

# مکان‌یابی ناحیه گسترده خطا در خطوط چند پایانه فشار قوی جریان مستقیم (HVDC) مبتنی بر معادلات حاکم بر خط

اسرا ایزدی فر<sup>۱</sup> جواد ساده<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران

[izadiefar.asra@alumni.um.ac.ir](mailto:izadiefar.asra@alumni.um.ac.ir)

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

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

**چکیده:** توسعه روز افزون خطوط چند پایانه فشار قوی جریان مستقیم (MTDC) به دلیل مزایای این نوع از شبکه نسبت به شبکه AC خصوصاً در فواصل طولانی، توجه را بیش از پیش به ارائه راهکاری به منظور حفاظت و تخمین مکان خطا در این نوع شبکه جلب کرده است. در این مقاله روشی مبتنی بر معادلات حاکم بر خط برای مکان‌یابی خطا در یک شبکه MTDC ارائه شده است. در روش پیشنهادی فرض شده است ابزار اندازه‌گیری تنها بر روی پایانه‌های متصل به کانونرتر نصب شده‌اند. الگوریتم پیشنهادی شامل سه بخش شناسایی قطب خطادار، تشخیص خط خطادار و تخمین مکان خطا است. برای شناسایی قطب خطادار، شاخص تغییرات ولتاژ پیشنهاد شده است. شناسایی قطب خطادار منجر به کاهش تعداد دفعات اجرای الگوریتم و سرعت بخشیدن به کل فرآیند تخمین مکان خطا می‌گردد. الگوریتم شناسایی خط خطادار نیز به دو زیر بخش برون خط و بر خط تقسیم شده است. در بخش برون خط مفهومی تحت عنوان خطوط فرضی با توجه به ساختار شبکه معرفی می‌گردد که در یافتن مکان خطا تاثیر مثبتی دارد. در بخش بر خط با استفاده از خطوط فرضی و تحلیل نتایج معادلات، روشی به منظور شناسایی خطوط سالم و در نتیجه تفکیک خط خطادار معرفی می‌شود. پس از شناسایی خط خطادار اگر اطلاعات حداقل یک سمت خط در دسترس نباشد، با استفاده از معادلات حاکم بر خط اطلاعات مورد نیاز تخمین زده می‌شود. به عنوان آخرین مرحله، مکان خطا نیز از میانگین نتایج حاصل از حل معادلات با استفاده از اطلاعات خط خطادار محاسبه می‌گردد. شبکه مورد مطالعه شامل خطوط هوایی و کابلی و ساختار شعاعی و حلقوی است تا صحت روش در تمامی حالات بررسی گردد. نتایج شبیه سازی های انجام شده، بیانگر عملکرد مناسب روش پیشنهادی به ازای خطاهای مختلف از جمله خطا در نزدیکی پایانه خطوط بلند و خطا با مقاومت بالا است.

**واژه‌های کلیدی:** خطوط چند پایانه جریان مستقیم، مکان‌یابی خطا ناحیه گسترده، مدل خط با پارامترهای گسترده

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.167

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جواد ساده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران

تعریف می‌گردد، خط دارای خطا را شناسایی می‌کند. برخی از مراجع، الگوریتمی برای شناسایی خط خطادار و زمان رسیدن موج به پایانه‌ها به طور همزمان ارائه داده‌اند. به عنوان نمونه، مرجع [۸] به شناسایی خط خطادار و در ادامه به مکان‌یابی خطا در یک شبکه MTDC با اتصال ستاره با استفاده از روش امواج سیار پرداخته است. این مرجع از ساختار ستاره‌ی سه پایانه بهره می‌برد که ابزار اندازه‌گیری تنها بر روی پایانه‌های آن قرار دارد و نقطه‌ی اشتراکی ساختار ستاره بدون ابزار اندازه‌گیری است. در ادامه بیان می‌کند می‌توان این روش را برای هر ساختار ستاره، با تعداد پایانه دلخواه به کار برد. در این مرجع زمان رسیدن موج به پایانه‌ها توسط تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT<sup>۶</sup>) محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از معادلات موج در روش امواج سیار برای هر بخش از ساختار ستاره، شاخصی با عنوان شاخص شناسایی بخش خطادار معرفی کرده و بیان می‌کند خطا در بخشی رخ داده است که این شاخص کمترین مقدار را داشته باشد. از طرفی مکان وقوع خطا، با میانگین‌گیری مقادیر حاصل شده از معادلات موج بخش‌های سالم بدست آمده است. مراجع [۹] و [۱۰] نیز اساسی مشابه با مرجع [۸] را در نظر گرفته‌اند.

روش‌های مبتنی بر زمان از دیگر روش‌های مکان‌یابی خطا است که علاوه بر دقت بالا مشکلات مطرح شده برای روش امواج سیار را ندارند. از مزایای این روش‌ها پاسخ مناسب خصوصاً برای مدل گسترده خط، مناسب برای خطاهای نزدیک ترمینال و عملکرد صحیح برای خطاهایی با شکل موج نزدیک به صفر می‌باشد. در مقابل دقت این روش‌ها به فرکانس نمونه برداری و دریافت سنکرون داده‌ها وابسته است [۱۱].

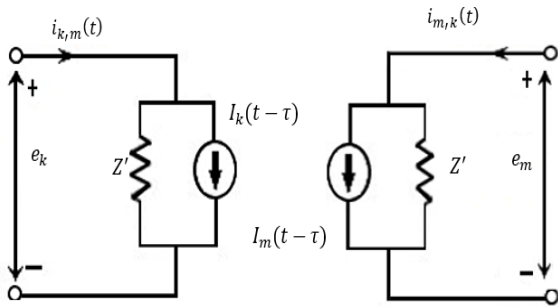
مرجع [۱۲] به منظور مکان‌یابی خطا روشی با استفاده از جریان کلیدهای قدرت ترکیبی (HbCB<sup>۷</sup>) یک پایانه معرفی می‌کند. در مرحله‌ی اول با استفاده از انتگرال جریان عبوری از کلید قدرت، نوع خطا را شناسایی می‌کند. اما الگوریتمی برای شناسایی خط خطادار ارائه نمی‌دهد، با این فرض که خط خطادار توسط الگوریتم‌های حفاظتی رله‌ها مشخص شده است به منظور تخمین مکان خطا با استفاده از ضریب همبستگی، نزدیکترین الگوهای تست به شرایط خطا شناسایی شده و با استفاده از معادلات کرنل وزن دار مکان خطا تخمین زده می‌شود.

دسته‌ای از مراجع با استفاده از معادلات حاکم بر خط و شبکه مورد مطالعه در پنجره‌ی اطلاعاتی مدنظر و تحلیل سیگنال‌های زمانی به مکان‌یابی خطا پرداخته‌اند. دقت این روش برای شبکه‌ی AC و خط HVDC در مراجع [۱۴، ۱۳] اثبات شده است. مرجع [۱۵] با استفاده از معادلات حاکم برای مدل خط متوسط به تخمین مکان خطا در یک شبکه توزیع می‌پردازد. مرجع [۱۶] با استفاده از مدل گسترده خط انتقال در حوزه زمان به شناسایی بخش خطادار و تخمین مکان خطا در یک شبکه انتقال با سه پایانه پرداخته است. روش پیشنهادی بدون نیاز به تشخیص نوع خطا، تنها با استفاده از حداکثر نیم سیکل اطلاعات پس از خطا با دقت بالایی مکان خطا را تخمین می‌زند. مرجع [۱۷] با استفاده

اخیراً خطوط فشار قوی جریان مستقیم (HVDC<sup>۱</sup>) به دلایلی چون هزینه و افت ولتاژ کم‌تر نسبت به خطوط انتقال AC معمول در فواصل طولانی و همچنین انتقال برق بین دو ناحیه با فرکانس متفاوت مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند [۱]. خطوط چندپایانه HVDC (MTDC<sup>۲</sup>) به دلیل تعداد کانورتر کمتر نسبت به اتصال نقطه به نقطه‌ی خطوط HVDC اقتصادی‌تر است. علاوه بر این، در ساختار MTDC انتقال توان حتی با خروج یک خط از شبکه نیز ممکن است که این باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم خواهد شد [۲].

وقوع خطا که رخدادی رایج برای سیستم انتقال است، منجر به اختلال در سیستم قدرت و در بعضی مواقع قطع توان انتقالی می‌گردد. از آنجا که معمولاً ظرفیت خطوط HVDC بالاست، قطع آنها باعث می‌گردد ظرفیت زیادی از دسترس خارج شود. بنابراین شناسایی مکان خطا، به منظور رفع سریع‌تر خطا، انجام تعمیرات و بهره برداری دوباره از سیستم انتقال اهمیت دارد. یکی از مباحث مهم در مکان‌یابی خطا برای یک شبکه MTDC شناسایی درست خط خطادار است زیرا پس از وقوع خطا، سایر خطوط شبکه نیز از امواج سیار ناشی از خطا بر روی خط خطادار تاثیر می‌پذیرند. به طور کلی اطلاعات موردنیاز برای مکان‌یابی خطا در شبکه‌ی MTDC به دو شیوه‌ی نقطه به نقطه<sup>۳</sup> و ناحیه گسترده<sup>۴</sup> دریافت می‌گردند [۳]. دریافت اطلاعات به صورت نقطه به نقطه شیوه‌ی مرسوم به منظور مکان‌یابی خطا است. در این شیوه، به منظور عملکرد درست الگوریتم مورد استفاده، اندازه‌گیرها باید بر روی حداقل یکی از پایانه خط خطادار نصب شده باشد [۳]. در مقابل در روش ناحیه گسترده مکان خطا توسط اطلاعات دریافتی از تعداد محدودی ابزار اندازه‌گیری که ممکن است حتی در محلی دور از مکان خطا نصب شده باشند، تخمین زده می‌شود [۳].

عمده تحقیقات در خطوط HVDC از روش امواج سیار به منظور مکان‌یابی خطا بهره می‌برند. دشواری شناسایی موج اولیه، نادقیق بودن سرعت انتشار موج و تداخل موج اولیه و برگشت آن به ازای خطا در فواصل نزدیک از چالش‌های مطرح شده روش امواج سیار است [۵، ۴]. مرجع [۶] تمرکز خود را بر روی شناسایی پیشانی موج و زمان رسیدن موج به پایانه‌ها به منظور تخمین مکان خطا بر روی خط خطادار که از قبل شناسایی شده است، گذاشته است. با استفاده از تجزیه مقدار تکین (SVD<sup>۵</sup>) مد صفر و یک سیگنال ولتاژ و علامت مقادیر ماکزیمم و مینیمم آن، زمان رسیدن اولین و دومین موج که از محل خطا منتشر شده است را محاسبه و دور یا نزدیک بودن محل خطا به پایانه مدنظر را شناسایی می‌کند. در نهایت با استفاده از معادلات موج حاصل از دو موج برگشت از محل خطا، مکان خطا را تخمین می‌زند. در مقابل، هدف اصلی مرجع [۷] ارائه روشی جهت شناسایی درست خط دارای خطا است. این مرجع با استفاده از علامت توان گذرای امواج سیار که به صورت حاصل ضرب تغییرات ولتاژ و جریان هر پایانه پس از برخورد امواج سیار با آن پایانه



شکل (۱): مدل گسترده حوزه‌ی زمان برای یک خط بین دو پایانه  $m$  و  $k$  [۲۳]

خطا را بر روی خط مشخص شده تخمین می‌زند. از آنجا که خطوط HVDC عمدتاً دارای طول زیادی هستند، به منظور دستیابی به دقت بالاتر در مدلسازی خطوط، معادلات خط با پارامترهای توزیع شده مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بدست آمده اثبات می‌کند که روش پیشنهادی مکان خط را در یک شبکه‌ی MTDC با تعداد محدود ابزار اندازه‌گیری صرف نظر از اینکه شبکه دارای خطوط کابلی، هوایی یا ترکیبی از هر دو باشد، با دقت مناسب تخمین می‌زند.

## ۲- معادلات حوزه‌ی زمان برای مدل گسترده خط

خطوط HVDC عمدتاً دارای طول زیادی هستند، بنابراین برای دستیابی به دقت بالاتر در مکان‌یابی خط، از مدل گسترده خط به منظور مدلسازی این خطوط استفاده می‌شود. مدل گسترده حوزه‌ی زمان برای یک خط بین دو پایانه  $k$  و  $m$  مطابق با شکل (۱) می‌باشد.

مطابق با شکل (۱) جریان پایانه‌های  $k$  و  $m$  به صورت زیر است.

$$i_{k,m}(t) = \left(\frac{1}{Z'}\right)e_k(t) + I_k(t - \tau) \quad (1)$$

$$i_{m,k}(t) = \left(\frac{1}{Z'}\right)e_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (2)$$

منابع جریان وابسته در این شکل به صورت روابط (۳) و (۴)

تعریف می‌شوند [۲۳].

$$I_k(t - \tau) = \frac{-R}{Z'^2} [e_k(t - \tau) + Z' i_{k,m}(t - \tau)] - \frac{Z}{Z'^2} [e_m(t - \tau) + Z' i_{m,k}(t - \tau)] \quad (3)$$

$$I_m(t - \tau) = \frac{-R}{Z'^2} [e_m(t - \tau) + Z' i_{m,k}(t - \tau)] - \frac{Z}{Z'^2} [e_k(t - \tau) + Z' i_{k,m}(t - \tau)] \quad (4)$$

که در معادلات فوق  $\tau$ ،  $Z$  و  $R$  به ترتیب عبارتند از مدت زمان لازم برای انتشار موج بین دو پایانه، امپدانس مشخصه خط و مقاومت خط. همچنین  $Z'' = Z - \frac{R}{4}$  و  $Z' = Z + \frac{R}{4}$  می‌گردند [۲۳]. جریان و ولتاژ یک پایانه را می‌توان با استفاده از اطلاعات پایانه دیگر به صورت رابطه زیر محاسبه کرد [۲۴].

از سیگنال‌های زمانی ولتاژ و جریان به مکان‌یابی خطا می‌پردازد. این مرجع بیان می‌کند در ساختار مدولار کانورترهای چند سطحی (MMC<sup>۱</sup>) پس از وقوع خطا در لحظات اولیه قبل از مسدود شدن کانورتر می‌توان خط را به صورت مدار R-L وابسته به فرکانس مدل کرد. پارامترهای این مدل از قبل توسط شبیه‌سازی یک خطای بدون مقاومت در میانه‌ی خط اندازه‌گیری می‌شود. معادلاتی بر اساس مدل خط و مدل کانورتر بالادست در این مرحله نوشته می‌شود. با حل معادلات، مکان خطا با استفاده از سیگنال ولتاژ و جریان پایانه‌ها و ولتاژ دو سر راکتور هموارساز بدست می‌آید (برای هر نمونه زمانی یک پاسخ بدست می‌آید). به منظور جبران اثرات خازنی خط که در این مدل لحاظ نشده از فیلتر پایین‌گذر (پس فاز مرتبه اول) استفاده می‌شود، تا فرکانس‌های بالای سیگنال را حذف کند. روش معرفی شده دقت مناسبی دارد و از مقاومت خطا و نویز تاثیر نمی‌پذیرد اما تحت تاثیر مقدار راکتور هموار ساز و توان انتقالی کانورتر است.

سنسورهای اندازه‌گیری جریان DC معمولاً در محل کانورترها و پست‌ها نصب می‌شوند [۱۸]. بنابراین اطلاعات گره‌های DC که محل تلاقی خطوط DC اند اما به کانورتر متصل نیستند، معمولاً در دسترس نیستند. وجود گره‌های DC در MTDC ها توجه را به سمت روش‌های مکان‌یابی خطا ناحیه گسترده جلب کرده است.

مرجع [۱۹] روشی مبتنی بر امواج سیار را به منظور مکان‌یابی خطا ناحیه گسترده به کار می‌برد. در واقع با رسم گراف شبکه و زمان رسیدن موج به اندازه‌گیرها که تنها بر روی پایانه‌های متصل به کانورترهای DC نصب شده است به مکان‌یابی خطا می‌پردازد. مرجع [۲۰] اساسی مشابه با مرجع [۱۹] دارد، با این تفاوت که به جای به کارگیری قواعد ریاضی گراف، با استفاده از یک الگوریتم تکراری تعداد احتمالات مکان وقوع خطا را کاهش می‌دهد. مرجع [۲۱] نیز اساسی مشابه با دو مرجع قبل دارد با این تفاوت که خط دارای خطا را با محاسبه‌ی شاخصی با عنوان زمان وقوع خطا (FOT<sup>۲</sup>) برای کوتاه‌ترین مسیرها بین دو ابزار اندازه‌گیری و انتخاب کوچکترین FOT، شناسایی می‌کند. علاوه بر چالش‌های روش امواج سیار، محدودیت دیگری برای روش ارائه شده در مراجع فوق وجود دارد. اگر طول خطی که خطا روی آن رخ داده است بزرگتر از طول سایر مسیرها بین دو پایانه این خط باشد، به کار بردن زمان اولین موجی که به ابزار اندازه‌گیر برسد باعث می‌شود برخی از خطاها به درستی مکان‌یابی نشوند. در واقع طول زیاد این خط باعث ایجاد ناحیه‌ی کور می‌شود [۲۲].

از آنجا که مکان‌یابی دقیق و سریع خطا در سیستم‌های چندپایانه فشار قوی جریان مستقیم، می‌تواند به بازیابی سریعتر سیستم پس از رخداد خطا کمک کند، در این مقاله، روشی مبتنی بر معادلات حاکم بر خط به منظور مکان‌یابی خطای ناحیه گسترده در خطوط چندپایانه فشار قوی جریان مستقیم ارائه شده است. ابزار اندازه‌گیری تنها بر روی پایانه‌ها نصب شده‌اند و گره‌های DC فاقد این ابزارند. روش پیشنهادی ابتدا قطب خطدار و سپس خط دارای خطا را شناسایی می‌کند و در نهایت مکان

### ۳- تحلیل پاسخ معادلات تخمین مکان خط

همانطور که بیان شد، از برابری ولتاژهای  $e_{x,k}(t)$  و  $e_{x,m}(t)$  می‌توان مکان خط را بر هر یک از داده‌های زمانی یا حتی پنجره‌ای از اطلاعات (رابطه (۱۱)) محاسبه کرد. از آنجا که معادلات فوق با شرط وقوع خط در مکان  $x$  نوشته شده‌اند، کاربرد این معادلات با استفاده از داده‌های یک خط سالم پاسخ درستی در اختیار نمی‌گذارد.

به منظور مقایسه‌ی پاسخ‌های حاصل از حل معادله (۱۱) به هنگام استفاده از اطلاعات یک خط سالم با مقادیر متناظر به هنگام استفاده از اطلاعات یک خط خطادار، از شیوه‌ی پنجره‌ی متحرک برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی استفاده می‌شود. بدین صورت که ابتدا پنجره‌ای از اطلاعات با تعداد  $N_W$  انتخاب می‌شود و به کمک معادله (۱۱) مکان خط محاسبه می‌گردد. حال پنجره‌ی اطلاعاتی بعدی با طول برابر با پنجره‌ی قبل و با جابجایی این پنجره به اندازه یک یا چند نمونه جهت حذف قدیمی‌ترین داده از نظر زمانی و اضافه نمودن داده یا داده‌های جدید مدنظر قرار می‌گیرد. در نهایت برای هر پنجره اطلاعاتی یک پاسخ برای مکان خط ( $x$ ) محاسبه می‌شود. بر این اساس مجموعه‌ای از پاسخ‌ها ( $SOA^1$ ) حاصل می‌گردد. برای مثال فرض می‌شود وسط یک خط ۲۰ کیلومتری خطا رخ دهد. معادله (۱۱) با استفاده از ۱۰ میلی‌ثانیه اطلاعات ولتاژ و جریان (معادل ۵۰۰۱ نمونه) پس از خطا و هر بار برای پنجره‌هایی به طول ۰/۱ میلی‌ثانیه (معادل ۵۰ نمونه) با همپوشانی ۲۵ درصدی با پنجره قبلی حل شده است. شکل (۲-الف) پاسخ‌های قابل قبول معادله (۱۱) را با استفاده از اطلاعات دو طرف این خط که از کوچک به بزرگ مرتب شده‌اند، نشان می‌دهد. مطابق با این شکل در صورت وقوع خطا، عمده پاسخ‌های حاصل از معادله (۱۱) در اطراف محل خطا (پاسخ مدنظر) متمرکز است. شکل (۲-ب) پاسخ معادله (۱۱) را با استفاده از اطلاعات دو طرف همین خط زمانی که خطایی رخ نداده است، را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بر خلاف حالت قبل در یک خط سالم به این دلیل که تنها پاسخ‌های مثبت و کوچکتر از طول خط مورد قبول هستند، مجموعه پاسخ شامل پاسخ‌هایی نادرست و پراکنده بین صفر تا طول خط است. بنابراین به منظور شناسایی خط خطادار می‌توان از ایده تمرکز پاسخ‌های SOA بهره برد.

### ۳-۱- بررسی و شناسایی تمرکز در SOA اطراف مقدار مشخص

همانطور که بیان شد در این مقاله، از ایده تمرکز مجموعه پاسخ‌ها اطراف مقداری مشخص به منظور دستیابی به پاسخ نهایی معادله (۱۱) استفاده شده است. بنابراین گام‌های زیر با هدف بررسی تمرکز مجموعه پاسخ اطراف مقدار مشخص پیشنهاد می‌گردد:

- ۱- مجموعه پاسخ از کوچک به بزرگ مرتب شود.
- ۲- به منظور حذف پاسخ‌های پرت، ۱۵ درصد پاسخ‌های بالا و پایین این مجموعه حذف گردد.

$$i_{k,m}(t) = (Z'[e_m(t+\tau) - Z\hat{i}_{m,k}(t+\tau)] - Z''[e_m(t-\tau) + Z\hat{i}_{m,k}(t-\tau)] - \frac{R}{4}[2e_m(t) - \frac{R}{2}i_{m,k}(t)]) / 2Z^2 \quad (5)$$

$$e_k(t) = (Z'^2[e_m(t+\tau) - Z\hat{i}_{m,k}(t+\tau)] + Z''[e_m(t-\tau) + Z\hat{i}_{m,k}(t-\tau)] - \frac{R^2}{8}e_m(t) - \frac{R}{2}ZZ'\hat{i}_{m,k}(t)) / 2Z^2 \quad (6)$$

### ۲-۱- تخمین مکان خط با استفاده از معادلات خط

اگر در فاصله‌ی  $x$  کیلومتری از پایانه  $m$  خطایی رخ دهد، ولتاژ محل خطا را می‌توان به صورت تابعی از ولتاژ و جریان پایانه  $m$  بیان کرد [۲۴]. بدین ترتیب ولتاژ محل خطا به صورت (۷) محاسبه می‌شود.

$$e_{x,m}(t) = (Z_{x,m}'[e_m(t+\tau_{x,m}) - Z_{x,m}'i_{m,k}(t+\tau_{x,m})] + Z_{x,m}''[e_m(t-\tau_{x,m}) + Z_{x,m}''i_{m,k}(t+\tau_{x,m})] - \frac{R_{x,m}^2}{8}e_m(t) - \frac{R_{x,m}}{2}Z_{x,m}'Z_{x,m}''i_{m,k}(t)) / 2Z^2 \quad (7)$$

به طور مشابه ولتاژ محل خطا را می‌توان به صورت تابعی از ولتاژ و جریان پایانه  $k$  به صورت زیر بیان کرد:

$$e_{x,k}(t) = (Z_{x,k}'[e_k(t+\tau_{x,k}) - Z_{x,k}'i_{k,m}(t+\tau_{x,k})] + Z_{x,k}''[e_k(t-\tau_{x,k}) + Z_{x,k}''i_{k,m}(t+\tau_{x,k})] - \frac{R_{x,k}^2}{8}e_k(t) - \frac{R_{x,k}}{2}Z_{x,k}'Z_{x,k}''i_{k,m}(t)) / 2Z^2 \quad (8)$$

در این روابط  $R_{x,k}$  و  $R_{x,m}$  به ترتیب مقاومت خط از پایانه  $m$  و پایانه  $k$  تا محل خطا می‌باشد. همچنین داریم:

$$Z_{x,k}' = Z + \frac{R_{x,k}}{4} \text{ و } Z_{x,m}' = Z + \frac{R_{x,m}}{4} \quad (9)$$

$$Z_{x,k}'' = Z - \frac{R_{x,k}}{4} \text{ و } Z_{x,m}'' = Z - \frac{R_{x,m}}{4} \quad (10)$$

ابتدا همه‌ی معادلات فوق که در حوزه‌ی زمان نوشته شده‌اند، به صورت گسسته بازنویسی می‌شوند. روابط (۷) و (۸) معادلاتی غیرخطی بر حسب  $x$  هستند. متغیر  $x$  در  $\tau_{x,k}$ ،  $\tau_{x,m}$ ،  $R_{x,k}$  و  $R_{x,m}$  موجود است. از آنجا که ولتاژهای  $e_{x,m}(t)$  و  $e_{x,k}(t)$  ولتاژ یک نقطه هستند که از دو مسیر مختلف محاسبه شده‌اند، به منظور محاسبه‌ی مقدار  $x$  کفایت تفاضل این دو مقدار حداقل گردد. بنابراین با حل رابطه‌ی (۱۱) می‌توان مکان خطا ( $x$ ) را تخمین زد.

$$Min_x J = Min_x \sum_{h=1}^{N_W} (e_{x,k}(h) - e_{x,m}(h))^2 \quad (11)$$

در این رابطه  $h$  و  $N_W$  به ترتیب شماره نمونه و تعداد نمونه‌ها در پنجره اطلاعاتی مورد استفاده می‌باشند. باید توجه کرد پاسخی از این معادله قابل قبول است که در بازه‌ی  $0 \leq x \leq l_{line}$  طول خط (است) قرار گیرد.

• حال باید مطمئن شد که بازه‌ی نهایی تنها شامل بازه با بیشترین عضو و بازه‌های نزدیک به آن است. بنابراین اگر انحراف معیار پریونیت (مقدار انحراف معیار تقسیم بر طول خط) بازه‌ی نهایی از  $0/0001$  طول خط کمتر بود، مجموعه پاسخ متمرکز و در غیر این صورت غیر متمرکز است.

پس از شناسایی تمرکز در مجموعه پاسخ، میانگین پاسخ‌های متمرکز به عنوان پاسخ نهایی معادله (۱۱) در نظر گرفته می‌شود. شکل (۳) الگوریتم بررسی تمرکز پاسخ اطراف مقداری مشخص را نشان می‌دهد.

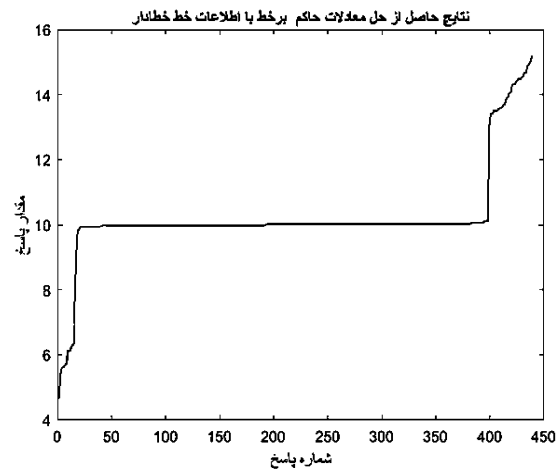
### ۳-۲- تحلیل تمرکز SOA و شناسایی خط خطادار

همچنان‌که اشاره شد به منظور شناسایی خطی که خطا روی آن رخ داده است، از مجموعه پاسخ‌های بدست آمده (SOA) ناشی از حل معادله تخمین مکان خطا (معادله (۱۱)) استفاده می‌شود. در واقع به هنگام بروز خطا، خط خطادار به صورت دو خط با مدل گسترده با طول‌های  $x$  و  $l$  مدل می‌شود که  $x$  مکان وقوع خطا است و معادلات مطرح شده در بخش ۱-۲ مکان نقطه‌ایی از شبکه را در اختیار می‌گذارد که محل تقاطع دو بخش خط با مدل پارامترهای گسترده باشد. از این ایده می‌توان به منظور شناسایی خط دارای خطا استفاده کرد. بدین منظور حالات زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

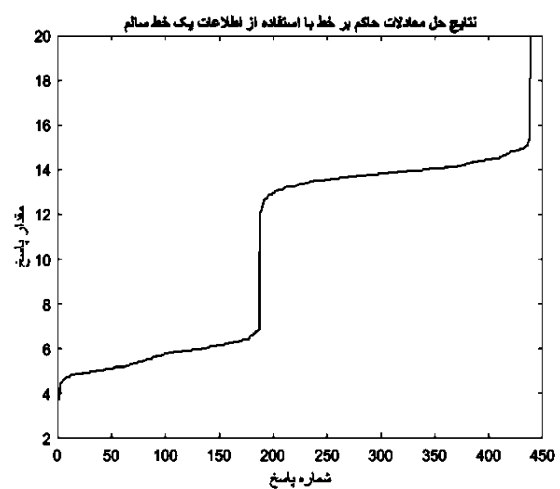
**الف) شناسایی دو خط سالم متصل به هم با فرض عدم در اختیار بودن اطلاعات پایانه وسط به کمک حل معادلات تخمین مکان خطا**

مطابق با شکل (۴-الف) حل معادله (۱۱) به وسیله‌ی اطلاعات پایانه‌های A و B، مجموعه پاسخی در اختیار می‌گذارد که بیش از ۵۰ درصد پاسخ‌های آن اطراف محل تلاقی دو خط AC و BC یعنی مکان پایانه C متمرکز است. زیرا مکان پایانه C محل اتصال دو بخش خط با مدل پارامترهای گسترده است که از یک طرف به پایانه‌های خط اصلی و از طرف دیگر به یکدیگر متصل‌اند. در حالی که SOA ناشی از حل معادله (۱۱) با استفاده از داده‌های پایانه A و پایانه B در شکل (۴-ب) هیچ‌گونه تمرکزی اطراف مقداری مشخص ندارد و پاسخ‌ها بین صفر تا طول خط مدنظر پراکنده شده‌اند. بنابراین اگر در SOA دو خط متصل به هم تمرکز پاسخ اطراف محل تلاقی خطوط مشاهده شد، هر دو خط سالم است. در غیر این صورت در یکی از بخش‌های خط خطا رخ داده است.

**ب) شناسایی خط خطادار متصل به خط سالم با کمک حل معادلات تخمین مکان خطا**



(الف)

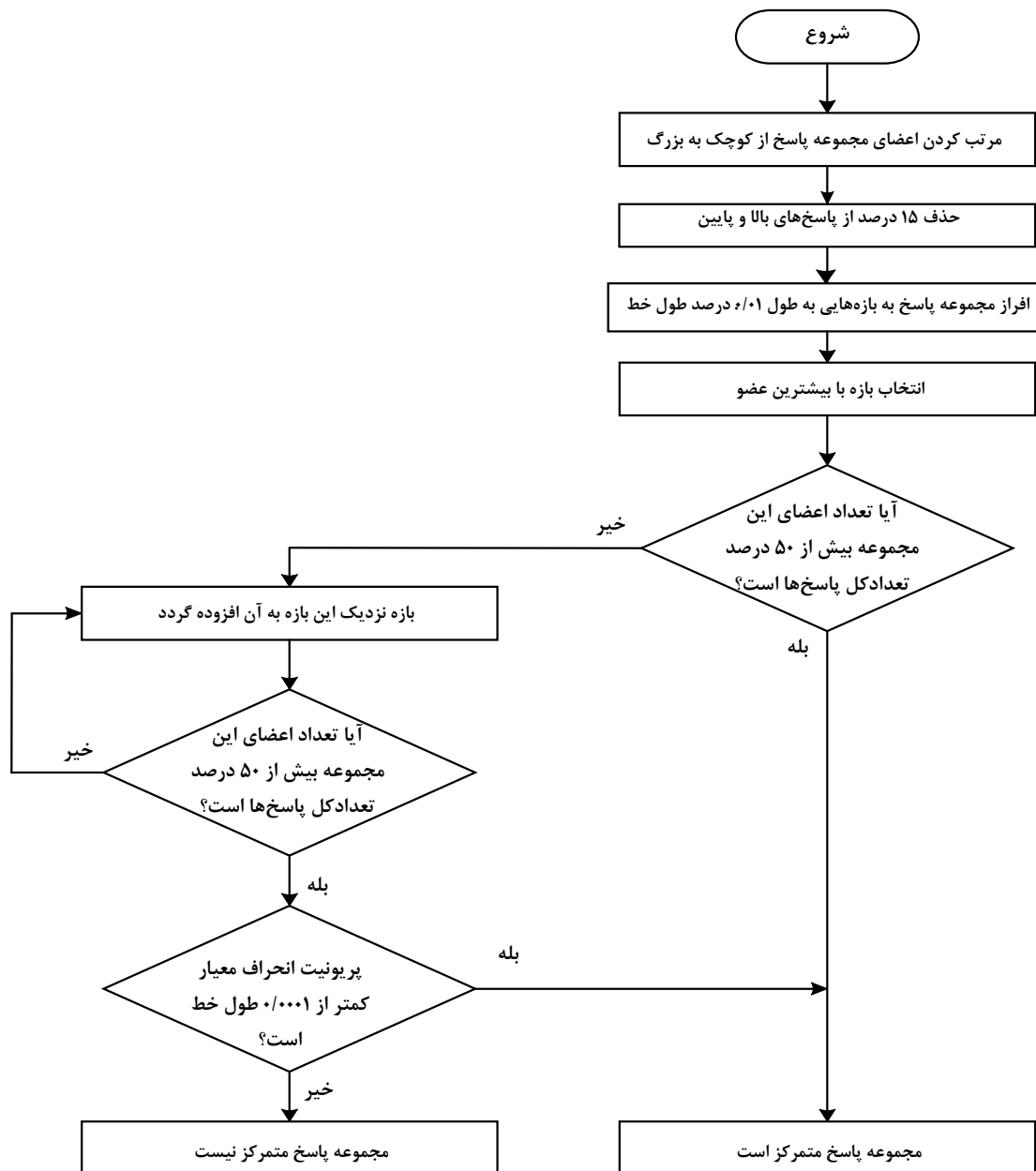


(ب)

شکل (۲): حل معادله (۱۱) با استفاده از اطلاعات یک خط HVDC الف) خطا در وسط خط ب) بدون وقوع خطا

۳- مجموعه پاسخ باقی مانده به بازه‌های کوچکی از طول خط (مثلاً  $0/01$  درصد طول خط) تقسیم شود. هر یک از این بازه‌های زیر، که تعداد عضو بیشتری داشت انتخاب شود:

- اگر تعداد اعضای بازه با بیشترین تعداد عضو، از ۵۰ درصد تعداد اعضای مجموعه پاسخ بیشتر باشد، مجموعه پاسخ متمرکز است.
- در غیر این صورت، چون طول بازه‌ها کوچک انتخاب شده است ممکن است بازه‌های نزدیک به بازه با بیشترین عضو نیز میزان قابل توجهی از پاسخ‌ها را در برگیرد. به منظور در نظر گرفتن این بازه‌ها، بازه با بیشترین عضو را انتخاب کرده و تا زمانی که تعداد اعضای مجموعه به بیش از ۵۰ درصد تعداد کل پاسخ‌ها برسد، بازه مورد مطالعه را گسترش می‌دهیم.



شکل (۳): الگوریتم بررسی و شناسایی تمرکز اطراف مقداری مشخص

- ۱- شناسایی قطب خطادار
- ۲- تخمین داده های ناموجود
- ۳- شناسایی خط خطادار و نهایتا
- ۴- تخمین مکان خطا در خط خطادار.

همانطور که بیان شد اساس مرحله ۳ بر مبنای مجموعه پاسخ بدست آمده با استفاده از معادله‌ی تخمین مکان خطا است. بنابراین پس از بیان روش پیشنهادی به منظور تشخیص قطب خطادار، روشی متشکل از دو فرآیند برون خط و بر خط برای شناسایی خط خطادار در یک شبکه‌ی MTDC مطرح می‌گردد.

مطابق با شکل (۴-ب) حل معادله (۱۱) به وسیله‌ی اطلاعات پایانه‌های C و B، مجموعه پاسخی در اختیار می‌گذارد که بیش از ۵۰ درصد اعضای آن اطراف مقدار مکان خطا متمرکز است. در حالی که SOA ناشی از حل معادله با استفاده از داده‌های پایانه‌های A و C هیچ‌گونه تمرکزی اطراف مقداری مشخص ندارد و پاسخ‌ها بین صفر تا طول خط AB پراکنده شده‌اند. بنابراین اگر در SOA یک خط، تمرکزی مشاهده شد، این خط خطادار است.

#### ۴- روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا

روش پیشنهادی به منظور مکان‌یابی حالت گسترده خطا در یک شبکه MTDC دو قطبی، شامل چهار مرحله زیر است:

الگوریتم مکان‌یابی خطا که در ادامه معرفی شده است به گونه ای عمل می‌کند که اگر قطب خطا دار شناسایی نشود و داده‌های قطب سالم به عنوان ورودی در نظر گرفته شود نیز به درستی پی به سالم بودن این قطب می‌برد. اما به منظور کاهش تعداد مواردی که لازم است مورد بررسی قرار گیرد، بهتر است قبل از شروع مکان‌یابی خطا، قطب خطادار شناسایی گردد تا داده‌های قطب دیگر مورد بررسی قرار نگیرد.

#### ۴-۲- شناسایی خطوط سالم و خط خطادار شبکه

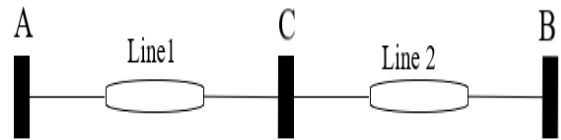
پیچیدگی شبکه‌ی MTDC و عدم وجود ابزار اندازه‌گیری بر روی گره‌های DC منجر به لزوم معرفی روشی گام به گام به منظور شناسایی خط خطادار شده است. از آنجا که محل نصب ابزارهای اندازه‌گیری به ساختار شبکه وابسته است، روش معرفی شده دارای دو مرحله برون خط و برخط است.

مفهومی تحت عنوان خط فرضی به منظور شناسایی خط خطادار معرفی می‌شود. بدین صورت که خط فرضی خطی است که از دو خط اصلی از شبکه تشکیل شده که از یک سمت به یک گره DC مشترک و از سمت دیگر به باس‌هایی که اطلاعات آنها در دسترس‌اند، متصل شده‌اند. برای مثال در شکل (۴-الف) اگر فرض شود C یک گره DC و A و B پایانه باشند، خط AB یک خط فرضی است.

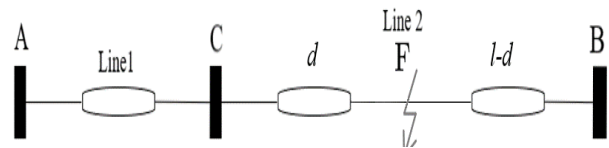
#### الف) مرحله برون خط

هدف اصلی این مرحله دسته‌بندی خطوط شبکه با توجه به ساختار آن و ارائه الگوریتم تشخیص سالم یا خطادار بودن خط متناسب با هر دسته است. در واقع الگوریتم‌های ارائه شده در این مرحله کفایت یکبار و برای همیشه (تا قبل از تغییر ساختار شبکه) انجام شود و نیاز به تکرار آن پس از وقوع هر خطا نیست. با توجه به بخش ۳-۲، با استفاده از اطلاعات خط فرضی AB و حل معادله (۱۱) می‌توان به سالم یا خطادار بودن این خط و به طور مشابه هر خط فرضی در یک شبکه پی برد. خط اصلی خطادار تنها با استفاده از یک خط فرضی شناسایی نمی‌شود. بنابراین خطوط فرضی که حداقل در یک خط اصلی مشترک‌اند در یک مجموعه قرار می‌گیرند. در هر مجموعه اعضای که هر دو خط اصلی تشکیل دهنده‌ی آن در خطوط فرضی دیگر مشترک است، حذف می‌شوند. هر یک از مجموعه‌های فوق  $\phi_h$  نامیده می‌شود که یکی از حالات زیر پیش می‌آید:

- تعداد اعضای مجموعه  $\phi_h$  حداقل ۲ عضو باشد: در این صورت اگر حداقل یکی از خطوط فرضی عضو این مجموعه خطادار باشد، خط اصلی مشترک بین تمام خطوط فرضی خطادار، خط خطادار است.
- مجموعه  $\phi_h$  تک عضوی باشد: اگر تنها عضو این مجموعه خطادار باشد یعنی تمامی خطوط اصلی شبکه جز دو خط اصلی تشکیل دهنده‌ی این مجموعه سالم‌اند. بدین ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶) می‌توان اطلاعات برخی از گره‌های DC از شبکه را تخمین زد. حال می‌توان خط فرضی دیگری



(الف)



(ب)

شکل (۴): دو خط متصل به هم الف) اتصال دو خط سالم به هم ب) اتصال یک خط خطادار به خط سالم

#### ۴-۱- شناسایی قطب خطادار

از آنجا که اکثر ساختارهای HVDC و MTDC دو قطبی هستند، در ادامه الگوریتمی گام به گام به منظور شناسایی قطب خطادار به شرح زیر ارائه شده است:

- ۱) وقوع خطا باعث بروز تغییرات در ولتاژ می‌شود به گونه‌ای که برای قطبی که خطا روی آن رخ داده است افت ولتاژ و برای قطب دیگر افزایش ولتاژ دیده می‌شود [۲۵]. تغییرات ولتاژ، به صورت تفاضل میانگین ۱۰ میلی‌ثانیه داده‌های ولتاژ بلافاصله پس از خطا از میانگین داده‌های ولتاژ قبل از خطا تعریف می‌گردد.
- ۲) انتخاب آستانه برای تغییرات ولتاژ به منظور تفکیک قطب خطادار از قطب سالم ممکن است باعث شود شرایطی خاص مانند رخداد خطا با مقاومت بالا به درستی شناسایی نگردد. بنابراین از تمامی ابزار اندازه‌گیری متصل به هر دو قطب تمامی کانورترها، آنکه بیشترین تغییرات ولتاژ ( $MCV^{(1)}$ ) را دارد انتخاب می‌شود. در صورتی که علامت  $MCV$  مثبت باشد، آن قطب سالم و چنانچه برای قطبی این علامت منفی شود، احتمال وقوع خطا در آن قطب وجود دارد.
- ۳) ممکن است خطای اندازه‌گیری و محاسباتی، منجر به منفی شدن علامت  $MCV$  گردد و چون آستانه‌ای برای این شاخص انتخاب نشده است، باید مراحل زیر بررسی شود.
  - وجود خطا باعث افزایش جریان در نتیجه بروز پیک مثبت در مشتق جریان می‌شود [۲۵]. بدین ترتیب اگر منفی شدن علامت  $MCV$  به همراه بروز پیک مثبت در جریان همان کانورتر یا باس بود، خطا رخ داده است.
  - در شرایطی که  $MCV$  برای هر دو ابزار اندازه‌گیر متصل به قطب‌های یک کانورتر منفی بود، اگر پیک مشتق جریان هر دو قطب در یک زمان رخ دهد، خطای رخ داده دو قطب و در غیر این صورت در قطبی رخ داده است که مقدار  $MVC$  آن بیشتر باشد.

که با خط فرضی اولیه در یک خط مشترک است تشکیل داد. در این صورت مجموعه  $\Phi_h$  دو عضوی می‌شود و مشابه با حالت قبل می‌توان خط خطادار را شناسایی کرد. خط فرضی دوم را می‌توان به صورت برون خط با توجه با ساختار شبکه از پیش تعیین کرد. خط فرضی دوم، خط فرضی پشتیبان ( $\Phi_{hb\_l}$ ) نامیده می‌شود.

- ممکن است در یک شبکه داده‌های هر دو سمت خط در دسترس نباشد، اینگونه خطوط و خطوطی از شبکه که تنها به این خطوط متصل‌اند مطابق با تعریف خطوط فرضی، در دسته‌بندی‌های اولیه خطوط فرضی قرار نمی‌گیرد. بنابراین اگر تمامی مجموعه‌های  $\Phi_h$  سالم باشند می‌توان با استفاده داده‌های خطوط عضو  $\Phi_h$  اطلاعات برخی از گره‌های DC را محاسبه کرد. سپس می‌توان مجموعه‌ی جدیدی از خطوط فرضی را تشکیل داد که خطوطی که از هر دو سمت به گره‌های DC متصل‌اند، عضو آن باشد. به این مجموعه خطوط فرضی جدید، مجموعه پشتیبان ( $\Phi_{hb\_s}$ ) می‌گویند.

### ب) مرحله بر خط

مرحله‌ی برخط با دریافت اطلاعات خط و بهره‌گیری از نتایج مرحله‌ی برون خط مکان خط را تخمین می‌زند. در این مرحله گام‌های زیر باید طی شود:

- ابتدا خطوطی که اطلاعات دو طرف آن موجود است مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادله (۱۱) با استفاده از اطلاعات پایانه‌های خط مدنظر حل می‌شود. اگر تمرکزی در SOA مشاهده شد، خط خطادار شناسایی شده و الگوریتم پایان می‌یابد. در غیر این صورت خطوط فرضی بررسی می‌شود.
- الگوریتم مکان‌یابی خط برای مجموعه‌های  $\Phi_h$  با شروع از مجموعه با تعداد اعضای کمتر اجرا می‌شود. در صورتی که SOA برای یک خط فرضی اطراف محل اتصال دو خط اصلی تشکیل‌دهنده‌ی آن متمرکز باشد، خط فرضی مربوطه سالم و در غیر این صورت خطادار است. اگر خط خطادار در یکی از مجموعه‌های  $\Phi_h$  مشخص شد، الگوریتم متوقف شده و سایر مجموعه‌ها بررسی نمی‌گردد.
- به هنگام اجرای الگوریتم مکان‌یابی خط برای مجموعه‌های  $\Phi_h$  یکی از حالات زیر ممکن است رخ دهد:

**ب-۱) خط در یکی از مجموعه خط‌های فرضی با بیش از یک عضو رخ داده باشد:** اگر تعداد خطوط فرضی مجموعه  $N$  ( $N > 1$ ) باشد و  $K$  تعداد از این خطوط سالم نباشند، خط اصلی مشترک بین تمامی این  $K$  خط فرضی، خطادار است. در صورتی که تنها یکی از اعضای مجموعه خطوط فرضی سالم نباشد، خطا در خطی رخ داده است که عضو هیچ از خطوط فرضی دیگر نباشد.

**ب-۲) خطا در مجموعه خطوط فرضی تک عضوی رخ دهد:** در این حالت اطلاعات گره‌های DC که عضوی از خط فرضی مدنظر نباشد، با استفاده از روابط (۵) و (۶) و قوانین مداری از اطلاعات خطوطی که از سالم بودن آن‌ها اطمینان حاصل شده است، بدست می‌آید. سپس الگوریتم مکان‌یابی خط برای خط فرضی پشتیبان این مجموعه تک عضوی اجرا می‌شود. اگر این خط پشتیبان نیز خطادار باشد، خط اصلی مشترک بین این دو خط فرضی خطادار است در غیر این صورت بخش دیگر خطادار است.

**ب-۳) تمامی اعضای مجموعه‌ها  $\Phi_h$  سالم باشند:** در این حالت اطلاعات گره‌های DC شبکه که در خطوط فرضی  $\Phi_h$  موجود بودند با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌گردد. حال خطوط فرض مجموعه  $\Phi_{hb\_l}$  مورد بررسی قرار می‌گیرند که یکی از دو حالت ب-۱ یا ب-۲ پیش می‌آید.

### ۴-۳- تخمین مکان خطا در خط خطادار

پس از شناسایی خط خطادار و اطمینان از سالم بودن سایر خطوط، داده‌های پایانه‌هایی از خط که اطلاعاتش موجود نیست، محاسبه می‌گردد. سپس معادله‌ی (۱۱) برای خط خطادار حل می‌شود. مطابق بخش ۳ زیر مجموعه‌ی متمرکزی از SOA بدست می‌آید. میانگین پاسخ‌های این زیرمجموعه، مکان خطا است.

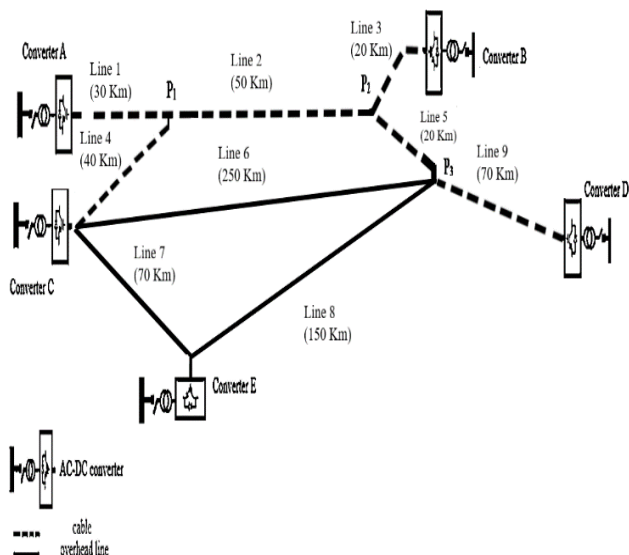
### ۵- ارزیابی روش پیشنهادی

به منظور بررسی صحت و دقت روش پیشنهادی، از شبکه معرفی شده در شکل (۵) که اصلاح شده‌ی شبکه‌ی مورد مطالعه مرجع [۱۹] است، استفاده شده است. شبکه مورد مطالعه دو قطب و شامل ترکیبی از خطوط کابلی و هوایی در سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت DC است. همچنان‌که در این شکل دیده می‌شود این شبکه دارای ۵ باس متصل به اینورتر و سه گره DC با نام‌های  $P_1$ ،  $P_2$  و  $P_3$  است که اطلاعات این گره‌ها در دسترس نیست. به علاوه طول بعضی از خطوط نسبت به دیگر خطوط بسیار بلند در نظر گرفته شده که بتوان وجود و یا عدم وجود ناحیه‌ی کور (که در روش امواج سیار منجر به عدم شناسایی خط خطادار می‌گردد) را مورد بررسی قرار داد. اطلاعات شبکه مورد مطالعه (شکل (۵)) بر مبنای شبکه CIGRE B4 (DCS3) می‌باشد [۲۶].

شبکه مورد مطالعه در محیط SIMULINK از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. فرکانس نمونه‌برداری ۵۰۰ کیلوهرتز و پنجره اطلاعاتی ۱۰ میلی‌ثانیه پس از خطا و ۲ میلی‌ثانیه قبل از خطا انتخاب شده است. از آنجا که روش معرفی شده از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است، در ادامه نیز شناسایی قطب، خط خطادار و تخمین مکان خطا جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است.



## ۵-۱- ارزیابی روش پیشنهادی به منظور شناسایی قطب خطادار



شکل (۵): شبکه مورد مطالعه

بررسی قرار می‌گیرد که از سالم بودن خطوط تشکیل‌دهنده  $AP_1C$  و  $\{DP_3E, CP_3D\}$  (خطوط با شماره‌های ۱، ۴، ۶، ۸ و ۹) اطمینان حاصل گردیده است. پس می‌توان اطلاعات گره‌های  $P_1$  و  $P_3$  را محاسبه کرد. بدین ترتیب  $BP_3$  و  $P_1P_3$  مجموعه پشتیبان‌اند که در خط شماره ۲ با یکدیگر مشترک‌اند.

پس از مشخص کردن خطوط فرضی، خطوط فرضی پشتیبان و مجموعه پشتیبان به صورت برون خط می‌توان به هنگام بروز خط، خط دارای خطا را به صورت گام به گام و برخط شناسایی کرد. به منظور شناسایی خط خطادار ابتدا خطوطی که داده‌های دو طرف آن در دسترس است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبکه مورد مطالعه تنها خط ۷ چنین ویژگی دارد. در صورتی که این خط خطادار باشد، مجموعه پاسخ اطراف مکان خطا متمرکز است پس خط دارای خطا شناسایی شده و باید مکان خطا بر روی آن تخمین زده شود. در غیر این صورت، مجموعه‌های خطوط فرضی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی با مجموعه‌ها با تعداد عضو کمتر ( $AP_1C$ ) شروع می‌شود و در صورت سالم بودن این مجموعه نوبت  $\{DP_3E, CP_3D\}$  است.

اگر خطا در مجموعه  $AP_1C$  شناسایی شود، از سالم بودن تمام خطوط شبکه جز خط ۱ و ۴ اطمینان حاصل می‌شود. بنابراین می‌توان اطلاعات گره  $P_3$  را با استفاده از اطلاعات داده‌های پایانه مقابل این گره بر روی خطوط ۶، ۸ و ۹ تخمین زد. سپس با استفاده از اطلاعات گره  $P_3$  و کانورتور B می‌توان اطلاعات گره  $P_2$  روی خط شماره ۲ را با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه کرد. حال اگر خط پشتیبان خطادار بود، یعنی خطا در خط مشترک بین  $AP_1C$  و  $AP_1P_2$ ، یعنی خط شماره ۱ و در غیر این صورت در خط شماره ۴ رخ داده است.

اگر مجموعه  $AP_1C$  خطادار نبود باید تمام اعضای مجموعه  $\{DP_3E, CP_3D\}$  مورد بررسی قرار گیرد. اگر هر دو خط فرضی خطادار باشند خطا در خط مشترک آن‌ها یعنی خط ۹ رخ داده است. در صورتی

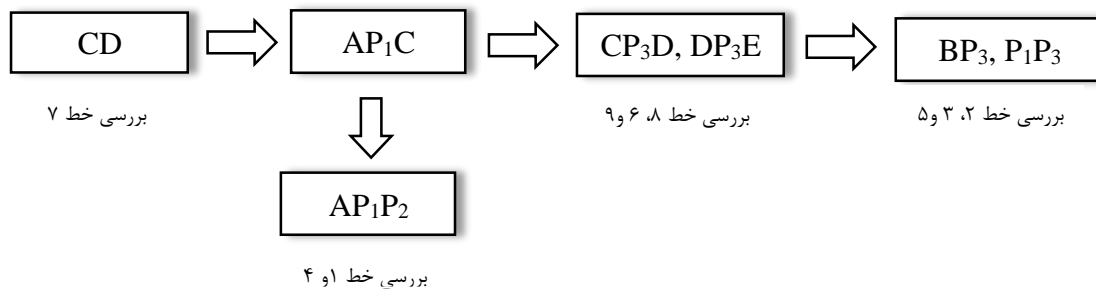
به منظور ارزیابی روش پیشنهادی برای شناسایی قطب خطادار، انواع خطا (تک قطب به زمین و دو قطب به زمین) با مقاومت‌های مختلف خطا در مکان‌های متفاوت در طول خطوط شبکه مورد مطالعه شبیه‌سازی شده است. به عنوان چند نمونه فرض می‌شود

خطای تک قطب به زمین (PG) و خطای دو قطب به زمین (PPG) با مقاومت خطا (مقاومت خطا ۱۵۰ اهم برای خطای تک‌قطب به زمین و مقاومت خطای ۵۰ اهم برای خطای دو قطب به زمین) و بدون مقاومت خطا در دو مکان مختلف از شبکه رخ دهد. جدول (۱) نتایج حاصل از شناسایی قطب خطادار را نشان می‌دهد. مطابق با این جدول به هنگام وقوع خطای تک قطب، تنها قطب خطادار افت ولتاژ را مشاهده می‌کند و مشاهده پیک مثبت جریان نشان‌دهنده وقوع خطا در قطب مربوطه می‌باشد و دیگر نیازی به بررسی زمان وقوع پیک مشتق جریان نیست. به هنگام بروز افت ولتاژ بر روی هر دو قطب، همچنان‌که قبلاً اشاره شد تنها زمانی خطای رخ داده دو قطب شناسایی می‌شود که پیک مشتق جریان برای هر دو قطب در یک زمان رخ دهد. همچنان‌که نتایج ارائه شده نشان می‌دهد تشخیص قطب خطا در تمامی موارد شبیه‌سازی شده به درستی صورت گرفته که صحت عملکرد روش پیشنهادی را تایید می‌نماید.

## ۵-۲- ارزیابی روش پیشنهادی به منظور شناسایی خط خطادار

شبکه مورد مطالعه دارای ۵ کانورتور و ۳ گره DC است. بنابراین لازم است مطابق روش بیان شده در بخش ۴-۲-الف، خطوط فرضی به صورت برون خط با توجه به ساختار شبکه تعیین شوند. مجموعه خطوط فرضی اولیه برای شبکه  $AP_1C$ ،  $CP_3D$  و  $DP_3E$  می‌باشند. از آنجا که دو خط  $CP_3D$  و  $DP_3E$  دارای خط مشترک (خط شماره ۹) هستند، بنابراین مجموعه‌های خطوط فرضی این شبکه به دو زیر مجموعه  $AP_1C$  و  $\{DP_3E, CP_3D\}$  تقسیم می‌شوند. مجموعه  $AP_1C$  تک عضوی است بنابراین نیاز به یک خط پشتیبان دارد. خط فرضی پشتیبان هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که خطا در خطوط اصلی تشکیل‌دهنده  $AP_1C$  رخ داده باشد. پس می‌توان اطلاعات  $P_3$  و  $P_2$  را محاسبه کرد. بدین ترتیب خط  $AP_1P_2$  که با  $AP_1C$  در خط شماره ۱ مشترک هستند، به عنوان خط فرضی پشتیبان در نظر گرفته می‌شود.

خطوط با شماره‌های ۲، ۳ و ۵ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی هیچ‌یک از خطوط فرضی  $AP_1C$  و  $\{DP_3E, CP_3D\}$  نمی‌باشند. زیرا یا هر دو پایانه‌ی خط مد نظر گره DC است (خطوط شماره ۲ و ۵) یا تمامی خطوط متصل به آن اینگونه است (خط شماره ۳). به منظور بررسی این خطوط به مجموعه پشتیبان نیاز است. این مجموعه هنگامی مورد



شکل (۶): مجموعه‌های مورد بررسی شناسایی خط ختادار

اگر  $x_{ij}$  برای خط شماره ۷ مقدار داشت یعنی خطا در این خط رخ داده است و غیر متمرکز بودن آن یعنی خط شماره ۷ سالم می‌باشد. از طرفی اگر  $x_{ij}$  برای خطوط فرضی برابر با محل اتصال دو خط اصلی آن بود، یعنی خطوط تشکیل‌دهنده این خط فرضی سالم هستند و غیر متمرکز بودن آن یعنی خطا در یکی از خطوط تشکیل‌دهنده آن رخ داده است. مطابق با مرجع [۲۲] وجود خطوط با طول زیاد در کنار خطوط کوتاه در شبکه، ممکن است باعث ایجاد ناحیه‌ی کور در شناسایی خط ختادار شود. در حالی که بر اساس نتایج ارایه شده در جدول (۲)، حتی به هنگام بروز خطا در فاصله‌ی ۵ درصدی از  $P_3$  روی خط شماره ۶ (بلندترین خط شبکه با طول ۲۵۰ کیلومتر) با وجود مسیرهای کوتاه‌تر متصل به ابزار اندازه‌گیری، بازهم خط دارای خطا به درستی شناسایی شده است.

که تنها مجموعه پاسخ یکی از خطوط فرضی  $\{DP_3E, CP_3D\}$  متمرکز باشد، خطا در خط غیر مشترک آن خط فرضی رخ داده است. اگر خطا در هیچ یک مجموعه‌های  $AP_1C$  و  $\{DP_3E, CP_3D\}$  رخ نداده بود. از سالم بودن خطوط ۱، ۴، ۶، ۸ و ۹ اطمینان حاصل می‌شود. بنابراین می‌توان اطلاعات گره  $P_3$  را با استفاده از اطلاعات داده‌های پایانه مقابل این گره بر روی خطوط ۶، ۸ و ۹ تخمین زد. از طرفی اطلاعات گره  $P_1$  با استفاده از اطلاعات داده‌های پایانه مقابل این گره بر روی خطوط ۱ و ۴ تخمین زده می‌شود. سپس معادله (۱۱) برای مجموعه پشتیبان  $BP_3$  و  $P_1P_3$  حل می‌گردد. در این صورت یک مجموعه با ۲ عضو مدنظر است که مشابه با بررسی مجموعه  $\{DP_3E, CP_3D\}$  می‌توان خط ختادار را شناسایی کرد.

شکل (۶) روند مرحله برون خط روش پیشنهادی را به‌منظور شناسایی خط ختادار در شبکه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این شکل اگر تمامی اعضا هر مجموعه سالم باشد مسیر افقی و در غیر این صورت مسیر عمودی طی می‌شود.

جدول (۱): نتایج ارزیابی روش پیشنهادی به منظور شناسایی قطب ختادار

شرایط	نوع خطا	MCV قطب مثبت (p.u)	MCV قطب منفی (p.u)	زمان وقوع پیک مثبت مشتق جریان برای قطب مثبت	زمان وقوع پیک مثبت مشتق جریان برای قطب منفی	نتیجه شناسایی قطب ختادار
خطا در فاصله ۷۰ درصدی از گره $P_1$ روی خط شماره ۴ بدون مقاومت	PG قطب منفی	۰/۰۰۷۳	-۰/۲۲۷۴	-	-	خطای قطب منفی
	PPG	-۰/۲۲۳۷	-۰/۲۲۶۷	۰/۰۰۵۶ ثانیه پس از برداشت اطلاعات	۰/۰۰۵۶ ثانیه پس از برداشت اطلاعات	خطای دو قطب
خطا در فاصله ۵ درصدی از کانوتر $C$ روی خط شماره ۴ با مقاومت خطا	PG قطب مثبت	-۰/۰۲۷۵	۰/۰۰۰۷	-	-	خطای قطب مثبت
	PPG	-۰/۵۰۵۱	-۰/۵۰۵۸	۰/۰۰۵۱ ثانیه پس از برداشت اطلاعات	۰/۰۰۵۱ ثانیه پس از برداشت اطلاعات	خطای دو قطب

در جدول (۲) برخی از نتایج بررسی اثر تغییر نوع خطا، مقاومت خطا و مکان خطا بر روی صحت و دقت روش پیشنهادی به منظور شناسایی خط ختادار آورده شده است. در این جدول  $x_{ij}$  به معنای میانگین پاسخ‌های متمرکز بر روی یک خط فرضی بین  $i$  و  $j$  است.

### ۵-۳- ارزیابی روش پیشنهادی به منظور تخمین مکان خطا

پس از شناسایی خط ختادار اطلاعات ولتاژ و جریان طرفین این خط در صورت موجود نبودن از مسیر خطوط سالم اطراف آن محاسبه می‌شود. جدول (۳) بیشینه و میانگین درصد خطای تخمین مکان خطا برای خطای تک قطب و دو قطب به زمین تا فاصله ۱ درصدی از پایانه‌ها

بر اساس نتایج ارایه شده در این جدول، مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی قادر به شناسایی خط ختادار در شرایط متفاوت است. در این جدول نماد  $UC^{12}$  به معنی مجموعه پاسخ غیر متمرکز است. بنابراین

جدول (۲): نتایج شناسایی خط خادار

عامل مورد بررسی	مکان خطا	نوع خطا	مقاومت خطا	تخمین مکان خطا (کیلومتر)	تخمین مکان خطا برای اعضا مجموعه $\emptyset_h$ (کیلومتر)	تخمین مکان خطا برای اعضا مجموعه $\emptyset_{hb}$ یا مجموعه $\emptyset_{hb_s}$ (کیلومتر)	نتیجه
نوع خطا	۲ درصدی کانورتر D روی خط ۹	PPG	۰	UC	$x_{AC} = 29.9873$ $x_{CD} = UC$ $x_{DE} = UC$	-	Line9
				UC	$x_{AC} = 29.9876$ $x_{CD} = UC$ $x_{DE} = UC$	-	Line9
مقاومت خطا	۵۰ درصدی خط ۲	PG	۱۵۰	UC	$x_{AC} = 29.9892$ $x_{CD} = 69.9862$ $x_{DE} = 69.9857$	$x_{BP_3} = 19.9830$ $x_{P_1P_3} = UC$	Line2
				UC	$x_{AC} = 29.9796$ $x_{CD} = 69.9875$ $x_{DE} = 69.9848$	$x_{BP_3} = 19.9805$ $x_{P_1P_3} = UC$	Line2
مکان خطا (به صورت تصادفی انتخاب شده است)	۵ درصدی P <sub>3</sub> روی خط ۶ ۱۸ درصدی کانورتر E روی خط ۷ ۲۶ درصدی کانورتر P <sub>1</sub> روی خط ۴	PG	۱۵۰	UC	$x_{AC} = 29.9864$ $x_{CD} = UC$ $x_{DE} = 69.9858$	-	Line6
				$x_{CE} = 12.5959$	-	-	Line7
				UC	$x_{AC} = UC$	-	Line4

با مقاومت خطای متفاوت (حداکثر ۱۵۰ اهم برای خطای تک قطب و ۵۰ اهم برای خطای دو قطب) را نمایش می‌دهد.

جدول (۳): نتایج تخمین مکان خطا در شرایط مختلف

نوع خطا	مقاومت خطا	تعداد موارد آزمایش	میانگین درصد خطای تخمین مکان خطا	بیشینه درصد خطای تخمین مکان خطا
تک قطب	۰	۱۵۰	۰/۰۸۰۶	۰/۱۷۰۴
دو قطب	۱۵۰	۱۵۰	۰/۲۸۰۶	۰/۳۵۱۱
دو قطب	۵۰	۱۵۰	۰/۰۵۰۷	۰/۱۷۰۳
			۰/۰۴۵۹	۰/۲۴۸۸۰

### ۵-۳-۱- اثر مقاومت خطا بر دقت روش پیشنهادی

همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، دقت روش پیشنهادی با تغییر مقدار مقاومت خطا، تغییر می‌کند، اما همچنان دقت مکان‌یابی خطا بالا است. به منظور بررسی بیشتر جدول (۴) درصد تخمین مکان خطا با تغییر مقاومت از حالت بدون مقاومت تا مقاومت خطای ۵۰۰ اهم را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که دلیل استفاده از داده‌های هر دو سمت خط مقاومت خطا تاثیر بسیار کمی بر دقت روش پیشنهادی دارد.

### ۵-۳-۲- اثر فرکانس نمونه برداری بر دقت روش پیشنهادی

ارزیابی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با کاهش فرکانس نمونه‌برداری تمرکز پاسخ‌ها اطراف مقداری مشخص کمتر می‌شود. از آنجا که روش پیشنهادی بر اساس تمرکز داده‌ها حول مقداری مشخص عمل می‌کند، برای دستیابی به دقت قابل قبول در روش پیشنهادی، لازم است فرکانس فرکانس نمونه‌برداری به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود.

در ارزیابی‌های انجام شده، رخداد خطا در خطوط مختلف و در فواصل متفاوت از پایانه‌های خطوط، در نظر قرار گرفته است. یعنی برای هر نوع خطا با مقاومت خطای مشخص، ۱۵۰ مکان مختلف در خطوط متفاوت بررسی شده است. خطای تخمین مکان خطا به صورت تفاضل مقدار حقیقی و تخمین زده شده تقسیم بر طول خط تعریف شده است.

جدول (۵) نتایج حاصل از مکان‌یابی خطا با تغییر فرکانس نمونه‌برداری از ۱۲۵ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز برای وقوع خطا در شرایط مختلف را نشان می‌دهد.

براساس نتایج ارائه شده، مشاهده می‌گردد که هرچه فرکانس نمونه‌برداری بیشتر باشد، دقت روش پیشنهادی در هر نمونه خطا (سایر

جدول (۴): بررسی اثر مقاومت خطا بر دقت روش پیشنهادی

شرایط خطا	مقاومت خطا ( $\Omega$ )	درصد خطای تخمین مکان خطا
خطای تک قطب وسط خط ۷ (داده‌های هر دو سمت خط موجود است)	۰	۰/۰۲
	۵۰	۰/۰۲۳۷
	۱۵۰	۰/۰۳۵
خطای تک قطب در ۱ درصدی انتهای خط ۸ (تنها داده‌های یک سمت خط موجود است)	۰	۰/۱۷۵۲
	۵۰	۰/۰۱۶۲
	۱۵۰	۰/۰۸۷۲
خطای دو قطب در ۵ درصدی خط ۲ (داده‌های هر دو سمت خط موجود نیست)	۰	۰/۰۶۱۶
	۵۰	۰/۰۲۰۱
	۱۵۰	۰/۰۳۴۸
	۵۰۰	۰/۰۳۵

شرایط در آن ثابت است) نیز افزایش می‌یابد. تفاوت حاصل بین خطاهای مختلف در یک فرکانس نمونه‌برداری ناشی از تغییر در نوع خطا است. البته باید توجه داشت که با کاهش فرکانس نمونه‌برداری تا ۱۲۵ کیلوهرتز، درصد خطای تخمین مکان خطا زیر یک درصد باقی می‌ماند که مقدار قابل قبولی است.

### ۵-۳-۳- بررسی اثر زمان برداشت اطلاعات بر دقت روش پیشنهادی

وقوع خطا با افزایش ناگهانی جریان و کاهش ناگهانی ولتاژ قابل شناسایی است. اما شناسایی دقیق لحظه‌ی وقوع خطا مشکلاتی را در بر دارد. همانطور که یافتن زمان رسیدن موج برگشت به پایانه‌ها مشکل است، که البته بعضی از مقالات با ابزاری چون تبدیل موجک لحظه‌ی وقوع خطا را به دقت شناسایی می‌کنند [۲۷].

بررسی‌های متعدد صورت گرفته در این تحقیق، نشان می‌دهد در روش پیشنهادی اگر زمان برداشت اطلاعات از لحظه بروز خطا نباشد، مشکلی پیش نمی‌آید. بنابراین نیازی نیست که توسط الگوریتمی بطور دقیق زمان وقوع خطا را شناسایی کرد. جدول (۶) اثر تغییر زمان برداشت اطلاعات بر دقت روش پیشنهادی را برای شرایط خطا مشابه با جدول (۵)، نشان می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که تاخیر در برداشت اطلاعات تاثیر قابل توجهی بر دقت روش پیشنهادی ندارد.

لازم به توضیح است که در تمامی موارد پنجره اطلاعاتی ۱۲ میلی‌ثانیه انتخاب شده است.

### ۵-۳-۴- بررسی اثر نویز و دریافت صحیح اطلاعات بر دقت روش پیشنهادی

روش پیشنهادی بر مبنای اطلاعات زمانی کانورترها عمل می‌کند بنابراین در صورت دریافت اشتباه اطلاعات پاسخ درستی در اختیار نمی‌گذارد. به همین دلیل افزودن نویز نیز در دقت روش پیشنهادی تاثیرگذار است. به منظور بررسی اثر افزودن نویز بر دقت روش پیشنهادی فرض می‌شود که تمامی اطلاعات دریافتی نویز سفید گوسی با نسبت سیگنال به نویزهای ( $SNR^{۱۳}$ ) مختلف اعمال شود. جدول (۷) نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش نویز منجر به افزایش خطای تخمین مکان خطا می‌شود. از طرفی هرچه نسبت سیگنال به نویز کمتر شود، خط خطادار خصوصا در مواردی که داده‌های

جدول (۵): بررسی اثر فرکانس نمونه‌برداری بر دقت روش

#### پیشنهادی

شرایط خطا	فرکانس نمونه برداری (kHz)	درصد خطای تخمین مکان خطا
خطای تک قطب بدون مقاومت وسط خط ۷ (داده‌های هر دو سمت خط موجود است)	۱۲۵	۰/۷۷۸۶
	۲۵۰	۰/۷۱۵
	۵۰۰	۰/۰۲
خطای تک قطب با مقاومت ۱۵۰ اهم در ۱ درصدی انتهای خط ۸ (تنها داده‌های یک سمت خط موجود است)	۱۲۵	۰/۰۱۳۸
	۲۵۰	۰/۹۰۵۲
	۵۰۰	۰/۵۷۲۶
خطای دو قطب با مقاومت ۵۰ اهم در ۵ درصدی خط ۲ (داده‌های هر دو سمت خط موجود نیست)	۱۲۵	۰/۰۲۸۲
	۲۵۰	۰/۰۹۱۲
	۵۰۰	۰/۰۸۸۷
	۱۰۰۰	۰/۰۴۱۴
	۱۰۰۰	۰/۰۳۱۰

دو سمت خط موجود نباشد، شناسایی نمی‌گردد.

### ۵-۳-۵- بررسی اثر پارامترهای خطا بر دقت روش پیشنهادی

علاوه بر صحت اطلاعات دریافتی، تخمین مقدار درست پارامترهای خطا بر دقت روش پیشنهادی تاثیر می‌گذارد. مطابق با جدول (۸) تغییر پارامتر در کل محاسبات به شدت در دقت روش پیشنهادی تاثیرگذار است. به گونه‌ای که در بعضی موارد دارای خطا شناسایی نمی‌شود و در بعضی موارد دارای خطا شناسایی شده اما الگوریتم تخمین

جدول (۶): بررسی اثر زمان برداشت اطلاعات بر دقت روش

پیشنهادی

شرایط خطا	زمان برداشت اطلاعات (میلی ثانیه پس از خطا)	درصد خطای تخمین مکان خطا
خطای تک قطب بدون مقاومت وسط خط ۷ (داده‌های هر دو سمت خط موجود است)	۰	۰/۰۲
	۱	۰/۰۱۹۶
	۲	۰/۰۱۷۳
خطای تک قطب با مقاومت ۱۵۰ اهم در ۱ درصدی خط ۸ (تنها داده‌های یک سمت خط موجود است)	۵	۰/۰۱۹۱
	۰	۰/۰۷۵۲
	۱	۰/۰۵۴۱
خطای دو قطب با مقاومت ۵۰ اهم در ۱ درصدی خط ۲ (داده‌های هر دو سمت خط موجود نیست)	۲	۰/۰۵۴۰
	۵	۰/۰۵۲۰
	۰	۰/۰۱۹۰
	۱	۰/۰۲۷۶
	۲	۰/۰۳۲۱
	۵	۰/۰۳۱۴

مکان خطا پاسخ نمی‌دهد.

مرجع [۱۴] شیوه‌ای پیشنهادی می‌دهد که مکان خطا با در نظر گرفتن مقادیر پارامتر به صورت مجهول با استفاده از معادلات حاکم بر خط تخمین زده می‌شود. از این شیوه می‌توان به عنوان راهکار و بهبود دقت تخمین مکان خطا در روش پیشنهادی بهره برد.

۵-۳-۶- بررسی اثر مقدار حذف پاسخ‌های پرت

همانطور که بیان شد به منظور کاهش اثر پاسخ‌های پرت، ۱۵ درصد پاسخ‌های بالا و پایین حذف می‌شود. در حالت کلی تغییر این درصد تاثیر چندانی در دقت روش پیشنهادی ندارد. بهره‌مندی از بیشترین بازه پاسخ، محاسبه انحراف معیار و میانگین‌گیری از پاسخ منجر به تشخیص درست خط دارای خطا و تخمین مکان خطا با دقت بالا حتی بدون حذف پاسخ‌های پرت می‌شود. در شرایط عادی نمی‌توان بیان کرد که افزایش میزان پاسخ‌های پرت باعث دقت تخمین مکان خطا می‌شود یا خیر. مطابق با شکل (۷) برای خطای دو قطب با مقاومت ۵۰ اهم در ۵ درصدی خط ۲ افزایش درصد حذف باعث شده است که بخشی از پاسخ‌های نزدیک به پاسخ اصلی حذف شده‌اند که این امر برای خطای تک قطب با مقاومت ۱۵۰ اهم در ۱ درصدی انتهای خط ۸ صدق نمی‌کند (شکل (۸)) و کاملاً وابسته به پاسخ‌های حاصل از حل الگوریتم است.

اثر این بازه در شرایط تحلیلی مختلف آشکار می‌شود. برای مثال در شرایطی که داده‌های ورودی نویز داشته باشند، افزایش درصد حذف پاسخ‌های پرت دقت روش پیشنهادی را افزایش می‌دهد. شکل (۹) این اثر را برای خطای مشابه با اطلاعات دریافتی با اعمال نویز سفید گوسی با  $SNR=100$  را نشان می‌دهد.

با توجه نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی، عملکرد مناسبی برای یک شبکه MTDC با وجود خطوط هوایی و کابلی به ازای انواع مختلف خطا، خطا در مکان‌ها و با مقاومت خطاهای مختلف دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر معادلات حاکم بر خط به منظور تخمین ناحیه گسترده خطا معرفی شده است. در روش پیشنهادی فرض شده که ابزار اندازه‌گیری تنها در پایانه‌های متصل به کانورتر شبکه نصب شده‌اند.

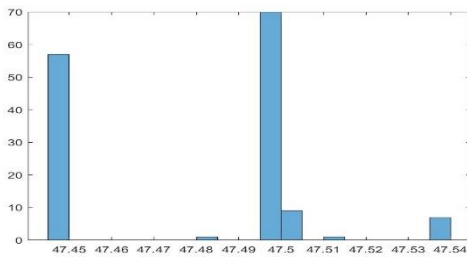
روش پیشنهادی دارای سه بخش تشخیص قطب خطا، شناسایی خط خطا و تخمین مکان خطا است. تغییرات ولتاژ و جریان پایانه‌ها به هنگام بروز خطا شاخص شناسایی قطب خطا است. مطابق بررسی‌های انجام شده، حل معادلات حاکم بر خط، محل تقاطع دو بخش خط با مدل پارامترهای گسترده را در اختیار می‌گذارد. همین ایده در شناسایی خط دارای خطا به کار گرفته شده است. به دلیل پیچیدگی و گستردگی شبکه طی فرآیندی برون خط با توجه به ساختار شبکه مجموعه‌ای از خطوط فرضی، خطوط فرضی پشتیبان و مجموعه پشتیبان تشکیل و در بخش برخط با ثبت داده‌های جریان و ولتاژ و حل

جدول (۷): بررسی اثر نویز بر دقت روش پیشنهادی

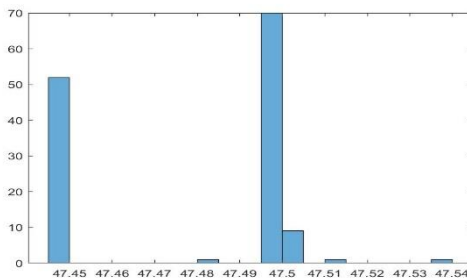
درصد خطای تخمین مکان خطا	SNR	شرایط خطا
۰/۰۲	بدون نویز	خطای تک قطب بدون مقاومت وسط خط ۷ (داده‌های هر دو سمت خط موجود است)
۰/۰۲	۲۵۰	
۰/۰۲۰۴	۱۰۰	
۰/۰۲۲	۵۰	
۰/۱۸۱۴	۴۰	
۰/۱۹۴۷	۱۰	
۰/۰۷۵۲	بدون نویز	خطای تک قطب با مقاومت ۱۵۰ اهم در ۱ درصدی خط ۸ (تنها داده‌های یک سمت خط موجود است)
۰/۰۷۵۲	۲۵۰	
۰/۰۷۵۹	۱۰۰	
۰/۰۸۴	۵۰	
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	۴۰	
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	۱۰	
۰/۰۳۴۸	بدون نویز	خطای دو قطب با مقاومت ۵۰ اهم در ۱ درصدی خط ۲ (داده‌های هر دو سمت خط موجود نیست)
۰/۰۳۴۸	۲۵۰	
۰/۰۳۴۸	۱۰۰	
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	۵۰	
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	۴۰	
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	۱۰	

جدول (۸): بررسی اثر تغییر پارامتر دقت روش پیشنهادی

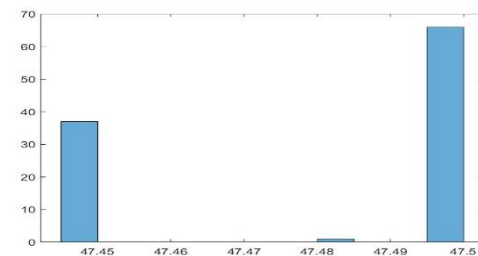
درصد خطای تخمین مکان خطا به ازای تغییر پارامترهای کابل	درصد خطای تخمین مکان خطا به ازای تغییر پارامترهای خط	درصد خطای تخمین مکان خطا به ازای تغییر پارامترهای خط و کابل	درصد تغییر پارامترهای	شرایط خطا
-	۰/۰۴۹۶	۰/۰۴۹۶	٪۱	خطای تک قطب بدون مقاومت وسط خط ۷ (داده‌های هر دو سمت خط موجود است)
-	۰/۴۵۹۷	۰/۴۵۹۷	٪۵	
-	مکان خطا شناسایی نمی‌شود	مکان خطا شناسایی نمی‌شود	٪۱۰	
۰/۹۳۱۸	۰/۴۷۶۴	۰/۷۲۰۸	٪۱	(تنها داده‌های یک سمت خط موجود است)
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	مکان خطا شناسایی نمی‌شود	٪۵	
مکان خطا شناسایی نمی‌شود	خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	مکان خطا شناسایی نمی‌شود	٪۱۰	
۰/۰۲۴۸	۰/۰۴۵۱	۰/۱۱۹۰	٪۱	خطای دو قطب با مقاومت ۵۰ اهم در ۵ درصدی خط ۲ (داده‌های هر دو سمت خط موجود نیست)
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	مکان خطا شناسایی نمی‌شود	٪۵	
خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	خط دارای خطا شناسایی نمی‌شود	٪۱۰	



(الف)



(ب)



(ج)

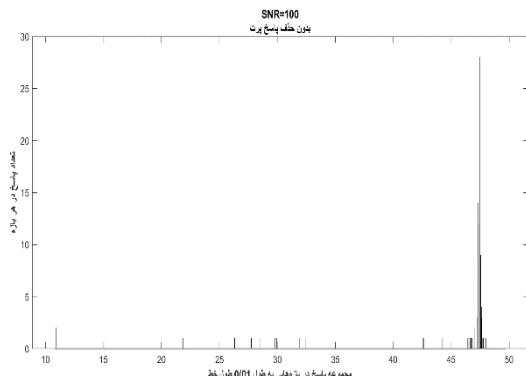
شکل (۷): مجموعه پاسخ برای خطای دو قطب با مقاومت ۵۰ اهم در فاصله‌ی ۱ درصدی خط ۲ (الف) بدون حذف پاسخ (ب) ۵ درصد حذف پاسخ پرت (ج) ۱۵ درصد حذف پاسخ پرت

معادلات تخمین مکان خطا برای هر خط فرضی خط دارای خطا شناسایی می‌گردد.

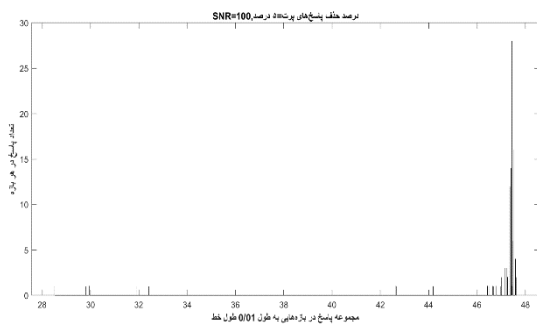
محاسبه‌ی اطلاعات ولتاژ و جریان ناموجود برای خط‌آدار و حل معادلات مکان خطا برای این خط آخرین گام الگوریتم پیشنهادی است.

الگوریتم معرفی شده‌ی در یک شبکه با ترکیبی از خطوط هوایی، کابلی و خطوط کوتاه و بلند مورد بررسی قرار گرفته است.

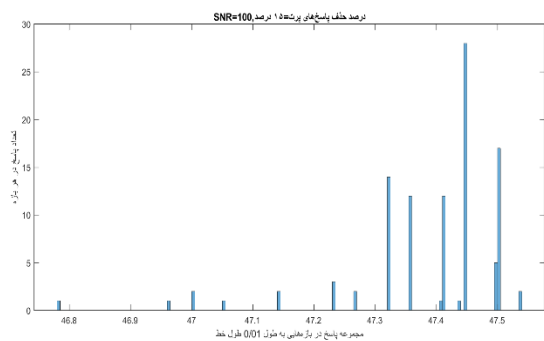
براساس نتایج ارائه شده، روش پیشنهادی در تمامی موارد مورد آزمایش در دو گام تشخیص قطب خط‌آدار و شناسایی خط‌آدار به درستی عمل می‌کند. به علاوه نتایج ارائه شده بیانگر دقت بالای ۹۹ درصدی به ازای انواع مختلف خطا، خطا در مکان‌های متفاوت و حتی خطا در فواصل ۱ درصدی طول خط از پایانه‌های خط و مقاومت‌های خطا می‌باشد. عدم نیاز به شناسایی دقیق لحظه‌ی وقوع خطا، دقت قابل قبول به ازای خطا با مقاومت‌های بالا و عدم وجود ناحیه‌ی کور از دیگر مزایای روش پیشنهادی است.



(الف)

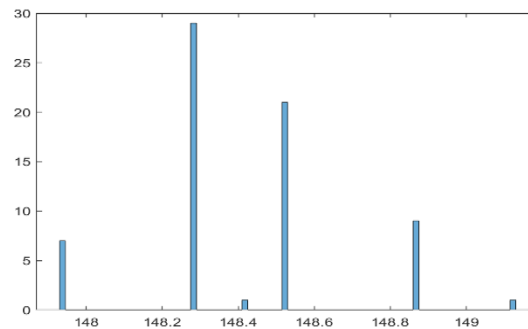


(ب)

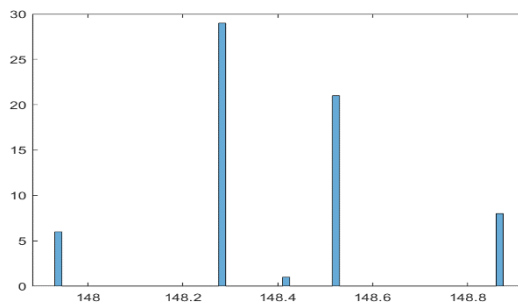


(ج)

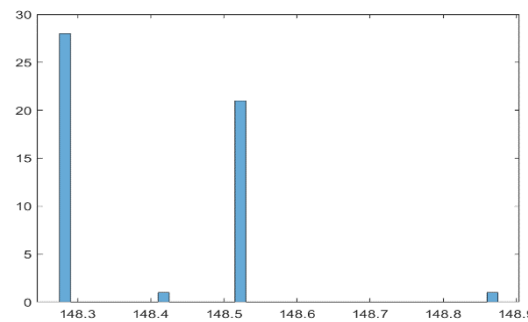
شکل (۹): مجموعه پاسخ با اطلاعات دریافتی با اعمال نویز سفید گوسی با  $SNR=100$  بدون حذف پاسخ ب ۵ درصد حذف پاسخ پرت ج ۱۵ درصد حذف پاسخ پرت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۸): مجموعه پاسخ برای خطای تک قطب با مقاومت ۱۵۰ اهم در ۱ درصدی انتهای خط ۸ الف) بدون حذف پاسخ ب ۵ درصد حذف پاسخ پرت ج ۱۵ درصد حذف پاسخ پرت

## مراجع

- [3] X. Jiao, Fault location in transmission systems using synchronised measurements, Ph.D. dissertation: Electrical and Computer Engineering University of Kentucky, 2017.
- [4] D. Tzelepis, A. Dyško, G. Fusica, P. Niewczas, S. Mirsaedi, C. Booth and X. Dong, "Advanced fault location in MTDC networks utilising optically-multiplexed current measurements and machine learning approach," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 97, pp. 319-333, 2018.
- [5] Y. Yang and C. Huang, "A single-ended fault location method for DC lines in bipolar MMC-HVDC system," Electrical Engineering, vol. 102, pp. 899-908, 2020.
- [1] C. Ryttoft, M. Callavik, H. Johansson, P. Lundberg, E. Jansson, H. Bawa, S. Funke, S. Stoeter and A. Moglestue, "ABB review special report 60 years of HVDC," ABB, Zurich, Switzerland, 2014.
- [2] C. M. Franck, "HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 998-1007, 2011.

- location in multiterminal DC systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2552 - 2560, 2014.
- [20] S. Azizi, S. Afsharnia and M. Sanaye-Pasand, "Fault location on multi-terminal DC systems using synchronized current measurements," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 779-786, 2014.
- [21] Q. Lin, G. Luo and J. He, "Travelling-wave-based method for fault location in multi-terminal DC networks," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 2314-2318, 2017.
- [22] G. Luo, Y. Liu, D. Zhang, J. He, B. Xu, J. Ding and C. Luo, "Maximum traveling-wave-based fault location for meshed MTDC networks," in *Energy Internet and Energy System Integration*, Changsha, China, 2019.
- [23] H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 4, pp. 389-3, 1969.
- [24] J. Sadeh, N. Hadjsaid, A. M. Ranjbar, and R. Feuillet, "Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 1027 - 1033, 2000.
- [25] A. Geoffrey, Writer, Full selective protection strategy for multi-terminal cable HVDC grids based on HB-MMC converters. [Performance]. Universite Grenoble Alpes, 2017.
- [26] "Guide for the development of models for HVDC converters in a HVDC grid," *Cigre*, 2014.
- [27] K. Nanayakkara, A.D. Rajapakse and R. Wachal, "Fault location in extra long HVdc transmission lines using continuous wavelet transform," in *International Conference on Power Systems*, Netherlands, 2011.
- [6] Q. Huai, K. Liu, A. Hooshyar, H. Ding, L. Qin and K. Chen, "Line fault location for multi-terminal MMC HVDC system based on SWT and SVD," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 19, pp. 4053-4043, 2020.
- [7] A. E.B. Abu-Elanien, A. A. Elserougi, A. S. Abdel-Khalik, A. M. Massoud and S. Ahmed, "A differential protection technique for multi-terminal HVDC," *Electric Power Systems Research*, vol. 130, pp. 78-88, 2016.
- [8] D. Wang and M. Hou, "Travelling wave fault location algorithm for LCC-MMC-MTDC hybrid transmission system based on Hilbert-Huang transform," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 121, no. 106125, 2020.
- [9] D. Wang and M. Hou, "Travelling wave fault location principle for hybrid multi-terminal LCC-VSCHVDC transmission line based on R-ECT," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 117, no. 105627, 2020.
- [10] D. Wang, H. Yanga, M. Hou and Y. Guob, "Travelling wave fault location principle for hybrid multi-terminal LCCMMC-HVDC transmission lines based on C-EVT," *Electric Power Systems Research*, vol. 185, no. 106402, 2020.
- [11] R. Muzzammel, A. Raza, M. R. Hussain, G. Abbas, I. Ahmed, M. Qayyum, M. A. Rasool and M.A. Khaleel, "MT-HVdc systems fault classification and location methods based on traveling and non-traveling waves—A comprehensive review," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 4760, 2019.
- [12] D. Tzelepis, S. Mirsaedi, A. Dyško, Q. Hong, J. He and C. Booth, "Intelligent fault location in MTDC networks by recognising patterns in hybrid circuit breaker currents during fault clearance process," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 5, pp. 3056 - 3068, 2021.
- [13] A. T. Johns and S. K. Salman, "Differential equation based techniques," in *Digital protection for power systems*, London, P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers IEE Power Series 15, 1995, Chapter7, pp. 107-114.
- [۱۴] م.م. کمالی فازر، "مکان یابی خطا در خطوط HVDC با استفاده از روش معادلات دیفرانسیل"، پایان نامه کارشناسی ارشد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۲.
- [۱۵] ر. دشتی و م. قاسمی، "مکان یابی خطا در شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده به روش امپدانس با استفاده از مدل خط متوسط"، *مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران*، جلد ۴، شماره ۳، ش.ص. ۹۰-۷۹، ۱۳۹۶.
- [۱۶] ع. کامیاب، م. ح. جاویدی و ج. ساده، "فاصله یابی خطا در خطوط انتقال نیرو با سه پایانه در حوزه زمان با استفاده از اندازه گیریهای همزمان و مدل گسترده خط انتقال"، *مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران*، جلد ۵، شماره ۱، ش.ص. ۶۷-۵۹، ۱۳۸۷.
- [17] J. Xu, Y. Lu, C. Zhao and J. Liang, "A model-based DC fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC systems using a simplified line representation," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 35, no. 1, pp. 386-395, 2020.
- [18] Y. Xiang, K. L. Chen, Q. Xu, Z. Jiang, and Z. Hong, "A novel contactless current sensor for HVDC overhead transmission lines," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 11, pp. 4725-4732, 2018.
- [19] S. Azizi, M. Sanaye-Pasand, M. Abedini and A. Hasani, "A traveling-wave-based methodology for wide-area fault



- <sup>1</sup> High Voltage DC transmission lines
- <sup>2</sup> Multi-Terminal high-voltage Direct Current systems
- <sup>3</sup> Point to point
- <sup>4</sup> Wide area
- <sup>5</sup> Singular Value Decomposition
- <sup>6</sup> Hilbert-Huang Transform
- <sup>7</sup> Hybrid Circuit Breaker
- <sup>8</sup> Modular Multi-level Converter
- <sup>9</sup> Fault Occurring Time
- <sup>10</sup> Set Of Answers
- <sup>11</sup> Maximum Change of Voltage
- <sup>12</sup> Unconcentrated set of answers
- <sup>13</sup> Signal to Noise Ratio