فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال نیرو با سه پایانه در حوزه زمان با استفاده از اندازه‌گیریهای همزمان و مدل گسترده خط انتقال

عباداله کامیاب [۱] محمد حسین جاویدی [۲] جواد ساده [۳]

۱- دانشجوی دکتری گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران و
محقق معاونت بهره‌برداری برق منطقه‌ای خراسان- مشهد- ایران
ebadkamyab@yahoo.com
۲- دانشیار- گروه برق- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران
javidi@ferdowsi.um.ac.ir ,
۳- استادیار گروه برق- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران
sadeh@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده: روشهای فاصله‌یابی خطا با استفاده از ولتاژها و جریانهای یک طرف خط انتقال برای سیستمهای با سه پایانه و بیشتر کاربردی ندارند. تاکنون روشهای مختلفی جهت حل مسئله فاصله‌یابی خط ا در خطوط با چند پایانه ارائه شده که عمدتاً از مدل های فشرده و یا مدل گسترده حوزه فرکانس خط انتقال استفاده شده است. برای حل مسئله فاصله یابی خطا در این خطوط قبل از تعیین فاصله تا محل خطا بایستی روشی جهت تعیین بخش خطا دار ارائه گردد. در این مقاله روشی برای تعیین بخش خطادار خط انتقال و همچنین الگوریتمی برای فاصله یابی محل خطا با استفاده از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان ارائه شده است که در آن پنجره اطلاعاتی مورد نیاز برای اجرای الگوریتم، پنجره ای کوتاهتر از نیم سیکل می‌باشد. در این روش اطلاعات هر سه پایانه برای اجرای الگوریتم مورد نیاز است. روش پیشنهادی به مقاومت و نوع خطا وابسته نبوده و زاویه شروع خطا، جریان بار و امپدانس منابع تاثیری بر روی دقت آن ندارند. همچنین نیازی به فیلتر کردن مولفه DC میراشونده و مولفه-های فرکانس بالای موجود در شکل موجهای ولتاژ و جریان وجود ندارد. شبیه سازی یک سیستم قدرت نمونه توسط نرم‌افزار EMTP/ATP در شرایط عملکردی متفاوت و استفاده از داده‌های حاصل در محیط نرم‌افزار MATLAB برای اجرای الگوریتم صحت و دقت این روش را تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: خطوط انتقال سه پایانه، حفاظت خطوط انتقال، فاصله‌یابی خطا، تعیین قسمت خطادار، مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۵/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۸۷/۵/۱۴
نام نویسنده مسئول : عباداله کامیاب
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - مشهد - انتهای خیابان دکتر بهشتی - بلوار ذکریا - انتهای پارس جنوبی - مجتمع برق منطقه‌ای خراسان

Archive of SID
www.SID.ir

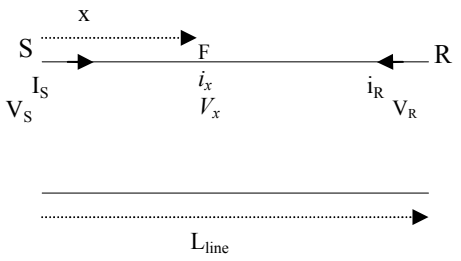
۱- مقدمه:

خطوط انتقال نیرو مانند همه تجهیزات دیگر سیستم قدرت در معرض انواع خطاها قرار دارند. شایع‌ترین نوع خطا روی خطوط انتقال نیرو اتصال کوتاه‌هائی هستند که به دلایل مختلف بوجود می‌آیند. از آنجایی که خطوط انتقال نیرو در پهنه وسیعی گسترده شده اند، به کارگیری روشی و یا استفاده از دستگاههائی که به کمک آنها بتوان محل خطا را با سرعت و دقت کافی تعیین نمود، ضروری به نظر میرسد. این وسایل را فاصله یابهای خطا و الگوریتمهای استفاده شده در آنها را الگوریتمهای فاصله‌یابی خطا می‌نامند. تاکنون الگوریتمهای متعددی برای فاصله‌یابی خطا ارائه شده که در آنها از اطلاعات یک طرف و یا طرفین خط انتقال استفاده گردیده است[۱۲-۱]. در این روشها از مدلهای مختلف خط انتقال استفاده شده است. از میان این روشها، آنهایی که از اطلاعات ولتاژ و جریان یکطرف خط انتقال استفاده می کنند، در خطوط انتقال با انشعابهای میانی کاربرد ندارند. جهت حل مسئله فاصله‌یابی خطا در این خطوط روش های مختلفی ارائه شده که در آنها عمدتاً از مدلهای فشرده و یا مدل گسترده خط انتقال در حوزه فرکانس استفاده شده است[۷-۱]. به طور نمونه آقای Girgis در مرجع [۱] برای حل مسئله فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال با سه پایانه روشی ارائه نموده که در آن اطلاعات همزمان و غیرهمزمان پایانه‌ها بکار گرفته شده است. در مرجع [۲] جهت حل مسئله فاصله یابی خطا در خطوط دو مداره با سه پایانه، اختلاف جریانهای متناظر دو مدار به عنوان داده های ورودی استفاده شده است. در دو روش اخیر از مدل فشرده خط انتقال استفاده شده است. آقای Lin [۳] با استفاده از اطلاعات دو پایانه و با فرض تولید در پایانه سوم به کمک مدل گسترده خط انتقال در حوزه فرکانس، روشی را برای فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال با سه پایانه پیشنهاد داده است. همچنین در مرجع [۴] با استفاده از اطلاعات هر سه پایانه و مدل گسترده حوزه فرکانس، روش ارائه شده در مرجع [۵] جهت فاصله‌یابی خطا به خطوط انتقال با سه پایانه تعمیم داده شده است. الگوریتمهایی که در آنها به منظور فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال، از مدل فشرده خط انتقال استفاده گردیده، در خطوط بلند و دارای انشعاب به دلیل صرفنظر کردن از اثر خازنی خط دارای دقت کافی نمی‌باشند. همچنین روشهایی که در آنها از مدل گسترده خط انتقال در حوزه فرکانس استفاده می‌گردد، به دلیل نیاز به محاسبه فازورهای ولتاژ و جریان و نیز حذف مولفه dc میرا شونده در شکل موجها که احتمال خطا در محاسبه آن وجود دارد، در تعیین فاصله تا محل خطا دارای خطای زیاد می‌باشند[۱۱].

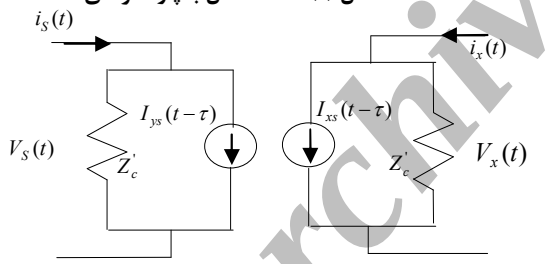
در این مقاله با استفاده از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان[۱۳] روشی برای تعیین بخش خطادار و فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال با سه پایانه ارائه شده است. این روش از اطلاعات همزمان ولتاژها و جریانهای هر سه پایانه به عنوان داده‌های ورودی استفاده می‌کند. با توجه به پیشرفت تکنولوژی مخابرات، اطلاعات به راحتی می تواند برای انجام محاسبات به کامپیوتر مرجع ارسال گردد و همزمان کردن اطلاعات نیز توسط سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) قابل انجام بوده، ضمن اینکه روش محاسباتی نیز برای همزمان نمودن اطلاعات غیر همزمان در مرجع [۱] بیان شده است. از مزایای روش پیشنهادی عدم حساسیت روش به مقدار مقاومت خطا و زاویه شروع خطا می‌باشد. همچنین پنجره اطلاعاتی مورد نیاز این الگوریتم کمتر از نیم سیکل می‌باشد. از مزایای بر جسته این روش، عدم نیاز به الگوریتمی جهت تشخیص نوع خطا در اجرای روش پیشنهادی می‌باشد.

۲- مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان و تبدیل مودال

شکل (۱) خط انتقال تکفاز با پارامترهای گسترده و شکل (۲) مدل گسترده بخش SF از آن را در حوزه زمان نشان می‌دهد [۱۲]. در این شکل S و R به ترتیب نشان دهنده ابتدا و انتهای خط و F نقطه‌ای دلخواه به فاصله x از خط را نشان می‌دهد که اتصالی در آن رخ داده است.



شکل (۱): خط انتقال با پارامترهای



شکل (۲): مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان بین پایانه S و محل خطا

به‌کمک شکل (۲) می‌توان معادلات زیر را بدست آورد:

$$i_S(t)=\frac{1}{Z_c'}V_S(t)+I_{ys}(t-\tau) \quad (۱)$$

$$i_x(t)=\frac{1}{Z_c'}V_x(t)+I_{xS}(t-\tau) \quad (۲)$$

در معادلات فوق منابع جریان وابسته I_{xs} و I_{ys} به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I_{ys}(t-\tau)=-\frac{R'/4}{Z_c'^2}[V_S(t-\tau)+Z_c''i_S(t-\tau)] -\frac{Z_c}{Z_c'^2}[V_x(t-\tau)+Z_c''i_x(t-\tau)] \quad (۳)$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$I_{xs}(t-\tau) = -\frac{R'/4}{Z_c'^2}[V_x(t-\tau) + Z_c'' i_x(t-\tau)] - \frac{Z_c}{Z_c'^2}[V_S(t-\tau) + Z_c'' i_S(t-\tau)] \quad (۴)$$

بطوریکه:

τ: زمان سیر موج از S به F

Z_c: امپدانس مشخصه خط انتقال

R': مقاومت خط از S تا F

همچنین داریم:

$$Z_c' = Z_c + R'/4$$

$$Z_c'' = Z_c - R'/4$$

۳- مرور الگوریتم فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال با دو پایانه

از آنجا که الگوریتم فاصله‌یابی ارائه شده در این مقاله تعمیمی از روش ارائه شده در مرجع[۹] می‌باشد، خلاصه‌ای از روش پیشنهادی این مرجع که شامل خطاهای متقارن و نامتقارن می‌باشد در ادامه ارائه شده است.

۳-۱- خطاهای سه فاز متقارن

به منظورفاصله یابی اینگونه خطاها، ابتدا با حذف i_x از معادلات (۱) تا (۴) رابطه زیر بدست می آید:

$$V_{xS}(t) = (Z_c'^2[V_S(t+\tau) - Z_c' i_S(t+\tau)] + Z_c''^2[V_S(t-\tau) + Z_c'' i_S(t-\tau)] - \frac{Z_c' R'}{4}[\frac{R'/2}{Z_c'}V_S(t) + 2Z_c'' i_S(t)]) \Big/ 2Z_c^2 \quad (۵)$$

در رابطه فوق، $V_{xS}(t)$ ولتاژ محل خطا است که به کمک اطلاعات پایانه S محاسبه شده است.

به روش مشابه ولتاژ نقطه خطا بصورت تابعی از ولتاژ و جریان طرف R بدست می‌آید.

$$V_{xR}(t) = (Z_{Rc}'^2[V_R(t+T-\tau) - Z_{Rc}' i_R(t+T-\tau)] + Z_{Rc}''^2[V_R(t-T+\tau) + Z_{Rc}'' i_R(t-T+\tau)] - \frac{Z_{Rc}' R_R'}{4}[\frac{R_R'/2}{Z_{Rc}'}V_R(t) + 2Z_{Rc}'' i_R(t)]) \Big/ 2Z_c^2 \quad (۶)$$

پارامترها در معادلات فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند :

T: زمان انتشار موج از S به R

R_R': مقاومت خط از R تا F

همچنین داریم:

$$Z_{Rc}' = Z_c + R_R'/4$$

$$Z_{Rc}'' = Z_c - R_R'/4$$

به دلیل پیوستگی ولتاژ در طول خط انتقال، با مساوی قرار دادن معادلات (۵) و (۶) می‌توان نوشت:

$$F(V_S, i_S, V_R, i_R, t, \tau) = 0 \quad (۷)$$

بطوریکه:

$$F = \{Z_c'^2[V_S(t+\tau) - Z_c' i_S(t+\tau)] + Z_c''^2[V_S(t-\tau) + Z_c'' i_S(t-\tau)] - Z_c'\frac{R'}{4}[\frac{R'/2}{Z_c'}V_S(t) + 2Z_c'' i_S(t)] - (Z_{Rc}'[V_R(t+T-\tau) - Z_{Rc}' i_R(t+T-\tau)] + Z_{Rc}''[V_R(t-T+\tau) + Z_{Rc}'' i_R(t-T+\tau)] - Z_{Rc}'\frac{R_R'}{4}[\frac{R_R'/2}{Z_{Rc}'}V_R(t) + 2Z_{Rc}'' i_R(t)])\} \Big/ 2Z_c^2 \quad (۸)$$

فاصله تا محل خطا (x) در معادله (۸) نه تنها در زمان سیر موج τ نهفته است بلکه در متغیرهای R'، R_R'، Z_c'، Z_c''، Z_{Rc}' و Z_{Rc}'' نیز بطور صریح وجود دارد. برای محاسبه محل خطا در معادله فوق، ابتدا به گسسته سازی آن پرداخته و سپس با حل مسئله بهینه سازی زیر محل خطا را تعیین می‌نماییم:

$$\text{Min} \quad obj(p) = \underset{p}{Min}\sum_k F^2(V_S, i_S, V_R, i_R, k, p) \quad (۹)$$

در معادله فوق متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$p\Delta t = \tau$ و $k\Delta t = t$

Δt: زمان نمونه‌برداری

p, k: اعداد صحیح دلخواه

جهت اعمال روش پیشنهادی فاصله‌یابی خطا به خطاهای نامتقارن، از تبدیل شبکه نامتقارن به دو شبکه متقارن در مودهای یک و دو و شبکه مود صفر استفاده می‌گردد. این تبدیل در حوزه فرکانس همان تبدیل توالیها می‌باشد، که در حوزه زمان نمی‌توان از آن جهت تبدیل شبکه نامتقارن به سه شبکه متقارن استفاده نمود. در حوزه زمان جهت تبدیل شبکه نامتقارن به سه شبکه متقارن از تبدیل مودال استفاده می‌شود. برای خطوط جابجا شده، تبدیل زیر که به تبدیل کلارک معروف است برای تغییر حوزه از زمان به مودال استفاده می‌شود:

$$[M]^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & -1 & 0\\ 1 & 0 & -1\end{bmatrix}, \quad [M] = \begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & -2 & 1\\ 1 & 1 & -2\end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

$$g_{012}(t) = [M]^{-1} g_{abc} \quad (۱۱)$$

در معادله (۱۱)، g_{abc} و g_{012} توسط معادلات زیر تعریف میشوند :

$g_{012} = [g_0 \quad g_1 \quad g_2]^T$ و $g_{abc} = [g_a \quad g_b \quad g_c]^T$

بطوریکه g میتواند بردار ولتاژ یا جریان بوده و T عملگر ترانسپوز می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۲- خطاهای نامتقارن

در مرجع [۹] جهت اعمال روش به خطاهای نامتقارن بسته به نوع خطا با ترکیب مناسب ولتاژ و جریان فازها تابع بهینه سازی بدست می‌آید و با حل آن فاصله تا محل خطا محاسبه می‌گردد که با توجه به تفاوت سرعت موج در مودهای صفر و یک در اتصال کوتاه تک فاز به زمین باعث افزایش خطا می‌شود. در این مقاله، از این واقعیت که هر معادله مستقل در حوزه مودال از هر نظر مشابه معادله خط انتقال تکفاز می‌باشد [۱۲] استفاده شده و تابع بهینه‌سازی F در هر مود بطور مستقل تعریف می‌شود. معادلات (۵) و (۶) در حوزه مودال به صورت زیر می‌باشند:

$$V_{xS}^{(m)}(t)=(Z_{cm}^{'2}[V_S^{(m)}(t+\tau_m)-Z_{cm}^{'}i_S^{(m)}(t+\tau_m)] +Z_{cm}^{''2}[V_S^{(m)}(t-\tau_m)+Z_{cm}^{''}i_S^{(m)}(t-\tau_m)] -\frac{Z_{cm}^{'}R_m^{'}}{4}[\frac{R_m^{'}/2}{Z_{cm}^{'}}V_S^{(m)}(t)+2Z_{cm}^{''}i_s^{(m)}(t)])\Big/2Z_{cm}^2 \qquad (۱۲)$$

همچنین به طریق مشابه داریم :

$$V_{xR}^{(m)}(t)=(Z_{Rcm}^{'2}[V_R^{(m)}(t+T_m-\tau_m)-Z_{Rcm}^{'}i_R^{(m)}(t+T_m-\tau_m)] +Z_{Rrcm}^{''2}[V_R^{(m)}(t-T_m+\tau_m)+Z_{Rcm}^{''}i_R^{(m)}(t-T_m+\tau_m)] -\frac{Z_{Rcm}^{'}R_{Rm}^{'}}{4}[\frac{R_{Rm}^{'}/2}{Z_{Rcm}^{'}}V_R^{(m)}(t)+2Z_{Rcm}^{''}i_R^{(m)}(t)])\Big/2Z_{cm}^2 \qquad (۱۳)$$

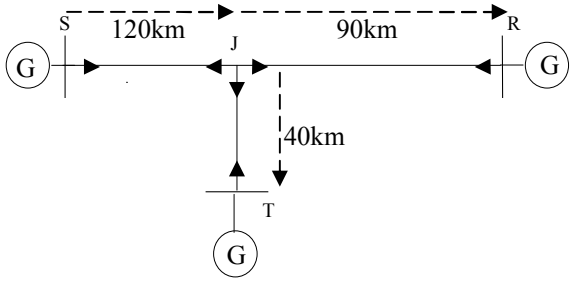
در معادلات بالا m نشان دهنده کمیات مودال است که سه مقدار ۰ و ۱ و ۲ را بخود می‌گیرد و V_{xS} و V_{xR} ولتاژهای نقطه‌ای از خط به فاصله x از پایانه S است که به ترتیب با استفاده از اطلاعات پایانه‌های S و R به دست آمده‌اند. بنابراین با استفاده از تبدیل سیستم سه فاز نامتقارن به سه سیستم متقارن، تابع F در مودهای مختلف به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned}F_m=&\{Z_{cm}^{'2}[V_S^{(m)}(t+\tau_m)-Z_{cm}^{'}i_S^{(m)}(t+\tau_m)]\\&+Z_{cm}^{''2}[V_S^{(m)}(t-\tau_m)+Z_{cm}^{''}i_S^{(m)}(t-\tau_m)]\\&-Z_{cm}^{'}\frac{R_m^{'}}{4}[\frac{R_m^{'}/2}{Z_{cm}^{'}}V_S^{(m)}(t)+2Z_{cm}^{''}i_S^{(m)}(t)]\\&-(Z_{Rcm}^{'}[V_R^{(m)}(t+T_m-\tau_m)-Z_{Rcm}^{'}i_R^{(m)}(t+T_m-\tau_m)]\\&+Z_{Rcm}^{''}[V_R^{(m)}(t-T_m+\tau_m)+Z_{Rcm}^{''}i_R^{(m)}(t-T_m+\tau_m)]\\&-Z_{Rcm}^{'}\frac{R_{Rm}^{'}}{4}[\frac{R_{Rm}^{'}/2}{Z_{Rcm}^{'}}V_R^{(m)}(t)+2Z_{Rcm}^{''}i_R^{(m)}(t)])\}/2Z_{cm}^2\end{aligned} \qquad (۱۴)$$

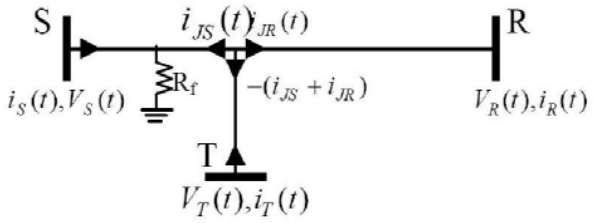
تعریف پارامترهای موجود در روابط فوق مشابه پارامترهای تعریف شده در معادلات (۵) و (۶) در مود m می‌باشند. در روش پیشنهادی، فاصله‌یابی خطا در مود صفر یا مود یک بطور مستقل انجام می‌گیرد. لازم به توضیح است که در خطاهای که اتصالی به زمین نیز وجود دارد تمامی سه مولفه مقدار خواهند داشت در صورتیکه در برخی از خطاها مثلاً اتصالی دو فاز، مود صفر غیر فعال خواهد بود. با توجه به اینکه مود یک در انواع اتصالیها وجود دارد، در صورت استفاده از مود یک در فاصله‌یابی خطا، تعیین نوع خطا در برآورد فاصله تا محل خطا ضروری نمی‌باشد.

۴- تعمیم روش فاصله‌یابی خطا به خطوط انتقال با سه پایانه

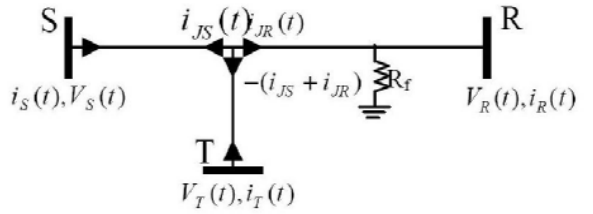
جهت اعمال الگوریتم به خطوط با سه پایانه، شبکه نمونه نشان داده شده در شکل (۳) را در نظر می‌گیریم. موقعیت های مختلف خطا در شکلهای (۴- الف) ، (۴- ب) و (۴- ج) نشان داده شده‌اند.



شکل (۳): شبکه سه پایانه مورد مطالعه



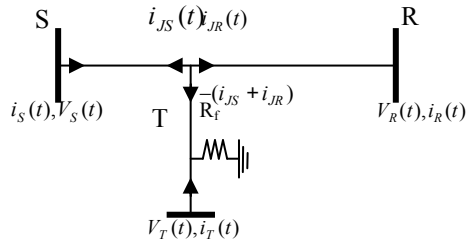
الف) خطا در بخش (S-J)



ب) خطا در بخش (R-J)

Archive of SID

www.SID.ir



ج) خطا در بخش (T-J)

شکل (۴): مکانهای مختلف خطا

فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال با سه پایانه طی دو مرحله به شرح زیر اجرا می‌گردد:

الف ـ تعیین بخش خطا دار

ب ـ تعیین فاصله تا محل خطا

در ادامه این دو مرحله بصورت جداگانه تشریح شده است.

۴-۱- تعیین بخش خطادار

برای تعیین بخش خطا دار، ابتدا ولتاژ نقطه انشعاب (J) را به کمک مدل گسترده خطوط S-J ، R-J و T-J در حوزه زمان بدون توجه به وقوع خطا بدست می‌آوریم. به طور نمونه ولتاژ نقطه J به وسیله اطلاعات پایانه S به صورت زیر بدست می‌اید:

$$V_{JS}(t)=(Z'^{2}_{cJS}[V_S(t+T_1)-Z'_{cJS}i_S(t+T_1)] +Z''^{2}_{cJS}[V_S(t-T_1)+Z''_{cJS}i_S(t-T_1)] -Z'_{cJS}[\frac{R'_{JS}/2}{Z'_{cJS}}V_S(t)+2Z'_{cJS}i_S(t)]) \Big/ 2Z_{c1}^2 \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق پارامترها بصورت زیر تعریف می‌شوند:

T_1: زمان سیر موج از S به J

Z_{c1}: امپدانس مشخصه خط S-R

R'_{JS}: مقاومت خط از S تا J

$$Z'_{cJS}=Z_{c1}+R'_{JS}/4$$

$$Z''_{cJS}=Z_{c1}-R'_{JS}/4$$

روابط مشابهی را می‌توان جهت محاسبه ولتاژ نقطه J به کمک اطلاعات موجود در پایانه های R و T نیز بدست آورد.

حال توابع معیار زیر را در نظر می‌گیریم:

$$X_1=\int |V_{JS}(t)-V_{JR}(t)|dt \quad (۱۶)$$

$$X_2=\int |V_{JS}(t)-V_{JT}(t)|dt \quad (۱۷)$$

$$X_3=\int |V_{JR}(t)-V_{JT}(t)|dt \quad (۱۸)$$

در صورتیکه خطائی در سیستم رخ نداده باشد، نتیجه این سه معیار عددی نزدیک به صفر می‌باشد زیرا تفاضل ولتاژ یک نقطه از خط (نقطه انشعاب J) می‌باشد که به کمک اطلاعات دو پایانه متفاوت حاصل شده است. در صورتیکه در یکی از بخشهای سه گانه خطایی رخ داده باشد، تنها یکی از این سه انتگرال مقدار صحیح را نشان خواهد داد و دو معیار دیگر مقادیر نسبتاً بزرگی را نشان می‌دهند. به عنوان مثال اگر در بخش S-J خطائی رخ دهد، محاسبه ولتاژ J به کمک اطلاعات پایانه S (V_{JS}) با خطا همراه بوده در صورتیکه می‌توان ولتاژ J را به کمک دو پایانه دیگر به درستی محاسبه کرد. در این شرایط معیار X_3 که V_{JS} در آن حضور ندارد بایستی مقدار کوچکی داشته باشد در صورتیکه دو معیار دیگر X_1 و X_2 مقادیر بزرگی را دارند. بدین صورت می‌توان توسط الگوریتمی پس از محاسبه این سه تابع معیار، بخش خطادار را تعیین کرد. با این توضیحات در صورتیکه بین این سه تابع معیار، X_1 حداقل باشد، بخش خطادار J-T ، اگر X_2 حداقل باشد، بخش خطادار J-R و نهایتاً اگر X_3 حداقل باشد، بخش خطادار J-S تشخیص داده می‌شود. در ادامه، این الگوریتم در شرایط مختلف از نظر موقعیت وقوع خطا، مقاومتهای مختلف و زوایای شروع خطای متفاوت بررسی و در تمامی شرایط پاسخ مطلوبی حاصل شده است.

۴-۲ - تعیین محل خطا

برای تعیین فاصله تا محل خطا پس از تعیین بخش خطادار، با تبدیل شبکه با سه پایانه به شبکه‌ای با دو پایانه، الگوریتم فاصله‌یابی خطا را ادامه می‌دهیم. برای توضیح بیشتر فرض کنید که خطا در بخش R-J اتفاق افتاده باشد. ابتدا ولتاژ نقطه J را با استفاده از مدل گسترده خط انتقال J-T یا J-S محاسبه می‌کنیم (رابطه ۱۵)، سپس به‌منظور محاسبه جریان $i_{JR}(t)$ جریانهای $i_{JS}(t)$ و $i_{JT}(t)$ را با استفاده از مدل گسترده حوزه زمان خطوط سالم T-J و S-J توسط روابط زیر محاسبه می‌نماییم:

$$i_{JS}(t)=(Z'_{cJS}[V_S(t+T_1)-Z'_{cJS}i_S(t+T_1)] -Z''_{cJS}[V_S(t-T_1)+Z''_{cJS}i_S(t-T_1)] -\frac{R'_{JS}}{4}[2V_S(t)-\frac{R'_{JS}}{2}i_S(t)]) \Big/ 2Z_{c1}^2 \quad (۱۹)$$

$$i_{JT}(t)=(Z'_{cjT}[V_T(t+T_3)-Z'_{cJT}i_T(t+T_3)] -Z''_{cJT}[V_T(t-T_3)+Z''_{cJT}i_T(t-T_3)] -\frac{R'_{JT}}{4}[2V_T(t)-\frac{R'_{JT}}{2}i_T(t)]) \Big/ 2Z_{c3}^2 \quad (۲۰)$$

در روابط فوق پارامترها بصورت زیر تعریف میشوند:

T_3: زمان سیر موج از T به J

R'_{JT}: مقاومت بخش S-J و T-J

Z_{c3}: امپدانس مشخصه خط T-J

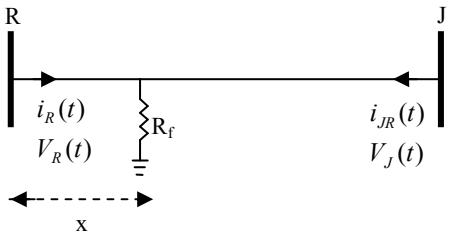
$$Z'_{cJT}=Z_{c3}+R'_{JT}/4$$

$$Z''_{cJT}=Z_{c3}-R'_{JT}/4$$

باتوجه به مراحل طی شده در بالا، شبکه با سه پایانه شکل (۳) به شبکه با دو پایانه شکل (۵) تبدیل می گردد:

Archive of SID

www.SID.ir



شکل(۵): تبدیل شبکه با سه پایانه به شبکه با دو پایانه

در این شکل $i_{JR}(t) = -(i_{JS}(t) + i_{JT}(t))$ است و $i_{JS}(t)$ و $i_{JT}(t)$ از روابط (۱۹) و (۲۰) تعیین می‌شوند. در این مرحله با استفاده از الگوریتم فاصله‌یابی خطا جهت خطوط با دو پایانه که در بخش ۳ تشریح شده است، محل خطا مشخص می‌شود. روش مشابهی را می‌توان برای وقوع خطا در بخشهای S-J و T-J بکار برد.

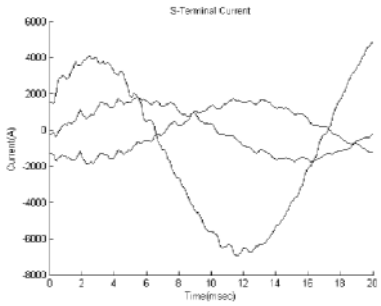
۵- ارزیابی روش پیشنهادی

در این بخش برای اطمینان از صحت و دقت روش پیشنهادی، نتایج برخی از شبیه‌سازیهای انجام شده بر روی سیستم قدرت شکل (۳) که مشخصات آن در بخش ضمیمه آمده است، ارائه می‌گردد. شبیه‌سازی‌های متعددی با انواع اتصالیها، مقاومتهای مختلف خطا، زوایای مختلف وقوع خطا و مکانهای مختلف خطا انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در انواع اتصالیها بخش خطا دار با استفاده از معیارهای ذکر شده به درستی تشخیص داده شده است و برآورد فاصله تا محل خطا به نوع اتصالی، مقاومت خطا و زاویه خطا بستگی ندارد. همچنین با توجه به اینکه در بدست آوردن تابع معیارها از مشخصات و ثوابت منابع استفاده نشده است تغییر ساختار شبکه قدرت و تغییر مدل تونن شبکه هیچ تاثیری بر الگوریتم نخواهد داشت. در شبیه‌سازیهای انجام شده فاصله بین نمونه‌ها ۵ میکروثانیه معادل فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. در صورتیکه نتوان در عمل به چنین فرکانس نمونه‌برداری دست پیدا کرد، می‌توان به کمک روش درونیابی، فرکانس نمونه‌برداری را به صورت مجازی و تا حد مورد نیاز افزایش داد[۱۴و۱۰].

۵-۱- خطا در بخش (S-J)

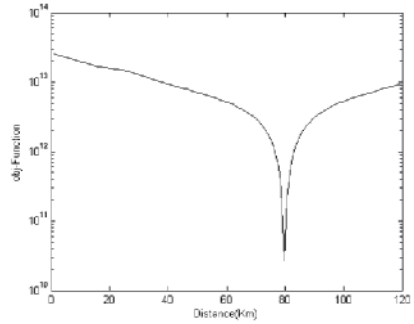
فرض کنید یکبارخطای تکفاز به زمین (SLG) با مقاومت خطای ۱۰ اهم و زاویه شروع خطای صفر درجه و بار دیگر خطای دو فاز با مقاومت خطای ۱ اهم و زاویه شروع خطای ۹۰ درجه به فاصله ۸۰ کیلومتراز پایانه S به وقوع پیوسته باشد. به عنوان نمونه ولتاژها و جریانهای پایانه S در حالت خطای تکفاز به زمین در شکل (۶) نشان داده شده است. شکل (۷) تابع بهینه سازی obj تعریف شده در معادله (۱۴) را به ترتیب برای مودهای صفر و یک خطای تکفاز و برای مود یک خطای دو فاز نشان می‌دهد.

الف) ولتاژها

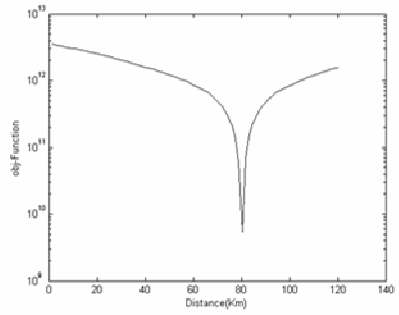


ب) جریان‌ها

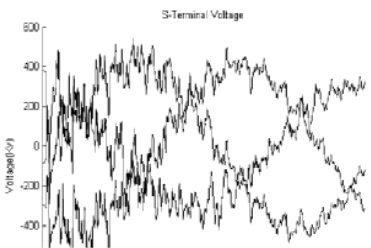
شکل (۶): ولتاژها و جریانهای سه فاز پایانه S



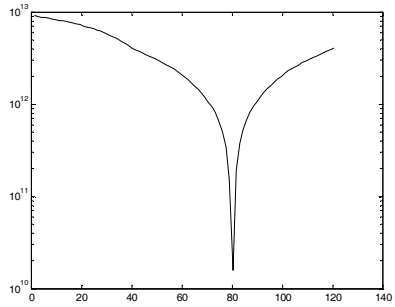
الف) استفاده از مود صفر شکل موجها با فرض خطای تکفاز



ب) استفاده از مود یک شکل موجها با فرض خطای تکفاز



Archive of SID
www.SID.ir



ج) استفاده از مود یک شکل موجها با فرض خطای دو فاز

شکل(۷): تابع هدف تعریف شده در معادله (۱۴) برای خطا در بخش S-J

همچنانکه دربخش قبل بیان شد با استفاده از مودهای مختلف، پس از تعیین بخش خطادار و محاسبه ولتاژها و جریانهای مورد نیاز الگوریتم، مسئله بهینه سازی حل گردیده است. با محاسبه تابع معیارهای تعیین بخش خطا ، بخش خطادار بدرستی تشخیص داده شده است. با استفاده از مود یک فاصله تا محل خطا در هر دو وضعیت خطا ۸۰/۳۲ کیلومتر برآورد شده است که معادل ۰/۱۵ درصد خطا در محاسبه مکان اتصالی است. جهت برآورد دقت محاسبات فاصله‌یابی خطا توسط روش پیشنهادی، برای خطا در بخش $S\text{-}J$ ، مکانهای متفاوت وقوع خطا در نظر گرفته شده و با مود یک آزمایش شده است که بخشی از نتایج در جداول (۳) برای دو نوع خطای ذکر شده ارائه گردیده است. با محاسبه تابع معیارها و حداقل شدن تابع معیار X_3 به درستی بخش خطادار، $S\text{-}J$ تشخیص داده شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در صورت بروز خطا در نزدیکی نقطه انشعاب، الگوریتم بدرستی بخش خطادار و فاصله تا محل خطا را محاسبه می‌کند (ردیف ششم از جداول ۳).

جدول(۳): تشخیص بخش خطادار و تعیین محل خطا

الف) خطای تکفاز به زمین در بخش S-J با مقاومت خطای ۱۰ اهم و زاویه شروع خطای صفر درجه

درصد خطا	برآورد فاصله	تابع معیار X_3	تابع معیار X_2	تابع معیار X_1	فاصله خطا
۰/۲۶	۵/۵۴	۲/۷۹	۴۲۶	۴۲۶	۵
۰/۳۷	۲۰/۷۷	۲/۷۹	۳۱۵	۳۱۵	۲۰
۰/۰۸	۴۰/۱۶	۱/۹۶	۲۲۴	۲۲۴	۴۰
۰/۱۵	۸۰/۳۲	۲/۱۳	۱۵۵	۱۵۵	۸۰
۰/۰۲	۱۱۴/۹۵	۲/۸۲	۵۷	۵۷	۱۱۵
۰/۰۵	۱۱۹/۱۰	۷/۹۴	۴۵/۲۰	۴۱/۲۷	۱۱۹

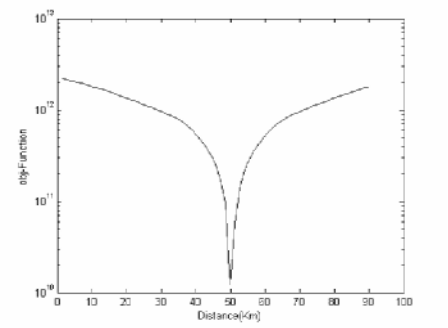
ب) خطای دوفاز در بخش S-J با مقاومت خطای ۱ اهم با زاویه شروع خطای ۹۰ درجه

درصد خطا	برآورد فاصله	تابع معیار X_3	تابع معیار X_2	تابع معیار X_1	فاصله خطا
۰/۲۶	۵/۵۴	۴/۲۱	۴۸۵/۴	۴۸۵/۱۷	۵
۰/۳۷	۲۰/۷۷	۴/۹۹	۳۹۱/۷	۳۹۱/۶۴	۲۰
۰/۰۸	۴۰/۱۶	۵/۵	۳۱۳/۵	۳۱۳/۸۶	۴۰
۰/۱۵	۸۰/۳۲	۵/۹۵	۲۹۰/۸	۲۹۰/۸۶	۸۰
۰/۰۲	۱۱۴/۹۵	۲/۸۲	۷/۹	۹۶/۲۵	۱۱۵
۰/۰۵	۱۱۹/۱۰	۶/۲۵	۳۱/۸	۲۹/۵۵	۱۱۹

۵-۲- خطا در بخش ($R\text{-}J$)

جهت بررسی دقت الگوریتم ارائه شده فرض کنید خطای تکفاز به زمین در فاصله ۵۰ کیلومتری از پایانه R در بخش ($R\text{-}J$) از سیستم رخ داده است. ضمن اینکه بخش خطادار به درستی بخش $R\text{-}J$ از خط انتقال تشخیص داده شده فاصله تا محل خطا ۴۹/۸۵ کیلومتر برآورد شده است که معادل ۰/۰۷ درصد خطا می‌باشد. شکل (۸) تابع معیار obj تعریف شده در معادله (۱۴) را در مود یک نشان می‌دهد.

جهت برآورد دقت روش پیشنهادی، این الگوریتم برای انواع اتصالیها و شرایط مختلف خطا برای خطا در بخش $R\text{-}J$، اجرا شده که بخشی از نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در این حالت تابع معیار X_2 حداقل مقدار را اختیار کرده است که نشان دهنده وقوع خطا در بخش $R\text{-}J$ می‌باشد. برای انواع خطاهای دیگر با زاویه شروع و مقاومت خطای متفاوت برآورد فاصله تا محل خطا مشابه حالت خطای تکفاز بدست آمده که در هر بار و در تمامی شرایط مطالعه شده با توجه به محاسبه تابع معیار تعیین بخش خطادار، بخش خطادار بدرستی تشخیص داده شده است. همچنانکه از این جدول مشاهده می‌شود، فاصله‌یابی خطا با دقت انجام شده به گونه‌ای که برای خطاهای رخ داده در بخش $R\text{-}J$ حداکثر خطا ۰/۲۶ درصد طول خط می‌باشد.



شکل(۸): تابع هدف تعریف شده در معادله (۱۴) با فرض خطا در بخش R-J

Archive of SID

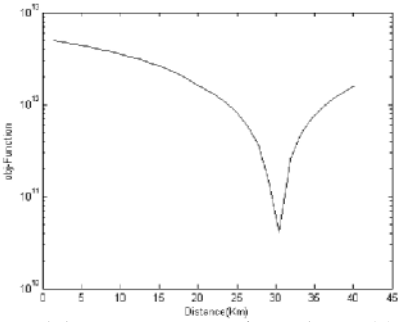
www.SID.ir

جدول(۴): تشخیص بخش خطادار و تعیین محل خطا برای خطای تکفاز به زمین در بخش R-J با مقاومت خطای ۱۰ اهم و زاویه شروع خطای صفر درجه

(درصد خطا	برآورد فاصله	تابع معیار X_3	تابع معیار X_2	تابع معیار X_1	فاصله خطا
۰/۲۶	۵/۵۴	۳۳۲	۷/۹۶	۳۳۲	۵
۰/۱۱	۱۵/۲۳	۳۰۰/۳۷	۷/۳۰	۳۰۰/۴۴	۱۵
۰/۲۲	۳۰/۴۷	۲۱۹/۳۰	۶/۸۰	۲۱۹/۳۷	۳۰
۰/۰۷	۴۹/۸۵	۱۷۸	۷/۵۷	۱۷۸	۵۰
۰/۲۴	۸۴/۴۸	۶۰	۸/۳۵	۶۰	۸۵

۵-۳- خطا در بخش (*T-J*)

به منظور بررسی صحت الگوریتم تعیین بخش خطادار و دقت روش پیشنهادی برای یافتن موقعیت اتصالی در شاخه انشعابی (بخش*T-J*)، حالات مختلفی از انواع اتصالیها با مقاومتهای مختلف و زوایای شروع خطای متفاوت شبیه‌سازیهای متعددی انجام شده است. به طور نمونه اگر خطای تکفازی در فاصله ۳۰ کیلومتری از پایانه T در این بخش رخ دهد، توابع معیار تشخیص بخش خطادار، به ترتیب مقادیر ۸/۶۲، ۱۴۳ و ۱۴۳ را خواهد داشت که طبق الگوریتم ارائه شده در بخش (۴-۱) بخش خطادار به درستی بخش *T-J* تشخیص داده می‌شود. در این شرایط تابع هدف ارائه شده در معادله (۱۴) با استفاده از تنها مود یک محاسبه گردیده که در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود مکان خطا ۳۰/۴۷ کیلومتر برآورد شده که نشان دهنده ۰/۲۲ درصد خطا است که دقت بالایی را ارائه می‌نماید. جهت بررسی میزان دقت الگوریتم در مکانهای مختلف دیگری نیز شبیه‌سازی تکرار و خلاصه‌ای از نتایج در جدول (۵) گردآوری شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌گردد که دقت الگوریتم در مکانهای متفاوت مناسب بوده به صورتیکه حداکثر خطا ۰/۳۲ درصد می‌باشد.



شکل(۹): تابع هدف تعریف شده در معادله (۱۴) با فرض خطا در بخش T-J

جدول (۵): تشخیص بخش خطادار و تعیین محل خطا برای خطای تکفاز به زمین در بخش T-J با مقاومت خطای ۱۰ اهم و زاویه شروع خطای صفر درجه

درصد خطا	برآورد فاصله	تابع معیار X_3	تابع معیار X_2	تابع معیار X_1	فاصله خطا
./۲۸	۴/۴۱	۱۳۶/۵۵	۱۳۶/۹۵	۴/۴۵	۵
۰/۱۵	۹/۶۹	۱۹۲	۱۹۲	۷/۹۲	۱۰
۰/۲۲	۳۰/۴۷	۱۴۳	۱۴۳	۸/۶۲	۳۰
۰/۳۲	۳۹/۶۸	۱۵/۳۲	۱۶/۶۱	۵/۵۵	۳۹

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای تعیین بخش خطادار و نیز الگوریتم فاصله یابی خطا برای خطوط انتقال با سه پایانه با استفاده از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان پیشنهاد شده است. مبنای این روش در تبدیل شبکه با سه پایانه به شبکه با دو پایانه پس از تشخیص بخش خطا دار و سپس حل مسئله فاصله یابی خطا می‌باشد. از آنجاییکه در این روش از مدل دقیق خط انتقال استفاده گردیده، فاصله یابی خطا با دقت بسیار خوبی انجام شده است به گونه‌ای که حداکثر خطای آن کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد. از مزایای روش پیشنهادی می توان به عدم تاثیر امپدانس منابع، جریان بار ، مقاومت خطا و زاویه شروع خطا بر دقت آن اشاره نمود. از دیگر مزایای این روش، نیاز به داده های زمانی کم (کمتر از نیم سیکل) و عدم نیاز به تشخیص نوع خطا می‌باشد، بنابراین حتی اگر رله های حفاظتی نوع خطا را به درستی تشخیص نداده باشند، فاصله تا محل خطا بدون هیچگونه مشکلی محاسبه خواهد شد. ضمن اینکه در تمامی شرایط بخش خطادار به درستی تعیین شده است.

پیوست:

$R_1(\Omega)$	۱/۳۱	$R_0(\Omega)$	۲/۳۳
$L_1(mH)$	۴۷/۷۵	$L_0(mH)$	۸۴/۶۷

ثوابت خط انتقال شبکه با سه پایانه:

(خط اصلی)

توالی صفر		توالی یک	
$r_0(\Omega/km)$	۰/۲۷۵	$r_1(\Omega/km)$	۰/۰۲۷۵
$l_0(mH/km)$	۳/۲۶۷۹۸	$l_1(mH/km)$	۱/۰۰۲۶۸
$c_0(\mu F/km)$	۰/۰۰۸۵	$c_1(\mu F/km)$	۰/۰۱۳

Archive of SID

www.SID.ir

(خط انشعابی)

توالی صفر		توالی یک	
$r_0(\Omega/km)$	۰/۰۴۶۱۲	$r_1(\Omega/km)$	۰/۰۱۵۳۷
$l_0(mH/km)$	۲/۶۵۷۴	$l_1(mH/km)$	۰/۸۸۵۸
$c_0(\mu F/km)$	۰/۰۰۴۳۵۵	$c_1(\mu F/km)$	۰/۰۱۳۰۶۵

مراجع:

[1] A.A. Girgis, D.G. Hart and W.L.Peterson "A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 98-107, Jan. 1992.

[2] T. Nagasawa , M. Abe, N. Otsuzuki, T. Emura. Y. Jikihara and M. Takeuchi, "Development of a New Fault Locator Algorithm for Multi – Terminal Two Parallel Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, pp. 1516-1537, July, 1992.

[3] Y.H. Lin and C.W. Liu, "A New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current Phasors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, pp. 452-459, April 2002.

[4] A. Kalam and A.T. Johns, "Accurate Fault Location Technique For Multi- Terminal EHV Lines", IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM 91, Nov. 1991, Hong Kong.

[5] J. Izykowski, "A Fault-Location Method for Application with Differential Relays of Three-Terminal Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No.4, pp.2099-2107, October, 2007.

[6] M.Fulczyk et.al, "New Method of Locating Faults on Three-Terminal Lines Equipped with Current Differential Relays", IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1- 8, June, 2007.

[7] A.O. Ibe and B.J. Cory, " Fault- Location Algorithm for Multiphase Power Lines," IEE Proc., Vol. 134, Pt. C, No.1, pp. 43-50, June, 1987.

[8] A.T. Johns and S. Jamali, "Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines", IEE Proc., Vol. 137, Pt. C, No. 6, pp. 395-402, Nov. 1990.

[9] J. Sadeh, A.M. Ranjbar, N. Hadjsaid and R. Feuillet, "Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 1027-1033, July, 2000.

[10] G. Song et.al, "Parallel Transmission Lines Fault Location Algorithm Based on Differential Component Net," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 4, pp. 2396 - 2406, October, 2005.

[11] B. Jeyasurya and M.A. Rahman, "Simulation of Transmission Line Fault Locators in a Personal Computer," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 24, pp. 299-302, March/April, 1991.

[12] E.G. Silveira and C.Pereira, "Transmission Line Fault-Location Using Two-Terminal Data Without Time Synchronization", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22 . No. 1, pp. 2099- 2107, Feb. 2007.

[13] H. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transient in Single and Multi Phase Networks", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 388- 399, Apr. 1969.

[۱۴] کامیاب، عباداله، **" فاصله‌یابی خطا در حوزه زمان برای خطوط دو و سه پایانه انتقال نیرو،"** پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد-ایران، بهمن ۱۳۸۲.

Archive of SID

www.SID.ir