

برنامه ارائه شفاهی مقالات در نشست ۱: الگوریتم های جدید حفاظتی (۱)

سه شنبه ۱۲ دی ماه ۹۱، ساعت: ۱۲:۰۰-۱۰:۳۰، سالن ابوریحان

روسای جلسه: آقای دکتر عسگریان ابیانه، آقای دکتر فرخزاد، آقای دکتر خدرزاده

ترتیب	عنوان مقاله	نام نویسندگان	زمان ارائه	کدمقاله
۱	ارائه روشی جدید جهت تشخیص فاز خطا در خطوط جبران شده با STATCOM	احمد شریعتی، جواد ساده	۱۰:۳۰	۲۱۲۵
۲	الگوریتمی برای بازسازی جریان ثانویه ی تخریب شده ی CT در اثر اشباع هسته	میثم جعفرنژاد قره تپه، کاظم مظلومی	۱۰:۴۸	۲۱۲۲
۳	ارائه روشی کارآمد برای هماهنگی حفاظتی بهینه شبکه توزیع و فوق توزیع شهرستان سنندج و ارزیابی عملکرد آن	میثم غلامی، ناجی قادرنژاد، لیلا رشیدی	۱۱:۰۶	۵۱۰۶
۴	الگوریتمی جدید در حفاظت دیفرانسیل خطوط انتقال جبران شده با TCSC	میثم حاجی زاده، دکتر جواد ساده	۱۱:۲۴	۲۱۰۳
۵	طرح های حفاظت ویژه در سیستمهای قدرت	حمید غلامی دهکردی، محمد احمدیان، مجتی خدرزاده	۱۱:۴۲	۱۱۱۱۸

الگوریتمی جدید در حفاظت دیفرانسیل خطوط انتقال جبران شده با TCSC

میثم حاجی‌زاده^۱

دکتر جواد ساده^۲

کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت

دانشیار مهندسی برق قدرت

^{۱،۲} گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

واژه‌های کلیدی: حفاظت دیفرانسیل خط، TCSC، خطوط جبران شده سری، مقاومت خطا، محل وقوع خطا

چکیده- در این مقاله الگوریتم حفاظت دیفرانسیل جبرانی جدیدی جهت حفاظت خطوط جبران شده با TCSC ارائه می‌شود. روشی ارائه شده با استفاده از ضرب مولفه‌های جریان اضافه شده به جریان بار دو انتها اقدام به تشخیص خطا خواهد نمود. در صورتی که ضرب مولفه‌های جریان اضافه شده به یا کاسته شده از جریان بار مثبت باشد نشان از خطای داخلی خواهد داشت و در صورتی که مقداری منفی داشته باشد می‌تواند ناشی از قوع خطای خارجی یا تغییراتی در سیستم TCSC باشد. به محض اینکه ضرب مولفه‌های اضافه شده به یا کاسته شده از جریان بار در دو انتها مثبت شود دستور قطع صادر خواهد شد. در این مطالعه TCSC به صورت دینامیکی و با تمام جزئیات مدل شده و تأثیر تغییرات در سیستم کنترلی و کلیه شرایط وقوع خطا نیز بر عملکرد الگوریتم ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم مورد بررسی از دو سو تغذیه است و در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. کلیه نتایج حاصله عملکرد صحیح الگوریتم را تأیید می‌کند.

در سالهای اخیر مقالات مختلفی در رابطه با حفاظت

دیفرانسیل خطوط انتقال ارائه شده است. این مقالات را می-

توان در چند گروه اصلی دسته‌بندی نمود و مورد بررسی قرار داد.

گروه اول شامل مقالاتی می‌شود که اصول کار آنها بر اساس مقادیر در حوزه‌ی زمان می‌باشد. در روشهای حفاظت دیفرانسیل زمانی الگوریتم‌های ارائه شده روی مقادیر زمانی نمونه‌ها کار می‌کنند و اصول تصمیم‌گیری آنها بر اساس مقادیر جریان دو انتهای ناحیه‌ی حفاظتی قرار دارد و نمونه‌های یک انتها با نمونه‌های انتهای دیگر که در زمان یکسان روی داده‌اند مقایسه و یا در یک الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روشها سنکرون بودن نمونه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و در صورت عدم سنکرونیزم نمونه‌ها ممکن است الگوریتم حفاظتی عملکرد صحیحی نداشته باشد.

۱- مقدمه

با رشد تکنولوژی مقدار مصرف برق نیز افزایش یافت و لازمی این افزایش، تأسیس نیروگاههای بیشتر، احداث خطوط انتقال جدید، افزایش ظرفیت خطوط موجود با بکارگیری جبران‌سازهای سری بود. برای تأمین بار در شبکه‌های کنونی نیز اکثر خطوط و نیروگاهها در حدود نهایی خود مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در نتیجه با توجه به اینکه اکثر تجهیزات شبکه در نزدیکی نقطه‌ی ناپایداری مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند نقش حفاظت در حفظ و نگهداری از چنین شبکه‌ای بسیار حائز اهمیت خواهد بود. با توجه به این شرایط، نیاز به حفاظتی با سرعت عملکرد بسیار زیاد و قابل تنظیم برای شبکه‌های بسیار پیچیده‌ی کنونی احساس می‌شود. از این رو حفاظت دیفرانسیل با توجه به مزایای زیادی که داراست راه حل مناسبی است.

مراجع [۱] و [۲] با استفاده از آنالیز همبستگی و سنجش تشابه سیگنالهای جریان دو انتها، خط انتقال جبران نشده را حفاظت نموده‌اند. مرجع [۳] با استفاده از روش پردازش سیگنال در حوزه‌ی زمان پلاریته امواج گذرا را برای کلیه‌ی خطوط تعیین نموده و با مقایسه‌ی پلاریته امواج گذرای خطوط با یکدیگر تعیین می‌کند که خطا روی خط یا باسبار اتفاق افتاده است. این روش نیاز به نمونه برداری با فرکانس بسیار بالایی دارد و برای ارتباط دو انتهای خط انتقال بایستی از کانالی با پهنای باند بزرگ استفاده نمود. مرجع [۴] با استفاده از پنجره‌ی میانگین متحرک^۱ برای خطوط انتقال طرح حفاظت دیفرانسیلی جریان را ارائه نموده است. مرجع [۵] با استفاده از پلاریته‌ی امواج گذرای ضبط شده در دو انتها و مقایسه آنها خطای داخلی و خارجی را از هم تشخیص می‌دهد.

گروه دوم شامل مقالاتی می‌شود که اساس کارشان بر اساس مقایسه‌ی فاز قرار دارد و از مدل فازوری خط استفاده می‌کنند. در روشهای حفاظت دیفرانسیل بر اساس مقایسه فاز بسته به الگوریتم حفاظتی نیاز است حداقل نمونه‌های یک سیکل سیستم قدرت بدست آمده سپس بر اساس فاز بدست آمده برای یک سیکل و مقایسه با فاز انتهای دیگر خطا تعیین می‌شود در صورتی که اختلاف فاز جریان دو انتها نزدیک به صفر باشد نشان از خطای داخلی خواهد بود و اختلاف فاز ۱۸۰ درجه نشان از نبود خطا یا خطای خارجی می‌باشد. در روشهای حفاظت دیفرانسیل بر اساس مقایسه‌ی فاز نیز نیاز است نمونه‌های یک انتها برای انتهای دیگر ارسال شود. در خطوط جبران شده‌ی سری ممکن است هنگام وقوع خطای داخلی اختلاف فاز جریانهای دو انتها نزدیک به ۱۸۰ درجه باشد و این الگوریتم با مشکل مواجه شود. مرجع [۶] یک رله-ی دیفرانسیل برای خطوط از دو سو تغذیه ارائه نموده است. در این مقاله یک شاخص جدید برای نواحی عملکرد و عدم عملکرد بر اساس مدل فازوری جریانهای دو انتها ارائه شده است. در مرجع [۷] بر اساس روش فازوری و استفاده از مولفه‌ی جریانی خطا که به جریان بار اضافه شده است حفاظت خطوط چند ترمیناله را انجام داده است. در مرجع [۸]

حفاظت دیفرانسیل برای خطوط جبران‌شده سری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله روش فوریه‌ی گسسته به منظور حفاظت سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نواحی حفاظتی در مختصات کارتزین و قطبی بررسی شده است.

گروه سوم مقالاتی را شامل می‌شوند که اساس کارشان مقایسه‌ی توان دو انتهای خط می‌باشد. در روشهای حفاظت دیفرانسیل توان تشخیص خطا بر اساس مقایسه‌ی اختلاف توان دو انتها انجام می‌شود. در صورتی که اختلاف توان دو انتها از مقدار تلفات خط بیشتر باشد نشان از خطا در ناحیه‌ی حفاظتی خواهد داشت. در روشهای حفاظت دیفرانسیل توان برای اندازه‌گیری توان دو انتها علاوه بر ترانس جریان به ترانس ولتاژ نیز نیاز می‌باشد.

در مرجع [۹] حفاظت دیفرانسیل بر اساس اصل بقای انرژی ارائه شده است. در این مقاله توان اکتیو دو طرف خط اندازه‌گیری می‌شود در صورتی که اختلاف این دو توان از مقدار مشخصی بیشتر باشد نشان از وقوع خطا در داخل ناحیه-ی حفاظتی می‌باشد.

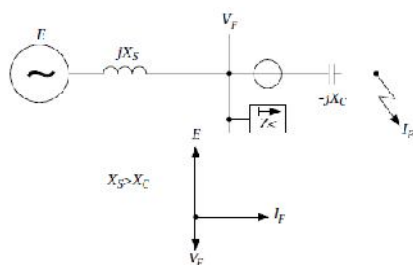
گروه چهارم شامل مقالاتی است که دو روش با اساس کار متفاوت را با یکدیگر ترکیب می‌کنند. بسته به نیاز سیستم حفاظتی بعضی اوقات نیاز است برای از بین بردن نقایص مربوط به یک الگوریتم حفاظتی از الگوریتم دیگری در کنار الگوریتم قبلی استفاده شود که در این حالت نوع الگوریتم حفاظتی الگوریتم ترکیبی خواهد بود که علاوه بر پوشش نقایص الگوریتم قبلی آنها را به مزیت تبدیل خواهد نمود.

مرجع [۱۰] حفاظت دیفرانسیل ترکیبی را ارائه نموده است. این مرجع رله‌ی دیفرانسیل جریانی و الگوریتم امواج گذرا را با یکدیگر ترکیب نموده است تا بتواند از ویژگی‌های هر دو روش استفاده نموده و معایب هر یک از آنها را برطرف نماید.

۲- مشکلات حفاظت خطوط جبران‌شده با TCSC

هنگام استفاده از TCSC در خط انتقال مشکلاتی پیش می‌آید که هنگام نبود TCSC چنین مشکلاتی وجود نخواهد داشت در نتیجه استفاده از روشهای متعارف به منظور حفاظت

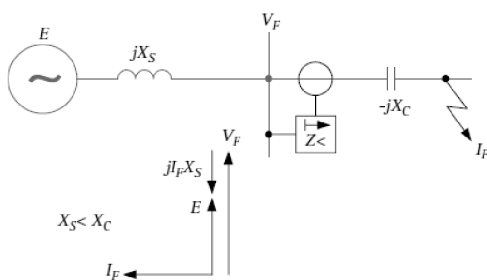
^۱ Moving Window Averaging



شکل (۱) وارونگی ولتاژ در خط انتقال جبران‌شده‌ی سری.

۲-۴- وارونگی جریان

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، هنگامی که TCSC بین نقطه‌ی اندازه‌گیری و محل خطا واقع شود و راکتانس TCSC خازنی بوده و از راکتانس خط که بین نقطه‌ی خطا تا ژنراتور قرار گرفته است بزرگتر باشد وارونگی جریان روی می‌دهد در این شرایط ولتاژ باس اندازه‌گیری شده و ولتاژ پایانه‌ی ژنراتور با یکدیگر هم‌فاز خواهند بود و جریان نسبت به آنها پیش‌فاز می‌شود. در این حالت جریان دو پایانه هنگام وقوع خطاهای داخلی دارای اختلاف فاز نزدیک به 180° درجه است که باعث عدم عملکرد رله‌های دیفرانسیل مقایسه‌ی فاز و الگوریتم‌هایی می‌شود که بر اساس مقایسه‌ی نمونه‌های جریانی دو انتها تصمیم‌گیری می‌کنند خواهد شد. وارونگی جریان باعث عدم قرارگیری مشخصه‌ی امپدانس اندازه‌گیری شده ناشی از خطا در داخل ناحیه‌ی عملکرد خواهد شد.



شکل (۲) وارونگی جریان در خط انتقال جبران‌شده‌ی سری.

۲-۵- اضافه ولتاژ

در صورتی که راکتانس TCSC خازنی باشد و هنگام وقوع خطا با راکتانس خط برابر شود مدار برآیند ناشی از TCSC و راکتانس خط یک مدار رزونانسی خواهد بود و

خطوط جبران‌شده‌ی سری با مشکلات جدی مواجه خواهد شد. در ادامه عملکرد الگوریتم‌های حفاظتی هنگام نصب TCSC بررسی می‌شود.

۲-۱- کاهش امپدانس

هرگاه راکتانس TCSC خازنی باشد و بین محل خطا و نقطه‌ی اندازه‌گیری قرار بگیرد اندازه‌گیری امپدانس دچار مشکل خواهد شد. بدین صورت که مقدار راکتانس TCSC از مقدار راکتانس خط کم شده و باعث کاهش مقدار امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله می‌شود. این امر باعث خواهد شد هنگام وقوع خطاهای خارجی عملکرد ناصحیح رخ دهد.

۲-۲- افزایش امپدانس

هنگامی که راکتانس TCSC سلفی است و بین محل خطا و نقطه‌ی اندازه‌گیری قرار می‌گیرد مقدار امپدانس اندازه‌گیری شده بزرگتر از مقدار امپدانس رله برای آن تنظیم شده است. در این حالت راکتانس سلف با راکتانس خط جمع شده و مقدار امپدانس اندازه‌گیری شده بزرگتر از مقدار امپدانس تنظیمی برای رله می‌شود. که این امر باعث عدم عملکرد رله برای خطاهای داخلی می‌شود.

۲-۳- وارونگی ولتاژ

هنگامی که راکتانس برآیند TCSC خازنی باشد و بین محل خطا و نقطه‌ی اندازه‌گیری قرار داشته باشد و میزان راکتانس القایی خط در مقایسه با راکتانس TCSC بزرگتر باشد همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است ولتاژ باس اندازه‌گیری شده نسبت به ولتاژ ترمینال ژنراتور به اندازه‌ی 180° درجه اختلاف فاز پیدا می‌کند که باعث وقوع وارونگی ولتاژ خواهد شد. این امر باعث می‌شود منحنی مشخصه‌ی امپدانس دیده شده خارج از ناحیه‌ی عملکرد رله‌ی دیستانس قرار گیرد.

باعث بروز اضافه ولتاژهایی ناشی از پدیده‌ی تشدید در خطوط خواهد شد.

۳- مدل‌سازی سیستم

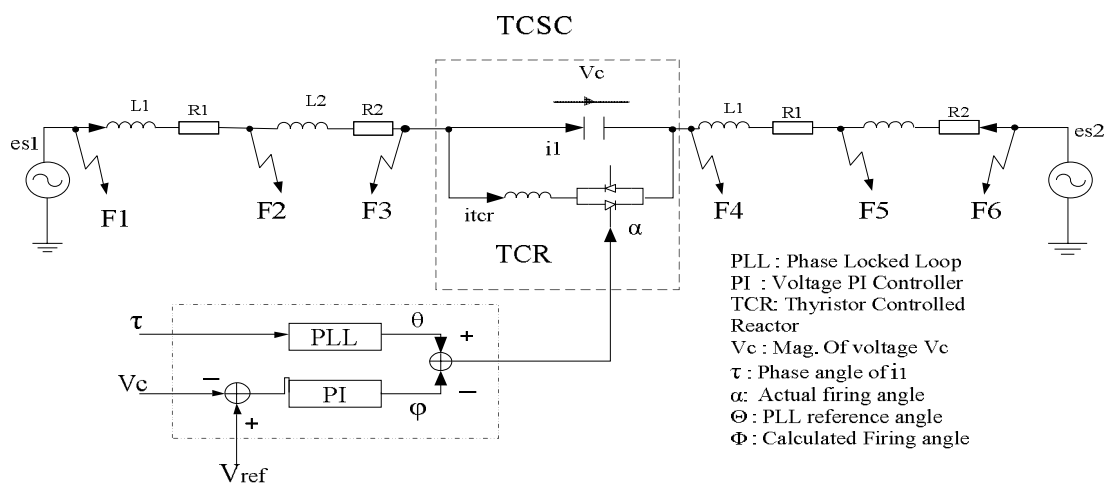
سیستم آزمایشی مورد استفاده در این مقاله یک خط انتقال بلند که توسط TCSC جبران شده و در دو انتها به دو منبع ولتاژ با ولتاژ ثابت متصل شده است. شکل (۳) یک دیاگرام تک خطی از سیستم مورد آزمایش را نشان می‌دهد که مقاومت و اندوکتانس خط به صورت فشرده مدل شده‌اند. هر فاز TCSC ترکیبی از یک خازن ثابت و یک TCR می‌باشد که به صورت موازی با یکدیگر بسته شده‌اند. TCSC به وسیله‌ی تأخیر در سیگنال آتش ترستورها کنترل می‌شود و سیگنال آتش توسط یک PLL با جریان خط سنکرون می‌شود. کنترل کننده نیز مدل PI است و ترکیبی از یک جبران‌کننده‌ی سری و فیلتر فیدبک می‌باشد [۱۱]. سه سیستم آزمایشی به منظور بررسی دقت مدل ارائه شده برای TCSC مورد بررسی قرار گرفته است. در این سه سیستم آزمایشی پارامترها و نقاط کار متفاوتی اعمال شده است.

- سیستم ۱ — ۷۵٪ جبران‌سازی در مد خازنی.
- سیستم ۲ — ۴۰٪ جبران‌سازی در مد خازنی.
- سیستم ۳ — ۷۵٪ جبران‌سازی در مد سلفی.

پارامترهای سیستم آزمایشی مطابق با [۱۲] انتخاب شده است. و اطلاعات سیستم آزمایشی در ضمیمه ارائه شده است. خطاهای تک‌فاز، دوفاز و سه‌فاز در نقاط نشان داده شده در شکل (۳) به ازای مقاومت‌های مختلف اعمال شده و الگوریتم پیشنهادی به ازای این شرایط بررسی خواهد شد.

۴- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر جریان اضافه شده به یا کاسته شده از جریان بار بعد از وقوع خطا یا بعد از وقوع تغییرات در سیستم کنترلی TCSC می‌باشد. در صورتی که میزان راکتانس خازنی TCSC نزدیک به ۷۵ درصد راکتانس خط باشد هنگام وقوع خطا در وسط خط وارونگی جریان روی خواهد داد و جریان دو انتها دارای اختلاف فاز نزدیک به ۱۸۰ درجه خواهد بود. در صورتی که از روشهای دیفرانسیل فازوری در این حالت استفاده گردد به علت اختلاف فاز نزدیک به ۱۸۰ درجه جریان دو انتها، خطای داخلی به اشتباه به عنوان خطای خارجی در نظر گرفته شده و رله عملکردی نخواهد داشت. در حالی که هنگام وقوع خطاهای خارجی اختلاف فاز جریان دو انتها دقیقاً برابر ۱۸۰ درجه بوده ولی هنگام وقوع وارونگی جریان این اختلاف نزدیک به ۱۸۰ است و در لحظات ابتدایی پس از وقوع خطا علامت مولفه‌ی جریان اضافه شده به جریان بار برای هر دو انتها یکسان می‌باشد در صورت ضرب مثبت مولفه در یکدیگر در لحظات ابتدایی مقدار حاصلضرب مثبت بوده و با استفاده از این روش می‌توان خطای داخلی را از خطای خارجی به درستی تشخیص داد. با استفاده از این روش می‌توان خطاهای داخلی و خارجی را از یکدیگر تشخیص داد و خطوط جبران‌شده‌ی سری را حفاظت نمود. در حالتی که خطایی رخ نداده است دامنه جریان سیکل جدید با سیکل قبلی یکسان است و اختلاف جریان سیکل جدید با سیکل قبلی نزدیک به صفر است، در واقع مولفه‌ی جریان اضافه شده برای هر دو انتها نزدیک به صفر خواهد بود. معادلات (۱) و (۲) جریان اضافه شده به جریان بار را به ترتیب برای جریان سمت فرستنده و گیرنده نمایش می‌دهد. معادله‌ی (۳) معیار عملکرد را نشان می‌دهد. در صورتی نامعادله‌ی (۴) صادق باشد رله عمل نموده و خطی که در آن خطا روی داده است را از مدار خارج می‌کند.



شکل ۳) دیاگرام تک خطی سیستم شبیه سازی شده.

راحتی قابل ساخت و اجرا می باشد و برای اجرای آن به سخت افزار پیچیده ای نیاز نیست. قابلیت اطمینان این الگوریتم بسیار بالا می باشد، به طوری که در مقابل تمام انواع خطاها که ممکن است در خط روی دهد دارای عملکرد مناسبی می باشد و خط را در مقابل خطاهای ضعیف و شدید به خوبی حفاظت می نماید. درصد جبران سازی بر عملکرد رله تأثیر گذار نمی باشد. تغییرات که در سیستم کنترلی TCSC روی می دهد تأثیری بر عملکرد الگوریتم ندارد. عملکرد در مد سلفی و یا خازنی TCSC بر صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی تأثیری ندارد. نوع خطا و زاویه ی وقوع خطا بر صحت عملکرد رله تأثیر گذار نیست. سرعت عملکرد رله بسیار زیاد است و هنگام وقوع خطاهای شدید از ناپایداری سیستم جلوگیری می کند و برای خطاهای با شدت کمتر نیز از سرعت مناسبی برخوردار می باشد. با استفاده از این الگوریتم می توان فازهایی که در آنها خطا روی داده است را مشخص نمود. این الگوریتم هنگام وقوع خطاهای بسیار شدید در مرز بین دو ناحیه در صورتی که خطا در ناحیه ی حفاظتی قرار داشته باشد آن را تشخیص می دهد و در صورتی که در خارج ناحیه ی حفاظتی باشد عملکردی نخواهد داشت و کل ناحیه ی حفاظتی را به طور کامل حفاظت می نماید و برای خطاهای خارجی هیچ عملکردی نشان نمی دهد.

۵- نتایج شبیه سازی ها

$$\Delta I_{\text{send}}(k) = I_{\text{send}}(k) - I_{\text{send}}(k - n) \quad (1)$$

$$\Delta I_{\text{recieve}}(k) = I_{\text{recieve}}(k) - I_{\text{recieve}}(k - n) \quad (2)$$

$$OP = \Delta I_{\text{recieve}}(i) * \Delta I_{\text{send}}(i) \quad (3)$$

$$OP > Res \quad (4)$$

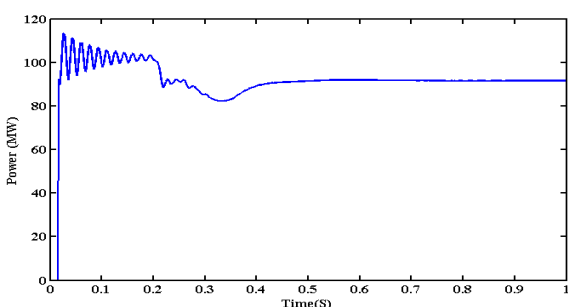
در معادلات بالا ΔI_{send} و $\Delta I_{\text{recieve}}$ به ترتیب جریان اضافه شده به جریان بار سمت فرستنده و گیرنده، n تعداد نمونه در هر سیکل، k بیانگر نمونه ی k ام که از $n+1$ شروع می شود، I_{send} و I_{recieve} به ترتیب بیانگر جریان سمت فرستنده و گیرنده می باشند، OP شاخص عملکرد برای رله و Res معیار بازدارنده از عملکرد می باشد در صورتی که OP از Res بزرگتر باشد رله فرمان قطع را صادر خواهد نمود.

این الگوریتم برای خطاهای شدید واکنش بسیار سریعی دارد به طوری که OP به سرعت افزایش می یابد و از حد بازدارنده بیشتر می شود. به علت ماهیت ضرب نمونه ی یک انتها در انتهای دیگر در صورتی که نویز روی سیگنال یک انتها سوار شود و انتهای دیگر مشکلی نداشته باشد پس از ضرب مولفه ی جریان دو انتها در یکدیگر به علت اینکه مولفه ی جریان یک انتها نزدیک به صفر می باشد پس از ضرب با مولفه ی دارای نویز آن را تضعیف می نماید و باعث کاهش حساسیت الگوریتم به نویز می شود. به منظور ارتباط دو انتهای خط نیاز به استفاده از کانال با پهنای باند زیاد نمی باشد. تعداد نمونه برداری در هر سیکل ۳۰ نمونه می باشد. الگوریتم به

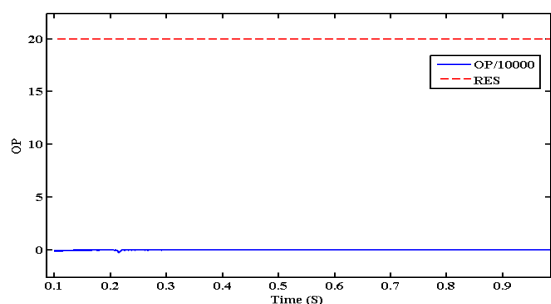
پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. کلیه مشخصه‌های عملکرد بدست آمده مربوط به فاز A می‌باشد و مشخصه‌ی عملکرد دو فاز B و C نشان داده نشده است.

۵-۱-۱- وارد مدار شدن TCSC در مد سلفی

در این حالت راکتانس TCSC حدود ۲۰ اهم می‌باشد و در لحظه‌ی ۰/۲ ثانیه وارد مدار می‌شود. بعد از وارد شدن TCSC به مدار مقدار توان انتقالی عبوری از خط کاهش یافته در این حالت مشخصه‌ی عملکرد از حد بازدارنده کوچکتر بوده و الگوریتم پیشنهادی عکس‌العملی نشان نمی‌دهد.



شکل ۴: توان انتقالی عبوری از خط بعد از وارد مدار شدن TCSC در مد سلفی.



شکل ۵: مشخصه‌ی عملکرد الگوریتم پیشنهادی به ازای وارد مدار شدن TCSC در مد سلفی.

۵-۱-۲ وارد مدار شدن TCSC در مد خازنی

در این حالت TCSC دارای راکتانس ۱۳۲ اهم بوده و در لحظه‌ی ۰/۲ ثانیه وارد مدار می‌شود. بعد از وارد شدن TCSC به مدار مقدار توان انتقالی خط افزایش یافته و مقدار تأخیر زاویه‌ی آتش‌تریستور به منظور کاهش اثر سلف موازی با خازن افزایش می‌یابد.

در این قسمت تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد رله بررسی می‌شود. بررسی تأثیر سیستم کنترلی، تأثیر محل خط، تأثیر مقاومت خط، تأثیر نوع خط، تأثیر زاویه شروع خط بر عملکرد رله به ترتیب در بخش‌های اول تا پنجم انجام شده است.

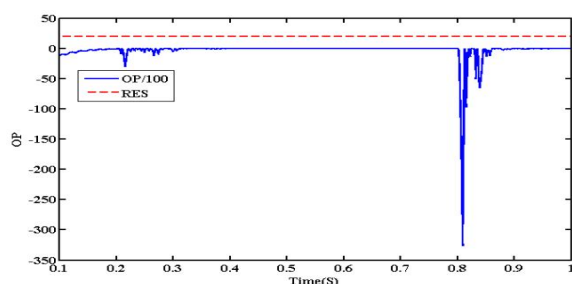
با توجه به مشکلاتی که در اثر نصب خازن سری در خط ایجاد می‌شود به جز بخش‌های اول و ششم، در کلیه بخش‌ها درصد جبران‌سازی ۷۵ در نظر گرفته می‌شود. کلیه بررسی‌ها بر روی سیستم نشان داده شده در شکل (۳) انجام می‌شود.

منحنی‌های نشان داده در شبیه‌سازی‌ها مقدار OP را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل‌ها مشخص است هنگام وقوع خط‌های داخلی OP مثبت می‌باشد و برای خط‌های خارجی یا تغییرات در سیستم کنترلی OP منفی است. مقدار در نظر گرفته شده برای Res در کلیه شبیه‌سازی‌ها برابر ۲۰ می‌باشد، در صورتی که مقدار OP از ۲۰ بیشتر شود رله عمل خواهد نمود و در صورتی که کمتر از ۲۰ باشد رله هیچ واکنشی نشان نخواهد داد. عدد ۲۰ که در واقع حد بازدارنده از عملکرد می‌باشد بسیار بزرگ انتخاب شده است و این باعث افزایش قابلیت اطمینان در عملکرد رله می‌شود تا به ازای تمام شرایطی که ممکن است در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته نشده است رله واکنش نایجایی نداشته باشد. در کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده به منظور واضح بودن بیشتر شکل‌ها تنها عملکرد رله روی یک فاز رسم شده است.

۵-۱- بررسی تغییرات سیستم کنترلی بر عملکرد رله

در این بخش به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی بعد از وارد مدار شدن TCSC می‌پردازیم. در حالت اول TCSC به منظور کاهش توان عبوری از خط در حالت مد سلفی وارد مدار می‌شود و در حالت دوم به منظور افزایش توان عبوری به صورت مد خازنی وارد مدار خواهد شد. در حالت سوم TCSC در مد خازنی است که افت ولتاژی به اندازه‌ی ۵٪ در e_{s1} روی می‌دهد در این حالت نیز عملکرد الگوریتم پیشنهادی به ازای تغییرات در سیستم کنترلی بررسی می‌شود. در حالت چهارم به ازای افزایش ولتاژی به اندازه‌ی ۵٪ که در پایانه‌ی e_{s2} روی می‌دهد در حالتی که TCSC در مد سلفی است الگوریتم

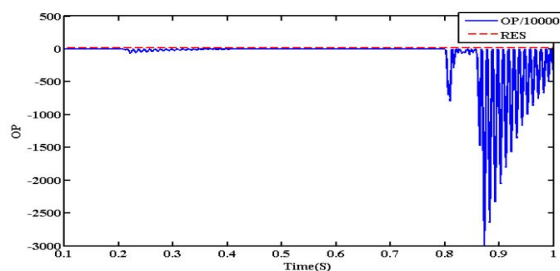
داشتن توان عبوری روی می‌دهد. در این حالت زاویه‌ی آتش ترستورها تغییر می‌کند و راکتانس معادل TCSC تغییر خواهد نمود به ازای این تغییرات الگوریتم پیشنهادی هیچ عکس-عملی نشان نمی‌دهد و مشخصه‌ی عملکرد از حد بازدارنده کوچک می‌باشد. در شکل (۹) مشخصه‌ی عملکرد رله به ازای این شرایط نشان داده شده است.



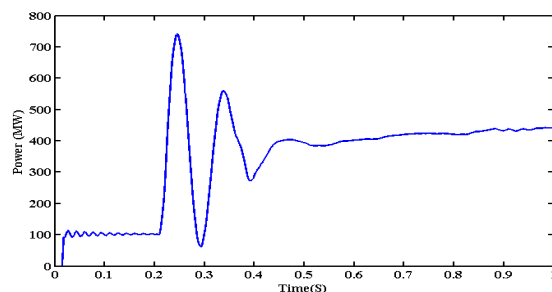
شکل ۹) مشخصه‌ی عملکرد رله هنگامی که افزایش ولتاژی به اندازه‌ی ۵ درصد در e_{s2} اتفاق می‌افتد.

۵-۲- بررسی تأثیر محل خطا

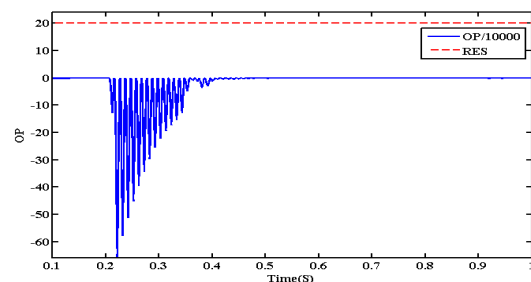
به ازای وقوع خطای سه‌فاز با مقاومت 0.001Ω اهم در نقاط مختلف عملکرد الگوریتم پیشنهادی بررسی می‌شود. در این حالت TCSC در مد خازنی با درصد جبران‌سازی ۷۵ در لحظه-ی 0.2 ثانیه وارد مدار می‌شود. خطا در لحظه‌ی 0.8 ثانیه روی می‌دهد. کلیه‌ی مشخصه‌های عملکرد بدست آمده مربوط به فاز A می‌باشد و مشخصه‌ی عملکرد دو فاز B و C نشان داده نشده است. با توجه به شکل‌های ۱۰ الی ۱۵ مشخص است که به ازای خطای داخلی در نقاط F_2 - F_6 مشخصه‌ی عملکرد از حد بازدارنده بزرگتر شده است ولی با توجه به شکل‌های F_1 و F_6 مشخصه‌ی عملکرد از حد بازدارنده به ازای خطاهای خارجی کوچکتر می‌باشد و دستور قطع به ازای وقوع خطاهای خارجی صادر نخواهد شد.



شکل ۱۰) مشخصه‌ی عملکرد رله به ازای خطا در نقطه‌ی F_1



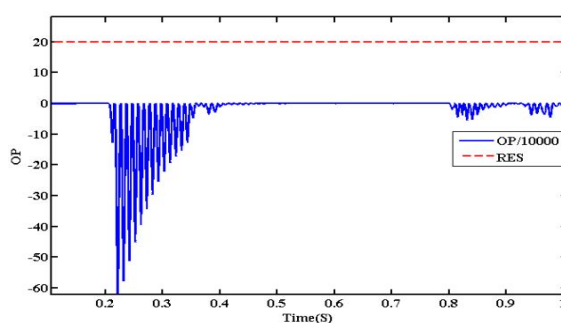
شکل ۶) توان انتقالی عبوری از خط بعد از وارد مدار شدن TCSC در مد خازنی.



شکل ۷) مشخصه‌ی عملکرد الگوریتم پیشنهادی به ازای وارد مدار شدن TCSC در مد خازنی.

۵-۳- افت ولتاژ ۵ درصدی در e_{s1}

در این حالت افت ولتاژی به اندازه‌ی ۵ درصد در لحظه‌ی 0.8 ثانیه در منبع ولتاژ e_{s1} روی می‌دهد. با توجه به شکل (۷) مشخص است که مشخصه‌ی عملکرد رله بعد از این اتفاق از مقدار حد بازدارنده کوچکتر می‌باشد و رله هیچ گونه عملکردی نخواهد داشت.



شکل ۸) مشخصه‌ی عملکرد رله هنگامی که افت ولتاژی به اندازه‌ی ۵ درصد در e_{s1} اتفاق می‌افتد.

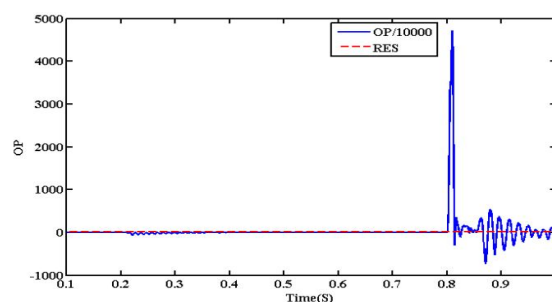
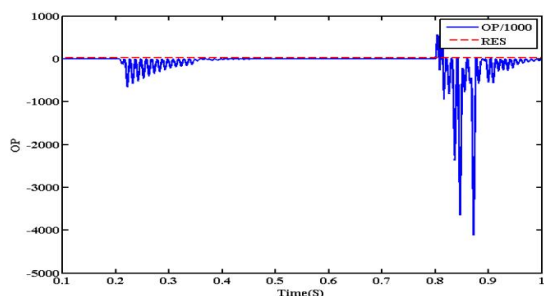
۵-۴- افزایش ولتاژ ۵ درصدی در e_{s2}

به ازای افزایش ولتاژ باس دریافت کننده‌ی توان (e_{s2}) تغییراتی در سیستم کنترل کننده‌ی TCSC جهت ثابت نگاه

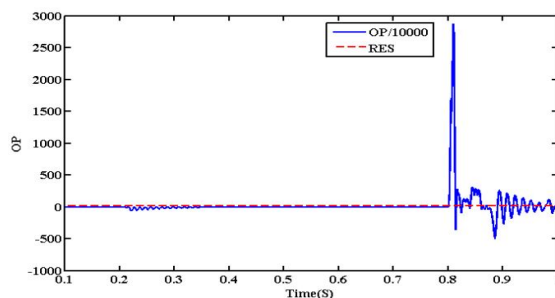
شکل ۱۵) مشخصه عملکرد رله به ازای خطا در نقطه F_1 .

۳-۵- بررسی تأثیر مقاومت خطا

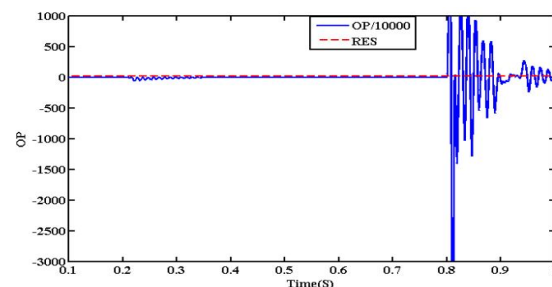
با توجه به اینکه الگوریتم‌های حفاظتی به ازای خطاهای شدید خارجی و خطاهای ضعیف داخلی دچار عملکرد ناصحیح می‌شوند در قسمت قبل الگوریتم پیشنهادی هنگام وقوع خطاهای داخلی و خارجی در شدیدترین حالت مورد ارزیابی قرار گرفت و عملکرد صحیحی داشت. در این بخش الگوریتم پیشنهادی تنها به ازای ضعیف‌ترین خطاهای داخلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. الگوریتم پیشنهادی به ازای خطاهای شدید خارجی عملکرد صحیحی داشت در نتیجه به ازای خطاهای خارجی با شدت کمتر مورد سنجش قرار نمی‌گیرد. در این بررسی TCSC در مد خازنی قرار دارد و درصد جبران‌سازی ۷۵ بوده و در لحظه $۰/۲$ ثانیه وارد مدار می‌شود. به ازای چنین شرایطی الگوریتم پیشنهادی هنگام وقوع خطاهای تک‌فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم بررسی می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱۴-۱۷ مشخص است که الگوریتم پیشنهادی به ازای خطای تک فاز، فاز A با زمین به ازای هر چهار نقطه F_1 - F_2 عملکرد صحیحی داشته است. کلیدی مشخصه‌های بدست آمده مربوط به فاز A می‌باشد و مشخصه عملکرد دو فاز B و C نشان داده نشده است. به ازای تغییرات مقاومت از ۰/۰۱ اهم تا ۱۰۰۰ اهم در نقطه ۴، زمان عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای کلیدی مقاومت‌ها ۰/۵ میلی ثانیه می‌باشد، به ازای کلیدی مقاومتها به ازای اولین نقطه نمونه برداری پس از وقوع خطا مشخصه عملکرد از حد بازدارنده بزرگتر شده و رله فرمان قطع صادر نموده است. در صورتی که مقدار حد بازدارنده بزرگتر بود برای مقاومت‌های بزرگتر تغییرات زمان عملکرد به ازای تغییرات مقاومت خطا قابل ملاحظه‌تر بود.



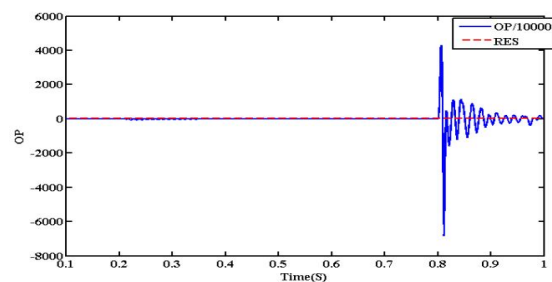
شکل ۱۱) مشخصه عملکرد رله به ازای خطا در نقطه F_2 .



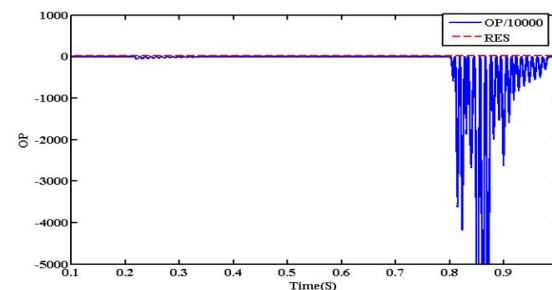
شکل ۱۲) مشخصه عملکرد رله به ازای خطا در نقطه F_3 .



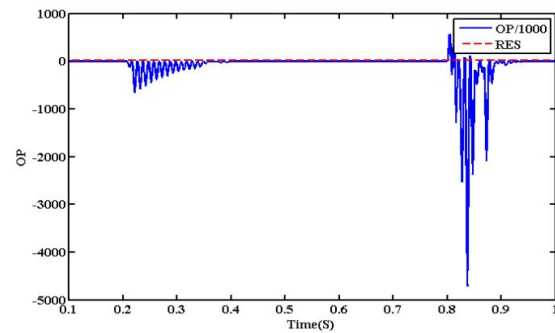
شکل ۱۳) مشخصه عملکرد رله به ازای خطا در نقطه F_4 .



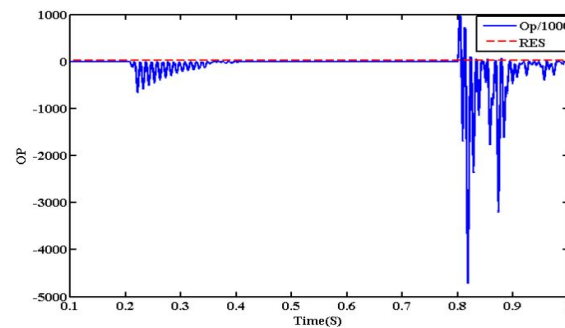
شکل ۱۴) مشخصه عملکرد رله به ازای خطا در نقطه F_5 .



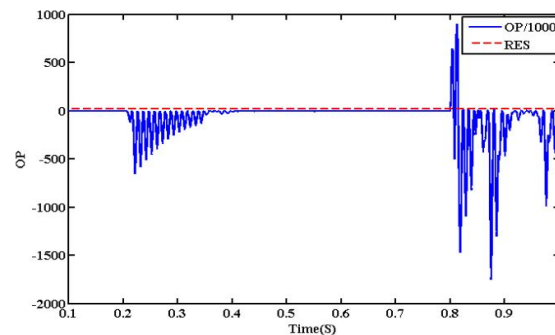
شکل ۱۴) مشخصه‌ی عملکرد هنگام وقوع خطای تک فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم در F_2 .



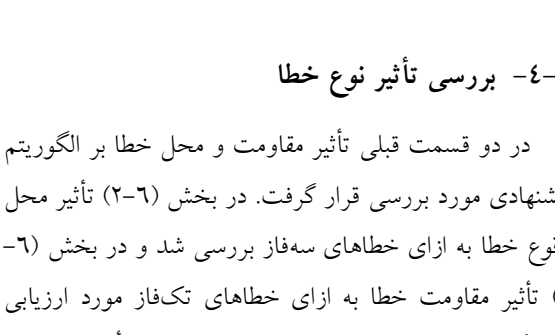
شکل ۱۵) مشخصه‌ی عملکرد هنگام وقوع خطای تک فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم در F_3 .



شکل ۱۶) مشخصه‌ی عملکرد هنگام وقوع خطای تک فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم در F_4 .



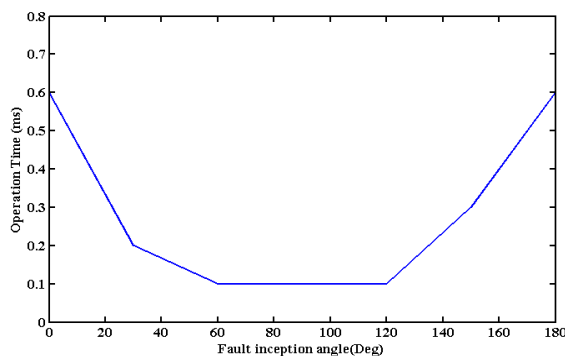
شکل ۱۷) مشخصه‌ی عملکرد هنگام وقوع خطای تک فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم در F_5 .



بر عملکرد الگوریتم پیشنهادی نیز بررسی شد با این حال با توجه به بررسی‌های بیشتری که صورت گرفت مشخص شد که نوع خطا هیچ تأثیری بر صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی ندارد و تنها باعث افزایش یا کاهش سرعت عملکرد الگوریتم خواهد شد.

۵-۵- بررسی تأثیر زاویه‌ی شروع خطا

در این قسمت عملکرد الگوریتم پیشنهادی هنگام وقوع خطای تک‌فاز با مقاومت ۲۰۰ اهم در نقطه‌ی F_4 تحت زوایای متفاوت شروع خطا بررسی می‌شود. با توجه به بررسی انجام شده صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی تغییری نمی‌کند ولی به ازای زوایای مختلف شروع خطا زمان عملکرد الگوریتم پیشنهادی متغیر است. با توجه به نمودار شکل (۱۸) مشخص شده که زمان عملکرد در زاویه‌ی شروع خطای ۹۰ درجه کمترین مقدار را داراست و در زوایای شروع خطای ۰ و ۱۸۰ درجه بیشترین زمان عملکرد را خواهیم داشت. زمان عملکرد به ازای زوایای ۱۸۰ تا ۳۶۰ مشابه زوایای شروع خطای ۰ تا ۱۸۰ درجه است.



شکل ۱۸) بررسی زمان عملکرد الگوریتم پیشنهادی به ازای زوایای مختلف شروع خطا.

۶- نتیجه گیری

الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در این مقاله قادر است خطوط جبران‌شده‌ی سری به وسیله‌ی TCSC را به درستی و با سرعت عملکرد مناسب حفاظت نماید. الگوریتم پیشنهادی با استفاده از ضرب دو مولفه‌ی جریان اضافه شده به جریان بار در یکدیگر اقدام به تشخیص خطا می‌نماید. در صورتی که

۵-۴- بررسی تأثیر نوع خطا

در دو قسمت قبلی تأثیر مقاومت و محل خطا بر الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش (۶-۲) تأثیر محل وقوع خطا به ازای خطاهای سه‌فاز بررسی شد و در بخش (۶-۳) تأثیر مقاومت خطا به ازای خطاهای تک‌فاز مورد ارزیابی قرار گرفت. در واقع در دو بخش قبلی به نوعی تأثیر نوع خطا

PLL k_p	۳۰	۳۰	۳۰
PLL k_i	۳۰۰ ۱/s	۳۰۰ ۱/s	۳۰۰ ۱/s
T_1	۰.۰۳ s	۰.۰ s	۰.۰ s
T_2	۰.۰۰۷ s	۰.۰ s	۰.۰ s

مراجع:

- [۱] Y. Rongxiang, C. Deshu, Y. Xianggen, Z. Zhe, M. Tianhao and C. Wei, "Principle and Property Investigation of The Transient Current Differential Protection Based on Correlation Analysis", IEEE Power Engineering Society, vol.۳, Jan. ۲۰۰۰, pp.۱۹۴۵-۱۹۴۹.
- [۲] Y. Li, D.S. Chen, R.X. Yuan, X.G. Yin and Z. Zhang, "Study of The Transient Current Differential Protection Based on Correlation Analysis", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, vol.۲, Oct. ۲۰۰۲, pp.۸۳۰-۸۳۴.
- [۳] L. Xiang-ningn, L. Wenjun, T.Qingan, W. Hanli and L. Pei, "A Novel Duplicated Main Protection Scheme Suitable for Both Transmission Lines and Busbars", IEEE Power Engineering Society, ۲۰۰۶, pp.۱-۷.
- [۴] S. Dambhare, S.A. Soman and M.C. Chandorkar, "Current Differential Protection of Transmission Line Using the Moving Window Averaging Technique," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. ۲۵, no. ۲, ۲۰۰۹, pp. ۶۱۰-۶۲۰.
- [۵] W. Chi-Kong, L. Chi-Wai, L. Kuok-Cheong, L. Chu-San and H. Ying-Duo, "Novel Wavelet Approach to Current Differential Pilot Relay Protection", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. ۱۸, ۲۰۰۳, pp.۲۰-۲۵.
- [۶] Z. Min, D. Xinzhou, Z.Q. Bo, B.R.J. Caunce and A.Klimek, "A New Current Differential Protection Scheme for Two-Terminal Transmission Lines", IEEE Power Engineering Society, June ۲۰۰۷, pp.۱-۶.
- [۷] G. Houlei and P.A. Crossley, "A New Current Differential Protection Scheme for Teed Transmission Lines", IEEE Power Engineering Society, ۲۰۰۶, pp.۱-۶.
- [۸] L.F. Santos and P.M. Silveira, "Evaluation of Numerical Current Differential Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines", IEEE/PES, Aug. ۲۰۰۶, pp.۱-۶.
- [۹] M.M. A.Aziz, A.F. Zobaa, D.K. Ibrahim and M.M. Awad, "Transmission Lines Differential Protection Based on The energy Conservation Law", Electric Power Systems Research, vol.۷۸, Nov. ۲۰۰۸, pp.۱۸۶۵-۱۸۷۲.
- [۱۰] G.b. Zou and H.I. Gao, "The Current Differential and Travelling Wave Based Algorithm for Ultra High Speed Hybrid Protection", Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, ۲۰۰۸, pp.۱۶۹۳-۱۶۹۷.
- [۱۱] D.Jovicic, G.N.Pillai "Analytical Modelling of TCSC Dynamics" IEEE Transactions on Power Delivery, vol ۲۰, Issue ۲, April ۲۰۰۵, pp. ۱۰۹۷-۱۱۰۴.
- [۱۲] N. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS: IEEE Press, ۲۰۰۰.

ضرب دو مولفه در یکدیگر مثبت باشد نشان دهندهی خطای خارجی است. در صورتی که ضرب دو مولفه مقدار منفی داشته باشد نشان از خطای خارجی یا تغییرات در قسمت کنترلی TCSC است. الگوریتم پیشنهادی در مقابل کلیهی شرایط و خطاهایی که ممکن است رخ دهد آزمایش شده است و کلیهی بررسی‌ها نشان دهندهی سرعت زیاد و دقت عملکرد بسیار عالی در تشخیص خطاست. تعداد نمونه‌ی مورد نیاز در هر سیکل ۳۰ نمونه می‌باشد در صورتی نمونه برداری با این نرخ امکان پذیر نباشد کاهش تعداد نمونه‌ها تنها باعث کاهش سرعت عملکرد می‌شود. موثرترین عامل در سرعت الگوریتم پیشنهادی زاویه‌ی شروع خطاست و هنگام وقوع خطا در زوایای نزدیک به ۹۰ درجه بیشترین سرعت عملکرد را داراست. مقاومت خطا، نوع خطا، محل وقوع خطا تأثیری در صحت عملکرد ندارند.

ضمیمه:

	System ۱	System ۲	System ۳
Ac system data			
R	۱.۵۲۰۶ Ω	۱.۵۲۰۶ Ω	۱.۵۲۰۶ Ω
L	۰.۱۰۸۱ H	۰.۱۰۸۱ H	۰.۱۰۸۱ H
e_{s1}	۵۳۹ kV	۵۳۹ kV	۵۳۹ kV
e_{s2}	۴۷۷.۸ kV	۴۷۷.۸ kV	۴۷۷.۸ kV
f	۶۰ Hz	۶۰ Hz	۶۰ Hz
TCSC data (at nominal point)			
% comp	۷۵٪	۴۰٪	۷۵٪
X_l/X_c	۰.۱۳۴۳	۰.۱۶۳۲	۰.۱۳۴۳
$\omega_r = 1/\sqrt{l_{cr}c}$	۱۶۳.۷ Hz	۱۴۸.۵۴ Hz	۱۶۳.۷ Hz
c	۲۱.۹۷۷ μ F	۴۱ μ F	۲۱.۹۷۷ μ F
l_{cr}	۰.۰۴۳ H	۰.۰۲۸ H	۰.۰۴۳ H
V_c	۱۲۸.۵ kV	۲۸ kV	۴.۲ kV
Fir. angl. α	۷۶°	۷۳°	۲۳°
Controller data			
k_p	-۰.۰۰۲ rad/kV	-۰.۰۰۶ rad/kV	۰.۰۵ rad/kV
K_i	-۰.۰۶ rad/(kVs)	-۰.۷ rad/(kVs)	۲۰ rad/(kVs)
T_{d1}	۱/۲۲۰ s	۱/۲۲۰ s	۱/۲۲۰ s
T_{d2}	۱/۱۴۰۰ s	۱/۱۴۰۰ s	۱/۱۴۰۰ s
ζ_f	۰.۹	۰.۹	۰.۹
ω_f	۵۰ Hz	۵۰ Hz	۵۰ Hz