

بررسی اثر منابع فتوولتائیک بر روی هماهنگی تجهیزات حفاظتی فیدر توزیع

محمد دادخواه^۱، بهادر فانی^۲ مجید معظمی^۳

^۱ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. mo_dadkhah@hotmail.com
^۲ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. bahador.fani@gmail.com
^۳ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. m_moazzami79@yahoo.com

چکیده - در سال های اخیر استفاده از منابع تولید پراکنده به سبب مزایای فراوان آن به شدت افزایش یافته است. برای استفاده بهینه از این منابع، مسائلی مانند جایابی بهینه نصب، تعیین ظرفیت بهینه و کاهش (و یا حذف) تاثیرات منفی آن ها بر سیستم های توزیع باید مورد بررسی قرار گیرد. یکی از مهمترین تاثیرات منفی این منابع، تاثیر بر حفاظت شبکه های توزیع می باشد که در این پروژه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله از صفحات PV به عنوان منابع پراکنده استفاده شده است. در ادامه نشان داده خواهد شد تحت چه شرایطی و تا چه اندازه صفحات PV بر روی هماهنگی بصورت ملموسی تاثیر می گذارند، با دسته بندی انجام شده از تصمیم گیری های نابجا و غیر ضروری جلوگیری خواهد شد. در ادامه، کارایی دسته بندی انجام شده توسط شبیه سازی آنها روی یک فیدر نمونه مورد ارزیابی قرار می گیرد. کلید واژه - منابع تولید پراکنده، هماهنگی تجهیزات حفاظتی، صفحات خورشیدی، رله جریان زیاد.

۱- مقدمه

نزدیکی شبکه های توزیع به مصرف کننده ها و همچنین با توجه به اینکه عمده خطاهای سیستم قدرت در این شبکه ها اتفاق می افتد حفاظت از آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. هر چند این شبکه ها با ولتاژ بالایی سروکار ندارند اما به دلیل ساختار، تنوع و تعدد تجهیزات به کار رفته در آنها، این شبکه ها بیشترین سهم را در افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت به خود اختصاص داده اند. آمارها و بررسی ها نشان می دهد تقریباً ۷۰٪ خاموشی های مشترکین به سیستم توزیع مربوط می شود. با وقوع هر خطا، تعدادی از بارها بی برق شده و از شبکه جدا می گردند که این مسئله باعث نارضایتی مشترکین می گردد. از طرف دیگر، وقوع خاموشی باعث افزایش میزان انرژی توزیع نشده و وارد آمدن زیان به شرکت های برق می شود. از این رو بهبود ارتباط تولید و مصرف و کاهش تعداد خاموشی ها در شبکه های توزیع، توجه بسیاری از متخصصین و کارشناسان صنعت برق را به خود جلب کرده است. در این میان نقش سیستم حفاظتی در برآوردن این خواسته، بسیار مهم و برجسته است. در ادامه این مقاله به بررسی عملکرد تجهیزات حفاظت جریانی در شبکه توزیع با حضور منابع پراکنده می پردازیم. اثر DGها (Distributed Generator) بر روی هماهنگی بین

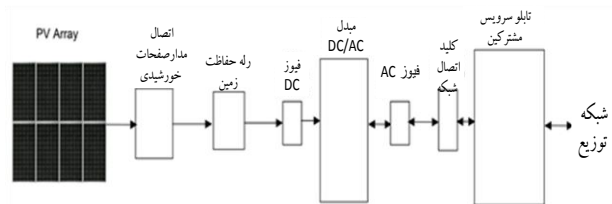
در سال های اخیر استفاده از منابع تولید پراکنده به سبب مزایای فراوان اقتصادی و زیست محیطی این منابع به شدت افزایش یافته است. اما با وجود این مزایا، مسایل زیادی در طراحی و بهره برداری و اتصال این منابع به شبکه های قدرت به وجود می آید. در صورتیکه این مسایل بررسی نشود، ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی در سیستم های قدرت گردد. از جمله مهمترین این مشکلات، ایجاد ناهماهنگی در سیستم حفاظتی شبکه های توزیع، امکان ایجاد شرایط جزیره ای، جایابی بهینه و تعیین ظرفیت تولید و مشکلات کنترل ولتاژ و فرکانس می باشد. برای کاهش تاثیرات منفی و افزایش مزایای اتصال آنها به شبکه های قدرت، مشکلات مذکور باید مورد بررسی قرار گیرند. موقعیت نصب این منابع می تواند باعث تغییر تاثیرات این منابع بر سیستم شود، به نحوی که ممکن است تاثیرات مثبت این منابع در مقایسه با تاثیرات منفی کمتر و یا بیشتر گردد. بنابراین با تعیین این پارامتر می توان تاثیرات منفی این منابع را کاهش داده و یا به کلی حذف نمود. با توجه به

از آنجائیکه اینورترهای مذکور به تنهایی توانایی کنترل ولتاژ و فرکانس خروجی خود را منطبق بر تغییرات بار ندارند لازم است در صورت غیر عادی شدن شرایط ولتاژ و فرکانس شبکه خاموش شوند [۶]. لذا حفاظت سیستم‌های PV بر اساس استاندارد IEEE ۹۲۹ مطابق جدول (۱) می‌باشد [۷]. هنگامیکه یک خطا روی فیدر رخ می‌دهد، سیستم PV جریانی را به سمت خطا جاری می‌سازد، مقدار این جریان به طرح و نوع اینورتر وابسته می‌باشد. از آنجائیکه سیستم‌های PV به نحوی طراحی شده‌اند تا بیشترین توان قابل استحصال را از صفحات خورشیدی به سمت شبکه انتقال دهند، حتی در شرایط کمبود ولتاژ که در هنگام وقوع خطا ایجاد می‌شود این اینورترها تلاش می‌کنند بیشترین توان را به شبکه انتقال دهند. به عنوان مثال این اینورترها مانند یک منبع توان ثابت عمل می‌کنند. هر چند اگر جریان خروجی سیستم PV از حد مجاز بیشتر شود اینورتر آنرا تا مقدار ماکزیمم خود محدود خواهد کرد. اینورترها جریانشان را در حد ۱ یا ۲ برابر جریان نامی محدود می‌کنند [۸]. با در نظر گرفتن این مطلب و مدت زمانیکه منابع PV بر اساس طرح حفاظتی جدول (۱) در بازه زمانی وقوع خطا در شبکه حضور دارند می‌توان سهم منابع PV را در جریان خطا تعیین کرد. لذا با توجه به تاثیر سهم جریان خطای منابع PV در جریان خطای ابتدای فیدر پروفایل جریان خطای ابتدای فیدر بصورت کاملاً متغیر خواهد بود. [۹]. شکل (۲) یک نمونه از پروفایل جریان خطا در ابتدای فیدر با حضور منابع PV را نشان می‌دهد.

رله‌های اضافه‌جریان در مقاله‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۵]. روش‌های متفاوتی در این مقاله‌ها پیشنهاد شده‌اند، مانند کاربرد سیستم‌های چند واسطه، روش‌های حفاظتی تطبیق پذیر و الگوریتم‌های ردیابی معکوس. این مطالعات جزئیات کمی از تاثیر PVها (Photo voltaic) را آشکار می‌کنند. در حقیقت یک وضعیت محدود از شکل را بیان می‌کنند بنابراین لازم است مطالعه‌ای انجام شود که نشان دهد تحت چه شرایطی و تا چه اندازه نفوذ PVها تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی هماهنگی بین رله‌های اضافه‌جریان می‌گذارند. در مقاله [۵] تاثیر محل نصب و ظرفیت منابع پراکنده بر روی هماهنگی‌ها بصورت محدود بررسی شده است بطوریکه یک روش جامع برای تصمیم‌گیری و حرکت بسوی اتوماسیون سیستم حفاظتی را ارائه نمی‌دهد. در قسمت دوم تاثیر محل نصب PVها روی پروفایل جریان خطا تشریح می‌شود. در قسمت سوم عملکرد رله‌های اضافه‌جریان و همچنین روی هماهنگی بین آنها توسط معادله‌ها و منحنی‌های جریان- زمان تشریح می‌شود. در این قسمت نشان داده خواهد شد در چه شرایطی تاثیر صفحات PV ممکن است منجر به از دست رفتن هماهنگی بین رله‌های اضافه‌جریان شود. در قسمت چهارم روش پیشنهادی برای ارزیابی هماهنگی در یک فیدر مبتنی بر صفحات PV معرفی می‌شود. در قسمت پنجم نتیجه‌گیری از تحقیق ارائه خواهد شد.

۲- حفاظت PV و تاثیر آن بر پروفایل جریان خطا

شکل (۱) یک شبکه نوعی که یک PV محلی به آن متصل شده است را نشان می‌دهد. این یک PV به همراه اینورتر AC/DC با قابلیت تطبیق ولتاژ ۱۲۰ یا ۲۴۰ ولت متناوب می‌باشد. اینورتر سیستم‌های PV از نوع TG (Tie Grid) می‌باشند به این مفهوم که فقط در زمان اتصال به فیدر توزیع و برقدار بودن شبکه توانایی تولید توان دارند.

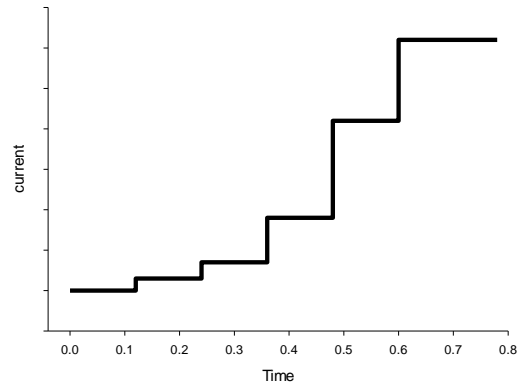


شکل (۱) اجزاء اصلی یک سیستم PV محلی

جدول (۱) طرح حفاظتی صفحات PV

زمان قطع		
۶ سیکل	$V < 0.5pu$	ولتاژ
۱۲۰ سیکل	$0.5pu \leq v \leq 0.88pu$	
عملکرد عادی	$0.88pu \leq v \leq 1.01pu$	
۱۲۰ سیکل	$1.01pu \leq v \leq 1.37pu$	
۲ سیکل	$1.37pu \leq v$	فرکانس
۶ سیکل	$f < 59.3$	
عملکرد عادی	$59.3pu \leq f \leq 60.5pu$	
۶ سیکل	$60.5 < f$	

حفاظتی تحلیل کرد میزان امپدانس خطا است. در صورت وقوع خطا با امپدانس نزدیک به صفر منابع PV بالا دست تجهیز حفاظتی و پائین دست محل وقوع خطا به ترتیب PV_{up} و PV_{af} بر روی تجهیز حفاظتی پائین دست و بالا دست خود تاثیر چندانی ندارند. زیرا در این شرایط جریان خطای اصلی شبکه بسیار بیشتر از جریان خطای محدود شده منابع PV می باشد. لذا می توان نتیجه گیری کرد در شرایط وقوع خطا با امپدانس صفر، منابع PV بر روی عملکرد تجهیزات حفاظتی تاثیر چندانی نمی گذارند. ولی در شرایط وقوع خطا با امپدانس زیاد اثر گذاری منابع PV نسبت به محل قرارگیری آنها در فیدر بر روی تجهیزات حفاظتی قابل بررسی می باشد.



شکل (۲). پروفایل جریان خطا در ابتدای فیدر توزیع با حضور منابع PV

۳-۱- منابع بالادست تجهیز حفاظتی (PV_{up}):

با فرض قابل توجه بودن تعداد PV های بالادست تجهیز حفاظتی، این منابع باعث کاهش مقدار جریان پست اصلی می شوند ولی به همان مقدار سهم منابع PV به جریان پست اصلی اضافه خواهد شد. لذا در این شرایط PV ها تاثیر چندانی بر روی تجهیز حفاظتی پائین دست خود ندارند. در شرایط حداقل بودن منابع PV بالادست نیز به دلیل ناچیز بودن سهم جریان PV ها در برابر جریان I_s این منابع تاثیر چندانی بر روی عملکرد PD ندارند. از آنچه که بیان شد می توان نتیجه گیری کرد بطور کلی منابع PV نصب شده در بالادست تجهیز حفاظتی تاثیر چندانی بر روی عملکرد آن ندارند. شکل (۴) تفاوت پروفایل جریان خطا در ابتدای فیدر و پروفایل جریان خطا عبوری از تجهیز حفاظتی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود جریان خطای ابتدای فیدر در اثر حضور منابع PV متغیر می شود ولی در محل تجهیز حفاظتی در پایین دست PV ها جریان تقریباً بدون تغییر است.

۳-۲- تاثیر منابع PV مابین PD_r و محل خطا (PV_{ufa})

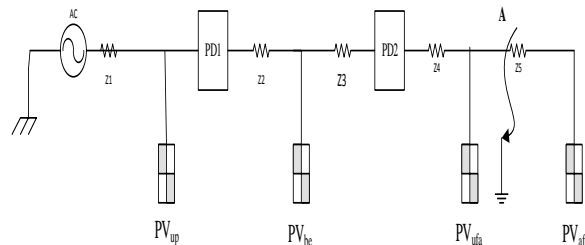
بر روی هماهنگی:

در شرایط نفوذ بالای منابع PV و حضور آنها در پائین دست تجهیز حفاظتی و بالادست خطا باعث تاثیر پذیری جریان ابتدای خطا از آنها می شود [۱۰]. در این شرایط که جریان عبوری از تجهیز حفاظتی با جریان ابتدای فیدر برابر است زمان عملکرد تجهیز حفاظتی دچار تغییر می شود.

۳-۲- ارزیابی تاثیر محل نصب صفحات PV بر روی

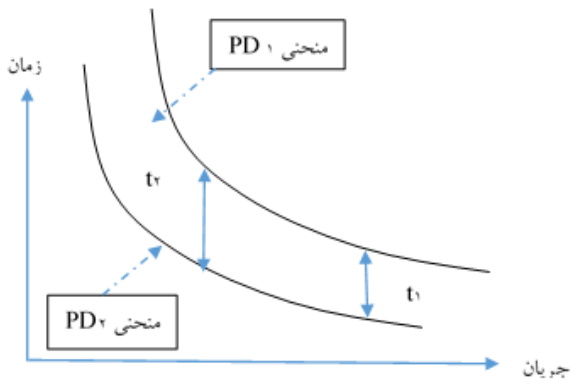
هماهنگی بین رله های اضافه جریان

محل نصب سیستم های PV در یک فیدر توزیع در تعیین میزان تاثیر گذاری آنها روی عملکرد و هماهنگی تجهیزات حفاظتی مهم است. شکل (۳) طرح کلی یک فیدر توزیع و محل های ممکن برای نصب منابع PV روی آن را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود چهار محل کلی برای نصب منابع پراکنده روی این فیدر تعیین شده است. PV های بالادست تجهیز حفاظتی PD_1 که با PV_{up} نشان داده شده اند. PV های مابین تجهیز حفاظتی PD_r و محل وقوع خطا که با PV_{ufa} نمایش داده شده اند. منابع PV که بعد از محل خطا قرار دارند و با PV_{af} نام گذاری شده اند. منابع PV که مابین دو تجهیز حفاظتی قرار دارند و با PV_{be} شناسایی می شوند.



شکل (۳). محل نصب منابع PV در یک فیدر توزیع و بررسی اثر آنها بر روی سیستم حفاظتی

محل قرار گیری منابع PV بر روی عملکرد تجهیز حفاظتی تاثیرگذار است ولی آنچه که عامل تعیین کننده محسوب می شود و براساس آن می توان اثر محل نصب PV ها را بر عملکرد تجهیز



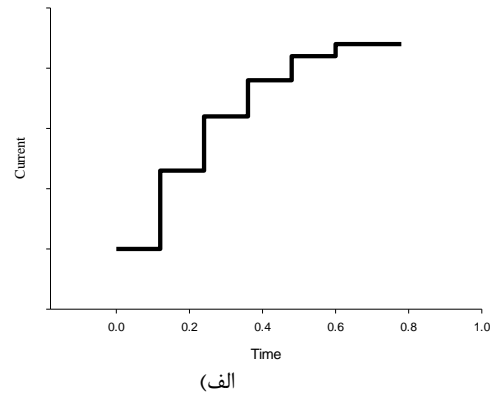
شکل (۵). تاثیر منابع PV مابین تجهیز حفاظتی و محل خطا. تغییرات جریان برای دو تجهیز حفاظتی یکسان است.

۳-۳- بررسی اثر منابع PV واقع در پایین دست محل خطا بر روی هماهنگی:

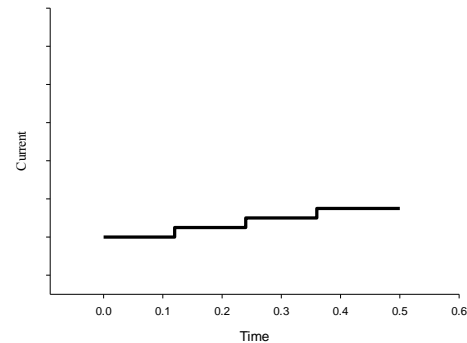
در لحظه وقوع خطا با فرض زیاد بودن امپدانس خطا، منابع PV واقع در پایین دست محل خطا بوسیله جریان تزریقی به سمت محل خطا ولتاژی را در محل خطا ایجاد می کنند [۱۱]. در این شرایط جریان ابتدای خط و همچنین جریان گذرنده از تجهیز حفاظتی تحت تاثیر مقدار ولتاژ ایجاد شده قرار می گیرد. به این صورت که با کاهش جریان زمان عملکرد PD_1 و PD_2 بصورت همزمان افزایش می یابد. لذا می توان نتیجه گیری کرد با وقوع خطا امپدانس بالا، منابع PV پایین دست خطا، هماهنگی را مختل نمی کنند. در صورت صفر بودن امپدانس خطا، جریانهای تزریقی از سمت منابع PV پایین دست قادر به ایجاد ولتاژ در محل خطا نخواهند بود لذا در این شرایط منابع PV پایین دست بر روی جریان گذرنده از تجهیز حفاظتی و بالطبع زمان عملکرد آن اثری ندارند.

۳-۴- تاثیر منابع PV واقع بین PD_1 و PD_2 بر روی هماهنگی:

طبق آنچه که مورد بحث قرار گرفت برای خطاهایی با مقاومت کم، زمان عملکرد PD ها بدون تغییر باقی می ماند اما مطابق شکل (۶)، PV های قرار گرفته ما بین دو PD ، جریان اندازه گیری شده توسط PD_1 را کاهش می دهند و منجر به افزایش زمان



(الف)

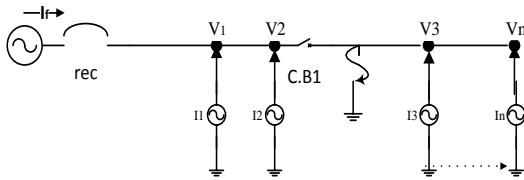


(ب)

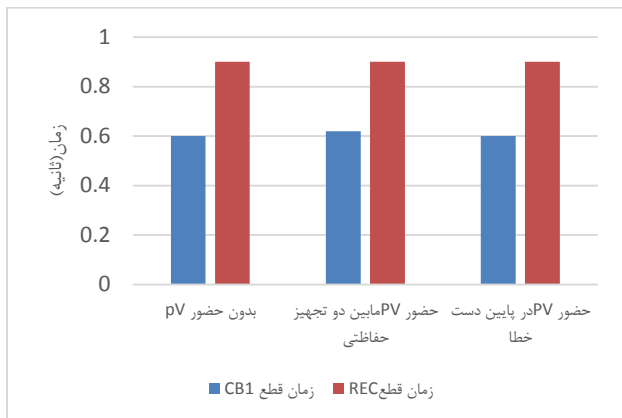
شکل (۴). تفاوت پروفایل های جریان خطای عبوری از ابتدای فیدر و تجهیز حفاظتی. (الف) پروفایل جریان خطای ابتدای فیدر. (ب) پروفایل جریان خطا عبوری از تجهیز حفاظتی.

با فرض وقوع خطا در نقطه A برای این حالت و قرار گرفتن هر دو تجهیز حفاظتی در بالادست منابع PV میزان کاهش جریان و افزایش زمان عملکرد آنها به یک مقدار خواهد بود. شکل (۵) مطالب بیان شده را بخوبی نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است اختلاف زمانی بین زمان های قطع PD ها از t_1 به t_2 افزایش می یابد. نکته مهم اینکه مقیاس این نمودار لگاریتمی است، لذا t_1 از t_2 خیلی بزرگتر خواهد بود به این معنی که این گروه از PV ها نه تنها هماهنگی بین عملکرد PD ها را دچار اختلال نمی کنند بلکه با افزایش فاصله بین زمانهای قطع PD ها موجب بهبود هماهنگی آنها نیز می شوند.

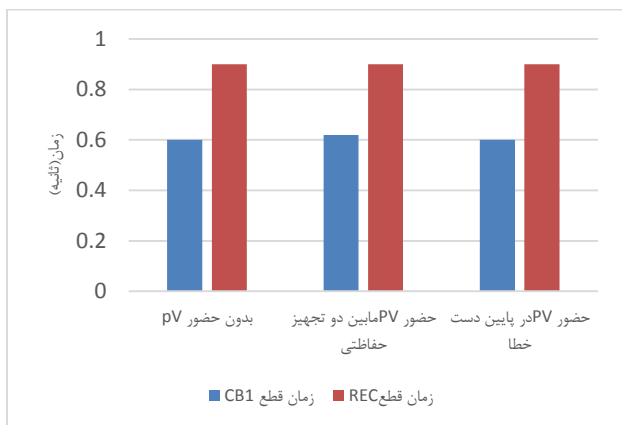
در زمان وقوع خطا جریان در محل خطا برابر با مجموع جریان گذرنده از تجهیز حفاظتی و جریان های تزریقی از سمت منابع PV خواهد بود.



شکل (۷). شمای تک خطی فیدر مورد مطالعه.



شکل (۸). نتایج شبیه سازی بر روی فیدر مورد مطالعه. خطا با مقاومت زیاد

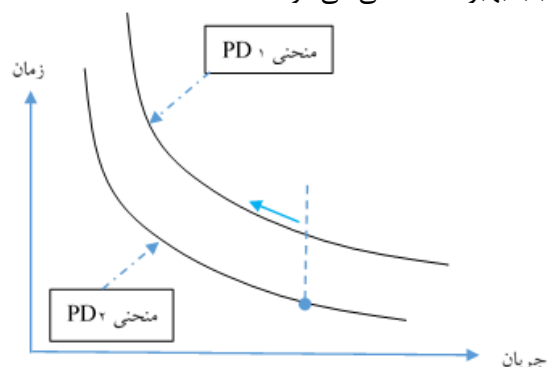


شکل (۹). نتایج شبیه سازی با فرض مقاومت صفر خطا.

۵- نتیجه گیری:

در یک فیدر توزیع با حضور منابع پراکنده پروفایل جریان خطا نسبت به یک فیدر معمولی نسبتاً متفاوت است. در این مقاله بررسی شد مکان نصب PVها چه تاثیری بر روی میزان تغییرات جریان خطا در ابتدای فیدر و محل تجهیز حفاظتی می گذارد. در

قطع PD_1 خواهند شد. در حالیکه تاثیر چندانی بر عملکرد PD_2 نخواهند گذاشت. دلیل این امر آنست که PVهایی که مابین دو PD قرار دارند پائین دست PD_1 و بالای دست PD_2 محسوب می شوند لذا مطابق آنچه قبلاً نتیجه گیری شد PVهای بالای دست یک PD تاثیر چندانی بر عملکرد آن نخواهند گذاشت. اما با کاهش جریان اندازه گیری شده PD بالای دست خود موجب افزایش زمان قطع آن خواهند شد، لذا با افزایش حاشیه زمانی بین زمان های عملکرد دو PD سبب بهبود هماهنگی می شوند.



شکل (۶). تاثیر PVهای مابین PD_1 و PD_2 بر روی هماهنگی. در صورت

زیاد بودن امپدانس خطا هماهنگی بهتر می شود.

۴- شبیه سازی

در این قسمت برای مقایسه نتیجه گیری های انجام شده در قسمت قبلی با آنچه که در واقعیت اتفاق می افتد، یک فیدر واقعی شبیه سازی شد. فیدر مورد مطالعه مطابق شکل (۷) در ابتدای آن یک ریکلوزر و در پایین دست آن یک رله جریان زیاد نصب شده است. در ابتدا شرایط وقوع خطا با امپدانس زیاد مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در نمودار شکل (۸) مشاهده می شود، با خروج PVهای بالای دست رله جریان زیاد هماهنگی بین دو تجهیز حفاظتی وضعیت بهتری پیدا میکند. همچنین به دلیل زیاد بودن امپدانس خطا با خروج PVهای پایین دست محل خطا جریان ابتدای فیدر افزایش می یابد، ولی به دلیل تغییر جریان هر دو تجهیز حفاظتی اختلالی در هماهنگی بوجود نمی آید. شبیه سازیها بار دیگر با در نظر گرفتن خطا با مقاومت صفر انجام شد. از نتایج بدست آمده مشخص می شود که در این شرایط صرف نظر از محل نصب PVها هماهنگی از بین نخواهد رفت. شکل (۹).

این بین امیدانس خطا عامل مهمی است که بر اساس آن می توان به بررسی محل نصب PVها پرداخت. بر اساس نتایج بدست آمده حضور PVها در اکثر موارد نه تنها موجب بهم ریختگی طرح حفاظتی فیدر نمی شود بلکه با افزایش حاشیه زمانی موجب بهبود آن نیز می شود.

مراجع

- [۱] J. Keller, B. Kroposki, R. Bravo, S. Robles, "Fault current contribution from single-phase PV inverters," ۳۷th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, ۱۹-۲۴ June ۲۰۱۱, pages: ۱۸۲۳-۱۸۲۶
- [۲] T.S. Sidhu, D. Bejmert, "Short-circuit current contribution from large scale pv power plant in the context of distribution power system protection performance," IET Conference on Renewable Power Generation, ۶-۸ September ۲۰۱۱
- [۳] J. Moirangthem, K.R. Krishnanand, N. Saranjit, "Optimal coordination between overcurrent relay using an enhanced discrete differential evolution algorithm in a distribution system with DG," International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS), December ۲۰۱۱
- [۴] P. C. Maiola, J. G. Rolim, "A multi-agent system for protection coordination between radial systems in the presence of distributed generation," ۱۱th International Conference on Developments in Power systems Protection, ۲۳-۲۶ April ۲۰۱۲
- [۵] A. F. Naiem, Y. Hegazy, A. Y. Abdelaziz, and M. A. Elsharkawy, *A Classification Technique for Recloser-Fuse Coordination in Distribution Systems With Distributed Generation*, ۲۰۱۱
- [۶] Reinaldo Tonkoski, Dave Turcotte, and Tarek H. M. EL-Fouly, *Impact of High PV Penetration on Voltage Profiles in Residential Neighborhoods*, ۲۰۱۲
- [۷] IEEE ۹۲۹, "IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems", ۲۰۰۰
- [۸] IEEE P1۵۴۷.۷TM/D۴.۰, "Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource", ۲۰۰۰
- [۹] M. E. Baran, H. Hooshyar, Z. Shen, A. Huang, "Accommodating high PV penetration on distribution feeders," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. ۳, no. ۲, June ۲۰۱۲, pages: ۱۰۳۹ - ۱۰۴۶
- [۱۰] Anderson Hoke, Rebecca utler, Joshua Hambrick, . and Benjamin Kroposki, *Steady-State Analysis of Maximum Photovoltaic Penetration Levels on Typical Distribution Feeders*,
- [۱۱] Mesut E. Baran, Hossein Hooshyar, Zhan Shen, and Alex Huang, *Accommodating High PV Penetration on Distribution Feeders*, ۲۰۱۲