

ارائه طرح جدیدی برای حفاظت ریز شبکه AC مبتنی بر زاویه فاز تفاضلی مؤلفه تحمیلی خطای جریان

ساسان علیلو^۱ توحید غنی زاده بلندی^۲ داریوش نظریور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران
sasan_aliloo@yahoo.com

۲- استادیار-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران
t.ghanizadehbolandi@urmia.ac.ir

۳- استاد-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران
d.nazarpour@urmia.ac.ir

چکیده: ریز شبکه‌ها برای مدیریت فنی و اقتصادی نفوذ منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع طی دهه اخیر مطرح شده‌اند. ارائه یک طرح حفاظتی اولیه با امنیت و قابلیت اعتماد مناسب برای ریز شبکه‌های جریان متناوب به دلیل استفاده از انواع تکنولوژی‌های تولید پراکنده یک مساله چالش برانگیز است. در این مقاله یک طرح حفاظتی جدید و مستقل با استفاده از اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون جریان به دست آمده از باس‌های ریز شبکه برای تشخیص انواع خطاهای اتصال کوتاه داخلی از خارجی در مکان‌های مختلف ارائه می‌شود. عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی در شرایط بهره‌برداری مختلف ریز شبکه (در حالت اتصال و انفصال از شبکه) و با ورود و خروج DG ها و تغییر سطح نفوذ آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا شاخص جدیدی مبتنی بر زاویه فاز تفاضلی مؤلفه‌های تحمیلی خطای جریان اندازه‌گیری شده از دو باس ریز شبکه برای تشخیص خطاهای اتصال کوتاه از شرایط غیر خطا ارائه می‌گردد. عملکرد شاخص پیشنهادی روی سیستم ۱۵ باسه استاندارد به ازای شرایط مختلفی نظیر خطاهای با مقاومت بالا و تغییر سطح نفوذ منابع تولید پراکنده در حالت اتصال و انفصال ریز شبکه ارزیابی می‌شود. نتایج به دست آمده نشانگر توانمندی و برتری طرح پیشنهادی در حفاظت مطمئن ریز شبکه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ریز شبکه AC، حفاظت، اندازه‌گیری‌های فازور سنکرون، منابع تولید پراکنده، مؤلفه‌های تحمیلی خطا.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.131

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر توحید غنی زاده بلندی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - ارومیه - جاده سرو - دانشگاه ارومیه - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر - گروه مهندسی برق قدرت

۱- مقدمه

• انگیزه پژوهش

در سال‌های اخیر عواملی نظیر محدودیت‌های بهره‌برداری از منابع سوخت فسیلی، چالش‌های زیست‌محیطی و مسائل فنی باعث شده است تا استفاده از منابع تولید پراکنده و انرژی‌های تجدید پذیر رشد بالایی در شبکه‌های توزیع برق داشته باشند. به منظور مدیریت نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در شبکه و با هدف ارتقای تاب‌آوری^۱ و قابلیت اطمینان شبکه در مقابل حوادث، شکل‌گیری ریزش‌بکه‌ها در سیستم‌های توزیع رواج پیدا کرده است. یکی از چالش‌های بهره‌برداری از ریزش‌بکه‌ها ارائه یک طرح حفاظتی مناسب و مستقل برای ریزش‌بکه می‌باشد تا بتواند قابلیت اطمینان مناسبی در تشخیص انواع خطاهای ریزش‌بکه طی شرایط بهره‌برداری مختلف ایجاد کند [۱]. به دلیل متفاوت بودن فرآیندهای کنترلی و بهره‌برداری ریزش‌بکه‌ها، طرح‌های حفاظتی مرسوم و قدیمی شبکه‌های توزیع متداول نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای حفاظتی ریزش‌بکه باشد [۲]. بنابراین نیاز است تا طرح‌های حفاظتی مستقل و مناسبی برای حفاظت ریزش‌بکه‌ها در شرایط بهره‌برداری مختلف (با انواع منابع تولید پراکنده و طی شرایط متصل و یا منفصل از شبکه) ارائه شود. در این قسمت به مرور و بررسی برخی از طرح‌های حفاظتی ارائه شده برای ریزش‌بکه‌های جریان متناوب می‌پردازیم.

• مروری بر پژوهش‌های پیشین

طرح‌های حفاظتی که قبلاً ارائه شده‌اند عمدتاً مبتنی بر رله‌های اضافه جریان یا رله‌های دیفرانسیلی و یا مبتنی بر رله‌های دیستانس می‌باشند که غالباً نمی‌توانند برخی از چالش‌های حفاظتی ریزش‌بکه را پاسخگو باشند. سطح جریان اتصال کوتاه در ریزش‌بکه عمدتاً با توپولوژی ریزش‌بکه و مد کاری ریزش‌بکه و حتی شرایط خطا تغییر می‌کند که این عوامل باعث ایجاد محدودیت در عملکرد رله‌های اضافه جریان می‌شود. برای غلبه بر این مسئله معمولاً طرح حفاظت تطبیقی ارائه شده است. در مرجع [۳] یک طرح حفاظتی ارائه شده است که تنظیمات تریپ رله اضافه جریان را بسته به شرایط ریزش‌بکه بروزرسانی می‌کند. عیب عمده این طرح پاسخ زمانی بالای آن است و نمی‌تواند عملکرد به موقع داشته باشد. همچنین این طرح با تغییر سطح نفوذ DG پاسخ مناسبی ارائه نمی‌دهد. در مرجع [۴] طرح ولتاژ محدود شده مبتنی بر رله اضافه جریان ارائه شده است که دامنه جریان‌های DG را در طول شرایط خطا تا ترمیم مجدد ریزش‌بکه محدود می‌کند. این طرح برای ریزش‌بکه‌های مستقل عملکرد خوبی دارد ولی برای ریزش‌بکه‌هایی که قابلیت اتصال به شبکه دارند عملکرد خوبی ارائه نمی‌دهد. در مرجع [۵] نیز یک طرح حفاظتی تطبیقی مبتنی بر رله اضافه جریان با سطح نفوذ بالای DG ارائه شده است که از نواقص آن در نظر نگرفتن حالت کاری جزیره‌ای ریزش‌بکه است. در مرجع [۶] نیز یک مدل حفاظتی مبتنی بر استخراج اطلاعات برای

خطاهای موازی ارائه شده است که در هر دو حالت متصل به شبکه و منفصل از شبکه کارایی خوبی دارد ولی در خطاهای امپدانس بالا عملکرد درستی ارائه نمی‌دهد. در مرجع [۷] یک طرح حفاظتی مبتنی بر رله دیفرانسیل و بر اساس مؤلفه‌های توالی ارائه شده است که از تکنیک استخراج اطلاعات برای تشخیص خطا استفاده شده است. این طرح فقط برای ریزش‌بکه‌هایی مناسب است که یکپارچه از تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر استفاده شده است و فقط برای ریزش‌بکه مستقل مناسب است؛ همچنین با تغییر سطح نفوذ DG عملکرد خوبی ندارد. در مرجع [۸] یک طرح حفاظتی مبتنی بر رله دیفرانسیل ارائه شده است. در این طرح رله طوری تنظیم شده است که وقتی که مقدار دیفرانسیل جریان از ده درصد مقدار نامی تجاوز کند رله عمل می‌کند. این طرح در خطاهای امپدانس بالا عملکرد خوبی ندارد. در کل ارائه یک طرح حفاظتی مبتنی بر رله دیفرانسیل با تنظیمات یکسان برای شرایط کاری متفاوت ریزش‌بکه بسیار دشوار است. طرح‌های حفاظتی مبتنی بر رله دیستانس از روش‌های مهم در حفاظت خطوط انتقال می‌باشند. اما استفاده از طرح‌های مبتنی بر رله دیستانس در ریزش‌بکه‌ها با چالش‌هایی همراه است. در مرجع [۹] طرح حفاظت مبتنی بر رله دیستانس ارائه شده است. این طرح صرفاً برای ریزش‌بکه‌های دارای تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر ارائه شده است. در مرجع [۱۰] طرح حفاظتی مبتنی بر رله دیستانس ارائه شده است که عملکرد محدودی در حالت جزیره‌ای ریزش‌بکه و نیز خطاهای امپدانس بالا دارد. در مرجع [۱۱] استفاده از رله‌های دیستانس در ریزش‌بکه‌ها مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفته است که مشاهده شده است که عملکرد تولیدات پراکنده و ورود و خروج آنها و نیز تغییر سطح نفوذ آنها در ریزش‌بکه در دقت محاسبه امپدانس و مقاومت خطا تأثیر منفی می‌گذارند. در مرجع [۱۲] طرح حفاظتی مبتنی بر انحراف جریان خطا در حالت دائم برای حفاظت اولیه و پشتیبان ارائه شده است. این طرح برای خطاهای مقاومت بالا نتیجه مطلوبی ندارد. در مرجع [۱۳]، تکنیک تشخیص خطا مبتنی بر تابع مونیتورینگ حالت گذرا که از دیتاهای جریان‌های اینورتر بدست آمده، ارائه شده است.

برای غلبه بر مشکلات روش‌های مرسوم و قدیمی در حفاظت ریزش‌بکه استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) به صورت اندازه‌گیری‌های ناحیه گسترده در ریزش‌بکه در حال رشد می‌باشند. در مرجع [۱۴]، طرح تشخیص خطای سریع با استفاده از محاسبات تخمین حالت مبتنی بر PMU ارائه شده است. در این طرح یک شبکه استاندارد سه فاز ۱۰ کیلوولت مورد مطالعه قرار گرفته است که شامل تولیدات پراکنده است و دستگاه‌های PMU در همه باس‌ها نصب شده است. این طرح از مقادیر لحظه‌ای بدست آمده از PMU‌ها برای تشخیص وقوع خطا و مکان خطا استفاده می‌کند. از معایب این طرح پاسخ زمانی بالای آن می‌باشد. هزینه نصب PMU‌ها یکی از موانع استفاده از آنها در شبکه توزیع است. در مرجع [۱۵]، مفهوم μ -PMU برای ایجاد حفاظت ناحیه گسترده برای ریزش‌بکه معرفی شده است.

PMU ها کلیه ویژگی های PMU های مرسوم را دارند و با توجه به هزینه پایین می توانند کاربرد وسیعی در شبکه های توزیع داشته باشند. در مرجع [۱۶]، یک طرح حفاظت ناحیه گسترده مبتنی بر μ -PMU و زاویه فاز ارائه شده است. نرخ تغییر زاویه فاز ولتاژ بین نقطه مشترک و نزدیکترین باس به نقطه خطا در دو حالت جزیره ای و متصل به شبکه برای تشخیص خطا استفاده شده است. در مرجع [۱۷] یک طرح حفاظتی مبتنی بر PMU و درصد افت ولتاژ برای تشخیص و دسته بندی خطاها در ریزشبهه ارائه شده است. در مرجع [۱۸] یک تکنیک مکان یابی خطا مبتنی بر امپدانس و استخراج اطلاعات از طریق μ -PMU ها که در باس های ریزشبهه نصب شده اند ارائه شده است. در این روش دقت تشخیص مکان خطا برای خطاهای با مقاومت بزرگتر از ۱۰۰ اهم کاهش می یابد.

• ضرورت انجام پژوهش مبتنی بر چالش های موجود

با بررسی پژوهش های پیشین انجام شده در زمینه حفاظت ریزشبهه های جریان متناوب می توان دریافت که ارائه یک طرح حفاظتی مطمئن که بتواند در شرایط مختلف بهره برداری ریزشبهه و با حضور انواع تولیدات پراکنده، امنیت و قابلیت پاسخگویی مناسبی را داشته باشد همچنان جزو اولویت های اصلی محققین در سال های اخیر بوده است. چالش هایی همچون ضرورت تشخیص انواع مختلف اتصال کوتاه ها در مکان های مختلف در ریزشبهه، ارائه طرح های حفاظتی قابل کاربرد در دو مد بهره برداری ریزشبهه در حالت ها متصل و منفصل از شبکه، بررسی تاثیر تغییر سطح نفوذ انواع منابع تولید پراکنده و تشخیص خطاهای مقاومت بالا جزو اولویت ها و جهت گیری های اصلی طرح های حفاظتی ارائه شده برای ریزشبهه های جریان متناوب بوده است.

• نوآوری و سهم اصلی مقاله

در مقاله [۱۹]، استفاده از زاویه فاز مؤلفه های سوپریمپوز جریان به عنوان یک تکنیک حفاظتی مناسب برای حفاظت خطوط انتقال بلند جبران شده سری معرفی شد که الگوریتم پیشنهادی موفقیت مناسبی در حفاظت سریع خطوط جبران شده سری داشت. در این مقاله به دنبال ارائه یک طرح حفاظتی جدید و مستقل با استفاده از اندازه گیری های فازور سنکرون توالی مثبت جریان به دست آمده از تجهیزات اندازه گیری فازور سنکرون نصب شده در باس های ریزشبهه جریان متناوب هستیم تا در شرایط بهره برداری مختلف ریزشبهه (در حالت اتصال و انفصال از شبکه) با ورود و خروج DG ها و تغییر سطح نفوذ آن ها، انواع خطاهای اتصال کوتاه داخلی از خارجی را در مکان های مختلف تشخیص بدهیم. در این راستا با استفاده از مؤلفه های تحمیلی خطای جریان به دست آمده از باس های ابتدا و انتهای خطوط ریزشبهه شاخص جدیدی مبتنی بر دیفرانسیل زاویه فاز مؤلفه های تحمیلی خطای جریان معرفی می گردد تا بتواند ضمن تشخیص انواع خطاهای اتصال کوتاه، عملکرد مطلوبی در حالت جزیره ای ریزشبهه، خطاهای با مقاومت بالا و تغییر در سطح نفوذ منابع

تولید پراکنده داشته باشد. به طور خلاصه نوآوری طرح حفاظتی پیشنهادی به شرح ذیل است:

- تشخیص انواع خطاهای داخلی از خارجی در مکان های مختلف ریزشبهه مجهز به انواع منابع تولید پراکنده؛
- تشخیص خطاهای اتصال کوتاه با مقاومت بالا؛
- کارایی موفق حفاظت ریزشبهه در حالت های اتصال و انفصال از شبکه؛
- عدم تأثیر از تغییر سطح نفوذ منابع تولید پراکنده؛
- تشخیص فاز معیوب و تسهیل تریپ تکفاز.

• سازمان دهی مقاله

سازمان مقاله و بخش بندی قسمت های مختلف آن به این شرح است: روش حفاظتی پیشنهادی و اثبات عملکرد آن در خطاهای داخلی و خارجی و طرح حفاظتی مبتنی بر شاخص پیشنهادی در بخش ۲ ارائه شده است. بخش ۳ به ارائه نتایج شبیه سازی روی شبکه ۱۵ باسه استاندارد با لینک کردن دو نرم افزار PSCAD و MATLAB به ازای سناریوهای مختلف می پردازد و در نهایت بخش ۴ نتیجه گیری از مقاله را ارائه می کند.

۲- روش حفاظتی پیشنهادی

طرح حفاظتی پیشنهادی برای ریزشبهه AC یک شاخص جدیدی تحت عنوان دیفرانسیل زاویه فاز مؤلفه خطای جریان به دست آمده از ۲ باس ابتدا و انتهای هر خط ریزشبهه (DPAFCC) ارائه می کند. این شاخص از مؤلفه های تحمیلی خطای جریان برای تشخیص خطاهای داخلی از خطاهای خارجی استفاده می کند. در این مقاله از جریان های اندازه گیری شده سه فاز توسط μ PMU های نصب شده در باس های شبکه برای استخراج مؤلفه های تحمیلی خطا استفاده می شود. شاخص حفاظتی پیشنهادی از قدرمطلق اختلاف زاویه فازوری مؤلفه های تحمیلی خطای جریان دو باس ریزشبهه به صورت رابطه زیر به دست می آید:

$$DPAFCC = |\Delta \bar{I}_m - \Delta \bar{I}_n| \quad (1)$$

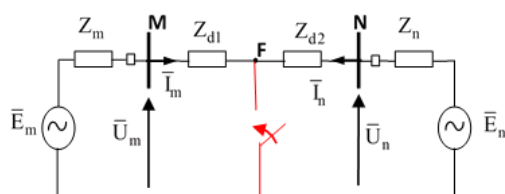
به طوریکه $\Delta \bar{I}_m$ و $\Delta \bar{I}_n$ به ترتیب مؤلفه های فازوری خطای جریان به دست آمده از باس ابتدایی m و باس انتهایی n از خط حفاظت شونده در ریزشبهه می باشند. زاویه فاز مؤلفه های تحمیلی خطای جریان های به دست آمده از دو باس ریزشبهه در این رابطه نمونه به نمونه تفاضل گیری شده و مقدار قدرمطلق زاویه دیفرانسیلی به عنوان مبنای تشخیص خطاهای داخلی از خارجی با یک مقدار آستانه مقایسه می شود.

۲-۱- استخراج مؤلفه های تحمیلی خطا

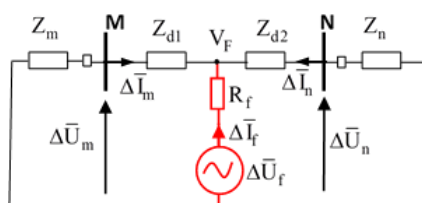
بر اساس قضیه جمع آثار در سیستم های الکتریکی، می توان هر سیستم قدرتی را که در شرایط خطا قرار دارد، به صورت حاصل جمع

توالی مثبت جریان‌های به دست آمده در باس‌های M و N ریزشبهه، $\Delta \bar{I}_m$ و $\Delta \bar{I}_n$ به ترتیب مؤلفه‌های خطای توالی مثبت فازوری جریان-

های باس‌های M و N ریزشبهه، $\Delta \bar{U}_m$ و $\Delta \bar{U}_n$ به ترتیب مؤلفه‌های خطای توالی مثبت فازوری ولتاژهای باس‌های M و N ریزشبهه، \bar{E}_m و \bar{E}_n به ترتیب مؤلفه‌های فازوری توالی مثبت ولتاژهای تونن به دست آمده از دید باس‌های M و N ریزشبهه، Z_m و Z_n به ترتیب امپدانس تونن توالی مثبت شبکه و منابع متصل از دید باس M و N ، Z_d امپدانس توالی مثبت خط حفاظت شونده در ریزشبهه، R_f مقاومت خطا، V_F ولتاژ توالی مثبت محل خطا، $\Delta \bar{U}_f$ و $\Delta \bar{I}_f$ به ترتیب مؤلفه خطای ولتاژ و جریان تزریقی در محل خطا می‌باشد.



(الف-۲)



(ب-۲)

شکل (۲): مدار معادل ریزشبهه دارای خطای داخلی (الف-۲) و شبکه

مؤلفه خطای توالی مثبت آن (ب-۲)

با نوشتن KVL در حلقه‌های سمت راست و چپ شبکه مؤلفه خطای نشان داده شده در شکل (ب-۲) بر حسب ولتاژ محل خطا روابط زیر به دست می‌آیند:

$$V_F = -(Z_m + Z_{d1}) \Delta \bar{I}_m \quad (3)$$

$$V_F = -(Z_n + Z_{d2}) \Delta \bar{I}_n \quad (4)$$

با توجه به برابری روابط (۳) و (۴) خواهیم داشت:

$$-(Z_m + Z_{d1}) \Delta \bar{I}_m = -(Z_n + Z_{d2}) \Delta \bar{I}_n \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \bar{I}_m}{\Delta \bar{I}_n} = \frac{(Z_n + Z_{d2})}{(Z_m + Z_{d1})} \quad (6)$$

با توجه به رابطه (۴) اختلاف زاویه فاز بین مؤلفه‌های خطای فازوری جریان‌های جاری شده از باس‌های M و N به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

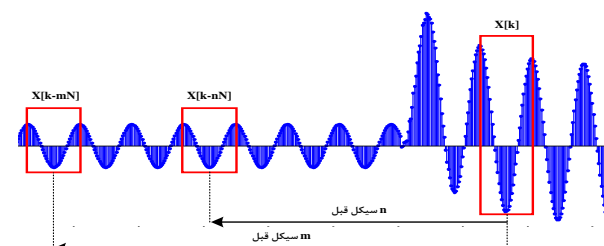
$$\angle \Delta \bar{I}_m - \angle \Delta \bar{I}_n = \angle (Z_n + Z_{d2}) - \angle (Z_m + Z_{d1}) \quad (7)$$

در رابطه (۷)، در عمل زاویه فاز امپدانس‌های تونن Z_m و Z_n به دلیل اینکه کل امپدانس‌های شبکه بالادست را نیز مدل می‌کند نزدیک به ۹۰ درجه می‌باشد. زاویه فاز امپدانس خط توزیع در ریزشبهه نیز

دو سیستم تجزیه و تحلیل کرد. یکی از این سیستم‌ها که با حذف همه‌ی تغییرات در ولتاژ و جریان‌های ناشی از خطا بدست می‌آید، سیستم قبل از خطا (بدون عیب) بوده و دیگری که فقط براساس تغییرات ناشی از خطا در پارامترهای اساسی همچون ولتاژ و جریان شکل می‌گیرد، سیستم تحمیلی خطا نام دارد. مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان بدست آمده از طرف ثانویه‌ی ترانس‌های اندازه‌گیری پس از طی مراحل ابتدایی پردازش سیگنال در رله‌های دیجیتال از جمله فیلتر کردن، تبدیل آنالوگ به دیجیتال و نمونه‌برداری به صورت یک سیگنال دیجیتال $x[k]$ با N نمونه در هر سیکل به عنوان خروجی داده می‌شود. با وجود اینکه برای نحوه‌ی استخراج مؤلفه‌های تحمیلی خطا (در فرکانس قدرت) روش‌های مختلف ارائه شده است، رابطه زیر می‌تواند به عنوان کامل‌ترین روش برای محاسبه‌ی این مقادیر با در نظر گرفتن اختلاف نمونه‌های سیکل موجود با نمونه‌های متناظر در سیکله‌ای قبلی پیشنهاد داده شود

$$\Delta x[k] = x[k] - x[k - nN] - \{x[k - nN] - x[k - mN]\}; m > n \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق عبارت $x[k - nN]$ بیانگر نمونه‌ای از سیگنال می‌باشد که n سیکل قبل از نمونه‌ی k قرار دارد. عبارت داخل آکولاد که اختلاف بین نمونه‌های متناظر در m و n سیکل قبل از خطا را از مؤلفه‌های تحمیلی محاسبه شده کم می‌کند، به منظور در نظر گرفتن تغییرات دینامیکی و فرکانسی سیستم قدرت در استخراج صحیح آنها از نمونه‌های اندازه‌گیری شده، می‌باشد. نمودار کلی سیکل‌های مورد نیاز برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های تحمیلی در شکل (۱) نمایش داده شده است. مؤلفه‌های تحمیلی خطای استخراج شده توسط رابطه (۲) توسط الگوریتم دیجیتال تخمین فازور DFT به کمیت‌های فازوری تبدیل شده و مؤلفه توالی مثبت آنها برای استخراج شاخص DPAFCC مطابق رابطه (۱) بکارگرفته می‌شوند.

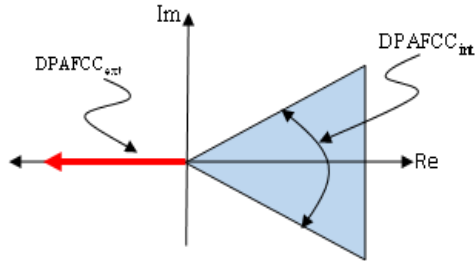


شکل (۱): نحوه‌ی استخراج مؤلفه‌های تحمیلی از سیگنال $x[k]$

۲-۲- عملکرد شاخص پیشنهادی در خطاهای داخلی

برای بررسی عملکرد شاخص پیشنهادی در خطاهای داخلی، یک خط نمونه‌ی دارای خطا در ریزشبهه به همراه شبکه مؤلفه خطای توالی مثبت آن با مدل‌سازی منابع بالادست ریزشبهه در باس M و منابع DG در باس پایین دست N به صورت نشان داده شده در شکل (۲) ارائه شده است. در این شکل، \bar{I}_m و \bar{I}_n به ترتیب مؤلفه‌های فازوری

زاویه فاز α° و تغییر آن در این بازه، محل قرارگیری زاویه فاز شاخص DPAFCC در ناحیه آبی رنگ نشان داده شده در شکل (۳) و در بازه -65° درجه تا $+65^\circ$ درجه تغییر خواهد کرد. از طرفی به دلیل عدم هم-پوشانی زاویه فاز DPAFCC در خطاهای داخلی و خارجی این عدم قطعیت تاثیر منفی در عملکرد طرح حفاظتی نخواهد گذاشت.



شکل (۳): ناحیه قرارگیری زاویه فاز شاخص پیشنهادی در خطاهای داخلی و خارجی

۲-۳- عملکرد شاخص پیشنهادی در خطاهای خارجی

شاخص پیشنهادی می‌بایست ضمن تشخیص وقوع خطاهای خارج از خط حفاظت شونده، نباید به ازای این خطاها دچار عملکرد شود و از طرفی حین وقوع اتفاقاتی غیر از خطا، نظیر تغییر سطح نفوذ منابع تولیدپراکنده و یا تغییر حالت اتصال ریزش شبکه از حالت متصل به منفصل و یا برعکس نباید فرمان قطع صادر کند. در این قسمت به دنبال اثبات عملکرد شاخص پیشنهادی در خطاهای خارجی هستیم. برای این منظور یک خطای خارجی در سمت راست باس N خارج از خط حفاظت شونده MN به ازای حضور DG در پائین دست باس N لحاظ شده است. شبکه معادل مؤلفه خطای توالی مثبت به ازای خطای خارجی با حضور DG در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. در این شکل Z_{DG} و E_{DG} به ترتیب امپدانس توالی مثبت DG و ولتاژ معادل آن می‌باشد. همان‌طوریکه دیده می‌شود یکی از ویژگی‌های مهم شبکه مؤلفه خطا حذف شدن تمامی منابع قبل از خطا و مدل‌سازی امپدانس شبکه و بار آن با مقادیر معادل می‌باشد. در شبکه‌های توزیع اثر خازنی خط قابل صرف نظر کردن است و از مدل ساده خط برای استخراج روابط ولتاژ و جریان ابتدا و انتهای خط استفاده می‌شود. در این خطوط به دلیل کوتاه بودن خط و حذف جریان شارژینگ خازنی خط، می‌توان جریان‌های ابتدا و انتهای خط را یکسان در نظر گرفت. با توجه به شکل (۴-ب)، به ازای وقوع خطای خارج از خط حفاظت شونده در سمت راست باس N مؤلفه خطای جریان ابتدا و انتهای خط به شکل زیر خواهد بود:

$$\Delta \bar{I}_m = -\Delta \bar{I}_n \quad (15)$$

از رابطه (۱۵) می‌توان نتیجه گرفت که اگر مقدار فازوری مؤلفه خطای جریان در باس M به صورت $\alpha \angle \theta$ باشد، انگاه مقدار فازوری مؤلفه خطای جریان در باس N به صورت $\alpha \angle \theta + 180^\circ$ خواهد بود. بنابراین

معمولا عددی بزرگتر از 25° درجه و کوچکتر از 90° درجه می‌باشد. از طرفی اندازه امپدانس‌های تونن مذکور نیز بزرگتر از اندازه امپدانس خط حفاظت شونده است. از طرفی در فضای اعداد مختلط و در آنالیز برداری، همواره زاویه فاز بردار برآیند بین زاویه فاز حاصله تکی آن دو بردار خواهد بود. لذا به زبان ریاضی خواهیم داشت:

$$\{ \forall (Z_1, Z_2) \in C \mid \angle Z_1 \leq \angle Z_2 \} \Rightarrow \angle Z_1 \leq \angle (Z_1 + Z_2) \leq \angle Z_2 \quad (8)$$

با اعمال (۸) به طرف راست رابطه (۷)، روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\angle Z_{d2} \leq \angle (Z_n + Z_{d2}) \leq \angle Z_n \quad (9)$$

$$\angle Z_{d1} \leq \angle (Z_m + Z_{d1}) \leq \angle Z_m \quad (10)$$

با توجه به توضیحات فوق در عمل می‌توان زاویه فاز امپدانس‌های توالی مثبت Z_{d2} و Z_{d1} را با هم برابر به میزان α° فرض کرد. از طرفی با فرض زاویه فازهای امپدانس‌های تونن Z_n و Z_m به اندازه 90° درجه خواهیم داشت:

$$\alpha^\circ \leq \angle (Z_n + Z_{d2}) \leq 90^\circ \quad (11)$$

$$\alpha^\circ \leq \angle (Z_m + Z_{d1}) \leq 90^\circ \quad (12)$$

با تفریق زوایای فاز به دست آمده در روابط (۱۱) و (۱۲) رابطه ذکر شده در (۷) به صورت زیر استخراج خواهد شد:

$$\alpha^\circ - 90^\circ \leq \angle (Z_n + Z_{d2}) - \angle (Z_m + Z_{d1}) \leq 90^\circ - \alpha^\circ \quad (13)$$

با توجه به رابطه (۱۳) می‌توان استنباط کرد که هرچه خط حفاظت شونده ریزش شبکه اندوکتیو باشد زاویه فاز آن نزدیک به 90° درجه خواهد شد و در نتیجه مقدار شاخص DPAFCC در حوالی نزدیک صفر درجه قرار خواهد گرفت. بنابراین خواهیم داشت:

$$\alpha^\circ - 90^\circ \leq \text{DPAFCC} \leq 90^\circ - \alpha^\circ \quad (14)$$

ناحیه قرارگیری زاویه فاز شاخص پیشنهادی را در خطاهای داخلی در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به رابطه (۶) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف زاویه فاز مؤلفه تحمیلی خطای جریان مستقل از اندازه مقاومت خطا می‌باشد. لذا انتظار می‌رود که شاخص پیشنهادی تحت تاثیر اندازه مقاومت خطا قرار نگیرد. بنابراین چنانچه مقدار شاخص پیشنهادی DPAFCC در ناحیه نشان داده شده در شکل (۳) قرار گیرد وقوع خطاهای داخلی در ریزش شبکه محرز می‌شود. مقدار این شاخص می‌بایست براساس جریان‌های دو طرف باس به صورت جداگانه برای هر فاز محاسبه گردد تا بتوان با مقایسه آن با آستانه عملکرد پیشنهادی فاز معیوب را شناسایی کرد. یکی از مزایای مهم شناسایی فاز معیوب برقراری امکان قطع تک‌فاز برای رفع خطاهای اتصال کوتاه گذرا می‌باشد. مطابق با رابطه (۱۴) و محدوده نشان داده شده در شکل (۳) برای ناحیه قرارگیری زاویه فاز شاخص پیشنهادی در خطای داخلی می‌توان مقدار آستانه عملکرد مطمئن طرح حفاظتی را به صورت $|90^\circ - \alpha^\circ|$ نظر گرفت تا بتوان خطاهای داخلی را از خطاهای خارجی با دقت تشخیص داد. مقدار زاویه α° براساس طول خط ریزش شبکه مشخص خواهد شد و این مقدار عددی در بازه بین 25° درجه و 90° درجه خواهد بود. لذا با لحاظ عدم قطعیت

DPAFCC طرح حفاظتی ریزشبهه را پایه‌ریزی کرد. مراحل مربوط به اجرای طرح حفاظتی پیشنهادی به صورت گام‌های زیر خواهد بود:

(۱) سیگنال‌های آنالوگ جریان‌های ابتدا و انتهای هر خط از ریزشبهه اندازه‌گیری شده و از یک فیلتر ضدتشابه^۱ پائین‌گذر عبور کرده و سپس با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰ نمونه برسیکل به صورت دیجیتال نمونه برداری می‌شوند.

(۲) مؤلفه‌های خطای سیگنال‌های نمونه برداری شده با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شوند. در حالت بهره‌برداری عادی که تغییراتی در سیگنال‌های جریان شبکه وجود ندارد، مقدار مؤلفه-ی خطای سیگنال برابر صفر است ولی با ایجاد تغییر ناشی از وقوع خطا در شبکه مقدار سیگنال‌های مؤلفه خطا غیرصفر می‌گیرد.

(۳) مقدار فازوری مؤلفه‌های خطای محاسبه شده توسط الگوریتم دیجیتال تخمین فازور فوریه (DFT) محاسبه می‌شوند. این عملیات توسط μ -PMU نصب شده در دو باس ابتدا و انتهای ریزشبهه قابل استخراج خواهد بود.

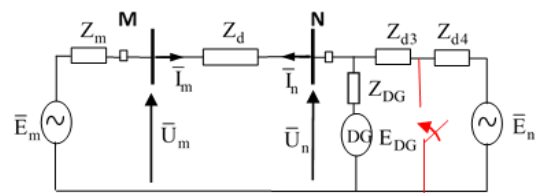
(۴) با استفاده از رابطه (۱) برای هر سه فاز (A,B,C) به طور جداگانه شاخص DPAFCC محاسبه می‌شود.

(۵) مقدار شاخص DPAFCC برای هر فاز با مقدار آستانه آن $(90^\circ - \alpha)$ مقایسه می‌شود. در صورتیکه مقدار شاخص در محدوده معرفی شده در رابطه (۱۴) قرار گیرد وقوع خطای داخلی محرز می‌گردد. در غیر این صورت چنانچه زاویه فاز شاخص حوالی ۱۸۰ درجه باشد وقوع خطای خارجی و یا شرایط غیرنرمال در ریزشبهه تشخیص داده می‌شود.

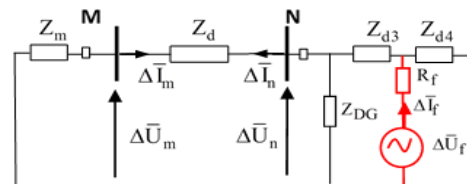
(۶) با تشخیص خطای داخلی، رله مبتنی بر شاخص DPAFCC به بریکرهای ابتدا و انتهای ریزشبهه دستور قطع خط خطادار را می‌دهد. فلوجارت طرح حفاظتی پیشنهادی متناسب با گام‌های فوق‌الذکر به صورت شکل (۵) خواهد بود.

۳- پیاده‌سازی و ارائه نتایج شبیه‌سازی

طرح حفاظتی پیشنهاد شده بر روی یک ریزشبهه استاندارد ۱۵ باسه ولتاژ متوسط ۱۲,۴۷ کیلوولت و فرکانس ۵۰ هرتز که در شکل (۶) نشان داده شده است، مطالعه و شبیه‌سازی شده است. اطلاعات و داده‌های سیستم در [۲۰] موجود است. ظرفیت ریزشبهه ۱۰۰ مگاوات است و ۱۷,۱۶٪ ظرفیت ریزشبهه تحت نفوذ PV و ژنراتور بادی و هیدروژنراتور می‌باشد. این ریزشبهه شامل پنج ترانسفورماتور برای تبدیل ولتاژ انتفوق توزیع به ولتاژ متوسط ۱۲,۴۷ Kv و اتصال نیروگاه‌های پراکنده به شبکه می‌باشد. طول هر خط ۵ کیلومتر در نظر گرفته شده و پارامترهای خط و مقادیر نامی بارها و نیروگاه‌های پراکنده همانند مقاله [۱۹] می‌باشد. مدار ریزشبهه در محیط PSCAD شبیه



(۴-الف)



(۴-ب)

شکل (۴): مدار معادل ریزشبهه دارای خطای خارجی در خارج باس N

(۴-الف) و شبکه مؤلفه خطای توالی مثبت آن (۴-ب)

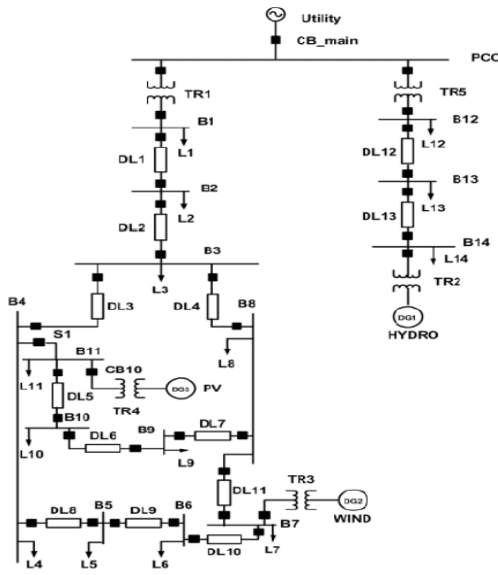
مطابق با رابطه (۱) مقدار شاخص DPAFCC در خطاهای خارجی به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\angle \Delta \bar{I}_m - \angle \Delta \bar{I}_n = \pm 180^\circ \quad (14)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به تفاوت مقدار شاخص پیشنهادی در خطاهای داخلی و خارجی، می‌توان دیفرانسیل زاویه فاز مؤلفه خطای جریان به دست آمده از دو باس ابتدایی و انتهایی ریزشبهه را به عنوان معیار مطمئنی برای تشخیص خطا در ریزشبهه پیشنهاد داد. در شرایط غیر خطا نظیر تغییر در سطح نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه و یا اتفاقاتی نظیر تغییر مدکاری ریزشبهه از حالت اتصال به حالت جزیره‌ای و یا وقوع اضافه بار در شبکه نیز به دلیل تغییراتی که در سیگنال‌های ولتاژ و جریان شبکه حاصل می‌شود، انتظار ایجاد مؤلفه‌های سوپرایمپوز (مؤلفه‌های خطا) وجود دارد. از آنجایی که این تغییرات در خارج از خط حفاظت شونده رخ می‌دهند می‌توان انتظار داشت که مقدار زاویه فاز شاخص پیشنهادی در این اتفاقات نیز همچون خطای خارجی به ۱۸۰ درجه نزدیک خواهد شد. صحت این موضوع توسط سناریوهای مختلفی در بخش شبیه‌سازی نشان داده خواهد شد. ناحیه قرارگیری زاویه فاز معیار DPAFCC به ازای وقوع خطاهای خارجی در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به عدم همپوشانی مکان هندسی قرارگیری معیار DPAFCC در خطاهای داخلی و خارجی، طرح حفاظتی پیشنهادی عملکرد مطمئنی در تفکیک شرایط خطا از شرایط غیرخطا خواهد داشت.

۲-۴ طرح حفاظتی پیشنهادی مبتنی بر DPAFCC

همان‌طوریکه در بخش‌های قبلی اثبات گردید دیفرانسیل زاویه فاز مؤلفه خطای جریان‌های به دست آمده از دو باس ابتدا و انتهای هر خط از ریزشبهه در حین خطاهای داخلی در بازه‌نشان داده شده در شکل (۳) قرار گرفته و به زاویه صفر درجه نزدیک می‌شود. درحالیکه در خطاهای خارجی و یا شرایط غیرخطا مقدار این شاخص پیشنهادی به زاویه فاز ۱۸۰ درجه می‌رسد. بنابراین می‌توان بر مبنای شاخص

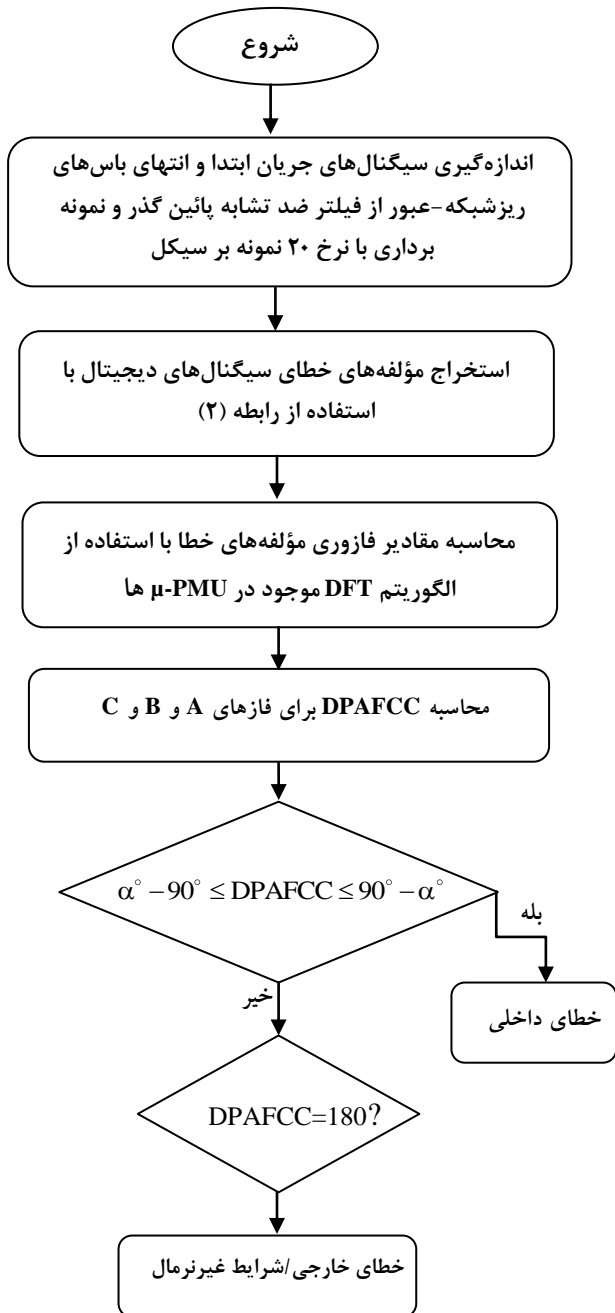


شکل (۶): مدار استاندارد ۱۵ باسه [۱۹]

۳-۱- بررسی عملکرد شاخص پیشنهادی در شناسایی خطاهای داخلی از خارجی

برای اثبات درستی عملکرد شاخص پیشنهادی در تشخیص درست انواع خطاهای اتصال کوتاه داخلی و خارجی، خط DL2 (خط متصل بین باس ۲ و ۳) به عنوان خط حفاظت شونده لحاظ شده و سیگنال‌های ولتاژ و جریان به دست آمده از باس‌های ۲ و ۳ برای استخراج شاخص DPAFCC به کار می‌رود. این خط به صورت اندوکتیو لحاظ شده و زاویه فاز امپدانس توالی مثبت خط حدود ۸۰ درجه ($\alpha^\circ = 80^\circ$) می‌باشد. بنابراین مطابق آنچه در بخش ۲-۲ گفته شد زاویه فاز آستانه عملکرد DPAFCC برابر ۱۰ درجه ($|90^\circ - \alpha^\circ|$) لحاظ می‌گردد. بنابراین در فازهایی که زاویه فاز DPAFCC کمتر از ۱۰ درجه باشد وقوع خطای داخلی محرز می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی برای انواع خطای اتصال کوتاه داخلی و خارجی در جدول (۱) نشان داده شده است که نشانگر درستی عملکرد شاخص پیشنهادی می‌باشد. نتایج نحوه تغییر فاز شاخص DPAFCC به ازای خطای اتصال کوتاه سه فاز در وسط خط حفاظت شونده DL2 در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطوریکه دیده می‌شود زاویه فاز شاخص پیشنهادی در هر سه فاز زیر مقدار آستانه ۱۰ درجه بوده و تشخیص خطای سه فاز محرز می‌باشد. شکل (۸) نیز نتیجه شاخص DPAFCC را برای هر سه فاز به ازای خطای تکفاز به زمین (A-G) را نشان می‌دهد که وقوع خطا در فاز A را به خوبی نشان می‌دهد. بررسی نتایج حاصله در جدول (۱) بیانگر این موضوع است که اولاً شاخص پیشنهادی قادر به تشخیص تمامی انواع اتصال کوتاه می‌باشد و تشخیص ذاتی فاز معیوب یکی از مهمترین ویژگی‌های آن می‌باشد. از طرفی شاخص قادر به تشخیص خطا در زمانی کمتر از نیم سیکل بوده که سرعت تشخیص

سازی شده و انواع اتصال کوتاه و اتفاقات در آن شبیه‌سازی شده است. مقادیر ولتاژ و جریان باس‌ها از PSCAD به محیط MATLAB منتقل و با کدنویسی مناسب، دیفرانسیل زاویه فاز مؤلفه خطای جریان ابتدا و انتهای خط یا همان شاخص DPAFCC استخراج شده است. در ادامه عملکرد شاخص پیشنهادی برای چهار سناریوی مختلف نظیر انواع خطاهای اتصال کوتاه داخلی و خارجی در مکان‌های مختلف، خطاهای با مقاومت بالا، تغییر سطح نفوذ تولیدات پراکنده و ورود و خروج آن‌ها و تغییر حالت ریزشبه از حالت اتصال به انفصال بررسی شده است. در نهایت برای اثبات کارایی روش پیشنهادی عملکرد آن از چند بعد با سایر روش‌های حفاظت ریزشبه مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل (۵): الگوریتم حفاظتی ریزشبه

بالای خط را توسط طرح پیشنهادی نشان می‌دهد. همچنین تغییر مکان خط تأثیری در عملکرد شاخص پیشنهادی ندارد.

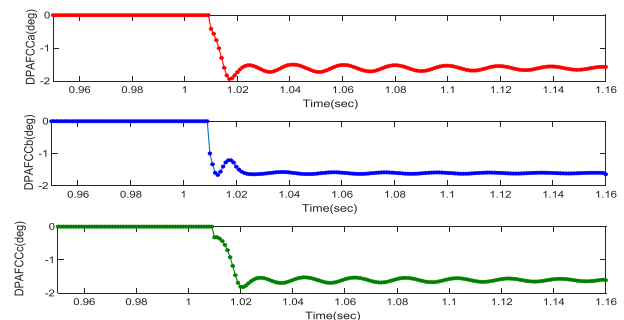
جدول (۱): نتایج DPAFCC به ازای انواع خطای اتصال کوتاه

فاصله خطا از باس ۲ (متر)	نوع خطا	مقاومت خطا	DPAFCC _a (deg)	DPAFCC _b (deg)	DPAFCC _c (deg)	لحظه تشخیص خطا (ms)	فاز معیوب
۲۵۰۰	A-G	مقدار مقاومت خطا ۰/۱ اهم فرض شده است.	-۱/۷	-۱۸۰	-۱۸۰	۸	A
	AB-G		-۲/۶۸	-۰/۴	-۱۸۰	۶	AB
	BC		+۱۸۰	-۲/۶۲	-۰/۴۴	۹	BC
	ABC		-۱/۵۹	-۱/۵۲	-۱/۶۱	۸	ABC
۱۰۰۰	B-G	مقدار مقاومت خطا ۰/۱ اهم فرض شده است.	+۱۸۰	-۱/۲۴	+۱۸۰	۶	B
	ABCG		-۱/۳	-۱/۲۷	-۱/۱۹	۷	ABC
۴۰۰	C-G	مقدار مقاومت خطا ۰/۱ اهم فرض شده است.	+۱۸۰	+۱۸۰	-۲/۳۵	۸	C
-۲۵۰۰	A-G		+۱۸۰	-۱۸۰	-۱۸۰	-	-
	AB		+۱۸۰	-۱۸۰	-۱۸۰	-	-
	ABC		+۱۸۰	-۱۸۰	-۱۸۰	-	-

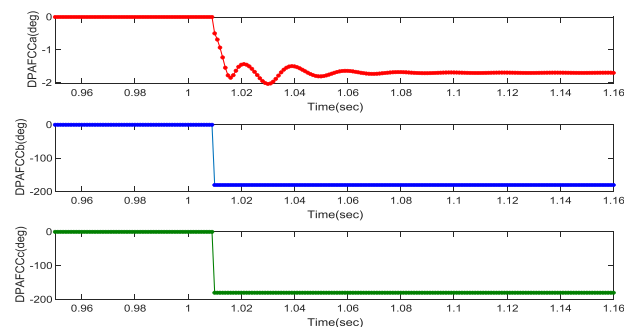
حفاظتی مستقل از مقاومت خطا برای حفاظت ریزشبه از اهمیت بالایی برخوردار است. در این قسمت به بررسی تأثیر تغییر مقاومت خطا بر عملکرد شاخص پیشنهادی DPAFCC می‌پردازیم. جدول (۲) نتایج حاصل از این قسمت را به ازای مقاومت‌های از ۲۰ اهم تا ۲۰۰ اهم را نشان می‌دهد. در این راستا، عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی با عملکرد رله‌های اضافه جریان و دیفرانسیل در جدول (۲) مقایسه شده است. رله دیفرانسیل طوری تنظیم شده است که به ازای اختلاف جریان بالاتر از ۱۰٪ مقدار نامی (جریان آستانه ۰/۱ پریونیت) عمل کند. به ازای خطای تکفاز با مقاومت ۵۰ اهم در وسط خط DL2 اندازه جریان دیفرانسیل به ۰/۰۸۵ پریونیت رسیده است که کوچکتر از مقدار آستانه تنظیمی بوده و در نتیجه رله دیفرانسیل به ازای مقاومت ۵۰ اهم عمل نخواهد کرد درحالیکه مطابق با شکل (۹) روش حفاظتی پیشنهادی به راحتی خطای با مقاومت ۵۰ اهم را تشخیص می‌دهد. همچنین نتایج مشابهی در عدم موفقیت رله اضافه جریان با تنظیم مقدار آستانه جریان در ۱۲٪ جریان نامی در تشخیص خطای تکفاز به زمین با مقاومت ۵۰ اهم به دست آمده است. نحوه تغییر فاز شاخص DPAFCC به ازای خطای تکفاز به زمین A-G در وسط خط DL2 با مقاومت ۵۰ اهم در شکل (۹) نشان داده شده است نتایج نشانگر توفیق طرح حفاظتی پیشنهادی در تشخیص خطاهای با مقاومت بالا است.

جدول (۲): نتایج DPAFCC به ازای انواع مقاومت خطا

فاصله خطا (متر) از باس ۲	نوع خطا	مقاومت خطا (اهم)	DPAFCC _a (deg)	DPAFCC _b (deg)	DPAFCC _c (deg)	لحظه تشخیص خطا (ms)	فاز معیوب
۲۵۰۰	A-G	۲۰	-۱/۶۹	-۱۸۰	-۱۸۰	۸	A
	B-G	۵۰	-۱۸۰	-۱/۷۱	-۱۸۰	۶	B
	C-G	۱۰۰	+۱۸۰	+۱۸۰	-۱/۷۲	۹	C
	ABC	۲۰۰	-۱/۵۹	-۱/۵۲	-۱/۶۱	۸	ABC
	رله دیفرانسیل جریانی خط DL2 با مقدار آستانه ۰/۱ پریونیت						
	نوع خطا		جریان دیفرانسیل		تشخیص خطا		
	A-G (۵۰ اهم)		۰/۰۸۵ پریونیت		ناموفق		
	رله اضافه جریان خط DL2 با مقدار آستانه ۱/۲ پریونیت						
	نوع خطا		جریان رله		تشخیص خطا		
	A-G (۵۰ اهم)		۱،۰۵ پریونیت		ناموفق		



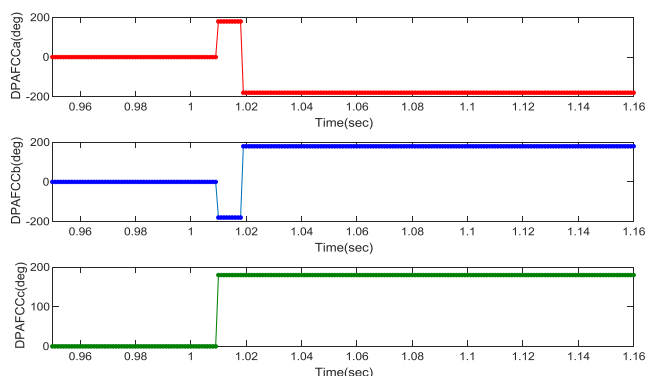
شکل (۷): DPAFCC برای خطای سه فاز به زمین در وسط خط DL2



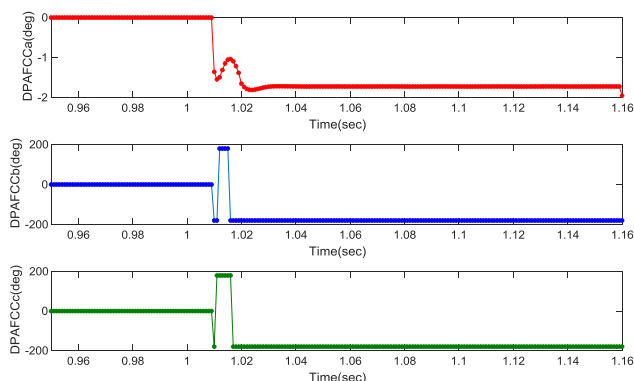
شکل (۸): DPAFCC برای خطای تک فاز به زمین در وسط خط DL2

۳-۲- بررسی اثر مقاومت خطای بالا

یکی از مشکلات طرح‌های حفاظتی متداول مبتنی بر جریان در ریزشبه، اثرپذیری آن از مقاومت خطای بالا و عدم موفقیت آن‌ها در تشخیص خطاهای با مقاومت بالا می‌باشد. بنابراین ارائه یک طرح



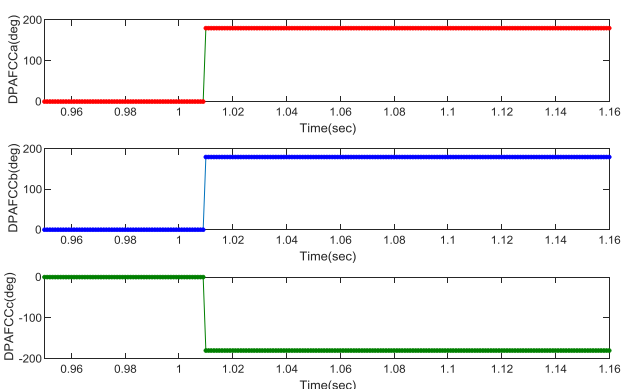
شکل (۱۱): نتایج DPAFCC حین خروج نیروگاه PV در باس B11 در ثانیه یک



شکل (۹): DPAFCC برای خطی تک فاز به زمین A-G با مقاومت ۵۰ اهم در وسط خط DL2

۴-۳- بررسی عملکرد در شرایط جزیره ای ریزشبه

از دیگر شرایط بحرانی غیر خطا و مهم در ریزشبه، قطع تغذیه شبکه اصلی است. با قطع تغذیه شبکه، انتظار داریم که طرح حفاظتی پیشنهادی در شرایط جزیره ای شدن ریزشبه عملکرد صحیحی نشان دهد و شرایط ریزشبه را نرمال تشخیص داده و دچار عملکرد بی مورد نشود و اجازه دهد تا ریزشبه با منابع پراکنده داخلی خود به فعالیت جزیره ای خود ادامه دهد. برای این منظور فرض شده ریزشبه در ثانیه یک از شبکه بالادست جدا شود. این اتفاق باعث تغییر توان جاری شده در ریزشبه و در نتیجه تغییر ولتاژ و جریان های آن خواهد شد. شکل (۱۲) نتایج حاصل از تغییر فاز DPAFCC را برای هر سه فاز در حین جزیره ای شدن نشان می دهد که بیانگر عملکرد موفق طرح حفاظتی پیشنهادی در شرایط جزیره ای است.



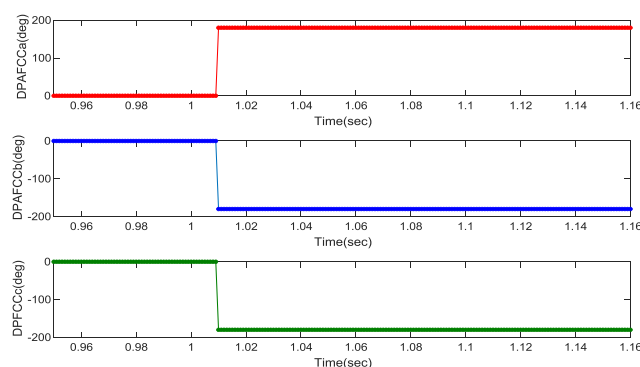
شکل (۱۲): نتایج DPAFCC حین جزیره ای شده ریزشبه در ثانیه یک

۵-۳- ارزیابی عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی در اثر اشباع ترانس جریان

در ترانسفورماتورهای اندازه گیری جریان در خطاهای اتصال کوتاه نزدیک به ترانس به دلیل افزایش دامنه جریان، امکان اشباع ترانس و ایجاد خطای اندازه گیری در دامنه جریان ثانویه وجود دارد. پدیده

۳-۳- بررسی اثر تغییر سطح نفوذ منابع تولید پراکنده

طرح حفاظتی پیشنهادی می بایست در شرایط بحرانی غیر خطا نیز عملکرد خوبی داشته باشد و منجر به تریپ ناخواسته نشود. یکی از شرایط بحرانی غیر خطا، ورود و خروج منابع تولید پراکنده به ریزشبه می باشد، که تغییرات سریع و وسیعی در ولتاژ و جریان ریزشبه ایجاد می کند که می تواند باعث عملکرد بی مورد طرح های حفاظتی متداول ریزشبه همچون حفاظت دیفرانسیل جریانی شود. طی شرایط بحرانی غیر خطا انتظار این است که الگوریتم پیشنهادی این شرایط را به عنوان خطا تشخیص نداده و DPAFCC را در حدود ۱۸۰ درجه محاسبه کند. برای این منظور فرض می شود که نیروگاه خورشیدی متصل در باس B11 در ثانیه ۱ وارد مدار شود. شکل (۱۰) نحوه تغییر زاویه فاز DPAFCC را در این حین نشان می دهد. نتایج حاصله بیانگر عملکرد موفق شاخص پیشنهادی در تشخیص این حادثه به عنوان حادثه خارجی است و لذا طرح حفاظتی در این حین دچار اشتباه در عملکرد نخواهد شد. نتایج مشابهی هنگام خروج این نیروگاه در ثانیه یک در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نتایج DPAFCC حین ورود نیروگاه PV در باس B11 در ثانیه یک

۳-۶- مقایسه روش حفاظتی پیشنهادی با روش‌های متداول حفاظت ریزشبهه

با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت‌های قبلی، عملکرد روش حفاظتی پیشنهادی فعلی با سایر حفاظت‌های متداول ریزشبهه نظیر حفاظت اضافه جریان و حفاظت دیفرانسیل و نیز سایر طرح‌های حفاظتی جدید ارائه شده در مقالات در جدول (۳) مقایسه می‌شود. توانایی تشخیص انواع خطاهای اتصال کوتاه داخلی از خارجی، تشخیص فاز معیوب، تشخیص خطاهای امپدانس بالا، عملکرد صحیح با تغییر سطح نفوذ انواع منابع تولید پراکنده و توانایی تشخیص خطا در شرایط جزیره‌ای جزو معیارهای مقایسه می‌باشد. علامت "✓" به مفهوم توانمندی روش پیشنهادی و علامت "×" به معنای ناتوانی روش حفاظتی در برآورده ساختن فاکتور مقایسه می‌باشد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که حفاظت ریزشبهه مبتنی بر شاخص DPAFCC توانسته است اکثر مشکلات حفاظت‌های متداول ریزشبهه را برطرف کند و در نتیجه قابلیت پاسخگویی و امنیت بالاتری نسبت به روش‌های مرسوم در حفاظت مطمئن خط ارائه نماید.

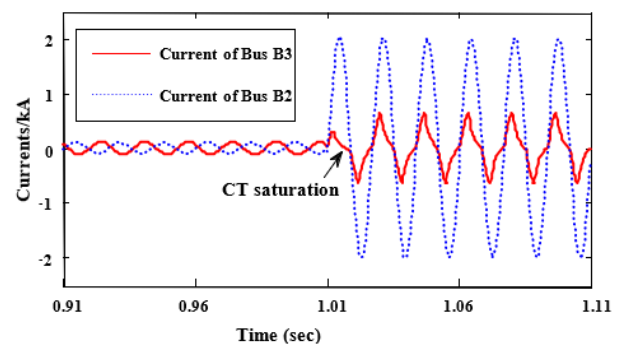
جدول (۳): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های حفاظتی مرسوم

فاکتور مقایسه	حفاظت اضافه جریان	حفاظت دیفرانسیل	[۲۱]	[۲۲]	حفاظت DPAFCC
تشخیص انواع خطاهای اتصال کوتاه داخلی و خارجی	✓	✓	✓	✓	✓
توانایی تشخیص فاز معیوب	✓	✓	×	✓	✓
تشخیص خطاهای مقاومت بالا	×	×	✓	×	✓
عملکرد صحیح با تغییر سطح نفوذ انواع منابع تولید پراکنده	×	×	×	×	✓
عملکرد صحیح در شرایط جزیره‌ای	×	×	✓	✓	✓

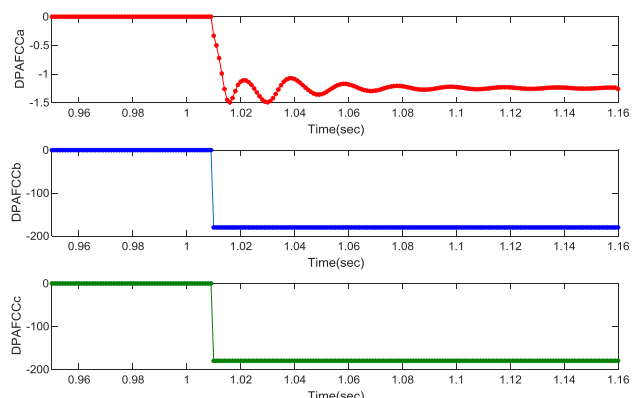
۳-۷- تأخیر مخابراتی

جهت اجرای طرح حفاظتی پیشنهادی ریزشبهه مبتنی بر DPAFCC، می‌بایست نمونه‌های فازوری مولفه‌خطای جریان اندازه‌گیری شده توسط μ -PMU در باس انتهایی، توسط یک کانال مخابراتی اختصاصی با سرعت بالا همچون فیبر نوری به باس محلی منتقل شوند. در این راستا، عواملی همچون فرآیند استخراج فازور (T_{Phasor})، تأخیر ارسال داده ($T_{data,TRNS}$)، زمان لازم برای اجرای الگوریتم (T_{ALG}) و زمان عملکرد کلیدها (T_{CB}) می‌توانند در ایجاد تأخیر کلی نقش داشته

اشباع ترانسفورماتور ناشی از افزایش شارمغناطیس‌کنندگی و نزدیک شدن نقطه کار ترانس به نقطه زانویی منحنی مغناطیس‌شوندگی است که به دلیل عبور عمده جریان از شاخه مغناطی‌کنندگی ترانس، می‌تواند باعث ایجاد خطای قابل توجه در دامنه جریان ثانویه ترانس شود. این مشکل در رله‌های دیفرانسیل و رله‌های اضافه جریان که براساس اندازه‌گیری دامنه جریان اتصال کوتاه عمل می‌کنند می‌تواند باعث کاهش امنیت رله و اختلال در عملکرد آن‌ها شود. با این حال، از آنجایی که عملکرد طرح حفاظتی پیشنهادی مبتنی بر دیفرانسیل زاویه فاز مولفه‌های تحمیلی خطای جریان دو انتهای خط حفاظت شونده بوده و وابستگی به دامنه جریان ندارد، انتظار می‌رود که تحت تاثیر پدیده اشباع ترانسفورماتور قرار نگیرد. با این وجود به منظور اثبات عملکرد صحیح رله در شرایط اشباع ترانس جریان فرض می‌شود که خطای تکفاز به زمین A-G در فاصله ۵۰۰ متری از باس B3 در خط DL2 رخ می‌دهد که این خطا منجر به اشباع ترانس در باس B3 می‌شود. در این حالت نتایج شاخص DPAFCC در شکل (۱۴) نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که دیفرانسیل زاویه فاز مولفه خطای جریان در فاز خطادار تحت تاثیر اشباع ترانس قرار نمی‌گیرد و قادر به تشخیص صحیح فاز معیوب می‌باشد.



شکل (۱۳): شکل موج جریان در حالت اشباع ترانس جریان در باس B3 به ازای وقوع خطا در فاصله ۵۰۰ متری باس B3



شکل (۱۴): DPAFCC برای خطای تک فاز به زمین A-G در خط DL2 در فاصله ۵۰۰ متری باس B3 تحت اشباع ترانس جریان

- الگوریتم حفاظتی در صورت قطع تغذیه شبکه اصلی و جزیره ای شدن ریزشبکه عملکرد مطمئنی داشته و دچار خطا در عملکرد نمی شود.

مراجع

- [۱] جوادى سعيد، رضائى نويد، حسامى نقشبندى على، "طراحی یک ساختار حفاظت دیفرانسیل جدید برای ریزشبکه های DC مبتنی بر مؤلفه های جریان خطا" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱.
- [۲] نصرت پور حسین، زنگنه علی، "خودترمیمی بهینه شبکه های توزیع هوشمند مبتنی بر گراف درخت پوشا و بهبود قابلیت اطمینان شبکه" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸.
- [3] Mahat, P., Chen, Z., Bak-Jensen, B., & Bak, C. L. "A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation" IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 3, pp. 428-437, 2011.
- [4] Etemadi, A. H., & Iravani, R. "Overcurrent and overload protection of directly voltage-controlled distributed resources in a microgrid". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 12, pp. 5629-5638, 2012.
- [5] Wan, H., Li, K. K., & Wong, K. P. "An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 5, pp. 2118-2124, 2010.
- [6] Ustun, T. S., Ozansoy, C., & Zayegh, A. "Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to IEC 61850-7-420" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 3, pp. 1560-1567, 2012.
- [7] Casagrande, E., Woon, W. L., Zeineldin, H. H., & Svetinovic, D. "A differential sequence component protection scheme for microgrids with inverter-based distributed generators" IEEE Transactions on smart grid, Vol. 5, No. 1, pp. 29-37, 2013.
- [8] Mohammed, M. E. "High-speed differential busbar protection using wavelet-packet transform" IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 6, pp. 927-933, 2005.
- [9] Chilvers, I., Jenkins, N., & Crossley, P. "Distance relaying of 11 kV circuits to increase the installed capacity of distributed generation" IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 1, pp. 40-46, 2005.
- [10] El-Arroudi, K., & Joos, G. "Performance of interconnection protection based on distance relaying for wind power distributed generation" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 2, pp. 620-629, 2017.
- [11] Nikolaidis, V. C., Tsimtsios, A. M., & Saffigianni, A. S. "Investigating particularities of infeed and fault resistance effect on distance relays protecting radial distribution feeders with DG" IEEE Access, Vol. 6, pp. 11301-11312, 2018.
- [12] Ma, J., Wang, X., Zhang, Y., Yang, Q., & Phadke, A. G. "A novel adaptive current protection scheme for distribution systems with distributed generation" International Journal of Electrical Power & Energy Systems" Vo. 43, No. 1, pp. 1460-1466, 2012.

باشند. بنابراین کل زمان لازم برای رفع خطا توسط روش پیشنهادی می تواند با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردد:

$$T_{delay} = T_{Phasor} + T_{data,TRNS} + T_{ALG} + T_{CB} \quad (۱۷)$$

بر اساس استاندارد IEEE C37.118.2، مقادیر معمول تأخیرهای زمانی ذکر شده در رابطه (۱۷) در جدول (۴) ارائه شده است [۲۳]. مشاهده می شود که حداکثر تأخیر زمانی بدست آمده از رابطه (۱۷) برای جداسازی خطا ۱۱۰/۳ میلی ثانیه خواهد بود.

جدول (۴): مقدار متداول فاکتورهای ایجادکننده تأخیر

مقدار متداول (ms)	محدوده تأخیر (ms)	دلیل تأخیر	شاخص تأخیر
۲۰	۱۷-۱۰۰	پنجره نمونه برداری	T_{Phasor}
۱۵	۰/۰۰۵-۳۰	پردازش و فیلترینگ اندازه گیری	
۱۵	۰/۰۰۵-۳۰	تأخیر ورود و خروج داده	$T_{data,TRNS}$
۰/۰۳	$\mu s/Km$ ۶	تأخیر ارسال داده	
۱۰	۱۰-۱۵	تأخیر اجرای الگوریتم	T_{ALG}
۵۰	۸۰-۵۰	تأخیر عملکرد کلید	T_{CB}

۴- نتیجه گیری

این مقاله یک طرح حفاظتی نوین را برای ریزشبکه های AC مجهز به انواع منابع تولیدپراکنده با استفاده از اختلاف زاویه فاز مؤلفه تحمیلی خطای جریان ابتدا و انتهای خط ارائه می دهد. آنالیز مداری و شبیه سازی طرح حفاظتی پیشنهادی روی یک ریزشبکه استاندارد نمونه، عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی طرح را در تشخیص انواع خطاهای داخلی از خطاهای خارجی و شرایط بحرانی تایید می کند. به طور خلاصه می توان برجستگی های طرح پیشنهادی را به صورت زیر بیان کرد:

- الگوریتم در مدت زمان کمتر از نصف سیکل قدرت قادر به تشخیص خطا با دقت بالایی است و لذا می تواند ضمن ارائه حفاظت سریع باعث بهبود شاخص های قابلیت اطمینان شبکه شود.
- طرح حفاظتی پیشنهادی در تشخیص خطاهای با مقاومت بالا دقت بسیار خوبی دارد.
- موقعیت خطا و فاصله آن با ابتدا و انتهای خط تأثیری بر دقت تشخیص خطا ندارد.
- الگوریتم حفاظتی در تشخیص شرایط بحرانی غیر خطا همچون ورود و خروج DG ها و تغییر سطح نفوذ آن ها عملکرد مطلوبی دارد.

- [13] Sadeghkhani, I., Golshan, M. E. H., Mehrizi-Sani, A., Guerrero, J. M., & Ketabi, A. "Transient monitoring function-based fault detection for inverter-interfaced microgrids" IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 2097-2107, 2016.
- [14] Pignati, M., Zanni, L., Romano, P., Cherkaoui, R., & Paolone, M. "Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 1, pp. 381-392, 2016.
- [15] Von Meier, A., Stewart, E., McEachern, A., Andersen, M., & Mehrmanesh, L. "Precision micro-synchrophasors for distribution systems: A summary of applications" IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 6, pp. 2926-2936, 2017.
- [16] Sharma, N. K., & Samantaray, S. R. "Assessment of PMU-based wide-area angle criterion for fault detection in microgrid" IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, No. 19, pp. 4301-4310, 2019.
- [17] Liang, X., Wallace, S. A., & Nguyen, D. "Rule-based data-driven analytics for wide-area fault detection using synchrophasor data" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 3, pp. 1789-1798, 2016.
- [18] Majidi, M., & Etezadi-Amoli, M. "A new fault location technique in smart distribution networks using synchronized/non-synchronized measurements" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 3, pp. 1358-1368, 2017.
- [19] Taheri, M. M., Seyedi, H., Nojavan, M., Khoshbouy, M., & Ivatloo, B. M. "High-speed decision tree-based series-compensated transmission lines protection using differential phase angle of superimposed current" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 6, pp. 3130-3138, 2018.
- [20] Samantaray, S. R., Kamwa, I. and Joos, G., "Phasor measurement unit based wide-area monitoring and information sharing between micro-grids," in IET Gen. Trans. & Dist., vol. 11, no. 5, pp. 1293-1302, March-2017.
- [21] Mohammadi, S., Ojaghi, M., Jalilvand, A., and Shafiee, Q., "A pilot-based unit protection scheme for meshed microgrids using apparent resistance estimation" International Journal of Electrical Power & Energy Systems. Vol. 126, 106564, 2021.
- [22] Baloch, S., and Muhammad, M. S., "An intelligent data mining-based fault detection and classification strategy for microgrid" IEEE Access, Vol. 9, pp. 22470-22479, 2021.
- [23] IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems, IEEE Standard C37.118.2-2011, 2011.

زیر نویس ها

¹Resiliency

²Differential Phase Angle of Fault Component Current (DPAFCC)

³Anti-Aliasing Filter