

بهبود عملکرد رله‌های دیستانس در حفاظت خطوط انتقال کوتاه

وحید فتحی^۱، دانشجو، هیرش سیدی^۲، دانشیار، ابراهیم بابایی^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- ایران- v.fathi88@ms.tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران- hseyedi@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران- e-babaei@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی برای بهبود عملکرد رله‌های دیستانس در حفاظت خطوط انتقال کوتاه پیشنهاد می‌شود. رله‌های دیستانس در کنار مزایای متعدد دارای معایبی نیز می‌باشند. این معایب به خصوص در مورد خطوط انتقال کوتاه جدی‌تر هستند. مهم‌ترین مشکلات رله‌های دیستانس در حفاظت خطوط کوتاه اثر مقاومت خطا و مشکل کوچک بودن ولتاژ محل رله و در نتیجه افزایش خطای ترانسفورماتورهای ولتاژ می‌باشند. در این مقاله روشی برای رفع معایب مذکور پیشنهاد می‌شود که استفاده از آن باعث بهبود عملکرد رله دیستانس می‌شود. عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار EMTP-ATP مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته و با روش‌های موجود مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حفاظت دیستانس، خط انتقال کوتاه، رله‌های میکروپروسسوری، مقاومت خطا

Improving the performance of short line distance protection

V. Fathi, H. Seyedi, E. Babaei

Faculty of Electrical and Computer Engineering- University of Tabriz- Iran - Tabriz

Abstract: In this paper, a new method is proposed to modify the function of distance relays in protection of short transmission lines. Besides having numerous advantages, distance relays have also some disadvantages which are more serious in the case of short transmission lines. Effect of fault resistance and small voltage in the relay point are the most important problems of relays in such lines which lead to large CVT errors. In this paper a new method is proposed for overcoming mentioned problems and using it, will improve distance relays function. Effectiveness of the proposed methods is assessed, analyzed and compared with the existing methods, using simulations in EMTP software.

Key Words: Protection, Short Transmission line, Digital Relays, Fault Resistance

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۲/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: وحید فتحی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تبریز- خیابان شریعتی جنوبی- خیابان بارون آواک کوچه حشمتی جنب مدرسه چیت‌چیان پلاک ۳۵

۱- مقدمه

$$V_R = \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} V_S = \frac{1}{1 + \frac{Z_S}{Z_L}} V_S = \frac{1}{1 + SIR} V_S \quad (1)$$

حتی اگر از خطای ترانسفورماتورهای ولتاژ نیز صرف نظر شود رله‌های دیستانس برای ولتاژهای کوچک دارای عملکرد مطمئنی نخواهند بود. هم چنین رله‌های دیستانس خطوط کوتاه در معرض افزایش دید گذرا در اثر حالت‌های گذرای ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی هستند [۲].

با توجه به مشکلات فوق، استفاده از روش‌های جریانی در حفاظت خطوط کوتاه متداول شده است. روش‌های جریانی به صورت‌های مختلفی از جمله مقایسه فاز جریان^۲ و استفاده از تفاضل جریان^۳ پیاده‌سازی شده‌اند [۴-۸]. این روش‌ها عموماً نیاز به کانال مخابراتی پیچیده و سریع دارند تا اطلاعات بین دو پست با یکدیگر مبادله شوند. بنابراین استفاده از این روش‌ها علاوه بر پرهزینه بودن اجراء، دارای این مشکل هستند که هرگونه خطا در کانال مخابراتی باعث عملکرد نایجا و یا نادرست رله خواهد شد. البته یک مزیت روش‌های جریانی، عدم نیاز به اطلاعات ولتاژ می‌باشد. لذا رله‌ای که از این روش استفاده می‌کند ساده‌تر است و ضمناً نیاز به ترانسفورماتور ولتاژ نیز از بین می‌رود. البته هنوز برای مقاصدی مانند اندازه‌گیری و سنکرون کردن وجود ترانسفورماتور ولتاژ ضروری است. در مقابل، این روش به کانال ارتباطی وابستگی شدیدی دارد و هرگونه خطا در کانال باعث عدم عملکرد یا عملکرد نادرست رله خواهد شد. بنابراین تجهیزات مخابراتی مورد استفاده، نیاز به تجهیزات پشتیبان دارند و در نتیجه هزینه طرح بالا می‌رود.

در مرجع [۹] روش متفاوتی برای حفاظت خط انتقال کوتاه ارائه گردیده است. این روش از یک سیگنال فرکانس بالا که از محل رله به سمت خط ارسال می‌شود کمک گرفته و با استفاده از یک مقایسه‌گر فاز، بین جریان‌های پیش‌فاز و پس‌فاز، هنگام بروز خطای زمین تمایز ایجاد می‌کند. مزیتی که این روش دارد سرعت عملکرد بالای آن است. استفاده از سیگنال‌های فرکانس بالا در صورت وجود نویز عملکرد این روش را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

یکی دیگر از روش‌هایی که می‌تواند در حفاظت خطوط کوتاه مورد استفاده قرار گیرد، شبکه‌های عصبی است. این شبکه‌ها جهت حفاظت خط انتقال در مراجع متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰-۱۸]. در برخی از این روش‌ها، شبکه عصبی بر اساس اطلاعات ولتاژ و جریان دو طرف خط، محل خطا را مشخص می‌کند [۱۰]. طبیعتاً این روش نیازمند کانال مخابراتی سریع و مطمئنی برای انتقال اطلاعات سه فاز ولتاژ و جریان به پست مقابل است. در مرجع [۱۹] فقط جهت خطا از طریق کانال ارسال می‌شود و رله با استفاده از آن و اطلاعات محلی در مورد خطا تصمیم‌گیری می‌نماید.

در مرجع [۲۰] با در نظر گرفتن این که ولتاژ و جریان محل خطا هم‌فاز هستند و با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان، محل خطا را مشخص می‌نماید. در این مقاله در بخش دوم روشی برای محاسبه ولتاژ محل رله خط انتقال کوتاه مطرح می‌شود. سپس با در نظر گرفتن این مطلب که افت ولتاژ روی خط انتقال کوتاه قابل صرف‌نظر است جریان خطای سمت انتهایی خط انتقال تخمین زده می‌شود. در نهایت محل خطا با استفاده از مقادیر جریان و همچنین ولتاژ تخمین زده شده، مشخص می‌شود. در بخش سوم شبیه‌سازی انجام شده و تحلیل نتایج آن ارائه شده است. نهایتاً در بخش چهارم نتیجه‌گیری آورده شده است.

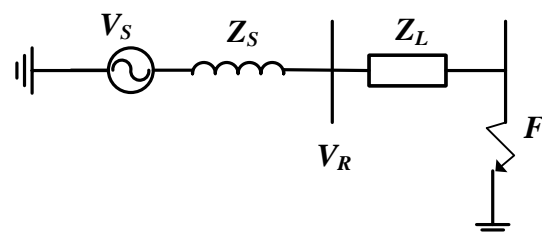
خط انتقال یکی از مهم‌ترین تجهیزات سیستم قدرت است که حفاظت آن از دیدگاه حفظ پایداری سیستم و جلوگیری از آسیب دیدن تجهیزات در اثر عبور جریان اتصال کوتاه دارای اهمیت بسیار زیادی است. با توجه به فاصله زیاد بین ترمینال‌های ابتدا و انتهای خط، حفاظت خط انتقال یکی از پیچیده‌ترین انواع حفاظت در سیستم قدرت است. حفاظت خط انتقال به طرق مختلف صورت می‌گیرد. متداول‌ترین روش حفاظت خط در مورد خطوط متوسط و بلند حفاظت دیستانس است [۱]. این روش حفاظتی، با محاسبه امپدانس دیده شده از محل رله تا محل خطا و مقایسه آن با نواحی حفاظتی از قبل تعریف شده، عمل حفاظت را انجام می‌دهد. علاوه بر روش دیستانس، روش‌های متعدد دیگری نیز در مراجع مختلف ارائه شده است.

با وجود ارائه روش‌های جایگزین برای حفاظت دیستانس، این روش حفاظتی هنوز متداول‌ترین روش حفاظت خط انتقال است. از مشکلات اصلی رله دیستانس تاثیر مقاومت خطا می‌باشد. به طور معمول تاثیر مقاومت در خط‌های فاز به فاز کم‌تر است چرا که معمولاً تنها مقاومت جرقه، بین دو فاز قرار دارد. اما زمانی که اتصال کوتاه با مقاومت به زمین در انتهای ناحیه حفاظتی اتفاق می‌افتد، امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله خارج از ناحیه حفاظتی آن خواهد بود و رله عمل نخواهد کرد. اثر تغذیه خطا از منابع مختلف نیز باعث تشدید اثر نامطلوب مقاومت خطا خواهد شد [۳ و ۲].

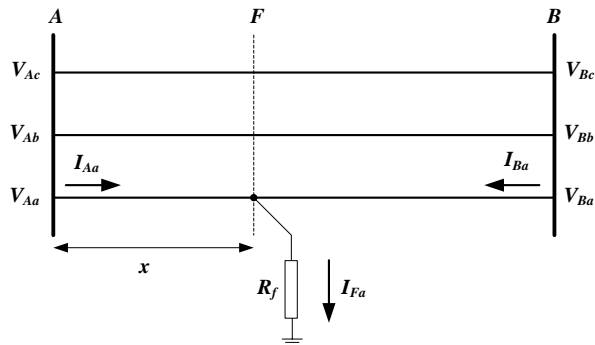
در مورد خطوط کوتاه، استفاده از حفاظت دیستانس، علاوه بر مشکلات فوق‌الذکر با مشکلات دیگری نیز روبرو است. به دلیل کوچک بودن امپدانس خطوط کوتاه، نسبت امپدانس منبع به امپدانس خط انتقال^۱ عدد بزرگی است. به طور کلی در حفاظت، خط کوتاه به خطی اطلاق می‌شود که SIR آن بزرگ باشد. بنابراین خطی به طول ۳۰ کیلومتر که SIR آن کم است همانند خط بلند خواهد بود. اما یک خط ۱۰۰ کیلومتری که SIR بالایی دارد همانند خط کوتاه رفتار می‌کند. معمولاً خطوطی که SIR آن‌ها بزرگ‌تر از ۴ باشد از نظر حفاظتی، خط کوتاه محسوب می‌شوند [۲].

با توجه به تعریف ارائه شده برای خط کوتاه، در صورتی که یک اتصال کوتاه داخلی اتفاق بیفتد ولتاژ دیده شده در محل رله بسیار کوچک‌تر از ولتاژ نامی سیستم خواهد بود. چرا که این ولتاژ از تقسیم ولتاژ بین خط و منبع معادل شبکه حاصل می‌شود. این امر باعث می‌شود که کوچک‌ترین خطا در اندازه‌گیری ولتاژ، عملکرد رله را دچار اختلال نماید. با توجه به اینکه ترانسفورماتورهای ولتاژ در حوالی مقادیر نامی عملکرد مناسبی دارند در صورتی که ولتاژ محل رله بسیار کم‌تر از ولتاژ نامی سیستم باشد، خطای ترانسفورماتورهای ولتاژ، قابل توجه خواهد بود.

زمانی که نسبت SIR افزایش می‌یابد مطابق رابطه (۱)، ولتاژ محل رله (V_R در شکل ۱) به شدت افت می‌کند. این کاهش شدید ولتاژ، باعث عملکرد نادرست ترانسفورماتورهای خازنی می‌شود.



شکل (۱): خطا در نقطه F در داخل خط انتقال کوتاه



شکل (۳): خطای تک‌فاز به زمین در فاصله x از ترمینال A

تنها پارامتری که در استفاده از رابطه (۲) در ابتدای خط انتقال مستقیماً در اختیار رله قرار ندارد جریان انتهایی خط انتقال است که به سمت خطا در حال عبور است (جریان I_{Ba} در شکل ۳). در ادامه روشی برای تخمین جریان انتهایی خط انتقال پیشنهاد می‌شود و سپس با استفاده از رابطه (۲) محل خطا و مقاومت خطا محاسبه می‌شود. مراحل انجام روش پیشنهادی برای خطای تک‌فاز به زمین به شرح زیر است:

- (۱) فرض می‌شود امپدانس معادل تونن منابع هر دو طرف خط انتقال کوتاه یعنی Z_{S1} و Z_{S2} در شکل (۲) در اختیار رله قرار دارد. منظور از امپدانس‌های تونن، امپدانس مولفه‌های متقارن معادل شبکه می‌باشد.
- (۲) در شرایط عادی ولتاژ منبع تونن (ولتاژ منبع مولفه مثبت) از دید ابتدای خط انتقال یعنی $V_1 \angle \delta_1$ در شکل (۲)، با استفاده از مقادیر ولتاژ V_A و جریان I_A و هم‌چنین امپدانس منبع Z_{S1} محاسبه می‌شود.
- (۳) با در اختیار داشتن جریان و ولتاژ در شرایط عادی، ولتاژ V_B و جریان I_B انتهایی خط انتقال از طریق ماتریس انتقال خط، مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

- (۴) ولتاژ منبع معادل تونن (ولتاژ منبع مولفه مثبت) انتهایی خط انتقال یعنی $V_2 \angle \delta_2$ در شکل (۲)، مشابه مرحله ۲ محاسبه می‌شود.

- (۵) فرض می‌شود هنگام بروز خطای تک‌فاز به زمین ($a \rightarrow g$)، ولتاژ محل خطا برابر ولتاژ ابتدای خط انتقال و آن هم برابر ولتاژ انتهایی خط انتقال است. یعنی ولتاژهای V_{fa} و V_{Ba} در شکل (۳) با هم برابرند.

$$V_{Aa} = V_{Ba} = V_{fa} \quad (6)$$

این فرض با در نظر گرفتن این مسئله که امپدانس خط انتقال کوچک است و افت ولتاژ روی آن ناچیز است صورت گرفته است. در نتیجه مولفه‌های متقارن ولتاژ نیز با هم برابرند.

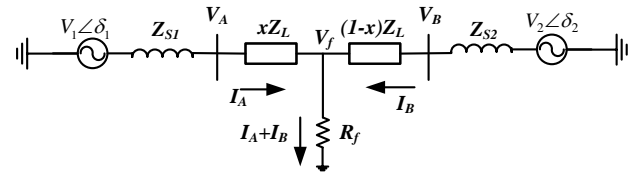
$$V_{A+} = V_{B+} = V_{f+} \quad (7)$$

- (۶) مدار معادل مؤلفه‌های متقارن شبکه هنگام بروز خطای تک فاز $a \rightarrow g$ ، به صورت شکل (۴) می‌باشد.

۲- روش پیشنهادی برای حفاظت خطوط انتقال کوتاه

زمانی که خطایی در یک خط انتقال کوتاه اتفاق می‌افتد، مطابق شکل ۲ جریان‌های خطا از دو انتهای خط انتقال به سمت محل خطا به وجود می‌آیند. در شکل ۲، Z_L امپدانس کل خط انتقال و x درصدی از طول خط است که خطا در آن نقطه اتفاق افتاده است.

در این بخش روش پیشنهادی برای حفاظت خطوط انتقال کوتاه در مقابل انواع خطاها ارائه می‌گردد. هدف این روش غلبه بر مشکلات ناشی از کم بودن ولتاژ محل رله و اثر مقاومت خطا می‌باشد.



شکل (۲): خطای با مقاومت R_f در داخل خط انتقال کوتاه

۲-۱- خطای تک‌فاز به زمین

در صورتی که خطای تک‌فاز به زمین $a \rightarrow g$ مطابق شکل (۳) در فاصله x از ترمینال A اتفاق افتد می‌توان از رابطه (۲) برای تخمین محل خطا و مقدار مقاومت خطا استفاده کرد [۲۱].

$$\begin{bmatrix} x \\ R_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1m} & I_{Fm_r} \\ M_{2m} & I_{Fm_i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{Am_r} \\ V_{Am_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در رابطه (۲) اندیس‌های i و r به ترتیب نشان‌دهنده قسمت موهومی و قسمت حقیقی پارامتر مربوطه هستند.

V_{Am} نشان دهنده ولتاژ فاز m در ابتدای خط انتقال بر حسب ولت و x نشان دهنده فاصله محل خطا از ابتدای خط انتقال بر حسب متر و I_{Fm} نشان دهنده جریان خطا که مجموع جریان خطای ابتدا (I_{Am}) و انتهایی خط انتقال (I_{Bm}) بر حسب آمپر می‌باشد.

هم‌چنین:

$$M_{1m} = \sum_k (Z_{mk_r} I_{Ak_r} - Z_{mk_i} I_{Ak_i}) \quad (3)$$

$$M_{2m} = \sum_k (Z_{mk_r} I_{Ak_i} + Z_{mk_i} I_{Ak_r}) \quad (4)$$

در روابط فوق تعاریف زیر صورت گرفته است:

k : فازهای a, b, c

Z_{mk} : امپدانس متقابل بین فاز m و فاز k بر حسب اهم بر متر؛

I_{A_k} : جریان فاز k در ابتدای خط انتقال بر حسب آمپر؛

I_{B_k} : جریان فاز k در انتهایی خط انتقال بر حسب آمپر.

در نتیجه جریان انتهایی خط انتقال با استفاده از روابط (۱۱) الی (۱۴) محاسبه می‌شود.

(۹) در نهایت تمام پارامترهای لازم برای تخمین محل خطا توسط رابطه (۲)، در اختیار رله قرار دارد. بنابراین رله قادر است محل خطا و مقدار مقاومت خطا را محاسبه نماید.

۲-۲- خطای دو فاز به هم

در صورتی که خطای دو فاز به هم $b \rightarrow c$ مطابق شکل (۵) در فاصله x از ترمینال A اتفاق افتد، می‌توان از رابطه (۱۵) برای تخمین محل خطا و مقدار مقاومت خطا استفاده کرد [۲۱].

$$\begin{bmatrix} x \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_3 & I_{Fm_r} \\ M_4 & I_{Fm_i} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{Am_r} - V_{An_r} \\ V_{Am_i} - V_{An_i} \end{bmatrix} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) M_3 و M_4 به صورت روابط (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شوند. در روابط (۱۵) الی (۱۷) m و n فازهای درگیر خطا هستند.

$$M_3 = \sum_k [(Z_{mk_r} - Z_{nk_r}) I_{Ak_r} - (Z_{mk_i} - Z_{nk_i}) I_{Ak_i}] \quad (16)$$

$$M_4 = \sum_k [(Z_{mk_r} - Z_{nk_r}) I_{Ak_i} + (Z_{mk_i} - Z_{nk_i}) I_{Ak_r}] \quad (17)$$

در روابط فوق تعاریف زیر صورت گرفته است:

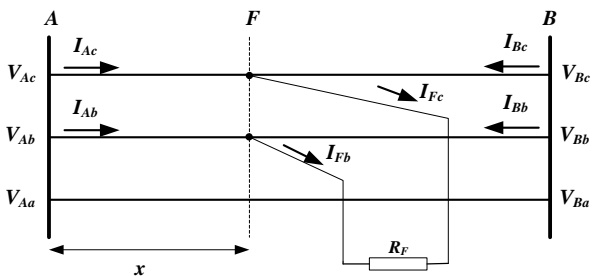
a, b, c فازهای k

Z_{mk} : امپدانس متقابل بین فاز m و فاز k بر حسب اهم بر متر؛

Z_{nk} : امپدانس متقابل بین فاز n و فاز k بر حسب اهم بر متر؛

I_{Ak} : جریان فاز k در ابتدای خط انتقال بر حسب آمپر؛

I_{Bk} : جریان فاز k در انتهای خط انتقال بر حسب آمپر.



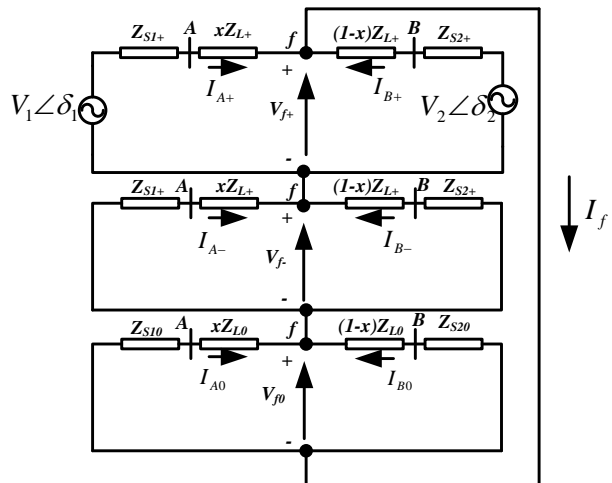
شکل (۵): خطای دو فاز به هم در فاصله x از ترمینال A

مراحل انجام روش پیشنهادی برای خطای دو فاز به هم به شرح زیر است:

مراحل ۱ الی ۶ برای این نوع خطا نیز مشابه مراحل ۱ الی ۶ بخش ۲-۱ می‌باشد با این تفاوت که این بار خطا ($b \rightarrow c$) می‌باشد و در نتیجه به جای رابطه (۱۰) می‌بایست از رابطه (۱۸) استفاده کرد.

$$V_{f0} = 0 \quad (18)$$

مشابه خطای تک فاز به زمین، ولتاژ فازهای b و c با استفاده از روابط (۸)، (۹) و (۱۸) محاسبه می‌شود. مدار معادل مولفه‌های متقارن شبکه هنگام بروز خطای دو فاز ($b \rightarrow c$) به صورت شکل (۶) می‌باشد.



شکل (۴): مدار معادل مولفه‌های متقارن شبکه در حالت خطای تک‌فاز به زمین

با در نظر گرفتن رابطه (۷) و این که افت ولتاژ روی خط انتقال ناچیز است، مولفه‌های متقارن ولتاژ به صورت روابط (۸) الی (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$V_{f+} = V_1 \angle \delta_1 - Z_{S1+} I_{A+} \quad (8)$$

$$V_{f-} = -Z_{S1-} I_{A-} \quad (9)$$

$$V_{f0} = -Z_{S10} I_{A0} \quad (10)$$

ولتاژ فاز a با استفاده از روابط (۶) الی (۱۰) محاسبه می‌شود.

(۷) مطابق شکل (۴) برای محاسبه جریان I_{B+} ، از افت ولتاژ روی خط انتقال صرف‌نظر می‌شود. بنابراین مولفه مثبت جریان انتهایی خط انتقال با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$I_{B+} = \frac{V_2 \angle \delta_2 - V_{f+}}{Z_{S2+}} \quad (11)$$

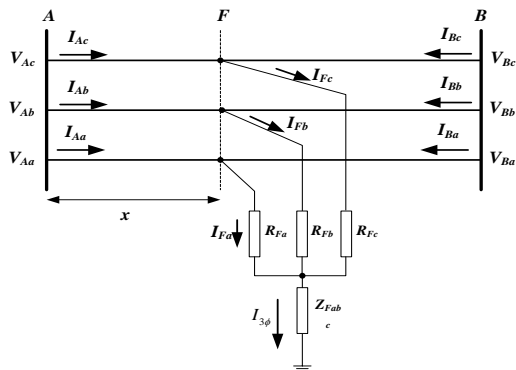
(۸) همان‌گونه که در شکل (۴) مشخص شده است، مولفه‌های جریان خطا با یکدیگر برابر هستند. جریان خطا به صورت رابطه (۱۲) می‌باشد.

$$I_f = I_{A+} + I_{B+} = I_{A-} + I_{B-} = I_{A0} + I_{B0} \quad (12)$$

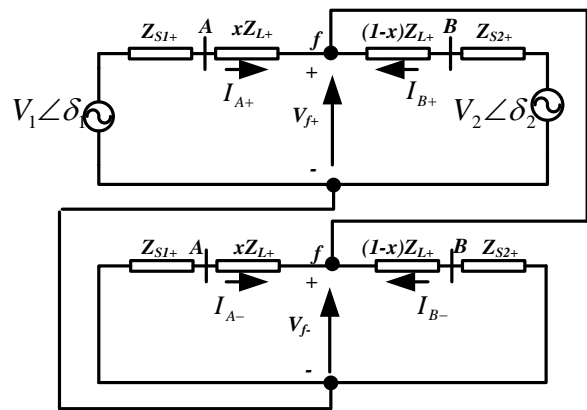
بنابراین مولفه‌های منفی و صفر جریان انتهایی خطا با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند.

$$I_{B-} = I_{A+} + I_{B+} - I_{A-} \quad (13)$$

$$I_{B0} = I_{A+} + I_{B+} - I_{A0} \quad (14)$$



شکل (۷): خطای سه‌فاز به زمین در فاصله x از ترمینال A



شکل (۶): مدار معادل مولفه‌های متقارن شبکه در حالت خطای دو فاز

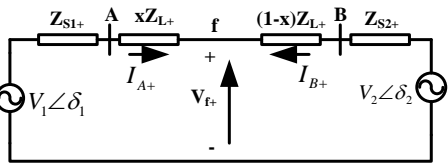
مراحل انجام روش پیشنهادی برای خطای سه فاز به زمین به شرح زیر است:

مراحل ۱ الی ۶ برای این نوع خطا نیز مشابه مراحل ۱ الی ۶ بخش ۲-۱ می‌باشد. با این تفاوت که این بار خطا ($abc \rightarrow g$) می‌باشد و در نتیجه به جای روابط (۹) و (۱۰) می‌بایست از روابط (۲۵) و (۲۶) استفاده کرد.

$$V_{f-} = 0 \quad (25)$$

$$V_{f0} = 0 \quad (26)$$

مولفه‌های متقارن ولتاژ و در نتیجه ولتاژ فازهای a ، b و c با استفاده از روابط (۸)، (۲۵) و (۲۶) محاسبه می‌شوند. مدار معادل مولفه‌های متقارن شبکه هنگام بروز خطای سه فاز ($abc \rightarrow g$) به صورت شکل (۸) می‌باشد.



شکل (۸): مدار معادل مولفه‌های متقارن شبکه در حالت خطای سه فاز به زمین

ادامه الگوریتم از مرحله ۷ به شرح زیر می‌باشد:

(۷) مطابق شکل (۸) برای محاسبه جریان I_{B+} ، از افت ولتاژ روی خط انتقال صرف‌نظر می‌شود. بنابراین مولفه مثبت جریان انتهایی خط انتقال با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$I_{B+} = \frac{V_2 \angle \delta_2 - V_{f+}}{Z_{S2}} \quad (27)$$

(۸) به دلیل وجود تقارن، مولفه‌های منفی و صفر جریان وجود نخواهند داشت و برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین جریان‌های فاز انتهایی خط انتقال محاسبه می‌شوند و محل خطا از طریق رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

همان‌گونه که توضیح داده شد در روش پیشنهادی، ابتدا می‌بایست نوع اتصال کوتاه مشخص باشد سپس الگوریتم حفاظتی بر اساس نوع اتصال کوتاه، عملکرد متناسب را در پیش خواهد گرفت. توجه به این نکته ضروری است که تشخیص نوع اتصال کوتاه در رله‌ها، به خصوص رله‌های جدید به سادگی توسط واحدهای تشخیص دهنده خطا^۴ قابل انجام است. این واحدها معمولاً با مقایسه نمونه جریان فعلی با نمونه جریان سیکل قبلی به راحتی نوع اتصال کوتاه را تشخیص می‌دهند [۲۲].

ادامه الگوریتم از مرحله ۷ به شرح زیر می‌باشد:

(۷) مطابق شکل (۶) برای محاسبه مولفه‌های جریان انتهایی خط، از افت ولتاژ روی خط انتقال صرف‌نظر می‌شود. بنابراین مولفه‌های متقارن جریان انتهایی خط انتقال با استفاده از روابط (۱۹) الی (۲۱) محاسبه می‌شوند.

$$I_{B+} = \frac{V_2 \angle \delta_2 - V_{f+}}{Z_{S2+}} \quad (19)$$

$$I_{B-} = \frac{-V_{f-}}{Z_{S2+}} \quad (20)$$

$$I_{B0} = 0 \quad (21)$$

لذا، جریان انتهایی خط انتقال با استفاده از روابط (۱۹) الی (۲۱) محاسبه می‌شود.

(۸) در نهایت تمام پارامترهای لازم برای تخمین محل خطا توسط رابطه (۱۵)، در اختیار رله قرار دارد. بنابراین رله قادر است محل خطا را محاسبه نماید.

۲-۳- خطای سه فاز

در صورتی که خطای سه فاز به زمین $abc \rightarrow g$ مطابق شکل (۷) در فاصله x از ترمینال A اتفاق افتد می‌توان از رابطه (۲۲) برای تخمین محل خطا و مقدار مقاومت خطا استفاده کرد [۲۱].

$$\begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fc} \\ R_{F_{abc}} \\ X_{F_{abc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1a} & I_{Fa_r} & 0 & 0 & I_{3\phi_r} & -I_{3\phi_i} \\ M_{2a} & I_{Fa_i} & 0 & 0 & I_{3\phi_i} & I_{3\phi_r} \\ M_{1b} & 0 & I_{Fb_r} & 0 & I_{3\phi_r} & -I_{3\phi_i} \\ M_{2b} & 0 & I_{Fb_i} & 0 & I_{3\phi_i} & I_{3\phi_r} \\ M_{1c} & 0 & 0 & I_{Fc_r} & I_{3\phi_r} & -I_{3\phi_i} \\ M_{2c} & 0 & 0 & I_{Fc_i} & I_{3\phi_i} & I_{3\phi_r} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{A_{ar}} \\ V_{A_{ai}} \\ V_{A_{br}} \\ V_{A_{bi}} \\ V_{A_{cr}} \\ V_{A_{ci}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

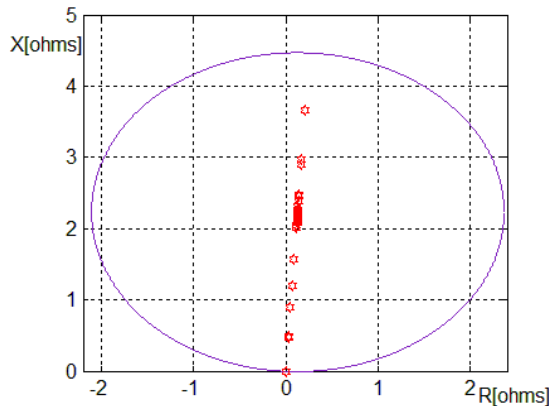
در رابطه (۲۲)، پارامترهای M_1 و M_2 هر فاز با استفاده از روابط (۳) و

(۴) محاسبه می‌شوند هم‌چنین:

$$I_{3\phi} = I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc} \quad (23)$$

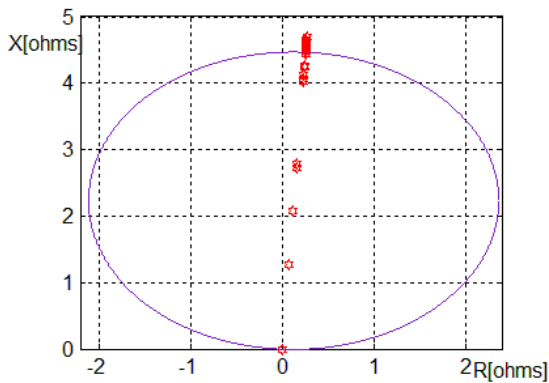
$$Z_{F_{abc}} = R_{F_{abc}} + jX_{F_{abc}} \quad (24)$$

در صورتی که خطای تک فاز به زمین در فاصله ۵ کیلومتر از ابتدای خط انتقال کوتاه با مقاومت برابر ۵ اهم اتفاق افتد عملکرد رله در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



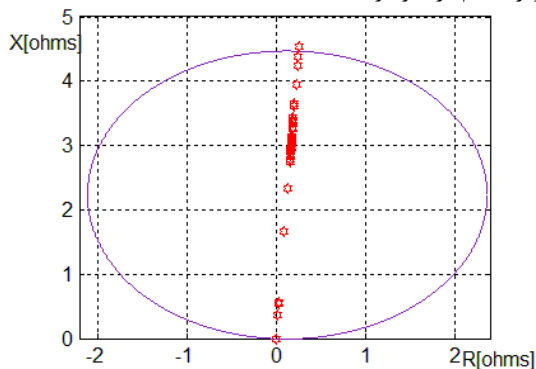
شکل (۱۱): امپدانس دیده شده خطای تک فاز به زمین در فاصله ۵ کیلومتر از ابتدای خط انتقال و با مقاومت ۵ اهم

شکل (۱۲) مقدار امپدانس رله در هنگام بروز خطای دو فاز به هم در فاصله ۱۵ کیلومتر از ابتدای خط انتقال را نشان می‌دهد. مقاومت خطا در این حالت برابر ۱۰ اهم در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۲): امپدانس دیده شده خطای دو فاز به هم در فاصله ۱۵ کیلومتر از ابتدای خط انتقال و با مقاومت ۱۰ اهم

شکل (۱۳) مقدار امپدانس رله در هنگام بروز خطای دو فاز به هم در فاصله ۱۰ کیلومتر از ابتدای خط انتقال را نشان می‌دهد. مقاومت خطا در این حالت برابر ۵ اهم در نظر گرفته شده است.

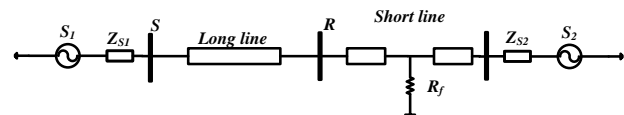


شکل (۱۳): امپدانس دیده شده خطای دو فاز به هم در فاصله ۱۰ کیلومتر از ابتدای خط انتقال و با مقاومت ۵ اهم

۳- مدل سازی سیستم و نتایج شبیه سازی

۳-۱- مدل سازی سیستم

شکل (۹) شبکه‌ای که برای شبیه سازی روش‌های حفاظت خط انتقال کوتاه استفاده شده است را نشان می‌دهد.



شکل (۹): شبکه مورد نظر برای شبیه سازی حفاظت خط انتقال کوتاه

شبیه سازی در برنامه EMTP-ATP انجام گرفته و مشخصات منابع

معادل شبکه به صورت زیر است.

$$S_1: 230KV, 50Hz, Z_{S1+}=0.64+j8.32 \Omega, Z_{S10}=3.2+j13.44 \Omega, \delta_1=10^\circ$$

$$S_2: 230KV, 50Hz, Z_{S2+}=1.28+j33.12 \Omega, Z_{S20}=0.96+j27.84 \Omega, \delta_2=20^\circ$$

خط انتقال بلند به طول ۲۰۰ کیلومتر و خط انتقال کوتاه به طول ۲۰

کیلومتر هستند و امپدانس مولفه مثبت واحد طول هر کدام برابر

$$0.0162 + j0.2793 \Omega/Km \text{ و امپدانس مولفه صفر برابر}$$

$$0.1588 + j0.6458 \Omega/Km \text{ می‌باشد. امپدانس‌های خودی واحد طول فازها}$$

$$\text{برابر } 0.063686 + j0.401414 \Omega/Km \text{ و امپدانس متقابل واحد طول بین}$$

$$\text{فازها برابر } 0.047526 + j0.12218 \Omega/Km \text{ می‌باشد. هم‌چنین ناحیه}$$

حفاظتی سریع رله دیستانس روی ۸۰ درصد خط انتقال تنظیم شده است.

تمامی سیگنال‌های ولتاژ و جریان از طریق نرم افزار EMTP-ATP به

صورت ماتریس ذخیره می‌شوند. سپس این ماتریس‌ها در نرم افزار

MATLAB فراخوانی شده و محاسبات لازم روی این سیگنال‌ها انجام

می‌گیرد. روشی که برای تخمین فازور استفاده می‌شود، روش الگوریتم فوریه

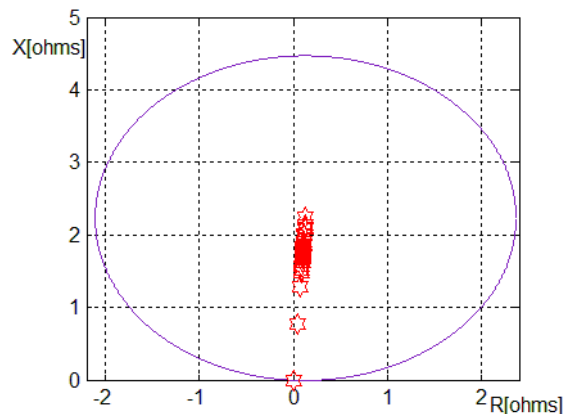
بازگشتی می‌باشد [۲۳ و ۲۴].

۳-۲- نتایج شبیه سازی

در صورتی که خطای تک فاز به زمین در فاصله ۵ کیلومتر از ابتدای خط

انتقال کوتاه با مقاومت ۲۰ اهم اتفاق افتد، عملکرد رله در شکل (۱۰) نشان

داده شده است.



شکل (۱۰): امپدانس دیده شده خطای تک فاز به زمین در فاصله ۵ کیلومتر از ابتدای خط انتقال و با مقاومت ۲۰ اهم

جدول (۱): درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس در حالت خطای $a \rightarrow g$

محل خطا	مقاومت خطا	دیستانس معمولی	روش مرجع [۲۰]	روش پیشنهادی
۵	۱	۹۸	۲۲	۵۴
	۵	۸۶۵	۸۰	۵۳
	۱۰	۱۷۴۲	۱۵۴	۵۰
	۲۰	۳۶۱۳	۱۵۰	۴۲
۱۰	۱	۳۶	۳۰	۲۷
	۵	۴۷۳	۴۶	۲۳
	۱۵	۱۴۲۵	۱۲۸	۲۰
	۲۰	۱۹۳۶	۱۷۸	۱۸
۱۵	۱	۲۰	۱۳	۱۶
	۵	۳۰۰	۳۴	۱۵
	۱۰	۶۷۴	۶۰	۱۴
	۲۰	۱۳۰۰	۱۲۰	۹

جدول (۲): درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس در حالت خطای $b \rightarrow c$

محل خطا	مقاومت خطا	دیستانس معمولی	روش مرجع [۲۰]	روش پیشنهادی
۵	۱	۱۱۴	۳۲	۶
	۵	۹۰۰	۱۶۶	۲۴
	۱۰	۱۹۰۰	۲۶۰	۳۴
۱۰	۱	۴۱	۲۰	۷
	۵	۵۰۰	۸۰	۱۱
	۱۵	۱۰۲۰	۱۳۰	۱۶
۱۵	۱	۲۰	۱۱	۷
	۵	۳۶۶	۵۳	۷
	۱۰	۷۱۷	۸۶	۱۰

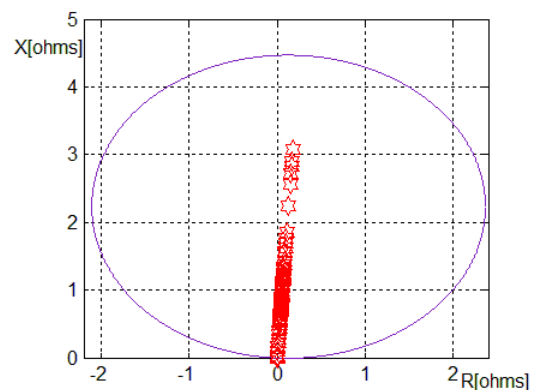
جدول (۳): درصد خطای اندازه‌گیری امپدانس در حالت خطای $abc \rightarrow g$

محل خطا	مقاومت خطا	دیستانس معمولی	روش مرجع [۲۰]	روش پیشنهادی
۵	۱	۷	۶	۶
	۵	۷	۶	۶
	۱۰	۷	۶	۵
۱۰	۱	۷	۵	۵
	۵	۱۰	۵	۴
	۱۵	۱۰	۷	۳
۱۵	۱	۸	۶	۵
	۵	۱۰	۶	۴
	۱۰	۱۰	۶	۴

۳-۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

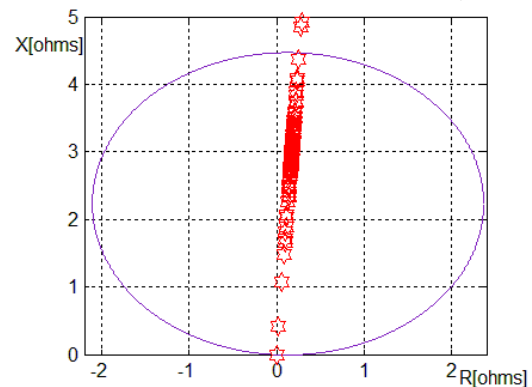
بر اساس شبیه‌سازی‌های ارائه شده در بخش ۳-۲ نتایج زیر حاصل می‌شود.
 - روش ارائه شده نیاز به سیگنال ولتاژ حین اتصال کوتاه ندارد. از آنجا که یکی از مشکلات اساسی حفاظت خطوط انتقال کوتاه، خطای ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ در ولتاژهای پایین است، عدم نیاز به سیگنال ولتاژ حین خطا باعث بهبود قابل ملاحظه عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های پیشین می‌شود.

شکل (۱۴) مقدار امپدانس رله در هنگام بروز خطای سه فاز به هم در فاصله ۲ کیلومتر از ابتدای خط انتقال را نشان می‌دهد. مقاومت خطا در این حالت برابر ۱ اهم در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۴): امپدانس دیده شده خطای سه فاز به هم و به زمین در فاصله ۲ کیلومتر از ابتدای خط انتقال و با مقاومت ۱ اهم

شکل (۱۵) مقدار امپدانس رله در هنگام بروز خطای سه فاز به هم در فاصله ۱۰ کیلومتر از ابتدای خط انتقال را نشان می‌دهد. مقاومت خطا در این حالت برابر ۲۰ اهم در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۵): امپدانس دیده شده خطای سه فاز به هم و به زمین در فاصله ۱۰ کیلومتر از ابتدای خط انتقال و با مقاومت ۲۰ اهم

در ادامه مقایسه بین روش پیشنهادی با روش دیستانس معمولی و هم‌چنین روش ارائه شده در مرجع [۲۰] در جدول‌های ۱ الی ۳ صورت می‌گیرد. در روش ارائه شده در مرجع [۲۰]، با در نظر گرفتن این مطلب که هنگام بروز خطا، امپدانس مسیر خطا غالباً خاصیت اهمی دارد و در نتیجه زاویه ولتاژ و جریان محل خطا با یکدیگر برابر خواهند بود، محل خطا تخمین زده می‌شود. در جدول‌های ۱ الی ۳ به ترتیب خطاهای تک فاز به زمین، دو فاز به هم و سه فاز به زمین مقایسه شده‌اند. هم‌چنین همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شد، هنگام بروز خطا ولتاژ محل رله در خطوط انتقال کوتاه، به شدت افت می‌کند. بنابراین ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ تحت این شرایط، دچار خطا می‌شوند. در مقایسه انجام شده، خطای ترانسفورماتور اندازه‌گیری ولتاژ، ۶ درصد در دامنه و ۴ درجه اختلاف فاز در نظر گرفته شده است. مقدار این خطا بر اساس مرجع [۲۵] برای ترانسفورماتورهای ولتاژ در نظر گرفته شده است.

- [8] M. G. Gracia, W. Osal and M. P. Comech, "Line protection based on the differential equation algorithm using mutual coupling," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, No. 5-6, 2007.
- [9] A. A. El-Alaily and M. M. Mandour, "A comprehensive form for the protection of very short transmission lines," *Electric Power Systems Research*, Vol. 14, No. 3, 1988.
- [10] I. Sadinezhad and M. Joorabian, "A new adaptive hybrid neural network and fuzzy logic based fault classification approach for transmission lines protection," *IEEE International Conference on Power and Energy*, Sydney, December, 2008.
- [11] R. K. Agganval, J. Lorenzo and A. L. Orille, "Implementation and laboratory test of a fully integrated neural network based protection relay for high voltage transmission lines," *Developments in Power System Protection*, Vol. 1, 2004.
- [12] Z. Q. Bo, H. Y. Li, R. K. Agganval, A. T. Johns and P. J. Moore, "Noncommunication protection of transmission line based on genetic evolved neural network," *Developments in Power System Protection*, March 1997.
- [13] O. P. Malik, "Application of neural networks in transmission line protection," *Power Engineering Society General Meeting*, June 2007.
- [14] A. Oonsivilai and S. Saichoomdee, "Appliance of recurrent neural network toward distance transmission lines protection," *TENCON*, January 2009.
- [15] D. V. Coury and D. C. Jorge, "Artificial neural network approach to distance protection of transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, 1998.
- [16] W. Gang, H. Jiali, L. Yao, Y. Xiaodan and L. Zhongpu, "Neural network application in directional comparison carrier protection of EHV transmission lines," *Advances in Power System Control*, Vol. 1, November 1997.
- [17] U. Lahiri, A. K. Pradhan and S. Mukhopadhyaya, "Modular neural network-based directional relay for transmission line protection," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No 4, 2005.
- [18] M. Sanaye-Pasand and O. P. Malik, "High speed transmission system directional protection using an Elman network," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, 1998.
- [۱۹] فتحی، سیدی، بابایی، «الگوریتم جدید حفاظت واحد خطوط انتقال کوتاه بر اساس شبکه‌های عصبی»، پنجمین کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، دی‌ماه ۱۳۸۹
- [20] Zh. Y. Xu, G. Xu, L. Ran, S. Yu and Q. X. Yang, "A new fault-impedance algorithm for distance relaying on a transmission line," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, 2010.
- [21] R. H. Salim, M. Resener, A. D. Filomena, K. R. C. Oliveira and A. S. Bretas, "Extended fault-location formulation for power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 2, 2009.
- [22] G. Ziegler, *Numerical Distance Protection*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- [23] H. A. Darwish and M. Fikri, "Practical considerations for recursive dft implementation in numerical relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, 2007.
- [24] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2009.
- [25] *Network Protection & Automation Guide*, ALSTOM, 2011.
- همان‌گونه که از نتایج بدست آمده در جدول‌های ۱ الی ۳ مشاهده می‌شود، به جز حالت‌هایی که مقاومت خطا بسیار کم در نظر گرفته شده در بقیه موارد روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر دارای خطای کم‌تری است. البته باید این مورد را در نظر داشت که معمولاً حداقل مقاومت خطا در نتیجه وجود جرعه است که مقدار آن نیز در حدود ۵ اهم می‌باشد. بنابراین روش پیشنهاد شده در مقایسه با دو روش پیشین، در عمل عملکرد مناسب‌تری دارد.
- روش پیشنهاد شده نیاز به کانال مخابراتی برای برقراری ارتباط بین پست‌های ابتدا و انتهای خط انتقال ندارد. ولتاژ و جریان انتهای خط انتقال با استفاده از مقادیر ولتاژ و جریان ابتدای خط انتقال تخمین زده می‌شوند. در نتیجه مشکلات ناشی از خطا در ارسال اطلاعات یا خطای خود کانال مخابراتی که در روش‌های جریانی وجود دارد، در روش پیشنهادی وجود نخواهد داشت.
- با افزایش مقاومت خطا، دقت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر بیشتر می‌شود. چرا که در این حالت افت ولتاژ روی امپدانس خط انتقال کوتاه، کم‌تر می‌شود. در نتیجه ولتاژ ابتدای خط انتقال که برابر ولتاژ انتهای آن فرض شده، دارای خطای کم‌تری است. لذا افزایش مقاومت خطا باعث بهبود عملکرد روش پیشنهادی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای اصلاح عملکرد رله دیستانس در حفاظت خطوط انتقال کوتاه مطرح شد. این روش با استفاده از اطلاعات ولتاژ پیش از وقوع خطا و هم‌چنین جریان حین اتصال کوتاه، تخمینی از ولتاژ و جریان انتهای خط انتقال انجام می‌دهد و سپس با استفاده از این اطلاعات محل خطا را تخمین می‌زند. تقریب‌های به کار رفته در این روش و عدم نیاز به ولتاژ حین اتصال کوتاه، کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مشابه را افزایش می‌دهد. روش پیشنهاد شده برای مقاومت خطاهای تا ۲۰ اهم نسبت به سایر روش‌های مشابه در بهبود عملکرد رله‌های دیستانس خطوط انتقال کوتاه، پاسخ مناسب‌تری دارد.

مراجع

- [1] H. Seyedi and L. Behroozi, "New distance relay compensation algorithm for double-circuit transmission line protection," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 5, No. 10, 2011.
- [2] W. A. Elmore, *Protective Relaying Theory and Applications*, Second Edition, ABB Power T&D, 1994.
- [3] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, *Power System Relaying*, Third Edition, Wiley 2008.
- [4] GER-2681B, "Phase comparison relaying," GE Publication.
- [5] GER3735, "Relaying short lines," GE Publication.
- [6] S. Dambhare, S. A. Soman and M. C. Chandorkar, "Adaptive current differential protection schemes for transmission line protection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 4, 2009.
- [7] E. Rosolowski, J. Izykowski and M. M. Saha, "Fault location algorithm for use with current differential protective relays of double-circuit line", *IEEE Bucharest Power Tech*, June 2009.

زیرنویس

- ¹ Source to Line Impedance Ratio (SIR)
- ² Phase Comparison
- ³ Current Differential
- ⁴ Fault Detector