

فرمولاسیون جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا در خطوط انتقال دومداره نامتقارن طی خطاهای Cross-Country با در نظر گرفتن موقعیت مکانی خطاهای تکفاز

حامد عبدالله زاده^۱ حمید رضا متین افشار^۲

۱- استادیار- گروه مهندسی برق، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

H.abdollahzadeh@gmail.com

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد - گروه مهندسی برق، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده: خطاهای Cross-Country خطاهای نامتعارف در خطوط انتقال دومداره بوده که مشتمل بر دو خطای تکفاز به زمین در دو فاز از شش فاز این خطوط و در دو موقعیت مکانی متفاوت می‌باشند. در مورد این خطاها، داشتن روابط تحلیلی توصیف‌کننده جریان‌های شاخه خطا (جریان‌های لحظه‌ای جاری شده از فازها به شاخه خطا)، مبنا و ابزاری کارا برای پرداختن به موضوعات تحقیقاتی با اهمیتی همچون تحلیل خطا، حفاظت و رله گذاری، جاییابی و دسنه بندی خطا بوده که در تحقیقات پیشین بدان پرداخته نشده است. در این مقاله، با تحلیل مدل حوزه زمانی خطوط دومداره نامتقارن، فرمولاسیون جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا طی خطاهای Cross-Country با در نظر گرفتن موقعیت خطاهای تکفاز مشتمل ارائه می‌گردد. در نتیجه این فرمولاسیون، روابط صریح حاکم بر جریان‌های لحظه‌ای بر حسب جریان‌های سه فاز یک انتهای خط و فواصل خطا از همان انتها استخراج می‌شود. این روابط، پرداختن به موضوعات تحقیقاتی فوق الذکر که در حوزه زمان توسعه داده می‌شود را تسهیل کرده و دارای کاربرد عملی می‌باشد. روابط بدست آمده از طریق شبیه سازی نرم افزاری در PSCAD/EMTDC با استفاده از مدل معتبر خط دومداره ارزیابی شده و اعتبار آن مورد تایید قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: خطاهای Cross-Country، جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا، خطوط انتقال دومداره نامتقارن، موقعیت مکانی خطاهای تکفاز.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.147

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: حامد عبدالله زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - بزرگراه بسیج - بزرگراه امام رضا(ع) - شهرک قیامدشت - دپارتمان برق و الکترونیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

۱- مقدمه

خطوط انتقال هوایی یکی از المان‌های حیاتی برای عملکرد پایدار سیستم‌های قدرت بهم پیوسته به شمار می‌روند [۱]. ساختار دو مداره این خطوط با مدارهای نصب شده در یک دکل مشترک، بنا به مزایای فنی، اقتصادی و زیست محیطی نسبت به ساختار تک مداره دارای برتری بوده و به همین دلیل در سیستم‌های قدرت بیشتر مورد توجه می‌باشند [۲،۳]. خطوط انتقال دو مداره در سطوح ولتاژ فشار متوسط و گاه‌فشار قوی غالباً با مدارت نامتقارن با هادی‌های بدون جایگشت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۴]. خطوط انتقال هوایی در برگیرنده هادی‌های بدون عایق (عایق هوا) در فازها بوده و به همین دلیل به طور غیر قابل اجتناب و با احتمال رخداد بالا در معرض انواع خطاهای اتصال کوتاه طی دوره بهره‌برداری می‌باشند [۵].

علاوه بر خطاهای متعارف ده گانه [۱]، خطوط انتقال دو مداره در معرض رخداد خطاهای نامتعارفی از جمله خطاهای Cross-Country می‌باشند [۷،۸]. با اشاره به شکل (۱)، این نوع خطاها، که در ادامه با اختصار می‌شوند، طبق تعریف متشکل از دو خطای تک فاز به زمین (L-G) در فازهای غیر هم نام در یک مدار یکسان یا دو مدار مختلف در خطوط دومداره می‌باشند که در موقعیت‌های مکانی متفاوت از خط رخ می‌دهند. این دو رخداد می‌تواند به طور همزمان یا با توالی زمانی به وقوع بپیوندد.

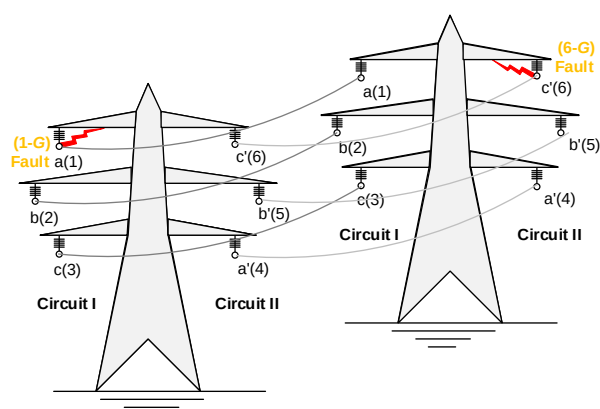
جریان‌های شاخه خطا، که طبق تعریف در این مقاله جریانی‌هایی هستند که طی یک اتصال کوتاه از فاز(های) خطادار در محل خطا به شاخه خطا جاری می‌شوند، پارمتر(های) مهمی به شمار می‌رود که از تحلیل مدل مداری خط انتقال در سیستم قدرت در حوزه فازور یا حوزه زمان قابل استخراج می‌باشد. این جریان(ها) مبنا و ابزاری برای پرداختن به موضوعات تحقیقاتی با اهمیتی همچون تحلیل خطا، حفاظت و رله‌گذاری [۸-۱۳]، جایابی و دسته‌بندی خطا [۱۴-۲۱] خواهد بود. تحلیل انواع خطاها در مورد خطوط انتقال دو مداره نا-متقارن به دلیل لزوم مشارکت هر شش فاز (القای متقابل بین فازها) در تحلیل حوزه فاز و همچنین عدم ساده‌سازی مدل مداری آن در شبکه‌های متقارن در تحلیل حوزه توالی امری پیچیده است [۲۲]. این پیچیدگی در خصوص خطاهای CCF به دلیل حضور دو خطا بر روی خط و در دو مکان مختلف به ویژه در حوزه زمان بیشتر خواهد بود. این امر را می‌توان از دلایل فقدان روابطی در تحقیقات گذشته و کتب مرجع برای جریان‌های شاخه خطا در مورد خطاهای CCF روی خطوط انتقال متقارن دانست.

از طریق تحلیل مدل مداری حوزه زمان خطوط انتقال دو مداره با هادی‌های جایگشت نشده که در یک حالت کلی فرض می‌شود مدارت خط دارای هادی‌های نامشابه نیز هستند، در این مقاله فرمولاسیون جریان‌های لحظه‌ای فازهای خطادار طی خطاهای CCF با در نظر

گرفتن موقعیت خطاهای تکفاز تشکیل دهنده ارائه می‌گردد. در نتیجه این فرمولاسیون، روابط تحلیلی صریح حاکم بر جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا بر حسب جریان‌های سه فاز یک انتهای خط و فاصله خطا از همان انتها استخراج می‌شود. این روابط در موضوعات تحقیقاتی مختلف مرتبط با حفاظت خطوط انتقال که در حوزه زمان توسعه داده می‌شود دارای کاربرد عملی می‌باشد. روابط بدست آمده از طریق مطالعات شبیه‌سازی در نرم افزار PSCAD/EMTDC با استفاده از مدل معتبر خط دو مداره نامتقارن مورد ارزیابی قرار گرفته، اعتبار و دقت آن سنجیده شده و مورد تایید قرار می‌گیرد.

۲- مدل مداری خط انتقال مورد مطالعه

خط انتقال دو مداره مورد مطالعه در یک حالت کلی در برگیرنده مدارات با هادی‌های نامشابه و بدون اعمال جایگشت در هر دو مدار در نظر گرفته شده و القای متقابل، همانند آنچه در عمل وجود دارد،



شکل (۱): یک خطای Cross-Country نمونه مشتمل بر خطاهای تکفاز به زمین $a-G$ (1-G) و $c'-G$ (6-G)

بین کلیه شش فاز خط لحاظ می‌گردد. همچنین فرض می‌گردد که مدارات خط، مانند آنچه در عمل غالباً وجود دارد، در هر دو انتهای فرستنده و گیرنده به شینه‌های مشترک ختم می‌گردند. به منظور اینکه فرمولاسیون در بخش‌های بعدی با سهولت و شفافیت بیشتری صورت گیرد، هادی‌های در مدار اول با شماره گذاری ۱ تا ۳ و در مدار دوم با ۴ تا ۶ همانند آنچه در شکل (۱) مشخص شده است تمیز داده خواهند شد. در تحلیل اولیه فرض می‌گردد که خطای CCF در برگیرنده فاز ۱ از مدار اول و فاز ۶ از مدار دوم باشد، اما در هر حال نتایج بدست آمده می‌تواند به هر دو فاز از شش فاز خط تعمیم داده شود. با مفروضات فوق، ماتریس‌های مقاومت و اندوکتانس فاز خط در مورد فازهای خطا دار و همچنین فازهای بدون خطا (سالم) موازی با آنها (فازهای ۴ و ۳) به صورت زیر تعریف می‌گردد.

۳- فرمولاسیون جریان شاخه‌های خطا

در مورد خطای CCF مورد نظر که مطابق با شکل (۱)، فازهای ۱ و ۶ را در بر می‌گیرد، جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا $(i_{1F}(t))$ و $(i_{3F}(t))$ در شکل (۲) که از نقاط خطای F_1 و F_2 از طریق شاخه خطا به زمین جاری می‌شوند را می‌توان طی یک پروسه تحلیلی استخراج نمود که در این بخش بدان پرداخته می‌شود.

با اشاره به شکل (۲)، در وضعیتی که خطای 1-G نسبت به 6-G تقدم دارد، ولتاژهای نقاط خطای $v_{1F}(t)$ و $v_{6F}(t)$ را می‌توان در حوزه زمان بر حسب ولتاژها و جریان‌ها در شینه L و با اعمال قانون KVL در مسیر (قرمز رنگ) بین این شینه و نقاط خطا به صورت زیر بدست آورد.

$$v_{1F}(t) = v_{1L}(t) - d_{f1} \times \sum_{j=1}^6 (z_{1j} \times i_{jL}(t)) \quad (7)$$

$$v_{6F}(t) = v_{6L}(t) - d_{f2} \times \sum_{j=1}^6 (z_{6j} \times i_{jL}(t)) + (d_{f2} - d_{f1}) z_{61} \times i_{1F}(t) \quad (8)$$

که در آنها $v_{1L}(t)$ و $v_{6L}(t)$ به ترتیب ولتاژهای خطادار ۱ و ۶ در شینه L و $i_{jL}(t)$ جریان فاز j ام خط در همان شینه می‌باشد. نظر به اینکه مدارهای خط در هر دو انتها به شینه‌های مشترک ختم می‌شوند، ولتاژ فازهای خطادار در انتهای دور یا به عبارتی شینه R ($v_{1R}(t)$ و $v_{6R}(t)$) را می‌توان از طریق فازهای موازی سالم متناظر (فازهای ۴ و ۳) با اعمال قانون KVL در مسیر (سبز رنگ) بین شینه های L و R به صورت زیر بدست آورد.

$$v_{1R}(t) = v_{1L}(t) + (1 - d_{f1}) z_{41} \times i_{1F}(t) + (1 - d_{f2}) z_{46} \times i_{6F}(t) - \sum_{j=1}^6 (z_{4j} \times i_{jL}(t)) \quad (9)$$

$$v_{6R}(t) = v_{6L}(t) + (1 - d_{f1}) z_{31} \times i_{1F}(t) + (1 - d_{f2}) z_{36} \times i_{6F}(t) - \sum_{j=1}^6 (z_{3j} \times i_{jL}(t)) \quad (10)$$

همچنین در فازهای خطادار ۱ و ۶ روابط زیر در مسیر (بنفش رنگ) بین شینه R و نقاط خطای F_1 و F_2 طبق شکل (۲) برقرار می‌باشد.

$$v_{1F}(t) - v_{1R}(t) = (1 - d_{f1}) \times (-z_{11} \times i_{1F}(t)) + \sum_{j=1}^6 (z_{1j} \times i_{jL}(t)) - (1 - d_{f2}) z_{16} \times i_{6F}(t) \quad (11)$$

$$v_{6F}(t) - v_{6R}(t) = (1 - d_{f2}) \times (-z_{66} \times i_{6F}(t) + z_{61} \times i_{1F}(t)) + \sum_{j=1}^6 (z_{6j} \times i_{jL}(t)) \quad (12)$$

$$R_{ph} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} & r_{36} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} & r_{46} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} & r_{66} \end{pmatrix} \quad (1)$$

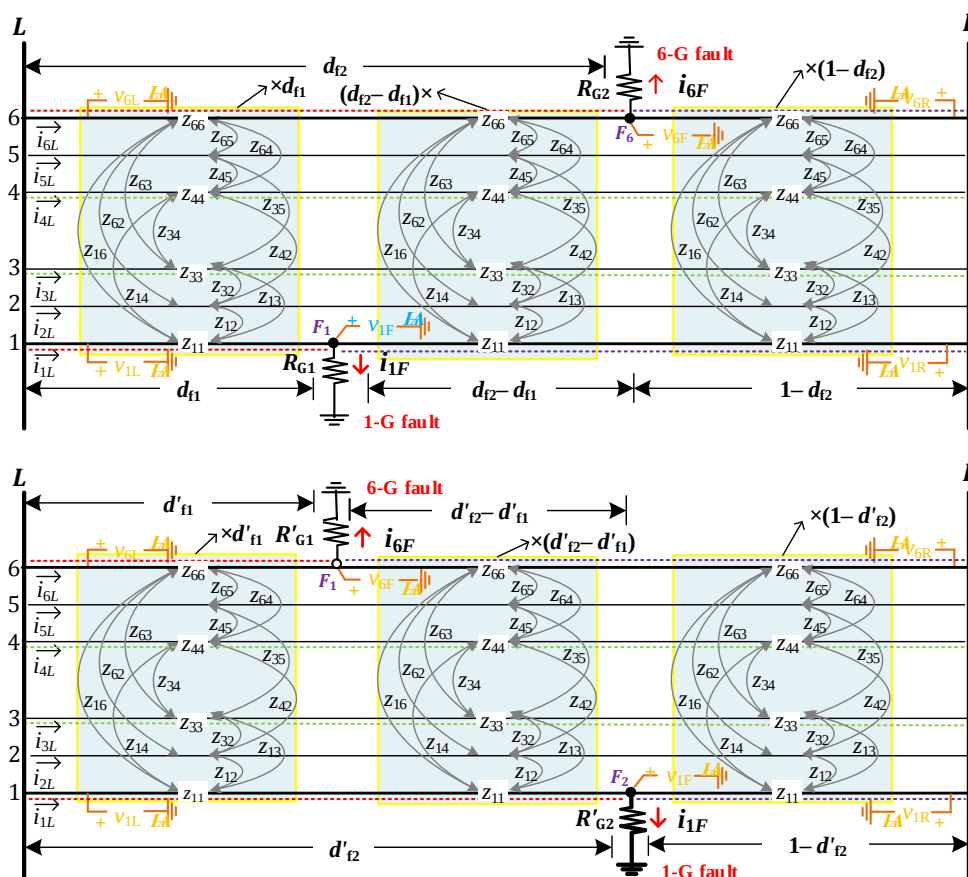
$$L_{ph} = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} & l_{15} & l_{16} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} & l_{34} & l_{35} & l_{36} \\ l_{41} & l_{42} & l_{43} & l_{44} & l_{45} & l_{46} \\ l_{61} & l_{62} & l_{63} & l_{64} & l_{65} & l_{66} \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آنها درایه‌ها با زیرنوشته تکراری مقاومت‌های سری فاز و اندوکتانس‌های خودی فاز و درایه‌ها با زیرنوشته غیر تکراری مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های متقابل بین فازها می‌باشند. بر اساس درایه‌های (۱) و (۲) پارامترهای زیر را می‌توان تعریف نمود.

$$z_{1j} = r_{1j} + l_{1j} \times d/dt \quad (3) \quad z_{3j} = r_{3j} + l_{3j} \times d/dt \quad (4)$$

$$z_{4j} = r_{4j} + l_{4j} \times d/dt \quad (5) \quad z_{6j} = r_{6j} + l_{6j} \times d/dt \quad (6)$$

که در آن $j = 1, 2, \dots, 6$ مشخص کننده شماره فازها بوده و d/dt اپراتور مشتق گیر زمانی می‌باشد. پارامترهای تعریف شده در روابط (۳)-(۶) را می‌توان در واقع معادل زمانی امیداندن‌های سری خودی و متقابل خط در نظر گرفت که هنگامی که در جریان‌های لحظه‌ای فازهای مربوطه ضرب می‌گردند، افت ولتاژ لحظه‌ای بر روی فازهای خطادار (فازهای ۱ و ۶) و فازهای سالم موازی آنها (فازهای ۴ و ۳) را نتیجه خواهند داد. براساس پارامترهای (۳)-(۶)، مدل خط انتقال شش فاز مورد مطالعه در حوزه زمان طی خطای CCF تعیین شده استخراج شده و در شکل (۲) نشان داده شده است. در این مدل، از خازن موازی هادی‌های خط بر اساس این واقعیت که خطوط دو مداره ناتقارن با هادی‌های بدون جایگشت غالباً در دسته خطوط کوتاه و گاهاً خطوط متوسط قرار می‌گیرند، صرف نظر شده است. در مورد خطاهای CCF، دو وضعیت مختلف بر حسب موقعیت مکانی خطاهای تکفاز (1-G و 6-G) تشکیل دهنده خطای CCF می‌توان متصور شد. با فرض انتهای نزدیک خط (شینه L) به عنوان مبنا، در وضعیت اول خطای 1-G نسبت به 6-G دارای تقدم مکانی است (شکل (۲) مدار فوقانی) که به ترتیب در فواصل d_{f1} و d_{f2} از شینه L با مقاومت‌های زمین R_{G1} و R_{G2} قرار می‌گیرند. در وضعیت دوم، خطای 1-g نسبت به 6-g دارای تأخر مکانی رخ می‌دهد (شکل (۲) مدار تحتانی) که به ترتیب در فواصل d'_{f1} و d'_{f2} با مقاومت‌های R'_{G1} و R'_{G2} قرار می‌گیرند. در نتیجه وقوع خطای CCF در وضعیت اول، پارامترهای (۳)-(۶) در مدل خط با ضرایب d_{f1} ، $(d_{f2} - d_{f1})$ و $(d_{f2} - 1)$ به ترتیب در سمت چپ، وسط و سمت راست خطا ظاهر می‌شوند. در وضعیت دوم، این ضرایب برابر با d'_{f1} ، $(d'_{f2} - d'_{f1})$ و $(d'_{f2} - 1)$ خواهند بود.



شکل (۲): مدل مداری خط انتقال مورد مطالعه طی یک خطای CCF؛ خطای 1-G دارای تقدم مکانی (شکل فوقانی) و تأخر مکانی (شکل تحتانی) نسبت به خطای 6-G

$$i_{1F}(t) = \frac{B'C - BC'}{AB' - A'B} = (1/(1-d_{f1})) \times \sum_{j=1}^6 (\gamma_j \times i_{jL}(t)) \quad (20)$$

$$i_{6F}(t) = \frac{AC' - A'C}{AB' - A'B} = (1/(1-d_{f2})) \times \sum_{j=1}^6 (\gamma'_j \times i_{jL}(t)) \quad (21)$$

که در آنها خواهیم داشت:

$$\gamma_j = (\eta_j - \delta_j) / \sigma \quad (22)$$

$$\gamma'_j = (\phi_j - \psi_j) / \sigma \quad (23)$$

پارامترهای η_j ، δ_j ، ϕ_j و ψ_j در (۲۲) و (۲۳) به ازای شماره فاز 1, 2, ..., 6 از روابط زیر بدست آمده

$$\eta_j = (z_{66} - z_{36})(z_{1j} - z_{4j}) \quad (24)$$

$$\delta_j = (z_{16} - z_{46})(z_{6j} - z_{3j}) \quad (25)$$

$$\phi_j = (z_{11} - z_{41})(z_{6j} - z_{3j}) \quad (26)$$

$$\psi_j = (z_{61} - z_{31})(z_{1j} - z_{4j}) \quad (27)$$

و همچنین خواهیم داشت:

$$\sigma = (z_{11} - z_{41})(z_{66} - z_{36}) - (z_{61} - z_{31})(z_{16} - z_{46}) \quad (28)$$

با جایگذاری (۷) و (۹) در (۱۱) و همچنین (۸) و (۱۰) در (۱۲)، و سپس مرتب سازی نتایج به شکل ماتریسی، رابطه زیر بر حسب جریان‌های شاخه خطای حاصل می‌شود.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ A' & B' \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{1F}(t) \\ i_{6F}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C \\ C' \end{pmatrix} \quad (13)$$

که در آن خواهیم داشت:

$$A = (1-d_{f1})(z_{11} - z_{41}) \quad (14)$$

$$B = (1-d_{f2})(z_{16} - z_{46}) \quad (15)$$

$$A' = (1-d_{f1})(z_{61} - z_{31}) \quad (16)$$

$$B' = (1-d_{f2})(z_{66} - z_{36}) \quad (17)$$

$$C = \sum_{j=1}^6 (z_{1j} - z_{4j}) \times i_{jL}(t) \quad (18)$$

$$C' = \sum_{j=1}^6 (z_{6j} - z_{3j}) \times i_{jL}(t) \quad (19)$$

طی یک خطای CCF که مکان‌های دو خطای تکفاز به زمین تشکیل دهنده d_{f1} و d_{f2} ثابت می‌باشد، رابطه (۱۳) را می‌توان از نظر ریاضی یک دستگاه دو معادله با دو مجهول (جریان‌های شاخه خطای $i_{1F}(t)$ و $i_{6F}(t)$) در نظر گرفت. با حل این دستگاه، مجهولات به صورت زیر استخراج می‌گردند.

با در اختیار داشتن (۳۳) و (۳۴)، روابط نهایی جریان‌های شاخه خطا در (۲۰) و (۲۱) بر حسب جملات شامل d/dt و فاقد آن به صورت زیر حاصل می‌شوند.

$$i_{1F}(t) = (1/(1-d_{f1})) \times \sum_{j=1}^6 (\gamma_j \times i_{jL}(t)) = (1/(1-d_{f1})) \times \sum_{j=1}^6 (\alpha_j \times i_{jL}(t) + \beta_j \times d/dt i_{jL}(t)) \quad (36)$$

$$i_{6F}(t) = (1/(1-d_{f2})) \times \sum_{j=1}^6 (\gamma'_j \times i_{jL}(t)) = (1/(1-d_{f2})) \times \sum_{j=1}^6 (\alpha'_j \times i_{jL}(t) + \beta'_j \times d/dt i_{jL}(t)) \quad (37)$$

در مورد یک خط انتقال دومداره نامتقارن مفروض، مقدار عددی پارامترهای α_j ، β_j ، α'_j و β'_j در روابط (۳۶) و (۳۷)، از طریق ثابت‌های خط انتقال بدست آمده و جریان‌های شاخه خطا طی یک خطای CCF با تعیین متغیر فواصل خطاهای تکفاز به زمین تشکیل دهنده و در دست داشتن جریان فازهای خط $(i_{jL}(t))$ در انتهای نزدیک و همچنین مشتقات زمانی آنها به سهولت محاسبه می‌گردند. روابط (۳۶) و (۳۷)، در وضعیتی که خطای 1-G نسبت به 6-G دارای تقدم مکانی است برقرار است. در وضعیت معکوس، که 1-G دارای تأخر مکانی نسبت به 6-G می‌باشد، روابط مربوطه با یک فرآیند تحلیلی مشابه بر مدل مداری خط (شکل (۲) مدار تحتانی) به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$i_{6F}(t) = (1/(1-d'_{f1})) \times \sum_{j=1}^6 (\gamma'_j \times i_{jL}(t)) = (1/(1-d'_{f1})) \times \sum_{j=1}^6 (\alpha'_j \times i_{jL}(t) + \beta'_j \times d/dt i_{jL}(t)) \quad (38)$$

$$i_{1F}(t) = (1/(1-d'_{f2})) \times \sum_{j=1}^6 (\gamma_j \times i_{jL}(t)) = (1/(1-d'_{f2})) \times \sum_{j=1}^6 (\alpha_j \times i_{jL}(t) + \beta_j \times d/dt i_{jL}(t)) \quad (39)$$

اگر چه روابط (۳۶)-(۳۹)، جریان‌های شاخه خطا برای دو فاز خطادار مفروض ۱ و ۶ را بیان می‌کنند، اما باید توجه داشت که صورت کلی روابط برای هر زوج فاز خطادار دلخواه (از ۶ فاز خط انتقال) یکسان بوده و قابل تعمیم می‌باشد. برای این منظور کافی است در روابط (۳)-(۶) و (۲۴)-(۳۲)، شماره فازهای خطادار مورد نظر و همچنین فازهای سالم موازی متناظر با آنها را با شمار فازهای ۱ و ۶ (فازهای خطادار مفروض) و همچنین با ۴ و ۳ (فازهای سالم موازی متناظر) جایگذاری نمود.

به منظور اینکه جریان‌های خطا در (۲۰) و (۲۱) قابل محاسبه باشند، (۲۲) و (۲۳) باید به جملات شامل اپراتور مشتق‌گیر d/dt و جملات فاقد اپراتور تجزیه شوند. از پارامترهای تعریف شده در (۳)-(۶) و با برقراری رابطه $d^2/dt^2 = -\omega_0^2$ در مورد پارامترهای شبکه با شکل موج سینوسی و فرکانس زاویه ای مولفه اصلی ω_0 ، رابطه (۲۸) در مخرج کسره‌های (۲۲) و (۲۳) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\sigma = \sigma' + \sigma'' \times d/dt; \quad \sigma' = ((r_{11} - r_{41})(r_{66} - r_{36}) - (r_{61} - r_{31})(r_{16} - r_{46})) - (\omega_0^2 \times ((l_{11} - l_{41})(l_{66} - l_{36}) - (l_{61} - l_{31})(l_{16} - l_{46}))) \quad (29)$$

$$\sigma'' = ((r_{11} - r_{41})(l_{66} - l_{36}) - (r_{61} - r_{31})(l_{16} - l_{46})) + ((r_{66} - r_{36})(l_{11} - l_{41}) - (r_{16} - r_{46})(l_{61} - l_{31}))$$

به طریق مشابه، روابط (۲۴)-(۲۷) که در صورت کسره‌های (۲۲) و (۲۳) ظاهر شده‌اند به شکل زیر حاصل می‌گردند.

$$\delta_j = \delta'_j + \delta''_j d/dt; \quad \delta'_j = (r_{16} - r_{46})(r_{6j} - r_{3j}) - \omega_0^2 (l_{16} - l_{46})(l_{6j} - l_{3j}) \quad (30)$$

$$\delta''_j = (r_{16} - r_{46})(l_{6j} - l_{3j}) + (l_{16} - l_{46})(r_{6j} - r_{3j})$$

$$\phi_j = \phi'_j + \phi''_j d/dt; \quad \phi'_j = (r_{11} - r_{41})(r_{6j} - r_{3j}) - \omega_0^2 (l_{11} - l_{41})(l_{6j} - l_{3j}) \quad (31)$$

$$\phi''_j = (r_{11} - r_{41})(l_{6j} - l_{3j}) + (r_{6j} - r_{3j})(l_{11} - l_{41})$$

$$\psi_j = \psi'_j + \psi''_j d/dt; \quad \psi'_j = (r_{61} - r_{31})(r_{1j} - r_{4j}) - \omega_0^2 (l_{61} - l_{31})(l_{1j} - l_{4j}) \quad (32)$$

$$\psi''_j = (r_{61} - r_{31})(l_{1j} - l_{4j}) + (r_{1j} - r_{4j})(l_{61} - l_{31})$$

با ضرب صورت و همچنین مخرج (۲۲) و (۲۳) در عبارت $\sigma = \sigma' - \sigma'' \times d/dt$ ، پارامترهای γ_j و γ'_j در (۲۰) و (۲۱) به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$\gamma_j = \alpha_j + \beta_j \times d/dt; \quad \alpha_j = \lambda \times ((\eta'_j - \delta'_j) \times \sigma' + \omega_0^2 \times (\eta''_j - \delta''_j) \times \sigma'') \quad (33)$$

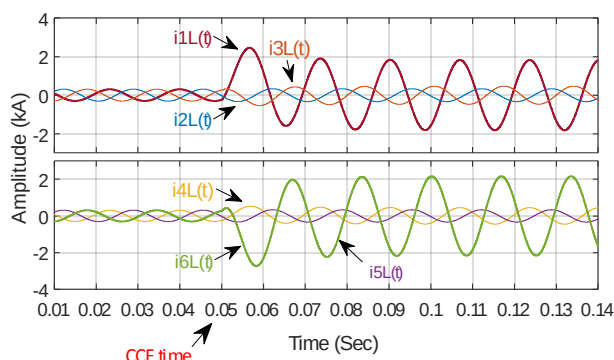
$$\beta_j = \lambda \times ((\eta''_j - \delta''_j) \times \sigma' - (\eta'_j - \delta'_j) \times \sigma'')$$

$$\gamma'_j = \alpha'_j + \beta'_j \times d/dt; \quad \alpha'_j = \lambda \times ((\phi'_j - \psi'_j) \times \sigma' + \omega_0^2 \times (\phi''_j - \psi''_j) \times \sigma'') \quad (34)$$

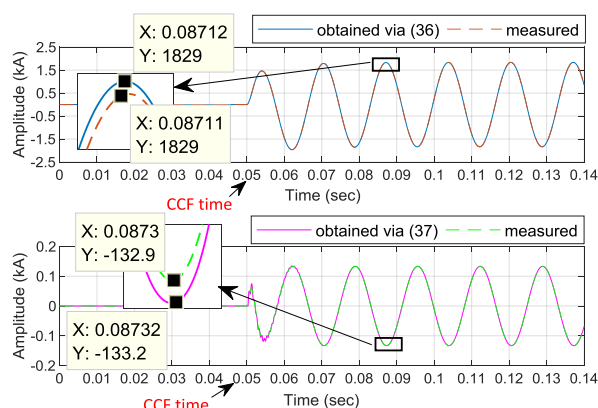
$$\beta'_j = \lambda \times ((\phi''_j - \psi''_j) \times \sigma' - (\phi'_j - \psi'_j) \times \sigma'')$$

که در آنها خواهیم داشت:

$$\lambda = 1/((\sigma')^2 + (\omega_0 \times \sigma'')^2) \quad (35)$$



شکل (۵): جریان‌های لحظه‌ای شش فاز خط انتقال در انتهای نزدیک

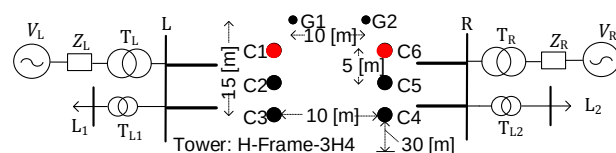


شکل (۶): جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا طی سناریوی خطای ۱: $i_{1F}(t)$ (شکل فوقانی) و $i_{6F}(t)$ (شکل تحتانی)

گردد. در این سناریوها، خطاها در انتهای دور، نزدیک و میانه خط و مقاومت‌های زمین پایین (5Ω) و بالا (200Ω) در نظر گرفته شده است. همچنین باید متذکر شد که سناریوهای ۱ و ۲ مرتبط با موقعیت اول خطاها و روابط جریان (۳۶) و (۳۷) و سناریوی ۳ مرتبط با موقعیت دوم و روابط (۳۸) و (۳۹) می‌باشند. به عنوان یک نتیجه اولیه، جریان فازهای خط انتقال در انتهای نزدیک ($i_{jL}(t)$) درمورد سناریوی دوم (پس از فیتراسیون پایین‌گذر) در شکل (۵) نشان داده شده است. برای محاسبه جریان‌های شاخه خطا در هر بازه نمونه برداری ($\Delta t = 10 \mu s$)، این جریان‌ها به همراه مشتقات زمانی آن و همچنین موقعیت خطاهای تکفاز طبق سناریوهای شکل (۴) در روابط (۳۶)–(۳۹) جایگذاری می‌گردد. مشتقات زمانی جریان‌ها در هر بازه نمونه برداری از رابطه مشتق‌گیری گسسته زیر محاسبه می‌گردد.

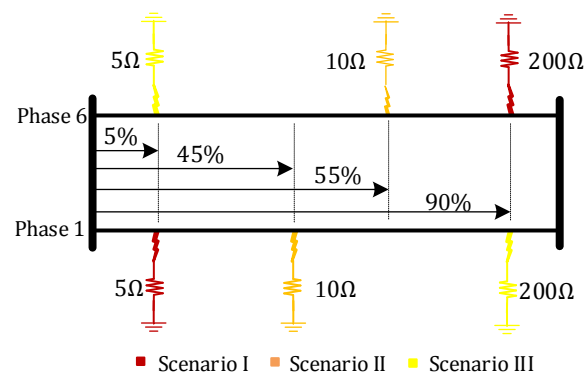
$$d/dt i_{jL}(t) = (1/\Delta t) \times (i_{jL}(t) - i_{jL}(t - \Delta t)) \quad (40)$$

در شکل‌های (۶)–(۸)، شکل موج‌های جریان‌های شاخه خطای بدست آمده از (۳۶)–(۳۹) به ازای سناریوهای خطای مفروض نشان داده شده است. در کلیه شکل‌ها، نتایج بدست آمده با جریان‌های شاخه خطای متناظر که در سیستم تست از طریق اندازه‌گیری حاصل می‌شود، مقایسه شده است. این جریان‌های اندازه‌گیری شده را می‌توان به عنوان مرجعی معتبر در مطالعات تلفیقی نمود، چرا که



- Sources— $f=60$ Hz, $V_L=V_R=230 \angle 0$ kV, $Z_L=Z_R=0.2+2.0j \Omega$.
- Transformers— T_L & T_R : 100 MVA, 230 Δ /132 Y_g kV, T_{L1} & T_{L2} : 50 MVA, 132 Y_g/63 Δ kV.
- Loads L_1 & L_2 : $P_L=50$ MW and $Q_L=30$ MVAR.
- Parallel line— length: 100 km, model: frequency dependent, circuit-I conductors type: ACSR (Hawk), circuit-II conductors type: ACSR (Oriole).

شکل (۳): سیستم تست بکار گرفته شده در مطالعات شبیه‌سازی



شکل (۴): سناریوهای خطای لحاظ شده در مطالعات شبیه‌سازی از منظر موقعیت و مقاومت زمین خطاهای تکفاز به زمین

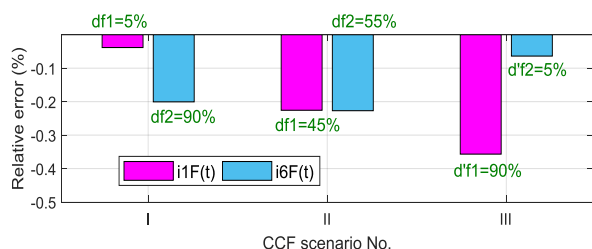
۴- اعتبارسنجی روابط استخراج شده

شکل (۳) یک سیستم تست به همراه مشخصات آن را برای ارزیابی اعتبار روابط جریان شاخه خطای استخراج شده نشان می‌دهد. با اشاره به آرایش هندسی فازهای خط انتقال و همچنین نوع هادی‌های مشخص شده در شکل (۳)، مقادیر عددی ماتریس‌های (۱) و (۲) به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$R_{ph} = \begin{pmatrix} 0.24136 & 0.11403 & 0.10931 & 0.10903 & 0.11349 & 0.11979 \\ 0.10931 & 0.10380 & 0.22037 & 0.99970 & 0.10368 & 0.10903 \\ 0.10903 & 0.10368 & 0.09997 & 0.27043 & 0.10380 & 0.10931 \\ 0.11979 & 0.11349 & 0.10903 & 0.10931 & 0.11403 & 0.29142 \end{pmatrix} (\Omega/\text{km})$$

$$L_{ph} = \begin{pmatrix} 0.00204 & 0.00092 & 0.00079 & 0.00072 & 0.00076 & 0.00077 \\ 0.00079 & 0.00093 & 0.00208 & 0.00080 & 0.00077 & 0.00072 \\ 0.00072 & 0.00077 & 0.00080 & 0.00224 & 0.00093 & 0.00079 \\ 0.00077 & 0.00076 & 0.00072 & 0.00079 & 0.00092 & 0.00221 \end{pmatrix} (\text{H}/\text{km})$$

مدل در نظر گرفته شده برای خط انتقال در شبیه‌سازی‌ها، مدل حوزه زمان J Marti [۲۳] می‌باشد. در مورد خطای CCF، همانگونه که در فرمولاسیون بخش گذشته نیز فرض شد، فازهای خطا طبق شکل (۳)، فازهای ۱ و ۶ در نظر گرفته می‌شود. همچنین سه سناریو مختلف مطابق شکل (۴) در مورد موقعیت مکانی (درصدی طول خط از شینه L) و مقاومت زمین خطاهای تکفاز تشکیل دهنده لحاظ می‌-



شکل (۹): خطای نسبی دامنه جریان جریان‌های شاخه خطی

محاسبه شده در قیاس با جریان های مرجع

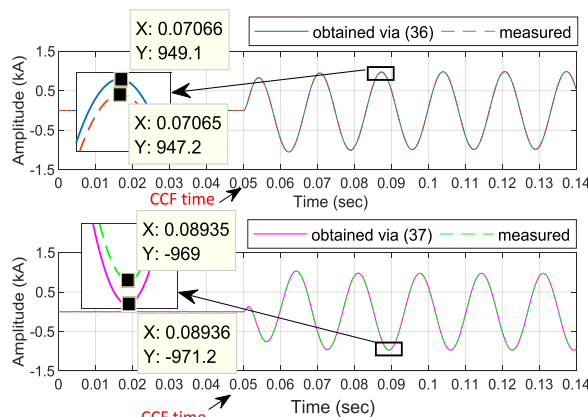
بدست می‌آیند. نظر به موقعیت خطاهای تکفاز به زمین در سناریوهای خطای مفروض ملاحظه می‌گردد که دقت روابط در مورد خطاهای نزدیک‌تر به انتهای نزدیک (شینه L) بزرگتر بوده و هر چه خطاها به انتهای دور (شینه R) نزدیک‌تر می‌گردند، اندکی از دقت کاسته می‌شود. این امر را می‌توان به صرفنظر از خازن موازی خط در فرآیند فرمولاسیون نسبت داد که منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج نگردیده است.

۵- نتیجه‌گیری

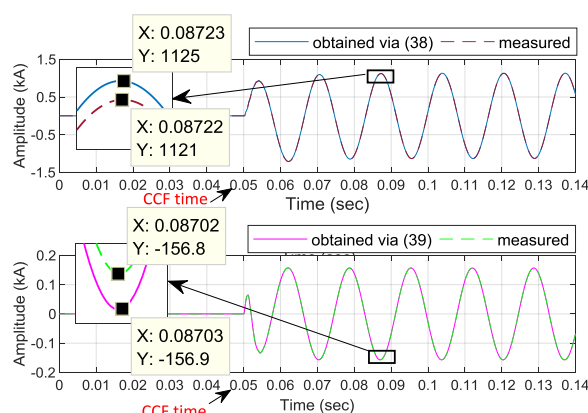
در این مقاله با تحلیل مدل مداری مبتنی بر حوزه زمان خطوط انتقال دو مداره نامتقارن، روابط معتبر و صریح حاکم بر جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا برحسب جریان‌های لحظه‌ای شش فاز خط در انتهای نزدیک و فواصل خطای سنجیده شده از همین انتها استخراج گردید. نتایج شبیه‌سازی که با هدف اعتبارسنجی روابط بدست آمده انجام شده است نشان می‌دهد با در نظر گرفتن جریان‌های شاخه خطای اندازه‌گیری شده بر روی خط انتقال با مدل J. Marti طی خطاهای CCF مفروض به عنوان مرجع، انطباق بسیار دقیقی بین شکل موج-های بدست آمده از روابط پیشنهادی و مرجع وجود دارد. صرفنظر از موقعیت مکانی و مقاومت‌های زمین خطاهای تکفاز تشکیل دهنده CCF، مشاهده می‌شود که روابط پیشنهادی با دقتی بالاتر از ۹۹٫۶٪ (خطای کوچکتر از ۰٫۴٪) قادر هستند جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطا را استخراج کنند. همچنین لازم به توجه است که جریان‌های بدست آمده به اندازه یک نمونه زمانی نسبت به زمان واقعی تأخیر خواهند داشت. در اختیار داشتن چنین روابطی، کمکی شایان توجه به متخصصین و محققان در تحلیل خطاهای CCF و همچنین توسعه موضوعات تحقیقاتی در حوزه حفاظت خطوط انتقال خواهد کرد.

مراجع

- [1] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. Overbye and A. Birchfield, "Power systems analysis and design", 7th ed., Cengage Learning, Jan. 2022.
- [2] J. S. Wijekoon, M. N. Haleem, A. D. Rajapakse, Transient based faulted conductor selection method for double circuit lines, Electr. Power Syst. Research, vol.196 pp.1-8, Jul. 2021.
- [3] A. H. Azimi and A. A. Abdoos, "A new intelligent method for parallel transmission lines protection",



شکل (۷): جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطای سناریوی خطای ۲:

 $i_{1F}(t)$ (شکل فوقانی) و $i_{6F}(t)$ (شکل تحتانی)

شکل (۸): جریان‌های لحظه‌ای شاخه خطای سناریوی خطای ۳:

 $i_{1F}(t)$ (شکل فوقانی) و $i_{6F}(t)$ (شکل تحتانی)

PSCAD/EMTDC مدلی معتبر از خط انتقال را در حوزه زمان به خدمت می‌گیرد که در آن اثر پارامترهای توزیع شده خط لحاظ گردیده است [۲۳].

با اشاره به شکل‌های (۶) تا (۸)، از انطباق بسیار نزدیک بین جریان‌های بدست آمده (محاسبه شده) و اندازه‌گیری شده (مرجع) می‌توان استنباط نمود که فرمولاسیون پیشنهادی جریان‌های شاخه خطای خطای CCF از دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. این دقت را می‌توان از منظر انحراف بین دامنه و زاویه شکل موج جریان‌های محاسبه شده و مرجع بررسی نمود. در مورد زاویه فاز، شکل موج‌ها با یک تأخیر قابل چشم‌پوشی در قیاس با مرجع، معادل با یک بازه نمونه برداری (۱۰ میکرو ثانیه)، بدست می‌آیند که ناشی از لزوم مشتق‌گیری از جریان‌های خط و در اختیار داشتن دو نمونه متوالی از آنها طبق رابطه (۴۰) می‌باشد. در مورد دامنه، با استفاده از مقادیر مشخص شده در بخش بزرگ نمای شده شکل‌های (۶) تا (۸)، خطای نسبی دامنه جریان‌های محاسبه شده نسبت به جریان‌های مرجع بدست آورده شده و نتایج در شکل (۹) نشان داده شده است. از نتایج ملاحظه می‌گردد که جریان‌های شاخه خطا با دقت نسبی بزرگتر از ۹۹٫۶٪ در مقایسه با جریان‌های مرجع توسط فرمولاسیون پیشنهادی

- [19] V. Ashok, A. Yadav, M. Pazoki, and A. Y. Abdelaziz, "Fault location scheme for cross-country faults in dual-Circuit line using optimized regression t", *Electr. Power Comp. and Syst.*, vol. 14, no. 14-15 pp. 1632-1648, Jan 2021.
- [20] M. H. Khazaei and F. A. Haghjoo "Comprehensive PMU-Based Fault Location Algorithm for Double Circuit and Multi-Terminal Transmission Lines", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol.14, no. 1, pp. 1-10, 2017.
- [21] R. Dashti and M. Ghasemi. "Fault Location in Power Distribution Network with Presence of Distributed Generation Resources Using Impedance Based Method and Applying π Line Model", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 14, no. 3, pp. 79-90, 2017.
- [22] K. R. Pillay and B. S. Rigby, "Studying the impact of mutual coupling on distance protection relays using a real-time simulator", *IEEE Africon '11, Zambia*, pp. 1-6, Sep. 2011.
- [23] PSCAD v.4.2.0, Copy Right (C) 2005, Manitoba Research Center.
- Technol Econ Smart Grids Sustain Energy, vol. 5, no. 14, pp. 1-14, Aug. 2020.
- [۴] آمار تفصیلی صنعت برق ایران، وزارت نیرو، ۱۳۹۹.
- [5] K. Nishant, B. R. Bhalja, Bhavesh, V. Pandya, P. Tripathi, and S. Jena, "A phasor-distance based faulty phase detection and fault classification technique for parallel transmission lines", *Int. J. of Emerg Elect. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1-16, Aug. 2020.
- [6] M. H. H. Musa, A. Y. M. Abbas and A. S. I. A. Ahmed, "Cross-country, evolving, and inter-circuit relaying scheme for double-circuit transmission line", *International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, May 2021.
- [7] H. A. Abd el-Ghany, A. M. Azmy and A. M. Abeid, "A general travelling-wave-based scheme for locating simultaneous faults in transmission lines", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 35, no. 1, pp. 130-139, Feb. 2020.
- [8] V. Ashok and A. Yadav, "A protection scheme for cross-country faults and transforming faults in dual-circuit transmission line using real-time digital simulator: a case study of chhattisgarh state transmission utility", *Iran J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng.* vol. 43, pp. 941-967, May 2019.
- [9] V. Ashok and A. Yadav, "Fault diagnosis scheme for cross-country faults in dual-circuit line with emphasis on high-impedance fault syndrome", *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 2087-2097, Jun. 2021.
- [10] S. Asghari Govar and H. Seyedi, "Adaptive CWT-based transmission line differential protection scheme considering cross-country faults and CT saturation", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 9, pp. 2035 - 2041, Jun. 2016.
- [11] T. R. Althi, E. Koley, S. Ghosh, "A random forest based communication-less approach for protection scheme of six-phase transmission line against shunt, series, evolving and cross-country faults", *Electr. Eng.*, Jul. 2023.
- [12] B. Chatterjee and S. Debnath, "A new protection scheme for transmission lines utilizing positive sequence fault components", *Electr. Power Syst. Research*, vol.190, pp. 1-15, Jan. 2021.
- [13] V. Ashok, A. Yadav and A. Y. Abdelaziz, "MODWT-based fault detection and classification scheme for cross-country and evolving faults", *Electr. Power Syst. Research*, vol. 175, pp. 1-20, Oct. 2019.
- [14] A. N. kumar, M. S. Kumar, M. Ramesha, B. Gururaj4, and A. Srikanth "Support vector machine based fault section identification and fault classification scheme in six phase transmission line", *IAES Int. J. of Art. Intel.* vol. 10, no. 4, pp. 1019-1024, Dec. 2021.
- [15] N. Kumar, A. Sanjay, Ch. and Chakravarthy, "Fuzzy inference system-based solution to locate the cross-country faults in parallel transmission line", *Int. J. of Elect. Eng. & Edu.*, vol. 58, no. 1, pp. 83-96, Feb. 2019.
- [16] A. Saber, "New fault location algorithm for four-circuit overhead lines using unsynchronized current measurements", *Int. J. of Elect. Power & Ener. Syst.*, vol. 120, no. 1, pp. 1-6, Sep. 2020.
- [17] H. Mehrjerdi, and Amir Ghorbani, "High-speed auxiliary fault location element for distance relays in double-circuit lines", *Elect. Power Syst. Research*, vol. 200, pp. 1-11, Nov. 202۲.
- [18] R. Kumar, M. Tripathy, "A novel impedance based fault locator algorithm for transmission line", *Elect. Power Syst. Research*, vol. 224, pp. 1-9, Nov. 2023.

