

## **A New Method for Controlling Microgrids Protection Settings with the High Penetration of Distributed Generation**

**Hadi Bisheh<sup>1</sup>, Majid Moazzami<sup>1,2</sup>, Bahador Fani<sup>1,2</sup>, Ghazanfar Shahgholian<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>2</sup> Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

### **Abstract:**

In recent years, the distributed generation resources (DGR) have become an essential and inseparable component in power networks and have achieved major success. Improving network power voltage, helping in peak load conditions and reducing load on power lines and transformers, utilizing renewable energies and reducing environmental pollution constitute some of the reasons for their expansion. In contrast to all these advantages in a given network, the increased presence of distributed generation resources has presented new challenges for power networks. One of the most important problems is the impact on system protection functionality. The traditional protection structure of the networks will be impaired and malfunctioned due to the presence of distributed generation resources. In this paper, a new intelligent linear control algorithm is used to restore the protective coordination. The proposed method modifies the protection characteristic curve of the protection system by adjusting the overcurrent relay current coefficient. This control procedure is in accordance with the widely applied over-current relay curves and complies with the relevant standards. For this purpose, by using a new drop control block and local sampling of over-current relay current, current setting of the relay is recovered to keep the correct operation of protection system. The proposed method is evaluated on two real micro-grids test system in Isfahan province by ETAP software. The findings indicate the ability of this method in coordinating the protection functionality of micro-grids with high penetration coefficient of DGR.

**Keywords:** Current Coefficient, Over Current Relay, Intelligent Control, Protection Coordination.

## روش جدید کنترل تنظیمات حفاظتی ریزشبه با ضریب نفوذ بالای تولیدات پراکنده

هادی بیشه<sup>۱</sup>، مجید معظمی<sup>۲</sup>، بهادر فانی<sup>۳</sup>، غضنفر شاهقلیان<sup>۴</sup>

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

h.bisheh88@sel.iaun.ac.ir

۲- مرکز تحقیقات ریزشبه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

m\_moazzami@pel.iaun.ac.ir, b.fani@pel.iaun.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir

**چکیده:** سال‌های اخیر، منابع تولید پراکنده، با توجه به دستاوردهای فراوانشان، به بخش جدانشدنی و بااهمیت در شبکه‌های قدرت امروزی تبدیل شده‌اند. بهبود تنظیم ولتاژ شبکه، کمک به شرایط اوج مصرف و کاهش بارگذاری خطوط انتقال و ترانسفورماتورهای قدرت، بهره‌مندی از انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش آلاینده‌گی محیط‌زیست از جمله دلایل رشد و توسعه منابع تولید پراکنده‌اند. در مقابل مزیت‌های این منابع برای شبکه، افزایش حضور منابع تولید پراکنده، چالش‌های جدیدی برای شبکه‌های قدرت فراهم کرده است. از مهم‌ترین مشکلات ایجادشده، تأثیر بر عملکرد سیستم حفاظتی شبکه است. ساختار حفاظتی سنتی شبکه‌ها با تأثیر از حضور منابع تولید پراکنده، دچار اختلال می‌شود و عملکرد نادرستی خواهد داشت. در این مقاله با بهره‌گیری از الگوریتم کنترل خطی هوشمند جدید، به بازیابی هماهنگی حفاظتی اقدام شده است. روش پیشنهادی با تنظیم ضریب جریان رله اضافه‌جریان، سبب اصلاح منحنی مشخصه حفاظتی سیستم حفاظتی می‌شود. براساس استراتژی پیشنهادی، کنترل مطابق با منحنی‌های متداول رله‌های اضافه‌جریان است و از استانداردهای مربوط به آنها پیروی می‌کند. برای این منظور، با استفاده از یک بلوک کنترلی افتی جدید و نمونه‌برداری از کمیت جریان رله اضافه‌جریان به صورت محلی با جریان تنظیمی روی رله بازیابی شده، عملکرد سیستم حفاظتی حفظ می‌شود. استراتژی پیشنهادی روی دو ریزشبه واقعی مجزا در منطقه اصفهان، با نرم‌افزار ETAP، تست و ارزیابی شده است. نتایج ارائه‌شده بیان‌کننده توانایی روش پیشنهادی در حفظ هماهنگی حفاظتی در ریزشبه‌های با ضریب نفوذ بالای منابع تولید پراکنده خواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** ضریب جریانی، رله اضافه‌جریان، کنترل هوشمند، هماهنگی حفاظتی

### ۱- مقدمه

گسترش زیادی یافته است. از جمله این مزایا، ایجاد ریزشبه‌ها و همچنین شبکه‌های هوشمند توزیع، کاهش بارگذاری روی خطوط انتقال، کمک به مدیریت بار در شرایط اوج بار شبکه، بهبود پروفایل ولتاژ و همچنین افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌اند [۱] و [۲]. با در نظر گرفتن دستاوردهای فراوان منابع DG برای سیستم قدرت، نصب این منابع در ابعاد، تنوع و ظرفیت‌های گوناگون در شبکه مشاهده می‌شود.

منابع مبتنی بر اینورتر، نظیر توربین‌های باد و به‌ویژه سیستم‌های فتوولتائیک<sup>۲</sup> از جمله منابع تولید پراکنده پرکاربرد

در سال‌های اخیر، جایگاه منابع تولید پراکنده<sup>۱</sup> در سیستم‌های قدرت به دلیل مزایای روزافزون این منابع

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳

نام نویسنده مسئول: غضنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - نجف‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف‌آباد - دانشکده مهندسی برق

این منابع به شمار می‌آید. این مسئله در بسیاری از مراجع در چند سال گذشته، بررسی و راهکارهای گوناگونی برای مقابله با آن پیشنهاد شده است.

در مرجع [۱۳]-[۱۶] با بررسی اثر منابع DG بر حفاظت شبکه توزیع، با مکان‌یابی مناسب برای این منابع به برطرف‌سازی این مشکل اقدام کرده است. در این روش با بهینه‌سازی محل قرارگیری منابع تولید پراکنده، اثر این منابع محدود شده است. با وجود حل مسئله مطرح‌شده در این مقاله، اعمال محدودیت در مکان نصب این منابع ضعف این روش به شمار می‌آید.

مشابه روش یادشده، در مراجع [۱۷]-[۱۹] به بهینه‌سازی توان تولیدی منابع DG اقدام شده است. به عبارت دیگر، با کنترل میزان تولید این منابع در شبکه، هماهنگی حفاظتی بازیابی می‌شود؛ اما باید در نظر داشت مالکین خصوصی منابع تولید پراکنده، علاقه‌مند به دریافت حداکثر سود با توجه به تولید حداکثری منبع DG نصب‌شده‌اند؛ از این رو اعمال محدودیت در توان تولیدشده نسبت به محدودیت مکان نصب‌شده منابع پراکنده به مراتب اثر نامطلوب‌تری خواهد داشت.

به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی در اصلاح هماهنگی تجهیزات حفاظتی، تنها به کنترل منابع DG محدود نبوده و در مراجع [۲۰]-[۲۳] راهکار پیشنهادی روی سیستم حفاظتی شبکه پیاده‌سازی شده است. در این روش با کنترل زمان‌های عملکرد تجهیزات حفاظتی شبکه و به دست آوردن بهینه‌ترین شرایط عملکرد آنها، هماهنگی حفظ می‌شود.

می‌توان گفت با کنترل بهینه زمان‌های عملکرد تجهیزات حفاظتی، عملکرد سیستم حفاظتی بسیار مطلوب خواهد بود؛ اما باید در نظر داشت با توجه به نیاز این روش به داشتن اطلاعات کلیه تجهیزات، در کنار محاسبات سنگین و پیچیده، وابستگی روش مذکور به کمیت‌های زیاد و از تمامی تجهیزات حفاظتی، ضعف این روش به شمار می‌آید.

استفاده از تجهیزات جدید و اصلاح ساختار سیستم حفاظتی شبکه، راهکارهای دیگر مقابله با اثر منابع DG بر حفاظت شبکه‌اند [۵] و [۲۴] و [۲۵]. در مرجع [۲۶] و [۲۷] نصب محدودکننده جریان خطا (FCL) برای مسئله

امروزی به شمار می‌آید [۳]-[۵]. منابع PV با بهره‌گیری از انرژی پاک خورشیدی و قابلیت نصب در ابعاد مختلف با ظرفیت‌های کوچک خانگی تا مزارع خورشیدی وسیع از محبوبیت فراوانی نسبت به سایر منابع از دید مشترکین، سرمایه‌گذاران و همچنین بهره‌بردار شبکه دارد. همچنین با توجه به بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیری همچون نور خورشید، شایان توجه دوست‌داران محیط‌زیست بوده است. در مقابل این منابع، واحدهای تولیدی مبتنی بر ژنراتورهای سنکرون با وجود بهره‌مندی از سوخت‌های فسیلی و نیز با توجه به زمان و هزینه بهره‌برداری مناسب، جایگاه خوبی کسب کرده است [۶] و [۷].

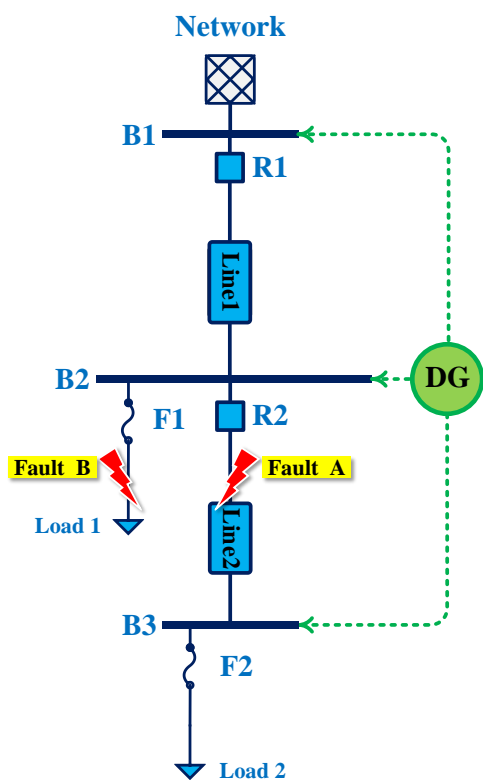
در کنار موارد ذکرشده باید در نظر داشت منابع DG دارای مشکلات متعددی برای شبکه قدرت‌اند؛ برای نمونه، منابع مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر علاوه بر هزینه‌های احداث درخور توجه، وابستگی به مکان نصب و شرایط محیطی و همچنین عدم قطعیت در تولید توان‌اند [۸]. وابستگی به نور خورشید در سیستم‌های PV، بر تولید آن در شرایط جوی تأثیر می‌گذارد.

همچنین، اینورتر منابع فتوولتائیک به‌منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی ناشی از شرایط خطا، توان خروجی آنها را در سطح مشخص و از پیش تعیین شده‌ای محدود کرده است؛ به گونه‌ای که جریان حالت خطای این منابع در حدود دو تا سه برابر جریان نامی خواهد بود [۱] و [۲]. با توجه به مزایای فراوان منابع تجدیدپذیر نظیر سیستم‌های فتوولتائیک برای شبکه قدرت، نصب این منابع در شبکه رو به افزایش است. این امر سبب شده است برخلاف آنچه درباره محدودبودن جریان خطای این منابع تصور می‌شود، نگرانی‌هایی برای نصب منابع PV در رابطه با سیستم حفاظتی به وجود آید.

حضور گسترده منابع پراکنده در شبکه‌های هوشمند، می‌تواند سبب ایجاد اشکال در عملکرد مطلوب سیستم نیز شود. از مهم‌ترین اینها می‌توان به اختلال در عملکرد سیستم حفاظتی شبکه، تغییر در پروفایل جریان و همچنین سطح اتصال کوتاه شبکه یا بروز مشکلات جزیره‌ای شدن اشاره کرد [۹]-[۱۲]. عملکرد نادرست سیستم حفاظتی شبکه در اثر حضور منابع تولید پراکنده، از مهم‌ترین اثرات مخرب

- اصلاح سیستم حفاظتی به صورت محلی و نیازداشتن به سیستم‌های مخابراتی.
  - هزینه پیاده‌سازی کمتر در کنار زمان اجرای کوتاه‌تر.
- ساختار کلی این مقاله بدین شرح است؛ در بخش (۲) ساختار سیستم حفاظتی و اثر حضور منابع تولید پراکنده در آن بررسی شده است. پس از آن، در بخش (۳) الگوریتم پیشنهادی بیان شده است و در بخش (۴) نتایج شبیه‌سازی این روش به‌خوبی نشان‌دهنده موفقیت استراتژی پیشنهادی‌اند. در انتها در بخش (۵)، نتیجه‌گیری کلی این مقاله ارائه شده است.

## ۲- هماهنگی حفاظتی شبکه



شکل (۱): شمای تک‌خطی شبکه توزیع شعاعی نمونه

تجهیزات حفاظتی به کار برده شده در سیستم حفاظتی شبکه‌های توزیع، ادوات تشخیص‌دهنده اضافه‌جریان<sup>۳</sup> در شبکه‌اند. این ادوات شامل فیوز، ریکلوزر و رله اضافه‌جریان است. مطابق شکل (۱) با توجه به کنترل‌پذیری قابلیت تنظیم‌شدن در رله‌ها، از رله‌های OC برای حفاظت فیدر اصلی و از فیوزها برای حفاظت نواحی جانبی استفاده می‌شود. عملکرد تجهیزات حفاظتی براساس میزان جریان

مذکور پیشنهاد شده است. براساس این روش، زمان وقوع اتصالی در شبکه اثر منبع تولید پراکنده بر پروفایل جریان شبکه محدود شده، می‌تواند از اختلال در عملکرد سیستم حفاظتی جلوگیری کند. مشکل این روش در افزایش هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و تعمیرات و همچنین بالارفتن تلفات در شبکه است.

در تمامی مراجع بررسی شده، در ازای حل کردن مسئله حفاظتی در حضور منابع تولید پراکنده، شبکه را با مشکلات جدیدی روبه‌رو کرده است. تعیین ظرفیت و مکان نصب محدود برای منابع پراکنده، اجرای محاسبات پیچیده برای عملکرد مطلوب سیستم حفاظتی در شرایط خطا و همچنین متحمل کردن هزینه‌های نصب و راه‌اندازی تجهیزات حفاظتی جدید برای شبکه، از مهم‌ترین مشکلات در این مراجع به شمار می‌روند.

در این مقاله، روش جدید هماهنگی حفاظتی در ریزشبکه‌های با ضریب نفوذ بالای منابع تولید پراکنده به‌منظور اصلاح کاستی‌های روش‌های قبلی ارائه شده است. این روش از طریق اصلاح سیستم حفاظتی به‌وسیله تنظیم تجهیزات حفاظتی میسر خواهد بود. برای این منظور، از رله‌های اضافه‌جریان متداول و مطابق استانداردهای موجود شبکه استفاده شده است. در این روش با استفاده از یک کنترلر افی، ضریب جریانی رله اضافه‌جریان به صورت خطی کنترل می‌شود. بر اساس این روش، رله‌های شبکه به گونه‌ای زمان عملکرد خود را با شرایط شبکه تطبیق می‌دهند که باوجود حضور منابع تولید پراکنده در آن، عملکرد مطلوبی داشته باشد. جنبه‌های نوآوری استراتژی پیشنهادی در مقایسه با راهکارهای قبلی به صورت زیرند:

- عدم وابستگی استراتژی پیشنهادی به نوع، مکان و ظرفیت نصب‌شده منابع تولید پراکنده در شبکه.

- پاسخ‌گویی مناسب به عدم قطعیت در تولید منابع DG.

- بازیابی هماهنگی براساس اصلاح تنظیم حفاظتی و ایجادنشدن اختلال و تنش در کنترل منابع تولید پراکنده.

- قابلیت عملی بودن و اجرا روی تجهیزات حفاظتی قدیمی و برنامه‌ناپذیر.

استاندارد باید برابر  $K1$  و  $K2$  است. این ضرایب دارای مقادیر مشخصی بوده که در جدول (۱) موجود است.

با توجه به شکل (۱)، در این شبکه روی فیدر اصلی دو رله OC نصب شده است. همچنین در ابتدای هر شاخه جانبی متهی به بارهای شبکه، یک فیوز قرار داده شده است. این چیدمان به صورت متداول و به دلیل اهمیت فیدر اصلی در مقابل فیدرهای جانبی در نظر گرفته شده است. هر تجهیز حفاظتی، موظف به عملکرد صحیح در ناحیه حفاظتی تحت پوشش خود است. همچنین به منظور عملکرد هماهنگ و رعایت اولویت بندی در برطرف سازی شرایط اتصال، هر تجهیز حفاظتی با تجهیز بالادست خود دارای هماهنگی زمانی مشخصی است. در این صورت رله  $RI$  به عنوان حفاظت پشتیبان رله  $R2$  به ازای خطای به وجود آمده مطابق شکل (۱) خواهد بود. همچنین هماهنگی مابین رله‌ها و فیوزها نیز برقرار است. در شکل (۲) منحنی مشخصه حفاظتی رله‌های  $RI$  و  $R2$  و فیوز  $FI$  نمایش داده شده است.

زمانی که مطابق شکل (۱) خطای A در شبکه رخ می‌دهد، رله  $R2$  ناحیه خطادیده را ایزوله می‌کند. پس از آن و در صورت نبود عملکرد موفق آن رله، رله  $RI$  پس از گذشت مدت زمان معین، ناحیه تحت پوشش خود را بی‌برق می‌کند. این مدت زمان مشخص، حاشیه زمانی هماهنگی<sup>۷</sup> نامیده می‌شود. در شکل (۲-الف) مسئله هماهنگی میان دو رله به ازای خطای A به خوبی دیده می‌شود. همچنین هنگامی که خطای B در شبکه اتفاق می‌افتد، با توجه به وقوع خطا در ناحیه حفاظتی فیوز  $FI$ ، این تجهیز بلافاصله فیدر مذکور را بی‌برق می‌کند. در شرایطی که فیوز  $FI$  در قطع مدار ناموفق باشد، رله  $RI$  به عنوان پشتیبان عملیات جداسازی مدار را انجام می‌دهد. در شکل (۲-ب) هماهنگی به ازای خطای B برای رله  $RI$  و فیوز  $FI$  مشاهده می‌شود.

## ۲-۱- اثر منبع تولید پراکنده بر سیستم حفاظتی

### شبکه

یک منبع تولید پراکنده با قرار گرفتن در شبکه توزیع، موجب تغییر در پروفایل جریان می‌شود. با وقوع اتصال و جاری شدن جریان خطا در شبکه، منبع DG نیز جریان خطایی مطابق با تکنولوژی ساخت آن منبع به شبکه و محل

عبوری و فاصله آنها از محل وقوع اتصالی، انتخاب مناسبی برای اولویت بندی مطابق با زمان است. برای این منظور لازم است برای هر دو تجهیز حفاظتی قرار گرفته در کنار یکدیگر، هماهنگی زمانی وجود داشته باشد تا از ایجاد اختلال در عملکرد سیستم حفاظتی جلوگیری شود؛ از این رو برای هر دو تجهیز حفاظتی پشت سر هم، تجهیز حفاظتی قرار گرفته در سمت پایین دست، اصلی<sup>۸</sup> و تجهیز قرار گرفته در در سمت بالادست، حفاظت پشتیبان<sup>۹</sup> در نظر گرفته می‌شود.

هر رله OC دارای یک معادله مشخصه است که طبق استاندارد IEC60255 به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۸].

$$t_R = \frac{K1}{\left[\frac{I_R}{I_{base}}\right]^{K2} - 1} TMS \quad (1)$$

در این رابطه  $t_R$  برابر با زمان عملکرد رله زمان معکوس،  $TMS$  ضریب تنظیم زمانی<sup>۱</sup>،  $I_R$  جریان اتصالی عبوری از رله و  $I_{base}$  جریان از پیش تنظیم شده روی آن رله است. باید در نظر داشت جریان‌های اندازه‌گیری شده مقادیر جریانی است که در سمت ثانویه ترانسفورماتور جریان مربوط به رله مشاهده می‌شود. پس از کاهش جریان عبوری از شبکه قدرت و مطابق با نسبت تبدیل CT، اندازه‌گیری جریان میسر خواهد بود.

جدول (۱): پارامترهای تنظیمی رله اضافه‌جریان براساس نوع

منحنی مطابق با استاندارد IEC60255

Parameters		IEC Curves
$K1$	$K2$	
0.05	0.04	Short time Inverse
0.14	0.02	Normal Inverse
13.5	1	Very Inverse
80	2	Extremely Inverse
120	1	Long time Inverse

ضرایب  $K1$  و  $K2$  پارامترهای ثابتی‌اند که با آنها شیب منحنی مشخصه حفاظتی رله مشخص می‌شود. همان‌گونه که در بالا به آن اشاره شد منحنی مشخصه رله‌های زمان معکوس مطابق با استاندارد، طراحی و بهره‌برداری می‌شود. در رابطه (۱) دو پارامتر در نظر گرفته شده براساس

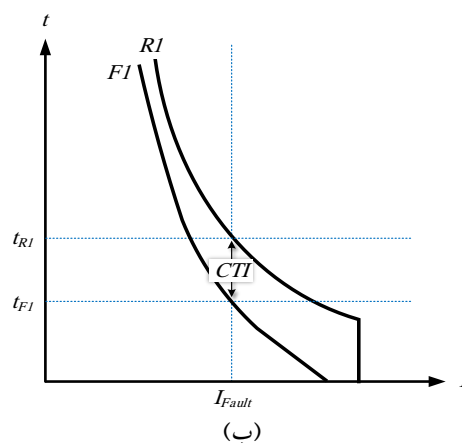
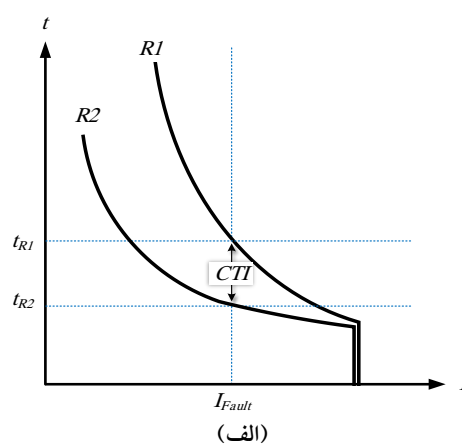
تولیدی منابع DG به توان دریافتی بارهای شبکه است  
 $(PL\%) = \left[ \frac{\sum P_{DG}}{\sum P_{Load}} \right] \times 100$  (۳) و (۴). زمانی  
 که منابع PV دارای ضریب نفوذ کمی در شبکه اند، افزایش  
 دو تا سه برابری جریان حالت خطای آنها تأثیر ناچیزی بر  
 جریان عبوری از تجهیزات خواهد داشت؛ اما با افزایش  
 ضریب نفوذ آنها دو مسئله اهمیت دارد؛ نخست، با وجود  
 کمتری بودن افزایش جریان آنها در مقایسه با ماشین‌های  
 سنکرون، در ضریب‌نفوذهای بالا این مقدار درخور توجه  
 است و می‌تواند بر سیستم حفاظتی شبکه اثرگذار باشد.  
 دوم، به سبب اینکه تولید منابع PV وابسته به نور خورشید  
 است و از پایداری مناسبی در تولید توان برخوردار نیست،  
 ضریب نفوذشان بسیار متغیر خواهد بود [۲۹].

به عبارت دیگر، وابسته‌نبودن روش پیشنهادی به منابع  
 DG، ازجمله مزایای این روش در پاسخ‌گویی مناسب به  
 مسئله عدم قطعیت منابع تولید پراکنده به شمار می‌آید. به  
 عبارت دیگر، چنانچه اصلاح تنظیمات برای یک سطح از  
 حضور منابع DG یا تعداد مشخصی از آنها انجام شود، با  
 تغییرات توان خروجی منابع، این تنظیمات بی‌اثر و  
 خودبه‌خود نقض می‌شود. به عبارت دیگر، اگر منابع تولید  
 پراکنده از نوع سیستم‌های فتوولتائیک در نظر گرفته شوند،  
 در ساعاتی از شبانه‌روز که تولید منابع به صفر می‌رسد،  
 تنظیمات انجام‌شده براساس حضور منابع با ضریب نفوذ  
 مشخص، بی‌استفاده می‌شود و نمی‌تواند تضمین‌کننده  
 هماهنگی حفاظتی باشد. برای روشن‌تر شدن موضوع، به  
 بررسی دقیق‌تر اثر حضور منابع بر جریان‌های تجهیزات  
 حفاظتی شبکه نیاز است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

در شبکه شکل (۱) هنگامی که منبع تولید پراکنده در  
 شبکه قرار داشته باشد، در سه ناحیه می‌تواند با شبکه پارالل  
 شود. این سه مکان با سبارهای B1، B2 و B3 است. در  
 ادامه این سه حالت بررسی می‌شود.

با قرارگیری منبع DG در باسبار B1 به‌ازای خطای  
 رخ داده در نقطه A، بخشی از جریان خطا با این منبع تأمین  
 می‌شود. امپدانس کوچک‌تر میان منبع DG و خطای نقطه A  
 نسبت به امپدانس بین شبکه قدرت بالادست و خطای  
 مذکور، سبب تأمین جریان با منبع تولید پراکنده در شرایط  
 وقوع اتصالی است. در رابطه (۲) چگونگی این تأثیر  
 مشخص می‌شود.

وقوع خطا تزریق می‌کند. این پدیده سبب شده است در  
 مسیر بین محل وقوع اتصالی و مکان قرارگیری منبع DG  
 جریان نسبت به شرایط حضورنداشتن منبع تولید پراکنده  
 افزایش یابد؛ اما در سایر بخش‌های فیدر جریان عبوری از  
 شبکه بالادست کاهش یابد.



شکل (۲): منحنی مشخصه حفاظتی، (الف): رله R1 و R2 و (ب): رله R1 و F1

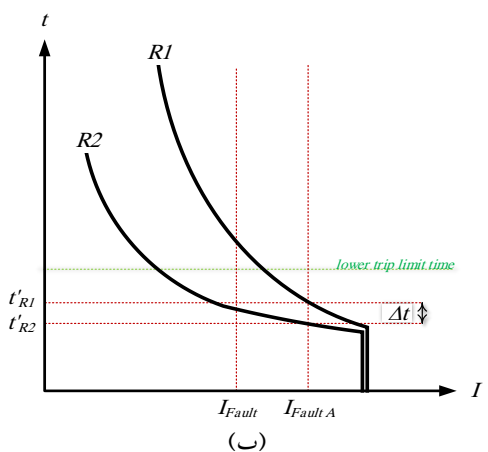
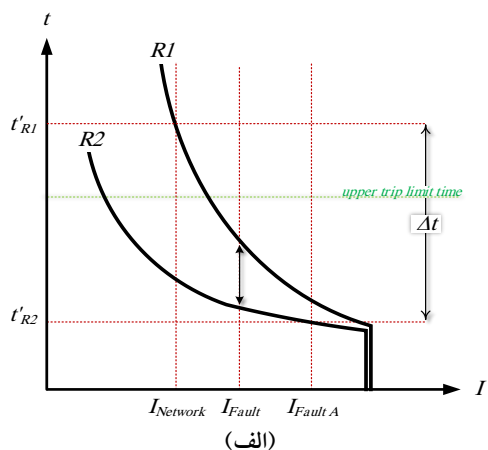
منابع تولید پراکنده براساس مکان، نوع و ظرفیت  
 نصب‌شده در یک شبکه، سبب ایجاد تغییر در پروفایل  
 جریانی شبکه می‌شوند. هر سه مورد مطرح‌شده به‌نوبه‌خود  
 مهم است و بر عملکرد سیستم حفاظتی اثر می‌گذارد؛ اما  
 میزان تولید این منابع و توان انتقالی به سمت شبکه و  
 بارهای آن بیشتر شایان توجه قرار می‌گیرد.

ضریب نفوذ<sup>۱</sup> منابع تولید پراکنده، عدم قطعیت این منابع  
 در نظر گرفته می‌شود. این مشارکت در پاسخ‌گویی به  
 تقاضای بار، ضریب نفوذ منابع DG نام دارد. ضریب نفوذ  
 منابع تولید پراکنده براساس تعریف، برابر نسبت توان

محاسبه می‌شود؛ اما جریان کاهش‌یافته رله  $RI$  از رابطه (۳) تعیین می‌شود.

$$I_{Network} = I_{Fault} - \frac{Z_{B2, Fault A}}{Z_{Net, Fault A}} I_{DG} \quad (۳)$$

که در این رابطه  $I_{Network}$  جریان خطای عبوری از رله  $RI$  و  $Z_{B2, Fault A}$  امپدانس مابین منبع  $DG$  و نقطه خطا است. براساس روابط (۲) و (۳)، اثر منبع تولید پراکنده در مکان مشخص شده مشاهده می‌شود. با توجه به معادله مشخصه زمان معکوس رابطه (۱)، با افزایش جریان عبوری از رله  $R2$ ، زمان عملکرد آن، کاهش و با کاهش جریان عبوری از رله  $RI$ ، زمان عملکرد آن افزایش می‌یابد؛ بنابراین حاشیه زمانی مابین زمان‌های عملکرد دو رله افزایش می‌یابد.



شکل (۳): هماهنگی حفاظتی مابین رله‌های  $R1$  و  $R2$

(الف): نصب منبع  $DG$  در باسبار  $B1$  و (ب): نصب منبع  $DG$  در باسبار  $B2$

$$I_{Fault A} = I_{Fault} + \frac{Z_{Net, B1}}{Z_{Net, Fault A}} I_{DG} \quad (۲)$$

که در این رابطه  $I_{Fault A}$  جریان تزریقی به محل وقوع خطا،  $I_{Fault}$  جریان خطای تأمین‌شده شبکه بالادست در زمان حضورنداشتن منبع  $DG$  (این جریان متناسب با سطح اتصال کوتاه شبکه اصلی تعیین می‌شود)،  $Z_{Net, B1}$  امپدانس معادل دیده‌شده از شبکه بالادست تا محل نصب منبع پراکنده،  $Z_{Net, Fault A}$  کل امپدانس معادل تا نقطه خطا و  $I_{DG}$  جریان خطای منبع تولید پراکنده است. براساس رابطه (۲) تأثیر حضور منبع  $DG$  در شبکه و در موقعیت باسبار  $B1$  بر جریان خطای عبوری از تجهیزات شبکه مشاهده می‌شود. بر اساس این، جریان عبوری از رله‌های  $R1$  و  $R2$  افزایش می‌یابد. طبق رابطه (۱) با افزایش جریان عبوری از رله‌ها، زمان عملکرد آنها کاهش می‌یابد و سریع‌تر خطا برطرف می‌شود. در ابتدا شاید اینگونه برداشت شود که هرچه سریع‌تر عملیات پاک‌سازی خطای صورت‌پذیر وضعیت شبکه پایدارتر خواهد بود؛ اما باید در نظر داشت کاهش زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی که عملکرد آن باید با سایر تجهیزات حفاظتی شبکه هماهنگ باشد، در محدوده عملکرد مناسب قرار دارد یا خارج از این ناحیه است. به عبارت دیگر، تنها در نظر گرفتن زمان عملکرد یک تجهیز حفاظتی کفایت نمی‌کند؛ بلکه نیاز است زمان‌های عملکرد تجهیزات حفاظتی قرارگرفته در مجاورت یکدیگر باهم مقایسه شود.

برای اتصال کوتاه نقطه  $B$  با توجه به حضور منبع  $DG$  در موقعیت مذکور، دقیقاً مشابه حالت بررسی‌شده در پاراگراف قبل است؛ به این دلیل که جریان اتصال عبوری از رله  $RI$  و فیوز  $FI$ ، در اثر حضور منبع پراکنده افزایش یافته است. براساس مشخصه حفاظتی نمایش داده شده در شکل (۲-ب)، زمان‌های عملکرد هر دو تجهیز کاهش خواهد یافت. اما زمانی که منبع  $DG$  در باسبار  $B2$  قرار داشته باشد، مسئله کمی متفاوت از حالت قبل می‌شود. در شرایط اتصال کوتاه رخ داده شده در نقطه  $A$ ، جریان عبوری از رله  $R2$  که در مسیر مابین منبع  $DG$  و نقطه خطا است، افزایش می‌یابد. این درحالی است که جریان عبوری از رله  $RI$  کاهش یافته است که فقط از شبکه بالادست تأمین می‌شود؛ بنابراین در این حالت، جریان‌های عبوری از دو رله با یکدیگر برابر نیست. جریان افزایش‌یافته رله  $R2$  براساس رابطه (۲)

بر عملکرد سیستم حفاظتی این شبکه تأثیر بگذارد. در شبکه نمونه شکل (۱)، با قرارگیری منبع DG در باسبارهای B1 و B2 می‌تواند موجب تغییر در عملکرد سیستم حفاظتی بشود. در باسبار B1 نصب منبع پراکنده سبب کاهش در زمان عملکرد رله‌های  $R1$  و  $R2$  می‌شود. برای باسبار B2 حضور منبع DG با افزایش زمان عملکرد رله پشتیبان و همچنین حاشیه هماهنگی میان دو رله همراه می‌شود.

تغییرات به وجود آمده بر سیستم حفاظتی در شرایط قرارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه، علاوه بر مکان نصب منابع، می‌تواند متأثر از میزان مشارکت در تأمین دیماند آن شبکه با منابع DG نیز باشد. با توجه به روابط (۲) و (۳)، جریان تزریقی منابع DG در شرایط وقوع خطا عامل تأثیرگذار دیگری بر جریان عبوری از رله‌های  $R1$  و  $R2$  است.

در شرایطی که توان تولیدی و ظرفیت نصب شده منابع DG یا به بیان دیگر، میزان مشارکت در تأمین بارهای شبکه افزایش می‌یابد، متناسب با آن، جریان حالت خطای منابع بیشتر می‌شود؛ بنابراین با افزایش یافتن تولید منابع DG در شبکه، تغییرات ایجاد شده بر جریان‌های رله‌ها، افزایش و اختلال به وجود آمده بر سیستم حفاظتی شبکه افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که به آن اشاره شد زمانی که در شبکه منبع تولید پراکنده نصب شده باشد، رفتار جریان‌های رله‌های شبکه مطابق شکل (۳) خواهد بود. در روش پیشنهادی با ارائه استراتژی جدید، به اصلاح منحنی مشخصه حفاظتی رله پشتیبان اقدام می‌شود. به عبارت دیگر، تجهیز حفاظتی قرار گرفته در پایین دست شبکه که حفاظت اصلی در نظر گرفته می‌شود، بدون تغییر و براساس تنظیم اولیه خود در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور، در ابتدا یک محدوده زمانی برای عملکرد مجاز رله پشتیبان لحاظ می‌شود. نواحی در نظر گرفته شده در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. به بیان دیگر، عملکردهای درون محدوده‌های زمانی بین حد بالایی<sup>۹</sup> و حد پایینی<sup>۱۰</sup> و برای رله  $R1$  مجاز بوده است که در محدوده هماهنگی حفاظتی قرار دارد و در نتیجه، زمان‌های بالاتر از حد  $t_{UTL}$  و پایین‌تر از  $t_{LTL}$ ، در محدوده ناهماهنگی قرار دارند.

در شکل (۳)، اثر حضور منبع DG بر هماهنگی حفاظتی مابین رله‌های  $R1$  و  $R2$  به‌ازای قرارگیری منبع DG در باسبارهای B1 و B2 مشاهده می‌شود. مطابق شکل (۳-الف) با نصب منبع DG در باسبار B1 حاشیه زمانی میان دو رله کاهش می‌یابد. اگرچه زمان عملکرد هر رله به‌صورت مجزا کاهش یافته و سریع‌تر خطای ایجاد شده برطرف شده است، به دلیل کاهش حاشیه زمانی بین دو رله، احتمال اختلال در عملکرد آنها به‌شدت افزایش می‌یابد؛ تا جایی که ممکن است رله پشتیبان ( $R1$ ) پیش از عملکرد رله اصلی ( $R2$ ) فیدر را بی‌برق کند و سبب ایجاد ناهماهنگی حفاظتی بشود. همچنین طبق شکل (۳-ب)، زمانی که منبع DG در موقعیت باسبار B2 قرار گرفته باشد، حاشیه هماهنگی میان دو رله افزایش می‌یابد. با وجود اینکه افزایش در زمان عملکرد رله  $R1$  و همچنین حاشیه هماهنگی میان دو رله به عملکرد مطمئن‌تر و ایمن‌تر در سیستم حفاظتی منجر می‌شود، با فراتر رفتن این زمان عملکرد از محدوده مجاز با توجه به ظرفیت حرارتی و تحمل جریان اتصال کوتاه برای تجهیزات در معرض این جریان، عملکرد سیستم حفاظتی دچار اختلال می‌شود.

وضعیت خطای رخ داده در نقطه B نیز برای حضور منبع DG در باسبار B2 برای هماهنگی میان رله  $R1$  و فیوز  $F1$ ، مشابه هماهنگی دو رله است؛ اگرچه مطابق شکل (۲-ب)، با توجه به شیب تند منحنی فیوز، شرایط بهتری وجود خواهد داشت.

هنگامی که منبع DG در باسبار B3 به شبکه متصل شود، به دلیل اینکه محل قرارگیری آن پس از نقطه وقوع خطا است، تزریق جریان آن منبع به سمت نقطه خطا، اثری بر جریان‌های عبوری از رله‌های  $R1$  و  $R2$  قرار گرفته در پیش از نقطه خطا نخواهد داشت. این مسئله به‌علت وجود اتصالی و وقوع ولتاژ نزدیک به صفر در نقطه اتصالی است؛ از این رو در وضعیت نصب منبع DG در باسبار B3 سیستم حفاظتی بدون اختلال در عملکرد خود، رفتار صحیحی خواهد داشت.

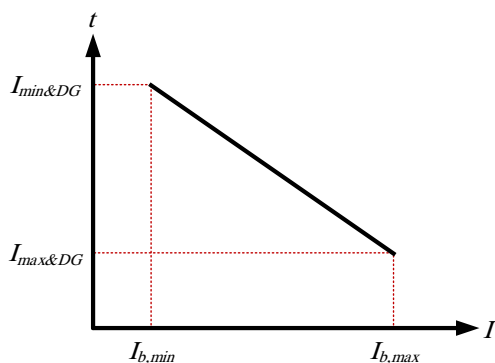
### ۳- الگوریتم پیشنهادی

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد حضور منبع تولید پراکنده براساس مکان‌های نصب مختلف در شبکه می‌تواند

که در این رابطه، پارامترهای  $I_{b,max}$ ،  $I_{b,min}$  و  $\Delta I_R$  و  $\Delta I_b$  به صورت زیر تعریف می شوند.

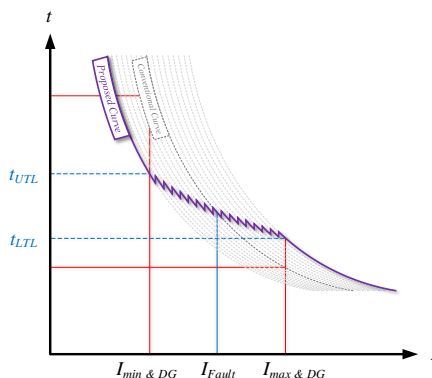
$$\begin{aligned} I_{b,min} &= I_{min,DG} / \sqrt{K \left[ 1 + \left[ \frac{K \times TMS}{t_{UTL}} \right] \right]} \\ I_{b,max} &= I_{max,DG} / \sqrt{K \left[ 1 + \left[ \frac{K \times TMS}{t_{LTL}} \right] \right]} \quad (5) \\ \Delta I_b &= I_{b,max} - I_{b,min} \\ \Delta I_R &= I_{max,DG} - I_{min,DG} \end{aligned}$$

در تنظیم ضریب جریانی رله، یک نکته بسیار مهم وجود دارد. در عمل برای رله های واقعی، هر عددی قابلیت تنظیم شدن بر رله را ندارد. در واقع مقادیر این ضریب به صورت گسسته یا پلکانی تغییر می کند نه به صورت پیوسته؛ از این رو با توجه به شکل (۴)، منحنی مذکور در بازه تنظیم شده به صورت دندانهای ویرایش می شود. مطابق رابطه (۴)، با کنترل جریان  $I_{base}$  رله پشتیبان، زمان عملکرد این رله در بازه هماهنگی قرار خواهد گرفت. در شکل (۶) چگونگی پیاده سازی استراتژی کنترلی پیشنهادی مشاهده می شود. همان گونه که ملاحظه می شود ضریب جریانی رله بر اساس یک کنترلر اف پی اصلاح می شود.



شکل (۵): مشخصه کنترل خطی جریان تنظیمی رله

اصلاح تطبیقی ضریب جریانی رله با توجه به تغییرات جریان عبوری از رله که به صورت محلی انجام می شود، برای هر مکان نصب و ضریب نفوذی از منابع تولید پراکنده صدق می کند. این در حالی است که اگر در روش پیشنهادی ضریب  $I_{base}$  به صورت آفلاین اصلاح می شد، تنظیمات صورت گرفته تنها برای شرایط خاصی از قرارگیری منابع در DG در شبکه متناسب با مکان نصب و ظرفیت تولیدی آنها برقرار بود و در سایر شرایط به اصلاح مجدد نیاز است.



شکل (۴): منحنی مشخصه پیشنهادی هوشمند رله اضافه جریان

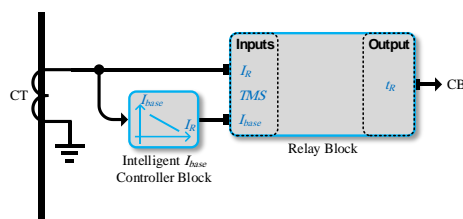
در روش پیشنهادی با کنترل کردن پارامترهای تنظیمی رله پشتیبان، با توجه به شرایط حضور منابع در شبکه، به بازایی حفاظتی اقدام می شود. این کار به صورت تطبیقی انجام می شود. بر اساس معادله مشخصه رله در رابطه (۱)، ملاحظه می شود این معادله از پارامترهای مختلفی تشکیل شده است. در روش پیشنهادی این مقاله، کنترل روی ضریب جریانی  $I_{base}$  انجام شده است و سایر ضرایب بدون تغییر و بر اساس فرض اولیه شبکه طراحی شده در نظر گرفته شده اند.

برای این منظور با یک مشخصه کاهش (افتی) بین جریان عبوری از رله ( $I_R$ ) و ضریب جریانی  $I_{base}$  مقدار مدنظر برای این ضریب به دست می آید که بر اساس آن زمان عملکرد رله در بازه هماهنگی قرار می گیرد. با چنین فرضی، منحنی مشخصه پیشنهادی رله پشتیبان مطابق شکل (۴) است. همان گونه که ملاحظه می شود چنانچه رله در بازه جریانی  $I_{min&DG}$  و  $I_{max&DG}$  و محدوده مجاز عملکرد  $t_{UTL}$  و  $t_{LTL}$  عملکرد داشته باشد، هماهنگی به ازای شرایط حضور منابع تولید پراکنده حفظ شده است.

به منظور چنین عملکردی برای رله پشتیبان، یک مشخصه افتی به صورت شکل (۵) در نظر گرفته می شود. به ازای حداقل جریان عبوری از رله یعنی  $I_{min&DG}$  ضریب جریانی روی  $I_{b,min}$  و همچنین به ازای بیشینه جریان عبوری از رله یعنی  $I_{max&DG}$  ضریب جریانی روی  $I_{b,max}$  تنظیم می شود. بر اساس این، یک معادله مشخصه به صورت زیر برای ضریب جریانی رله منظور می شود.

$$\begin{aligned} I_{base} &= \frac{1}{\Delta I_R} [\Delta I_b \times I_R] \\ &+ \frac{1}{\Delta I_R} [I_{b,min} \times I_{max,DG} - I_{b,max} \times I_{min,DG}] \quad (6) \end{aligned}$$

متناسب با نحوه حضور منابع تولید پراکنده در شبکه بدون نیاز به بستر مخابراتی برای اصلاح تنظیمات حفاظتی، منحنی مشخصه رله را در ناحیه مناسب برای بازیابی هماهنگی باقی ننگ می‌دارد.



شکل (۶): پیاده‌سازی کنترل‌کننده ضریب جریان رله اضافه‌جریان

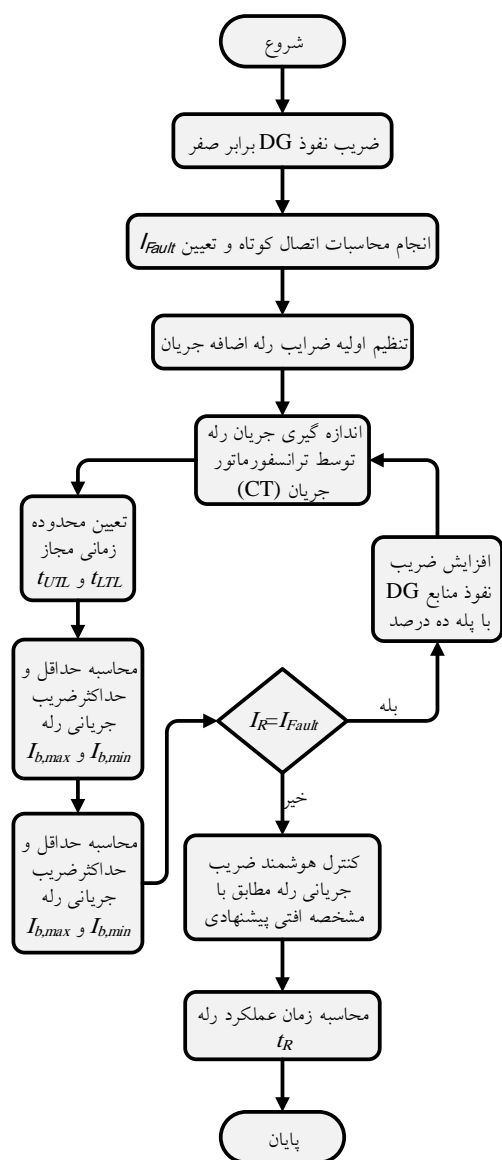
به عبارت دیگر، هر تغییری در حضور منابع DG در شبکه براساس روابط (۲) و (۳)، موجب جابه‌جایی اندازه جریان عبوری از رله روی منحنی مشخصه آن رله، نسبت به مقادیر تنظیمی اولیه خود می‌شود؛ از این رو با کنترل ضریب جریانی رله براساس جریان عبوری از آن، به صورت آنلاین اثر حضور منابع تولید پراکنده بر سیستم حفاظتی شبکه تعیین شده، زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی شبکه در محدوده مجاز باقی می‌ماند.

### ۳-۱- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم کنترل ضریب جریانی رله پیشنهادی، مطابق فلوجارت شکل (۷) اجرا می‌شود. براساس این شکل، در ابتدا با استفاده از محاسبات اتصال کوتاه در شبکه جریان خطای عبوری از رله یعنی  $I_{Fault}$  در شرایط حضور نداشتن منابع DG در شبکه محاسبه می‌شود. در ادامه با افزایش ضریب نفوذ این منابع، با تعیین حداقل و حداکثر ضریب جریانی مجاز برای رله، پارامترهای مشخصه خطی تنظیم می‌شوند.

با نمونه‌گیری از جریان رله در بلوک کنترلی آنلاین اصلاح ضریب جریانی رله، ضریب  $I_{base}$  رله، اصلاح روی رله تنظیم می‌شود؛ بنابراین با به‌کارگیری استراتژی پیشنهادی، به صورت آنلاین براساس نوع قرارگیری و همچنین میزان ضریب نفوذ منابع DG در شبکه، هماهنگی حفاظتی بازیابی می‌شود.

به سبب اینکه مطالعات مربوط به شرایط وقوع اتصال کوتاه در شبکه بوده و نیاز به پاک‌سازی آن در حداقل زمان ممکن است، مطابق روش پیشنهادی بدون نیاز به انجام محاسبات سنگین و زمان‌بر، تنها با کنترل یک پارامتر از رله اضافه‌جریان، هماهنگی حفاظتی شبکه بازیابی می‌شود. کنترل پارامتر  $I_{base}$  رله براساس جریان عبوری روی رله



شکل (۷): فلوجارت الگوریتم کنترل  $I_{base}$

### ۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، از نرم‌افزار ETAP برای شبیه‌سازی استفاده شده است. در این بخش در دو شبکه متفاوت، راهکار پیشنهادی، بررسی و نتایج برای هر شبکه ارائه شده‌اند. نتایج بیان‌کننده موفقیت استراتژی پیشنهادی در این مقاله در هر دو شبکه است.

## ۴-۱- ریزشیکه اول

جدول (۲): مشخصات شبکه مطالعه شده

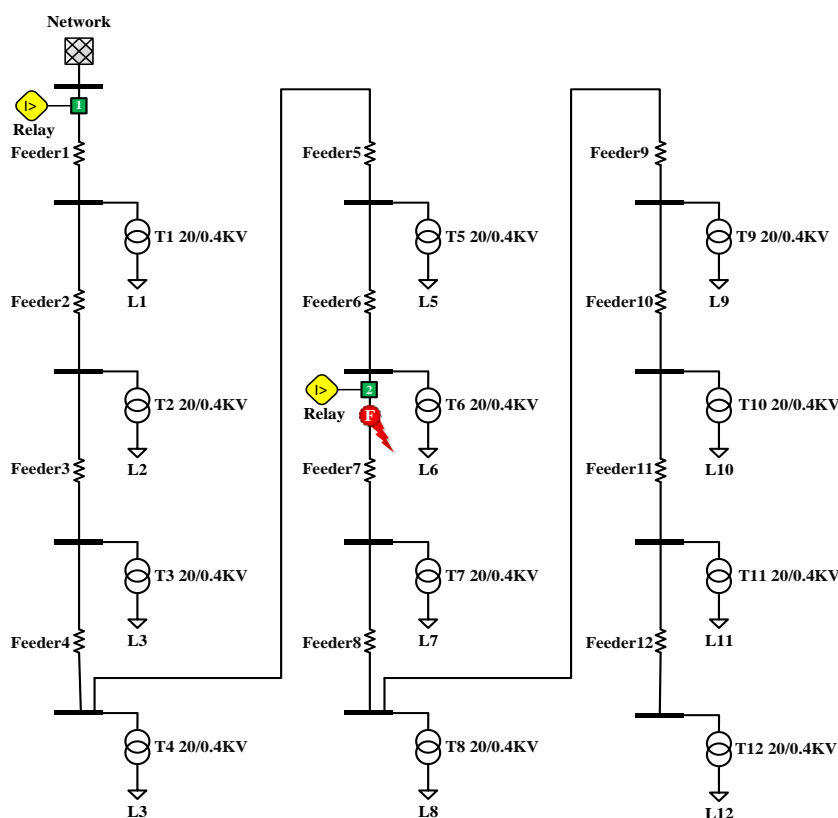
short-circuit power of the main substation		450 MVA
Conductor	feeder length	2 Km
	Type	Pirelli-AACSR/AC
	Size	120 mm <sup>2</sup>
	Line shape	Horizontal Headway type not transposed
Load	Legs altitude	9 m
	Total Demand	1100 KW
	Transformer	20/0.4 KV 1250 KVA DYg

در این بخش از یک شبکه، تست نمونه برای اجرای الگوریتم پیشنهادی با مشخصات مطابق جدول (۲) استفاده شده است. این شبکه دارای سطوح ولتاژی ۲۰ و ۰/۴ کیلوولت است. بارهای شبکه در شاخه‌های جانبی و از طریق ترانسفورماتور با شبکه پارالل شده‌اند.

در شبکه شکل (۸)، شمای کلی فیدر مطالعه شده در شرایط قرارگیری منابع تولید پراکنده نمایش داده شده است. تجهیزات حفاظتی شبکه شامل رله‌های  $R1$  و  $R2$  از نوع

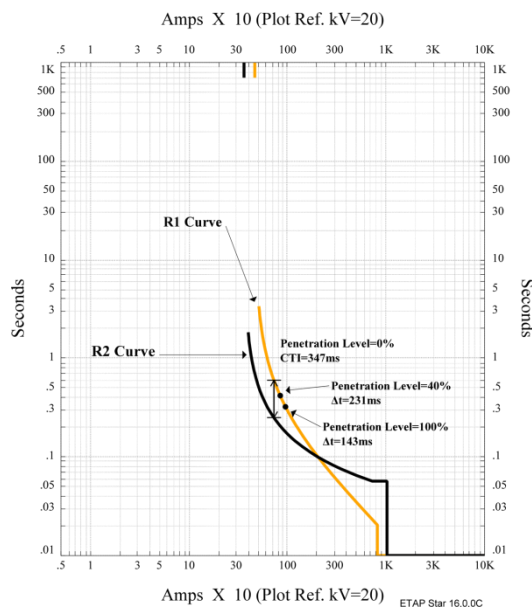
اضافه جریان زمان معکوس هستند. بر اساس این، مشخصات رله‌های حفاظتی مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه، رفتار رله‌های شبکه به عنوان حفاظت‌های اصلی و پشتیبان بررسی می‌شود.

اساس عملکرد هر تجهیز حفاظتی، برطرف کردن خطاهای به وجود آمده در زون حفاظتی خود با حداقل تأخیر زمانی ممکن است. همچنین رله‌ها با تجهیز پایین دست خود هماهنگ عمل کرده و علاوه بر حفاظت اصلی در زون خود حفاظت پشتیبان شاخه جانبی خود نیز است. بر اساس طراحی سیستم حفاظتی متداول در شبکه‌های توزیع، حاشیه زمانی اولیه (مناسب‌ترین مقدار برای هماهنگی که با توجه به ساختار شبکه لحاظ می‌شود)، میان هر دو تجهیز برابر ۳۵۰ میلی‌ثانیه لحاظ می‌شود. به علاوه، حداقل حاشیه زمانی عملکرد مجاز بین دو تجهیز حفاظتی زمان حداقلی ۲۵۰ میلی‌ثانیه است. این زمان به منظور اختلال نداشتن در عملکرد تجهیزات و اطمینان از عملکرد سیستم حفاظتی است. همچنین حداکثر زمان برطرف سازی جریان خطا از تجهیزات شبکه ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه و بر اساس منحنی حرارتی هادی‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۸): دیاگرام تک خطی شبکه مطالعه شده

در ابتدا فرض می‌شود منبع تولید پراکنده در بخشی از فیدر شبکه نصب شده باشد که مابین دو رله قرار دارد. با نصب این منبع بر فیدر شبکه شکل (۸)، به‌ازای شرایط وقوع خطایی مطابق شکل مذکور در شبکه، جریان‌های عبوری از رله  $R1$ ، کاهش و جریان رله  $R2$  افزایش می‌یابد. این مسئله به افزایش زمان عملکرد رله پشتیبان و همچنین کاهش زمان عملکرد رله اصلی منجر خواهد شد.



شکل (۱۰): منحنی‌های حفاظتی رله  $R1$  و  $R2$  در شرایط

حضور منبع تولید پراکنده در بالادست رله  $R1$

در ضریب نفوذ ده درصدی این منبع، زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان به‌ترتیب برابر با ۲۳۸ و ۶۵۱ میلی‌ثانیه است. به عبارت دیگر، رله  $R1$  با تأخیر بیشتری نسبت به قبل خطا را برطرف می‌کند. این مسئله در این شرایط به عملکرد مطلوب‌تر سیستم حفاظتی کمک خواهد کرد؛ اما به همین جا ختم نمی‌شود. با افزایش ضریب نفوذ منبع تولید پراکنده، زمان عملکرد رله پشتیبان ( $R1$ ) باز افزایش می‌یابد تا در ضریب نفوذ ۵۰ درصد، این زمان به ۱۰۳۸ میلی‌ثانیه می‌رسد. در این شرایط عملکرد رله پشتیبان از خارج از محدوده هماهنگی است ( $t_{RI} > t_{UTL}$ ).

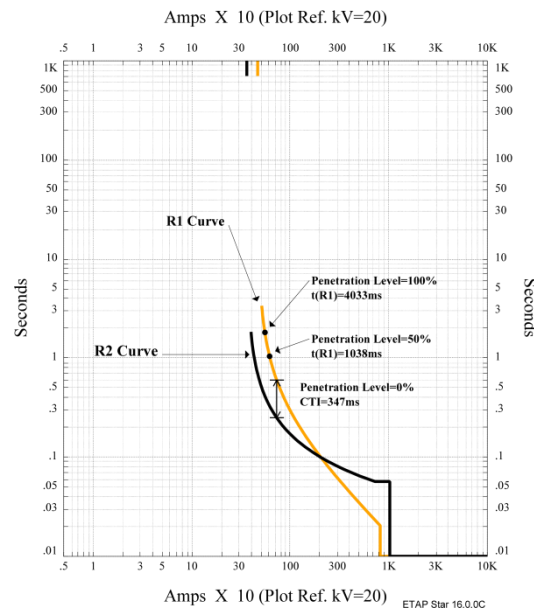
در ادامه با افزایش ضریب نفوذ تا میزان ۱۰۰ درصد، این زمان عملکرد به مقدار ۴۰۳۳ خواهد رسید. در شکل (۹) منحنی مشخصه حفاظتی در دستگاه زمان برحسب جریان دو رله مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در

جدول (۳): مشخصات فنی رله‌های شبکه مطالعه‌شده

Device	Type	Curve Type	TMS (sec)	$I_{base}(\%)$
R1	SIEMENS-7SJ601	Very Inverse	۰/۰۲۵	۱/۱۶۵
R2	SIEMENS-7SJ601	Normal Inverse	۰/۰۲۵	۰/۹۰۷

در شبکه شکل (۸)، زمانی که خطایی مطابق شکل در شبکه رخ می‌دهد، جریان خطای یکسانی از دو رله عبور می‌کند که برابر با ۰/۷۳۰ کیلو آمپر است. به‌ازای این جریان، براساس مشخصات اولیه رله‌ها - که در جدول (۳) ارائه شده است - زمان عملکرد رله‌های  $R1$  و  $R2$  به‌ترتیب برابر با ۵۹۶ و ۲۴۹ میلی‌ثانیه است. پارامترهای اتخاذشده در جدول (۳) براساس مشخصات فنی واقعی رله‌های موجود در شبکه مذکور صورت گرفته‌اند. در این شرایط حاشیه هماهنگی اولیه میان دو رله برابر ۳۴۷ میلی‌ثانیه خواهد بود. ملاحظه می‌شود در شرایط حضورناستن منابع تولید پراکنده در شبکه، هماهنگی حفاظتی به‌خوبی میان دو رله اصلی و پشتیبان به‌ازای وقوع خطا در نقطه F برقرار است. در ادامه، شرایط حضور منابع در شبکه مذکور بررسی می‌شوند. برای این منظور، دو حالت بررسی شده‌اند.

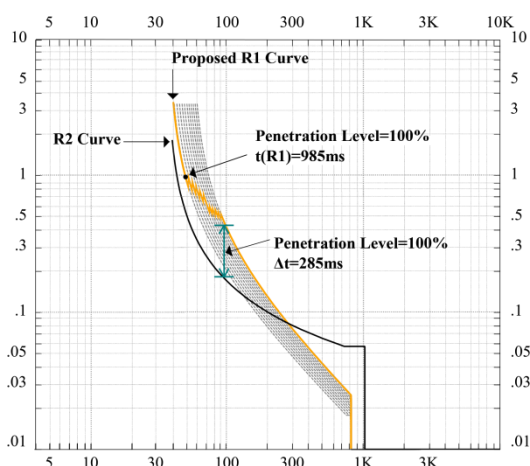
#### ۴-۱-۱- وجود DG مابین دو رله $R1$ و $R2$



شکل (۹): منحنی‌های حفاظتی رله  $R1$  و  $R2$  در شرایط حضور

منبع تولید پراکنده در مابین دو رله

ضریب جریانی رله پشتیبان ( $I_{base}$ ) مطابق مشخصه افتی پیشنهادی، به بازیابی هماهنگی حفاظتی اقدام شد. برای این منظور، در شکل (۱۱) مشخصه پیشنهادی رله  $RI$  ارائه شده است. براساس این شکل، در شرایط قرارگیری مختلف منابع تولید پراکنده بر فیدر شبکه و با ضرایب نفوذ متفاوت به خوبی هماهنگی حفاظتی حفظ شده است.



شکل (۱۱): اصلاح هوشمند منحنی مشخصه پیشنهادی رله پشتیبان در شرایط مختلف حضور منبع DG در شبکه

در جدول (۴)، اثر حضور منابع تولید پراکنده بر عملکرد رله‌های  $RI$  و  $R2$  شبکه به‌ازای ضرایب نفوذ مختلف آورده شده است. به‌علاوه پس از اعمال استراتژی پیشنهادی، اثر این روش بر زمان عملکرد رله پشتیبان به‌ازای قرارگیری منبع تولید پراکنده مابین دو رله و همچنین اثر این روش بر حاشیه زمانی مابین دو رله در زمان قرارگیری منبع تولید پراکنده در بالادست حفاظت پشتیبان به‌خوبی ملاحظه می‌شود.

براساس جدول (۴) به‌خوبی مشاهده می‌شود پس از اعمال روش کنترلی جدید ارائه شده در این مقاله، در تمام ضریب نفوذها و همچنین در مکان‌های مختلف قرارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه، هماهنگی حفاظتی حفظ می‌شود.

این شکل مشاهده می‌شود در زمان حضورنداشتن منبع تولید پراکنده، حاشیه هماهنگی به‌خوبی برقرار است و رله‌ها مطابق با طراحی سنتی و متداول سیستم حفاظتی شبکه، خطای به‌وجودآمده را به‌خوبی و با هماهنگی مطلوب با یکدیگر برطرف می‌کند؛ اما چنانچه منبع تولید پراکنده در مابین دو رله قرار گیرد، هماهنگی ازدست‌رفته و سیستم حفاظتی و همچنین تجهیزات شبکه دچار آسیب‌دیدگی خواهند شد.

#### ۴-۱-۲- وجود DG در بالادست رله $RI$

در این حالت، زمانی که منبع تولید پراکنده در بالادست رله  $RI$  در شبکه شکل (۸) در نظر گرفته شود، در شرایط وقوع خطا مطابق این شکل، جریان‌های عبوری از هر دو رله اصلی و پشتیبان به یک اندازه افزایش می‌یابد. این مسئله موجب افزایش جریان‌های عبوری از رله‌های حفاظتی شبکه می‌شود. با افزایش ضریب نفوذ منبع در شبکه، به‌ازای حضور ده درصدی منبع، زمان عملکرد رله‌های  $RI$  و  $R2$  به‌ترتیب برابر ۵۴۹ و ۲۳۸ میلی‌ثانیه بوده است و بنابراین حاشیه زمانی مابین آنها برابر ۳۱۱ میلی‌ثانیه می‌شود. مشاهده می‌شود حاشیه زمانی بین دو رله نسبت به حاشیه هماهنگی اولیه خود کمتر شده است.

به‌ازای حضور منبع تولید پراکنده در ضریب نفوذ ۴۰ درصد در این شرایط، حاشیه زمانی بین دو رله به اندازه ۲۳۱ میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد که از حداقل حاشیه هماهنگی مجاز (۲۵۰ میلی‌ثانیه)، کمتر و در نتیجه، هماهنگی حفاظتی ازدست‌رفته تلقی می‌شود. این روند کاهشی در حاشیه زمانی تا جایی ادامه داشت که در ضریب نفوذ ۱۰۰ درصد به مقدار ۱۴۳ میلی‌ثانیه خواهد رسید. شکل (۱۰) نشان‌دهنده این موضوع است.

#### ۴-۱-۳- اثر روش پیشنهادی

با توجه به بخش‌های قبل، در شرایط حضور منابع تولید پراکنده در شبکه، هماهنگی حفاظتی شبکه دچار اشکال می‌شود؛ از این رو براساس روش پیشنهادی و با کنترل

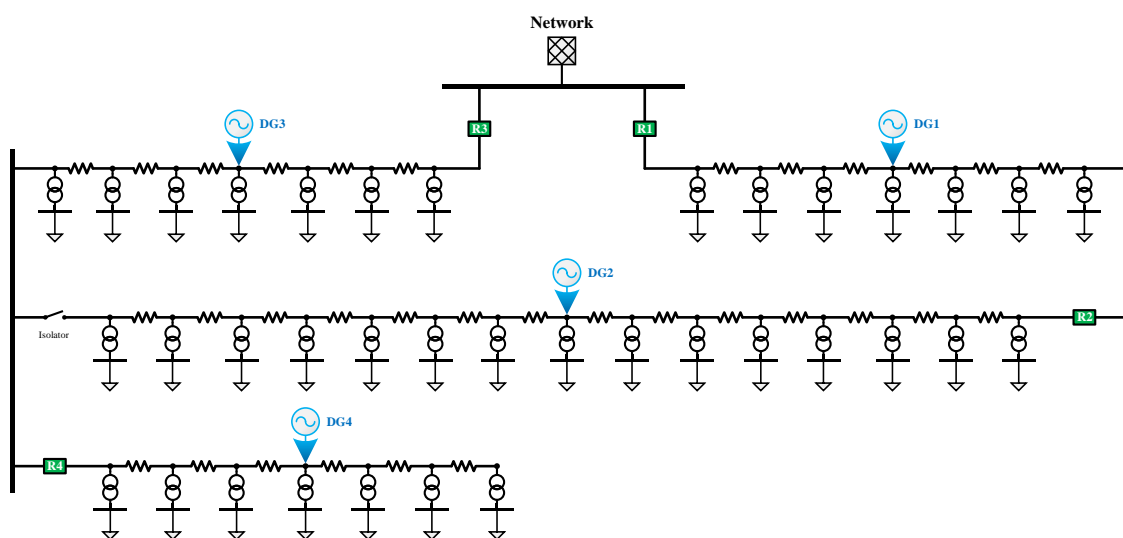
جدول (۴): مقادیر زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی در شرایط حضور منابع تولید پراکنده در شبکه

مکان DG	درصد ضریب نفوذ	$I_{base}$ (%)	$t_{RI}$ (ms)		$\Delta t$ (ms)	
			طرح متداول	طرح پیشنهادی	طرح متداول	طرح پیشنهادی
بین دو رله اصلی و پشتیبان	۱۰۰	۰/۹۴۰	۴۰۳۳	۹۸۵	۳۸۵۴	۸۰۶
	۹۰	۰/۹۶۲	۲۵۵۷	۹۱۱	۲۳۷۴	۷۲۸
	۸۰	۰/۹۸۴	۱۸۷۲	۸۵۱	۱۶۸۴	۶۶۲
	۷۰	۱/۰۰۷	۱۴۷۷	۸۰۰	۱۲۸۳	۶۰۶
	۶۰	۱/۰۲۹	۱۲۱۹	۷۵۷	۱۰۲۰	۵۵۷
	۵۰	۱/۰۵۱	۱۰۳۸	۷۱۹	۸۳۲	۵۱۴
	۴۰	۱/۰۷۳	۹۰۴	۶۸۷	۶۹۱	۴۷۴
	۳۰	۱/۰۹۵	۸۰۰	۶۵۹	۵۸۰	۴۳۸
	۲۰	۱/۱۱۷	۷۱۸	۶۳۳	۴۸۹	۴۰۵
	۱۰	۱/۱۳۹	۶۵۱	۶۱۱	۴۱۳	۳۷۳
	۰	۱/۱۶۵	۵۹۶	۵۹۱	۳۴۷	۳۴۲
بالادست دو رله اصلی و پشتیبان	۱۰	۱/۱۸۴	۵۴۹	۵۷۳	۳۱۱	۳۳۴
	۲۰	۱/۲۰۶	۵۰۹	۵۵۶	۲۸۰	۳۲۷
	۳۰	۱/۲۲۸	۴۷۴	۵۴۱	۲۵۴	۳۲۱
	۴۰	۱/۲۵۰	۴۴۴	۵۲۷	۲۳۱	۳۱۴
	۵۰	۱/۲۷۲	۴۱۸	۵۱۵	۲۱۲	۳۰۹
	۶۰	۱/۲۹۴	۳۹۴	۵۰۳	۱۹۵	۳۰۳
	۷۰	۱/۳۱۶	۳۷۳	۴۹۲	۱۷۹	۲۹۸
	۸۰	۱/۳۳۸	۳۵۴	۴۸۲	۱۶۶	۲۹۴
	۹۰	۱/۳۶۰	۳۳۷	۴۷۳	۱۵۴	۲۸۹
	۱۰۰	۱/۳۸۳	۳۲۲	۴۶۴	۱۴۳	۲۸۵

#### ۴-۲- ریزش شبکه دوم

شکل (۱۲) شمای تک خطی شبکه شبیه سازی دوم را نشان می دهد. این ریزش شبکه مربوط به یک منطقه صنعتی است که دارای ۳۶ مشترک با حساسیت های بیشتر نسبت به مصرف کنندگان خانگی در تأمین برق مطلوب و مطمئن بوده است که بر اساس این، هزینه بیشتری نیز پرداخت می کنند. در این ریزش شبکه دو فیدر با سیستم قدرت ۲۰ کیلو ولت تغذیه می شوند و بارهای خود را به صورت مستقل از یکدیگر تأمین می کنند. آرایش هادی های این ریزش شبکه در سمت فشار متوسط و فشار ضعیف به صورت هوایی و به ترتیب سه و چهار سیم است. تمامی بارهای موجود در این دو فیدر با ترانس های ۲۰ به ۰/۴ کیلو ولت به شبکه اصلی متصل می شود.

به منظور افزایش قابلیت اطمینان این ریزش شبکه، فیدرهای اصلی شبکه با یک کلید مانور به یکدیگر متصل می شوند. به بیان دیگر، در صورتی که هر دو کلید مربوط به رله های R1 و R3 بسته باشند، امکان بسته شدن کلید مانور و تغییر آرایش شبکه به حالت حلقه ای وجود ندارد و هر دو فیدر به صورت مستقل بارهای خود را تأمین می کنند. در صورت بسته بودن کلید مانور، یکی از کلیدهای رله های R1 یا R3 باز می گردد و هر دو فیدر به یک فیدر از یک سو تغذیه تبدیل می شوند. بدین منظور برای حفظ امنیت شبکه، یک Inter-Lock بین عملکرد کلید مانور با رله های R1 و R3 در ابتدای دو فیدر برقرار شده است



شکل (۱۲): ریزشبکه صنعتی شبیه‌سازی شده در حضور منابع تولید پراکنده

به‌ازای خطای اتفاق‌افتاده روی فیدرها، هماهنگی لازم برقرار است.

همه رله‌های استفاده‌شده در این مقاله از نوع Over Current بوده‌اند و قابلیت عملکرد در دو حالت لحظه‌ای و تأخیری را دارند. در صورت مستقل‌بودن هر دو فیدر از یکدیگر، سیستم حفاظتی آن به نحوی است که در صورت رخداد هرگونه خطا در هر فیدر، هماهنگی حفاظتی آن برقرار شده است.

#### ۴-۲-۱- بررسی تغییر توپولوژی در شبکه

در صورت بسته‌شدن کلید Isolator، دو حالت در نحوه آرایش شبکه با تغییر وضعیت هر کدام از کلیدهای موجود در ابتدای هر فیدر اتفاق می‌افتد. در صورتی که رله R1 بسته و رله R3 باز گردد، رله R3 از مدار خارج می‌شود و سه رله R1، R2 و R4 وظیفه حفاظت فیدر اصلی را بر عهده دارند. در این حالت رله R4 وظیفه حفاظت ناحیه اصلی خود را دارد و رله R2 که در شرایط قبل از مانور وظیفه حفاظت از ناحیه مربوط به خود را بر عهده داشت، در شرایط جدید، علاوه بر اینکه ناحیه رله R3 را نیز در ناحیه حفاظت اصلی خود محافظت می‌کند، باید پشتیبان رله R4 باشد و زمان هماهنگی مناسب را در صورت نداشتن عملکرد به‌موقع آن داشته باشد.

در این شبکه رله‌های R1 و R2 روی یک فیدر و رله‌های R3 و R4 روی فیدر دیگری نصب شده‌اند. در حالتی که کلید مانور باز باشد، دو فیدر و سیستم حفاظتی آنها به‌صورت مستقل از هم بوده است؛ به طوری که رله R1 به‌ازای هر نوع خطای رخ داده شده در ناحیه اصلی رله R2، پشتیبان این رله بوده و هماهنگی بین آنها برقرار است. در همین شرایط رله R3 پشتیبان عملکرد رله R4 در ناحیه حفاظت اصلی این رله است و در صورت رخداد خطا در این ناحیه با یکدیگر هماهنگ‌اند. در شرایطی که دو فیدر با کلید Isolator مانور شوند و یکی از رله‌های R1 و R2 باز گردد، هر دو فیدر به‌صورت یکپارچه و از یک سو تغذیه می‌شوند. با تبدیل دو فیدر به یک فیدر متناسب با وضعیت رله‌های R1 و R2 سیستم حفاظتی شبکه شرایط مختلفی خواهد داشت.

در صورتی که رله R2، باز و کلید مانور بسته شود، سه رله R1، R2 و R4 به‌صورت دو به دو پشتیبان یکدیگر شده و لازم است با یکدیگر هماهنگ شوند. هماهنگی موجود میان این سه رله به گونه‌ای است که رله R2 پشتیبان رله R4 بوده و رله R1 برای خطای رخ‌داده در ناحیه حفاظت اصلی R2، پشتیبان این رله است. در حالتی که رله R1 باز باشد و هر دو فیدر با رله R2 تغذیه شوند، سه رله R3، R4 و R2 حفاظت کل شبکه را بر عهده می‌گیرند. در این وضعیت رله R3 پشتیبان هر دو رله R2 و R4 بوده و

وضعیت ایجاد شده در این شبکه، از لحاظ تغییر وضعیت کلید مانور با قطع یکی از دو رله R1 و R3 و به دنبال آن، اتصال یا انفصال همه یا تعدادی از منابع تولید پراکنده به صورت هم‌زمان یا به صورت جداگانه، هماهنگی رله‌های حفاظتی بررسی می‌شود.

برای این منظور، مطابق جدول (۶)، توپولوژی‌های مختلف شبکه براساس نحوه باز و بسته بودن کلیدهای آن مشخص می‌شوند. با توجه به اینکه اندازه و جهت جریان خطای اتصال کوتاه در شرایط حضور این منابع تحت تأثیر قرار می‌گیرد، تأثیر این منابع را با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده در ناحیه‌های حفاظتی مختلف، بررسی و در صورت بر هم خوردن این هماهنگی، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، راهکار مناسب برای حفظ آن برقرار می‌شود؛ از این رو نیاز است در ضریب نفوذهای مختلف هماهنگی ارزیابی می‌شود.

جدول (۶): توپولوژی‌های مختلف بهره‌برداری ریز شبکه

condition	R1	R2	Isolator
A	بسته	بسته	باز
B	بسته	باز	بسته
C	باز	بسته	بسته

در صورتی که کلید مانور در حالت بسته باقی بماند و رله R3 بسته و رله R1 باز گردد، سه رله R2، R3 و R4 روی یک فیدر قرار می‌گیرند و حفاظت شبکه را بر عهده خواهند داشت. در این حالت وضعیت عملکرد دو رله R2 و R4 نسبت به حالت بازبودن کلید Isolator متفاوت می‌شود؛ بنابراین با توجه به تغییر ساختار ایجاد شده، لازم است این سه رله در هنگام ایجاد خطا، عملکرد مناسبی با توجه به نقش خود در حالت عملکرد به‌عنوان رله اصلی و پشتیبان داشته باشند. با توجه به محاسبات صورت‌گرفته، تنظیمات نهایی رله‌ها در جدول (۵) قرار داده شده‌اند. بر اساس این، هماهنگی رله‌ها در هر شرایطی از مانور شبکه برقرار است.

جدول (۵): مشخصات فنی رله‌های شبکه مطالعه شده

Device	Type	IEC Curve Type	TMS (sec)	I <sub>base</sub> (%)
R1	SIEMENS-7UT613	Extremely Inverse	۰/۰۸۳	۴
R2	SIEMENS-7UT613	Very Inverse	۰/۱۱۴	۴
R3	SIEMENS-7UT613	Long-Time Inverse	۰/۰۵۰	۱/۷۶
R4	SIEMENS-7UT613	Very Inverse	۰/۰۵۰	۶/۱

#### ۴-۲-۲- اثر حضور منبع DG در شبکه

حال هماهنگی میان رله‌های حفاظتی شبکه در حضور منابع تولید پراکنده بررسی می‌شود. به بیان کامل‌تر، در هر

جدول (۷): تأثیر منابع DG براساس حالات مختلف کار شبکه

condition	Penetration Level of DG (%)			t (sec)				Δt (sec)
	DG1	DG2	DG3	R1	R2	R3	R4	
A	۳۰	-	-	۱/۰۸۷	۰/۳۸۶	-	-	۰/۷۰۱
	-	-	۹۰	-	-	۰/۵۸۰	۰/۰۷۳	۰/۵۰۷
B	۳۰	-	-	-	۰/۴۷۳	-	۰/۲۴۸	۰/۲۲۵
	-	۶۰	-	-	۱/۱۳۸	-	۰/۱۴۵	۰/۹۹۳
C	-	-	۶۰	-	۰/۳۴۲	۱/۱۸۸	-	۰/۸۴۶
	-	-	۹۰	-	-	۰/۵۸۰	۰/۰۷۳	۰/۵۰۷

قرارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه، سیستم حفاظتی این ریز شبکه صنعتی چگونه دچار مشکل شده و به ارزیابی هماهنگی حفاظتی نیاز است.

با به کارگیری استراتژی پیشنهادی در این مقاله، به اصلاح تنظیمات حفاظتی در راستای ارزیابی اقدام می‌شود.

برای روشن شدن مسئله، تأثیر حضور منابع بر سیستم حفاظتی شبکه، مطابق جدول (۷) برای سه حالت کاری شبکه در نظر گرفته شده است. این حالت‌ها با توجه به توپولوژی شبکه و وضعیت کلید مانور لحاظ شده که در زمان حضور نداشتن منابع تولید پراکنده، هماهنگی بین رله‌های حفاظتی برقرار بوده است. براساس نتایج ارائه شده به خوبی مشاهده می‌شود براساس ضریب نفوذ و مکان

جدول (۸): ارزیابی ریزش شبکه صنعتی شکل (۱۲) براساس توپولوژی A

شماره منبع DG	ضریب نفوذ منبع DG (%)	نحوه تأثیر بر سیستم حفاظت	زمان (ثانیه)	
			طرح متداول	طرح پیشنهادی
۱	۰	افزایش زمان عملکرد رله پشتیبان (R1)	۰/۷۶۸	۰/۷۱۹
	۱۰		۰/۸۶۴	۰/۷۴۱
	۲۰		۰/۹۷۱	۰/۷۶۴
	۳۰		۱/۰۸۷	۰/۷۸۷
	۴۰		۱/۲۱۴	۰/۸۱۱
	۵۰		۱/۳۵۴	۰/۸۳۶
	۶۰		۱/۵۰۷	۰/۸۶۱
	۷۰		۱/۶۷۴	۰/۸۸۸
	۸۰		۱/۸۵۹	۰/۹۱۵
	۹۰		۲/۰۵۶	۰/۹۴۲
	۱۰۰		۲/۲۷۹	۰/۹۷۱

همانگی جدول (۹): ارزیابی ریزش شبکه صنعتی شکل (۱۲) براساس توپولوژی B

شماره منبع DG	ضریب نفوذ منبع DG (%)	نحوه تأثیر بر سیستم حفاظت	زمان (ثانیه)	
			طرح متداول	طرح پیشنهادی
۱	۰	کاهش حاشیه هم‌مانگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان (R2-R4)	۰/۳۱۷	۰/۳۰۵
	۱۰		۰/۲۷۵	۰/۳۲۰
	۲۰		۰/۲۴۶	۰/۳۲۹
	۳۰		۰/۲۲۵	۰/۳۳۵
	۴۰		۰/۲۰۹	۰/۳۳۸
	۵۰		۰/۱۹۶	۰/۳۴۰
	۶۰		۰/۱۸۷	۰/۳۴۲
	۷۰		۰/۱۷۹	۰/۳۴۳
	۸۰		۰/۱۷۲	۰/۳۴۴
	۹۰		۰/۱۶۷	۰/۳۴۵
	۱۰۰		۰/۱۶۲	۰/۳۴۵
۲	۰	افزایش زمان عملکرد رله پشتیبان (R1)	۰/۶۸۲	۰/۶۷۰
	۱۰		۰/۷۴۳	۰/۶۹۴
	۲۰		۰/۸۱۰	۰/۷۱۹
	۳۰		۰/۸۸۲	۰/۷۴۵
	۴۰		۰/۹۶۰	۰/۷۷۲
	۵۰		۱/۰۴۵	۰/۸۰۱
	۶۰		۱/۱۳۸	۰/۸۳۰
	۷۰		۱/۲۳۹	۰/۸۶۱
	۸۰		۱/۳۴۷	۰/۸۹۳
	۹۰		۱/۴۶۹	۰/۹۲۶
	۱۰۰		۱/۵۹۹	۰/۹۶۰

نتایج این اصلاح تنظیمات حفاظتی در جدول‌های (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) آورده شده‌اند. با مقایسه نتایج این جدول با جدول (۷)، ملاحظه می‌شود در شرایطی که حضور منابع DG در شبکه، عملکرد سیستم حفاظتی را با اختلال مواجه کرده بود، با به‌کارگیری روش پیشنهادی، باوجود حضور منابع تولید پراکنده در بیشترین ضریب نفوذ و به وجود آمدن بدترین شرایط برای عملکرد سیستم حفاظتی، هماهنگی به بهترین نحو بازیابی شده است و تجهیزات حفاظتی در محدوده عملکرد مجاز خود عمل می‌کنند.

جدول (۱۰): ارزیابی ریزشکبه صنعتی شکل (۱۲) براساس توپولوژی C

شماره منبع DG	ضریب نفوذ منبع DG (%)	نحوه تأثیر بر سیستم حفاظت	زمان (ثانیه)	
			طرح متداول	طرح پیشنهادی
	۰		۰/۸۹۲	۰/۷۴۲
	۱۰		۰/۹۳۸	۰/۷۶۵
	۲۰		۰/۹۸۶	۰/۷۸۸
	۳۰		۱/۰۳۵	۰/۸۱۲
	۴۰		۱/۰۸۵	۰/۸۳۶
۳	۵۰	افزایش زمان عملکرد رله پشتیبان (R3)	۱/۱۳۶	۰/۸۶۰
	۶۰		۱/۱۸۸	۰/۸۸۵
	۷۰		۱/۲۴۱	۰/۹۱۰
	۸۰		۱/۲۹۵	۰/۹۳۵
	۹۰		۱/۳۵۰	۰/۹۶۱
	۱۰۰		۱/۴۰۶	۰/۹۸۶

## ۵- نتیجه گیری

برای شبکه، مشترکین برق و همچنین سرمایه‌گذاران خصوصی منابع تولید پراکنده، به‌خوبی هماهنگی را بازیابی می‌کند. درواقع این روش را می‌توان روی سیستم‌های سستی در شبکه‌های توزیع، پیاده‌سازی کرد.

در این مقاله با در نظر گرفتن حضور منابع تولید پراکنده در شبکه، هماهنگی بین رله‌های اضافه‌جریان بررسی شد. با بررسی اثرات این منابع در کاهش یا افزایش زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی ریزشکبه، ملاحظه شد رفتار سیستم حفاظتی متناسب با فرارگیری منابع در شبکه متفاوت بوده است؛ بنابراین موضوع مکان نصب منابع ازجمله موارد تأثیرگذار بر سیستم حفاظتی در نظر گرفته شده است. در ادامه با یک الگوریتم جدید، به‌منظور بازیابی هماهنگی حفاظتی در شبکه، منحنی مشخصه متفاوت و جدیدی برای رله پشتیبان مطابق با استاندارد ارائه شد. بر اساس این منحنی، در بازه‌های جریانی متفاوت، ضریب  $I_{base}$  رله پشتیبان به‌صورت خطی، کنترل و مقادیر آن اصلاح می‌شود؛ به گونه‌ای که به‌ازای هرگونه شرایط حضور منابع از نظر مکان نصب و همچنین میزان تولید آنها در ریزشکبه، سیستم حفاظتی عملکرد مناسبی خواهد داشت. این روش بدون تحمیل کردن هزینه‌های اضافی

## مراجع

- [1] S. K. G. Manikonda and D. N. Gaonkar, "Comprehensive Review of IDMs in DG Systems," *IET Smart Grid*, Vol. 2, No. 1, pp. 11–24, Mar. 2019.
- [2] A. Vinayagam, A. A. Alqumsan, K. S. V. Swarna, S. Y. Khoo, and A. Stojcevski, "Intelligent control strategy in the islanded network of a solar PV microgrid," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 155, pp. 93–103, Feb. 2018.
- [3] R. K. Varma, S. A. Rahman, V. Atodaria, S. Mohan, and T. Vanderheide, "Technique for Fast Detection of Short Circuit Current in PV Distributed Generator," *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, Vol. 3, No. 4, pp. 155–165, Dec. 2016.
- [4] Y. Tang and R. Ayyanar, "Methodology of

- 2019.
- [15] P. T. Manditereza and R. C. Bansal, "Fault detection and location algorithm for DG-integrated distribution systems," *J. Eng.*, Vol. 2018, No. 15, pp. 1286–1290, Oct. 2018.
- [16] H. Doagou-Mojarrad, G. B. Gharehpetian, H. Rastegar, and J. Olamaei, "Optimal placement and sizing of DG (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm," *Energy*, Vol. 54, pp. 129–138, Jun. 2013.
- [17] M. M. Shabestary and Y. A.-R. I. Mohamed, "Asymmetrical Ride-Through and Grid Support in Converter-Interfaced DG Units Under Unbalanced Conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 66, No. 2, pp. 1130–1141, Feb. 2019.
- [18] H. Yazdanpanahi, W. Xu, and Y. W. Li, "A Novel Fault Current Control Scheme to Reduce Synchronous DG's Impact on Protection Coordination," *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 29, No. 2, pp. 542–551, Apr. 2014.
- [19] M. M. Salem, N. I. Elkalashy, Y. Atia, and T. A. Kawady, "Modified Inverter Control of Distributed Generation for Enhanced Relaying Coordination in Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 32, No. 1, pp. 78–87, Feb. 2017.
- [20] N. El Nailly, S. M. Saad, T. Hussein, K. El-Arroudi, and F. A. Mohamed, "On-line adaptive protection scheme to overcome operational variability of DG in smart grid via fuzzy logic and genetic algorithm," *9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, pp. 1–6, 2018.
- [21] H. M. Sharaf, H. H. Zeineldin, and E. El-Saadany, "Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, No. 1, pp. 143–151, Jan. 2018.
- [22] A. E. C. Momesso, W. M. S. Bernardes, and E. N. Asada, "Fuzzy adaptive setting for time-current-voltage based overcurrent relays in distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 108, pp. 135–144, Jun. 2019.
- [23] B. Chattopadhyay, M. S. Sachdev, and T. S. Sidhu, "An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 11, No. 1, pp. 165–173, 1996.
- [24] K. A. Wheeler, M. Elsamahy, and S. O. Faried, "A Novel Reclosing Scheme for Mitigation of Distributed Generation Effects on Overcurrent Protection," *IEEE Trans. Automated Protection Analysis for Large Distribution Feeders With High Penetration of Photovoltaic Systems*, *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, Vol. 4, No. 1, pp. 1–9, Mar. 2017.
- [5] K. Jia, C. Gu, Z. Xuan, L. Li, and Y. Lin, "Fault Characteristics Analysis and Line Protection Design Within a Large-Scale Photovoltaic Power Plant," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, No. 5, pp. 4099–4108, Sep. 2018.
- [6] H. Wan, K. K. Li, and K. P. Wong, "An Adaptive Multiagent Approach to Protection Relay Coordination With Distributed Generators in Industrial Power Distribution System," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 46, No. 5, pp. 2118–2124, Sep. 2010.
- [7] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, and C. Chen, "Power Distribution System Outage Management With Co-Optimization of Repairs, Reconfiguration, and DG Dispatch," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, No. 5, pp. 4109–4118, Sep. 2018.
- [8] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, and K. Y. Lee, "Determining PV Penetration for Distribution Systems With Time-Varying Load Models," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 29, No. 6, pp. 3048–3057, Nov. 2014.
- [9] H. K. Jahanger, D. W. P. Thomas, M. Sumner, and C. Rose, "Impact of an inverter-based DG on a double-ended fault location method," *J. Eng.*, Vol. 2018, No. 15, pp. 1078–1083, Oct. 2018.
- [10] A. Sharma and B. K. Panigrahi, "Phase Fault Protection Scheme for Reliable Operation of Microgrids," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 54, No. 3, pp. 2646–2655, May 2018.
- [11] M. A. Haj-ahmed and M. S. Illindala, "The Influence of Inverter-Based DGs and Their Controllers on Distribution Network Protection," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, No. 4, pp. 2928–2937, Jul. 2014.
- [12] B. Fani, H. Bisheh, and A. Karami-Horestani, "An offline penetration-free protection scheme for PV-dominated distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 157, pp. 1–9, Apr. 2018.
- [13] D. K. Khatod, V. Pant, and J. Sharma, "Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 28, No. 2, pp. 683–695, May 2013.
- [14] E. Purwar, D. N. Vishwakarma, and S. P. Singh, "A Novel Constraints Reduction-Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System With DGs," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 10, No. 1, pp. 889–898, Jan.

- Protection of an Electric Power System with Distributed Generations (DGs)," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 23, No. 3, Jun. 2013.
- [28] *IEC 60255-1 Measuring Relays and Protection Equipment - Part 1: Common*. IEC BSI, 2009.
- [29] F. Hajimohammadi, B. Fani, M. Moazzam, "A New intelligent method of Fuse – Recloser Coordination in a Distribution System with High PV Penetration Rates", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 49-64, Winter 2018.
- Power Deliv.*, Vol. 33, No. 2, pp. 981–991, Apr. 2018.
- [25] M. N. Alam, "Adaptive Protection Coordination Scheme using Numerical Directional Overcurrent Relays," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, pp. 1–1, 2018.
- [26] H.-C. Jo and S.-K. Joo, "Superconducting Fault Current Limiter Placement for Power System Protection Using the Minimax Regret Criterion," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25, No. 3, pp. 1–5, Jun. 2015.
- [27] H.-C. Jo and S.-K. Joo, and K. Lee, "Optimal Placement of Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) for

---

<sup>1</sup> Distributed Generation (DG)  
<sup>2</sup> Photovoltaic System (PV)  
<sup>3</sup> Over Current (OC)  
<sup>4</sup> Main Protection  
<sup>5</sup> Backup Protection  
<sup>6</sup> Time Multiply Setting  
<sup>7</sup> Coordination Time Interval (CTI)  
<sup>8</sup> Penetration Level of DG (PL)  
<sup>9</sup> Upper Trip Limit (UTL)  
<sup>10</sup> Lower Trip Limit (LTL)

