افزایش سطح اتصال کوتاه در شبکه و یا حتی تغییر جهت جریان اتصالی‌شده که در شرایط خطا اثر نامطلوبی برروی عمل‌کرد تجهیزات حفاظت اضافه‌جریان خواهندداشت. از مهم‌ترین مشکلاتی که ممکن است منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع به‌وجود آورند، اختلال در عمل‌کرد سیستم‌های حفاظتی شبکه می‌باشد [۷،۶].

به‌طور معمول اکثر منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع شامل منابع با مبتنی‌بر اینورتر و همچنین منابع مبتنی‌بر ژنراتورهای سنکرون می‌باشند. منابع تولید پراکنده مبتنی‌بر اینورتر نظیر سیستم‌های فتوولتاییک در شرایط خطا جریانی در حدود دو تا سه برابر جریان نامی به شبکه تزریق می‌کنند [۷]. اما این جریان برای منابع DG مبتنی‌بر ژنراتورهای سنکرون می‌تواند به پنج تا ده برابر جریان نامی خود برسد. بنابراین می‌توان گفت به‌ازای یک ظرفیت نصب‌شده مشخص از منابع تولید پراکنده، تأثیر جریان تزریقی یک ژنراتور سنکرون نسبت به یک منبع اینورتری در شرایط خطا بیش‌تر است. متناسب با ضریب نفوذ[2] (PL)، مکان نصب و تکنولوژی ساخت منابع تولید پراکنده، این منابع در شرایط خطا اثرات قابل‌توجهی بر هماهنگی تجهیزات حفاظتی خواهندداشت.

روش‌های متداول تحلیل اتصال‌کوتاه برای بررسی تغییرات جریان خطا در فیدرهای با نفوذ بالای منابع تولید پراکنده و ارزیابی اثر آن‌ها روی تجهیزات حفاظتی نا کارآمد هستند. ازاین‌رو به‌منظور کاهش تأثیر حضور منابع DG برروی سیستم حفاظت متداول شبکه توزیع، در مقالات متعددی روش‌هایی پیشنهاد شده‌است که می‌توان آن‌ها را در چند دسته طبقه‌بندی نمود.

تعیین ظرفیت تولیدی منابع تولید پراکنده و اصلاح مدار کنترلی آنها براساس میزان مجاز تغییرات جریان خطا ازجمله راه‌کارهای ارائه‌شده در تعدادی از این مقاله‌ها است. ازآنجایی‌که در عمل ظرفیت تولیدی منابع تولید پراکنده به عوامل زیادی وابسته است، علی‌رغم این‌که اصلاح مدار کنترلی تا حدودی منجربه اصلاح سیستم حفاظتی می‌گردد منجربه پیچیده‌شدن مسأله طراحی و کنترل شبکه خواهدشد [۷-۱۱ ، ۱۲].

در [۱۳ ، ۱۴] ازدست‌رفتن و یا برقراری هماهنگی در سیستم حفاظتی باتوجه‌به مکان‌های مختلف نصب منابع تولید پراکنده موردبررسی قرار گرفته، با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی یک مکان بهینه برای نصب منابع DG تعیین شده‌است. روش‌های بهینه‌سازی همچنین برروی تنظیمات حفاظتی شبکه اجرا می‌شود که در آن‌ها بهترین شرایط عمل‌کرد سیستم حفاظتی شبکه مشخص می‌گردد [۱۵-۱۹]. این روش‌ها دارای هزینه کمی بوده و در آن سیستم حفاظتی بدون تغییر باقی می‌ماند و نیازی به ادوات اضافه وجود ندارد [۲۰ ، ۲۱]. از معایب این راه‌کار محدودنمودن مکان و ظرفیت نصب منابع تولیدی و حجم محاسبات بسیارزیاد بوده، همچنین با تغییر توپولوژی شبکه ممکن است تمامی محاسبات بی‌اعتبار گردند.

استفاده از شبکه مخابراتی گسترده به‌عنوان یک راه‌کار دیگر مطرح شده‌است [۲۲ ، ۲۳]. در سیستم‌های چندعاملی با بهره‌گیری از شبکه ارتباطی بین تجهیزات شبکه، فرامین حفاظتی لازم به سیستم ارسال می‌گردد [۲۴-۲۸] و به‌صورت به‌هنگام حفاظت شبکه را کنترل می‌نماید. اما علاوه‌بر هزینه بالای اجرای شبکه ارتباطی، با وقوع مشکل در سیستم مخابراتی، این روش می‌تواند ناکارآمد گردد.

جداشدن سریع منابع تولید پراکنده از شبکه به‌منظور عدم تغییر پروفایل جریان خطا نیز به‌عنوان یک راه‌کار ارائه شده‌است. برای این منظور در [۲۹-۳۳] از کلیدهای تریستوری استفاده شده‌است. اما در این شرایط استفاده از منحنی سریع رله‌ها و همچنین فیوزهای تندکار امکان‌پذیر نخواهدبود. به‌علاوه با خروج مداوم منابع تولید پراکنده امکان استفاده از همه ظرفیت نامی منابع از دست می‌رود و همچنین ممکن است شاخص‌های کیفیت توان از محدوده مجاز خارج شوند.

اصلاح ساختار سیستم حفاظتی شبکه دسته دیگری از مقاله‌ها را دربرمی‌گیرد [۳۴]. به‌کارگیری رله‌های جدید برنامه‌پذیر، جای‌گزینی رله‌های دیستانس و همچنین رله‌های جهتی به‌جای رله‌های سنتی، به‌عنوان دیگر روش‌های کارآمد در اصلاح سیستم حفاظتی ارائه شده‌اند [۳۵-۴۸]. اما این جای‌گزینی‌ها افزایش هزینه بالای طراحی سیستم حفاظتی را به‌همراه دارد. همچنین ازآنجاکه رله‌های دیستانس معمولاً در خطوط کوتاه دچار خطای عمل‌کرد می‌باشند، به‌کارگیری آن‌ها در فیدرهای توزیع که دارای طول خطوط کوتاه‌تری نسبت به شبکه‌های فوق توزیع و انتقال است، نامناسب خواهدبود. همچنین در روش‌های

www.SID.ir

Archive of SID

محاسباتی که عموماً نیازمند برقراری لینک مخابراتی به‌منظور بهینه‌سازی هماهنگی حفاظتی هستند، دارای قابلیت اطمینان کمتری به‌دلیل وابستگی به بستر مخابراتی می‌باشند.

به‌کارگیری محدودکننده‌های جریان به‌منظور کاهش تأثیر منابع تولید پراکنده برروی جریان خطا به‌عنوان یک راه‌کار دیگر در ایجاد شرایط هماهنگی حفاظتی مطرح می‌باشد [۴۹ ، ۵۰] . اما استفاده از محدودکننده‌ها در شبکه‌های توزیع به‌دلیل تلفات کلیدزنی در حالت کار دائم شبکه و همچنین هزینه‌های زیاد طراحی و نصب، محبوبیت به‌کارگیری از این روش‌ها را کاهش می‌دهد.

همان گونه که در بخش قبل اشاره شد، تمامی روش‌های ارائه شده دارای نقاط ضعف می‌باشند. متحمل نمودن هزینه‌های اضافی به شبکه، مناسب بودن روش‌ها برای یک سطح نفوذ مشخص از منابع DG و همچنین محدود کردن مکان نصب آنها به نقاط خاصی که در آنجا بهترین عملکرد در سیستم حفاظتی میسر می‌شود، از جمله این موارد می‌باشد.

در این مقاله با تکیه بر ساختار شعاعی شبکه توزیع و طراحی سنتی سیستم حفاظتی آن، رفتار سیستم در شرایط مختلف مکان نصب و ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده موردبررسی قرار می‌گیرد. با درنظرگرفتن تأثیر حضور منابع DG متناسب با ضریب نفوذ و محل قرارگیری آن‌ها در شبکه، می‌توان شرایط و نقاطی از شبکه را مشخص نمود که در آن‌ها منابع بیشترین تأثیر را برروی سیستم حفاظتی دارند و می‌توانند موجب اختلال در عمل‌کرد آن بشوند. ازاین‌رو سعی شده که با پوشش‌دادن راه‌کارهای قبلی، روشی پیشنهاد گردد که بدون وابستگی به نوع منبع DG نصب‌شده در شبکه، بتواند در هر شرایطی از حضور منابع تولید پراکنده هماهنگی سیستم حفاظتی را حفظ نماید. درشرایطی که ضریب نفوذ این منابع افزایش می‌یابد، هیچ اختلالی در سیستم حفاظتی به‌وجود نیاید. در جدول (۱) مزایای راه‌کار پیشنهادی در مقایسه با روش‌هایی که پیش از آن ارائه شده‌است، قرار داده شده‌است.

جنبه‌های نوآوری این مقاله در مقایسه با سایر مقاله‌ها به شرح زیر است:

- مستقل‌بودن از مکان نصب، ضریب نفوذ و نوع منابع تولید پراکنده نصب‌شده در شبکه
- کنترل محلی و عدم نیاز به برقراری لینک مخابراتی میان تجهیزات شبکه و افزایش قابلیت اطمینان و همچنین کاهش هزینه
- اصلاح هماهنگی به‌صورت آفلاین
- بدون نیاز به سرمایه گذاری به‌منظور نصب و جای‌گزینی تجهیزات و همچنین طراحی کنترلرهای جدید
- قابلیت اجرای روش پیشنهادی برروی رله‌های قدیمی و همچنین جدید برنامه‌پذیر و استفاده از منحنی‌های استاندارد
- عمل‌کرد صحیح حتی با تغییر آرایش و توپولوژی شبکه

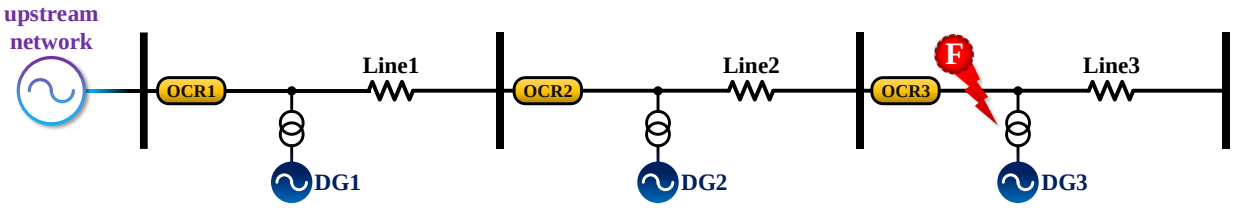
در بخش دوم تأثیر حضور منابع تولید پراکنده برروی سیستم حفاظتی شبکه توزیع بررسی می‌شود. در بخش سوم روش پیشنهادی در این مقاله ارائه‌شده که نتایج شبیه‌سازی آن در بخش چهارم قابل مشاهده است. درنهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه خواهدشد.

جدول ۱: مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های قبلی

مرجع	وابستگی به منبع تولید پراکنده			نوع استراتژی			نیازمندی به لینک مخابراتی	کارایی در سیستم‌های سنتی	لزوم جای‌گزینی تجهیزات جدید	قابلیت اطمینان بالا	هزینه پایین
	ظرفیت	مکان	نوع	تطبیقی	آنلاین	آفلاین					
روش پیشنهادی	×	×	×	✓	×	✓	×	✓	×	✓	✓
بهینه‌سازی مکان نصب منبع تولید پراکنده [۲۱،۱۴]	✓	✓	×	✓	✓	×	✓	×	×	✓	×
محدودنمودن ضریب نفوذ منابع [۹-۱۱]	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	×
طرح حفاظتی مبتنی بر ساختار مخابراتی [۲۳-۲۶]	×	×	×	✓	✓	×	✓	×	✓	×	×
خروج سریع منابع DG در شرایط وقوع خطا [۳۰-۳۲]	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	×	×
اصلاح ساختار سیستم حفاظتی [۴۴،۴۲،۴۱،۳۸،۳۶]	✓	✓	×	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	×
نصب محدودکننده جریان خطا در شبکه [۵۰،۴۹]	×	×	×	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	×

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: شبکه توزیع شعاعی نمونه در شرایط حضور منابع تولید پراکنده

۲- سیستم حفاظتی شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده

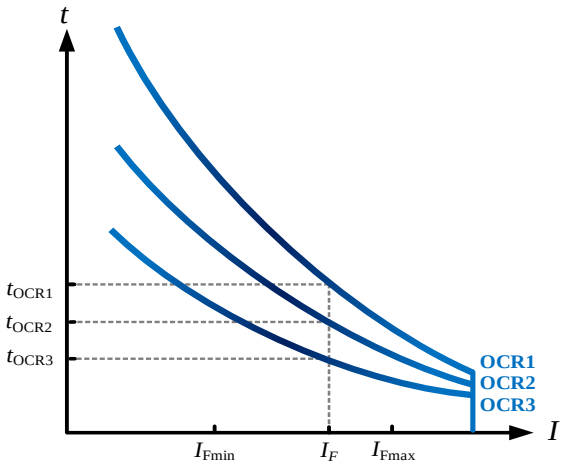
حضور منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی می‌تواند برعملکرد سیستم حفاظتی این شبکه‌ها اثر گذارد. باتوجه‌به این‌که تنظیمات رله‌های حفاظتی فیدرهای توزیع متناسب با جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در شرایط خطا صورت می‌گیرد، تغییر در جریان خطای عبوری از این تجهیزات حفاظتی می‌تواند منجر به اختلال در عمل‌کرد آن‌ها شده و یا حتی در شرایطی می‌تواند عمل‌کرد رله‌ها را بهبود بخشد. در فیدرهای توزیع شعاعی جریان از سمت شبکه قدرت بالادست به سمت مصرف‌کنندگان در پایین‌دست فیدر جاری می‌گردد. با حضور منابع DG متناسب با مکان نصب و ظرفیت تولیدی آن‌ها، اندازه جریان تزریقی از شبکه بالادست کاهش می‌یابد.

جریان عبوری از رله‌های حفاظتی شبکه بسته به محل نصب منابع DG در طول فیدر توزیع، می‌تواند مقادیر کاملاً متفاوتی داشته‌باشد. متناسب با امپدانس بین شبکه بالادست تا محل وقوع خطا، جریان خطای عبوری محدود می‌گردد. اما با اتصال سیستم‌های DG برروی فیدر، جریان خطا علاوه‌بر شبکه بالادست توسط منابع DG هم تقویت می‌گردد. بنابراین متناسب با حضور منابع DG در طول فیدر، جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در پایین‌دست شبکه می‌تواند بیش‌تر از جریان عبوری از حفاظت بالادست خود باشد. در این شرایط عمل‌کرد سیستم حفاظتی تحت تأثیر حضور منابع DG قرار گرفته‌است.

بدترین شرایط حضور این منابع زمانی‌است که مابین دو تجهیز حفاظتی بالادست و پایین‌دست به‌عنوان حفاظت‌های اصلی و پشتیبان قرار گرفته‌باشند. در این شرایط ممکن است هماهنگی حفاظتی از دست برود. پرواضح است اگر سیستم‌های DG در پایین‌دست حفاظت اصلی و یا در بالادست حفاظت پشتیبان واقع شوند، به یک اندازه برروی هر دو تجهیز حفاظتی اصلی و پشتیبان اثر می‌گذارند. منابع DG که در پایین‌دست رله اصلی قرار می‌گیرند موجب عمل‌کرد نامطلوب سیستم حفاظتی نمی‌شوند. این در حالی است که منابع نصب‌شده در بالادست حفاظت پشتیبان رفتاری کاملاً متفاوت از شرایط مذکور دارند. هرچند این منابع جریان‌های عبوری از هر دو تجهیز حفاظتی را به یک اندازه تغییر می‌دهند، اما تحت شرایطی می‌توانند موجب ازبین‌رفتن هماهنگی شوند.

در شکل (۱) یک شبکه توزیع نمونه و با آرایش شعاعی نشان داده شده‌است. مطابق این شکل سیستم حفاظتی شبکه از سه رله اضافه جریان OCR1، OCR2 و OCR3 که هر کدام به‌عنوان حفاظت اصلی خطوط Line1، Line2 و Line3 به حساب می‌آیند، تشکیل شده‌است. هر رله در زون اصلی، وظیفه حفاظت از فیدر مربوط به خود را دارد. همچنین به‌عنوان پشتیبان رله پایین‌دست خود نیز محسوب شده و در صورت عمل‌کرد نادرست رله پایین‌دست، عمل خواهدنمود.

رله‌ها از نوع زمان معکوس بوده، منحنی مشخصه زمان - جریان آنها مطابق شکل (۲) است. ملاحظه می‌گردد در شرایط عدم اتصال منابع DG به شبکه، بین زمان عمل‌کرد هر دو رله یک حاشیه زمانی مجاز (Coordination Time Interval) (CTI) به‌منظور عمل‌کرد هماهنگ در شرایط وقوع خطا در نظر گرفته شده‌است. درواقع عمل‌کرد هر جفت رله به‌عنوان حفاظت‌های اصلی و پشتیبان با هم هماهنگ می‌باشد. خطای درنظرگرفته‌شده برای شبکه شکل (۱) در فاصله نزدیک رله OCR3 می باشد. بنابراین به‌ازای جریان اتصال کوتاه I_F رله OCR3 به‌عنوان حفاظت اصلی و رله OCR2 به‌عنوان حفاظت پشتیبان آن در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲: منحنی مشخصه حفاظتی رله‌های اضافه جریان شبکه نمونه

براساس حداقل و حداکثر جریان خطای عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان، زمان عمل‌کرد رله‌ها به‌منظور برقراری هماهنگی حفاظتی تعیین می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر براساس طراحی اولیه سیستم حفاظت، در بازه جریانی $[I_{F\min}, I_{F\max}]$ رله‌های OCR2 و OCR3 عمل‌کرد صحیح داشته و هماهنگی بین زمان‌های عمل‌کرد دو رله به‌طور کامل برقرار می باشد. برای مطالعه دقیق‌تر برروی مسأله حضور منابع تولید پراکنده در شبکه، براساس مکان نصب و ضریب نفوذهای مختلف این منابع عمل‌کرد سیستم حفاظتی شبکه ارزیابی می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۱- مکان نصب منابع تولید پراکنده در شبکه

زمانی‌که منبع تولید پراکنده در شبکه نمونه شکل (۱) قرار گیرد، بسته به مکان نصب آن برروی فیدر، رفتار سیستم حفاظتی شبکه متفاوت خواهد بود، که در چهار حالت مختلف بررسی می‌گردد.

- در ابتدا فرض می‌شود که فقط منبع DG3 در شبکه قرار دارد. در شرایط وقوع خطا در شبکه به‌دلیل قرارگیری این منبع پس از محل وقوع خطا، جریان عبوری از رله‌های حفاظتی تغییر نکرده و عمل‌کرد صحیحی خواهندداشت.
- زمانی‌که فقط منبع DG2 در شبکه نصب شده‌باشد، بخشی از جریان خطا توسط این منبع تأمین می‌گردد. درنتیجه جریان عبوری از OCR3 افزایش و جریان رله OCR2 و OCR1 که در بالادست این منبع قرار دارند کاهش می‌یابد. در این شرایط زمان عمل‌کرد حفاظت اصلی کاهش و زمان حفاظت پشتیبان افزایش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر حاشیه هماهنگی بین دو رله بزرگتر شده‌است.

در شکل (۱) اگر شبکه بدون منابع DG در نظر گرفته‌شود، جریان خطا برابر $I_F = V_{th}/Z_{th}$ می‌باشد که در آن V_{th} ولتاژ شبکه و Z_{th} امپدانس شبکه تا محل وقوع خطا است. به‌ازای قرارگیری منبع DG2، جریان‌های عبوری از رله‌های حفاظتی مطابق زیر خواهدبود.

$$I_{OCR1} = I_{OCR2} = \frac{1}{Z_{th}}\left[V_{th} - Z_{DG2} I_{DG2}\right] \quad (۱)$$

$$I_{OCR3} = \frac{1}{Z_{th}}\left[V_{th} + Z'_{DG2} I_{DG2}\right] \quad (۲)$$

که در این روابط I_{DG2} جریان منبع تولید پراکنده، Z_{DG2} امپدانس مابین این منبع تا محل وقوع خطا و Z'_{DG2} امپدانس بین شبکه تا منبع تولید پراکنده می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، جریان‌های I_{OCR2} و I_{OCR1} کاهش و جریان I_{OCR3} افزایش می‌یابد. به‌علاوه تغییرات حاصل‌شده برروی جریان عبوری از فیدرهای شبکه تابعی از مکان نصب و جریان منابع تولید پراکنده می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر با نزدیک‌شدن منبع DG به محل وقوع خطا و یا با بیشترشدن توان تولیدی منبع تولید پراکنده، ، جریان I_{OCR3} افزایش بیش‌تر و جریان‌های I_{OCR2} و I_{OCR1} کاهش کم‌تری خواهندداشت. بنابراین زمان‌های عمل‌کرد رله‌ها متناسب با ظرفیت تولیدی منابع DG و همچنین مکان قرارگیری آن‌ها تغییر می نماید.

در شرایطی که فقط DG1 برروی فیدر قرار گیرد، جریان عبوری از هر دو رله OCR3 و OCR2 افزایش و جریان OCR1 کاهش می‌یابد. درنتیجه هر دو رله اصلی و پشتیبان سریع‌تر عمل می‌نماید و حاشیه هماهنگی بین آن‌ها کاهش می‌یابد.

اگر در شبکه شکل (۱)، براساس فرض III منبع DG1 برروی فیدر قرار گرفته‌باشد، رابطه جریانی جدیدی بین رله‌ها برقرار بوده که مطابق زیر محاسبه می‌گردد.

$$I_{OCR1} = \frac{1}{Z_{th}}\left[V_{th} - Z_{DG1} I_{DG1}\right] \quad (۳)$$

$$I_{OCR2} = I_{OCR3} = \frac{1}{Z_{th}}\left[V_{th} + Z'_{DG1} I_{DG1}\right] \quad (۴)$$

مشاهده می‌گردد با حضور منبع DG1 در شبکه، جریان I_{OCR1} کاهش و جریان‌های I_{OCR2} و I_{OCR3} افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در بالا به آن اشاره شد، تغییرات جریان تابعی از مکان نصب و جریان منبع تولید پراکنده می‌باشد. با دورشدن منبع DG از شبکه بالادست و یا با بیش‌ترشدن توان تولیدی این منبع، جریان‌های I_{OCR2} و I_{OCR3} افزایش بیش‌تر و جریان I_{OCR1} کاهش کم‌تری خواهندداشت. بنابراین براساس روابط (۳) و (۴) زمان‌های عمل‌کرد رله‌ها تحت‌تأثیر ظرفیت تولیدی منابع DG و همچنین مکان قرارگیری آن‌ها بر روی فیدر قرار گرفته‌است.

- درنهایت ممکن است منابع DG2 و DG1 هم‌زمان در شبکه حضور داشته‌باشند. در این شرایط جریان رله OCR3 افزایش بیش‌تری دارد که متناسب با آن زمان عمل‌کرد سریع‌تری خواهدداشت. اما حضور هم‌زمان این دو منبع تأثیر یک‌دیگر را برروی رله OCR2 خنثی کرده و تقریباً زمان عمل‌کرد این رله ثابت است. همچنین رله OCR1 با جریان عبوری کمتر، تأخیر بیشتری در قطع خواهدداشت.

اگر فرض شود منبع DG1 در بالادست رله پشتیبان و منبع DG2 در مابین رله‌های اصلی و پشتیبان قرار داشته‌باشد، جریان عبوری از رله پشتیبان مطابق رابطه (۵) خواهدبود:

$$I_{OCR2} = \frac{1}{Z_{th}}\left[V_{th} + Z'_{DG1} I_{DG1} - Z_{DG2} I_{DG2}\right] \quad (۵)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد بسته به مکان قرارگیری منابع، جریان عبوری از رله پشتیبان از مقدار اولیه خود (I_F) بیش‌تر شده و یا کاهش می‌یابد. با فرض یکسان‌بودن منابع DG1 و DG2 ($I_{DG1} = I_{DG2} = I_{DG}$) رابطه فوق به‌صورت زیر خواهدبود:

$$I_{OCR2} = \frac{1}{Z_{th}}\left[V_{th} + (Z'_{DG1} - Z_{DG2}) I_{DG}\right] \quad (۶)$$

براساس این رابطه، تأثیر منابع DG برروی جریان عبوری از رله پشتیبان در مقایسه با شرایطی که منابع فقط در یک طرف رله OCR2 قرار داشته‌باشند، بسیار کم‌تر خواهدبود. به‌علاوه اگر فاصله قرارگیری منابع DG از دو سمت رله به یک اندازه باشد ($Z'_{DG1} \approx Z_{DG2}$)، تأثیر جریان I_{DG} برابر صفر می‌گردد. بنابراین جریان عبوری از رله پشتیبان برابر جریان تزریق‌شده از سمت شبکه بالادست بوده ($I_{OCR2} \approx I_F$)، که مشابه شرایط عدم حضور منابع DG در شبکه می‌باشد.

۲-۲- ظرفیت نصب‌شده (ضریب نفوذ) منابع تولید پراکنده

هنگامی‌که سیستم‌های DG مطابق با مدار شکل (۱) در مابین دو تجهیز حفاظتی به شبکه متصل شوند، در شرایط وقوع خطا در نقطه F جریان عبوری از رله OCR2 کاهش و جریان رله اصلی OCR3 افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب نفوذ این منابع در شبکه، جریان خطای تزریقی توسط منابع DG افزایش می‌یابد و درنتیجه کاهش بیشتری در جریان عبوری از رله OCR2 را به دنبال خواهدداشت. ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده در یک فیدر توسط نسبت مجموع حداکثر توان تولیدی منابع تولید

www.SID.ir

Archive of SID

پراکنده موجود در فیدر به مجموع توان نامی بارهای فیدر تعریف می‌شود [۵۱، ۵۲].

$$PL(\%)=\frac{\sum P_{DG}}{\sum P_{Load}}\times 100 \qquad (۷)$$

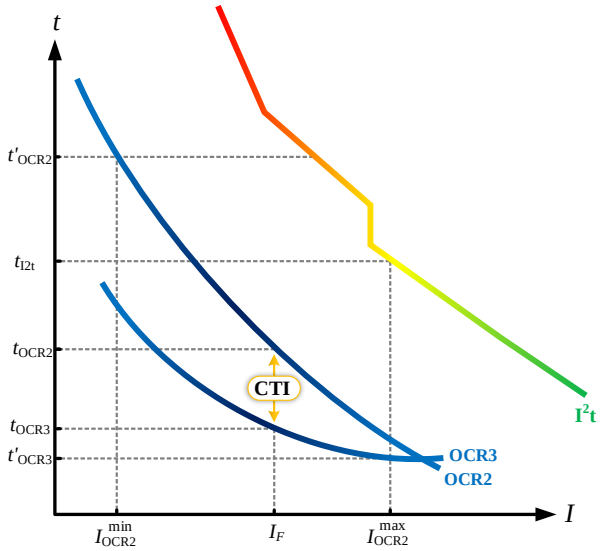
درصورتی‌که این کاهش جریان در بازه هماهنگی $[I_{F\min}, I_{F\max}]$ واقع شود، اتصال منابع DG با ایجاد یک حاشیه امن برای زمان عمل‌کرد رله پشتیبان، به بهبود هماهنگی حفاظتی منجر می‌شود. اما به‌ازای یک سطح نفوذ مشخص از منابع DG در شبکه، ممکن است جریان عبوری از رله پشتیبان OCR2 از حد مجاز $I_{F\min}$ کمتر گردد. به‌ازای جریان‌های کم‌تر از $I_{F\min}$ زمان عمل‌کرد رله OCR2 به اندازه‌ای افزایش می‌یابد که از حد تحمل حرارتی هادی‌های شبکه بیش‌تر شود.

در شرایط وقوع خطا اندازه جریان اتصال‌کوتاه عبوری از تجهیزات شبکه بسیار بزرگ‌تر از جریان نامی آن‌ها بوده و هادی‌هایی که در مسیر عبور این جریان هستند باتوجه به تلفات ناشی از عبور جریان از سطح مقطع آن‌ها، به‌شدت گرم می‌شوند. افزایش حرارت هادی‌ها در این شرایط به‌اندازه‌ای خواهدبود که موجب آسیب‌رسیدن به تجهیزات شبکه می‌شود. براساس استاندارد IEC 60909 یک حد تحمل حرارتی به‌منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی تجهیزات برای هادی‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود [۵۳].

طبق این استاندارد حداکثر زمان قطع جریان اتصالی در شبکه باید کم‌تر ازحد تحمل حرارتی واقع گردد. به این منظور مطابق شکل (۳) منحنی مشخصه‌های سیستم حفاظتی باید با رعایت یک فاصله مناسب در پایین منحنی حرارتی هادی شبکه قرار بگیرد. بنابراین می‌توان گفت در اثر حضور منابع DG با ضریب نفوذ بالا، در شرایطی که جریان عبوری از رله پشتیبان OCR2 از $I_{F\min}$ کمتر گردد هماهنگی رله‌های حفاظتی در شبکه شکل (۱) از دست خواهدرفت و رله OCR2 به‌عنوان حفاظت پشتیبان عمل نکرده و احتمالاً در ناحیه اضافه بار خود تحریک خواهدشد.

با حضور منابع DG در بالادست رله‌های اصلی و پشتیبان، در شرایط خطا جریانی بزرگ‌تر از I_F از رله OCR2 و OCR3 عبور خواهدنمود. متناسب با ضریب نفوذ منابع DG در شبکه، جریان عبوری از رله‌های حفاظتی افزایش بیش‌تری داشته که به‌ازای چنین جریانی، زمان عمل‌کرد رله‌های اصلی و پشتیبان براساس منحنی مشخصه حفاظتی آن‌ها کاهش می‌یابد. اگر منحنی مشخصه‌های این دو رله به‌گونه‌ای تنظیم شده‌باشد که با افزایش جریان بیش از $I_{F\min}$ حاشیه زمانی بین آن‌ها کاهش یابد، می‌تواند در یک ضریب نفوذ مشخصی از منابع DG منجربه ناهماهنگی در سیستم حفاظتی گردد.

در شکل (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش جریان عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان و کاهش زمان عمل‌کرد آن‌ها در ضریب نفوذهای بالای منابع DG، حاشیه زمانی بین زمان‌های عمل‌کرد دو رله به‌اندازه‌ای کاهش می‌یابد که از محدوده هماهنگی خارج شده‌است.



شکل ۳: تأثیر منابع تولید پراکنده برروی منحنی رله‌های حفاظتی

زمان عمل‌کرد رله‌ها بر اساس استاندارد IEC60255 مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۵۴]:

$$t_{relay}=T.D.S\frac{A}{\left[\frac{I_{relay}}{I_{base}}\right]^{P}-1} \qquad (۸)$$

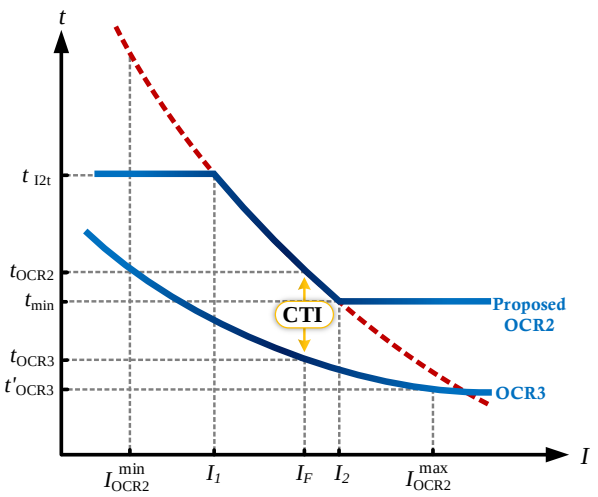
که در این رابطه t_{relay} زمان عمل‌کرد رله، T.D.S ضریب تنظیم زمانی و I_{relay} جریان حالت خطای عبوری از رله و I_{base} جریان تنظیم‌شده برروی آن می‌باشد. این جریان‌ها مقادیر اندازه‌گیری‌شده در سمت ثانویه ترانسفورماتور جریان مربوط به رله می‌باشند. نسبت جریان عبوری به جریان تنظیمی برروی رله را M در نظر می‌گیرند $M=I_{relay}/I_{base}$. همچنین A و P ضرایب ثابتی هستند که شیب منحنی مشخصه حفاظتی را مشخص می‌کند.

در شکل (۳) به‌ازای جریان خطای I_F، رله OCR3 در طی زمان t_{OCR3} و در صورت عملکرد ناموفق این رله پس از گذشت حاشیه زمانی CTI، رله OCR2 در زمان t_{OCR2} پیش از رسیدن زمان خطا به آستانه تحمل حرارتی هادی شبکه، خطا را برطرف می‌کند.

با افزایش ضریب نفوذ منابع DG مابین دو تجهیز حفاظتی در شبکه تا حد ۱۰۰ درصد، جریان خطای عبوری از رله پشتیبان تا مقدار $I_{OCR2}^{\min}$ کاهش می‌یابد که در این شرایط حد تحمل حرارتی هادی شبکه به‌ازای جریان $I_{OCR2}^{\max}$ زمان t_{I2t} می‌باشد. به‌بیان‌دیگر سیستم حفاظتی باید به‌ازای عبور جریان $I_{OCR2}^{\max}$ از شبکه، خطای مربوطه را در زمانی کمتر از t_{I2t} برطرف کند. اما رله OCR2 به سبب عبور جریان حداقلی $I_{OCR2}^{\min}$ از آن در زمان t'_{OCR2} عمل می‌کند که بیش‌تر ازحد تحمل حرارتی هادی شبکه می‌باشد. به‌طور معمول حداکثر زمان مجاز برای عمل‌کرد رله پشتیبان در شبکه‌های توزیع را برابر ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه در نظر می‌گیرند. به‌بیان‌دیگر منحنی مشخصه حفاظت‌های اصلی و پشتیبان باید همیشه در زیر منحنی حرارتی هادی‌های شبکه قرار گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴: مشخصه پیشنهادی رله حفاظتی OCR2

مطابق شکل (۳) با مشخص‌کردن ضریب نفوذ حداکثر به‌عنوان بدترین حالت حضور منابع DG و کاهش جریان I_{OCR2} متناسب با این ضریب نفوذ به مقدار I_{OCR2}^{min} ، لازم است زمان عملکرد OCR2، از t'_{OCR2} به محلی در زیر منحنی تحمل حرارتی هادی‌های شبکه یعنی t_{I2t} تغییر یابد. در شرایطی که منابع DG در بالادست رله پشتیبان قرار داشته‌باشند، با افزایش جریان رله‌های اصلی و پشتیبان زمان عمل‌کرد آن‌ها و همچنین حاشیه زمانی بین دو رله کاهش می‌یابد. اگر کاهش حاشیه زمانی بین عمل‌کردهای دو رله بیش‌ترازحد مجاز باشد (۲۵۰ میلی‌ثانیه)، در این شرایط نیز به‌منظور بازیابی هماهنگی لازم است نقطه کار رله پشتیبان به‌ازای جریان خطای I_{OCR2}^{max} اصلاح شود. برای این منظور لازم است به‌ازای جریان خطای I_{OCR2}^{max} زمان عمل‌کرد رله پشتیبان با رعایت فاصله مجاز از منحنی حرارتی آن‌قدر افزایش یابد تا حاشیه زمانی بین دو منحنی حفاظت‌های اصلی و پشتیبان برابر حد مجاز شود. بنابراین زمان عمل‌کرد رله پشتیبان را به‌ازای ضریب نفوذ بیشینه منابع تولید پراکنده در بالادست شبکه را به اندازه حاشیه زمانی اولیه بیش‌تر از زمان عمل‌کرد حفاظت اصلی در نظر گرفته‌می‌شود. مقدار t_{min} مطابق زیر محاسبه می‌گردد:

$$t_{min} = t'_{OCR3} + CTI_{min} \qquad (۹)$$

که در این رابطه CTI_{min} برابر حداقل حاشیه زمانی مجاز برای هماهنگی می‌باشد که باید مقداری بین CTI و زمان ۲۵۰ میلی‌ثانیه داشته‌باشد. با درنظرگرفتن زمان عمل‌کرد حفاظت پشتیبان به‌ازای بیشترین ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه در بالادست حفاظت پشتیبان برابر مقدار فوق، محدودیتی از دید سیستم حفاظتی در نصب منابع وجود نخواهدداشت.

۳- روش پیشنهادی

در شرایطی که منابع DG به سبب حضور در شبکه باعث برهم‌زدن هماهنگی حفاظتی شده‌اند، نیاز به یک راه‌کار مناسب برای بازیابی مجدد هماهنگی می‌باشد. باید در نظر داشت اصلاح هماهنگی در یک سطح خاص از حضور منابع، ممکن است برای ضریب نفوذهای دیگر این منابع موجب سوءعملکرد سیستم حفاظتی گردد. در این بخش با ارائه یک راه‌کار مناسب به‌نحوی هماهنگی بازیابی می‌گردد که در هر شرایطی از حضور منابع تولید پراکنده سیستم حفاظتی شبکه عمل‌کرد مناسبی داشته‌باشد. در روش پیشنهادی یک محدوده عمل‌کرد مجاز برای رله پشتیبان به‌صورت $[t_{min}, t_{I2t}]$ در نظر گرفته می‌شود. براین‌اساس اگر بتوان مطابق شکل (۴) زمان عمل‌کرد رله پشتیبان را در بازه هماهنگی مجاز باقی نگه داشت، می‌توان گفت همواره هماهنگی حفاظتی حفظ شده‌است. برای این منظور باید معادله مشخصه حفاظتی رله پشتیبان اصلاح گردد. زمان عمل‌کرد مطلوب رله پشتیبان برای عمل‌کرد مطابق شکل (۴) به قرار زیر است.

$$t_{OCR2} = \begin{cases} t_{I2t} & I_{OCR2} < I_1 \\ T.D.S \dfrac{A}{\left[I_{relay}/I_{base}\right]^P - 1} & I_1 < I_{OCR2} < I_2 \\ t_{min} & I_2 < I_{OCR2} \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در این رابطه جریان‌های I_1 و I_2 به‌ترتیب جریان عبوری از رله پشتیبان به‌ازای زمان‌های عمل‌کرد t_{I2t} و t_{min} می‌باشد که در شکل (۴) مشخص شده‌است. براین‌اساس مقادیر جریان‌های I_1 و I_2 از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$I_1 = I_{base}\left(1 + \frac{A \times T.D.S}{t_{I2t}}\right)^{1/P} \qquad (۱۱)$$

$$I_2 = I_{base}\left(1 + \frac{A \times T.D.S}{t_{min}}\right)^{1/P} \qquad (۱۲)$$

با مشخص‌شدن شاخص‌های جریانی I_1 و I_2 و براساس استراتژی پیشنهادی، می‌توان زمان عمل‌کرد رله پشتیبان را مطابق رابطه (۱۰) کنترل نمود. برای این منظور ضریب تنظیم زمانی این رله مطابق بازه جریانی ارائه‌شده در رابطه (۱۰) اصلاح می‌گردد. معادله مشخصه کنترلی این پارامتر به‌صورت زیر خواهدبود:

$$T.D.S^{new} = \begin{cases} \dfrac{t_{I2t}}{A}\left[\left(\dfrac{I_{OCR2}}{I_{base}}\right)^P - 1\right] & I_{OCR2} < I_1 \\ T.D.S^{old} & I_1 < I_{OCR2} < I_2 \\ \dfrac{t_{min}}{A}\left[\left(\dfrac{I_{OCR2}}{I_{base}}\right)^P - 1\right] & I_2 < I_{OCR2} \end{cases} \qquad (۱۳)$$

براساس رابطه (۱۳) به‌ازای بازه جریانی $[I_1, I_2]$ منحنی مشخصه رله OCR2 بدون تغییر و براساس تنظیمات اولیه باقی می‌ماند. به‌ازای جریان‌های خارج از این بازه، منحنی مشخصه رله پشتیبان اصلاح می‌شود. در معادله مشخصه بدست‌آمده برای T.D.S رله OCR2 تمامی پارامترها به‌صورت ثابت و با محاسبات قبلی مشخص می‌شوند. تنها پارامتر متغیر در رابطه (۱۳) جریان عبوری از خود رله می‌باشد که به‌راحتی در محل نصب آن رله در دسترس است. همان‌گونه‌که در این رابطه مشاهده می شود، روش پیشنهادی هیچ‌گونه وابستگی به منبع تولید پراکنده نصب‌شده در شبکه، از نظر مکان قرارگیری، ظرفیت نصب‌شده و همچنین پارامترهای داخلی و آن منبع ندارد. همان‌گونه‌که ملاحظه می

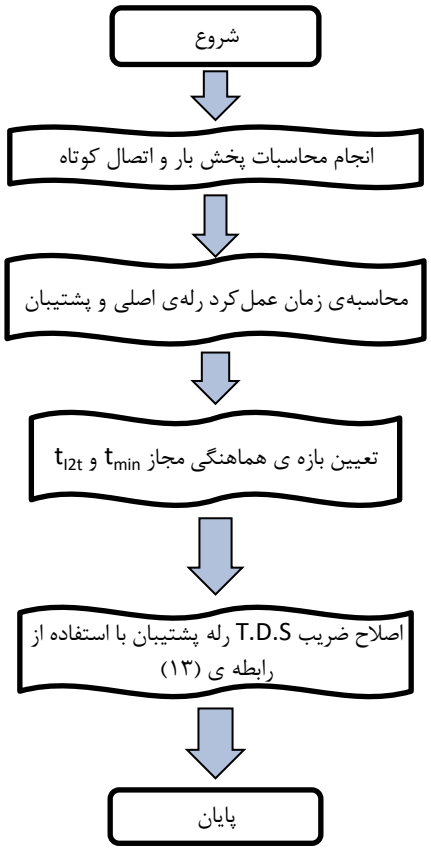
www.SID.ir

Archive of SID

شود از مزایای استراتژی پیشنهادی عدم‌نیاز به برقراری لینک ارتباطی میان تجهیزات حفاظتی شبکه و درنتیجه بالابودن قابلیت اطمینان روش ارائه‌شده در این مقاله است.

۳-۱- فلوچارت روش اجرایی به‌منظور بازیابی هماهنگی

روند اجرای کار مطابق فلوچارت ارائه‌شده در شکل (۵) است که با وقوع اتصالی در یکی از نقاط شبکه، به‌ازای ضریب نفوذ منابع برابر با صفر شروع می‌گردد. با انجام محاسبات اتصال کوتاه جریان شاخه‌ها و ولتاژ باس‌ها تعیین می‌شود. در مرحله بعد زمان عمل‌کرد رله‌ها متناسب با جریان عبوری آن‌ها مشخص می‌شود.با افزایش تعداد منابع DG که بیان‌کننده ضریب نفوذ منابع می‌باشد (حداکثر ضریب نفوذ در این الگوریتم به میزان صددرصد می‌باشد) بدترین شرایط حضور منابع و بنابراین محدوده عمل‌کرد مجاز سیستم حفاظتی مشخص می‌گردد.



شکل ۵: فلوچارت روند اجرای مراحل بازیابی هماهنگی

با محاسبه محدوده زمانی عمل‌کرد رله OCR2، می‌توان آن را مطابق رابطه (۱۳) برروی رله پشتیبان تنظیم نمود. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که تمامی مراحل برای تعیین این رابطه به‌صورت آفلاین انجام می‌شود که از مزایای روش پیشنهادی محسوب می‌شود. بنابراین براساس روش پیشنهادی، هماهنگی ازدست‌رفته دوباره بازیابی می‌گردد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، قسمتی از یک شبکه توزیع نمونه در محیط نرم‌افزار ETAP شبیه‌سازی شده‌است. سیستم تست دارای آرایشی شعاعی می‌باشد. شبکه مذکور از نوع سه‌سیمه هوایی با سطح ولتاژ ۲۰ کیلو ولت است. اکثر بارهای نصب‌شده برروی این فیدر، مصرف‌کننده‌های خانگی هستند که ازطریق ترانسفورماتورهای ۲۰ به ۰/۴ کیلو ولت به شبکه متصل شده‌اند. در شکل (۶) شمای تک خطی فیدر موردمطالعه مشاهده می‌گردد. مطابق شکل فرض می‌شود که منابع DG1 و DG2 می‌توانند برروی شبکه قرار گیرند. مطابق با طراحی سیستم‌های حفاظتی متداول در شبکه‌های توزیع، در شبکه شکل (۶) برای حفاظت فیدر از رله‌های اضافه‌جریان به‌صورت اصلی و پشتیبان و از فیوز به‌منظور حفاظت شاخه‌های جانبی مصرف‌کننده‌ها، استفاده شده‌است. اساس عمل‌کرد هر تجهیز حفاظتی، تشخیص و برطرف‌نمودن خطاهای به‌وجودآمده در زون حفاظتی خود در کم‌ترین زمان ممکن است. همچنین هر تجهیز با تجهیز پایین‌دست خود هماهنگ عمل کرده و علاوه‌بر حفاظت اصلی در زون خود به‌عنوان حفاظت پشتیبان شاخه جانبی خود نیز است.

مبنای حاشیه زمانی عمل‌کرد هماهنگ بین دو تجهیز حفاظتی زمان حداقلی ۳۵۰ میلی‌ثانیه به‌منظور عدم‌اختلال در عمل‌کرد تجهیزات حفاظتی است. همچنین حداکثر زمان برطرف‌سازی خطا در شبکه ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه و براساس منحنی حرارتی هادی‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود. لذا مشخصات رله‌های حفاظتی مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۲: مشخصات فنی رله‌های شبکه شبیه‌سازی‌شده

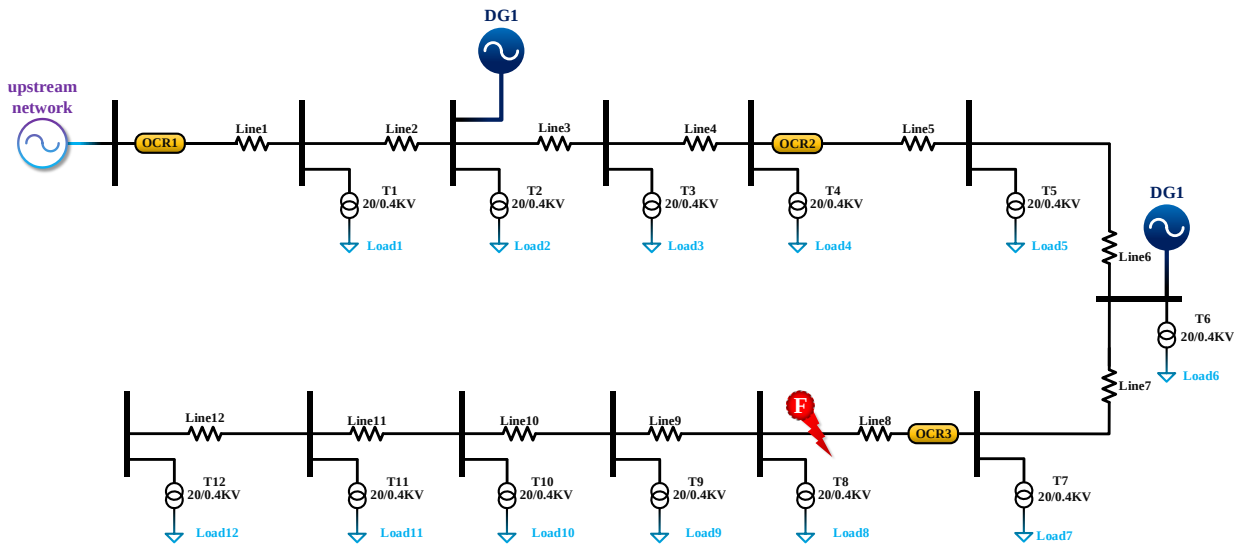
Device	Type	Curve Type	T.D.S	I_{base}
OCR2	ALSTOM-P121	IEC-VI	۰/۰۴۵	۱/۲۴
OCR3	ALSTOM-P121	IEC-SI	۰/۰۴	۱/۷۳

منابع تولید پراکنده می‌توانند در نقاط مختلف شبکه و با ضریب نفوذهای متفاوت قرار بگیرند. در شکل (۶) مکان قرارگیری منابع DG برروی فیدرهای اصلی شبکه مشخص شده‌است. به‌منظور بررسی تأثیر حضور این منابع برروی فیدر، شرایط شبکه در دو حالت مطالعه و شبیه‌سازی شده‌است. ازآنجایی‌که بررسی عمل‌کرد حفاظتی بین هر دو جفت رله مشابه دیگری می‌باشد، کافی است مراحل شبیه‌سازی برای رله‌های OCR2 و OCR3 به‌عنوان حفاظت‌های پشتیبان و اصلی انجام شود. موارد مطرح‌شده در مورد رله OCR1 نیز صدق می‌نماید. در ابتدا شبکه بدون منابع تولید پراکنده در نظر گرفته‌می‌شود. در این شرایط جریان خطای یکسانی از رله‌های OCR2 و OCR3 عبور می‌کند.

مطابق شکل (۶) با وقوع خطای سه‌فاز در نزدیکی رله اصلی (OCR3) جریان عبوری از شبکه برابر ۱۸۶۰ آمپر است. به‌دلیل وقوع خطا در نزدیک‌ترین نقطه به رله OCR3، این رله در کوتاه‌ترین زمان

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶: شبکه شبیه‌سازی‌شده

ممکن و براساس تنظیم حفاظتی خود در زمان ۲۶۰ میلی‌ثانیه عمل کرده و شبکه را از محل خطا جدا می‌نماید.

پس از گذشت حاشیه زمانی بین رله مذکور و OCR2 یعنی زمان ۳۵۰ میلی‌ثانیه، رله OCR2 به‌عنوان پشتیبان OCR3، درصورت عدم‌عمل‌کرد آن خطا را تشخیص و نهایتاً در زمان ۶۱۰ میلی‌ثانیه اتصالی را در شبکه قطع می‌نماید. زمانی‌که منابع تولید پراکنده در شبکه شکل (۶) قرار گیرد، در لحظه وقوع خطا جریان‌های نابرابری از دو رله اصلی و پشتیبان یعنی OCR3 و OCR2 عبور می‌کند. براین‌اساس اگر ضریب نفوذ منبع تولید پراکنده در شبکه به میزان ۱۰ درصد کل بارهای شبکه در نظر گرفته شده‌باشد و مکان قرارگیری آن‌ها مابین دو رله اصلی و پشتیبان واقع شده‌باشد، جریان رله OCR3 برابر ۱۹۴۶ آمپر و زمان عمل‌کرد آن به ازای این جریان خطا ۲۵۳ میلی‌ثانیه است. ملاحظه می شود که زمان عمل‌کرد این رله نسبت به شرایط بدون حضور منابع تولید پراکنده در شبکه کاهش داشته‌است. اما در همین شرایط جریان عبوری از رله OCR2 برابر ۱۷۹۸ آمپر و در مدت زمان ۶۷۶ میلی‌ثانیه عمل‌کرد خواهدداشت. بنابراین در این شرایط حضور منبع DG سبب افزایش زمان عمل‌کرد حفاظت پشتیبان شده‌است.

بیشترشدن ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده براساس مکان قرارگیری فوق، باعث کاهش زمان عمل‌کرد رله OCR3 و افزایش زمان OCR2 گردیده‌است. در ضریب نفوذ ۵۰ درصد زمان عمل‌کرد رله OCR2 برابر ۱۱۶۳ میلی‌ثانیه بوده که از حد تحمل حرارتی هادی‌های شبکه فراتر رفته‌است. به‌عبارت‌دیگر این رله دیگر نمی‌تواند به‌عنوان پشتیبان رله OCR3 عمل نماید. این روند تا جایی ادامه خواهدداشت که در ضریب نفوذ ۱۰۰ درصد زمان عمل‌کرد رله OCR2 برابر ۱۸۸۰ میلی‌ثانیه می گردد.

در شکل (۷) رفتار منحنی مشخصه حفاظتی رله‌های اصلی و پشتیبان براساس قرارگیری منابع تولید پراکنده در مابین دو رله مشخص شده‌است. هنگامی‌که در شکل (۶) منابع DG در بالادست دو رله اصلی و پشتیبان به شبکه متصل گردد، جریان‌های عبوری از رله‌ها به یک مقدار افزایش می‌یابد. در شرایطی که توان تولید این منبع برابر ۱۰ درصد بار شبکه می‌باشد، جریان خطای عبوری از رله‌های مذکور برابر ۱۹۱۰ آمپر خواهدبود. مطابق با این جریان، زمان عمل‌کرد رله‌های اصلی و پشتیبان کاهش‌یافته و به‌ترتیب برابر ۲۵۵ و ۵۶۳ میلی‌ثانیه است.

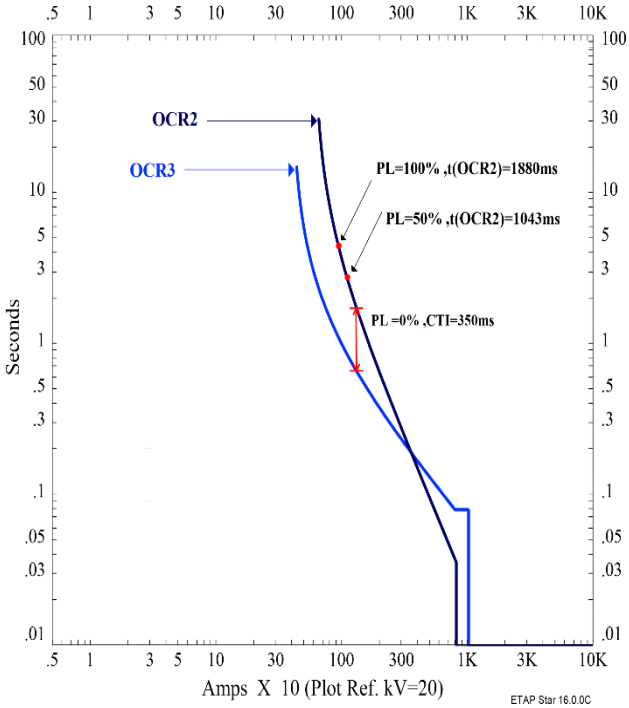
علی‌رغم این‌که زمان عمل‌کرد هر دو رله در برطرف‌سازی سریع‌تر خطا از شبکه کاهش یافته‌است، حاشیه زمانی مابین زمان عمل‌کرد رله‌ها نیز کمتر شده‌است. این کاهش در حاشیه زمانی بین دو رله با افزایش حضور تولید منبع تولید پراکنده در شبکه بیش‌تر شده، در ضریب نفوذ ۳۰ درصد این حاشیه هماهنگی از حداقل زمان مجاز (۲۵۰ میلی‌ثانیه) نیز کمتر می‌شود. کاهش حاشیه زمانی بین رله OCR3 و OCR2 تا جایی ادامه دارد که با ضریب نفوذ منابع DG برابر ۱۰۰ درصد بار کل شبکه، این زمان به مقدار حداقلی ۱۴۴ میلی‌ثانیه خواهدرسید. در شکل (۸) رفتار منحنی مشخصه حفاظتی رله‌های اصلی و پشتیبان براساس قرارگیری منابع تولید پراکنده در بالادست رله پشتیبان مشخص شده‌است.

در جدول‌های (۳) و (۴) شرایط عمل‌کرد هماهنگ بین رله‌ها در ضریب نفوذهای مختلف منابع تولید پراکنده مورد بررسی قرار گرفته‌است. براساس حضور منابع DG در بالادست دو رله اصلی و پشتیبان و یا در مابین دو رله، زمان رله‌های اصلی و پشتیبان تغییرات متفاوتی دارند. قابل مشاهده است که به‌ازای قرارگیری این منابع در بالادست شبکه و با ضریب نفوذ ۳۰ درصد، و همچنین با حضور منابع

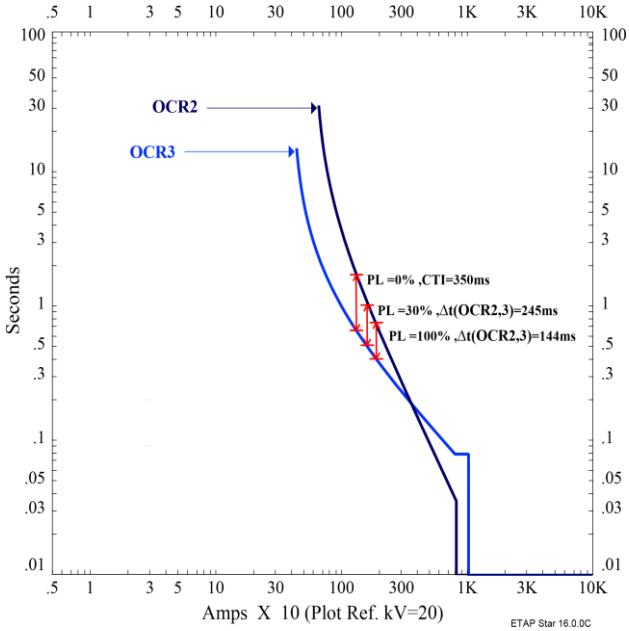
www.SID.ir

Archive of SID

DG با ضریب نفوذ ۵۰ درصد در مابین دو رله حفاظتی، هماهنگی سیستم حفاظتی از دست می‌رود.



شکل ۷: تأثیر قرارگیری منابع DG در بین دو رله اصلی و پشتیبان



شکل ۸: تأثیر قرارگیری منابع DG در بالادست رله پشتیبان

۴-۱- بررسی هماهنگی رله و فیوز

همان‌گونه‌که در بالا به آن اشاره شده‌است، هر تجهیز در ناحیه حفاظتی خود به‌عنوان حفاظت اصلی و برای تجهیز حفاظتی پایین‌دست خود به‌عنوان حفاظت پشتیبان عمل‌کرد دارد. بنابراین فیوز فقط به‌عنوان حفاظت اصلی در ناحیه خود عمل‌کرد دارد. رله اضافه جریانی که در بالادست هر فیوز قرار دارد پشتیبان آن بوده و به‌صورت هماهنگ با فیوز پایین‌دست خود عمل می‌کند. برای هماهنگی میان رله اضافه جریان و فیوز رابطه زمانی ($t_{relay} - t_{fuse} >$ ۳۵۰ ms) برقرار است [۵۱].

جدول ۳: زمان عمل‌کرد منحنی‌های متداول و پیشنهادی در شرایط قرارگیری منابع DG در مابین دو رله

DG Level (%)	Conventional Strategy			Proposed Strategy
	t_{OCR2}	t_{OCR3}	Δt	t_{OCR2}
۰	۶۰۹	۲۵۹	۳۵۰	۶۰۹
۱۰	۶۷۶	۲۵۳	۴۲۳	۶۷۶
۲۰	۷۵۶	۲۵۰	۵۰۶	۷۵۶
۳۰	۸۴۵	۲۴۸	۵۹۷	۸۴۵
۴۰	۹۳۸	۲۴۶	۶۹۲	۹۳۸
۵۰	۱۰۴۳	۲۴۵	۷۹۸	۹۹۸
۶۰	۱۱۶۳	۲۴۴	۹۱۹	۹۹۸
۷۰	۱۳۰۰	۲۴۳	۱۰۵۷	۹۹۸
۸۰	۱۴۶۱	۲۴۳	۱۲۱۸	۹۹۸
۹۰	۱۶۵۱	۲۴۲	۱۴۰۹	۹۹۸
۱۰۰	۱۸۸۰	۲۴۱	۱۶۳۹	۹۹۸

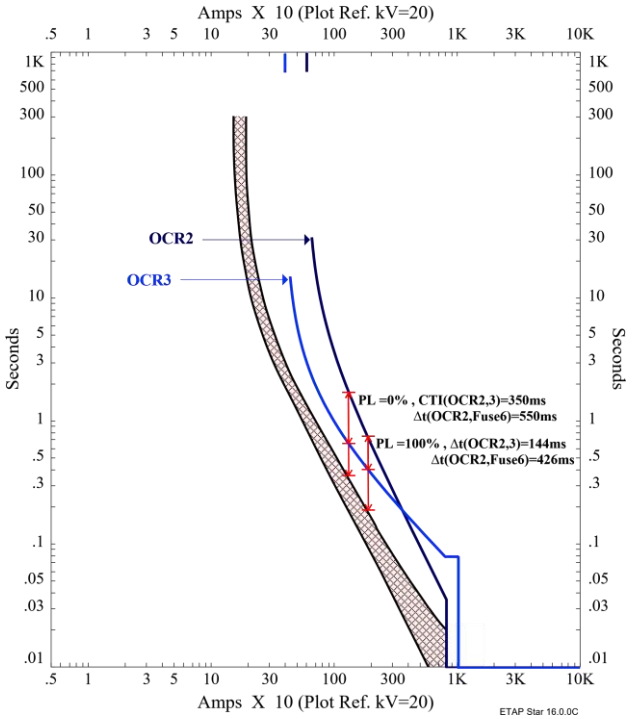
جدول ۴: زمان عمل‌کرد منحنی‌های متداول و پیشنهادی در شرایط قرارگیری منابع DG در بالادست رله پشتیبان

DG Level (%)	Conventional Strategy			Proposed Strategy
	t_{OCR2}	t_{OCR3}	Δt	t_{OCR2}
۰	۶۰۹	۲۵۹	۳۵۰	۶۰۹
۱۰	۵۶۳	۲۵۵	۳۰۸	۵۶۳
۲۰	۵۲۶	۲۵۳	۲۷۳	۵۲۶
۳۰	۴۹۵	۲۵۰	۲۴۵	۵۱۶
۴۰	۴۷۰	۲۴۸	۲۲۲	۵۱۶
۵۰	۴۴۹	۲۴۷	۲۰۲	۵۱۶
۶۰	۴۳۱	۲۴۵	۱۸۶	۵۱۶
۷۰	۴۱۶	۲۴۴	۱۷۲	۵۱۶
۸۰	۴۰۴	۲۴۲	۱۶۲	۵۱۶
۹۰	۳۹۴	۲۴۱	۱۵۳	۵۱۶
۱۰۰	۳۸۵	۲۴۱	۱۴۴	۵۱۶

در ادامه به‌عنوان نمونه هماهنگی میان یکی از رله‌ها و فیوزهای شبکه موجود در شکل (۶) مقاله بررسی می‌گردد. برای این منظور می توان منحنی مشخصه حفاظتی رله OCR2 و فیوز مربوط به load6 را در شکل (۹) مشاهده کرد. مطابق این شکل زمانی که منابع تولید پراکنده در بالادست شبکه قرار دارند، هماهنگی حفاظتی میان رله و فیوز بررسی می‌شود. همان‌گونه‌که ملاحظه می‌شود، در بالاترین ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه همچنان هماهنگی مذکور برقرار می‌باشد. اما باید توجه داشت که چنان‌چه در قبل به آن اشاره شده‌بود، در این شرایط هماهنگی میان رله‌های OCR1 و OCR2 از دست رفته‌است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹: هماهنگی حفاظتی فیوز – رله

۴-۲- بازیابی هماهنگی براساس استراتژی پیشنهادی

در جدول (۳) نتایج شبیه‌سازی عمل‌کرد رله پشتیبان مطابق روش پیشنهادی به‌ازای قرارگیری منابع DG در مابین رله‌های اصلی و پشتیبان و در جدول (۴) به‌ازای قرارگیری این منابع در بالادست رله OCR2 قابل‌مشاهده است. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در مقابل طرح حفاظتی اولیه، عمل‌کرد موفق روش پیشنهادی در هر ضریب نفوذ از منابع DG ملاحظه می‌گردد.

براساس استراتژی پیشنهادی با درنظرگرفتن $CTI_{\min}$ برابر ۲۷۵ میلی‌ثانیه، زمان $t_{\min}$ برابر ۵۱۶ و t_{I2t} برابر ۹۹۸ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده‌است. مطابق جدول (۳) که در ضریب نفوذ ۵۰ درصد منابع تولید پراکنده در شبکه که هماهنگی از دست می‌رود، زمان عمل‌کرد رله پشتیبان برروی ۹۹۸ میلی ثانیه ثابت می‌شود. همچنین در جدول (۴) برای ضریب نفوذ ۳۰ درصد، زمان عمل‌کرد رله مذکور برروی ۵۱۶ میلی ثانیه تنظیم شده‌است. با تنظیمات جدید اتخاذشده برای رله OCR2 حاشیه زمانی مناسب از زمان عمل‌کرد رله OCR3 به‌ازای ضریب نفوذ ۱۰۰ درصدی منابع DG همچنان حفظ می‌گردد. در مورد قرارگیری حداکثری منابع تولید پراکنده در مابین دو تجهیز حفاظتی در شبکه، عمل‌کرد رله OCR1 به‌عنوان حفاظت پشتیبان در زمان کم‌تر ازحد تحمل حرارتی هادی‌های شبکه به‌خوبی قابل‌مشاهده است.

۵- نتیجه‌گیری

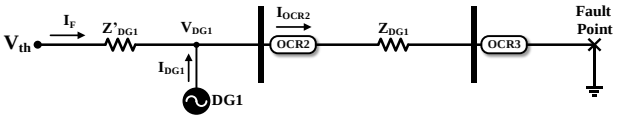
در این مقاله یک بررسی کامل از حضور منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع و همچنین تأثیر آن‌ها برروی سیستم حفاظتی شبکه انجام شد. همان‌گونه که در بخش دوم مقاله آمده‌است براساس مکان نصب و همچنین ضریب نفوذ منابع DG میزان اثرپذیری سیستم حفاظتی متفاوت می‌باشد. برای این منظور روشی ارائه شد که با استفاده از آن بتوان هماهنگی حفاظتی ازدست‌رفته در شرایط حضور منابع تولید پراکنده را بازیابی نمود.

براساس استراتژی پیشنهادی در این مقاله، به‌خوبی هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان در شبکه برقرار گردید و با اصلاح منحنی مشخصه رله OCR2 و بهره‌گیری از مشخصه‌های متداول رله‌های اضافه جریان، هماهنگی حفظ شد. به‌عبارت‌دیگر سیستم حفاظتی توانایی تشخیص به‌موقع و مطمئن خطا را مجدداً به دست آورد.

مزیت روش ارائه‌شده در عمل‌کرد قابل‌قبول آن به‌ازای هر ضریب نفوذی از منابع DG و همچنین شرایط عدم‌حضور منابع تولید پراکنده در شبکه می‌باشد. استراتژی پیشنهادی به نوع منبع تولید پراکنده نصب‌شده در شبکه وابسته نمی‌باشد و نسبت به روش‌هایی که برای کنترل تولید منابع در شرایط خطا پیاده‌سازی می‌شود، ارجحیت دارد.

پیوست

در این بخش روند اثبات یکی از روابط یعنی رابطه (۴) به منظور تصدیق مطالب مطرح‌شده در مقاله، ارائه شده‌است. شایان ذکر است که سایر روابط موردنظر نیز روند اثبات مشابهی دارند. برای این منظور شکل (۱۰) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۰: تأثیر حضور منبع DG1 برروی جریان عبوری از رله OCR2

همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل (۱۰) تصویری با جزییات بیش‌تر از شکل شماره (۱) مقاله است. همان‌گونه که در متن مقاله آمده‌است، امپدانس مابین شبکه بالادست تا منبع تولید پراکنده Z'_{DG1} و امپدانس مابین این منبع تا محل وقوع خطا برابر Z_{DG1} بوده که مجموع آنها برابر Z_{th} می‌باشد. مطابق شکل ولتاژ محل اتصال منبع تولید پراکنده به شبکه برابر V_{DG1} می‌باشد. باتوجه‌به وقوع خطا در شبکه می توان گفت که ولتاژ V_{DG1} از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{DG1} = Z_{DG1} I_{OCR2} \qquad (\text{پ}۱)$$

ازطرفی خواهیم‌داشت:

$$V_{th} - V_{DG1} = Z'_{DG1} I_F \Rightarrow V_{DG1} = V_{th} - Z'_{DG1} I_F \qquad (\text{پ}۲)$$

از روابط (پ۱) و (پ۲) می‌توان نتیجه گرفت:

$$Z_{DG1} I_{OCR2} = V_{th} - Z'_{DG1} I_F \Rightarrow V_{th} = Z_{DG1} I_{OCR2} + Z'_{DG1} I_F \qquad (\text{پ}۳)$$

همچنین برای نقطه اتصال منبع DG1 به شبکه می‌توان گفت:

$$I_{OCR2} = I_F + I_{DG1} \Rightarrow I_F = I_{OCR2} - I_{DG1} \qquad (\text{پ}۴)$$

باتوجه‌به روابط (پ۳) و (پ۴) باید گفت:

www.SID.ir

Archive of SID

$$V_{th} = Z_{DG1} I_{OCR2} + Z'_{DG1}\left(I_{OCR2} - I_{DG1}\right)$$
$$= \left(Z_{DG1} + Z'_{DG1}\right) I_{OCR2} - Z'_{DG1} I_{DG1} \qquad (پ۵)$$
$$= Z_{th} I_{OCR2} - Z'_{DG1} I_{DG1}$$

و نهایتاً رابطه (پ۶) به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$I_{OCR2} = \left(V_{th} + Z'_{DG1} I_{DG1}\right) / Z_{th} \qquad (پ۶)$$

همان‌گونه‌که ملاحظه می‌شود رابطه (پ۶) که در این‌جا حاصل شد برابر رابطه شماره (۴) مقاله می‌باشد. به‌همین‌ترتیب تمامی روابط از (۱) تا (۶) مقاله را می‌توان اثبات نمود.

مراجع

[1] D. Ranamuka, A. P. Agalgaonkar and K. M. Muttaqi, "*Examining the Interactions between DG Units and Voltage Regulating Devices for Effective Voltage Control in Distribution Systems*," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 53, pp. 1485–1496, 2017.

[2] K.A. Joshi and N.M. Pindoriya, "*Case-specificity and its implications in distribution network analysis with increasing penetration of photovoltaic generation*," CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 3, no. 1, 2017.

[3] B. Yan, P.B. Luh, G. Warner, and P. Zhang "*Operation and Design Optimization of Microgrids with Renewables*," IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, vol. 14, no. 2, pp. 573-585, 2017.

[4] W. Zhang, Y. Xu, W. Liu, F. Ferrese and L.Liu "*Fully Distributed Coordination of Multiple DFIGs in a Microgrid for Load Sharing*," IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 806-815, 2013.

[5] D.I. Doukas, K. Papastergiou, P. Bakas and A. Marinopoulos, "*Energy storage sizing for large scale PV power plants base-load operation- Comparative study and results*", Proceeding of the IEEE/PVSC, pp. 570-574, Austin, TX, USA, 2012.

[6] J.C. Gómez, J. Vaschetti, C. Coyos and C. Ibarlucea, "*Distributed generation: impact on protections and power quality*," IEEE Latin America Trans., vol. 11, no. 1, pp. 460-465, 2013.

[7] M.E. Baran, H. Hooshyar, Z. Shen and A. Huang, "*Accommodating high pv penetration on distribution feeders*", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 1039-1046, 2012.

[8] H. Hooshyar and M.E. Baran, "*Fault analysis on distribution feeders with high penetration of PV systems*," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 2890-2896, 2013.

[9] N. Rajaei, M.H. Ahmed, M.M.A. Salama and R.K. Varma, "*Fault current management using inverter-based distributed generators in smart grids*", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 5, no. 5, pp. 2183-2193, 2014.

[10] M.M. Salem, N.I. Elkalashy, Y. Atia and T.A. Kawady, "*Modified inverter control of distributed generation for enhanced relaying coordination in distribution networks*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 78-87, 2017.

[11] D.Q. Hung, N. Mithulananthan and K.Y. Lee," *Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models*", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 29, no. 6, pp. 3048-3057, 2014

[۱۲] محمودرضا شاکرمی، مسعود طرهان و اسماعیل رکرک، «*مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و خازنها به‌طور همزمان در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن مدل بار چند سطحی و وابسته به ولتاژ*،» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۱، صفحات ۱۳۹-۱۲۳، ۱۳۹۱.

[13] A.M. Al-Sabounchi, J. Gow and M. Al-Akaidi, "*Optimal sizing and location of large PV plants on radial distribution feeders for minimum line losses*", Proceeding of the IEEE/EPECS, pp. 1-7, Sharjah, United Arab Emirates, 2015.

[14] D.K. Khatod, V. Pant and J. Sharma, "*Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators*", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 683-695, 2013.

[15] M. Lwin, J. Guo, N. Dimitrov and S. Santoso, "*Stochastic optimization for discrete overcurrent relay tripping characteristics and coordination*", IEEE Trans. on Smart Grid, pp.1-1, 2017.

[16] A. Srivastava, J.M. Tripathi, R. Krishan and S.K. Parida, "*Optimal coordination of overcurrent relays using gravitational search algorithm with DG penetration*", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 54, no. 2, pp. 1155-1165, 2018.

[17] E. Purwar, D.N. Vishwakarma and S.P. Singh, "*A novel constraints reduction based optimal relay coordination method considering variable operational status of distribution system with DGs*", IEEE Trans. on Smart Grid, pp.1-10, 2017.

[18] Y. Tang and R. Ayyanar, "*Methodology of automated protection analysis for large distribution feeders with high penetration of photovoltaic systems*", IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, vol. 4, no. 1, pp.1-9, 2017.

[۱۹] عباس صابری نوقابی، حامد بدرسیمایی و محسن فرشاد، «*یک روش احتمالی به‌منظور تنظیم بهینه رله‌های اضافه جریان ترکیبی با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها*»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۱، صفحات ۱۴۱-۱۵۳، ۱۳۹۶.

[20] A.H.R. Butler, J. Hambrick and B. Kroposki, "*Steady-state analysis of maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders*", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 4, no. 2, pp. 350-357, 2013.

[21] H. Zhan, C. Wang, Y. Wang, X. Yang, X. Zhang, C. Wu, and Y. Chen, "*Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks*", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 7, pp. 55-65, 2016.

[22] E. Sortomme, S.S. Venkata and J. Mitra, "*Microgrid protection using communication-assisted digital relays*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2789-2796, 2010.

[23] V.C. Nikolaidis, E. Papanikolaou, and A.S. Safigianni, "*A communication-assisted overcurrent protection scheme for radial distribution systems with distributed generation*", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 7, pp. 114-123, 2016.

[24] E. Sortomme, S.S. Venkata and J. Mitra, "*Microgrid protection using communication-assisted digital relays*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2789-2796, 2010.

[25] E.O. Schweitzer, D. Finney, and M.V. Mynam "*Communications-assisted schemes for distributed generation protection*", Proceeding of the IEEE/TDC, pp. 1-8, Orlando, FL, USA, 2012.

[26] Z. Liu, C. Su, H.K. Høidalen and Z. Chen, "*A multiagent system-based protection and control scheme for distribution system with distributed-generation integration*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 32, pp. 536-545, 2017.

[27] P.C. Maiola and J.G. Rolim, "*A multi-agent system for protection coordination of radial systems in the presence of distributed generation*", Proceeding of the IEEE/DPSP, pp. 1-6, Birmingham, UK, 2012.

[28] H. Wan, K.K. Li and K.P. Wong, "*An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system*", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 46, no. 5, pp. 2118-2124, 2010.

[29] I. Sadeghkhani, M.E. Hamedani-Golshan, J.M. Guerrero and A. Mehrizi-Sani, "*A current limiting strategy to improve fault ride-through of inverter interfaced autonomous microgrids*", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 8, no. 99, pp. 1-11, 2016.

[30] K.O. Oureilidis and C.S. Demoulias, "*A fault clearing method in converter-dominated microgrids with conventional protection means*", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 31, no. 6, pp. 4628-4640, 2016.

[31] D.S. Kumar, D. Srinivasan and T. Reindl, "*A fast and scalable protection scheme for distributed network with distributed generation*", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 31, no. 2, pp. 67–75, 2016.

[32] R.K. Varma, S.A. Rahman, V. Atodaria, S. Mohan and T. Vanderheide, "*Technique for fast detection of short circuit*

www.SID.ir

Archive of SID

[43] E.C. Piesciorovsky and N.N. Schulz, "*Fuse-relay adaptive overcurrent protection scheme for microgrid with distributed generators*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 11, no. 2, pp. 540-549, 2017.

[44] A. Sinclair, D. Finney, D. Martin, and P. Sharma, "*Distance protection in distribution systems: how it assists with integrating distributed resources*", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 50, no. 3, pp. 2186-2196, 2014.

[45] S. Chaitusaney and A. Yokoyama, "*Prevention of reliability degradation from recloser–fuse miscoordination due to distributed generation*", Ieee Trans. on Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp. 2545-2554, 2008.

[46] M.Y Shih, A Conde, Z Leonowicz and L Martirano, "*An adaptive overcurrent coordination scheme to improve relay sensitivity and overcome drawbacks due to distributed generation in smart grids*", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 53, no. 6, pp. 5217-5228, 2017.

[47] S. Shen, D. Lin, H. Wang, P. Hu, K. Jiang, D. Lin and B. He, "*An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized thevenin equivalent parameters estimation*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 411-419, 2017.

[48] A. Agrawal, M. Singh and M.V. Tejeswini, "*Voltage current based time inverse relay coordination for PV feed distribution systems*", Proceeding of the IEEE/ NPSC, pp. 1-6, 2016.

[49] H.C. Jo, S.K. Joo, and K. Lee, "*Optimal placement of superconducting fault current limiters (SFCLs) for protection of an electric power system with distributed generations (DGs)*", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 23, no. 3, 2013.

[50] K. Wheeler, M. Elsamahy, S. Faried, "*Use of superconducting fault current limiters for mitigation of distributed generation influences in radial distribution network fuse–recloser protection systems*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 11, no. 7, pp. 1605-1612, 2017.

[51] C. Prévé, "*Protection of electrical networks*", ISTE Ltd, 2006.

[52] D.Q. Hung, N. Mithulananthan and K.Y. Lee,"*Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models*", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 29, no. 6, pp. 3048-3057, 2014

[53] "*IEC standard for short-circuit currents in three-phase a.c. systems*", IEC Std 60909.

[54] "*IEC standard for single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time*", IEC standard 60255.

current in PV distributed generator", IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, vol.3, no.4, pp. 155-165, 2016

[33] Min Cheol Ahn and Tae Kuk Ko, "*Proof-of-concept of a smart fault current controller with a superconducting coil for the smart grid*", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 21, no. 3, 2011.

[34] A. Tjahjono, D. O. Anggriawan, A. K. Faizin, A. Priyadi, M. Pujiantara, T. Taufik, M. H. Purnomo, "*Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 11, no. 10, pp. 2575-2585, 2017.

[35] H.H. Zeineldin, Y. Rady, I. Mohamed, V. Khadkikar, and V.R. Pandi, "*A Protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems*", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 4, no. 3, pp. 1523 – 1532, 2013.

[36] 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. on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 537 – 544, 2015.

[37] T.S. Ustun, C. Ozansoy and A. Zayegh, "*Fault current coefficient and time delay assignment for microgrid protection system with central protection unit*", IEEE Trans. on Power Systems, vol 28, no. 2, pp. 598-606, 2013.

[38] A. Saberi-Noghabi, H. Rajabi-Mashhadi and J. Sadeh, "*Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1348-1354, 2010.

[39] B. Hussain, S.M. Sharkh, S.Hussain and M.A. Abusara, "*An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distributed generation*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 669-677, 2013.

[40] M. Dewadasa, A. Ghosh and G. Ledwich, "*Fold back current control and admittance protection scheme for a distribution network containing distributed generators*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 4, no. 8, pp. 952-962, 2010.

[41] M. Ojaghi, Z. Sudi, and J. Faiz, "*Implementation of full adaptive technique to optimal coordination of overcurrent relays*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 28, no. 1, pp. 235-244, 2013.

[42] P.H. Shah and B.R. Bhalja, "*New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser–fuse miscoordination during distributed generation interconnections*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 8, no. 4, pp. 682-688, 2014.

زیرنویس‌ها

1. Distributed Generations
2. Penetration Level

www.SID.ir