

## بررسی پروفایل جریان خطا در یک فیدر توزیع انرژی الکتریکی با نفوذ بالای منابع فتوولتائیک

محمد دادخواه<sup>۱</sup>، بهادر فانی<sup>۲</sup> و مجید معظمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. mo\_dadkhah@hotmail.com

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. bahador.fani@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. m\_moazzami79@yahoo.com

چکیده - عملکرد تجهیزات حفاظتی در یک فیدر توزیع سنتی بر اساس جریان خطای گذرنده از آن تجهیز می‌باشد. در این فیدر جریان خطای گذرنده از تجهیز حفاظتی با جریان خطا در محل خطا تفاوت چشمگیری ندارد. همچنین پروفایل جریان خطا با گذشت زمان دچار تغییر نخواهد شد. ولی در یک فیدر با ضریب نفوذ بالای منابع پراکنده پروفایل جریان خطا نسبت به یک فیدر توزیع سنتی متفاوت خواهد بود. لذا برای انجام تنظیمات رله و برقراری هماهنگی بین چند تجهیز حفاظتی تعیین پروفایل جریان خطا الزامی است. در این مقاله به بررسی تغییرات جریان خطا در یک فیدر توزیع با نفوذ بالای منابع فتوولتائیک و ارائه روشی برای بدست آوردن پروفایل جریان خطا می‌پردازیم. کلید واژه- منابع فتوولتائیک، پروفایل جریان خطا، هماهنگی تجهیزات حفاظتی، رله جریان زیاد

آرایش شبکه از شعاعی به حلقوی و از تک منبع به چند منبع می‌شود، سیستم حفاظتی موجود که بر مبنای آرایش سنتی شبکه پایه‌گذاری شده است دچار اختلال خواهد شد. به عنوان مثال کلید بازبست خودکار در شبکه ممکن است با عملکرد خود باعث ایجاد بازبست غیرسنکرون شود. یکی از مهمترین تاثیرات منفی منابع پراکنده ایجاد تغییر رفتار در جریان خطا در مدت زمان حضورشان در حین خطا می‌باشد [۲]. لذا در ادامه این مقاله به بررسی این پدیده خواهیم پرداخت. از بین تکنولوژی‌های موجود برای تولیدات پراکنده منابع فتوولتائیک به دلیل هزینه‌های نسبتاً کمتر و فضای مورد نیاز کمتر برای نصب، مورد استقبال بیشتری قرار گرفته است. لذا در این مقاله از منابع فتوولتائیک به عنوان منابع تولیدات پراکنده استفاده خواهیم کرد. در این رابطه مقاله‌های متعددی به بررسی مشکلات آنها پرداخته‌اند. در مقاله [۳] یک روش تحلیل خطا برای DGهای (Distributed Generator) مبتنی بر اینورتر پیشنهاد شده است. هدف این روش برآورد اولین پیک جریانی است

### ۱- مقدمه

امروزه با افزایش هزینه‌های انتقال توان از مکان‌های دوردست به سمت مصرف کننده، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و محدود بودن ظرفیت خطوط انتقال، استفاده از منابع تولید پراکنده به شدت افزایش یافته است. استفاده از این منابع دارای مزیت‌هایی است که مهمترین آنها عبارتند از: کاهش قیمت تمام شده انرژی برای مصرف کننده آزادسازی ظرفیت خطوط انتقال بدون نیاز به احداث شبکه‌های جدید، کاهش میزان تلفات، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خطوط انتقال و توزیع و افزایش پایداری سیستم قدرت. منابع تولید پراکنده با داشتن مزیت‌های گوناگون دارای معایبی نیز می‌باشند که مهمترین آنها عبارتند از: اختلال در عملکرد سیستم حفاظتی شبکه توزیع انرژی [۱]، جزیره‌ای شدن ناخواسته تعدادی از مصرف کننده‌ها و اختلال در کنترل ولتاژ و فرکانس شبکه. از آنجائیکه حضور منابع پراکنده در شبکه توزیع موجب تغییر

طرح حفاظتی مورد استفاده برای سیستم PV عامل مهم دیگری است که هنگام وقوع خطا، روی سهم صفحات PV در جریان خطا اثر می گذارد. در جدول (۱) خلاصه وضعیت طرح حفاظتی پیشنهادی استاندارد IEEE929 برای چنین سیستمی ارائه شده است [۶]. مطابق این جدول زمانیکه تجهیز حفاظتی وضعیت غیر عادی ولتاژ و یا فرکانس شبکه را احساس کند، صفحات PV را از شبکه جدا می کند. باید دقت نمود مطابق آنچه که در جدول آمده است، مدت زمانیکه طول می کشد تا سیستم حفاظتی صفحات PV را از شبکه جدا کند به میزان افت ولتاژ ترمینال های سیستم PV در هنگام وقوع خطا بستگی دارد. مطابق این طرح اگر در شرایط وقوع خطا ولتاژ ترمینال به کمتر از ۰/۵ pu برسد صفحات PV در زمانی کمتر از ۶ سیکل قطع خواهند شد. و اگر این ولتاژ بیشتر از ۰/۵ pu باشد، این زمان تا ۱۲۰ سیکل طولانی خواهد شد. شکل (۲) چنین وضعیتی را نشان می دهد.

جدول (۱) طرح حفاظتی صفحات PV

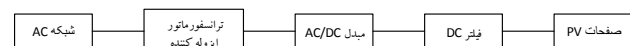
زمان قطع		
۶ سیکل	$V < 0.5pu$	ولتاژ پایین
۱۲۰ سیکل	$0.5pu \leq v \leq 0.88pu$	
عملکرد عادی	$0.88pu \leq v \leq 1.1pu$	
۱۲۰ سیکل	$1.1pu \leq v \leq 1.37pu$	
۲ سیکل	$1.37pu \leq v$	ولتاژ بالا
۶ سیکل	$f < 59.3$	
عملکرد عادی	$59.3pu \leq f \leq 60.5pu$	
۶ سیکل	$60.5 < f$	

زمانیکه در  $t = 0$  خطا رخ می دهد در امتداد فیدر به سمت انتهای آن همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، PV1 و PV2 که به محل خطا نزدیکتر هستند، ولتاژ ترمینال آنها به زیر ۰/۵ PU کاهش پیدا می کند. بنابراین مطابق جدول (۱) در مدت زمان ۰/۱۲ ثانیه از فیدر جدا می شوند. اما در PV3 و PV4 ولتاژ ترمینالها بیشتر از ۰/۵ pu خواهد بود، بنابراین مطابق طرح حفاظتی در مدت زمان ۲/۴ ثانیه قطع خواهند شد. از سوی دیگر PV5 در کل زمان وقوع خطا به کار خود ادامه می دهد چرا که ولتاژ ترمینال آن بزرگتر از ۰/۸۸ pu خواهد بود. از آنجائیکه در یک فیدر با نفوذ بالای منابع PV شبکه از تک منبع به چند منبع

که DG مجهز به اینورتر کنترل شونده با ولتاژ می تواند در حین اولین سیکل وقوع خطا تزریق کند. روش های متداول تحلیل اتصال کوتاه فقط امکان ایجاد یک تصویر لحظه ای از جریان خطا را فراهم می کنند [۴]، لذا این روش ها برای تحلیل تغییرات جریان خطا در فیدرهایی با نفوذ بالای DG و ارزیابی اثر آنها روی تجهیزات حفاظتی ناکارآمد هستند. در قسمت سوم روشی را برای بدست آوردن پروفایل جریان خطا با حضور منابع پراکنده ارائه می کنیم. و در قسمت چهارم روش ارائه شده را بر روی یک فیدر واقعی مورد آزمایش قرار می دهیم.

## ۲- تحلیل نحوه اثرگذاری منابع PV بر روی جریان خطا

برای تحلیل تاثیر صفحه های PV (Photo Voltaic) روی جریانهای خطا ابتدا به یک مدل برای صفحه های PV نیاز می باشد. شکل (۱) اجزای کلی یک سیستم PV خانگی متصل شده به یک شبکه متناوب را نشان می دهد. این یک سیستم مبتنی بر اینورتر با قابلیت تولید ولتاژ ۱۲۰ یا ۲۴۰ ولت متناوب می باشد. زمانیکه یک خطا در فیدر توزیع رخ می دهد، سیستم PV جریانی را به سمت نقطه خطا جاری می کند که این جریان وابسته به نوع اینورتر PV می باشد. از آنجائیکه سیستم های PV بصورتی طراحی شده اند تا بیشترین مقدار ممکن توان را از صفحه های PV به شبکه تحویل دهند، لذا در شرایط وقوع خطا و کاهش ولتاژ نیز سعی می کنند بیشترین توان ممکن را تامین کنند. این وضعیت آنها همانند عملکرد یک منبع توان ثابت می باشد. بنابراین جریان تزریقی مبدل های PV به سمت شبکه را می توان توسط رابطه  $I = \frac{P_{pv}}{V}$  تقریب زد. در این رابطه  $P_{pv}$  توان دریافتی از صفحه های PV و ولتاژ متناوب ترمینال آن می باشد. هرچند اگر این جریان از حد مجاز اینورتر فراتر رود، اینورتر آنرا در سطح ماکزیمم خود محدود خواهد کرد. اینورترها جریانشان را در حد ۱ یا ۲ برابر جریان نامی محدود می کنند [۵]. بنابراین برای انجام مطالعات خطا در بدترین شرایط فرض می شود، محدودیت جریان با نسبت ۲ برابر جریان نامی انجام شود.



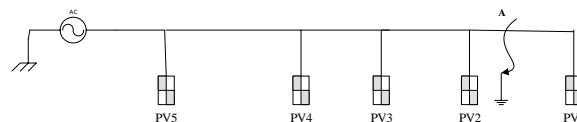
شکل (۱). معرفی اجزاء یک سیستم PV خانگی و نحوه اتصال آن به شبکه توزیع

با نفوذ بالای منابع PV پروفایل جریان خطا بدست خواهد آمد. روش مذکور به عنوان یک وسیله کارآمد می تواند مورد استفاده مهندسیین طراح سیستم های حفاظتی قرار بگیرد. از آنجائیکه با خروج هر PV فیدر توزیع شرایط جدیدی پیدا می کند لذا به یک روش تکرار شونده نیاز است تا جریان ولتاژ شاخه ها را در هر مرحله تعیین کند. برای توضیح بیشتر شکل (۲) را در نظر بگیرید، در زمان وقوع خطا در صورت خروج منابع PV1 و PV2 به دلیل افزایش جریان اصلی فیدر افت ولتاژها بیشتر می شود لذا اگر در مرحله قبل پیش بینی می شد که منابع PV3 و PV4 در زمان ۲/۴ ثانیه از فیدر جدا شوند حال ممکن است این منابع در زمان زودتری از شبکه جدا شوند. طبق این روش ابتدا در شرایط وقوع خطا، فیدر را با تمام منابع PV در نظر می گیریم و عملیات شبیه سازی را انجام می دهیم با مشخص شدن جریان و ولتاژ تمامی شاخه ها و باس بارها، تعداد PV هایی که باید در این مرحله از مدار خارج شوند مشخص می شوند. با خروج PV های مورد نظر مراحل مذکور با شبیه سازی فیدر با شرایط جدید تکرار می شود. مراحل تا خروج کامل منابع PV تکرار خواهد شد. لازم به ذکر است روش ارائه شده بر مبنای کار رله های سنتی بصورت غیر همزمان (Off Line) می باشد. توضیح اینکه قبل از شکل گیری طرح حفاظتی، مهندس طراح توسط این روش پروفایل جریان خطا را بدست می آورد. سپس با استفاده از آن به طراحی و تنظیم سیستم حفاظتی می پردازد.

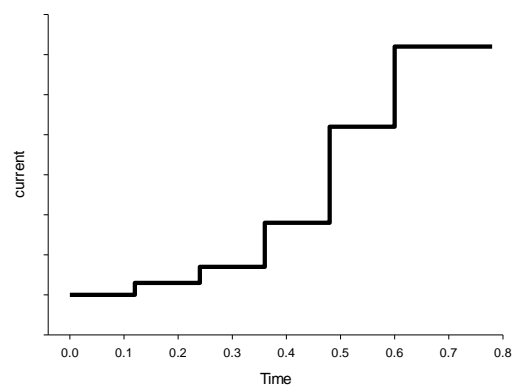
#### ۴- شبیه سازی

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، یک فیدر واقعی در نرم افزار PSCAD شبیه سازی شد. سپس نتایج بدست آمده از شبیه سازی با اطلاعات حاصل از مانیتورینگ پارامترهای فیدر در مواقع بروز اتصال کوتاه تک فاز و سه فاز مقایسه شد. فیدر شبیه سازی شده یک فیدر توزیع با مصارف اکثراً خانگی می باشد. در این فیدر هر واحد خانگی مجهز به سیستم PV می باشد. به این صورت که هر سیستم PV قادر به تولید توان تا میزان حدکثر مصرف آن واحد خانگی است. شبکه مذکور سه فاز اصلی دارد که چندین کابل تکفاز زیر زمینی برای تغذیه مشترکین از مدار اصلی انشعاب گرفته اند. از آنجائیکه شبیه سازی تمام بارها و سیستم های PV بصورت مجزا میسر نمی باشد، لذا بارهای تکفاز و

(multi source) تغییر وضعیت پیدا می کند. با توجه به مدل انتخاب شده برای مبدل این منابع، در شرایط وقوع خطا هر منبع PV جریانی را به سمت نقطه خطا جاری می سازد که با در نظر گرفتن همه منابع PV موجود در فیدر سهمی از جریان خطا را تشکیل می دهند. لذا منابع PV میزان جریان خطای جاری شونده از منبع اصلی شبکه به سمت نقطه خطا را تحت تاثیر قرار می دهند. حال با توجه به این اصل و طبق آنچه که در مورد خروج منابع PV طبق طرح حفاظتی آنها گفته شد، می توان نتیجه گیری کرد که در یک شبکه توزیع با نفوذ بالای منابع PV در مدت زمان وقوع خطا منابع PV موجب متغیر شدن جریان خطا می شوند. شکل (۳) یک نمونه از پروفایل جریان خطا در یک فیدر توزیع با نفوذ بالای منابع PV را نشان می دهد.



شکل (۲). تحلیل خروج PV ها از فیدر توزیع در زمان وقوع خطا بر اساس طرح حفاظتی IEEE929

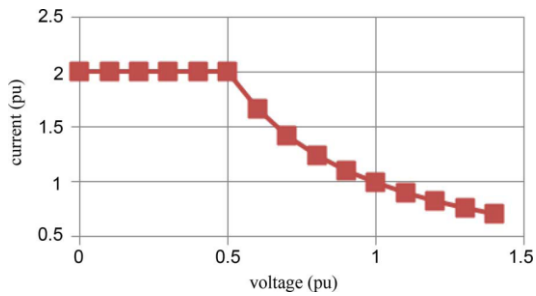


شکل (۳). پروفایل جریان خطا در یک فیدر توزیع با حضور منابع پراکنده. جریان خطا با خروج منابع PV تغییر می کند.

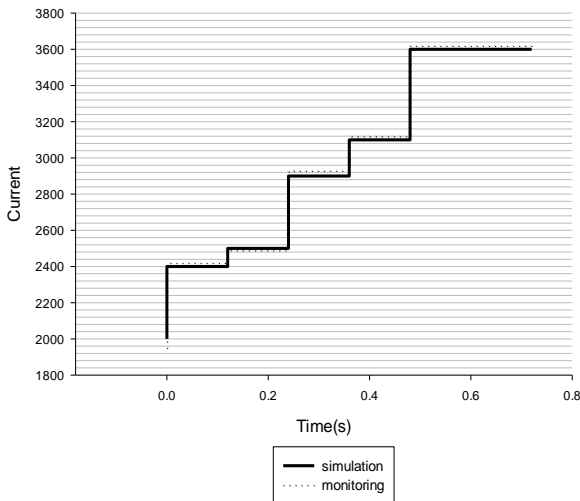
#### ۳- ارائه روشی برای تعیین پروفایل جریان خطا

تعیین پروفایل جریان خطا برای طراحی و تنظیم طرح حفاظتی در یک فیدر توزیع امری ضروری است. لذا در این قسمت روشی را مورد بررسی قرار می دهیم که بوسیله آن در یک فیدر توزیع

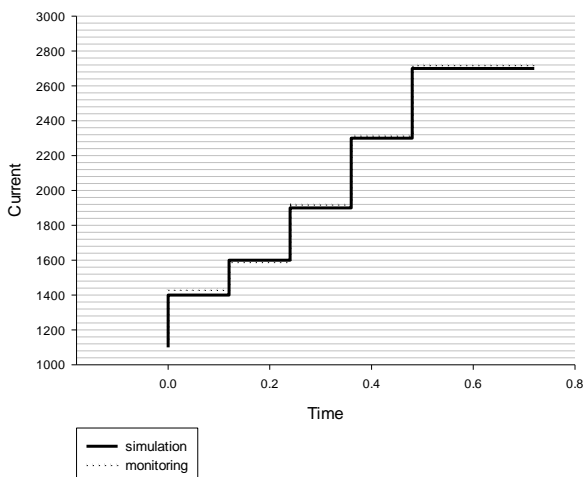
۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل (۶). مشخصه V-I سیستم PV شبیه سازی شده

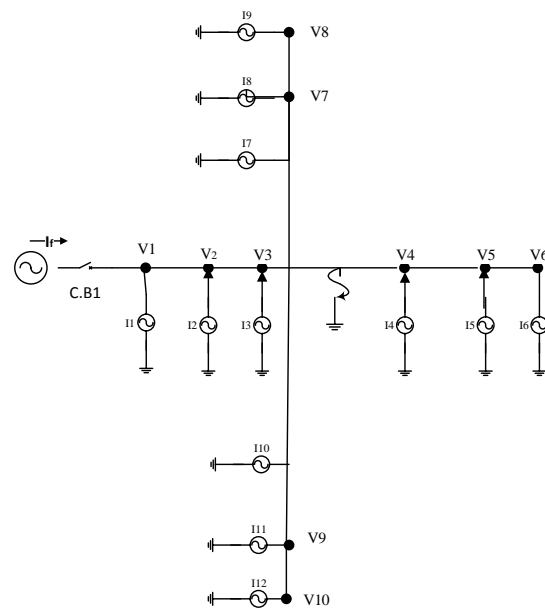


شکل (۷) مقادیر جریان خطا گذرنده از کلید قدرت اصلی مدار حاصل از مانیتورینگ و شبیه سازی به ازاء وقوع خطای سه فاز.



شکل (۸) مقایسه مقادیر جریان خطا عبوری از کلید قدرت اصلی حاصل از شبیه سازی و مانیتورینگ به ازاء وقوع خطای تکفاز در مدار.

سیستم های PV که از یک فاز مشابه انشعاب گرفته اند بصورت یک بار کلی به همراه یک PV با توان معادل مجموع توان تک PV های مرتبط با آنها جمع آوری گردیده اند. از اینرو شبکه شبیه سازی شده مطابق شکل (۵) یک مدار سه فاز با بارهای نامتعادل و صفحات PV تک فاز می باشد. سیستم PV با استناد به یک مدل متداول شبیه سازی شده است. مدلی که در آن از برای تمام مدل های مبدلها استفاده شده است. همچنین فرض بر این است که در این شبکه کلیه سیستم های PV مجهز به مکانیزم ردیابی نقطه به نقطه برای دریافت حداکثر توان می باشند [۷]. شکل (۶) نمودار V-I سیستم PV بدست آمده از نتایج شبیه سازی را نشان می دهد. مطابق این شکل اینورتر صفحات PV تحت دو حالت کاری عمل می کنند: (۱) توان ثابت، (۲) جریان ثابت. شکل های (۸) و (۹) نتایج بدست آمده از شبیه سازی و روش پیشنهادی را مقایسه می کنند. جریانهای خطای بدست آمده، جریانهایی هستند که از مدار شکن در شرایط وقوع خطاهای تکفاز و سه فاز عبور می کنند.



شکل (۵). شمای تک خطی شبکه شبیه سازی شده با نفوذ بالای منابع PV.

همانطور که در شکل های (۶) و (۷) مشاهده می شود اختلاف مقادیر حاصل از شبیه سازی و مانیتورینگ کمتر از ۵ درصد است. که نشان از کارآمدی روش پیش نهاد شده می باشد.

## ۵- نتیجه گیری

این تحقیق نشان می دهد پروفایل جریان خطا در یک فیدر توزیع با ضریب نفوذ بالای صفحات PV بصورت قابل ملاحظه ای با یک فیدر معمولی که فقط مجموعه بارها به آن متصل هستند متفاوت خواهد بود. سهم بودن سیستم PV در جریان خطا و همچنین سیستم حفاظتی PV که بر اساس ولتاژ پایانه های مبدل آن طراحی شده است به متغیر شدن جریان خطا منجر می شوند. در این تحقیق یک روش پیشنهاد شد که در حقیقت تعمیم یافته روش های متداول آنالیز اتصال کوتاه می باشد و بوسیله آن امکان ارزیابی پروفایل جریان خطا محقق می گردد. تست نتایج روش پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی نشان می دهد این روش یک برآورد کاملاً دقیق را فراهم می کند. روش ارائه شده می تواند به عنوان یک ابزار مورد استفاده مهندسين طراح در حوزه حفاظت مورد استفاده قرار بگیرد.

## مراجع

- [1] 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
- [2] J. Gao, W. Hu, Z. Shi, and B. Tang, "Research of effect on distribution network with penetration of photovoltaic system," in *Proc. 45th Int. Universities Power Eng. Conf.*, 2010
- [3] 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
- [4] F. Soudi, D. Shirmohammadi, and C. S. Cheng, "A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 4, pp. 2053-2059, Nov. 1995.
- [5] *Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection*, IEEE.7/D4.0
- [6] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE 929, 2000
- [7] Model Available on the Website of ECEE Department at the University of Colorado at Boulder [Online]. Available: <http://ecee.colorado.edu/~ecen2060/matlab.html>