

هماهنگی تطبیقی فیوز و ریکلوزر در سیستم‌های توزیع با ضریب نفوذ بالای منابع فتوولتاییک

فرزاد حاجی محمدی^(۱) - بهادر فانی^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۲/۴

خلاصه: استفاده از تولیدات پراکنده فتوولتاییک در سیستم توزیع باعث بهبود پروفایل ولتاژ شبکه، بهبود کیفیت توان و ... می‌گردد. اما از طرف دیگر باعث ایجاد عدم هماهنگی حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر می‌شود. در این مقاله یک روش تطبیقی به منظور حفظ هماهنگی فیوز - ریکلوزر ارائه شده است. این روش بر اساس اصلاح تطبیقی منحنی عملکرد سریع ریکلوزر متناسب با نسبت حداکثر خطای عبوری از فیوز شاخه خطا به ریکلوزر ابتدای خط می‌باشد. به کمک روش ارائه شده در لحظه وقوع خطا متناسب با ضریب نفوذ منابع فتوولتاییک، شاخص هماهنگی زمانی تعیین می‌گردد و سپس بر اساس این شاخص، ضریب تنظیم زمانی عملکرد سریع ریکلوزر به صورت تطبیقی اصلاح می‌شود و در نهایت زمان جدید زمان قطع ریکلوزر به منظور حفظ فیوز در این شرایط محاسبه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر توانایی روش ارائه شده پیشنهادی در سناریوهای متفاوت خطا، تغییرات ضریب نفوذ منابع فتوولتاییک و مقاومت‌های خطای متفاوت می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های توزیع، هماهنگی تطبیقی فیوز و ریکلوزر، منابع فتوولتاییک.

Adaptive Coordination of Fuse – Recloser in a Distribution System with High PV Penetration

Farzad Hajimohammadi⁽¹⁾ – Bahador Fani⁽²⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Farzad.hajimohammadi@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

bahador.fani@gmail.com

Employment of photovoltaic (PV) distributed generation in the distribution system, leads to improvement of network voltage profile and power quality. On the other hand, it causes miscoordination between fuses and recloser. In this paper an adaptive method is presented to maintain coordination between fuse and recloser. This method is based on a modification of fast operation curve of recloser, proportional to the lateral fuse maximum fault current to recloser current which is located at the beginning of the feeder. Simulation results show the performance of the proposed methods for different fault scenarios, variation of PV penetration and different fault resistance. Based on the presented method, proportional to PVs penetration the protection coordination index (PCI) is determined in fault period. Then, according to this index, time dial setting (TDS) of recloser fast operation is modified adaptively. Finally, new recloser trip time is calculated in this condition for fuse saving. Simulation results show the performance of the proposed method for different fault scenarios, variation of PV penetration and different fault resistances.

Index Terms: Distribution system, Adaptive coordination of fuse – recloser, Photovoltaic resource

نویسنده مسئول: بهادر فانی، استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، bahador.fani@gmail.com

۱- مقدمه

در چند سال اخیر نصب منابع تولید پراکنده فتوولتاییک (PV) در سیستم‌های قدرت الکتریکی با هدف بهبود پایداری سیستم و رعایت مسائل زیست محیطی، روند رو به رشدی داشته است. اما از طرف دیگر در شرایط وقوع خطا به دلیل سهم جریان تزریقی تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر، حفاظت سیستم با مشکل رو به رو شده است [۷-۱]. اکثر طرح‌های حفاظتی در سیستم‌های توزیع شعاعی شامل هماهنگی بین فیوز با ریکلوزر و رله‌های جریان زیاد می‌باشد. در عمل به ازای وقوع خطا در پایین دست فیوزهای نصب شده در ابتدای شاخه‌های فرعی سیستم توزیع، عملکرد سریع ریکلوزر قبل از سوختن فیوز، باید ماهیت گذرا یا دائم بودن خطا را بررسی نماید. اما به دلیل تزریق جریان اضافی منابع PV، جریان خطای دیده شده توسط فیوز بیشتر از ریکلوزر ابتدای خط خواهد بود و منجر به عملکرد زودتر فیوز می‌گردد [۹-۸]. به منظور حذف اثر منفی منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر بر طرح‌های حفاظتی معمول، روش‌های متعددی در مقالات مختلف ارائه شده است، که به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف) روش‌های پیشگیرانه: در مراجع [۱۰-۱۲] مبنای محاسبات تنظیمات تجهیزات حفاظتی، ماکزیمم ضریب نفوذ منابع DG متصل به سیستم توزیع می‌باشد، تا جایی که مشکل حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر رخ ندهد. قابل ذکر است که نقطه ضعف این روش محدود کردن ضریب نفوذ این منابع می‌باشد، که امری نامطلوب است.

ب) استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا: در مراجع [۱۶-۱۳] استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا به منظور کنترل سطح جریان خطا و حفظ هماهنگی فیوز-ریکلوزر در سیستم‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است. این روش نیز بسیار پر هزینه است.

ج) اصلاح ساختار سیستم حفاظتی: این روش بر مبنای استفاده از ریکلوزرها و کلیدهای قدرت اضافی در سیستم قدرت می‌باشد. در حقیقت این روش نیاز به اصلاح آرایش سیستم قدرت و حتی استفاده از حفاظت دیستانس را نیز دارد [۲۰-۱۳].

در این مقاله، اثر منابع فتوولتاییک بر روی هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر در سیستم‌های توزیع بررسی شده است. همچنین اثر تغییرات ضریب نفوذ سیستم‌های PV بر حفاظت الکتریکی شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. روش تطبیقی پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر شیفت منحنی مشخصه سریع ریکلوزر متناسب با تغییرات جریان ابتدای خط نسبت به جریان عبوری از فیوز در مدت زمان وقوع خطا می‌باشد. براساس این روش به کمک اصلاح ضریب تنظیم زمانی عملکرد سریع ریکلوزر، زمان جدید فرمان قطع آن به منظور حفظ فیوز، محاسبه می‌گردد.

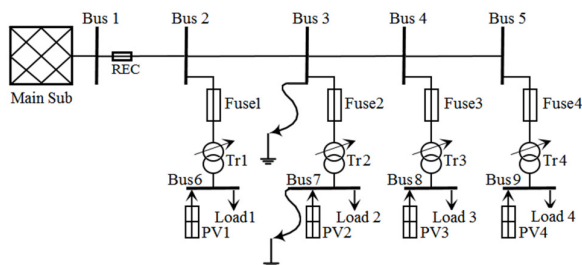
در این مقاله در بخش (۲) به بررسی تأثیر پروفایل ولتاژ سیستم قبل از وقوع خطا بر پروفایل جریان ابتدای خط در لحظه وقوع خطا در سیستم‌های توزیع با ضریب نفوذ بالای منابع فتوولتاییک پرداخته

می‌شود. در ادامه بر اساس تغییرات پروفایل جریان خطا، شاخصی به منظور تعیین محل وقوع خطا در سیستم توزیع در حضور منابع PV ارائه می‌گردد. در بخش (۳) اثر سیستم‌های PV بر حفاظت الکتریکی سیستم‌های توزیع بررسی شده است و چگونگی از بین رفتن هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر در این شرایط شرح داده شده است. الگوریتم تطبیقی روش پیشنهادی مقاله به منظور اصلاح تطبیقی منحنی عملکرد سریع ریکلوزر به منظور حفظ فیوز در بخش (۴) ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که بیانگر صحت عملکرد روش‌های پیشنهادی به ازای ضریب نفوذهای متفاوت سیستم‌های فتوولتاییک می‌باشد در بخش (۵) دیده می‌شود و در نهایت در بخش (۶) نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- تأثیر پروفایل ولتاژ سیستم بر پروفایل جریان خطای ابتدای

خط در سیستم توزیع با نفوذ بالای منابع PV

در این قسمت روش پیشنهادی برای بررسی هماهنگی حفاظتی در یک سیستم توزیع با ضریب نفوذ بالای منابع PV ارائه شده است. با توجه به تأثیر مکان وقوع خطا و مقدار ولتاژ باس بارهای سیستم توزیع در لحظه خطا بر روی 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 بالا بر روی هماهنگی سیستم حفاظتی و در نهایت روش پیشنهادی جهت شیفت منحنی سریع ریکلوزر به منظور حفظ هماهنگی فیوز و ریکلوزر ارائه می‌شود.

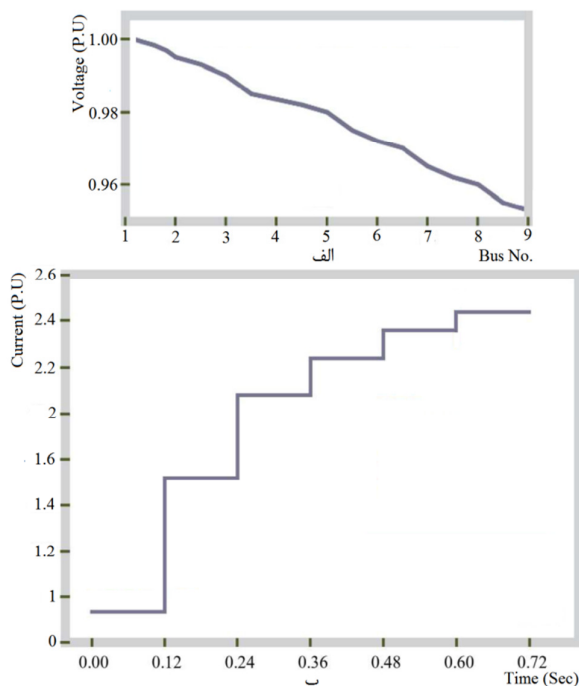


شکل (۱): شبکه‌ی توزیع شعاعی با نفوذ بالای منابع PV خانگی

Fig. (1): Radial distribution system with high penetration of domestic PV sources

در شکل (۱) یک شبکه‌ی توزیع با نفوذ بالای منابع PV خانگی نشان داده شده است. منابع فتوولتاییک نصب شده در یک سیستم توزیع مثل یک منبع توان ثابت با ضریب توان واحد عمل می‌کنند. 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 آسیب رسیدن به اینورتر، جریان خروجی منابع فتوولتاییک تا مقدار دو برابر جریان نامی محدود می‌گردد [۲۱].

از آنجایی که منابع PV به صورت محلی بارها را تغذیه می‌کنند، سطح ولتاژ هر باس وابسته به سطح توان تولیدی سیستم‌های فتوولتاییک در



شکل (۳): پروفایل جریان در حالت پروفایل ولتاژ نزولی در سیستم‌های توزیع شامل منابع PV

Fig. (3): Current profile in falling voltage profile in PV dominated distribution feeder

۲-۱- تشخیص محل وقوع خطا بر اساس پروفایل جریان خطای

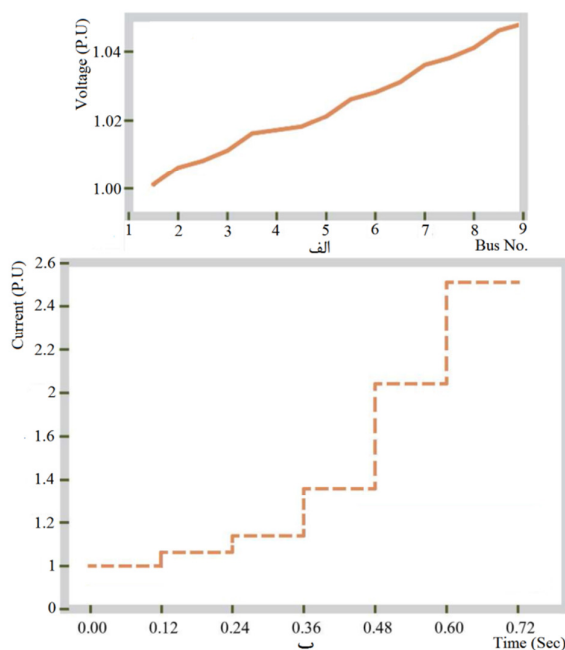
ابتدای فیدر توزیع با نفوذ بالای منابع PV

محل وقوع خطا در نحوه تغییرات جریان خطا در ابتدای فیدر توزیع با نفوذ بالای منابع PV اثر زیادی دارد. برای فهم این مطلب یک خطای سه فاز با امپدانس ناچیز در محل باس شماره ۳ مطابق شکل (۱) در نظر بگیرید. در این شرایط جریان خطای ابتدای فیدر فقط با خروج PVهای بالادست محل وقوع خطا (یعنی PV1 و PV2) تغییر می‌کند. در این حالت PVهای پایین‌دست خطا (PV3 و PV4) اثری بر روی این جریان نخواهند داشت. در این حالت با تزریق جریان توسط PV3 و PV4 به محل خطا، پتانسیل باس ۳ تغییر چندانی ندارد و جریان ابتدای خط تقریباً مستقل از جریان PVهای پایین‌دست خطا خواهد بود.

اگر خطا در طرف ولتاژ کم سیستم (به عنوان نمونه باس شماره ۷) رخ دهد، با توجه به طولانی‌تر شدن مسیر جریان خطا تا محل وقوع خطا، جریان‌های تزریقی از سمت PVهای پایین‌دست ولتاژی را در باس ۳ تزریق می‌کنند. بنابراین در این حالت PVهای پایین‌دست خطا نیز بر روی جریان ابتدای خطا اثر خواهند گذاشت. بعلاوه 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 روی جریان ابتدای فیدر اثر دارند. در این حالت تغییرات جریان خطا ناشی از خروج منابع PV نسبت به حالت قبل دارای تغییرات قابل ملاحظه‌تری است.

مقایسه با توان مصرفی بارهای متصل شده به آن باس می‌باشد. مطابق شکل (۲-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 (۲-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 می‌گردد و منجر به افزایش تغییرات در پله‌های آخر پروفایل جریان خطای ابتدای فیدر می‌گردد.

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 (۳-الف) شاهد یک پروفایل 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 (پیوست ۱) تعداد بیشتری از منابع PV از شبکه جدا خواهند شد و تغییرات جریان در ابتدای فیدر بیشتر می‌گردد [۲۲]. 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 این مورد در شکل (۳-ب) نمایش داده شده است.



شکل (۲): پروفایل جریان در حالت پروفایل ولتاژ صعودی در سیستم‌های توزیع شامل منابع PV

Fig. (2): Current profile in rising voltage profile in PV dominated distribution feeder

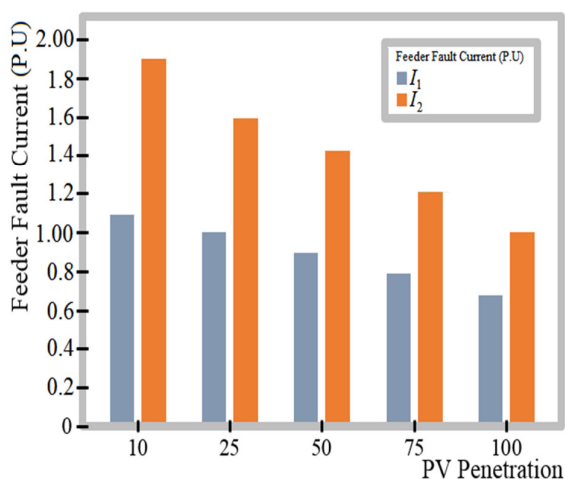
در شکل (۳) نحوه تغییرات جریان خطای ابتدای فیدر به ازای وقوع خطا در باس‌های شماره ۳ و شماره ۷ سیستم شکل (۱) نشان داده شده است. به منظور تعیین مکان وقوع خطا می‌توان از نسبت تعریف شده در رابطه (۱) استفاده کرد:

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

که در این رابطه I_1 جریان خطای اندازه‌گیری شده توسط رله جریان زیاد ابتدای خط درست در لحظه وقوع خطا و I_2 جریان خطا پس از خروج گروه اول از سلول‌های فتوولتائیک می‌باشد. مقدار آستانه‌ی این شاخص وابسته به مقادیر توان منابع فتوولتائیک متصل به سیستم و بارهای متصل به آن می‌باشد و برای هر سیستم با انجام مطالعات اتصال کوتاه به دست می‌آید. برای مثال به ازای وقوع خطا در باس‌های ۳ و ۷ مقدار نسبت تعریف شده در رابطه (۲) به ترتیب برابر ۰/۱۱ و ۰/۵۶ به دست می‌آید. از آنجایی که 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.

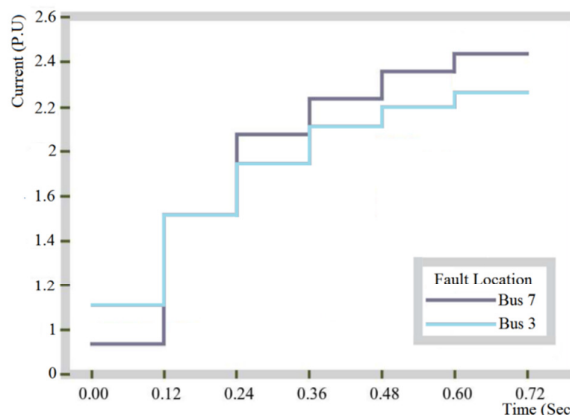
۲-۲-۱- بررسی روند تغییرات نسبت تبدیل I_f/I_2 بر اساس پروفایل‌های ولتاژ

I_f جریان عبوری از فیوز شاخه‌ی خطا I_2 جریان خطای عبوری از ابتدای فیدر پس از خروج گروه اول از سلول‌های فتوولتائیک می‌باشد. به منظور بررسی روند تغییرات و تعیین آستانه‌ی این نسبت و استفاده از آن به عنوان یک شاخص در ادامه، باید تمامی شرایط مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور به ازای خطاهای سه‌فاز و تک‌فاز در سمت ولتاژ کم شبکه نشان داده شده در شکل (۵) و با ضریب نفوذهای متفاوت منابع فتوولتائیک، مقدار آن محاسبه گردد. جدول (۱) نتایج شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.



شکل (۵): پله اول جریان خطای ابتدای خط به ازای وقوع خطا در سمت ولتاژ کم شبکه شکل (۱) به ازای تغییرات ضریب نفوذ منابع PV
Fig. (5): First step of fault current profile for fault inception in low voltage side of the Fig. (1) system with different PVs penetration

همان‌طور که از مقادیر جدول (۱) مشاهده می‌شود، در حالت پروفایل ولتاژ صعودی مقدار این نسبت به ازای خطاهای متفاوت در سمت ولتاژ کم شبکه برابر یک می‌باشد. از طرف دیگر، در حالت پروفایل ولتاژ نزولی، همان‌طور که در قسمت قبل بررسی شد با کاهش ضریب نفوذ منابع PV، جریان خطای عبوری از ابتدای فیدر پس از خروج گروه اول از سلول‌های فتوولتائیک (I_2) افزایش بیشتری می‌یابد و در نتیجه مقدار I_f/I_2 کاهش خواهد یافت.

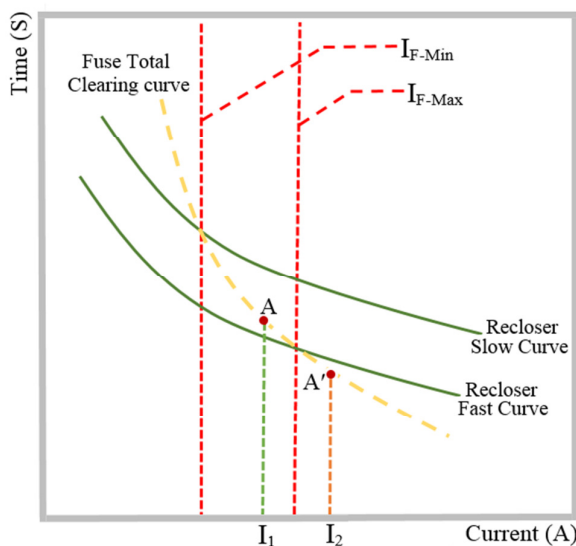


شکل (۴) جریان ابتدای فیدر به ازای وقوع خطا در سیستم قدرت شکل (۱)
Fig. (4): Fault current profile for fault inception in the electrical power system of Fig. (1)

۲-۲- اثر ضریب نفوذ منابع فتوولتائیک بر نحوه تغییرات

جریان خطای ابتدای یک سیستم توزیع

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در حالت پروفایل ولتاژ نزولی در لحظات اولیه پس از وقوع خطا تعداد بیشتری از منابع فتوولتائیک از شبکه جدا خواهند شد. بنابراین در این لحظات تغییرات جریان خطای ابتدای فیدر زیاد می‌باشد. این تغییرات جریان خطا در پله اول شدت بیشتری نسبت به پله‌های بعدی دارد. در این شرایط با افزایش ضریب نفوذ منابع PV، سهم کمتری از توان مورد نیاز بارها از طریق باس اصلی شبکه تأمین می‌شود. بنابراین در صورت وقوع خطا، تزریق جریان از سمت باس اصلی به محل خطا کمتر خواهد بود و تغییرات جریان ابتدای خط نیز کمتر است. شکل (۵) جریان خطا قبل از خروج منابع



شکل (۶): از بین رفتن هماهنگی بین فیوز و کلید بازبست مجدد به ازای وقوع خطا در سمت ولتاژ کم شبکه شکل (۱)

Fig. (6): Fuse – recloser miscoordination for fault inception in low voltage side of the Fig. (1) system

در این مقاله به منظور داشتن یک حفاظت پشتیبان مناسب، فاصله زمانی بین عملکرد فیوز و ارسال فرمان قطع توسط کلید بازبست مجدد ۱۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است [۲۴]. حداقل حاشیه زمانی مورد قبول برای سیستم تست در بدترین حالت یعنی به ازای یک خطای سه فاز در سمت ولتاژ کم فیدر توزیع ۴۰ میلی ثانیه می باشد [۲۵]. منحنی مشخصه حالت سریع کلید بازبست مجدد در فاصله‌ی I_{F-max} و I_{F-min} زیر منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار می گیرد. 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 شاخه‌ی خطا عمل می کند و منجر به حفظ فیوز شاخه فرعی سیستم می گردد.

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. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، عدم هماهنگی بین فیوز و کلید بازبست مجدد زمانی اتفاق می افتد که جریان خطا به دلیل جریان اضافی تزریقی توسط منابع تولید پراکنده، از I_{F-max} بیشتر شود. در نتیجه، زمان قطع فیوز از نقطه A به نقطه A' شیف‌ت داده می شود و فیوز در زمان کمتری نسبت به کلید بازبست مجدد عمل می کند یا هر دو در یک زمان عمل می نمایند. در این مقاله یک روش حفاظتی بر مبنای اصلاح تنظیمات کلید بازبست مجدد به صورت تطبیقی و متناسب با ضریب نفوذ منابع PV می باشد. برای این منظور یک شاخص برای بررسی میزان از دست رفتن هماهنگی ادوات حفاظتی معرفی می گردد. به کمک این شاخص

Table (1): Simulation results of Fig. (1) distribution system in order to I_f/I_2 calculation

جدول (۱): 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 فیدر مورد مطالعه	سه فاز	نزولی	٪۱۰	۰/۱۱		
	تک فاز به زمین			۰/۱۳		
	سه فاز		٪۲۵	۰/۲۲		
	تک فاز به زمین			۰/۳۴		
	سه فاز		٪۵۰	۰/۵۴		
	تک فاز به زمین			۰/۵۵		
	سه فاز		٪۷۵	۰/۷۶		
	تک فاز به زمین			۰/۷۸		
	تک فاز به زمین		سه فاز	صعودی	$\geq ٪۱۰۰$	۱

۳- هماهنگی تجهیزات حفاظتی در یک فیدر توزیع با نفوذ بالای منابع فتوولتائیک

زمان صدور فرمان قطع یک کلید بازبست مجدد از رابطه‌ی (۲) به دست می آید [۲۳]:

$$t = \left[\frac{A}{(M)^p - 1} + B \right] \times TDS, \quad M = \frac{I_{f(CTS)}}{I_{pickup}} \quad (2)$$

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 می شود. ثابت‌های A ، B و P با توجه به مدهای کاری مشخصه جریان - زمان تجهیز حفاظتی تغییر می کنند. اطلاعات بیشتر در این مورد در پیوست (۲) آورده شده است. $I_{f(CTS)}$ جریان خطای دیده شده توسط تجهیز اضافه جریان است یا به عبارتی همان جریان سمت ثانویه ترانسفورماتور جریان می باشد همچنین I_{pickup} جریان برداشت تجهیز اضافه جریان است. با تغییر مقادیر TDS و I_{pickup} می توان منحنی جریان - زمان کلید بازبست مجدد را به سمت بالا یا پایین شیفت داد.

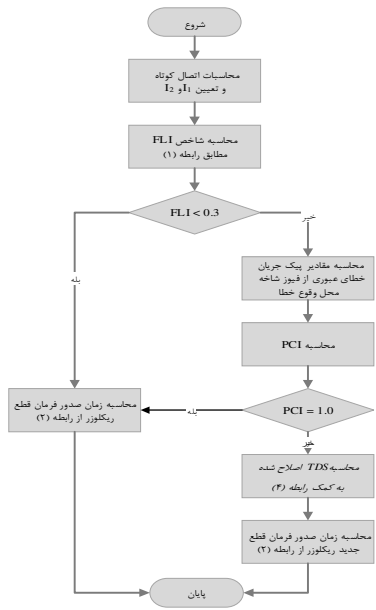
همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، هماهنگی بین کلید بازبست مجدد و فیوز تنها زمانی برقرار خواهد بود که جریان خطا (I_1) بین حداکثر جریان خطای فیدر (I_{F-max}) و حداقل جریان خطای فیدر (I_{F-min}) قرار گیرد. در این صورت فاصله زمانی هماهنگی (CTI) مناسب بین عملکرد این دو تجهیز حفظ می شود.

اعمال آن در رابطه (۲)، زمان صدور فرمان قطع جدید ریکلوزر ابتدای فیدر به دست خواهد آمد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به منظور بررسی صحت عملکرد روش پیشنهادی، هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی یک فیدر واقعی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل (۸) 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 مجهز می‌باشند. اینورترهای منابع PV از نوع متصل به شبکه می‌باشند. مشخصات کلی شبکه در پیوست (۳) آمده است.

در ابتدای فیدر شکل (۸) از یک کلید بازبست مجدد (REC1) مدل Joslyn 351j استفاده شده است. به منظور 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 (۷): الگوریتم تحلیل هماهنگی تجهیزات حفاظتی در سیستم‌های توزیع با نفوذ بالای منابع PV

Fig. (7): Protective device coordination assessment in PV dominated distribution feeder

شکل (۹) تغییرات پروفایل ولتاژ به دست آمده از مطالعات پخش بار فیدر توزیع مورد مطالعه را به ازای تغییرات ضریب نفوذ منابع PV نشان می‌دهد. همانطور که در بخش ۲-۱ گفته شد پروفایل ولتاژ غالب در یک فیدر توزیع شامل سیستم‌های PV، پروفایل ولتاژ نزولی می‌باشد، که این پدیده به وضوح در شکل (۹) دیده می‌شود.

هماهنگی منحنی مشخصه کلید بازبست مجدد به صورت تطبیقی اصلاح می‌گردد.

۴- اصلاح منحنی مشخصه زمان - جریان کلید بازبست مجدد

به منظور بررسی حفظ هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر، نسبت تبدیل I_f/I_2 بررسی شده در قسمت قبل به عنوان یک شاخص هماهنگی حفاظتی (PCI) استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

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

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، با تغییر مقادیر TDS و I_{pickup} می‌توان منحنی جریان - زمان کلید بازبست مجدد را به سمت بالا یا پایین شیفت داد. از این رو در این مقاله مقدار اصلاح شده TDS متناسب با تغییرات ضریب نفوذ منابع PV، به کمک شاخص PCI، از طریق رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$TDS_{modified} = TDS \times PCI \quad (4)$$

با توجه به روابط (۳) و (۴) از آن جایی که در حالت پروفایل ولتاژ صعودی، مقدار شاخص PCI برابر یک می‌باشد، مقدار اصلاح شده TDS تغییری نمی‌کند و این امر نشان دهنده حفظ هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر در این شرایط می‌باشد. از طرف دیگر در حالت پروفایل نزولی با اصلاح مقدار TDS، هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی بازیابی می‌گردد.

۴-۱- الگوریتم حفاظتی پیشنهادی به منظور اصلاح TDS عملکرد سریع ریکلوزر

در این قسمت یک الگوریتم جدید به منظور محاسبه زمان جدید قطع رله جریان زیاد ابتدای خط در فیدرهای توزیع با نفوذ بالای منابع PV پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی در شکل (۷) نمایش داده شده است. مطابق شکل در گام اول محاسبات اتصال کوتاه به منظور محاسبه جریان I_1 (جریان خطای اولیه) و جریان I_2 (جریان خطا پس از خروج اولین دسته از منابع PV) انجام می‌شود. سپس توسط شاخص FLI (رابطه (۱)) محل وقوع خطا مشخص می‌گردد. اگر FLI از مقدار آستانه تعیین شده کوچکتر باشد، محل وقوع خطا در سمت ولتاژ زیاد تشخیص داده شده و زمان قطع رله جریان زیاد ابتدای خط از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

از طرف دیگر مقادیر بزرگتر از آستانه‌ی شاخص FLI نشانگر وقوع خطا در سمت ولتاژ کم است. در این شرایط با محاسبه‌ی جریان خطای عبوری از فیوز شاخه‌ی خطا، شاخص PCI محاسبه می‌شود. در صورتی که مقدار به دست آمده برابر یک باشد، زمان قطع ریکلوزر ابتدای خط همچنان از رابطه (۲) محاسبه خواهد شد. از طرف دیگر مقادیر کوچکتر از یک نشان‌دهنده بر هم خوردن هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر است و در این شرایط با اصلاح مقدار TDS مطابق رابطه (۴) و

به منظور بررسی طرح حفاظتی فیدر مورد مطالعه شکل (۸) با ضریب نفوذ بالای منابع PV، سه سناریوی اتصال کوتاه سه فاز A، B و C در مکان‌های متفاوت شبکه شبیه‌سازی شده است. سناریوی A مربوط به ناحیه تحت حفاظت REC1 می‌باشد و هماهنگی بین ریکلوزر و فیوزهای پایین دست آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سناریوی B به ازای وقوع خطا در پایین دست REC2 بوده و به هماهنگی بین دو ریکلوزر شبکه می‌پردازد. هماهنگی بین REC2 و فیوزهای پایین دست آن در سناریوی C تحلیل می‌شود.

قابل ذکر است که طراحی سیستم حفاظتی باید به گونه‌ای باشد که در بدترین شرایط وقوع خطا، یعنی به ازای حداکثر ضریب نفوذ منابع PV و کمترین مقاومت خطا، بتواند هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی را حفظ نماید. برای این منظور ابتدا به ازای مقاومت خطای صفر با تغییر ضریب نفوذ سیستم‌های فتوولتائیک آستانه‌ای از بین رفتن هماهنگی فیوز - ریکلوزر در دو سناریوی A و C بررسی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی طرح حفاظتی به ازای بیشترین تغییرات جریان ابتدای خط و مقاومت خطای صفر در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در این شرایط در سناریوی A و C جریان خطای دیده شده توسط فیوز از ریکلوزر بیشتر بوده و باعث از بین رفتن هماهنگی بین آن‌ها می‌گردد، که نقایص سیستم حفاظتی موجود را به وضوح نشان می‌دهد. از طرف دیگر در سناریوی B، با توجه به محل وقوع خطا مشکل حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر ایجاد نمی‌گردد و هماهنگی حفاظتی بین دو ریکلوزر حفظ می‌شود.

در ادامه به منظور بازیابی هماهنگی حفاظتی بر اساس روش تطبیقی پیشنهادی، به ازای وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوهای A و C در بدترین شرایط نتایج حاصل از شبیه‌سازی قبل و بعد از اصلاح تنظیمات حفاظتی به ترتیب در جدول‌های (۴) و (۵) آورده شده است.

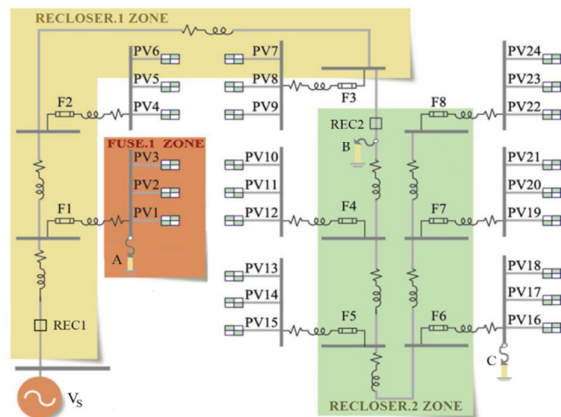
Table (2): Conventional protection scheme results in the worst short-circuit scenarios

جدول (۲): نتایج طرح حفاظتی معمول به 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

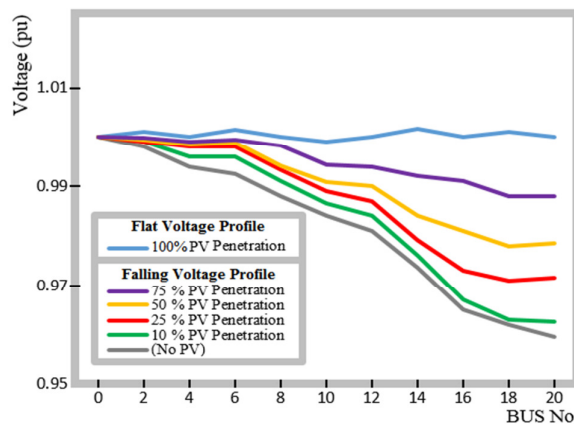
در ادامه به منظور بازیابی هماهنگی حفاظتی بر اساس روش تطبیقی پیشنهادی، به ازای وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوهای A و C در بدترین شرایط نتایج حاصل از شبیه‌سازی قبل و بعد از اصلاح تنظیمات حفاظتی به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در روش معمول حفاظتی با ثابت در نظر گرفتن TDS بر روی مقدار ۰/۵، منجر به عملکرد زود هنگام فیوز قبل از مد سریع ریکلوزر می‌گردد و در نتیجه شاهد عدم هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر خواهیم بود. از طرف دیگر با اعمال روش پیشنهادی و اصلاح مقدار TDS شاهد بازیابی هماهنگی حفاظتی بین

قابل ذکر است که تنظیمات تجهیزات حفاظت ولتاژی شبکه بر اساس استاندارد ANSI C84.1 انجام شده است [۲۶]. طبق استاندارد مذکور حدود تغییرات ولتاژ مجاز در سیستم توزیع در محدوده ۰/۹ تا ۱/۰۵ پریونیت قرار می‌گیرد. مطابق استاندارد IEEE929 کمترین سیکل زمانی که یک PV می‌تواند از فیدر جدا شود ۶ سیکل (۰/۱۲ ثانیه برای فرکانس ۵۰Hz) و با ضریبی از آن در نظر گرفت.



شکل (۸): فیدر توزیع مورد مطالعه با ضریب نفوذ بالای منابع PV

Fig. (8): Studied distribution feeders with high PVs penetration



شکل (۹): تغییرات پروفایل ولتاژ به دست آمده از مطالعات پخش بار فیدر توزیع مورد مطالعه

Fig. (9): Voltage profile variation obtained from studied distribution feeder load flow

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

اصلاح ضریب تنظیم زمانی عملکرد سریع ریکلوزر متناسب با ضریب نفوذ منابع فتولتاییک، حفظ فیوز را به ازای وقوع خطا در پایین دست فیوز تضمین می‌نماید. شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مقاله به کمک نرم‌افزار ETAP صورت پذیرفته است. به منظور تحلیل طرح حفاظتی پیشنهادی از شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت واقع در شرق اصفهان استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده‌ی توانایی طرح پیشنهادی به منظور حفظ هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر حتی در ضریب نفوذهای بالای منابع فتولتاییک و مقاومت خطای صفر می‌باشد.

فیوز و ریکلوزر خواهیم بود. در نتیجه در این شرایط به ازای وقوع خطا ابتدا مد سریع ریکلوزر عمل می‌نماید و منجر به حفظ فیوز می‌گردد و در صورتی که خطا گذرا نباشد با رعایت فاصله زمانی مناسب، فیوز شاخه خطا عمل می‌کند و مانع از گسترش خطا به شبکه بالادست می‌گردد. جدول (۵) نتایج طرح حفاظتی اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر در صورت وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوی A و C به ازای تغییرات ظرفیت PV را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید تطبیقی به منظور حفظ هماهنگی حفاظتی بین فیوز-ریکلوزر ارائه شده است. این روش با استفاده از

Table (3): Simulation results of recloser fast characteristic modification for short circuit fault in scenario A

جدول (۳): نتایج اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر در صورت وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوی A

Scenario	FLI Value	Fault type	PV Penetration Percentage	PCI	TDS	TDS _{modified}	Operation Time (Sec)		New Operation Time (Sec)	
							t _{Fuse1}	t _{Rec1}	t _{Fuse1}	t _{Rec1}
A	0.5	L-G	25	0.25	0.5	0.125	0.2	NO	0.2	0.16
			50	0.56		0.28	0.22	NO	0.22	0.19
			75	0.77		0.385	0.25	NO	0.25	0.21
			100	1		0.5	0.35	0.31	0.35	0.31
		LLL	25	0.23	0.5	0.115	0.19	NO	0.19	0.13
			50	0.55		0.275	0.2	NO	0.2	0.16
			75	0.74		0.37	0.22	NO	0.22	0.2
			100	1		0.5	0.33	0.28	0.33	0.28

Table (4): Simulation results of recloser fast characteristic modification for short circuit fault in scenario C

جدول (۴): نتایج اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر در صورت وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوی C

Scenario	FLI Value	Fault type	PV Penetration Percentage	PCI	TDS	TDS _{modified}	Operation Time (Sec)		New Operation Time (Sec)	
							t _{Fuse1}	t _{Rec1}	t _{Fuse1}	t _{Rec1}
C	0.7	L-G	25	0.23	0.5	0.115	0.15	NO	0.15	0.1
			50	0.53		0.265	0.18	NO	0.18	0.13
			75	0.73		0.365	0.22	NO	0.22	0.19
			100	1		0.5	0.3	0.25	0.3	0.25
		LLL	25	0.2	0.5	0.1	0.12	NO	0.12	0.09
			50	0.51		0.255	0.15	NO	0.15	0.11
			75	0.7		0.35	0.2	NO	0.2	0.16
			100	1		0.5	0.25	0.21	0.25	0.21

Table (5): Simulation results of recloser fast characteristic modification for short circuit fault in scenario A and C for PVs penetration variation

جدول (۵): نتایج اصلاح مشخصه سریع ریکلوزر در صورت وقوع خطای اتصال کوتاه سناریوی A و C به ازای تغییرات ظرفیت PV

PV Capacity (MW)	Scenario	Fault type	PCI	TDS _{modified}	New Operation Time (Sec)			
					t _{Fuse1}	t _{Rec1}	t _{Fuse6}	t _{Rec2}
1	A	L-G	0.77	0.385	0.35	0.31	---	---
		LLL	0.74	0.37	0.33	0.28	---	---
	C	L-G	0.73	0.365	---	---	0.3	0.25
		LLL	0.7	0.35	---	---	0.25	0.21
1.5	A	L-G	0.765	0.382	0.34	0.31	---	---
		LLL	0.705	0.37	0.32	0.27	---	---
	C	L-G	0.695	0.347	---	---	0.3	0.24
		LLL	0.657	0.328	---	---	0.24	0.2
2	A	L-G	0.705	0.352	0.32	0.3	---	---
		LLL	0.668	0.334	0.29	0.26	---	---
	C	L-G	0.652	0.326	---	---	0.28	0.23
		LLL	0.620	0.31	---	---	0.22	0.18
2.5	A	L-G	0.68	0.34	0.31	0.28	---	---
		LLL	0.621	0.311	0.27	0.24	---	---
	C	L-G	0.586	0.293	---	---	0.27	0.21
		LLL	0.526	0.263	---	---	0.2	0.15

ضمائم

ضمیمه (۳): خلاصه مشخصات فیدر مورد مطالعه

مشخصات	تجهیز	ردیف
مشخصات		
۲۰ کیلومتر	طول فیدر	۱
خطوط هوایی پانل نشده شعاعی	نوع فیدر	۲
خطوط با سطح ولتاژ متوسط: ۱۲۰ میلی متر مربع خطوط با سطح ولتاژ کم: کابل ۴×۵۰ میلی متر مربع	ضخامت خطوط	۳
افقی - فاصله بین خطوط: ۷۰-۱۴۰-۷۰ سانتی متر	نوع خطوط	۴
ولتاژ متوسط: ۲۰ کیلوولت، ولتاژ کم: ۴۰۰ ولت	ولتاژ نامی	۵
۹ متر	ارتفاع پایه تیرهای توزیع	۶
۴۰۰ کیلوولت آمپر با اتصال مثلث - ستاره زمین شده	ترانسفورماتور	۷
۲۵ مگاوات آمپر	توان پست اصلی	۸

ضمیمه (۱): طرح حفاظتی منابع PV (استاندارد IEEE929)

پارامتر	تغییرات	زمان قطع
ولتاژ ترمینال	$V < 0.5Pu$	۶ سیکل
	$0.5 \leq V \leq 0.88Pu$	۱۲۰ سیکل
	$0.88 \leq V \leq 1.1Pu$	عملکرد عادی
	$1.1 \leq V \leq 1.37Pu$	۱۲۰ سیکل
	$1.37Pu \leq V$	۲ سیکل
فرکانس شبکه	$f < 59.3$	۶ سیکل
	$59.3 \leq f \leq 60.5$	عملکرد عادی
	$60.5 \leq f$	۶ سیکل

ضمیمه (۲): مشخصه زمان - جریان رله‌های جریان زیاد

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

References

- [1] N. Nimpitiwan, G. Heydt, R. Ayyanar, S. Suryanarayana, "Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, pp. 634-641, Jan. 2007.
- [2] I. Zangiabadi, A. Etesami, "Power management of a wind energy conversion system equipped by DFIG", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 7, No. 26, pp. 23-34, Sep. 2015.
- [3] 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. on Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 1, pp. 58-67, Jan. 2013.
- [4] S. Shojaeean, H. Akrami, "Coordination between wind power, hydro storage facility and conventional generating units according to the annual growth load", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 4, No. 14, pp. 31-40, June 2013.
- [5] M.A. Zamani, T. S. Sidhu, A. Yazdani, "A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage microgrids", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 26, No. 3, pp. 1873-1883, Jul. 2011.
- [6] B. Kroposki, C. Pink, R. DeBlasio, H. Thomas, M. Simões, P.K. Sen, "Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 25, No. 3, pp. 901-908, Aug. 2010.
- [7] Y. Han, X. Hu, D. Zhang, "Study of adaptive fault current algorithm for microgrid dominated by inverter based distributed generators", *Proceeding of the IEEE/PEDG*, pp. 852-854, Jun. 16-18, Hefei, China, China, June 2010.
- [8] 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, April 2014.
- [9] T.E. McDermott, R.C. Dugen, "Distributed generation impact on reliability and power quality indices", *Proceeding of the IEEE/REPCON*, Colorado Springs, CO, USA, May 2002.
- [10] Y. Lu, L. Hua, J.Wu, G.Wu, G. Xu, "A study on effect of dispersed generator capacity on power system protection", *Proceeding of the IEEE/PES*, pp. 1-6, Tampa, FL, USA, June 2007.
- [11] 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, Oct. 2008.
- [12] A. Farzanehfard, S.A.M. Javadian, S.M.T. Bathaee, M.-R.Haghifam, "Maintaining the recloser-fuse coordination in distribution systems in presence of dg by determining dg's size", *Proceeding of the IEEE/DPSP*, pp. 124-129, Glasgow, UK, March 2008.
- [13] 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, June 2012.
- [14] H. Yamaguchi, T. Kataoka, "Current limiting characteristics of transformer type superconducting fault current limiter with shunt impedance and inductive load", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 23, No. 4, pp. 2545-2554, Oct. 2008.
- [15] Y. Zhang, R.A. Dougal, "Novel dual-FCL connection for adding distributed generation to a power distribution utility," *IEEE Trans. on Applied Supercond.*, Vol. 21, No. 3, pp. 2179-2183, Jun. 2011.
- [16] 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.
- [17] H.B. Funmilayo, K.L. Buyler-Purry, "An approach to mitigate the impact of distributed generation on the overcurrent protection scheme for radial feeders", *Proceeding of the IEEE/PSCE*, pp. 1-11, Seattle, WA, USA, March 2009.
- [18] D. Uthitsunthorn, T. Kulworawanichpong, "Distance protection of a renewable energy plant in electric power distribution systems", *Proceeding of the IEEE/powercon*, pp. 1-4, 2010, Hangzhou, China, Oct. 2010.
- [19] F.A. Viawan, D. Karlsson, A. Sannino, J. Daalde, "Protection scheme for meshed distribution systems with high penetration of distributed generation", *Proceeding IEEE/PSAMP*, pp. 99-104, Clemson, SC, USA, March 2006.
- [20] I.M. Chilvers, N. Jenkins, P.A. Crossley, "The use of 11 kV distance protection to increase generation connected to the distribution network", *Proceeding of the IEEE/ICDPSP*, Amsterdam, Netherlands, April 2004.
- [21] IEEE Approved Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection, IEEE P1547.7/D11, June 2013, Feb. 2014.
- [22] IEEE 929, IEEE Recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems, 2000.
- [23] IEEE Standard inverse-time characteristic equations for over-current relays, IEEE Standard C37, 112, 1996.
- [24] 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, Jan. 2012.
- [25] B. Hussain, S.M. Sharkh, S. Hussain, S. Hussain ; 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.
- [26] ANSI Standard for Voltage Ratings in Electric Power Systems and Equipment, ANSI C84.1-2006.