الگوریتم جامعی برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال دو مداره و چند پایانه‌ای (بیش از سه پایانه) مبتنی بر داده‌های PMU

محمدحسین خزاعی[1] فرهاد حق‌جو[2]

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
khazaei@ace.sbu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
f_haghjoo@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله الگوریتم جامعی برای مکان‌یابی خطا در خطوط دو مداره و چند پایانه‌ای، مبتنی بر داده‌های فازوری PMUها و مدل گسترده خط ارائه شده است. معادلات دیفرانسیل خطوط سه فاز دو مداره بدلیل تزویج متقابل بین فازها به هم وابسته بوده و در این حالت حل آنها مشکل است. برای تفکیک معادلات و محاسبه پارامترها و مؤلفه‌های مودال پایانه‌های خط، در خطوط جابجاشده از تبدیل کلارک و در خطوط جابجانشده از ماتریس‌های تبدیل حاصله از تئوری بردارهای ویژه- مقادیر ویژه استفاده شده است. کمیت‌های نقاط انشعاب با استفاده از فازورهای پایانه‌ها و معادلات حاکم بر مدل گسترده خط محاسبه و بر اساس مقایسهٔ مقادیر ولتاژ تخمینی، بخش خطادار تعیین شده است. با توجه به وابستگی معادلات دیفرانسیل خط به زمان و مکان، برای تعیین مکان خطا از چهار روش استفاده شده است. در روش‌های اول و دوم رابطه‌ای بدست آمده که در زمان وقوع خطا، مکان خطا را نشان می‌دهد. در روش‌های سوم و چهارم شاخص‌هایی مبتنی بر فازور ولتاژ یا جریان تعریف شده (اختلاف ولتاژها و مجموع جریان‌ها) که با توجه به تغییرات آنها در طول خط (نقطه مینیمم یا ماکزیمم)، مکان خطا مشخص شده است.

سیستم‌های نمونه یک خط دو مداره سه پایانه‌ای و یک خط دو مداره پنج پایانه‌ای از شبکه انتقال ایران است که در نرم‌افزار EMTP شبیه سازی شده و داده‌های حاصله در نرم افزار MATLAB مطابق با الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین مکان دقیق خطا پردازش گردیده است. تمام عوامل تأثیرگذار ازجمله وجود منبع در انشعابات، اختلاف فاز و تفاوت امپدانس منابع، تزویج متقابل، عدم جابجایی خط، بار نامتقارن، انواع خطا، خطاهای بین دو مدار، وقوع دو خطای همزمان و پیشامد عدم دسترسی به داده‌های یک PMU در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای تعیین بخش خطادار و مکان خطا کارآمد بوده و حداکثر اشتباه آن کمتر از ۱٪ (و برای خطاهای همزمان و خطاهای بین دو مدار کمتر از ۳٪) است. در نهایت مقاله حاضر با مراجع مقایسه شده و وجوه تمایز و نوآوری‌های آن بیان شده است.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی خطا، خطوط انتقال دو مداره چند پایانه‌ای، واحد اندازه‌گیری فازوری (PMU)، مؤلفه‌های مودال، تئوری بردارهای ویژه- مقادیر ویژه، EMTP، MATLAB

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۲/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول: فرهاد حق‌جو

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- حکیمیه- بلوار وفادار شرقی- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور- دانشکده مهندسی برق

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

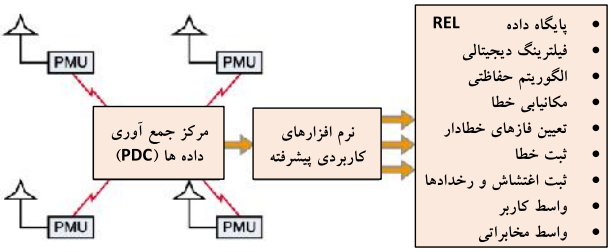
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]

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

۱- مقدمه

خطوط انتقال در برخی موارد بدلیل محدودیت‌های فنی یا اقتصادی، بصورت سه پایانه‌ای یا چند پایانه‌ای[۱] بهره‌برداری شده و حفاظت آنها با مشکلاتی از جمله کاهش یا افزایش ناخواسته برد رله دیستانس، کاهش بارپذیری رله و ... همراه است. همچنین در خطوط دو مداره تزویج متقابل بین دو مدار باعث کاهش یا افزایش برد رله دیستانس شده که برای جلوگیری از عملکرد اشتباه رله از ضرایبی برای جبران اثر امپدانس متقابل توالی صفر استفاده می‌شود [۱-۳].

با توجه به وجود خطوط دو مداره چند پایانه‌ای در شبکه انتقال و فوق توزیع برق ایران [۴]، ارائه روشی برای حفاظت این خطوط حائز اهمیت است. الگوریتم‌های مکان‌یابی خطا اعم از حفاظت خط هستند؛ زیرا علاوه بر تعیین زون خطا، مکان دقیق آن را نیز مشخص می‌سازند. همچنین با توجه به نصب PMU[۲]ها در شبکه انتقال برق کشور [۵]، الگوریتم مکان‌یابی ارائه شده در این مقاله مبتنی بر داده‌های فازوری می‌باشد. از مزایای مکان‌یابی خطا مبتنی بر داده‌های PMU حجم کم داده‌های ارسالی و قابلیت پیاده‌سازی طرح مکان‌یابی با تجهیزات اندازه‌گیری موجود است. PMU های نصب‌شده در طرفین خط با نمونه‌برداری از سیگنال‌های ولتاژ و جریان در هر پنجره داده، فازورها و مؤلفه‌ها را محاسبه و با کمک سیستم GPS[۳] و الصاق برچسب زمانی، سنکرون نموده و برای پردازش‌های بعدی به PDC[۴] ارسال می‌نمایند. نرم‌افزارهای کاربردی واسط نیز داده‌های PDC را آرشیو و دسته‌بندی نموده و در اختیار رله یا مکانیاب خطا قرار می‌دهند. شکل (۱) نحوه ارتباط PMUها و رله برای انجام وظایف حفاظتی از جمله مکان‌یابی خطا را نشان می‌دهد.



شکل (۱): حفاظت سیستم قدرت مبتنی بر داده‌های PMU.

در مراجع [۱۱] تا [۲۴] به مکان‌یابی خطا در خطوط چند پایانه‌ای پرداخته شده است که از میان آنها، در [۱۲]، [۱۴]، [۲۰] و [۲۱] به مکان‌یابی خطا در خطوط چند پایانه‌ای دو مداره پرداخته شده است.

در مرجع [۱۲] از مدل فشرده خط کوتاه و اختلاف جریان‌های خطوط موازی در هر پایانه و تبدیل سیستم چند پایانه‌ای به سیستم سه پایانه‌ای استفاده شده است. در خط سه پایانه‌ای یک معادله kcl در نقطه خطا و دو معادله kvl برای حلقه‌های متشکل از نقطه انشعاب و خط انتقال نوشته شده و با حل دستگاه حاصله، فاصله محل خطا از مکانیاب خطا بر حسب جریان‌های دیفرانسیلی و طول بخش‌های خط سه‌پایانه‌ای بدست آمده است.

در مرجع [۱۴] دو الگوریتم برای مکان‌یابی خطا در خطوط کوتاه با استفاده از اطلاعات جریانی و ولتاژی CT و CVTهای موجود در پایانه‌ها و مبتنی بر اصل برابری مجموع جریان‌های تزریقی به بخش خطادار و مجموع جریان در پایانه‌ها، بیان شده‌است. در الگوریتم اول از محاسبه امپدانس و الگوریتم دوم از روش نسبت انحراف جریان استفاده شده، ولی خطاهای دو فاز به زمین و سه فاز بررسی نشده است.

در مرجع [۲۰] برای جداسازی فازها و حذف امپدانس متقابل از معادلات، از تبدیل مؤلفه‌های متقارن استفاده شده است. رابطه ولتاژ نقطه خطا (V_f) با استفاده از فازورهای سنکرون ولتاژ و جریان پایانه‌های اصلی، امپدانس موجی خط و ثابت انتشار موج بدست آمده و با حذف V_f از این رابطه، شاخص مکان خطا حاصل شده است. این شاخص برای تمام بخش‌ها محاسبه شده و با توجه به آن، بخش و مکان خطا مشخص شده است. برای بدست‌آوردن پارامترهای خودی و متقابل خط دو مداره، از میانگین درایه‌های غیرقطری ماتریس‌های فازی امپدانس و ادمیتانس استفاده نموده که دارای خطا می‌باشد.

در مرجع [۲۱] بر اساس پردازش داده‌های قبل و بعد از خطا، سنکرون نمودن کمیت‌های ولتاژ و جریان موجود، تخمین امپدانس بارها در پایانه‌های دیگر و از اختلاف ولتاژ تخمینی در نقطه خطا مکان آن تعیین شده است. در انشعابات خط چند پایانه‌ای تنها اتصال بار در نظر گرفته شده و مکان‌یابی بر اساس کمیت‌های سه فاز (V_{abc} و I_{abc}) انجام شده است. در این چهار مرجع خطوط کاملاً جابجاشده در نظر گرفته شده درحالیکه در عمل اینطور نیست.

در این مقاله نواقص فوق‌الذکر برطرف شده و تمام عوامل تأثیرگذار بر نتایج مکان‌یابی [۶و۷]، ازجمله: ظرفیت خازنی موازی، عدم جابجایی خط، تزویج متقابل، انشعاب (Teed،Tap،Toff)، وجود منبع در انشعابات، اختلاف فاز و تفاوت امپدانس منابع، بار نامتقارن، مقاومت خطا و تمام انواع خطا از جمله خطاهای بین دومدار و وقوع دو خطای همزمان در دو مدار در نظر گرفته شده است. مکان‌یابی خطا در خطوط چندپایانه‌ای مبتنی بر تخمین فازورهای ولتاژ و جریان در نقاط انشعاب بوده که با استفاده از فازورهای پایانه‌ها و معادلات حاکم بر مدل گسترده خط محاسبه شده و بر اساس مقایسهٔ مقادیر ولتاژ تخمینی نقاط انشعاب، بخش خطادار تعیین شده‌است. سپس با تقلیل خط چندپایانه‌ای و تحلیل بخش خطادار، مکان خطا با استفاده از چند روش محاسبه شده و روش مناسب معرفی گردیده است.

نحوه بیان مطالب در بخش‌های بعد بدین‌ترتیب است: در بخش دوم مراحل الگوریتم پیشنهادی تشریح و در بخش سوم روش‌های پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا بیان شده‌است. در بخش چهارم نتایج

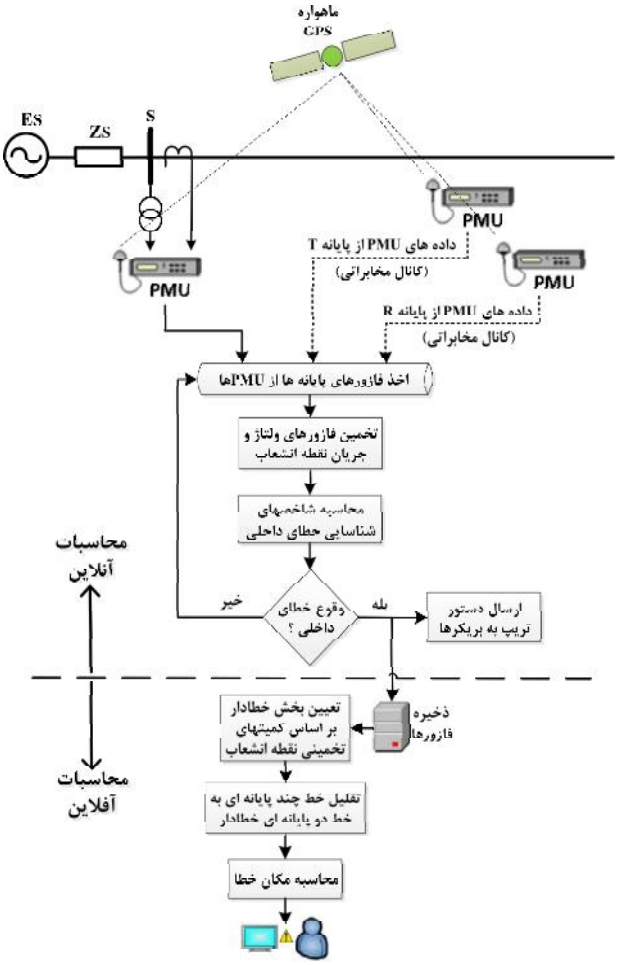
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

شبیه‌سازی روی دو سیستم نمونه دو مداره چند پایانه‌ای تحلیل و بررسی شده و در بخش پنجم نیز نتایج حاصله بیان شده است.

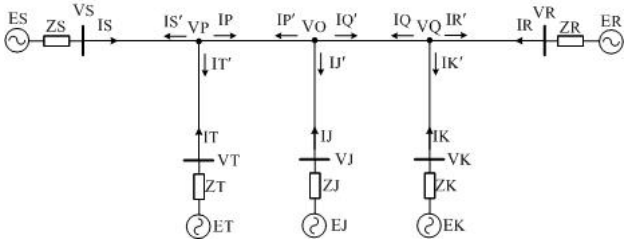
۲- الگوریتم پیشنهادی

اصول الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر تخمین فازورهای ولتاژ و جریان در نقاط انشعاب است. کمیت‌های نقاط انشعاب با استفاده از فازورهای پایانه‌ها و معادلات حاکم بر مدل گسترده خط محاسبه - شده و بر اساس مقایسهٔ مقادیر ولتاژ تخمینی، بخش خطادار تعیین شده و سپس با تقلیل خط چندپایانه‌ای به خط دو پایانه‌ای (بخش خطادار) مکان خطا با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه شده‌است. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی مطابق شکل (۲) است.

در [۸] از این الگوریتم مبتنی بر مؤلفه‌های متقارن در خطوط چند پایانه‌ای تک مداره و در این مقاله مبتنی بر مؤلفه‌های مودال در خطوط چند پایانه‌ای دو مداره استفاده شده‌است. برای نمونه یک خط پنج پایانه‌ای مطابق شکل (۳) را می‌توان مورد بررسی قرار داد.



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



شکل (۳): خط پنج پایانه‌ای نمونه

این خط پنج پایانه‌ای در صورت تشخیص وقوع خطا، طی چند مرحله به بخش مشتمل بر ناحیه خطادار کاهش داده می‌شود. بطور نمونه در صورت وقوع خطا در بخش SP، با مقایسه مقادیر تخمینی ولتاژ نقاط انشعاب، خط پنج پایانه‌ای فوق به خط سه پایانه‌ای STO و سپس به بخش خطادار SP کاهش بُعد داده می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا با استفاده از مؤلفه‌های ولتاژ و جریان پایانه‌های R و K کمیت‌های نقطه Q تخمین زده می‌شود. مساوی بودن پارامترهای تخمینی نقطه Q مبتنی بر مولفه‌های پایانه‌های مذکور به معنای عدم وقوع عیب در نواحی QR و QK است. سپس با استفاده از مؤلفه‌های پایانه J و نقطه Q، کمیت‌های نقطه O محاسبه می‌گردد و همین روال تا رسیدن به نقطه انشعابی با پارامترهای تخمینی متفاوت ادامه می‌یابد. بعنوان مثال در صورت وقوع عیب در ناحیه بین پایانه S و نقطه انشعاب P، ولتاژ تخمینی این نقطه مبتنی بر پارامترهای پایانه S بسیار کمتر از ولتاژ تخمینی مذکور مبتنی بر پارامترهای پایانه T خواهد بود. پارامترهای نقاط انشعاب P را می‌توان بترتیب ذیل محاسبه نمود:

$$\begin{cases} V_p\big|_S = \frac{V_S - Z_{cSP} I_S}{2} e^{\gamma_{SP} L_{SP}} + \frac{V_S + Z_{cSP} I_S}{2} e^{-\gamma_{SP} L_{SP}} \\ V_p\big|_O = \frac{V_O - Z_{cOP} I_O}{2} e^{\gamma_{OP} L_{OP}} + \frac{V_O + Z_{cOP} I_O}{2} e^{-\gamma_{OP} L_{OP}} \\ V_p\big|_T = \frac{V_T - Z_{cTP} I_T}{2} e^{\gamma_{TP} L_{TP}} + \frac{V_T + Z_{cTP} I_T}{2} e^{-\gamma_{TP} L_{TP}} \end{cases} \quad (۱)$$

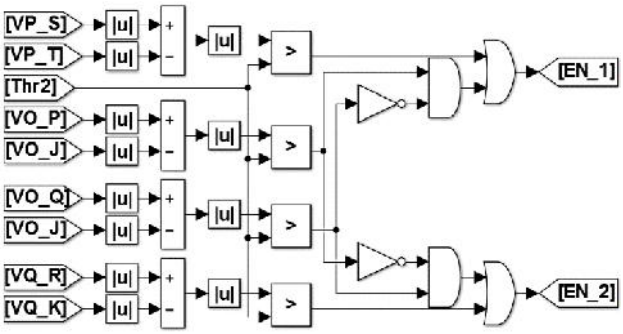
$$\begin{cases} I_p\big|_S = \frac{V_S - Z_{cSP} I_S}{2Z_{cSP}} e^{\gamma_{SP} L_{SP}} - \frac{V_S + Z_{cSP} I_S}{2Z_{cSP}} e^{-\gamma_{SP} L_{SP}} \\ I_p\big|_O = \frac{V_O - Z_{cOP} I_O}{2Z_{cOP}} e^{\gamma_{OP} L_{OP}} - \frac{V_O + Z_{cOP} I_O}{2Z_{cOP}} e^{-\gamma_{OP} L_{OP}} \\ I_p\big|_T = \frac{V_T - Z_{cTP} I_T}{2Z_{cTP}} e^{\gamma_{TP} L_{TP}} - \frac{V_T + Z_{cTP} I_T}{2Z_{cTP}} e^{-\gamma_{TP} L_{TP}} \end{cases} \quad (۲)$$

که در این روابط $V_p\big|_S$ و $I_p\big|_S$ (I_S') بترتیب ولتاژ و جریان نقطه انشعاب P مبتنی بر مولفه‌های پایانه S، V_S و I_S ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در پایانه S، Z_{cSP} امپدانس موجی بخش SP، γ_{SP} ثابت انتشار موج در بخش SP و L_{SP} طول بخش SP است.

مطابق شکل (۴) با مقایسه ولتاژهای تخمینی نقاط انشعاب P، O و Q، شرطهای ENable_1 و ENable_2 برای تقلیل خط مورد نظر بدست می‌آید. با توجه به میزان افت ولتاژ در شرایط مختلف بهره‌برداری، حد آستانه برای اختلاف ولتاژهای تخمینی در نقاط انشعاب Thr2=0.2% انتخاب شده است. بعنوان مثال در صورت وقوع خطا در بخش SP، اختلاف مقادیر $V_p\big|_S$ و $V_p\big|_T$ بیش از Thr2 بوده و Enable_1 فعال می‌شود، در نتیجه خط پنج پایانه‌ای به

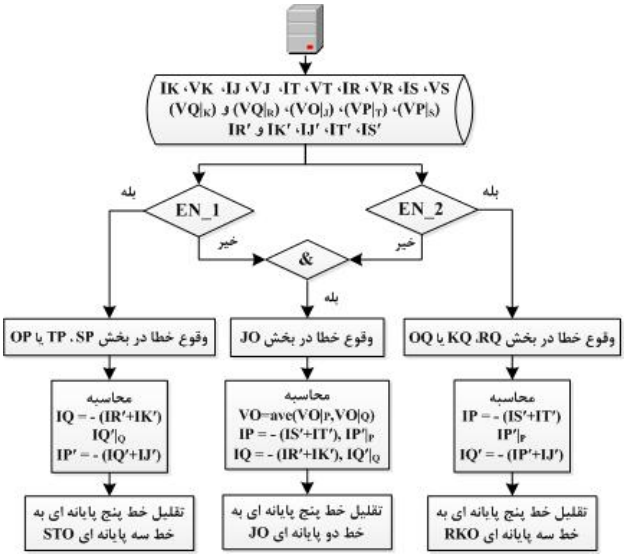
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1-Spring 2017

STO و سپس به بخش خطادار SP کاهش داده می‌شود.



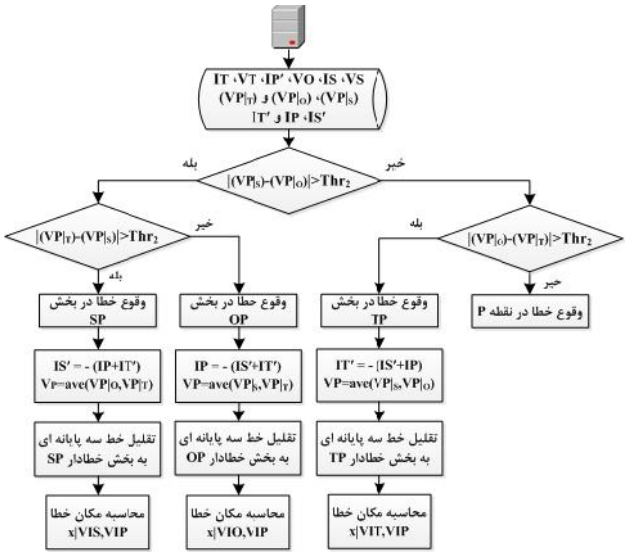
شکل (۴): نحوه ترکیب شرط‌ها برای تعیین بخش خطادار

با فرض تشخیص خطای داخلی و ارسال دستور تریپ به بریکرها و ذخیره‌سازی داده‌های فازوری، فلوچارت الگوریتم مکان‌یابی برای خط مذکور مطابق شکل (۵) است.



شکل (۵): فلوچارت الگوریتم مکان‌یابی خطا در خط پنج پایانه‌ای

در شکل (۵) پس از بارگذاری داده‌های فازوری اندازه‌گیری شده و تخمینی، با توجه به شرط‌ها خط در چند مرحله به بخش خطادار کاهش داده می‌شود. خط پنج پایانه‌ای به چند طریق قابل کاهش است، که در اینجا به ۲ خط سه پایانه‌ای (STO و RKO) و ۱ خط دو پایانه‌ای (JO) کاهش داده می‌شود. بعنوان مثال اگر شرط EN_1 برقرار شود، مطابق شکل (۵) خط پنج پایانه‌ای به خط سه پایانه‌ای STO کاهش داده شده و فلوچارت الگوریتم مکان‌یابی برای آن مطابق شکل (۶) است؛ پس از بارگذاری داده‌های ذخیره‌شده، با مقایسه ولتاژهای تخمینی نقطه انشعاب P مبتنی بر داده‌های پایانه‌های S و T و نقطه O بخش خطادار تعیین شده و با استفاده از روش‌هایی که در بخش بعد بیان شده مکان دقیق خطا محاسبه می‌شود. بطور کلی در هر خط N پایانه‌ای با تخمین کمیت‌های نقاط انشعاب و ترکیب منطقی آنها می‌توان خط مورد نظر را در چند گام به خط دو پایانه‌ای خطادار کاهش داده و مکان خطا را در آن محاسبه نمود.



شکل (۶): فلوچارت الگوریتم مکانیابی خطا در خط سه پایانه‌ای STO

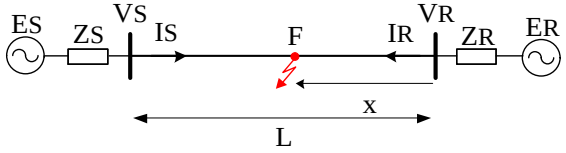
۳- روش‌های پیشنهادی برای مکان‌یابی خطا

۳-۱- تعیین مکان خطا مبتنی بر محاسبه

پس از تعیین بخش خطادار، با استفاده از کمیت‌های دو سر آن و معادلات ولتاژ و جریان حاکم بر خط، رابطه مکان خطا بدست می‌آید.

۳-۱-۱- روش ۱: مبتنی بر شاخص‌های M و N

شکل (۷) یک خط دو پایانه‌ای به طول L را با خطایی واقع در فاصله x از پایانه R نشان داده است.



شکل (۷): دیاگرام تک خطی یک خط انتقال دو پایانه‌ای خطادار.

مکان خطا بصورت رابطه (۳) بدست می‌آید. که در آن، x مکان خطا بر حسب کیلومتر ($0\le x\le L$) و D مکان خطا بر حسب پریونیت یا واحد طول خط ($0\le D\le 1$) است.

$$x = D.L = \frac{1}{2\gamma} ln\left(\frac{N}{M}\right) \qquad (۳)$$

$$\begin{cases} N = \frac{V_R+Z_cI_R}{2} - \frac{V_S-Z_cI_S}{2e^{-\gamma L}} \\ M = \frac{V_S+Z_cI_S}{2e^{\gamma L}} - \frac{V_R-Z_cI_R}{2} \end{cases} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، مقدار شاخص‌های M و N با وقوع خطای داخلی بطور ناگهانی افزایش می‌یابد ولی در شرایط دیگر ناچیز است، که از این ویژگی در [۸] برای شناسایی خطاهای داخلی استفاده شده‌است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]

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

۳-۱-۲- روش ۲: مبتنی بر معادلات طرفین نقطه خطا

با استفاده از فازورهای دو پایانه و روابط هیپربولیکی مدل خط بلند در طرفین نقطه خطا، رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} \left(1+\frac{Z'_{RF}Y'_{RF}}{2}\right)V_R - Z'_{RF}I_R = \left(1+\frac{Z'_{SF}Y'_{SF}}{2}\right)V_S - Z'_{SF}I_S \\ Z'_{RF} = Z_c\,sinh(\gamma x) \\ Z'_{SF} = Z_c\,sinh\big(\gamma(L-x)\big) \\ 1+\frac{Z'_{RF}Y'_{RF}}{2} = cosh(\gamma x) \\ 1+\frac{Z'_{SF}Y'_{SF}}{2} = cosh\big(\gamma(L-x)\big) \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن Z'_S و Y'_S پارامترهای خط در بخش SF بطول L-x و Z'_R و Y'_R پارامترهای خط در بخش RF بطول x است. با حل رابطه (۲)، فاصله مکان خطا از پایانه R بصورت رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$x = D.L = \frac{1}{\gamma}Arctanh\left[\frac{Z_c I_S\,sinh\,\gamma L - V_S\,cosh\,\gamma L + V_R}{Z_c I_S\,cosh\,\gamma L - V_S\,sinh\,\gamma L + Z_c I_R}\right] = \frac{1}{\gamma}Arctanh\left[\frac{Z'I_S - \left(1+\frac{Z'Y'}{2}\right)V_S + V_R}{Z_c\left(1+\frac{Z'Y'}{2}\right)I_S - \frac{Z'}{Z_c}V_S + Z_c I_R}\right] \quad (۶)$$

که در آن Z'، Y'، Z_c و γ بترتیب امپدانس کل خط بر حسب اهم، ادمیتانس کل خط بر حسب زیمنس، امپدانس موجی خط و ثابت انتشار موج در واحد طول بر اساس مدل خط بلند است.

۳-۲- تعیین مکان خطا مبتنی بر منحنی تغییرات کمیت‌های الکتریکی

امکان تعیین مکان خطا، مبتنی بر منحنی تغییرات ولتاژ و جریان در طول خط بر اساس فازورهای دو سر خط نیز وجود دارد.

۳-۲-۱- روش۳: اختلاف ولتاژهای تخمینی در نقطه خطا

برای تخمین ولتاژ هر نقطه از خط هم می‌توان از فازورهای ولتاژ و جریان ابتدای خط استفاده نمود و هم می‌توان از کمیت‌های انتهای خط استفاده نمود. مقدار این ولتاژهای تخمینی، در شرایط عادی در کل خط و در شرایط وقوع خطا تنها در مکان خطا با هم برابر است.

$$\Delta V(x) = \sum_t abs\left\{\overbrace{\left(\cosh\gamma(L-x)\,\widehat{V_S} - Z_c\sinh\gamma(L-x)\,\widehat{I_S}\right)}^{V(x)_S} - \overbrace{\left(\cosh\gamma x\,\widehat{V_R} - Z_c\sinh\gamma x\,\widehat{I_R}\right)}^{V(x)_R}\right\} \quad (۷)$$

بنابراین با رسم پروفیل اختلاف ولتاژهای تخمینی مطابق رابطه (۷) در طول خط، نقطه‌ی مینیمم آن بیانگر مکان خطا خواهد بود و $\widehat{V_S}$، $\widehat{I_S}$، $\widehat{V_R}$ و $\widehat{I_R}$، بردارهای زمانی کمیت‌های پایانه‌ها و بقیه پارامترها، اسکالر و مربوط به مشخصات خط هستند.

۳-۲-۲- روش۴: مجموع جریان‌های تزریقی به نقطه خطا

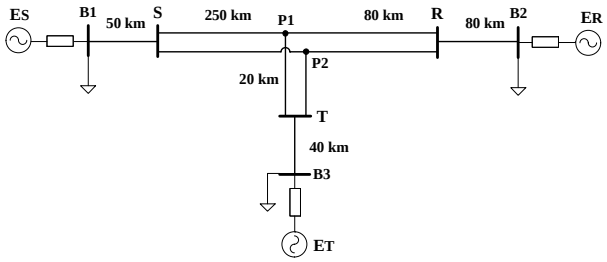
جریان عبوری از خط را هم با استفاده از فازورهای ابتدای خط و هم با استفاده از فازورهای انتهای خط می‌توان محاسبه نمود. در شرایط عادی مجموع جریان‌های بدست‌آمده برابر جریان شارژ خازنی خط است. اما در شرایط خطا با رسم مجموع جریان‌ها در طول خط مطابق رابطه (۸)، نقطه ماکزیمم آن نشانگر محل خطا خواهد بود.

$$\sum I(x) = \sum_t abs\left\{\overbrace{\left(-\frac{1}{Z_c}\sinh\gamma(L-x)\,\widehat{V_S} + \cosh\gamma(L-x)\,\widehat{I_S}\right)}^{I(x)_S} + \overbrace{\left(\frac{1}{Z_c}\sinh\gamma x\,\widehat{V_R} - \cosh\gamma x\,\widehat{I_R}\right)}^{I(x)_R}\right\} \quad (۸)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

۴-۱- مکان‌یابی خطا در یک خط دو مداره سه پایانه‌ای

خط سه پایانه‌ای دو مداره شبیه‌سازی شده مطابق شکل (۸) است. مشخصات اجزای سیستم و هادی‌های خط بترتیب مطابق جدول (۱) و جدول (۲) است.



شکل (۸): خط دو مداره سه پایانه‌ای

جدول (۱): مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده

مشخصات خط افقی	$r_1 = r_2 = 0.0181\,, r_0 = 0.2188\,, r_{0m} = 0.2005\ [\Omega/km]$ $l_1 = l_2 = 0.9297\,, l_0 = 3.2829\,, l_{0m} = 2.0802\ [mH/km]$ $c_1 = c_2 = 12.571\,, c_0 = 7.8555\,, c_{0m} = -2.0444\ [nF/km]$ $L_S = 250, L_R = 80\ [km]$
پارامترهای خط افقی	$z = 0.0181 + j0.2921\ [\Omega/km]$ $y = j3.949 \times 10^{-6}\ [S/km]$ $Z_c = 272.0846 - j13.46\ [\Omega]$ $\gamma = 3.32617 \times 10^{-5} + j0.0010745\ [1/km]$
مشخصات خط عمودی	$r_1 = r_2 = 0.02685\,, r_0 = 0.2102\,, r_{0m} = 0.1834\ [\Omega/km]$ $l_1 = l_2 = 1\,, l_0 = 3.7085\,, l_{0m} = 2.4258\ [mH/km]$ $c_1 = c_2 = 11.662\,, c_0 = 6.9959\,, c_{0m} = -2.1088\ [nF/km]$ $L_T = 20\ [km]$
پارامترهای خط عمودی	$z = 0.02685 + j0.3139\ [\Omega/km]$ $y = j3.664 \times 10^{-6}\ [S/km]$ $Z_c = 292.99607 - j12.50678\ [\Omega]$ $\gamma = 4.5821 \times 10^{-5} + j0.0010734\ [1/km]$
مشخصات منابع	$V_S = 400\angle 20°\,, V_R = 400\angle 0°, V_T = 400\angle 10°\ [kV]$ $f = 50\ [Hz], S_b = 100\ [MVA]$ $R_S = 1\ [\Omega], L_S = 0.0318\ [mH]$ $R_R = 0.8\ [\Omega], L_R = 0.0159\ [mH]$ $R_T = 0.9\ [\Omega], L_T = 0.0255\ [mH]$
مشخصات بار نامتقارن در هر پایانه	$P_A = 600MW, \cos\varphi_A = 0.9$ $P_B = 400MW, \cos\varphi_B = 0.8$ $P_C = 200MW, \cos\varphi_C = 0.95$

جدول (۲): مشخصات هادی‌ها

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

خط انتقال	نوع هادی	قطر خارجی [cm]	نسبت T/D	GMR [cm]	مقاومت dc [Ω/km]	تعداد باندل	قطر باندل [cm]
افقی	فاز	۳/۱۲۹۳	۰/۳۷۵	۱/۲۵۵	۰/۰۵۲۱	۳	۵۷/۷۴
	گارد	۰/۹۵۲۵	۰/۵	۰/۳۷۱	۴/۱۰۲	۱	۰
عمودی	فاز	۳/۱۷	۰/۳۷۵	۱/۲۷۱	۰/۰۵۲	۲	۳۰
	گارد	۱/۱	۰/۵	۰/۴۲۸	۳/۶۰۴	۱	۰

با استفاده از ماتریس تبدیل کلارک تعمیم‌یافته معادلات خط تفکیک شده، پارامترها و مؤلفه‌های مودال شش‌گانه آن بدست آمده و در نتیجه بصورت دو خط سه پایانه‌ای مجزا تحلیل شده‌است. مطابق فلوچارت شکل (۶)، ابتدا ولتاژ و جریان نقطه انشعاب P با استفاده از فازورهای پایانه‌های S، R و T محاسبه و خطای داخلی توسط شاخص M شناسایی شده است. با مقایسه ولتاژهای تخمینی نقطه انشعاب بخش خطادار تعیین و مکان خطا با روش‌های چهارگانه مذکور محاسبه شده، که نتایج آن در جدول (۳) درج گردیده است. بهترین نتایج مکان‌یابی در این خط، متعلق به روش‌های اول و سوم، بترتیب با حداکثر خطای ۰/۳۴ و ۰/۴۹ درصد است.

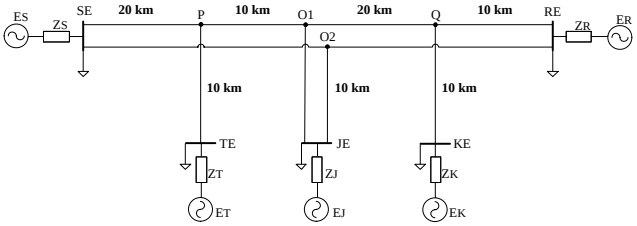
جدول (۳): نتایج مکان‌یابی خطا در خط دو مداره سه پایانه‌ای

مکان خطا	نوع و مقاومت خطا	روش ۱	روش ۲	روش ۳	روش ۴
۲۵ کیلومتری پایانه S	AG- ۱۰ Ω	۰/۱	۰/۷۹	۰/۲۲	۰/۵۳
۷۵ کیلومتری پایانه S	AB – ۱ Ω	۰/۰۴	۰/۷۴	۰/۱۱	۰/۳۲
۱۲۵کیلومتری پایانه S	BCG – ۱۰۰ Ω	۰/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۰۹
۱۷۵کیلومتری پایانه S	ABCG – ۵۰ Ω	۰/۰۶	۰/۴۷	۰/۱۲	۰/۱۳
۲۲۵ کیلومتری پایانه S	CG – ۵۰ Ω	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۲۲	۰/۲۲
۲۰ کیلومتری پایانه R	ABG – ۱ Ω	۰/۱	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۶۲
۴۰ کیلومتری پایانه R	ABCG –۱۰ Ω	۰/۰۷	۰/۱	۰/۱	۰/۲
۵۰ کیلومتری پایانه R	BG – ۱۰۰ Ω	۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۳۷	۰/۵
۶۰ کیلومتری پایانه R	BC – ۵۰ Ω	۰/۳۴	۰/۱۸	۰/۴۹	۰/۵۳
۱۰ کیلومتری پایانه T	AC – ۱۰ Ω	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۷۵
نقطه انشعاب	ABCG –۱۰۰Ω	۰/۰۱	۰/۲	۰/۰۱	۰/۰۱
حداکثر درصد خطای مکانیابی		۰/۳۴	۰/۹۸	۰/۴۹	۰/۷۵
میانگین درصد خطای مکانیابی		۰/۱۳	۰/۴	۰/۱۸	۰/۳۵

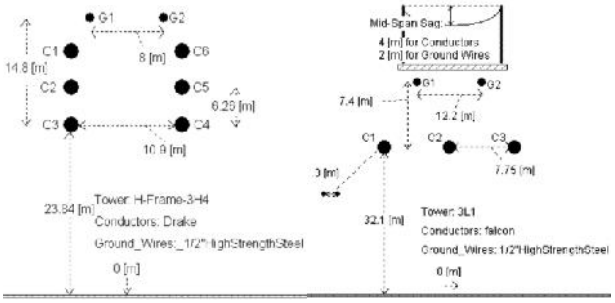
۴-۲- مکان‌یابی خطا در یک خط دو مداره پنج پایانه‌ای

مطابق شکل (۹)، خط مورد نظر یک خط دو مداره متشکل از یک خط پنج پایانه‌ای و یک خط سه پایانه‌ای با سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت از شبکه انتقال خوزستان (با برخی تغییرات طولی) است. آرایش هندسی، پارامترهای مود هوایی خطوط دومداره و تک‌مداره و مشخصات سیستم مطابق شکل (۱۰) و جداول (۳) و (۴) است. سیستم شبیه‌سازی شده در EMTP در ضمیمه درج شده است.

معادلات دیفرانسیل درجه دو خط انتقال چند فاز به فرم ماتریسی (۹) نوشته می‌شود.



شکل (۹): سیستم پنج پایانه‌ای دو مداره



شکل (۱۰): آرایش هندسی خطوط

$$\frac{d^2[V_{phase}]}{dx^2} = [z_{phase}][y_{phase}][V_{phase}]$$
$$\frac{d^2[I_{phase}]}{dx^2} = [y_{phase}][z_{phase}][I_{phase}] \qquad (۹)$$

جدول (۴): مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده

پارامترهای خط دو مداره	$z = 0.071162 + 0.4131i\ [\Omega/km]$ $y = 0.275 \times 10^{-5} i\ [S/km]$ $Z_c = 389.012 - 33.246i\ [\Omega]$ $\gamma = 9.1467 \times 10^{-5} + 1.0697 \times 10^{-3} i\ [1/km]$
پارامترهای خط تک مداره	$z = 0.0281 + 0.3108i\ [\Omega/km]$ $y = 0.3612 \times 10^{-5} i\ [S/km]$ $Z_c = 293.636 - 13.247i\ [\Omega]$ $\gamma = 4.78484 \times 10^{-5} + 1.0606 \times 10^{-3} i\ [1/km]$
مشخصات منابع	$V_S = 230\angle 20°, V_R = V_J = 230\angle 10°\ [kV]$ $V_T = V_K = 230\angle 0°\ [kV]$ $f = 50\ [Hz], S_b = 100\ [MVA]$ $R_S = 1\ [\Omega], L_S = 0.0318\ [mH]$ $R_R = 0.8\ [\Omega], L_R = 0.0159\ [mH]$ $R_T = R_J = R_K = 0.9\ [\Omega], L_T = L_J = L_K = 0.0255\ [mH]$
مشخصات بار نامتقارن	$P_A = 600MW, \cos\varphi_A = 0.9$ $P_B = 400MW, \cos\varphi_B = 0.8$ $P_C = 200MW, \cos\varphi_C = 0.95$

جدول (۵): مشخصات هادی‌ها

خط انتقال	نوع هادی	قطر خارجی [cm]	نسبت T/D	GMR [cm]	مقاومت dc [Ω/km]	تعداد باندل	قطر باندل [cm]
دو مداره	فاز	۲/۸۱۴۳	۰/۳۶۴	۱/۲۳	۰/۰۷۰۵	۱	۰
	گارد	۰/۸۰۱۴	۰/۵	۰/۳۱۲۴	۰/۳۰۶	۱	۰
تک مداره	فاز	۱/۵۸۱۲	۰/۳۶۴	۰/۶۳۸	۰/۰۵۵۲	۲	۳۰
	گارد	۰/۸۰۱۴	۰/۵	۰/۳۱۲۴	۰/۳۰۶	۱	۰

هدف از تئوری بردارهای ویژه- مقادیر ویژه، بدست آوردن ماتریس‌های تبدیل ولتاژ ($[T_v]$) و جریان ($[T_i]$) برای خط جابجا نشده، مطابق (۱۰) است که حاصلضرب‌های [y][z] و [z][y] را قطری نموده، معادلات را مستقل ساخته و پارامترها و مؤلفه‌های مودال را نتیجه دهد [۹].

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]

$$[V_{phase}] = [T_v][V_m],\ [V_m] = [T_v]^{-1}[V_{phase}]$$
$$[I_{phase}] = [T_i][I_m],\ [I_m] = [T_i]^{-1}[I_{phase}] \quad (۱۰)$$

با جاگذاری مؤلفه‌های مودال از (۱۰) در (۹)، معادلات بصورت (۱۱) تبدیل می‌شود.

$$\frac{d^2[V_m]}{dx^2} = [T_v]^{-1}[z][y][T_v][V_m]$$
$$\frac{d^2[I_m]}{dx^2} = [T_i]^{-1}[y][z][T_i][I_m] \quad (۱۱)$$

در EMTP با توجه به خروجی Line Model Module [۱۰] و در MATLAB با تابع ([y][z])=[V,D]eig، مقادیر ویژه (درایه‌های قطری ماتریسD) و بردارهای ویژه (ستون‌های ماتریسV) بدست آمده‌است. ماتریس $[T_i]$ برای قطری نمودن حاصلضرب [y][z] است. اگرچه حاصلضرب‌های [y][z] و [z][y] مقادیر ویژه یکسانی دارند، بردارهای ویژه آنها متفاوت بوده و بصورت (۱۲) با هم ارتباط دارند.

$$[T_v] = \left[(T_i)^{*-1}\right]^T \quad (۱۲)$$

معادلات دیفرانسیل درجه یک را نیز می‌توان در حوزه مودال بصورت (۱۳) نوشت.

$$\frac{d[V_m]}{dx} = [T_v]^{-1}[z][T_i][I_m]$$
$$\frac{d[I_m]}{dx} = [T_i]^{-1}[y][T_v][V_m] \quad (۱۳)$$

با جاگذاری از (۱۲)، ماتریس پارامترهای مودال خط از روابط (۱۴) بدست می‌آید.

$$[z_m] = [T_i]^t[z][T_i]$$
$$[y_m] = [T_v]^t[y][T_v] \quad (۱۴)$$

بدین ترتیب خط چند فاز به مجموعه‌ای از مدارات مودال بدون تزویج تبدیل می‌شود که امپدانس موجی و ثابت انتشار هر مود j از رابطه (۱۵) بدست آمده‌است. برای یک خط جابجانشده به تعداد فازها مود متمایز وجود دارد.

$$Z_{cm_j} = \sqrt{\frac{z_{m_{jj}}}{y_{m_{jj}}}}, \gamma_{m_j} = \sqrt{z_{m_{jj}} y_{m_{jj}}} \quad (۱۵)$$

با توجه به نحوه تعریف فازهای خط دو مداره در مدل خط (توالی فازهای یکسان دو مدار یعنی بترتیب a_1، a_2، b_1، b_2، c_1 و c_2)، مؤلفه‌های مودال از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$[V_0 V_{00} V_1 V_{11} V_2 V_{22}]^t = [T_v]^{-1}[V_a V_{aa} V_b V_{bb} V_c V_{cc}]^t$$
$$[I_0 I_{00} I_1 I_{11} I_2 I_{22}]^t = [T_i]^{-1}[I_a I_{aa} I_b I_{bb} I_c I_{cc}]^t \quad (۱۶)$$

خروجی EMTP Line Constants Routines [۱۰] و پاسخ روابط (۱۵) و (۱۶) برای حل معادلات (۳)-(۸) در MATLAB و تعیین مکان خطا بکار رفته است. برای خطاهای نمونه در مدارهای اول و دوم شکل (۹)، مقادیر ولتاژ و جریان تخمینی برای سه نقطه انشعاب P، O و Q با استفاده از کمیت‌های پایانه‌های خط (SE، RE، TE، JE و KE) بدست آمده و در فرآیند تقلیل خط پنج پایانه‌ای به بخش خطادار مورد استفاده قرار گرفته‌است. بر اساس پارامترهای خطوط، درصد خطای مکان‌یابی با روش‌های چهارگانه برای خطاهای نمونه (با در نظر گرفتن تنوع مکان/ نوع/ مقاومت خطا و شرایط بارگذاری) در جدول(۶) درج شده‌است. بار متوسط و کم بترتیب ۵۰ و ۲۰ درصد مقدار کل در نظر گرفته شده‌است.

جدول(۶): نتایج مکانیابی خطاهای نمونه در خط دومداره پنج‌پایانه‌ای

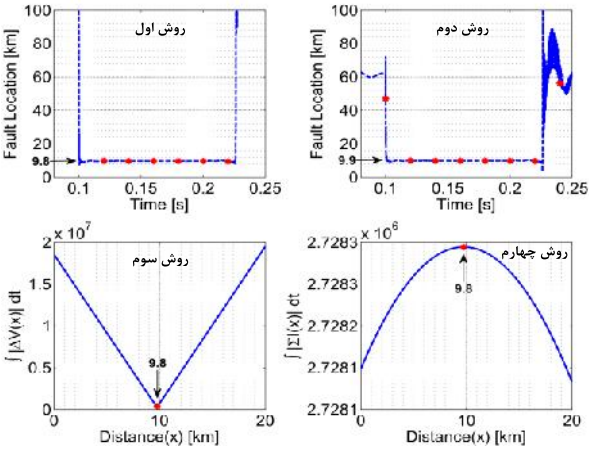
مکان خطا	نوع و مقاومت خطا	شرایط بارگذاری	درصد خطای مکان‌یابی			
			روش۱	روش۲	روش۳	روش۴
SP1- 10km of S1	AG- 50Ω	بار کامل	۰/۴	۱/۶	۰/۵	۰/۳
SP1- 10km of S1	BCG- 50Ω	بار کم	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۵	۰/۶
OQ1- 10km of O1	BG- 10Ω	بار متوسط	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۵
OQ1- 10km of O1	ABG- 10Ω	بار کامل	۰/۰۵	۰/۴	۰/۰۵	۰/۰۵
JO1- 5km of J1	ABCG- 1Ω	بار کامل	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۱/۵
RO2-10km of R2	AC- 1Ω	بار کم	۰/۲۳	۰/۳۶	۰/۲	۰/۰۵
RO2-10km of R2	AC- 10Ω	بار متوسط	۰/۱۶	۰/۳	۰/۱۵	۰/۰۵
RO2-20km of R2	ACG- 100Ω	بار کامل	۰/۲۸	۰/۱	۰/۲۸	۰/۳۳
SO2- 10km of S2	BG- 50Ω	بار کامل	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۰۵	۰/۴
SO2- 20km of S2	ABCG- 10Ω	بار متوسط	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۰۳	۰/۰۵
SO2- 20km of S2	ABCG- 100Ω	بار کامل	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲	۰/۲۵
P1 teed point	AB- 10Ω	بار متوسط	۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۴۷	۰/۳۵
O1 teed point	ABG- 1Ω	بار کم	۰/۰۱	۱/۹	۰/۳۷	۰/۴۲
Q1 teed point	BC- 100Ω	بار کامل	۰/۰۱	۰/۵۲	۰/۲۲	۰/۲
O2 teed point	ABCG- 100Ω	بار کامل	۰/۲	۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۰۱
حداکثر درصد خطای مکان‌یابی			۰/۴۷	۱/۹	۰/۵	۱/۵
میانگین درصد خطای مکان‌یابی			۰/۱۷	۰/۵۲	۰/۲۲	۰/۳۱

مطابق جدول(۶) بهترین نتایج مکان‌یابی متعلق به روش‌های اول و سوم است که علت آن عدم وابستگی این دو روش به پارامترهای واحد طول خط است. حداکثر خطای مکان‌یابی با این دو روش بترتیب برابر با ۰/۴۷ و ۰/۵ درصد است.

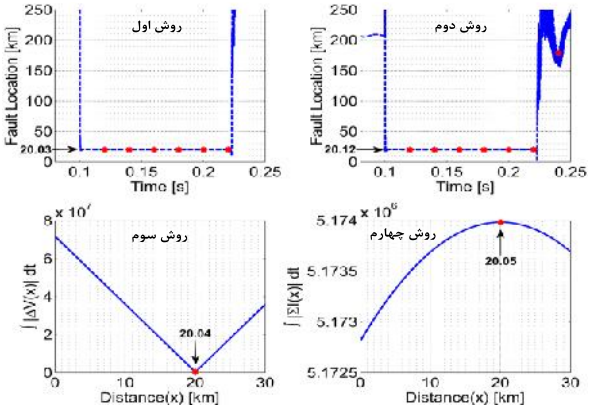
همچنین عملکرد چهار روش برای مکان‌یابی خطاهای همزمان در دو مدار و خطای بین دو مدار بررسی شده و درصد خطای روش‌ها برای چند سناریو خطای نمونه در جدول (۷) درج شده‌است.

مشابه قبل بهترین نتایج مکان‌یابی متعلق به روش‌های اول و سوم بوده و حداکثر خطای مکان‌یابی با این دو روش بترتیب برابر با ۲/۶ و ۱/۹ درصد است. در شکل‌های (۹) و (۱۰) نتیجه مکان‌یابی یک خطای نمونه بین دو مدار که در آن مدار اول و دوم بترتیب دچار اتصال کوتاه BG و ACG با مقاومت ۵۰ اهم شده، نشان داده شده‌است، که بترتیب مربوط به مکان‌یابی خطا مبتنی بر مؤلفه‌های مودال مدار اول و مدار دوم هستند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017



شکل (۹): مکانیابی خطای BG-50Ω در OQ1- 10km from O1



شکل (۱۰): مکانیابی خطای ACG-50Ω در RO2-20km from R2

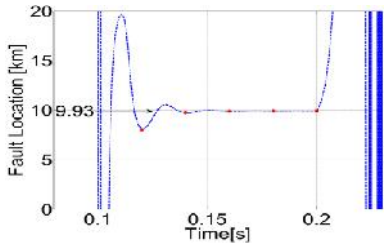
۳-۴- پیشامد n-1 تا PMU

در این قسمت با فرض عدم دسترسی به داده‌های PMU پایانه J (به دلایلی از جمله نقص در فرستنده، کانال مخابراتی و یا گیرنده)، نشان داده شده که هنوز هم می‌توان با استفاده از داده‌های ارسالی از PMUهای نصب شده در پایانه‌های دیگر و مقادیر تخمینی کمیت‌های نقاط انشعاب، بخش خطادار و مکان خطا را تعیین نمود. مشابه قبل برای تعیین بخش خطادار از مقایسه ولتاژهای تخمینی نقاط انشعاب و حد آستانه استفاده شده‌است. بعنوان نمونه برای خطا در وسط بخش O1Q (x=10km):

$Abs(V_{P|S} - V_{P|T}) < Thr_2 \Rightarrow$ fault is not in SP and TP
$Abs(V_{Q|R} - V_{Q|K}) < Thr_2 \Rightarrow$ fault is not in RQ and KQ
$Abs(V_{O1|P} - V_{O1|Q}) > Thr_2 \Rightarrow$ fault is in O_1P or O_1Q
$V_{O1|Q} < V_{O1|P} \Rightarrow$ fault is in O_1Q

پس از تعیین بخش خطادار، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در پایانه‌های R و K کمیت‌های نقطه انشعاب Q تخمین زده شده‌است. از آنجائیکه تنها داده‌های یک سمت از بخش خطادار در دسترس بوده و طول خط کوتاه است، برای تعیین مکان دقیق خطا از روش تک پایانه‌ای Takagi [۲۶] و رابطه (۱۷) استفاده شده، که در آن VS″ و IS″ بترتیب اختلاف مقادیر قبل و بعد از خطای ولتاژ و جریان در پایانه S و x مکان خطا از S است. در شکل (۱۱) نتیجه مکان‌یابی برای خطای نمونه ABCG با مقاومت ۱ اهم در وسط بخش O_1Q نشان داده شده‌است.

$$x = \frac{Im(V_{SI}{''}_S{}^*)}{Im(ZI_S{I''}_S{}^*)} \qquad (۱۷)$$



شکل (۱۱): مکانیابی خطای ABCG-1Ω در وسط O1Q با روش Takagi

البته این روش برای محاسبه مکان خطا به اطلاعات پخش بار قبل از خطا و برای جبران اثر ولتاژ القایی ناشی از تزویج متقابل فاز خطادار و فازهای سالم نیاز به تعیین نوع خطا و فاز خطادار دارد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصله در موارد ذیل خلاصه شده‌است:

- ✓ حفاظت خطوط چند پایانه‌ای دو مداره بدلیل infeed و تزویج متقابل با مشکلاتی همراه بوده و با توجه به وجود این خطوط در شبکه انتقال و فوق توزیع ایران الگوریتمی برای تشخیص و مکان‌یابی خطا در این خطوط ارائه شد.
- ✓ برای تفکیک و حل نمودن معادلات وابسته خط سه فاز، در خطوط جابجاشده از تبدیل کلارک و در خطوط جابجانشده از تئوری بردارها و مقادیر ویژه استفاده شد.
- ✓ در الگوریتم پیشنهادی با مقایسه ولتاژهای تخمینی نقاط انشعاب بخش خطادار تعیین شده و بدین وسیله خط چند پایانه‌ای به یک خط دو پایانه‌ای ساده تقلیل داده شد.
- ✓ با استفاده از مؤلفه‌های مودال ولتاژ و جریان پایانه‌ها، چهار روش برای مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال بویژه خطوط چند پایانه‌ای دو مداره، ارائه و شبیه‌سازی و نتایج آنها تحلیل شد.
- ✓ روش‌های پیشنهادی روی یک خط دو مداره سه پایانه‌ای و یک خط دو مداره پنج پایانه‌ای از شبکه ایران اجرا و در نرم‌افزارهای MATLAB و EMTP شبیه‌سازی شد.
- ✓ تنها با داشتن فازورهای پایانه‌ها، امپدانس موجی و ثابت انتشار موج در خط، مکان انواع خطای داخلی تعیین شد و اشتباه مکان‌یابی با روش‌های اول و سوم برای خطا در یک مدار کمتر از ۱٪ و برای خطاهای بین دو مدار کمتر از ۳٪ است.
- ✓ تمام عوامل تأثیرگذار ازجمله اختلاف فاز و تفاوت امپدانس منابع، بار نامتقارن، عدم جابجایی خط، احتمال عدم دسترسی به داده‌های یک PMU، انواع خطاهای فاز به فاز، فاز به زمین، همزمان و بین دو مدار در نظر گرفته شد.

وجوه تمایز این‌مقاله در مقایسه با مراجع در جدول (۸) درج‌شده‌است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]

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

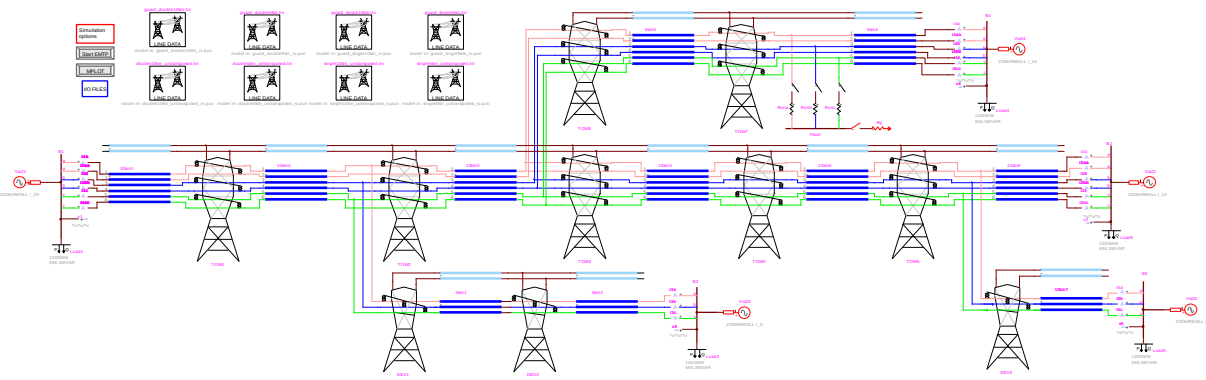
جدول (۷): نتایج مکان‌یابی خطاهای همزمان در دو مدار و خطاهای بین دو مدار

نوع خطا	مکان خطا		نوع و مقاومت خطا		درصد خطای مکان‌یابی					
					روش اول		روش دوم		روش سوم		روش چهارم	
	مدار۱	مدار۲	مدار۱	مدار۲	مدار۱	مدار۲	مدار۱	مدار۲	مدار۱	مدار۲	مدار۱	مدار۲
خطای همزمان در دو مدار	SP1- 10km of S1	RO2-20km of R2	BG- 10Ω	AC- 10Ω	۰/۹۶	۰/۲	۰/۵	۰/۱۶	۰/۹۵	۰/۰۰۷	۰/۹۵	۰/۲
	OQ1-10km of O1	SO2- 10km of S2	ABCG-1Ω	BCG-50Ω	۰/۲۹	۰/۱۴	۰/۶۴	۱/۰۳	۰/۳	۰/۰۷	۰/۲۵	۲/۱۶
	TP1- 5km of T1	JO2- 5km of J2	ACG-10Ω	AG- 50Ω	۲/۴	۲/۶	۲/۴	۵	۱/۹	۱/۹	۰/۵	۰/۷
	SP1- 10km of S1	SO2- 20km of S2	BC- 1Ω	ABCG-1Ω	۰/۹	۰/۳۴	۰/۸	۰/۵۸	۰/۳۶	۰/۹	۰/۴	۰/۷
خطای بین دو مدار	SP1- 10km of S1	SO2- 10km of S2	ABCG-1Ω	ABCG-1Ω	۰/۴۲	۰/۲۶	۰/۶۳	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۳	۱/۲۵	۱/۱۳
	OQ1-10km of O1	RO2-20km of R2	BG- 50Ω	ACG-50Ω	۱/۲	۰/۱۲	۰/۵۹	۰/۴	۱/۲	۰/۱۳	۱/۲	۰/۱۷
	O1 teed point	O2 teed point	AG-100Ω	CG- 100Ω	۰/۰۱	۰/۰۱	۶/۳	۰/۶	۰/۲۲	۰/۳	۰/۱	۰/۳۸
	JO1- 5km of J1	JO2- 5km of J2	ABG-10Ω	BCG-10Ω	۰/۶۵	۱	۱/۲	۰/۳	۱/۲	۱	۰/۰۰۱	۱
حداکثر درصد خطای مکان‌یابی					۲/۴	۲/۶	۶/۳	۵	۱/۹	۱/۹	۱/۲۵	۲/۱۶
میانگین درصد خطای مکان‌یابی					۰/۸۵	۰/۵۸	۱/۶۳	۱/۰۷	۰/۵۱	۰/۸۹	۰/۵۸	۰/۸

جدول (۸): وجوه تمایز این مقاله در مقایسه با مراجع موجود برای مکان‌یابی خطا در خطوط چند پایانه‌ای

ویژگی	[۱۱]	[۱۲]	[۱۳]	[۱۴]	[۱۵]	[۱۶]	[۱۷]	[۱۸]	[۱۹]	[۲۰]	[۲۱]	[۲۲]	[۲۳]	[۲۴]	مقاله حاضر
خازن موازی خط	✓				✓	✓				✓	✓		✓	✓	✓
مدل گسترده خط	✓					✓				✓	✓			✓	✓
تفاوت در انشعابات		✓	✓				✓	✓						✓	✓
بیش از سه پایانه		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓
خطوط دو مداره با تزویج متقابل		✓		✓						✓	✓				✓
خطوط جابجا شده/نشده															✓
تمام انواع خطا			✓			✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓
خطاهای بین دو مدار															✓
مؤلفه‌های مودال	✓					✓								✓	✓
تئوری بردارها و مقادیر ویژه															✓
اطلاعات مورد نیاز	VI_{mod}	VI_{sym}	vi_{abc}, Q	vi_{abc}	VI_{abc}	VI_{mod}	V_{abc}	VI_{sym}	VI_{sym}	VI_{sym}	VI_{abc}	VI_{sym}	VI_{abc}	VI_{mod}	VI_{mod}
مکان‌یابی با n-1 تا PMU															✓
مستقل از نوع خطا		✓				✓	✓	✓		✓	✓		✓		✓
خطای مکانیابی (برای خطای ساده)	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<3%	<1%	<2%	<1%	<2%	-	<1%	<1%	<1%
شبیه‌سازی با ATP/EMTP		✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓

پیوست الف:



شکل (الف-۱): سیستم شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار EMTP

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

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

مراجع

[1] Gerhard Ziegler, “Numerical Distance Protection; Principles and Applications”, 2nd Ed., Published by John Wiley, 2006.

[2] North American Electric Reliability Council (NERC), “The Complexity of Protecting Three-Terminal Transmission Lines”, A Technical Document Prepared by the System Protection and Control Task Force, 2006.

[3] ALSTOM, “Network Protection and Automation Guide; Protective Relays, Measurement and Control”, ISBN: 978-0-9568678-0-3, © May 2011.

[4] Siemens Co., “Extensive Studies and Enhancement of Iranian HV Power System; Final Report on Protection Study”, Revision A, Technical Report, Document ID: E D SE PTI/sk0632/FIR02-A, 2009.

[5] S. Rabiee, H. Ayoubzadeh, D. Farrokhzad, F. Aminifar, “Practical Aspects of Phasor Measurement Unit (PMU) Installation in Power Grids”, Smart Grid Conference (SGC2013), Shahid Abbaspour University, Tehran, 2013.

[6] Jan Izykowski, “Fault Location on Power Transmission Lines”, Published by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław, 2008.

[7] A.T. Johns, S. Jamali, “Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines”, IEE, Vol. 137, Pt. C, No. 6, pp. 395-402, November 1990.

[8] M.H. Khazaei, F. Haghjoo, "PMU Based Fault Location in Multi-Terminal Transmission Lines", 9th Power Systems Protection and Control Conference, Amirkabir University, Tehran, Iran, January 2015.

[9] H. W. Dommel, “EMTP Theory Book”, 2nd ed., Vancouver, British Columbia, Microtran Power System Analysis Corporation, © May 1992.

[10] EMTPWorks, Version 2.02, Help Documents, © 2000-2005 IREQ/Hydro Quebec.

[11] A. Kalam, A.T. Johns, “Accurate Fault Location Technique for Multi-Terminal EHV Lines”, IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Nov. 1991.

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

[13] M. Abe, N. Otsuzuki, T. Emura and M. Takeuchi, “Development of a New Fault Location System for Multi-Terminal Single Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1,1995.

[14] T. Funabashi, H. Otoguro, Y. Mizuma, L. Dube, A. Ametani, “Digital Fault Location for Parallel Double-Circuit Multi-Terminal Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 531–537, 2000.

[15] Q. Gong, Y. Chen, C. Zhang, Z. Wang, “A Study of the Accurate Fault Location System for Transmission Line Using Multi-Terminal Signals”, 2000 IEEE.

[16] Kai-Ping Lien, Chih-Wen Liu, Joe-Air, Ching-Shan Chen, Chi-Shan, “A Novel Fault Location Algorithm for Multi-Terminal Lines Using Phasor Measurement Units”, Proceedings of 37th Annual North American Power Symposium, Ames, Iowa, USA, October 23-25, 2005.

[17] Sukumar M. Brahma, “Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, 2005.

[18] Sukumar M. Brahma, “New Fault-Location Method for a Single Multiterminal Transmission Line Using Synchronized Phasor Measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, 2006.

[19] Marek Fulczyk ,Przemyslaw Balcerek, Jan Izykowski, Eugeniusz Rosolowski, Murari Mohan Saha, “ATP-EMTP Investigation of a New Fault Location Method for Multi-Terminal Power Lines”, The International Conference on Power Systems Transients (IPST’07), Lyon, France, 2007.

[20] C.W. Liu, K.P. Lien, C.S. Chen, J.A. Jiang, “A Universal Fault Location Technique for N-Terminal (N ≥ 3) Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, pp. 1386-1373, 2008.

[21] Giovanni Manassero, Eduardo Cesar Senger, Renato Mikio Nakagomi, Eduardo Lorenzetti Pellini, Emílio César Neves Rodrigues, “Fault Location System for Multiterminal Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, 2010.

[22] Yanfeng Gong, M. Mynam, A. Guzman, “Real-Time MultiTerminal Fault Location System for Transmission Networks”, IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2011.

[23] Quanyuan Jiang, Bo Wang, and Xingpeng Li, “An Efficient PMU-Based Fault-Location Technique for Multiterminal Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 4, August 2014.

[۲۴] عباداله کامیابی، محمدحسین جاویدی، جواد ساده، "فاصله‌یابی خطا در خطوط انتقال نیرو با سه پایانه در حوزه زمان با استفاده از اندازه-گیری‌های همزمان و مدل گسترده خط انتقال"، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال پنجم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۸۷.

[۲۵] رحمن دشتی، جواد ساده، "ارائه روشی اجرایی و نوین جهت شناسایی بخش خطا در شبکه‌های توزیع"، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۲.

[26] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, T. Matsushima, “Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Issue 8, pp. 2892-2898, August 1982.

[1] Multi-terminal transmission line

[2] Phasor Measurement Unit

[3] Ground Positioning System

[4] Phasor Data Concentrator

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

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.1.2]