

## **A New intelligent method of Fuse – Recloser Coordination in a Distribution System with High PV Penetration Rates**

**Farzad Hajimohammadi<sup>1,2</sup>, Bahador Fani<sup>1,2</sup>, Majid Moazzami<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

### **Abstract:**

Employment of photovoltaic (PV) distributed generation (DG) in the distribution system, leads to improvement of network voltage profile and help to generate the power required by the network. Beside the mentioned advantages, increment of these sources penetration rate cause miscoordination between fuses and recloser. In this paper a new adaptive intelligent method of fuse – recloser coordination in distribution systems with high PV penetration rates is presented. The proposed method is a two-phase approach which operates proportional to the connected photovoltaic systems penetration rate. The first phase is based on an adaptive modification of fast operation curve of recloser, proportional to current term of the branch fuse maximum fault current to recloser current which is located at the beginning of the feeder. The second phase is according to modification of fast operation characteristic of recloser, proportional to voltage drop in fault inception period at the recloser location. By using this method, not only the avoidance of unnecessary exits of PV resources, but also the operation of fuse-saving is possible with adaptive correction of the fast-performance curve of the recloser.

**Keywords:** Distribution system, Adaptive coordination of fuse – recloser, photovoltaic resource

## یک روش جدید هماهنگی هوشمند فیوز - ریکلوزر در سیستم‌های توزیع با

### ضریب نفوذ زیاد سلول‌های فتوولتائیک

فرزاد حاجی‌محمدی<sup>۱</sup>، بهادر فانی<sup>۱</sup>، مجید معظمی<sup>۲</sup>

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

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

farzad.hajimohammadi@gmail.com, bahador.fani@gmail.com,  
m\_moazzami@pel.iaun.ac.ir

**چکیده:** نصب تولیدات پراکنده فتوولتائیک در سیستم توزیع به بهبود پروفایل ولتاژ و کمک به تولید توان مورد نیاز شبکه منجر می‌شود. علاوه بر مزایای یادشده، افزایش ضریب نفوذ این منابع در سیستم، ایجاد ناهماهنگی حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر را موجب می‌شود. در مقاله حاضر، روش هوشمند تطبیقی به منظور حفظ هماهنگی فیوز و ریکلوزر در سیستم‌های توزیع با ضریب نفوذ بیشتر منابع فتوولتائیک ارائه شده است. روش پیشنهادی، روش هوشمند دو فازی است که متناسب با ضریب نفوذ سیستم‌های فتوولتائیک متصل به سیستم عمل می‌کند. فاز نخست بر اساس اصلاح تطبیقی منحنی عملکرد سریع ریکلوزر متناسب با جمله جریانی نسبت حداکثر جریان خطای عبوری از فیوز شاخه خطا به ریکلوزر ابتدای خط و فاز دوم بر مبنای اصلاح تطبیقی منحنی عملکرد سریع ریکلوزر با استفاده از جمله ولتاژی افت ولتاژ محل نصب ریکلوزر در صورت وقوع خطا عمل می‌کند. با استفاده از این روش نه تنها از خروج غیرضروری منابع PV جلوگیری می‌شود، متناسب با اصلاح تطبیقی منحنی عملکرد سریع ریکلوزر، عمل حفظ فیوز امکان‌پذیر است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم‌های توزیع، هماهنگی تطبیقی فیوز و ریکلوزر، منابع فتوولتائیک

### ۱- مقدمه

سهم جریان تزریقی تولیدات پراکنده، حفاظت سیستم با مشکل روبه‌رو شده است [۱-۵].

بیشتر طرح‌های حفاظتی موجود در سیستم‌های توزیع شعاعی شامل هماهنگی بین فیوز با ریکلوزر و رله‌های اضافه جریان است. در عمل به‌ازای وقوع خطا در پایین دست فیوزهای نصب‌شده در ابتدای شاخه‌های فرعی سیستم توزیع، عملکرد سریع ریکلوزر قبل از سوختن فیوز، باید ماهیت گذرا یا دائم‌بودن خطا را بررسی کند؛ اما به دلیل تزریق جریان اضافی منابع DG، جریان خطای دیده‌شده با فیوز، بیشتر از ریکلوزر ابتدای خط خواهد بود و به عملکرد زودتر فیوز منجر می‌شود [۶-۷].

در سال‌های اخیر نصب منابع تولید پراکنده فتوولتائیک در سیستم‌های قدرت الکتریکی با هدف بهبود پایداری سیستم و رعایت مسائل زیست‌محیطی روند روبه‌رشدی داشته است؛ اما از طرف دیگر، در شرایط وقوع خطا به دلیل

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۶

نام نویسنده مسئول: مجید معظمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - نجف‌آباد - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف‌آباد - دانشکده مهندسی برق.

خطا به منظور کنترل سطح جریان خطا و حفظ هماهنگی فیوز و ریکلوزر در سیستم‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده در مراجع [۱۷-۱۴] پیشنهاد شده است. نصب محدودکننده‌های جریان خطا به دلیل قیمت بالا و همچنین نیاز به مطالعات و آزمایشات بیشتر برای اطمینان از طراحی صحیح (جایابی بهینه در سیستم قدرت و انتخاب مقاومت مناسب) روشی کاربردی نیست.

در دسته چهارم به اصلاح ساختار سیستم حفاظتی پرداخته می‌شود. این روش بر مبنای استفاده از ریکلوزرها و کلیدهای قدرت اضافی است و نیاز به اصلاح آرایش سیستم قدرت و حتی استفاده از حفاظت دیستانس را نیز دارد [۲۱-۱۸]. واضح است این روش‌ها به هزینه‌های درخور توجه و نصب تجهیزات اضافی نیاز دارد.

دسته پنجم از روش‌های حفاظتی ارائه شده در این زمینه، استفاده از مشخصه‌های غیراستاندارد زمان - جریان - ولتاژ برای کاهش زمان عملکرد حالت سریع ریکلوزر است [۲۵-۲۲]. به منظور اعمال این دسته از روش‌ها به ریکلوزرهای مبتنی بر ریزپردازنده نیاز است. برای اعمال ترم ولتاژی ارائه شده در این مقالات، ریکلوزر نصب شده در ابتدای خط باید پورت ورودی ولتاژ داشته باشد.

در مراجع [۲۸-۲۶] روشی‌هایی بر مبنای کنترل جریان خروجی منابع DG در مدت زمان وقوع خطا ارائه شده است که دسته ششم روش‌های حفاظتی است. روش‌های ارائه شده در این مقالات به منظور محدود کردن جریان به توپولوژی شبکه وابسته است و قابلیت تطبیق پذیری با شرایط جدید و تعمیم برای سایر شبکه‌ها را ندارد. از طرف دیگر، در این روش‌ها توان قابل استحصال از منابع PV به خصوص در افت ولتاژهای پایین به شدت کاهش می‌یابد که این موضوع امری نامطلوب است.

در نهایت مقایسه کلی و جامع بین شش دسته روش در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این مقایسه با توجه به سرعت عملکرد، قابلیت پیاده‌سازی و محدودیت‌های اجرایی روش‌های بیان شده است.

به منظور حذف اثر منفی منابع تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر بر طرح‌های حفاظتی معمول، روش‌های متعددی در مقالات مختلف ارائه شده است که به شش دسته کلی تقسیم می‌شوند:

یکی از ساده‌ترین راه‌ها که در ابتدای ورود منابع پراکنده به سیستم‌های توزیع و فوق توزیع، پیشنهاد و استفاده شد، قطع منابع پراکنده به محض وقوع اتصال کوتاه است [۹-۸]. به این ترتیب، قبل از عملکرد حفاظت فیدرها منشأ تغییر در جریان اتصال کوتاه و به هم خوردن هماهنگی، از مدار خارج می‌شود؛ بنابراین طرح حفاظتی همانند قبل از ورود منابع پراکنده عملکرد مناسب خود را دارد. این روش به دلایلی، مطلوب نیست؛ زیرا در حالت حفاظت‌های سریع مثل عملکرد ریکلوزر قابل پیاده‌سازی نیست، مگر منابع تولید پراکنده سرعت قطع سریع‌تری داشته باشند که با توجه به عملکرد ریکلوزرهای نسل جدید در کمتر از ۶ سیکل بعد از وقوع خطا، دیگر این روش عملی نیست. به علاوه بیرون رفتن این منابع مزایای مربوط به نصب آنها را از سیستم سلب می‌کند. درحقیقت در این شرایط، سهم توان تولیدی منابع تولید پراکنده به‌طور کامل قطع می‌شود و نه تنها موجب افزایش ناگهانی جریان ابتدای خط به منظور جبران توان از دست‌رفته از سمت این منابع می‌شود، بهبود پروفیل ولتاژ شبکه که در حضور این منابع مشاهده می‌شود نیز از دست خواهد رفت. از طرف دیگر، وصل مجدد آنها به سیستم نیز امری زمان‌بر است؛ بنابراین در حد امکان باید از خروج بی‌دلیل آنها جلوگیری کرد.

دسته دوم بر روش‌های پیشگیرانه تمرکز دارد. در مراجع [۱۳-۱۰] مبنای محاسبات تنظیمات تجهیزات حفاظتی، ماکزیمم ضریب نفوذ منابع DG متصل به سیستم توزیع است؛ تا جایی که مشکل حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر رخ ندهد. درخور ذکر است نقطه ضعف این روش، محدود کردن ضریب نفوذ این منابع است که امری نامطلوب است.

دسته سوم استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا (FCL) را توصیه می‌کند. کاربرد محدودکننده‌های جریان

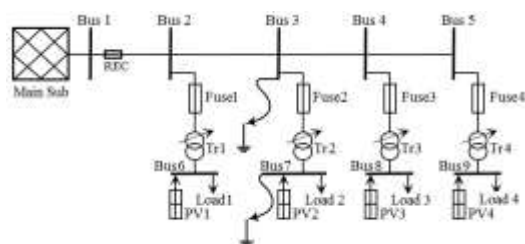
جدول (۱): مقایسه بین روش‌های ارائه‌شده در زمینه حفظ فیوز در سیستم‌های توزیع در حضور منابع PV

ردیف	روش ارائه‌شده	سرعت عملکرد	قابلیت پیاده‌سازی	محدودیت‌های اجرایی
۱	قطع منابع پراکنده	حداقل ۶ سیکل بعد از خطا	آنلاین	۱- غیرکاربردی در حالت استفاده از ریکلوزرهای دیجیتال ۲- وصل مجدد زمان بر
۲	تعیین حداکثر ضریب نفوذ DG	---	آفلاین	محدود کردن ضریب نفوذ
۳	FCL	آنی	آفلاین	۱- هزینه زیاد ۲- وابسته بودن مشخصات FCL به توپولوژی شبکه
۴	اصلاح ساختار حفاظتی	---	آفلاین	هزینه بالا
۵	مشخصه غیراستاندارد	کمتر از ۶ سیکل بعد از خطا	آنلاین	نیازمند ریکلوزرهای دیجیتالی
۶	کنترل جریان خروجی DG	حداقل ۶ سیکل بعد از خطا	آنلاین	محدود کردن توان تزریقی

## ۲- تأثیر پروفایل ولتاژ سیستم بر پروفایل جریان خطای ابتدای خط در سیستم توزیع با نفوذ زیاد منابع PV

در این قسمت به بررسی هماهنگی حفاظتی در سیستم توزیع با ضریب نفوذ بیشتر منابع PV پرداخته شده است. با توجه به تأثیر مکان وقوع خطا و مقدار ولتاژ باس بارهای سیستم توزیع در لحظه خطا بر عملکرد سیستم حفاظتی، در این بخش ابتدا پروفایل‌های ولتاژ شبکه قبل از وقوع خطا و تغییرات پروفایل جریان ابتدای خط در لحظه خطا بررسی می‌شود.

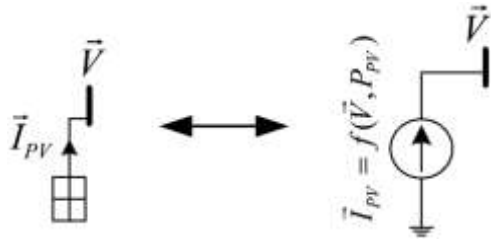
در ادامه، اثر منابع PV با ضریب نفوذ بیشتر روی هماهنگی سیستم حفاظتی ارائه می‌شود. در شکل (۱) شبکه توزیع با نفوذ بیشتر منابع PV خانگی نشان داده شده است.



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

منابع فتوولتائیک نصب‌شده در سیستم توزیع مورد مطالعه در شرایط نرمال عملکرد شبکه مثل منبع توان ثابت با

در مقاله حاضر، روش هوشمند حفاظتی شامل دو فاز عملکرد و بر اساس ضریب نفوذ منابع فتوولتائیک ارائه شده است. مطابق این روش جدید در فاز اول به منظور شیفت منحنی مشخصه عملکرد سریع ریکلوزر از یک جمله جریانی استفاده می‌شود و در فاز دوم، اصلاح مشخصه عملکرد سریع ریکلوزر بر مبنای یک جمله ولتاژی در مدت زمان وقوع خطا صورت می‌گیرد. در این ساختار با توجه به اندازه گیری محلی ولتاژ در فاز دوم به لینک مخابراتی نیاز نیست. در ادامه مقاله در بخش (۲) به بررسی تأثیر پروفایل ولتاژ سیستم قبل از وقوع خطا بر پروفایل جریان ابتدای خط در لحظه وقوع خطا در سیستم‌های توزیع با ضریب نفوذ بیشتر منابع فتوولتائیک پرداخته می‌شود. سپس بر اساس تغییرات پروفایل جریان خطا، شاخصی برای تعیین محل وقوع خطا در سیستم توزیع در حضور منابع PV ارائه می‌شود. در بخش (۳)، اثر سیستم‌های PV بر حفاظت الکتریکی سیستم‌های توزیع بررسی شده است. روش هوشمند تطبیقی پیشنهادی در بخش (۴) آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بخش (۵) آورده شده‌اند که بیان‌کننده درستی عملکرد روش پیشنهادی است. در نهایت، در بخش (۶) نتیجه گیری مقاله ارائه شده است.



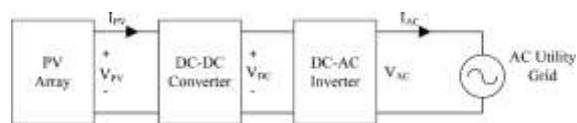
شکل (۴): مدل پنل PV به منظور آنالیز خطا

به سبب اینکه منابع PV به صورت محلی بارها را تغذیه می‌کنند، سطح ولتاژ هر باس وابسته به سطح توان تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک در مقایسه با توان مصرفی بارهای متصل شده به آن باس است. مطابق شکل (۵-الف) زمانی که توان تولیدی سیستم‌های PV از مقدار توان مصرفی بارها بیشتر باشد، امکان برگشت توان تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک به شبکه بالادست وجود دارد؛ بنابراین سطح ولتاژ در طول شبکه به سمت باس‌های انتهایی فیدر توزیع افزایش می‌یابد. در این شرایط بر اساس شکل (۵-ب) در لحظه وقوع خطا با خروج منابع PV محل خطا، ولتاژ شبکه کاهش می‌یابد و جریان ابتدای خط تغییرات کمی خواهد داشت؛ اما با گذشت زمان از لحظه وقوع خطا تعداد منابع فتوولتائیک خارج شده افزایش می‌یابد و حمایت ولتاژی شبکه کمتر می‌شود و به افزایش تغییرات در پله‌های آخر پروفایل جریان خطای ابتدای فیدر منجر می‌شود.

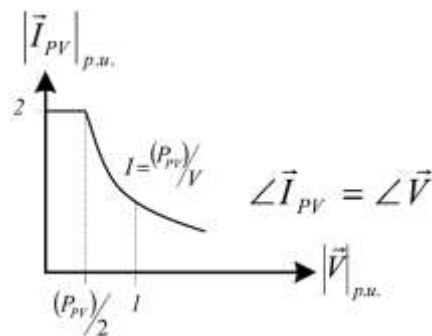
از طرف دیگر، اگر توان مصرفی بیشتر از مقدار توان تولیدی PVها باشد، ولتاژ در طول خط به سمت انتهای فیدر کاهش خواهد یافت و مطابق شکل (۶-الف) شاهد پروفیل ولتاژ نزولی خواهیم بود. در این شرایط، با خروج منابع PV محل وقوع خطا، مقادیر ولتاژ شبکه در سطح پایین‌تری در مقایسه با پروفایل ولتاژ صعودی قرار می‌گیرد؛ در نتیجه، بر اساس استاندارد IEEE929 تعداد بیشتری از منابع PV از شبکه جدا خواهند شد و تغییرات جریان در ابتدای فیدر بیشتر می‌شوند [۳۰]. با گذشت زمان از لحظه وقوع خطا با خروج تعداد کمتری از منابع فتوولتائیک، تغییرات جریان ابتدای خط کاهش می‌یابد؛ بنابراین شاهد کاهش تغییرات جریان خطا در پله‌های آخر پروفایل جریان خطای ابتدای فیدر خواهیم بود که در شکل (۶-ب) نمایش داده شده است.

ضریب توان واحد عمل می‌کنند. درحقیقت توان راکتیو تولیدی با این منابع در شبیه‌سازی‌های آتی لحاظ نشده است. جریان اتصال کوتاه تزریقی با منابع فتوولتائیک 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 تا مقدار دو برابر جریان نامی محدود می‌شود [۲۹].

شکل (۲) اجزای اصلی سیستم نوعی فتوولتائیک متصل به شبکه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل آرایه‌های فتوولتائیک، مبدل DC-DC و اینورتر DC-AC اجزای اصلی این سیستم اند. رفتار اینورتر منابع PV نصب‌شده در سیستم مورد مطالعه بر اساس مشخصه V-I شکل (۳) است. مطابق این مشخصه در شرایط وقوع خطا و کاهش ناگهانی ولتاژ دوسر اینورتر منابع PV، جریان تزریقی با این منابع به سیستم توزیع تا حد دو برابر جریان نامی آن محدود می‌شود. درخور ذکر است شکل (۴) مدل پنل فتوولتائیک شبیه‌سازی شده به‌ازای شرایط خطا را نشان می‌دهد. بر اساس این مدل، صفحات خورشیدی به‌منظور آنالیز خطا مانند منبع جریان کنترل‌شونده عمل می‌کند که دامنه جریان خروجی آنها به ولتاژ دو سر ترمینال خروجی و سطح توان منبع بستگی دارد.



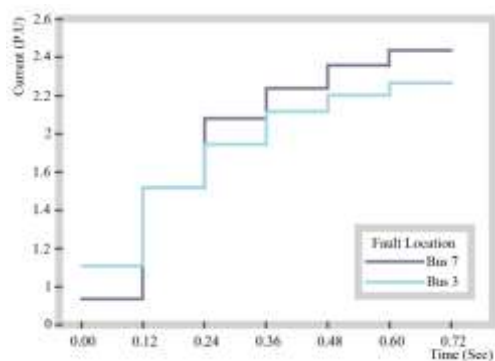
شکل (۲): اجزای اصلی سیستم فتوولتائیک نوعی



شکل (۳): مشخصه V-I سیستم فتوولتائیک

شرایط جریان خطای ابتدای فیدر فقط با خروج PVهای بالادست محل وقوع خطا (یعنی PV1 و PV2) تغییر می‌کند. در این حالت PVهای پایین دست خطا (PV3 و PV4) اثری بر این جریان نخواهند داشت. در این شرایط با تزریق جریان PV3 و PV4 به محل خطا، پتانسیل باس ۳ تغییر چندانی ندارد و جریان ابتدای خط تقریباً مستقل از جریان PVهای پایین دست خطا خواهد بود.

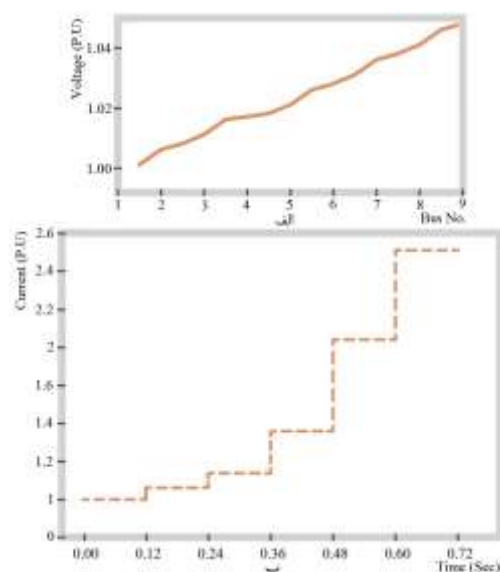
اگر خطا در طرف ولتاژ کم سیستم (برای نمونه، باس شماره ۷) رخ دهد، با توجه به طولانی‌تر شدن مسیر جریان خطا تا محل وقوع خطا، جریان‌های تزریقی از سمت PVهای پایین دست، ولتاژی را در باس ۳ ایجاد می‌کنند؛ بنابراین در این حالت PVهای پایین دست خطا نیز بر جریان ابتدای خطا اثر خواهند گذاشت. به‌علاوه منابع PV واقع در بالادست خطا (یعنی PV1 و PV2) صرف‌نظر از محل وقوع خطا و متناسب با ولتاژی که در ترمینال خود ایجاد می‌کنند، بر جریان ابتدای فیدر اثر دارند. در این حالت تغییرات جریان خطا ناشی از خروج منابع PV نسبت به حالت قبل دارای تغییرات چشمگیرتری است. در شکل (۷) نحوه تغییرات جریان خطای ابتدای فیدر به‌ازای وقوع خطا در باس‌های شماره ۳ و شماره ۷ سیستم شکل (۱) نشان داده شده است.



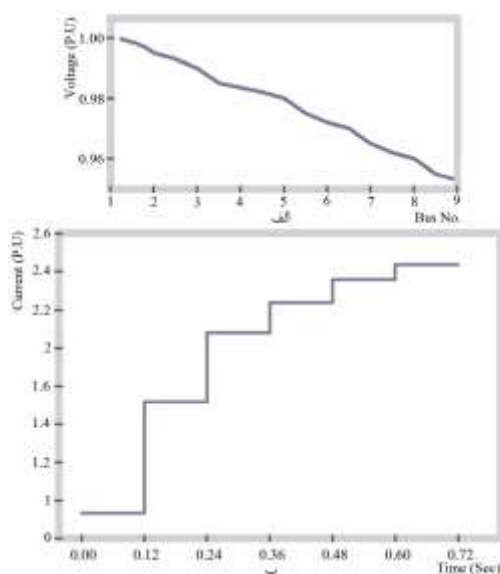
شکل (۷): جریان ابتدای فیدر به‌ازای وقوع خطا در سیستم توزیع نشان داده شده در شکل (۱)

برای تعیین مکان وقوع خطا از نسبت تعریف‌شده در رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$FLI = \frac{I_2 - I_1}{I_2} \quad (1)$$



شکل (۵): پروفایل جریان در حالت پروفایل ولتاژ صعودی در سیستم‌های توزیع شامل منابع PV



شکل (۶): پروفایل جریان در حالت پروفایل ولتاژ نزولی در سیستم‌های توزیع شامل منابع PV

## ۲-۱- تشخیص محل وقوع خطا بر اساس پروفایل جریان خطای ابتدای فیدر توزیع با نفوذ زیاد منابع PV

محل وقوع خطا در نحوه تغییرات جریان خطا در ابتدای فیدر توزیع با نفوذ زیاد منابع PV اثر زیادی دارد. برای فهم این مطلب، خطای سه فاز با امپدانس ناچیز در محل باس شماره ۳ مطابق شکل (۱) در نظر بگیرد. در این

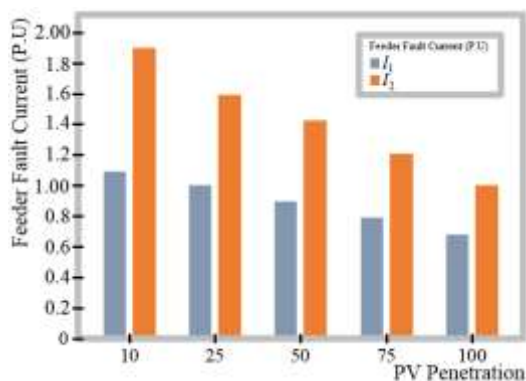
تغییرات جریان ابتدای خط نیز کمتر است. شکل (۸) جریان خطا قبل از خروج منابع PV ( $I_1$ ) و پله نخست تغییرات جریان خطای ابتدای خط را به‌ازای وقوع خطا ( $I_2$ ) در سمت ولتاژ کم شبکه شکل (۱) به‌ازای تغییرات ضریب نفوذ منابع PV نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با کاهش ضریب نفوذ منابع PV، تغییرات جریان خطای ابتدای فیدر بیشتر می‌شود.

## ۲-۲-۱- بررسی روند تغییرات نسبت تبدیل $I_f / I_2$

### بر اساس پروفایل‌های ولتاژ

$I_f$  جریان عبوری از فیوز شاخه خطا و  $I_2$  جریان خطای عبوری از ابتدای فیدر پس از خروج گروه نخست از سلول‌های فتولتائیک است. به‌منظور بررسی روند تغییرات و تعیین آستانه این نسبت و استفاده از آن به‌عنوان شاخص، در ادامه باید تمامی شرایط بررسی شوند.

برای این منظور باید به‌ازای خطاهای سه فاز و تک فاز در سمت ولتاژ کم شبکه نشان داده شده در شکل (۱) و با ضریب نفوذهای متفاوت منابع فتولتائیک، مقدار این ضریب محاسبه شود. جدول (۳) نتایج شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.



شکل (۸): پله نخست جریان خطای ابتدای خط به‌ازای وقوع

خطا در سمت ولتاژ کم شبکه شکل (۱) متناسب

### با ضریب نفوذ منابع PV

با توجه به مقادیر جدول (۳)، در حالت پروفایل ولتاژ صعودی مقدار این نسبت به‌ازای خطاهای متفاوت در سمت ولتاژ کم شبکه برابر یک است. از طرف دیگر، در حالت پروفایل ولتاژ نزولی، همان‌طور که در قسمت قبل بررسی شد، با کاهش ضریب نفوذ منابع PV، جریان خطای عبوری

که در این رابطه  $I_1$  جریان خطای اندازه‌گیری شده با رله جریان زیاد ابتدای خط درست در لحظه وقوع خطا و  $I_2$  جریان خطا پس از خروج گروه اول از سلول‌های فتولتائیک است. مقدار آستانه این شاخص وابسته به مقادیر توان منابع فتولتائیک متصل به سیستم و بارهای متصل به آن است و برای هر سیستم با انجام مطالعات اتصال کوتاه به دست می‌آید؛ برای مثال، مطابق جدول (۲) به‌ازای وقوع خطا در باس‌های ۳ و ۷ مقدار نسبت تعریف شده در رابطه (۲) به‌ترتیب برابر ۰/۲۱ و ۰/۳۵ به دست می‌آید. با توجه به اینکه این مقدار برای باس‌های دیگر سیستم شکل (۱) به سمت ۰/۳ میل می‌کند، مقدار آستانه در این مقاله برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): شاخص مکان خطا در سیستم توزیع شکل (۱)

شماره	$I_1$	$I_2$	FLI
سمت فشار			
ضعیف		۱/۵	۰/۴
سیستم	۰/۹	۱/۴۵	۰/۳۷
توزیع مکان		۱/۴	۰/۳۵
خطا		۱/۳۵	۰/۳۳
سمت فشار			
قوی	۱/۱	۱/۴	۰/۲۶
سیستم		۱/۳۵	۰/۲۴
توزیع	۲		۰/۲۱
			۰/۱۸

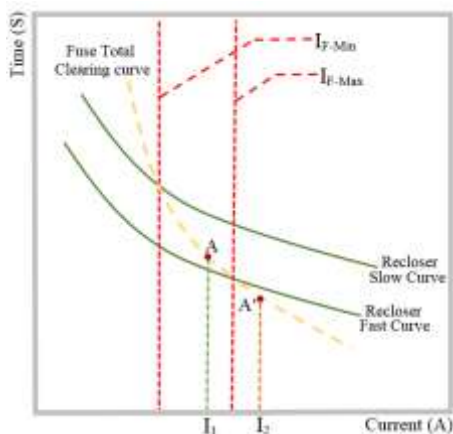
## ۲-۲-۲- اثر ضریب نفوذ منابع فتولتائیک بر

### تغییرات جریان خطای ابتدای سیستم توزیع

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در حالت پروفایل ولتاژ نزولی در لحظات اولیه پس از وقوع خطا تعداد بیشتری از منابع فتولتائیک از شبکه جدا خواهند شد؛ بنابراین در این لحظات، تغییرات جریان خطای ابتدای فیدر زیاد است. این تغییرات جریان خطا در پله نخست شدت بیشتری نسبت به پله‌های بعدی دارد. در این شرایط با افزایش ضریب نفوذ منابع PV، سهم کمتری از توان لازم بارها با باس اصلی شبکه تأمین می‌شود؛ بنابراین در صورت وقوع خطا، تریق جریان از سمت باس اصلی به محل خطا کمتر خواهد بود و

است. با تغییر مقدار  $TDS$ ، منحنی جریان - زمان کلید بازبست مجدد به سمت بالا یا پایین شیفته می‌شود. با توجه به شکل (۹)، هماهنگی بین کلید بازبست مجدد 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، فاصله زمانی بین عملکرد فیوز و ارسال فرمان قطع با کلید بازبست مجدد ۱۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است [۳۲ و ۳۳]. حداقل حاشیه زمانی پذیرفتنی برای سیستم تست در بدترین حالت، یعنی به‌ازای یک خطای سه فاز در سمت ولتاژ کم فیدر مورد مطالعه ۰/۵۴، ۰/۵۵، ۰/۷۶، ۰/۷۸، ۱ و  $\geq 100\%$  درصد ضریب نفوذ منابع PV است. منحنی مشخصه حالت سریع کلید بازبست مجدد در فاصله  $I_{F-min}$  و  $I_{F-max}$  زیر منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، منحنی مشخصه کند کلید بازبست مجدد، بالای منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار خواهد گرفت. در این شرایط در صورت وقوع خطای گذرا در سمت ولتاژ کم فیدر توزیع نشان داده شده در شکل (۱)، منحنی مشخصه سریع کلید بازبست مجدد، زودتر از فیوز شاخه خطا عمل می‌کند و به حفظ فیوز شاخه فرعی سیستم منجر می‌شود.

اتصال منابع تولید پراکنده به سیستم‌های توزیع بسته به سطح توان تولیدی، نوع و مکان قرارگیری آنها بر هماهنگی بین فیوز و کلید بازبست مجدد اثر خواهد گذاشت.



شکل (۹): از بین رفتن هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر به‌ازای وقوع خطا در سمت ولتاژ کم شبکه شکل (۱)

از ابتدای فیدر پس از خروج گروه نخست از سلول‌های فتوولتائیک ( $I_2$ ) افزایش بیشتری می‌یابد و در نتیجه، مقدار  $I_f / I_2$  کاهش خواهد یافت.

جدول (۳): نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم توزیع شکل (۱)

به منظور محاسبه نسبت $I_f / I_2$				
مکان خطا	نوع خطا	پروفایل ولتاژ	درصد ضریب نفوذ منابع PV	نسبت $I_f / I_2$
سمت ولتاژ کم	سه فاز	ولتاژ	۱۰٪	۰/۱۱
سمت ولتاژ کم	تک فاز به زمین	ولتاژ	۲۵٪	۰/۱۳
سمت ولتاژ کم	سه فاز	ولتاژ	۲۵٪	۰/۲۳
سمت ولتاژ کم	تک فاز به زمین	ولتاژ	۲۵٪	۰/۲۴
سمت ولتاژ کم	سه فاز	ولتاژ	۵۰٪	۰/۵۴
سمت ولتاژ کم	تک فاز به زمین	ولتاژ	۵۰٪	۰/۵۵
سمت ولتاژ کم	سه فاز	ولتاژ	۷۵٪	۰/۷۶
سمت ولتاژ کم	تک فاز به زمین	ولتاژ	۷۵٪	۰/۷۸
سمت ولتاژ کم	سه فاز	ولتاژ	$\geq 100\%$	۱

### ۳- هماهنگی تجهیزات حفاظتی در یک فیدر

#### توزیع با نفوذ زیاد منابع فتوولتائیک

زمان استاندارد صدور فرمان قطع یک کلید بازبست مجدد از رابطه (۲) به دست می‌آید [۳۱]:

$$t_{Recl-Std} = \left[ \frac{A}{(M)^p - 1} + B \right] \times TDS \quad (2)$$

$$M = \frac{I_f(CTS)}{I_{pickup}}$$

که در این رابطه  $t$  زمان عملکرد تجهیز حفاظتی 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. اطلاعات بیشتر در این باره در پیوست (۱) آورده شده‌اند.  $I_f(CTS)$  جریان خطای دیده‌شده با تجهیز اضافه جریان یا به عبارتی همان جریان سمت ثانویه ترانسفورماتور جریان است؛ همچنین  $I_{pickup}$  جریان برداشت تجهیز اضافه جریان



$$t_{Recl-Pr1} = \left[ \frac{A}{\left( \frac{I_{f(CTS)}}{I_{pickup}} \right)^p - 1} \right] \times PCI_1 \times TDS \quad (4)$$

با توجه به روابط (۳) و (۴)، با توجه به اینکه در حالت پروفایل ولتاژ صعودی، مقدار شاخص  $PCI$  برابر یک است، زمان صدور فرمان قطع ریکلوزر تغییری نمی‌کند و این امر نشان‌دهنده عدم کارایی این فاز به‌ازای ضریب نفوذهای بزرگ‌تر و مساوی ۱۰۰ درصد است و به یک فاز دومی به‌منظور حفظ هماهنگی فیوز - ریکلوزر در این شرایط نیاز است. از طرف دیگر، در حالت پروفایل نزولی با اصلاح مقدار  $TDS$ ، زمان جدید به‌صورت هوشمند و متناسب با ضریب نفوذ منابع فتوولتائیک و به‌صورت تطبیقی مطابق رابطه پیشنهادی (۴)، محاسبه و هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی بازیابی می‌شود.

#### ۴-۲- فاز ولتاژی

در فاز دوم پیشنهادی یک جمله ولتاژی به‌مشخصه زمان - جریان ریکلوزر اضافه شده است. به دلیل اینکه ریکلوزر در ابتدای فیدر نصب شده است، دامنه ولتاژ خطای مورد نیاز با یک ترانسفورماتور ولتاژ نصب‌شده در پست به دست می‌آید. در این شرایط، مشخصه پیشنهادی برای عملکرد حالت سریع ریکلوزر به‌صورت زیر است:

$$t_{Recl-Pr2} = \left[ \frac{A}{\left( \frac{I_{f(CTS)}}{I_{pickup}} \right)^p - 1} \right] \times PCI_2 \times TDS \quad (5)$$

$$PCI_2 = \frac{V_{sc-pu}}{e^{(k \times V_{sc-pu})}}$$

به کمک جمله ولتاژی زمان عملکرد 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.

طرح پیشنهادی با استفاده از جمله ولتاژی، زمان عملکرد ریکلوزر را اصلاح می‌کند. شکل (۱۰) تغییرات

با توجه به شکل (۹)، ناهماهنگی بین فیوز و کلید بازبست مجدد، زمانی اتفاق می‌افتد که جریان خطا به دلیل جریان اضافی تزریقی با منابع تولید پراکنده، 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 کلید بازبست مجدد عمل می‌کند یا هر دو در یک زمان عمل می‌کنند.

در این مقاله برای حل مشکل بیان‌شده، دو فاز حفاظتی تطبیقی بر مبنای اصلاح تنظیمات کلید بازبست مجدد به‌صورت تطبیقی و متناسب با ضریب نفوذ منابع  $PV$  پیشنهاد شده است. برای این منظور برای هر فاز یک شاخص برای بررسی میزان از دست رفتن هماهنگی ادوات حفاظتی معرفی می‌شود. به کمک این شاخص‌ها هماهنگی منحنی مشخصه کلید بازبست مجدد به‌صورت تطبیقی اصلاح می‌شود و زمان جدید صدور فرمان قطع عملکرد سریع ریکلوزر محاسبه می‌شود.

#### ۴-۱- روش هوشمند پیشنهادی اصلاح منحنی

##### مشخصه زمان - جریان ریکلوزر

##### ۴-۱-۱- فاز جریانی

برای بررسی حفظ هماهنگی بین فیوزهای نصب‌شده در ابتدای شاخه‌های فرعی سیستم توزیع و ریکلوزر ابتدای خط، نسبت تبدیل  $I_f/I_2$  بررسی شده در قسمت قبل، شاخص هماهنگی حفاظتی ( $PCI_1$ ) استفاده می‌شود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

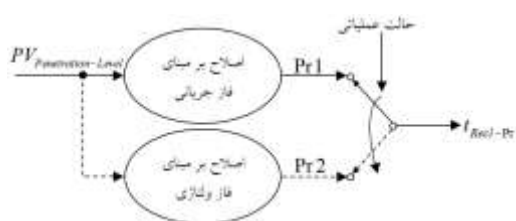
$$PCI_1 = \begin{cases} 1 & , PV \text{ Penetration} \geq 100\% \\ \frac{I_f}{I_2} & , 0\% < PV \text{ Penetration} < 100\% \end{cases} \quad (3)$$

همان‌طور که قبلاً ذکر شد با تغییر مقدار  $TDS$ ، منحنی جریان - زمان کلید بازبست مجدد به سمت بالا یا پایین شیف‌ت داده می‌شود؛ از این‌رو در این مقاله، زمان جدید صدور فرمان قطع سریع ریکلوزر به کمک فاز اول و متناسب با تغییرات ضریب نفوذ منابع  $PV$ ، با رابطه (۴) به دست می‌آید:

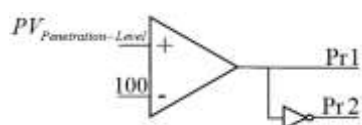
می‌شود. با توجه به شکل (۱۰)، بهترین مقدار برای ثابت  $k$  عدد ۳ است؛ زیرا مقدار بزرگ‌تر باعث افزایش بیش از حد حساسیت به ولتاژ می‌شود و به‌ازای کوچک‌ترین تغییرات ولتاژ، زمان عملکرد ریکلوزر، کاهش زیاد و نادرستی پیدا می‌کند. مقادیر کمتر نیز باعث کاهش حساسیت به ولتاژ می‌شود و در بدترین شرایط، احتمال عملکرد زودتر فیوز قبل از عملکرد سریع ریکلوزر تشدید می‌شود.

### ۴-۳- الگوریتم جدید حفاظتی پیشنهادی

شکل (۱۱) بلوک کنترلی روش هوشمند پیشنهادی این مقاله به‌منظور حذف اثر منابع فتوولتائیک بر هماهنگی تجهیزات حفاظتی را نشان می‌دهد. در این روش در یک فیدر توزیع با نفوذ زیاد منابع PV در شرایط پروفایل ولتاژ نزولی ( $PV_{Penetration-Level} < 100$ )، روش پیشنهادی بر مبنای فاز جریانی عمل می‌کند. در غیر این صورت، یعنی زمانی که  $PV_{Penetration-Level} \geq 100$  باشد، هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی به کمک فاز جریانی ایجاد نمی‌شود. در این حالت، برای حذف اثر نامطلوب منابع فتوولتائیک بر هماهنگی تجهیزات حفاظتی از فاز ولتاژی استفاده می‌شود. شکل (۱۲) بلوک منطقی وضعیت عملیاتی روش هوشمند پیشنهادی را نمایش می‌دهد. مطابق این شکل بر اساس مقایسه مقدار شاخص  $PV_{Penetration-Level}$  با مقدار آستانه اش، به یکی از دو حالت فاز ولتاژی یا جریانی تغییر وضعیت می‌دهد. وضعیت Pr1 بیان‌کننده عملکرد در فاز جریانی و Pr2 نشان‌دهنده عملکرد الگوریتم در فاز ولتاژی است.

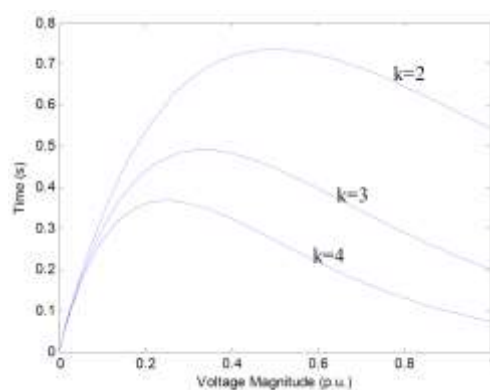


شکل (۱۱): بلوک کنترلی روش هوشمند پیشنهادی



شکل (۱۲): بلوک منطقی وضعیت عملیاتی روش پیشنهادی

جمله ولتاژی رابطه (۵) را به‌ازای مقادیر مختلف برای ثابت  $k$  نشان می‌دهد. افت ولتاژ در محل ریکلوزر متناسب با محل خطا است. یک خطا نزدیک به ریکلوزر باعث افت ولتاژ درخور توجه و جریان خطای بزرگ می‌شود.



شکل (۱۰): جمله ولتاژی مشخصه پیشنهادی به ازای مقادیر متفاوت ثابت  $k$

بنابراین، برطرف کردن سریع خطا با توجه به رابطه (۵) به دست می‌آید؛ به این صورت که جمله ولتاژی، کوچک و کمتر از یک می‌شود و باعث کاهش زمان عملکرد ریکلوزر می‌شود. 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. اگرچه حضور سیستم‌های فتوولتائیک اثر بسیار کمی بر جریان خطای ریکلوزر به‌ازای خطاهای نزدیک دارد، برای خطاهای دور کاهش جریان خطای ریکلوزر باعث تشدید این مورد می‌شود؛ از این رو زمان عملکرد ریکلوزر افزایش می‌یابد.

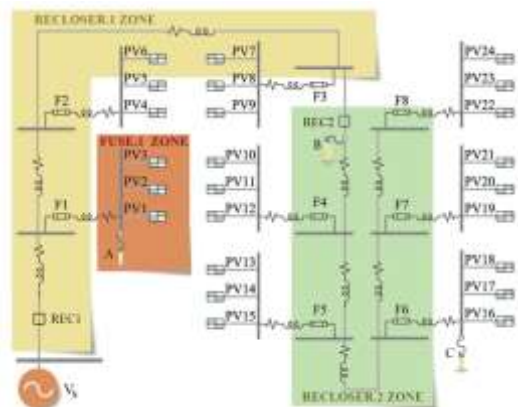
در حالت کلی، جریان عبوری از فیوز در حضور منابع PV برای خطاهای دور افزایش می‌یابد؛ بنابراین احتمال عملکرد فیوز قبل از باز شدن ریکلوزر به‌ازای خطاهای دور وجود دارد. جمله ولتاژی با دقت زیاد برای جلوگیری از ناهماهنگی فیوز - ریکلوزر پیشنهاد شده است. محل خطا به‌خوبی در منحنی ولتاژ شکل (۱۰) در نظر گرفته شده است؛ یعنی زمان عملکرد ریکلوزر با توجه به محل خطا (افت ولتاژ) کاهش می‌یابد و زمان عملکرد سریع تری برای خطاهای نزدیک یا بیشتری برای خطاهای دور به دست می‌آید. درحقیقت زمان عملکرد ریکلوزر مبتنی بر محل خطا، باعث جبران سهم جریان خطای تزیقی منابع PV

به منظور محاسبه زمان جدید قطع ریکلوزر مبتنی بر جمله ولتاژی از رابطه (۵) استفاده می‌شود و الگوریتم پیشنهادی به صورت هوشمند به حالت (Pr2) تغییر وضعیت می‌دهد.

### ۵- نتایج شبیه‌سازی

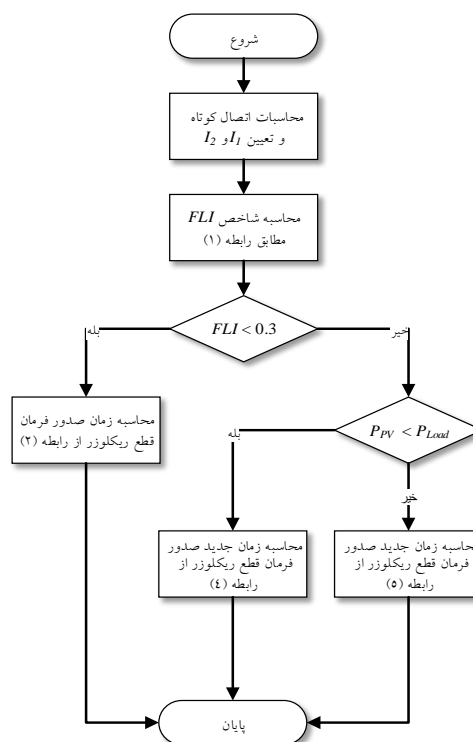
در این بخش برای بررسی درستی عملکرد روش پیشنهادی، هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی یک فیدر واقعی با استفاده از نرم افزار ETAP مطالعه می‌شود. شکل (۱۴) قسمتی از یک فیدر توزیع شعاعی واقع در شرق شهر اصفهان با برخی اصلاحات و تغییرات را نشان می‌دهد. سطوح ولتاژ نامی اولیه و ثانویه ترانسفورماتورهای این شبکه به ترتیب ۲۰ و ۰/۴ کیلوولت است. تمام بارهای این فیدر به سیستم‌های PV خانگی مجهزند. اینورترهای منابع PV از نوع متصل به شبکه (Tie-Grid Inverter) هستند. مشخصات کلی شبکه در پیوست (۲) آمده‌اند.

در ابتدای فیدر شکل (۱۴) از کلید بازبست مجدد (REC1) مدل Joslyn 351j استفاده شده است. برای حفاظت از انشعابات فرعی از فیوزها استفاده می‌شود. مطابق شکل در ابتدای تنها انشعاب بزرگ این فیدر، کلید حفاظت بازبست مجدد دیگری (REC2) نیز نصب شده است.



شکل (۱۴): فیدر توزیع مورد مطالعه با نفوذ زیاد منابع PV

در سیستم مورد مطالعه بدون منابع PV، به منظور برقراری هماهنگی بین دو ریکلوزر نصب‌شده در سیستم، هر دو عملکرد سریع و کند ریکلوزر پایین دست (REC2) زودتر از ریکلوزر ابتدای خط (REC1) عمل می‌کند. همچنین برای حفظ هماهنگی بین ریکلوزرهای شبکه با فیوزهای پایین دست آنها، منحنی مشخصه حالت سریع کلید



شکل (۱۳): الگوریتم پیشنهادی هماهنگی تجهیزات حفاظتی در سیستم‌های توزیع با نفوذ زیاد منابع PV

الگوریتم هوشمند پیشنهادی برای محاسبه زمان جدید صدور فرمان قطع ریکلوزر ابتدای خط در فیدرهای توزیع با نفوذ زیاد منابع PV در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. مطابق شکل (۱۳)، در گام نخست، محاسبات اتصال کوتاه به منظور محاسبه جریان  $I_1$  (جریان خطای اولیه) و جریان  $I_2$  (جریان خطا پس از خروج نخستین دسته از منابع PV) انجام می‌شود. سپس با شاخص  $FLI$  (رابطه (۱)) محل وقوع خطا مشخص می‌شود. اگر  $FLI$  از مقدار آستانه تعیین‌شده کوچک‌تر باشد، محل وقوع خطا در سمت ولتاژ زیاد تشخیص داده می‌شود و زمان صدور فرمان قطع ریکلوزر ابتدای خط از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

از طرف دیگر، مقادیر بزرگ‌تر از آستانه شاخص  $FLI$  نشان‌دهنده وقوع خطا در سمت ولتاژ کم است. در این شرایط در صورتی که توان تولیدی با منابع فتوولتائیک از توان مصرفی بارها کمتر باشد (پروفایل ولتاژ نزولی)، اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر به کمک جمله جریان  $(Pr1)$  و مطابق رابطه (۴) صورت می‌گیرد؛ در غیر این صورت

هماهنگی بین دو ریکلوزر شبکه می‌پردازد. هماهنگی بین REC2 و فیوزهای پایین دست آن در سناریوی C تحلیل می‌شود. درخور ذکر است طراحی سیستم حفاظتی باید به گونه‌ای باشد که در بدترین شرایط وقوع خطا، یعنی به‌ازای حداکثر ضریب نفوذ منابع PV و کمترین مقاومت خطا، بتواند هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی را حفظ کند. برای این منظور ابتدا به‌ازای مقاومت خطای صفر با تغییر ضریب نفوذ سیستم های فتوولتائیک آستانه از بین رفتن هماهنگی فیوز - ریکلوزر در دو سناریوی A و C بررسی می‌شود.

بازبست مجدد در فاصله  $I_{F-min}$  و  $I_{F-max}$  زیر منحنی مشخصه ذوب فیوز و منحنی مشخصه کند ریکلوزر بالای منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار خواهد گرفت.

برای بررسی طرح حفاظتی فیدر مورد مطالعه شکل (۱۴) با ضریب نفوذ زیاد منابع PV، سه سناریوی اتصال کوتاه سه فاز A، B و C در مکان‌های متفاوت شبکه، شبیه‌سازی شده‌اند. سناریوی A مربوط به ناحیه حفاظت شده REC1 است و هماهنگی بین ریکلوزر و فیوزهای پایین دست آن بررسی می‌شوند. سناریوی B به‌ازای وقوع خطا در پایین دست REC2 است و به

جدول (۴): نتایج طرح حفاظتی معمول به‌ازای بدترین شرایط اتصال کوتاه

Scenario	FLI Value	Operation Time (Sec)			
		REC.1	REC.2	Fuse1	Fuse6
A	0.5	0.5	NO	0.2	NO
B	0.2	0.52	0.12	NO	NO
C	0.7	1	0.6	NO	0.1

جدول (۵): نتایج اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر در صورت وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوی A

Scenario	FLI Value	Fault type	PV Penetration Percentage	Std-Operation Time (Sec)		New Operation Time (Sec)			
				$t_{Fuse1}$	$t_{Rec1}$	$t_{Fuse1}$	$t_{Rec1}$		
							Pr-1	Pr-2	[22]
A	0.5	L-G	25	0.2	NO	0.2	0.16	0.13	0.14
			50	0.22	NO	0.22	0.19	0.17	0.18
			75	0.25	NO	0.25	0.21	0.19	0.2
		100	0.3	NO	0.3	0.31	0.24	0.22	
		LLL	25	0.19	NO	0.19	0.13	0.11	0.12
			50	0.2	NO	0.2	0.16	0.14	0.15
75	0.22		NO	0.22	0.2	0.18	0.19		
		100	0.24	NO	0.24	0.26	0.21	0.23	

جدول (۶): نتایج اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر در صورت وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوی C

Scenario	FLI Value	Fault type	PV Penetration Percentage	Std-Operation Time (Sec)		New Operation Time (Sec)			
				$t_{Fuse1}$	$t_{Rec1}$	$t_{Fuse1}$	$t_{Rec1}$		
							Pr-1	Pr-2	[22]
C	0.7	L-G	25	0.15	NO	0.15	0.1	0.08	0.09
			50	0.18	NO	0.18	0.13	0.12	0.11
			75	0.22	NO	0.22	0.19	0.18	0.17
		100	0.27	NO	0.27	0.28	0.25	0.26	
		LLL	25	0.12	NO	0.12	0.09	0.07	0.08
			50	0.15	NO	0.15	0.12	0.1	0.11
75	0.2		NO	0.2	0.16	0.15	0.14		
		100	0.23	NO	0.23	0.24	0.2	0.21	

جدول (۷): حداکثر ظرفیت منابع فتوولتائیک نصب‌شده در باس‌های مختلف سیستم توزیع شبیه‌سازی شده

محل اتصال PV به سیستم (باس پایین دست فیوز شماره)	حداکثر تعداد منابع فتوولتائیک قابل اتصال بر اساس			
	طرح حفاظتی استاندارد (Std)	فاز حفاظتی پیشنهادی مبتنی بر جریان (Pr1)	فاز حفاظتی پیشنهادی مبتنی بر ولتاژ (Pr2)	روش حفاظتی ارائه شده در مرجع [۲۲]
F1	1	3	5	4
F2	1	2	5	3
F3	1	2	3	3
F4	1	2	3	3
F5	1	2	3	2
F6	1	2	3	2
F7	1	2	3	2
F8	1	2	3	2

جدول (۸): نتایج حاصل از شبیه‌سازی اتصال کوتاه سه فاز روش پیشنهادی مقاله و روش ارائه شده در مرجع [۳۴]

Faulted Location	PV rating (MW)											
	0			1			3			5		
	t <sub>Fuse</sub> (Sec)	CTI <sub>pr</sub> (Sec)	CTI <sub>New</sub> (Sec)	t <sub>Fuse</sub> (Sec)	CTI <sub>pr</sub> (Sec)	CTI <sub>New</sub> (Sec)	t <sub>Fuse</sub> (Sec)	CTI <sub>pr</sub> (Sec)	CTI <sub>New</sub> (Sec)	t <sub>Fuse</sub> (Sec)	CTI <sub>pr</sub> (Sec)	CTI <sub>New</sub> (Sec)
F1	0.224	0.136	0.14	0.211	0.125	0.13	0.2	0.122	0.12	0.165	0.115	0.1
F2	0.246	0.124	0.126	0.230	0.120	0.121	0.21	0.117	0.117	0.182	0.112	0.094
F3	0.284	0.112	0.118	0.265	0.110	0.113	0.24	0.108	0.116	0.2	0.102	0.078

از طرف دیگر، با اعمال فازهای تطبیقی پیشنهادی و اصلاح مقدار  $TDS$  مطابق نتایج نشان داده شده در جداول (۵) و (۶)، شاهد بازیابی هماهنگی حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر خواهیم بود؛ در نتیجه، در این شرایط به‌ازای وقوع خطا، ابتدا مد سریع ریکلوزر عمل می‌کند و به حفظ فیوز منجر می‌شود و نهایتاً در صورتی که خطا گذرا نباشد با رعایت فاصله زمانی مناسب، فیوز شاخه خطا عمل می‌کند و مانع از گسترش خطا به شبکه بالادست می‌شود؛ البته باید تأکید کرد به کمک فاز دوم یعنی استفاده از جمله ولتاژی (Pr2) حاشیه زمانی بین عملکرد فیوز و ریکلوزر (CTI) به دلیل عملکرد سریع‌تر ریکلوزر، نسبت به حالت استفاده از جمله جریان (Pr1)، مقدار بیشتری دارد و به همین دلیل استفاده از جمله ولتاژی در توان‌های بالا نیز عملکرد بهتری خواهد داشت. با توجه به نتایج جداول (۵) و (۶)، جمله ولتاژی ارائه شده در مرجع [۲۲] حاشیه زمانی کمتری نسبت به حالت ترم ولتاژی پیشنهادی در این مقاله فراهم می‌کند و این نشان‌دهنده برتری روش ارائه شده در مقاله است.

جدول (۷) حداکثر ظرفیت منابع فتوولتائیک نصب‌شده در باس‌های مختلف سیستم توزیع شبیه‌سازی شده را نشان

نتایج حاصل از شبیه‌سازی طرح حفاظتی به‌ازای بیشترین تغییرات جریان ابتدای خط و مقاومت خطای صفر در جدول (۸) نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شرایط در سناریوی A و C جریان خطای دیده شده با فیوز از ریکلوزر بیشتر است و باعث از بین رفتن هماهنگی بین آنها می‌شود که نقایص سیستم حفاظتی موجود را به‌وضوح نشان می‌دهد. از طرف دیگر، در سناریوی B، با توجه به محل وقوع خطا مشکل حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر ایجاد نمی‌شود و هماهنگی حفاظتی بین دو ریکلوزر حفظ می‌شود.

در ادامه به‌منظور بازیابی هماهنگی حفاظتی بر اساس فازهای تطبیقی پیشنهادی، به‌ازای وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوهای A و C در بدترین شرایط نتایج حاصل از شبیه‌سازی قبل و بعد از اصلاح تنظیمات حفاظتی به‌ترتیب در جداول (۵) و (۶) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در روش معمول حفاظتی با ثابت در نظر گرفتن  $TDS$  بر مقدار ۰/۵، به عملکرد زود هنگام فیوز قبل از مد سریع ریکلوزر منجر می‌شود و در نتیجه، شاهد ناهماهنگی بین فیوز و ریکلوزر خواهیم بود.

داشت. از طرف دیگر، روش پیشنهادی مرجع [۳۴] دو محدودیت اصلی زیر به شرح زیر دارد:

- ۱- وابسته بودن این روش به ریکلوزر اضافی در ضریب نفوذهای بیشتر از ۲ مگاوات.
- ۲- وابسته بودن طرح پیشنهاد شده به مکان نصب PV.

## ۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، روش هوشمند حفاظتی دوفازی مبتنی بر نرخ ضریب نفوذ منابع فتوولتائیک متصل به سیستم توزیع به منظور حفظ فیوز در شرایط خطا ارائه شد. مطابق این روش جدید، حالت عملکرد سریع ریکلوزر به ازای وقوع خطا در سیستم بر اساس اصلاح تطبیقی  $TDS$ ، به کمک یکی از دو فاز جریانی یا ولتاژی ارائه شده، سریع تر از فیوز شاخه خطا عمل می کند و ماهیت گذرا یا دائم خطا را بررسی می کند و به حفظ فیوز منجر می شود. فاز جریانی ارائه شده، تنها به ازای ضریب نفوذهای کمتر از ۱۰۰ درصد، توانایی حفظ هماهنگی فیوز - ریکلوزر را دارد و متناسب با نسبت جریان خطای عبوری از فیوز شاخه خطا به جریان خطای عبوری از ریکلوزر ابتدای خط، ضریب تنظیم زمانی عملکرد سریع ریکلوزر را اصلاح می کند و به کاهش زمان عملکرد آن منجر می شود؛ در حالی که فاز ولتاژی مشکل فاز جریانی را برطرف می کند و به ازای ضریب نفوذهای بیشتر ۱۰۰ درصد نیز حفظ فیوز را به ازای وقوع خطا در پایین دست شبکه توزیع و در حضور تولیدات پراکنده فتوولتائیک تضمین می کند. نتایج شبیه سازی نشان دهنده توانایی طرح پیشنهادی به منظور حفظ هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر حتی در ضریب نفوذهای بیشتر منابع فتوولتائیک و مقاومت خطای صفر است.

## ضمایم

ضمیمه (۱): مشخصه زمان - جریان رله های 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

می دهد. مطابق جدول مذکور حداکثر ضریب نفوذ منابع فتوولتائیک برای حفظ هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر در این شرایط به کمک مشخصه های پیشنهادی و با مشخصه استاندارد و همچنین با روش پیشنهادی در مرجع [۲۲] مقایسه شده است. با توجه به نتایج مشاهده شده، روش حفاظتی مبتنی بر ترم ولتاژی ارائه شده در مقاله (Pr2) بیشترین توانایی حفظ هماهنگی حفاظتی بین فیوز - ریکلوزر را به ازای ضریب نفوذهای بیشتر منابع فتوولتائیک دارد. درخور ذکر است به ترتیب ترم ولتاژی ارائه شده در مرجع [۲۲] و ترم جریانی ارائه شده در مقاله (Pr1) در پله های بعدی قرار می گیرند و در نهایت روش استاندارد کمترین توانایی حفظ هماهنگی فیوز و ریکلوزر را در این شرایط دارد.

شایان ذکر است امروزه همه تولیدکنندگان ریکلوزر مانند SIEMENS, ABB و غیره، ولتاژ و جریان را به منزله دو ورودی مجزا در ریکلوزرهای مبتنی بر ریزپردازنده خود جای داده اند؛ بنابراین نیازی به سفارش ریکلوزر ویژه به منظور اعمال مشخصه های پیشنهادی نیست.

برای مقایسه بیشتر، روش پیشنهادی با روش تطبیقی ارائه شده در مرجع [۳۴] مقایسه شده است. درخور ذکر است هماهنگی حفاظتی مطرح شده در مرجع مذکور با تنظیم TDS و Ipickup ریکلوزر صورت می گیرد؛ در صورتی که در روش پیشنهادی ارائه شده در مقاله، تنها TDS عملکرد سریع ریکلوزر اصلاح می شود.

مطابق مرجع [۳۲]، حداقل حاشیه زمانی هماهنگی بین عملکرد فیوز و ریکلوزر، ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته می شود؛ بنابراین با توجه به مقادیر جدول (۸)، به ازای ضریب نفوذهای پایین مقدار CTI مرجع [۳۴] (CTI<sub>New</sub>) بیشتر از CTI روش پیشنهادی در این مقاله (CTI<sub>pr</sub>) است؛ اما به ازای ضریب نفوذهای بیشتر از ۳ مگاوات روش پیشنهادی در مقاله، حاشیه زمانی عملکرد بهتری را بین فیوز و ریکلوزر فراهم می کند و در نهایت، به ازای توان ۵ مگاوات مقدار CTI<sub>New</sub> حتی از حداقل مقدار قابل قبول آن نیز کمتر شده است. درحقیقت در این شرایط، روش مرجع [۳۴] دیگر توانایی حفظ هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر را نخواهد

## ضمیمه (۲): خلاصه مشخصات فیدر مورد مطالعه

ردیف	تجهیز	مشخصات
۱	طول فیدر	۲۰ کیلومتر
۲	نوع فیدر	خطوط هوایی بانددل نشده شعاعی
۳	مشخصات خطوط	خطوط ولتاژ متوسط: ۱۲۰ میلی متر مربع خطوط ولتاژ کم: کابل ۴×۵۰ میلی متر مربع جنس کابل: آلومینیومی عایق: XLPE
۴	نوع خطوط	افقی فاصله بین خطوط: ۷۰-۱۴۰-۷۰ سانتی متر
۵	ولتاژ نامی	ولتاژ متوسط: ۲۰ کیلوولت ولتاژ کم: ۴۰۰ ولت
۶	ارتفاع پایه تیرهای توزیع	۹ متر
۷	ترانسفورماتور	۴۰۰ کیلوولت آمپر با اتصال مثلث - ستاره زمین شده
۸	مشخصات پست اصلی	۲۵۰ مگاوات آمپر X/R=6.3

## مراجع

- [7] Chaitusaney, S., Yokoyama, A., "Conflict between backup generation and recloser-fuse miscoordination in reliability aspect from distributed generation", Proc. IASTED Int. Conf. Energy Power Systems, Chiang Mai, Thailand, pp. 205-210, 2006.
- [8] McDermott, T.E., Dugen, R.C., "Distributed generation impact on reliability and power quality indices", Proc. IEEE Rural Electric Power Conf., Clairton, PA, USA, pp. D3-1-D3-7, May 2002.
- [9] Barker, P.P., Mello, R.W.D., "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems", Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, pp. 1645-1656, 2000.
- [10] Tailor, J.K. and Osman, A.H., "Restoration of Fuse-Recloser Coordination in Distribution System with high DG Penetration", Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st, pp. 1-8, 2008.
- [11] Y. Lu, L. Hua, J.Wu, G.Wu, and G. Xu, "A study on effect of dispersed generator capacity on power system protection", in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, pp. 1-6, 2007.
- [12] S.Chaitusaney and A.Yokoyama, "Prevention of reliability degradation from recloser-fuse miscoordination due to distributed generation", IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, No. 4, pp. 2545-2554, Oct. 2008.
- [13] A. Farzanehrfat, S. A. M. Javadian, S. M. T. Bathaee, and M.-R. Haghifam, "Maintaining the recloser-fuse coordination in distribution systems in presence of dg by determining dg's size", in Proc.
- [1] N. Nimpitiwan, G. Heydt, R. Ayyanar, and S. Suryanarayana, "Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators", IEEE Trans. Power Del., Vol. 22, No. 1, pp.634-641, Jan. 2007.
- [2] A. Abdel-Khalik, A. Elserougi, A. Massoud, S. Ahmed, "Fault current contribution of medium voltage inverter and doubly-fed induction-machine-based flywheel energy storage system", IEEE Trans. Sustainable Energy, Vol. 4, No. 1, pp.58-67, Jan. 2013.
- [3] Ahmed El-Naggar; István Erlich, "Fault Current Contribution Analysis of Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No. 3, pp.874-882, Sept. 2015.
- [4] Tarek Medalel Masaud; Ronak Deepak Mistry, "Fault current contribution of Renewable Distributed Generation: An overview and key issues", IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Oct. 2016.
- [5] N. Rajaei; M. H. Ahmed; M. M. A. Salama; R. K. Varma, "Analysis of fault current contribution from inverter based distributed generation", IEEE PES General Meeting, July. 2014.
- [6] Y. Han, X. Hu, and D. Zhang, "Study of adaptive fault current algorithm for microgrid dominated by inverter based distributed generators", in Proc. 2nd IEEE Int. Symp. Power Electron. Distributed Generation Syst. (PEDG), pp. 852-854, 16-18. June. 2010.

- Power Syst. Res., Vol. 122, No. 5, pp. 42-49, January 2015.
- [24] Dewadasa, M., Ghosh, A., Ledwich, G., et al.: "Fault isolation in distributed generation connected distribution networks", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 5, No. 10, pp. 1053-1061, Oct. 2011.
- [25] Keil, T., Jager, J.: "Advanced coordination method for overcurrent protection relays using nonstandard tripping characteristics", IEEE Trans. Power Del., Vol. 23, No. 1, pp. 52-5, Jan. 2008.
- [26] Hesam Yazdanpanahi, YunWei Li, Wilsun Xu, "A New Control Strategy to Mitigate the Impact of Inverter-Based DGs on Protection System", IEEE Trans. Smart Grid, Vol.3, No.3, pp. 1427-1436, 2012.
- [27] Nazila Rajaei, and M. M. A. Salama, "Management of Fault Current Contribution of Synchronous DGs Using Inverter-Based DGs", IEEE Trans. Smart Grid, Vol.6, No.6, pp. 3073-3081, 2015.
- [28] Esmaeil Ebrahimi, Mohammad Javad Sanjari, Gevork B. Gharehpetian, "Control of three-phase inverter-based DG system during fault condition without changing protection coordination", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 63, pp. 814-823, December 2014.
- [29] IEEE P1547.7/D11, "IEEE Approved Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection", Jun. 2013.
- [30] IEEE 929, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, 2000.
- [31] IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Over-current Relays, IEEE Standard C37, 112-1996.
- [32] Naiem, A.F., Hegazy, Y., Abdelaziz, A.Y., et al, "A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 27, No. 1, pp. 176-185, 2012.
- [33] Hussain, B., Sharkh, S.M., Hussain, S., Abusara M. A, "An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distributed generation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 28, No. 2, pp. 669-677, 2013.
- [34] Yingying Tang; Raja 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.
- 9th IET Int. Conf. Develop. Power Syst. Protect, pp. 124-129, 2008.
- [14] S. H. Lim and 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. Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, pp.5601104-5601104, June 2012.
- [15] H. Yamaguchi and T. Kataoka, "Current limiting characteristics of transformer type superconducting fault current limiter with shunt impedance and inductive load", IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, No. 2, pp.668-671, June 2008.
- [16] Y. Zhang and R. A. Dougal, "Novel dual-FCL connection for adding distributed generation to a power distribution utility", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, No. 3, pp. 2179 - 2183, June 2011.
- [17] Elmitwally, A., Gouda, E., Eladawy, S., "Restoring recloser-fuse coordination by optimal fault current limiters planning in DG-integrated distribution systems", Int. J. Elec. Power, pp. 9-18, 2016.
- [18] H. B. Funmilayo and K. L. Buylar-Purry, "An approach to mitigate the impact of distributed generation on the overcurrent protection scheme for radial feeders", in Proc. IEEE Power Syst. Conf. Expo., pp. 1-11, 2009.
- [19] D. Uthitsunthorn and T. Kulworawanichpong, "Distance protection of a renewable energy plant in electric power distribution systems", in Proc. Int. Conf. Power Syst. Technol., pp. 1-4, 2010.
- [20] F. A. Viawan, D. Karlsson, A. Sannino, and J. Daalde, "Protection scheme for meshed distribution systems with high penetration of distributed generation", in Proc. Power Syst. Conf. Adv. Metering, Protection Control, Commun., Distrib. Resources, pp. 99-104, 2006.
- [21] I. M. Chilvers, N. Jenkins, and P. A. Crossley, "The use of 11 kV distance protection to increase generation connected to the distribution network", in Proc. Int. Conf, pp. 551-554, 2004.
- [22] Saleh, K.A., Zeineldin, H.H., Al-Hinai, A., et al.: "Optimal coordination of directional overcurrent relays using a new time-current-voltage characteristic", IEEE Trans. Power Del., Vol. 30, No. 2, pp. 537-544, April 2015.
- [23] Castillo Salazar, C.A., Conde Enríquez, A., Schaeffer, S.E.: "Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves", Electr.



