

حفاظت فوق سریع باس بار مبتنی بر تبدیل آنلاین زمان-زمان

محمود لشگری^۱ و سید محمد شهرتاش^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله روش جدیدی برای حفاظت فوق سریع باس بار ارائه شده است. در این روش با اعمال تبدیل آنلاین TT به مولفه‌های تحمیلی سیگنال‌های جریان ثانویه ترانسفورماتورهای جریان پست، مولفه‌های فرکانس بالای ایجاد شده توسط خط استخراج می‌شوند و سپس با استفاده از الگوریتم ساده پیشنهادی برای پردازش خروجی‌های تبدیل آنلاین TT، حفاظت باس بار انجام می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهاد شده، مدل واقعی پست ۴۰۰ کیلو ولت در نرم‌افزار EMTP/ATP-Draw شبیه‌سازی شده است که نتایج آن در حالات مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی دارای حساسیت و قابلیت اتکا بالا در تفکیک خطاهای خارجی از داخلی به همراه سرعت عملکرد فوق العاده سریع است.	دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵
	واژگان کلیدی: سیگنال جریان، مولفه‌های گذرا، تبدیل آنلاین TT، حفاظت باس بار، پست.

۱- مقدمه

باس بار یکی از مهمترین عناصر سیستم قدرت به حساب می‌آید و محل اتصال تجهیزات مختلفی مانند ترانسفورماتورها، ژنراتورها، خطوط انتقال و بارها می‌باشد. اگرچه وقوع خطا در نواحی باس بارها به ندرت رخ می‌دهد اما غیر ممکن نمی‌باشد، و از طرف دیگر با توجه به بالا بودن سطح جریان ایجاد شده در شرایط وقوع خطای باس بار و نقش کلیدی باس بار در اتصال تجهیزات مختلف، این نوع خطاها می‌توانند آسیب‌های قابل توجهی به سیستم و سایر تجهیزات وارد نمایند. به منظور ایجاد محدودیت در آسیب‌های ایجاد شده ناشی از وقوع خطا بر تجهیزات و حفظ پایداری و جلوگیری از بی‌برق شدن کامل پست، لازم است که حفاظت باس بار علاوه بر داشتن حساسیت و قابلیت اطمینان بالا، دارای سرعت عملکرد بسیار بالایی باشد [۱]. اصول حفاظت باس بار را می‌توان به دو دسته عمده

تقسیم کرد [۲] و مزایا و معایب هر دسته را مطابق شکل

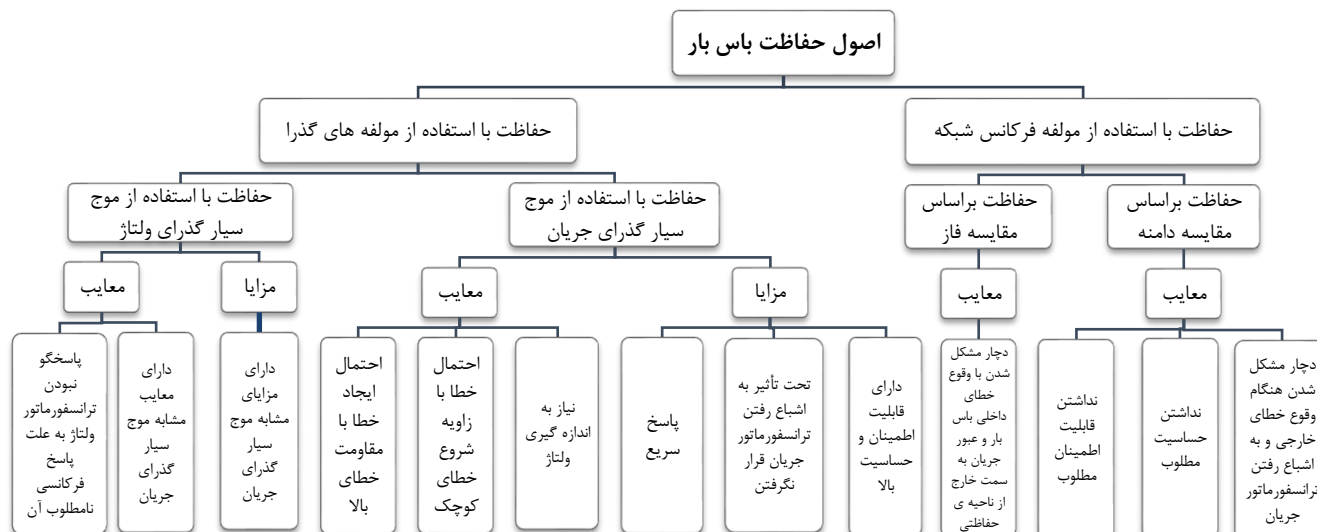
(۱) تحلیل نمود:

- حفاظت باس بار با استفاده از مولفه فرکانس شبکه [۳-۶].
- حفاظت باس بار با استفاده از مولفه‌های گذرا [۲] و [۷-۱۰].

مرسوم‌ترین روشی که با استفاده از مولفه فرکانس شبکه حفاظت باس بار را انجام می‌دهد حفاظت دیفرانسیل است که با اندازه‌گیری فازور جریان توسط روش تبدیل فوریه این وظیفه را انجام می‌دهد. طرح حفاظت دیفرانسیل تقریباً در تمامی طرح‌های حفاظت باس بار اجرا می‌شود، اما این روش حفاظتی ممکن است به علت خطاهای اندازه‌گیری که در حین اشباع ترانسفورماتور جریان به علت وقوع خطای خارجی رخ می‌دهد، باعث عملکرد بی‌مورد شود. از طرف دیگر این طرح حفاظتی به علت نیاز به محاسبه‌ی فازور

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shahrtash@iust.ac.ir

۱. دانشجو، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران



شکل ۱- مزایا و معایب اصول حفاظت باس بار

جریان با استفاده از روش تبدیل فوریه باعث ایجاد محدودیت در سرعت عملکرد بالا برای حفاظت باس بار می-شود [۳]. به منظور رفع مشکل تأثیر اشباع ترانسفورماتور جریان بر حفاظت دیفرانسیل، از رله‌ی دیفرانسیل درصدی استفاده می‌شود که باعث عدم ارسال فرمان تریپ در زمان وقوع اشباع ترانسفورماتور جریان به علت وقوع خطای خارجی می‌گردد اما استفاده از این طرح باعث کاهش حساسیت رله می‌شود [۱۱]. در [۳] روشی برای حفاظت باس بار با استفاده از مولفه فرکانس شبکه ارائه شده است که در آن با استفاده از جریان‌های تحمیلی ناشی از خطا و محاسبه‌ی انتگرال مد هوایی جریان تحمیلی تمامی خطوط متصل به باس بار، تشخیص خطای باس بار صورت می‌گیرد. با وقوع خطا در سطح پست و روی خطوط انتقال، امواج سیار گذرای ولتاژ و جریان تولید و در طول خطوط و روی سطح بی و باس بارها منتشر می‌شوند که البته شدت آنها به زاویه‌ی شروع خطا در سیگنال ولتاژ و مقاومت خطا، وابسته هستند. نکته‌ی مهم در طرح‌های حفاظتی که از مولفه‌های گذرا استفاده می‌شود، توانایی استخراج مولفه‌های فرکانس بالای ایجاد شده ناشی از خطا است [۱۲]. امواج سیار ایجاد شده در بردارنده‌ی اطلاعات مفیدی مانند نوع خطا و لحظه وقوع خطا است که اگر این مشخصات به درستی استخراج شوند، حفاظتی با سرعت بسیار بالا، حاصل خواهد شد [۲]. در تقابل با روش‌های دسته‌ی اول، روش‌های حفاظتی که از مولفه‌های گذرا استفاده می‌کنند، سرعت عملکرد بسیار بالاتری دارند و به ندرت تحت تأثیر اشباع ترانسفورماتور

جریان، خطاهای اندازه‌گیری و جریان بار قرار می‌گیرند - [۱۳]. در حالت کلی با استفاده از روش‌های حفاظت مبتنی بر مولفه‌های گذرا، قبل از به اشباع رفتن ترانسفورماتور جریان، تشخیص وقوع خطا صورت می‌گیرد، به همین دلیل اشباع ترانسفورماتور جریان تأثیر منفی بر عملکرد این دسته از روش‌های حفاظتی ندارد [۲].

در [۲] روشی برای حفاظت باس بار با استفاده از تفاوت جهت امواج سیار تولید شده با وقوع خطا ارائه شده است. در این روش برای استخراج مولفه‌های فرکانس بالا از سیگنال ولتاژ استفاده شده است.

در [۷] به کمک ریخت‌شناسی ریاضیاتی و استفاده از موج سیار جریان، روشی برای حفاظت باس بار ارائه شده است. در این روش با استفاده از اثر تضعیف مولفه‌های فرکانس بالای موج سیار جریان (هنگام وقوع خطای خط) توسط خازن‌های نشستی و استفاده از این ویژگی برای ایجاد تفاوت میان امواج سیار گذرای ایجاد شده توسط خطای خط (خطای خارجی) و خطای باس بار (خطای داخلی)، معیار تشخیص خطای باس بار ارائه شده است. در این روش با توجه به استفاده از موج سیار جریان، نیاز به اندازه‌گیری ولتاژ می‌باشد.

حفاظت باس بار با استفاده از امواج سیار ولتاژ و جریان برای محاسبه‌ی انرژی گذرای خطوط در [۸] (با منطقی مشابه [۲]) ارائه شده است.

در [۹] روشی برای حفاظت باس بار با استفاده از تبدیل

جریان با استفاده از روش تبدیل فوریه باعث ایجاد محدودیت در سرعت عملکرد بالا برای حفاظت باس بار می-شود [۳]. به منظور رفع مشکل تأثیر اشباع ترانسفورماتور جریان بر حفاظت دیفرانسیل، از رله‌ی دیفرانسیل درصدی استفاده می‌شود که باعث عدم ارسال فرمان تریپ در زمان وقوع اشباع ترانسفورماتور جریان به علت وقوع خطای خارجی می‌گردد اما استفاده از این طرح باعث کاهش حساسیت رله می‌شود [۱۱]. در [۳] روشی برای حفاظت باس بار با استفاده از مولفه فرکانس شبکه ارائه شده است که در آن با استفاده از جریان‌های تحمیلی ناشی از خطا و محاسبه‌ی انتگرال مد هوایی جریان تحمیلی تمامی خطوط متصل به باس بار، تشخیص خطای باس بار صورت می‌گیرد. با وقوع خطا در سطح پست و روی خطوط انتقال، امواج سیار گذرای ولتاژ و جریان تولید و در طول خطوط و روی سطح بی و باس بارها منتشر می‌شوند که البته شدت آنها به زاویه‌ی شروع خطا در سیگنال ولتاژ و مقاومت خطا، وابسته هستند. نکته‌ی مهم در طرح‌های حفاظتی که از مولفه‌های گذرا استفاده می‌شود، توانایی استخراج مولفه‌های فرکانس بالای ایجاد شده ناشی از خطا است [۱۲]. امواج سیار ایجاد شده در بردارنده‌ی اطلاعات مفیدی مانند نوع خطا و لحظه وقوع خطا است که اگر این مشخصات به درستی استخراج شوند، حفاظتی با سرعت بسیار بالا، حاصل خواهد شد [۲]. در تقابل با روش‌های دسته‌ی اول، روش‌های حفاظتی که از مولفه‌های گذرا استفاده می‌کنند، سرعت عملکرد بسیار بالاتری دارند و به ندرت تحت تأثیر اشباع ترانسفورماتور

از سیگنال‌های ورودی مورد نیاز خواهد بود. علاوه بر اینها، لازم است حجم محاسبات با قابلیت‌های پردازشگر از منظر سرعت نمونه‌برداری و مدت زمان انجام محاسبات همخوانی داشته باشد.

۲-۱- تجهیزات اندازه‌گیری

مطلب مهمی که در بحث طراحی الگوریتم‌های حفاظتی که از مولفه‌های گذرا استفاده می‌کنند وجود دارد، جنبه‌ی عملی بودن این طرح‌ها است که از مصادیق آن نحوه استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان برای اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ و جریان است. در [۲] نیاز به استفاده از مبدل‌های ولتاژ می‌باشد. اگر مبدل استفاده شده از نوع ترانسفورماتور ولتاژ خازنی باشد به دلیل نوع پاسخ فرکانسی آن، نمی‌تواند حالت‌های گذرا را با دقت مناسب عبور دهد [۱۴] و اگر مبدل ولتاژ نوری به کار گرفته شود، علاوه بر پیچیده بودن، هزینه بر هم می‌باشد [۳] و استفاده از این تجهیز تنها برای استخراج مولفه‌های فرکانس بالای سیگنال ولتاژ اقدامی منطقی به نظر نمی‌رسد. در [۱۰] و [۱۵] امواج سیار جریان به ترتیب با فرکانس‌های نمونه‌برداری ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوهرتز استخراج شده‌اند در حالیکه ترانسفورماتورهای جریان تنها تا فرکانس ۵۰ کیلوهرتز دارای دقت مناسبی می‌باشند [۱۶].

بر این اساس در این مقاله برای تطابق الگوریتم با شرایط واقعی، اولاً از سیگنال جریان اندازه‌گیری شده توسط ترانسفورماتورهای جریان پست استفاده شده است و ثانیاً فرکانس نمونه‌برداری در این مقاله برابر با ۱۰۰ کیلوهرتز انتخاب شده تا از دقت سیگنال جریان گرفته شده از ثانویه-ی ترانسفورماتور جریان اطمینان حاصل شود.

۲-۲- تبدیل آنالین TT

هدف از اعمال یک تبدیل ریاضی بر یک سیگنال، بدست آوردن اطلاعات اضافی است که در سیگنال اولیه (معمولاً حوزه‌ی زمان) به سادگی قابل مشاهده نمی‌باشد. توابع تحلیلی مختلفی برای استخراج ویژگی‌های کاربردی سیگنال‌های جریان و ولتاژ استفاده می‌شود، مانند تبدیل فوریه، تبدیل موجک، تبدیل S و تبدیل TT. تبدیل TT یا تبدیل زمان-زمان یک سیگنال را از حوزه زمان به حوزه زمان-زمان انتقال می‌دهد. این تبدیل اولین بار در سال ۲۰۰۳ توسط آقای Pinnegar مطرح شد [۱۷]

موجک ارائه شده است. در این روش با مقایسه‌ی مقادیر اولین ضریب مولفه‌ی دقیق سیگنال جریان با مقدار آستانه-ی ثابت مربوط به خطاهای داخلی و خطاهای خارجی تمایز میان آنها صورت گرفته است.

در [۱۰] با اعمال تبدیل هیلبرت به سیگنال‌های جریان، حفاظت باس‌بار انجام شده است. در این مرجع، مقادیر آستانه‌ی معرفی شده برای عملیات حفاظت براساس انجام شبیه‌سازی‌ها و یافتن الگو در میان نتایج شبیه‌سازی بدست آمده و برحسب نوع خطا این مقادیر متفاوت می‌باشند، به همین دلیل در این روش برای تشخیص خطای باس‌بار، ابتدا نیاز به تشخیص نوع خطا می‌باشد.

در این مقاله روش جدیدی برای حفاظت باس‌بار با استفاده از مولفه‌های گذرا ارائه شده است. در این روش با استفاده از مولفه‌های تحمیلی سیگنال‌های جریان ترانسفورماتور-های جریان موجود در سطح بی پست و استفاده از تبدیل TT^۱، مولفه‌های فرکانس بالای سیگنال‌های جریان استخراج می‌شوند و تنها با استفاده از عملیات ساده ریاضی میان خروجی تبدیل TT چهار سیگنال جریان، تشخیص خطای داخلی باس‌بار از خطای خارجی آن صورت می‌گیرد. انواع مختلف خطا در محل‌های مختلف و به ازای مقادیر مختلف مقاومت خطا و زاویه‌های مختلف شروع خطا در پست ۴۰۰ کیلو ولت ۱/۵ کلیدی شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی علاوه بر داشتن حساسیت و قابلیت اتکای بالا، در زمان وقوع خطا در ناحیه‌ی باس‌بار دارای سرعت عملکرد بسیار بالایی در تشخیص خطای داخلی باس‌بار می‌باشد.

در ادامه ساختار مقاله به شرح زیر است:

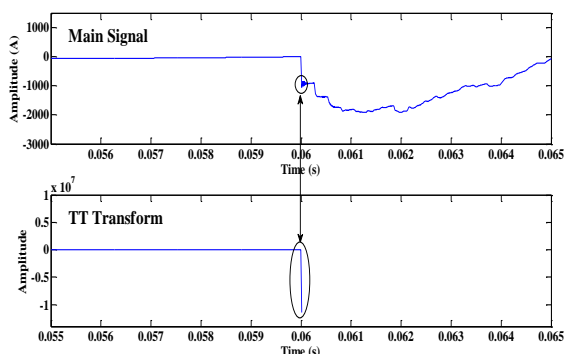
در بخش دوم ابزارهای مورد نیاز برای عملیات حفاظت تشریح شده‌اند. در بخش سوم ساختار الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش چهارم به شبیه‌سازی و بررسی نتایج پرداخته شده است و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- ابزارهای مورد نیاز برای عملیات حفاظت

اجرای هر طرح حفاظتی نیازمند ابزارهایی است. مبدل‌های ولتاژ و یا جریان ابزارهای در دسترس قرار گرفتن و محدود-سازی سیگنال‌های مورد نیاز محسوب می‌شوند. پس از این مرحله، ابزاری نرم‌افزاری برای استخراج مولفه‌های مورد نظر

¹ Time-time transform

أم، نمونه‌های موجود در پنجره‌ی اطلاعاتی ورودی تبدیل TT، نمونه‌ی موجود در گام زمانی n أم و گام‌های زمانی قبل‌تر قرار داده شده‌اند. در شکل (۳) نمونه‌ای از شکل موج سیگنال جریان خطا و تبدیل آنالین TT اعمال شده به مولفه‌های تحمیلی آن نشان داده شده است.



شکل ۳- خروجی تبدیل آنالین TT به ازای اولین نمونه‌ی قابل اندازه‌گیری از جریان خطا

با توجه به شکل (۳)، تا قبل از وقوع خطا، مقدار خروجی تبدیل TT صفر است و با ورود اولین نمونه‌ی قابل اندازه‌گیری از جریان خطا، خروجی تبدیل TT مقدار گرفته است.

۲-۳- کاهش بار محاسباتی با کمک روش کاهش تعداد نمونه‌ها

به منظور کاهش حجم محاسباتی پردازش سیگنال‌ها در الگوریتم پیشنهادی حفاظت سریع با سبار با استفاده از تبدیل آنالین TT، از تکنیک کاهش تعداد نمونه‌ها استفاده شده است. به دلیل نیاز به محاسبه‌ی تبدیل فوریه در روند محاسبات تبدیل آنالین TT، پنجره‌ی اطلاعاتی برابر با یک سیکل کامل در نظر گرفته شده است. در نتیجه با توجه به انتخاب فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ کیلوهرتز، پنجره‌ی اطلاعاتی دارای ۲۰۰۰ نمونه می‌باشد. اگر با استفاده از تکنیک کاهش تعداد نمونه‌ها، از ۲۰۰۰ نمونه‌ی موجود در پنجره‌ی اطلاعاتی، ۲۰ نمونه انتخاب شود، برای محاسبه‌ی تبدیل آنالین TT در هر فاز، لازم است ۲۰ عملیات ضرب و ۱۹ عملیات جمع برای محاسبه‌ی تبدیل فوریه و به طور مشابه ۲۰ عملیات ضرب و ۱۹ عملیات جمع برای محاسبه‌ی عکس تبدیل فوریه انجام شود، همچنین ۲۰ عملیات ضرب برای محاسبه‌ی ضرب تابع H در تابع G در رابطه‌ی (۱)، نیاز می‌باشد، بنابراین با استفاده از تکنیک کاهش تعداد نمونه‌ها، بار محاسباتی پردازشگر به ۶۰ عملیات ضرب و ۳۸ عملیات جمع کاهش می‌یابد که این اقدام معادل با

که از تبدیل فوریه معکوس تبدیل S به دست می‌آید. از آنجا که عناصر قطری تبدیل TT بیشترین استفاده را در کاربردهای مختلف دارند، در [۱۸] اشاره شده است که با استفاده از روابط (۱) و (۲) می‌توان صرفاً عناصر قطری تبدیل TT را محاسبه نمود.

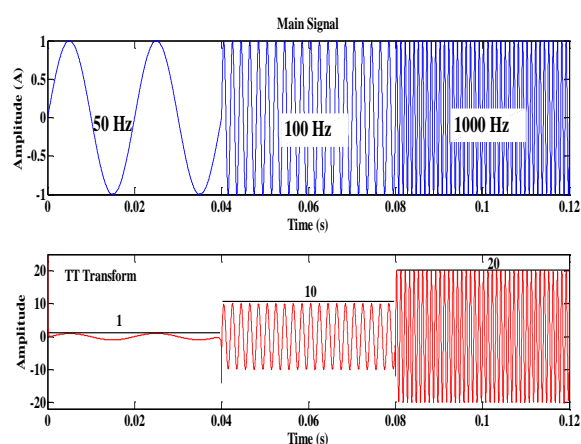
$$TT(t,t)=F^{-1}\{G(f)\times H(f)\} \quad (1)$$

$$G(f)=k\pi^2|f| \quad (2)$$

در رابطه (۱)، H تبدیل فوریه سیگنال مورد نظر، G تابعی وابسته به فرکانس و F^{-1} نماد عکس تبدیل فوریه و در رابطه (۲)، k مقدار ثابتی مانند $k_1 = -0.02199$ ، $k_2 = -0.00679$ و $k_3 = -0.00405$ است [۱۸]. در این مقاله k برابر با مقدار k_1 در نظر گرفته شده است.

بر خلاف تبدیل‌های S و موجک که برای استفاده نیاز به تنظیم و انتخاب برخی پارامترها دارند، در تبدیل TT نیاز به تنظیم پارامتری برای استفاده از آن نمی‌باشد. در تبدیل S انتخاب سطر مناسب (باند فرکانسی) از میان سطرهای خروجی آن و در تبدیل موجک انتخاب سطح مناسب تجزیه و موجک مادر از پارامترهای تأثیرگذار می‌باشند که قبل از استفاده از تبدیل‌ها نیاز به انتخاب آنها است.

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ویژگی بارز تبدیل TT، تقویت مولفه‌های فرکانس بالا در مقایسه با مولفه‌های فرکانس پایین است که این ویژگی تبدیل TT را به ابزاری کارآمد برای استخراج مولفه‌های گذرای فرکانس بالا تبدیل کرده است.



شکل ۲- تقویت مولفه‌ی فرکانس بالا در یک سیگنال نمونه (بالا) پس از اعمال تبدیل TT (پائین)

در این مقاله برای پردازش سیگنال، از تبدیل TT به صورت آنالین استفاده شده است، بدین شکل که در گام زمانی n

گام اول: نمونه برداری

از سیگنال‌های جریان ترانسفورماتورهای جریان موجود در ناحیه‌های حفاظتی باس‌بارها (ترانسفورماتورهای جریان ۱، ۳، ۴ و ۶) با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز، نمونه برداری می‌شود.

گام دوم: کاهش تعداد نمونه‌ها

به منظور کاهش بار محاسباتی پردازشگر مورد نیاز برای اجرای الگوریتم، فرآیند کاهش تعداد نمونه‌ها با انتخاب هر نمونه و ۱۹ نمونه قبل از آن (که هر کدام در فاصله یک میلی‌ثانیه‌ای دیگری است) انجام می‌شود.

گام سوم: محاسبه مولفه تحمیلی

مولفه‌های تحمیلی سیگنال‌های جریان از طریق حاصل تفریق نمونه‌ی حاضر از نمونه‌ی یک سیکل قبل، محاسبه می‌شود. در روند محاسبه گام سوم، با در نظر گرفتن آستانه-ای معادل یا کمتر از خطای سطح‌بندی در میکروپروسسور رله‌ی حفاظت باس‌بار، مولفه تحمیلی محاسبه می‌شود. لزوم این کار برای حذف اثر نویز در سیگنال‌های جریان اندازه‌گیری شده است. بدین ترتیب اثر نویز در سیگنال‌های اندازه‌گیری در محاسبه مولفه تحمیلی اثر قابل توجهی نخواهد داشت [۲۰].

شایان ذکر است که اگر به جای استفاده از مولفه‌های تحمیلی سیگنال‌های جریان از سیگنال‌های جریان استفاده شود، الگوریتم به استثنای وقوع خطای تکفاز به زمین با زاویه شروع خطای صفر درجه از سیگنال ولتاژ، در سایر حالت‌ها قادر به تشخیص وقوع خطا به ازای هر نوع خطایی و با هر مقدار زاویه‌ی شروع خطا و مقاومت خطا، با استفاده از اولین نمونه‌ی قابل اندازه‌گیری از جریان خطا در مدت زمان ۱۰ میکروثانیه خواهد بود [۲۰].

به منظور تشخیص خطای داخلی باس‌بار تنها با استفاده از اولین نمونه‌ی قابل اندازه‌گیری از جریان خطا در تمامی حالت‌های وقوع خطا، از مولفه‌های تحمیلی سیگنال جریان استفاده شده است.

گام چهارم: انتخاب فاز شاخص

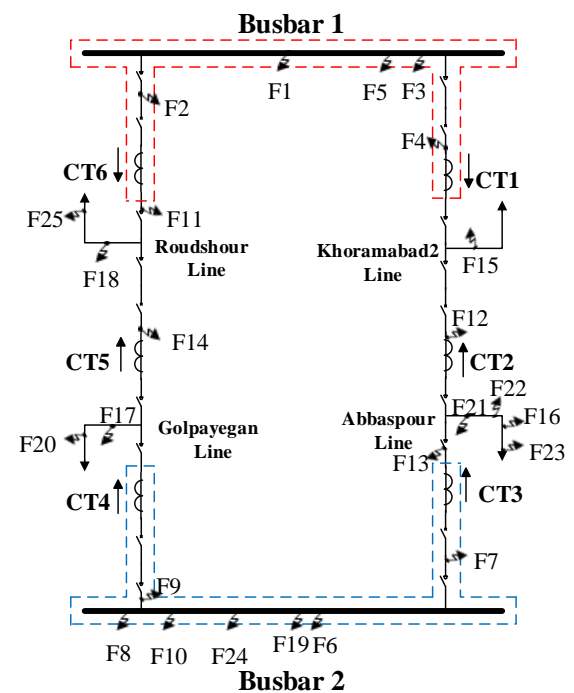
فاز شاخص در هر گام زمانی از میان سه فاز A، B و C به منظور ارزیابی شاخص‌های الگوریتم انتخاب می‌شود. انتخاب فاز شاخص بدین صورت است که ابتدا در هر یک از فازهای A، B و C بصورت مجزا، از میان مقادیر خروجی تبدیل آنالین TT اعمال شده به سیگنال‌های تحمیلی جریان ترانسفورماتورهای جریان ۱، ۳، ۴ و ۶

کاهش ۹۹ درصدی حجم محاسبات پردازشگر رله‌ی دیجیتال است.

روش جایگزین برای کاهش تعداد نمونه‌ها، آنست که به جای انتخاب فرکانس نمونه برداری ۱۰۰ کیلوهرتز از فرکانس ۱ کیلوهرتز استفاده شود (که معادل با ۲۰ نمونه در هر پنجره اطلاعاتی می‌شود)، در اینصورت زمان نمونه برداری برابر ۱ میلی‌ثانیه می‌شود که این زمان به معنای این است اگر خطا رخ دهد، اولین نمونه‌ی قابل اندازه‌گیری از خطا بعد از ۱ میلی‌ثانیه وارد پنجره اطلاعاتی می‌شود ولی اگر نمونه برداری با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز صورت گیرد و سپس با روش کاهش تعداد نمونه‌ها ۲۰ نمونه انتخاب شود، اولین نمونه‌ی قابل اندازه‌گیری از خطا بعد از ۱۰ میکروثانیه وارد پنجره اطلاعاتی می‌شود. همچنین اگر از فرکانس نمونه برداری ۱ کیلوهرتز استفاده شود، مولفه‌های فرکانس بالای تولید شده در هنگام وقوع خطا، قابل رویت نخواهند بود.

۳- ساختار الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص خطای داخلی باس‌بار تشریح شده است. شکل (۴) ساختار تک خطی حفاظتی پست ۴۰۰ کیلو ولت اراک ۱ را با آرایش ۱/۵ کلیدی نشان می‌دهد. ناحیه‌ی حفاظتی باس‌بارهای ۱ و ۲ با خط چین مشخص شده اند [۱۹]. در ادامه، روند اجرای الگوریتم به صورت گام به گام تشریح شده است.



شکل ۴- ساختار تک خطی حفاظتی پست ۱/۵ کلیدی

جدول ۱ - پلاریته سیگنال‌های جریان در صورت وقوع خطا

موقعیت خطا	ICT1/ICT6
خطای داخلی باس بار	بزرگتر از صفر
خطای خارجی روی خط	کوچکتر از صفر
خطای خارجی روی بی	کوچکتر از صفر

جدول ۲ - پلاریته سیگنال‌های جریان در صورت انجام کلیدزنی

موقعیت کلیدزنی	ICT1/ICT6
در ناحیه باس بار	کوچکتر از صفر
در سطح بی	کوچکتر از صفر

با توجه به نتایج جدول‌های ۱ و ۲، تنها در زمان وقوع خطا در ناحیه حفاظتی باس بار، حاصل تقسیم سیگنال‌های جریان موجود در ناحیه حفاظتی باس بار بزرگتر از صفر هستند. نتایج بررسی وقوع خطا در ناحیه حفاظتی باس بار ۲ نیز مشابه نتایج جدول‌های ۱ و ۲ است. با توجه به این نکته، در ادامه معیارهای تصمیم‌گیری در الگوریتم پیشنهادی تشریح شده است.

- خطا در ناحیه حفاظتی باس بار ۱: در این حالت مقدار شاخص TT_{16} مقداری بزرگتر از صفر خواهد بود.
- خطا در ناحیه حفاظتی باس بار ۲: در این حالت مقدار شاخص TT_{34} مقداری بزرگتر از صفر خواهد بود.
- در صورتیکه هر دو شاخص TT_{16} و TT_{34} مثبت باشند، الگوریتم با استفاده از مقدار شاخص $|TT_{13}|$ تصمیم‌گیری می‌کند. اگر خطا در ناحیه حفاظتی باس بار ۱ رخ داده باشد، بر اساس ویژگی تضعیف کنندگی خازن نشستی بر روی مولفه‌های فرکانس بالا، مقدار دامنه‌ی مولفه‌ی گذرا در محل ترانسفورماتور جریان ۱ از مقدار دامنه‌ی مولفه‌ی گذرا در محل ترانسفورماتور جریان ۳ بیشتر است، در نتیجه شاخص $|TT_{13}|$ مقداری بزرگتر از ۱+ دارد و اگر خطا در ناحیه حفاظتی باس بار ۲ رخ داده باشد، این شاخص مقداری کوچکتر از ۱+ دارد.

روند اجرای الگوریتم در شکل (۵) نشان داده شده است.

۴- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی پست

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهاد شده برای تشخیص خطای داخلی از خطای خارجی باس بار، با استفاده از نرم‌افزار EMTP-ATP Draw، پست ۴۰۰ کیلو ولت

(ترانسفورماتورهای جریان نشان داده شده در شکل (۴))، مقدار بیشینه انتخاب می‌شود. سپس با مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی انتخاب شده در هر فاز، فازی که دارای بزرگترین مقدار بیشینه باشد، به عنوان فاز شاخص الگوریتم در آن گام زمانی که الگوریتم در حال اجرا است، انتخاب می‌شود.

گام پنجم: تعریف شاخص‌های ارزیابی

تعریف شاخص‌های الگوریتم بر حسب مقادیر فاز شاخص انتخاب شده به صورت زیر انجام می‌شود:

شاخص شماره ۱: TT_{16}

تعریف شاخص TT_{16} (۱۶ به معنای شماره ترانسفورماتورهای جریان ۱ و ۶ در کنار یکدیگر است) مطابق رابطه‌ی (۳) است.

$$(3) \quad TT_{16} = \frac{\text{تبدیل آنلاین } TT \text{ اعمال شده به مولفه‌های تحمیلی جریان } CT1}{\text{تبدیل آنلاین } TT \text{ اعمال شده به مولفه‌های تحمیلی جریان } CT6}$$

شاخص شماره ۲: TT_{34}

تعریف شاخص TT_{34} (۳۴ به معنای شماره ترانسفورماتورهای جریان ۳ و ۴ در کنار یکدیگر است) مطابق رابطه‌ی (۴) است.

$$(4) \quad TT_{34} = \frac{\text{تبدیل آنلاین } TT \text{ اعمال شده به مولفه‌های تحمیلی جریان } CT3}{\text{تبدیل آنلاین } TT \text{ اعمال شده به مولفه‌های تحمیلی جریان } CT4}$$

شاخص شماره ۳: $|TT_{13}|$

تعریف شاخص $|TT_{13}|$ (۱۳ به معنای شماره ترانسفورماتورهای جریان ۱ و ۳ در کنار یکدیگر است) مطابق رابطه‌ی (۵) است.

$$(5) \quad |TT_{13}| = \frac{\text{تبدیل آنلاین } TT \text{ اعمال شده به مولفه‌های تحمیلی جریان } CT1}{\text{تبدیل آنلاین } TT \text{ اعمال شده به مولفه‌های تحمیلی جریان } CT3}$$

گام ششم: تصمیم‌گیری نهایی

بر مبنای اصول حاکم بر امواج گذرا، به سادگی می‌توان نشان داد که پلاریته‌ی نسبت سیگنال‌های جریان ترانسفورماتورهای جریان موجود در ناحیه حفاظتی باس-بار ۱ با توجه به جهت‌های در نظر گرفته شده برای ترانسفورماتورهای جریان در شکل (۴)، در صورت وقوع خطا در سه ناحیه‌ی خطوط انتقال، در سطح بی و در ناحیه حفاظتی باس بار ۱، مطابق جدول ۱ و در صورت انجام کلیدزنی در ناحیه حفاظتی باس بار ۱ و در سطح بی مطابق جدول ۲ نشان می‌باشد.

سوئیچگیر، خطوط انتقال، هادی‌های استفاده شده در سطح پست و مدل‌سازی باس‌بار و مدل‌سازی شبکه خارجی پست در بخش انتهایی خطوط انتقال، انجام شده است.

الف) مدل‌سازی شبکه‌ی داخلی پست

به منظور شبیه‌سازی پست ۱/۵ کلیدی، در ادامه شبیه‌سازی شبکه‌ی داخلی پست تشریح شده است.

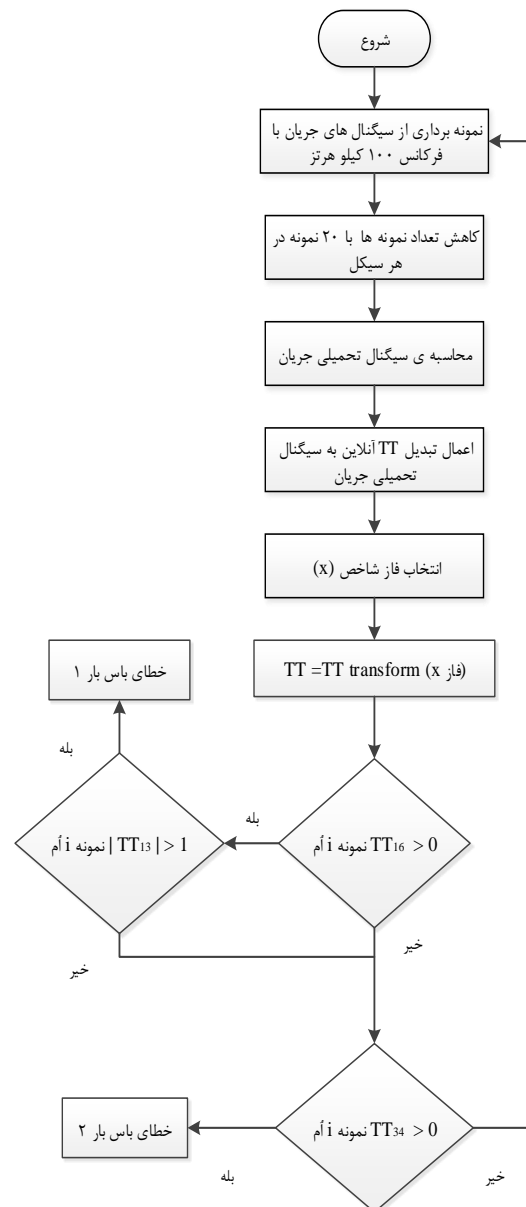
۱) مدل‌سازی خط انتقال: به منظور در نظر گرفتن اثر وابستگی فرکانسی پارامترهای خط، از مدل خط J.Marti [۲۱] استفاده شده است.

۲) مدل‌سازی تجهیزات سوئیچگیر: مدل تجهیزات سوئیچگیر، خازن‌های نشتی در محل استقرار این تجهیزات در پست است [۲۲]. مقادیر خازن‌های استفاده شده برای تجهیزات (به استثنای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی) در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلو ولت، مطابق مقادیر ذکر شده در [۲۲] است و مقدار خازن نشتی برای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی مطابق [۲۳] انتخاب شده است.

نکته حائز اهمیت آنکه در مورد بحث مطالعه در داخل پست، برخلاف عملی که در [۳ و ۷] و سایر مراجعی که در مطالعات فرکانس بالای خود از مدل خازن نشتی تجهیزات استفاده کرده‌اند، نباید به ازای تمامی خازن‌های نشتی موجود در سطح پست، یک خازن معادل در روی باس‌بار قرار داد، زیرا این اقدام در صورتی صحیح خواهد بود که بحث مطالعه در داخل پست مطرح نباشد و وجود پست صرفاً نقش یک گره را میان دو خط داشته باشد، مانند بررسی که در [۲۳] انجام شده است.

۳) مدل‌سازی هادی بین تجهیزات سوئیچگیر و باس‌بارها:

مدل هادی بین تجهیزات سوئیچگیر و باس‌بارها، به صورت مدل توزیع شده خط انتقال است [۲۲]. حداکثر فاصله میان تجهیزات سوئیچگیر برابر با ۷/۵ متر است که در این حالت زمان سیر موج برابر با ۴۸ نانو ثانیه است. با توجه به انتخاب فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ کیلو هرتز، گام زمانی برابر با ۱۰ میکرو ثانیه است، در نتیجه زمان سیر موج محاسبه شده از زمان گام زمانی شبکه کمتر است و از آنجاییکه گام زمانی شبکه باید بزرگترین مقسوم علیه مشترک زمان سیر موج تمامی خطوط شبکه باشد، استفاده از مدل توزیع شده برای هادی‌های میان تجهیزات سوئیچگیر امکان پذیر نمی‌باشد. به منظور رفع مشکل ایجاد شده، به جای مدل توزیع شده در شبکه مورد مطالعه از n تعداد مدل فشرده‌ی خط انتقال



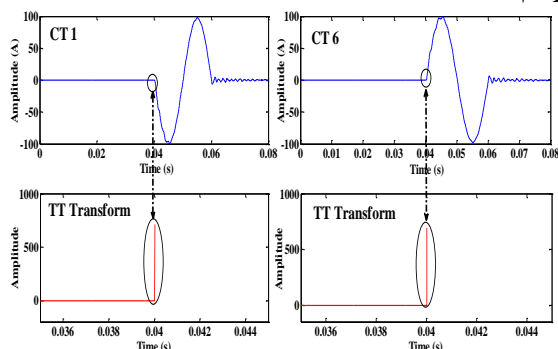
شکل ۵- الگوریتم پیشنهاد شده برای تشخیص خطای باس‌بار

۱/۵ کلیدی اراک ۱ به ازای ۴ فیدر مطابق شکل (۴) شبیه‌سازی شده است. داده‌های استفاده شده برای شبیه‌سازی کاملاً مطابق با اطلاعات واقعی پست اراک ۱ می‌باشند.

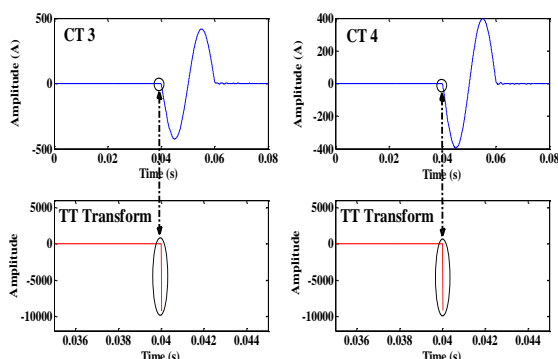
قدم اول در ارزیابی هر الگوریتم حفاظتی، طراحی یک مدل مناسب برای سیستم تحت مطالعه و منطبق با شرایط واقعی است. به منظور بررسی الگوریتم‌های طراحی شده برای حفاظت باس‌بار با استفاده از مولفه‌های گذرا، ابتدا لازم است تا در محدوده فرکانس‌های گذرا مدل مناسب تجهیزات سوئیچگیر و خطوط انتقال به درستی و منطبق با رفتار واقعی عناصر شبیه‌سازی شوند.

در این مقاله شبیه‌سازی مدل مورد مطالعه در دو بخش مدل‌سازی شبکه داخلی پست شامل مدل‌سازی تجهیزات

ترانسفورماتورهای جریان ۳ و ۴ و تبدیل آنالین TT آنها رسم شده است.



شکل ۵- سیگنال‌های جریان و تبدیل آنالین TT فاز A ترانسفورماتورهای جریان ۱ و ۶



شکل ۶- سیگنال‌های جریان و تبدیل آنالین TT فاز A ترانسفورماتورهای جریان ۳ و ۴

با توجه به مقادیر تبدیل TT در شکل‌های (۶) و (۷) واضح است که مقدار دو شاخص TT_{16} و TT_{34} بزرگتر از صفر هستند، بنابراین الگوریتم تشخیص وقوع خطا در یکی از نواحی حفاظتی باس بارها می‌دهد. در این حالت، مقدار شاخص $|TT_{13}|$ برابر 0.076 بدست می‌آید که از آنجاییکه این مقدار از ۱ کوچکتر است، تشخیص نهایی الگوریتم، وقوع خطای داخلی باس بار ۲ است.

۴-۲-۲- بررسی خطای خارجی نمونه در F25

روال بررسی الگوریتم در این حالت کاملاً مشابه بخش ۴-۲-۱ است. شکل موج سیگنال جریان فاز A ترانسفورماتور-های جریان ۱ و ۶ و تبدیل آنالین TT در شکل ۸ و شکل موج سیگنال جریان فاز A ترانسفورماتورهای جریان ۳ و ۴ و تبدیل آنالین TT در شکل ۹، به ازای ورود اولین نمونه‌ی خطا در پنجره‌ی اطلاعاتی، نشان داده شده است. با توجه به نتایج تبدیل آنالین TT در شکل‌های ۸ و ۹، واضح است که مقدار هیچ یک از شاخص‌های TT_{16} و TT_{34}

استفاده شده است. در این حالت به منظور داشتن خطای یک درصد در مدل‌سازی، بایستی به ازای هر ۱۳۰ متر یک مدل فشرده‌ی π استفاده شود، این در حالی است که در مدل‌سازی شبکه مورد مطالعه، برای مدل‌سازی هادی‌های بین تجهیزات، حداقل در هر ۷/۵ متر یک مدل π استفاده شده است، در نتیجه خطای مدل‌سازی بسیار کمتر از ۱ درصد خواهد بود.

ب) مدل‌سازی شبکه خارجی پست

در زمان وقوع خطای باس بار، زمان اولین موج برگشتی از انتهای کوتاه‌ترین خط انتقال (خط خرم‌آباد) با طول ۴۰ کیلومتر) برابر با $266/7$ میکروثانیه است، که با توجه به گام زمانی شبکه که برابر ۱۰ میکروثانیه است، موج برگشتی بعد از ۲۷ نمونه از شروع خطا به محل اندازه‌گیری سیگنال-های جریان می‌رسد، در حالی که در الگوریتم پیشنهادی، تشخیص وقوع خطای داخلی باس بار با اولین نمونه‌ی خطا انجام می‌شود، بنابراین در مدل‌سازی شبکه خارجی در مدل مورد مطالعه، نیازی به مدل‌سازی دقیق شبکه خارجی نمی‌باشد، به همین دلیل انتهای هر چهار خط انتقال متصل به پست، به عنوان شین بی‌نهایت در نظر گرفته شده است.

۴-۲- بررسی نتایج

در این قسمت، قبل از ارزیابی الگوریتم پیشنهاد شده به ازای حالت‌های مختلف خطا، روند اجرای الگوریتم به ازای وقوع خطای تکفاز به زمین فاز A با مقاومت خطای ۴۰ اهم و زاویه‌ی شروع خطای صفر درجه، در دو حالت وقوع خطای داخلی در ناحیه‌ی حفاظتی باس بار ۲ (نقطه‌ی F24 در شکل (۴)) و خطای خارجی در ۳۰ کیلومتری خط رودشور (نقطه‌ی F25 در شکل (۴)) بررسی شده است. زمان وقوع خطا در شبیه‌سازی ۴۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. مطابق فرآیند توضیح داده شده برای انتخاب فاز شاخص، در هر دو حالت وقوع خطای F25 و F24، فاز A به عنوان فاز شاخص الگوریتم انتخاب شده است، به همین دلیل نتایج موجود در شکل‌های (۶) تا (۹) که در ادامه نشان داده شده‌اند، به ازای مقادیر فاز A می‌باشند.

۴-۲-۱- بررسی خطای داخلی نمونه در نقطه F24

در شکل (۶) سیگنال جریان فاز A در ترانسفورماتورهای جریان ۱ و ۶ و تبدیل آنالین TT آنها را به ازای ورود اولین نمونه‌ی خطا در پنجره‌ی اطلاعاتی نشان داده شده است. در شکل (۷) به ازای همان اتصالی، سیگنال‌های خروجی

باس بار مستقل از نوع خطا، زاویه شروع خطای سیگنال ولتاژ و محل خطا می‌باشد.

شایان ذکر است که عملکرد الگوریتم‌هایی که تنها از سیگنال جریان برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند، به شدت در برابر خطاهایی با زاویه شروع خطای کوچک تحت تأثیر قرار می‌گیرند و احتمال عملکرد غیر صحیح در این حالت بالا می‌رود، در حالی که الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله با توجه به نتایج جدول‌های ۳ تا ۵، حتی زمانی که زاویه‌ی شروع خطای سیگنال ولتاژ صفر باشد نیز دارای عملکرد صحیح است.

۴-۳- مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر روش‌ها

هدف از ارائه الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، ارائه راهکاری جدید برای غلبه بر مشکلاتی است که در الگوریتم‌ها ارائه شده در گذشته برای حفاظت باس بار وجود دارد.

از جمله مشکلاتی که در الگوریتم‌های ارائه شده در مقاله-های مختلف وجود دارد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

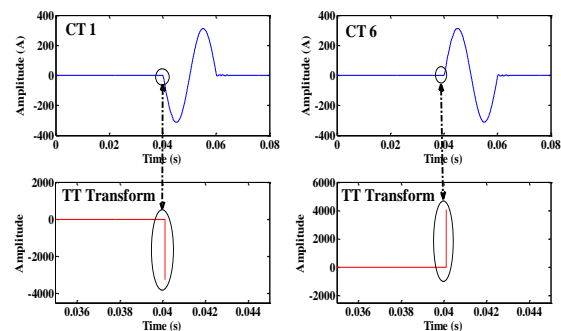
- نیاز به استفاده از سیگنال ولتاژ (ترانسفورماتور ولتاژ دارای پاسخ فرکانسی مناسبی نیست).
- نیاز به تشخیص نوع خطا قبل از ارزیابی وقوع خطا.
- عدم تشخیص وقوع خطا در زاویه‌ی شروع خطای صفر درجه از سیگنال ولتاژ.
- تحت تأثیر قرار گرفتن منطق حفاظتی از عواملی مانند اشباع ترانسفورماتور جریان، جریان بار و مقاومت خطا.
- عدم تشخیص سریع خطا.

در مقایسه با الگوریتم‌های ارائه شده برای حفاظت باس بار در مقالات مختلف، الگوریتم پیشنهاد شده دارای مزیت‌های قابل توجهی است. در جدول ۶ مواردی از این مزیت‌ها در مقایسه با برخی روش‌های جدید که در تمامی آنها برای حفاظت باس بار از مولفه‌های گذرا استفاده شده ارائه گردیده است.

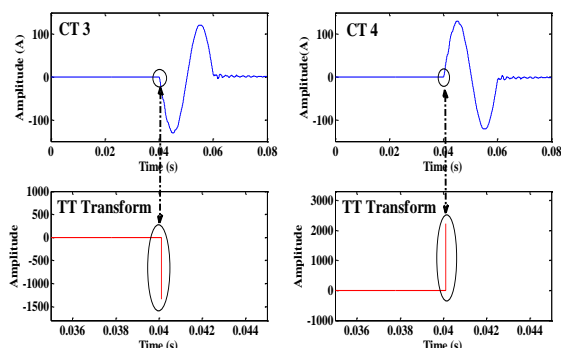
به منظور انجام مقایسه به معیارهای زیر توجه شده است:

- مدل‌سازی صحیح و دقیق پست مورد نظر در بازه فرکانس گذرا اعتبار داشته باشد.
- به دست‌بندی خطا برای اعمال روش احتیاج نداشته باشد.

بزرگتر از صفر نیست، بنابراین خطا در هیچ کدام از ناحیه-های حفاظتی باس بارها رخ نداده است.



شکل ۸- سیگنال‌های جریان و تبدیل آنلین TT فاز A ترانسفورماتورهای جریان ۱ و ۶



شکل ۹- سیگنال‌های جریان و تبدیل آنلین TT فاز A ترانسفورماتورهای جریان ۳ و ۴

۴-۲-۳- بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در تمامی حالات

در جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی وقوع انواع مختلف خطای داخلی و خطای خارجی باس بار به ازای برخی زاویه‌های شروع خطای سیگنال ولتاژ، مقاومت‌های مختلف خطا و محل‌های وقوع خطا، نشان داده شده است.

در جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی وقوع خطای داخلی دو فاز به زمین فازهای BC روی باس بار ۲ و خطای داخلی تکفاز به زمین فاز A، در ۵۰ کیلومتری خط گلپایگان برای زاویه‌های مختلف شروع خطا سیگنال ولتاژ و به ازای مقاومت خطای ۱۰۰ اهم ارائه شده است.

در جدول ۵ نیز نتایج شبیه‌سازی وقوع خطای خارجی تکفاز به زمین فاز A با مقاومت خطای ۱۰۰ اهم و زاویه‌ی شروع خطای صفر درجه‌ی سیگنال ولتاژ در فواصل ۳، ۵۰ و ۲۰۰ کیلومتری از خط عباسپور نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول‌های ۳، ۴ و ۵، الگوریتم پیشنهادی حفاظت

همانگونه که در جدول ۶ نشان داده شده است، علاوه بر سایر توانمندی‌ها، زمان عملکرد الگوریتم پیشنهادی در میان زمان عملکرد سایر الگوریتم‌ها دارای کمترین مقدار می‌باشد و با ورود اولین نمونه‌ی خطا در پنجره‌ی اطلاعاتی، تشخیص خطای داخلی از خطای خارجی باس بار صورت می‌گیرد.

- نتایج اجرای الگوریتم در همه لحظات از موج ولتاژ و در بازه وسیعی از مقادیر مقاومت خطا صورت گرفته باشد.
- فرکانس نمونه‌برداری تطابق لازم با قابلیت تجهیزات اندازه‌گیری واسط را داشته باشد.
- به چه مدت زمان (تعداد نمونه) پس از وقوع خطا برای انجام صحیح عملیات حفاظتی نیاز است.

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی به ازای انواع مختلف خطا

خطای باس بار	محل خطا	نشان خطا (در شکل ۴)	نوع خطا	مقاومت خطا	زاویه شروع خطا	TT ₁₆	TT ₃₄	TT ₁₃	نتیجه‌ی تشخیص	صحت نتیجه	
خطای داخلی	در ناحیه‌ی باس بار ۱	F1	Ag	۲۰۰ Ω	۳۰°	۱	۱	۱۱/۴۶	خطا در ناحیه ۱	✓	
		F2	BC	۴۰۰ Ω	صفر درجه	۰/۶۶	-۰/۳۹	۷/۷۴	خطا در ناحیه ۱	✓	
		F3	BCg	۰/۱ Ω	۰/۱ Ω	۶۰°	۱/۰۹	۳/۳۴	خطا در ناحیه ۱	✓	
		F4	3L	صفر اهم	۳L	۹۰°	۱/۵۲	-۲/۵۷	۴/۵۹	خطا در ناحیه ۱	✓
		F5	3Lg	۲۰۰ Ω	3Lg	۴۵°	۱/۰۵	۱/۷۳	۱۳/۶۶	خطا در ناحیه ۱	✓
	در ناحیه‌ی باس بار ۲	F6	Bg	۴۰۰ Ω	۴۰۰ Ω	صفر درجه	۱	۱	۰/۰۷۶	خطا در ناحیه ۲	✓
		F7	AB	۳۰۰ Ω	۳۰۰ Ω	۳۰°	-۰/۵۵	۱/۲۹	۰/۱۴	خطا در ناحیه ۲	✓
		F8	ABg	۲۰۰ Ω	۲۰۰ Ω	۴۵°	۰/۲۳	۰/۸۵	۰/۰۲۸	خطا در ناحیه ۲	✓
		F9	3L	صفر اهم	3L	صفر درجه	۰/۲۲	۰/۹	۰/۰۲۷	خطا در ناحیه ۲	✓
		F10	3Lg	۰/۱ Ω	3Lg	۹۰°	۰/۵۲	۰/۹۵	۰/۰۴۹	خطا در ناحیه ۲	✓
خطای خارجی	در سطح بی	F11	Ag	۰/۱ Ω	۹۰°	-۰/۸۱	-۰/۵۱	۳/۷۱	خطای خارجی	✓	
		F12	BC	۱۰۰ Ω	۳۰°	-۱/۳۱	-۱/۳۸	۱/۰۱	خطای خارجی	✓	
		F13	ABg	۲۰۰ Ω	۲۰۰ Ω	۶۰°	-۱/۶۸	-۱/۲۵	۰/۳۹	خطای خارجی	✓
		F14	3L	صفر اهم	3L	صفر درجه	-۰/۷۶	-۰/۷۱	۱/۰۸	خطای خارجی	✓
	روی خطوط انتقال	F15	Cg	۱۰۰ Ω	۱۰۰ Ω	۴۵°	-۱/۲۴	-۱/۶۶	۱/۸۲	خطای خارجی	✓
		F16	AC	۲۰۰ Ω	۲۰۰ Ω	صفر درجه	-۱/۵۱	-۱/۱۲	۰/۵۲	خطای خارجی	✓
		F17	BCg	۲۰۰ Ω	۲۰۰ Ω	۹۰°	-۰/۶۵	-۰/۷۷	۰/۴۳	خطای خارجی	✓
		F18	3Lg	۳۰۰ Ω	۳۰۰ Ω	۶۰°	-۰/۸۱	-۰/۶۱	۲/۴۱	خطای خارجی	✓

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی به ازای زاویه‌های مختلف شروع خطا

محل خطا	نشان خطا (در شکل ۴)	زاویه شروع خطا	TT ₁₆	TT ₃₄	TT ₁₃	نتیجه‌ی تشخیص	صحت نتیجه
باس بار ۲	F19	صفر درجه	۱	۱	۰/۰۷۵	خطا در ناحیه ۲	✓
	F19	۴۵°	۱	۱	۰/۰۷۱	خطا در ناحیه ۲	✓
	F19	۹۰°	۱	۱	۰/۰۷۲	خطا در ناحیه ۲	✓
خطا گلیپایگان	F20	صفر درجه	-۰/۶۴	-۰/۷۷	۰/۴۳	خطای خارجی	✓
	F20	۶۰°	-۰/۶۵	-۰/۷۷	۰/۴۴	خطای خارجی	✓
	F20	۹۰°	-۰/۶۴	-۰/۷۷	۰/۴۴	خطای خارجی	✓

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی خطای خارجی به ازای محل‌های مختلف خطا

فاصله‌ی خطا از ابتدای خط	نشان خطا (در شکل ۴)	TT ₁₆	TT ₃₄	[TT ₁₃]	نتیجه‌ی تشخیص	صحت نتیجه
۳ کیلومتر	F21	-۱/۵۷	-۱/۳۱	۰/۵۲	خطای خارجی	✓
۵۰ کیلومتر	F22	-۱/۵۳	-۱/۲۹	۰/۵۲	خطای خارجی	✓
۲۰۰ کیلومتر	F23	-۱/۵۱	-۱/۲۷	۰/۵۲	خطای خارجی	✓

ساده، سرعت عملکرد فوق العاده سریع، قابلیت اتکای بالا و حساسیت بالا، قابلیت عملیاتی دارد، زیرا در این بار محاسباتی پردازشگر با استفاده از روش کاهش تعداد نمونه-ها، ۹۹ درصد کاهش یافته و سیگنال‌های ورودی الگوریتم، سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط ترانسفورماتورهای جریان رایج موجود در پست می‌باشند.

از نظر سرعت عملکرد، الگوریتم پیشنهادی خطای داخلی باس‌بار را در کمترین زمان ممکن، با اولین نمونه‌ی خطا در مدت زمان ۱۰ میکروثانیه تشخیص می‌دهد که این ویژگی یکی از عوامل برتری الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های ارائه شده در این زمینه است. از دیگر عوامل برتری روش پیشنهاد شده، تحت تأثیر قرار نرفتن با مقاومت خطای بالا و زاویه‌ی شروع خطای کوچک سیگنال ولتاژ می‌باشد. از دیگر مزایای برجسته‌ی این مقاله که برای اولین بار در مطالعات داخل پست لحاظ شد، در نظر گرفتن مدل مناسب برای باس‌بار، هادی میان تجهیزات سوئیچگیر در سطح بی و معادل قرار ندادن خازن‌های نشستی تجهیزات سوئیچگیر برای باس‌بار و در نظر گرفتن آن به طور مجزا برای هر تجهیز در محل آنها می‌باشد. ایجاد تمایز میان خطای باس‌بار و خطای بی از دیگر نکات برجسته‌ی مقاله می‌باشد.

جدول ۶- نتایج مقایسه الگوریتم پیشنهاد شده با سایر مراجع

معیارهای مقایسه	[۲]	[۷]	[۹]	[۱۰]	الگوریتم پیشنهادی
مدل‌سازی دقیق و صحیح پست	×	×	×	×	✓
نیاز نداشتن به دسته‌بندی خطا	✓	×	✓	×	✓
بررسی در تمامی زوایای وقوع خطای سیگنال ولتاژ	✓	×	✓	✓	✓
بررسی در محدوده-ی وسیعی از مقدار مقاومت خطا	×	×	×	×	✓
تطابق فرکانس نمونه‌برداری با تجهیزات اندازه‌گیری	×	×	✓	×	✓
زمان تشخیص خطای داخلی (میلی ثانیه)	۸	۵	۱/۲	۱	۰/۰۱

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای تشخیص خطای داخلی باس‌بار مبتنی بر تبدیل زمان- زمان ارائه شد. الگوریتم پیشنهاد شده حفاظت باس‌بار در این مقاله علاوه بر داشتن ساختاری

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله تقدیر و تشکر خود را از همکاری سرکار خانم دکتر خلیلی‌فر، جناب آقای مهندس همتی و همچنین دفتر تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای باختر جهت جمع‌آوری اطلاعات پست اراک ۱، اعلام می‌دارند.

مراجع

- [1] R. Abd Allah, "Experimental results and technique evaluation based on alienation coefficients for busbar protection scheme", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 73, 2015, pp. 943-954.
- [2] G. Zou, H. Gao, "A traveling-wave-based amplitude integral busbar protection technique", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, 2012, pp. 602-609.

- [3] S. Song, G. Zou, "A novel busbar protection method based on polarity comparison of superimposed current", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 4, 2015, pp. 1914–1922.
- [4] M.M. Eissa, "A novel digital directional technique for bus-bars protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 1636–1641.
- [5] M. Sachdev, T. Sidhu, H. Gill, "A busbar protection technique and its performance during CT saturation and CT ratio-mismatch", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, 2000, pp. 895–901.
- [6] J.B. Royle, A. Hill, "Low impedance biased differential busbar protection for application to busbar of widely differential configuration", Fourth International Conference on Developments in Power Protection, 1989, pp. 40–44.
- [7] H. Shu, Y. Dai, X. Tian, "Study on the novel transient bus protection based on morphological top-bottom-operator", IJ .Intelligent Systems and Applications, Vol.3, No.3, 2011, pp. 33–39.
- [8] H. Shu, Y. Dai, X. Tian, "A novel bus protection based on transient energy of voltage traveling wave and current traveling wave", The 2nd International Workshop, Database Technology and Applications (DBTA), 2010, pp.1–4.
- [9] S.A. Gafoor, P.R. Rao, "A transient current based busbar protection scheme using wavelet transforms", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33, No. 4, 2011, pp. 1049–1053.
- [10] Z. Guo, J. Tao, Z. Tan, "Hilbert-Huang transform-based transient busbar protection algorithm", IET, Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, No. 14, 2015, pp. 2032–2039.
- [11] N. Perera, A.D. Rajapakse, D. Muthumuni, "Wavelet based transient directional method for busbar protection", International Conference on Power systems Transients (IPST2011) in Delft, the Netherlands, 2011.
- [12] Sh. Wang, X. Dong, Sh. Shi, "A novel busbar protection scheme based on wavelet multi-resolution signal decomposition", The 10th IET International Conference, Developments in Power System Protection, 2010, pp.1–5.
- [13] X.Z. Dong, M.A. Redfern, Z. Bo, F. Jiang, "The application of the wavelet transform of traveling wave phenomena for transient based protection", International Conference on Power Systems Transients (IPST) in New Orleans, USA, 2003.
- [14] D. Xinzhou, Ge. Yaozhong, X. Bingyin, "Fault position relay based on current travelling waves and wavelets", IEEE, Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, 2000, pp.1997–2004.
- [15] J.D. Duan, B.H. Zhang, "Research of traveling-wave differential bus protection based on wavelet transform", The 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004, pp.694–697.
- [16] M.I. Samesima, J.C. Oliveira, E.M. Dias, "Frequency response analysis and modeling of measurement transformers under distorted and voltage supply", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, 1991, pp.1762–1767.
- [17] C.R. Pinnegar, L. Mansinha, "A method of time-time analysis: The TT-transform", Digital signal processing, Vol. 13, No. 4, 2003, pp. 588–603.
- [18] C. Simon, M. Schimmel, J.J. Danobeitia, "On the TT-transform and its diagonal elements", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 56, No. 11, 2008, pp. 5709–5713.

[۱۹] نظام نامه سیستم رله و حفاظت شبکه انتقال برق ایران، مدیریت شبکه برق ایران، آذر ۱۳۹۳.

[۲۰] م. لشگری، "حفاظت باس بار با کمک امواج گذرا"، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دی ۱۳۹۴.

- [21] J.R. Marti, "Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1, 1982, pp. 147–155.
- [22] A.F. Imece, D.W. Durbak, H. Elahi, "Modeling guidelines for fast front transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996, pp.493–506.
- [23] M. Khodadadi, S.M. Shahrtash, "A new noncommunication-based protection scheme for three-terminal transmission lines employing mathematical morphology-based filters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 1, 2013, pp. 347–356.