بهبود سیستم حفاظتی شبکه توزیع برای حفظ فیوز در حضور منابع تولید پراکنده

مهدی طالب نجف‌آبادی[۱،۴]، بهادر فانی*[۲،۴]، غضنفر شاهقلیان[۳،۴]

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
*۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۴- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌ها، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
تاریخ دریافت: ۹۹/۴/۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۲۷

چکیده: منابع تجدیدپذیر[۱] جهت تأمین توان در سیستم‌های قدرت بر روی فیدرهای توزیع و یا نزدیک مصرف‌کنندگان استفاده می‌شود. در جایابی و نصب این منابع باید اثرات منفی آن‌ها روی شبکه توزیع در نظر گرفته شود. در این مقاله بر اساس کنترل جریان منابع تولید پراکنده[۲] با استفاده از نمودار جریان- ولتاژ منابع در حین خطا یک روش تنظیم هماهنگی اداوات حفاظتی ارائه شده است. جریان‌ها در حین خطا، با حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده در نقاط مختلف تعیین و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار ETAP نشان می‌دهند که تنظیم هماهنگی ادوات حفاظتی در برخی از موارد با ورود این منابع به شبکه، دچار مشکل می‌شوند و با استفاده از روش پیشنهادی هماهنگی حفاظتی بازیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع، حفاظت، حفظ فیوز، تولید منابع پراکنده.

۱- مقدمه

استفاده از منابع پراکنده، فاصله‌ی الکتریکی بین تولیدکننده و مصرف‌کننده را کاهش می‌دهد و در بهبود نمایه ولتاژ، توان راکتیو و کاهش مشکلات بین توزیع و انتقال تاثیر دارد [۱-۴]. هم‌چنین باعث کاهش تلفات الکتریکی و در صورت امکان باعث جلوگیری از هدر رفتن انرژی گرمایی تولیدی در ژنراتورها می‌شود [۵-۸]. منابع تولید پراکنده به علت تمرکز زدایی می‌توانند قابلیت اطمینان و کیفیت توان سیستم را افزایش دهند. از دیگر مزایای منابع تولید پراکنده می‌توان به الف) کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، ب) تجدید ساختار و رقابت موجود در بازار، ج) تنوع منابع انرژی و د) بازده انرژی و استفاده منطقی از آن اشاره کرد [۹،۱۰].

بهره‌برداری غیرمناسب از این منابع می‌تواند شبکه را دچار مشکل کند. جایابی بهینه و تعیین ظرفیت تولید و تکنولوژی مورد استفاده برای واحدهای تولید پراکنده از نکاتی مربوط به نصب این منابع است که برای کاهش تأثیرات منفی و افزایش مزایای اتصال آن‌ها به شبکه-های قدرت باید مورد بررسی قرار گیرد. موقعیت نصب و ظرفیت تولید این منابع می‌تواند باعث تغییر تأثیرات این منابع بر سیستم شود و ممکن است تأثیرات مثبت این منابع در مقایسه با تأثیرات منفی، کاهش یا افزایش یابد [۱۱،۱۲].

از معایب منابع تولید پراکنده می‌توان به الف) افزایش سطح اتصال‌کوتاه، ب) کاهش کیفیت توان، ج) کاهش قابلیت اطمینان، د) جزیره‌ای شدن ناخواسته، ه) افزایش زمان بازیابی شبکه بعد از خطا، و) کاهش امنیت عمومی شبکه و گارگران و ز) افزایش احتمال خرابی تجهیزات شبکه و مشترکین. با ارائه راه‌کارهای مناسب و طراحی دقیق می‌توان معایب منابع تولید پراکنده را جبران کرد که تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۳،۱۴].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020

سیستم‌های توزیع برق[۳] ساختاری شعاعی و ساده دارند که از ساده‌ترین ساختارهای سیستم برق به شمار می‌روند. در این نوع از ساختار، فیدرها به‌صورت شعاعی از پست‌ها به سمت فیدرهای فرعی امتداد یافته‌اند. منابع تولید پراکنده ماهیت شبکه را از یک سوءتغذیه یا شعاعی به چند تغذیه تغییر می‌دهند. این تغییر ماهیت، جهت شارش جریان در خطوط را عوض می‌کند. در نتیجه نمایه ولتاژ نیز عوض می‌شود. بنابراین نمی‌توان گفت که اگر پروفایل ولتاژ در پرباری در محدوده استاندارد قرار گیرد، برای حالت کم‌باری شبکه نیز در محدوده استاندارد قرار می‌گیرد [۱۵-۱۸].

توان اکتیو تزریقی توسط یک منبع تولید پراکنده معمولاً ثابت بوده و در شرایط کم‌باری به علت کاهش مصرف، اضافه بار تولید پراکنده می‌تواند به سمت پست فوق توزیع برگردد، لذا در این شرایط شارش جریان در جهت معکوس باعث تغییر نمایه ولتاژ و در بعضی مواقع ایجاد اضافه ولتاژ خواهد شد. در حالت کلی باید شبکه در بدترین حالت ممکن نیز کارایی داشته باشد تا از خارج شدن نمایه ولتاژ یا جریان خطوط از محدوده مجاز اطمینان حاصل شود [۱۹،۲۰].

منابع تولید پراکنده با ورود به سیستم‌های توزیع و فوق توزیع، ساختار شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند که از مهم‌ترین تأثیرات آن‌ها می‌توان به برهم زدن سیستم حفاظتی نام برد. قطع منابع تولید پراکنده به محض وقوع اتصال کوتاه یکی از روش‌های پیشنهادی ابتدایی است.بنابراین قبل از عملکرد حفاظت فیدرها، عامل تغییر در جریان اتصال کوتاه و از بین رفتن هماهنگی حفاظتی از مدار خارج می‌شود و طرح حفاظتی می‌تواند همانند قبل، عملکرد مناسب خود را داشته باشد. در این حالت حفاظت‌هایی مثل عملکرد منحنی سریع ریکلوزر قابل پیاده‌سازی نیست. هم‌چنین بیرون رفتن منابع، مزایای مربوط به نصب آن‌ها را از سیستم سلب می‌کند و مشکل سنکرون کردن مجدد آن‌ها نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

استفاده از محدودکننده‌های جریان منابع تولید پراکنده در حین اتصال‌کوتاه روش دیگر حفاظتی است [۲۱،۲۲]. هزینه بالا، طراحی و نصب محدودکننده‌های جریان خطا از معایب این روش است و لذا مناسب برای کنترل جریان اتصال‌کوتاه نیست [۲۳].

روش‌های پیشگیرانه که بر مبنای آن، محاسبات تنظیمات تجهیزات حفاظتی، ماکزیمم ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شود در بعضی از مراجع اشاره شده است [۲۴،۲۵]. محدود کردن ضریب نفوذ این منابع از معایب این روش است.

طرح حفاظتی پیشرفته مبتنی بر اتوماسیون و کانال‌های مخابراتی از روش‌های دیگر پیشنهادی در مقالات است [۲۶] که دارای مزایای فراوانی است ولی به علت گرانی و نیاز به زیرساخت‌های فراوان در بسیاری از موارد قابل پیاده‌سازی نیست.

روش دیگر، به‌کارگیری ساختار جدید برای سیستم حفاظتی است [۲۷]. در این روش یک ریکلوزر جدید در ابتدای شاخه‌هایی که منبع پراکنده در آن‌ها نصب می‌شود، استفاده شده و حتی گاهی از حفاظت دیستانس نیز استفاده می‌شود. همان‌طور که مشخص است، با توجه به هزینه‌های بالا و نصب تجهیزات اضافی، این روش قابل پیاده‌سازی نیست.

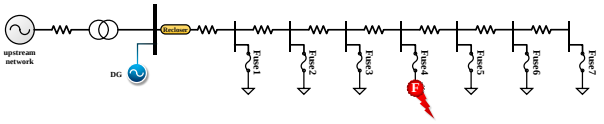
استفاده از مشخصه‌های غیر استاندارد زمان- جریان– ولتاژ برای کاهش زمان عملکرد منحنی سریع ریکلوزر از روش‌های دیگر است که در مقالات اشاره شده است [۲۸،۲۹]. برای استفاده از این روش‌ها، به ریکلوزرهای مبتنی بر ریزپردازنده احتیاج است. برای اعمال مشخصه ولتاژی در این‌گونه روش‌ها، ریکلوزر ابتدای خط باید دارای پورت ورودی ولتاژ باشد.

اصلاح تنظیمات حفاظتی موجود روش پیشنهادی در این مقاله است که با وارد شدن منابع پراکنده با ضریب نفوذ زیاد، بتوان با کم‌ترین تغییر، هماهنگی طرح حفاظتی را بازیابی کرد. به‌عبارت دیگر به‌جای تغییر در ساختار کلی حفاظت سیستم و یا به‌کارگیری وسایل جدید برای رفع مشکل حفاظتی به وجود آمده، تنظیمات وسایل حفاظتی موجود تغییر داده می‌شوند.

پس از بیان مسئله در مقدمه ادامه ساختار مقاله به این شرح است: در قسمت دوم به شبکه توزیع شعاعی مورد مطالعه در این مقاله اشاره می‌شود. استراتژی کنترل پیشنهادی در قسمت سوم بیان می‌گردد. در قسمت چهارم نتایج شبیه‌سازی همراه با بررسی نتایج آمده است. در نهایت در قسمت پنجم نتیجه‌گیری مقاله بیان شده است.

۲- شبکه توزیع شعاعی

شکل (۱) یک شبکه توزیع با ساختار شعاعی برای مطالعه در این مقاله درنظر گرفته شده است. در این شبکه جریان از یک سمت و از طریق پست قدرت در بالادست به سمت بارهای شبکه در شاخه‌های جانبی جاری می‌شود. سیستم حفاظتی پیاده‌سازی شده در این شبکه از نوع ساختار متداول است و طرح حفظ فیوز پیاده‌سازی شده است. در این شبکه در ابتدای فیدر اصلی از یک ریکلوزر و در ابتدای هر شاخه جانبی از فیوز استفاده شده است.



شکل (۱): شبکه توزیع نمونه شعاعی

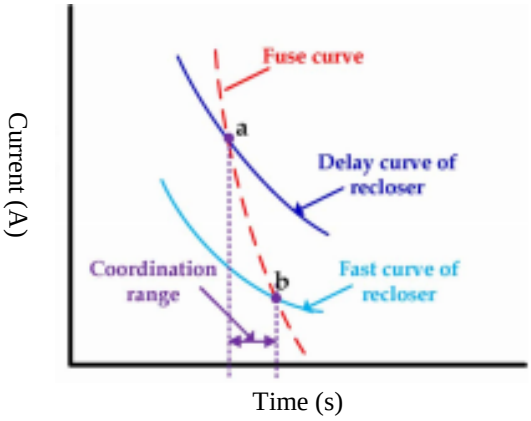
در عملکرد سیستم حفاظتی شبکه، زمان وقوع خطا ابتدا ریکلوزر ناحیه تحت حفاظت خود را بی‌برق نموده و کل فیدر مذکور ایزوله می‌گردد. پس از طی چند سیکل مجدداً فرمان وصل توسط ریکلوزر صادر شده و مدار برق‌دار می‌گردد. چنانچه خطای مشخص شده در شکل گذرا بوده، با یک مرحله عملیات قطع و وصل توسط ریکلوزر خطا پاک‌سازی می‌شود. در طول این فرآیند، فیوز هیچ‌گونه عملکردی نخواهد داشت. اما اگر پس از یک مرحله عملیات قطع و وصل فیدر توسط ریکلوزر، هنوز خطا وجود داشت، برای بار دوم ریکلوزر فرمان قطع و وصل با تأخیر را صادر می‌کند. این مراحل ممکن است بسته به

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

شرایط شبکه و طراحی اولیه صورت گرفته تا چند مرحله انجام شود. در نهایت درصورت دائمی بودن اتصالی مذکور، ریکلوزر اقدام به باز کردن مدار مربوطه نموده و به‌صورت قفل شده باقی می‌ماند. در این شرایط نیاز به اعزام گروه‌های تعمیراتی بوده که با حضور درمحل اقدام به رفع مشکل نمایند [۳۰].

فرایند قطع و وصل ریکلوزر در دفعات متعدد برای ایمن نگه داشتن فیوز در شرایط وقوع خطاهای گذرا است. به این دلیل که زمانی که فیوز عملکرد داشته باشد، منجر به سوختن و ذوب شدن آن فیوز شده و نیاز به تعویض آن المان است. این مسئله زمان‌بر بوده و باعث افزایش مدت زمان بی‌برقی مشترکین و بارهای شبکه شده و هم‌چنین باعث افزایش هزینه‌های سیستم قدرت می‌شود.

مطابق شکل (۲) در زمان خطا و بعد از عبور جریان از فیدر، بر اساس طرح حفاظتی حفظ فیوز، در ابتدا ریکلوزر قرار گرفته در ابتدای فیدر فرمان قطع را صادر می‌کند [۳۱]. عملکرد سریعتر ریکلوزر در مقایسه با فیوز به خوبی قابل مشاهده است. هم‌چنین حاشیه زمانی بین زمان‌های عملکرد ریکلوزر و فیوز برابر Δt بوده که نشان دهنده برقرار بودن هماهنگی در این شرایط است.



شکل (۲): مشخصه جریان-زمان برای بررسی هماهنگی حفاظتی براساس طرح حفظ فیوز

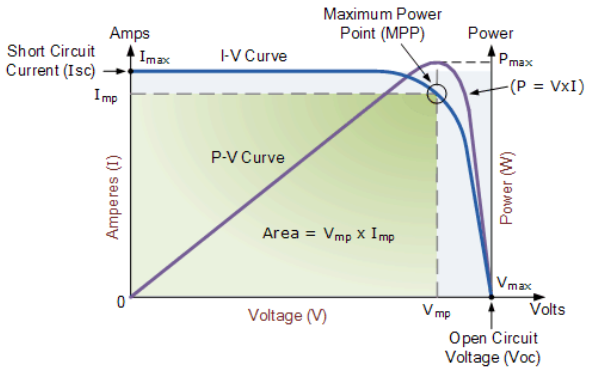
در شبکه توزیع شعاعی هنگامی که منبع تولید پراکنده در شبکه قرار داشته باشد، جریان عبوری از ریکلوزر و فیوز ۴ در شرایط خطا به یک اندازه افزایش می‌یابد. با افزایش جریان عبوری از دو تجهیز نامبرده، زمان عملکرد آنها کاهش می‌یابد. با توجه به شیب هر یک از منحنی‌های ریکلوزر و فیوز، میزان کاهش در زمان‌های عملکردی، با توجه به افزایش جریان، متفاوت است. بنابراین چون شیب منحنی فیوز تندتر از منحنی ریکلورز است، حاشیه هماهنگی زمانی میان دو تجهیز حفاظتی کاهش خواهد یافت.

کاهش حاشیه زمانی بین ریکلوزر و فیوز ۴ مربوطه با توجه به حضور منبع PV بسته به میزان تولید این منبع می‌تواند تغییراتی داشته باشد. به‌عبارت دیگر زمانی که ضریب نفوذ این منبع در شبکه افزایش یابد، سهم جریان تزریقی در شرایط خطا توسط منبع PV نیز افزایش خواهد یافت. این افزایش سبب تقویت بیشتر جریان اتصالی و در نتیجه کاهش هرچه بیشتر زمان‌های عملکرد دو تجهیز حفاظتی و بنابراین کاهش حاشیه هماهنگی میان آن‌ها خواهد شد. تا جایی که در بدترین حالت (بیشترین ضریب نفوذ) جریان عبوری از ریکلوزر و فیوز ۴ افزایش می‌یابد. در این شرایط مشاهده می‌شود که نه تنها حاشیه هماهنگی میان دو تجهیز حفاظتی از حداقل مقدار خود کمتر شده است، بلکه بر اساس منحنی، فیوز زودتر از ریکلوزر عمل نموده و موجب یک ناهماهنگی حفاظتی شده است.

یکی از وسایل حفاظتی که مربوط به خود منابع تولید پراکنده بوده، اینورتر به کار رفته در آن‌ها است. به دلیل جریان مستقیم بودن خروجی این منابع، استفاده از اینورتر در خروجی آن‌ها برای ارتباط با شبکه اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین برای حالت خطا و اتصال کوتاه، باید از این اینورتر محافظت شود که این کار توسط خود اینورتر و با محدودکردن جریان اتصال کوتاه دائم انجام می‌گیرد. این حد محدود شده جریان اتصال کوتاه در اینورتر منابع تولید پراکنده، توسط ضریبی به نام ضریب K در تنظیمات داخلی اینورتر منابع وجود دارد که معمولاً بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درصد جریان حالت دائمی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس روش پیشنهادی، تنظیمات اتخاذ شده باید بر روی منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر صورت پذیرد.

۳- روش پیشنهادی

در سیستم‌های فتوولتائیک برای حفاظت از مدارات داخلی اینورتر، از افزایش ناگهانی جریان خروجی جلوگیری می‌شود. این جریان‌های ناگهانی در شرایط افت ولتاژهایی مانند شرایط وقوع خطا در شبکه رخ می‌دهد. در شکل (۳) نحوه عملکرد یک سیستم فتوولتائیک نمونه براساس ولتاژهای مختلف نمونه‌گیری شده از شبکه نشان داده شده است.



شکل (۳): مشخصه سیستم فتوولتاییک (منحنی‌های ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان و نقطه کار ماکزیمم توان تولیدی)

منابع تولید پراکنده به‌ویژه منابع مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، با هدف دریافت حداکثر توان از منبع تأمین توان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیردند. بنابراین در ضریب توان واحد و براساس رابطه زیر به‌کار برده می‌شوند:

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (۱)$$

براساس رابطه بالا، در شرایط عادی منابع PV برای حداکثر تولید خود بر روی مد کاری توان ثابت[۴] (MPPT) بهره‌برداری می‌شوند. لذا برای ثابت نگه‌داشتن توان خروجی خود، با افزایش و یا کاهش ولتاژ شبکه (V_{PV}) جریان تولیدی اینورتر آنها (I_{PV}) به‌ترتیب کاهش و یا افزایش می‌یابد.

در شرایط افت ولتاژ از مقدار نامی مطابق مشخصه سیستم فتوولتاییک، برای ثابت نگه‌داشتن توان خروجی سیستم فتوولتائیک، جریان تولیدی افزایش می‌یابد. در افت ولتاژهای شدید ناشی از وقوع اتصالی در شبکه، افزایش جریان منبع منجر به آسیب دیدگی اینورتر و مدارهای داخلی شده و در یک سطح مشخصی محدود می‌شود. بنابراین در این شرایط از مد کاری توان ثابت به مد جریان ثابت تغییر وضعیت می‌دهد که مد کاری گذر از خطا[۵] (FRT) نامیده می‌شود. مطابق این مد کنترلی، جریان حالت خطای منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$I_{sc} = K \times I_n \quad (۲)$$

که در آن I_{SC} جریان حالت خطای منبع و K درصد مجاز افزایش جریان از مقدار نامی منبع تولید پراکنده است. ضریب K بر اساس نوع طراحی اولیه و همچنین ابعاد منبع متفاوت است. به‌طور معمول برای منابع با ظرفیت بالا نظیر مزارع خورشیدی، این ضریب برابر ۲۰۰ درصد و برای منابع کوچک نظیر سیستم‌های فتوولتائیک خانگی تا ۳۰۰ درصد نیز درنظر گرفته می‌شود.

نکته قابل توجه برای تعیین حد مجاز افزایش جریان خطای منابع اینورتری این است که در کنار حفاظت از مدار داخلی منبع تولید پراکنده، میزان مشارکت آن منبع در شرایط افت ولتاژهای ناشی از افزایش بار نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، زمانی که منبع PV می‌تواند با تزریق جریان به سمت شبکه در شرایط افزایش بار، کمک نماید، با اعمال محدودیت سخت‌گیرانه‌تر و در نظر گرفتن ضریب افزایش کوچکتر برای این منابع، شرایط حالت دائمی شبکه نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با وجود اعمال مد کنترلی FRT در منابع مبتنی بر اینورتر و محدود شدن جریان خطای تزریقی به شبکه، زمانی‌که ضریب نفوذ منابع PV در شبکه افزایش می‌یابد، همین تزریق جریان کوچک در شبکه منجر به از دست رفتن هماهنگی حفاظتی می‌گردد. از این رو در روش پیشنهادی در این مقاله با اعمال کنترل جدید برروی مد کاری اینورتر، هماهنگی حفاظتی بازیابی می‌شود.

در روش پیشهادی به ازای افت ولتاژهای بیشتر از V_F که قبلاً براساس استراتژی کنترلی FRT جریان اینورتر ثابت باقی می‌ماند، جریان خروجی منبع شروع به کاهش می‌کند. این روش یک مد کنترلی جدید و به‌هنگام بوده که جایگزین مد کاری FRT در منابع مبتنی بر اینورتر می‌گردد. برای این منظور بر اساس رابطه زیر این کنترل بر روی منبع PV انجام می‌شود:

$$I_{PV} = \begin{cases} \dfrac{P_{PV}}{V_{PV}} & for\ Normal\ Condition \\ \dfrac{V_{PV}^{K}}{P_{PV}} & for\ Fault\ Condition \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن پارامتر K یک عدد ثابت است. نحوه تنظیم این پارامتر بر اساس شرایط شبکه متفاوت است. به‌منظور پیوستگی منحنی مشخصه ولتاژ برحسب جریان پیشنهادی، پارامتر K مناسب مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$K = \left[\left(2 \times log_{V_f}^{P_{pv}}\right)\right] - 1 \quad (۴)$$

چنانچه مطابق استراتژی کنترلی پیشنهادی اقدام به اصلاح جریان تولیدی منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر شود، مطابق کاهش ولتاژ نقطه اتصال منبع به شبکه، جریان آن نیز کاهش می‌یابد. در این شرایط، منابعی که به لحاظ موقعیت قرارگیری در شبکه، به سمت نقطه خطا نزدیکتر است، بیشتر محدود شده و منابعی که از نقطه خطا دورتر بوده و در نتیجه اثر کمتری در ایجاد ناهماهنگی حفاظتی شبکه دارند، کمتر محدود می‌شوند.

۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

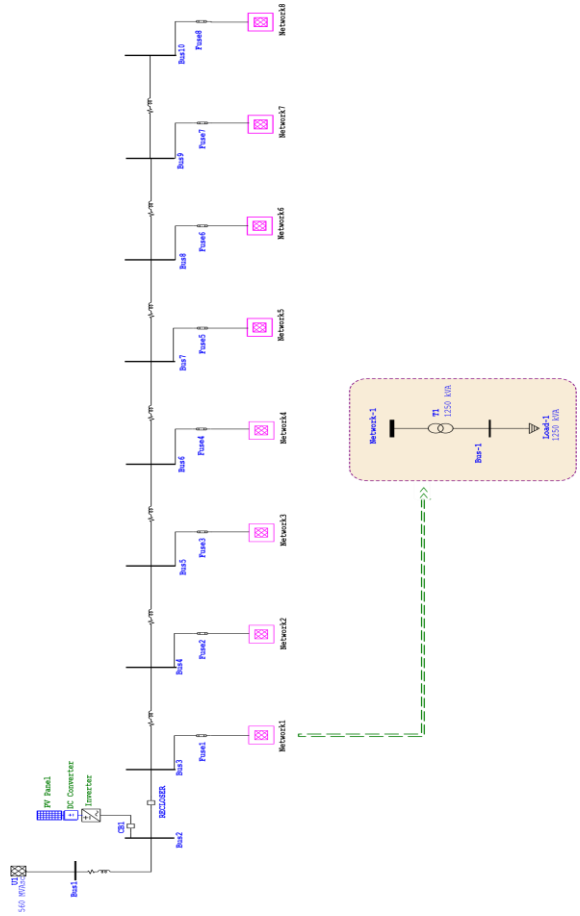
در این قسمت از نرم‌افزار ETAP برای شبیه‌سازی شرایط وقوع خطا و بررسی هماهنگی حفاظتی در حضور منابع تولید پراکنده به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شده است. مشخصات شبکه آزمایشی نمونه برای اجرای الگوریتم پیشنهادی در جدول (۱) آمده است. این سیستم یک شبکه توزیع نمونه دارای ساختار شعاعی بوده که سطوح ولتاژی ۲۰ و ۰/۴ کیلوولت است و در شاخه‌های جانبی بارهای شبکه قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود هر شاخه جانبی با یک ریز شبکه مدل شده که در آن مجموعه باسبار ۲۰ کیلوولت، ترانسفورماتور ۲۰-۰/۴ کیلوولت، باسبار ۰/۴ کیلوولت و در نهایت بار متصل به آن مدل شده است.

جدول (۱): مشخصات شبکه مورد مطالعه

پارامتر	اندازه
سطح اتصال کوتاه شبکه	450 MVA
طول هر بخش از فیدر	2 Km
نوع هادی	Pirelli-AACSR/AC
سطح مقطع هادی	120 mm^2
نوع آرایش هادی‌های فیدر	افقی (Horizontal)
	Headway type
	جابجا نشده (Not transposed)
	شعاعی (Radial)
ارتفاع پایه‌های دکل خط	9 m
میزان کل بار شبکه	1100 KW
مشخصات ترانسفورماتورهای کاهنده بارهای شبکه	20/0.4 KV – 1250 KVA DYg

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020

شکل (۴) شمای کلی فیدر مورد مطالعه در شرایط قرارگیری منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. تجهیزات حفاظتی شبکه شامل ریکلوزر و فیوز هستند. بر این اساس، مشخصات تجهیزات حفاظتی مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): نمودار تک خطی شبکه توزیع نمونه برای شبیه‌سازی در محیط ETAP

جدول (۲): مشخصات تجهیزات حفاظتی شبکه

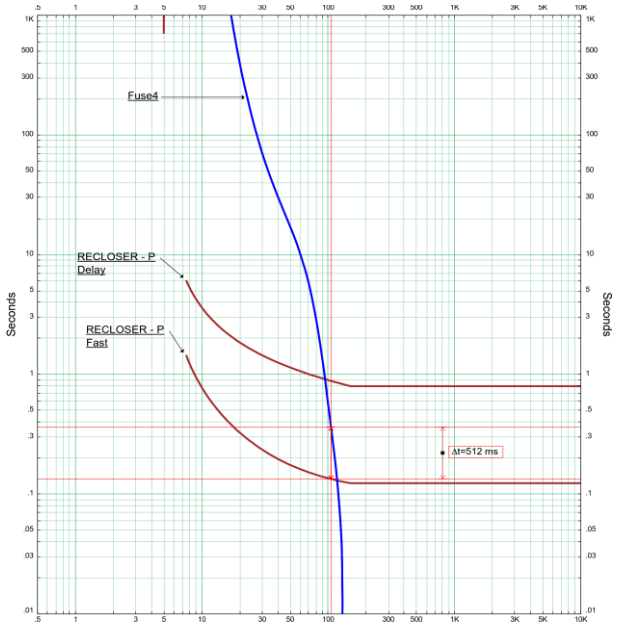
نوع تجهیز	شرکت سازنده	مدل	نوع منحنی	Time Dial
ریکلوزر	Joslyn	351J	IEC Very Inverse	0.05
فیوز	Little fuse	JTD_ID	Time Delay	-

در طرح حفاظتی متداول اجرا شده بر روی این فیدر که طرح هماهنگی حفظ فیوز است، ریکلوزر در ابتدای فیدر قرار گرفته و فیوزها در ابتدای هر شاخه جانبی نصب شده است. بر اساس این طرح، به‌ازای هر اتصال کوتاهی که در ناحیه حفاظتی فیوزها رخ می‌دهد، در ابتدا ریکلوزر وظیفه پاک‌سازی سریع خطا را به‌عهده دارد، که در این حالت از سوختن فیوزها به‌ازای اتصالی‌های گذرای به‌وجود آمده در شبکه جلوگیری می‌شود. در صورتی که خطای رخ داده شده پایدار باشد، پس از گذشت چندبار قطع و وصل ریکلوزر و در نهایت قفل شدن آن، با سوختن فیوز، خطای مذکور پاک سازی می‌شود.

براساس استاندارد، اصل هماهنگی در این طراحی برای فیوز و ریکلوزر به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$t_{Recloser} - 0.75 \times t_{Fuse} < 0 \qquad (۵)$$

زمان عملکرد ریکلوزر بر اساس منحنی تنظیم شده بر روی آن، باید از ۷۵ درصد زمان عملکرد فیوز کوچکتر باشد. زمانی که منبع PV در شبکه حضور نداشته باشد، به‌ازای خطای به وجود آمده در ناحیه حفاظتی Fuse4، جریان خطای عبوری از شبکه برابر ۹۸۳ آمپر است. بر این اساس زمان عملکرد ریکلوزر مطابق منحنی حفاظتی از پیش تعریف شده آن، برابر ۱۳۶ میلی ثانیه است. پس از دو بار عملکرد ریکلوزر برروی منحنی سریع خود، به دلیل باقی ماندن خطا، در زمان ۶۴۹ میلی ثانیه، فیوز ذوب شده و مدار را قطع می‌نماید. در این شرایط مشاهده می‌شود که هماهنگی به خوبی حفظ شده است زیرا زمان ۱۳۶ میلی ثانیه کمتر از ۷۵ درصد زمان ذوب فیوز (۶۴۹ میلی ثانیه) یعنی ۴۸۷ میلی ثانیه است. ترتیب زمان عملکرد ریکلوزر و فیوز در جدول (۳) آمده است. در این شرایط، منحنی مشخصه حفاظتی ریکلوزر و فیوز ۴ شبکه تحت تست، مطابق شکل (۵) است.



شکل (۵): منحنی‌های حفاظتی فیوز و ریکلوزر

همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، در شرایط وقوع خطا در ناحیه تحت حفاظت فیوز ۴ نحوه عملکرد دو تجهیز حفاظتی به چه صورت است. زمانی که منبع PV در شبکه قرار می‌گیرد، جریان‌های عبوری از دو تجهیز به‌شدت افزایش می‌یابد. به‌ازای ضریب نفوذ ۲۵ درصد منبع فتوولتاییک، جریان خطای عبوری از فیدر برابر ۱۰۵۴ آمپر بوده که به‌ازای آن، زمان عملکرد ریکلوزر و فیوز به ترتیب برابر ۱۳۴ و ۳۶۵ میلی ثانیه است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

جدول (۳): جدول ترتیب زمانی عملکرد تجهیزات حفاظتی نرم افزار ETAP

Project:	ETAP	Page:	12
Location:	16.0.0C	Date:	10-05-2019
Contract:		SN:	4359168
Engineer:		Revision:	Base
Filename: sim	Study Case: SM	Config.:	Normal

Short-Circuit Analysis

IEC 60909 Standard

Sequence-of-Operation Event Summary Report

Electrical Transient Analyzer Program

Symmetrical 3-Phase Fault between Network4 and Fuse4. Adjacent to Bus14.

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
136	RECLOSER	0.983	36.2	136	1st Operation - Phase - Fast - TOC
236	RECLOSER	0.000	100		1st Recloser
372	RECLOSER	0.983	36.2	136	2nd Operation - Phase - Fast - TOC
472	RECLOSER	0.000	100		2nd Recloser
649	Fuse4	0.983	649		
1371	RECLOSER	0.983	798	898	3rd Operation - Lockout - Phase - Delay - TOC

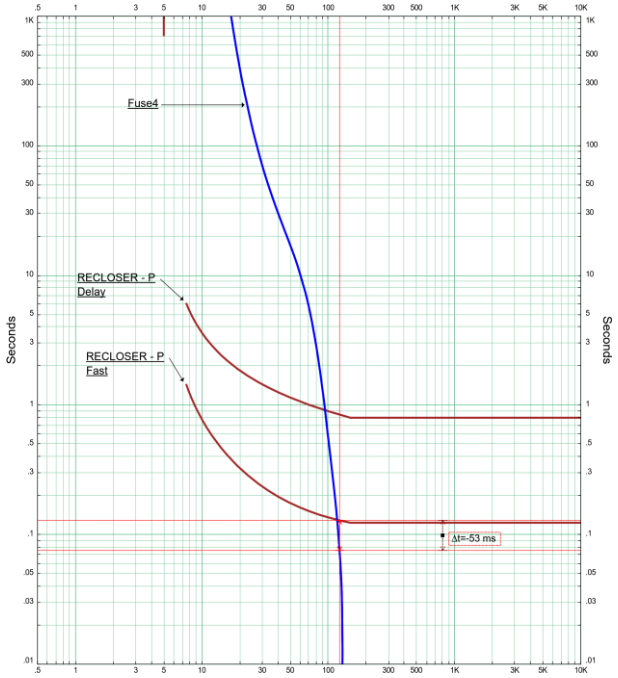
این روند افزایشی در جریان عبوری، با افزایش تولید سیستم PV ادامه یافته؛ تا جایی که تولید این منبع برابر کل بار فیدر مورد نظر است، جریان عبوری از ریکلوزر و فیوز، به ازای اتصال کوتاه مفروض در ناحیه حفاظتی فیوز ۴ برابر با ۱۲۲۶ آمپر شده و زمان‌های عملکرد ریکلوزر و فیوز به ترتیب برابر ۱۲۹ و ۷۹/۱ میلی ثانیه خواهد شد.

در جدول (۴) رفتار ریکلوزر و فیوز به‌ازای جریان‌های خطای مختلف و در شرایط حضور منبع PV در شبکه نمایش داده شده است. بر اساس این جدول، هماهنگی میان دو تجهیز نیز بررسی شده است. در شکل (۶) در بدترین شرایط حضور منابع PV حاشیه هماهنگی میان ریکلوزر و فیوز به خوبی مشاهده می‌شود. پس از اعمال روش پیشنهادی برروی کنترل جریان خروجی منبع PV، در شرایط وقوع خطا متناسب با ولتاژ محل اتصال آن منبع به شبکه، جریان خطای عبوری از تجهیزات حفاظتی کنترل شده و موجب هماهنگی میان آنها می‌شود.

براین اساس به‌صورت جدول (۵) اصلاح می‌گردد. چنانچه ملاحظه می‌گردد، پس از اعمال استراتژی کنترلی جدید بر روی سیستم فتوولتاییک، حتی در ضریب نفوذهای بالای حضور منابع تولید پراکنده، هماهنگی میان دو تجهیز حفاظتی ریکلوزر و فیوز بر پایه طرح حفاظتی حفظ فیوز، به خوبی حفظ شده است. برای این منظور در بیشترین ضریب نفوذ، مشخصه‌های حفاظتی دو تجهیز در شکل (۷) ارائه شده است و نتیجه موفق روش پیشنهادی قابل مشاهده است.

جدول (۴): زمان‌های عملکرد فیوز و ریکلوزر در حضور منبع تولید پراکنده بر اساس طرح اولیه

PV Penetration (%)	I_{fuse4} (Amp)	$I_{Recloser}$ (Amp)	t_{fuse4} (ms)	$t_{Recloser}$ (ms)	Δt (ms)
0	983	983	649	136	350.75
25	1054	1054	365	134	139.75
50	1119	1119	217	132	30.75
75	1176	1176	133	130	-30.25
100	1226	1226	79.1	129	-69.675

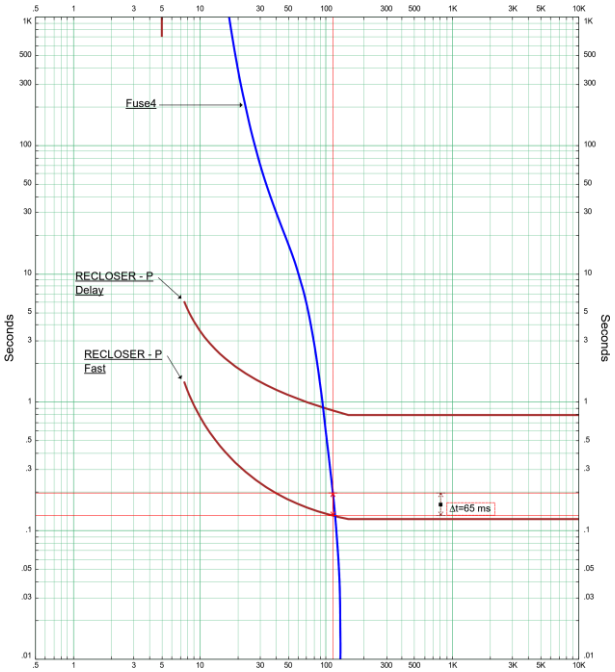


شکل (۶): حضور منبع PV در بالاترین ضریب نفوذ براساس طراحی اولیه

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

جدول (۵): اثر روش پیشنهادی بر زمان‌های عملکرد فیوز و ریکلوزر در حضور منبع تولید پراکنده

PV Penetration (%)	I_{fuse4} (Amp)	$I_{Recloser}$ (Amp)	t_{fuse4} (ms)	$t_{Recloser}$ (ms)	Δt (ms)
0	983	983	649	136	350.75
25	1022	1022	470	135	217.5
50	1060	1060	345	133	125.75
75	1097	1097	258	132	61.5
100	1131	1131	197	131	16.75



شکل (۷): حضور منبع PV در بالاترین ضریب نفوذ براساس روش کنترلی پیشنهادی جدید

۵- نتیجه‌گیری

یکی از مهمترین بخش‌های شبکه‌های توزیع الکتریکی، سیستم حفاظت آن شبکه محسوب می‌شود. ورود منابع تولید پراکنده در این شبکه‌ها، باعث بروز مشکلات متفاوت مانند برهم خوردن تنظیمات حفاظتی شده است. در این مقاله از روش کنترل جریان با استفاده از اینورتر متعلق به منبع پراکنده استفاده شده است. بررسی هماهنگی حفاظتی منابع تولید پراکنده و مشکلاتی مربوط به افزایش ضریب نفوذ در این مقاله بررسی گردید. طراحی و هماهنگی طرح حفاظتی فیوز- ریکلوزر (طرح حفظ فیوز) با به‌کارگیری شبکه‌ی توزیع ۲۰ کیلوولت در نرم‌افزار ETAP ارائه شد.

مراجع

[۱] **درویشی پ.، براتی ح.، "*بازآرایی و جایابی بهینه منابع تولید پراکنده (DGs) در شبکه توزیع در حضور شین کنترل ولتاژ از راه دور با استفاده از الگوریتم بازار بورس*"، نشریه تحقیقات نوین در برق، سال هفتم، ش.: ۲، ص.: ۲۴-۱۳، ۱۳۹۷.**

[۲] **علیلو م.، سعدی س.، زمانیان س.، غلامی ج.، مشاری ش.، "*بهبود بهره‌وری سیستم توزیع با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه انواع منابع تولید پراکنده و جبران ساز استاتیک توزیع*"، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۱۲، ش.: ۴۵، ص.: ۱-۱۵، بهار ۱۴۰۰.**

[3] S. Hasan, A. R. Nair, R. Bhattarai, S. Kamalasadan, K. M. Muttaqi, "*Acoordinated optimal feedback control of distributed generators for mitigation of motor starting voltage sags in distribution networks*", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 56, No. 1, pp. 864 – 875, Jan./Feb. 2020.

[۴] **کلیددار ن.، مرتضوی س.، براتی ح.، "*بیشینه‌سازی سود شرکت توزیع دارای واحدهای تولید پراکنده و بارهای قابل قطع*"، تحقیقات نوین در برق، سال: ۲، ش.: ۱، ص.: ۲۱-۳۰، بهار ۱۳۹۲.**

[5] A. Kharrazi, V. Sreeram, Y. Mishra, "*Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the* power *quality of low* voltage distribution *network- A review*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 120, Article 109643, March 2020.

[۶] **گرجی س.، زمانیان س.، معظمی م.، "*مدیریت انرژی بهینه ریزشبکه براساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست-محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ*"، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۱۱، ش.: ۴۳، ص.: ۴۹-۶۸، پاییز ۱۳۹۹.**

[7] Karimi H., Simab M., Nafar M., "*Compensating and enhancing voltage quality in electrical distribution systems using dynamic voltage restorer based on synchronous reference frame theory*", Signal Processing and Renewable Energy, Vol. 4, No, 2, pp. 53-72, Spring 2020.

[8] J. Ma, F. Liu, L. Jiang, M. Wu, Y. Li, W. Wang, "*Multi-DFIG aggregated model based SSR analysis considering wind spatial distribution*", IET Renewable Power Generation, vol. 13, no. 4, pp. 549-554, 18 3 2019.

[9] H. Karimi, G. Shahgholian, B. Fani, I. Sadeghkhani, M. Moazzami, "*A protection strategy for inverter interfaced islanded microgrids with looped configuration*", Electrical Engineering, Vol. 101, No. 3, pp. 1059-*1073, Sep. 2019.*

[10] L. Mehigan, J. P. Deane, B. P. Ó. Gallachóir, V. Bertsch, "*A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems*", Energy, Vol. 163, pp. 822-836, Nov. 2018.

[11] H. Lotfi, R. Ghazi, M. B. Naghibi sistani, *"Providing a novel approach for dynamic feeder reconfiguration considering importance of reliability and grid's security*", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 10, No. 40, pp. 13-22, Winter 2020.

[۱۲] **صادق‌خانی ا.، "*تحلیل عملکرد محدودکننده ترکیبی مبدل‌های منبع ولتاژ در حضور سطح کنترل دوم ریزشبکه‌های جزیره‌ای*"، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۹، شماره: ۳۳، ص: ۱۴-۳، بهار ۱۳۹۷.**

[13] R. Nale, K. Venkatanagaraju, S. Biswal, M. Biswal, N. Kishor, "*Islanding detection in distributed generation system using intrinsic time decomposition*", IET Genera-

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

tion, Transmission and Distribution, Vol. 13, No. 5, pp. 626-633, March 2019.

[۱۴] **سالاری م.، حقیقت‌دار-فشارکی ف.، "*جایابی و تعیین اندازه بهینه خازن‌ها و منابع تولید پراکنده با هدف بهبود قابلیت اطمینان و حداقل نمودن تلفات در شبکه‌های توزیع*"، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۱۱، ش.: ۴۳، ص.: ۹۳-۹۴، پاییز ۱۳۹۹.**

[۱۵] **لطفی ح.، قاضی ر.، نقیبی-سیستانی م.، "*ارائه استراتژی پویا برای تجدید ارایش شبکه توزیع با توجه به اهمیت قابلیت اطمینان و امنیت سیستم*، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۱۰، ش.: ۴۰، ص.: ۱۳-۲۲، زمستان ۱۳۹۸.**

[16] C. Dou, D. Yue, J. M. Guerrero, X. Xie, S.Hu, "*Multiagent system-based distributed coordinated control for radial DC microgrid considering transmission time delays*", IEEE Trans on Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2370-2381, Sept. 2017.

[۱۷] **صادقیان م.، فانی ب.، صادق‌خانی ا.، شاهقلیان غ.، "*طراحی کنترل‌کننده محلی توان برای منابع پراکنده اینورتری در ریزشبکه‌های جزیره‌ای*"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال: ۸، ش.: ۳، ص.: ۵۸-۴۷، ۱۳۹۸.**

[18] H. M. G. C. Branco, M. Oleskovicz, D. V. Coury, A. C. B. Delbem, "*Multiobjective optimization for power quality monitoring allocation considering voltage sags* in *distribution systems*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 97, pp. 1-10, April 2018.

[19] 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, April 2013.

[۲۰] **شاهقلیان غ.، فانی ب.، کیوانی ب.، کریمی ح.، معظمی م.، "*بهبود تسهیم توان راکتیو با استفاده از اصلاح مشخصه‌های افتی در ریزشبکه‌های خودگردان*"، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، سال: ۹، ش.: ۳، ص.: ۷۱-۶۴، پاییز ۱۳۹۸.**

[21] A. Elmitwally, E. Gouda, S. Eladawy, "*Restoring recloser-fuse coordination by optimal fault current limiters planning in DG-integrated distribution systems*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 77, pp. 9-18, May 2016.

[22] H. C. Seo, "*New adaptive reclosing technique using second-order difference of THD in distribution system with BESS used as uninterruptible power supply*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 90, pp. 315-322, Sep. 2017.

[23] S. H. Lim, J. C. Kim, "*Analysis on protection coordination of protective devices with a SFCL due to the application location of a dispersed generation in a power distribution system*", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, Article: 5601104, June 2012.

[24] P. H. Shah, 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, April 2014.

[25] D. S. Kumar, D. Srinivasan, A. Sharma, T. Reindl, "*Adaptive directional overcurrent relaying scheme for meshed distribution networks*", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 12, No. 13, pp. 3212 – 3220, June 2018.

[26] P. K. Dodiya, B. R. Bhalja, T. P. Swecha, "*Universal approach to tackle the threat of miscoordination between fuse and recloser in distribution network with distributed generations*", Proceeding of the IEEE/AUPEC, Wollongong, NSW, Australia, Sept. 2015.

[27] K. A. Saleh, H. H. Zeineldin, A. Al-Hinai, 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, April 2015.

[28] C. A. C. Salazar, A. C. Enríquez, S. E. Schaeffer, "*Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves*", Electric Power Systems Research, Vol. 122, pp. 42-49, May 2015,

[29] M. Dewadasa, A. Ghosh, G. Ledwich, M. Wishart, "*Fault isolation in distributed generation connected distribution networks*", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 5, No. 10, pp. 1053-1061, Oct. 2011.

[30] M. Chandran, S. R. Kumar, P. Somasundaram, "*Smart and adaptive over current protection for distribution system with distributed generation*", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 102-111, April 2014.

[31] M. H. Kim, S. H. Lim, J. C. Kim, "*Improvement of recloser-fuse operations and coordination in a power distribution system with SFCL*", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 2209-2212, June 2011.

زیرنویس‌ها

1. Renewable resources
2. Sub network
3. Maximum power point tracking
4. Fault ride through
5. Power distribution system

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Improved Protection System for Distribution Network to Maintain Fuse in the Presence of Distributed Generation Resources

Mahdi Taleb[1], Bahador Fani[2], Ghazanfar Shahgholian[3]

1- MSc, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
2- Assistant Professor- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, bahador.fani@gmail.com
3- Associate Professor- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, shahgholian@iaun.ac.ir

Abstract: Renewable sources are used to provide power in power systems on feeders or near consumers. The placement and installation of these resources should take into account their negative effects on the distribution network. In this paper based on flow control of dispersed production resources by using current-voltage-voltage diagrams during the error, a method of regulating the coordination of protective measures is presented. The flows during the error, with the presence and absence of dispersed production resources, have been designated at various locations and compared to each other. The simulation results in ETAP software shown that adjust the coordination of protective equipment in some cases by entering these resources into the network, they get into trouble and the protective coordination is restored using the proposed method.

Keywords: Distribution network, protection, fuse retention, distributed resource generation.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]