

## یک طرح حفاظتی فیوز بهنگام چند مرحله‌ای با ضریب نفوذ آزاد منابع فتوولتائیک در سیستم‌های توزیع

مهران رحیمی<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، بهادر فانی<sup>۲</sup>، دانشیار، مجید معظمی<sup>۲</sup>، استادیار، مجید دهقانی، استادیار<sup>۲</sup>، غزنفر شاهقلیان<sup>۲</sup>، دانشیار

۱- مرکز تحقیقات ریزشکبه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

bahador.fani@gmail.com, majid.moazzami@gmail.com, deh\_amir@yahoo.com, shahgholian@iaun.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله یک طرح حفاظتی<sup>۱</sup> چند مرحله‌ای به منظور حفظ هماهنگی فیوز و ریکلوزر ارائه شده است. روش پیشنهادی به صورت آنلاین و متناسب با ضریب نفوذ منابع فتوولتائیک<sup>۲</sup> عمل می‌نماید. در مرحله اول به منظور حفظ فیوز از یک منحنی غیراستاندارد جریان - زمان - ولتاژ استفاده می‌شود و در صورتی که مقدار ضریب تنظیم زمانی<sup>۳</sup> جدید محاسبه شده از مرحله اول به ریکلوزر قابل اعمال نباشد، مرحله دوم طرح حفاظتی فعال می‌گردد و سهم جریان تزریقی منابع فتوولتائیک متناسب با ولتاژ محل اتصال اینورتر کاهش می‌یابد. باید خاطر نشان کرد که روش پیشنهادی، یک روش ترکیبی است که در مرحله اول نسبت به سایر طرح‌های ارائه شده در این زمینه، تاثیر حساسیت ریکلوزر در اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر لحاظ شده است و در مرحله دوم نیز نسبت به سایر روابط ارائه شده در زمینه کنترل جریان اینورتر، محدودیت کمتری بر توان خروجی منابع PV در شرایط خطا اعمال می‌گردد. قابل ذکر است که به منظور اجرای طرح حفاظتی ارائه شده نیاز به زیر ساخت‌های مخابراتی نیست. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم افزار ETAP عملکرد طرح پیشنهادی را به‌طور موثری تأیید می‌کند.

**واژه های کلیدی:** شبکه توزیع شعاعی، طرح حفاظتی دو مرحله‌ای، تولید پراکنده<sup>۴</sup> فتوولتائیک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۲/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: غزنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

## ۱- مقدمه

ارائه شده است، هر چند روش مذکور برای تمامی حالت‌های اتصال کوتاه جوابگو نیست. برای حل مشکل عدم هماهنگی در بدترین شرایط خطا که حفظ فیوز به کمک تغییر سائز آن امکان پذیر نیست، در مرجع [۱۰] یک روش تغییر نوع فیوز ارائه شده است.

ب) اصلاح مشخصه عملکرد سریع ریکلوزر: عمده روش‌های ارائه شده در این دسته به سه روش اصلی تقسیم بندی می‌شوند. در مرجع [۱۱] ضریب تنظیم زمانی (TDS) عملکرد سریع ریکلوزر به صورت تطبیقی به کمک مقدار نسبت جریان عبوری از ریکلوزر به جریان فیوز شاخه خطا اصلاح می‌گردد. این روش نیازمند ریکلوزر دیجیتال مبتنی بر میکروپروسسور است و همچنین به منظور ارتباط نقاط اندازه‌گیری و سیستم کنترل مرکزی شبکه توزیع نیاز به زیرساخت‌های ارتباطی است که به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیستند. مطابق روش‌های ارائه شده در مراجع [۱۲، ۱۳] جریان تنظیمی تجهیز اضافه جریان ( $I_{pickup}$ ) به صورت تطبیقی تنظیم می‌گردد. به منظور تعیین زمان جدید عملکرد تجهیزات حفاظتی،  $I_{pickup}$  متناسب با تغییرات جریان خطا به روز می‌گردد. باید خاطر نشان کرد که جریان خطا به مکان خطا و ضریب نفوذ DG وابسته است. استفاده از منحنی مشخصه‌های غیر استاندارد زمان-جریان-ولتاژ به منظور کاهش زمان عملکرد حالت سریع ریکلوزر به کمک یک ترم ولتاژی در مراجع [۱-۱۸] ارائه شده است. مشابه روش ارائه شده در مرجع [۱۱] به منظور اعمال این دسته از روش‌ها نیز به ریکلوزرهای مبتنی بر ریزپردازنده نیاز است. از طرف دیگر ولتاژ ابتدای خط به راحتی به کمک یک ترانسفورماتور ولتاژ در پست بالادست ریکلوزر قابل ثبت است. از آن جایی که این ولتاژ به صورت محلی اندازه‌گیری می‌شود برخلاف مرجع [۱۱] دیگر نیاز به زیر ساخت‌های مخابراتی نیست. لازم به ذکر است علی‌رغم اینکه روش‌های ارائه شده در مراجع [۱۱] و [۱۸-۱۴] بر مبنای کاهش زمان عملکرد سریع ریکلوزر به کمک کاهش مقدار TDS عمل می‌نمایند، اما در هیچ یک از این مقالات به دو چالش کاهش حساسیت ریکلوزر<sup>۵</sup> و محدودیت در مقدار حداقل TDS قابل اعمال به ریکلوزر در شرایط افزایش ضریب نفوذ منابع PV متصل به شبکه پرداخته نشده است.

ج) کنترل منابع DG: این دسته از روش‌ها نیز به سه روش اصلی قابل تقسیم هستند. حذف تمام DGها قبل از ایجاد عدم هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر در مراجع [۱۹، ۲۰] ارائه شده است. خروج منابع DG امری غیر مطلوب برای سیستم توزیع است و از طرف دیگر سنکرون کردن مجدد آنها با سیستم توزیع به منظور وصل مجدد DGها امری زمان بر است [۲۱]. محدود کردن ظرفیت DGها راه حل دیگری است که در این دسته از روش‌های حفاظتی جای دارد و هدف آنها پیدا کردن آستانه نفوذ منابع تولید پراکنده تا جایی که برای سیستم حفاظتی مشکل ایجاد نمایند، است. اشکال روش مذکور عدم ارائه راه حل به منظور افزایش ظرفیت DGها است [۲۲، ۲۳]. در جدیدترین روش‌های ارائه شده در این دسته کنترل جریان خروجی

با توجه به لزوم کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و تلفات بالایی خطوط انتقال انرژی الکتریکی و پیشرفت سریع تکنولوژی در زمینه تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، نصب منابع تولید پراکنده (DG) مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر رشد روز افزونی داشته است [۲، ۱]. این منابع می‌توانند به دو صورت کلی در شبکه قرار گیرند. حالت اول مزارع توربین‌های بادی و یا مزارع سلول‌های خورشیدی است که اغلب توسط بخش خصوصی احداث و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در حالت دوم منابع DG در شبکه توزیع (DN) به صورت محلی در نزدیکی مصرف کننده نصب می‌شوند و توان مورد نیاز بارها را به صورت محلی تامین می‌نمایند. در این شرایط آرایش منابع DG در DN به صورت گسترده است [۳، ۴].

از جمله مزایای اتصال منابع DG به سیستم قدرت می‌توان به مواردی مانند آزاد شدن قسمتی از ظرفیت خطوط انتقال، کاهش نیاز به احداث نیروگاه‌های توان بالا، کاهش هزینه‌های ناشی از گسترش شبکه‌های انتقال و توزیع و همچنین کاهش آلودگی‌های زیست محیطی اشاره نمود [۵، ۶]. اما از طرف دیگر با نصب DGها در شبکه‌های توزیع معایبی نیز مانند تغییرات پروفایل ولتاژ شبکه توزیع، شرایط تشکیل شبکه‌های جزیره‌ای و سهم جریان تزریقی آن‌ها در شرایط وقوع خطا و اشکال در حفاظت سیستم ایجاد می‌گردد که بدون در نظر گرفتن آنها بهره‌برداری از این منابع تقریباً غیر ممکن می‌گردد [۷، ۸]. لازم به ذکر است که سهم جریانی منابع تولید پراکنده در شرایط وقوع خطا می‌تواند به اندازه‌های باشد که نقطه کار تجهیزات حفاظتی و فیوزهای موجود در شبکه را تغییر دهد و باعث از بین رفتن هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی گردد. عدم هماهنگی ایجاد شده منجر به عدم پاک‌سازی خطا در زمان تعیین شده می‌گردد که می‌تواند موجب آسیب رسیدن به تجهیزات و مصرف کننده‌های متصل به سیستم شود.

در صورت وقوع خطا در شبکه توزیع و به صورت ویژه در پایین دست فیوزهای نصب شده در شاخه‌های فرعی شبکه، به دلیل سهم جریان تزریقی منابع DG به سیستم، هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر از بین می‌رود. به عبارت دیگر در این شرایط فیوز به ازای خطاهای گذرا زودتر از عملکرد سریع ریکلوزر عمل می‌نماید و در حقیقت استراتژی حفظ فیوز با مشکل مواجه می‌گردد. به منظور غلبه بر مشکل ذکر شده، راه‌حل‌های متعددی ارائه شده است که بر حسب محل اعمال تغییرات، به چهار دسته اصلی زیر تقسیم‌بندی می‌گردند: الف) اعمال تغییرات بر روی فیوزها، ب) اصلاح مشخصه عملکرد سریع ریکلوزر، ج) کنترل منابع DG و د) ایجاد اصلاحات در سیستم توزیع.

الف) اعمال تغییرات بر روی فیوزها: اثر نوع و ضریب نفوذ DGها بر روی زمان ذوب فیوز در مرجع [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله یک روش تغییر سائز فیوز برای حفظ هماهنگی حفاظتی

نباشد. در این مرحله به منظور حفظ هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر، جریان خروجی منابع PV در لحظات خطا متناسب با ولتاژ دو سر اینورتر آنها کاهش می‌یابد. در ادامه مقاله در بخش دوم، اصول عملکرد فیوز و ریکلوزر در سیستم توزیع در دو حالت با و بدون منابع PV مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم روش حفظ فیوز پیشنهادی و روابط حاکم بر آن ارائه می‌گردد. نحوه عملکرد الگوریتم روش پیشنهادی در بخش چهارم آورده شده است. معرفی سیستم تست و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن به کمک نرم افزار ETAP در بخش پنجم آورده شده‌اند که بیان‌کننده درستی عملکرد روش پیشنهادی است. در نهایت، در بخش ششم نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

## ۲- اصول عملکرد فیوز و ریکلوزر در یک سیستم توزیع

تجهیزات حفاظتی متعددی از جمله فیوز، ریکلوزر و رله‌های اضافه جریان در سیستم‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف یک سیستم حفاظتی پاک کردن موثر انواع خطا در حداقل زمان ممکن و به ازای ایجاد کمترین ناحیه خاموشی در سیستم توزیع است. حدوداً ۸۰ تا ۹۰ درصد خطاهای سیستم توزیع ماهیت گذرا دارند که توسط عملکرد سریع ریکلوزر برطرف می‌شوند [۳۰]. از طرف دیگر به منظور حفظ فیوز شاخه‌های فرعی سیستم توزیع در زمان وقوع خطا لازم است که عملکرد سریع ریکلوزر با فیوز هماهنگ باشد تا نه تنها مانع عملکرد اشتباه فیوز شود، بلکه از گسترش خطا به شبکه بالادست نیز جلوگیری گردد.

### ۲-۱- بدون حضور منابع PV

در صورت عدم حضور منابع PV در سیستم توزیع، زمان استاندارد صدور فرمان قطع یک ریکلوزر از رابطه (۱) به دست می‌آید [۳۱]:

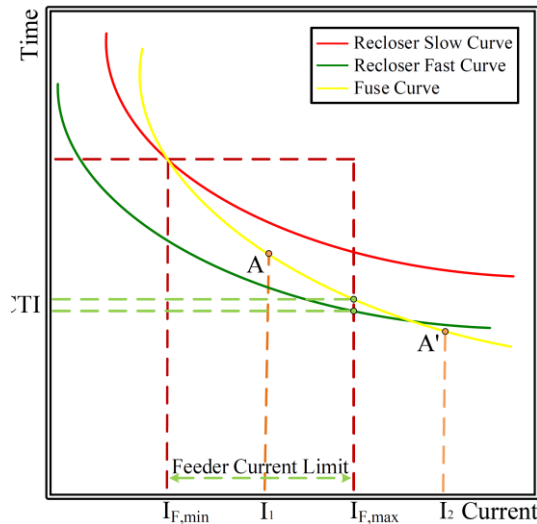
$$t_{R-Std} = \left[ \frac{A}{\left( \frac{I_f}{I_{pickup}} \right)^p - 1} + B \right] \times TDS \quad (1)$$

که در آن  $t_{R-Std}$  زمان استاندارد عملکرد ریکلوزر و TDS ضریب تنظیم زمانی است. این ضریب برای عملکرد حالت کند، برابر یک و برای عملکرد سریع، ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. ثابت‌های A، B و P با توجه به مدهای کاری مشخصه جریان-زمان تجهیز حفاظتی تغییر می‌کنند که در جدول (۱) ضمایم آورده شده‌اند.  $I_f$  جریان خطای دیده‌شده توسط ریکلوزر است و  $I_{pickup}$  نیز جریان برداشت ریکلوزر است. با تغییر مقدار TDS، منحنی جریان-زمان ریکلوزر به سمت بالا یا پایین شیفت داده می‌شود.

منابع DG ارائه شده است. این روش مبتنی بر کنترل جریان تزریقی منابع DG به سیستم توزیع در لحظات وقوع خطا است [۲۴،۲۵]. لازم به ذکر است که در روش مذکور اگر کنترلر مناسبی طراحی نشود، در صورت ایجاد افت ولتاژ قابل توجه بر روی ترمینال‌های دو سر اینورتر DG، توان خروجی این منابع به صورت ناگهانی به شدت کاهش پیدا خواهد کرد و تقریباً مشابه حالتی می‌گردد که DG از سیستم خارج شده باشد.

د) ایجاد اصلاحات در سیستم توزیع: این دسته روش از روش‌ها بر اصلاح ساختار سیستم حفاظتی شبکه توزیع یا استفاده از تجهیزات اضافی جانبی و حفاظتی استوار است. برای این منظور از تجهیزات حفاظتی مانند: رله دیستانس یا رله‌های جریان زیاد جهتی که معمولاً برای حفاظت از شبکه توزیع کاربردی ندارد، استفاده می‌گردد. از طرف دیگر استفاده از تجهیزات اضافی حفاظتی برای شبکه توزیع مانند: ریکلوزرها و بریکرهای اضافه وسکشنلایزر، نه تنها هزینه‌های زیادی به سیستم تحمیل می‌نماید، بلکه نیازمند اصلاح مجدد ساختار سیستم توزیع است [۲۶،۲۷]. در نهایت استفاده در محدود کننده‌های جریان خطا (FCL) به عنوان تجهیزات جانبی در این دسته قرار می‌گیرد. FCLها تجهیزاتی هستند که به صورت سری در مدار سیستم توزیع نصب می‌شوند و در حالت عملکرد نرمال شبکه امپدانس ناچیزی دارند [۲۸،۲۹]. اما با وقوع خطا امپدانس آنها به صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند و جریان خطا را محدود می‌نماید. استفاده از این روش نیاز به جابجایی صحیح و انتخاب مناسب FCL به لحاظ مقدار امپدانس است. امپدانس آن‌ها در اثر تغییر توپولوژی شبکه، دست خوش تغییر می‌شود و نیاز به محاسبات مجدد می‌گردد. البته از هزینه زیادی نیز که به شبکه نیز تحمیل می‌کنند نمی‌توان چشم‌پوشی نمود.

با توجه به لزوم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به منظور تامین توان، نصب تولیدات پراکنده فتوولتائیک رشد قابل توجهی در سیستم قدرت به خصوص در بخش توزیع داشته است. علی‌رغم مزایای فراوان این منابع مانند بهبود پروفیل ولتاژ شبکه توزیع و تامین سطح بالایی از توان مورد نیاز، اشکالاتی را نیز به همراه داشته‌اند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های ایجاد شده عدم هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر به ازای وقوع خطا در شبکه توزیع است. در این مقاله، یک روش حفاظتی چند مرحله‌ای ارائه شده است. بر اساس روش ارائه شده در مرحله اول به کمک یک ترم ولتاژی مقدار TDS ریکلوزر اصلاح می‌گردد و در حقیقت منحنی مشخصه عملکرد سریع ریکلوزر به سمت پائین شیفت پیدا می‌کند تا مجدداً زیر منحنی ذوب فیوز قرار گیرد. قابل ذکر است که بر خلاف سایر مقالات ارائه شده در این زمینه، مرحله اول حفاظتی ارائه شده در این مقاله در انجام محاسبات زمان جدید عملکرد سریع ریکلوزر؛ دو چالش کاهش حساسیت ریکلوزر و محدودیت در مقدار حداقل TDS قابل اعمال به ریکلوزر را لحاظ کرده است. مرحله دوم طرح حفظ فیوز ارائه شده زمانی فعال می‌گردد که TDS جدید محاسبه شده به ریکلوزر موجود در شبکه قابل اعمال



شکل (۲): از بین رفتن هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر به ازای وقوع خطا در سمت ولتاژ کم شبکه شکل (۱)

### ۲-۲- با حضور منابع PV

اتصال منابع PV به سیستم‌های توزیع بسته به سطح توان تولیدی، نوع و مکان قرارگیری آنها بر هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر اثر خواهد گذاشت. مطابق شکل (۲)، عدم هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر، زمانی اتفاق می‌افتد که جریان خطا به دلیل جریان تزریقی توسط منابع PV، از  $I_{F,max}$  بیشتر شود؛ در نتیجه، زمان قطع فیوز از زمان متناظر با نقطه A به نقطه A' شیف‌ت داده می‌شود و فیوز در زمان کمتری نسبت به ریکلوزر عمل می‌کند. در این مقاله به منظور جلوگیری از عدم هماهنگی ایجاد شده بین فیوز و ریکلوزر در سیستم توزیع، یک طرح حفاظتی آنلاین چند مرحله‌ای با ضریب نفوذ آزاد منابع PV ارائه شده است. روش حفظ فیوز پیشنهادی در این مقاله و روابط حاکم بر آن در بخش بعدی به تفصیل شرح داده شده است.

### ۳- روش حفظ فیوز چند مرحله‌ای پیشنهادی

#### ۳-۱- مرحله اول حفاظتی

در مرحله اول طرح حفاظتی پیشنهادی دو فاکتور اصلاحی (Correction Factor) با عنوان‌های  $CF_1$  و  $CF_2$  در مقدار TDS عملکرد سریع ریکلوزر ضرب می‌گردند. در این شرایط، مشخصه پیشنهادی برای عملکرد حالت سریع ریکلوزر به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$t_{R-Pr} = \left[ \frac{A}{\left( \frac{I_f}{I_{pickup}} \right)^p - 1} \right] \times TDS_{New} \quad (3)$$

$$TDS_{New} = TDS \times CF_1 \times CF_2 \quad (4)$$

از آنجاییکه با تغییر  $I_{pickup}$  احتمال حساس شدن بیش از حد ریکلوزر وجود دارد، به گونه‌ای که ممکن است به ازای عبور جریان‌های بار از شبکه، ریکلوزر به اشتباه باز شود، بنابراین مطمئن‌ترین و راحت‌ترین ابزار اصلاح منحنی همان TDS است. از طرف دیگر مشخصه زمان-جریان فیوز را می‌توان با رابطه (۲) توصیف نمود [۳۲]:

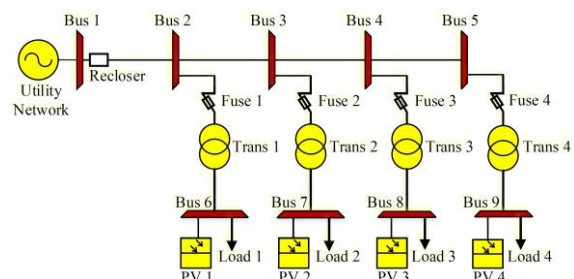
$$\log(t_{fuse}) = a \times \log(I_{fuse-sc}) + b \quad (2)$$

که در آن  $a$  و  $b$  پارامترهای ثابت،  $I_{fuse-sc}$  جریان خطای فیوز،  $t_{fuse}$  زمان عملکرد فیوز است. شکل (۱) یک سیستم توزیع شعاعی با نفوذ بالای منابع PV را نشان می‌دهد.

بدون در نظر گرفتن منابع PV و به ازای وقوع خطا در سمت ولتاژ کم این شبکه، مطابق شکل (۲) هماهنگی بین ریکلوزر و فیوز تنها زمانی برقرار خواهد بود که جریان خطا ( $I_1$ ) بین حداکثر جریان خطای فیدر ( $I_{F,max}$ ) و حداقل جریان خطای فیدر ( $I_{F,min}$ ) قرار گیرد. در این صورت فاصله زمانی هماهنگی (CTI) مناسب بین عملکرد این دو تجهیز حفظ می‌شود.

در این مقاله به منظور داشتن حفاظت پشتیبان مناسب، حداقل فاصله زمانی بین عملکرد فیوز و ارسال فرمان قطع توسط ریکلوزر صد میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است [۳۲].

منحنی مشخصه حالت سریع ریکلوزر در فاصله  $I_{F,min}$  و  $I_{F,max}$  زیر منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، منحنی مشخصه کند ریکلوزر، بالای منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار خواهد گرفت. در این شرایط در صورت وقوع خطای گذرا در سمت ولتاژ کم سیستم توزیع، منحنی مشخصه ریکلوزر، زودتر از فیوز شاخه خطا عمل می‌کند و به حفظ فیوز شاخه فرعی سیستم منجر می‌گردد.



شکل (۱): شبکه توزیع شعاعی با نفوذ زیاد منابع PV

که در رابطه (۳)،  $t_{R-PF}$  زمان عملکرد پیشنهادی ریکلوزر است.

ب- محاسبه  $CF_2$

فاکتور  $CF_2$  محاسبه شده در این مرحله در حقیقت به منظور جبران‌سازی کاهش حساسیت ریکلوزر است که مطابق رابطه (۶) بیان می‌گردد. افزایش سطح نفوذ DG، منجر به کاهش حساسیت ریکلوزر ابتدای خط می‌گردد. در این شرایط کاهش جریان خطای جاری شده از سمت پست اصلی منجر به عدم تشخیص خطا توسط ریکلوزر می‌گردد و می‌توان گفت ریکلوزر به حد تنظیمی نمی‌رسد. تجزیه و تحلیل حساسیت به منظور بررسی این مورد است که آیا ریکلوزر به اندازه کافی حساس است تا به ازای حداقل جریان خطای واقع شده در انتهای فیدر تحت حفاظت خود عمل نماید. این مورد به ازای برقراری هماهنگی بین هر دو تجهیز حفاظتی از رابطه (۶) قابل محاسبه است [۳۳]:

$$CF_2 = \frac{1}{Sensitivity} \quad (6)$$

$$Sensitivity = \frac{I_{SC}}{K \times I_{Load-Max}} \quad (7)$$

که  $I_{SC}$  جریان خطای گذرا از ریکلوزر، فاکتور اضافه بار و  $I_{Load-Max}$  حداکثر جریان تزریقی از منبع اصلی شبکه است که به کمک مطالعات پخش بار محاسبه می‌گردد. از آنجاییکه حداقل مقدار حساسیت ارائه شده در مرجع [۳۳] برابر ۱/۵ لحاظ می‌گردد، بنابراین مقدار  $CF_2$  همواره عددی کوچکتر از یک به دست می‌آید که در نهایت منجر به کاهش مقدار TDS عملکرد سریع ریکلوزر می‌گردد.

الف- محاسبه  $CF_1$

مطابق رابطه (۵) مقدار ضریب اصلاحی ( $CF_1$ ) متناسب با  $V_{sc-pu}$  (دامنه ولتاژ خطا در محل ریکلوزر ابتدای فیدر) کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که دامنه ولتاژ خطای مورد نیاز با یک ترانسفورماتور ولتاژ نصب‌شده در پست به دست می‌آید. به کمک  $CF_1$  عملکرد سریع ریکلوزر متناسب با تغییرات ولتاژ و مقدار ثابت  $k$  کاهش می‌یابد. ثابت  $k$  یک ضریب تنظیم جدید و با عنوان ضریب حساسیت به ولتاژ برای مشخصه ریکلوزر تعریف می‌شود.

$$CF_1 = \frac{1}{e^{|1-kV_{sc-pu}|}} \quad (5)$$

به ازای خطاهای ابتدای فیدر توزیع، ضریب  $CF_1$  کمتر از یک می‌شود و باعث کاهش زمان عملکرد ریکلوزر می‌گردد. از سوی دیگر، اگر خطا در انتهای فیدر رخ دهد، دامنه ولتاژ خطا بالا است و در نتیجه زمان عملکرد حالت سریع ریکلوزر کاهش کمتری خواهد داشت. مقدار ثابت  $k$  عدد ۳ در نظر گرفته شده است؛ زیرا مقدار بزرگ‌تر باعث افزایش بیش از حد حساسیت به ولتاژ می‌شود و به‌ازای کوچک‌ترین تغییرات ولتاژ، زمان عملکرد ریکلوزر، کاهش زیاد و نادرستی پیدا می‌کند. مقادیر کمتر نیز باعث کاهش حساسیت به ولتاژ می‌شود و در بدترین شرایط، احتمال عملکرد زودتر فیوز قبل از عملکرد سریع ریکلوزر تشدید می‌شود. جدول (۱) روند تغییرات پارامتر  $CF_1$  را به ازای تغییرات مکان خطا در شکل شبکه (۱) نشان می‌دهد.

جدول (۱): روند تغییرات پارامتر  $CF_1$  به ازای تغییرات مکان خطا در شکل شبکه (۱)

| شماره باس |      |      |      |      |      |      |      |      | مکان خطا |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| ۱         | ۲    | ۳    | ۴    | ۵    | ۶    | ۷    | ۸    | ۹    |          |
| ۰/۳۶      | ۰/۸  | ۰/۹  | ۰/۶۷ | ۰/۶  | ۰/۵۴ | ۰/۵  | ۰/۴۴ | ۰/۴  | K=2      |
| ۰/۳۶      | ۰/۸  | ۰/۵۲ | ۰/۳۳ | ۰/۲۹ | ۰/۲۵ | ۰/۲۱ | ۰/۱۸ | ۰/۱۶ | K=3      |
| ۰/۳۶      | ۰/۵۵ | ۰/۳  | ۰/۱۷ | ۰/۱۴ | ۰/۱۱ | ۰/۰۹ | ۰/۰۷ | ۰/۰۶ | K=4      |

تا مقدار دو برابر جریان نامی محدود می‌شود. اینورتر منابع PV قادر به تشخیص خطا از سایر اختلالات شبکه مانند تغییرات ناگهانی بار نیست، بنابراین در این شرایط منجر به خروج اشتباه و غیر ضروری منابع PV می‌گردد. بنابراین در این حالت یک روش کاربردی، محدود کردن جریان خروجی اینورتر PVها است، تا نه تنها از خروج غیر ضروری آنها جلوگیری شود بلکه اثر نامطلوب آنها بر هماهنگی تجهیزات حفاظتی حذف گردد. در مرحله دوم حفاظتی تا زمانی که افت ولتاژ دو سر اینورتر ( $V_{out}$ ) بزرگتر از ۰/۸۸ پریونیت باشد [۳۴]، جریان تزریقی اینورتر ( $I_{inv,inj}$ ) بر اساس جذب حداکثر توان از PVها محاسبه می‌گردد که به کمک رابطه (۸) بیان می‌گردد.

$$I_{inv,inj} = \frac{P_{Demand}}{V_{out}} \quad (8)$$

### ۲-۳- مرحله دوم حفاظتی

مرحله دوم طرح حفاظتی زمانی فعال می‌گردد که مرحله اول حفاظتی توانایی حفظ فیوز را نداشته باشد. در این شرایط به کمک کنترل جریان خروجی منابع PV، هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر به ازای وقوع خطا در پایین دست فیوز حفظ می‌گردد. منابع PV نصب‌شده در سیستم توزیع در شرایط نرمال عملکرد شبکه مثل منبع توان ثابت با ضریب توان واحد عمل می‌کنند. جریان تزریقی منابع PV در زمان خطا به ساختار اینورتر و نحوه اتصال آنها به شبکه وابسته است. شایان ذکر است این منابع حتی در شرایط خطا و کمبود ولتاژ ناشی از آن، با افزایش جریان خروجی اینورترشان، حداکثر توان خروجی را به سیستم توزیع تحویل می‌دهند. در این شرایط برای جلوگیری از آسیب‌رسیدن به اینورتر، جریان خروجی منابع فتوولتائیک

ریکلوزر قابل اعمال نباشد، مرحله دوم طرح حفظ فیوز فعال می‌گردد. در این مرحله اینورتر منابع PV که ولتاژ دو سر اینورتر آنها بیشتر از ۸۸٪ پرینویت باشد مطابق رابطه (۸) جریان  $I_{Inv.inj}$  را به شبکه تزریق می‌کنند و در غیر اینصورت سایر منابع PV به منظور محدود کردن جریان تزریقی به شبکه، مطابق رابطه (۹) عمل می‌نمایند و منجر می‌شوند که جریان خطای فیدر کاهش یابد و مجدداً بین مقدار  $I_{F-min}$  و  $I_{F-max}$  قرار گیرد.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

### ۵-۱- شبکه توزیع مورد مطالعه

در این بخش برای بررسی درستی عملکرد روش پیشنهادی، هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی یک فیدر واقعی با استفاده از نرم‌افزار ETAP مطالعه می‌شود. شکل (۴) شبکه مورد استفاده به منظور مطالعات شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که یک قسمت از شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت مورد بهره‌برداری در ایران است. شبکه مورد مطالعه شامل ۱۴ فیوز در شاخه‌های فرعی آن است. به عنوان مثال، F47 یک فیوز متصل در سر شاخه متصل به باس ۴۷ است. این شبکه توسط دو ترانسفورماتور قدرت ۶۳/۲۰ کیلوولت، 30MVA با اتصال Ynd1 و با راکتانس گذرای ۱۳/۷٪ تغذیه می‌شود. سطح جریان خطا در باس بار ۶۳ کیلوولت ۳/۵ کیلوآمپر است. دو ترانسفورماتور ۲۰/۰/۴ کیلوولت با اتصال ZNyn11، با راکتانس کمکی گذرا ۶/۵٪ متصل به باس بار ۲۰ کیلوولت برای تغذیه داخلی پست وجود دارد و همچنین یک مسیر زمین برای سیستم اتصال مثلث ۲۰ کیلوولت فراهم می‌کند. حداکثر جریان بار از فیدر اصلی ۲۰ کیلوولت، ۱۶۳ آمپر است. در این بخش، عملکرد توزیع در جدول (۲) ضمایم آورده شده است. در این بخش، عملکرد طرح پیشنهادی برای حالت‌های مختلف سیستم توزیع شامل تست در حضور واحدهای PV یا بدون آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج اتصال کوتاه به کمک مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار ETAP انجام گرفته است. در تمام حالت‌ها تست، مقدار TDS برای منحنی عملکرد کند و سریع استاندارد ریکلوزر به ترتیب، ۱ و ۰/۵ و  $I_{pickup}$  روی مقدار ۲۴۴/۵ تنظیم شده است. در این مقاله، حداقل مقدار قابل قبول CTI، ۱۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. حداقل مقدار TDS قابل اعمال به ریکلوزر مورد مطالعه در این مقاله ۰/۱ است.

### ۵-۲- حالت‌های مختلف

به منظور بررسی طرح حفظ فیوز پیشنهادی، چهار حالت برای ضریب نفوذها و مکان‌های متفاوت منابع PV در شبکه در نظر گرفته شده است. در حالت اول هیچ گونه منبع PV به سیستم توزیع متصل نیست و در سه حالت دیگر منابع PV در نقاط مختلف سیستم توزیع نصب شده است. در جدول (۳) چهار حالت مورد مطالعه نشان داده

در این رابطه  $P_{Demand}$  توان خروجی اینورتر و  $V_{out}$  ولتاژ موثر محل اتصال منبع PV به سیستم است. در این شرایط جریان تزریقی توسط اینورتر با ولتاژ دو سر آن رابطه‌ی عکس دارد و با کاهش ولتاژ به منظور جذب حداکثر توان، جریان خروجی آن افزایش می‌یابد. در غیر این صورت یعنی زمانی که  $V_{out}$  کوچکتر از ۰/۸۸ پرینویت باشد، هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی از بین می‌رود. در این حالت به منظور حذف اثر نامطلوب PVها بر هماهنگی فیوز و ریکلوزر، جریان تزریقی اینورتر دیگر بر اساس جذب حداکثر توان از سلول‌های فتولتائیک محاسبه نمی‌شود و مطابق رابطه (۹) برعکس حالت قبلی با کاهش ولتاژ در هنگام خطا، جریان تزریقی توسط اینورتر ( $I'_{Inv.inj}$ ) نیز کاهش می‌یابد.

$$I'_{Inv.inj} = (V_{out})^{-1} \times P_{Demand} = CLF \times P_{Demand} \quad (9)$$

جدول (۲) روند تغییرات فاکتور محدودکننده جریان (CLF) به ازای افت ولتاژ دو سر اینورتر منابع PV را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش ولتاژ، مقدار CLF نیز کاهش می‌یابد. در این شرایط، مطابق رابطه (۹) جریان خروجی اینورتر نیز کاهش خواهد یافت. کاهش جریان مذکور منجر به حفظ جریان خطا در محدوده مجاز جریان خطای فیدر می‌شود و در حقیقت هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر بازیابی می‌گردد.

جدول (۲): تغییرات پارامتر CLF به ازای ولتاژ دو سر اینورتر

| $V_{out}$ | ۰/۸۸ | ۰/۸  | ۰/۷۵ | ۰/۷ | ۰/۶۵ | ۰/۶  | ۰/۵۵ | ۰/۵  |
|-----------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| CLF       | ۰/۸۶ | ۰/۷۶ | ۰/۶۸ | ۰/۶ | ۰/۵  | ۰/۴۳ | ۰/۳۴ | ۰/۲۵ |

## ۴- الگوریتم حفاظتی پیشنهادی

در شکل (۳) الگوریتم نحوه عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی به منظور حفظ هماهنگی فیوز-ریکلوزر در شبکه توزیع شامل منابع PV، نشان داده شده است. مطابق الگوریتم ارائه شده در ابتدا محاسبات پخش بار شبکه به منظور تعیین حداکثر جریان عبوری از ابتدای فیدر توزیع ( $I_{Load-Max}$ ) انجام می‌شود. با فرض اینکه خطا در لحظه  $t=0$  ایجاد شود و در ابتدا ضریب نفوذ منابع PV صفر باشد مقدار جریان خطا ( $I_{sc}$ ) و مقدار حساسیت ریکلوزر مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد. در ادامه در صورتی که هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر برقرار باشد به‌صورت پله پله مقدار ضریب نفوذ منابع PV افزایش می‌یابد و این چرخه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر از بین رود، یا به عبارت دیگر فیوز زودتر از عملکرد حالت سریع ریکلوزر عمل نماید. در این شرایط طرح حفظ فیوز پیشنهادی فعال می‌شود و مقدار  $TDS_{New}$  از رابطه (۴) تعیین می‌گردد.

اگر مقدار  $TDS_{New}$  محاسبه شده به ریکلوزر قابل اعمال باشد، مرحله اول طرح حفظ فیوز پیشنهادی فعال می‌شود و زمان پیشنهادی ریکلوزر مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد تا مجدداً منحنی حالت عملکرد سریع ریکلوزر زیر منحنی عملکرد فیوز قرار گیرد و هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر بازیابی گردد. از طرف دیگر اگر مقدار  $TDS_{New}$  به

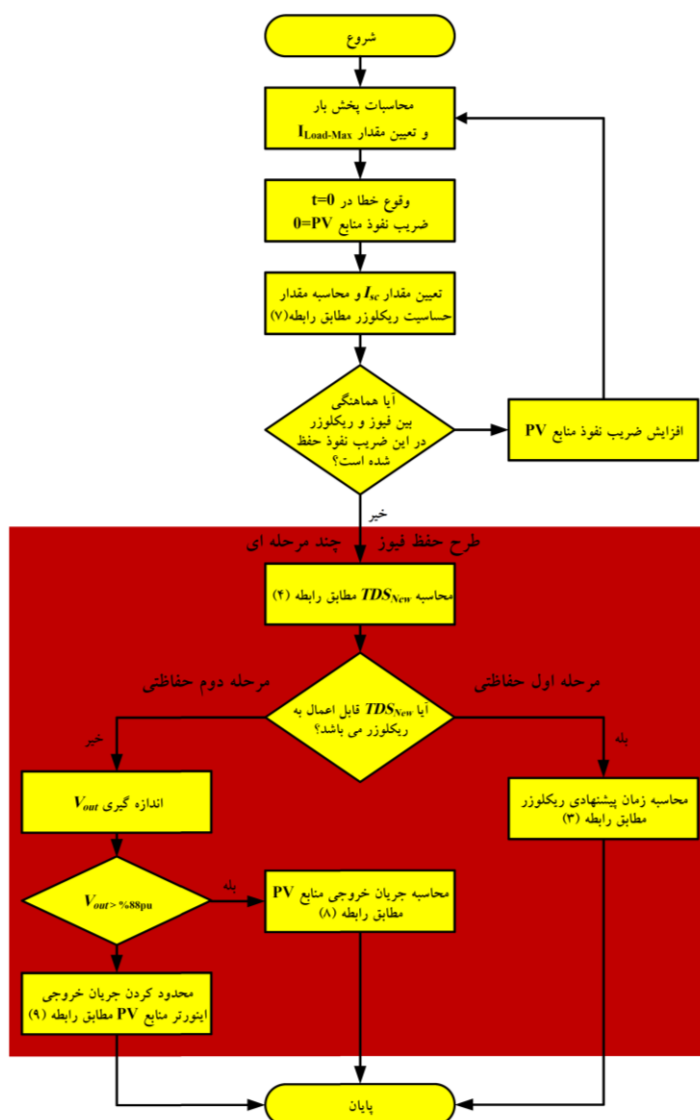
لازم به ذکر است حداقل و حداکثر جریان خطای فیدر مورد مطالعه به ترتیب ۱۵۰۰ و ۳۵۰۰ آمپر است.

شده است. حالت‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند در هر مرحله نسبت به مراحل قبل ضریب نفوذ منابع PV افزایش می‌یابد و از طرف دیگر مکان خطا نیز دورتر می‌شود. در حقیقت حالت ۴ معادل بدترین شرایط خطا است.

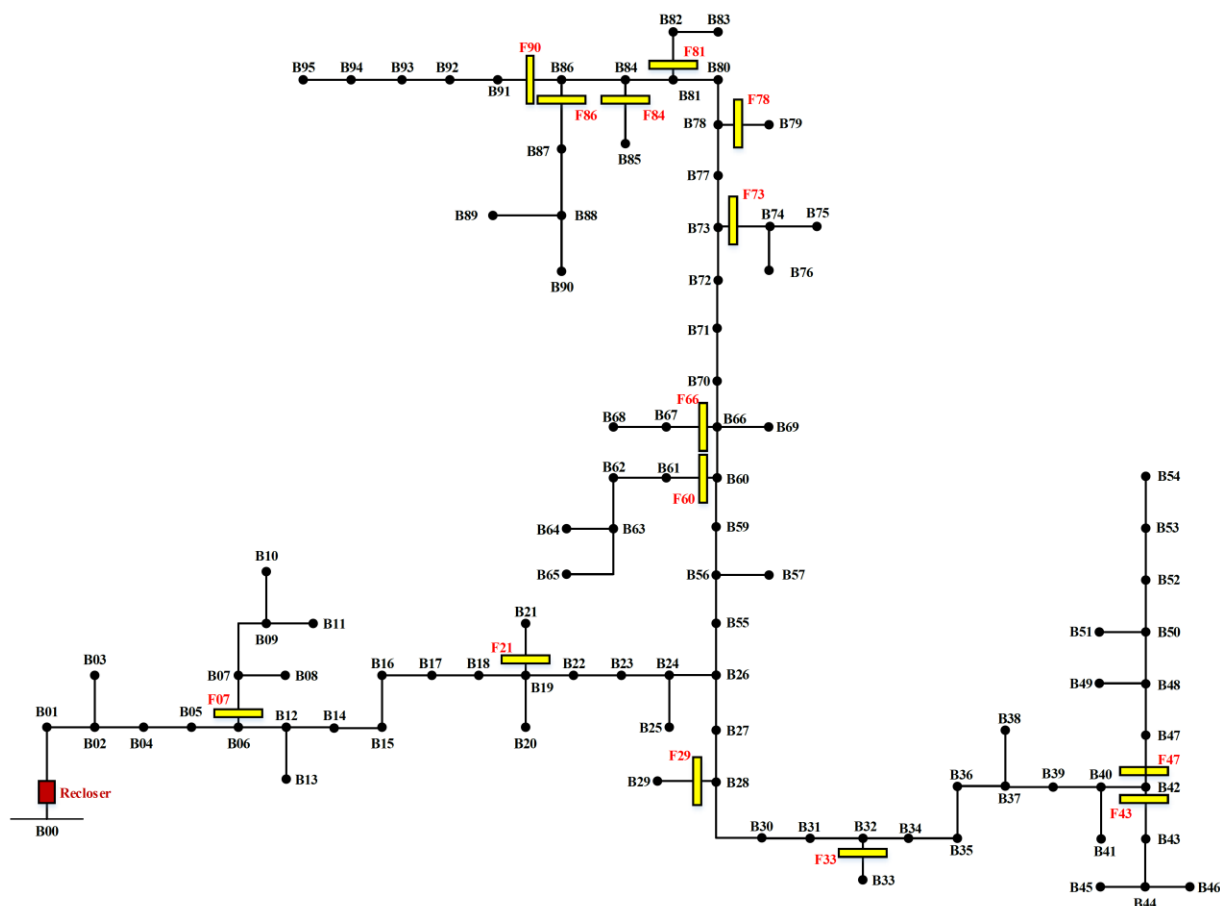
جدول (۳): حالت‌های مورد مطالعه

| حالت | تعداد منابع PV | باس محل اتصال منابع PV به DN |
|------|----------------|------------------------------|
| ۱    | ۰              | -                            |
| ۲    | ۳              | ۴۲                           |
| ۳    | ۴              | ۶۶                           |
| ۴    | ۵              | ۸۶                           |

مطابق شکل (۵) به کمک شبیه‌سازی اتصال کوتاه سه فاز و به ازای تغییرات ضریب نفوذهای منابع PV، مقدار جریان خطای فیدر به دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در حالت‌های ۲، ۳ و ۴ به ازای ضریب نفوذهای بیشتر از ۳۰ درصد مقدار جریان خطای فیدر ( $I_1$ ) از حداکثر جریان خطای فیدر ( $I_{F-max}$ ) بیشتر می‌شود و در حقیقت هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر از بین می‌رود.



شکل (۳): الگوریتم نحوه عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی به منظور حفظ هماهنگی فیوز - ریکلوزر در شبکه توزیع شامل منابع PV



شکل (۴): شبکه توزیع مورد مطالعه

می‌یابد و در محدوده مجاز  $I_{F-min}$  تا  $I_{F-max}$  قرار می‌گیرد و طرح حفظ فیوز بازیابی می‌گردد.

### ۵-۳- حداکثر ضریب نفوذ منابع PV

با فعال شدن مرحله دوم روش پیشنهادی در این مقاله نه تنها جریان خروجی منابع PV در لحظه خطا محدود می‌گردد، بلکه محدودیت اعمال  $TDS_{New}$  نیز مرتفع می‌گردد. بنابراین به نوعی می‌توان گفت روش پیشنهادی یک روش با ضریب نفوذ آزاد منابع PV است. با این حال به منظور نشان دادن محدودیت ضریب نفوذ سایر روش‌های ارائه شده جدول (۵) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد به ازای حالت‌های ۲، ۳ و ۴، روش‌های ارائه شده در مراجع [۱۱]، [۱۴] و [۳۵] نسبت به حالت استاندارد، به ازای ضریب نفوذهای بالاتری توانایی برقراری هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر را دارند، با این تفاوت که بر خلاف روش ارائه شده در مرجع [۱۱]، مراجع [۱۴] و [۳۵] نیاز به لینک‌های مخابراتی ندارد.

به‌منظور بازیابی هماهنگی فیوز و ریکلوزر، روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع شبیه‌سازی شده اعمال گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطالعات هماهنگی حفاظتی در جدول (۴) مشاهده می‌گردد.

مطابق جدول مذکور و با توجه به اینکه حداقل مقدار  $TDS_{New}$  قابل اعمال به ریکلوزر ۰/۱ است، به ترتیب به ازای حالت‌های ۲، ۳ و ۴ مرحله اول حفاظتی تا ضریب نفوذهای ۱۰۰، ۷۰ و ۶۰ درصد قابلیت اجرایی دارد. به عبارت دیگر هر چه خطا دورتر می‌شود و ضریب نفوذ منابع PV بیشتر می‌گردد، توانایی مرحله اول حفاظتی به منظور حفظ فیوز کمتر می‌گردد.

این موضوع نشان دهنده‌ی این است که روش اصلاح مشخصه ریکلوزر به تنهایی به عنوان یک عامل موثر، توانایی تضمین حفظ فیوز را ندارد. بنابراین مطابق شکل (۶) در حالت‌های ۳ و ۴ به ازای ضریب نفوذهای بالاتر از ۷۰ و ۶۰ درصد مرحله دوم حفاظتی فعال می‌گردد و با محدود کردن جریان تزریقی منابع PV، مقدار جریان خطای فیدر کاهش



جدول (۴): اصلاح ضریب تنظیم زمانی (TDS) عملکرد سریع ریکلوزر با مرحله اول حفاظتی

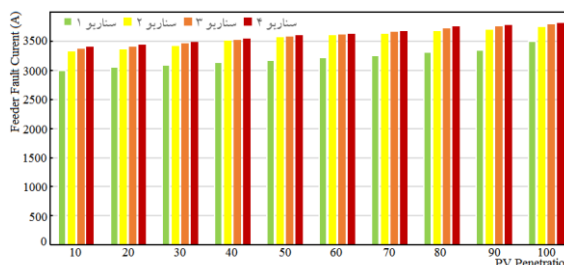
| ضریب نفوذ PV منابع | سناریو             |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    | ۲                  |                    |                    | ۳                  |                    |                    | ۴                  |                    |                    |
|                    | TDS <sub>New</sub> | CTI <sub>Std</sub> | CTI <sub>New</sub> | TDS <sub>New</sub> | CTI <sub>Std</sub> | CTI <sub>New</sub> | TDS <sub>New</sub> | CTI <sub>Std</sub> | CTI <sub>New</sub> |
| ۰                  | ۰/۴۸               | ۱۳۹                | ۲۰۸                | ۰/۴۵               | ۱۳۶                | ۲۰۰                | ۰/۴۲               | ۱۳۱                | ۱۹۳                |
| ۱۰                 | ۰/۴۵               | ۱۲۸                | ۱۹۵                | ۰/۴۱               | ۱۲۴                | ۱۸۸                | ۰/۳۸               | ۱۲۰                | ۱۷۶                |
| ۲۰                 | ۰/۴۳               | ۱۲۰                | ۱۸۷                | ۰/۳۵               | ۱۱۵                | ۱۷۲                | ۰/۳                | ۱۱۲                | ۱۶۱                |
| ۳۰                 | ۰/۴                | ۱۰۹                | ۱۷۴                | ۰/۲۷               | ۱۰۶                | ۱۶۲                | ۰/۲۴               | ۱۰۲                | ۱۴۵                |
| ۴۰                 | ۰/۳۵               | ۹۸                 | ۱۶۶                | ۰/۲۲               | ۹۵                 | ۱۴۳                | ۰/۱۹               | ۹۱                 | ۱۳۰                |
| ۵۰                 | ۰/۳۲               | ۸۶                 | ۱۵۳                | ۰/۱۷               | ۸۲                 | ۱۳۱                | ۰/۱۵               | ۷۹                 | ۱۱۲                |
| ۶۰                 | ۰/۲۹               | ۷۵                 | ۱۴۵                | ۰/۱۴               | ۷۳                 | ۱۱۵                | ۰/۱                | ۷۰                 | ۱۰۰                |
| ۷۰                 | ۰/۲۵               | ۶۶                 | ۱۳۶                | ۰/۱                | ۶۴                 | ۱۰۱                | -                  | ۶۱                 | -                  |
| ۸۰                 | ۰/۲۳               | ۵۴                 | ۱۲۸                | -                  | ۵۱                 | -                  | -                  | ۴۹                 | -                  |
| ۹۰                 | ۰/۱۸               | ۴۲                 | ۱۱۵                | -                  | ۳۹                 | -                  | -                  | ۳۷                 | -                  |
| ۱۰۰                | ۰/۱۲               | ۳۰                 | ۱۰۳                | -                  | ۲۸                 | -                  | -                  | ۲۵                 | -                  |

### ۶- نتیجه‌گیری

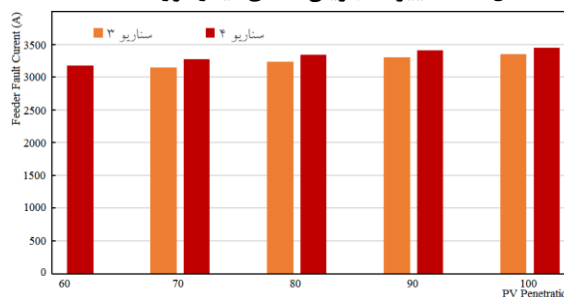
در این مقاله یک روش حفظ فیوز چند مرحله ای آنلاین با ضریب نفوذ آزاد منابع PV متصل به سیستم توزیع ارائه شده است. بر اساس طرح حفاظتی ارائه شده، در مرحله اول ضریب تنظیم زمانی عملکرد سریع ریکلوزر به صورت آنلاین اصلاح می‌گردد و در نتیجه به ازای وقوع خطا سریع‌تر از فیوز شاخه خطا عمل می‌نماید و ماهیت گذرا یا دائم خطا را بررسی می‌کند و در حقیقت منجر به حفظ فیوز می‌گردد. از آنجایی که اصلاح منحنی مشخصه سریع ریکلوزر به تنهایی توانایی حفظ فیوز به ازای تمامی حالت‌های اتصال کوتاه را ندارد، در نتیجه مرحله اول حفاظتی تا زمانی کاربرد دارد که مقدار ضریب تنظیم زمانی محاسبه شده به ریکلوزر شبکه قابل اعمال باشد، در غیر این صورت مرحله دوم حفاظتی فعال می‌شود. با توجه به اینکه مرحله دوم حفاظتی بر مبنای محدود کردن جریان خروجی منابع PV در لحظه خطا است، در نتیجه به ازای تمامی ضریب نفوذهای منابع PV، توانایی حفظ فیوز را در صورت وقوع خطا در پایین دست شبکه توزیع تضمین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی بیانگر توانایی طرح پیشنهادی به حفظ هماهنگی فیوز و ریکلوزر در بدترین شرایط خطا و بدون هیچ گونه محدودیت ضریب نفوذ منابع فتوولتائیک است.

### مراجع

[۱] شمس‌نیا ع، حسینی س.ج، دانیالی س، "مدلسازی و شبیه‌سازی اینورتر هیبرید با منابع انرژی تجدید پذیر سلول خورشیدی و توربین بادی مجهز به الگوریتم MPPT



شکل (۵): تغییرات جریان خطای فیدر مورد مطالعه



شکل (۶): کنترل جریان خطای فیدر با مرحله دوم حفاظتی

جدول (۵): حداکثر تعداد منابع PV متصل به DN

| باس محل اتصال منابع PV به DN | تعداد منابع PV |           |           | حالت استاندارد | حالت |
|------------------------------|----------------|-----------|-----------|----------------|------|
|                              | مرجع [۳۵]      | مرجع [۱۴] | مرجع [۱۱] |                |      |
| ۴۲                           | ۳              | ۳         | ۳         | ۱              | ۲    |
| ۶۶                           | ۳              | ۴         | ۳         | ۱              | ۳    |
| ۸۶                           | ۳              | ۴         | ۳         | ۱              | ۴    |

- saving in distribution networks with distributed generation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 28, No. 2, pp. 669-677, 2013.
- [14] S. Jamali, H. Borhani-Bahabadi, "Protection method for radial distribution systems with DG using local voltage measurements", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 34, pp. 651-660, 2019.
- [15] S. Jamali, H. Borhani-Bahabadi, "Non-communication protection method for meshed and radial distribution networks with synchronous-based DG", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 93, pp. 468-478, 2017.
- [۱۶] فانی ب.، کرباسچی ع.، "یک طرح حفاظتی فیوز - ریکلوزر مبتنی بر مشخصه زمان - جریان- ولتاژ در سیستم‌های توزیع شامل منابع فتوولتائیک"، نشریه روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۹، شماره ۳۵، صفحه ۱۱-۱۸، پائیز ۱۳۹۷.
- [۱۷] حاجی محمدی ف.، فانی ب.، "هماهنگی تطبیقی فیوز و ریکلوزر در سیستم‌های توزیع با ضریب نفوذ بالای منابع فتوولتائیک"، نشریه روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۸، شماره ۳۰، صفحه ۲۳-۳۲، تابستان ۱۳۹۶.
- [۱۸] حاجی محمدی ب.، فانی ب.، معظمی م.، "یک روش جدید هماهنگی هوشمند فیوز - ریکلوزر در سیستم‌های توزیع با ضریب نفوذ زیاد سلول‌های فتوولتائیک"، نشریه هوش محاسباتی در مهندسی برق، سال: ۹، شماره ۱، صفحه ۴۹-۶۵، بهار ۱۳۹۷.
- [19] M. Ebrahimpour, B. Vahidi, S. H. Hosseiniyan, "A hybrid superconducting fault current controller for DG networks and microgrids", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.23, No.5, pp.5604306-5604306, 2013.
- [20] R. K. Varma, S. A. Rahman, V. Atodaria, S. Mohan, T. Vanderheide, "Technique for fast detection of short circuit current in PV distributed generator", *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 3, No. 4, pp. 155-165, 2016.
- [21] Rajaei, N., Ahmed, M.H., Salama, M.M.A., Varma, R.K., "Fault current management using inverter-based distributed generators in smart grids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 5, No. 5, pp. 2183-2193, 2014.
- [22] S. Chaitusaney, 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.
- [23] H.A. Abdel-Ghany, A.M. Azmy, N.I. Elkalashy, E.M. Rashad, "Optimizing DG penetration in distribution networks concerning protection schemes and technical impact", *Electric Power System Research*, Vol. 11, pp. 113-122, 2015.
- [24] N. Rajaei, M. M. A. Salama, "Management of fault current contribution of synchronous DGs using inverter-based DGs", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 6, No. 6, pp. 3073-3081, 2015.
- [25] E. Ebrahimi, M. J. Sanjari, G. B. Gharehpetian, "Control of three-phase inverter-based DG system during fault condition without changing بهبودیافته"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال: ۱، شماره: ۲، ص: ۸-۱۸، زمستان ۱۳۹۱.
- [۲] باقری-طولابی ه.، شاکرمی م.، "ترکیب جدیدی از سیستم استنتاج فازی و الگوریتم علف‌های هرز به منظور بازاریابی همزمان با جابجایی و تعیین ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع"، نشریه روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۶، شماره: ۲۱، ص: ۲۰-۱۳، بهار ۱۳۹۴.
- [۳] روزبهی ش.، مرادی م.ح.، "بهینه سازی عملکرد واحدهای تولید پراکنده در یک بازار رقابتی با ترکیب تئوری بازی و الگوریتم تکاملی"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال: ۵، شماره: ۹، ص: ۱۱۲-۱۲۲، بهار و تابستان ۱۳۹۵.
- [۴] بیابانی ن.، رضانی م.، فلقی ح.، "افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده توسط جابجایی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در شبکه‌های توزیع"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال: ۱۲، شماره: ۱، ص: ۱۴-۲۴، بهار ۱۳۹۳.
- [5] G. Shahgholian, Z. Azimi, "Analysis and design of a DSTATCOM based on sliding mode control strategy for improvement of voltage sag in distribution systems", *Electronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 1-12, 2016.
- [6] K. Khani, G. Shahgholian, "Analysis and optimization of frequency control in isolated microgrid with double-fed induction-generators based wind turbine", *Journal of International Council on Electrical Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 24-37, 2019.
- [7] K. I. Jennette, C. D. Booth, F. Coffele, A. J. Roscoe, "Investigation of the sympathetic tripping problem in power systems with large penetrations of distributed generation", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 9, No. 4, pp.379-385, 2015.
- [8] T. Mashau, S. Kibaara, S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, "Impact of distributed generation on protection coordination in radial distribution Feeder", *Proceeding of the IEEE/UPEC*, pp. 1-5, Soest, Germany, 2011.
- [9] R. C. Dugan, D. T. Rzy, "Electric distribution protection problems associated with the interconnection of small, dispersed generation devices", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 103, No. 6, pp. 1121-1127, 1984.
- [10] J. F. Witte, S. R. Mendis, M. T. Bishop, J. A. Kischefsky, "Computer-aided recloser applications for distribution systems", *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 5, No. 3, pp. 27-32, 1992.
- [11] 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, 2014.
- [12] A. Conde, E. Vazque, "Operation logic proposed for time overcurrent relays", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2034-2039, 2007.
- [13] B. Hussain, S. M. Sharkh, S. Hussain, M. A. Abusara, "An adaptive relaying scheme for fuse

- [30] J. L. Blackburn, T. J. Domin, "Protective relaying: Principles and applications", CRC Press, Boca Raton, 4th edition, 2014.
- [31] IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, IEEE Standard C37, 112-1996.
- [32] A. F. Naiem, Y. Hegazy, A. Y. Abdelaziz, M. A. Elsharkawy, "A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 27, No. 1, pp. 176-185, 2012.
- [33] M. Y. Shih, A. Conde, Z. Leonowicz, 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.
- [34] IEEE 1547-2018, 'IEEE std 1547-2018 (revision of IEEE Std 1547-2003)', "IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces", (IEEE, USA, 2018)
- [35] S. Jamali, H. Borhani-Bahabadi, "A new recloser time-current-voltage characteristic for fuse saving in distribution networks with DG", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 11, No. 1, pp. 272-279, 2017.
- protection coordination", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 63, pp. 814-823, Dec. 2014.
- [26] V. C. Nikolaidis, E. Papanikolaou, 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.
- [27] A. Sinclair, D. Finney, D. Martin, et al, "Distance protection in distribution systems, how it assists with integrating distributed resources", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 50, pp. 2186-2196, 2014.
- [28] 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 & Distribution*, Vol. 11, pp. 1605-1612, 2017.
- [29] D. K. Ibrahim, E. E. D. A. E. Zahab, S. A. E. A. Mostafa, "New coordination approach to minimize the number of re-adjusted relays when adding DGs in interconnected power systems with a minimum value of fault current limiter", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 85, pp. 32-41, 2017.

## ضمایم

ضمیمه (۱): مشخصه زمان - جریان رله‌های جریان زیاد

| مد کاری رله  | A    | B | P    |
|--------------|------|---|------|
| استاندارد    | ۰/۱۴ | ۰ | ۰/۰۲ |
| بسیار معکوس  | ۱۳/۵ | ۰ | ۱    |
| شدیداً معکوس | ۸۰   | ۰ | ۲    |

ضمیمه (۲): مشخصات سیستم توزیع مورد مطالعه

| Line Name | From | To  | R(Ω)  | X(Ω)  | Load (KVA) | Line Name | From | To  | R(Ω)  | X(Ω)  | Load (KVA) |
|-----------|------|-----|-------|-------|------------|-----------|------|-----|-------|-------|------------|
| L01       | B00  | B01 | 0.113 | 0.144 | 84         | L48       | B47  | B48 | 0.045 | 0.037 | 38         |
| L02       | B01  | B02 | 0.126 | 0.161 | 0          | L49       | B48  | B49 | 0.118 | 0.096 | 75         |
| L03       | B02  | B03 | 0.030 | 0.024 | 154        | L50       | B48  | B50 | 0.114 | 0.092 | 75         |
| L04       | B02  | B04 | 0.089 | 0.114 | 213        | L51       | B50  | B51 | 0.091 | 0.074 | 75         |
| L05       | B04  | B05 | 0.049 | 0.062 | 151        | L52       | B50  | B52 | 0.159 | 0.129 | 75         |
| L06       | B05  | B06 | 0.098 | 0.125 | 0          | L53       | B52  | B53 | 0.191 | 0.155 | 75         |
| L07       | B06  | B07 | 0.745 | 0.605 | 0          | L54       | B53  | B54 | 0.200 | 0.162 | 75         |
| L08       | B07  | B08 | 0.101 | 0.082 | 19         | L55       | B26  | B55 | 0.182 | 0.232 | 19         |
| L09       | B07  | B09 | 0.067 | 0.054 | 150        | L56       | B55  | B56 | 0.179 | 0.228 | 0          |
| L10       | B09  | B10 | 0.109 | 0.089 | 19         | L57       | B56  | B57 | 0.111 | 0.090 | 38         |
| L11       | B09  | B11 | 0.186 | 0.151 | 19         | L58       | B56  | B59 | 0.094 | 0.119 | 150        |
| L12       | B06  | B12 | 0.049 | 0.062 | 0          | L59       | B59  | B60 | 0.014 | 0.017 | 0          |
| L13       | B12  | B13 | 0.025 | 0.021 | 236        | L60       | B60  | B61 | 0.143 | 0.116 | 0          |
| L14       | B12  | B14 | 0.066 | 0.084 | 19         | L61       | B61  | B62 | 0.032 | 0.026 | 75         |
| L15       | B14  | B15 | 0.162 | 0.207 | 19         | L62       | B62  | B63 | 0.023 | 0.018 | 0          |
| L16       | B15  | B16 | 0.134 | 0.171 | 188        | L63       | B63  | B64 | 0.036 | 0.030 | 75         |
| L17       | B16  | B17 | 0.260 | 0.332 | 75         | L64       | B63  | B65 | 0.098 | 0.080 | 19         |
| L18       | B17  | B18 | 0.109 | 0.139 | 19         | L65       | B60  | B66 | 0.220 | 0.280 | 0          |
| L19       | B18  | B19 | 0.166 | 0.212 | 0          | L66       | B66  | B67 | 0.005 | 0.004 | 188        |

|     |     |     |       |       |     |     |     |     |       |       |     |
|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----|
| L20 | B19 | B20 | 0.069 | 0.056 | 75  | L67 | B67 | B68 | 0.131 | 0.106 | 19  |
| L21 | B19 | B21 | 0.175 | 0.142 | 19  | L68 | B66 | B69 | 0.068 | 0.055 | 150 |
| L22 | B19 | B22 | 0.027 | 0.035 | 38  | L69 | B66 | B70 | 0.077 | 0.099 | 75  |
| L23 | B22 | B23 | 0.080 | 0.102 | 38  | L70 | B70 | B71 | 0.029 | 0.037 | 0   |
| L24 | B23 | B24 | 0.107 | 0.137 | 0   | L71 | B71 | B72 | 0.054 | 0.069 | 19  |
| L25 | B24 | B25 | 0.052 | 0.042 | 19  | L72 | B72 | B73 | 0.082 | 0.104 | 0   |
| L26 | B24 | B26 | 0.067 | 0.086 | 0   | L73 | B73 | B74 | 0.040 | 0.033 | 0   |
| L27 | B26 | B27 | 0.049 | 0.062 | 150 | L74 | B74 | B75 | 0.110 | 0.089 | 38  |
| L28 | B27 | B28 | 0.034 | 0.043 | 0   | L75 | B74 | B76 | 0.066 | 0.054 | 38  |
| L29 | B28 | B29 | 0.309 | 0.251 | 120 | L76 | B73 | B77 | 0.068 | 0.087 | 38  |
| L30 | B28 | B30 | 0.194 | 0.247 | 150 | L77 | B77 | B78 | 0.054 | 0.069 | 0   |
| L31 | B30 | B31 | 0.117 | 0.149 | 75  | L78 | B78 | B79 | 0.157 | 0.127 | 75  |
| L32 | B31 | B32 | 0.050 | 0.064 | 0   | L79 | B78 | B80 | 0.060 | 0.077 | 120 |
| L33 | B32 | B33 | 0.263 | 0.214 | 75  | L80 | B80 | B81 | 0.034 | 0.044 | 0   |
| L34 | B32 | B34 | 0.176 | 0.225 | 150 | L81 | B81 | B82 | 0.026 | 0.033 | 38  |
| L35 | B34 | B35 | 0.193 | 0.246 | 75  | L82 | B82 | B83 | 0.140 | 0.178 | 38  |
| L36 | B35 | B36 | 0.165 | 0.211 | 150 | L83 | B81 | B84 | 0.027 | 0.035 | 0   |
| L37 | B36 | B37 | 0.176 | 0.225 | 0   | L84 | B84 | B85 | 0.283 | 0.230 | 150 |
| L38 | B37 | B38 | 0.033 | 0.042 | 75  | L85 | B84 | B86 | 0.244 | 0.311 | 75  |
| L39 | B37 | B39 | 0.190 | 0.242 | 75  | L86 | B86 | B87 | 0.247 | 0.201 | 75  |
| L40 | B39 | B40 | 0.054 | 0.069 | 0   | L87 | B87 | B88 | 0.091 | 0.074 | 0   |
| L41 | B40 | B41 | 0.045 | 0.037 | 75  | L88 | B88 | B89 | 0.069 | 0.056 | 75  |
| L42 | B40 | B42 | 0.136 | 0.173 | 0   | L89 | B88 | B90 | 0.081 | 0.066 | 75  |
| L43 | B42 | B43 | 0.091 | 0.074 | 75  | L90 | B86 | B91 | 0.131 | 0.167 | 75  |
| L44 | B43 | B44 | 0.068 | 0.055 | 0   | L91 | B91 | B92 | 0.122 | 0.156 | 75  |
| L45 | B44 | B45 | 0.272 | 0.221 | 75  | L92 | B92 | B93 | 0.108 | 0.138 | 38  |
| L46 | B44 | B46 | 0.227 | 0.185 | 75  | L93 | B93 | B94 | 0.013 | 0.016 | 75  |
| L47 | B42 | B47 | 0.204 | 0.166 | 75  | L94 | B94 | B95 | 0.542 | 0.692 | 38  |

### زیرنویس:

1. Protection Scheme
2. PV Penetration Rate
3. Time Dial Setting (TDS)
4. Distributed Generation (DG)
5. Recloser Sensitivity