

یک طرح حفاظتی فیوز - ریکلوزر مبتنی بر مشخصه زمان - جریان - ولتاژ در سیستم‌های توزیع شامل منابع فتوولتائیک

بهادر فانی^(۱) - علیرضا کرباسچی^(۲)

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

(۲) کارشناس ارشد - مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۱۵

خلاصه: استفاده از تولیدات پراکنده در سیستم توزیع منجر به بهبود پروفایل ولتاژ شبکه و بهبود کیفیت توان و می‌گردد. اما از طرف دیگر باعث ایجاد عدم هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی بین می‌شود. در این مقاله یک مشخصه جدید زمان - جریان - ولتاژ به منظور حفظ هماهنگی فیوز - ریکلوزر ارائه شده است. این روش بر اساس اصلاح تطبیقی منحنی عملکرد سریع ریکلوزر متناسب با یک ترم ولتاژی که در حقیقت ضریبی از ولتاژ محل ریکلوزر در لحظه خطا بر حسب پریونیت می‌باشد، است. به کمک روش ارائه شده در لحظه وقوع خطا متناسب با محل خطا، شاخص اصلاحی مقدار ضریب تنظیم زمانی ریکلوزر محاسبه می‌گردد و سپس بر اساس این شاخص، ضریب تنظیم زمانی عملکرد سریع ریکلوزر به صورت تطبیقی اصلاح می‌شود و در نهایت زمان جدید 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 فتوولتائیک می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های توزیع، استراتژی حفظ فیوز، منابع تولید پراکنده فتوولتائیک.

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

Bahador Fani⁽¹⁾ - Alireza Karbaschi⁽²⁾

(1) Assistant Professor - Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

bahador.fani@gmail.com

(2) MSc - Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

alreka5847@gmail.com

Abstract: The use of Distributed Generations in the distribution system, has lead to improve both network voltage profile and power quality. But it can probably create miscoordination between protective devices. In this paper a new Time – Curent – Voltage characteristic is presented in order to return coordination between fuse and recloser. This method is based on an adaptive modification of fast operation curve of recloser, which is related to a voltage term that is infact the perunit voltage amplitude of recloser at fault accurance point. Based on the presented method, relate to the fault location, the Time Dial Setting (TDS) modification index (MI) is determined in fault location. Thus, according to this index, TDS of recloser fast operation is modified adaptively. Finally, new recloser trip time is calculated in this conditions for fuse saving. Simulation results show the performance of the proposed methods for both different types of fault scenarios and variation of PV penetration.

Index Terms: Distribution system, fuse saving method, photovoltaic distributed resource.

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

۱- مقدمه

طرح حفاظتی پیشنهادی که در حقیقت یک مشخصه زمان - جریان - ولتاژ است در بخش (۴) آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که بیانگر صحت عملکرد روش‌های پیشنهادی به‌ازای ضریب نفوذهای متفاوت سیستم‌های فتوولتاییک می‌باشد در بخش (۵) دیده می‌شود و در نهایت در بخش (۶) نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- هماهنگی تجهیزات حفاظتی در یک فیدر توزیع با نفوذ بالای منابع فتوولتاییک

تجهیزات حفاظتی متفاوتی مانند ریکلوزر، فیوز، سکشنالایزر و رله اضافه جریان با بریکرها در سیستم‌های توزیع استفاده می‌شوند. ریکلوزر و سکشنالایزر اغلب در بدنه سیستم‌های توزیع نصب شده است. رله اضافه جریان با بریکر مربوطه، معمولاً در ابتدای فیدر نصب شده می‌شوند. فیوزها نیز اغلب در شاخه‌های فرعی نصب می‌گردند.

در یک طرح حفاظتی مناسب، تمام خطاها در سیستم توزیع باید تشخیص داده شوند و به سرعت با حداقل منطقه قطع، برطرف گردند. بدنه فیدر باید به ازای وقوع خطا در شاخه‌های فرعی، به طور موقت بی‌انرژی گردد. آمار و ارقام نشان داده است که بین ۸۰ تا ۹۰ درصد از خطاها در خطوط توزیع هوایی ماهیتی گذرا دارند، که می‌تواند با یک عمل ریکلوزر برطرف شوند. عملیات سریع ریکلوزر باید با فیوزهای پایین‌دست هماهنگ شود. سکشنالایزر پس از تعداد از پیش تعیین شده عملیات ریکلوزر مجدد، به ازای خطاهای دائم عمل می‌کند. زمان صدور فرمان قطع یک کلید ریکلوزر مجدد از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید [۲۰]:

$$t_{recl} = \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{set}} \right)^p} + B \right] \times TDS \quad (1)$$

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 مورد در پیوست (۱) آورده شده است. I_{sc} جریان خطای دیده شده توسط تجهیز اضافه جریان است یا به عبارتی همان جریان سمت ثانویه ترانسفورماتور جریان می‌باشد. همچنین I_{set} جریان برداشت تجهیز اضافه جریان است. با تغییر مقادیر TDS و I_{set} می‌توان منحنی جریان - زمان کلید ریکلوزر مجدد را به سمت بالا یا پایین شیف‌ت داد. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، هماهنگی بین کلید ریکلوزر 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}) قرارگیرد. در این صورت فاصله زمانی هماهنگی (CTI) مناسب بین عملکرد این دو تجهیز حفظ می‌شود. در این مقاله به منظور داشتن یک حفاظت پشتیبان مناسب، فاصله زمانی بین عملکرد فیوز و ارسال فرمان قطع توسط کلید ریکلوزر مجدد ۱۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. حداقل حاشیه زمانی مورد قبول برای سیستم تست

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 روبه‌رو شده است [۵-۱].

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 پایین‌دست 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 [۷-۶]. 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 [۸-۱۰] 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 محدود کننده‌های جریان خطا: در مراجع [۱۴-۱۱] 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 پرهزینه 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 به اصلاح آرایش سیستم قدرت نیاز دارد و حتی در شرایطی استفاده از حفاظت دیستانس نیز لازم است [۱۹-۱۵].

در این مقاله اثر منابع فتوولتاییک بر روی هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر در سیستم‌های توزیع مورد بررسی قرار گرفته 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 ولتاژ محل ریکلوزر در 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) هماهنگی تجهیزات حفاظتی در یک فیدر توزیع با نفوذ بالای منابع فتوولتاییک ارائه شده است. در این بخش 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. در بخش (۳) مشخصه‌های غیر استاندارد ارائه شده پیشین به منظور برقراری هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر بیان شده است.

جریان خطا به دلیل جریان اضافی تریقی توسط منابع تولید پراکنده، از I_{F-max} بیشتر شود. در نتیجه، زمان قطع فیوز از نقطه A به نقطه A' شیفته شده می‌شود و فیوز در زمان کمتری نسبت به ریکلوزر مجدد عمل می‌کند یا هردو در یک زمان عمل می‌نمایند.

این مقاله یک روش حفاظتی بر مبنای اصلاح تنظیمات کلید ریکلوزر مجدد به صورت تطبیقی می‌باشد. برای این منظور یک شاخص اصلاح ضریب تنظیم زمانی معرفی می‌گردد. به کمک این شاخص هماهنگی منحنی مشخصه ریکلوزر مجدد به صورت تطبیقی اصلاح می‌گردد.

۳- مشخصه‌های غیر استاندارد ارائه شده پیشین

به منظور اصلاح تطبیقی عملکرد سریع ریکلوزر در سیستم‌های توزیع شامل تولیدات پراکنده، به ترتیب در مراجع [۲۱] و [۲۲] مشخصه‌های غیر استاندارد مطابق روابط (۲) و (۳) ارائه شده است:

$$t_{recl} = \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{set}} \right)^p - 1} + B \right] \times TDS \times \left(\frac{1}{e^{1-V_{sc}}} \right)^k \quad (2)$$

$$t_{recl} = \left[\frac{A}{\left(\ln \left(V_n \times \frac{I_{sc}}{V_{sc}} \right) \right)^p - \left(\ln \left(V_n \times \frac{I_{set}}{V_{set}} \right) \right)^p} + B \right] + D \times TDS \times \frac{(V_{sc})^k}{e^{V_{sc}}} \quad (3)$$

در مشخصه‌های بیان شده، t_{recl} زمان عملکرد رله، I_{sc} جریان خطای رله، I_{set} و V_{set} به ترتیب جریان و ولتاژ تنظیمی رله، V_{sc} اندازه ولتاژ خطا در واحد پرونیت (p.u.)، V_n مقدار ولتاژ فاز نامی سیستم می‌باشد.

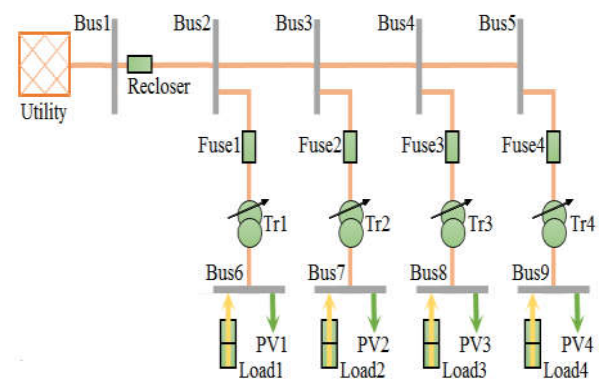
با استفاده از مشخصه‌های ارائه شده فوق زمان عملکرد حالت سریع ریکلوزر به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و هماهنگی حفاظتی در مقایسه با مشخصه استاندارد بهبود پیدا می‌کند. به منظور مقایسه مقدار فاکتور کاهنده زمان عملکرد مشخصه‌های غیر استاندارد (MI) ارائه شده فوق با یکدیگر، شبیه‌سازی‌های اتصال کوتاه سه فاز بر روی تمامی باس‌های سیستم تست شکل (۱) انجام شده است که نتایج در جدول (۲) دیده می‌شود. مطابق شکل وقوع یک خطا نزدیک به ریکلوزر (باس ۶) باعث افت ولتاژ قابل توجه و جریان خطای بزرگی می‌گردد. بنابراین در این شرایط خطا باید سریع بر طرف گردد. از طرف دیگر، اگر یک خطا در انتهای فیذر (باس ۹) رخ دهد، دامنه ولتاژ خطا بالاتر خواهد بود.

۴- طرح حفاظتی پیشنهادی

سهم اصلی این مقاله یک مشخصه جدید زمان - جریان - ولتاژ برای عملکرد سریع ریکلوزرهای مبتنی بر ریزپردازنده است. مشخصه جدید حفاظتی بر کاستی‌های روش‌های قبلی به منظور داشتن یک استراتژی ساده و قابل اعتماد حفظ فیوز، غلبه می‌نماید. لازم به ذکر است که همه ریکلوزرهای جدید دارای ریز پردازنده می‌باشند و تنها در برخی از موارد

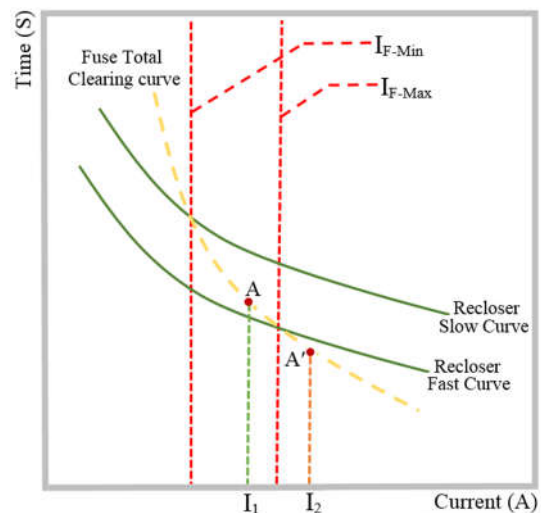
در بدترین حالت یعنی به ازای یک خطای سه فاز در سمت ولتاژ کم فیذر توزیع ۴۰ میلی‌ثانیه می‌باشد. منحنی مشخصه حالت سریع کلید ریکلوزر مجدد در فاصله‌های I_{F-min} و I_{F-max} زیر منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار می‌گیرد. از طرف دیگر، منحنی مشخصه کلید ریکلوزر مجدد بالای منحنی مشخصه ذوب فیوز قرار خواهد گرفت. در این شرایط، در صورت وقوع خطای گذرا در سمت ولتاژ کم فیذر توزیع نشان داده شده در شکل (۱)، منحنی مشخصه سریع کلید ریکلوزر مجدد زودتر از فیوز شاخه‌ی خطا عمل می‌کند و منجر به حفظ فیوز شاخه فرعی سیستم می‌گردد.

قابل ذکر است که در شکل (۱) یک شبکه‌ی توزیع با نفوذ بالای منابع PV نشان داده شده است. منابع فتوولتائیک نصب شده در یک سیستم توزیع مثل یک منبع توان ثابت با ضریب توان واحد عمل می‌کنند.



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

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



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

Fig. (2): Fuse – recloser miscoordination for fault inception in low voltage side of the Fig. (1) system

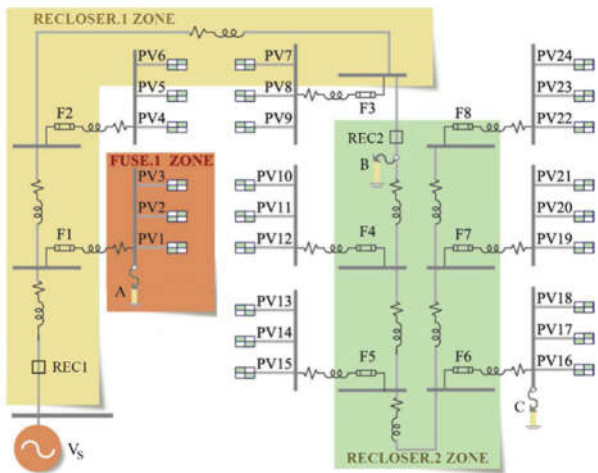
اتصال منابع تولید پراکنده به سیستم‌های توزیع بسته به سطح توان تولیدی، نوع و مکان قرارگیری آن‌ها بر هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر مجدد اثر خواهد گذاشت. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، عدم هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر مجدد زمانی اتفاق می‌افتد که

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 (۴) 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 (۲) آمده است.

در ابتدای فیدر شکل (۴) از یک کلید ریکلوزر مجدد (REC1) مدل Joslyn J351 استفاده شده است. به منظور حفاظت از انشعابات فرعی از فیوزها استفاده می‌شود. مطابق شکل در ابتدای تنها انشعاب بزرگ این فیدر، حفاظت ریکلوزر مجدد دیگری (REC2) نیز نصب شده است.

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 پایین دست (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 ریکلوزر مجدد در فاصله‌ی 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.



شکل (۴): فیدر توزیع مورد مطالعه با ضریب نفوذ بالای منابع PV
Fig. (4): Studied distribution feeders with high PVs penetration

به‌منظور بررسی طرح حفاظتی فیدر مورد مطالعه شکل (۴) 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.

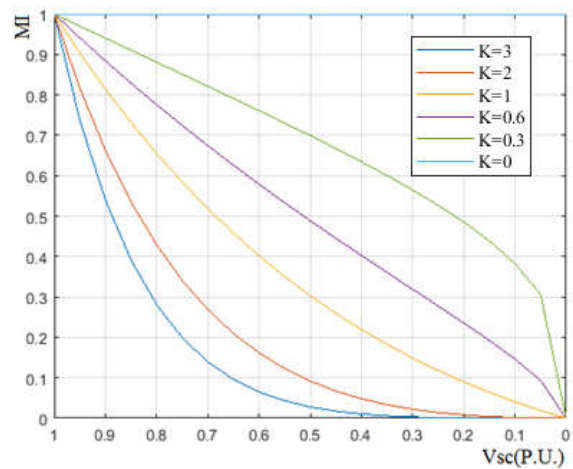
موجود در سیستم توزیع ریکلوزرها این‌گونه نیستند. در مشخصه پیشنهادی یک ترم ولتاژی به مشخصه زمان به شدت معکوس بر اساس استانداردهای IEEE یا IEC اضافه شده است. اگر ریکلوزر در ابتدای فیدر نصب شده باشد، دامنه ولتاژ را می‌توان با ترانسفورماتور ولتاژ نصب شده در پست به دست آورد. مشخصه پیشنهادی برای عملکرد حالت سریع ریکلوزر به صورت زیر می‌باشد:

$$t_{rect} = \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_{set}} \right)^p + B} \right] \times TDS \times \left(\frac{V_{sc}}{e^{1-V_{sc}}} \right)^k \quad (4)$$

با توجه به ترم پیشنهادی که به منظور اصلاح زمان عملکرد ریکلوزر ارائه شده است، می‌توان موارد زیر را تجزیه و تحلیل نمود:

۱- ولتاژ ابتدای خط در لحظه خطا (Vsc)، به عنوان مبنای ساخت ترم پیشنهادی می‌باشد. مقدار Vsc دقیقاً به موقعیت خطا بستگی دارد و بنابراین می‌تواند در واحد پرینیت به عنوان مرجع مناسبی به منظور اصلاح زمان عملکرد حالت سریع ریکلوزر مورد استفاده قرار گیرد. قابل ذکر است که اندازه‌گیری ولتاژ ابتدای خط به کمک یک ترانسفورماتور ولتاژ نصب شده در پست اصلی به صورت محلی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. ۲- از آنجایی که بر اساس روش پیشنهادی زمان عملکرد جدید ریکلوزر باید متناسب با ولتاژ ابتدای خط باشد، بنابراین باید به ازای خطاهای نزدیکتر به ریکلوزر که شاهد کاهش ولتاژ بیشتری هستیم، در زمان کمتری عمل نماید و به صورت برعکس به ازای خطاهای دورتر از ابتدای خط زمان عملکرد ریکلوزر افزایش یابد. برای مرتفع کردن این مورد باید از ترم 1-Vsc استفاده نمود.

شکل (۳) نتایج شبیه‌سازی ترم ولتاژی پیشنهادی را به کمک نرم افزار Matlab نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات ترم ولتاژی ارائه شده در این مقاله، بهترین حالت به ازای $K=3$ رخ می‌دهد. به ازای مقادیر کمتر حساسیت به ولتاژ کم و بر عکس به ازای مقادیر بالاتر از ۳، حساسیت به کوچکترین تغییرات ولتاژ به شدت افزایش می‌یابد.



شکل (۳) تغییرات ضریب اصلاحی (MI) به ازای ضرایب حساسیت به ولتاژ (K) متفاوت

Fig. (3): Variation of modification index (MI) due to different voltage sensitivity index (K)

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. همان طور 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 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. از طرف دیگر همانطور که از جداول (۳) و (۴) دیده می‌شود، به کمک روش پیشنهادی در زمان کمتری نسبت به روش‌های ارائه شده در مراجع [۲۰] و [۲۱] فرمان قطع ریکلوزر صادر می‌گردد. جدول (۵) مقایسه بین روش پیشنهادی و روش‌های پیشین به لحاظ حداکثر تعداد منبع فتولتائیک قابل اتصال به سیستم توزیع می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود روش پیشنهادی در ضریب نفوذهای بالاتر از روش‌های مشابه قبلی توانایی برقراری استراتژی حفظ فیوز را دارد.

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 فتولتائیک آستانه‌ی 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.

Table (1): Conventional protection scheme results in the worst short-circuit scenarios

جدول (۱): نتایج طرح حفاظتی معمول در بدترین شرایط اتصال کوتاه

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

Table (2): Comparison of voltage term variations for [23], [25] references for the different fault locations in Fig (1) network

جدول (۲): مقایسه تغییرات ترم ولتاژی مراجع [23] و [25] به ازای تغییرات مکان خطا در شبکه شکل (۱)

مرجع	Bus No.	9	8	7	6	5	4	3	2	1
روش پیشنهادی	$\left(\frac{V_{sc}}{e^{1-V_{sc}}}\right)^k$	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.55	0.4	0
[20]	$\left(\frac{1}{e^{1-V_{sc}}}\right)^k$	0.86	0.74	0.64	0.54	0.47	0.41	0.25	0.16	0.05
[21]	$\frac{(V_{sc})^k}{e^{V_{sc}}}$	0.33	0.29	0.26	0.23	0.2	0.17	0.095	0.043	0

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

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

Scenario	Fault type	PV Penetration Percentage	MI	TDS	TDS _{modified}	Operation Time (Sec)		New Operation Time (Sec)		
						t _{Fuse1}	t _{Rec1}	t _{Rec1}		
								Pr	[21]	[22]
A	L-G	25	0.23	0.5	0.115	0.15	NO	0.1	0.11	0.12
		50	0.53		0.265	0.18	NO	0.13	0.14	0.16
		75	0.73		0.365	0.22	NO	0.19	0.20	0.21
		100	0.8		0.4	0.3	0.25	0.25	0.26	0.28
	LLL	25	0.2	0.5	0.1	0.12	NO	0.09	0.1	0.11
		50	0.51		0.255	0.15	NO	0.11	0.12	0.14
		75	0.7		0.35	0.2	NO	0.16	0.17	0.18
		100	0.78		0.39	0.25	0.21	0.21	0.22	0.24

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

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

Scenario	Fault type	PV Penetration Percentage	MI	TDS	TDS _{modified}	Operation Time (Sec)		New Operation Time (Sec)		
						t _{Fuse1}	t _{Rec1}	t _{Rec1}		
								Pr	[21]	[22]
C	L-G	25	0.25	0.5	0.125	0.2	NO	0.16	0.17	0.18
		50	0.56		0.28	0.22	NO	0.19	0.20	0.21
		75	0.77		0.385	0.25	NO	0.21	0.22	0.24
		100	0.86		0.43	0.35	0.31	0.31	0.32	0.33
	LLL	25	0.23	0.5	0.115	0.19	NO	0.13	0.14	0.15
		50	0.55		0.275	0.2	NO	0.16	0.17	0.19
		75	0.74		0.37	0.23	NO	0.2	0.21	0.22
		100	0.84		0.42	0.33	0.28	0.28	0.29	0.31

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 اصلاح ضریب تنظیم زمانی عملکرد سریع ریکلوزر متناسب با مکان وقوع خطا، 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 فتوولتاییک و مقاومت خطای صفر می‌باشد.

Table (5): Maximum number of allowable connected photovoltaic resources in each bus of the studied system for different methods

جدول (۵): حداکثر تعداد منابع فتوولتاییک قابل اتصال در هر باس سیستم مورد مطالعه به ازای روش‌های مختلف

محل اتصال PV	حداکثر تعداد منابع فتوولتاییک قابل اتصال در هر باس			
	Std	[21]	[22]	Proposed
F1	1	3	3	4
F2	1	3	2	3
F3	1	2	2	3
F4	1	2	2	3
F5	1	2	2	3
F6	1	2	1	2
F7	1	2	1	2
F8	1	1	1	2

ضمائم

ضمیمه (۱): 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

ضمیمه (۲): خلاصه مشخصات فیدر مورد مطالعه

مشخصات	پارامتر	ردیف
۲۰ کیلومتر	طول فیدر	۱
خطوط هوایی بانل نشده شعاعی	نوع فیدر	۲
خطوط با سطح ولتاژ متوسط: ۱۲۰ میلی‌متر مربع خطوط با سطح ولتاژ کم: کابل ۴×۵۰ میلی‌متر مربع	ضخامت خطوط	۳
افقی - فاصله بین خطوط: ۷۰-۱۴۰-۷۰ سانتی‌متر	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

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. 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.
3. 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.
4. M. Samady-Shadlu, "A review on fault detection and diagnosis methods in distribution power networks", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 8, No. 31, pp. 51-66, Dec. 2017.
5. 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, Hefei, China, June 2010.
6. R. Javizadegan, M. Mahdavian, "Design and implementation of an optimal PV refrigeration system in the smart grid considering multi-objective optimization", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 8, No. 32, pp. 39-50, March 2018.
7. T.E. McDermott, R.C. Dugen, "Distributed generation impact on reliability and power quality indices", *Proceeding of the IEEE/REPCON*, pp. D3-1–D3-7, Colorado Springs, CO, USA, May 2002.
8. 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.
9. 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.
10. A. Farzanehrafat, 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 IET*, pp. 124–129, Glasgow, UK, March 2008.
11. 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.
12. 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.
13. Y. Zhang, R. A. Dougal, "Novel dual-FCL connection for adding distributed generation to a power distribution utility", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, No. 3, pp. 2179–2183, Jun. 2011.
14. 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, No. 5, pp. 9-18, May 2016.
15. H.B. Funmilayo, K.L. Buylar-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.
16. D. Uthitsunthorn, T. Kulworawanichpong, "Distance protection of a renewable energy plant in electric power distribution systems", *Proceeding of the IEEE/POWERCON*, pp. 1–4, Hangzhou, China, Oct. 2010.
17. F. A. Viawan, D. Karlsson, A. Sannino, and J. Daalde, "Protection scheme for meshed distribution systems with high penetration of distributed generation", *Proceeding of the IEEE/PSAMP*, pp. 99–104, Clemson, SC, USA, March 2006.
18. L.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, Vol. 2, pp. 551-554, Dec. 2004.
19. F. Hajimohammadi, B. Fani, "Adaptive coordination of fuse – recloser in a distribution system with high pv penetration", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 8, No. 30, pp. 23-32, Sep. 2017.
20. IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Over-current Relays, *IEEE Standard C37*, 112-1996.
21. K.A. Saleh, H.H. Zeineldin, A. Al-Hinai, E.F. El-Saadany, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using a new time-current-voltage characteristic", *IEEE Trans on Power Delivery*, pp. 537–544, Vol. 30, No. 2, April 2015.
22. 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, 468-478, Dec. 2017.

