

بهبود تشخیص خطا در حین نوسان توان در خطوط جبران‌سازی شده سری با استفاده

از سری تیلور

زهرا مروج^۱، روح‌الامین انصاری^۲، علیرضا جدائی^۳

۱- استاد، گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران

zmoravej@semnan.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران

amin.ansari90@yahoo.com

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران

a.jodaei@semnan.ac.ir

چکیده: در حین نوسان توان ممکن است امپدانس اندازه‌گیری شده وارد زون حفاظتی رله شود و عملکرد اشتباه رله را به دنبال داشته باشد. در صورتی که رله در حین نوسان توان عمل کند، ممکن است باعث ناپایداری شدن شبکه شود. تشخیص خطا در حین نوسان توان در خطوط جبران‌سازی شده با خازن سری، پیچیدگی بیشتری نسبت به خطوط ساده دارد. در خطوط جبران‌سازی شده اندازه جریان خطا، خازن سری و تجهیزات حفاظتی آن، نوع خطا، محل خطا، نوع حفاظت خازن و سطح جبران‌سازی خازن سری عوامل تأثیرگذار بر امپدانس حلقه خطا هستند. در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا در حین نوسان توان با استفاده از اندازه فازور توالی منفی جریان خط و کاربرد سری تیلور ارائه شده است. روش ارائه شده روی یک شبکه استاندارد IEEE، شبیه‌سازی و عملکرد آن ارزیابی شده است. روش ارائه شده، عملکرد مناسبی با سرعت بالا برای انواع خطاهای متقارن و نامتقارن شبکه دارد. برای شبیه‌سازی روش ارائه شده از برنامه PSCAD و MATLAB استفاده شده است که مقایسه نتایج با روش‌های دیگر، کارایی روش ارائه شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خطا در حین نوسان توان، خط جبران‌سازی شده، توالی منفی، سری تیلور، نوسان توان

۱- مقدمه

انتقال شبکه‌های برق نیاز است. برای افزایش ظرفیت انتقال شبکه می‌توان خطوط انتقال جدید احداث کرد یا ظرفیت خطوط انتقال موجود را افزایش داد که اقتصادی‌ترین راه افزایش ظرفیت انتقال خطوط موجود تا حد ممکن است [۱].

در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و پیشرفت صنعت، نیاز به انرژی برق در دنیا روزبه‌روز در حال افزایش است. برای تأمین این انرژی، به افزایش تولید و ظرفیت خطوط

روش‌های متداول برای افزایش ظرفیت خطوط انتقال استفاده از تجهیزات جبران‌سازی سری و شنت، استفاده از ادوات FACTS و ترانسفورماتورهای جابه‌جاکننده فاز^۱ هستند که با کم کردن توان راکتیو مورد نیاز شبکه یا کاهش راکتانس خطوط انتقال به افزایش ظرفیت توان انتقالی سیستم منجر می‌شوند [۲، ۳]. جبران‌سازی با خازن سری،

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶

نام نویسنده مسئول: زهرا مروج

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - دانشگاه سمنان - دانشکده برق و کامپیوتر

بهبود تشخیص خطا در حین نوسان توان در خطوط جبران‌سازی شده سری با استفاده از سری تیلور

شبکه به سرعت ایجاد می‌شود. در حین خطای سه فاز متقارن نیز به علت حالت گذرای ایجاد شده و هارمونیک‌های تزریق شده به شبکه در حین خطا توالی منفی جریان در سیکل‌های ابتدایی خطا ایجاد می‌شود و به سرعت از بین می‌رود؛ بنابراین، در هر دو حالت خطای متقارن و نامتقارن در شبکه توالی منفی وجود خواهد داشت. در این روش از تغییرات اندازه فازور توالی منفی جریان خط و سری تیلور برای تشخیص خطا در حین نوسان توان استفاده شده است [۹].

روش سری تیلور، مزایایی از قبیل صحت، سرعت، پیشرفت مرحله به مرحله، سادگی برنامه‌نویسی و بهبود ثبات عددی دارد. روش سری تیلور می‌تواند نظم و ترتیب متفاوتی را برای بخش‌های مختلف ایجاد کند و دقت شبیه‌سازی را افزایش دهد. همچنین، سری تیلور توانایی حذف محاسبات اضافی را دارد که باعث می‌شود الگوریتم پیشنهادی سریع به نتیجه برسد [۱۰]. از مزایای دیگر سری تیلور، تأثیرناپذیر بودن سری تیلور از نویز است که می‌توان بر مزایای روش پیشنهادی افزود [۱۱].

در روش ارائه شده در [۱۲] مقدار افت ولتاژ در طول خازن سری به صورت آنالین و آبی تخمین زده می‌شود و برای خطاهای بعد از خازن سری این مقدار جبران می‌شود. در خطاهای بعد از جبران‌ساز سری که حلقه خطا شامل خازن سری و MOV نیز است، به دلیل عملکرد این دو تجهیز، رله در تشخیص محل خطا دچار مشکل می‌شود. در [۱۳] رله‌های سنتی از امپدانس توالی مثبت برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند. با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، با توجه به تأثیرنداشتن جبران‌سازی سری بر امپدانس متقابل شبکه، برای تشخیص خطا در خطوط جبران‌سازی شده از این امپدانس استفاده شده است.

در [۱۴] با استفاده از مؤلفه DC جریان اندازه‌گیری شده و مقایسه تغییرات مؤلفه DC جریان دو سر خط تشخیص می‌دهند خطا در کجا اتفاق افتاده است. این روش تنها برای فهمیدن موقعیت خطا است. این روش با استفاده از اطلاعات دو سر خط به دست می‌آید و به یک شبکه با سرعت بسیار بالا نیاز است. روش ارائه شده در [۱۵] به‌عنوان حفاظت پشتیبان کاربرد دارد و براساس زاویه فاز

یکی از رایج‌ترین روش‌های جبران‌سازی خطوط انتقال است که علاوه بر افزایش ظرفیت خطوط و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهبود پروفیل ولتاژ شبکه، افزایش توانایی کنترل ولتاژ و کاهش تلفات خط را سبب می‌شود [۴]. با وجود این، جبران‌سازی با خازن سری باعث به وجود آمدن مشکلاتی مانند نوسان زیر سنکرون، وارونگی ولتاژ و جریان، کاهش یا افزایش برد رله‌های دیستانس خط و امپدانس غیرخطی تجهیزات حفاظتی خازن سری در حین خطا می‌شود [۵]. در سیستم قدرت در حین عملکرد پایدار شبکه، تعادل میان تولید و مصرف برقرار است. عواملی مانند خطا در شبکه باعث ایجاد تغییرات ناگهانی در توان الکتریکی می‌شود؛ اما توان مکانیکی ژنراتور، توانایی تغییر ناگهانی را ندارد که به نبود تعادل بین توان مکانیکی و الکتریکی در ژنراتور منجر می‌شود. این تعادل‌نداشتن منجر به تغییرات شدید زاویه بار ژنراتور می‌شود که نوسان توان انتقالی در شبکه را در پی خواهد داشت [۶].

زمانی که نوسان توان به دلیل نوسان ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده اتفاق می‌افتد، امپدانس دیده شده با رله شروع به تغییر می‌کند. ممکن است این امپدانس اندازه‌گیری شده وارد زون حفاظتی رله شود و عملکرد ناخواسته رله را در پی داشته باشد [۸،۷]. برای جلوگیری از عملکرد رله به علت نوسان توان، عملکرد رله قفل می‌شود. اگر در حین نوسان توان خطایی رخ دهد، رله باید به سرعت از حالت بلاک خارج شود و عملکرد داشته باشد. تشخیص خطا در حین نوسان توان، برای خطوط جبران‌سازی شده سری به علت عملکرد غیرخطی خازن سری و تجهیزات حفاظتی آن در حین خطا سخت‌تر است. با توجه به اینکه شبکه در حین نوسان توان برای ناپایدار شدن مستعدتر است، هرچه روش تشخیص خطا سریع‌تر عمل کند، ممکن است از ناپایدار شدن شبکه در حین نوسان توان پایدار جلوگیری کند.

در این مقاله، روشی جامع و سریع برای تشخیص انواع خطاهای متقارن و نامتقارن در خط جبران‌سازی شده با خازن سری در حین نوسان توان ارائه شده است. در حالت عادی شبکه یا در حین نوسان توان به علت متقارن بودن شبکه، توالی منفی وجود ندارد؛ اما به علت خطا، توالی منفی در

پیشنهاد شده می‌توان به نیازداشتن به روش‌های پردازش سیگنال، سرعت بالا در تشخیص نوسان توان، تشخیص خطای هم‌زمان با نوسان توان و کاهش محاسبات به‌منظور سهولت در پیاده‌سازی عملی اشاره کرد.

در [۲۱] یک روش تشخیص نوسان توان با استفاده از روش میانگین‌سنجش یک پنجره متحرک ارائه شده است. میانگین متحرک سیگنال جریان مدوله‌شده در طول نوسان توان به‌طور دوره‌ای متفاوت است؛ درحالی‌که از آغاز یک خطا، در نیمه مثبت یا منفی باقی می‌ماند. با استفاده از این ویژگی، دو شاخص براساس معیارهای علامت و زمان میانگین متحرک محاسبه می‌شوند تا نوسان توان از خطای متقارن متمایز شود. در این مقاله راهکاری برای خطاهای نامتقارن ارائه نشده است و روش استفاده‌شده این مقاله حساسیت کمی به نویز سیگنال دارد. همچنین در این مقاله، مقادیر مختلف برای زاویه بار ژنراتور در نظر گرفته نشده است. تفاوت دیگر [۲۱] با این مقاله در رنج فرکانس نوسان توان است. مقاله [۲۱] در رنج ۰/۲۵ تا ۳/۱۶ هرتز است و در فرکانس‌های بالاتر توانایی عملکرد روش پیشنهادی بحث نشده است.

در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا در حین نوسان توان با استفاده از اندازه‌فازور توالی منفی جریان خط و کاربرد سری تیلور ارائه شده است. روش ارائه‌شده روی یک شبکه استاندارد IEEE، شبیه‌سازی و عملکرد آن ارزیابی شده است. این روش، عملکرد مناسبی با سرعت بالا برای انواع خطاهای متقارن و نامتقارن شبکه دارد. برای شبیه‌سازی روش ارائه‌شده از برنامه PSCAD و MATLAB استفاده شده است که مقایسه نتایج با روش‌های دیگر کارایی روش ارائه‌شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

۲- روش پیشنهادی برای تشخیص خطا در

حین نوسان توان برای خط جبران‌سازی شده

با خازن سری

برای ارزیابی روش ارائه‌شده در این مقاله، از سیستم استاندارد IEEE در مقالات [۱۷]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۵] و [۲۸]

امپدانس توالی مثبت عمل می‌کند. در این روش از واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU)^۲ استفاده می‌شود. در هنگام خطا تغییرات امپدانس نسبت به حالت نوسان توان سریع‌تر است که این موضوع اساس عملکرد [۱۶] قرار گرفته و برای تمایز خطا از نوسان توان استفاده شده است. در [۱۷] از توالی منفی جریان برای تشخیص خطا در حین نوسان توان در خط جبران‌سازی شده سری استفاده می‌کنند. در حالت عملکرد عادی شبکه، توالی منفی جریان در شبکه وجود ندارد. در حین نوسان توان نیز به‌علت متقارن بودن نوسان توان، توالی منفی جریان ناچیز است؛ اما هنگام ایجاد خطا در شبکه و نامتقارن شدن آن، توالی منفی جریان در شبکه ظاهر می‌شود. در [۱۷] با استفاده از روش CUSUM^۴ (جمع انباشته) تغییرات توالی منفی جریان در حین خطا محاسبه می‌شود.

عملکرد اشتباه رله دیستانس هنگام وقوع نوسان توان، یکی از دلایل عمده خاموشی سیستم برق شناخته شده است. در این راستا، در [۱۸] یک طرح حفاظتی مبتنی بر چارچوب ترکیبی یک مجموعه از الگوریتم درخت، حداقل مربع و الگوریتم آدالین برای انجام وظیفه تشخیص و طبقه‌بندی خطا، زون‌بندی و تشخیص نوسان توان پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی مبتنی بر تخمین آنلاین اطلاعات افسر DC به همراه مؤلفه اصلی سیگنال جریان است.

در [۱۹] یک روش جدید تشخیص خطا با استفاده از مشتق زمانی سیگنال‌های ولتاژ معرفی شده است. فاصله زمانی بین دو قله متوالی مشتق سیگنال ولتاژ همیشه در طول نوسان توان از مقدار آن در شرایط بروز خطا به‌صورت چشمگیری زیاد است؛ از این ویژگی برای تشخیص خطا هنگام نوسان توان استفاده شده است.

در [۲۰]، برای تشخیص نوسان توان و جلوگیری از عملکرد اشتباه رله‌های دیستانس، یک روش بدون نیاز به استفاده از تبدیل فوریه با نرم‌گیری مستقیم از داده‌های نمونه‌برداری شده از سیگنال جریان پیشنهاد شده است. براساس این، یک پنجره سیگنال تشکیل شده و از سیگنال جریان نمونه‌برداری می‌کند. در ادامه، داده‌های موجود درون پنجره تشکیل ماتریس را خواهند داد که به راحتی می‌توان مقدار نرم آنها را محاسبه کرد. از جمله ویژگی‌های روش

بهبود تشخیص خطا در حین نوسان توان در خطوط جبران‌سازی‌شده سری با استفاده از سری تیلور

بهره‌برداری می‌شوند، توالی منفی در حالت عملکرد عادی شبکه ناچیز است. همچنین، هنگام رخداد نوسان توان در شبکه، به‌علت متقارن بودن نوسان توان در حالت نوسان توان پایدار، اندازه توالی منفی جریان ناچیز خواهد بود. در هنگام ناپایدار شدن شبکه نیز با افزایش فرکانس نوسان توان، توالی منفی ایجادشده در مقایسه با حالت خطا کمتر است. در این روش با نمونه‌گیری از جریان خط و استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT)، اندازه فازور توالی منفی جریان به دست می‌آید. سپس با استفاده از سه جمله اول بسط سری تیلور حول زمان t_0 ، نمونه $t_0 + 1$ تخمین زده می‌شود. در مقاله [۲۲] از ساده‌سازی بسط سری تیلور و برای تخمین مقدار تابع در زمان $t_0 + 1$ استفاده شده است. مقدار تابع $g(t)$ برای $k\Delta t$ ثانیه بعد از زمان t_0 با استفاده از سری تیلور به‌صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود؛ در این معادله، $g(t_0)$ مقدار تابع $g(t)$ در زمان t_0 و $d_n(t_0)$ مشتق مرتبه n تابع $g(t)$ در نقطه t_0 است. با توجه به تعریف مشتق در نقطه m رابطه (۲) حاصل می‌شود:

$$g(t_0 + k\Delta t) = g(t_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d_n(t_0) \cdot (k\Delta t)^n}{n!} \quad (1)$$

$$d_0(t_m) = s(t_m) = s_m, d_1(t_m) = \frac{s_{m+1} - s_{m-1}}{2\Delta t} \quad (2)$$

$$d_n(t_m) = \frac{d_{n-1}(t_{m+1}) - d_{n-1}(t_{m-1})}{2\Delta t}$$

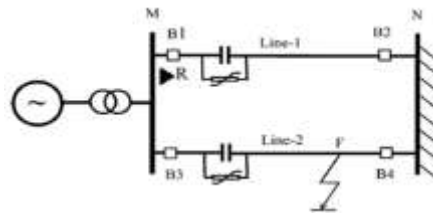
در این روش برای ساخت نمونه بعدی از سه جمله اول سری تیلور استفاده می‌شود. با قراردادن معادله (۲) در معادله (۳) و ساده‌کردن آن، مقدار نمونه $(m+1)$ با استفاده از سری تیلور به‌صورت رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$g(t_{m+1}) = g(t_{m-1}) + d_{n-1}(t_{m+1})\Delta t + \left(\frac{d_2(t_{m-1})(\Delta t)^2}{2!}\right) \quad (3)$$

$$g(t_{m+1}) = s_{m-2} - 3s_{m-1} + 3s_m \quad (4)$$

معادله (۴) در حالت عادی شبکه و حالت نوسان توان تخمین مناسبی از نمونه $(m+1)$ است؛ اما در حالت خطا این معادله، خطای تخمین بیشتری دارد. برای محاسبه خطای پیش‌بینی، متغیر ε که اندازه اختلاف مقدار واقعی اندازه‌گیری‌شده و مقدار تخمین زده شده با سری تیلور است، به‌صورت معادله (۵) تعریف می‌شود. برای بالابردن دقت در تشخیص خطا DI به‌صورت رابطه (۶) تعریف

استفاده شده است و پیاده‌سازی روش پیشنهادی در سیستم بزرگ‌تر در مطالعات بعدی انجام خواهد گرفت. سیستم مطالعه‌شده برای شبیه‌سازی و به دست آوردن داده برای بررسی عملکرد روش ارائه‌شده، سیستم تک ماشین و شین بی‌نهایت IEEE است که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): سیستم تک ماشین و شین بی‌نهایت IEEE

هر دو خط استفاده‌شده، طول ۳۲۰ کیلومتر دارند که با خازن سری به میزان ۰.۴٪ جبران‌سازی شده‌اند. خازن سری قرار داده شده در خط با MOV در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از خطا و نوسان توان محافظت می‌شوند. ولتاژ نامی MOV، ولتاژ دو سر خازن سری در بار نامی آن است که ۱۶۰ کیلوولت تنظیم شده است. سایر مشخصات شبکه در پیوست آمده‌اند.

برای ایجاد نوسان توان در شبکه در خط ۲، خطایی ایجاد و پس از مدت زمان مشخصی با بریکرهای دو سر خط، خطا برطرف می‌شود که ایجاد نوسان توان در شبکه را باعث می‌شود. درحالی‌که نوسان توان در شبکه وجود دارد، عملکرد رله خط یک بلاک می‌شود. در صورتی که در حین نوسان توان خطایی در خط یک ایجاد شود، روش ارائه‌شده باید قادر به تشخیص خطا باشد و رله را از حالت بلاک خارج کند تا رله عملکرد داشته باشد. برای ارزیابی روش پیشنهادی حالت‌های مختلف تأثیرگذار بر خطای شبکه از جمله تأثیر مقاومت خطا، مکان وقوع خطا، نوع خطا (تک‌فاز، دوفاز، سه فاز)، محل قرارگرفتن خازن سری در خط (ابتدای خط، انتهای خط، دو طرف خط)، فرکانس‌های متفاوت نوسان توان و زاویه وقوع خطا ارزیابی شده‌اند.

در روش پیشنهادی، به‌منظور تشخیص خطاهای متقارن و نامتقارن در حین نوسان توان برای خط جبران‌سازی‌شده با خازن سری از اندازه فازور توالی منفی جریان استفاده می‌شود. با توجه به اینکه شبکه‌های قدرت به‌صورت متقارن

می‌شود:

$$\varepsilon_{m+1} = |g(t_{m+1}) - s_{m+1}| \quad (5)$$

$$DI = \sum_{p=0}^{N-1} \varepsilon_{m-p+1}^2 \quad (6)$$

بلوک دیاگرام روش ارائه شده در شکل (۲) نشان داده شده است. جزئیات روابط مربوط به محاسبه امپدانس خط و تعیین زون‌های حفاظتی در [۲۳] مشاهده می‌شود.

۱ kHz است که فرکانس مناسبی برای نمونه‌گیری است. پس از محاسبه DI اگر مقدار به دست آمده از حد آستانه تعریف شده بیشتر باشد، رله از حالت بلاک خارج می‌شود و عملکرد خواهد داشت. تعیین حد آستانه مناسب امری ضروری است و در صورت انتخاب نادرست، امکان خطا در عملکرد سیستم وجود دارد.

۳- اندازه فازور توالی منفی جریان در هنگام

خطا

برای مطالعه شبکه‌های سه فاز متعادل، کمیت‌های ولتاژ و جریان شبکه برای یک فاز محاسبه می‌شوند و برای دوفاز باقیمانده به راحتی کمیت‌ها با شیفت فاز ۱۲۰ درجه‌ای به دست می‌آیند؛ اما هنگام نامتعادل بودن شبکه، نمی‌توان چنین کاری کرد. برای مطالعه شبکه در حالت نامتقارن از قضیه فورسکیو استفاده می‌شود. بر طبق قضیه فورسکیو شبکه سه فاز نامتعادل، به سه سیستم سه فاز متعادل می‌تواند تبدیل شود که مؤلفه‌های متقارن سیستم سه فاز نام دارند. این مؤلفه‌ها شامل مؤلفه توالی مثبت، منفی و صفرند [۲۲]. زمانی که شبکه در حالت عملکرد عادی است، فقط توالی مثبت دارد و مقدار توالی منفی و صفر ناچیز است. هنگام نامتقارن شدن شبکه به علت برخی اغتشاشات، مؤلفه‌های منفی و صفر ظاهر می‌شوند. یکی از روش‌های به کاررفته برای تشخیص خطاهای نامتقارن، استفاده از این مؤلفه‌ها است.

زمان ایجاد خطای تک‌فاز یا دوفاز در شبکه، به علت نامتقارن شدن شبکه، مؤلفه منفی جریان ظاهر می‌شود و تا زمان باقی ماندن خطا در شبکه و نامتقارن بودن آن، این جریان در شبکه باقی خواهد ماند. به محض برطرف شدن خطا، جریان مؤلفه منفی به سرعت کاهش می‌یابد و مقداری نزدیک به صفر می‌شود. در شبکه مطالعه شده، شکل موج اندازه فازور توالی منفی جریان، در هنگام خطای تک‌فاز در شکل (۳) نشان داده شده است. این خطا در زمان ۵ ثانیه شروع شده و به مدت ۰/۵ ثانیه روی خط باقی می‌ماند. مطابق شکل (۳)، اندازه فازور توالی منفی، در هنگام وقوع خطای تک‌فاز به سرعت افزایش می‌یابد و تا زمان



شکل (۲): دیاگرام روش پیشنهادی

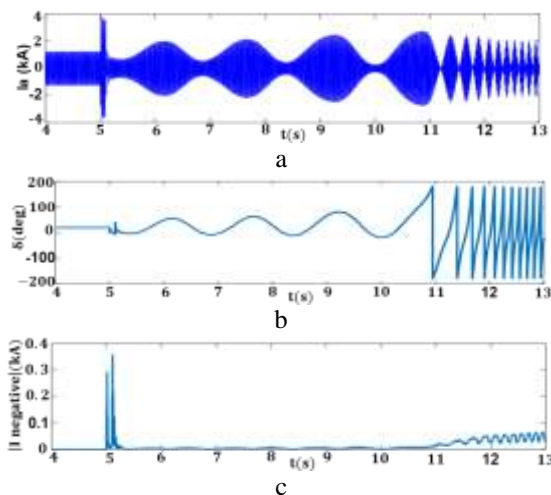
زمانی که شبکه در حالت عملکرد عادی خود باشد یا نوسان توانی در شبکه رخ دهد، مقدار تخمین زده شده با سری تیلور، تخمین مناسبی است و با مقدار واقعی اندازه فازور توالی منفی اندازه‌گیری شده اختلاف کمی دارد؛ اما بلافاصله پس از وقوع خطا به علت تغییر ناگهانی اندازه فازور توالی منفی جریان مقدار تخمین زده شده با مقدار واقعی اختلاف بیشتری پیدا خواهند کرد. اگر DI از حد آستانه مشخص شده بیشتر باشد، یعنی خطا اتفاق افتاده است و رله باید عمل کند. در این روش فرکانس نمونه‌گیری

بهبود تشخیص خطا در حین نوسان توان در خطوط جبران‌سازی شده سری با استفاده از سری تیلور

$$i(t) = 2I \cos(2\pi(\frac{f_1 - f_2}{2})t + \varphi_1) \cdot \sin(2\pi(\frac{f_1 + f_2}{2})t + \varphi_2) \quad (8)$$

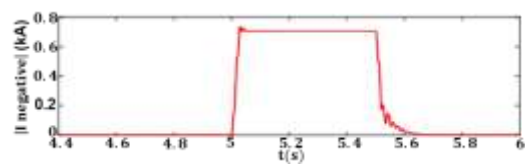
در معادله (8) $(\frac{f_1 - f_2}{2})$ و $(\frac{f_1 + f_2}{2})$ فرکانس مدولاسیون جریان و فرکانس نمونه جریان است. در حالت عادی عملکرد شبکه f_1, f_2 با هم برابر و مساوی فرکانس نامی شبکه‌اند. در صورتی که فرکانس نامی در معادله بالا جایگذاری شود، معادله حالت عادی عملکرد شبکه به دست می‌آید؛ اما هرچه نوسان توان شدیدتر باشد، اختلاف دو فرکانس موجود بیشتر است و مدولاسیون جریان، فرکانس تغییرات بیشتری خواهد داشت.

در حالتی که نوسان توان در شبکه ایجاد می‌شود، تا زمانی که فرکانس مدولاسیون نوسان توان، کم و شبکه پایدار باشد، میزان توالی منفی در شبکه ناچیز است؛ اما به محض ناپایدار شدن شبکه، توالی منفی به آرامی شروع به افزایش می‌کند. این تغییرات به آرامی انجام می‌شود و در مقایسه با تغییرات جریان توالی منفی در هنگام خطا، کوچک است. در شکل (4) قسمت a جریان شبکه نشان داده شده است. پس از برطرف شدن خطا، نوسان توان در شبکه ایجاد می‌شود. در شکل (4) قسمت b زاویه بار ژنراتور نشان داده شده است. پس از وقوع خطا زاویه بار ژنراتور شروع به نوسان می‌کند. تغییرات زاویه بار ژنراتور، تا ثانیه 11 به آرامی انجام می‌شود.

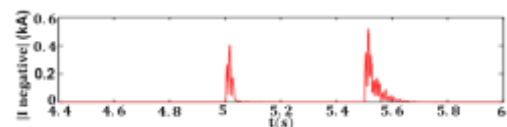


شکل (4): (a) تغییرات جریان در حین خطا و نوسان توان (b) تغییرات زاویه بار در حین خطا و نوسان توان (c) تغییرات اندازه فازور توالی منفی جریان در حین خطا و نوسان توان پس از 11 ثانیه، با ناپایدار شدن شبکه، تغییرات زاویه بار

وجود خطا در شبکه باقی می‌ماند و پس از برطرف شدن خطا به سرعت به صفر می‌رسد؛ اما در لحظه وقوع خطای سه فاز، به علت حالت گذرای ایجاد شده و هارمونیک‌های تزریق شده به شبکه، به علت خطای سه فاز، توالی منفی جریان در لحظه ابتدایی وقوع خطا ظاهر می‌شوند. شکل موج اندازه فازور جریان توالی منفی به صورت شکل (3) قسمت (b) خواهد بود. پس در هر دو حالت، خطای متقارن و نامتقارن در شبکه توالی منفی جریان خطا ایجاد می‌شود.



(a)



(b)

شکل (3): اندازه فازور توالی منفی جریان (a) در حالت خطای نامتقارن (b) در حالت خطای سه فاز متقارن

4- اندازه فازور جریان توالی منفی در هنگام نوسان توان

در سیستم ماشین و شین بی‌نهایت در هنگام ایجاد نوسان توان در شبکه، جریان موجود در خط، دو مؤلفه سینوسی به صورت معادله (7) دارد.

$$i(t) = I_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + I_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (7)$$

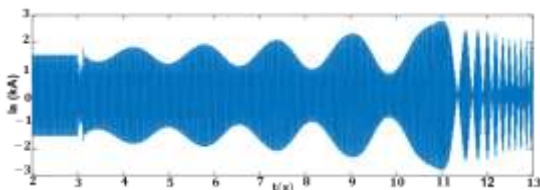
f_1, f_2 دو فرکانس موجود در شبکه در هنگام نوسان توان I_1, I_2 اندازه مؤلفه‌های جریان φ_1, φ_2 زاویه فاز اولیه

به علت وجود نوسان توان در شبکه دو فرکانس f_1, f_2 وجود دارند که یکی از این فرکانس‌ها به علت انحراف سرعت ژنراتور از سرعت نامی است و فرکانس دوم به علت وادار کردن باس بی‌نهایت یا شبکه به باقی ماندن در فرکانس نامی است [24]. با فرض برابر بودن I_1, I_2 ، معادله (8) به شکل زیر نوشته می‌شود:

۵-۱- بررسی تأثیر محل خطا بر روش ارائه شده

در هنگام خطا با توجه به محل وقوع خطا، جریان خطای متفاوتی وجود خواهد داشت. برای خطاهای در حین نوسان توان ایجادشده در انتهای خط، ممکن است اندازه جریان خطا از اندازه جریان نوسان توان کمتر باشد و این موضوع کار رله را برای تشخیص خطا دچار مشکل کند. همچنین در خط جبران‌سازی شده، برای خطاهای انتهای خط، به علت آنکه دامنه جریان خطا کم است، اختلاف ولتاژ ایجادشده در دوسر خازن سری منجر به عملکرد مؤثر تجهیزات حفاظتی خازن مانند MOV نمی‌شود و ترکیب امپدانس خازن سری و MOV در حلقه خطا باقی می‌ماند.

برای ارزیابی عملکرد روش ارائه شده مطابق شکل (۶)، خطایی در زمان ۳ ثانیه در خط دوم، ایجاد و پس از ۰/۲ ثانیه خطا از روی خط برداشته می‌شود که ایجاد نوسان توان در شبکه را سبب می‌شود. در حین نوسان توان خطایی سه فاز با مقاومت خطای ۱۰ اهم در خط ۱ در زمان ۱۲ ثانیه در موقعیت‌های مختلفی از طول خط ایجاد می‌شود و نتایج در جدول (۱) نمایش داده می‌شوند.



شکل (۶): نوسان توان ایجادشده بر اثر خطا در خط ۲

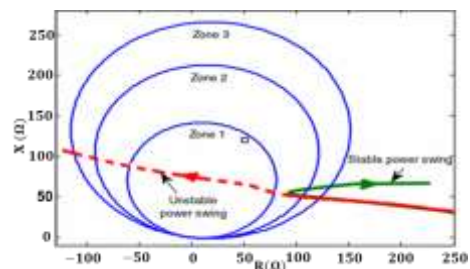
رله‌های سنتی، خطا را در ۲۰ میلی‌ثانیه تشخیص می‌دهد؛ اما در این مقاله از نتایج مشخص است که برای خطاهای نزدیک رله، به علت بیشتر بودن شدت جریان، تغییرات اندازه فازور توالی منفی جریان بیشتر است و در نتیجه زمان تشخیص خطا کمتر خواهد بود. همچنین، روش ارائه شده برای خطاهای انتهای خط قادر به تشخیص خطا در حین نوسان توان در زمان کمتر از ۶ میلی‌ثانیه است. عملکرد روش ارائه شده نسبت به روش CUSUM برای خطاهای انتهای خط بهتر است و خطا را در زمان کمتری تشخیص می‌دهد.

ژنراتور شدید می‌شود و در بازه -180 تا $+180$ درجه تغییر می‌کند. زمان ناپایدار شدن شبکه، فرکانس نوسان توان افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس نوسان توان تغییرات جریان زیاد می‌شود و گذراهایی در شبکه ایجاد می‌کند. این گذراها به ایجاد توالی منفی جریان در شبکه منجر می‌شوند. در شکل (۴) قسمت C اندازه فازور توالی منفی جریان نشان داده شده است. با ناپایدار شدن شبکه در ثانیه ۱۱ و افزایش فرکانس نوسان توان، اندازه فازور توالی منفی شروع به تغییر و افزایش می‌کند؛ با وجود این، تغییرات اندازه فازور توالی منفی جریان در حالت ناپایدار شدن شبکه نسبت به حالتی که خطا افتاده، بسیار کمتر است.

۵- بررسی و مقایسه نتایج

در این قسمت، عملکرد روش ارائه شده در شرایط مختلف شبکه ارزیابی شده است. از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تشخیص خطا در حین نوسان توان شامل موقعیت خطا، مقاومت خطا، فرکانس نوسان توان، زاویه توان در هنگام خطا، سطح جبران‌سازی خازن سری و موقعیت خازن سری در خط هستند.

عملکرد روش ارائه شده روی شبکه استاندارد IEEE شبیه‌سازی شده است. برای حالت نوسان توان پایدار و ناپایدار، خط سیر امپدانس اندازه‌گیری شده با رله وارد زون حفاظتی رله خواهد شد. در حالت نوسان توان پایدار، خط سیر امپدانس مدت زمان کمتری به نسبت حالت نوسان توان ناپایدار در زون حفاظتی رله باقی خواهد ماند. در شکل (۵) امپدانس اندازه‌گیری شده با رله در حین نوسان توان پایدار و ناپایدار نشان داده شده است.



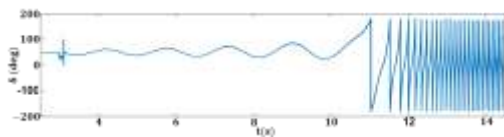
شکل (۵): خط سیر امپدانس دیده شده در حین نوسان توان پایدار و ناپایدار

بهبود تشخیص خطا در حین نوسان توان در خطوط جبران‌سازی‌شده سری با استفاده از سری تیلور

تغییرات اندازه فازور توالی منفی جریان عمل می‌کند. در حین خطای متقارن، حالت گذاری شبکه باعث ایجاد جریان توالی منفی می‌شود که دارای تغییرات سریع است؛ بنابراین، روش ارائه‌شده برای این نوع خطا پاسخی سریع‌تر از حالت خطای نامتقارن خواهد داشت.

۳-۵- تأثیر زاویه بار

زمانی که نوسان توان در شبکه اتفاق می‌افتد، زاویه بار ژنراتور شروع به نوسان و تغییر می‌کند. هرچه نوسان توان سریع‌تر باشد، تغییرات زاویه توان بیشتر خواهد بود. در شکل (۷) پس از خطایی که در زمان ۳ ثانیه اتفاق افتاده است، زاویه بار شبکه شروع به نوسان می‌کند و در هنگام ناپدید شدن شبکه، نرخ تغییرات زاویه بار ژنراتور به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و در بازه ۱۸۰- تا ۱۸۰+ درجه نوسان می‌کند.



شکل (۷): تغییرات زاویه بار در هنگام نوسان توان پایدار و ناپایدار

زمانی که زاویه بار نزدیک به ۱۸۰ درجه باشد، جریان در مقدار ماکزیمم خود و ولتاژ در کمترین مقدار خود است. اگر در این زاویه خطایی رخ دهد، تغییرات ولتاژ و جریان کمتر خواهد بود و تشخیص خطا سخت‌تر است. در زمان ۱۱/۰۵ تا ۱۱/۵۵ زاویه بار ژنراتور از ۱۸۰- به ۱۸۰+ می‌رسد. برای بررسی تأثیر زاویه بار، در این بازه زمانی خطاهایی ایجاد می‌شود؛ نتایج در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

جدول (۳): نتایج بررسی تأثیر زاویه بار ژنراتور در هنگام خطا

| بر مدت زمان تشخیص خطا | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| زمان وقوع خطا | زمان تشخیص روش [۱۷]CUSUM(ms) | زمان تشخیص روش ارائه شده (ms) |
| ۱۱/۰۵ | ۵ | ۴ |
| ۱۱/۱۵ | ۳ | ۳ |
| ۱۱/۲۵ | ۳ | ۲ |
| ۱۱/۳۵ | ۲ | ۴ |
| ۱۱/۴۵ | ۴ | ۴ |
| ۱۱/۵۵ | ۴ | ۴ |

جدول (۱): نتایج بررسی تأثیر موقعیت خطا بر مدت زمان

| تشخیص خطا | | |
|------------|------------------------------|-------------------------------|
| موقعیت خطا | زمان تشخیص روش [۱۷]CUSUM(ms) | زمان تشخیص روش ارائه شده (ms) |
| ٪۲۰ | ۲ | ۲ |
| ٪۳۰ | ۲ | ۲ |
| ٪۴۰ | ۸ | ۴ |
| ٪۵۰ | ۸ | ۵ |
| ٪۶۰ | ۹ | ۵ |
| ٪۷۰ | ۷ | ۴ |
| ٪۸۰ | ۶ | ۵ |

۲-۵- تأثیر نوع خطا

برای ارزیابی عملکرد روش ارائه‌شده در حین خطاهای متقارن و نامتقارن، خطای مختلف، ایجاد و عملکرد آن ارزیابی می‌شود. خطایی در ثانیه ۳ در خط دوم ایجاد می‌شود که باعث نوسان توان در شبکه می‌شود و در حین نوسان توان برای دو زمان، خطا در انتهای خط ایجاد می‌شود. نتایج در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به نتایج روش ارائه‌شده برای انواع خطا در شبکه نسبت به روش CUSUM عملکرد مناسب‌تر و زمان تشخیص سریع‌تر دارد.

جدول (۲): نتایج بررسی تأثیر نوع خطا بر مدت زمان تشخیص

| خطا | | | |
|---------|--------------------|------------------------------|-------------------------------|
| نوع خطا | زمان وقوع خطا (ms) | زمان تشخیص روش [۱۷]CUSUM(ms) | زمان تشخیص روش ارائه شده (ms) |
| L-G | ۱۲ | ۸ | ۵ |
| | ۱۴ | ۸ | ۶ |
| L-L | ۱۲ | ۷ | ۵ |
| | ۱۴ | ۲ | ۲ |
| L-L-G | ۱۲ | ۸ | ۵ |
| | ۱۴ | ۲ | ۲ |
| L-L-L | ۱۲ | ۶ | ۴ |
| | ۱۴ | ۲ | ۲ |
| L-L-L-G | ۱۲ | ۶ | ۴ |
| | ۱۴ | ۲ | ۲ |

برای خطای سه فاز متقارن عملکرد روش ارائه‌شده نسبت به حالت نامتقارن بهتر است. این روش براساس نرخ

۵-۵- تأثیر موقعیت قرارگیری خازن سری در

خط

خازن جبران‌ساز سری را با توجه به توپولوژی شبکه، در ابتدای خط، وسط خط، انتهای خط یا در هر دو طرف خط قرار می‌دهند. در هرکدام از حالت‌های بالا تنظیمات رله دیستانس برای خط متفاوت است. در حالتی که خازن در ابتدای خط قرار دارد، رله دیستانس همواره با در نظر گرفتن عملکرد خازن سری و تجهیزات آن عمل می‌کند.

در حالتی که خازن سری در وسط خط انتقال نصب می‌شود، برای خط‌های قبل از خازن سری و بعد از آن نیاز به تنظیمات متفاوتی برای رله است. برای تشخیص اینکه خطا قبل از خط یا بعد از خط خازن اتفاق افتاده، از روش مقایسه مؤلفه DC استفاده می‌شود. حضور خازن سری در حلقه خط بر مؤلفه منفی جریان خط تأثیر می‌گذارد. برای ارزیابی عملکرد روش ارائه‌شده، خازن سری را در سه ناحیه مختلف قرار داده و خطای سه فاز با مقاومت ۱۰۰ اهم در ثانیه ۱۲ در خط ایجاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۵) ارائه شده‌اند.

جدول (۵): نتایج تأثیر موقعیت خازن سری بر مدت زمان

تشخیص خطا

| محل نصب خازن | موقعیت خطا | زمان تشخیص روش [۱۷]CUSUM(ms) | زمان تشخیص روش ارائه‌شده (ms) |
|--------------|------------|------------------------------|-------------------------------|
| خازن در | ٪۳۰ | ۲ | ۴ |
| ابتدای خط | ٪۷۰ | ۵ | ۵ |
| خازن در | ٪۳۰ | ۲ | ۲ |
| وسط خط | ٪۷۰ | ۳ | ۲ |
| خازن در | ٪۳۰ | ۲ | ۲ |
| انتهای خط | ٪۷۰ | ۲ | ۲ |

۵-۶- تأثیر سطح جبران‌سازی خازن

در سیستم قدرت با توجه به نیاز شبکه سطح جبران‌سازی در بازه ٪۲۵ تا ٪۷۵ است. برای ارزیابی عملکرد روش ارائه‌شده، خطایی در انتهای خط با مقاومت ۱۰۰ اهم در زمان ۱۴/۵ ثانیه اعمال می‌شود و برای سطح جبران‌سازی از ٪۲۵ با پله‌های ٪۱۰ افزایش می‌یابد تا سطح جبران‌سازی به ٪۷۰ برسد. عملکرد روش ارائه‌شده در

نتایج نشان می‌دهند روش ارائه‌شده عملکرد مناسبی در زاویه توان‌های مختلف دارد. برای خط‌های ابتدا و انتهای بازه زمانی، به علت نزدیک بودن زاویه بار به ۱۸۰ درجه، تغییرات ولتاژ و جریان کمتر است و تشخیص خطا مدت زمان بیشتری طول می‌کشد.

۵-۴- تأثیر فرکانس نوسان

همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد، در حین نوسان توان در شبکه دو فرکانس متفاوت مشاهده می‌شود که فرکانس نوسان توان به صورت $(\frac{f_1 - f_2}{2})$ است. هرچه اختلاف فرکانس موجود بیشتر باشد، سرعت نوسان توان در شبکه بیشتر است. در نوسان توان‌های سریع ($f_s > 5 Hz$)، سرعت تغییرات اندازه ولتاژ و جریان زیاد می‌شود و این افزایش نرخ تغییرات منجر به عملکرد اشتباه روش‌های سنتی و روش‌هایی می‌شود که براساس سرعت تغییرات امیدانسن عمل می‌کنند. نوسان توان‌های پایدار فرکانس نوسان پایینی دارند؛ اما به محض ناپایدار شدن شبکه، این فرکانس شروع به افزایش می‌کند. هنگام ناپایدار شدن شبکه، با افزایش فرکانس، نوسان باعث ایجاد گذراهایی در شبکه می‌شود که توالی منفی ایجاد می‌کند؛ با وجود این، اندازه این توالی منفی و نرخ تغییرات آن نسبت به حالت خطایی سه فاز ناچیز است.

اگر در شبکه خطایی در زمان ۳ ثانیه در خط دوم اتفاق افتد، شبکه دچار نوسان توان می‌شود. فرکانس نوسان توان بین ثانیه ۱۰ تا ۱۵ از ۱ هرتز به ۱۰ هرتز می‌رسد. در جدول (۴) خط‌هایی به فاصله ۱ ثانیه ایجاد می‌شود و در هر بار زمان تشخیص خطا در جدول آورده می‌شود. خطای ایجادشده از نوع سه فاز با مقاومت ۱۰۰ اهم است.

جدول (۴): نتایج تأثیر فرکانس نوسان توان بر مدت زمان

تشخیص خطا

| زمان وقوع خطا | زمان تشخیص روش [۱۷]CUSUM(ms) | زمان تشخیص روش ارائه‌شده (ms) |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|
| ۱۰ | ۲ | ۳ |
| ۱۱ | ۳ | ۲ |
| ۱۲ | ۳ | ۳ |
| ۱۳ | ۴ | ۴ |
| ۱۴ | ۵ | ۴ |
| ۱۵ | ۴ | ۴ |

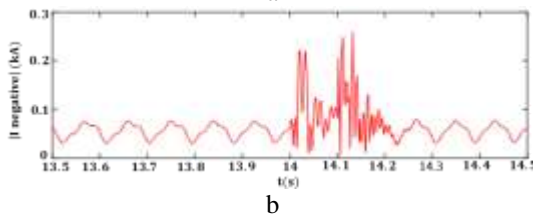
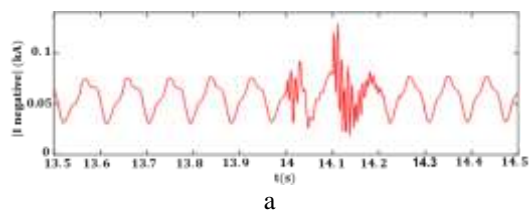
بهبود تشخیص خطا در حین نوسان توان در خطوط جبران‌سازی شده سری با استفاده از سری تیلور

۵-۷- تأثیر مقاومت خطا

برای بررسی تأثیر مقاومت خطا بر روش ارائه شده در انتهای خط خطایی با مقاومت متفاوت ایجاد می‌شود؛ عملکرد روش ارائه شده در جدول (۷) آمده است. خطای ایجاد شده در فاصله ۲۵۰ کیلومتری در خط با ۰.۴٪ جبران‌سازی شبیه‌سازی شده است.

جدول (۷): نتایج تأثیر مقاومت خطا بر مدت زمان تشخیص

| خطا | | |
|----------------|----------------|------------|
| زمان تشخیص روش | زمان تشخیص روش | مقاومت خطا |
| ارائه شده (ms) | [۱۷]CUSUM(ms) | |
| ۲ | ۲ | ۱۵ |
| ۲ | ۳ | ۴۵ |
| ۳ | ۳ | ۷۵ |
| ۴ | ۴ | ۱۰۵ |
| ۴ | ۴ | ۱۳۵ |



شکل (۹): تأثیر مقاومت خطا بر اندازه فازور توالی منفی

جریان (a) مقاومت خطای ۱۵۰ اهم (b) مقاومت خطای ۱۰ اهم

افزایش مقاومت خطا باعث کاهش دامنه اندازه فازور توالی منفی جریان می‌شود؛ اما با توجه به اینکه روش ارائه شده براساس نرخ تغییرات اندازه فازور توالی منفی جریان عمل می‌کند، افزایش مقاومت خطا تأثیر کمی بر این روش خواهد داشت. در شکل (۱۱) تأثیر مقاومت خطا بر اندازه فازور توالی منفی جریان نشان داده شده است. خطای سه فاز در انتهای خط در زمان ۱۴ ثانیه اتفاق افتاده است.

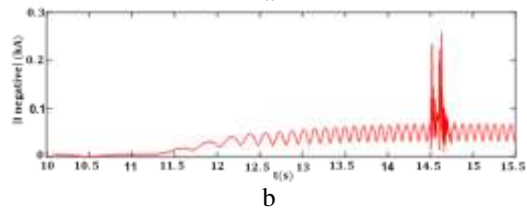
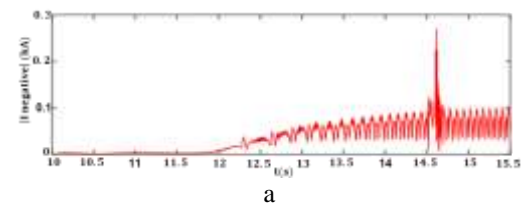
جدول ۶ آورده شده است. حد تنظیم شده برای عملکرد روش ارائه شده برای سطح جبران‌سازی ۰.۴٪ تنظیم شده است.

جدول (۶): نتایج تأثیر سطح جبران‌سازی خازن بر مدت زمان

| تشخیص خطا | | |
|---------------------|----------------|----------------|
| درصد جبران‌سازی خطا | زمان تشخیص روش | زمان تشخیص روش |
| | [۱۷]CUSUM(ms) | ارائه شده (ms) |
| ۲۵٪ | ۴ | ۳ |
| ۳۵٪ | ۶ | ۴ |
| ۵۰٪ | ۷ | ۸ |
| ۶۰٪ | ۱۴ | - |
| ۷۰٪ | - | - |

با افزایش سطح جبران‌سازی در خط انتقال، مؤلفه‌های هارمونیکی تزریق شده به خط با خازن سری افزایش می‌یابد. این مؤلفه‌های هارمونیکی در شرایط نوسان توان پایدار تأثیر کمی بر عملکرد روش ارائه شده دارد؛ اما با ناپایداری شدن شبکه و افزایش فرکانس نوسان توان تغییرات توالی منفی افزایش می‌یابد.

در شکل (۸) تغییرات اندازه فازور جریان توالی منفی برای خط انتقال با سطح جبران‌سازی ۰.۳۰٪ و ۰.۶۵٪ نشان داده شده است. با افزایش سطح جبران‌سازی تغییرات اندازه فازور توالی منفی جریان در حین نوسان توان‌های سریع، افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه سطح جبران‌سازی برای یک خط مقدار مشخصی است، با یک بار تنظیم حد عملکرد DI روش ارائه شده عملکرد بهینه‌ای خواهد داشت.



شکل (۸): اندازه فازور مؤلفه منفی جریان برای خطا در حین

نوسان توان (a) جبران‌سازی ۰.۶۵٪ (b) جبران‌سازی ۰.۳۰٪

۶- نتیجه گیری

تعداد سیگنال‌های ورودی زیاد و بار محاسباتی روش‌های مقالات، به افزایش زمان محاسبات و تأخیر در تشخیص خطا منجر می‌شود. در روش ارائه‌شده در این مقاله از سری تیلور استفاده شده است که با ساده‌کردن آن میزان محاسبات بسیار کم شده است. همچنین، پیاده‌سازی روش ارائه‌شده نسبت به سایر روش‌ها بسیار راحت‌تر است. نکته دوم، نرخ نمونه‌برداری است که باید با رله‌های موجود در شبکه متناسب باشد. رله‌های پیشرفته در شبکه قادر به نمونه‌برداری با نرخ بالا هستند؛ اما رله‌های سنتی فرکانس نمونه‌برداری کمتری دارند. روش ارائه‌شده برای عملکرد مطلوب خود به نرخ نمونه‌برداری با فرکانس ۱ کیلوهرتز نیاز دارد که نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر است. نکته سوم، زمان پاسخ روش‌های موجود در هنگام خطا است. روش ارائه‌شده نسبت به سایر روش‌ها پاسخ سریع‌تری نسبت به خطاهای مختلف در شبکه دارد و در زمان کمتری قادر به تشخیص خطا است. در جدول (۸) اطلاعات مقالات مختلف برای انواع خطاها آورده شده است. در این مقاله، خطوط جبران‌سازی شده با خازن سری در خطوط طولانی بررسی شده و تأثیر این خطوط بر شبکه و مشکلات ایجادشده برای رله‌های دیستانس خطوط انتقال مطالعه شده است. مشاهده می‌شود عملکرد خازن سری و تجهیزات حفاظتی آن در هنگام خطا ممکن است باعث عملکرد اشتباه رله دیستانس خط شود.

جدول (۸): مقایسه روش ارائه‌شده با سایر روش‌ها

| مرجع | نرخ نمونه‌برداری (kHz) | روش | سیگنال (در محل رله) | زمان پاسخ |
|---------------|------------------------|--|-------------------------------|------------|
| [۲۶] | ۱۰-۲ | $\left \frac{dQ}{dt} \right , \left \frac{dP}{dt} \right $ | توان اکتیو و راکتیو | (۱۰-۲۴) ms |
| [۲۷] | ۴ | Covariance | جریان دو طرف خط | (۱۱-۲) ms |
| [۱۷] | ۱ | CUSUM | توالی منفی جریان | ۸ ms |
| [۲۸] | ۱ | ادمیتانس خط | ولتاژ و جریان خط | (۱۴-۳) ms |
| روش ارائه شده | ۱ | سری تیلور | اندازه فازور توالی منفی جریان | (۶-۲) ms |

پیوست

مشخصات شبکه ماشین و شین بی‌نهایت IEEE

مشخصات ژنراتور، ترانسفورماتور و خط انتقال

$$60 \cdot MVA, X_d = 1.81 pu, X'_d = 0.3 pu, X''_d = 0.23 pu, T'_{do} = 8s,$$

$$22KV, T'_{do} = 0.03s, X'_q = 0.25 pu, T'_q = 0.03 pu, X_p = 0.15 pu$$

$$60 \cdot MVA, 22/400 KV, 50Hz, \Delta/Y, X = 0.133 pu, X_{core} = 0.33 pu$$

$$R_{core} = 0, R_{copper} = 0.0177 pu$$

$$0.12 + j0.88 \Omega/km = \text{امپدانس توالی مثبت}$$

$$0.309 + j1.297 \Omega/km = \text{امپدانس توالی منفی}$$

$$19/34 \times 10^3 \Omega/km = \text{راکتانس خازنی توالی مثبت}$$

مراجع

- [1] D. M. Larruskain, I. Zamora, O. Abarrategui, A. Iraolagoitia, M. Gutiérrez, E. Loroño, "Power transmission capacity upgrade of overhead lines", In International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ), Vol. 1, No.4, April 2006
- [2] E. M. Carlini, S. Favuzza, S. E. Giangreco, F. Massaro & C. Quaciari, "Upgrading an overhead line. Italian TSO applications for integration of RES", International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), pp. 470-475, 11 Jun 2013.
- [3] J. R. Daconti & D. C. Lawry, "Increasing power transfer capability of existing transmission lines", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 3, pp. 1004-1009, 7 Sep 2003.
- [4] V. C. Ogboh, & T. C. Madueme, "Investigation of Faults on the Nigerian Power System Transmission Line Using Artificial Neural Network", Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 342-351, 23 Feb 2015.
- [5] D. Novosel, A. Phadke, M. M. Saha, & S. Lindahl, "Problems and solutions for microprocessor protection of series compensated lines", PP.18-23, 1997.
- [6] G. Benmouyal, D. Hou, D. Tziouvaras, "Zero-setting power-swing blocking protection", In 31st annual western protective relay conference, PP. 19-21, 19 Oct 2004.
- [7] N. Zhang, H. Song, M. Kezunovic, "Transient based relay testing: a new scope and methodology", In MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 1110-1113, 16 May 2006.
- [8] C. Pang, M. Kezunovic, "Fast distance relay scheme for detecting symmetrical fault

- Measurement & Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 212-222, 9 Oct 2018.
- [19] B. Patel, P. Bera, S. H. Dey, "Differential voltage-based fault detection during power swing" ,IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 14, No. 1, pp.157-165, 11 Nov 2019.
- [20] B. Taheri, S. A. Hosseini, H. Askarian-Abyaneh, F. Razavi, "Detection of Power Swing and Blocking the Third Zone of Distance Relay Using the Norm Calculation of the Current Sampled Data" , Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 16. No. 3, pp.125-135, 10 Sep 2019.
- [21] J. G. Rao, A. K. Pradhan, "Power-swing detection using moving window averaging of current signals" ,IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No.1, pp. 368-376, 12 Aug 2014.
- [22] B. Mahamedi, "A very fast unblocking scheme for distance protection to detect symmetrical faults during power swings" , In2010 Conference Proceedings IPEC, pp. 378-383, 27 Oct 2010.
- [23] M. Zellagui, A. Chaghi, "Effects of shunt FACTS devices on MHO distance protection setting in 400 kV transmission line" ,Electrical and Electronic Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 164-169, 2012.
- [24] S. E. Zocholl, "Sequence Components and Untransposed Transmission Lines" ,2007.
- [25] I. G. Tekdemir, B. Alboyaci, "A novel approach for improvement of power swing blocking and deblocking functions in distance relays" , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 4, pp.1986-1994, 17 Aug 2016.
- [26] X. Lin, Y. Gao, P. Liu, "A novel scheme to identify symmetrical faults occurring during power swings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, pp. 73-78, 26 Dec 2007.
- [27]M. H. Musa, Z. He, L. Fu, Y. Deng, "A covariance indices based method for fault detection and classification in a power transmission system during power swing" , International Journal of Electrical Power & Energy Systems, pp. 581-591, 1 Feb 2019.
- [28]S. M. Hashemi, M. Sanaye-Pasand, M. Shahidehpour, "Fault detection during power swings using the properties of fundamental frequency phasors" , IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 2, pp. 1385-1394, 20 Oct 2017.
- during power swing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 2205-2212, 7 Sep 2010.
- [9] J. Machowski, D. Nelles, "New power swing blocking method", pp. 218-221, 1997.
- [10] X. Chang, Y. Wang, L. Hu L, "An implicit Taylor series numerical calculation method for power system transient simulation", In Proceedings of the 25th IASTED international conference on Modeling, identification, and control, pp. 82-85, 6 Feb 2006.
- [11]O. Kalinli, M. L. Seltzer, A. Acero, " Noise adaptive training using a vector Taylor series approach for noise robust automatic speech recognition", In2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 3825-3828, 19 Apr 2009.
- [12] MM. Saha, B. Kasztenny, E. Rosolowski, J. Izykowski, " First zone algorithm for protection of series compensated lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 200-207, 2001.
- [13] P. M. Tonape, A. R. Thorat, & M. M. Tonape, "Modified design of distance relay for series compensated transmission line" , In 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), pp. 1-6, 18 Mar 2016.
- [14] A. A. Razavi, H. A. Samet H. A, "protection scheme for series capacitor compensated transmission lines that uses DC component of line current" , In2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), PP. 1-6, 14 May 2013.
- [15] M. K. Jena, S. R. Samantaray, & B. K. Panigrahi, "A new wide-area backup protection scheme for series-compensated transmission system" , IEEE Systems Journal, Vol. 11, No. 3, pp. 1877-1887, 31 Aug 2015.
- [16] A. Mechraoui, DW. Thomas, "A new blocking principle with phase and earth fault detection during fast power swings for distance protection" , IEEE transactions on power delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1242-1248, Jul 1995.
- [17] P. K. Nayak, A. K. Pradhan, & P. Bajpai, "A fault detection technique for the series-compensated line during power swing" ,IEEE transactions on power delivery, Vol. 28, No. 2, pp. 714-722, 3 Jan 2013.
- [18] S. K. Shukla, E. Koley, & S. Ghosh, "DC offset estimation-based fault detection in transmission line during power swing using ensemble of decision tree" ,IET Science,

-
- ¹ phase-shifting transformers
 - ² sub synchronous oscillation
 - ³ Phasor measurement unit
 - ⁴ Cumulative sum
 - ⁵ Fast Fourier transform