



فاصله یابی خطا در خطوط انتقال جبران شده با ادوات FACTS موازی

مرضیه نقدی جواد ساده رضا قاضی
دانشجوی کارشناسی ارشد قدرت استادیار گروه برق استاد گروه برق

دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

rghazi@um.ac.ir

sadeh@um.ac.ir

marzie_naghdi@yahoo.com

چکیده- در این مقاله الگوریتم فاصله یابی خطای جدیدی با استفاده از مدل گسترده حوزه زمان و با پنجره کوچکی از نمونه های ولتاژ و جریان همزمان دو پایانه خط برای خطوط انتقال جبران شده با ادوات FACTS موازی ارائه می شود، که ادوات FACTS را به عنوان یک جعبه سیاه در نظر گرفته و نیازی به داشتن مدل دقیق ادوات و دانستن عملکرد سیستمهای کنترلی آنها در زمان رخداد خطا در خط انتقال وجود ندارد. این الگوریتم مستقل از ساختار سیستم، زاویه شروع خطا و مقاومت خطا می باشد. انواع مختلف خطا در فواصل مختلف و شرایط گوناگون با استفاده از نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی های متفاوت دقت الگوریتم پیشنهادی را تایید می نماید.

کلید واژه- ادوات FACTS موازی، خط انتقال جبران شده، فاصله یابی خطا، مدل گسترده حوزه زمان خط انتقال، PSCAD/EMTDC

۱- مقدمه

همگی در مورد بررسی رفتار رله ها و نحوه عملکرد آنها هستند و سخنی در مقالات درباره فاصله یابی خطا در این خطوط وجود ندارد [۱-۷].

در این مقاله الگوریتم فاصله یابی خطا با استفاده از مدل گسترده حوزه زمان برای خطوط انتقال جبران شده با ادوات FACTS موازی ارائه می شود، که ادوات FACTS را به عنوان یک جعبه سیاه در نظر گرفته است و نیازی به داشتن مدل دقیق ادوات و دانستن عملکرد سیستمهای کنترلی آنها در زمان رخداد خطا در خط انتقال وجود ندارد. این الگوریتم مستقل از ساختار سیستم، زاویه شروع خطا و مقاومت خطا می باشد. الگوریتم پیشنهادی از پنجره کوچکی از نمونه های همزمان ولتاژ و جریان دو پایانه خط انتقال برای فاصله یابی خطا بهره می برد. انواع مختلف اتصال کوتاه در فواصل مختلف و شرایط گوناگون با استفاده از نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی گردیده و الگوریتم پیشنهادی با نرم افزار MATLAB بر نتایج حاصل از شبیه سازیها پیاده شده است. نتایج حاصله دقت الگوریتم پیشنهادی را تایید می کند.

۲- معیار فاصله یابی خطا

اگر در خط انتقال ساده تکفاز اتصال کوتاهی در نقطه دلخواه F به فاصله x ($x \leq L_{line}$) طول کل خط انتقال) از

خطوط انتقال از ارکان اساسی هر سیستم قدرت می باشد. مهمترین اختلالی که در سیستم انتقال رخ می دهد، وقوع انواع اتصال کوتاه هاست. وسیله ای که بتواند با سرعت و دقت کافی موقعیت خطا را تشخیص دهد، فاصله یاب خطا نام دارد. فاصله یاب خطا در خطاهای دائمی و گذرا محل آسیب دیده را تشخیص می دهد. تجهیزات جدیدی که از ساختار الکترونیک قدرت بهره می برند، چون ادوات FACTS در سالهای اخیر سیستمهای انتقال و توزیع شبکه برق را متحول ساخته اند. هماهنگی تجهیزات حفاظتی سیستم انتقال از موارد مهم در بحث نصب و استفاده از این ادوات در سیستم برق است، زیرا وجود هر تجهیز جدیدی در سیستم قدرت با وجود داشتن مزایای بسیار بدون توجه به عملکرد سیستمهای حفاظتی سبب اختلال در سیستم قدرت خواهد شد. فاصله یابهای خطا نیز که در تعیین دقیق محل خطا در سیستم قدرت دارای اهمیت هستند، باید با این ادوات که به طور عمده در خط برای جبران و افزایش توانایی انتقال توان نصب می شوند، هماهنگ گردند. مطالعاتی که تا به حال در مورد رفتار سیستمهای حفاظتی در خطوط جبران شده با ادوات FACTS موازی (مشهورترین آنها SVC و STATCOM) انجام گرفته اند، انگشت شمارند و

$Z'_c = Z_c + R'/4$ و $Z''_c = Z_c - R'/4$
 بطور مشابه برای قسمت FR خط انتقال:

$$V_x^R(t) = \left(Z_{rc}^2 [V_s(t+T-\tau) - Z'_{rc} i_r(t+T-\tau)] \right. \\
 + Z_{rc}^2 [V_r(t-T+\tau) + Z''_{rc} i_r(t-T+\tau)] \\
 \left. - \frac{Z_{rc} R'_r}{4} \left[\frac{R'_r/2}{Z'_{rc}} V_r(t) + 2Z''_{rc} i_r(t) \right] \right) / 2Z_c^2 \quad (3)$$

$$i_{xr}(t) = \left(Z'_{rc} [V_r(t+T-\tau) - Z'_{rc} i_r(t+T-\tau)] \right. \\
 + Z''_{rc} [V_r(t-T+\tau) + Z''_{rc} i_r(t-T+\tau)] \\
 \left. - \frac{R'_r}{4} \left[2V_r(t) - \frac{R'_r}{2} i_r(t) \right] \right) / 2Z_c^2 \quad (4)$$

در روابط اخیر:

T: زمانی که موج سیار از نقطه S به R می‌رسد؛

R'_r : مقاومت خط از نقطه R تا F؛

$Z'_c = Z_c + R'_r/4$ و $Z''_c = Z_c - R'_r/4$

با توجه به پیوستگی ولتاژ در روی خط انتقال:

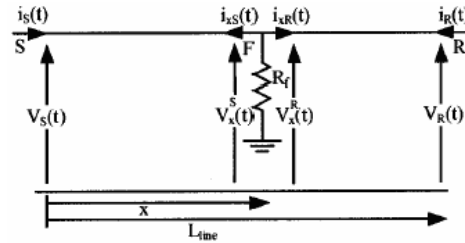
$$|V_x^S(t) - V_x^R(t)| = 0 \quad (5)$$

رابطه فوق می‌تواند به عنوان معیار فاصله‌یابی در خط انتقال بکار آید. ولی در برخی از نقاط دیگر به غیر از نقطه خطا ممکن است این رابطه به طور لحظه‌ای برقرار باشد برای جلوگیری از چنین حالتی از انتگرال رابطه (5) به عنوان معیار فاصله‌یابی خطا استفاده می‌شود. اگر نقطه خطا به فاصله x از نقطه S واقع شده باشد این مقدار به صورت مستتر در مقدار τ خط وجود دارد که به مقادیر ولتاژ و جریان خط وابسته است. با توجه به پیوستگی ولتاژ در روی خط انتقال، برای پیدا کردن مکان خطا معادله (6) گسسته‌سازی و به صورت یک مسئله بهینه‌سازی به روش عددی حل می‌شود:

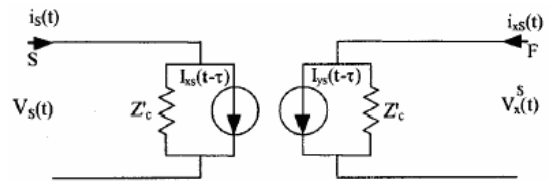
$$\min_x J(x) = \int_{t1}^{t2} |V_x^S(t) - V_x^R(t)| dt \quad (6)$$

پنجره داده‌های مورد نیاز لااقل می‌بایست دو برابر مدت

پایانه S خط انتقال رخ دهد (شکل 1). مدل گسترده قسمت SF از خط انتقال به صورت شکل (2) خواهد بود [8].



شکل 1: مدل خطا در خط تک‌فاز



شکل 2: مدل گسترده قسمت SF خط

با توجه به شکل (2) معادلات ولتاژ و جریان به صورت زیر هستند:

$$V_x^S(t) = \left(Z_c^2 [V_s(t+\tau) - Z'_c i_s(t+\tau)] \right. \\
 + Z_c^2 [V_s(t-\tau) + Z''_c i_s(t-\tau)] \\
 \left. - \frac{Z'_c R'_r}{4} \left[\frac{R'_r/2}{Z'_c} V_s(t) + 2Z''_c i_s(t) \right] \right) / 2Z_c^2 \quad (1)$$

$$i_{xs}(t) = \left(Z'_c [V_s(t+\tau) - Z'_c i_s(t+\tau)] \right. \\
 + Z''_c [V_s(t-\tau) + Z''_c i_s(t-\tau)] \\
 \left. - \frac{R'_r}{4} \left[2V_s(t) - \frac{R'_r}{2} i_s(t) \right] \right) / 2Z_c^2 \quad (2)$$

در اینجا:

τ : زمانی که موج سیار از نقطه S به F می‌رسد؛

Z_c : امپدانس مشخصه خط انتقال؛

R'_r : مقاومت خط از نقطه S تا F؛

ادوات FACTS موازی به طور موازی با خط انتقال در نقاط مختلف ابتدا، انتها و یا نقطه میانی خط نصب می‌گردند. جایگاه آنها بستگی به کاربردها دارد؛ ولی برای کنترل یا افزایش ظرفیت انتقال توان در خطوط طولانی (مثل اتصال خطوط متصل به دو شبکه بزرگ) نقطه میانی خط بهترین محل برای نصب آنهاست. شکل (۳) را در نظر بگیرید ادوات FACTS به صورت جعبه سیاه Q فرض شده‌اند.

برای استفاده از روش فاصله‌یابی خط که در قسمت (۲) و با بهره‌گیری از معادله (۶) بیان شد، باید مدل خط انتقال شکل (۳) تبدیل به یک مدل خط ساده گردد. در مدل خط ساده از اطلاعات نقطه S و R برای فاصله‌یابی خط استفاده می‌گردید که بین S و نقطه خط F یک خط ساده بود و به همین ترتیب بین F و R نیز خط انتقال ساده‌ای قرار داشت. خطی که در شکل (۳) دیده می‌شود جعبه Q را داراست که رابطه بین ولتاژ دو سر آن V_D و جریان آن I_{Sh} مشخص نیست. پس با نمونه‌برداری که در نقطه S و R انجام شده، نمی‌توان به راحتی الگوریتم مورد نظر را پیاده کرد. خط انتقال ساده در واقع خطی است که بین نقطه D و S (یا D و R) قرار دارد. نکته دیگر آنکه معین نیست که خط در فاصله بین S تا D رخ داده است یا در نقطه D و یا در فاصله بین D و R. الگوریتم پیشنهادی از مراحل زیر در این حالت استفاده می‌کند:

مرحله اول: در ابتدا با نمونه‌های ولتاژ و جریان (V_S و I_S) و معادله (۱) و (۲)، مقادیر ولتاژ و جریان (V_{DS} و $I_{D1primary}$) و به طور مشابه با نمونه‌های (V_R و I_R) و معادلات (۳) و (۴) مقادیر V_{DR} و $I_{D2primary}$ محاسبه می‌گردد.

مرحله دوم: اگر جعبه سیاه Q دارای جریان نامی I_n باشد پس جریان جعبه سیاه Q در بازه $0 \leq |I_{Sh}| \leq |I_n|$ قرار دارد. برای اتصال کوتاه در نیمه SD خط $|I_n| + \max(|I_{D2primary}|) \leq |I_{D1}| \leq 0$ و برای خط در فاصله DR، $|I_n| + \max(|I_{D1primary}|) \leq |I_{D2}| \leq 0$ می‌باشد. رابطه $I_{max} = \max(|I_{D1primary}|, |I_{D2primary}|)$ در نظر داشته باشید، و مقدار w را برابر $w = |I_n| / I_{max}$ فرض کنید. چون مشخص نیست که مکان وقوع خط در فاصله بین پایانه S و نقطه اتصال جعبه Q (SD) قرار دارد (F_1) یا در قسمت DR (F_2)، از سه قسمت در این مرحله استفاده می‌گردد.

زمان لازم برای انتشار امواج ولتاژ و جریان در طول خط انتقال باشد. این پنجره حداقل شامل داده‌های یک چهارم سیکل پس از وقوع خط است، ولی انتخاب پنجره بزرگتر دقت فاصله‌یابی خط را افزایش خواهد داد. الگوریتم پیشنهادی از اطلاعات یک دوم سیکل برای فاصله‌یابی خط بهره می‌گیرد. این الگوریتم نیاز به داده‌های ولتاژ و جریان همزمان دو پایانه دارد که از طریق سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) به صورت همزمان برداشت می‌گردند یا اینکه برداشت داده‌ها غیر همزمان بوده و سپس با پردازش داده‌ها همزمان گردند.

یک خط انتقال ساده دارای سه فاز است؛ روابط ولتاژ و جریان فازها نه تنها به پارامترهای گسترده همان فاز وابسته است بلکه به پارامترهای متقابلی که بین فازها حاکم است نیز وابستگی دارد. برای استفاده از رابطه (۶) که برای خط تک‌فاز بیان شد از تبدیل مودال آنالیز LC استفاده می‌شود که خطوط سه‌فاز را تبدیل به سه خط تک‌فاز مستقل کند. در الگوریتم پیشنهادی از نمونه‌های ولتاژ و جریان برای فاصله‌یابی خط استفاده می‌گردد و مقادیر فازوری در آنها وجود ندارد؛ بنابراین از ماتریس تبدیل Karrenbauer با درایه‌های حقیقی استفاده می‌شود.

$$T_V = T_I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

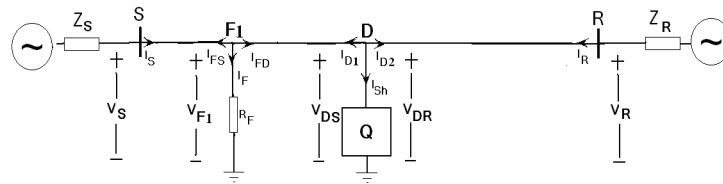
برای محاسبه مقاومت خط در هر فاز از سه‌فاز از خط انتقال معادله زیر وجود دارد:

$$V_x(t) = -R_f(i_{xS}(t) + i_{xR}(t)) \quad (8)$$

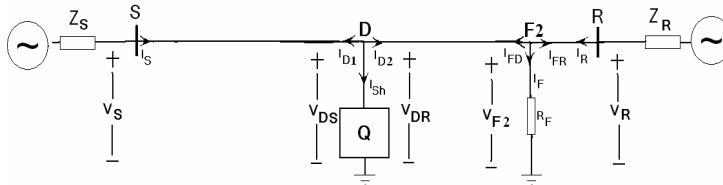
معادله (۸) به رابطه ساده $AR_f = B$ تبدیل می‌شود که A و B بردارهای ستونی وابسته به نمونه‌های ولتاژ و جریان دو پایانه خط انتقال‌اند. مقاومت اتصال کوتاه از رابطه زیر قابل محاسبه است (A^t به معنای ترانپوز ماتریس A است):

$$R_f = (A^t A)^{-1} A^t B \quad (9)$$

۳- الگوریتم فاصله‌یابی خط پیشنهادی در خطوط جبران‌شده با ادوات FACTS موازی در میانه خط انتقال



(الف)



(ب)

شکل ۳: مدل خط خطادار با وجود ادوات FACTS موازی در میانه خط

قسمت (۱): فرض می‌شود که خطا در فاصله SD مثل نقطه F1 رخ داده است (شکل ۳-الف). $V_D = V_{DR}$ (مقادیر V_{DR} در مرحله اول محاسبه شد) و $I_{D1}^{(1,1)} = -(1-w) \times I_{D2\text{primary}}$ و $I_{D1}^{(1,1)} = -I_{D2\text{primary}}$ قرار می‌گیرد. ($i=1$ و $j=1$)

الف- قسمت (۱): با استفاده از نمونه‌های ولتاژ و جریان (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ و (V_S) و (I_S) و معادله (۶) مکان خطا تعیین می‌گردد. x که تابع J را مینیمم کند، جواب اولیه مکان خطاست $(x_1^{(i,j)} = x)$ و مقدار J برابر $J_1^{(i,j)} = J$ قرار داده می‌شود.

ب- قسمت (۱): با فرض $x_1^{(i,j)}$ و $I_{D1}^{(i,j)}$ جواب درست است، با معادله (۱) و (۲) و مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در نقطه S (V_S و I_S)، مقادیر ولتاژ V_{F1} و جریان I_{FS} و با معادله (۳) و (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ جریان بدست می‌آید. با مقادیر V_{F1} و I_{FD} و I_{FS} به دست آمده و با توجه به فازهای خطادار شده، مقاومت خطای هر فاز از معادله (۹) بدست می‌آید.

قسمت (۲): فرض می‌شود که خطا در فاصله بین R و D نقطه‌ای مثل نقطه F2 رخ داده است (شکل ۳-ب)؛ در ابتدا $I_{D2}^{(1,1)} = -(1-w) \times I_{D1\text{primary}}$ و $I_{D2}^{(1,1)} = -I_{D1\text{primary}}$ در نظر گرفته می‌شود. $V_D = V_{DS}$ قرار می‌گیرد (مقادیر V_{DS} در مرحله اول محاسبه شد). سپس تمامی مراحل الف تا ج قسمت (۱) به طور مشابه این بار با (V_R) و (I_R) به جای (V_S) و (I_S) و (V_D) و $(I_{D2}^{(i,j)})$ به جای (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ که در قسمت (۱) بود انجام می‌شود تا مقادیر $x_2^{(i,j)} = 0.5L_{line} + x_1^{(i,j)}$ ، $J_2(i) = J_2^{(i,j)}$ و $I_{D2}(i) = I_{D2}^{(i,j)}$ حاصل شود. قسمت (۳):

$$J_f(i) = \min(J_{f1}(i), J_{f2}(i))$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{if } J_f(i) = J_{f1}(i) \Rightarrow x_f(i) = x_{f1}(i), \\ I_{Sh}(i) = -I_{Df1}(i) - I_{D2\text{primary}} \\ \text{if } J_f(i) = J_{f2}(i) \Rightarrow x_f(i) = x_{f2}(i), \\ I_{Sh}(i) = -I_{Df2}(i) - I_{D1\text{primary}} \end{cases} \quad (10)$$

مرحله سوم: اگر $\max(|I_{D1}^{(i,j)}|, |I_{D2}^{(i,j)}|) \leq I_{\max} + |I_n|$ به مرحله چهارم بروید و اگر نه $i=i+1$ و $j=1$ قرار دهید.

ب- قسمت (۱): با فرض $x_1^{(i,j)}$ و $I_{D1}^{(i,j)}$ جواب درست است، با معادله (۱) و (۲) و مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در نقطه S (V_S و I_S)، مقادیر ولتاژ V_{F1} و جریان I_{FS} و با معادله (۳) و (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ جریان بدست می‌آید. با مقادیر V_{F1} و I_{FD} و I_{FS} به دست آمده و با توجه به فازهای خطادار شده، مقاومت خطای هر فاز از معادله (۹) بدست می‌آید.

ب- قسمت (۱): با فرض $x_1^{(i,j)}$ و $I_{D1}^{(i,j)}$ جواب درست است، با معادله (۱) و (۲) و مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در نقطه S (V_S و I_S)، مقادیر ولتاژ V_{F1} و جریان I_{FS} و با معادله (۳) و (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ جریان بدست می‌آید. با مقادیر V_{F1} و I_{FD} و I_{FS} به دست آمده و با توجه به فازهای خطادار شده، مقاومت خطای هر فاز از معادله (۹) بدست می‌آید.

ب- قسمت (۱): با فرض $x_1^{(i,j)}$ و $I_{D1}^{(i,j)}$ جواب درست است، با معادله (۱) و (۲) و مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در نقطه S (V_S و I_S)، مقادیر ولتاژ V_{F1} و جریان I_{FS} و با معادله (۳) و (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ جریان بدست می‌آید. با مقادیر V_{F1} و I_{FD} و I_{FS} به دست آمده و با توجه به فازهای خطادار شده، مقاومت خطای هر فاز از معادله (۹) بدست می‌آید.

ب- قسمت (۱): با فرض $x_1^{(i,j)}$ و $I_{D1}^{(i,j)}$ جواب درست است، با معادله (۱) و (۲) و مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در نقطه S (V_S و I_S)، مقادیر ولتاژ V_{F1} و جریان I_{FS} و با معادله (۳) و (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ جریان بدست می‌آید. با مقادیر V_{F1} و I_{FD} و I_{FS} به دست آمده و با توجه به فازهای خطادار شده، مقاومت خطای هر فاز از معادله (۹) بدست می‌آید.

ب- قسمت (۱): با فرض $x_1^{(i,j)}$ و $I_{D1}^{(i,j)}$ جواب درست است، با معادله (۱) و (۲) و مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در نقطه S (V_S و I_S)، مقادیر ولتاژ V_{F1} و جریان I_{FS} و با معادله (۳) و (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ جریان بدست می‌آید. با مقادیر V_{F1} و I_{FD} و I_{FS} به دست آمده و با توجه به فازهای خطادار شده، مقاومت خطای هر فاز از معادله (۹) بدست می‌آید.

ب- قسمت (۱): با فرض $x_1^{(i,j)}$ و $I_{D1}^{(i,j)}$ جواب درست است، با معادله (۱) و (۲) و مقادیر ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در نقطه S (V_S و I_S)، مقادیر ولتاژ V_{F1} و جریان I_{FS} و با معادله (۳) و (V_D) و $(I_{D1}^{(i,j)})$ جریان بدست می‌آید. با مقادیر V_{F1} و I_{FD} و I_{FS} به دست آمده و با توجه به فازهای خطادار شده، مقاومت خطای هر فاز از معادله (۹) بدست می‌آید.

ب- STATCOM در میانه خط انتقال

Fault type	A-G		A-B		A-B-C	
	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)
Actaul Dist. (km)						
5	6.8182	0.61	5.1136	0.04	5.1136	0.04
35	35.7955	0.27	34.0909	0.30	34.0909	0.30
120	117.6136	0.80	121.0227	0.34	119.3182	0.23
165	167.0455	0.68	165.3409	0.11	165.3409	0.11
210	209.6591	0.11	209.6591	0.11	209.6591	0.11
295	296.5909	0.53	294.8864	0.04	296.5909	0.53

از آنجائیکه اتصال کوتاه به زمین عموماً همراه با مقاومت خطا می‌باشد. لذا جهت بررسی اثر مقاومت خطا بر روی دقت الگوریتم پیشنهادی نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای خطای تکفاز به زمین در فواصل مختلف به ازای مقاومت‌های خطای مختلف و زاویه وقوع خطای صفر درجه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل به ازای مقاومت‌های مختلف خطا

الف-SVC در میانه خط انتقال

Fault type	10 Ω		50 Ω		100 Ω	
	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)
Actaul Dist. (km)						
5	3.4091	0.53	5.1136	0.04	5.1136	0.04
50	51.1364	0.38	49.431	0.19	49.431	0.19
100	100.568	0.19	100.568	0.19	100.568	0.19
135	136.3636	0.45	134.659	0.11	134.6591	0.11
200	201.1394	0.38	199.432	0.19	199.432	0.19
250	248.8636	0.38	248.8636	0.38	250.568	0.19
295	296.5909	0.53	296.5909	0.53	294.8864	0.04

ب- STATCOM در میانه خط انتقال

Fault type	10 Ω		50 Ω		100 Ω	
	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)
Actaul Dist. (km)						
5	3.4091	0.53	5.1136	0.04	5.1136	0.04
35	37.5	0.83	34.0909	0.30	34.0909	0.30
120	117.6136	0.80	121.0227	0.34	121.0227	0.34
165	167.0455	0.68	165.3409	0.11	165.3409	0.11
210	207.9545	0.68	209.6591	0.11	211.3636	0.45
295	296.5909	0.53	294.8864	0.04	294.8864	0.04

در جدول (۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای خطای تکفاز به زمین در فواصل مختلف به ازای مقاومت خطای ۱۰ اهم و زوایای وقوع خطای مختلف مشاهده می‌گردد.

گام ۱، برای نمونه‌های جریان در نظر بگیرید، و مقدار

$$I_{D1}^{(i,1)} = -(1-w)I_{D2primary} + (i-1) \times 0.1 \times I_{D2primary}$$

$$I_{D2}^{(i,1)} = -(1-w)I_{D1primary} + (i-1) \times 0.1 \times I_{D1primary}$$

و محاسبه کنید. دوباره به مرحله دوم برگردید و مراحل (الف) تا (چ) قسمت (۱) و (الف) تا (چ) قسمت (۲) برای i و j جدید و قسمت (۳) را انجام دهید.

مرحله چهارم: مکان خطا از روش زیر به دست می‌آید:

$$i_{goal} = i(\min J_f(i)) \quad (11)$$

$$\Rightarrow x_{goal} = x_f(i_{goal}), \quad I_{Sh_{goal}} = I_{Sh}(i_{goal})$$

به این ترتیب علاوه بر مکان خطا مقادیر جریان و ولتاژ جعبه Q در زمان رخداد اتصال کوتاه محاسبه گردید. همچنین می‌توان با مقادیر به دست مقاومت اتصال کوتاه را با استفاده از معادله (۹) محاسبه کرد.

۴- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

به منظور ارزیابی الگوریتم ارائه شده سیستم قدرتی مشابه شکل (۳) با طول ۳۰۰ کیلومتر، ۳۴۵ کیلو ولت، ۶۰ هرتز [۹] در نظر گرفته شده است. مشخصات SVC و STATCOM شبیه‌سازی شده در مرجع [۴] وجود دارد. سیستم قدرت مورد نظر با نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی گردیده و برای پیاده‌سازی الگوریتم از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

در جدول (۱) نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای انواع مختلف خطا در فواصل مختلف به ازای مقاومت خطای ۱۰ اهم و زاویه وقوع خطای صفر درجه با وجود SVC و STATCOM در میانه خط دیده می‌شود.

جدول ۱- نتایج حاصل برای انواع مختلف خطا

الف-SVC در میانه خط انتقال

Fault type	A-G		A-B		A-B-C	
	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)
Actaul Dist. (km)						
5	6.8182	0.61	5.1136	0.04	5.1136	0.04
50	51.1364	0.38	51.1364	0.38	49.431	0.19
100	100.568	0.19	100.568	0.19	100.568	0.19
135	134.6591	0.11	134.659	0.11	134.6591	0.11
200	199.432	0.19	199.432	0.19	199.432	0.19
250	250.568	0.19	248.8636	0.38	250.568	0.19
295	294.886	0.04	294.8864	0.04	294.8864	0.04

جدول ۳- نتایج حاصل برای زوایای مختلف خطا

الف- SVC در میانه خط انتقال

Fault type	0 degree		45 degree		90 degree	
	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)
Actual Dist. (km)						
5	6.8182	0.61	5.1136	0.04	5.1136	0.04
50	51.1364	0.38	49.431	0.19	49.431	0.19
100	100.568	0.19	100.568	0.19	100.568	0.19
135	136.3636	0.45	134.659	0.11	136.3636	0.45
200	199.4318	0.19	199.4318	0.19	201.1364	0.38
250	248.8636	0.38	250.5682	0.19	248.8636	0.38
295	294.8864	0.04	294.8864	0.04	294.8864	0.04

ب- STATCOM در میانه خط انتقال

Fault type	0 degree		45 degree		90 degree	
	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)	Cal. Dist.	Error (%)
Actual Dist. (km)						
5	5.1136	0.04	5.1136	0.04	5.1136	0.04
35	34.0909	0.30	34.0909	0.30	34.0909	0.30
120	117.6136	0.80	121.0227	0.34	121.0227	0.34
165	165.3409	0.11	165.3409	0.11	165.3409	0.11
210	207.9545	0.68	209.6591	0.11	209.6591	0.11
295	293.1818	0.61	294.8864	0.04	294.8864	0.04

زاویه شروع خطای صفر درجه و مقاومت اتصال کوتاه ۱۰ اهم است. خطای فاصله‌یابی خطا با وجود تفاوت مشخصه انواع جبران‌کننده‌های موازی، از نوع تجهیز FACTS مستقل است. با نتایج حاصل از روش ارائه شده، می‌توان مشخصه SVC یا STATCOM در زمان خطا را نیز مشخص کرد.

۶- مراجع

- [1] M. Khederzadeh, "Impact of FACTS Devices on Digital Multifunctional Protective Relay", Transmission and Distribution Con. and Exh.: Asia Pacific. IEEE/PES, Vol. 3, pp.2043-2048, 6-10 Oct. 2002.
- [2] K. El-Arroudi, G. Joos and D. T. McGillis, "Operation of Impedance Protection Relays with the STATCOM", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, Apr. 2002.
- [3] J. V. V. N Bapiraja, U. J. Shenoy, K. G. Sheshadri, H. P. Khincha and D. Thukaram, "Implementation of DSP Based Relaying with Particular Reference to Effect of STATCOM on Transmission Line Protection", IEEE-POWERCON 2004, Singapore, 21-24 Nov. 2004.
- [4] T. S. Sidhu, R. K. Varma, P. K. Gangadharan, F. A. Albasri and G. R. Ortiz, "Performance of Distance Relays on Shunt-FACTS Compensated Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005.
- [5] A. Kazemi, S. Jamali and H. Shateri, "Effects of STATCOM on Distance Relay Tripping Characteristic", 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Con. and Exh.: Asia and Pacific, Dalian, China.
- [6] X. Zhou, H. Wang, R. K. Aggarwal and P. Beaumont, "Performance Evaluation of a Distance Relay as Applied to a Transmission System With UPFC", IEEE Trans. on Power Delivery, 2006.
- [7] S. Li and M. Ding, "The Vulnerability Analysis of Transmission System Based on the Performance of Mho Relay and SVC", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 8, Issue 1, Article 6, 2007.
- [8] J. Sadeh, N. Hadjsaid, A.M. Ranjbar and R. Feuillet, "Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 1027-1033, July 2000.
- [9] S. Hongchun, S. Dajun and C. Xueyun, "A New Electromagnetic Transient Simulation Method for Faults in Complex Power System", IEEE, International Conference on Power System Technology, Proceedings. PowerCon., Vol. 4, pp. 2645 - 2651, 13-17 Oct. 2002.

از بررسی جداول فوق مشاهده می‌گردد که خطای الگوریتم کمتر از ۱ درصد طول خط انتقال است و از مقاومت خطا و زاویه وقوع خطا نیز تاثیر نمی‌پذیرد. نکته قابل توجه آنکه نوع تجهیز FACTS در این روش مورد توجه نیست.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم فاصله‌یابی خطای جدیدی با استفاده از مدل گسترده حوزه زمان و با پنجره کوچکی از نمونه‌های ولتاژ و جریان همزمان دو پایانه خط برای خط انتقال جبران‌شده با ادوات FACTS موازی ارائه شد. مشخصه ادوات FACTS در میانه خط بر سیگنال‌های ولتاژ و جریان در زمان خطا تاثیر دارد. این روش ادوات FACTS را به عنوان یک جعبه سیاه در نظر گرفته است و نیازی به مدل ادوات و یا دانستن عملکرد سیستم‌های کنترلی آنها در زمان رخداد خطا ندارد. از نتایج حاصله از پیاده سازی الگوریتم به نظر می‌رسد که الگوریتم مستقل از ساختار سیستم، نوع خطا، زاویه شروع خطا و مقاومت خطا می‌باشد. ماکزیمم خطای مشاهده شده ۰.۸۳٪ برای اتصال کوتاه تکفاز به زمین با STATCOM در میانه خط در فاصله ۳۵km از پایانه S،