

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

محمدحسین خزاعی^۱ فرهاد حق‌جو^۲

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 مکان‌بایی خطا در خطوط دو مداره و چند پایانه‌ای، مبتنی بر داده‌های فازوری PMU‌ها و مدل گستردۀ 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 جابجاشده از ماتریس‌های تبدیل حاصله از تنوری بردارهای ویژه- مقادیر ویژه استفاده شده است. کمیت‌های نقاط انشعاب با استفاده از فازورهای پایانه‌ها و معادلات حاکم بر مدل گستردۀ خط محاسبه و بر اساس مقایسه مقادیر ولتاژ تخمینی، بخش خطدار تعیین شده است. با توجه به وابستگی معادلات دیفرانسیل خط به زمان و مکان، برای تعیین مکان خط از چهار روش استفاده شده است. در روش‌های اول و دوم رابطه‌ای بدست آمده که در زمان وقوع خطا، مکان خط 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 (نقشه مینیمم یا ماکریمم)، مکان خط 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 شبیه‌سازی شده و داده‌های حاصله در نرم افزار MATLAB مطابق با الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین مکان دقیق خطا پردازش گردیده است. تمام عوامل تأثیرگذار از جمله وجود منبع در انشعابات، اختلاف فاز و تفاوت امپدانس منابع، تزویج متقابل، عدم جابجاشی خط، بار نامتقارن، انواع خط، 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 خطدار و مکان خط کارآمد بوده و حداقل اشتباہ آن کمتر از ۱٪ (و برای خطاهای همزمان و خطاهای بین دو مدار کمتر از ۰.۳٪) است. در نهایت مقاله حاضر با مراجع مقایسه شده و وجود تمايز و نوآوري های آن بیان شده است.

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

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

۱- مقدمه

بخش‌های خط سه‌پایانه‌ای بدست آمده است.

در مرجع [۱۴] دو الگوریتم برای مکان‌بایی خط‌ها در خطوط کوتاه با استفاده از اطلاعات جریانی و ولتاژی CT و CVT‌های موجود در پایانه‌ها و مبتنی بر اصل برابری مجموع جریان‌های تزیری به بخش خط‌دادار و مجموع جریان در پایانه‌ها، بیان شده است. در الگوریتم اول از محاسبه امپدانس و الگوریتم دوم از روش نسبت انحراف جریان استفاده شده، ولی خط‌های 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 خط‌ها (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 خط حاصل شده است. این شاخص برای تمام بخش‌ها محاسبه شده و با توجه به آن، بخش و مکان خط مشخص شده است. برای بدست آوردن پارامترهای خودی و متقابل خط دو مداره، از میانگین درایه‌های غیرقطری ماتریس‌های فازی امپدانس و ادمیتانس استفاده نموده که دارای خط‌می باشد.

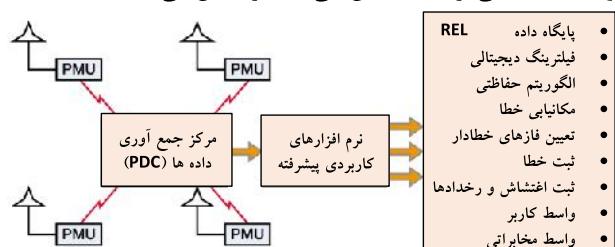
در مرجع [۲۱] بر اساس پردازش داده‌های قبل و بعد از خط‌ها، سنکرون نمودن کمیت‌های ولتاژ و جریان موجود، تخمین امپدانس بارها در پایانه‌های دیگر و از اختلاف ولتاژ تخمینی در نقطه خط‌مکان آن تعیین شده است. در انشعابات خط چند پایانه‌ای تنها اتصال بار در نظر گرفته شده و مکان‌بایی بر اساس کمیت‌های سه فاز (V_{abc}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

در این مقاله نواقص فوق‌الذکر بر طرف شده و تمام عوامل تأثیرگذار بر نتایج مکان‌بایی [۷]، از جمله: ظرفیت خازنی موازی، عدم جابجا شدن خط، تزویج متقابل، انشعاب (Teed, Tap, Toff)، وجود منبع در انشعابات، اختلاف فاز و تفاوت امپدانس منابع، بار نامتقارن، مقاومت خط‌ها و تمام انواع خط‌ها از جمله خط‌های بین دو مدار و قوع دو خط‌ای هم‌زمان در دو مدار در نظر گرفته شده است. مکان‌بایی خط‌ها 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 مقایسه مقادیر ولتاژ تخمینی نقاط انشعاب، بخش خط‌دادار تعیین شده است. سپس با تقلیل خط چند‌پایانه‌ای و تحلیل بخش خط‌دادار، مکان خط‌ها با استفاده از چند روش محاسبه شده و روش مناسب معرفی گردیده است.

نحوه بیان مطالب در بخش‌های بعد بدین ترتیب است: در بخش دوم مراحل الگوریتم پیشنهادی تشریح و در بخش سوم روش‌های پیشنهادی برای مکان‌بایی خط‌ها بیان شده است. در بخش چهارم نتایج

خطوط انتقال در برخی موارد بدليل محدودیت‌های فنی با 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 اشتباہ رله از ضرایبی برای جبران اثر امپدانس متقابل توالي صفر استفاده می‌شود [۳-۱].

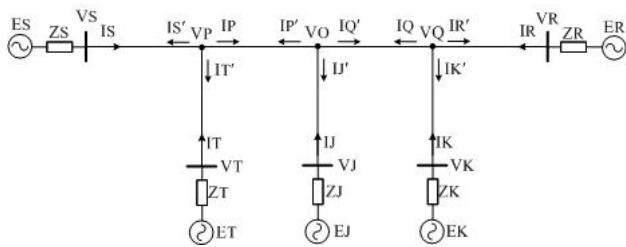
با توجه به وجود خطوط دو مداره چند پایانه‌ای در شبکه انتقال و فوق توزیع برق ایران [۴]، ارائه روشی برای حفاظت این خطوط حائز اهمیت است. الگوریتم‌های مکان‌بایی خط‌ها اعم از حفاظت خط هستند؛ زیرا علاوه بر تعیین زون خط‌ها، مکان دقیق آن را نیز مشخص می‌سازند. همچنین با توجه به نصب PMU‌ها در شبکه انتقال برق کشور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



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

در مراجع [۱۱] تا [۲۴] به مکان‌بایی خط‌ها در خطوط چند پایانه‌ای پرداخته شده است که از میان آنها، در [۲۰]، [۱۴]، [۱۲] و [۲۱] به مکان‌بایی خط‌ها 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 خط‌ها و دو معادله kvl برای حلقه‌های متعدد از نقطه انشعاب و خط انتقال نوشته شده و با حل دستگاه حاصله، فاصله محل خط‌ها از مکانیاب خط‌ها بر حسب جریان‌های دیفرانسیلی و طول



شکل (۳): خط پنج پایانه‌ای نمونه

این خط پنج پایانه‌ای در صورت تشخیص وقوع خطا، طی چند مرحله به بخش مشتمل بر ناحیه خطدار 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 خطدار 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 مؤلفه‌های پایانه‌های مذکور به معنای عدم وجود 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. عنوان 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 را می‌توان بترتیب ذیل محاسبه نمود:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_p|_S = \frac{V_S - Z_{cSP} I_S}{2} e^{\gamma_{SP} L_{SP}} + \frac{V_S + Z_{cSP} I_S}{2} e^{-\gamma_{SP} L_{SP}} \\ V_p|_O = \frac{V_O - Z_{cOP} I_O}{2} e^{\gamma_{OP} L_{OP}} + \frac{V_O + Z_{cOP} I_O}{2} e^{-\gamma_{OP} L_{OP}} \\ V_p|_T = \frac{V_T - Z_{cTP} I_T}{2} e^{\gamma_{TP} L_{TP}} + \frac{V_T + Z_{cTP} I_T}{2} e^{-\gamma_{TP} L_{TP}} \end{array} \right. \quad (1)$$

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

که در این روابط $I_p|_S$ و $V_p|_S$ (I_S) بترتیب ولتاژ و جریان نقطه انشعاب P مبتنی بر مؤلفه‌های پایانه S، VS و IS و ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در پایانه S، Z_{cSP} آنپدنس موجی بخش SP ثابت انتشار موج در بخش SP و L_{SP} طول بخش SP است.

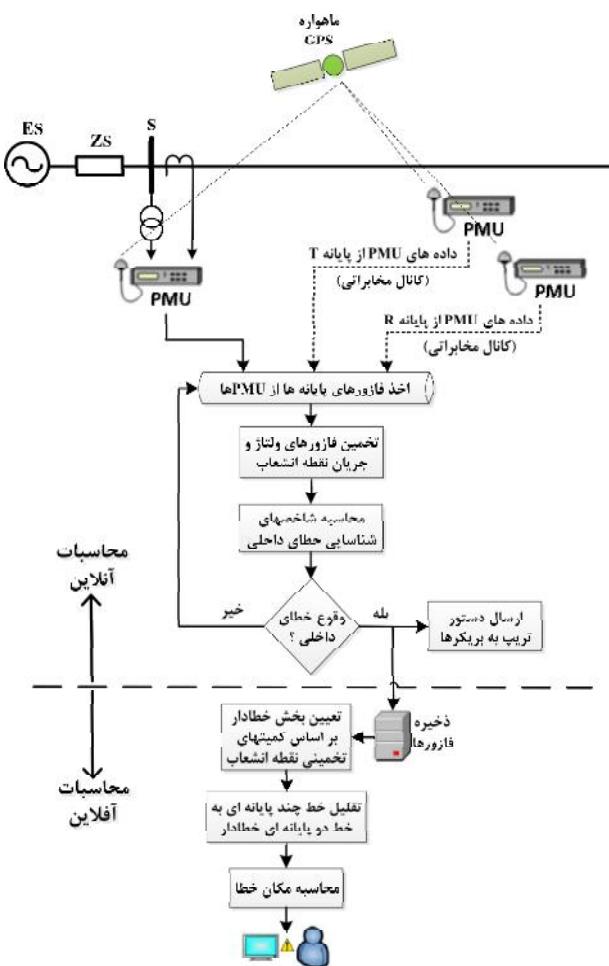
مطابق شکل (۴) با مقایسه ولتاژهای تخمینی نقاط انشعاب P، O و Q، شرط‌های Enable_1 و Enable_2 برای تقلیل خط مورد نظر بدست می‌آید. با توجه به میزان افت ولتاژ در شرایط مختلف بهره‌برداری، حد آستانه برای اختلاف ولتاژهای تخمینی در نقاط انشعاب Thr2=0.2% انتخاب شده است. عنوان مثال در صورت وقوع خطا در بخش SP، اختلاف مقادیر $|V_p|_S$ و $|V_p|_T$ بیش از Thr2 بوده و Enable_1 فعال می‌شود، در نتیجه خط پنج پایانه‌ای به

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

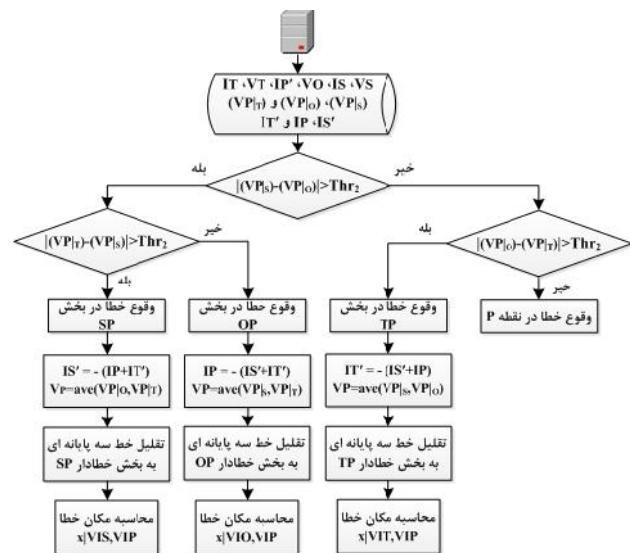
۲- الگوریتم پیشنهادی

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 محسوبه شده و بر اساس مقایسه مقادیر ولتاژ تخمینی، بخش خطدار تعیین شده و سپس با تقلیل خط چند پایانه‌ای به خط دو پایانه‌ای (بخش خطدار) مکان خطا با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه شده است. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی مطابق شکل (۲) است.

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



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



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

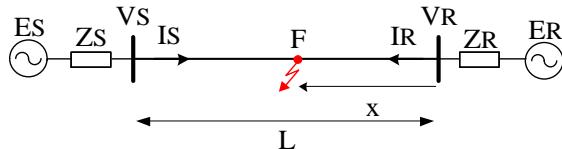
۳- روش‌های پیشنهادی برای مکان‌یابی خط‌ها

۳-۱- تعیین مکان خط‌ها مبتنی بر محاسبه

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

۳-۱-۱- روش ۱: مبتنی بر شاخص‌های M و N

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



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

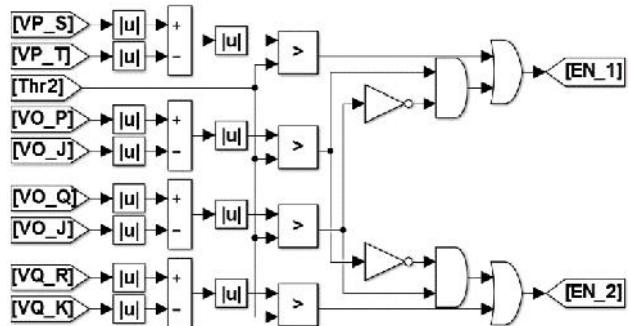
مکان خط‌ها بصورت رابطه (۳) بدست می‌آید. که در آن، X مکان خط‌ها بر حسب کیلومتر ($0 \leq x \leq L$) و D مکان خط‌ها بر حسب پریونیت یا واحد طول خط ($0 \leq D \leq 1$) است.

$$x = D \cdot L = \frac{1}{2\gamma} \ln \left(\frac{N}{M} \right) \quad (3)$$

$$\begin{cases} N = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} - \frac{V_S - Z_c I_S}{2e^{-\gamma L}} \\ M = \frac{V_S + Z_c I_S}{2e^{\gamma L}} - \frac{V_R - Z_c I_R}{2} \end{cases} \quad (4)$$

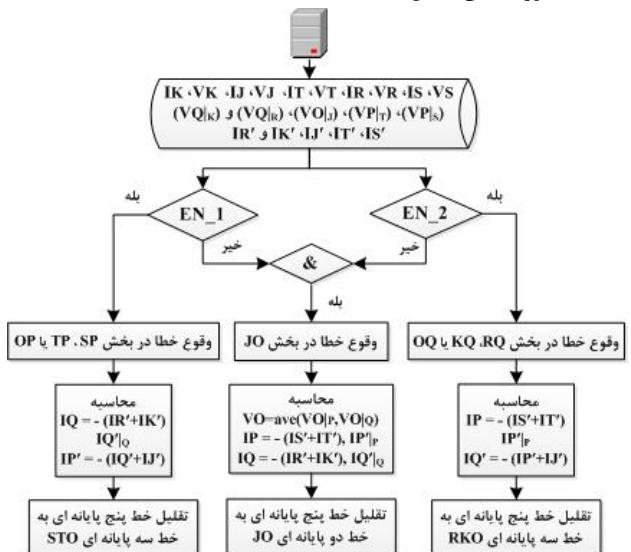
در رابطه (۴)، مقدار شاخص‌های M و N با وقوع خط‌ای داخلی بطور ناگهانی افزایش می‌یابد ولی در شرایط دیگر ناچیز است، که از این ویژگی در [۸] برای شناسایی خط‌های داخلی استفاده شده است.

و سپس به بخش خطدار SP کاهش داده می‌شود.



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

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



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

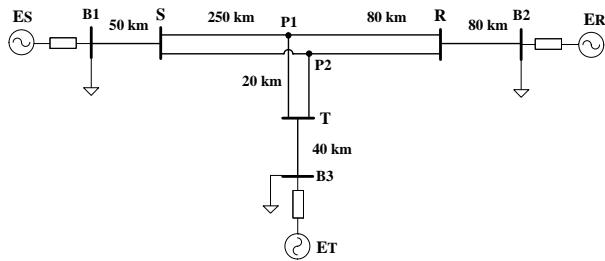
در شکل (۵) پس از بارگذاری داده‌های فازوری اندازه‌گیری شده و تخمینی، با توجه به شرط‌ها خط در چند مرحله به بخش خطدار کاهش داده می‌شود. خط پنج پایانه‌ای به چند طریق قابل کاهش است، که در اینجا به ۲ خط سه پایانه‌ای (RKO و STO) و ۱ خط دو پایانه‌ای (JO) کاهش داده می‌شود. بنوان مثال اگر شرط EN_1 برقرار شود، 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 خطدار تعیین شده و با استفاده از روش‌هایی که در بخش بعد بیان شده مکان دقیق خط‌ها 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 خطدار کاهش داده و مکان خط‌ها در آن محاسبه نمود.

$$\sum I(x) = \sum_t \text{abs} \left\{ \begin{array}{l} \frac{I(x)_S}{\left(-\frac{1}{Z_c} \sinh \gamma(L-x) \hat{V}_S + \cosh \gamma(L-x) \hat{I}_S \right)} + \\ \frac{I(x)_R}{\left(\frac{1}{Z_c} \sinh \gamma x \hat{V}_R - \cosh \gamma x \hat{I}_R \right)} \end{array} \right\} \quad (8)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

۱-۱-۴ مکان‌یابی خط 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

$r_1 = r_2 = 0.0181, r_0 = 0.2188, r_{0m} = 0.2005 [\Omega/\text{km}]$	مشخصات خط افقی
$l_1 = l_2 = 0.9297, l_0 = 3.2829, l_{0m} = 2.0802 [\text{mH}/\text{km}]$	پارامترهای خط افقی
$c_1 = c_2 = 12.571, c_0 = 7.8555, c_{0m} = -2.0444 [\text{nF}/\text{km}]$	مشخصات خط عمودی
$L_S = 250, L_R = 80 [\text{km}]$	
$z = 0.0181 + j0.2921 [\Omega/\text{km}]$	
$y = j3.949 \times 10^{-6} [\text{S}/\text{km}]$	
$Z_c = 272.0846 - j13.46 [\Omega]$	
$\gamma = 3.32617 \times 10^{-5} + j0.0010745 [1/\text{km}]$	
$r_1 = r_2 = 0.02685, r_0 = 0.2102, r_{0m} = 0.1834 [\Omega/\text{km}]$	
$l_1 = l_2 = 1, l_0 = 3.7085, l_{0m} = 2.4258 [\text{mH}/\text{km}]$	
$c_1 = c_2 = 11.662, c_0 = 6.9959, c_{0m} = -2.1088 [\text{nF}/\text{km}]$	
$L_T = 20 [\text{km}]$	
$z = 0.02685 + j0.3139 [\Omega/\text{km}]$	
$y = j3.664 \times 10^{-6} [\text{S}/\text{km}]$	
$Z_c = 292.99607 - j12.50678 [\Omega]$	
$\gamma = 4.5821 \times 10^{-5} + j0.0010734 [1/\text{km}]$	
$V_S = 400 \angle 20^\circ, V_R = 400 \angle 40^\circ, V_T = 400 \angle 10^\circ [\text{kV}]$	
$f = 50 [\text{Hz}], S_b = 100 [\text{MVA}]$	مشخصات منابع
$R_S = 1 [\Omega], L_S = 0.0318 [\text{mH}]$	
$R_R = 0.8 [\Omega], L_R = 0.0159 [\text{mH}]$	
$R_T = 0.9 [\Omega], L_T = 0.0255 [\text{mH}]$	
$P_A = 600 \text{MW}, \cos \varphi_A = 0.9$	مشخصات بار
$P_B = 400 \text{MW}, \cos \varphi_B = 0.8$	
$P_C = 200 \text{MW}, \cos \varphi_C = 0.95$	
نامتناهن در هر پایانه	

جدول (۲): مشخصات هادی‌ها

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

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

$$\begin{cases} \left(1 + \frac{Z'_{RF} Y'_{RF}}{2} \right) V_R - Z'_{RF} I_R = \left(1 + \frac{Z'_{SF} Y'_{SF}}{2} \right) V_S - Z'_{SF} I_S \\ Z'_{RF} = Z_c \sinh(\gamma x) \\ Z'_{SF} = Z_c \sinh(\gamma(L-x)) \\ 1 + \frac{Z'_{RF} Y'_{RF}}{2} = \cosh(\gamma x) \\ 1 + \frac{Z'_{SF} Y'_{SF}}{2} = \cosh(\gamma(L-x)) \end{cases} \quad (5)$$

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

$$x = D \cdot L = \frac{1}{\gamma} \operatorname{Arctanh} \left[\frac{Z_c I_S \sinh \gamma L - V_S \cosh \gamma L + V_R}{Z_c I_S \cosh \gamma L - V_S \sinh \gamma L + Z_c I_R} \right] = \frac{1}{\gamma} \operatorname{Arctanh} \left[\frac{Z' I_S - \left(1 + \frac{Z' Y'}{2} \right) V_S + V_R}{Z_c \left(1 + \frac{Z' Y'}{2} \right) I_S - \frac{Z'}{Z_c} V_S + Z_c I_R} \right] \quad (6)$$

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

۲-۲- تعیین مکان خط مبتنی بر منحنی تغییرات

کمیت‌های الکتریکی

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

۲-۲-۳- روش ۳: اختلاف ولتاژهای تخمینی در نقطه خط

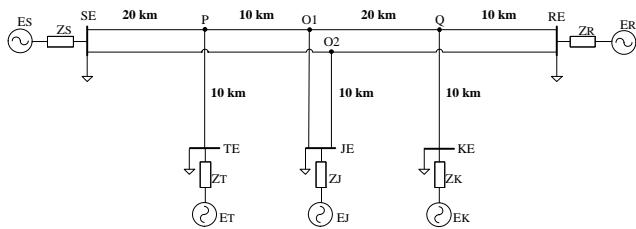
برای تخمین ولتاژ هر نقطه از خط هم می‌توان از فازورهای ولتاژ و جریان ابتدای خط استفاده نمود و هم می‌توان از کمیت‌های انتهای خط استفاده نمود. مقدار این ولتاژهای تخمینی، در شرایط عادی در کل خط و در شرایط وقوع خط اتفاقاً در مکان خط با هم برابر است.

$$\Delta V(x) = \sum_t \text{abs} \left\{ \frac{\frac{V(x)_S}{V(x)_R}}{\left(\cosh \gamma(L-x) \hat{V}_S - Z_c \sinh \gamma(L-x) \hat{I}_S \right) - \left(\cosh \gamma x \hat{V}_R - Z_c \sinh \gamma x \hat{I}_R \right)} \right\} \quad (7)$$

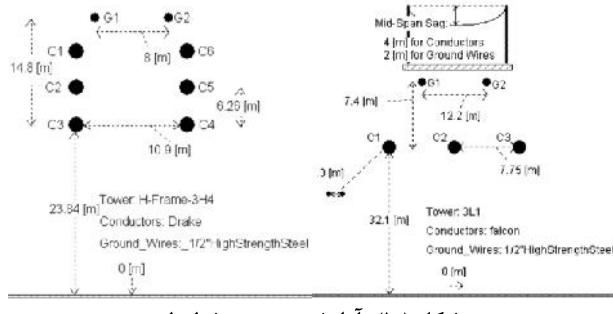
بنابراین با رسم پروفیل اختلاف ولتاژهای تخمینی مطابق رابطه (۷) در طول خط، نقطه‌ی مینیمم آن بیانگر مکان خط خواهد بود و \hat{V}_S , \hat{I}_S , \hat{V}_R و \hat{I}_R ، بردارهای زمانی کمیت‌های پایانه‌ها و بقیه پارامترها، اسکالار و مربوط به مشخصات خط هستند.

۲-۲-۴- روش ۴: مجموع جریان‌های تزدیقی به نقطه خط

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 خط با رسم مجموع جریان‌ها در طول خط مطابق رابطه (۸)، نقطه ماکریم آن نشانگر محل خط خواهد بود.



شکل (۹): سیستم پنج پایانه‌ای دو مداره



شکل (۱۰): آرایش هندسی خطوط

$$\frac{d^2[V_{phase}]}{dx^2} = [Z_{phase}][y_{phase}][V_{phase}] \quad (9)$$

$$\frac{d^2[I_{phase}]}{dx^2} = [y_{phase}][Z_{phase}][I_{phase}]$$

جدول (۴): مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده

$z = 0.071162 + 0.4131i [\Omega/km]$	پارامترهای خط دو مداره
$y = 0.275 \times 10^{-5}i [S/km]$	
$Z_c = 389.012 - 33.246i [\Omega]$	
$\gamma = 9.1467 \times 10^{-5} + 1.0697 \times 10^{-3}i [1/km]$	
$z = 0.0281 + 0.3108i [\Omega/km]$	پارامترهای خط تک مداره
$y = 0.3612 \times 10^{-5}i [S/km]$	
$Z_c = 293.636 - 13.2471i [\Omega]$	
$\gamma = 4.78484 \times 10^{-5} + 1.0606 \times 10^{-3}i [1/km]$	
$V_S = 230\angle 20^\circ, V_R = V_J = 230\angle 10^\circ [kV]$	مشخصات منابع
$V_T = V_K = 230\angle 0^\circ [kV]$	
$f = 50 [Hz], S_b = 100 [MVA]$	
$R_S = 1 [\Omega], L_S = 0.0318 [mH]$	
$R_R = 0.8 [\Omega], L_R = 0.0159 [mH]$	
$R_T = R_J = R_K = 0.9 [\Omega], L_T = L_J = L_K = 0.0255 [mH]$	
$P_A = 600MW, \cos \varphi_A = 0.9$	مشخصات بار نامتناهی
$P_B = 400MW, \cos \varphi_B = 0.8$	
$P_C = 200MW, \cos \varphi_C = 0.95$	

جدول (۵): مشخصات هادی‌ها

خط انتقال	نوع هادی	قطر خارجی [cm]	نسبت T/D	GMR [cm]	مقاومت dc [\Omega/km]	تعداد باندل	قطر باندل [cm]
دو مداره	فاز	۲/۸۱۴۳	۰/۳۶۴	۱/۲۲	۰/۰۷۰۵	۱	.
دو مداره	گارد	۰/۸۰۱۴	۰/۵	۰/۳۱۲۴	۰/۰۳۰۶	۱	.
تک مداره	فاز	۱/۵۸۱۲	۰/۳۶۴	۰/۶۳۸	۰/۰۵۵۲	۲	۳۰
تک مداره	گارد	۰/۸۰۱۴	۰/۵	۰/۳۱۲۴	۰/۰۳۰۶	۱	.

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 حاصل ضرب های $[y][z][y]$ و $[y][z][z]$ را قطری نموده، معادلات را مستقل ساخته و پارامترها و مؤلفه‌های مودال را نتیجه دهد [۹].

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

با استفاده از ماتریس تبدیل کلارک تعیین یافته معادلات خط تفکیک شده، پارامترها و مؤلفه‌های مودال شش گانه آن بدست آمده و در نتیجه بصورت دو خط سه پایانه‌ای مجزا تحلیل شده است. 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 خطدار تعیین و مکان خط با روش‌های چهار گانه 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 حداقل خطای ۰/۳۴ و ۰/۴۹ درصد است.

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

مکان خط	روش ۱	روش ۲	روش ۳	روش ۴	نوع و مقاومت خط	مکان خط
S ۲۵ کیلومتری پایانه	AG- ۱۰ Ω	۰/۷۹	۰/۲۲	۰/۵۳	۰/۰۵۳	.
S ۷۵ کیلومتری پایانه	AB- ۱ Ω	۰/۰۴	۰/۷۴	۰/۳۲	۰/۰۱۱	.
S ۱۲۵ کیلومتری پایانه	BCG- ۱۰۰ Ω	۰/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۰۰۸	.
S ۱۷۵ کیلومتری پایانه	ABC G- ۵۰ Ω	۰/۰۶	۰/۴۷	۰/۱۳	۰/۰۱۲	.
S ۲۲۵ کیلومتری پایانه	CG- ۵۰ Ω	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۲۲	۰/۰۲۲	.
R ۲۰ کیلومتری پایانه	ABG- ۱ Ω	۰/۱	۰/۱۲	۰/۶۲	۰/۰۰۵	.
R ۴۰ کیلومتری پایانه	ABC G- ۱۰۰ Ω	۰/۰۷	۰/۱	۰/۲	۰/۰۱	.
R ۵۰ کیلومتری پایانه	BG- ۱۰۰ Ω	۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۱۵	۰/۰۳۷	.
R ۶۰ کیلومتری پایانه	BC- ۵۰ Ω	۰/۳۴	۰/۱۸	۰/۱۵۳	۰/۰۴۹	.
T ۱۰ کیلومتری پایانه	AC- ۱۰ Ω	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۷۵	۰/۰۲۵	.
نقاطه انشعاب	ABC G- ۱۰۰ Ω	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۱	.
میانگین درصد خطای مکانیابی	حداقل درصد خطای مکانیابی	۰/۳۴	۰/۹۸	۰/۰۴۹	۰/۰۴۹	.
میانگین درصد خطای مکانیابی	میانگین درصد خطای مکانیابی	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	.

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

مطابق شکل (۹)، خط مورد نظر یک خط دو مداره متتشکل از یک خط پنج پایانه‌ای و یک خط سه پایانه‌ای با سطح ولتاژ 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.

نمونه (با در نظر گرفتن تنوع مکان / نوع / مقاومت خط و شرایط بارگذاری) در جدول (۶) درج شده است. بار متوسط و کم بترتیب ۵۰ و ۲۰ درصد مقدار کل در نظر گرفته شده است.

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

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

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 شده است.

مشابه قبل بهترین نتایج مکانیابی متعلق به روش‌های اول و سوم بوده و حداکثر خطای مکانیابی با این دو روش بترتیب برابر با ۰/۱۹ و ۰/۲۶ 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 شده است، که بترتیب مربوط به مکانیابی خطای مبتنی بر مؤلفه‌های مodal مدار اول و مدار دوم هستند.

$$\begin{aligned} [V_{phase}] &= [T_v][V_m], \quad [V_m] = [T_v]^{-1}[V_{phase}] \\ [I_{phase}] &= [T_i][I_m], \quad [I_m] = [T_i]^{-1}[I_{phase}] \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{d^2[V_m]}{dx^2} &= [T_v]^{-1}[z][y][T_v][V_m] \\ \frac{d^2[I_m]}{dx^2} &= [T_i]^{-1}[y][z][T_i][I_m] \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$[T_v] = [(T_i)^{*}-1]^T \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{d[V_m]}{dx} &= [T_v]^{-1}[z][T_i][I_m] \\ \frac{d[I_m]}{dx} &= [T_i]^{-1}[y][T_v][V_m] \end{aligned} \quad (13)$$

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

$$\begin{aligned} [z_m] &= [T_i]^t[z][T_i] \\ [y_m] &= [T_v]^t[y][T_v] \end{aligned} \quad (14)$$

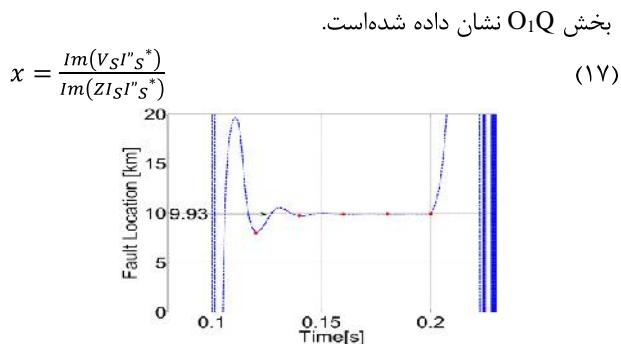
بدین ترتیب خط چند فاز به مجموعه‌ای از مدارات مodal بدون تزویج تبدیل می‌شود که امپدانس موجی و ثابت انتشار هر مود ز از رابطه (۱۵) بدست آمده است. برای یک خط جابجاشده به تعداد فازها مود متمایز وجود دارد.

$$Z_{cmj} = \sqrt{\frac{z_{mjj}}{y_{mjj}}}, \gamma_{mj} = \sqrt{z_{mjj}y_{mjj}} \quad (15)$$

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

$$\begin{aligned} [V_0 V_{00} V_1 V_{11} V_2 V_{22}]^t &= [T_v]^{-1}[V_a V_{aa} V_b V_{bb} V_c V_{cc}]^t \\ [I_0 I_{00} I_1 I_{11} I_2 I_{22}]^t &= [T_i]^{-1}[I_a I_{aa} I_b I_{bb} I_c I_{cc}]^t \end{aligned} \quad (16)$$

خروجی (۱۵) و (۱۶) برای حل معادلات (۳)-(۸) در MATLAB و EMTP Line Constants Routines تعیین مکان خطای 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 (RE، SE، TE و KE) بدست آمده و در فرآیند تقلیل خط پنج پنج پایانه‌ای به بخش خطدار مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس پارامترهای خطوط، درصد خطای مکانیابی با روش‌های چهارگانه برای خطاهای



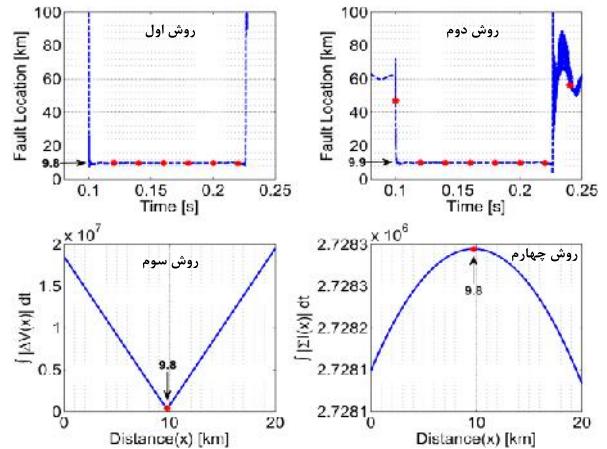
شکل (11): مکانیابی خطای ABCG- 1Ω در وسط O_1Q با روش Takagi.

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

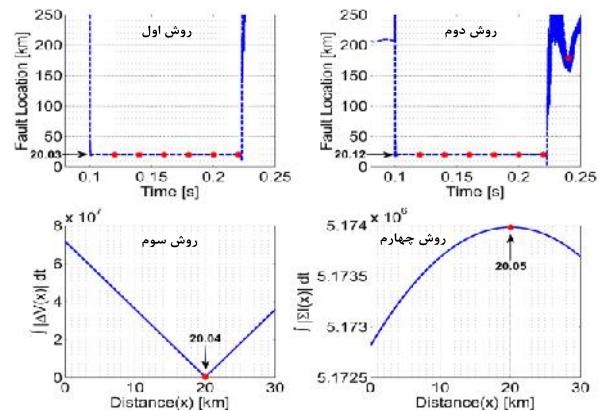
۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصله در موارد ذیل خلاصه شده است:

- ✓ حفاظت خطوط چند پایانه‌ای دو مداره بدلیل infeed و تزویج مقابل با مشکلاتی همراه بوده و با توجه به وجود این خطوط در شبکه انتقال و فوق توزیع ایران الگوریتمی برای تشخیص و مکان‌یابی خطای در این خطوط ارائه شد.
- ✓ برای تفکیک و حل نمودن معادلات وابسته خط سه فاز، در خطوط جابجا شده از تبدیل کلارک و در خطوط جابجا شده از تئوری بردارها و مقادیر ویژه استفاده شد.
- ✓ در الگوریتم پیشنهادی با مقایسه ولتاژهای تخمینی نقاط انشعاب بخش خطدار تعیین شده و بدین وسیله خط چند پایانه‌ای به یک خط دو پایانه‌ای ساده تقسیل داده شد.
- ✓ با استفاده از مؤلفه‌های مودال ولتاژ و جریان پایانه‌ها، چهار روش برای مکان‌یابی خطای 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 خطای در یک مدار کمتر از ۱٪ و برای خطای دو مدار بین ۱٪ و ۳٪ است.
- ✓ تمام عوامل تأثیرگذار از جمله اختلاف فاز و تفاوت امپدانس منابع، بار نامتقارن، عدم جابجاگیری خط، احتمال عدم دسترسی به داده‌های یک PMU، انواع خطای فاز به فاز، فاز به زمین، همزمان و بین دو مدار در نظر گرفته شد.
- وجود تمایز این مقاله در مقایسه با مراجع در جدول (۸) درج شده است.



شکل (۹): مکانیابی خطای ABCG- 50Ω در $OQ1-10\text{km}$ from $O1$



شکل (۱۰): مکانیابی خطای ABCG- 50Ω در $R2-20\text{km}$ from $R2$

۴-۳- 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 کمیت-های نقاط انشعاب، بخش خطدار و مکان خطای انتقال تعیین نمود. مشابه قبل برای تعیین بخش خطدار از مقایسه ولتاژهای تخمینی نقاط انشعاب و حد آستانه استفاده شده است. عنوان نمونه برای خطای در

وسط بخش $(x=10\text{km})$ O_1Q

$$Abs(V_{P|S} - V_{P|R}) < Thr_2 \Rightarrow \text{fault is not in SP and TP}$$

$$Abs(V_{Q|R} - V_{Q|K}) < Thr_2 \Rightarrow \text{fault is not in RQ and KQ}$$

$$Abs(V_{O_1|P} - V_{O_1|Q}) > Thr_2 \Rightarrow \text{fault is in } O_1P \text{ or } O_1Q$$

$$V_{O_1|Q} < V_{O_1|P} \Rightarrow \text{fault is in } O_1Q$$

پس از تعیین بخش خطدار، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در پایانه‌های R و K کمیت‌های نقطه انشعاب Q تخمین زده شده است. از آنجاییکه تنها داده‌های یک سمت از بخش خطدار در دسترس بوده و طول خط کوتاه است، برای تعیین مکان دقیق خطای در 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 خطای از S است. در شکل (۱۱) نتیجه مکان‌یابی برای خطای نمونه ABCG با مقاومت ۱ اهم در وسط

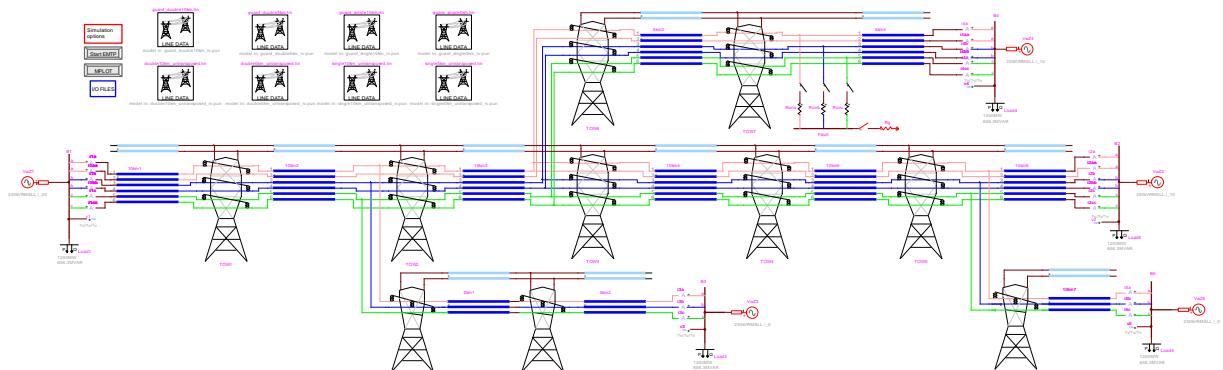
جدول (۷): نتایج مکان‌یابی خطاهای همزمان در دو مدار و خطاهای بین دو مدار

درصد خطاهای مکان‌یابی						نوع و مقاومت خط		مکان خط			نوع خط
روش چهارم	روش سوم	روش دوم	روش اول	مدار ۱	مدار ۲	مدار ۱	مدار ۲	مدار ۱	مدار ۲	مدار ۱	
۰/۲	۰/۹۵	۰/۰۰۷	۰/۹۵	۰/۱۶	۰/۵	۰/۲	۰/۹۶	AC- 10Ω	BG- 10Ω	RO2-20km of R2	SP1- 10km of S1
۲/۱۶	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۳	۱/۰۳	۰/۶۴	۰/۱۴	۰/۲۹	BCG- 50Ω	ABCG- 1Ω	SO2- 10km of S2	OQ1-10km of O1
۰/۷	۰/۱۵	۱/۹	۱/۹	۵	۲/۴	۲/۶	۲/۴	AG- 50Ω	ACG- 10Ω	JO2- 5km of J2	TP1- 5km of T1
۰/۷	۰/۱۴	۰/۳۶	۰/۹	۰/۰۵۸	۰/۸	۰/۳۴	۰/۹	ABCG- 1Ω	BC- 1Ω	SO2- 20km of S2	SP1- 10km of S1
۱/۱۳	۱/۲۵	۰/۳	۰/۴۵	۰/۰۵۵	۰/۶۳	۰/۲۶	۰/۴۲	ABCG- 1Ω	ABCG- 1Ω	SO2- 10km of S2	SP1- 10km of S1
۰/۱۷	۱/۲	۰/۱۳	۱/۲	۰/۴	۰/۰۵۹	۰/۱۲	۱/۲	ACG- 50Ω	BG- 50Ω	RO2-20km of R2	OQ1-10km of O1
۰/۳۸	۰/۱	۰/۳	۰/۲۲	۰/۶	۶/۳	۰/۰۱	۰/۰۱	CG- 100Ω	AG- 100Ω	O2 teed point	O1 teed point
۱	۰/۰۰۱	۱	۱/۲	۰/۳	۱/۲	۱	۰/۶۵	BCG- 10Ω	ABG- 10Ω	JO2- 5km of J2	JO1- 5km of J1
۲/۱۶	۱/۲۵	۱/۹	۱/۹	۵	۶/۳	۲/۶	۲/۴	حداکثر درصد خطاهای مکان‌یابی			
۰/۸	۰/۰۵۸	۰/۰۵۱	۰/۰۸۹	۱/۰۷	۱/۶۳	۰/۰۵۸	۰/۰۸۵	میانگین درصد خطاهای مکان‌یابی			

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

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

پیوست الف:



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

مراجع

- [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 Balcerak, 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 ($N \geq 3$) 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, Emilio 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] عبادالله کامیابی، محمدحسین جاویدی، جواد ساده، "فاصله‌یابی خط‌ها در خطوط انتقال نیرو با سه پایانه در حوزه زمان با استفاده از اندازه‌گیری‌های همزمان و مدل گستردۀ 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 خط‌ها 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] 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. Domme, "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.

¹ Multi-terminal transmission line

² Phasor Measurement Unit

³ Ground Positioning System

⁴ Phasor Data Concentrator