**یک روش تطبیقی به عنوان حفاظت پشتیبان خطوط انتقال با استفاده از PMU با هدف بهبود عملکرد زون 3 رله دیستانس**

**علیرضا صفاریان ,[[1]](#footnote-1)1، علی سوایی 2، محمود جورابیان 3، سید محمدموسوی فرد 4**

**1- استادیار، گروه مهندسي برق، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران ،اهواز، a.saffarian@scu.ac.ir**

**2- دانشجوی دکتری ، گروه مهندسي برق، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران ،اهواز، alisavaei@gmail.com**

**3- استاد، گروه مهندسي برق، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران ،اهواز، mjoorabian@scu.ac.i**r

4- **شرکت سهامی برق منطقه‌ای خوزستان، mohammad\_mousavifard@yahoo.com**

**خلاصه**

این مقاله یک روش حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده را برای خطوط انتقال ارائه می‌دهد. در این روش کل شبکه با توجه به نحوه‌ی جانمایی PMUها و آرایش شبکه، به تعدادی زون‌های حفاظتی پشتیبان (BPZ) تقسیم می‌شود. با وقوع خطا، جریان‌های توالی مثبت و صفر ورودی به BPZ نسبت به شرایط پیش از خطا، به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می‌یابند و لذا بر این اساس BPZ خطادار قابل شناسایی است. سپس با توجه به آنکه در هنگام شرایط تنش شبکه (تداخل بار، نوسان توان و ...)، تمامی رله‌های یک BPZ همزمان خطا را در زون‌های خود نمی‌بینند، خطا بودن اغتشاش یا تنش‌بودن آن بررسی و در صورت خطا بودن آن، نوع خطا نیز تعیین می‌گردد. نهایتا با استفاده از روش حداقل مربعات و داده‌های ولتاژ و جریان دریافتی از PMUها، خط خطادار و محل آن تعیین می‌شود. به منظور بررسی کارآمدی روش، رویکرد پیشنهادی در شبکه‌های نمونه 9 شینه IEEE، سیستم 39 شینه New England و همچنین شبکه خوزستان تست و ارزیابی شده است. نتایج نشان از قابلیت روش در تعیین BPZ خطادار و محل دقیق خطا، تمایز بین شرایط تنش و خطا، تعیین محل خطا در خطوط سه ترمیناله و همچنین وابستگی بسیار کم به مقاومت خطا را دارد.

25 mm

30 mm

**کلمات کليدي:** رله­های دیستانس، عملکرد زون 3، حفاظت ناحیه گسترده ، واحد اندازه­گیری فازور (**PMU**)**،** زون حفاظتی پشتیبان (BPZ)

# 1. مقدمه

در سال‌های اخیر شبکه‌های برق با هدف تامین برق اقتصادی و با قابلیت اطمینان بالا، با وسعت و پیچیدگی روزافزونی روبروشده اند و نزدیک به محدودیت‌هایشان نیز بهره برداری می‌شوند. با این وجود، این سیستم‌ها در صورت وقوع اغتشاشات شدید، مستعد عملکرد اشتباه هستند. مطالعه و بررسی خاموشی‌های اخیر نشان می‌دهند که این خاموشی‌ها عمدتا ناشی از عملکرد اشتباه رله‌های حفاظتی نظیر عملکرد زون 3 رله دیستانس در حین وجود تنش‌هایی نظیر تداخل بار، نوسان توان و ... هستند. این تصمیم نادرست رله‌ها، منجر به افزایش تنش در شبکه و متعاقبا خرابی‌ها و قطعی‌های آبشاری می‌شود [1-4]. رله‌های دیستانس اغلب از اندازه‌گیری‌های محلی استفاده کرده و شرایط آن‌ها با توجه به شرایط سیستم قدرت، تطبیق داده نمی‌شود، با یکدیگر در ارتباط نبوده و مقاومت خطا را در نظر نمی‌گیرند [5]. لذا به نظر می‌رسد نیاز به وجود و ارائه‌ی راهکارهایی جدید، برای طرح‌های حفاظت‌های پیشتیبان نوآورانه‌ای می‌باشد.

یکی از پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی، معرفی و استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) می‌باشد که فازور سنکرون ولتاژ و جریان را ارائه می‌دهد. با استفاده از این PMUها، اندازه‌گیری و حفاظت ناحیه گسسترده (WAMPAC) در سطح شبکه قدرت، میسر شده که کاربردهایی نظیر طرح‌های حفاظت ویژه، تخمین حالت، میرایی نوسانات و ... را داراست [6, 7]. روش‌های مورد استفاده برای حفاظت ناحیه گسترده ممکن است از وضعیت رله‌های موجود در شبکه [8]، ولتاژ[9]، ولتاژ و جریان [10] برای حفاظت پشتیبان خطوط و بهبود عملکرد رله‌ی دیستانس استفاده کنند.

معمولاً در طرح‌های بلوکه کردن رله دیستانس در شرایط نوسان توان از نرخ تغییر امپدانس برای تشخیص نوسان توان استفاده می­شود. اما در این روش تنظیم مناسب تایمر به علت تغییر فرکانس نوسان از 1/0 تا 5 هرتز مشکل می­باشد. محدودیت دیگر این روش مربوط به آشکارسازی خطا در زمان نوسان توان است. برای غلبه بر این مشکل در [11] روشی به نام r-dot برای تشخیص نوسان توان از خطا ارائه شده است، اما زمان تصمیم­گیری آن طولانی است. روش آشکارسازی خطا که در [12] ارائه شده است از یک مؤلفه اضافه جریان برای تشخیص خطا استفاده می­کند که عملکرد آن در زوایای توان نزدیک به 180 درجه و برای خطاهای مقاومت بالا صحیح نمی­باشد.

هنگام اضافه‌بار، هر ناحیه حفاظتی که برد طولانی­تری داشته باشد، بیشتر در معرض تداخل مشخصه بار و ناحیه عملکردی رله قرار می‌گیرد که می‌تواند منجر به تریپ نابجا گردد. شکل مشخصه رله، برای پرهیز از این حالات ناخواسته مهم می­باشد. معمولاً با انتخاب دقیق محدوده ناحیه سه، از تداخل بار در وضعیت عادی سیستم جلوگیری می­شود. با انتخاب مشخصه چهارضلعی برای رله، خطاهای مقاومتی را نیز پوشش داده شده و از تداخل مشخصه بار و مشخصه امپدانسی جلوگیری می‌شود. اما تنظیم شکل مشخصه رله در یک سیستم بزرگ مسئله­ای پیچیده می­باشد. در [1] روشی پیشنهاد شده که از نرخ تغییر ولتاژ نسبت به زمان استفاده می­کند؛ اما این روش نیاز به تعیین دقیق مقادیر آستانه دارد تا قادر به تشخیص کلیدزنی خط، کلیدزنی خازن و راکتور باشد. در [13] روش­هایی مبتنی بر سیستم‌های عصبی- فازی و ماشین بردار پشتیبان ارائه شده که عیب این روش­ها نیاز به تعداد زیادی الگوی اولیه و قادر نبودن به تشخیص حالت خطا از دیگر حالت­های تنش در شبکه در صورت ایجاد تغییرات در شبکه می­باشد. در [14] روشی مبتنی بر تبدیل موجک پیشنهاد شده است. عملکرد مناسب این روش­ها، وابسته به انتخاب مناسب تابع تبدیل موجک می­باشد.

در بسیاری از طرح‌های معرفی شده، به علت استفاده از اندازه­گیری­های محلی، رله‌های دیستانس در تشخیص خطا از دیگر وقایع دچار خطا می­شوند. از سوی دیگر، برای تشخیص خطا از شرایط مختلف تنش در شبکه قدرت یک روش جامع و کامل مورد نیاز است.

در مقاله پیش رو، روشی ترکیبی جدیدی برای تشخیص خطا و تمایز آن از تنش‌هایی نظیر نوسان توان و تداخل بار و نهایتا یافتن محل خطا، ارائه شده است. ابتدا یک روش بهینه‌سازی برای کمینه کردن تعداد PMUهای نصب شده، استفاده می‌شود [15]. این کار باعث غلبه بر مشکل محدودیت فضای ذخیره‌سازی و زیرساخت‌های ارتباطی می‌شود. سپس الگوریتم پیشنهادی ارایه می‌گردد. بخش اول الگوریتم پیشنهادی، آشکارسازی اغتشاش و تمایز آن از تنش‌های شبکه و تعیین ناحیه حفاظتی پشتیبان(BPZ) دارای خطا [16] و بخش دوم لگوریتم یافتن خطا خطادار و محل خطا در آن خط است [5]. این روش به عنوان پشتیبان حفاظت اولیه خط، قابل استفاده است.

بخش‌های مختلف مقاله در ادامه بدین شرح است: در بخش دوم روش حفاظتی پیشنهادی و مراحل آن توصیف می‌گردد. نتایج تست روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های نمونه شامل سیستم 39 شینه New England و همچنین شبکه خوزستان در بخش سوم، ارائه شده است. نهایتا در بخش چهارم، مقاله با ارائه‌ی نتیجه‌گیری پایان می‌یابد.

# 2- روش حفاظتی پیشنهادی

روش حفاظتی پیشننهادی در این مقاله، دارای رویکردی سه لایه برای حفاظت خطوط انتقال است. در لایه‌ی اول، ضمن بررسی تمامی BPZها از نظر وقوع اغتشاش در آن‌ها، BPZ دارای اغتشاش توسط الگوریتم اولیه آشکار می‌شود. در لایه‌ی دومِ طرح حفاظتی، خطا از دیگر تنش‌های شبکه تمایز داده شده و بررسی می‌شود که آیا اغتشاش آشکارشده در الگوریتم اولیه، خطا است یا خیر. نهایتا الگوریتم ثالثیه نیز محل خطا را اعلام می‌کند.

به بیان دیگر، برای اجرای الگوریتم در وهله‌ی اول، می‌بایست پس از جایابی بهینه PMUها، شبکه‌ را به نواحی‌ حفاظتی با نام نواحی حفاظتی پشتیبان یا به اختصار BPZ (Back Up protection Zone) تقسیم کرد. سپس توسط الگوریتم‌های اولیه، ثانیه و ثالثیه به ترتیب BPZ دارای اغتشاش، BPZ خطادار و محل خطا را شناسایی کرد.

در ادامه روش و مبانی عملکرد هر یک از این لایه‌ها، با نام‌های الگوریتم اولیه، ثانویه و ثالثیه توضیح داده می‌شود.

## 1-2 جایابی بهینه PMUها

جایابی بهینه PMUها، با هدف مشاهده پذیربودن شبکه حین خطا، صورت می‌گیرد. واضح است که جایابی با هدف یادشده، متفاوت از جایابی در شرایط عادی شبکه خواهد بود. بدین منظور می‌بایست محل نصب PMUها را به نحوی در شبکه تعیین نمود که ضمن استفاده از کمترین تعداد PMU، شبکه در حین خطا نیز مشاهده پذیر گردد. با توجه به پیشرفت تکنولوژی، فرض می‌شود PMU نصب شده در یک شین، ولتاژ فاز در باس مربوطه و جریان را در خطوط متصل به این شین را اندازه گیری می­کند [17]. هدف اصلی مشاهده پذیر بودن شبکه با حداقل تعداد PMU می­باشد. صورت مسأله برای یک سیستم n باسه به صورت زیر می­باشد:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |
| (2) |  |

xبردار متغیر باینری، i شماره باس، Wi ارزش PMU نصب شده در باس iام است. xi برابر با یک است اگر در شین شماره i، PMU داشته باشیم و در غیر این صورت، برابر صفر است. f(x) تابع برداری و عدد یک در سمت دیگر علامت نامساوی، در واقع برداری تماماً شامل عدد یک است [18].

در ادامه می­توان قیدهایی به مسأله اضافه نمود تا اهداف بیشتری را در بر بگیرد. جزئیات بیشتر از شبیه‌سازی این روش به همراه قیدهای دیگری نظیر قید وجود باس‌های تزریق صفر و قید ترکیب باس‌های ترانسفورماتوری در شبکه‌های نمونه در مرجع [15] توسط همین نویسندگان بررسی شده است. در ادامه از نتایج جایابی PMU، ارائه شده در همان مقاله مذکور، برای بررسی عملکرد الگوریتم‌های اولیه، ثانویه و ثالثیه استفاده می‌شود.

## 2-2 تقسیم شبکه به BPZهای مختلف

پس از جایابی بهینه PMU ها در شبکه، شبکه می‌بایست به چندین ناحیه حفاظتی یا BPZ تقسیم‌بندی شود. شکل BPZها، به نحوه چینش PMU ها در شبکه و آرایش خود شبکه بستگی دارد. هر BPZ شامل مجموعه‌ای از خطوط و باس‌ها می‌باشد که به وسیله باس‌های دارای PMU محاصره شده‌اند. به این معنی که باس‌های مرزی در هر BPZ الزاماً دارای PMU می‌باشند [5].

## 3-2 الگوریتم اولیه تعیین ناحیه خطا

هدف این الگوریتم یافتن باس‌های نزدیک به محل خطا است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، همه باس­های مرزی در یک BPZ دارای PMU هستند بنابراین کلیه جریان­های ورودی به هر BPZ با این PMU ها اندازه‌گیری می‌شوند. پس اگر خطایی در k امین BPZ رخ بدهد، مجموع جریان­های توالی صفر و مثبت ورودی به این BPZ افزایش یافته و به میزان قابل‌ملاحظه‌ای از مقادیر جریان­ها پیش از وقوع خطا بیشتر خواهد بود. اگر جریان­های ورودی به یک BPZ از یک مقدار آستانه بیشتر باشد، در آن BPZ خطا رخ داده است؛ بنابراین اگر معادله زیر برای یک BPZ صدق کند، در آن BPZ خطا رخ داده است.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| (3) | |  |  |
| (4) |  | |  |

بیان‌کننده جریان توالی s ورودی به k امین BPZ بوده و جریان آستانه خطا برای k امین BPZ در توالی s ام می­باشد. نیز جریان توالی s خط l می­باشد که به‌وسیله PMU اندازه‌گیری می­شود. مقادیر جریان آستانه را می­توان با کمک فرمول­های زیر به دست آورد [5]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (5) |  |  |
| (6) |  |  |

اندیس­های صفر و یک بیانگر توالی­های صفر و یک هستند. ثابتی است که کمترین مقدار را بیان می­کند و مقدار آن بین صفر و یک پریونیت است. در BPZ هایی که بار وجود ندارد، مقدار برابر با خواهد بود. با استفاده از مطالعات حالت گذرای سیستم به دست می­آید. در هر لحظه مقدار برابر با مقدار میانگین در یک دقیقه آخر خواهد بود. و ضریب­های ثابتی هستند که و را مشخص می­کنند. این الگوریتم از طرح حفاظتی رله اضافه جریان الهام گرفته شده است؛ بنابراین نقش جریان pick up در رله­های اضافه جریان جهتی را دارد. و نیز همانند جریان­های pick up فاز و زمین در رله­های اضافه جریان جهتی مشخص می­گردند. به‌بیان‌دیگر مقدار بین صفر و یک و مقدار بین یک و دو خواهد بود؛ بنابراین با توجه به دو معادله پیشین، با جایگذاری ، جریان آستانه k امین BPZ با توجه به شرایط سیستم به دست می­آید؛ بنابراین امنیت و قابلیت اطمینان الگوریتم تشخیص ناحیه خطا تضمین شده است [5].

اگر در باس­های ژنراتوری سیستم PMU وجود نداشته باشد، امکان این که BPZ ها را از PMU ها جدا کنیم وجود نخواهد داشت و ممکن است BPZ ها با یک یا چند ژنراتور تداخل داشته باشند. اگر خطایی در یکی از این BPZ ها اتفاق بیفتد، الگوریتم تشخیص ناحیه خطا، قادر نخواهد بود که وقوع خطا را در این ناحیه­ها تشخیص دهد؛ زیرا جریان محل خطا از سمت ژنراتورهای موجود در BPZ نیز تغذیه می­گردد؛ بنابراین به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم تشخیص خطا در شبکه­های انتقال هوشمند، باس­های ژنراتوری می­بایست به PMU مجهز شوند.

## 2-4 الگوریتم ثانویه تعیین ناحیه خطا با در نظر گرفتن احتمال وقوع وضعیت تنش در شبکه

حال که وقوع اغتشاش در شبکه تشخیص داده شده و گروه­های با بیشترین Idis نیز شناسایی شده­اند، می­بایست وضعیت رخداد خطا از وضعیت تنش در شبکه تشخیص داده شود. الگوریتمی که در این قسمت استفاده شده مبتنی بر امپدانس ظاهری است. گروهی که بیشترین انحراف را در مقدار Idis دارد انتخاب شده و امپدانس ظاهری در آن محاسبه می‌شود. امپدانس با استفاده از فازورهای ولتاژ و جریانی که توسط PMU اندازه‌گیری شده است، محاسبه می­گردد. نقاط اندازه‌گیری سیستم به‌گونه‌ای هستند که zone های عملکرد رله در نقاط مختلف اندازه‌گیری همپوشانی دارند. ایده اصلی الگوریتم این بخش به این صورت است که به‌عنوان مثال برای خطای رخ‌داده در zone 3 در گروهی که بیشترین میزان انحراف را در Idis دارد، مسیر امپدانس محاسبه‌شده در رله­های باس­های P (باس‌های دارای PMU) آن گروه وارد ناحیه zone 3 رله دیستانس می­گردد اما اگر به‌جای خطا یکی از حالت­های نوسان توان رخ‌داده بود، در همه باس­های P یک گروه، مسیر امپدانس وارد ناحیه zone 3 نمی­گردد. پارامتر Zd با استفاده از فرمول زیر برای هر خط انتقال متصل به باس‌های اندازه‌گیری محاسبه می­گردد [16]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (7) |  |  |

زمانی که مقدار امپدانس محاسبه‌شده توسط باس P کمتر از میزان تنظیمی رله باشد، مقدار این پارامتر کمتر از یک می­گردد. هنگام وقوع خطا مقدار Zd همه باس­های P در یک گروه کمتر از یک خواهد بود.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (8) |  |  |

Zset1ln، Zset2ln و Zset3ln مربوط به تنظیمات zone 1، zone 2 و zone 3 مربوط به l امین خط متصل به n امین باس اندازه‌گیری هستند. معیار آشکارساز خطا که با پارامتر fd محاسبه می­گردد، به‌صورت زیر محاسبه می­گردد:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (9) |  |  |
| (10) |  |  |

محاسبه این معیار با کمک همه باس­های اندازه‌گیری موجود در یک گروه صورت می­گیرد. به هر اندازه‌گیری یک وزن W اختصاص داده شده که بستگی به امپدانس ظاهری دارد. درصورتی‌که امپدانس ظاهری کمتر از مقدار تنظیمی رله باشد با توجه به اینکه این مقدار از کدام‌یک از مقادیر zone ها کمتر باشد، یک وزن منفی به Zd اختصاص داده می­شود. درصورتی‌که امپدانس محاسبه‌شده بیشتر از مقدار تنظیمی zone 3 باشد، وزن اختصاص داده‌شده مثبت خواهد بود. هنگام بروز خطا مقدار fd منفی خواهد بود زیرا همه رله­های موجود در گروه مربوطه، امپدانس ظاهری را کمتر از میزان تنظیمی خود خواهند دید؛ اما در دیگر وضعیت­های اغتشاش در شبکه، این معیار مثبت خواهد بود. ممکن است که هنگام وقوع خطا یکی از رله­ها خطا را در zone 2 یا zone 3 خود ببیند اما دیگر رله­ها خطا را در این zone تشخیص ندهند. به همین دلیل یک وزن منفی بیشتر برای این zone ها در نظر گرفته شده است. انتخاب وزن­ها بر این اساس صورت گرفته که گستره zone 3 تا انتهای خط مجاور را در بر می­گیرد و zone 2 حدود 100 تا 120 درصد از طول خط انتقال و zone 1 حدود 80 درصد از خط انتقال را در بر می­گیرد. هدف از این الگوریتم جلوگیری از عملکرد اشتباه zone 3 می­باشد بنابراین به zone های پایین­تر وزن بیشتری اختصاص داده می­شود[16].

## 5-2 الگوریتم ثالثیه تشخیص محل خطا با هدف تعیین دقیق خط خطادار و محل دقیق وقوع خطا

هدف این الگوریتم شناسایی خط انتقالی در BPZ است که در آن خطا رخ داده است. طبق الگوریتم پیشنهادی برای جایابی بهینه PMU و تقسیم‌بندی BPZ ها، همه باس­های مرزی در BPZ ها مجهز به PMU هستند و در باس­های داخلی هیچ PMU نصب نشده است. در الگوریتم ثالثیه، ناحیه­ای که در آن خطا رخ‌داده را می­توان به‌صورت یک زیر شبکه در نظر گرفت که از طریق باس­های مرزی حاوی PMU به بقیه قسمت­های شبکه متصل شده و بقیه شبکه به‌صورت منابع جریان معادل مدل شده است. نهایتا در این روش با استفاده از اصول مداری و روش حداقل مربعات، بردار مجهول u، که المان‌های آن به صورت زیر است محاسبه می‌شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |

با معلوم شدن و محاسبه این بردار، مقدار مجهول x با تقسیم ستون دوم ماتریس فوق بر ستون اول آن قابل محاسبه است. x فاصله محل خطا تا یکی از باس‌های دو طرف شین خطادار است. جزئیات این روش در [5] توضیح داده است.

همان گونه که بیان شد هدف اصلی این الگوریتم تشخیص خط انتقالی از BPZ است که در آن خطا رخ داده است. این الگوریتم ابتدا فرض می­کند که خطا در یک خط انتقال اتفاق افتاده است. سپس با این فرض، فاصله محل خطا یا x را به دست می­آورد. اگر x بین صفر و یک بود نتیجه می­گیرد که خطا در خط اتفاق افتاده است. این رویه برای کلیه خطوط موجود در یک BPZ تکرار می­شود. اگر الگوریتم خطا را در بیش از یک خط انتقال تشخیص داد، با کمک فرمول زیر مقدار خطای باقیمانده را برای هر خط محاسبه می­کند.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (12) |  |  |
| (13) |  |  |

که m و H بردارهای معلومی از المان‌های شبکه و جریان‌ها هستند که در [5] معرفی شده­اند. هر خط انتقالی که u محاسبه‌شده آن تطابق بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده داشته باشد به‌عنوان خط دارای خطا معرفی می­گردد. به‌بیان‌دیگر هر خطی که خطای باقیمانده کمتری داشته باشد به‌عنوان خطی که خطا در آن اتفاق افتاده معرفی می­شود. یادآرو می‌شود که برای اجرای الگوریتم مقدار هفت ضرب داخلی را محاسبه کنیم؛ بنابراین این الگوریتم بار محاسباتی بسیار کمی داشته و به‌سرعت می­تواند محل خطا را مشخص نماید.

شایان ذکر است در هنگام شبیه‌سازی و تست بر روی شبکه خوزستان، به ناچار برای حل مسئله‌ی حداقل مربعات، روش از حداقل مربعات به روش تجزیه QR تغییر داده شد تا دقت لازم به دست آید. همچنین با توجه به معادلات فوق، به‌جای خطای باقی‌مانده نسبی تخمین، از معیار نُرم خطا استفاده شد. نرم بردار u به صورت زیر محاسبه می‌شود:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (14) |  |  |

نهایتا فلوچارت روش پیشنهادی مطابق شکل 1 قابل ترسیم است [5].



شکل 1 فلوچارت طرح پیشنهادی برای الگوریتم تشخیص محل خطا [5]

# 3- نتایج شبیه‌سازی و تست الگوریتم بر روی شبکه‌های نمونه

مطابق توضیحات ارائه شده در بخش قبل، روش عملکرد الگوریتم بدین صورت است که ابتدا باید در شبکه، PMUها جانمایی و سپس BPZها تشکیل شود و با کاهش شبکه، مدار ساده شده‌ی مربوط به هر BPZ به دست آید. سپس داده‌های مربوط به تمامی PMUهای شبکه (ولتاژها و جریان‌ها)، توسط الگوریتم اولیه ارزیابی تا BPZ دارای اغتشاش شناسایی شود. در مرحله‌ی بعد، توسط الگوریتم ثانویه، نوع خطا را تشخیص داده و بین خطا و دیگر شرایط تنش‌ احتمالی (نظیر نوسان توان، تداخل بار و ...)، تمایز قائل شود. سپس در صورت تایید وجود خطا، توسط الگوریتم ثالثیه محل دقیق خطا و خط خطادار شناسایی شود.

در این بخش ابتدا، الگوریتم مذکور بر روی شبکه‌ی 9 شینه‌ی IEEE تست و ارزیابی می‌گردد و نتایج آن در ادامه ارائه خواهد شد.

شبکه 9 شینه IEEE در شکل 2 نشان داده شده است. این شبکه، سه شین تزریق صفر، سه ترانسفورماتور و سه شین ژنراتوری وجود دارد. نتیجه جایابی PMU‌ها بر روی این شبکه با استفاده از روش توضیح داده شده در بخش 2-1 با قید حذف ترانسفورماتورها و در نظر گرفتن شین‌های تزریق صفر و قید داشتن PMU در شین­های ژنراتوری این خواهد شد که نصب PMU در شین‌های B4، B7و B9 این شبکه لازم است. ترانسفورماتورهای حذف‌شده در جایابی بهینه PMU در سیستم 9 شینه IEEE ترانس‌های دو طرف شین‌های 4-3، 9-2 و 7-1 او شین باقیمانده پس از حذف ترانسفورماتورهای مذکور به ترتیب 4، 9 و 7 می‌باشد. نهایتا، BPZهای این شبکه نیز در شکل 2 نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با توجه به تعداد PMUها که سه عدد هستند، برای این شبکه، سه عدد BPZ با نام‌های BPZ1، BPZ2 و BPZ3 تشکیل می‌شود که به ترتیب خطوط 3و 4، خطوط 1 و 2 و خطوط 5 و 6 را شامل می‌شوند.



شکل 2 شبکه 9 شینه IEEE

در ادامه به عنوان نمونه به ازای چند خطای مختلف، عملکرد الگوریتم بررسی می‌گردد.

## 1-3 اعمال خطای تک‌فاز در یکی از خطوط BPZ1 شبکه‌ی 9 شینه IEEE

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم، ابتدا یک خطای تکفاز، در 50 درصدی خط 3 (خط 7-8) در شبکه 9 شینه IEEE اعمال می‌شود. شماره خطوط و شین‌های این شبکه و BPZها در شکل 2 مشخص‌شده و مطابق شکل، این خط در BPZ1 واقع‌شده است. این خطا در لحظه‌ی 1/0 ثانیه اعمال و در لحظه‌ی 2/0 ثانیه پاک می‌شود.

**1-1-3 بررسی عملکرد الگوریتم اولیه (تعیین BPZ خطادار در شبکه)**

بر اساس مطالب بیان‌شده ابتدا الگوریتم اولیه باید پیاده‌سازی شود تا BPZ خطادار را در شبکه شناسایی کند. ازآنجایی‌که خط خطادار در BPZ1 واقع است، باید مقدار Disturbance Status در زمان خطا و برای این BPZ برابر یک گردد و در بقیه­ی زمان‌ها و دیگر BPZها این معیار صفر باشد. مقدار Disturbance Status زمانی که شرط درج‌شده در رابطه (3) برآورده شود برابر یک می‌شود و در غیر این صورت مقدار صفر را دارد. برای بررسی شرط درج‌شده در رابطه (3)، لازم است ابتدا برای هر BPZ جریان‌های آستانه و محاسبه شوند. برای محاسبه این جریان‌های آستانه، بر اساس توضیحات داده‌شده در بخش 2 و [16]، پارامترهای ، و به ترتیب برابر 2/0، 2/1 و p.u.2/0 در نظر گرفته‌شده‌اند. مقدار متوسط قبل از وقوع خطا که برای محاسبه لازم است، از انجام پخش بار قبل از وقوع حادثه به دست ‌می‌آید. مقادیر آستانه محاسبه‌شده برای هر BPZ و مقدار جریان ورودی به هر BPZ در لحظات مختلف در شکل 3 نشان داده‌شده است. ملاحظه می‌گردد که فقط در BPZ1 جریان‌های ورودی توالی مثبت و صفر، از مقدار آستانه­ی این جریان‌ها بیشتر است و لذا در این BPZ معیار وضعیت اغتشاش یک می‌شود. مقدار این معیار برای هر سه BPZ نیز به‌صورت جداگانه در شکل 4 نشان داده‌شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مطابق این نمودارها فقط BPZ1، خطادار است. شایان‌ذکر است که در این شبیه‌سازی‌ها نرخ نمونه‌برداری 5 میلی‌ثانیه است. لذا ازنظر زمانی نیز بلافاصله پس از وقوع خطا (یعنی به‌اندازه‌ی یک نمونه یا 5 میلی‌ثانیه)، مقدار شاخص از صفر به سمت یک حرکت کرده است و 5 میلی‌ثانیه پس از رفع خطا نیز مقدار شاخص به مقدار صفر بازگشته است.

درشکل 3 (ب و ج) مشاهده می‌گردد که مقدار جریان آستانه توالی صفر در مقدار 2/0 پریونیت ثابت شده است. علت آن است که مقدار متوسط جریان توالی صفر در این BPZها قبل از وقوع خطا از جریان حداقل تنظیم‌شده برای آن BPZ () کمتر است و لذا مقدار جریان آستانه توالی صفر BPZ2 و BPZ3، برابر می‌شود.



شکل 3- نمودار مقایسه جریان‌های آستانه مؤلفه مثبت و صفر با مجموع جریان‌های مؤلفه مثبت و صفر واردشده به (الف) BPZ1، (ب) BPZ2 و (ج) BPZ3 به همراه نمودار وضعیت اغتشاش به ازای خطای تکفاز به زمین در فاز A خط 3 واقع در BPZ1



شکل 4 نمودار شاخص وضعیت اغتشاش مربوط به (الف) BPZ1، (ب) BPZ2 و (ج) BPZ3 به ازای خطای AG خط 3 واقع در BPZ1

**2-1-3 بررسی عملکرد الگوریتم ثانویه (تشخیص خطا از شرایط تنش در BPZ خطادار)**

بر اساس توضیحاتی که در خصوص عملکرد الگوریتم ثانویه در بخش 2 بیان شد، برای واکاوی نحوه عملکرد الگوریتم ثانویه بهتر است امپدانس دیده‌شده توسط رله‌های دیستانس فرضی واقع در شین‌های مرزی BPZ خطادار ترسیم شوند.

برای این منظور، نمودار R-X برای رله­های PMUدار BPZ1 یعنی رله‌ی واقع در خط شماره 3 و شین 7 (B7L3) و همچنین رله‌ی واقع در سمت دیگر یعنی خط شماره 4 و شین 9، توسط کدهای متلب که برای پیاده‌سازی الگوریتم اولیه و ثانویه خطا نوشته شده­‌اند استخراج گردیده‌اند. این نمودارها به ترتیب در شکل 5-الف و ج نمایش داده‌شده‌اند. علامت \* در این شکل‌ها نشان‌دهنده‌ی محل امپدانس دیده‌شده در شروع شبیه‌سازی است.



شکل 5 نمودار R-X به ازای وقوع خطای تکفاز در خط 3 واقع در BPZ1 برای الف) رله واقع در شین 7 خط 3 توسط نرم افزار متلب (کدهای نوشته شده)، ب) رله شین 7 خط 3 توسط نرم افزار دیگسایلنت، ج) شین 9 خط 4 د) شین 7 خط 2 ه) شین 4 خط 1 و) شین 4 خط 6 ز) شین 9 خط 5

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، رله واقع در شین 7 خط 3 خطای رخ‌داده در وسط خط 3 را در ناحیه 1 خود دیده است و رله واقع در انتهای خط مجاور (رله شین 9 خط 4) این خطا را در ناحیه 3 خود دیده است. همچنین شکل 5-ب معادل با شکل 5-الف است، با این تفاوت که این شکل، خروجی نرم‌افزار دیگسایلنت است. تطابق بین این دو شکل، نشان از صحت محاسبات دارد. لذا در ادامه از ارائه­ی نمودار مسیر امپدانسی نرم­افزار دیگسایلنت صرف‌نظر شده است.



شکل 6- نمودار معیار Fd (سمت چپ) و معیار وضعیت خطا (سمت راست) برای BPZ1 (بالا)، BPZ2 (وسط ب) و BPZ3 (پایین) بر حسب زمان به ازای وقوع خطای تک فاز به زمین AG در خط 3 ( واقع در BPZ1) در شبکه‌ی 9 شینه‌ی IEEE

مسیر امپدانسی دیده‌شده توسط برخی رله­های دیگر این شبکه در حین این خطا، نیز در همان شکل 5-الف رسم شده است. واضح است که دیگر رله‌های خطوط دیگر شبکه بسته به موقعیت خود نسبت به خط خطادار، باید خطا را خارج از ناحیه 1 خود یا خارج از هر سه ناحیه خود برای رله‌های خطوط دور یا در پشت سر خود ببینند. نتایج نشان داده‌شده در این شکل‌ها نیز این‌چنین هستند. شایان‌ذکر است که از این به بعد، رله‌ها را با نام شین و خط متناظرشان نام‌گذاری می‌شوند مثلاً رله‌ی B7L3 یعنی رله‌ی واقع در شین 7 و خط 3.

حال باید تشخیص داده شود که آیا این اغتشاش، خطا است یا خیر. با توجه به اینکه رله‌های BPZ1، خطا را در ناحیه‌های خود می­بینند انتظار داریم که در BPZ1 شاخص Fd منفی و معیار وضعیت خطا (Fault Status) برای فاز A، برابر یک باشد و در دیگر BPZها، این معیار صفر باشد. در شکل 6 (نمودارهای سمت چپ)، معیار Fd محاسبه‌شده برای BPZ1، BPZ2 و BPZ3 نشان داده‌شده است. در هر یک از این شکل‌ها، مقدار Fd به‌دست‌آمده برای 6 واحد رله دیستانس مشخص‌شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، مقدار این معیار در بازه‌ی زمانی خطا فقط برای فاز A در BPZ1، منفی است.

از سویی دیگر میدانیم که منفی شدن Fd سبب یک شدن معیار وضعیت خطا (Fault Status) می‌شود. در شکل 6 (نمودارهای سمت راست)، به ترتیب از بالا به پایین، نمودار معیار وضعیت خطای محاسبه‌شده برای BPZ1، BPZ2 و BPZ3 نشان داده‌شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، فقط وضعیت خطای فاز A در BPZ1، برابر یک است که بیانگر آن است که خطا در BPZ1 و در فاز A آن رخ‌داده است. ضمناً همان‌گونه که در شکل 6 ملاحظه می‌گردد، بازه زمانی وقوع خطا از لحظه‌ی 1/0 ثانیه تا لحظه‌ی 2/0 ثانیه است. زمان یک شدن و صفر شدن الگوریتم نیز به ترتیب 105/0 و 205/0 ثانیه است به‌بیان‌دیگر تأخیر الگوریتم به‌اندازه‌ی یک نمونه یا 5 میلی‌ثانیه است.

**3-1-3 بررسی عملکرد الگوریتم ثالثیه برای این خطا**

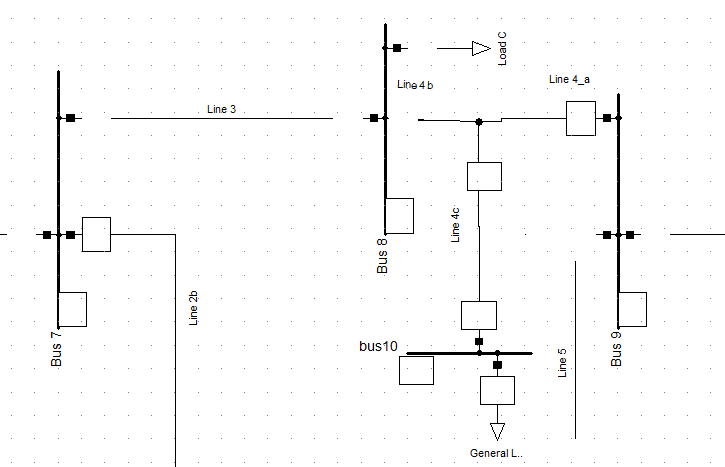
مطابق شکل 7 الگوریتم به درستی محل خطا را در 50 درصدی خط، تخمین می‌زند.



شکل 7: نمودار زمان-محل تخمینی خطا به ازای اعمال خطای AG در خط 3 و در فاصله‌ی 0.5 pu از شین 7 در شبکه‌ی 9 شینه‌ی IEEE

## 2-3 عملکرد الگوریتم در خط سه ترمیناله

به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم در خطوط چند ترمیناله، یک خط سه ترمیناله به‌جای خط 4، در BPZ1 قرار داده شد. بخش مربوطه از شبکه‌ی 9 شینه، که به آن خط سه ترمیناله اضافه‌شده است، در شکل 8 نشان داده‌شده است. بر روی یکی از این خطوط یعنی خط 4a، و در فاصله‌ی 80 درصدی از ترمینال خط سه ترمیناله، یک خطای سه فاز در لحظه‌ی 2/0 ثانیه اعمال و در لحظه‌ی 3/0 ثانیه پاک شد. برای تشخیص خط خطادار، اطلاعات PMUهای BPZ1 به الگوریتم داده می‌شود. شایان‌ذکر است که در محاسبات، ترمینال خط سه ترمیناله به‌عنوان یک شین در نظر گرفته می‌شود و سپس ماتریس امپدانس آن محاسبه می‌شود.



شکل 8- قرار دادن خط سه ترمیناله به‌جای خط 4 شبکه‌ی 9 شینه IEEE

با این فرض که الگوریتم فرض کند محل خطا، همان خط 4a است و محاسبات محل خطا برای این خط انجام شود، همان‌گونه که نمودار محل خطا-زمان (شکل 9- ج) نشان می‌دهد؛ الگوریتم محل خطا را در فاصله‌ی 73/80 درصدی از ترمینال خط سه ترمیناله، به دست آورده است؛ به‌بیان‌دیگر خطای تخمین در این حالت، 73/0 درصد است. همچنین نمودار محل خطا به همراه باقی‌مانده نسبی خطای تخمین برای تمام خطوط BPZ1، در شکل 9 رسم شده است. همان‌گونه که از این شکل ملاحظه می‌گردد، کمترین مقدار j در لحظات وقوع خطا، مربوط به خط 4a است. لذا این خط، خط خطادار محسوب می‌شود.



شکل 9 - نمودار محل خطا در خطوط مختلف BPZ1 شبکه‌ی 9 شینه دارای خط سه ترمیناله هنگام اعمال خطای سه فاز در خط 4a

## 3-3 بررسی عملکرد الگوریتم اولیه و ثانویه در حین تداخل بار

افزایش بار ممکن است منجر شود که مسیر امپدانسی برخی رله‌ها وارد ناحیه 3 عملکرد شان شود. این پدیده به اصطلاح تداخل بار نامیده می‌شود. رله دیستانس ممکن است این اتفاق را اشتباهاً وقوع خطا تصور کند و سیگنال قطع را بریکرهای خود ارسال کند. برای شبیه‌سازی این حالت، باید سیستم در حالت تنش پرباری باشد؛ و سپس تغییر بار ناگهانی در یک یا چند شین رخ دهد.

برای شبیه‌سازی این حالت در شبکه 9 شینه، بار شین‌های مختلف زیاد شد در لحظه‌ی t=2s باری به‌صورت ناگهانی به شین 8 اضافه شد. همان‌گونه که در شکل 10 نمایش داده‌شده است، مسیر امپدانس وارد ناحیه 3 رله‌ی واقع در شین 7 خط 7-8 می‌شود. حال باید داده­ها به الگوریتم داده شود تا بررسی گردد که الگوریتم این حالت را به‌عنوان خطا می‌بیند یا خیر.

|  |  |
| --- | --- |
| الف) رله‌ی B7L3 | ب) رله‌ی B9L4 |

شکل 10- مسیر امپدانسی رله‌ها به ازای وقوع تداخل بار الف) رله‌ی B9L4 یعنی رله‌ی واقع بر شین 9 -خط 4 ب) رله‌ی B7L3یعنی رله‌ی واقع بر شین 7 –خط3



شکل 11 نمودار وضعیت اغتشاش BPZ1 (الف)، BPZ2 (ب) و BPZ3 (ج) در شرایط تداخل بار به ازای ورود ناگهانی بار به شین 8 در لحظه‌ی t=2s

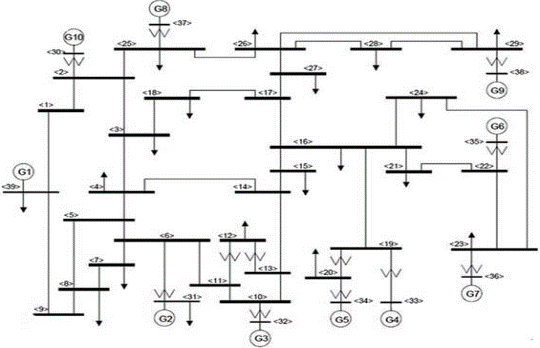
وضعیت اغتشاش BPZهای مختلف شبکه، در شکل 11 نمایش داده‌شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد این معیار فقط برای BPZ1، برابر یک می‌گردد که حاکی از تغییر ناگهانی جریان ورودی به این BPZ است. حال باید بررسی گردد که این اغتشاش خطا است یا خیر. نمودار Fd و وضعیت خطا برای BPZ1 در شکل 12 ارائه‌شده است. ملاحظه می‌گردد که به دلیل مثبت بودن معیار Fd، الگوریتم به‌درستی این حالت را خطا تشخیص نمی‌دهد. علت آن است که رله‌های موجود در این BPZ به‌طور هم‌زمان حادثه را درون ناحیه‌های خود نمی‌بیند.



شکل 12- نمودار معیار Fd (شکل الف) و وضعیت اغتشاش (شکل ب) برای BPZ1 در شرایط تداخل بار به ازای ورود ناگهانی بار به شین 8 در لحظه‌ی t=2s در شبکه‌ی 9 شینه‌ی IEEE

## 4-3 بررسی عمکرد طرح حفاظتی پیشنهادی در حین نوسان توان

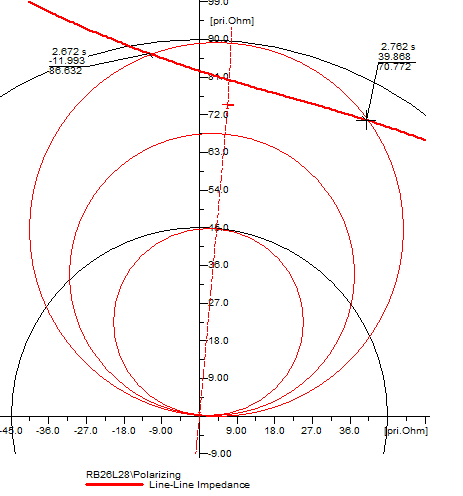
همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، رله‌های دیستانس در حین رخداد نوسان توان نباید عملکرد داشته باشند. در این بخش عملکرد الگوریتم در حین رخداد نوسان توان‌های مختلف بررسی می‌گردد. یادآور می‌گردد رله‌های دیستانس در نوسان‌های پایدار و ناپایدار نباید عملکرد داشته باشند تا رله‌ی مربوطه (خروج از همگامی)، عملکرد داشته باشد.



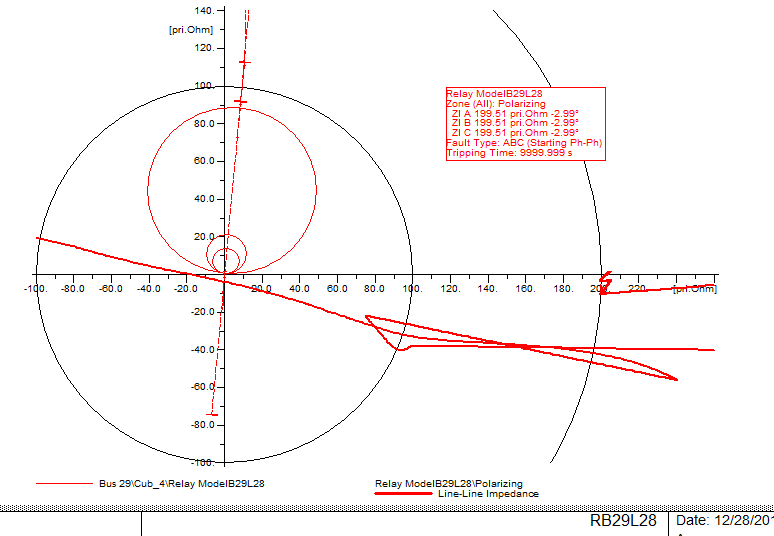
شکل 13- شبکه 39 شینه New England [16]

بدین منظور در شبکه‌ی 39 شینه (که در شکل 13 نشان داده شده است) و در خط 26-29 (BPZ17)، خطایی سه فاز در لحظه‌ی t=1.65s ایجاد و در لحظه‌ی t=1.8s رفع شد. یادآور می‌شود مطابق مرجع [15] محل بهینه PMUها در باس‌های B2,B4,B7,B8,B11,B13,B16,B18,B19,B22,B24,B26,B28,B39 است و بر این اساس دو BPZ مورد استفاده در این بخش، BPZ9 که شامل خطوط 26-28 و 28-29 و همچنین BPZ17 که فقط دارای خط 26-29 است، می‌باشند. در این شرایط، ژنراتور G09، ناپایدار می‌شود، درحالی‌که بقیه پایدار هستند.

مشخصه‌های امپدانسی رله‌های واقع در شین‌های PMUدار BPZ9، در شکل‌هایشکل 14 و شکل 15 نمایش داده‌شده است. ملاحظه می‌گردد که مسیر امپدانسی وارد ناحیه 3 رله‌ی R26-28 می‌شود و وارد ناحیه رله‌ی دیگر نمی‌شود. حال باید عملکرد الگوریتم در این حالت بررسی گردد.



شکل 14- نمودار مسیر امپدانسی رله R26-28 در هنگام خطا در خط 26-29به همراه زمان ورود و خروج به ناحیه 3 (به‌دست‌آمده از نرم‌افزار دیگسایلنت)



شکل 15- نمودار مسیر امپدانسی رله R29-28 در هنگام خطا در خط 26-29به همراه زمان ورود و خروج به ناحیه 3 رله دیستانس (به‌دست‌آمده از نرم‌افزار دیگسایلنت)

پس تا به اینجا خطایی در BPZ17 ایجاد شد که موجب شد مسیر امپدانسی وارد ناحیه 3 یکی از رله­های موجود در BPZ9، شود. حال باید بررسی شود که آیا الگوریتم در این حالت، برای BPZ9 خطایی را شناسایی می­کند یا خیر.

نمودار وضعیت اغتشاش BPZ9 در شکل 16 نمایش داده‌شده است. ملاحظه می‌گردد در لحظاتی این نمودار برابر یک می‌شود که بیانگر وقوع اغتشاش است. حال باید بررسی گردد که آیا این اغتشاش، خطا است یا خیر.

نمودار معیار Fd مربوط به این حالت در شکل 17-الف نمایش داده‌شده است. ملاحظه می‌گردد که این معیار هیچ‌گاه منفی نمی‌گردد. پس وقوع خطا در این BPZ منتفی می‌باشد. نمودار وضعیت خطا نیز که در شکل 17-ب نمایش داده‌شده است، مؤید این نتیجه است.



شکل 16 نمودار وضعیت اغتشاش در BPZ9 به ازای وقوع نوسان توان

|  |  |
| --- | --- |
| **الف) نمودار معیار** | **ب) نمودار وضعیت خطا** |

شکل 17 نمودار وضعیت خطا و معیار Fd برای واحدهای فازی شبکه 39 شینه در BPZ9 در حین نوسان توان الف) نمودار معیار ب) نمودار وضعیت خطا

## 5-3 بررسی عملکرد طرح حفاظتی در شبکه خوزستان

به منظور بررسی بیشتر صحت و کیفیت عملکرد الگوریتم، عملکرد آن در شبکه خوزستان نیز تست شد. بدین منظور اطلاعات مربوط به تعدادی از حوادث واقعی شبکه خوزستان دریافت شد. به دلیل عد دسترسی به اطلاعات دو طرف خط، زمان وقوع و رفع خطا از داده‌های واقعی استخراج و حادثه توسط نرم افزار Digsilent Power Factory شبیه‌سازی شد. از اطلاعات حاصله برای ارزیابی کیفیت عملکرد الگوریتم استفاده شد.

به عنوان نمونه‌، یک یاز این حوادث در 1/0 ثانیه به‌صورت خطای تک فاز BG در 20 درصدی خط ER905 رخ می­دهد. در 15/0 ثانیه رفع شده و در 16/0 ثانیه، بریکرهای دو طرف خط باز می­شود. در ادامه عملکرد الگوریتم برای این حادثه بررسی می‌گردد. شایان ذکر است با توجه به آنکه دو طرف خط مذکور، PMU جانمایی شده است این خط به عنوان یک BPZ تک خطی، به حساب می‌آید. این BPZ، BPZ10 نامیده می‌شود.

**1-3-5 عملکرد الگوریتم اولیه**

انتظار می­رود که وضعیت خطای BPZ10، در بازه­ی خطا به دلیل کمتر شدن جریان آستانه­ی BPZ از جریان ورودی، یک شود. نمودار مقایسه جریان­های آستانه و ورودی و همچنین نمودار وضعیت اغتشاش BPZها، به ترتیب در شکل­هایشکل 18 و شکل 19 نشان داده‌شده است که مؤید آن است که در بازه­ی خطا و با تأخیر یک نمونه، وضعیت اغتشاش BPZ10 یک شده و وضعیت اغتشاش دیگر BPZ ها در کل بازه صفر است.



شکل 18- نمودار مقایسه جریان‌های آستانه مؤلفه مثبت و صفر با مجموع جریان‌های ورودی مؤلفه مثبت و صفر برای BPZ10 به ازای خطای BG در خط ER905 واقع در BPZ10



شکل 19 نمودار وضعیت اغتشاش BPZ10 به ازای خطای BG در خط ER905 واقع در BPZ7 (حادثه واقعی 4)

|  |  |
| --- | --- |
| **الف) نمودار معیار** Fd **برای** BPZ10 | ب) نمودار وضعیت خطای |

شکل 20 معیار Fd (شکل الف) و وضعیت خطا (شکل ب) برای BPZ10 به ازای خطای BG در خط ER905 واقع در BPZ10

**1-3-5 عملکرد الگوریتم ثانویه برای حادثه واقعی 4**

با توجه به آنکه خطا از نوع فاز B به زمین است، انتظار داریم در BPZ7 در لحظات خطا معیار Fd واحد BG منفی و متعاقب آن وضعیت خطای آن واحد برابر یک گردد. نمودار معیار Fd و وضعیت خطای BPZ7، به ترتیب در شکل 20- الف و ب نشان داده ‌شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که معیار Fd واحد BG منفی شده و لذا وضعیت خطای آن واحد یک می‌گردد. لذا الگوریتم به‌درستی وقوع خطا را از اغتشاش تمایز می­دهد.

**1-3-5 عملکرد الگوریتم ثالثیه برای حادثه 4**

نمودار محل تخمینی خطا برای تنها خط واقع در BPZ10 به صورت فاصله از شین امیدیه 2 و فاصله از شین شهید عباسپور در شکل 21 ارائه‌شده اند. ملاحظه می­گردد که الگوریتم محل خطا را 04/20 درصدی شین امیدیه 2 تخمین می­زند که بیانگر خطای تخمین 02/0 درصدی است. همچنین فاصله­ی تخمینی خطا از شین شهید عباسپور نیز 86/79 است که بیانگر خطای تخمین 14/0 درصدی است. به هر حال خطای تخمین کمتر از 14/0 درصد است. شایان ذکر است حدود یک بودن مجموع فاصله­ی تخمینی خطا از دو شین دو طرف خط خطادار (ER905)، نشان از صحت برنامه نوشته شده و عملکرد الگوریتم دارد.



شکل 21 نمودار محل تخمینی خطا به ازای خطا روی خط ER905 الف) فاصله‌ی محل خطا تا شین شهید عباسپور ب) فاصله تا شین امیدیه 2

# 4. نتيجه­گيري

در این مقاله، یک طرح حفاظت پشتیبان ناحیه گسترده برای خطوط انتقال ارائه شده است. این طرح از اطلاعات PMUهای نصب شده در شبکه و ماتریس امپدانس BPZها به جای داده‌های محلی و امپدانس خط خطادار استفاده می‌کند. این طرح در مقایسه یا دیگر طرح‌های مبتنی بر PMUT، از PMU کمتری استفاده میکند. همچنین این طرح خود را با شرایط سیستم قدرت، تطبیق می‌دهد.

از شبکه‌های نمونه 9 شینه IEEE، سیستم 39 شینه New England و همچنین شبکه خوزستان به عنوان یک شبکه واقعی و بزرگ، به منظور بررسی و ارزیابی کیفیت عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده حاکی از قابلیت روش پیشنهادی در تعیین دقیق محل خطا و BPZ خطادار به ازای انواع مختلف خطاها، مکان‌های مختلف وقوع خطا و خطاهای با مقاومت بالا، تمایز بین وقوع خطا یا شرایط تنش (نظیر نوسان توان وتداخل بار)، مکان‌یابی خطا در خطوط سه ترمیناله است. با توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و اندازه‌گیری‌های ناحیه گسترده، طرح پیشنهادی در شبکه‌های هوشمند نیز قابل استفاده است.

# 5. قدرداني

این طرح از محل قرارداد پژوهشی شماره 5065013/95 شرکت سهامی برق منطقه‌ای خوزستان حمایت مالی شده است. بدین‌وسیله از این شرکت تقدیر و تشکر می‌شود.

# 6. مراجع

[1] Jonsson, M. and J.E. Daalder, "An adaptive scheme to prevent undesirable distance protection operation during voltage instability", IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): p. 1174-1180.

[2] Sahoo, B., et al., "An Effective Zone-3 Supervision of Distance Relay for Enhancing Wide Area Back-up Protection of Transmission System", IEEE Transactions on Power Delivery, 2020.

[3] Powergrid, “Report of the enquiry committee on grid disturbance in northern region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern and North-Eastern Region on 31st July 2012,” New Delhi, India, Tech Rep, GRID\_ENQ\_REP\_16\_8\_12, 2012.

[4] NERC, Disturbance Reports, North American Electric Reliability Council, NJ, USA, 2001.

[5] Neyestanaki, M.K. and A.M. Ranjbar, "An Adaptive PMU-Based Wide Area Backup Protection Scheme for Power Transmission Lines", IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): p. 1550-1559.

[6] A. G. Phadke and J. S. Thorp, "Synchronized Phasor Measurements and Their Applications", New York, NY, USA: Springer, 2008.

[7] Chen, M., et al., "Research on a Distance Relay-Based Wide-Area Backup Protection Algorithm for Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): p. 97-105.

[8] Sharafi, A., M. Sanaye-Pasand, and S.M. Hashemi, "Improved zone-3 distance protection based on adjacent relays data", International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 29(2).

[9] Yu, F., et al., "Wide-area backup protection and protection performance analysis scheme using PMU data", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 110, p. 630-641.

[10] Dobakhshari, A.S., "Fast accurate fault location on transmission system utilizing wide-area unsynchronized measurements", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 101, p. 234-242.

[11] Gao, Z.D. and G.B. Wang. "A new power swing block in distance protection based on a microcomputer-principle and performance analysis", International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-91, 1991.

[12] Apostolov, A.P., D. Tholomier, and S.H. Richards. "Superimposed components based sub-cycle protection of transmission lines", in IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.

[13] Seethalekshmi, K., S.N. Singh, and S.C. Srivastava, "A Classification Approach Using Support Vector Machines to Prevent Distance Relay Maloperation Under Power Swing and Voltage Instability", IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): p. 1124-1133.

[14] Brahma, S.M., "Distance Relay With Out-of-Step Blocking Function Using Wavelet Transform", IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): p. 1360-1366.

15. مهدی حاجوی، علیرضا صفاریان، محمود جورابیان، "جایابی بهینه واحدهای اندازه گیری فازور (PMU) با هدف رویت پذیری خطا در شبکه انتقال"، اولین همایش بین المللی مهندسی برق, اولین همایش بین المللی مهندسی برق،علوم کامپیوتر و فناوری اطلاعات، همدان، 1396.

[16] Kundu, P. and A.K. Pradhan, "Synchrophasor-Assisted Zone 3 Operation", IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): p. 660-667.

[17] ABB, "Technical Reference Manual-Phasor measurement terminal RES521\*1.0", Vasteras, Sweden, 2008.

[18] Xu, B. and A. Abur. "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs", in IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.

1. **علیرضا صفاریان**

   **Email: a.saffarian@scu.ac.ir** [↑](#footnote-ref-1)