

یک طرح حفاظتی خیلی سریع مبتنی بر امواج اولیه سیار جریان برای خطوط انتقال با استفاده از ریخت‌شناسی ریاضی

فرهاد نامداری^۱، استادیار؛ مسلم صالحی^۲، دانشجوی دکتری

۱- گروه برق قدرت - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - namdari.f@lu.ac.ir

۲- گروه برق قدرت - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - salehi.mo@fe.lu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک روش حفاظتی خیلی سریع برای خطوط انتقال با استفاده از تکنیک ریخت‌شناسی ریاضی (MM) ارائه شده است. روش پیشنهادی با استفاده از مقایسه پلاریته و زمان رسیدن امواج اولیه سیار جریان در هر دو طرف خط انتقال قادر است به راحتی جهت خطا، خطا در داخل و خارج خط انتقال را تشخیص دهد. برای پردازش سیگنال و استخراج مولفه‌های گذرا، یک فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی (MMF) جدید به گونه‌ای طراحی شده است که قادر است با دقت و سرعت بالا پلاریته امواج سیار را در تمامی شرایط تشخیص دهد. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های وسیعی با نرم‌افزار EMTP و MATLAB انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی قادر است با قابلیت اطمینان، سرعت و دقت بالا انواع خطا در داخل و خارج از خط انتقال و جهت آن‌ها را تشخیص دهد و عملکرد آن مستقل از امپدانس خطا، زاویه شروع خطا، نوع خطا و مکان خطا است.

واژه‌های کلیدی: ریخت‌شناسی ریاضی، امواج سیار، حفاظت خط انتقال، رله.

A High-Speed Protection Scheme for Transmission Lines using Mathematical Morphology

F. Namdari¹, Assistant Professor; M. Salehi², PhD Student

1- Department of Power Electric Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: namdari.f@lu.ac.ir

2- Department of Power Electric Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: salehi.mo@fe.lu.ac.ir

Abstract: In this paper, a novel high-speed protection scheme, for transmission lines based on initial current traveling waves and employing mathematical morphology (MM) is presented. This scheme, by comparing polarity and arrival time of initial current traveling wave from two terminals of the protected line, can discriminate the fault direction and internal faults from external faults rapidly. A new MM filter to extract transient components from fault-induced transient signals is designed. This MM filter can fast and accurately detect the arrival time and polarity of traveling waves in all conditions. Extensive simulation studies using EMTP and MATLAB are performed to evaluate the validity and reliability of the proposed scheme. The simulation results show that the proposed protection scheme can fast and reliably discriminate the fault direction and the internal faults from external faults in the most of conditions, especially in high impedance fault and low inception angle fault situation. The protection performance is immune to fault resistances, fault inception angles, fault types and fault location.

Keywords: Mathematical morphology, traveling waves, transmission lines protection, relay.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۹

نام نویسنده مسئول: فرهاد نامداری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خرم‌آباد - کیلومتر ۵ جاده بروجرد - دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق قدرت.

۱- مقدمه

در تقابل با تبدیل موجک، ریخت‌شناسی ریاضی (MM)^۴ که از تئوری مجموعه‌ها^۵ و هندسه انتگرالی^۶ به‌دست‌آمده [۱۹،۲۰]، به‌عنوان یک ابزار معنی‌دار در توصیف و تحلیل‌های هندسی توسعه پیدا کرده است. ریخت‌شناسی ریاضی (MM) به‌طور وسیعی در پردازش تصویر و سیگنال مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجاکه محاسبات ریاضی در تکنیک ریخت‌شناسی ریاضی فقط جمع و تفریق می‌باشند، بنابراین حجم محاسباتی در آن کم بوده و حفاظت مبتنی بر این روش، بسیار سریع و دقیق است. کاربردهای این روش در حفاظت سیستم‌های قدرت، در [۲۳-۲۱] گزارش شده است. در [۲۴] یک روش تشخیص خطای امیدانس بالا در سیستم توزیع بر اساس ریخت‌شناسی ریاضی ارائه شده است که فیلتر ریخت‌شناسی به‌کاررفته در آن فقط قادر به تشخیص دامنه سیگنال است. در [۲۵] نیز یک روش برای حفاظت خطوط انتقال سه‌پایانه‌ای پیشنهاد شده که از ریخت‌شناسی ریاضی استفاده نموده است و عملکرد درست آن نیازمند تنظیم آستانه‌های مختلفی می‌باشد. در [۲۶] یک روش حفاظتی برای خط انتقال با کمک ریخت‌شناسی ریاضی (MM) ارائه شده است که در آن برای استخراج سیگنال‌های گذرای ولتاژ و جریان از عنصرهای ساختاری^۷ (SE) درجه دوم استفاده نموده است. در روش فوق با مقایسه دامنه دو سیگنال گذرا که در یک دوره زمانی مشخص (به اندازه دو برابر مدت زمان عبور موج سیار از خط انتقال مجاور خط انتقال محافظت‌شده) به رله می‌رسند، جهت خطا تشخیص داده می‌شود. در واقع دو سیگنال فوق از امواج سیار رفت و برگشت ولتاژ و جریان به دست می‌آیند.

در این مقاله، یک روش حفاظتی جهت‌دار برای خطوط انتقال، بر اساس زمان و پلاریته امواج سیار اولیه جریان پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی از یک فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی (MMF)^۸ جدید برای پردازش سیگنال‌های گذرا استفاده شده است. فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی به‌کاررفته در این مقاله برخلاف روش‌های موجود، به گونه‌ای طراحی شده است که علاوه بر تشخیص دامنه امواج سیار، قادر است پلاریته و زمان رسیدن امواج سیار را نیز با دقت بالا تشخیص دهد. با توجه به زمان رسیدن و پلاریته امواج سیار اولیه جریان در دو طرف خط انتقال، جهت خطا، خطاهای داخلی و خارجی خط انتقال به‌راحتی تشخیص داده می‌شود. روش پیشنهادی برخلاف دیگر روش‌های موجود، در شرایط خاص مانند خطای امیدانس بالا و خطا با زاویه شروع کم، با قابلیت اطمینان و دقت بالا جهت خطا را تشخیص می‌دهد.

۲- اصول اساسی

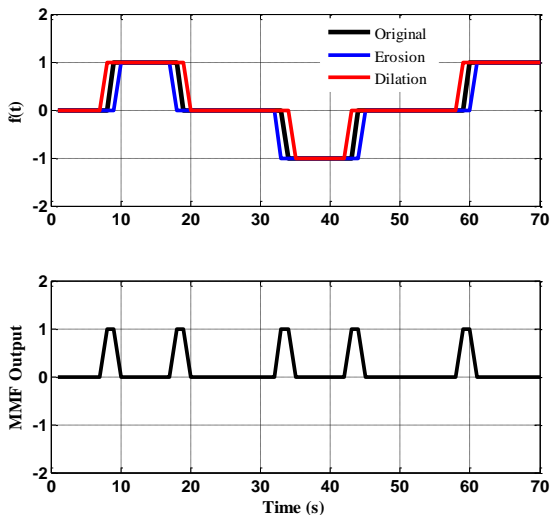
۲-۱- ریخت‌شناسی ریاضی

عملکرد دقیق حفاظت مبتنی بر امواج سیار، نیازمند یک ابزار مناسب برای پردازش سیگنال‌های گذرا است. تبدیل موجک هر چند که به‌عنوان یک ابزار مفید برای استخراج اطلاعات امواج فرکانس بالا در بسیاری از مطالعات به کار گرفته می‌شود، اما حجم محاسباتی بالایی

رفع سریع خطا نقش بسیار مهمی در افزایش پایداری گذرای سیستم قدرت دارد و ظرفیت انتقال توان در خطوط انتقال را بهبود می‌بخشد [۳-۱]. زمان عملکرد روش‌های حفاظتی مبتنی بر امواج سیار خیلی کم‌تر از روش‌های حفاظتی سنتی است. از طرف دیگر عملکرد رله‌های حفاظتی دیستانس^۱ تحت تأثیر عوامل گوناگونی مانند فاصله خطا، نوسان توان و جریان خازنی توزیع‌شده در طول خط انتقال قرار می‌گیرد. این موضوع محققان را به‌سمت مطالعه در زمینه حفاظت مبتنی بر امواج سیار سوق داده است [۴]. هنگامی که یک خطا روی یک خط انتقال رخ می‌دهد، امواج سیار ناشی از خطا به‌سمت دو طرف خط انتقال منتشر می‌گردند. این سیگنال‌های گذرای امواج سیار شامل اطلاعاتی در مورد نوع خطا، مکان خطا و جهت خطا هستند که با استفاده از این اطلاعات روش‌های حفاظتی خیلی سریع متعددی پیشنهاد شده است.

در بعضی از روش‌های حفاظتی مبتنی بر امواج سیار از دامنه امواج سیار و ارتباط بین آن‌ها برای تعیین جهت خطا استفاده شده است [۷-۵]. دیگر روش‌های حفاظتی مبتنی بر امواج سیار با استفاده از پلاریته سیگنال‌های ولتاژ و جریان امواج سیار و مقایسه آن‌ها جهت خطا را تعیین نموده‌اند [۱۲-۸]. روش‌های فوق هرچند دارای سرعت عملکرد بالایی هستند، اما در شرایط بد خطا مانند زاویه شروع کم خطا و امیدانس بالای خطا، عملکرد و قابلیت اطمینان آن‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای بهبود قابلیت اطمینان روش‌های حفاظتی موج سیار، بعضی از الگوریتم‌های حفاظتی ترکیبی در [۱۵-۱۳] پیشنهاد شده است. که البته در این الگوریتم‌ها چون از ترکیب روش‌های حفاظتی با اصول متفاوت استفاده می‌شود، الگوریتم حفاظتی پیچیده می‌گردد.

در [۱۶] از نسبت طیف انرژی تبدیل موجک برای تعیین جهت خطا استفاده شده است. یک روش حفاظتی بر اساس انتگرال امواج سیار رفت و برگشت برای تعیین جهت در [۱۷] استفاده شده است. در این روش‌ها، هر چند تا حدودی مشکل مربوط به خطا با زاویه شروع کم رفع شده است، اما برای عملکرد مطمئن نیازمند تنظیم آستانه^۲ دقیق خواهند بود. به منظور رفع مسائل فوق، روشی بر اساس مقایسه جهت انرژی گذرای امواج سیار در [۱۸] پیشنهاد شده است. که البته این روش از سیگنال‌های امواج سیار رفت و برگشت شین‌های مجاور استفاده نموده که باعث افزایش زمان پردازش و محاسبه می‌گردد. در اکثر روش‌های گفته‌شده فوق برای استخراج امواج گذرا و پردازش آن‌ها از تبدیل موجک^۳ استفاده شده است. با وجود آن‌که تبدیل موجک یک ابزار قوی برای پردازش سیگنال و دارای رزولوشن زمان - فرکانس خوبی است، اما در بعضی موارد ممکن است تحت تأثیر اغتشاش ناشی از نویز قرار گیرد. در شرایط خطا با زاویه شروع کم که به عنوان یک مشکل در روش‌های فوق مطرح گردید، دامنه امواج سیار خیلی کوچک شده و تشخیص آن‌ها توسط تبدیل موجک مشکل می‌گردد.



شکل ۱: پردازش سیگنال $f(t)$ با فیلتر MMF_3

در شکل ۱، سیگنال ساده $f(n)$ که تغییرات آن به صورت پله‌ای است، شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از اعمال عملگرهای فرسایش و گشایش و فیلتر $MMF_3(n)$ بر سیگنال $f(n)$ در شکل ۱ نمایش داده شده است. به‌طور واضح دیده می‌شود که این فیلتر قادر به تشخیص پلاریته نیست. نکته مهمی که وجود دارد این است که سیگنال‌های فرسایش و گشایش نسبت به هم در نقطه تغییر سیگنال اصلی اختلاف فاز دارند و با استفاده از این ویژگی می‌توان برای تشخیص پلاریته استفاده نمود.

برای تعریف فیلتر پیشنهادی عمل فرسایش و گشایش بر فیلتر MMF_3 که نسبت به دیگر فیلترها تاثیر بهتری در حذف نویز دارد، اعمال می‌گردد.

$$MMF_{3(dil)}(n) = (MMF_3 \oplus g)(n) \quad (8)$$

$$MMF_{3(ero)}(n) = (MMF_3 \ominus g)(n) \quad (9)$$

تشخیص پلاریته با استفاده از شرایط زیر تعیین می‌گردد:

$$MMF_{3(dil)}(n) - MMF_{3(dil)}(n-1) > \delta \quad (10)$$

$$MMF_{3(ero)}(n) - MMF_{3(ero)}(n-1) < -\delta \quad (11)$$

که δ عدد بسیار کوچکی است و برای تشخیص پس‌فاز یا پیش‌فاز بودن سیگنال‌های فرسایش و گشایش نسبت به هم در نقطه تغییر سیگنال اصلی استفاده می‌شود. که در این مقاله 0.0005 در نظر گرفته شده است. بر اساس (۱۰) و (۱۱) زمانی که سیگنال گشایش نسبت به سیگنال فرسایش پیش‌فاز باشد، خروجی فیلتر $(MMF_{3(ero)})$ دارای پلاریته مثبت و هنگامی که سیگنال گشایش نسبت به سیگنال فرسایش پس‌فاز باشد، خروجی فیلتر $(MMF_{3(dil)})$ دارای پلاریته منفی خواهد بود. همچنین هنگامی که تغییر ناگهانی در سیگنال اصلی وجود نداشته باشد، هر دو سیگنال فرسایش و گشایش نسبت به هم اختلاف فازی ندارند و خروجی فیلتر $(MMF_{3(ero)})$ صفر می‌شود.

دارد و در بعضی موارد تحت تاثیر اغتشاش ناشی از نویز قرار می‌گیرد. در تقابل با آن، ریخت‌شناسی ریاضی یک تکنیک غیرخطی با دقت بالا و حجم محاسباتی کم، می‌تواند برای استخراج اطلاعات سیگنال‌های فرکانس بالا مربوط به امواج سیار به کار رود. تمرکز آن بر روی شکل و اندازه سیگنال در حوزه زمان است و به پنجره اطلاعاتی کوچک‌تری نیازمند است [۲۷]. ریخت‌شناسی ریاضی از یک عنصر ساختاری (SE) برای استخراج ویژگی‌های لازم سیگنال استفاده می‌کند [۲۸]. ریخت‌شناسی ریاضی دارای دو عملگر اساسی فرسایش^۱ و گشایش^۲ است که بر اساس این دو، عملگرهای ترکیبی دیگری مانند باز^۳ و بسته^۴ تعریف می‌شود.

با فرض آن‌که $f(n)$ سیگنال ورودی که یک تابع گسسته تعریف شده در دامنه $D_f = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ باشد و $g(m)$ عنصر ساختاری (SE) که در دامنه $D_g = \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ تعریف شده باشد، آنگاه گشایش سیگنال f توسط g با $(f \oplus g)$ و فرسایش سیگنال f توسط g با $(f \ominus g)$ نشان داده و به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f_{dil}(n) = (f \oplus g)(n) = \max\{f(n-m) + g(m)\} \quad (1)$$

$$f_{ero}(n) = (f \ominus g)(n) = \max\{f(n+m) - g(m)\} \quad (2)$$

که در آن $m \in D_g$ و $n \in D_f$ است. با ترکیب دو عملگر فوق، دو عملگر دیگر به نام عملگر باز و بسته به دست می‌آیند. عمل باز سیگنال f توسط سیگنال g با $f \circ g$ نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f_{open}(n) = (f \circ g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (3)$$

همچنین عمل بسته سیگنال f توسط سیگنال g با $f \bullet g$ نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$f_{close}(n) = (f \bullet g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (4)$$

که \bullet نشان‌دهنده عملگر بسته و \circ نشان‌دهنده عملگر باز است. در حقیقت عملگر باز لبه‌های تیز سیگنال را صاف می‌کند و عملگر بسته شیارها و فاصله‌های خالی را پر می‌کند.

۲-۲- فیلتر پیشنهادی ریخت‌شناسی ریاضی

با ترکیب چهار عملگر گفته‌شده فیلترهای ریخت‌شناسی ریاضی (MMF) گوناگونی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

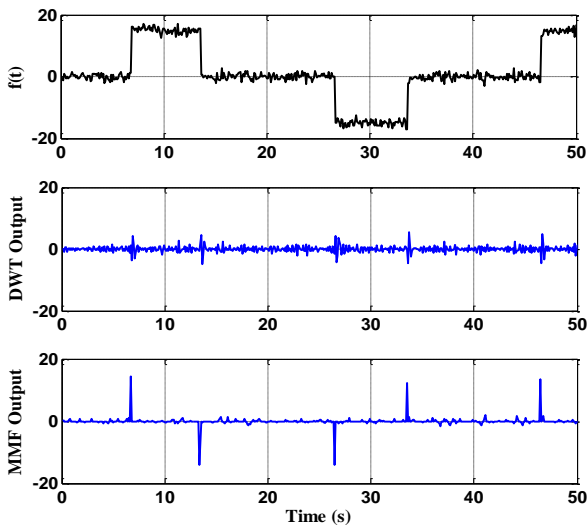
$$MMF_1(n) = ((f \ominus g)(n) + (f \oplus g)(n)) / 2 \quad (5)$$

$$MMF_2(n) = ((f \bullet g)(n) + (f \circ g)(n)) / 2 \quad (6)$$

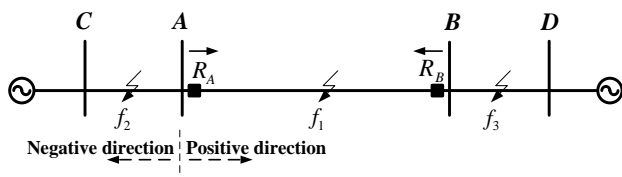
$$MMF_3(n) = (f(n) \circ (f \bullet g)(n) + f(n) \bullet (f \circ g)(n)) / 2 \quad (7)$$

فیلترهای فوق هرچند به‌خوبی تغییر در دامنه سیگنال را تشخیص می‌دهند اما قادر به تشخیص پلاریته نیستند. به همین دلیل در این مقاله فیلتر پیشنهادی به گونه‌ای تعریف شده است که قادر به تشخیص پلاریته باشد و از این خاصیت در حفاظت خط انتقال استفاده گردد.

که در آن v سرعت انتشار امواج سیار، Z_c امپدانس مشخصه خط، u_A^+ موج سیار رفت در جهت مثبت و u_A^- موج سیار برگشت در جهت



شکل ۳: مقایسه عملکرد فیلتر پیشنهادی (MMF) و تبدیل موجک (DWT) در حذف نویز



شکل ۴: دیاگرام تک خطی سیستم انتقال قدرت ۵۰۰ kV

منفی خط انتقال می‌باشند. همچنین l_{AB} طول خط انتقال $A-B$ و $0 \leq x \leq 1$ است. با ترکیب (۱۲) و (۱۳) امواج سیار رفت و برگشت به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$u_A^+ = (\Delta u + Z_c \Delta i) / 2 \quad (14)$$

$$u_A^- = (\Delta u - Z_c \Delta i) / 2 \quad (15)$$

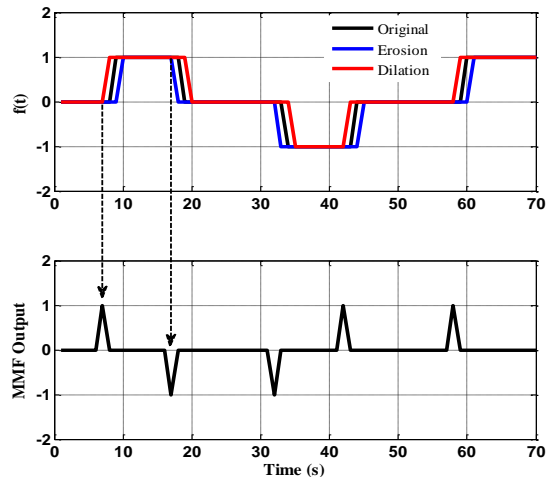
به‌طور مشابه، روابط فوق برای امواج سیار رفت و برگشت (u_B^+ و u_B^-) مربوط به رله R_B نیز نوشته می‌شود.

۳-۱- خطا در داخل خط انتقال حفاظت شده

در شکل ۵ دیاگرام نردبانی^{۱۵} متناظر با حالتی که خطا در f_1 رخ می‌دهد، نشان داده شده است و امواج سیار رفت و برگشت در آن مشخص گردیده است. اگر فرض شود t_0 زمان شروع خطا باشد، آنگاه زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر یک از رله‌های R_A و R_B به‌صورت زیر به دست می‌آیند [۳۰]:

$$t_A = t_0 + \frac{x l_{AB}}{v} \quad (14)$$

$$t_B = t_0 + \frac{(1-x) l_{AB}}{v} \quad (15)$$



شکل ۲: پردازش سیگنال $f(t)$ با فیلتر پیشنهادی

انتخاب نوع عنصر ساختاری SE، که در (۱) تا (۹) با $g(m)$ نشان داده شده، در پردازش سیگنال با ریخت‌شناسی ریاضی مهم است. عنصر ساختاری SE، دارای اشکال متفاوتی است که بعضی از آنها به شکل مسطح، مثلثی و نیم‌دایره‌ای هستند [۲۹]. در سیستم‌های قدرت که سیگنال‌ها به‌صورت تک‌بعدی هستند، مناسب‌ترین عنصر ساختاری SE، مسطح است. در [۲۶] از دو عنصر ساختاری SE درجه دوم استفاده شده است. در این مقاله عنصر ساختاری از نوع مسطح به‌صورت $SE = \{0, 0, 0\}$ در نظر گرفته شده است. نتایج پردازش سیگنال $f(t)$ توسط فیلتر پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. به‌طور واضح دیده می‌شود که فیلتر پیشنهادی پلاریته سیگنال را با دقت تشخیص داده است. در شکل ۳ عملکرد فیلتر پیشنهادی با تبدیل موجک گسسته (DWT) با (موجک مادر db4) در پردازش سیگنال $f(t)$ همراه با نویز مقایسه شده است. واضح است که فیلتر پیشنهادی نسبت به تبدیل موجک تأثیر کمتری از نویز می‌پذیرد و بستگی به شدت موج ممکن است تبدیل موجک قادر به تشخیص پلاریته نباشد.

۳- اصول اساسی طرح حفاظتی پیشنهادی

شکل ۴ نمایش تک خطی یک سیستم قدرت را نشان می‌دهد که در آن رله‌های جهت‌دار R_A و R_B در دو انتهای خط انتقال حفاظت‌شده $A-B$ قرار گرفته‌اند. جهت عبور جریان از شین A به شین B ، به‌عنوان جهت مثبت در نقطه رله R_A فرض شده است. مطابق شکل ۵ هنگامی که یک خطا در نقطه f_1 به فاصله $x l_{AB}$ از شین A رخ دهد، سیگنال‌های گذرای ولتاژ و جریان ناشی از خطا (Δu و Δi) که توسط رله R_A دیده می‌شوند، به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

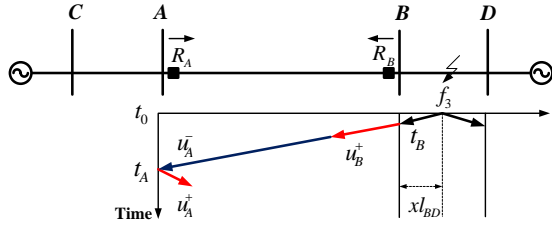
$$\Delta u = u_A^+ \left(t - \frac{x l_{AB}}{v} \right) + u_A^- \left(t + \frac{x l_{AB}}{v} \right) \quad (12)$$

$$\Delta i = \frac{1}{Z_c} \left[u_A^+ \left(t - \frac{x l_{AB}}{v} \right) + u_A^- \left(t + \frac{x l_{AB}}{v} \right) \right] \quad (13)$$

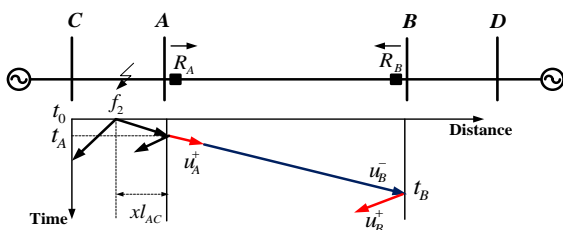
$$t_B = t_0 + \frac{x l_{BD}}{v} \quad (20)$$

که در آن l_{BD} طول خط انتقال B-D است. با ترکیب روابط (۱۹) و (۲۰):

$$t_A - t_B = \frac{l_{AB}}{v} \quad (21)$$



شکل ۶: دیاگرام لاتیس برای خطا در نقطه f_3



شکل ۷: دیاگرام لاتیس برای خطا در نقطه f_2

برای تعیین شاخص پلاریته در این حالت، مطابق شکل ۵ دیده می‌شود که رله R_A در زمان t_A هم موج سیار رفت u_A^+ و هم موج سیار برگشت u_A^- را می‌بیند. بنابراین با توجه به توضیحات فوق و جهت جریان رله‌ها، پلاریته امواج سیار اولیه جریان که توسط رله R_A و R_B دیده می‌شوند، مخالف همدیگرند. یعنی:

$$P_{R_A} \cdot P_{R_B} = -1 \quad (22)$$

بنابراین روابط (۲۱) و (۲۲) دو معیار هستند که به‌طور قطع تعیین می‌کنند خطا در خارج خط انتقال و در جهت مثبت رخ داده است. در نهایت هنگامی که خطا در جهت منفی و خارج از خط انتقال در f_2 مطابق با شکل ۷ رخ می‌دهد، زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از رله‌های R_A و R_B به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$t_A = t_0 + \frac{x l_{AC}}{v} \quad (23)$$

$$t_B = t_0 + \frac{x l_{AC}}{v} + \frac{l_{AB}}{v} \quad (24)$$

که در آن l_{AC} طول خط انتقال A-C است. با ترکیب روابط (۲۳) و (۲۴):

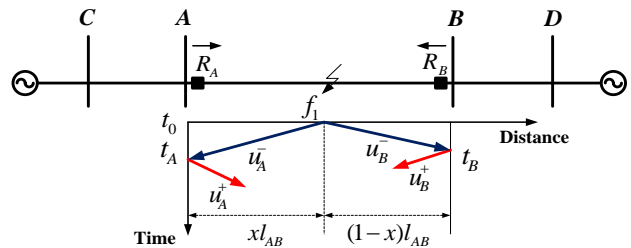
$$t_B - t_A = \frac{l_{AB}}{v} \quad (25)$$

مطابق با شکل ۷ دیده می‌شود که در این حالت رله R_A در زمان t_A فقط موج سیار رفت u_A^+ را می‌بیند در حالی که رله R_B در زمان t_B هم موج سیار رفت u_B^+ و هم موج سیار برگشت u_B^- را می‌بیند. با توجه به توضیحات فوق و جهت جریان رله‌ها، در این حالت نیز پلاریته امواج سیار اولیه جریان که توسط رله R_A و R_B دیده می‌شوند، مخالف همدیگرند. یعنی:

$$P_{R_A} \cdot P_{R_B} = -1 \quad (26)$$

که در آن t_A و t_B به ترتیب زمان رسیدن امواج اولیه سیار به رله‌های R_A و R_B را نشان می‌دهند. l_{AB} طول کل خط انتقال و v سرعت انتشار موج سیار است. با ترکیب (۱۴) و (۱۵):

$$t_A - t_B = (2x-1) \frac{l_{AB}}{v} \quad (16)$$



شکل ۵: دیاگرام لاتیس برای خطا در نقطه f_1

از آنجا که $0 \leq x \leq 1$ پس می‌توان نتیجه گرفت که:

$$|t_A - t_B| < \frac{l_{AB}}{v} \quad (17)$$

بنابراین بر اساس روابط تئوری فوق، هنگامی که خطا در داخل خط انتقال رخ دهد، رابطه (۱۷) برقرار است. اما در عمل، رابطه (۱۷) نیاز به تنظیم یک آستانه دارد تا خطای داخل خط از خطای خارج خط به‌طور دقیق تشخیص داده شود. به عبارت دیگر قابلیت اطمینان و دقت عملکرد روش حفاظتی وابسته به تعیین دقیق آستانه است. به همین دلیل در این مقاله برای بالا بردن قابلیت اطمینان و دقت روش حفاظتی، به‌جای تعیین آستانه، از یک شاخص تکمیلی دیگر استفاده شده و آن شاخص، پلاریته امواج سیار اولیه جریان در دو طرف خط انتقال است. مطابق با شکل ۵ هنگامی که یک خطا داخلی مثلاً در f_1 رخ می‌دهد، امواج سیار اولیه جریان رفت و برگشت توسط رله‌های R_A و R_B به ترتیب در زمان‌های t_A و t_B دیده می‌شوند و با توجه به جهت جریان‌های رله‌ها واضح است که پلاریته امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله R_A و R_B یکسان است، یعنی:

$$P_{R_A} \cdot P_{R_B} = 1 \quad (18)$$

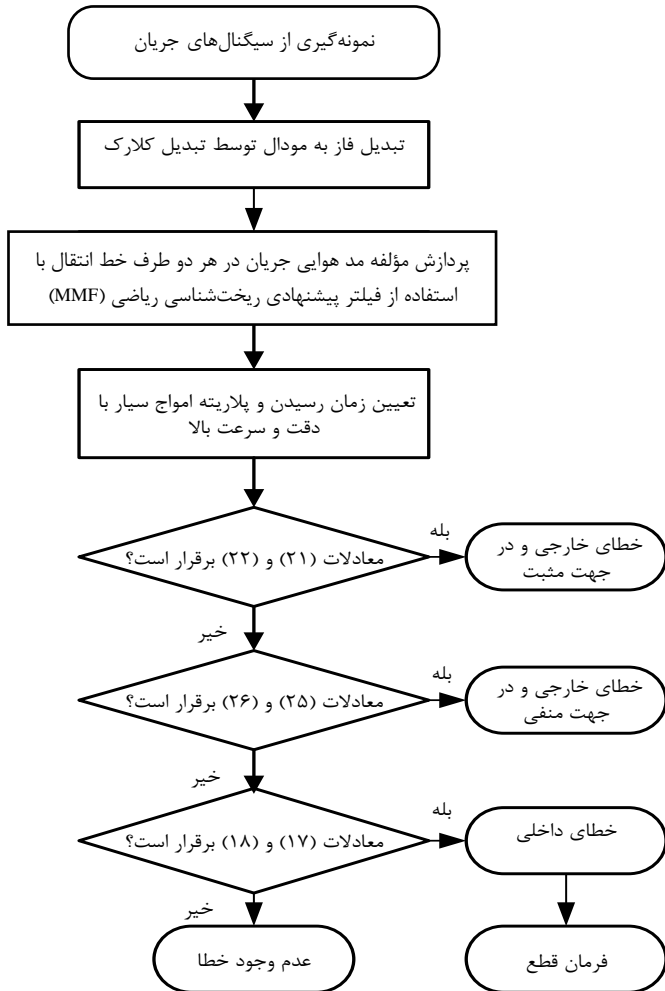
که در آن P_{R_A} و P_{R_B} به ترتیب پلاریته امواج سیار اولیه جریان دیده‌شده توسط رله‌های R_A و R_B را نشان می‌دهند. بنابراین روابط (۱۷) و (۱۸) دو معیار هستند که به‌طور قطع تعیین می‌کنند خطا در داخل خط انتقال رخ داده است.

۳-۲- خطا در خارج خط انتقال

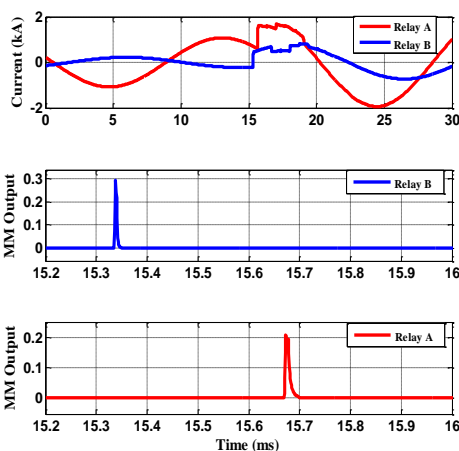
هنگامی که خطا در جهت مثبت و خارج از خط انتقال در f_3 رخ می‌دهد، مطابق شکل ۶ زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از رله‌های R_A و R_B به‌صورت زیر به دست می‌آیند:

$$t_A = t_0 + \frac{l_{AB}}{v} + \frac{x l_{BD}}{v} \quad (19)$$

هوایی در خطوط انتقال، ۲۹۹۱۴۷ کیلومتر بر ثانیه است [۳۰]. سیگنال‌های ولتاژ و جریان، ابتدا به مؤلفه‌های مودال تبدیل شده و سپس مؤلفه‌های مد هوایی در نرم‌افزار MATLAB با فرکانس نمونه‌برداری ۱ مگاهرتز توسط فیلتر پیشنهادی ریخت‌شناسی ریاضی (MMF) مورد پردازش قرار گرفته‌اند.



شکل ۸: فلوچارت طرح حفاظتی پیشنهادی



شکل ۹: سیگنال‌های جریان (مؤلفه‌هایی مد هوایی) مربوط به رله‌های R_B و R_A و پردازش آن‌ها با فیلتر پیشنهادی (MMF) هنگام بروز خطا در نقطه f_1

بنابراین روابط (۲۵) و (۲۶) دو معیار هستند که به‌طور قطع تعیین می‌کنند خطا در خارج خط انتقال و در جهت مثبت رخ داده است. فلوچارت روش حفاظتی پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق با این فلوچارت، مراحل انجام روش حفاظتی پیشنهادی به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

مرحله ۱: سیگنال‌های ولتاژ و جریان در یک فرکانس بالا نمونه‌گیری می‌شوند. سپس به‌منظور حذف اثر کوپلینگ بین فازها در سیستم قدرت سه‌فاز و استفاده از روش امواج سیار با یک سرعت یکسان، سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده در حوزه فاز توسط تبدیل کلارک^{۱۶} مطابق زیر به مؤلفه‌های مودال مجزا تبدیل می‌شوند [۳۰]:

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ M_\alpha \\ M_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \quad (27)$$

که M_a ، M_b و M_c ولتاژها یا جریان‌های فاز هستند. M_0 مؤلفه مد زمینی^{۱۷}، M_α و M_β مؤلفه‌های مد هوایی^{۱۸} هستند. سرعت مد زمینی ثابت نیست و وابسته به فرکانس موج سیار است و با افزایش فرکانس سرعت آن افزایش می‌یابد. از طرفی مؤلفه مد زمینی فقط برای خطاهای زمین‌شده دارای اندازه قابل توجهی است و برای همه خطاها نمی‌تواند به کار برده شود و برای اهداف خاص مانند تشخیص نوع خطا به کار برده می‌شود [۳۱]. اما سرعت مد هوایی تقریباً ثابت است بنابراین تشخیص آن ساده‌تر است و می‌توان برای انواع خطا از استفاده نمود.

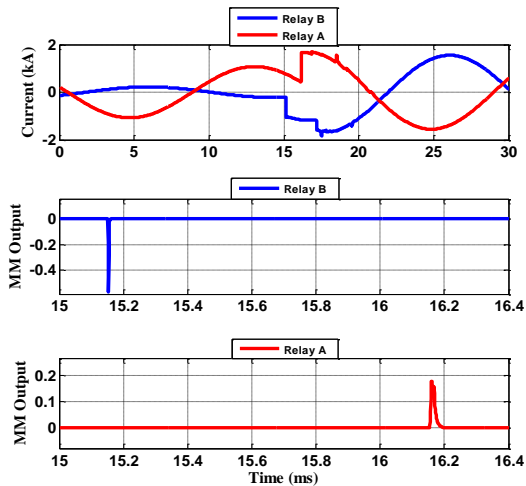
مرحله ۲: مؤلفه مد هوایی جریان M_α در هر دو طرف خط انتقال با استفاده از فیلتر پیشنهادی ریخت‌شناسی ریاضی (MMF) مورد پردازش قرار می‌گیرد و زمان رسیدن امواج اولیه سیار جریان به هر کدام از رله‌های دو طرف خط انتقال و پلاریته آن‌ها تعیین می‌گردد.

مرحله ۳: با مشخص شدن زمان رسیدن و پلاریته امواج اولیه سیار، روابط (۱۷) و (۱۸) برای تشخیص خطا در داخل خط انتقال، روابط (۲۱) و (۲۲) برای تشخیص خطا در جهت مثبت و خارج از خط انتقال و روابط (۲۵) و (۲۶) برای خطا در جهت منفی و خارج از خط انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرند. سرانجام با مشخص شدن جهت خطا با دقت بالا، فرمان قطع لازم توسط رله‌ها صادر می‌گردد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

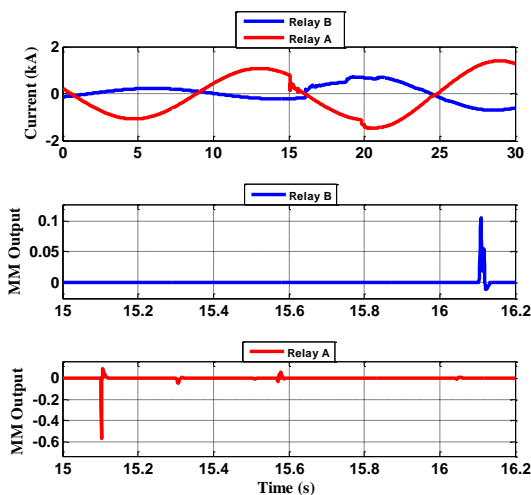
به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، نرم‌افزار EMTD برای شبیه‌سازی یک سیستم نمونه ۵۰۰ kV نشان داده‌شده در شکل ۴، به کار گرفته شده است. اطلاعات سیستم در پیوست داده شده است. رله‌های جهت‌دار R_A و R_B در دو انتهای خط حفاظت‌شده A-B قرار گرفته‌اند. طول خطوط C-A، A-B و B-D به ترتیب ۱۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلومتر است. در شبیه‌سازی‌ها از خطوط انتقال با مدل وابسته به فرکانس^{۱۹} استفاده شده است و سرعت انتشار امواج سیار مربوط به مد

۴-۱- خطا در داخل خط انتقال



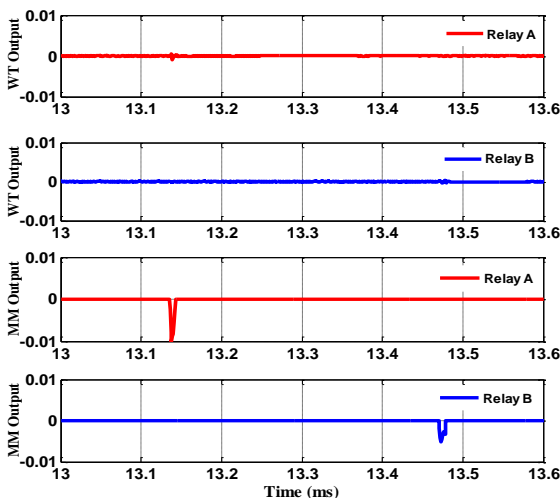
شکل ۱۰: سیگنال‌های جریان (مؤلفه‌هایی مد هوایی) مربوط به رله‌های R_A و R_B و پردازش آن‌ها با فیلتر پیشنهادی (MMF) هنگام بروز خطا

در نقطه f_3



شکل ۱۱: سیگنال‌های جریان (مؤلفه‌هایی مد هوایی) مربوط به رله‌های R_A و R_B و پردازش آن‌ها با فیلتر پیشنهادی (MMF) هنگام بروز خطا

در نقطه f_2



شکل ۱۲: مقایسه عملکرد فیلتر پیشنهادی (MMF) و تبدیل موجک (DWT) هنگام بروز خطا با زاویه شروع صفر درجه

فرض شده است که یک خطای تک‌فاز به زمین در فاز a با امپدانس خطای ۵۰ اهم و زاویه شروع خطای ۴۵ درجه در f_1 به فاصله ۲۰۰ کیلومتر از شین A رخ داده است. زمان وقوع خطا، ۱۵ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۹، نتایج پردازش سیگنال‌های موج سیار اولیه جریان برای هر دو رله R_A و R_B توسط فیلتر پیشنهادی MMF را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پلاریته سیگنال‌های امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله R_A و R_B یکسان هستند. علاوه بر آن با توجه به زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از رله‌ها:

$$t_A - t_B = 15.69 - 15.35 = 0.34$$

از طرفی:

$$\frac{l_{AB}}{v} = \frac{300 \text{ km}}{2.99147 \times 10^5 \text{ km/s}} = 1.0029 \text{ ms}$$

پس شرط $t_A - t_B < \frac{l_{AB}}{v}$ برقرار است. بنابراین روش پیشنهادی بر

اساس روابط (۱۷) و (۱۸)، این نوع خطا را به راحتی، با قابلیت اطمینان و دقت بالا به عنوان یک خطا در داخل خط انتقال تشخیص می‌دهد.

۴-۲- خطا در خارج از خط انتقال و در جهت مثبت

در این حالت فرض می‌شود که یک خطای خط به زمین در فاز a با فاصله ۴۵ کیلومتر از شین B در f_3 رخ دهد. زاویه شروع خطا ۹۰ درجه و امپدانس خطا ۵ اهم فرض شده است. شکل ۱۰، نتایج پردازش سیگنال‌های امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله R_A و R_B توسط فیلتر پیشنهادی MMF را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پلاریته سیگنال‌های امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله R_A و R_B مخالف هم هستند. در رله R_A پلاریته مثبت و در رله R_B پلاریته منفی است. و علاوه بر آن با توجه به زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از رله‌ها:

$$t_A - t_B = 16.154 - 15.151 = 1.003 \text{ ms}$$

بنابراین بر اساس روابط (۲۱) و (۲۲)، این نوع خطا به عنوان خطای خارج از خط انتقال و در جهت مثبت تشخیص داده می‌شود.

۴-۳- خطا در خارج از خط انتقال و در جهت منفی

در این حالت فرض می‌شود که یک خطای خط به زمین در فاز a با فاصله ۳۰ کیلومتر از شین A در f_2 رخ دهد. زاویه شروع خطا ۹۰ درجه و امپدانس خطا ۰/۱ اهم فرض شده است. نتایج پردازش سیگنال‌های امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله R_A و R_B توسط فیلتر پیشنهادی MMF در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پلاریته سیگنال‌های امواج سیار اولیه جریان برای هر دو رله R_A و R_B مخالف هم هستند. در رله R_A پلاریته منفی و در رله R_B پلاریته مثبت است. و علاوه بر آن با توجه به زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از رله‌ها:

$$t_B - t_A = 16.104 - 15.101 = 1.003 \text{ ms}$$

جدول ۱: نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بررسی تأثیر زاویه شروع خطا بر عملکرد روش پیشنهادی

فاصله و نوع خطا	زاویه شروع خطا	پلاریته		$t_A - t_B$ (ms)	$\frac{l_{AB}}{v}$ (ms)	نتایج تحلیل خطا
		ترمینال A	ترمینال B			
خطای AG در ۲۰۰ کیلومتری از شین A	۰	-	-	-۰/۳۴	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
	۴۵	+	+	-۰/۳۴	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
	۹۰	+	+	-۰/۳۴	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
خطای BCG در ۲۴۵ کیلومتری از شین A	۰	-	+	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۴۵	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۹۰	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
خطای ABCG در ۳۰ کیلومتری از شین A	۰	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی
	۴۵	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی
	۹۰	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی
خطای AB در ۲۰۰ کیلومتری از شین B	۰	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۴۵	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۹۰	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت

جدول ۲: نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بررسی تأثیر امپدانس خطا بر عملکرد روش پیشنهادی

فاصله و نوع خطا	امپدانس خطا	پلاریته		$t_A - t_B$ (ms)	$\frac{l_{AB}}{v}$ (ms)	نتایج تحلیل خطا
		ترمینال A	ترمینال B			
خطای AG در ۷۰ کیلومتری از شین A	۰/۰۱	+	+	-۰/۲	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
	۵۰	+	+	-۰/۲	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
	۱۰۰	+	+	-۰/۲	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
	۲۰۰	+	+	-۰/۲	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
	۴۰۰	+	+	-۰/۲	۱/۰۰۲۹	خطای داخلی
خطای ABG در ۵۰۰ کیلومتری از شین A	۰/۰۱	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۵۰	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۱۰۰	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۲۰۰	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
	۴۰۰	+	-	۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت مثبت
خطای ABCG در ۳۰ کیلومتری از شین A	۰/۰۱	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی
	۵۰	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی
	۱۰۰	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی
	۲۰۰	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی
	۴۰۰	-	+	-۱/۰۰۳	۱/۰۰۲۹	خطای خارجی و در جهت منفی

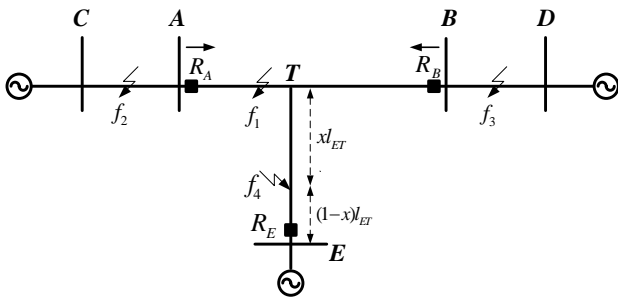
است که زاویه شروع خطا کوچک باشد. هنگامی که خطا در یک ولتاژ با دامنه کم رخ می‌دهد، دامنه امواج سیار ناشی از خطا ضعیف می‌باشد و تشخیص آنها دشوار است. و این موضوع تأثیر منفی بر عملکرد روش حفاظتی و رله‌ها دارد. اما فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی پیشنهادی که در این مقاله برای پردازش سیگنال به کار گرفته شده است، قادر است در این گونه شرایط خطا، به راحتی و با دقت بالا خطا را تشخیص دهد.

بنابراین بر اساس معیارهای روش پیشنهادی (۲۵) و (۲۶)، این نوع خطا به عنوان خطای خارج از خط انتقال و در جهت منفی تشخیص داده می‌شود.

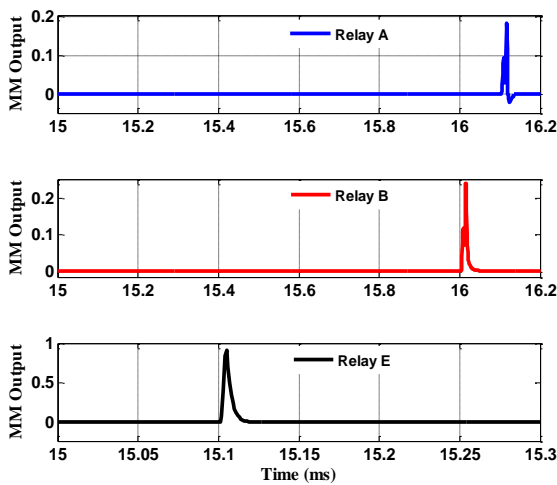
۴-۴- تأثیر زاویه شروع خطا

یکی از مشکلات روش‌های حفاظتی موجود، تشخیص خطا در شرایطی

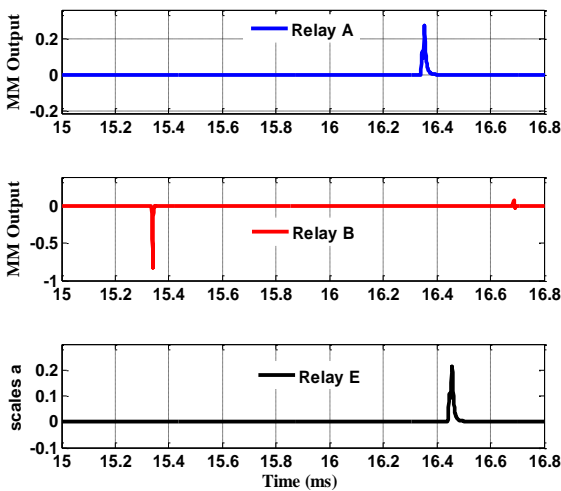
بود، درحالی که فیلتر پیشنهادی در این گونه شرایط نیز با دقت بالا پلاریته امواج سیار را تشخیص می دهد.



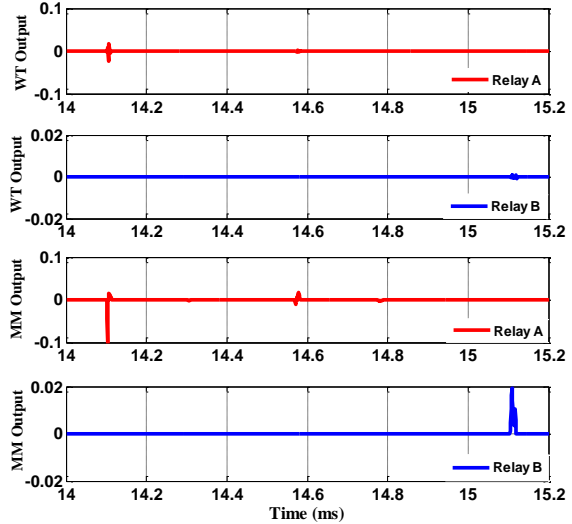
شکل ۱۴: خط انتقال سه ترمیناله ۵۰۰ kV



شکل ۱۵: پردازش سیگنال های جریان (مؤلفه مد هوایی) مربوط به رله های R_A ، R_B و R_E و پردازش آن ها با فیلتر پیشنهادی MMF برای خطای AB



شکل ۱۶: پردازش سیگنال های جریان (مؤلفه مد هوایی) مربوط به رله های R_A ، R_B و R_E و پردازش آن ها با فیلتر پیشنهادی MMF برای خطای AG



شکل ۱۳: مقایسه عملکرد فیلتر پیشنهادی (MMF) و تبدیل موجک (DWT) هنگام بروز خطای امپدانس بالا

برای یک خطای خط به زمین در فاز a با زاویه شروع صفر درجه و امپدانس خطای ۵۰ اهم در ۱۰۰ کیلومتری از شین A، نتایج پردازش سیگنال توسط تکنیک پیشنهادی ریخت شناسی ریاضی (MM) و تبدیل موجک (WT) با موجک مادر db4 برای هر دو رله R_A و R_B در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در این گونه شرایط خطا، که دامنه امواج سیار ضعیف می شود، تشخیص آن ها با تبدیل موجک مشکل خواهد بود، درحالی که با استفاده از فیلتر پیشنهادی MMF به راحتی و به طور واضح پلاریته امواج سیار تشخیص داده می شود. به منظور بررسی تأثیر زاویه شروع خطا، شبیه سازی های متعدد دیگری نیز انجام شده است که نتایج مربوط به خطای تک فاز به زمین AG، دوفاز به زمین BCG، دو فاز AB و سه فاز به زمین ABCG در جدول ۱ آمده است. امپدانس خطا ۵۰ اهم در نظر گرفته شده و زاویه شروع خطا از صفر تا ۹۰ درجه تغییر کرده است. با توجه به نتایج به دست آمده در این جدول واضح است که زاویه شروع خطا تأثیر منفی بر عملکرد روش پیشنهادی ندارد.

۴-۵- تأثیر امپدانس خطا

به منظور بررسی تأثیر امپدانس خطا بر عملکرد روش پیشنهادی، شبیه سازی های متنوعی انجام شده است که بعضی از نتایج برای زاویه شروع خطا ۴۵ درجه و تغییر امپدانس خطا از صفر تا ۴۰۰ اهم در جدول ۲ نشان داده شده است. برای یک خطای خط به زمین در فاز a با زاویه شروع ۴۵ درجه و امپدانس خطای ۴۰۰ اهم در ۱۰۰ کیلومتری از شین A، نتایج پردازش سیگنال توسط تکنیک پیشنهادی ریخت شناسی ریاضی (MM) و تبدیل موجک (WT) با موجک مادر db4 برای هر دو رله R_A و R_B در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود در خطای امپدانس بالا نیز دامنه امواج سیار ضعیف می شود و تشخیص آن ها با تبدیل موجک دشوار خواهد

۴-۶- عملکرد روش پیشنهادی برای خطوط سه ترمیناله

به شکل واضح است که پلاریته امواج اولیه سیار برای رله‌های R_A و R_B مخالف هم بوده و با توجه زمان رسیدن امواج اولیه سیار برای رله‌ها:

$$t_A - t_B = 16.3431 - 15.34 = 1.0031 \text{ms}$$

بنابراین بر اساس نتایج فوق و الگوریتم پیشنهادی خطای مذکور به عنوان یک خطای خارجی در خطوط سه ترمیناله تشخیص داده می‌شود. نکته دیگر اینکه با توجه به پلاریته هر سه رله R_A ، R_B و R_E می‌توان جهت خطا را نیز تعیین نمود. به عنوان مثال برای خطای فوق پلاریته رله‌های R_A و R_B مخالف هم بوده درحالی‌که پلاریته رله‌های R_A و R_E یکسان است و این نتایج نشان می‌دهند که خطا در خارج از خطوط سه ترمیناله و در جهت مثبت است. بنابراین به طور کلی بر اساس الگوریتم پیشنهادی در خطوط انتقال سه ترمیناله اگر خطا داخلی باشد، پلاریته هر سه رله یکسان و اگر خطا خارجی باشد، فقط پلاریته دو تا از رله‌ها یکسان است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش پیشنهادی برای حفاظت خط انتقال مبتنی بر پلاریته و زمان رسیدن امواج اولیه سیار جریان ارائه شد. برای پردازش سیگنال و استخراج امواج گذرا از یک فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی جدید استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی مستقل از نوع خطا، امپدانس خطا، زاویه شروع خطا و مکان خطا است و در شرایط بد خطا مانند خطای امپدانس بالا و خطا با زاویه شروع کم که دامنه امواج سیار ضعیف می‌شود، تبدیل موجک قادر به تشخیص پلاریته امواج سیار نیست اما روش پیشنهادی با دقت بالا پلاریته امواج سیار را تشخیص می‌دهد. روش پیشنهادی می‌تواند برای خطوط سه ترمیناله نیز به کار برده شود و نوع خطا (داخلی یا خارجی) را در خطوط سه ترمیناله با دقت بالا تشخیص دهد. همچنین استفاده از تکنیک ریخت‌شناسی ریاضی جدید در این روش باعث شده است که حجم محاسباتی کاهش، سرعت پردازش و دقت آن افزایش یابد.

پیوست

پارامترهای سیستم‌های انتقال ۵۰۰ kV دو ترمیناله و سه ترمیناله شبیه‌سازی شده به صورت زیر می‌باشند:

منابع تغذیه معادل:

ولتاژ: ۵۰۰ kV

$$Z_1 = 2/11 + j56/4 \Omega/\text{km}$$

امپدانس مؤلفه مثبت:

$$Z_0 = 28/16 + j134/46 \Omega/\text{km}$$

امپدانس مؤلفه صفر:

خطوط انتقال:

$$\text{AC: } 100 \text{ km} \quad \text{AB: } 300 \text{ km} \quad \text{BD: } 400 \text{ km}$$

$$\text{AT: } 70 \text{ km} \quad \text{BT: } 230 \text{ km} \quad \text{ET: } 100 \text{ km}$$

از آنجا که روش پیشنهادی فقط بر اساس پلاریته و زمان رسیدن اولین موج‌های سیار عمل می‌کند و در آن موج‌های سیار دوم به بعد که به شین‌ها می‌رسند، در نظر گرفته نمی‌شود، لذا اضافه شدن ترمینال به خطوط انتقال بر عملکرد آن تأثیری ندارد و برای خطوط انتقال چند ترمیناله نیز می‌تواند به کار برده شود. یک سیستم سه ترمیناله در شکل ۱۴ نشان داده شده است که در آن خط انتقال ET با طول ۱۰۰ کیلومتر به سیستم مورد مطالعه اضافه شده است. با توجه به این شکل واضح است که اگر یک خطا در هر کدام از نقاط f_1 ، f_2 و f_3 رخ دهد، بر اساس الگوریتم پیشنهادی، داخلی و یا خارجی بودن خطا تشخیص داده می‌شود. زیرا ترمینال اضافه شده تأثیری بر پلاریته و زمان رسیدن اولین موج‌های سیار که به رله‌های R_A و R_B می‌رسند، ندارد. همچنین اگر فرض شود که خطا در نقطه f_4 با فاصله x از شین E رخ دهد، زمان رسیدن اولین موج سیار به هریک از رله‌های R_A و R_B به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$t_A = t_0 + \frac{x l_{ET}}{v} + \frac{l_{AT}}{v} \quad (28)$$

$$t_B = t_0 + \frac{x l_{ET}}{v} + \frac{l_{BT}}{v} \quad (29)$$

که در آن l_{ET} طول خط انتقال ET، l_{AT} طول خط انتقال AT و l_{BT} طول خط انتقال BT است. با ترکیب (۲۸) و (۲۹):

$$t_A - t_B = \frac{l_{AT} - l_{BT}}{v} \quad (30)$$

بنابراین از (۳۰) می‌توان به سادگی نتیجه گرفت که $t_A - t_B < \frac{l_{AB}}{v}$ از طرفی واضح است که پلاریته امواج سیار به هر یک از رله‌ها یکسان است. بنابراین این نوع خطا به عنوان یک خطای داخلی در سیستم سه ترمیناله تشخیص داده می‌شود. به منظور نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی برای خطوط انتقال سه ترمیناله، فرض می‌شود که یک خطای دو فاز (AB) در فاصله ۳۰ کیلومتری از شین E با امپدانس خطای ۲۰ اهم و زاویه شروع ۴۵ درجه در لحظه ۱۵ میلی‌ثانیه رخ دهد. نتایج حاصل از پردازش سیگنال توسط فیلتر پیشنهادی MMF برای هر سه رله R_A ، R_B و R_E در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل واضح است که پلاریته امواج اولیه سیار برای هر سه رله یکسان است و با توجه به زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از رله‌های R_A و R_B :

$$t_A - t_B = 16.12 - 16.02 = 0.1 \text{ms}$$

بنابراین بر اساس تحلیل‌های فوق و الگوریتم پیشنهادی خطای مذکور به عنوان یک خطای داخلی در خطوط سه ترمیناله تشخیص داده می‌شود. به منظور بررسی بیش‌تر عملکرد روش پیشنهادی فرض می‌شود یک خطای تک‌فاز به زمین AG در فاصله ۲۰۰ کیلومتری از شین B با امپدانس خطای ۵ اهم و زاویه شروع ۲۰ درجه رخ دهد. نتایج حاصل از پردازش سیگنال توسط فیلتر پیشنهادی MMF برای هر سه رله R_A ، R_B و R_E در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با توجه

- [15] A. Carlos, O. Eduardo, and R. Giuseppe, "Adaptive non-communication protection based on traveling waves and impedance relay," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 3, pp. 1154-1162, 2006.
- [16] J. Duan, and B. Zhang, "Research on ultra-high-speed directional relay of EHV/UHV transmission lines using wavelet transform," *WSEAS Trans. Circuit Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 896-901, 2004.
- [17] G. Zou, and H. Gao, "Fast pilot protection method based on waveform integral of traveling wave," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 50, pp. 1-8, 2013.
- [18] Y. Kong, B. Zhang, and Z. Hao, "Study of ultra-high-speed protection of transmission lines using a directional comparison scheme of transient energy," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 3, 2015.
- [19] G. Matheron, *Random Sets and Integral Geometry*, New York, Wiley, 1975.
- [20] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, New York, Academic, 1982.
- [21] S. Gautam, and S. M. Brahma, "Overview of mathematical morphology in power systems—A tutorial approach," *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting (PES'09)*, pp. 1-7, 2009.
- [22] S. Gautam, and S. M. Brahma, "Properties of mathematical morphology based filter for online filtering of power system signals," *Proc. North American Power Symp. (NAPS)*, pp. 1-5, 2009.
- [23] S. Gautam, and S. M. Brahma, "Application of mathematical morphology based filters to detect a power swing," *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, 2010.
- [24] S. Gautam, and S. M. Brahma, "Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1226-1234, 2013.
- [25] M. Khodadadi, and S. M. Shahrtash, "A new noncommunication-based protection scheme for three-terminal transmission lines employing mathematical morphology-based filters," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 1, pp. 347-356, 2013.
- [26] Q. H. Wu, J. F. Zhang, and D. J. Zhang, "Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 4, pp. 1127-1133, 2003.
- [27] Q. H. Wu, Z. Lu, and T. Y. Ji, *Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology*, 1st ed. New York, Springer, Ch. 2, 2009.
- [28] H. J. A. M. Heijmans, *Morphological Image Operators*, New York, NY, USA: Academic, 1994.
- [29] L. Zhang, J. Xu, J. Yang, and D. Yang, "Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 22, no. 3, pp. 597-610, 2008.
- [۳۰] فرهاد نامداری و مسلم صالحی، «روشی برای مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار ناحیه گسترده در شبکه انتقال قدرت»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، ۱۳۹۵.
- [۳۱] سعید هاشمی‌نژاد، سیدقدرت‌اله سیف‌السادات، مرتضی رزاز و محمود جورابیان، «دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا در سیستم‌های قدرت با استفاده از تئوری امواج سیار و سیستم فازی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۴، ۱۳۹۴.
- $Z_1 = 1/0.8 + j0.5184 \Omega/km$ امیدانس مؤلفه مثبت:
- $Z_0 = 9/66 + j0.13 \Omega/km$ امیدانس مؤلفه صفر:
- $C_0 = 0.01 \mu f / km$ خازن موازی معادل مؤلفه منفی هر شین:
- $C_1 = 0.1336 \mu f / km$ خازن موازی معادل مؤلفه مثبت هر شین:

مراجع

- [1] A. Sharafi, M. Sanaye-Pasand, and P. Jafarian, "Ultra-high-speed protection of parallel transmission lines using current travelling waves," *IET Gen., Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 6, pp. 656-666, 2011.
- [2] R. Aguilar, F. Pérez, E. Orduña, and C. Rehtanz, "The directional feature of current transients, application in high-speed transmission-line protection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 2, pp. 1175-1182, 2013.
- [3] A. Sharafi, M. Sanaye-Pasand, and P. Jafarian, "Non-communication protection of parallel transmission lines using breakers open-switching travelling waves," *IET Gen., Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 1, pp. 88-98, 2012.
- [4] R. Aguilar, F. Pérez, and E. Orduña, "High-speed transmission line protection using principal component analysis, a deterministic algorithm," *IET Gen., Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 7, pp. 712-719, 2011.
- [5] A. T. Johns, "New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of EHV transmission lines," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Distrib. Conf.*, pp. 228-239, 1980.
- [6] X. Dong, Y. Ge, and J. He, "Surge impedance relay," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1247-1256, 2005.
- [7] K. V. Desikachar, and L.P. Singh, "Digital travelling-wave protection of transmission lines," *Electr Power Syst Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 19-28, 1984.
- [8] M. Chamia, and S. Liberman, "Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines-development, design and application," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-97, no. 6, pp. 2104-2116, 1978.
- [9] W. Chen, O. P. Malik, X. Yin, D. Chen, and Z. Zhang, "Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 4, pp. 1134-1139, 2003.
- [10] X. Dong, S. Wang, and S. Shi, "Polarized current travelling-wave based directional relay," *Auto. Elect. Power Syst.*, vol. 35, no. 21, pp. 78-83, 2011.
- [11] Z.Q. Bo, A.T. Johns, and R.K. Aggarwal, "A new approach to transmission protection using fault generated high frequency current signals," *Proceedings of the 12th power systems computation conference*, pp. 128-134, 1996.
- [12] M. Chamia, and S. Liberman, "Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines - development, design and application," *IEEE Trans. on PAS.*, vol. PAS-97, no. 6, pp. 2104-2116, 1978.
- [13] P. Jafarian, and M. Sanaye-Pasand, "A traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp. 588-599, 2010.
- [14] V. Pathirana, and P. G. McLaren, "A hybrid algorithm for high speed transmission line protection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 4, pp. 2422-2428, 2005.

زیرنویس‌ها

- ¹ Distance Protection
- ² Threshold
- ³ Wavelet Transform
- ⁴ Mathematical Morphology
- ⁵ Set Theory
- ⁶ Integral Geometry
- ⁷ Structural Element
- ⁸ Mathematical Morphology Filter
- ⁹ Erosion
- ¹⁰ Dilation
- ¹¹ Opening
- ¹² Closing
- ¹³ Discreet Wavelet Transform
- ¹⁴ Daubechies-4 mother wavelet
- ¹⁵ Lattice diagram
- ¹⁶ Clarke's Real Transformation Matrix
- ¹⁷ Ground-Mode
- ¹⁸ Aerial-Mode
- ¹⁹ Frequency-Dependant