

الگوریتم تجزیه و تحلیل خطا در سیستم‌های توزیع متصل به سلول‌های فتوولتائیک

فرزاد حاجی‌محمدی^۱ - دکتر بهادر فانی^۲

^۱ گروه برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، farzad.hajimohammadi@gmail.com

^۲ گروه برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، bahador.fani@gmail.com

چکیده - با نصب تولیدات پراکنده در سیستم‌های توزیع مسائل حفاظتی از اهمیت خاصی برخوردار شده‌اند. یکی از این موارد هماهنگی بین عملکرد تجهیزات حفاظتی در این نوع سیستم‌ها می‌باشد. در این مقاله یک الگوریتم حفاظتی بر اساس مقدار کاهش ولتاژ در زمان وقوع خطا به منظور خروج به موقع سلول‌های فتوولتائیک و جلوگیری از آسیب به آن‌ها و همچنین هماهنگی بین عملکرد رله اضافه جریان و باز بست پسیو بر اساس افزایش سطح جریان اتصال کوتاه در سیستم‌های توزیع با ضریب بالایی از سلول‌های فتوولتائیک پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه شده عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه - سیستم‌های توزیع، سلول‌های فتوولتائیک، هماهنگی تجهیزات حفاظتی.

۱- مقدمه:

هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی موجود در سیستم توزیع نمایش داده می‌شود. در بخش ۴ تخمین زمان عملکرد رله ولتاژی بر اساس تغییرات سطح ولتاژ دو سر اینورتر سیستم فتوولتائیک در چند سیکل اول خطا در قالب یک جدول حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۵ هماهنگی بین رله اضافه جریان و ریکلوزر بر اساس سطح جریان خطا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. شبیه‌سازی طرح پیشنهادی توسط نرم افزار Etap در بخش ۶ انجام پذیرفته است و در نهایت نتیجه در بخش ۷ آمده است.

۲- رفتار سیستم فتوولتائیک تحت شرایط خطا:

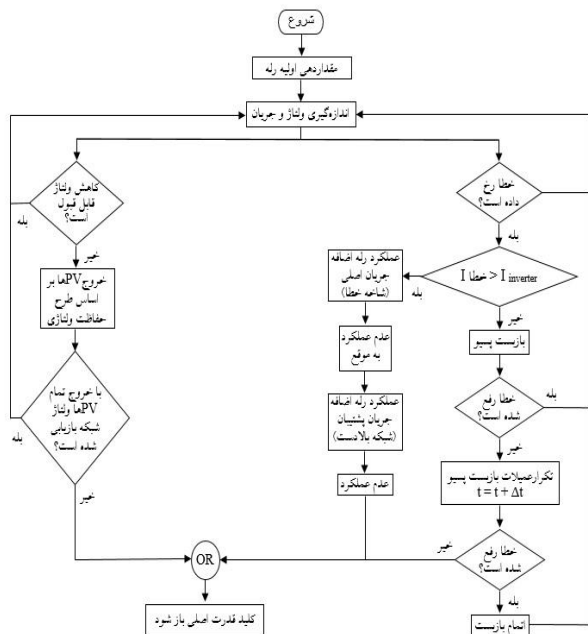
شبکه شبیه‌سازی شده در این مقاله یک فیدر توزیع نوعی است. مجموعه‌ای از سلول‌های فتوولتائیک در باس انتهایی این سیستم که دارای بارهایی با توان بیشتر نسبت به سایر باس‌ها می‌باشد قرار داده شده است و هر سیستم PV قادر به تولید ماکسیمم بار است. برای تجزیه و تحلیل اثر PVها بر روی چنین سیستمی، ما در ابتدا به یک مدل برای سیستم PV نیاز داریم. شکل (۱) یک شبکه نوعی متصل به سیستم PV را نشان می‌دهد که یک سیستم با واسط اینورتری است که ولتاژ ۱۲۰ یا ۲۴۰ ولت ac را تطبیق می‌دهد.

یکی از اثرات اصلی سیستم فتوولتائیک در فیدر توزیع بر حفاظت سیستم است، چون PVها در طول خطا، به جریان خطا کمک می‌کنند [۱] و [۲]. این تغییرات جریان خطا به نوبه‌ی خود بر روی عملیات و هماهنگی تجهیزات حفاظتی در چنین فیدرهایی، به طور قابل توجهی اثر می‌گذارند [۳] و [۴]. تاثیر تولیدات پراکنده بر هماهنگی بین رله‌های اضافه جریان در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۸]. از طرف دیگر در مرجع [۹] یک روش تجزیه و تحلیل خطا برای تولیدات پراکنده با واسط اینورتری پیشنهاد شده است. هدف این روش تخمین جریان زیاد اولیه در طرح کنترلی کاهش ولتاژ می‌باشد که تولید پراکنده با واسط اینورتری می‌تواند در طول سیکل اول خطا می‌تواند تزیق نماید.

این مطالعات تنها جزئیات محدودی از اثرات تولیدات پراکنده بر هماهنگی تجهیزات حفاظتی را بیان می‌نماید و اکثراً تنها هماهنگی حفاظت جریان را پوشش می‌دهند، بنابراین نیاز به یک مطالعه جامع در مورد رفتار PVها تحت شرایط خطا و تاثیر آن بر هماهنگی بین عملکرد تجهیزات حفاظتی می‌باشد، از این رو در این مقاله یک الگوریتم برای این منظور ارائه شده است. در بخش ۲ رفتار سیستم فتوولتائیک تحت شرایط خطا بررسی شده است. در بخش ۳ الگوریتم حفاظتی پیشنهادی با رویکرد

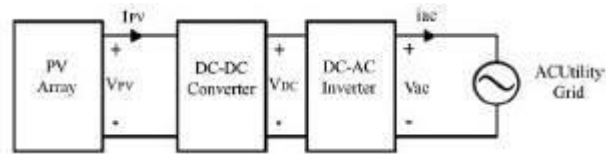
۳- الگوریتم حفاظتی پیشنهادی:

شکل (۳) الگوریتم حفاظتی پیشنهادی با رویکرد هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی موجود در سیستم توزیع را نمایش می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی بر دو اساس کار می‌کند، یکی به ازای تغییرات ولتاژ و دیگری به ازای تغییرات سطح جریان اتصال کوتاه می‌باشد که در اکثر مقالات به طور جداگانه بررسی شده‌اند.



شکل (۳): الگوریتم حفاظتی پیشنهادی

اما هدف این مقاله نه تنها رسیدن به طرحی جامع برای هماهنگی بین زمان قطع رله حفاظت جریانی و ولتاژی می‌باشد بلکه به دنبال الگوریتمی برای عملکرد بازست پسو به منظور عدم عملکرد بی‌مورد رله‌های حفاظتی می‌باشیم. در ابتدا طرح حفاظت ولتاژی ارائه می‌شود و سپس رویکردی برای تعیین زمان قطع رله اضافه جریانی و بررسی بازست پسو مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و در نهایت طرح پیشنهادی زمان قطع تجهیزات در قالب جدولی ارائه می‌شود که می‌توان در عمل جدول به دست آمده را در تنظیمات رله‌های دیجیتال جهت حفاظت از فیدر توزیع متصل به سیستم PV وارد نمود.

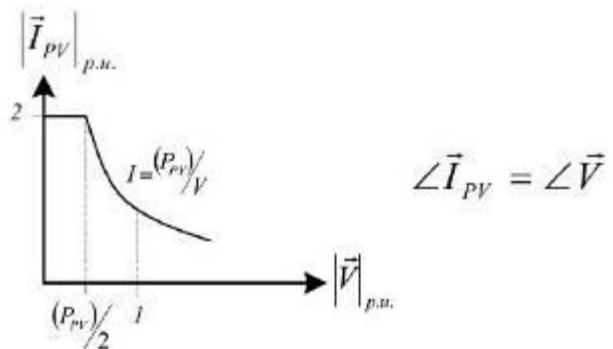


شکل (۱): اجزای اصلی یک سیستم PV

وقتی یک خطا در فیدر رخ می‌دهد، سیستم فتوولتائیک جریان خطا را تغذیه می‌کند. جریان تزریقی وابسته به طراحی اینورتر PV است. از آن جایی که سیستم PV به گونه‌ای طراحی شده است که ماکسیمم توان را از پنل‌های PV به سیستم انتقال دهد، لذا اینورتر PV تلاش می‌کند که این توان را، حتی تحت شرایط رخداد کمبود ولتاژ، که در طول خطا پدید می‌آید انتقال دهد، به این معنی که تلاش می‌کند مانند یک منبع توان ثابت عمل کند. از این رو، جریان تزریقی توسط اینورتر PV به سیستم به طور تقریبی از رابطه (۲) به دست می‌آید که P_{pv} توان انتقالی از پنل‌های PV و V ولتاژ ac ترمینال است. بنابراین سیستم PV، منحنی مشخصه $V-I$ نشان داده شده در شکل (۲) را خواهد داشت. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است اینورتر در رو حالت جریان ثابت و توان ثابت عمل می‌کند. روابط (۱) و (۲) سهم جریان خطا در یک سیستم توزیع در اثر حضور سیستم فتوولتائیک را بیان می‌کند:

$$I_{SC}(Bus) = I_{SC}(DS) + I_{SC}(PV) \quad (1)$$

$$I_{SC}(PV) = \frac{P_{PV}}{V} \quad (2)$$

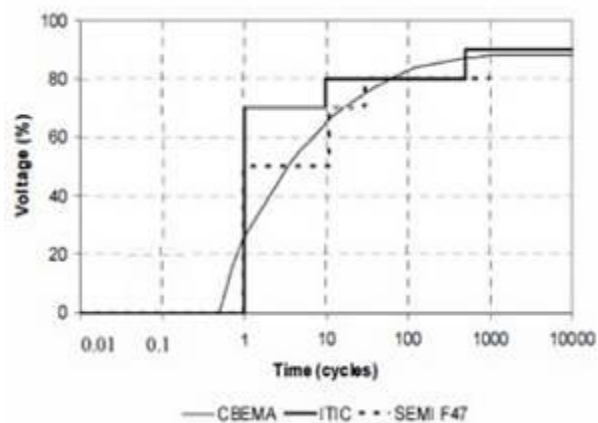


شکل (۲): منحنی V-I یک سیستم PV

۴- تجزیه و تحلیل حفاظت اضافه ولتاژ:

در اکثر مقالات تجزیه و تحلیل کاهش ولتاژ با استفاده از نمودار نشان داده شده در شکل (۴) صورت پذیرفته است. این نمودار ولتاژ-زمان با عناوین CBEMA، ITIC و SEMI F47 تماماً به طور مشترک توسط شرکت EPRI ارائه شده است [۱۰-۱۲]. همان طور که این نمودارها نمایش می‌دهند به ازای کاهش بیش از ۵۰ درصدی ولتاژ در کمتر از شش سیکل حفاظت سیستم تولید پراکنده باید فرمان قطع صادر کند.

از طرف دیگر طرح حفاظتی اضافه ولتاژ دیگری توسط استاندارد IEEE92 را برای چنین سیستم‌ها ارائه شده است [۱۳]. مدل حفاظتی در مقاله در صورت تشخیص ولتاژ و فرکانس غیر عادی، PV را در زمان مشخصی از شبکه جدا می‌کند، این زمان قطع وابسته به این است که ولتاژ ترمینال چگونه کم شود.



شکل (۴): نمودار حفاظتی CBEMA، ITIC و SEMI F47

جدول (۱): طرح حفاظت ولتاژی برای یک سیستم PV

درصد تغییرات ولتاژ	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۲۰	۱۳۰
مدت زمان خروج PV سیستم (سکان)	۶	۱۰	۳۰	۹۰	۱۲۰	۱۲۰	۲

مدلی که ما در این مقاله ارائه می‌دهیم در حقیقت تخمین نمودار حفاظتی CBEMA به یک جدول حفاظتی (Lookup Table) می‌باشد که مقادیر کاهش ولتاژ و به تبع زمان خروج PV از سیستم توزیع به صورت جدولی (۱) به عنوان تنظیمات به رله حفاظتی جهت خروج به موقع PV داده می‌شود.

۵- تجزیه و تحلیل هماهنگی حفاظت اضافه جریان و عملکرد بازبست پسیو:

در مرجع [۱۴] با استدلال بر این که سطح جریان اتصال کوتاه در چند سیکل اول خطا متغیر است، یک الگوریتم برای تخمین زمان عملکرد رله اضافه جریان ارائه شده است. اما در این مقاله زمان قطع رله اضافه جریان را تنها وابسته به سطح جریان نمی‌دانیم و هم زمان اثر کاهش ولتاژ را بر این زمان عملکرد نیز مد نظر می‌گیریم.

همان طور که قبلاً اشاره شد جریان تزریقی توسط اینورتر سیستم PV در هنگام وقوع خطا به طور تقریبی از رابطه P_{pv}/V ، به دست می‌آید که PV توان انتقالی از پنل‌های PV و ولتاژ ac ترمینال است. اگر این جریان از ماکسیمم جریان عبوری از اینورتر بیشتر شود، اینورتر این جریان را در سطح ماکسیمم خودش محدود می‌کند. اینورترها جریان خودشان را به یک یا دو برابر جریان عبوری محدود می‌کنند [۱۵]. الگوریتم پیشنهادی ما در این مقاله برای حفاظت اضافه جریان بر همین اساس استوار است که آیا جریان خطا از جریان قابل تحمل عبوری از اینورتر سیستم PV بیشتر می‌باشد یا خیر؟

اگر این جریان بیشتر از ماکسیمم جریان PV نباشد وارد عملیات بازبست پسیو می‌شویم که نهایتاً بعد از ۱۲۰ سیکل و سه بار عملیات بازبست اگر خطا رفع نشود با وجود این که جریان آن بیشتر از حد عبوری اینورتر نمی‌باشد، اما به دلیل ایجاد کاهش ولتاژ دو سر اینورتر، ریکلوزر به کلید قدرت اصلی فرمان تریپ صادر می‌کند. اما، اگر سطح جریان اتصال کوتاه بیشتر از جریان عبوری اینورتر باشد، ما در این مقاله با شبیه‌سازی و ثبت تغییرات لحظه‌ای مقادیر جریان و ولتاژ اینورتر سیستم PV در هنگام وقوع خطا مانند نمودار ولتاژ - جریان شکل (۲) یک lookup table به صورت جدول (۲) به دست

آوردیم که زمان قطع تجهیزات حفاظتی و خروج PV به ازای تغییرات توام سطح جریان و ولتاژ خطا ارائه شده است.

جدول (۲): طرح حفاظت ولتاژ-جریان برای یک سیستم PV

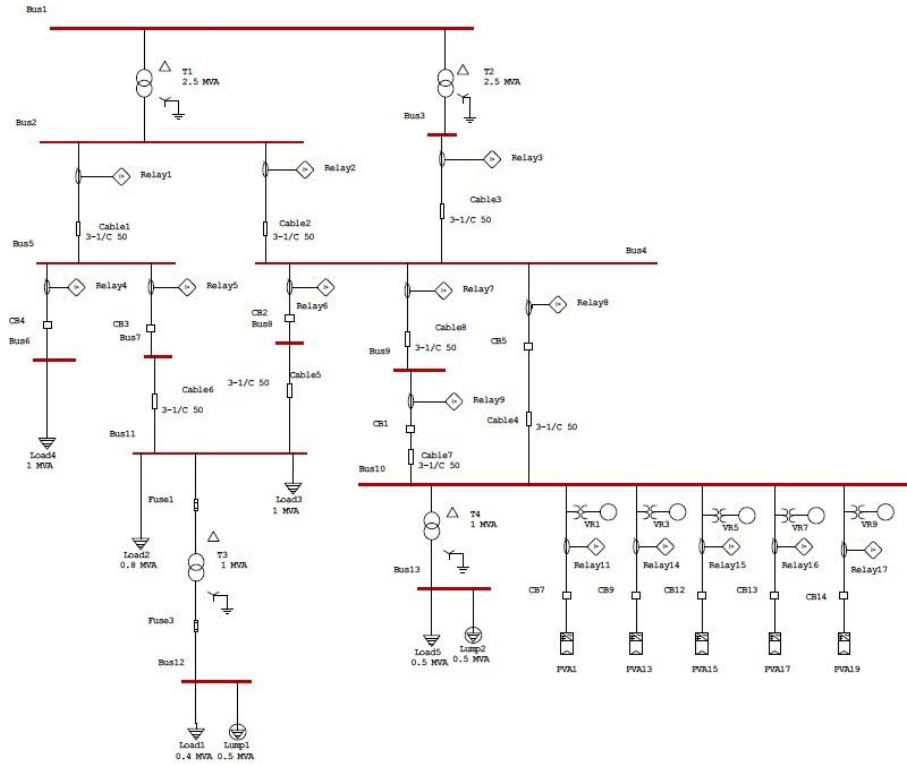
۱,۵	۱,۴	۱,۳	۱,۲	۱,۱	۱	۰,۹	۰,۸	۰,۷	۰,۶	۰,۵	تغییرات ولتاژ (پریونیت)
۰,۶	۰,۶	۰,۷	۰,۸	۰,۹	۱	۱,۱	۱,۲	۱,۳	۱,۷	۲	تغییرات جریان (پریونیت)
۲	۲	۱۲۰	۱۲۰	عملکرد نرمال			۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۶	زمان تریپ (سیکل)

قابل ذکر است که رله های به کار برده شده در سیستم مورد مطالعه از نوع IDMT-SI هستند و تنظیمات رله های جریانی شبکه بالادست بر اساس رابطه ارائه شده توسط IEC 255-3 در دو حالت حضور و عدم حضور سیستم PV محاسبه شده است. نتایج شبیه سازی، عملکرد الگوریتم حفاظتی پیشنهاد شده در مقاله را تایید می کنند.

۶- شبیه سازی طرح پیشنهادی:

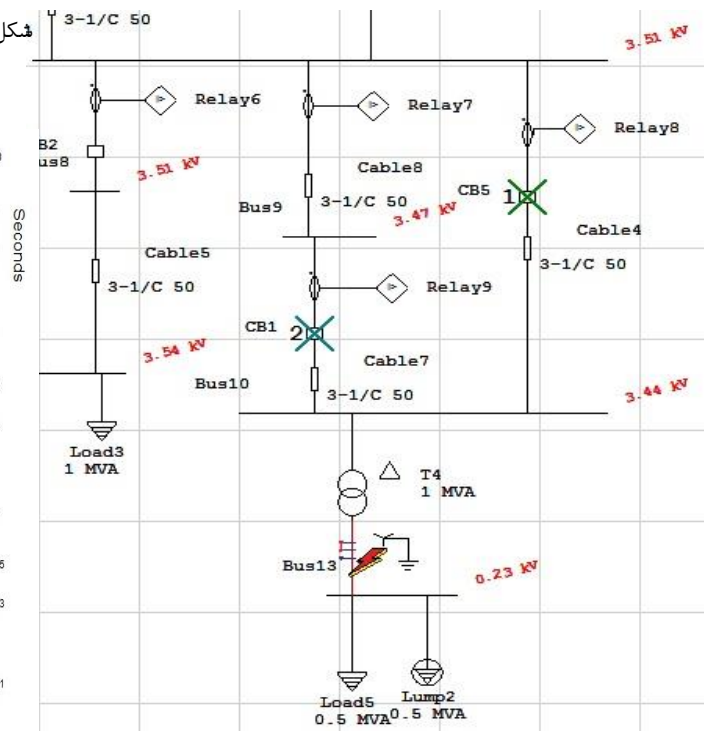
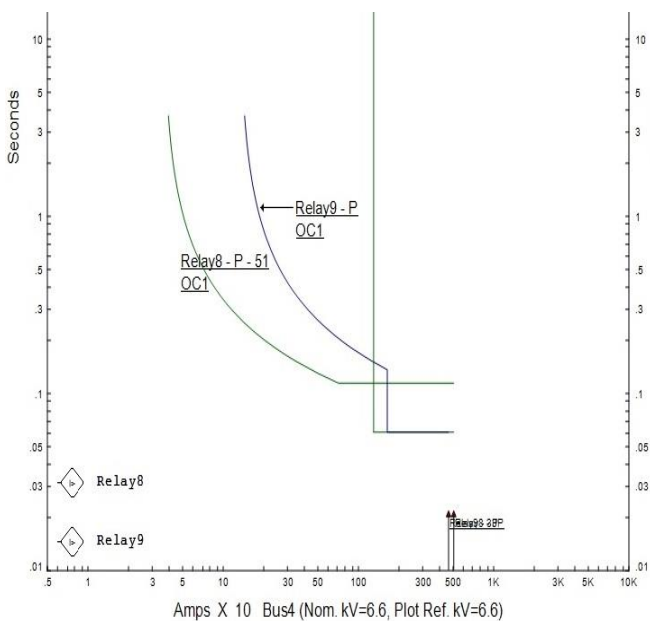
شبکه مورد مطالعه، یک سیستم توزیع شعاعی ۶,۶ کیلو ولت است که به کمک نرم افزار Etap شبیه سازی شده است. نمای تک خطی شبکه ذکر شده در شکل (۵) آمده است. تنظیمات رله های ولتاژ و جریان که به صورت محلی برای هر سلول فتوولتاییک قرار داده شده است مطابق با طرح حفاظتی ذکر شد در جدول (۲) می باشد.

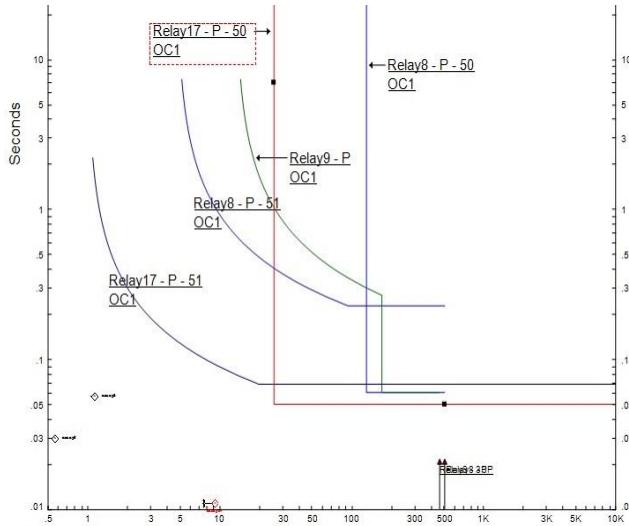
۲۰۲۱ و آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل (۵): شبکه مورد مطالعه شبیه سازی شده در نرم افزار Etap

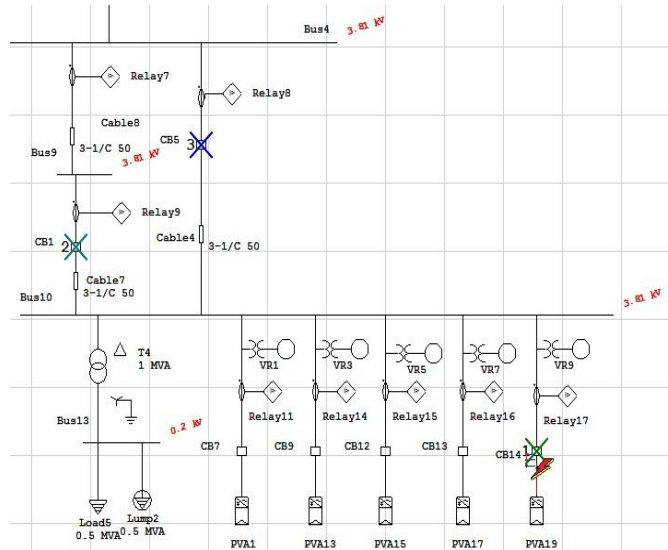
شکل (۸): عملکرد صحیح رله های جریانی در صورت عدم حضور PV به ازای خطای سه فاز نمایش داده شده در باس ۱۳





شکل (۱۱): نمودار رله های جریانی در صورت عدم حضور PV به ازای خطای سه فاز در شکل (۱۰)

شکل (۹): نمودار رله های جریانی در صورت عدم حضور PV به ازای خطای سه فاز در شکل (۸)



شکل (۱۰): عملکرد صحیح رله های جریانی در صورت عدم حضور PV به ازای خطای سه فاز نمایش داده شده

[1] J.Keller, B. Kroposki, R. Bravo, and S. Robles, "Fault current contribution from single-phase PV inverters," in Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Jun. 19–24, 2011, pp. 1822–1826

[2] T. S. Sidhu and D. Bejmert, "Short-circuit current contribution from large scale PV power plant in the context of distribution power system protection performance," in Proc. IET Conf. Renewable Power Generation RPG, Sep. 6–8, 2011, pp. 1–6.

[3] M. E. Baran, H. Hooshyar, Z. Shen, and A. Huang, "Accommodating high PV penetration on distribution feeders," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 1039–1046, Jun. 2012.

[4] R. A. Walling, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke, and L. A. Kojovic, "Summary of distributed resources impact on power delivery systems," IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 3, pp. 1636–1644, Jul. 2008.

[5] H. Hooshyar, M. E. Baran, "Fault Analysis on Distribution Feeders with High Penetration of PV Systems," IEEE Transactions on Power Systems, Available Online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

[6] P. C. Maiola, J. G. Rolim, "A multi-agent system for protection coordination between radial systems in the presence of distributed generation," 11th International Conference on Developments in Power Systems Protection, 23-26 April 2012, pages: 1 - 6.

[7] W. El-khattam, T. S. Sidhu, "Resolving the impact of distributed renewable generation on directional overcurrent relay coordination: a

۷- نتیجه گیری:

در این مقاله عملکرد سیستم های فتوولتائیک تحت شرایط خطا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. الگوریتم هماهنگی توام حفاظت اضافه جریان و ولتاژ و همچنین عملکرد بازبست پسیو در فیدرهای توزیع شامل سیستم PV ارائه گردید. تخمین زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی توسط نتایج شبیه‌سازی مورد تائید قرار گرفت.

با توجه به این که در حال حاضر نفوذ تولیدات پراکنده در فیدرهای توزیع در حال رو به افزایش است، لذا تنظیمات رله به منظور هماهنگی آنها باید مورد بازبینی قرار گیرد و نیاز به مطالعات بیشتر در مورد تاثیرات تولیدات پراکنده بر هماهنگی تجهیزات حفاظتی موجود در سیستم توزیع و به طور ویژه برای رله های اضافه جریان می‌باشد.

۸- مراجع:



چهارمین کنفرانس ملی ایده‌های نو در مهندسی برق



۱۳۹۴-۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

[11] IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power, IEEE Std. 446, 1995.

[12] IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment, IEEE Std. 1346, 1988.

[13] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE 929, 2000.

[14] H. Hooshyar, Luigi Vanfretti, "Coordination Assessment of Overcurrent Relays in Distribution Feeders with High Penetration of PV Systems," PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble.

[15] Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection, IEEE.7/D4

case study," IET Journal of Renewable Power Generation, vol. 3, no. 4, December 2009, pages: 415 - 425.

[8] H. Zayandehroodi, A. Mohamed, H. Shareef, M. Mohammadjafari, M. Farhoodnea, "A novel protection coordination strategy using back tracking algorithm for distribution systems with high penetration of DG," IEEE International Conference on Power Engineering and Optimization, 6-7 June 2012, pages: 1 - 6

[9] M. E. Baran and I. El-Markaby, "Fault analysis on distribution feeders with distributed generators," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 4, pp. 1757-1764, Nov. 2005.

[10] G. T. Heydt, "Electric power quality," in Stars in a Circle, Scottsdale, AZ, 1991.