

جبران سازی حفاظت دیستانس زمین خطوط انتقال دو مداره در برابر فرو-رسی / فرا-رسی ناشی از خطاهای مقاومت بالا / خطاها در مدار نامرتب

حسن دعاگوی مجرد^۱ حامد عبدالله زاده^۲

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

Hasan_doagou@yahoo.com

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

H.abdollahzadeh@gmail.com

چکیده: المان اندازه‌گیر امپدانس زمین رله‌های دیستانس خطوط دو مداره در مواجهه با خطاهای تکفاز به زمین با مقاومت بالا و همچنین خطاها در مدار نامرتب (مدار دیگر خط) دچار عملکرد نادرست می‌شود. در خصوص مورد نخست رله دچار فرو-رسی (عدم تشخیص خطا) و در خصوص مورد دوم دچار فرا-رسی (تشخیص نابجای خطا) می‌گردد. در این مقاله با تخمین آنالین و توآمان فاصله و مقاومت خطا از طریق طراحی و توسعه یک شبکه عصبی مصنوعی خطی تطبیق پذیر تک لایه، یک المان زمین برای رله گذاری دیستانس زمین خطوط انتقال دو مداره پیشنهاد می‌گردد که در برابر خطاهای مقاومت بالا مقاوم بوده و با اعمال یک ساز و کار منطقی بین مقادیر تخمین زده شده فاصله و مقاومت خطا، فرا-رسی آن در برابر خطاهای مدار نامرتب جبران می‌گردد. روش پیشنهادی به لحاظ سادگی در ساختار و اصول عملکردی، از نظر پیاده سازی عملی کاملاً توجیه پذیر بوده و به لحاظ استفاده از داده های اندازه گیری در یک انتهای خط نیازمند به کانال ارتباطی بین دو انتهای خط نبوده و در نتیجه از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار می‌باشد. عملکرد روش پیشنهادی از طریق مطالعات شبیه سازی در نرم افزار PSCAD/EMTDC مورد ارزیابی قرار گرفته و از نتایج مشخص می‌گردد که خطاهای فاز به زمین مستقل از مقدار مقاومت آن با سرعت و دقت بالا توسط این روش تشخیص داده شده، بدون آنکه در مورد خطاهای مدار نامرتب دچار فرا-رسی گردد.

واژه‌های کلیدی: خطوط انتقال دو مداره، رله‌گذاری دیستانس، المان زمین، مقاومت خطای بالا، خطاهای مدار نامرتب، شبکه عصبی مصنوعی، تخمین آنالین فاصله و مقاومت خطا

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.155

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول: حسن دعاگوی مجرد

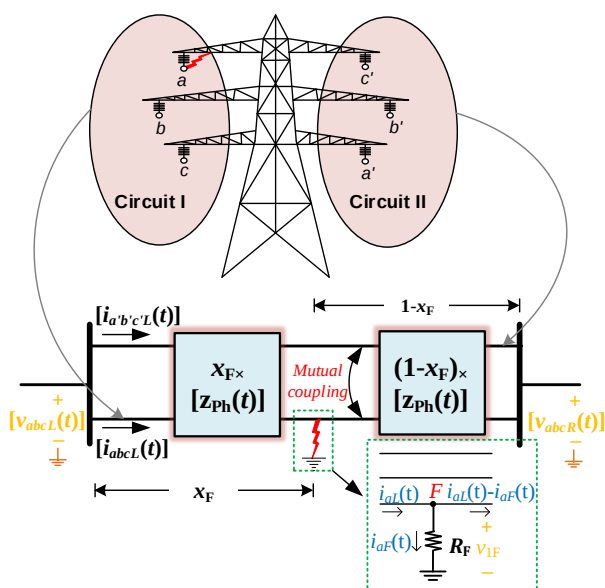
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - سه راه افسریه - بزرگراه امام رضا (ع) - کیلومتر ۱۸ - شهر قیامدشت - انتهای خیابان شهید باهنر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

۱- مقدمه

حفاظت دیستانس با توجه به ویژگی‌های آن، از مهمترین و پرکاربردترین گزینه‌های موجود به منظور حفاظت خطوط انتقال هوایی در برابر خطاهای اتصال کوتاه به شمار می‌رود [۱, ۲]. رله‌های دیستانس طرح کامل (غیر سوئیچ شونده) شامل المان‌های اندازه‌گیر امپدانس زمین و فاز برای فراهم آوردن پوشش حفاظتی کامل در برابر انواع مختلف خطا می‌باشند [۳]. خطوط انتقال دو مداره 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 [۴, ۵].

رله‌گذاری دیستانس خطوط انتقال دو مداره به دلیل حضور مدارات موازی و در نتیجه شکل‌گیری مسیر جریان بین آنها طی یک اتصال کوتاه و همچنین القای متقابل بین فازها در مدارات امری پیچیده و چالش برانگیز می‌باشد [۶]. المان اندازه‌گیر امپدانس زمین در رله‌های دیستانس که وظیفه پوشش خطاهای فاز به زمین را بر عهده دارد، به طور کلی با دو چالش مهم مواجه می‌باشد که می‌تواند منجر به از دست رفتن ویژگی‌های قابلیت اتکا (Dependability) و امنیت (Security) رله گردد. چالش نخست، خطاهای مقاومت بالا [۷] بوده که طی آنها امپدانس دیده شده رله به شرایط بهره‌برداری خط (سیستم) وابسته شده و حتی با اصلاح مشخصه تریپ رله (مانند آنچه در رله‌های تجاری صورت می‌گیرد [۸]) احتمال عدم تشخیص خطا توسط رله و در نتیجه فرو-رسی آن بسیار محتمل می‌باشد. چالش دوم که به خطوط دو مداره اختصاص دارد، وقوع خطا در مدار نا مرتبط (مدار دیگر) می‌باشد [۸] که بسته به موقعیت و مقاومت آن، با قرار-گیری منحنی امپدانس دیده شده (امپدانس خطا) در مشخصه تریپ رله در مدار مرتبط، منجر به عملکرد ناپسند آن (فرا-رسی) شده و قطع هر دو مدار خط را به همراه دارد.

در مورد چالش نخست (مقاومت خطای بالا)، راهکار سنتی استفاده از مشخصه‌های تریپ چهار وجهی (چند وجهی) گسترش یافته در جهت محور مقاومتی در صفحه مختلط $X-R$ می‌باشد [۹] که ضمن بهبود مساله منجر به حذف آن نمی‌گردد چرا که مشخصه رله به طور ذاتی وابسته به شرایط بهره‌برداری خط خواهد بود [۷]. در این راستا، [۱۰] روشی متمایز برای محاسبه امپدانس خطا برای حفاظت دیستانس خط در برابر مقاومت خطا ارائه می‌دهد که در آن از رابطه میان امپدانس خطای گردان و امپدانس اندازه‌گیری شده گردان در صفحه مختلط بهره می‌گیرد. در [۱۱]، روشی برای جبران فرو-رسی رله‌های دیستانس ناشی از مقاومت خطای بالا از طریق اصلاح سیگنال‌های ولتاژ و جریان ورودی به المان زمین آن پیشنهاد شده است. در [۱۲]، یک روش مبتنی بر یادگیری ماشین برای ابداع المان‌های اندازه‌گیر امپدانس در حفاظت دیستانس ناحیه اول پیشنهاد می‌دهد که برای این منظور از ولتاژها و جریان‌های افزایشی در محل رله استفاده کرده



شکل (۱): خط انتقال مورد مطالعه و مدل مداری آن طی یک خطای تکفاز به زمین (a-g)

و در برابر مقاومت‌های خطای بالا ایمن می‌باشد. در [۱۳] از شبکه‌های عصبی جهت ارائه یک طرح حفاظت دیستانس برای خطوط انتقال فشار قوی استفاده شده است که مصون از اثرات خطاهای مقاومت بالا عمل می‌کند. روش ارائه شده در [۱۴] از داده‌های گذرای استخراج شده از سیگنال‌های ولتاژ و جریان محل رله برای تحقق یک حفاظت دیستانس مبتنی بر کمیت‌های افزایشی بهره می‌گیرد که در طراحی آن، خطاهای مقاومت بالا لحاظ شده است. با استفاده از معادلات افت ولتاژ خط و تنظیم تطبیقی تنظیمات حفاظتی رله از طریق آن، [۱۵] یک حفاظت دیستانس تطبیقی با عملکرد صحیح در برابر مقاومت خطای بالا پیشنهاد کرده است. در [۱۶]، یک حفاظت دیستانس تطبیقی مبتنی بر شبکه‌های پایه شعاعی برای رفع چالش تغذیه دور خط ناشی از مقاومت خطای بالا ارائه شده است. همچنین در [۱۷]، با به خدمت گرفتن شبکه‌های عصبی Levenberg-Marquardt یک طرح حفاظت دیستانس تطبیقی برای مقابله با مقاومت‌های خطای بالای متغیر پیشنهاد می‌دهد. همچنین یک طرح حفاظت دیستانس بهبود یافته برای مقابله با القای متقابل بین مدارهای خط دو مداره و خطاهای مقاومت بالا در [۱۸] پیشنهاد شده است که با یک ساز و کار هوشمند آنلاین مبتنی بر سیستم واسط عصبی-فازی نقاط تنظیم رله تعیین می‌گردد. در [۱۹] از یادگیری ماشین برای توسعه یک حفاظت تطبیقی برای مقابله با خطاهای مقاومت بالا استفاده شده است که از طریق تولید مشخصه‌های تریپ ایده‌آل و بکارگیری آنها در شرایط بهره‌برداری سیستم محقق شده است.

در مورد چالش دوم (خطا در مدار نامرتبط)، راهکار سنتی، البته نه چندان کارآمد، تعیین نقطه رسایش رله به ازای بدترین شرایط فرا-رسی می‌باشد [۲۰] که در نتیجه آن، ناحیه اول حفاظتی رله کوچکتر شده (پوشش درصد کمتری از طول خط) و همین مساله فرا-رسی ناشی از چالش اول را وخیم تر می‌سازد. اگر چه در تحقیقات پیشین به

$$[Z_{ph}(t)]_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{aa'} & Z_{ab'} & Z_{ac'} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{ba'} & Z_{bb'} & Z_{bc'} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{ca'} & Z_{cb'} & Z_{cc'} \\ Z_{a'a} & Z_{a'b} & Z_{a'c} & Z_{a'a'} & Z_{a'b'} & Z_{a'c'} \\ Z_{b'a} & Z_{b'b} & Z_{b'c} & Z_{b'a'} & Z_{b'b'} & Z_{b'c'} \\ Z_{c'a} & Z_{c'b} & Z_{c'c} & Z_{c'a'} & Z_{c'b'} & Z_{c'c'} \end{pmatrix}_{6 \times 6} \quad (1)$$

درایه‌های ماتریس فوق به ازای سطر i ام و ستون j ام به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$z_{ij} = r_{ij} + l_{ij} \times d/dt \quad (2)$$

که در آن r_{ij} و l_{ij} به ترتیب مقاومت‌ها و اندوکتانس‌ها در ماتریس ثابت‌های خط [۲۱] بوده و d/dt اپراتور مشتق گیر زمانی می‌باشد. با فرض یک خطای تکفاز به زمین L-G (شکل (۱)) در فاز a در مدار اول خط در فاصله x_F از انتهای فرستنده (شینه L) و با مقاومت خطای R_F ولتاژ محل خطا (نقطه F) را می‌توان از طریق اعمال قانون KVL، بین شینه L و نقطه خطا (F) بر حسب ولتاژ و جریان‌های لحظه‌ای اندازه‌گیری شده در انتهای فرستنده به صورت زیر بیان نمود.

$$v_{aF}(t) = v_{aL}(t) - x_F \times [Z_{aj}]_{1 \times 6} \times \begin{pmatrix} [i_{abcL}(t)] \\ [i_{a'b'c'L}(t)] \end{pmatrix}_{6 \times 1} \quad (3)$$

که در آن $v_{aL}(t)$ ولتاژ لحظه‌ای فاز خطا در اندازه‌گیری شده در شینه L و $[Z_{aj}]$ به ازای $j=a, b, c, a', b', c'$ مشخص کننده سطر اول (۱) متناظر با فاز خطا در می‌باشد. همچنین:

$$[i_{abcL}(t)] = [i_{aL}(t) \quad i_{bL}(t) \quad i_{cL}(t)]^T \quad (4)$$

و

$$[i_{a'b'c'L}(t)] = [i_{a'L}(t) \quad i_{b'L}(t) \quad i_{c'L}(t)]^T \quad (5)$$

بردار جریان‌های لحظه‌ای فازها در مدارهای خط بوده که در شینه L اندازه‌گیری شده است. با اعمال ضرب ماتریسی، (۳) را می‌توان به صورت (۶) بازنویسی نمود.

$$v_{aF}(t) = v_{aL}(t) - x_F \times \sum_{j=a}^{c'} (Z_{aj} \times i_{jL}(t)) \quad (6)$$

نظر به اینکه مدارهای خط در هر دو انتها به شینه‌های مشترک ختم می‌شوند، ولتاژ فاز خطا در انتهای دور یا به عبارتی شینه R ($v_{aR}(t)$) را می‌توان از طریق فاز موازی سالم متناظر (فاز a') با اعمال قانون KVL بین شینه‌های L و R به صورت زیر بدست آورد.

$$v_{aR}(t) = v_{aL}(t) - x_F \times [Z_{a'j}]_{1 \times 6} \times \begin{pmatrix} [i_{abcL}(t)] \\ [i_{a'b'c'L}(t)] \end{pmatrix}_{6 \times 1} - (1 - x_F) \times [Z_{a'j}]_{1 \times 6} \times \begin{pmatrix} [i_{abcR}(t)] \\ [i_{a'b'c'R}(t)] \end{pmatrix}_{6 \times 1} \quad (7)$$

که در آن $[Z_{a'j}]$ مشخص کننده سطر چهارم در (۱) متناظر با فاز سالم موازی بوده و همچنین خواهیم داشت:

$$[i_{abcR}(t)] = [(i_{aL}(t) - i_{aF}(t)) \quad i_{bL}(t) \quad i_{cL}(t)]^T \quad (8)$$

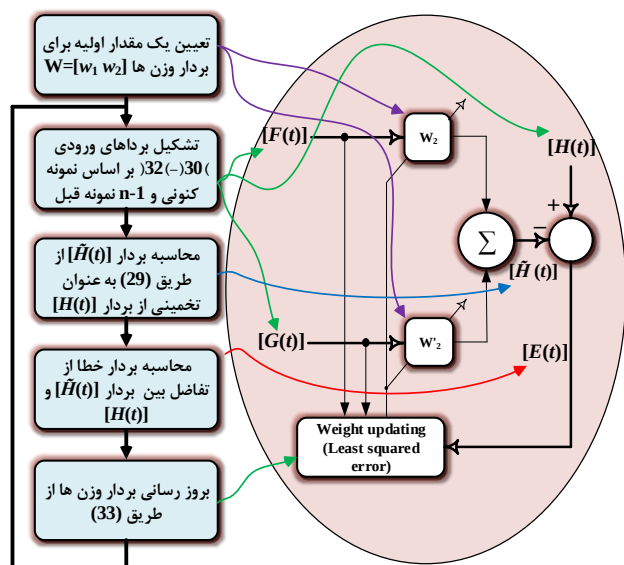
خوبی به ارائه راه حل هایی در مورد چالش اول پرداخته شده است، اما در مورد چالش دوم راهکاری به چشم نخورده و روش های پیشنهادی در چالش اول که در بالا مورد بررسی قرار گرفت اساساً قابلیت توسعه برای مرتفع ساختن چالش دوم مورد را ندارند.

در این مقاله با تخمین آنالین و توأمان فاصله و مقاومت خطا از طریق طراحی و توسعه یک شبکه عصبی مصنوعی خطی تطبیق پذیر تک لایه، یک المان زمین برای رله‌گذاری دیستانس زمین خطوط انتقال دو مداره پیشنهاد می‌گردد که اولاً در برابر خطاهای مقاومت بالا مقاوم بوده و ثانیاً با اعمال یک ساز و کار منطقی بین مقادیر تخمین زده شده فاصله و مقاومت خطا، فرا-رسی آن در برابر خطاهای مدار نامرتبط جریان می‌گردد. جنبه‌های نوآوری روش پیشنهادی در این مقاله را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- بر خلاف [19]-[10]، امکان بر طرف نمودن همزمان دو چالش مذکور در مورد رله‌های دیستانس فراهم می‌گردد.
- فرایند آموزش شبکه عصبی پیشنهادی به صورت آنالین در حین خطا صورت گرفته و بر خلاف [۱۳]، [۱۶]، [۱۷] و [۱۹]، نیاز به آموزش آفلاین آن با داده‌های حجیم آموزشی مرتفع می‌گردد.
- امکان جابجایی خطا به همراه رله‌گذاری دیستانس بدون نیاز به پردازش داده‌های خطا پس از رفع خطا.
- امکان فراهم آوردن پوشش حفاظتی برای کل طول خط در ناحیه اول حفاظتی.
- استفاده از داده‌های اندازه‌گیری یک انتهای خط و در نتیجه قابلیت اطمینان بالاتر در غیاب کانال ارتباطی.
- به لحاظ سادگی ساختاری و اصول عملکردی، المان زمین پیشنهادی دارای قابلیت پیاده سازی عملی می‌باشد.

۲- استخراج روابط مورد نیاز

شکل (۱) خط انتقال دومداره مورد مطالعه به همراه مدل مداری در نظر گرفته شده برای آن در حوزه زمان را به منظور توسعه روابط مورد نیاز نشان می‌دهد. خط انتقال دو مداره مورد مطالعه در یک حالت کلی در برگیرنده مدارات با هادی‌های بدون اعمال جایگشت در هر دو مدار در نظر گرفته شده و القای متقابل، همانند آنچه در عمل وجود دارد، 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. اگر چه ماتریس امپدانس فاز خطوط انتقال اساساً در حوزه فازور تعریف می‌گردد، اما می‌توان یک معادل حوزه زمانی به صورت زیر برای خط مورد مطالعه تعریف نمود.



شکل (۲): شبکه عصبی پیشنهادی جهت تخمین پارامترهای خطا

که در آن ρ_j و λ_j به ازای $j=a, b, c, a', b', c'$ به صورت زیر نتیجه می شود.

$$\rho_j = K \times ((r_{aj} - r_{a'j})r_{\Delta} + \omega_0^2 (l_{aj} - l_{a'j})l_{\Delta}) \quad (19)$$

$$\lambda_j = K \times ((l_{aj} - l_{a'j})r_{\Delta} - (r_{aj} - r_{a'j})l_{\Delta}) \quad (20)$$

که در آن ها داریم:

$$K = 1 / ((r_{\Delta})^2 + (\omega_0 l_{\Delta})^2) \quad (21)$$

با در اختیار داشتن (۱۹) و (۲۰)، رابطه نهایی جریان خطا در (۱۲) بر حسب جملات شامل d/dt و فاقد آن به صورت زیر حاصل می شوند.

$$i_{aF}(t) = (1/(1-x_F)) \times \sum_{j=a}^{c'} (\Gamma_j \times i_{jL}(t)) = (1/(1-x_F)) \times \sum_{j=a}^{c'} (\rho_j \times i_{jL}(t) + \lambda_j \times d/dt i_{jL}(t)) \quad (22)$$

با اشاره به شکل (۱)، رابطه زیر در مسیر خطا بین شینه L و اتصال زمین در انتهای مقاومت R_F برقرار می باشد.

$$v_{aL}(t) = x_F \times [z_{aj}]_{1 \times 6} \times \begin{pmatrix} [i_{abcl}(t)] \\ [i_{a'b'c'L}(t)] \end{pmatrix}_{6 \times 1} + R_F \times i_{aF}(t) \quad (23)$$

$$= x_F \times \sum_{j=a}^{c'} (z_{aj} \times i_{jL}(t)) + R_F \times i_{aF}(t)$$

با جایگزاری (۲۲) در (۲۳)، رابطه زیر بر حسب پارامترهای خطا شامل فاصله (x_F) و مقاومت خطا (R_F) نتیجه می شود.

$$x_F \times f(t) + (R_F / (1 - x_F)) \times g(t) = h(t) \quad (24)$$

که در آن f, g و h توابع زمانی متشکل از کمیت های اندازه گیری شده در شینه L بوده که از روابط زیر حاصل می شوند.

$$f(t) = \sum_{j=a}^{c'} (z_{aj} \times i_{jL}(t)) \quad (25)$$

$$g(t) = \sum_{j=a}^{c'} (\Gamma_j \times i_{jL}(t)) \quad (26)$$

$$h(t) = v_{aL}(t) \quad (27)$$

که در آن $i_{aF}(t)$ جریان لحظه ای خطا می باشد. رابطه (۷) را می توان به طور مشابه با (۶) به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$v_{aR}(t) = v_{aL}(t) + (1 - x_F) \times (z_{a'a} \times i_{aF}(t)) - \left(\sum_{j=a}^{c'} (z_{aj} \times i_{jL}(t)) \right) \quad (9)$$

در فاز خطادار، رابطه زیر بین شینه R و نقطه خطا برقرار است.

$$v_{aF}(t) - v_{aR}(t) = (1 - x_F) \times [z_{aj}]_{1 \times 6} \times \begin{pmatrix} [i_{abcl}(t)] \\ [i_{a'b'c'L}(t)] \end{pmatrix}_{6 \times 1} \quad (10)$$

$$= (1 - x_F) \times \left(- (z_{aa} \times i_{aF}(t)) + \sum_{j=a}^{c'} (z_{aj} \times i_{jL}(t)) \right)$$

با جایگزاری (۶) و (۹) در (۱۰)، رابطه زیر بر حسب جریان خطای $i_{aF}(t)$ نتیجه می شود.

$$(z_{aa} - z_{a'a}) i_{aF}(t) = (1/(1 - x_F)) \times \left(\sum_{j=a}^{c'} ((z_{aj} - z_{a'j}) \times i_{jL}(t)) \right) \quad (11)$$

از رابطه فوق، جریان خطای $i_{aF}(t)$ به صورت زیر قابل استخراج می باشد.

$$i_{aF}(t) = (1/(1 - x_F)) \times \left(\sum_{j=a}^{c'} (\Gamma_j \times i_{jL}(t)) \right) \quad (12)$$

که در آن Γ_j به ازای شماره فاز های $j=a, b, c, a', b', c'$ به صورت زیر تعریف می گردد.

$$\Gamma_j = z_{\Delta j} / z_{\Delta} \quad (13)$$

که در آن خواهیم داشت.

$$z_{\Delta j} = (z_{aj} - z_{a'j}) \quad (14)$$

$$z_{\Delta} = (z_{aa} - z_{a'a}) \quad (15)$$

به منظور اینکه جریان های خطا در (۱۲) قابل محاسبه باشند، (۱۳) باید به جملات شامل اپراتور مشتق گیر d/dt و جملات فاقد اپراتور تجزیه شوند. از امپدانس زمانی تعریف شده در (۲) 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 ، z_{Δ} در مخرج کسر (۱۳) به صورت زیر نوشته می شود.

$$z_{\Delta} = r_{\Delta} + l_{\Delta} \times d/dt \quad (16)$$

$$r_{\Delta} = (r_{aa} - r_{a'a}) \text{ \& } l_{\Delta} = (l_{aa} - l_{a'a}) \times d/dt$$

به طریق مشابه، $z_{\Delta j}$ که در صورت کسر (۱۳) ظاهر شده اند به صورت زیر حاصل می گردند.

$$z_{\Delta j} = r_{\Delta j} + l_{\Delta j} \times d/dt \quad (17)$$

$$r_{\Delta j} = (r_{aj} - r_{a'j}) \text{ \& } l_{\Delta j} = (l_{aj} - l_{a'j}) \times d/dt$$

با ضرب صورت و مخرج (۱۳) در عبارت $z_{\Delta} = r_{\Delta} - l_{\Delta} \times d/dt$ ، پارامتر Γ_j در (۱۳) به صورت زیر بدست می آید.

$$\Gamma_j = \rho_j + \lambda_j \times d/dt \quad (18)$$

۳- توسعه شبکه عصبی پیشنهادی

نظر به اینکه هر دو پارامتر خطا شامل فاصله (x_F) و مقاومت خطا (R_F) طی یک خطای تکفاز به زمین ثابت باقی می ماند، در (۲۴) را می توان یک ترکیب خطی از $f(t)$ و $g(t)$ با ضرایب (وزن های) تغییر ناپذیر با زمان w_1 و w_2 به صورت (۲۸) در نظر گرفت.

$$x_F \times f(t) + \underbrace{(R_F / (1 - x_F))}_{w_2} \times g(t) = h(t) \quad (28)$$

در حوزه گسسته (ناپیوسته) زمانی، یک پنجره (بردار) داده از g ، f و h در (۲۵)–(۲۷) به طول n را می توان تشکیل داد که با نمونه برداری از آنها با دوره نمونه برداری Δt صورت می گیرد. بدین ترتیب، (۲۸) را می توان به شکل ماتریسی به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$w_1 \times [F(t)]_{n \times 1} + w_2 \times [G(t)]_{n \times 1} = [H(t)]_{n \times 1} \quad (29)$$

$$[F(t)]_{n \times 1} = [f(t) \quad f(t - \Delta t) \quad \dots \quad f(t - (n-1)\Delta t)]^T \quad (30)$$

$$[H(t)]_{n \times 1} = [h(t) \quad h(t - \Delta t) \quad \dots \quad h(t - (n-1)\Delta t)]^T \quad (31)$$

$$[G(t)]_{n \times 1} = [g(t) \quad g(t - \Delta t) \quad \dots \quad g(t - (n-1)\Delta t)]^T \quad (32)$$

که در آن n طول بردار داده ها می باشد. به طریق مشابه با (۲۸)، بردار $H(t)$ در (۲۹) نیز یک ترکیب خطی از بردارهای $F(t)$ و $G(t)$ با همان ضرایب (وزن های) w_1 و w_2 می باشد. چنین ترکیب خطی، این فرصت را فراهم می سازد که بر اساس (۲۹) یک شبکه عصبی طراحی نمود [۲۲] که طی یک فرآیند آموزشی آنلاین وزن های w_1 و w_2 به عنوان مجهولات تخمین زده شوند. طرح شبکه عصبی پیشنهادی که یک شبکه ساده تک لایه با دو پرسپترون می باشد، در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین الگوی آموزش آنلاین این شبکه در فلوچارت شکل (۲) تبیین شده است. با اشاره به شکل (۲)، در فرآیند آموزش بردارهای (۳۰)–(۳۲) که شامل داده های اندازه گیری بوده و در هر لحظه نمونه برداری به صورت پیش رونده به اندازه یک نمونه به روز می شوند به عنوان ورودی در نظر گرفته می شوند. در مرحله نخست (نمونه زمانی نخستین)، بردارهای (۳۰)–(۳۲) در یک مقدار از پیش تعیین شده برای بردار وزن ها طبق (۲۹) ضرب شده و در نتیجه آن بردار $\tilde{H}(t)$ به عنوان یک تخمین از بردار اندازه گیری شده $H(t)$ حاصل می شود. در مرحله بعد، از حاصل تفاضل این دو بردار، بردار خطای تخمین $E(t)$ بدست می آید. در گام بعدی، این بردار خطا به همراه بردارهای اندازه گیری $F(t)$ و $G(t)$ به منظور بروزرسانی بردار وزن های $[W]_{2 \times 1} = [w_1 \quad w_2]^T$ مورد استفاده قرار می گیرند. برای بروز رسانی وزن ها رابطه بازگشتی حداقل مربعات خطا [۲۳] به صورت زیر مورد استفاده قرار می گیرد.

$$[W(t)]_{2 \times 1} = [W(t - \Delta t)]_{2 \times 1} + \varepsilon \times [D(t)]_{2 \times n}^T \times [D(t)]_{n \times 2}^{-1} \times [D(t)]_{2 \times n} \times [E(t)]_{n \times 1} \quad (33)$$

که در آن

$$[D(t)]_{n \times 2} = [[G(t)] \quad [H(t)]] \quad (34)$$

و $0 < \varepsilon < 1$ ضریب آموزشی شبکه عصبی می باشد.

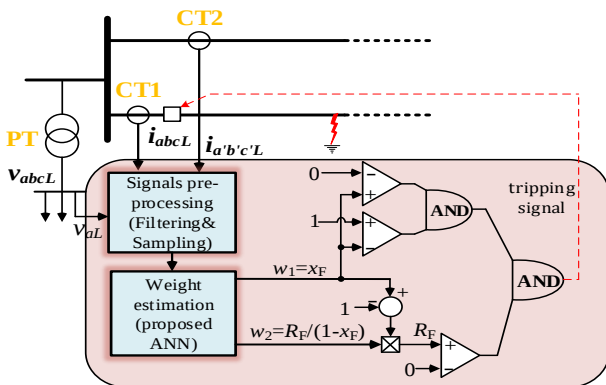
از طریق این شیوه بروزرسانی، بردار خطا طی فرآیند آموزش در دوره خطا حداقل شده و در نتیجه بردار وزن ها به مقدار مورد انتظار همگرا می شوند. بدین ترتیب، پارامترهای خطا شامل x_F و R_F از طریق وزن های تخمین زده شده توسط شبکه عصبی آموزش یافته به صورت زیر نتیجه می شود.

$$x_F = w_1 \quad (35)$$

$$R_F = w_2 \times (1 - w_1) \quad (36)$$

۴- المان دیستانس زمین پیشنهادی

شکل (۳) دیاگرام بلوکی اجزاء و ساز و کار المان دیستانس زمین پیشنهادی را نشان می دهد. در این المان ولتاژ فاز مورد حفاظت (فاز a) در محل رله (شینه L) و جریان های سه فاز هر دو مدار خط انتقال در این شینه توسط ترانس های ولتاژ و جریان اندازه گیری شده و پس از اعمال یک مرحله پردازش سیگنال (شامل فیلترینگ و نمونه برداری) برای تشکیل بردارهای (۳۰)–(۳۲) مورد استفاده قرار می گیرند. در مرحله بعد، شبکه عصبی پیشنهادی با دریافت بردارهای ورودی، تخمینی از وزن های w_1 و w_2 را در خروجی ارائه می دهد. وزن w_1 که طی خطای تکفاز به زمین همان فاصله خطا از محل رله x_F می باشد، به همراه وزن w_2 و از طریق رابطه (۳۶) با یک عملیات محاسباتی طبق شکل (۳) مقاومت خطای R_F را نتیجه می دهد. تشخیص خطا در مدار خطا دار توسط المان پیشنهادی طی دو مرحله صورت می گیرد.



شکل (۳): ساختار و ساز و کار عملکردی المان زمین پیشنهادی

همچنین طول بردارهای (۳۰)–(۳۲) برابر ۱۰۰ نمونه و ضریب آموزش ۰,۵ در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، تغییرات پارامترهای خطا، تغییرات در شرایط بار سیستم (خط)، تغییرات در زمان (زاویه) خطا و خطا در مدار نا مرتبط مواردی هستند که حساسیت المان پیشنهادی نسبت به آنها در ادامه سنجیده خواهد شد.

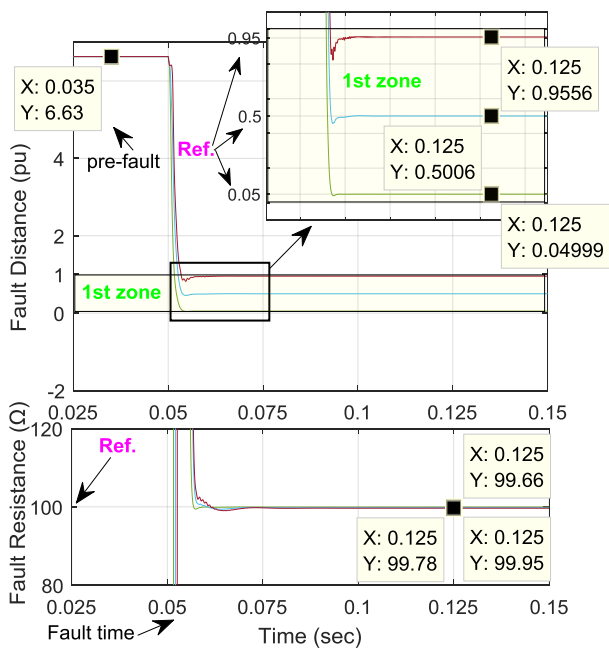
۵-۱- تغییرات در پارامترهای خطا

در این بخش، محل خطا در مقادیر ۰,۵، ۰,۰۵ و ۰,۹۵ پریونیت (از طول خط) از محل رله (باس C) لحاظ شده تا به ترتیب خطاهای نزدیک، میانی و خطاهای دور از رله مد نظر قرار گیرند. همچنین در هر موقعیت، مقاومت خطا برابر با ۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ اهم تعیین می‌گردد. بدین ترتیب، ۹ سناریوی خطا وجود خواهد داشت که به ازای آن حساسیت روش پیشنهادی به تغییرات در پارامترهای خطا ارزیابی می‌گردد. به عنوان نتیجه اولیه شبیه‌سازی و برای درک بهتر از وضعیت عملکرد شبکه عصبی پیشنهادی، سیگنال‌های ورودی (۳۰)–(۳۲) و خطای تخمین شبکه عصبی برای فاصله خطای 0.5 pu و مقاومت خطای 100 Ω در شکل (۵) نشان داده شده است. شبکه عصبی پیشنهادی با دریافت سیگنال‌های ورودی مطابق با شکل (۵)، فواصل و مقاومت‌های خطا را به صورت آنالین تخمین زده که نتایج آن بر حسب زمان برای سناریوهای خطای مفروض، در شکل‌های (۶)–(۸) نشان داده شده است. همانگونه که از نتایج ملاحظه می‌شود، پیش از وقوع خطا ($t < 0.05$ S)، فواصل خطا در مقادیری با فاصله زیاد از ناحیه حفاظت تخمین زده شده و پس از خطا مقادیر تخمینی در مدت زمان بسیار کوتاهی وارد ناحیه حفاظت می‌شوند. با سپری شدن گذرهای خطا، مقادیر تخمینی به مقادیر مرجع نزدیک شده و با حداقل شدن خطای تخمین شبکه عصبی (شکل (۵)) در زمانی در حدود نیم سیکل (10 ms) مقادیر مرجع را با دقت بالایی دنبال می‌کنند. هم زمان با تخمین فواصل خطا توسط شبکه عصبی، مقادیر دقیق تخمین از مقاومت‌های خطا نیز طبق نتایج شکل‌های (۶)–(۸) به صورت آنالین در دسترس می‌باشد. در صورتیکه زمان تشخیص (تریپ) خطا در این مقاله مدت زمانی از شروع خطا لحاظ گردد که پس از آن شروط مفروض در بخش ۴، به صورت دائم برقرار می‌گردد، نمودار شکل (۹) عملکرد المان پیشنهادی را در خصوص سناریوهای خطای فرض شده نشان می‌دهد. از نتایج شکل مشخص می‌گردد که المان‌های پیشنهادی قادر است خطاها را ظرف 1.7-3.6 میلی ثانیه از شروع خطا تشخیص داده و برطرف نماید. این زمان در مورد خطاهای نزدیک کمتر بوده و هر چه خطاها به انتهای دور نزدیک می‌شوند اندکی افزایش می‌یابد.

مرحله نخست، فاصله خطای تخمین زده شده با بکارگیری مقایسه کننده‌های عملیاتی (شکل (۳)) چک می‌شود که در محدوده اول حفاظتی ($x_F > 0$ و $x_F < 1$) قرار گرفته باشد. در این حالت فعال شدن سیگنال خروجی مقایسه کننده‌ها نشان دهنده وقوع یک خطا در یکی از مدارهای خط انتقال بوده، اما تشخیص مدار خطادار در این مرحله میسر نمی‌باشد. در مرحله بعد، طی یک فرآیند مقایسه‌ای دیگر، مقاومت خطای تخمین زده شده R_F تعیین علامت می‌شود (مثبت یا منفی). در صورتیکه علامت آن مثبت باشد، خطای رخ داده در مداره مورد حفاظت المان بوده و سیگنال‌های هر دو مرحله که به یک گیت AND ختم شده اند (شکل (۳))، خروجی این گیت را که به عنوان سیگنال تریپ لحاظ می‌گردد فعال کرده و فرمان قطع به کلید قدرت صادر می‌گردد. بدین ترتیب فرآیند مقایسه‌ای بر روی x_F رخداد خطا را در مدارات خط تشخیص داده و فرآیند دوم بر روی R_F مدار خطادار را مشخص می‌سازد. مبنای ساز و کار المان دیستانس زمین پیشنهادی بر اصل یکتایی جواب در تحلیل مدار استوار می‌باشد. بدین ترتیب که شبکه عصبی پیشنهادی که بر اساس روابط معتبر مداری بر روی مدل معتبر خط به ازای خطاها در یکی از مدارهای خط توسعه داده شده است، تنها در صورتی منجر به مقادیری صحیح از x_F و R_F خواهد شد که خطا در مدار مورد حفاظت باشد. منظور از مقادیر صحیح، قرار گیری مقادیر در محدوده منطقی مجاز آن‌ها می‌باشد، به طوریکه $0 < x_F < 1$ و $R_F > 0$. بنابراین تخمین پارامترها در خارج از محدوده‌های مجاز نشان از این واقعیت دارد که خطا در خارج از مدار مورد حفاظت و در مدار نامرتب می‌باشد. بدین ترتیب، x_F که در حضور مقاومت خطا و صرفنظر از مقدار آن تخمین زده شده بر چالش اول رله دیستانس (فرو-رسی در مقاومت های خطای بالا) فائق آمده و همچنین ایده استفاده از علامت R_F چالش دوم (فرا-رسی در برابر خطاهای مدار نامرتب) را مرتفع می‌سازد. بنابراین، انتظار می‌رود که با مکانیزم ساده (با قابلیت پیاده سازی عملیاتی) طراحی شده بتوان مشکلات حفاظت دیستانس سنتی را از طریق المان پیشنهادی جبران نمود که این مهم در نتایج بخش‌های بعد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

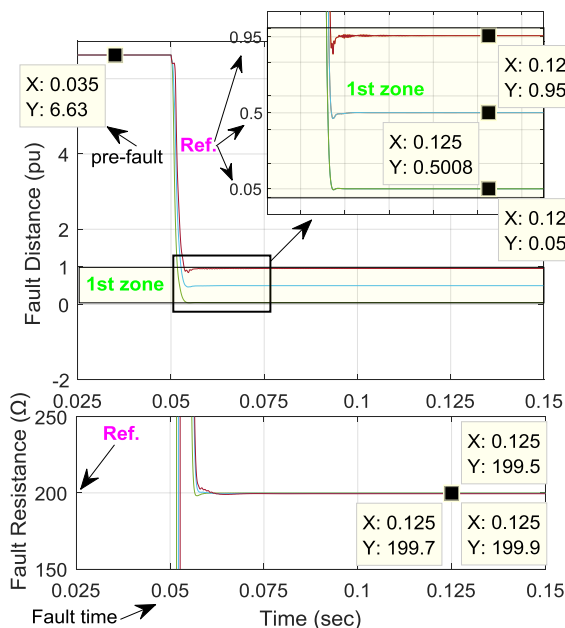
۵- ارزیابی عملکرد المان زمین پیشنهادی

شکل (۴) یک سیستم تست را نشان می‌دهد که در آن عملکرد المان زمین پیشنهادی از طریق مطالعات شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این سیستم با مشخصات آن در بخش ضمایم در نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. در این سیستم، خط مورد حفاظت، خط دو مداره ۱۰۰ کیلومتری بین شینه های C و D بوده که آرایش هندسی هادی های آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در هادی فاز a از مدار اول این خط خطای تکفازی در زمان $t = 0.05$ S اعمال می‌گردد. در مورد شبکه عصبی پیشنهادی، سیگنال های ورودی پس از یک مرحله فیلترینگ پایین‌گذر (با فرکانس مبدأ ۲۴۰ هرتز) در بازه زمانی ۱۰ میکروثانیه نمونه‌برداری می‌شوند.



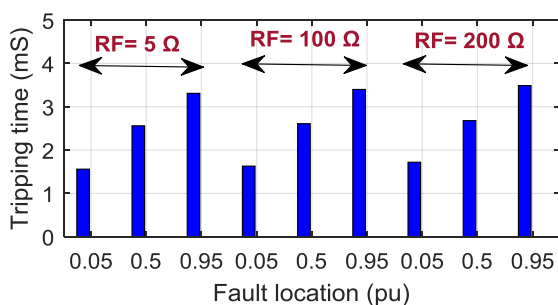
شکل (۷): تخمین فواصل و مقاومت خطا برای سه محل خطای مفروض

به ازای $R_F = 100 \Omega$



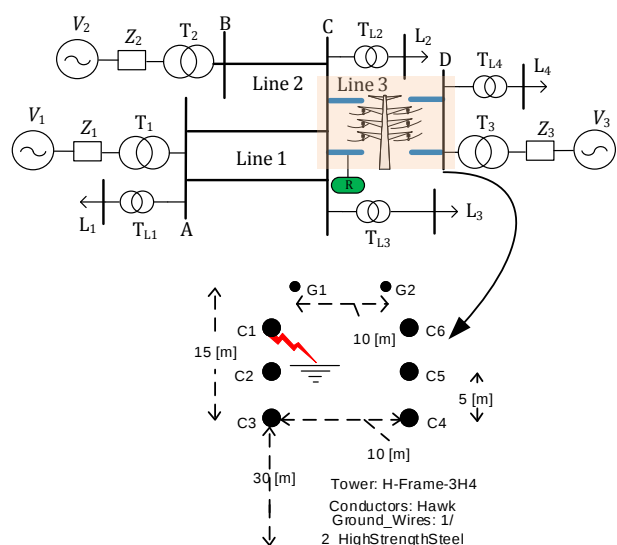
شکل (۸): تخمین فواصل و مقاومت خطا برای سه محل خطای مفروض

به ازای $R_F = 200 \Omega$

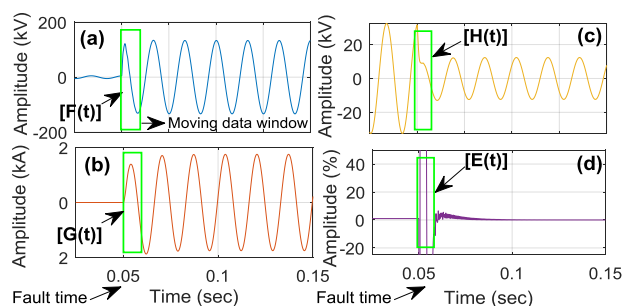


شکل (۹): زمان تشخیص (تریپ) خطا به ازای سناریوهای خطای

مفروض

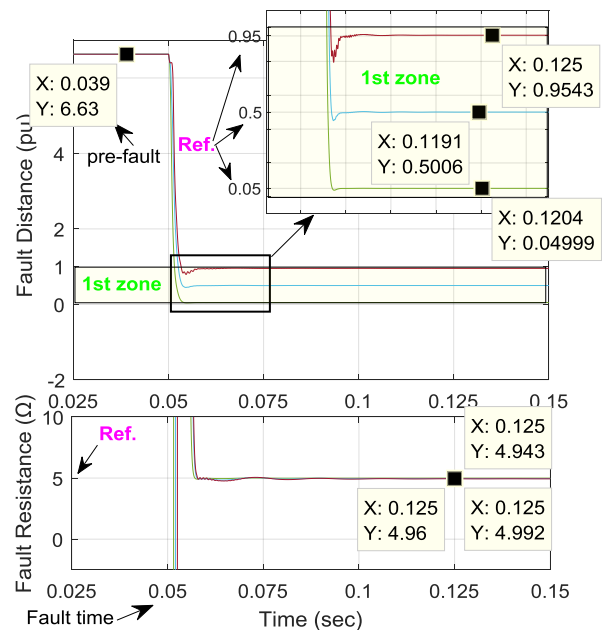


شکل (۴): سیستم تست نمونه برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی



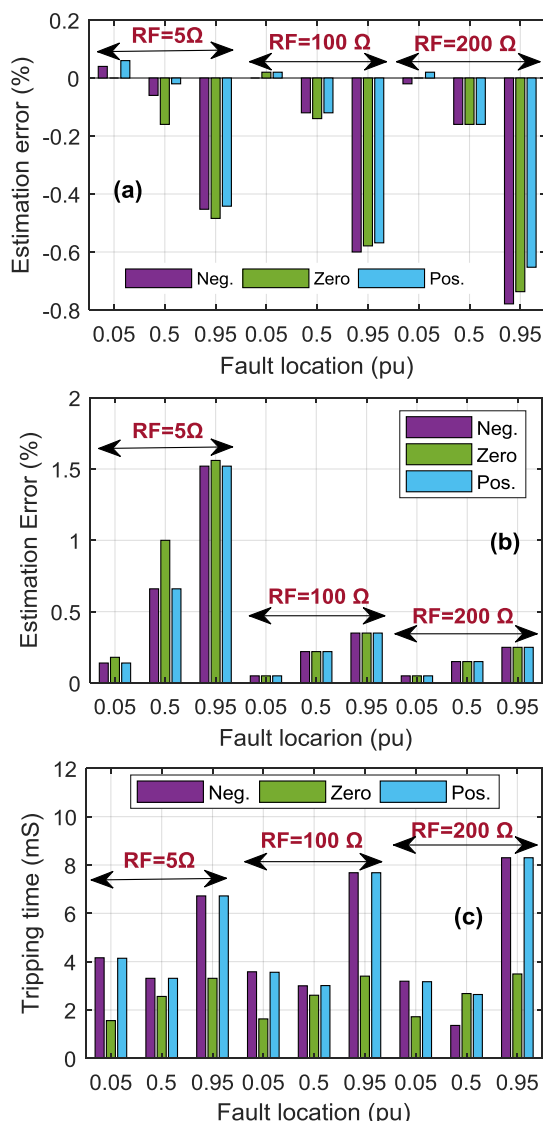
شکل (۵): سیگنال‌های ورودی به شبکه عصبی در (۳۰) - (۳۲) و

خطای تخمین آن برای خطای نمونه مفروض



شکل (۶): تخمین فواصل و مقاومت خطا برای سه محل خطای مفروض

به ازای $R_F = 50 \Omega$



شکل (۱۱): خطای تخمین فواصل خط (a)، مقاومت های خط (b) و زمان تشخیص خطها (c) به ازای تغییرات در زمان وقوع خط

نزدیک به مقدار با اهمیتی افزایش می یابد. دلیل این افزایش در مورد خطاهای نزدیک، خروج مقادیر تخمینی از حد پایین ناحیه حفاظت ($X_F < 0$) و در مورد خطاهای دور، خروج آن از حد بالای ناحیه حفاظت ($X_F > 1$) به دلیل تشدید گذراها می باشد. با وجود این افزایش، در هر حال باید توجه داشت که زمان تشخیص خط همچنان قابل قبول بوده و حداکثر به مقدار ۸٫۳ میلی ثانیه یا به عبارتی در حدود نیم سیکل می رسد.

۴-۵ - خطا در مدار نامرتب

در این بخش، با ایجاد خطاهای تک فاز در مدار دوم خط انتقال سیستم شکل (۳)، رفتار المان پیشنهادی که وظیفه حفاظتی مدار اول را برعهده دارد در برابر خطاهای مدار نامرتب مورد ارزیابی قرار می گیرد. در مورد این خطاها، پارامترهای خط همان ۹ سناریوی تعیین شده در

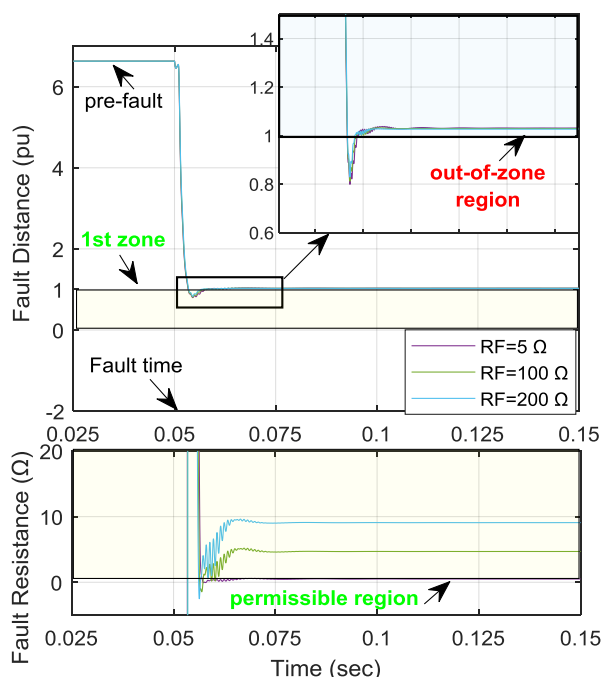
۵-۲ - تغییرات در شرایط بار سیستم (خط)

در این بخش، توان (اکتیو و راکتیو) بارهای L_1 - L_4 در سیستم شکل (۴)، یک بار از مقادیر پیش فرض (بار متوسط) در بخش ضمایم، به میزان ۱۰٪ افزایش (پر باری) و بار دیگر به میزان ۵۰٪ (کم باری) کاهش می یابد تا از این طریق حساسیت المان پیشنهادی نسبت به تغییرات بار سیستم (خط) ارزیابی شود. در این ارزیابی، پارامترهای خطا مقادیر مفروض در بخش قبل لحاظ گردیده و نتایج مربوطه شامل خطای تخمین فواصل و مقاومت های خطا و همچنین زمان تشخیص (تریپ) خطا در نمودارهای میله ای شکل (۱۰) در شرایط مفروض بار خط به صورت مقایسه ای نشان داده است. با اشاره به نتایج بدست آمده و از برابری ارتفاع میله ها در کم باری، بار متوسط و پر باری خط مشخص می گردد که تخمین فواصل و مقاومت های خطا در روش پیشنهادی حساسیتی به تغییرات بار خط ندارد. در این مورد شایان ذکر است که در مورد خطاهای دور (0.95 pu) فواصل خطا با دقت نسبی کمتری تخمین زده می شوند، اما در هر حال این خطا در حداکثر مقدار خود به کمتر از ۸٪ می رسد که قابل چشم پوشی می باشد. همچنین خطای تخمین مقاومت خطا (شکل (۱۰) b، در مقاومت های خطای پایین (5Ω) بیشتر بوده و در حداکثر مقدار به حدود ۱٫۷٪ می رسد. با اشاره به شکل (۱۰) c، زمان تشخیص خطا در روش پیشنهادی در شرایط بار متوسط و پر باری سیستم تقریباً یکسان بوده و حداکثر به ۳٫۶ میلی ثانیه می رسد. اما در وضعیت کم باری این زمان تریپ افزایش می یابد و حداکثر به حدود ۶٫۵ میلی ثانیه افزایش می یابد. این افزایش به دلیل منفی شدن موقت مقاومت خطای تخمین زده شده در لحظات اولیه شروع خطا می باشد و در نتیجه موجب طولانی تر شدن زمان برقراری شرط مربوط به مقاومت خطا در مکانیزم در نظر گرفته شده در المان پیشنهادی (شکل (۳) می گردد.

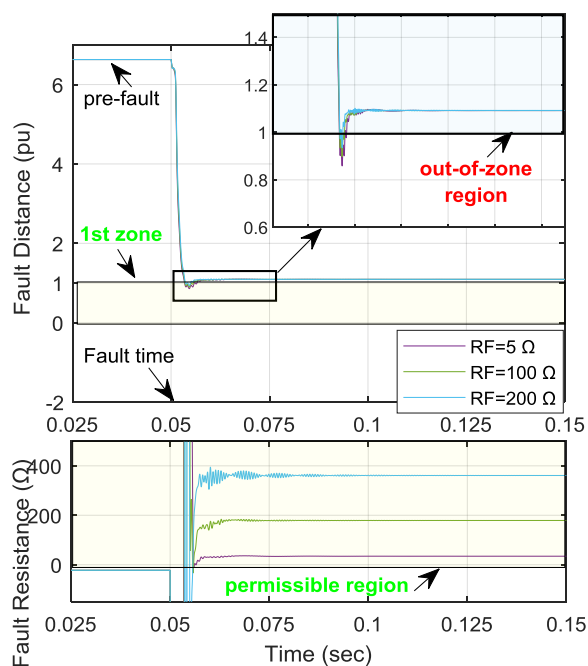
۵-۳ - تغییرات در لحظه شروع خطا

در این بخش، لحظه وقوع خطا که در مطالعات قبل برابر با $t = 0.05$ S و مقارن با زمان گذر ولتاژ فاز خطا دار از نقطه صفر در نظر گرفته شد، این بار مقارن با گذر ولتاژ از پیک مثبت ($t = 0.0542$ S) و پیک منفی ($t = 0.0625$ S) لحاظ می شود تا از این طریق نقش افزایش گذراها ناشی از خطا در عملکرد روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این بررسی شامل خطای تخمین فواصل و مقاومت های خطا و همچنین زمان تشخیص (تریپ) خطا در نمودارهای میله ای شکل (۱۰) در مورد سه لحظه وقوع خطای مفروض به صورت مقایسه ای نشان داده است. با اشاره به شکل (۱۱) a و b، لحظه وقوع خطا تاثیر با اهمیتی بر خطای تخمین فواصل و مقاومت های خطا در روش پیشنهادی ندارد. اما در مورد زمان تشخیص خطا از شکل (۱۱) c ملاحظه می گردد که در قیاس با لحظه وقوع خطا در صفر ولتاژ، زمان تشخیص روش پیشنهادی در لحظات پیک ولتاژ در مورد خطاهای انتهایی دور و

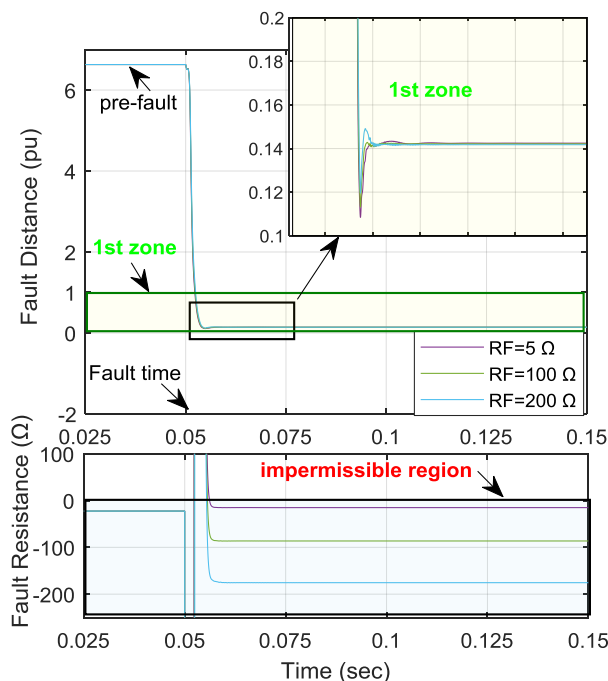
بخش ۵-۱ در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های (۱۲)-(۱۴) مقادیر تخمین زده شده فواصل و مقاومت‌های خطا توسط شبکه عصبی را بر حسب زمان نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، به ازای خطاهای نامرتبب نزدیک (0.05 pu)، تمامی مقادیر فواصل خطای تخمین زده شده توسط المان پیشنهادی مدار اول در ناحیه حفاظتی قرار می‌گیرند. بدین ترتیب در صورتیکه معیار تشخیص خطا در این المان صرفاً فاصله خطا در نظر گرفته می‌شد، فرارسی رله رخ داده و مدار اول خط نیز به اشتباه از سرویس خارج می‌شد. اما باید توجه داشت به ازای این خطاها مقدار تخمینی مقاومت‌های خطا منفی بوده و در نتیجه خارج از ناحیه مجاز می‌باشد. بدین ترتیب در المان پیشنهادی شرط مربوط به علامت مقاومت خطا برقرار نشده و عملاً از فرارسی رله جلوگیری می‌شود. در مورد خطاهای نامرتبب میانی (0.5 pu) و انتهای دور (0.95 pu) همانگونه که از شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌شود، اگرچه مقاومت خطای تخمین زده شده در ناحیه مجاز (با علامت مثبت) تخمین زده می‌شوند، اما در این موارد باید توجه داشت که فواصل خطای تخمینی اساساً در خارج ناحیه حفاظت قرار می‌گیرند و بدین ترتیب شرط مربوط به فاصله خطا برقرار نشده و فرارسی رله رخ نخواهد داد. نتایج این بخش به صراحت نشان می‌دهد که المان زمین پیشنهادی در برابر خطاهای مدار نامرتبب مقاوم بوده و با مکانیزم پیشنهاد شده برای آن دچار فرارسی نشده و در نتیجه ویژگی امنیت خود را حفظ می‌کند.



شکل (۱۳): فواصل و مقاومت‌های خطای تخمین زده شده طی خطای مدار نامرتبب در محل 0.5 pu و مقاومت‌های خطای مفروض



شکل (۱۴): فواصل و مقاومت‌های خطای تخمین زده شده طی خطای مدار نامرتبب در محل 0.95 pu و مقاومت‌های خطای مفروض



شکل (۱۲): فواصل و مقاومت‌های خطای تخمین زده شده طی خطای مدار نامرتبب در محل 0.05 pu و مقاومت‌های خطای مفروض

۶- نتیجه گیری

مراجع

- [1] Y. Chen, M. Wen, Z. Wang and X. Yin, "A novel instantaneous value based incremental quantities distance protection for AC transmission lines", Int. J. Electr. Power & Energ. Syst., vol. 135, pp. 1-15, Feb. 2022.
- [2] 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, 2019.
- [3] G. Ziegler, Numerical distance protection: principles and applications. 2nd ed. Berlin: Siemens AG, 2006.
- [4] M. Shahidehpour, W. F. Tinney and Y. Fu, "Impact of security on power systems operation", Proc. IEEE, vol. 93, no. 11, pp. 2013-2025, Nov. 2005.
- [5] A. H. Azimi and A. A. Abdoos, "A new intelligent method for parallel transmission lines protection", Technol Econ Smart Grids Sustain Energy, vol. 5, no. 14, pp. 1-14, Aug. 2020.
- [6] 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.
- [7] P. H. Vu, K. H. Le, Effect of Fault Resistance on the Operating Behavior of Distance Relay, Lap Lambert Academic Publishing, 2018.
- [8] Line distance protection IED REL 670 ANSI, Technical reference manual, ABB; Mar. 2007.
- [9] J. Lewis Blackburn and Thomas J. Domin, Protective Relaying Principles and Applications, Taylor and Francis Group 2006.
- [10] Y. Liang, Z. Lu, W. Li, W. Zha and Y. Huo, "A Novel fault impedance calculation method for distance protection against fault resistance", IEEE Trans. Power Del., vol. 35, no. 1, pp. 396-407, Feb. 2020.
- [11] H. Abdollahzadeh, "A new approach to eliminate impacts of high-resistance faults by compensation of traditional distance relays' input signals", Int. J. Electr. Power & Energ. Syst., vol. 197, pp. 1-9, May. 2021.
- [12] N. George, P. Surajath, O. D. Naidu and P. Yalla, "Machine Learning Based Setting-free Reach Element for Zone-1 Distance Protection", 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), pp. 1-5, 2019.
- [13] P. Verma, A. Verma and V. Bargate, "ANN Based Distance Protection of High Voltage Transmission Line", Design Engineering, vol. 2021, no. 7, pp. 7296- 73282, Aug. 2021.
- [14] Y. Chen, M. Wen, Z. Wang and X. Yin, "A novel instantaneous value based incremental quantities distance protection for AC transmission lines", Electr. Power & Energ. Syst., vol. 135, pp. 1-15, Feb. 2022.
- [15] J. Ma, W. Ma, Y. Qiu, and J. S. Thorp, "An Adaptive Distance Protection Scheme Based on the Voltage Drop Equation", IEEE Trans. Power Del., vol. 30, no. 4, pp. 1931-1940, Aug. 2015.
- [16] U. Uzubi, A. Ekwue and E. Ejiogu, "Adaptive distance relaying: Solution to challenges of conventional protection schemes in the presence of remote infeeds", Int. Trans. Electr. Energ. Syst., vol. 30, no. 5, May 2020.
- [17] U. Uzubi, A. Ekwue and E. Ejiogu, "An Adaptive Distance Protection Scheme for High Varying Fault Resistances", Scientific African, vol. 9, no. 1, pp. 1-13, Sep. 2020.

در این مقاله یک المان زمین دیستانس برای حفاظت خطوط انتقال دو مداره در برابر خطاهای فاز به زمین معرفی شده است که در آن دو مشکل اساسی رله های دیستانس سنتی شامل فرو-رسی در برابر خطاهای مقاومت بالا و فرا-رسی در برابر خطاهای نامرتب جبران شده است. المان پیشنهادی بر اساس تخمین آنالین و توان فاصله و مقاومت خطا توسط یک شبکه عصبی تطبیقی و یک مکانیزم مقایسه-ای منطقی بین مقادیر تخمینی توسعه داده شده است. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از طریق مطالعات شبیه سازی نشان می دهد که به ازای رنج گسترده ای از تغییرات در موقعیت های خطا، شرایط بار سیستم و زمان وقوع خطا، شبکه عصبی پیشنهادی قادر است صرف نظر از مقدار مقاومت خطا، تخمینی از فواصل و مقاومت های خطا با دقتی بالاتر از ۹۸٪ ارائه دهد. علاوه بر دقت بالا، سرعت همگرایی تخمین ها به نحوی است که المان پیشنهادی را قادر می سازد که خطاها را ظرف مدت زمانی کمتر از نیم سیکل تشخیص (تریپ) دهد. همچنین نتایج به خوبی نشان می دهد که در مورد خطاهای مدار نامرتب، تخمین فواصل و یا مقاومت های خطا خارج از محدوده های مجاز بوده، و بدین ترتیب از تشخیص نابجای (فرا-رسی) المان پیشنهادی در مورد این خطاها جلوگیری به عمل می آید.

پیوست

مشخصات سیستم تست شکل (۴) به شرح زیر می باشد.

■ منابع ولتاژ:

$$V_1 = V_2 = V_3 \quad 230 < 0 \text{ kV}, \quad f = 60 \text{ Hz}, \quad Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0.2 + 2.0i.$$

■ خطوط انتقال:

$$T_{line1}: 50 \text{ km}, T_{line2}: 70 \text{ km}, T_{line3}: 100 \text{ km}.$$

■ ترانسفورماتورهای قدرت:

$$T_1-T_3: 150 \text{ MVA}, 230 \Delta / 132 Y_g \text{ kV}, T_{L1}-T_{L4}: 100 \text{ MVA}, 132 Y_g / 63 \Delta \text{ kV}.$$

■ ترانسفورماتورهای اندازه گیری:

$$V_T: 100 \text{ VA}, 132000: \sqrt{3}/110: \sqrt{3} \text{ V}, 3P, CTs: 30 \text{ VA}, 500/1 \text{ A}, 5P30.$$

■ بارها:

$$L_1-L_4: P_L = 90 \text{ MW and } Q_L = 60 \text{ MVar}.$$

- [18] T. A. Kawady, G. M. Sowilam and R. Shalwala, "Improved Distance Relaying for Double-Circuit Lines Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System", Arab. Jour. for Scien. and Engin., vol. 45 no. 3, pp.1969-1984, Jan. 2020.
- [19] R. Dubey, S. R. Samantaray, B.K. Panigrahi, "An extreme learning machine based fast and accurate adaptive distance relaying scheme", Electr. Power & Energ. Syst., vol. 73, pp. 1002–1014, Dec. 2015.
- [20] V. Q. Xia, K .K. Li, A. K. David. Adaptive Relay Setting for Stand-Alone Digital Disatance Protection, IEEE Trans. Power Del., vol. 9, No.1 pp. 480–491, Jan. 1994.
- [21] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. Overbye and A. Birchfield, "Power systems analysis and design", 7th ed., Cengage Learning, Jan. 2022.
- [22] S. Shanmuganathan and S. Samarasinghe, Artificial Neural Network Modelling, Springer, 2016.
- [23] S. Liu, X. Jin and R. Gokaraju, "High-speed distance relaying using least error squares method and testing with FPGA", in IET Gener., Transm. & Distrib. vol. 13, no. 16, pp. 3591-3600, Aug. 2019.

زیر نویس ها

¹ Under-reach

² Over-reach