



## یک روش ترکیبی برای مکان یابی خطا و حفاظت شبکه‌های توزیع دارای تولید پراکنده با استفاده از شبکه عصبی

سید علی محمد جوادیان  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر  
ایران

محمود رضا حقی فام  
بخش برق دانشگاه تربیت مدرس

واژه‌های کلیدی: حفاظت، شبکه توزیع، تولید پراکنده، جایابی خطا، شبکه عصبی

### چکیده

یکی از مسائلی که در سال‌های اخیر توجه مهندسين برق را به خود جلب کرده است استفاده از منابع تولید پراکنده در سطح شبکه‌های توزیع است. حضور این گونه منابع تولید انرژی الکتریکی در شبکه‌های توزیع به دلیل پیچیده‌گی‌هایی که در بهره‌برداری، کنترل و حفاظت شبکه ایجاد می‌کنند، باید با انجام بررسی‌ها و مطالعات فراوانی صورت پذیرد. یکی از مهمترین مشکلاتی که حضور تولید پراکنده برای شبکه‌های توزیع ایجاد می‌کند از بین بردن کارایی سیستم حفاظت این شبکه‌ها است. تزریق جریان DG به شبکه توزیع ساختار شعاعی آن را از بین می‌برد و باعث ناکارآمدی فلسفه‌های سنتی حاکم بر حفاظت این گونه شبکه‌ها می‌شود. در شبکه‌های توزیع به دلیل بزرگ بودن امپدانس خطا و تغییرات وسیع آن و نیز سادگی ادوات حفاظتی این شبکه‌ها، تشخیص مکان دقیق خطا بسیار سخت است. از طرفی با نفوذ روزافزون منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، نیاز به طراحی

سیستم‌های جدید حفاظتی برای این گونه شبکه‌ها نیز افزایش می‌یابد. یکی از مسائلی که می‌تواند باعث بالا بردن کیفیت عملکرد رله‌های جدید حفاظتی شبکه توزیع شود، قدرت این رله‌ها در تشخیص محل دقیق خطا است. در این مقاله یک روش جدید برای تشخیص محل دقیق خطا و حفاظت شبکه‌های توزیع دارای منابع تولید پراکنده و با استفاده از شبکه‌های عصبی MLP ارائه شده است. همچنین روش پیشنهادی در این مقاله بر روی یک شبکه توزیع نمونه که در محیط نرم‌افزار DigSILENT Power Factory 13.2 شبیه‌سازی شده، پیاده‌سازی شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### ۱- مقدمه

سیستم شعاعی به دلیل ساختار ساده‌ای که دارد متداول‌ترین نوع شبکه توزیع محسوب می‌شود. در این ساختار فیدرها به صورت شعاعی از پست‌ها به سمت فیدرهای فرعی که به

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

حفاظتی بوده است. این مسأله در شبکه‌های توزیع به دلیل تغییرات وسیع امپدانس خطا از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و تشخیص آن نیز به مراتب سخت‌تر از شبکه‌های انتقال است [۳]. علاوه بر آن، اهمیت و قیمت کم تجهیزات شبکه‌های توزیع، طراحی سیستم‌های حفاظتی پیشرفته برای این شبکه‌ها را از نظر اقتصادی توجیه‌ناپذیر می‌سازد. این در حالی است که در صورت تشخیص دقیق محل خطا در این شبکه‌ها و طراحی صحیح سیستم حفاظت بر مبنای آن می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را به شدت افزایش داد [۴].

تشخیص مکان وقوع خطا در شبکه‌های فشار قوی انتقال به دلیل پائین بودن امپدانس خطا چندان پیچیده نیست و معمولاً توسط رله‌های دیستانس انجام‌پذیر است. اما به دلیل گستردگی شبکه‌های توزیع در سطح مناطق شهری و مسکونی، خطاهایی که در این شبکه‌ها اتفاق می‌افتند با امپدانس‌های متفاوت و معمولاً بزرگ همراه هستند. بالا بودن امپدانس خطا و دامنه تغییرات وسیع آن در شبکه‌های توزیع باعث می‌شود که با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های کلاسیک نتوان محل دقیق آن را مشخص نمود [۹ و ۱۰].

الگوریتم‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک، تئوری بازی، منطق فازی، کلونی مورچگان و سردشدن فلزات، در سال‌های اخیر به شدت مورد استفاده مهندسی در حل مسائل مختلف مهندسی و بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند، به طوری که حضور این روش‌ها در مسائل مهندسی باعث سادگی و سرعت بخشیدن به حل این گونه مسائل شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از پر قدرت‌ترین ابزارهای حل مسائل مهندسی همچون طبقه‌بندی و تقریب تابع می‌باشند. قدرت بسیار بالای این شبکه‌ها در حل مسائل فوق، به همراه سادگی پیاده‌سازی آنها باعث نفوذ روزافزون این شبکه‌ها در حل مسائل مهندسی شده است [۱۱].

در این مقاله یک روش جدید برای تشخیص محل دقیق خطا و حفاظت شبکه‌های توزیع دارای منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن اثر مقاومت خطا و با استفاده از شبکه‌های عصبی

همه جای ناحیه سرویس‌دهی کشیده شده‌اند امتداد یافته‌اند. اصولاً مزایای سیستم شعاعی در سادگی و ارزانی آن خلاصه می‌شود. با چنین آرایشی تعداد تجهیزات قطع‌کننده کاهش و طراحی سیستم حفاظت آسان می‌شود [۳-۱].

ساختار سنتی شبکه‌های برق همواره بر مبنای عدم وجود منابع تولید انرژی الکتریکی در شبکه‌های توزیع استوار است. اما در سال‌های اخیر به دلیل محدودیت‌های محیطی و جغرافیایی تولید، روند رو به رشد بار در شبکه‌های توزیع و نیاز به احداث نیروگاه‌های جدید، گرایش به سمت انرژی‌های پاک و سازگار با محیط زیست و قطع وابستگی به سوخت‌های فسیلی، توجه زیادی به منابع تولید پراکنده شده است. حضور منابع تولید پراکنده نیز مانند ظهور سایر تکنولوژی‌های جدید، علی‌رغم مزایای زیادی که دارد، دارای معایبی نیز می‌باشد. از جمله مزایای حضور تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع می‌توان به اصلاح کیفیت توان، اصلاح قابلیت اطمینان و کاهش تلفات اشاره کرد. این در حالی است که حضور این گونه منابع تولیدی باعث پیچیده شدن بهره‌برداری، کنترل و حفاظت شبکه‌های توزیع می‌شود [۳].

حضور منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع و تزریق جریان آنها به شبکه باعث می‌شود که ساختار شعاعی این گونه شبکه‌ها از بین برود و به واسطه آن ادوات حفاظتی موجود در شبکه هماهنگی خود را از دست بدهند. میزان اثرگذاری DG بر هماهنگی حفاظتی بستگی به سائز، نوع و محل DG دارد، به طوری که در برخی از موارد به کلی هماهنگی را از بین می‌برد و در برخی موارد دیگر ناحیه هماهنگی را کوچکتر می‌کند [۴ و ۵].

تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با نحوه تأثیرپذیری سیستم حفاظت شبکه‌های توزیع از منابع تولید پراکنده انجام شده است [۷-۴]. همچنین تحقیقاتی نیز در راستای چگونگی مقابله با مشکلات ایجاد شده برای عملکرد سیستم حفاظت شبکه‌های توزیع پس از اتصال DGها انجام گرفته است [۱۳-۸].

یکی دیگر از مسائل مهمی که همواره مورد توجه مهندسی حفاظت بوده، تشخیص دقیق محل خطا توسط رله‌های

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

نواحی شبکه، برای تمام بارهای موجود در ناحیه سکسیونر قابل قطع زیر بار قرار داده شود. این سکسیونرها نیز باید قابلیت عملکرد به ازای فرمان از راه دور را دارا باشند. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، لازم است که یک رله کامپیوتری، که دارای قابلیت پردازش و ذخیره اطلاعات بالایی باشد، در پست تغذیه کننده شبکه (پست فوق توزیع) قرار داده شود.

وظیفه اصلی حفاظت شبکه توزیع بر عهده رله مرکزی واقع در پست فوق توزیع قرار دارد. نحوه عملکرد نیز به این صورت است که رله با دریافت جریان برخی از نقاط شبکه به طور دائم بر وضعیت شبکه نظارت می‌کند. به محض اینکه خطایی در شبکه اتفاق بیافتد، رله متوجه وقوع آن شده، محل و نوع آن را تخمین می‌زند و با توجه به آن عملیات لازم برای پاکسازی خطا و بازیابی شبکه را با صدور فرامین لازم به کلیدهای جدا کننده نواحی انجام می‌دهد.

نقاطی از شبکه که باید جریان آنها به طور دائم مونیتور شده و در اختیار رله قرار گیرد عبارتند از:

- (۱) جریان تمام DGهای واقع در شبکه و منبع اصلی؛
- (۲) جریان تمام کلیدهای جدا کننده نواحی؛
- (۳) جریان تمام شاخه‌های فرعی موجود در شبکه، به غیر از شاخه‌هایی که در آنها DG حضور دارد؛

به غیر از جریان‌های فوق که به صورت Online و به طور دائم در اختیار رله قرار می‌گیرند، باید اطلاعات زیر نیز به عنوان اطلاعات ثابت شبکه در اختیار رله قرار گیرند و در حافظه آن ذخیره شوند:

- (۱) مشخصات فنی تمام تجهیزات شبکه شامل پست‌های توزیع، خطوط، المان‌های حفاظتی موجود و DGها؛
- (۲) منحنی بار ساعت به ساعت تخمینی برای تمام بارهای شبکه و درجه اهمیت آنها؛
- (۳) تمام اطلاعات مربوط به ناحیه‌بندی شبکه و محل قرارگیری کلیدهای جداکننده؛
- (۴) تمام اطلاعات مربوط به نحوه عملکرد رله به ازای خطاهای مختلف؛

در شکل (۱) شمای کلی الگوریتم حفاظت پیشنهادی نشان

MLP ارائه شده است. همچنین روش پیشنهادی در این مقاله بر روی یک شبکه توزیع نمونه که در محیط نرم‌افزار DigSILENT Power Factory 13.2 شبیه‌سازی شده، پیاده‌سازی شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- الگوریتم حفاظت

روش حفاظتی پیشنهادی این مقاله بدین صورت است که شبکه توزیع به چند ناحیه حفاظتی تقسیم‌بندی می‌شود. تقسیم‌بندی نواحی نیز با توجه به محل قرارگیری و ظرفیت DGهای موجود در شبکه و همچنین بار شبکه صورت می‌گیرد. روش ناحیه‌بندی شبکه به این صورت است که به ازای هر DG یک ناحیه در نظر گرفته شود که آن ناحیه از باس متصل به DG مربوطه شروع و به سمت انتهای فیدر پیشروی می‌کند و این پیشروی تا زمانی ادامه می‌یابد که مجموع بار میانگین تخمینی برای پست‌های توزیع واقع در ناحیه برابر با حداکثر ظرفیت DG باشد. البته اگر در حین پیشروی به سمت پائین دست، امتداد ناحیه به انتهای فیدر رسید ولی مجموع بار میانگین پست‌های توزیع واقع در ناحیه کمتر از ظرفیت DG داخل ناحیه بود، باید ناحیه را به سمت بالادست امتداد داد تا زمانی که شرط توازن بار میانگین و ظرفیت DG برقرار شود. البته باید به این نکته نیز توجه شود که اگر در حین پیشروی ناحیه به سمت پائین دست، قبل از برقراری شرط توازن ظرفیت و بار میانگین، DG دیگری وجود داشت، DG دوم نیز جزء همان ناحیه لحاظ شده و ناحیه تا جایی امتداد می‌یابد که مجموع بار میانگین پست‌های توزیع واقع در ناحیه برابر با مجموع ظرفیت DGهای ناحیه باشد.

پس از تقسیم‌بندی شبکه و مشخص شدن محدوده نواحی، بین تمام نواحی شبکه کلیدهای قطع کننده‌ای که دارای قابلیت باز و بسته شدن سریع و مکرر را داشته باشند و بتوان از راه دور آنها را کنترل کرد و به آنها فرمان قطع و وصل فرستاد، قرارداد می‌شوند. همچنین این کلیدها باید مجهز به رله سنکروچک نیز باشند. علاوه بر این لازم است که در برخی از

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

شبکه عصبی نیست و تنها با نرمالیزه کردن جریان سه فاز خروجی از پست تغذیه کننده شبکه می‌توان نوع خطا را تشخیص داد. برای نرمالیزه کردن جریان‌های مورد نظر از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$I_{normal} = \frac{I}{I_{max}} \quad (1)$$

که در آن مقدار جریان فاز و  $I_{max}$  مقدار بیشینه بردار جریان فازها است. با استفاده از رابطه (۱) و جدول (۱) می‌توان به راحتی نوع خطای افتاده در شبکه را تشخیص داد.

جدول (۱): مقادیر نرمالیزه شده جریان فازها به ازای خطاهای مختلف

Ic	Ib	Ia	نوع خطا
0	0	1	Ag
0	1	0	Bg
1	0	0	Cg
0	-1	1	AB
-1	0	1	AC
-1	1	0	BC
0	1	1	ABg
1	0	1	ACg
1	1	0	BCg
1	1	1	ABC

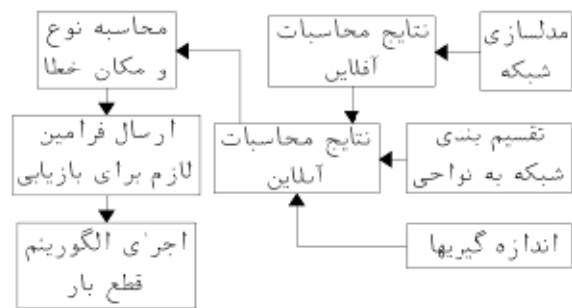
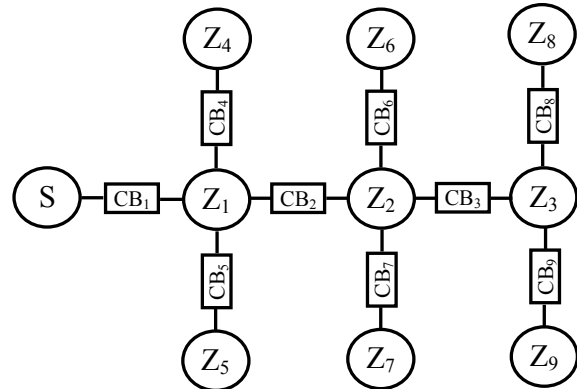
### ۳-۲- روش تشخیص مکان خطا

پس از تعیین نوع خطا باید مکان دقیق وقوع خطا تعیین شود. برای تعیین مکان خطا در این مقاله از شبکه عصبی MLP استفاده شده است. شکل (۲) شمای کلی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): شمای کلی روش پیشنهادی

داده شده است.



شکل (۱): شمای کلی الگوریتم حفاظت پیشنهادی

### ۳-۳- الگوریتم جایابی خطا

مهمترین بخش در هر سیستم حفاظت نحوه تشخیص خطا و محل وقوع آن است. در روش ارائه شده در این مقاله، طی محاسبات Offline، چهار شبکه عصبی MLP توسط اطلاعات تهیه شده از مدلسازی شبکه و شبیه سازی انواع خطاها با مقاومت‌های خطای مختلف و در مکانهای متفاوت آموزش داده می‌شوند. سپس در هنگام وقوع خطا در شبکه مکان دقیق آن توسط رله مرکزی و با استفاده از شبکه عصبی آموزش دیده مناسب محاسبه می‌گردد.

الگوریتم پیشنهادی این مقاله شامل دو مرحله تشخیص نوع خطا و تشخیص مکان خطا است که در ادامه تشریح شده‌اند.

### ۳-۱- روش تشخیص نوع خطا

برای تشخیص نوع خطا تنها از جریان سه فاز پست تغذیه کننده شبکه استفاده می‌شود. در این مرحله نیازی به استفاده از

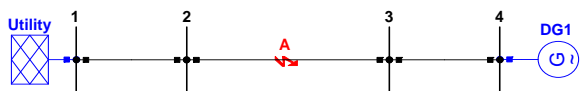
### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\frac{I_S}{I_{DG}} = \frac{Z_{34} + Z_{3a}}{Z_{12} + Z_{2a}} \quad (5)$$

حال اگر اتصال کوتاه در همان نقطه A و با امپدانس  $Z_f$  رخ دهد این نسبت تقریباً برابر خواهد بود با:

$$\frac{I_S}{I_{DG}} \approx \frac{Z_{rf} + Z_{ra} + Z_f}{Z_{1r} + Z_{ra} + Z_f} \quad (6)$$

که تقریباً برابر با همان مقدار حاصل از رابطه (5) است. بنابراین با استفاده از نسبت جریان خطای تزریقی از منابع مختلف به یکدیگر به عنوان ورودی شبکه عصبی می‌توان اثر امپدانس خطا را به حداقل مقدار خود رساند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این مشخصه ورودی تنها در شبکه‌های توزیع دارای DG قابل استخراج است و لذا روش ارائه شده در این مقاله تنها در این گونه شبکه‌ها قابل اجرا است و نمی‌توان از آن برای تعیین مکان خطا در شبکه‌های توزیع سنتی استفاده کرد.



شکل (3): یک شبکه توزیع ساده با یک DG

نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که با افزایش تعداد DGهای متصل به شبکه توزیع، دقت تشخیص محل خطا توسط شبکه عصبی نیز به خاطر افزایش تعداد ورودی‌های آن افزایش می‌یابد. به عنوان مثال اگر در شبکه تنها یک DG وجود داشته باشد، برای آموزش شبکه عصبی تنها از یک ورودی می‌توان استفاده کرد، ولی اگر  $n$  منبع تولید پراکنده به شبکه متصل شده باشد، به تعداد ترکیبات دو از  $n+1$  ورودی در شبکه خواهیم داشت. به عبارت دیگر تعداد ورودی‌های شبکه عصبی برابر است با:

$$N = \binom{n}{2} \quad (7)$$

که در آن  $n$  تعداد منابع تغذیه کننده جریان خطا است (شبکه و  $n-1$  منبع تولید پراکنده). تعداد خروجی‌های شبکه عصبی نیز به تعداد  $n$  (تعداد منابع تغذیه کننده جریان خطا) می‌باشد

پس از مشخص شدن نوع خطا توسط واحد مربوطه، شبکه عصبی آموزش داده شده مربوط به آن نوع خطا فعال می‌شود و با دریافت داده‌های ورودی، که توسط برنامه آماده‌سازی اطلاعات ورودی شبکه عصبی تهیه شده‌اند، فاصله خطا از تمام منابع تولید پراکنده و پست تغذیه کننده شبکه را به عنوان خروجی تولید می‌کند.

همان‌گونه که پیش از این اشاره شد مشکل اصلی تشخیص محل خطا در شبکه‌های توزیع، امپدانس خطا است. برای این شبکه عصبی را بتوان به نحوی آموزش داد که مقدار امپدانس خطا کمترین تأثیر را در خروجی آنها داشته باشد، باید مشخصه‌های مناسبی را به عنوان ورودی برای شبکه عصبی تعریف کرد. در این مقاله از نسبت جریان‌های خطای تزریقی توسط DGها و پست تغذیه کننده شبکه به یکدیگر برای ورودی شبکه عصبی استفاده شده است. جریان خطای تزریقی از هر یک از منابع تغذیه را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:

$$I_f = \frac{V}{Z_{th}} \quad (2)$$

که در آن  $V$  ولتاژ پایانه منبع تغذیه و  $Z_{th}$  امپدانس تونن معادل شبکه از دید آن است. به عنوان مثال در شبکه نشان داده شده در شکل (3) در صورتیکه یک اتصال کوتاه با مقاومت صفر در نقطه A اتفاق بیافتد، امپدانس دیده شده توسط DG و شبکه عبارتند از:

$$Z_{DG} = Z_{rf} + Z_{ra} \quad (3)$$

$$Z_s = Z_{12} + Z_{2a} \quad (4)$$

که در آن  $Z_{12}$  امپدانس خط متصل کننده باس شماره 1 به 2،  $Z_{34}$  امپدانس خط متصل کننده باس شماره 3 به 4،  $Z_{3a}$  امپدانس بین باس شماره 3 و محل خطا و  $Z_{2a}$  امپدانس بین باس شماره 2 و محل خطا است. در شبکه فوق نسبت جریان اتصال کوتاه تزریقی از شبکه به جریان اتصال کوتاه تزریقی از DG برابر است با:

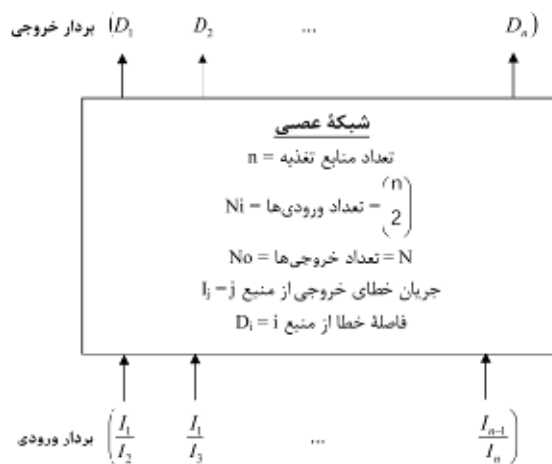
### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

داده و در هنگام وقوع آنها عکس‌العمل مناسب را انجام دهد. این امکان در شبکه‌های قدرت توسط بازبست‌ها فراهم می‌شود. در شبکه‌های توزیع سنتی نیز با هماهنگی بازبست - فیوز می‌توان به راحتی خطاهای گذرا را از خطاهای ماندگار تشخیص داد.

در طرح پیشنهادی این مقاله، هدف این است که ناحیه خطا از سایر نواحی شبکه و به واسطه باز شدن کلیدهای آن جدا شود. این در حالی است که سایر نواحی شبکه نیز تا حد امکان باید برقرار باقی بمانند. برای رسیدن به این هدف پس از اینکه محل خطا و ناحیه‌ای که خطا در آن رخ داده است توسط رله مشخص شد، فرمان قطع به تمام بریکرهای مربوط به ناحیه خطا و نواحی که در پائین دست آن قرار دارند صادر می‌شود. همچنین به منظور بی‌برق شدن ناحیه خطا، در صورتیکه در آن ناحیه DG حضور داشته باشد، رله فرمان قطع را به تمام DGهای داخل ناحیه ارسال می‌کند تا از مدار خارج گردند. در این شرایط ناحیه خطا به کلی بی‌برق شده و ارتباط الکتریکی آن با سایر نواحی شبکه قطع می‌شود و نواحی بالادست ناحیه خطا به صورت سنکرون با شبکه سراسری به کار خود ادامه می‌دهند و به وسیله منبع تغذیه اصلی و DGهای مربوط به خود تغذیه می‌شوند. نواحی پائین دست ناحیه خطا نیز در صورتی که دارای DG باشند به صورت جزیره‌ای برقرار باقی می‌مانند و در غیر این صورت بی‌برق می‌شوند.

برای انجام عملیات بازبست، از کلید متصل‌کننده ناحیه خطا به نواحی بالا دست استفاده می‌شود و این عملیات توسط رله مرکزی با مشخصه فیوز مربوط به شاخه خطا به صورت نرم‌افزاری هماهنگ می‌شود. برای این منظور رله پس از هر بار بازبست شرایط شبکه را مجدداً مورد بررسی قرار می‌دهد و در صورتیکه خطا همچنان وجود داشت کلید را دوباره قطع می‌کند و در غیر این صورت شبکه را بازیابی می‌کند. برای انجام عملیات بازیابی شبکه نیز رله فرمان وصل مجدد همراه با سنکرونیزم را ابتدا به کلیدهای قطع‌کننده نواحی و به

و هر خروجی فاصله محل خطا از منبع تغذیه مربوط به خود را مشخص می‌کند. با توجه به مطالب فوق می‌توان ساختار کلی شبکه عصبی استفاده شده در این مقاله را به صورت نشان داده شده در شکل (۴) تعریف کرد.



شکل (۴): ساختار شبکه عصبی

برای تشکیل شبکه عصبی تنها از یک لایه پنهان استفاده می‌شود اما در رابطه با تعداد نرون‌های لایه پنهان نمی‌توان اظهار نظر قطعی کرد و کاملاً وابسته به شرایط است. ولی برای حل هر مسأله می‌توان با روش سعی و خطا تعداد نرون‌های لایه پنهان را مشخص نمود. تعداد نرون‌های لایه خروجی دقیقاً برابر با تعداد خروجی‌ها است و تابع تبدیل نرون‌های خروجی نیز خطی در نظر گرفته شده است. همچنین تابع تبدیل نرون‌های لایه پنهان به شکل تانژانت هیپربولیک در نظر گرفته شده است. برای آموزش شبکه عصبی نیز از روش Levenberg-Marquardt استفاده شده است.

#### ۴- جداسازی ناحیه خطا و بازیابی شبکه

هدف اصلی طرح‌های حفاظتی در شبکه‌های قدرت این است که محل خطا را از شبکه ایزوله کنند، در حالی که تا حد امکان بارهای شبکه قطع نشوند. علاوه بر این با توجه به اینکه بیش از ۸۰ درصد خطاهای شبکه قدرت گذرا هستند و پس از مدت زمان کوتاهی از بین می‌روند، باید امکانی فراهم گردد که سیستم حفاظت بتواند این گونه خطاها را نیز تشخیص

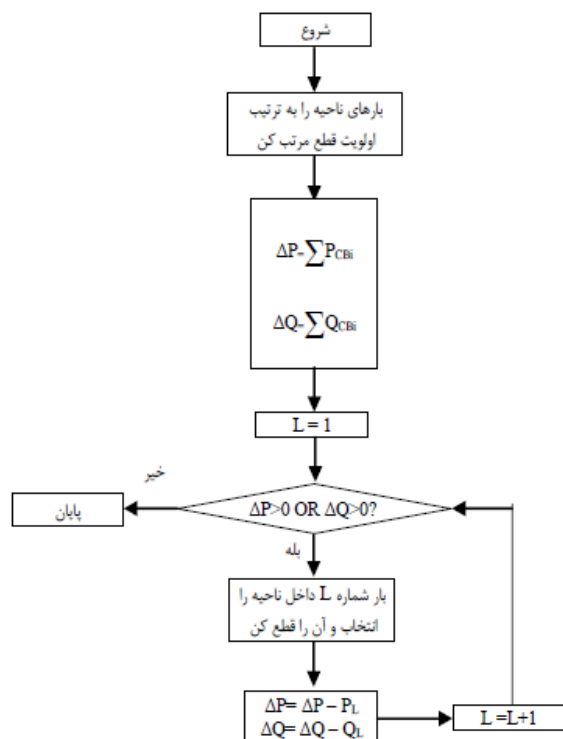
### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

زیر باری که برای آن پست‌های توزیع قرار داده شده است صادر می‌نماید.

شکل (۵) الگوریتم قطع بار رله مرکزی را نشان می‌دهد.

### ۶- شبیه‌سازی شبکه توزیع نمونه

در این مقاله برای مدلسازی شبکه توزیع نمونه و استخراج اطلاعات مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی از نرم‌افزار DIgSILENT Power Factory 13.2 و برای تشکیل شبکه عصبی و شبیه‌سازی الگوریتم ارائه شده از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. شبکه توزیع مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت ۲۲ باسه است که در آن ۲ دیزل ژنراتور با ظرفیتهای ۳/۵ و ۴/۵ مگاوات آمپر به ترتیب به باسهای ۲۲ و ۴ متصل شده است. شکل (۶) دیاگرام تک خطی شبکه مذکور را نشان می‌دهد. اطلاعات فنی مربوط به تجهیزات شبکه در ضمیمه مقاله ارائه شده است.



شکل (۵): الگوریتم قطع بار رله مرکزی

ترتیب از ابتدای فیدر تا انتهای فیدر صادر می‌کند و در انتها، DGهای ناحیه خطا را مجدداً وارد مدار می‌سازد.

### ۵- الگوریتم قطع بار

همان‌گونه که قبلاً نیز به آن اشاره شد، اگر در زمانی که بار شبکه بیشتر از بار میانگین است، در یکی از نواحی سیستم خطایی رخ دهد و به واسطه وقوع آن خطا و عملکرد رله و قطع برخی از کلیدهای شبکه، در شبکه توزیع نواحی پدید آیند که در مدت زمان رفع خطا به صورت جزیره‌ای به فعالیت خود ادامه دهند، باید در آن نواحی عملیات قطع بار انجام پذیرد.

در طرح حفاظتی این مقاله پیشنهاد شده است که میزان اختلاف تولید و بار داخل هر ناحیه با استفاده از حاصل جمع جریان عبوری از کلیدهای جداکننده مربوط به آن ناحیه در آخرین لحظه قبل از وقوع خطا مشخص شود.

$$\Delta P_L = \sum P_{C_{Bi}} \quad (۸)$$

$$\Delta Q_L = \sum Q_{C_{Bi}}$$

با محاسبه  $\Delta P_L$  و  $\Delta Q_L$  از رابطه (۸) برای هر ناحیه می‌توان میزان کمبود یا اضافه بار داخل هر ناحیه را نسبت به میزان تولید داخل ناحیه به دست آورد. پس از آن با استفاده از منحنی بار ساعت به ساعت تخمینی برای بارهای داخل آن ناحیه و ساعت وقوع خطا و مقادیر  $\Delta P_L$  و  $\Delta Q_L$  و درجه اهمیت بارها می‌توان آنقدر از بارهای ناحیه قطع کرد تا تعادل تولید و مصرف داخل هر ناحیه برقرار شود. البته این عملیات لازم است در نواحی صورت گیرد که در لحظه وقوع خطا دارای اضافه بار بوده‌اند و در صورتیکه در لحظه وقوع خطا بار داخل ناحیه جزیره‌ای شده کمتر از میزان تولید DGهای واقع در آن باشد رله هیچ فرمانی را صادر نمی‌کند تا سیستم کنترل فرکانس داخل ناحیه تولید DGها را به منظور برقراری فرکانس نامی کاهش دهد. لازم به ذکر است در صورت نیاز به قطع بار و پس از تشخیص اینکه کدام یک از بارهای شبکه باید قطع شوند، رله فرمان قطع را به سکسیونرهای قابل قطع



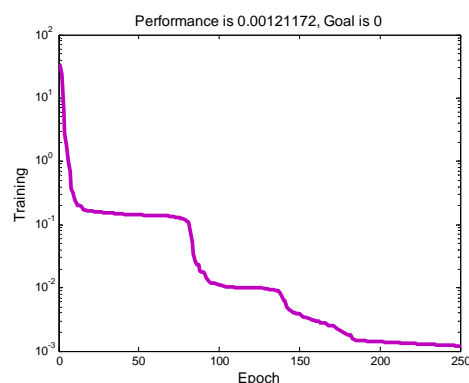
## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

برای اطمینان از عملکرد صحیح رله با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، عملکرد رله به ازای خطاهای مختلف و در ساعات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی فوق کفایت سیستم طراحی شده را اثبات می‌کند. در ادامه نتیجه شبیه‌سازی یک خطای سه‌فاز متقارن بر روی خط متصل کننده باس‌های ۱۳ و ۱۴ شبکه ارائه شده است.

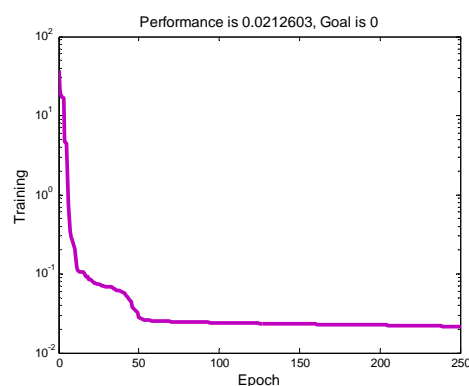
در این حالت رله پس از تشخیص خطا و محل آن و تشخیص اینکه خطا در ناحیه اول قرار گرفته است، بلافاصله فرمان قطع را به  $CB_1$ ،  $CB_2$ ،  $CB_3$  و  $CB_4$  صادر می‌کند. در این حالت نواحی اول و چهارم بی‌برق شده و نواحی دوم و سوم به صورت جزیره‌ای به کار خود ادامه می‌دهند.

پس از آن برای تشخیص خطای گذرا و انجام عملیات بازبست رله فرمان وصل مجدد را به  $CB_1$  ارسال می‌کند. پس از وصل مجدد  $CB_1$ ، رله مجدداً شرایط را بررسی می‌کند، در صورت مشاهده مجدد خطا فرمان قطع به  $CB_1$  صادر می‌شود. این عمل می‌تواند تا چند بار تکرار شود. بدیهی است به دلیل بی‌برق بودن ناحیه اول در هنگام وصل مجدد به سنکرونیزم نیازی نیست. در این شرایط، اگر خطا دائمی باشد تمام کلیدهای  $CB_1$ ،  $CB_2$ ،  $CB_3$  و  $CB_4$  باز می‌مانند و غیر از نواحی دوم و سوم که توسط  $DG_1$  و  $DG_2$  تغذیه می‌شوند بقیه نواحی بی‌برق می‌شوند. اما در صورتی که خطا ماهیتی گذرا داشت و در طول عملیات بازبست از بین رفت باید شبکه بازیابی شود. برای این کار ابتدا فرمان وصل به  $CB_1$  ارسال می‌شود و سپس  $CB_2$  به همراه عملیات سنکرونیزم بسته می‌شود، پس از آن فرمان وصل به  $CB_3$  صادر می‌گردد و در نهایت فرمان وصل به همراه عملیات سنکرونیزم به  $CB_4$  ارسال می‌گردد.

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم قطع بار رله باید خطای فوق در دو ساعت بار پیک و بار می‌نیم شبیه‌سازی شود. نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در ساعت بار می‌نیم واحد قطع بار رله هیچ فرمانی را صادر نمی‌کند ولی در ساعت بار پیک برای برقراری تعادل تولید و مصرف در ناحیه دوم و با توجه



شکل (۱۰): منحنی آموزش شبکه عصبی مربوط به خطای دو فاز



شکل (۱۱): منحنی آموزش شبکه عصبی مربوط به خطای دو فاز به زمین

جدول (۲): ساختار و میزان خطای شبکه‌های عصبی آموزش داده شده

نوع خطا	ساختار شبکه عصبی	خطای $MSE^1$
خطای سه فاز متقارن	[ ۳ ۶ ۳ ]	۰/۰۱۵۵۱۶۹
خطای تکفاز به زمین	[ ۳ ۵ ۳ ]	۰/۰۱۳۶۵۶۳
خطای دو فاز به هم	[ ۳ ۷ ۳ ]	۰/۰۰۱۲۱۱۷۲
خطای دو فاز به هم به زمین	[ ۳ ۷ ۳ ]	۰/۰۲۱۲۶۰۳

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود میزان خطای شبکه‌های عصبی، پس از آموزش حداکثر ۲/۵ متر است. لذا با توجه به اینکه طول خطوط در شبکه مذکور ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده و در سیستم‌های حفاظت شبکه‌های توزیع هدف تشخیص خطی است که خطا بر روی آن اتفاق افتاده است، می‌توان نتیجه گرفت که روش مذکور از خطای قابل قبولی برخوردار است.

<sup>1</sup> Mean Square Error

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

تشخیص می‌دهد و دستورات لازم برای جداسازی قسمت خطا دیده از بقیه قسمت‌های شبکه را صادر می‌نماید. همچنین الگوریتم ارائه شده بر روی یک شبکه توزیع نمونه که با استفاده از نرم‌افزار DIGSILENT مدل‌سازی شده و اطلاعات مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی از آن استخراج شده است پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آن ارائه شد. نتایج حاصل بیانگر قدرت و دقت بالای روش پیشنهادی است و قابلیت استفاده این روش را برای استفاده در طرح‌های حفاظتی هوشمند در شبکه‌های توزیع مدرن تأیید می‌کند.

#### ۸- پیوست

تمام خطوط استفاده شده در شبکه نمونه از نوع HYENA، به طول ۱۰۰ متر و با مشخصات مشروح در جدول (۱) می‌باشند.

مشخصات الکتریکی DG در جدول (۲) ارائه شده است. برای تمام بارهای شبکه یک منحنی بار سه پله‌ای با بار پیک برابر با یک مگاوات و ضریب توان ۰/۹ پس‌فاز در نظر گرفته شده است. شکل (۱۲) این منحنی بار را نشان می‌دهد.

جدول (۳): مشخصات الکتریکی هادی خطوط

نام هادی	نوع	سطح مقطع
HYENA	ACSR	126 mm <sup>2</sup>
مشخصات الکتریکی	R (Ω/km)	0.303
	X (Ω/km)	0.3383
	R <sub>0</sub> (Ω/km)	0.4509
	X <sub>0</sub> (Ω/km)	1.5866
	I <sub>n</sub> (A)	250

جدول (۴): مشخصات DG

Machine Type	IEC 909	Salient Pole Series 1	
Voltage (kV)	20	X'd (pu)	0.256
Pn (MW)	2.8 , 3.6	X''d (pu)	0.168
PFn	0.8	X0 (pu)	0.1
Connection	YN	X2 (pu)	0.2
Xd (pu)	1.5	R0=R2 (pu)	0
Xq (pu)	0.75	Rstr (pu)	0.504

به اولویت قطع بارها فرمان قطع را به سکسیونر پستهای شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۹ صادر می‌کند.

خروجی نرم‌افزار شبیه‌ساز رله در این حالت به شرح زیر است:

```
>>
The fault type is three phase fault.
The fault distance from network sources is: [650.24; 751.16; 649.97;]
The faulted section is section 13 which connects bus 13 to 14.
The faulted zone is zone 1.
CB1 ==> Opened
CB2 ==> Opened
CB3 ==> Opened
CB4 ==> Opened
CB1 ==> Re-closed (fast mode)
For Temporary Fault:
  CB2 ==> Closed (with synchronizing function)
  CB3 ==> Closed
  CB4 ==> Closed (with synchronizing function)
For Permanent Fault:
  CB1 ==> Opened
  CB1 ==> Re-closed (slow mode)
  CB1 ==> Opened
  Load17==> Shed
  Load18==> Shed
  Load19==> Shed
>>
```

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرحی نوین برای مکان یابی خطا و حفاظت شبکه‌های توزیع دارای تولید پراکنده با استفاده از شبکه عصبی ارائه شد. در روش ارائه شده برای حداقل کردن تأثیر امپدانس خطا در تشخیص محل آن، از نسبت جریان تزریقی منابع تغذیه به یکدیگر استفاده شد و به عنوان ورودی شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت. در روش ارائه شده ابتدا با استفاده از نرم‌الیزه کردن جریان خطای تزریقی از پست تغذیه کننده شبکه، نوع خطا مشخص شده و سپس شبکه عصبی آموزش دیده مربوط به آن نوع خطا برای تعیین فاصله محل خطا از منابع تغذیه موجود در شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در الگوریتم ارائه شده برای حفاظت شبکه پس از تقسیم‌بندی شبکه توزیع به نواحی جداگانه که در صورت نیاز قدرت بهره‌برداری به صورت جزیره‌ای را دارا باشند، رله کامپیوتری داخل پست فوق توزیع با استفاده از شبکه‌های عصبی آموزش داده شده در محاسبات offline، محل دقیق خطا را

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

Trans. Power Delivery, VOL. 19, NO. 1, JANUARY 2004, 56-63.

- [10] S.A.M. Javadian, M.-R. Haghifam, "Designing a New Protection System for Distribution Networks including DG", The 9<sup>th</sup> IET International conf. on Developments in Power System Protection, 17 - 20 March 2008, Glasgow, UK, pp.675-680.
- [11] M. Ehsan, A. Soroudi, "An Introduction to Heuristic Search Algorithms for Optimization of Engineering Problems," International Conference on Genetic and Evolutionary Methods, USA, June 25-28, 2007.

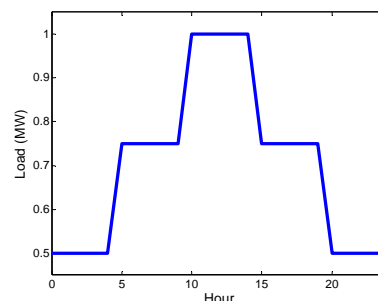
- [12] A. Farzanehrfat, S.A.M. Javadian, S.M.T. Bathaee, M.-R. Haghifam, "Maintaining the Recloser-Fuse Coordination in Distribution Systems in Presence of DG by Determining DG's Size ", The 9<sup>th</sup> IET International conf. on Developments in Power System Protection, 17-20 March 2008, Glasgow, UK, pp. 124-129.

[۱۳] سید علی محمد جوادیان، محمود فتوحی فیروزآباد، "ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن هماهنگی بازبست- فیوز،" سیزدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق، اردیبهشت ۱۳۸۷.

[۱۴] نازخانم رضایی، محمودرضا حقی فام، "حفاظت شبکه‌های توزیع با استفاده از شبکه‌های عصبی با در نظر گرفتن اثر تولیدات پراکنده،" بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق، آبان ۱۳۸۴، تهران.

[۱۵] سید علی محمد جوادیان و محمودرضا حقی فام، " بررسی تأثیر حضور منابع تولید پراکنده در عملکرد سیستم حفاظت شبکه‌های توزیع،" دوازدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق، اردیبهشت ۱۳۸۶، تهران.

- [16] S.A.M. Javadian, M.-R. Haghifam, "Protection of Distribution Networks in Presence of DG Using Distribution Automation System Capabilities," Proc. 2008 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 20-24 July 2008, pp.1-6.
- [17] S.A.M. Javadian, and M.-R. Haghifam, "Implementation of a new protection scheme on a real distribution system in presence of DG," Proc. PowerCon 2008 and 2008 IEEE Power India Conference, 12-15 October 2008, New Delhi, India, pp. 1-7.
- [18] S.A.M. Javadian, M.-R. Haghifam, N. Rezaei "A Fault Location and Protection Scheme for



شکل (۱۲): منحنی بار ساعت به ساعت پست‌های توزیع

### مراجع

- [1] P. P. Barker, R. W. de Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems: part 1-radial distribution systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, pp. 486-493, Apr. 2000.
- [2] N. Hadjsaid, J. Canard, F. Dumas, "Dispersed generation impact on distribution networks," IEEE Comput. Appl. Power, vol. 12, pp. 22-28, Apr. 1999.
- [3] R. C. Dugan, T. E. McDermott, "Operating conflicts for Distributed Generation interconnected with Utility Distribution Systems," IEEE Industry Applications Magazines, 19-25, Mar/Apr. 2002.
- [4] K. Kauhaniemi, L. Kumpulainen, "Impact of distributed generation on the protection of distribution networks," Developments in Power System Protection, Eighth IEE International Conference, April 2004, Vol.1, pp. 315 - 318.
- [5] A. Girgis, S. Brahma, "Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System," Power Engineering, LESCOPE'01. 2001 Large Engineering Systems Conference, 11-13 July 2001, pp. 115 - 119.
- [6] M. T. Doyle, "Reviewing the Impacts of Distributed Generation on Distribution System Protection," Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE Vol.1, pp.103-105.
- [7] L. K. Kumpulainen, K. T. Kauhaniemi, "Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing," Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES 10-13 Oct. 2004, Vol.1 pp. 603 - 608.
- [8] S. Brahma, A. Girgis, " Microprocessor-Based Reclosing to Coordinate Fuse and Recloser in a System with High Penetration of Distributed Generation", IEEE PES Winter Meeting, Vol.1, pp 453-458, 2002.
- [9] S. Brahma, A. Girgis, "Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation," IEEE

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

- protection devices in distribution system," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 23, NO. 4, October 2008, pp. 2241-2246.
- [30] N. Prera, A. D. Rajapakse, T. E. Buchholzer, "Isolation of faults in distribution networks with distributed generators," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 23, NO. 4, October 2008, pp. 2347-2355.
- [31] S. Chaitusaney, A. Yokoyama, "Prevention of reliability degradation from recloser-fuse miscoordination due to distributed generation," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 23, NO. 4, October 2008, pp. 2545-2554.
- [32] S. Haykin, "Neural Networks a comprehensive foundation," Second edition, Prentice-Hall, Inc. 1999.
- [33] K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, "Modern Heuristic Optimization Techniques, Theory and Applications to Power Systems," John Wiley & Sons Inc., 2008.
- [34] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std. 1547-2003, Jul. 2003.
- [35] IEEE Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.3, Nov. 2007.
- Distribution Systems in presence of DG Using MLP Neural Networks," 2009 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 26-30 July 2009, Calgary, Alberta, Canada, pp. 1-8.
- [19] R. Tamizkar, S.A.M. Javadian, M.-R. Haghifam, "Distribution System Reconfiguration for Optimal Operation of Distributed Generation," International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP2009), 9-11 June 2009, Capri, Italy, pp. 217-222.
- [20] S.A.M. Javadian, A. M. Nasrabadi, M.-R. Haghifam, J. Rezvantalab, "Determining Fault's Type and Accurate Location in Distribution Systems with DG Using MLP Neural Networks," International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP2009), 9-11 June 2009, Capri, Italy, pp. 284-289.
- [21] S.A.M. Javadian and M.-R. Haghifam, P. Barazandeh, "An Adaptive Over-current Protection Scheme for MV Distribution Networks Including DG," Proc. ISIE08 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 30th June to 2nd July 2008, Cambridge, UK, pp. 2520-2525.
- [22] N. Rezaei, M.-R. Haghifam, "Protection scheme for a distribution system with distributed generation using neural networks," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 30, Issue 4, May 2008, pp. 235-241.
- [23] Jiang J-A, Liu Y-H, Liu C-W, Yang J-Z, Too T-M, "An adaptive fault locator system for transmission lines," IEEE PES summer meeting, vol. 2, 1999. pp. 930-936.
- [24] A. Meshal, A. Al-shaher, M. Manar, B. Sabry, S. Ahmad, S. Saleh, "Fault location in multi-ring distribution network using artificial neural network," Electric Power Systems Research, vol. 64, 2003 pp. 87-92.
- [25] M. Baran, I. El-Markabi, "Adaptive over current protection for distribution feeders with distributed generators," in Proc. IEEE Power engineering Society Power Systems Conference and Exposition, pp. 715-719, 2004.
- [26] M. E. Baran and I. El-Markaby, "Fault analysis on distribution feeders with distributed generators," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20 (4), pp. 1757-1764, 2005.
- [27] M.-R. Haghifam, H. Falaghi, O. P. Malik, "Risk-based distributed generation placement," IET Generation Transmission Distribution, 2008, 2, (2), pp. 252-260.
- [28] X. Wu, Y. Lu, J. Du, "Wide area current protection for distribution feeders with distributed generation," DPRT 2008, 6-8 April 2008, Nanjing, China, pp. 2558-2563.
- [29] L. Comassetto, D. P. Bernardon, L. N. Canha, A. R. Abaide, "Software for automatic coordination of