

# فاصله یابی خطا در خطوط انتقال نیرو با سه پایانه در حوزه زمان با استفاده از اندازه گیریهای همزمان و مدل گسترده خط انتقال

عباداله کامیاب<sup>۱</sup>

محمد حسین جاویدی<sup>۲</sup>

جواد ساده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران و

محقق معاونت بهره برداری برق منطقه ای خراسان- مشهد- ایران

[ebadkamyab@yahoo.com](mailto:ebadkamyab@yahoo.com)

۲- دانشیار- گروه برق- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران

[javidi@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:javidi@ferdowsi.um.ac.ir)

۳- استادیار گروه برق- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی- مشهد- ایران

[sadeh@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:sadeh@ferdowsi.um.ac.ir)

**چکیده:** روشهای فاصله یابی 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 فاصله یابی خطا 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 خطا دار 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 می باشد. 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 امیدانس منابع تأثیری 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 نرم افزار EMTP/ATP در شرایط عملکردی متفاوت و استفاده از داده های حاصل در محیط نرم افزار MATLAB برای اجرای الگوریتم صحت و دقت این روش را تایید می کند.

**کلمات کلیدی:** خطوط انتقال سه پایانه، حفاظت خطوط انتقال، فاصله یابی خطا، تعیین قسمت خطا دار، 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 نویسنده مسئول: ایران - مشهد - انتهای خیابان دکتر بهشتی - بلوار ذکریا - انتهای پارس جنوبی - مجتمع برق منطقه ای خراسان

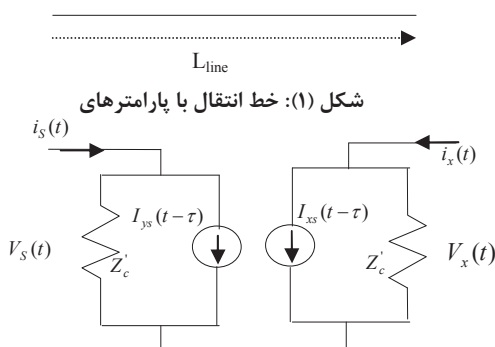
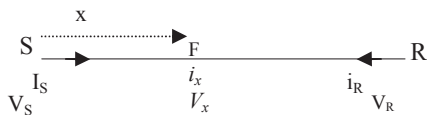
## ۱- مقدمه:

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 می باشد. همچنین پنجره اطلاعاتی مورد نیاز این الگوریتم کمتر از نیم سیکل می باشد. از مزایای بر جسته این روش، عدم نیاز به الگوریتمی جهت تشخیص نوع خطا در اجرای روش پیشنهادی می باشد.

## 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 می دهد [۱۲]. در این شکل S و R به ترتیب نشان دهنده ابتدا و انتهای خط و F نقطه ای دلخواه به فاصله X از خط را نشان می دهد که اتصال در آن رخ داده است.



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

به کمک شکل (۲) می توان معادلات زیر را بدست آورد:

$$i_S(t) = \frac{1}{Z_c} V_S(t) + I_{ys}(t-\tau) \quad (1)$$

$$i_x(t) = \frac{1}{Z_c} V_x(t) + I_{xs}(t-\tau) \quad (2)$$

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

$$I_{ys}(t-\tau) = -\frac{R'/4}{Z_c} [V_S(t-\tau) + Z_c'' i_S(t-\tau)] - \frac{Z_c}{Z_c'^2} [V_x(t-\tau) + Z_c'' i_x(t-\tau)] \quad (3)$$

خطوط انتقال نیرو مانند همه تجهیزات دیگر سیستم قدرت در معرض انواع خطاها قرار دارند. شایع ترین نوع خطا روی خطوط انتقال نیرو اتصال کوتاه هائی هستند که به دلایل مختلف بوجود می آیند. از آنجایی که خطوط انتقال نیرو در پهنه وسیعی گسترده شده اند، به کارگیری روشی و یا استفاده از دستگاههایی 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 فاصله یابی خطا می نامند. تاکنون الگوریتمهای متعددی برای فاصله یابی خطا ارائه شده که در آنها از اطلاعات یک طرف و یا طرفین خط انتقال استفاده گردیده است [۱۲-۱]. در این روشها از مدل های 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 فاصله یابی خطا در این خطوط روش های مختلفی ارائه شده که در آنها عمدتاً از مدل های 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 فاصله یابی خطا در خطوط انتقال با سه پایانه روشی ارائه نموده که در آن اطلاعات همزمان و غیرهمزمان پایانه ها 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 فاصله یابی 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 فاصله یابی خطا به خطوط انتقال با سه پایانه تکمیل داده شده است. الگوریتمهایی که در آنها به منظور فاصله یابی خطا در خطوط انتقال، از مدل فشرده خط انتقال استفاده گردیده، در خطوط بلند و دارای انشعاب به دلیل صرف نظر کردن از اثر خازنی خط دارای دقت کافی نمی باشند. همچنین روشهایی که در آنها از مدل گسترده خط انتقال در حوزه فرکانس استفاده می گردد، 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 می باشند [۱۱].

در این مقاله با استفاده از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان [۱۳] روشی برای تعیین بخش خطادار و فاصله یابی خطا در خطوط انتقال با سه پایانه ارائه شده است. این روش از اطلاعات همزمان ولتاژها و جریانهای هر سه پایانه به عنوان داده های ورودی استفاده می کند. با توجه به پیشرفت تکنولوژی مخابرات، اطلاعات به

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

$$F(V_S, i_S, V_R, i_R, t, \tau) = 0 \quad (7)$$

بطوریکه:

$$F = \{Z_c'^2 [V_S(t+\tau) - Z_c' i_S(t+\tau)] + Z_c''^2 [V_S(t-\tau) + Z_c'' i_S(t-\tau)] - Z_c' \frac{R'}{4} [\frac{R'}{Z_c'} V_S(t) + 2Z_c'' i_S(t)] - (Z_{Rc}' [V_R(t+T-\tau) - Z_{Rc}' i_R(t+T-\tau)] + Z_{Rc}'' [V_R(t-T+\tau) + Z_{Rc}'' i_R(t-T+\tau)] - Z_{Rc}' \frac{R_R'}{4} [\frac{R_R'}{Z_{Rc}'} V_R(t) + 2Z_{Rc}'' i_R(t)]\} / 2Z_c'^2 \quad (8)$$

فاصله تا محل خطا ( $x$ ) در معادله (۸) نه تنها در زمان سیر موج  $\tau$  نهفته است بلکه در متغیرهای  $R'$ ,  $R_R'$ ,  $Z_c'$ ,  $Z_{Rc}'$ ,  $Z_c''$  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:

$$\text{Min } obj(p) = \text{Min} \sum_p F^2(V_S, i_S, V_R, i_R, k, p) \quad (9)$$

در معادله فوق متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$p\Delta t = \tau \text{ و } k\Delta t = t$$

زمان نمونه برداری  $\Delta t$ :

اعداد صحیح دلخواه  $p, k$ :

جهت اعمال روش پیشنهادی فاصله یابی خطا به خطاهای نامتقارن، از تبدیل شبکه نامتقارن به دو شبکه متقارن در مدهای 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:

$$[M]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, [M] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$g_{012}(t) = [M]^{-1} g_{abc} \quad (11)$$

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

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

بطوریکه  $g$  میتواند بردار ولتاژ یا جریان بوده و  $T$  عملگر ترانسپوز می-باشد.

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

بطوریکه:

زمان سیر موج از  $S$  به  $F$   $\tau$ :

امپدانس مشخصه خط انتقال  $Z_c$ :

مقاومت خط از  $S$  تا  $F$   $R'$ :

همچنین داریم:

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

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

### ۳- مرور الگوریتم فاصله یابی خطا در خطوط انتقال با دو پایانه

از آنجا که الگوریتم فاصله یابی 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 منظور فاصله یابی اینگونه خطاها، ابتدا با حذف  $i_x$  از معادلات (۱) تا (۴) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{xs}(t) = (Z_c'^2 [V_S(t+\tau) - Z_c' i_S(t+\tau)] + Z_c''^2 [V_S(t-\tau) + Z_c'' i_S(t-\tau)] - \frac{Z_c' R'}{4} [\frac{R'}{Z_c'} V_S(t) + 2Z_c'' i_S(t)]) / 2Z_c'^2 \quad (5)$$

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.

$$V_{xR}(t) = (Z_{Rc}'^2 [V_R(t+T-\tau) - Z_{Rc}' i_R(t+T-\tau)] + Z_{Rc}''^2 [V_R(t-T+\tau) + Z_{Rc}'' i_R(t-T+\tau)] - \frac{Z_{Rc}' R_R'}{4} [\frac{R_R'}{Z_{Rc}'} V_R(t) + 2Z_{Rc}'' i_R(t)]) / 2Z_{Rc}'^2 \quad (6)$$

پارامترها در معادلات فوق به صورت زیر تعریف می‌شوند:

زمان انتشار موج از  $S$  به  $R$   $T$ :

مقاومت خط از  $R$  تا  $F$   $R_R'$ :

همچنین داریم:

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

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

### 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 می آید و با حل آن فاصله تا محل خطا محاسبه می گردد که با توجه به تفاوت سرعت موج در مودهای صفر و یک در اتصال کوتاه تک فاز به زمین باعث افزایش خطا می شود. در این مقاله، از این واقعیت که هر معادله مستقل در حوزه مودال از هر نظر مشابه معادله خط انتقال تکفاز می باشد [۱۲] استفاده شده و تابع بهینه سازی F در هر مود بطور مستقل تعریف می شود. معادلات (۵) و (۶) در حوزه مودال به صورت زیر می باشند:

$$V_{xS}^{(m)}(t) = (Z_{cm}^2 [V_S^{(m)}(t + \tau_m) - Z_{cm}' i_S^{(m)}(t + \tau_m)] + Z_{cm}^2 [V_S^{(m)}(t - \tau_m) + Z_{cm}'' i_S^{(m)}(t - \tau_m)] - \frac{Z_{cm}' R_m'}{4} \left[ \frac{R_m'}{Z_{cm}'} V_S^{(m)}(t) + 2Z_{cm}'' i_S^{(m)}(t) \right]) / 2Z_{cm}^2 \quad (12)$$

همچنین به طریق مشابه داریم:

$$V_{xR}^{(m)}(t) = (Z_{Rcm}^2 [V_R^{(m)}(t + T_m - \tau_m) - Z_{Rcm}' i_R^{(m)}(t + T_m - \tau_m)] + Z_{Rcm}^2 [V_R^{(m)}(t - T_m + \tau_m) + Z_{Rcm}'' i_R^{(m)}(t - T_m + \tau_m)] - \frac{Z_{Rcm}' R_{Rm}'}{4} \left[ \frac{R_{Rm}'}{Z_{Rcm}'} V_R^{(m)}(t) + 2Z_{Rcm}'' i_R^{(m)}(t) \right]) / 2Z_{Rcm}^2 \quad (13)$$

در معادلات بالا  $m$  نشان دهنده کمیت مودال است که سه مقدار ۰، ۱ و ۲ را بخود می گیرد و  $V_{xS}$  و  $V_{xR}$  ولتاژهای نقطه ای از خط به فاصله  $x$  از پایانه S است که به ترتیب با استفاده از اطلاعات پایانه های S و R به دست آمده اند. بنابراین با استفاده از تبدیل سیستم سه فاز نامتقارن به سه سیستم متقارن، تابع F در مودهای مختلف به صورت زیر در می آید:

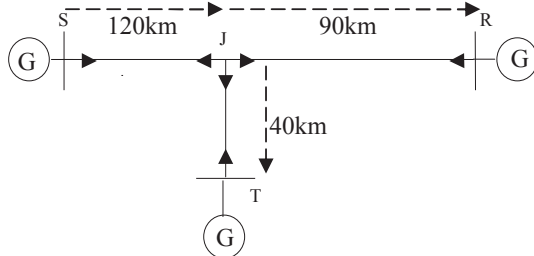
$$F_m = \{ Z_{cm}^2 [V_S^{(m)}(t + \tau_m) - Z_{cm}' i_S^{(m)}(t + \tau_m)] + Z_{cm}^2 [V_S^{(m)}(t - \tau_m) + Z_{cm}'' i_S^{(m)}(t - \tau_m)] - Z_{cm}' \frac{R_m'}{4} \left[ \frac{R_m'}{Z_{cm}'} V_S^{(m)}(t) + 2Z_{cm}'' i_S^{(m)}(t) \right] - (Z_{Rcm}' [V_R^{(m)}(t + T_m - \tau_m) - Z_{Rcm}' i_R^{(m)}(t + T_m - \tau_m)] + Z_{Rcm}'' [V_R^{(m)}(t - T_m + \tau_m) + Z_{Rcm}'' i_R^{(m)}(t - T_m + \tau_m)] - Z_{Rcm}' \frac{R_{Rm}'}{4} \left[ \frac{R_{Rm}'}{Z_{Rcm}'} V_R^{(m)}(t) + 2Z_{Rcm}'' i_R^{(m)}(t) \right]) \} / 2Z_{cm}^2 \quad (14)$$

تعریف پارامترهای موجود در روابط فوق مشابه پارامترهای تعریف شده در معادلات (۵) و (۶) در مود  $m$  می باشند. در روش پیشنهادی، فاصله یابی خطا در مود صفر یا مود یک بطور مستقل انجام می گیرد. لازم به توضیح است که در خطاهای که اتصال به زمین نیز وجود دارد

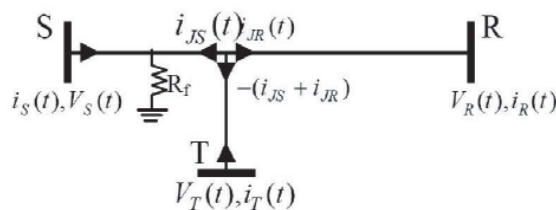
تمامی سه مولفه مقدار خواهند داشت در صورتیکه در برخی از خطاها مثلاً اتصالی دو فاز، مود صفر غیر فعال خواهد بود. با توجه به اینکه مود یک در انواع اتصالیها وجود دارد، در صورت استفاده از مود یک در فاصله یابی خطا، تعیین نوع خطا در برآورد فاصله تا محل خطا ضروری نمی باشد.

### ۴- تعمیم روش فاصله یابی خطا به خطوط انتقال با سه پایانه

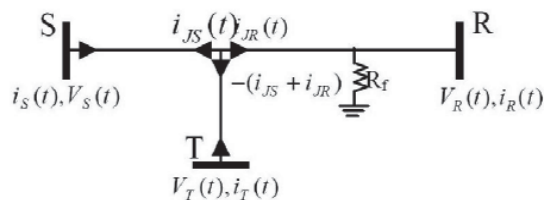
جهت اعمال الگوریتم به خطوط با سه پایانه، شبکه نمونه نشان داده شده در شکل (۳) را در نظر می گیریم. موقعیت های مختلف خطا در شکلهای (۴-الف)، (۴-ب) و (۴-ج) نشان داده شده اند.



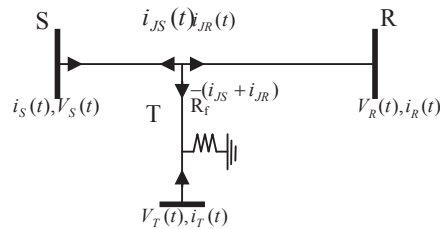
شکل (۳): شبکه سه پایانه مورد مطالعه



(الف) خطا در بخش (S-J)



(ب) خطا در بخش (R-J)



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 - تعیین بخش خطا دار  
ب - 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 می‌آید:

$$V_{JS}(t) = (Z_{cJS}^2 [V_S(t+T_1) - Z'_{cJS} i_S(t+T_1)] + Z_{cJS}^2 [V_S(t-T_1) + Z''_{cJS} i_S(t-T_1)] - Z'_{cJS} \left[ \frac{R'_{JS}/2}{Z_{cJS}} V_S(t) + 2Z'_{cJS} i_S(t) \right]) / 2Z_{c1}^2 \quad (15)$$

در رابطه فوق پارامترها بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} T_1 &: \text{زمان سیر موج از } S \text{ به } J \\ Z_{c1} &: \text{امپدانس مشخصه خط } S-R \\ R'_{JS} &: \text{مقاومت خط از } S \text{ تا } J \end{aligned}$$

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

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

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:

$$X_1 = \int |V_{JS}(t) - V_{JR}(t)| dt \quad (16)$$

$$X_2 = \int |V_{JS}(t) - V_{JT}(t)| dt \quad (17)$$

$$X_3 = \int |V_{JR}(t) - V_{JT}(t)| dt \quad (18)$$

در صورتیکه خطایی 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 خطایی 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 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 T-J، 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 به منظور 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:

$$\begin{aligned} i_{JS}(t) &= (Z'_{cJS} [V_S(t+T_1) - Z'_{cJS} i_S(t+T_1)] \\ &- Z''_{cJS} [V_S(t-T_1) + Z''_{cJS} i_S(t-T_1)] \\ &- \frac{R'_{JS}}{4} [2V_S(t) - \frac{R'_{JS}}{2} i_S(t)]) / 2Z_{c1}^2 \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{JT}(t) &= (Z'_{cJT} [V_T(t+T_3) - Z'_{cJT} i_T(t+T_3)] \\ &- Z''_{cJT} [V_T(t-T_3) + Z''_{cJT} i_T(t-T_3)] \\ &- \frac{R'_{JT}}{4} [2V_T(t) - \frac{R'_{JT}}{2} i_T(t)]) / 2Z_{c3}^2 \quad (20) \end{aligned}$$

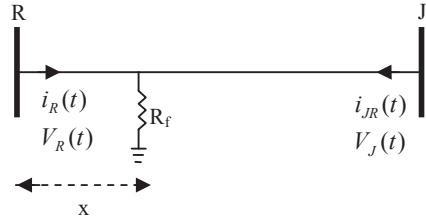
در روابط فوق پارامترها بصورت زیر تعریف میشوند:

$$\begin{aligned} T_3 &: \text{زمان سیر موج از } T \text{ به } J \\ R'_{JT} &: \text{مقاومت بخش } S-J \text{ و } T-J \\ Z_{c3} &: \text{امپدانس مشخصه خط } T-J \end{aligned}$$

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

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

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



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  $i_{JT}(t)$  و  $i_{JS}(t)$  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.

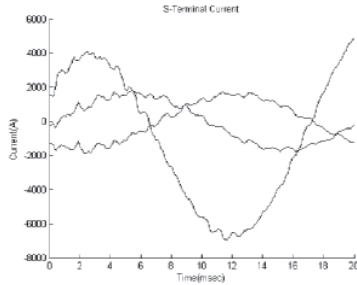
### ۵- ارزیابی روش پیشنهادی

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 اتصالیه، 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 [۱۴ و ۱۰].

#### ۵-۱- خطا در بخش (S-J)

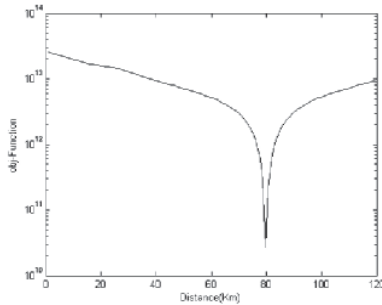
فرض کنید یکبار خطای تکفاز به زمین ( $SLG$ ) با مقاومت خطای ۱۰ اهم و زاویه شروع خطای صفر درجه و بار دیگر خطای دو فاز با مقاومت خطای ۱ اهم و زاویه شروع خطای ۹۰ درجه به فاصله ۸۰ کیلومتر از پایانه S به وقوع پیوسته باشد. به عنوان نمونه ولتاژها و جریانهای پایانه S در حالت خطای تکفاز به زمین در شکل (۶) نشان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

#### الف (ولتاژها)

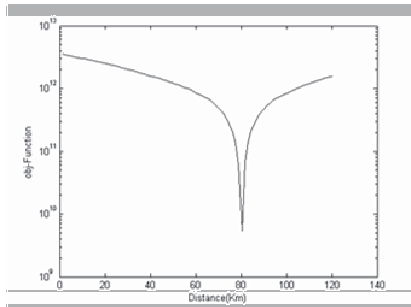


#### ب (جریان‌ها)

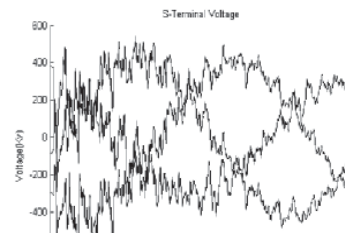
شکل (۶): ولتاژها و جریانهای سه فاز پایانه S



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



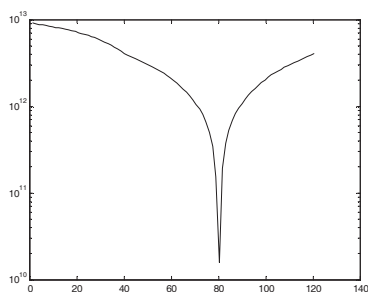
ب) استفاده از مود یک شکل موجها با فرض خطای تکفاز



ب) خطای دوفاز در بخش S-J با مقاومت خطای اهم با زاویه

شروع خطای ۹۰ درجه

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

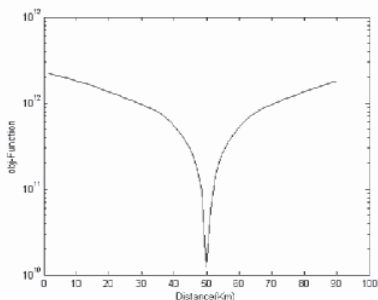


ج) استفاده از نمودار یک شکل موجها با فرض خطای دو فاز شکل (۷): تابع هدف تعریف شده در معادله (۱۴) برای خطا در بخش S-J

۵-۲- خطا در بخش (R-J)

جهت بررسی دقت الگوریتم ارائه شده فرض کنید خطای تکفاز به زمین در فاصله ۵۰ کیلومتری از پایانه R در بخش (R-J) از سیستم رخ داده است. ضمن اینکه بخش خطادار به درستی بخش R-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 نمودار نشان می‌دهد.

جهت برآورد دقت روش پیشنهادی، این الگوریتم برای انواع اتصالات و شرایط مختلف خطا برای بخش R-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-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-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

همچنانکه در بخش 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 نمودار 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 اتصالاتی است. جهت برآورد دقت محاسبات فاصله‌یابی خطا توسط روش پیشنهادی، برای خطا در بخش S-J، مکانهای متفاوت وقوع خطا در نظر گرفته شده و با نمودار 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-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 اهم ۱۱۰ و زاویه شروع خطای صفر درجه

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

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

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

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

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

### 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 اتصالها 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.

### 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 می‌توان 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 داده‌های زمانی کم (کمتر از نیم سیکل) و عدم نیاز به تشخیص نوع خطا می‌باشد، بنابراین حتی اگر رله‌های 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.

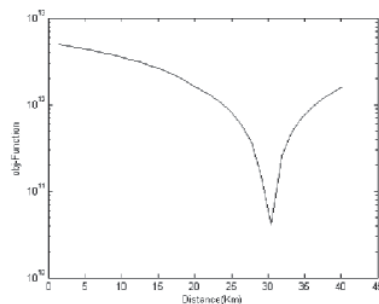
### پیوست:

$R_1(\Omega)$	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 یک		توالی صفر	
$r_1(\Omega/km)$	۰/۰۲۷۵	$r_0(\Omega/km)$	۰/۲۷۵
$l_1(mH/km)$	۱/۰۰۲۶۸	$l_0(mH/km)$	۳/۲۶۷۹۸
$c_1(\alpha F/km)$	۰/۰۱۳	$c_0(\alpha F/km)$	۰/۰۰۸۵



شکل (۹): تابع هدف تعریف شده در معادله (۱۴)

با فرض خطا در بخش T-J



(خط انشعابی)

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

[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.

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.