

## New protection schemes based on impedance for active distribution lines with high impedance fault detection capability

Seyyed Mohammad Nobakhti<sup>1,2</sup>, Abbas Ketabi<sup>2</sup>

1- Lecturer, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran  
smnobakhti@tvu.ac.ir

2- Full professor, Department of Electrical & Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran  
aketabi@kashanu.ac.ir

### Abstract:

The extensive penetration of microgrids in the distribution network poses challenges to the control system, coordination with the network, and especially the traditional current-based protection systems despite many advantages such as reducing power outages, increasing reliability and resiliency, enhancing the flexibility of the power system in supplying loads, and improving the power quality. The main reason for the incorrect performance of current protection schemes is the change in the network fault level due to the connection and disconnection of the distributed generator or the microgrid operating mode change from the grid connected to the islanded and vice versa. To improve the performance of the protection system in the presence of microgrids, some schemes have been presented in two general categories: schemes based on modifying the network behavior and schemes based on modifying the protection system. In the first category, the network behavior during the faults is modified by external equipment to operate the conventional protection schemes properly. In the second category, the protection schemes are modified to correct performance according to the network behavior change during the short circuit faults. Due to the limitations of the schemes in the first category, the schemes of the second ones are more practical. Among the second category schemes, the impedance-based ones can operate in both grid-connected and islanded modes of the microgrid due to their directional nature and independence of the fault level of the network.

This article rearranges and reforms the conventional sequence equivalent circuits of the lines during the short circuit faults and presents new equivalent circuits. Also, a protection scheme is proposed using these circuits for low-voltage and medium-voltage overhead and cable lines in smart AC microgrids. The basis of the proposed scheme is the large change in impedance in the proposed delta sequence equivalent circuit. This scheme employs the voltage and current data at the relay location and the magnitude of the positive sequence voltage at the other line end. Therefore, minimum data exchange between two ends of the line and low sampling rate are the features of the proposed scheme. This scheme is independent of the configuration of the microgrid, its operating mode, and uncertainties in the microgrid. Also, it can detect high resistance and high impedance short circuit faults in the grid-connected and islanded mode with a detection time of fewer than two cycles in low voltage lines and about three cycles in medium voltage lines. A case study microgrid is simulated in PSCAD software, and the proposed scheme is implemented on it by MATLAB software. The results show the accurate performance of the proposed protection scheme in detecting short circuit fault types in different conditions.

**Keywords:** Active distribution lines, distributed generator (DG), distribution network, doubly-fed lines modeling, fault detection, impedance-based protection, microgrid.

Submit date: 2022/06/16  
Accepted date: 2023/04/24

Corresponding author's Name: Abbas Ketabi

Corresponding author's address: Electrical Engineering Department, University of Kashan, Qotbe Ravani blvd, Kashan. 87986868 Kashan, Iran

## روش حفاظت جدید مبتنی بر امیدانس برای خطوط توزیع فعال با قابلیت تشخیص خطاهای امیدانس بالا

نوع مطالعه: پژوهشی

سید محمد نوبختی<sup>۱،۲</sup>، مربی فنی، عباس کتابی<sup>۲</sup>، استاد

۱- گروه مهندسی برق- دانشگاه فنی و حرفه ای- تهران- ایران

smnobakhti@tvu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان- ایران

aketabi@kashanu.ac.ir

**چکیده:** ویژگی‌های ریزشبکه‌ها از جمله عبور توان دوطرفه در فیدرها، کاهش سطح اتصال کوتاه در حالت جزیره‌ای، و ماهیت منابع تولید پراکنده (DGs\*) سبب اختلال در عملکرد روش‌های حفاظت متعارف در ریزشبکه‌ها می‌گردد. در این مقاله، یک روش حفاظتی مبتنی بر امیدانس، برای تشخیص اتصال کوتاه در خطوط توزیع هوایی و کابلی فشارضعیف (LV<sup>†</sup>) و فشارمتوسط (MV<sup>‡</sup>) در ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده است. برای تعیین یک شاخص تشخیص اتصال کوتاه، از مدارهای معادل پیشنهادی جدید برای خطوط دوسوتغذیه استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی داده‌های محل نصب رله و دامنه ولتاژ توالی مثبت طرف دیگر خط مورد نیاز است. این روش قابلیت تشخیص اتصال کوتاه‌های امیدانس بالا را نیز در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای دارا است. علاوه بر این، روش پیشنهادی، در برابر عدم قطعیت بار و تولید و همچنین تغییر پیکربندی شبکه، مقاوم است. نرخ نمونه برداری پایین و حداقل تبادل داده از جمله مزایای روش حفاظت پیشنهادی است. به منظور ارزیابی صحت عملکرد این روش، شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSCAD و MATLAB انجام شده است.

**واژه‌های کلیدی:** خطوط توزیع فعال، منابع تولید پراکنده، شبکه توزیع، مدل‌سازی خطوط دوسوتغذیه، تشخیص اتصال کوتاه، حفاظت مبتنی بر امیدانس، ریزشبکه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول : عباس کتابی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه کاشان

\* Distributed Generators

† Low Voltage

‡ Medium Voltage

## ۱- مقدمه

ریز شبکه‌ها، سیستم‌های توزیع فشار متوسط و فشار ضعیف شامل منابع تولید پراکنده (DGs) و بارها هستند که به صورت کنترل شده توانایی کار در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه را دارند. ریز شبکه‌ها قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری سیستم قدرت را تا حد زیادی بهبود می‌بخشند (Mirzaei, Said, Mustafa, Habibuddin & Teimourzadeh, Aminifar, Davarpanah & Ghaffari, 2016). (Guerrero, 2016). صرف نظر از مزایای ریز شبکه‌ها، به کارگیری گسترده آن‌ها منجر به چالش‌هایی در سیستم حفاظت و کنترل و همچنین مسائلی در هماهنگی با شبکه اصلی می‌شود. به دلیل وجود فیدرهای حلقوی، عبور توان دوطرفه در خطوط و کاهش قابل توجه سطح اتصال کوتاه در حالت جزیره‌ای، استراتژی‌های مر سوم حفاظت، در ریز شبکه‌ها به دست عمل نمی‌کنند (Blaabjerg, Yang, & Wang, 2017) (Yang, & Wang, 2017) (Adly, El, Jiao, & et al, 2015) (Sehiemy, & Abdelaziz, 2017) و روش‌های جدیدی مبتنی بر ارتباطات با استفاده از دستگاه‌های هوشمند، برای حفاظت از این خطوط مورد نیاز است (Aminifar, Fotuhi-Firuzabad, & Safdarian, Davoudi, & Shahidehpour, 2014).

به طور کلی، روش‌های حفاظت ریز شبکه‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول، روش‌های مبتنی بر اصلاح شبکه است که در آن رفتار شبکه در هنگام اتصال کوتاه را به منظور عملکرد صحیح روش‌های حفاظت مر سوم، اصلاح می‌کنند. دسته دوم، روش‌های مبتنی بر استراتژی حفاظتی است که در آن روش‌های حفاظتی مر سوم، بر اساس رفتار ریز شبکه‌ها اصلاح می‌شوند.

الف) روش‌های مبتنی بر اصلاح شبکه هنگامی که حالت کاری ریز شبکه از متصل به شبکه به جزیره‌ای و یا به عکس تغییر می‌یابد، سطح جریان اتصال کوتاه به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. در برخی از استراتژی‌های حفاظتی از تجهیزاتی برای کاهش سهم جریان اتصال کوتاه شبکه اصلی استفاده می‌شود. این تجهیزات شامل محدودکننده‌های جریان خطا (FCLs<sup>4</sup>)، ابرخازن‌ها، چرخ‌های طیار، باتری‌ها و تجهیزاتی هستند که بین ریز شبکه و شبکه اصلی نصب می‌شوند. اجرای این روش‌ها اغلب هزینه نسبتاً بالایی دارد (Khedrzedeh, 2012) (Ghanbari, & Farjah, 2013) (Esmaeili Dahej, Esmaeili, & Hojabri, 2018).

در (Oureilidis, & Demoulias, 2016)، روشی برای حفاظت از ریز شبکه‌های حلقوی با استفاده از یک سیستم حفاظت سنتی پیشنهاد شده است. در این روش، سیستم کنترل منابع تولید پراکنده طوری تنظیم می‌شود که منابع نزدیک‌تر به اتصال کوتاه جریان بزرگتری را

توزیع کنند تا هماهنگی انتخابی رله‌های حفاظتی را فراهم گردد.

ب) روش‌های مبتنی بر استراتژی حفاظتی

انواع مختلفی از روش‌های حفاظت ریز شبکه در این دسته وجود دارد. روش‌های حفاظت تطبیقی نوعی از استراتژی‌ها در این دسته هستند. در این نوع حفاظت، زمانی که حالت کاری ریز شبکه (جزیره‌ای یا متصل به شبکه) تغییر می‌کند، به طور خودکار تنظیمات رله اصلاح می‌گردد (Orji & et al., 2017) (Laaksonen, Ishchenko, & Oudalov, 2014). از چالش‌های این نوع روش‌های حفاظت، هزینه زیاد مورد نیاز برای جایگزینی تمام رله‌های موجود با رله‌های تطبیقی و نیاز به ارتقای روش‌های حفاظتی فعلی در سیستم‌های توزیع است. علاوه بر این، روش‌های تطبیقی معمولاً به زیر ساخت‌های ارتباطی نیز نیاز دارند.

از روش‌های مبتنی بر حفاظت دیفرانسیل، می‌توان به عنوان گروه دیگری از استراتژی‌ها در این دسته نام برد. به طور کلی، این نوع روش‌ها، نیازمند یک سیستم ارتباطی و همچنین اندازه‌گیری‌های همزمان هستند. علاوه بر این، بارهای گذرا و نامتعادل ممکن است در برخی موارد عملکرد آن‌ها را با اختلال روبرو کنند (Zeineldin, El-Sortomme, Venkata, & Mitra, 2006) (saadany, & Salama, 2006) (Aghdam, Kazemi Karegar, & Zeineldin, 2019) (Kar, Samantaray, & Dadashzadeh, 2017).

گروهی دیگر، روش‌های حفاظت مبتنی بر ولتاژ هستند. در بیش‌تر این نوع روش‌ها، نوع اتصال کوتاه و بزرگی افت ولتاژ در زمان اتصال کوتاه، زمان تشخیص اتصال کوتاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، این روش‌ها غالباً به حالت کاری ریز شبکه وابسته هستند. علاوه بر این، در حالت جزیره‌ای، نوسانات ولتاژ ناشی از پدیده‌هایی غیر از اتصال کوتاه ممکن است باعث تشخیص‌های حفاظتی نادرست در این روش‌ها گردد (Loix, Wijnhoven, & Deconinck, 2009) (Sharma & Samantaray, 2019).

روش‌های مبتنی بر حفاظت اضافه‌جریان، نوع دیگری در این دسته هستند. مستند معمولاً این نوع روش‌های حفاظت، به شدت به سیستم‌های ارتباطی گسترده وابسته بوده و علاوه بر آن، تغییرات سطح اتصال کوتاه بر عملکردشان تأثیرگذار است (Best, Morrow, & Crossley, 2009) (Darabi, Bagheri, & Gharehpetian, 2020) (Zamani, Sidhu, & Yazdani, 2011) (Furlan, Beuter, & Bataglioli, Faria, & Oleskovicz, 2018).

در روش‌های حفاظت دیستانس به عنوان نوعی دیگر در این دسته، به دلیل وجود منابع تولید پراکنده در ریز شبکه، در هنگام وقوع اتصال کوتاه در پایین‌دست رله دیستانس، این تجهیز امپدانس بزرگ‌تر از امپدانس واقعی می‌بیند. این پدیده به دلیل ولتاژ اضافی ناشی از

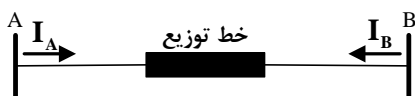
<sup>4</sup> Fault Current Limiters

- تشخیص اتصال کوتاه در خطوط فشارضعیف و فشارمتوسط
- زمان تشخیص اتصال کوتاه مناسب
- نرخ نمونه برداری پایین
- تبادل داده‌های حداقلی
- استقلال از عدم قطعیت بار و تولید
- استقلال از پیکربندی مجدد ریزشبه

در این مقلله، انواع اتصال کوتاه و مدارهای معادل پیه شنهادی مربوط به آن‌ها که در روش حفاظت پیه شنهادی استفاده می‌شود، در بخش دوم بررسی شده است. در بخش سوم، یک روش جدید مبتنی بر امیدانس برای تشخیص اتصال کوتاه در ریزشبه‌ها پیه شنهاده شده است. در بخش چهارم، استراتژی پیه شنهادی در نرم‌افزار PSCAD و MATLAB به منظور ارزیابی عملکرد آن شبیه‌سازی شده است. و بخش پنجم شامل نتیجه‌گیری است.

## ۲- مدار معادل خطوط دوسوتغذیه در اتصال کوتاه

به دلیل وجود منابع تولید پراکنده، برخی از خطوط توزیع در ریزشبه‌ها از دو طرف تغذیه می‌شوند. این خطوط توزیع دوسوتغذیه در شکل (۱) نشان داده شده است. برای مطالعه اتصال کوتاه‌ها، مدارهای معادل توالی برای هر نوع اتصال کوتاه مورد نیاز است.



شکل (۱): خط توزیع دوسوتغذیه

در این بخش، با استفاده از مدار معادل توالی سنتی انواع اتصال کوتاه، مدار معادل توالی مثبت یکپارچه، مدار معادل توالی منفی یکپارچه و مدار معادل توالی صفر یکپارچه که به ترتیب مدار APS<sup>۵</sup>، مدار ANS<sup>۶</sup> و مدار AZS<sup>۷</sup> نامیده می‌شود و در شکل (۲) آورده شده است، پیه شنهاده می‌گردد. K در این شکل عددی بین ۰ و ۱ و نشان‌دهنده محل اتصال کوتاه روی خط است. اندیس i نیز با 3P، LL، DLG و SLG به ترتیب برای اتصال کوتاه‌های سه‌فاز، دو‌فاز، دو‌فاز به زمین و تک‌فاز جایگزین می‌گردد. همچنین توالی مثبت، منفی و صفر به ترتیب با اندیس‌های ۱، ۲ و ۰ نمایش داده می‌شود. Z<sub>۱۰</sub> امیدانس توالی مثبت خط و Z<sub>۱۰</sub> امیدانس توالی صفر آن است. Z<sub>eq۰،i</sub> و Z<sub>eq۱،i</sub> امیدانس‌های معادل توالی‌ها و V<sub>eq۱،i</sub> و V<sub>eq۰،i</sub> ولتاژهای معادل توالی‌ها هستند که برای هر نوع اتصال کوتاه به صورت مجزا تعیین می‌گردد.

حضور منابع تولید پراکنده است و باعث افزایش کاذب فاصله اتصال کوتاه تا محل رله می‌شود. این افزایش ظاهری ممکن است منجر به اختلال در عملکرد رله‌های دی‌ستانس شود (Hooshyar, & Iravani, 2017) (Nikolaidis, Tsimtsios, & Safigianni, 2018). مهم‌ترین مزیت روش‌های حفاظت دی‌ستانس، وابستگی کمتر در مقایسه با سایر روش‌ها به تغییر سطح اتصال کوتاه در دو حالت کاری ریزشبه است که می‌تواند طرح حفاظتی را مستقل از حالت کاری ریزشبه کند.

در (Bottrell, & Green, 2013) تشخیص اتصال کوتاه با استفاده از امیدانس زمان معکوس انجام شده است که البته این روش توانایی تشخیص اتصال کوتاه‌های با مقاومت بالا را ندارد. علاوه بر این، روش‌های حفاظت امیدانس تفاضلی و حفاظت امیدانس کم‌زمان معکوس در (Huang, & et al., 2014) به ترتیب به عنوان حفاظت اصلی و پشتیبان پیشنهاد شده است. در این روش اگر اختلاف امیدانس دیده شده از ابتدا و انتهای خط از مقدار امیدانس خط بیشتر باشد خطا تشخیص داده می‌شود. از چالش‌های این روش تعیین مقدار آستانه به دلیل کوچک بودن امیدانس خط توزیع است. همچنین در (Pandakov, & Hoidalén, 2017) یک روش جبران برای حذف خطاهای ناشی از امیدانس اتصال کوتاه و جریان‌های تغذیه ورودی پیشنهاد شده است. این روش نیازمند سیستم ارتباطی گسترده جهت ارسال داده‌های همه رله‌ها به یک مرکز برای تحلیل و تصمیم‌گیری است. در (Billér, & Jaeger, 2018) روشی بر اساس جریان توالی منفی اندازه‌گیری شده در محل رله و سازگار با تغذیه ورودی و فیدرهای حلقوی و بدون استفاده از ولتاژ برای حفاظت دی‌ستانس خطوط در ریزشبه‌ها پیشنهاد گردیده است. این روش با وجود این که در مقایسه با حفاظت دی‌ستانس عملکرد بهتری دارد اما در مواردی نیز توانایی تشخیص صحیح را ندارد. همچنین در (Fang, Jia, Yang, Li, & Bi, 2019) یک روش بهبود یافته بر اساس تأخیر زمانی و امیدانس توالی صفر ارائه شده است. اگرچه با استفاده از تأخیر زمانی در این روش عملکرد سیستم حفاظت بهبود یافته است اما کاربرد این روش در شبکه‌های حساس که نیازمند رفع آنی اتصال کوتاه هستند امکان‌پذیر نیست. در (Nobakhti, Ketabi, & Shafie-khah, 2021) الگوریتم هلی برای حفاظت خطوط ریزشبه که فشار ضعیف پیه شنهاده شده، اما عملکرد آن در اتصال کوتاه‌های امیدانس بالا و خطوط کابلی بررسی نشده است.

در این مقلله، یک روش جدید مبتنی بر امیدانس، برای حفاظت ریزشبه‌ها در حالت‌های کاری متصل به شبکه و جزیره‌ای پیه شنهاده شده است. از ویژگی‌های آن می‌توان موارد زیر را برشمرد:

- تشخیص خطاهای امیدانس بالا
- عملکرد صحیح در خطوط هوایی و کابلی

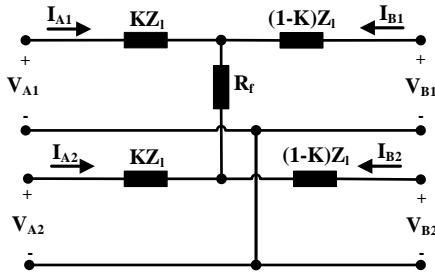
<sup>7</sup> Aggregated Zero Sequence

<sup>5</sup> Aggregated Positive Sequence

<sup>6</sup> Aggregated Negative Sequence

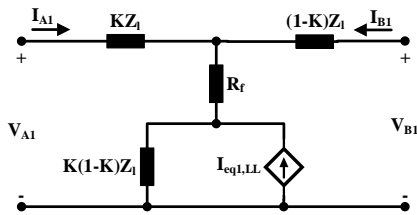
سپس کم کردن ولتاژ  $K(1-K)Z_l I_{eq1,LL}$  از دو طرف مدار، منبع وابسته در شاخه وسط حذف می شود. به این ترتیب مدار APS برای این نوع اتصال کوتاه به دست می آید. مقادیر  $V_{eq1,LL}$  و  $Z_{eq1,LL}$  در این مدار عبارتست از:

$$\begin{cases} Z_{eq,LL} = R_f + K.(1-K).Z_l \\ V_{eq1,LL} = (1-K).V_{A2} + K.V_{B2} \end{cases} \quad (3)$$



شکل (۴): مدارهای معتدل توالی سنتی برای اتصال کوتاه دوفاز به طور مشابه مقادیر پارامترهای مدار ANS برای این اتصال کوتاه به صورت رابطه (۴) به دست می آید. بدیهی است که مدار AZS این نوع اتصال کوتاه وجود ندارد.

$$V_{eq2,LL} = (1-K).V_{A1} + K.V_{B1} \quad (4)$$

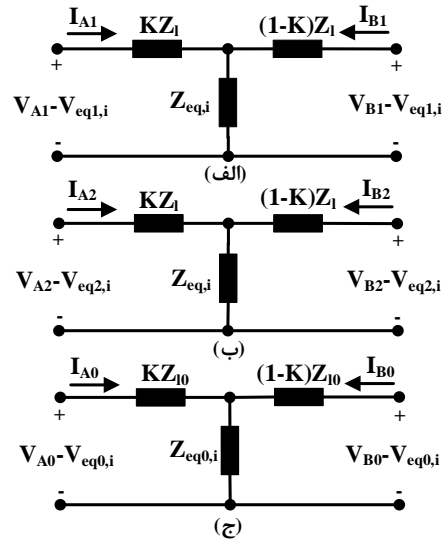


شکل (۵): مدار ساده شده اتصال کوتاه دوفاز

### ۲-۳- اتصال کوتاه تک فاز به زمین

در این نوع اتصال کوتاه یکی از فازها از طریق مقاومت  $R_f$  به زمین متصل می شود. شکل (۶) مدارهای معادل توالی را برای اتصال کوتاه تک فاز به زمین را نشان می دهد. با ساده سازی مدارهای توالی منفی و صفر، مدار APS حاصل می شود. به صورت مشابه می توان مدارهای ANS و AZS را به دست آورد.

$$\begin{cases} Z_{eq,SLG} = 3R_f + K.(1-K).(Z_l + Z_{l0}) \\ V_{eq1,SLG} = -(1-K).(V_{A2} + V_{A0}) - K.(V_{B2} + V_{B0}) \\ V_{eq2,SLG} = -(1-K).(V_{A1} + V_{A0}) - K.(V_{B1} + V_{B0}) \\ Z_{eq0,SLG} = 3R_f + 2K.(1-K).Z_l \\ V_{eq0,SLG} = -(1-K).(V_{A1} + V_{A2}) - K.(V_{B1} + V_{B2}) \end{cases} \quad (5)$$

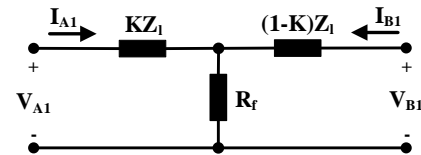


شکل (۲): (الف) مدار APS (ب) مدار ANS (ج) مدار AZS

### ۲-۱- اتصال کوتاه سه فاز

در این نوع اتصال کوتاه، هر سه فاز از طریق مقاومت  $R_f$  به زمین متصل می شوند. شکل (۳) مدار معادل سنتی این نوع اتصال کوتاه را که فقط شامل توالی مثبت است نشان می دهد. با مقایسه مدار این شکل و مدار APS در شکل (۲الف)، روابط  $V_{eq1,3P}$  و  $Z_{eq,3P}$  به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} Z_{eq,3P} = R_f \\ V_{eq1,3P} = 0 \end{cases} \quad (1)$$



شکل (۳): مدار APS برای اتصال کوتاه سه فاز

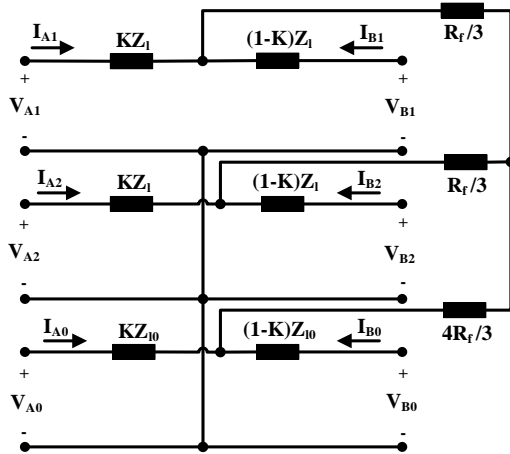
بدیهی است که به دلیل عدم وجود توالی منفی و صفر در این نوع اتصال کوتاه، مدارهای ANS و AZS قابل تعریف نیست.

### ۲-۲- اتصال کوتاه دوفاز

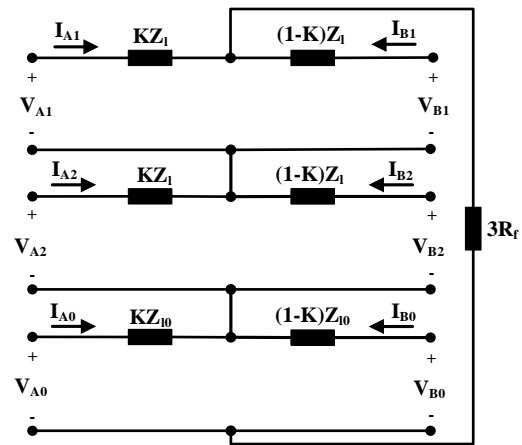
در این نوع اتصال کوتاه، دو فاز از طریق مقاومت  $R_f$  به یکدیگر متصل می شوند. شکل (۴) مدار معادل سنتی برای این نوع اتصال کوتاه را که شامل توالی های مثبت و منفی است نشان می دهد. اگر مدارهای معادل تونن (ولتاژ  $V_{A2}$  سری با امپدانس  $KZ_l$  و ولتاژ  $V_{B2}$  سری با امپدانس  $(1-K)Z_l$ ) به معادل نورتون تبدیل شوند و سپس مدار ساده شود، مدار شکل (۵) به دست می آید که در آن  $I_{eq1,LL}$  برابر است با:

$$I_{eq1,LL} = \frac{V_{A2}}{K.Z_l} + \frac{V_{B2}}{(1-K).Z_l} \quad (2)$$

با جایگزینی منبع جریان وابسته موازی با امپدانس (معادل نورتون) در شکل (۵) با منبع ولتاژ سری با امپدانس (معادل تونن) و



شکل (۷): مدارهای معادل توالی سنتی برای اتصال کوتاه دوفاز به زمین



شکل (۶): مدارهای معادل توالی سنتی برای اتصال کوتاه تکفاز به زمین

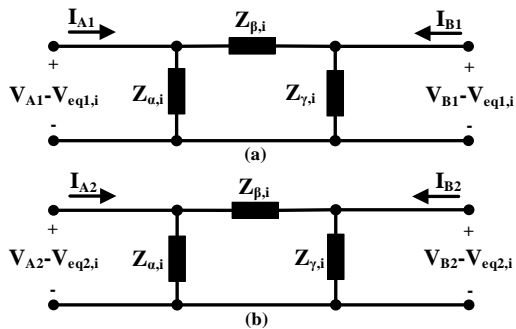
### ۳- روش حفاظت امیدانسی پیشنهادی

با استفاده از تبدیل ستاره-مثلث، مدارهای APS و ANS در شکل (۲) می‌تواند به صورت شکل (۸) در آید که در آن  $Z_{\alpha,i}$ ،  $Z_{\beta,i}$  و  $Z_{\gamma,i}$  از روابط زیر به دست می‌آید:

$$Z_{\alpha,i} = KZ_i + \frac{Z_{eq,i}}{1-K} \quad (۸)$$

$$Z_{\beta,i} = Z_i + \frac{K(1-K)Z_i^2}{Z_{eq,i}} \quad (۹)$$

$$Z_{\gamma,i} = (1-K)Z_i + \frac{Z_{eq,i}}{K} \quad (۱۰)$$



شکل (۸): مدار معادل مثلث مدارهای الف (ب) APS (ب) ANS

بر اساس رابطه (۸)، با افزایش مقدار  $R_f$ ، اندازه  $Z_{\alpha,i}$  افزایش می‌یابد. بنابراین در شرایط عادی که  $R_f$  بی نهایت است، اندازه  $Z_{\alpha,i}$  نیز بی نهایت و زاویه آن صفر خواهد بود. اما در هنگام اتصال کوتاه، اندازه  $Z_{\alpha,i}$  به شدت کاهش و زاویه آن، حداکثر تا زاویه امیدانسی توالی مثبت خط افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که زاویه امیدانسی خط در خطوط توزیع کوچک است. همچنین بر اساس رابطه (۹) در شرایط عادی، اندازه و زاویه امیدانسی  $Z_{\beta,i}$  با اندازه و زاویه امیدانسی  $Z_i$  برابر است و در هنگام اتصال کوتاه نیز به جز در مواردی که  $R_f$  خیلی نزدیک به صفر باشد، تغییرات اندازه و زاویه امیدانسی  $Z_{\beta,i}$  کوچک خواهد بود. کاهش شدید  $Z_{\alpha,i}$  در هنگام اتصال کوتاه می‌تواند مبنایی برای

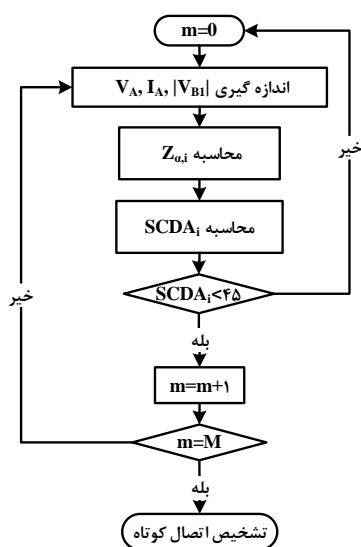
### ۴-۲- اتصال کوتاه دوفاز به زمین

این نوع اتصال کوتاه زمانی رخ می‌دهد که دوفاز از طریق مقاومت  $R_f$  به یکدیگر متصل شده و این دوفاز از طریق مقاومت  $R_f$  به زمین متصل می‌شوند. مدارهای معادل توالی سنتی این نوع اتصال کوتاه در شکل (۷) آورده شده است. پارامترهای مدارهای معادل ANS، APS و AZS از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} Z_{eq,DLG} = \frac{R_f}{3} + \frac{(3K(1-K)Z_i + 4R_f)(3K(1-K)Z_i + R_f)}{3(3K(1-K)(Z_i + Z_{i0}) + 5R_f)} \\ V_{eq1,DLG} = M((1-K)V_{A2} + KV_{B2}) + N((1-K)V_{A0} + KV_{B0}) \\ V_{eq2,DLG} = M((1-K)V_{A1} + KV_{B1}) + N((1-K)V_{A0} + KV_{B0}) \\ Z_{eq0,DLG} = \frac{K(1-K)Z_i + 3R_f}{2} \\ V_{eq0,DLG} = \frac{(1-K)}{2}(V_{A1} + V_{A2}) + \frac{K}{2}(V_{B1} + V_{B2}) \end{cases} \quad (۶)$$

مقادیر  $M$  و  $N$  در رابطه فوق عبارتست از:

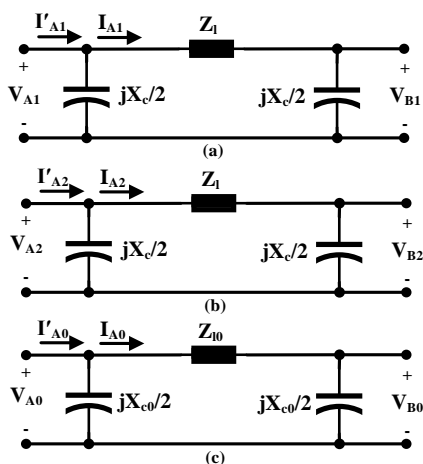
$$\begin{cases} M = \frac{3K(1-K)Z_i + 4R_f}{3K(1-K)(Z_i + Z_{i0}) + 5R_f} \\ N = \frac{3K(1-K)Z_i + R_f}{3K(1-K)(Z_i + Z_{i0}) + 5R_f} \end{cases} \quad (۷)$$



شکل (۹): نمودار جریان روش پیشنهادی

#### ۴- شبکه مورد مطالعه

به منظور ارزیابی عملکرد روش حفاظت پید شنهادی یک شبکه توزیع ۵۰ Hz که در شکل (۱۱) آورده شده است در نرم افزار PSCAD شبیه سازی شده و محاسبات در نرم افزار MATLAB انجام شده است (Huang, & et al., 2014). دو شبکه ۴۰۰ V و ۱۰ kV توسط یک ترانسفورماتور به شبکه ۳۵ KV اصلی متصل شده اند. در نقطه اتصال با شبکه اصلی، سطح اتصال کوتاه و نسبت R/X به ترتیب ۵۰۰ MVA و ۰/۱ است.



شکل (۱۰): مدل π خط

در شبکه ۴۰۰ V سه منبع تولید پراکنده وجود دارد. منبع های DG1 و DG2 از نوع تولید همزمان برق، حرارت و برودت (CCHP) با توان نامی ۲۰۰ kVA و ۱۰۰ kVA هستند. DG3 یک سیستم فتوولتائیک با توان نامی ۱۵۰ kVA است. مقاومت توالی مثبت و منفی خطوط هوایی ۴۰۰ V (خط ۱ تا ۴ و خط ۶) ۰/۳۲ Ω/km و مقدار آن در خط کابلی (خط ۵) ۰/۳ Ω/km است. مقاومت توالی صفر در خطوط

تشخیص اتصال کوتاه با شد. با استفاده از KCL و KVL در مدارهای شکل (۸) و مدار AZS و جایگزینی R\_f و K با Z\_beta,i و Z\_alpha,i اندازه V\_B1 به دست می آید. اگر این مقدار با اندازه V\_B1 از سالی از انتهای خط، برابر قرار داده شود و Z\_beta,i با Z\_alpha,i (مقدار آن در شرایط عادی) جایگزین شود، معادله ای بر حسب Z\_alpha,i به دست می آید. با در نظر گرفتن زاویه Z\_alpha,i برابر صفر، دو پاسخ حقیقی برای Z\_alpha,i به دست می آید. یکی از آنها، منفی و غیر قابل قبول است و پاسخ دیگر، در شرایط عادی یا هنگام اتصال کوتاه روی سایر خطوط، مثبت بینهایت و در هنگام اتصال کوتاه روی خط به مقادیر مثبت محدود کاهش می یابد. بنابراین، با توجه به این تغییر زیاد، زاویه تشخیص اتصال کوتاه SCDA\_i را به عنوان شاخص وقوع اتصال کوتاه می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$SCDA_i = \arctan\left(\frac{Z_{\alpha,i}}{Z_{\max,i}}\right) \quad (11)$$

مقدار Z\_max,i بر حسب نوع اتصال کوتاه، کمی بزرگ تر از اندازه Z\_alpha,i برای اتصال کوتاه با مقاومت اتصال کوتاه بیشینه نزدیک به انتهای خط در نظر گرفته می شود. مقدار SCDA\_i کم تر از ۴۵ درجه به معنای وقوع اتصال کوتاه روی خط است. در شرایط عادی، SCDA\_i حدود ۹۰ درجه است. در هنگام وقوع اتصال کوتاه روی خطوط مجاور ممکن است مقدار SCDA\_i به صورت گذرا به کم تر از ۴۵ درجه برسد اما به سرعت به نزدیکی ۹۰ درجه برمی گردد. بنابراین، مقادیر SCDA\_i کم تر از ۴۵ درجه برای M نمونه متوالی به معنای وقوع اتصال کوتاه روی خط است. شکل (۹) نمودار جریان این روش را نشان می دهد.

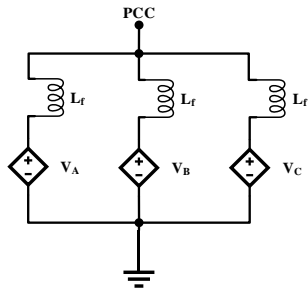
در روش پیشنهادی، خطوط توزیع با مقاومت سری با اندوکتانس مدل سازی شدند و ظرفیت خازنی خط نادیده گرفته شد. این فرض، برای خطوط هوایی قابل قبول است، اما در خطوط کابلی ممکن است عملکرد روش پید شنهادی را در هنگام وقوع خطاهای با مقاومت بالا به چالش بکشد. به منظور اصلاح این روش برای خطوط کابلی، می توان از مدل π خط که در شکل (۱۰) نشان داده شده است استفاده نمود. به این منظور، I\_A0، I\_A2 و I\_A1 در روش پید شنهادی، باید به صورت زیر جایگزین شوند:

$$\begin{aligned} I_{A1} &= I'_{A1} - \frac{2V_{A1}}{jX_c} \\ I_{A2} &= I'_{A2} - \frac{2V_{A2}}{jX_c} \\ I_{A0} &= I'_{A0} - \frac{2V_{A0}}{jX_{c0}} \end{aligned} \quad (12)$$

در این روابط X\_c راکتانس خازنی توالی مثبت و منفی خط و X\_c0 راکتانس توالی صفر خط است. همچنین، I\_A1، I\_A2 و I\_A0 جریان های توالی مثبت، منفی و صفر ورودی خط هستند.

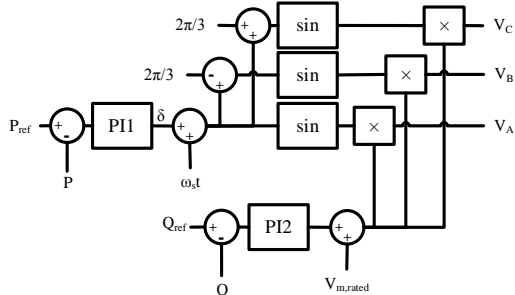
<sup>8</sup> Short Circuit Detection Angle

مدار معادل در نظر گرفته شده برای منابع تولید پراکنده در شکل (۱۲) نشان داده شده که شامل منابع ولتاژ وابسته و فیلتر سلفی است.

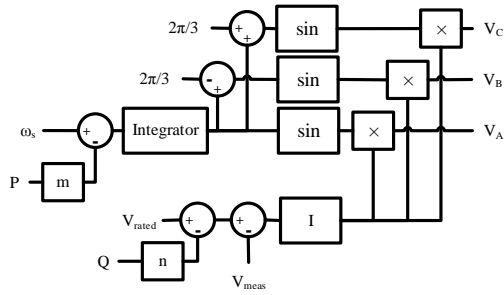


شکل (۱۲): مدار معادل DG

برای تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده بر اساس توان نامی آنها در حالت جزیره‌ای، از روش کنترل اکتیو استفاده می‌شود. سیستم کنترل در نظر گرفته شده برای منبع تولید پراکنده در حالت کاری متصل به شبکه در شکل (۱۳الف) نشان داده شده است. در این شکل، دامنه ولتاژ نامی،  $V_{m, rated}$  و فرکانس زاویه‌ای نامی و  $\omega_s$  و زمان  $t$  است. همچنین، سیستم کنترل در نظر گرفته شده برای منبع تولید پراکنده در حالت جزیره‌ای در شکل (۱۳ب) آورده شده است.  $m$  نسبت افت فرکانس زاویه‌ای مجاز به توان نامی منبع،  $n$  نسبت افت مجاز ولتاژ منبع به توان نامی و ولتاژ پایانه اندازه‌گیری شده است.  $m$  و  $n$  به ترتیب برابر ۲٪ و ۵٪ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که جریان خروجی منابع تولید پراکنده در زمان اتصال کوتاه به ۱/۵ برابر جریان نامی محدود شده است. ضرایب در نظر گرفته شده برای کنترل‌کننده‌ها در جدول (۱) آورده شده است.



(الف)

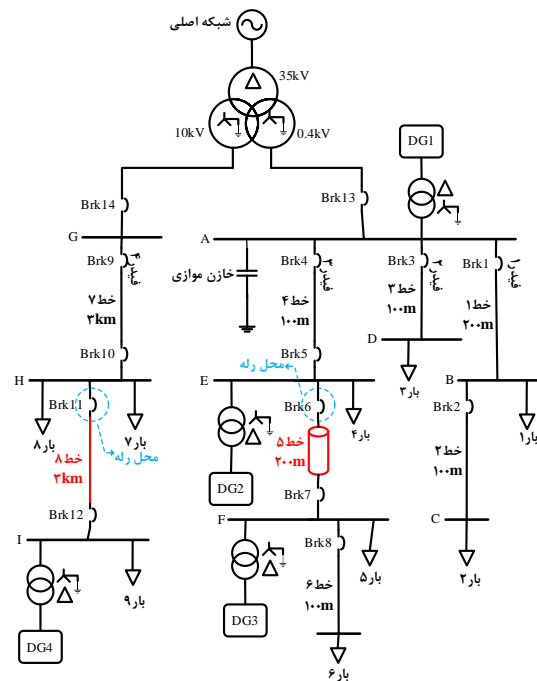


(ب)

شکل (۱۳): سیستم کنترل منبع تولید پراکنده در حالت متصل به شبکه، (ب) حالت جزیره‌ای

فیبرهای نوری را می‌توان برای پیوند ارتباطی در روش پیشنهادی استفاده کرد. به طور کلی، تأخیر ارتباطی شامل چهار جزء است: تأخیر

هوایی و خط کابلی به ترتیب  $1/10 \Omega/\text{km}$  و  $1 \Omega/\text{km}$  است. همچنین، اندوکتانس توالی مثبت و منفی خطوط هوایی  $400 \text{V}$  برابر  $0.261 \text{mH}/\text{km}$  و در خط کابلی برابر  $0.223 \text{mH}/\text{km}$  است. اندوکتانس توالی صفر خطوط هوایی و خط کابلی به ترتیب  $0.955 \text{mH}/\text{km}$  و  $1.082 \text{mH}/\text{km}$  است. ظرفیت خازنی توالی مثبت و منفی خط کابلی  $400 \text{V}$  برابر  $0.07 \mu\text{F}/\text{km}$  و ظرفیت خازنی توالی صفر آن  $0.02 \mu\text{F}/\text{km}$  است. توان راکتیو نامی بانک خازنی موازی در شین A برابر  $120 \text{kVA}$  است. توان بارهای ۱، ۳ و ۴ برابر  $40 \text{kVA}$  و توان بارهای ۲، ۵ و ۶ به ترتیب  $20 \text{kVA}$ ،  $5 \text{kVA}$  و  $25 \text{kVA}$  می‌باشد. ضریب توان همه بارها در شبکه  $400 \text{V}$  برابر  $0.9$  پس‌فاز است.



شکل (۱۱): شبکه مورد مطالعه

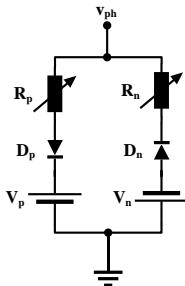
مقاومت توالی مثبت و منفی خطوط  $10 \text{kV}$  برابر  $0.38 \Omega/\text{km}$  و مقاومت توالی صفر  $0.76 \Omega/\text{km}$  است. همچنین، اندوکتانس توالی مثبت و منفی این خطوط  $1/432 \text{mH}/\text{km}$  و  $1/432 \text{mH}/\text{km}$  است. توان نامی DG4 (دیزل ژنراتور) در انتهای فیدر  $10 \text{kV}$  برابر  $60 \text{kVA}$  می‌باشد. توان بار ۷ برابر  $100 \text{kVA}$  و توان بار ۸ و ۹ برابر  $150 \text{kVA}$  است. ضریب توان بارها در فیدر  $10 \text{kV}$  برابر  $0.85$  پس‌فاز در نظر گرفته شده است.

شبکه  $400 \text{V}$  می‌تواند به عنوان یک ریزشبه در نظر گرفته شود که توانایی کار در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای را دارا است. در این مقاله، در هنگام تغییر حالت کاری ریزشبه از متصل به شبکه به جزیره‌ای، سیستم کنترل دیزل ژنراتور و CCHPها از کنترل توان اکتیو-راکتیو (P-Q) به کنترل ولتاژ-فرکانس (v-f) تغییر می‌کند تا ولتاژ و فرکانس را در حالت جزیره‌ای از محدوده مجاز حفظ کند. البته به دلیل ماهیت سیستم‌های فتوولتائیک، این نوع منبع صرف نظر از حالت کاری ریزشبه در حالت کنترل توان اکتیو-راکتیو باقی می‌ماند.

تصادفی و مستقل تغییر می‌کنند.

## ۵- ارزیابی روش پیشنهادی

به منظور ارزیابی روش حفاظت پیشنهادی، انواع مختلف اتصال کوتاه در خط ۵ (خط کابلی) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اتصال کوتاه‌ها روی خطوط ۴ و ۶ به عنوان اتصال کوتاه خارج از ناحیه حفاظتی خط ۵ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ Hz در نظر گرفته شد و اتصال کوتاه در ثانیه ۱۰ آغاز شد. با در نظر گرفتن محل اتصال کوتاه در ۹۰ درصد خط ( $K=0/9$ ) و مقاومت اتصال کوتاه  $R_f=50\Omega$  در معادلات (۱)، (۳)، (۵) و (۶)، مقادیر  $Z_{eq,3P}$ ،  $Z_{eq,LL}$ ،  $Z_{eq,SLG}$  و  $Z_{eq,DLG}$  به دست می‌آیند. اگر این مقادیر در رابطه (۸) جایگزین شده و اندازه آن‌ها محاسبه شود،  $|Z_{\alpha,LL}|$ ،  $|Z_{\alpha,3P}|$ ،  $|Z_{\alpha,SLG}|$  و  $|Z_{\alpha,DLG}|$  به ترتیب ۵۰۰، ۵۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰ به دست می‌آیند. برای اطمینان از عملکرد صحیح،  $Z_{max,i}$  ۱۵ درصد بیشتر از این مقادیر در نظر می‌شود. بنابراین،  $Z_{max,3P}$ ،  $Z_{max,LL}$ ،  $Z_{max,SLG}$  و  $Z_{max,DLG}$  به ترتیب ۵۷۵، ۵۷۵، ۱۷۲۵ و ۳۴۵ در نظر گرفته شدند. منحنی‌های  $SCDA_{3P}$  برای خطای سه‌فاز در ۵۰ درصد خط ۵ و ۱۰ درصد خط ۶ با مقاومت اتصال کوتاه  $0/01\Omega$  در حالت کاری متصل به شبکه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. برای اتصال کوتاه در داخل ناحیه حفاظتی (روی خط ۵)،  $SCDA_{3P}$  به سرعت کاهش می‌یابد و در مقادیر کوچک‌تر از ۴۵ درجه قرار می‌گیرد. در حالی که، برای یک اتصال کوتاه خارج از ناحیه حفاظتی (در ۱۰ درصد از خط ۶)، این مقدار به طور گذرا کاهش یافته و به سرعت به مقادیر بزرگ‌تر از ۴۵ درجه برمی‌گردد. با مطالعه انواع اتصال کوتاه‌ها در مکان‌های مختلف، تعداد  $SCDA_i$  متوالی کوچک‌تر از ۴۵ درجه برای تشخیص اتصال کوتاه (M) ۶ تعیین شد.



شکل (۱۴): مدل خطای امپدانس بالا (Wang, & et al., 2019)

جدول‌های (۵)–(۲) مقادیر  $SCDA_i$  و زمان پاسخ روش پیشنهادی را برای رله در ابتدای خط ۵ نشان می‌دهد. در این بررسی‌ها مقاومت اتصال کوتاه  $0/01\Omega$  تا  $50\Omega$  در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد برای هر اتصال کوتاه روی خط ۵ (داخل ناحیه حفاظتی)  $SCDA_i$  به مقادیر کمتر از ۴۵ درجه افت کرده و در این مقادیر می‌ماند. بنابراین، پس از ۶ نمونه متوالی کوچک‌تر از ۴۵ درجه، فرمان قطع به  $Brk6$  داده می‌شود. همچنین در صورت وقوع اتصال کوتاه در خطوط مجاور (خارج از ناحیه حفاظتی)،  $SCDA_i$  در مقادیر بزرگ‌تر

انتقال، تأخیر در صف، تأخیر انتشار و تأخیر پردازش. تأخیرهای انتقال و صف برای سیستم‌های ارتباطی پی‌شرفته مانند فیبر نوری با پهنای باند بالا ناچیز است. این تأخیر حدود  $0/1$  میلی‌ثانیه با پهنای باند  $1000-1100$  Mb/sec است. تأخیر انتقال شار برای سیستم‌های فشار ضعیف با خطوط کوتاه (حدود چند میکروثانیه) اندک است و تأخیر پردازش را می‌توان با استفاده از مسیریابی پیشرفته به حداقل رساند. بنابراین، کل تأخیر ارتباطی به اندازه‌ای کوچک خواهد بود که داده‌های مربوط به اندازه و ولتاژ توالی مثبت، در بازه زمانی کم‌تر از ۱ میلی‌ثانیه بین رله‌ها منتقل خواهد شد (Shabani, & Mazlumi, 2020). علاوه بر آن، احتمال آلوده شدن داده‌ها به نویز در فیبر نوری بسیار پایین است. برای خطوط طولانی‌تر، واحدهای اندازه‌گیری فازور مبتنی بر الگوریتم فیلتر کالمن پیشرفته را می‌توان در شین‌ها مطابق با استاندارد IEEE C37.118.1 قرار داد. واحدهای اندازه‌گیری فازور به دو کلاس P و M تقسیم می‌شوند. واحدهای اندازه‌گیری فازور مبتنی بر فیلتر کالمن پی‌شرفته کلاس P پاسخ سریع‌تری دارند و برای کاربردهای حفاظتی مناسب هستند (Sharma, & Samantaray, 2019) (Garcia, Guillen, Olveres, Ramirez, & Rodriguez, 2020).

جدول (۱): ضرایب کنترل‌کننده‌ها در منابع تولید پراکنده

رژیم کار	کنترل‌کننده	Kp	Ti	
متصل به شبکه	DG1	0/1	0/02	
	DG2	0/1	0/02	
	DG3	0/1	0/02	
	DG4	0/02	0/02	
	ایزوله	DG1	-	0/067
		DG2	-	0/067
		DG4	-	0/067

برای ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی در حضور ویژگی‌های غیرخطی اتصال کوتاه‌های امپدانس بالا، از مدل شکل (۱۴) استفاده شده است (Wang, & et al., 2019). این مدل شامل دو منبع DC با مقدار  $V_p$  و  $V_n$  و دیودهای متناظر  $D_p$  و  $D_n$  برای تشکیل مسیره‌های جریان نیم سیکل مثبت و منفی است. دو منبع دی سی  $V_p$  و  $V_n$  ولتاژ قوس را شبیه‌سازی می‌کنند و به طور تصادفی و مستقل تغییر می‌کنند. هنگامی که مقدار لحظه‌ای  $V_{ph}$  بزرگ‌تر از  $V_p$  باشد، جریان به سمت زمین جاری می‌شود و زمانی که مقدار لحظه‌ای  $V_{ph}$  کمتر از  $V_n$  باشد، معکوس می‌شود. زمانی که  $V_n < V_{ph} < V_p$  باشد هیچ جریانی عبور نمی‌کند. برای شبیه‌سازی مقاومت قوس الکتریکی که باعث جریان نامتقارن می‌شود،  $R_p$  و  $R_n$  مقادیر متفاوتی می‌گیرند و به طور

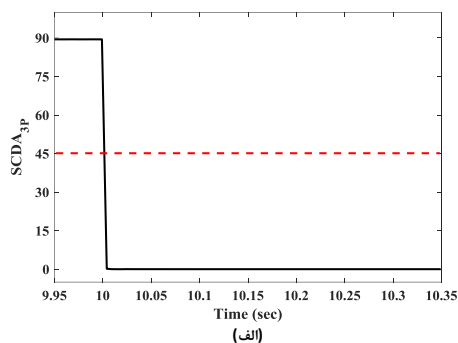
جدول (۲): عملکرد روش پیشنهادی در اتصال کوتاه سه فاز

حالت کاری ریزشک	نوع-مقاومت اتصال کوتاه	محل اتصال کوتاه	درزون ناحیه حفاظتی	SCDA <sub>3P</sub>	صحت عملکرد روش	زمان پاسخ (م ثانیه)
متصل به شبکه	3P- $0.1\Omega$	خط ۵	✓	۰/۰۳۵	✓	۳۰
		خط ۴	✓	۰/۰۵۶	✓	۳۵
		خط ۶	✗	۸۹/۹۶۷	✓	-
		خط ۵	✓	۰/۲۰۳	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۱/۰۹۲	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۱/۱۱۷	✓	۳۰
	3P- $1.0\Omega$	خط ۵	✓	۱/۹۸۶	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۳۵
		خط ۵	✓	۵/۵۸۱	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۳۵
		خط ۵	✓	۴۱/۰۵۵	✓	۵۰
		خط ۵	✓	۰/۰۰۵	✓	۳۰
3P- $0.1\Omega$	خط ۵	✓	۰/۲۰۳	✓	۳۰	
	خط ۴	✓	۰/۰۵۰	✓	۴۵	
	خط ۶	✗	۸۹/۹۶۷	✓	-	
	خط ۵	✓	۰/۱۱۲	✓	۳۰	
	خط ۵	✓	۰/۲۰۳	✓	۳۰	
	خط ۵	✓	۱/۰۴۳	✓	۳۵	
جزیره‌ای	3P- $1.0\Omega$	خط ۵	✓	۱/۱۱۷	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۱/۹۸۶	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۱۰/۰۸۳	✓	۳۵
	3P- $5.0\Omega$	خط ۵	✓	۵/۴۵۵	✓	۳۵
		خط ۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۳۵
		خط ۵	✓	۴۱/۷۰۹	✓	۵۰

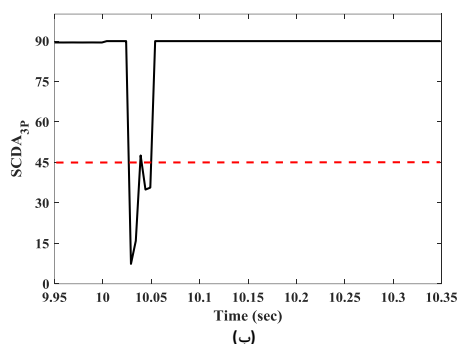
جدول (۳): عملکرد روش پیشنهادی در اتصال کوتاه دوفاز به زمین

حالت کاری ریزشک	نوع-مقاومت اتصال کوتاه	محل اتصال کوتاه	درزون ناحیه حفاظتی	SCDA <sub>DLG</sub>	صحت عملکرد روش	زمان پاسخ (م ثانیه)
متصل به شبکه	DLG- $0.1\Omega$	خط ۵	✓	۰/۰۱۸	✓	۳۰
		خط ۴	✓	۰/۱۵۴	✓	۴۰
		خط ۶	✗	۸۹/۹۸۰	✓	-
		خط ۵	✓	۰/۱۱۲	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۰/۲۱۳	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۱/۱۱۷	✓	۴۰
	DLG- $1.0\Omega$	خط ۵	✓	۱/۱۱۷	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۱/۹۸۶	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۴۰
		خط ۵	✓	۵/۵۸۱	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۳۵
		خط ۵	✓	۴۱/۰۵۵	✓	۵۰
DLG- $5.0\Omega$	خط ۵	✓	۰/۰۰۳	✓	۳۰	
	خط ۵	✓	۰/۰۱۷	✓	۳۰	
	خط ۴	✓	۰/۱۵۴	✓	۳۵	
	خط ۶	✗	۸۹/۹۸۰	✓	-	
	خط ۵	✓	۰/۱۱۲	✓	۳۰	
	خط ۵	✓	۰/۲۱۳	✓	۳۰	
جزیره‌ای	DLG- $1.0\Omega$	خط ۵	✓	۱/۱۱۷	✓	۳۵
		خط ۵	✓	۱/۱۱۷	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۱/۹۸۶	✓	۳۰
	DLG- $1.0\Omega$	خط ۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۳۵
		خط ۵	✓	۵/۴۵۵	✓	۳۰
		خط ۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۳۵
DLG- $5.0\Omega$	خط ۵	✓	۴۱/۷۰۹	✓	۵۰	

از ۴۵ درجه باقی می‌ماند (م شلبه شرایط عادی) و یابیه طور موقت کم‌تر از ۴۵ درجه می‌شود، بنابراین فرمان قطعی صادر نمی‌شود. علاوه بر این، این ارزیابی‌ها در این شبکه برای بارهای امپدانس ثابت نیز تکرار شد و نتایج مشابهی به دست آمد. به طور مشابه، این روش حفاظت برای Brk7 در انتهای خط ۵ نیز قابل پیاده‌سازی است. بنابراین، Brk6 و Brk7 می‌توانند از خط ۵ حفاظت کنند.



(الف)



(ب)

شکل (۱۵): منحنی SCDA<sub>3P</sub> در حالت کاری متصل به شبکه برای اتصال کوتاه با مقاومت اتصال کوتاه  $0.1\Omega$  در الف) ۵۰٪ خط ۵ ب) ۱۰٪ خط ۶

در مطالعه اتصال کوتاه، جریان خطوط پیش از وقوع اتصال کوتاه و همچنین زمان شروع اتصال کوتاه، اهمیت چندانی ندارد. اما در بررسی اتصال کوتاه‌های با مقاومت بالا، جریان اتصال کوتاه در مقایسه با جریان بارهای شبکه، زیاد نیست. به همین دلیل، جریان بار و زمان شروع اتصال کوتاه ممکن است بر عملکرد سیستم حفاظت تأثیرگذار باشد.

برای مطالعه تأثیر شرایط پیش از وقوع اتصال کوتاه بر تشخیص خطاهای مقاومت بالا در روش پیشنهادی، شرایط جدیدی پیش از وقوع اتصال کوتاه در نظر گرفته شد. در این شرایط، DG3 خاموش، بار ۱ تا ۶ دو برابر و زمان آغاز اتصال کوتاه  $10/0.05$  ثانیه (زاویه ولتاژ  $\pi/2$ ) در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی عملکرد صحیحی در شرایط جدید پیش از اتصال کوتاه دارد. بنابراین، روش پیشنهادی، با وجود عدم قطعیت در بارها، میزان تولید منابع و تغییر زمان شروع اتصال کوتاه عملکرد صحیحی دارد.

معمولاً برای ساده‌سازی اتصال کوتاه را با مقاومت خالص مدل می‌کنند. اما اتصال کوتاه‌های امپدانس بالا دارای ویژگی‌های غیرخطی هستند. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در حضور ویژگی‌های غیرخطی این اتصال کوتاه‌ها (شکل (۱۴))،  $V_p$  بین ۱۵۰ تا ۱۷۰ ولت و

اهم لحاظ گردید و به صورت تصادفی و مستقل در هر ۰/۱ میلی ثانیه تغییر داده شد. شبیه‌سازی‌ها در این شرایط نشان داد، روش پیشنهادی در اتصال کوتاه‌های تک‌فاز به زمین امیدانس بالا در نقاط مختلف خط در هر دو حالت کاری ریز شبکه نیز عملکرد صحیحی دارد. به این ترتیب، خواص غیرخطی خطاهای امیدانس بالا بر عملکرد طرح پیشنهادی تأثیری ندارد. عملکرد روش پیشنهادی برای تغییرات شرایط پیش از اتصال کوتاه و اتصال کوتاه‌های امیدانس بالا در جدول (۶) آورده شده است.

یکی از چالش‌های سیستم‌های حفاظت دارای اتصال مخبراتی بی‌سیم، وجود در صدی خطا در داده‌های آر سالی به دلیل تداخل نویز محیطی به خصوص در مسافت‌های طولانی است. اما در روش حفاظت پیشنهادی به دلیل کوتاه بودن طول خط توزیع در ریز شبکه و همچنین استفاده از فیبر نوری به عنوان بستر ارتباطی، احتمال آلوده شدن داده‌های تبادلی به نویز بسیار پایین است. با این وجود، عملکرد طرح حفاظت پیشنهادی با در نظر گرفتن ۱٪ نویز در اندازه ولتاژ توالی مثبت آر سالی از انتهای خط، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از عملکرد صحیح طرح حفاظت پیشنهادی در این شرایط بود.

جدول (۶): عملکرد روش پیشنهادی در تغییر شرایط قبل از اتصال - کوتاه و اتصال کوتاه امیدانس بالا

زمان پاسخ (م ثانیه)	صحت عملکرد روش	SCDA <sub>LL</sub>	محل اتصال کوتاه	نوع مقاومت اتصال کوتاه	حالت کاری ریز شبکه	شرایط
۳۰	✓	۰/۰۰۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۰/۰۱۴	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۴۰	✓	۰/۱۱۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۰/۱۱۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۰/۲۰۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۴۰	✓	۱/۰۶۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۱/۱۱۷	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۱/۹۸۶	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۴۰	✓	۹/۵۸۵	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۵/۴۵۵	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۴۵	✓	۴۱/۰۵۵	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۰/۰۰۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۰/۰۱۵	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۵	✓	۰/۱۳۱	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۰/۱۱۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۰/۲۰۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۵	✓	۱/۰۶۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۱/۱۱۷	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۱/۹۸۶	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۰	✓	۵/۴۵۵	✓	۱۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۳۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه
۵۰	✓	۴۱/۰۵۵	✓	۹۰٪	متصل به شبکه	تغییر شرایط قبل از اتصال کوتاه

جدول (۴): عملکرد روش پیشنهادی در اتصال کوتاه دوفاز

زمان پاسخ (م ثانیه)	صحت عملکرد روش	SCDA <sub>LL</sub>	محل اتصال کوتاه	نوع مقاومت اتصال کوتاه	حالت کاری ریز شبکه
۳۰	✓	۰/۰۰۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۰۱۴	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۴۰	✓	۰/۱۱۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۱۱۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۲۰۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۴۰	✓	۱/۰۶۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۱۱۷	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۹۸۶	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۴۰	✓	۹/۵۸۵	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۵/۴۵۵	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۴۵	✓	۴۱/۰۵۵	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۰۰۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۰۱۵	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۰/۱۳۱	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۶۷	×	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۱۱۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۲۰۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۱/۰۶۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۱۱۷	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۹۸۶	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۵/۴۵۵	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۵۰	✓	۴۱/۰۵۵	✓	۹۰٪	متصل به شبکه

جدول (۵): عملکرد روش پیشنهادی در اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین

زمان پاسخ (م ثانیه)	صحت عملکرد روش	SCDA <sub>SLG</sub>	محل اتصال کوتاه	نوع مقاومت اتصال کوتاه	حالت کاری ریز شبکه
۳۰	✓	۰/۰۰۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۰۱۰	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۰/۰۷۱	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۰۱	×	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۰۱	×	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۱۱۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۲۰۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۱/۰۱۹	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۱۱۷	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۹۸۶	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۴۵	✓	۱۰/۰۸۳	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۵/۴۵۵	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۹/۶۳۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۴۵	✓	۴۰/۴۰۲	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۰۰۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۰۱۰	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۰۶۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۰۱	×	۹۰٪	متصل به شبکه
-	✓	۸۹/۹۰۱	×	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۱۱۲	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۰/۲۰۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۰۶۷	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۱۱۷	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱/۹۸۶	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۱۰/۰۸۳	✓	۹۰٪	متصل به شبکه
۳۰	✓	۵/۴۵۵	✓	۱۰٪	متصل به شبکه
۳۵	✓	۹/۸۵۸	✓	۵۰٪	متصل به شبکه
۴۰	✓	۳۹/۷۵۳	✓	۹۰٪	متصل به شبکه

به منظور بررسی اثر اشباع ترانسفورماتورهای جریان بر عملکرد روش حفاظت پیشنهادی در اتصال کوتاه‌های شدید، اتصال کوتاه سه‌فاز با مقاومت ۰/۱ اهم در ۵۰ درصد خط ۶ مورد مطالعه قرار گرفت. جریان خروجی یک فاز ترانسفورماتور جریان با نسبت تبدیل ۱۰:۵ برای این اتصال کوتاه در شکل (۱۶) آورده شده است. در این شکل  $I_{\text{sat}}$  جریان خروجی ترانسفورماتور جریان است که به اشباع رفته است و  $I_{\text{unsat}}$  جریان در صورتی است که ترانسفورماتور جریان اشباع نشده باشد. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن اشباع در ترانسفورماتور جریان در شکل (۱۷) مقایسه شده است. در این شکل خط پر برای

$V_n$  بین ۱۴۵ تا ۱۵۵ ولت به طور تصادفی و مستقل هر ۰/۱ میلی‌ثانیه تغییر داده شد. همچنین برای  $R_p$  و  $R_n$  مقادیر متفاوتی بین ۱۵ تا ۲۵

حالت عادی است که تعیین مقدار آستانه را بسیار ساده می‌کند. اما در برخی روش‌ها مثل (Huang, & et al., 2014) مقدار آستانه نزدیک به امیدانس خط بایستی در نظر گرفته شود که برای خطوط توزیع که طول‌های کوتاهی دارند مقدار کمی است و ممکن است تعیین آستانه را با چالش روبرو کند.

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در خطوط فشار متوسط، انواع اتصال کوتاه با مقاومت‌های مختلف در خط ۸ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج برای اتصال کوتاه دوفاز و تک‌فاز به زمین در جدول‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. ارزیابی دو نوع دیگر اتصال کوتاه نیز، نتایج مشابهی به همراه داشت. بنابراین، این روش قادر به تشخیص صحیح، در خطوط فشار متوسط نیز می‌باشد. اما زمان پاسخ‌گویی در این خطوط بین ۳۰ تا ۸۰ میلی‌ثانیه است و متوسط ۳۵/۹ میلی‌ثانیه می‌باشد.

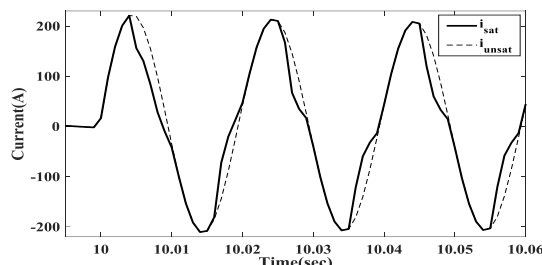
جدول (۷): عملکرد روش پیشنهادی در اتصال کوتاه دوفاز روی خط

فشار متوسط		محل اتصال کوتاه	نوع-مقاومت اتصال کوتاه	حالت کاری ریزشکه		
زمان پاسخ (م ثانیه)	صحت عملکرد روش					
۳۰	✓	۰/۰۳۶	✓	۱۰٪	خط ۸	LL- ۰/۰۱Ω
۳۰	✓	۰/۲۸۱	✓	۵۰٪		
۴۰	✓	۳/۴۴۸	✓	۹۰٪	خط ۷	
-	✓	۸۹/۹۶۹	×	۹۰٪		
۳۰	✓	۰/۱۴۴	✓	۱۰٪	خط ۸	LL-۱Ω
۳۰	✓	۰/۴۳۵	✓	۵۰٪		
۴۰	✓	۴/۰۵۰	✓	۹۰٪		
۳۰	✓	۱/۱۹۷	✓	۱۰٪	خط ۸	LL- ۱۰Ω
۳۰	✓	۲/۲۲۸	✓	۵۰٪		
۵۰	✓	۱۱/۸۰۱	✓	۹۰٪		
۳۰	✓	۵/۹۷۸	✓	۱۰٪	خط ۸	LL- ۵۰Ω
۴۰	✓	۱۰/۷۸۸	✓	۵۰٪		
۸۰	✓	۳۹/۱۰۵	✓	۹۰٪		
۳۰	✓	۰	✓	۱۰٪	خط ۸	LL- ۰/۰۱Ω
۳۰	✓	۰	✓	۵۰٪		
۳۵	✓	۰/۰۰۸	✓	۹۰٪	خط ۷	
-	✓	۸۹/۹۶۹	×	۹۰٪		
۳۰	✓	۰/۱۲۰	✓	۱۰٪	خط ۸	LL-۱Ω
۳۵	✓	۰/۱۹۴	✓	۵۰٪		
۳۵	✓	۱/۰۱۹	✓	۹۰٪		
۳۰	✓	۱/۲۲۵	✓	۱۰٪	خط ۸	LL- ۱۰Ω
۳۵	✓	۱/۹۸۶	✓	۵۰٪		
۳۵	✓	۱۰/۳۱۳	✓	۹۰٪		
۳۵	✓	۵/۷۱۱	✓	۱۰٪	خط ۸	LL- ۵۰Ω
۳۵	✓	۱۰/۳۱۳	✓	۵۰٪		
۴۵	✓	۴۱/۷۰۹	✓	۹۰٪		

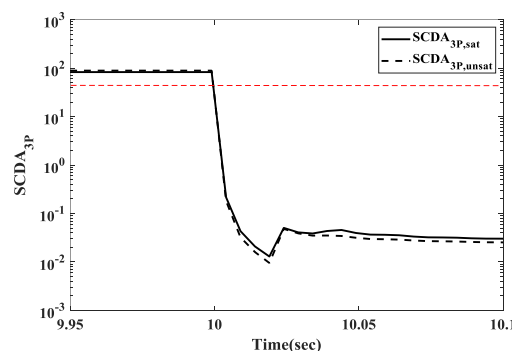
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با اصلاح مدارهای معادل توالی مرسوم انواع اتصال کوتاه، مدل جدیدی برای انواع اتصال کوتاه در شبکه‌های توزیع فعال پیشنهاد گردید. سپس، مدارهای مثلث معادل این مدارهای پیشنهادی با استفاده از تبدیل ستاره به مثلث به دست آورده شد. تغییر قابل توجه، در مقدار یکی از امیدانس‌ها در این مدارهای مثلث، اساس پیشنهاد روش حفاظتی برای ریزشکه‌ها شد. در این روش، شاخصی تحت عنوان SCDA معرفی گردید که با انتخاب مقدار

حالتی است که اشباع ترانسفورماتور جریان لحاظ شده و خط چین برای حالتی است که اشباع در نظر گرفته نشده است. برای نمایش بهتر اختلاف SCDA<sub>3P</sub> در دو حالت، مقیاس محور عمودی لگاریتمی در نظر گرفته شده است. این شکل نشان دهنده عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی در هنگام اشباع ترانسفورماتور جریان است.



شکل (۱۶): جریان خروجی یک فاز ترانسفورماتور جریان در هنگام اشباع هسته



شکل (۱۷): منحنی SCDA<sub>3P</sub> در حالت متصل به شبکه برای اتصال کوتاه با مقاومت ۰/۰۱Ω با در نظر گرفتن اشباع در هسته ترانسفورماتور جریان

بنابراین، روش پیشنهادی قادر به تشخیص انواع اتصال کوتاه در هر دو حالت کاری ریزشکه است. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد زمان تشخیص این روش بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌ثانیه و میانگین زمان پاسخ‌گویی آن ۳۲/۸ میلی‌ثانیه است که در مقایسه با روش‌های مرسوم که زمان پاسخ حدود ۵۰ میلی‌ثانیه دارند، حدود ۳۴٪ سریع‌تر است. همچنین در روش‌هایی که نیاز به تبادل داده دارند، معمولاً حداقل دو کمیت باید ارسال شود. به عنوان نمونه در (Huang, & et al., 2014)، نیاز به ارسال امیدانس محاسبه شده در انتهای خط شامل اندازه امیدانس و زاویه آن به ابتدای خط است، اما در روش پیشنهادی، تنها یک کمیت ارسال می‌گردد و این به معنای حداقل ۵۰٪ کاهش تبادل داده است. علاوه بر این، پایین بودن فرکانس نمونه برداری (۲۰۰Hz) در این روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرسوم مثل (Huang, & et al., 2014) با فرکانس نمونه برداری ۱۲۰۰Hz، از مزایای این روش محسوب می‌شود. زیرا حجم کم‌تر تبادل داده‌ها، آزاد شدن بیشتر سیستم ارتباطی جهت استفاده در سایر کاربردها را در ریزشکه به همراه دارد. از دیگر مزایایی طرح حفاظت پیشنهادی کاهش شدید SCDA<sub>i</sub> در هنگام وقوع انواع اتصال کوتاه در مقایسه با

Microgrids Considering DG Stability. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 10(3), 2407-2415.

Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M., Safdarian, A., Davoudi, A., & Shahidehpour, M. (2014). Synchrophasor Measurement Technology in Power Systems: Panorama and State-of-the-Art. *IEEE Access*, 2, 1607-1628.

Best, R. J., Morrow, D. J., & Crossley, P. A. (2009). Communication Assisted Protection Selectivity for Reconfigurable and Islanded Power Networks. *2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)* (pp. 1-5). Glasgow, UK : IEEE.

Billar, M., & Jaeger, J. (2018). Voltage-Free Distance Protection Method for Closed Loop Structures. *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)* (pp. 1-6). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina : IEEE.

Blaabjerg, F., Yang, Y., Yang, D., & Wang, X. (2017, May). Distributed Power-Generation System and Protection. *Proceedings of the IEEE*, 105(7), 1311-1331.

Bottrell, N., & Green, T. C. (2013). An Impedance-Based Method for the Detection of Over-Load and Network Faults in Inverter Interfaced Distributed Generation. *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)* (pp. 1-10). Lille, France: IEEE.

Darabi, A., Bagheri, M., & Gharehpetian, G. B. (2020). Highly Sensitive Microgrid Protection Using Overcurrent Relays with a Novel Relay Characteristic. *IET Renewable Power Generation*, 14(7), 1201-1209.

Esmaceli Dahej, A., Esmaceli, S., & Hojabri, H. (2018, September). Co-Optimization of Protection Coordination and Power Quality in Microgrids Using Unidirectional Fault Current Limiters. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 9(5), 5080-5091.

Fang, Y., Jia, K., Yang, Z., Li, Y., & Bi, T. (2019, September). Impact of Inverter-Interfaced Renewable Energy Generators on Distance Protection and an Improved Scheme. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 66(9), 7078-7088.

Furlan, R. H., Beuter, C. H., Bataglioli, R. P., Faria, I. d., & Oleskovicz, M. (2018). Improvement of Overcurrent Protection Considering Distribution Systems with Distributed Generation. *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* (pp. 1-5). Ljubljana, Slovenia: IEEE.

Garcia, V. T., Guillen, D., Olveres, J., Ramirez, B. E., & Rodriguez, J. R. (2020, May). Modelling of High Impedance Faults in Distribution Systems and Validation Based on Multiresolution Techniques. *Computers & Electrical Engineering*, 83.

Ghanbari, T., & Farjah, E. (2013, May). Unidirectional Fault Current Limiter: An Efficient Interface Between the Microgrid and Main Network. *IEEE Transaction on Power System*, 28(2), 1591-1598.

Hooshyar, A., & Irvani, R. (2017, July). Microgrid Protection. *Proceedings of the IEEE*, 105(7), 1332-1353.

Huang, W., Nengling, T., Zheng, X., Fan, C., Yang, X., & Kirby, B. J. (2014, August). An Impedance Protection Scheme for Feeders of Active Distribution Networks. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 29(4), 1591-1602.

Jiao, Z., Jin, J., Liu, L., Wang, Y., Wang, Q., & Wang, Z. (2015). A Practical Setting Method for Over-Current Relay and Automatic Recloser in Distribution Network with Photovoltaic Station. *International Journal of Electrical Energy*, 3, 225-229.

Kar, S., Samantaray, S. R., & Dadashzadeh, M. (2017, June). Data Mining Model Based Intelligent Differential Microgrid protection scheme. *IEEE Systems Journal*, 11(2), 1161-1169.

آستانه ۴۵ درجه برای آن قادر به تشخیص انواع اتصال کوتاه با مقاومت اتصال کوتاه تا ۵۰ اهم در هر دو حالت کاری متصل به شبکه و جزیره‌ای در خطوط توزیع فشار ضعیف و فشار متوسط است. علاوه بر این، روش پیشنهادی علاوه بر عملکرد صحیح در خطوط هوایی قادر به تشخیص اتصالات کوتاه در خطوط کابلی نیز است. میانگین زمان پاسخ گویی این روش برای انواع اتصالات کوتاه در خطوط فشار ضعیف ۳۲/۸ میلی ثانیه و در خطوط فشار متوسط ۳۵/۹ میلی ثانیه است که سرعت عملکرد مناسبی است. آزادسازی حداقل ۵۰ درصد از سیستم ارتباطی و نرخ نمونه برداری ۲۰۰Hz که در مقایسه با روش‌های مشابه نرخ پایینی است از مزایای این روش محسوب می‌شود. به علاوه، امکان تشخیص اتصالات کوتاه‌های امپدانس بالا و مقاوم بودن در برابر پیکربندی مجدد شبکه و عدم قطعیت بار و تولید، از قابلیت‌های روش پیشنهادی است. همچنین، تغذیه ورودی و اشباع ترانسفورماتورهای جریان بر عملکرد صحیح روش پیشنهادی تأثیری ندارد. این روش، به کمک نرم افزارهای PSCAD و MATLAB پیاده سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج صحت عملکرد آن را تایید کرد.

جدول (۸): عملکرد روش پیشنهادی در اتصال کوتاه دوفاز به زمین

روی خط فشار متوسط

حالت کاری پخش شبکه	نوع اتصال کوتاه	محل اتصال کوتاه	درون ناحیه حفاظتی	SCDA <sub>DLG</sub>	عملکرد روش پیشنهادی	زمان پاسخ (میلی ثانیه)	
متصل به شبکه	DLG- ۰/۰۱Ω	خط ۸	✓	۰/۰۲۲	✓	۳۰	
		خط ۷	✓	۰/۱۸۵	✓	۳۵	
		خط ۷	×	۲/۲۲۸	✓	۳۵	
	متصل به شبکه	DLG- ۱Ω	خط ۸	✓	۰/۱۳۴	✓	۳۰
			خط ۸	✓	۰/۳۵۳	✓	۳۵
			خط ۸	✓	۲/۶۱۷	✓	۳۵
DLG- ۱۰Ω		خط ۸	✓	۱/۱۹۷	✓	۳۰	
		خط ۸	✓	۲/۱۷۷	✓	۳۵	
		خط ۸	✓	۱۱/۵۴۰	✓	۴۵	
متصل به شبکه	DLG- ۵۰Ω	خط ۸	✓	۵/۹۷۸	✓	۳۵	
		خط ۸	✓	۱۱/۰۳۳	✓	۳۵	
		خط ۸	✓	۳۹/۱۰۵	✓	۷۵	
	DLG- ۰/۰۱Ω	خط ۸	✓	۰/۰۰۲	✓	۳۰	
		خط ۸	✓	۰/۰۰۴	✓	۳۰	
		خط ۷	×	۰/۰۱۵	✓	۴۰	
متصل به شبکه	DLG- ۱Ω	خط ۸	✓	۰/۱۲۳	✓	۳۰	
		خط ۸	✓	۰/۲۱۸	✓	۳۰	
		خط ۸	✓	۱/۰۱۹	✓	۴۰	
	DLG- ۱۰Ω	خط ۸	✓	۱/۱۹۷	✓	۳۰	
		خط ۸	✓	۲/۱۷۷	✓	۳۰	
		خط ۸	✓	۱۰/۰۸۳	✓	۴۰	
DLG- ۵۰Ω	خط ۸	✓	۵/۸۴۳	✓	۳۰		
	خط ۸	✓	۱۰/۳۱۳	✓	۳۰		
	خط ۸	✓	۴۱/۷۰۹	✓	۴۰		

## مراجع

Adly, A. R., El Sehiemy, R. A., & Abdelaziz, A. Y. (2017). Optimal Reclosing Time to Improve Transient Stability in Distribution System. *CIREC - Open Access Proc. Journal*, 2017(1), 1359-1362.

Aghdam, T. S., Kazemi Karegar, H., & Zeineldin, H. H. (2019, May). Variable Tripping Time Differential Protection for

- Zamani, M. A., Sidhu, T. S., & Yazdani, A. (2011, July). A Protection Strategy and Microprocessor-Based Relay for Low-Voltage Microgrids. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 26(3), 1873-1883.
- Zeineldin, H. H., El-saadany, E. F., & Salama, M. M. (2006). Distributed Generation Microgrid Operation: Control and Protection. *2006 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources* (pp. 105-111). Clemson, SC, USA: IEEE.
- Khederzadeh, M. (2012). Preservation of Overcurrent Relays Coordination in Microgrids by Application of Static Series Compensators. *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)* (pp. 1-6). Birmingham, UK: IET.
- Laaksonen, H., Ishchenko, D., & Oudalov, A. (2014, May). Adaptive Protection and Microgrid Control Design for Hailuoto Island. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 5(3), 1486-1493.
- Loix, T., Wijnhoven, T., & Deconinck, G. (2009). Protection of Microgrids with a High Penetration of Inverter-Coupled Energy Sources. *2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System* (pp. 1-6). Calgary, AB, Canada : IEEE.
- Mirsaeidi, S., Said, D. M., Mustafa, M. W., Habibuddin, M. H., & Ghaffari, K. (2016, May). Modeling and Simulation of a Communication-Assisted Digital Protection Scheme for Microgrid. *Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 867-878.
- Nikolaidis, V. C., Tsimsios, A. M., & Safigianni, A. S. (2018, March). Investigating Particularities of Infeed and Fault Resistance Effect on Distance Relays Protecting Radial Distribution Feeders with DG. *IEEE Access*, 6, 11301-11312.
- Nobakhti, S. M., Ketabi, A., & Shafie-khah, M. (2021, January). A New Impedance-Based Main and Backup Protection Scheme for Active Distribution Lines in AC Microgrids. *Energies 2021*, 14(2), 274.
- Orji, U., Schantz, C., Leeb, S. B., Kirtley, J. L., Sievenpiper, B., Gerhard, K., & McCoy, T. (2017, July). Adaptive Zonal Protection for Ring Microgrids. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 8(4), 1843-1851.
- Oureilidis, K. O., & Demoulias, C. S. (2016, June). A Fault Clearing Method in Converter-Dominated Microgrids with Conventional Protection Means. *IEEE Transaction Power Electronics*, 31(6), 4628-4640.
- Pandakov, K., & Hoidalén, H. K. (2017). Distance Protection with Fault Impedance Compensation for Distribution Network with DG. *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)* (pp. 1-6). Turin, Italy: IEEE.
- Shabani, A., & Mazlumi, K. (2020, January). Evaluation of a Communication-Assisted Overcurrent Protection Scheme for Photovoltaic-Based DC Microgrid. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 11(1), 429-439.
- Sharma, N. K., & Samantaray, S. R. (2019, October). Assessment of PMU-Based Wide-Area Angle Criterion for Fault Detection in Microgrid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(19), 4301-4310.
- Sharma, N. K., Samantaray, S. R., & oooo. (2020, February). PMU Assisted Integrated Impedance Angle-Based Microgrid Protection Scheme. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 35(1), 183-193.
- Sortomme, E., Venkata, S. S., & Mitra, J. (2010, October). Microgrid Protection Using Communication-Assisted Digital Relays. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 25(4), 2789 – 2796.
- Teimourzadeh, S., Aminifar, F., Davarpanah, M., & Guerrero, J. M. (2016, September). Macroprotections for Microgrids: Toward a New Protection Paradigm Subsequent to Distributed Energy Resource Integration. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 10(3), 6-18.
- Wang, X., Gao, J., Wei, X., Song, G., Wu, L., Liu, J., . . . Kheshti, M. (2019, November). High Impedance Fault Detection Method Based on Variational Mode Decomposition and Teager-Kaiser Energy Operators for Distribution Network. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 10(6), 6041-6054.