روش دقیق تخمین محل خطا در خطوط انتقال چند بخشی هوایی– کابلی

مهدی قاضی‌زاده احسائی[1]

۱- استادیار- گروه برق- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه زابل - زابل- ایران

ghazizadeh@uoz.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی جدید برای تعیین محل خطا در خطوط انتقال چند بخشی کابلی–هوایی ارائه شده است. این روش از نمونه‌های جمع‌آوری شده از دو پایانه خط به صورت همزمان در حوزه زمان بهره می‌برد و به همین دلیل نیاز به فیلتر برای استخراج مولفه‌های اصلی ولتاژ و جریان ندارد که این موضوع باعث دقت بالاتر این روش بدلیل عدم تاثیرپذیری از پاسخ فرکانسی فیلتر و مولفه DC میرا شونده شده است. از طرفی، این روش از مدل گسترده خط بهره می‌برد و از $K+1$ مرحله برای تعیین محل خطا تشکیل شده است (K: تعداد بخش‌های خط انتقال) و بر خلاف روش‌های دیگر نیاز به شناساگر برای تعیین بخش خطادیده از خط ندارد. دقت روش ارائه شده با آزمایش‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است که این آزمایش‌ها دقت بالای روش پیشنهادی را به ازای فاصله‌ها و انواع مختلف خطا در زمان‌های شروع خطای گوناگون نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: خطوط انتقال چند بخشی کابلی–هوایی، تخمین محل خطا، شناساگر تعیین بخش خطادیده ، فیلتر، حفاظت خط انتقال، نمونه‌های همزمان.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: مهدی قاضی‌زاده احسائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – زابل – کیلومتر ۳ جاده بنجار – پردیس جدید دانشگاه زابل – دانشکده ی فنی و مهندسی – گروه مهندسی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]

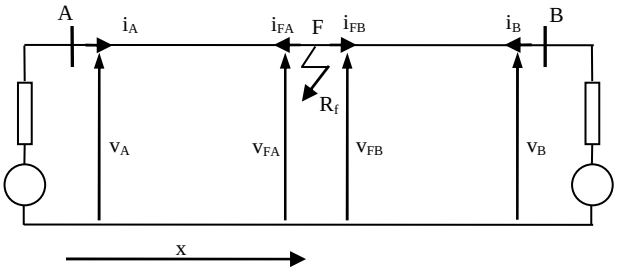
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

۱- مقدمه

امروزه در برخی مناطق مسکونی خصوصاً مناطق با تراکم جمعیتی به خطوط ترکیبی دو بخشی و چند بخشی برای انتقال انرژی الکتریکی نیاز است که این خطوط شامل قسمت‌های کابلی و هوایی هستند.

بحث حفاظت و جایابی خطا در سیستم‌های قدرت از جمله مباحثی است که از دیرباز مورد توجه محققان بوده [۱۶]-[۱] و روش‌های گوناگونی برای مشخص نمودن محل خطاهای رخداده در خطوط مختلف (شامل خطوط معمولی و خطوط دوبخشی و چندبخشی هوایی-کابلی)، ارائه شده است [۱۶]-[۳]. اما، تعیین محل خطاهایی که در خطوط ترکیبی ایجاد می‌شود از اهمیت بالاتری نسبت به خطوط معمولی برخوردار است. زیرا این خطوط دارای بخش‌های کابلی دفن شده در زیرزمین نیز می‌باشند که در صورت وقوع خطا در آن‌ها قابل رویت نیست. برای تعیین محل خطا در خطوط ترکیبی دو بخشی هوایی-کابلی روش‌های متعددی ارائه شده [۱۴]-[۷]، اما برای خطوط چند بخشی روش‌های معدودی از جمله [۱۵] پیشنهاد شده است. در خطوط چند بخشی هوایی-کابلی، پارامترهای خط انتقال در هر بخش با بخش دیگر متفاوت است و به همین دلیل، جایابی خطا در چنین خطوط ترکیبی نسبت به خطوط معمولی و خطوط دارای دو بخش، از پیچیدگی بیشتری برخوردار می‌باشد. روش ارائه شده در [۱۵] از مدل گسترده خط انتقال بهره برده است و از مولفه‌های اصلی ولتاژ و جریان دو طرف خط که به صورت همزمان جمع‌آوری شده استفاده نموده است. اما استخراج مولفه‌های اصلی ولتاژ و جریان توسط فیلتر باعث کاهش دقت این روش که ناشی از فیلتراسیون و عدم حذف مناسب مولفه DC میراشونده می‌باشد، خواهد شد. از طرفی روش پیشنهادی در [۱۵] برای شناسایی بخش کابلی یا هوایی که دچار خطا شده، به یک شناساگر نیاز دارد که خطای شناساگر باعث عدم عملکرد صحیح این روش می‌شود.

در این مقاله روش دقیق و جدیدی برای تعیین محل خطا در خطوط انتقال چند بخشی کابلی–هوایی ارائه شده است که از نمونه‌های همزمان ولتاژ و جریان دو طرف خط بهره می‌برد و در نتیجه نیاز به فیلتر ندارد. لذا، خطاهای ناشی از فیلتراسیون بر این روش تاثیرگذار نیست و این یکی از مزایای روش پیشنهادی نسبت به روش‌های قبلی است. از طرف دیگر، این الگوریتم نیاز به شناساگر برای مشخص نمودن بخش خطادیده از خط ندارد. در این روش، از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان استفاده شده است و دقت روش ارائه شده با آزمایش‌های گوناگون در نرم‌افزار MATLAB/Simulink تایید شده است.



شکل (۱): مدل تک فاز از یک خط انتقال سه فاز با پارامترهای گسترده

۲- روش تعیین محل خطا در خطوط چند بخشی

با توجه به اینکه در این مقاله، برای ارائه الگوریتم جایابی از برخی روابط موجود درمرجع [۱۶] استفاده شده، ابتدا اصول روش دو پایانه‌ای ارائه شده در این مرجع و روابط مورد نیاز در ادامه آورده شده است.

۲-۱- اصول الگوریتم دوپایانه‌ای جایابی خطا درخطوط یک‌بخشی

شکل (۱) را در نظر بگیرید که مدل تک فاز از یک خط انتقال سه‌فاز با پارامترهای گسترده را نشان می‌دهد. در این شکل A و B به ترتیب مشخص‌کننده پایانه‌های ابتدا و انتهای خط می‌باشد و فرض می‌شود که در نقطه F خطایی رخ داده که در فاصله x از ابتدای خط واقع شده است. درصورتی‌که نمونه‌های ثبت شده در ابتدای خط (باس A) و انتهای آن (باس B) توسط سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) همزمان شده و برای جایاب خط ارسال شود، ولتاژ سمت چپ خطا (v_{FA}) برحسب ولتاژ و جریان ثبت شده در ابتدای خط در حوزه زمان بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} v_{FA}(t) = {} & (Z + R.x/4)^2.[v_A(t + \frac{x}{c}) \\ & - ((Z + R.x/4).i_A(t + \frac{x}{c})] \\ & + (Z - R.x/4)^2.[v_A(t - \frac{x}{c}) \\ & + (Z - R.x/4).i_A(t - \frac{x}{c})] \\ & - \frac{(Z + R.x/4).R}{4}.[\frac{R/2}{(Z + R.x/4)}.v_A(t) \\ & + 2.(Z - R.x/4).i_A(t)]]/2Z^2 \end{aligned} \qquad (۱)$$

v_A, i_A: به ترتیب ولتاژ و جریان ابتدای خط،

v_{FA}: ولتاژ سمت چپ خطا،

t: یک لحظه از بازه زمانی نمونه‌برداری حین خطا،

R: مقاومت پریونیت خط از نقطه A تا F،

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]

Z: امپدانس مشخصه خط انتقال،

c: سرعت انتشار موج در خط انتقال.

همچنین، ولتاژ سمت راست خط (v_{FB}) بصورت تابعی برحسب ولتاژ و جریان ثبت شده در انتهای خط (باس B) در حوزه زمان به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} v_{FB}(t) = & (Z + R.(L-x)/4)^2.[v_B(t+\frac{L-x}{c}) \\ & -((Z + R.(L-x)/4).i_B(t+\frac{L-x}{c})] \\ & +(Z - R.(L-x)/4)^2.[v_B(t-\frac{L-x}{c}) \\ & +(Z - R.(L-x)/4).i_B(t-\frac{L-x}{c})] \\ & -\frac{(Z + R.(L-x)/4).R}{4}.[\frac{R/2}{(Z + R.(L-x)/4)}.v_B(t) \\ & +2.(Z - R.(L-x)/4).i_B(t)]) / 2Z^2 \end{aligned} \quad (۲)$$

v_B, i_B : به ترتیب ولتاژ و جریان انتهای خط،

L: طول خط از باس A تا B.

با توجه به این نکته که پارگی و انفصال در طول خط رخ نداده است، ولتاژ v_{FA} و ولتاژ v_{FB} با یکدیگر برابرند و لذا تفاضل آن‌ها برابر با صفر خواهد بود:

$$v_{FA} - v_{FB} = 0 \quad (۳)$$

با جایگذاری فرمول‌های (۱) و (۲) در رابطه (۳) معادله زیر بدست می‌آید:

$$g(v_A, i_A, v_B, i_B, t, x) = 0 \quad (٤)$$

فاصله خطا از ابتدای خط x تنها مجهول موجود در معادله (۴) می‌باشد و با حل این معادله x محاسبه می‌شود.

برای توضیح روش ارائه شده در این مقاله، ابتدا این روش برای خطاهای متقارن سه‌فاز به زمین شرح داده می‌شود.

۲-۲- روش ارائه شده برای خطاهای سه‌فاز متقارن

در ادامه برای درک ساده‌تر الگوریتم ارائه شده، این روش برای یک خط انتقال سه بخشی کابلی– هوایی توضیح داده خواهد شد. ذکر این نکته دارای اهمیت است که این روش به سادگی قابلیت تعمیم به خطوط انتقال چند بخشی با تعداد بخش‌های کابلی-هوایی بیشتر را خواهد داشت.

شکل (۲) دیاگرام تک خطی از یک خط انتقال سه‌بخشی کابلی– هوایی را نشان می‌دهد. J1 و J2 نقاط اتصال هر یک از بخش‌های خط انتقال هستند. خطایی با مقاومت R_F در نقطه F اتفاق افتاده است که به فاصله x کیلومتر از ابتدای خط (باس S) قرار دارد.

بدلیل این‌که قبل از تعیین محل خطا، بخشی از خط که دچار خطا شده نامشخص است، روش ارائه شده از ۴ مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول، دوم و سوم به ترتیب فرض می‌شود که خطا در بخش‌های ۱، ۲ و ۳ اتفاق افتاده است و در هر مرحله یک معادله بدست می‌آید. این معادلات که در مجموع سه معادله خواهد بود برای محاسبه محل خطا در مرحله ۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مراحل در ادامه آورده شده است.

۲-۲-۱- مرحله اول

شکل (۲) را در نظر بگیرید. فرض کنید خطای سه‌فاز متقارنی روی بخش ۱ اتفاق افتاده باشد. ولتاژ و جریان باس R برای جایاب خطا مشخص و معلوم است. لذا، ولتاژ و جریان نقطه اتصال J2 را می‌توان به صورت تابعی از ولتاژ و جریان باس R نوشت:

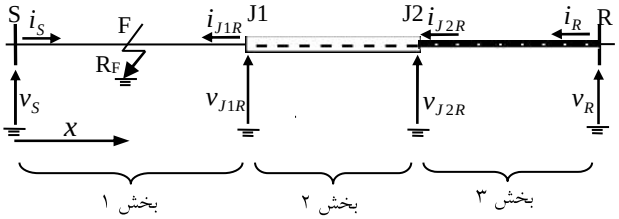
$$\begin{aligned} v_{J2R}(t) = & ((Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4)^2.[v_R(t+\frac{L_{S3}}{c_{S3}}) \\ & -(Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4).i_R(t+\frac{L_{S3}}{c_{S3}})] \\ & +(Z_{S3} - R_{S3}.L_{S3}/4)^2.[v_R(t-\frac{L_{S3}}{c_{S3}}) \\ & +(Z_{S3} - R_{S3}.L_{S3}/4).i_R(t-\frac{L_{S3}}{c_{S3}})] \\ & -\frac{(Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4).R_{S3}.L_{S3}}{4}.[\\ & \frac{R_{S3}.L_{S3}/2}{(Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4)}.v_R(t) \\ & +2.(Z_{S3} - R_{S3}.L_{S3}/4).i_R(t)]) / 2Z_{S3}^2 \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} i_{J2R}(t) = & -((Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4).[v_R(t+\frac{L_{S3}}{c_{S3}}) \\ & -(Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4).i_R(t+\frac{L_{S3}}{c_{S3}})] \\ & +(Z_{S3} - R_{S3}.L_{S3}/4)[v_R(t-\frac{L_{S3}}{c_{S3}}) \\ & +(Z_{S3} - R_{S3}.L_{S3}/4).i_R(t-\frac{L_{S3}}{c_{S3}})] \\ & -\frac{(Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4)}{4}.[2.v_R(t) \\ & -\frac{(Z_{S3} + R_{S3}.L_{S3}/4)}{2}.i_R(t)]) / 2Z_{S3}^2 \end{aligned} \quad (۶)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017



شکل (۲): خط انتقال سه بخشی، وقوع خطا در بخش ۱

که در روابط اخیر:

v_R, i_R: به ترتیب ولتاژ و جریان باس R،

v_{J2R}: ولتاژ نقطه اتصال J2،

Z_{S3}: امپدانس مشخصه بخش ۳،

R_{S3}: مقاومت خط مربوط به بخش ۳ برحسب اهم بر کیلومتر،

L_{S3}: طول بخش ۳،

c_{S3}: سرعت انتشار موج در بخش ۳.

حال، ولتاژ و جریان نقطه اتصال J2 مشخص است. با جایگذاری پارامترهای v_{J1R} ، i_{J2R} ، Z_{S2} ، R_{S2} ، L_{S2} ، c_{S2} به ترتیب به جای پارامترهای v_{J2R} ، i_R ، Z_{S3} ، R_{S3} ، L_{S3} ، i_{J2R} ، v_R ، c_{S3} در معادلات (۵) و (۶) ولتاژ و جریان نقطه اتصال J1 (v_{J1R} و i_{J1R}) به صورت توابعی از ولتاژ و جریان J2 (v_{J2R} و i_{J2R}) حاصل می‌شود. که:

Z_{S2}: امپدانس مشخصه بخش ۲،

R_{S2}: مقاومت بخش ۲ برحسب اهم بر کیلومتر،

L_{S2}: طول بخش ۲،

c_{S2}: سرعت انتشار موج در بخش ۲.

حال، با جایگذاری (۵) و (۶) در توابع بدست آمده، ولتاژ و جریان J1 به صورت توابعی از ولتاژ و جریان باس R بدست می‌آید:

$$v_{J1R} = f^{v}_{J1R}(v_R, i_R, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S2}, c_{S3}, t) \quad (۷)$$

$$i_{J1R} = f^{i}_{J1R}(v_R, i_R, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S2}, c_{S3}, t) \quad (۸)$$

بخش اول خط انتقال را در نظر بگیرید. ولتاژ و جریان باس S مشخص و معلوم، و ولتاژ و جریان نقطه اتصال J1 با استفاده از روابط (۷) و (۸) تعیین می‌شود. لذا، ولتاژ و جریان هر دو سمت بخش ۱ معلوم است. بنابراین، روش دو پایانه‌ای را می‌توان مورد استفاده قرار داد. معادله (۹) تنها در محل خطا معتبر خواهد بود:

$$f_{S1}(v_S, i_S, v_R, i_R, Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S1}, c_{S2}, c_{S3}, t, x) = 0 \quad (۹)$$

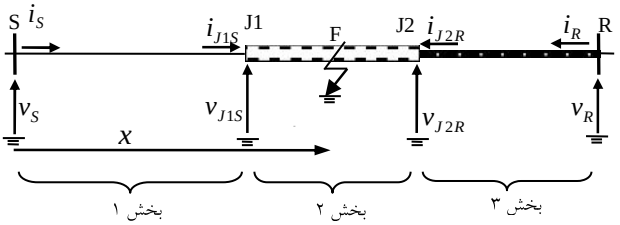
معادله (۹) با فرض وقوع خطای سه‌فاز به زمین در بخش اول خط انتقال بدست آمد. لذا x بین باس S و نقطه J1 واقع شده است.

۲-۲-۲- مرحله دوم

در این مرحله، فرض می‌شود که خطا در بخش ۲ رخ داده است (شکل (۳)). ولتاژ و جریان باس S مشخص و در دسترس است. لذا، ولتاژ و جریان نقطه اتصال J1 را می‌توان برحسب ولتاژ و جریان باس S به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} v_{J1S}(t) = ((Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4)^2.[&v_S(t+\frac{L_{S1}}{c_{S1}}) \\ &-(Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4).i_S(t+\frac{L_{S1}}{c_{S1}})] \\ +(Z_{S1}-R_{S1}.L_{S1}/4)^2.[&v_S(t-\frac{L_{S1}}{c_{S1}}) \\ &+(Z_{S1}-R_{S1}.L_{S1}/4).i_S(t-\frac{L_{S1}}{c_{S1}})] \\ -\frac{(Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4).R_{S1}.L_{S1}}{4}.[&\\ \frac{R_{S1}.L_{S1}/2}{(Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4)}&.v_S(t) \\ +2.(Z_{S1}-R_{S1}.L_{S1}/4).i_S(t)])&/2Z_{S1}^2 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

$$\begin{aligned} i_{J1S}(t) = -((Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4).[&v_S(t+\frac{L_{S1}}{c_{S1}}) \\ &-(Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4).i_S(t+\frac{L_{S1}}{c_{S1}})] \\ +(Z_{S1}-R_{S1}.L_{S1}/4)[&v_S(t-\frac{L_{S1}}{c_{S1}}) \\ &+(Z_{S1}-R_{S1}.L_{S1}/4).i_S(t-\frac{L_{S1}}{c_{S1}})] \\ -\frac{(Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4)}{4}.[&2.v_S(t) \\ -\frac{(Z_{S1}+R_{S1}.L_{S1}/4)}{2}&.i_S(t)])/2Z_{S1}^2 \end{aligned} \quad (۱۱)$$



شکل (۳): خط انتقال ۳ بخشی، وقوع خطا در بخش ۲

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]

همچنین، ولتاژ و جریان J2 را می‌توان توسط روابط (۵) و (۶) تعیین نمود. لذا، ولتاژ و جریان دو انتهای بخش ۲ تعیین گردید و با بکارگیری روش دو پایانه‌ای داریم:

$$f_{S2}(v_S, i_S, v_R, i_R, Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S1}, c_{S2}, c_{S3}, t, x) = 0 \quad (۱۲)$$

با فرض رخداد خطا در بخش ۲، رابطه (۱۲) بدست آمد. لذا، x بین L_{S1} و $L_{S1}+L_{S2}$ محدود می‌گردد.

۲-۲-۳- مرحله سوم

در این مرحله، فرض کنید خطا در بخش ۳ اتفاق افتاده است. ولتاژ و جریان J1 با بکارگیری روابط (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آید. با جایگذاری $i_{J2S}, v_{J1S}, i_{J1S}, Z_{S2}, R_{S2}, L_{S2}, c_{S2}\ v_{J2S}$ به ترتیب به جای $i_{J1S}, v_S, i_S, Z_{S1}, R_{S1}, L_{S1}, c_{S1}\ v_{J1S}$ در (۱۰) و (۱۱)، ولتاژ و جریان J2 به صورت توابعی از ولتاژ و جریان J1 (v_{J1S} و i_{J1S}) حاصل می‌شود. حال با جایگذاری (۱۰) و (۱۱) در توابع بدست آمده، v_{J2S} و i_{J2S} به صورت توابعی از ولتاژ و جریان باس S بدست می‌آید. بخش ۳ را مورد توجه قرار دهید. ولتاژ و جریان هر دو انتهای آن معلوم است. بنابراین، با بهره‌گیری از روش دو پایانه‌ای می‌توان نوشت:

$$f_{S3}(v_S, i_S, v_R, i_R, Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S1}, c_{S2}, c_{S3}, t, x) = 0 \quad (۱۳)$$

رابطه (۱۳) با فرض ایجاد خطا در بخش ۳ بدست آمد. لذا، x در محدوده $L_{S1}+L_{S2}<x<L_{S1}+L_{S2}+L_{S3}$ واقع شده است.

معادلات (۹)، (۱۲) و (۱۳) در مرحله بعد برای بدست آوردن مکان خطا بکار برده خواهد شد.

۲-۲-۴- مرحله چهارم

نکته‌ای که حائز اهمیت است این است که در روابط (۹)، (۱۲) و (۱۳) تنها یک متغیر مجهول x وجود دارد و دیگر پارامترها معلوم و مشخص‌اند. لذا، درصورت مشخص بودن بخش خطادیده با حل معادله متناظر با آن، مکان خطا محاسبه می‌شود. اما، در واقعیت قبل از تعیین محل خطا، بخش خطادیده مشخص نیست. بنابراین در این مرحله، ابتدا تابع سه ضابطه‌ای زیر براساس روابط (۹)، (۱۲) و (۱۳) که به ترتیب در مراحل ۱، ۲ و ۳ بدست آمد با توجه به فرضیات انجام شده در این مراحل، تعریف می‌شود:

$$f(v_S, i_S, v_R, i_R, Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S1}, c_{S2}, c_{S3}, t, x) = \begin{cases} f_{S1} & 0 < x < L_{S1} \\ f_{S2} & L_{S1} < x < L_{S1} + L_{S2} \\ f_{S3} & L_{S1} + L_{S2} < x < L_{S1} + L_{S2} + L_{S3} \end{cases} \quad (۱۴)$$

باید توجه داشت که تنها در یک نقطه از خط خطا رخ داده است. لذا، تنها یکی از ضابطه‌های تابع (۱۴) که متناظر با بخش خطا دیده از خط انتقال می‌باشد واقعاً برابر با صفر است و دیگر ضابطه‌ها برابر با صفر نخواهد بود. بنابراین، (۱۴) تنها در بخش واقعی خطا و در محل خطا برابر با صفر خواهد بود:

$$f(v_S, i_S, v_R, i_R, Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S1}, c_{S2}, c_{S3}, t, x) = 0 \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۵) به ازای تمامی نمونه‌های i_S ، v_R ، i_R ، v_S که حین خطا ثبت شده، برابر با صفر خواهد بود. لذا، معادله (۱۵) گسسته‌سازی شده و سپس بر اساس آن مساله بهینه‌سازی (۱۶) حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} Min\, J_f(x) = \\ \underset{x}{Min} \sum_{n=1}^{N} f^2(v_S, i_S, v_R, i_R, Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S3}, L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}, R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}, c_{S1}, c_{S2}, c_{S3}, n, x) \\ \text{Such that:} \quad 0 < x < L \end{cases} \quad (۱۶)$$

در این رابطه:

$n.\Delta t=t$،

n: یک عدد دلخواه،

Δt : پله نمونه برداری،

N: تعداد دسته نمونه‌های موجود در پنجره اطلاعاتی.

با حل مساله (۱۶)، با استفاده از روش‌های ارائه شده در مراجع مربوط، محل خطا محاسبه خواهد شد. بدلیل اینکه x در مساله فوق در محدوده طول خط انتقال قرار دارد، می‌توان از روش یکایک شماری [۱۷] برای این امر بهره برد.

نکته اینکه، روش پیشنهادی به سادگی برای انواع دیگر خطاها قابل انجام می‌باشد. برای این منظور ابتدا از تبدیل فاز به مودال برای مشخص نمودن کمیت‌های مودال استفاده می‌شود [۱۸]. حال می‌توان معادلات (۵) تا (۱۶) را در حوزه مودال نوشت. توجه به این نکته با

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

اهمیت است که هر معادله نوشته شده در حوزه مودال، از هر جهت با معادله خط انتقال تک‌فاز (با حذف وابستگی بین فازها) مشابه می‌باشد. بنابراین، به ازای هر مود یک تابع بهینه‌سازی مشابه با (۱۶) بدست می‌آید. با توجه به نوع خطا می‌توان تابع متناظر را انتخاب و برای تعیین مکان خطا بکار برد. با توجه به این حقیقت که مود یک در تمامی خطاها موجود است می‌توان از تابع متناظر با مود یک برای همه خطاها بهره برد.

توجه به این موضوع ضروری به نظر می‌رسد که روش پیشنهادی قابلیت توسعه برای خطوط با تعداد K بخش را دارا می‌باشد. به اینصورت که این روش از $K+1$ مرحله تشکیل می‌شود. در iامین مرحله ($1\leq i \leq K$) فرض می‌شود که خطا در بخش iام از خط انتقال رخ داده و یک معادله همانند معادلات (۹)، (۱۲) و (۱۳) بدست می‌آید. لذا، K معادله متناظر با K مرحله (یا متناظر با K بخش خط انتقال) حاصل می‌شود. در مرحله $K+1$ یک تابع Kضابطه‌ای مشابه (۱۴) تعریف می‌شود که تنها در بخش حقیقی خطا و در مکان واقعی خطا برابر صفر خواهد بود. بنابراین، یک مساله بهینه‌سازی همانند (۱۶) بدست می‌آید که با حل آن مکان خطا محاسبه می‌گردد.

۳- ارزیابی روش ارائه شده

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های گوناگونی انجام شده است. برای این کار یک سیستم قدرت سه‌فاز، سه بخشی و ۲۲۰ کیلوولتی در MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده است (دیاگرام تک خطی این سیستم در شکل (۲) نشان داده شده است). طول بخش‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب عبارتند از ۱۲۰، ۲۰ و ۱۵ کیلومتر. پارامترهای سیستم و خط انتقال در بخش ضمائم آورده شده است.

برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی، خطای تعیین مکان خطا به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$\text{درصد خطا} = \frac{\text{طول خط}}{\text{(مکان واقعی خطا - مکان محاسبه شده)}} \quad (۱۷)$$

برای مثال فرض کنید که خطای تک‌فاز به زمین در بخش ۲ خط انتقال در فاصله ۱۲۵ کیلومتری از ابتدای خط با مقاومت خطای ۱۰Ω اتفاق افتاده است. حدود دو سیکل از شکل موج ولتاژ و جریان سه‌فاز ثبت شده توسط ثبت کننده‌های نصب شده در باس R به ترتیب در شکل (۴)-(الف) و (ب) نمایش داده شده است. برای اجرای الگوریتم ارائه شده و با هدف حل مساله جایابی خطا، مقدار تابع بهینه‌سازی در طول خط انتقال محاسبه و در شکل (۵) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل می‌توان ملاحظه نمود منحنی تابع در فاصله‌های ۱۲۰ و ۱۴۰ کیلومتری (نقطه اتصالات بخش‌های مختلف خط انتقال) منفصل است و این بدلیل سه ضابطه‌ای بودن این تابع می‌باشد (همانند تابع سه ضابطه‌ای (۱۴) که برای خطاهای سه‌فاز به زمین بدست آمد). مقدار کمینه تابع بهینه‌سازی در مکان ۱۲۵ کیلومتری رخ داده و لذا مقدار خطای جایابی صفر درصد محاسبه می‌شود.

در ادامه، تاثیر پارامترهای مختلف خطا (فاصله خطا، زاویه شروع خطا و بخشی از خط که دچار خطا شده) بر روش پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفته است.

برای بررسی توانایی روش پیشنهادی، انواع مختلف خطا (تک‌فاز به زمین، سه‌فاز، دو فاز و دو فاز به زمین) در مکان‌های مختلف خط و در بخش‌های ۱، ۲ و ۳ شبیه‌سازی شده، در حالی که زاویه شروع خطا 30° لحاظ شده است. برخی از نتایج حاصل از این آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. همان طور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود حداکثر قدر مطلق خطا کمتر از ۰/۰۷ درصد می‌باشد که اثبات کننده این موضوع است که روش پیشنهادی دارای دقت بالایی می‌باشد.

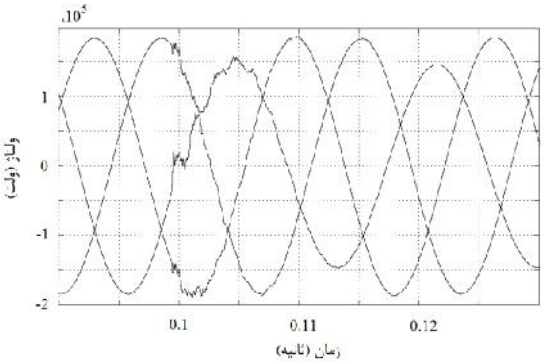
تاثیر عملکرد روش پیشنهادی به ازای زوایای شروع خطای گوناگون نیز، با شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داده شده است. جدول (۲) به ازای زوایای شروع خطای مختلف 0°، 45° و 90° با مقاومت خطای ۵ Ω تهیه شده است. در این جدول حساسیت پایین روش پیشنهادی به زاویه شروع خطا و دقت بالای آن با تغییر زاویه شروع خطا را می‌توان مشاهده نمود.

برخی از روش‌های جایابی خطا، برای خطاهای نزدیک به پایانه‌ها حساس بوده و به ازای این خطاها، نتایج نامناسبی را به‌دست می‌دهند. برای مطالعه اثر این قبیل خطاها بر روش ارائه شده، مکان‌هایی نزدیک به پایانه‌ها در نظر گرفته شده و انواع متنوع خطا در آنها اعمال شده است. تعدادی از نتایج بدست آمده از اجرای روش جایابی به ازای این خطاها در جدول (۳) نشان داده شده است. از این جدول می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش پیشنهادی به ازای این قبیل خطاها نیز همچنان دقت بالا و قابل قبولی را از خود نشان داده است.

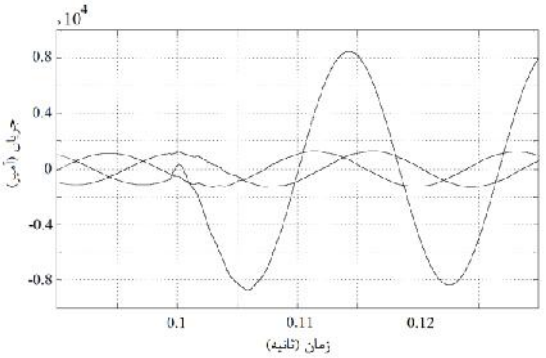
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]

جدول (۱): نتایج حاصل از جایابی خطا با رخداد انواع مختلف خطا در مکان‌های متعدد خط انتقال

نوع خطا	مکان واقعی خطا (کیلومتر)		R_f = 1Ω	R_f = 10Ω	R_f = 100Ω
			خطای جایابی به درصد		
A-G	30	بخش ۱	-0.0481	0.0523	0.0406
	50		-0.0519	0.0171	0.0533
	100		0.0590	0.0060	-0.0286
	130	بخش ۲	0.0607	-0.0442	0.0600
	150	بخش ۳	0.0387	-0.0019	0.0590
B-G	30	بخش ۱	0.0536	-0.0101	-0.0462
	50		0.0201	0.0593	0.0377
	100		0.0560	0.0450	-0.0599
	130	بخش ۲	0.0314	0.0332	0.0231
	150	بخش ۳	-0.0424	0.0201	-0.0139
C-G	30	بخش ۱	-0.0288	-0.0604	0.0266
	50		0.0417	-0.0520	-0.0585
	100		0.0581	-0.0236	0.0251
	130	بخش ۲	-0.0153	-0.0079	-0.0601
	150	بخش ۳	-0.0404	0.0381	0.0343
A-B-C-G	30	بخش ۱	0.0189	-0.0070	-0.0013
	50		-0.0289	0.0329	0.0270
	100		-0.0435	0.0200	0.0232
	130	بخش ۲	0.0593	-0.0002	-0.0491
	150	بخش ۳	-0.0356	0.0110	-0.0206
A-B-G	30	بخش ۱	0.0008	-0.0316	0.0324
	50		0.0592	0.0504	0.0257
	100		-0.0452	-0.0466	0.0061
	130	بخش ۲	-0.0317	0.0440	-0.0313
	150	بخش ۳	0.0554	-0.0331	0.0405
A-C-G	30	بخش ۱	-0.0321	-0.0391	-0.0194
	50		-0.0191	-0.0034	0.0150
	100		0.0064	0.0110	0.0427
	130	بخش ۲	0.0332	-0.0276	0.0538
	150	بخش ۳	0.0087	-0.0154	0.0327
B-C-G	30	بخش ۱	0.0040	-0.0575	-0.0547
	50		-0.0477	0.0560	0.0360
	100		-0.0630	-0.0039	0.0089
	130	بخش ۲	0.0380	-0.0436	-0.0210
	150	بخش ۳	-0.0431	0.0037	-0.0244
A-B	30	بخش ۱	0.0199	-0.0306	0.0132
	50		-0.0064	0.0320	0.0244
	100		0.0533	-0.0350	-0.0537
	130	بخش ۲	0.0049	0.0420	-0.0448
	150	بخش ۳	-0.0074	-0.0544	0.0640
A-C	30	بخش ۱	-0.0639	0.0596	-0.0507
	50		0.0476	0.0409	0.0355
	100		-0.0310	-0.0129	-0.0536
	130	بخش ۲	0.0530	-0.0088	0.0387
	150	بخش ۳	-0.0457	-0.0305	-0.0410
B-C	30	بخش ۱	0.0103	0.0476	-0.0469
	50		0.0455	-0.0458	0.0064
	100		0.0017	-0.0192	0.0157
	130	بخش ۲	-0.0336	-0.0547	-0.0127
	150	بخش ۳	-0.0335	-0.0408	-0.0486

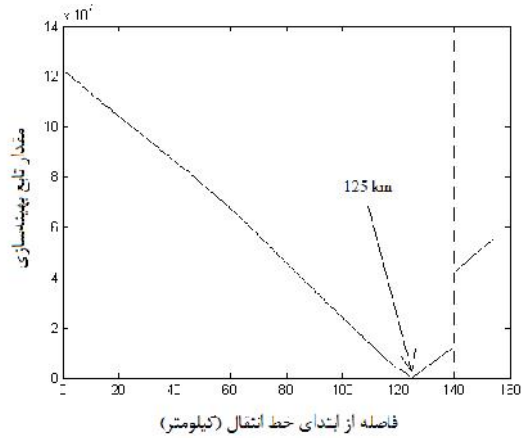


(الف)



(ب)

شکل (۴): (الف) ولتاژ و (ب) جریان سه‌فاز ثبت شده در باس انتهایی خط



شکل (۵): مقدار تابع بهینه‌سازی در طول خط انتقال

برای بررسی دقت روش ارائه شده با تغییر اختلاف زاویه ولتاژ دو طرف خط (زاویه توان)، زاویه فاز بین منابع ولتاژ دو طرف خط تغییر داده شده است و به ازای هر زاویه فاز، شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام شده است. به عنوان نمونه، اختلاف زوایه فاز ولتاژهای دو طرف خط (PhAng) ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درجه در نظر گرفته شده و انواع خطاها با مقاومت ۱۰ اهم و زاویه شروع خطای ۹۰ درجه اعمال شده است. روش ارائه شده با بکارگیری اطلاعات جمع‌آوری شده از شبیه‌سازی‌ها اجرا شده و نتایج حاصل برای خطای تک‌فاز به زمین در جدول (۴)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

جدول (۲): نتایج حاصل از جایابی خطا برای خطاهای با زوایای شروع مختلف

نوع خطا	مکان واقعی خطا (کیلومتر)		زاویه شروع خطا 0°	زاویه شروع خطا 45°	زاویه شروع خطا 90°
			خطای جایابی به درصد		
A-G	بخش ۱	40	-0.0316	0.0490	0.0524
	بخش ۲	132	0.0122	-0.0309	0.0410
	بخش ۳	145	-0.0242	-0.0096	-0.0616
B-G	بخش ۱	40	-0.0099	-0.0414	-0.0437
	بخش ۲	132	-0.0038	0.0127	-0.0523
	بخش ۳	145	0.0179	0.0258	0.0253
C-G	بخش ۱	40	-0.0233	-0.0556	-0.0602
	بخش ۲	132	-0.0119	0.0199	0.0040
	بخش ۳	145	0.0605	0.0282	0.0413
A-B-C-G	بخش ۱	40	-0.0509	-0.0226	0.0040
	بخش ۲	132	-0.0099	0.0360	0.0143
	بخش ۳	145	-0.0447	-0.0301	-0.0528
A-B-G	بخش ۱	40	0.0035	-0.0077	-0.0283
	بخش ۲	132	0.0023	0.0484	-0.0055
	بخش ۳	145	0.0590	0.0178	0.0572
A-C-G	بخش ۱	40	-0.0272	0.0227	-0.0334
	بخش ۲	132	-0.0557	0.0252	0.0222
	بخش ۳	145	0.0444	0.0217	-0.0356
B-C-G	بخش ۱	40	0.0226	0.0362	-0.0201
	بخش ۲	132	-0.0146	0.0132	-0.0636
	بخش ۳	145	-0.0048	-0.0644	0.0537
A-B	بخش ۱	40	0.0349	-0.0050	-0.0098
	بخش ۲	132	-0.0037	0.0367	-0.0229
	بخش ۳	145	0.0286	-0.0418	-0.0599
A-C	بخش ۱	40	-0.0205	-0.0448	-0.0034
	بخش ۲	132	0.0308	-0.0398	0.0139
	بخش ۳	145	-0.0298	0.0538	-0.0332
B-C	بخش ۱	40	-0.0274	-0.0402	0.0342
	بخش ۲	132	0.0237	0.0098	-0.0527
	بخش ۳	145	0.0186	-0.0096	0.0060

آورده شده است. با توجه به نتایج موجود در این جدول می‌توان چنین نتیجه گرفت که دقت روش پیشنهادی با تغییر اختلاف زاویه فاز ولتاژهای دو طرف خط تغییرات بسیار کمی را دارا می‌باشد.

حساسیت روش پیشنهادی به پارامترهای خط نیز مورد بررسی قرار گرفته و خطی سه‌بخشی و با پارامترهای متفاوت از آنچه‌که در ضمیمه آمده شبیه‌سازی و به ازای خطاهای مختلف در نقاط متفاوت خط مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل حاکی از آن است که این روش به پارامترهای خط وابستگی چندانی ندارد و همچنان دقت بالایی از خود نشان داده است.

جدول (۳): نتایج حاصل از جایابی خطا با رخداد انواع مختلف خطا در نزدیکی پایانه‌های خط انتقال

نوع خطا	مکان واقعی خطا (کیلومتر)		R_f = 1Ω	R_f = 10Ω	R_f = 100Ω
			خطای جایابی به درصد		
A-G	بخش ۱	4	-0.0163	0.0285	0.0505
	بخش ۲	117	0.0214	0.0439	-0.0650
	بخش ۳	152	-0.0406	0.0391	-0.0294
A-B-C-G	بخش ۱	4	-0.0530	-0.0456	-0.0637
	بخش ۲	117	-0.0350	0.0241	0.0183
	بخش ۳	152	-0.0512	0.0562	0.0222
A-B-G	بخش ۱	4	-0.0488	-0.0016	0.0058
	بخش ۲	117	-0.0024	0.07	-0.0669
	بخش ۳	152	-0.0047	0.0194	-0.0337
A-B	بخش ۱	4	0.0331	0.0427	-0.0401
	بخش ۲	117	0.0122	-0.0523	-0.0270
	بخش ۳	152	-0.0236	0.0615	0.0002

جدول (۴): درصد خطای جایابی با درنظر گرفتن زاویه‌های فاز مختلف برای ولتاژهای دو طرف خط (خطای تک‌فاز به زمین)

مکان واقعی خطا (کیلومتر)		PhAng= 10°	PhAng= 30°	PhAng= 40°
		خطای جایابی به درصد		
بخش ۱	20	0.0421	-0.0580	-0.0186
	60	0.0322	0.0600	-0.0659
	110	-0.0368	0.011	-0.0016
بخش ۲	130	0.0366	0.0648	-0.0058
بخش ۳	145	0.0251	0.0174	-0.0376

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تعیین محل خطا در خطوط انتقال چند بخشی کابلی–هوایی روش جدیدی ارائه شده است. این روش از مدل گسترده خط در حوزه زمان بهره می‌گیرد و از $K+1$ مرحله برای تعیین محل خطا تشکیل شده است و به شناساگر نیاز ندارد. این روش مستقیما از نمونه‌های ارسال شده از دو طرف خط به صورت همزمان در حوزه زمان استفاده می‌نماید و عدم نیاز به فیلتر باعث دقت بالاتر این روش نسبت به روش‌های مشابه شده است. بررسی دقت روش پیشنهادی با آزمایش‌های گوناگون صورت گرفته است که این آزمایش‌ها دقت بالای روش پیشنهادی را تحت فاصله‌ها و انواع مختلف خطا در زمان‌های شروع خطای گوناگون نشان می‌دهد طوری که حداکثر قدر مطلق خطا از ۰/۰۷ درصد تجاوز نکرده است.

پیوست:

مشخصات سیستم:

ولتاژ نامی سیستم: ۵۰۰ کیلوولت

فرکانس نامی سیستم: ۶۰ هرتز

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

زاویه فاز بین منابع ولتاژ: ۲۰ درجه

مشخصات خط انتقال:

بخش ۱:

توالی صفر:

R_0=0.275(Ω/km),L_0=3.4505998(mH/km), C_0=8.5(nF/km)

توالی مثبت و منفی:

R_1=0.0275(Ω/km), L_1=1.002768(mH/km), C_1=13(nF/km)

بخش ۲:

توالی صفر:

R_0=0.412(Ω/km), L_0=1.5338(mH/km), C_0=152.9(nF/km)

توالی مثبت و منفی:

R_1=0.024(Ω/km), L_1=0.4278(mH/km), C_1=281.1(nF/km)

بخش ۳:

توالی صفر:

R_0=0.059(Ω/km), L_0=0.408(mH/km), C_0=456.9(nF/km)

توالی مثبت و منفی:

R_1=0.016(Ω/km), L_1=0.268(mH/km), C_1=456.9(nF/km)

مراجع

[۱] حسین عسکریان ابیانه، هدا شریفیان، رضا محمدی چبنلو، فرزاد رضوی، **"روشی نو در بدست آوردن کمترین نقاط شکست به کمک الگوریتم ژنتیک"**، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره دوم، پائیز و زمستان ۱۳۹۰.

[۲] محسن حمزه، شاهرخ فرهنگی، مجید صنایع‌پسند، **"روشی جدید در تحلیل عملکرد حفاظت‌های ضدجزیره‌ای فرکانسی در حالت جزیره‌ای چند اینورتری"**، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال نهم، شماره دوم، صص ۱۸-۱۱، پائیز و زمستان ۱۳۹۱.

[3] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, T. Sakaguchi, "A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.3, pp. 1316-1323, Mar. 1981.

[4] M. S. Sachdev, R. Agarwal, "A technique for estimating transmission line fault locations from digital impedance relay measurements", IEEE Trans. Power Del., Vol. 3, No.1, pp. 121-129, Jan. 1988.

[5] J. Izykowski, E. Rosolowski, P. Balcerek, M. Fulczyk, and M. M. Saha, "Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements", IEEE Trans. Power Del., Vol. 25, no. 1, pp. 72–80, Jan. 2010.

[6] B. Alen, and L. Zbigniew, "Fault location in power networks with mixed feeders using the complex space-phasor and Hilbert–Huang transform", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 48, pp. 208–19, 2012.

[7] E. S. T. Eldin, M. M. A. Aziz, D. K. Ibrahim, and M. Gilany, "Fault location scheme for combined overhead line with underground power cable", Elect. Power Syst. Res., Vol. 76, pp. 928–935, 2006.

[8] Ch. Mingjun, Ch. Yiping, L. Xinkai, "Improved algorithm of fault location on overhead power line and high voltage cable hybrid line, " Journal of Mechanical & Electrical Engineering, Vol. 28, no. 9, pp. 1132-1135, 2011.

[9] M. Gilany, E. S. T. Eldin, M. M. A. Aziz, and D. K. Ibrahim, "An accurate scheme for fault location in combined overhead line with underground power cable", in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet., San Francisco, CA, Jun. 2005, Vol. 3, pp. 2521–2527.

[10] J. Sadeh and H. Afradi, "A new and accurate fault location algorithm for combined transmission lines using adaptive network-based fuzzy inference system", Electric Power Systems Research, Vol. 79, no. 11, pp. 1538-1545, Nov. 2009.

[11] Y. Yuze, Q. Jian, Li Gongxin, et. al., "A survey on fault location methods for hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines," Power System Technology, Vol. 30, no. 17, pp. 64-69, 2006.

[12] C. K. Jung, K.H. Kim, J. B. Lee, B. Klocklb, "Wavelet and neuro-fuzzy based fault location for combined transmission systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, pp. 445–54, 2007.

[13] I. Niazy, and J. Sadeh, "A new single ended fault location algorithm for combined transmission line considering fault clearing transients without using line parameters", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 44, pp. 816–823, 2013.

[14] X. Yang, M. S. Choi, S. J. Lee, C. W. Ten, and S. I. Lim, "Fault location for underground power cable using distributed parameter approach", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, no. 4, pp. 1809–1816, Nov. 2008.

[15] C.-W. Liu, T.-C. Lin, C.-S. Yu, and J.-Z. Yang, "A fault location technique for two-terminal multisection compound transmission lines using synchronized phasor measurements", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, no. 1, pp. 113-121, Mar. 2012.

[16] M. Ghazizadeh-Ahsaee, "Accurate NHIF locator utilizing two-end unsynchronized measurements", IEEE Trans. Power Del., Vol. 28, no. 1, pp. 419-426, Jan. 2013.

[17] R. E. Miller, Optimization: Foundations and applications, Wiley Press, New York, NY, 2000.

[18] J. Sadeh, N. Hadjsaid, A. M. Ranjbar, and R. Feuillet, "Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines", IEEE Trans. Power Del., Vol. 15, no. 3, pp. 1027–1033, Jul. 2000.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.5.6]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017