

روشی برای مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار ناحیه گسترده در شبکه انتقال قدرت

فرهاد نامداری^۱، استادیار؛ مسلم صالحی^۲، دانشجوی دکتری

۱- گروه برق قدرت - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - namdari.f@lu.ac.ir

۲- گروه برق قدرت - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - salehi.mo@fe.lu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی جدید مبتنی بر امواج سیار ناحیه گسترده برای تعیین مکان خطا در شبکه انتقال ارائه شده است. این روش دارای دو مرحله قطع خط (آفلاین) و برخط (آنلاین) است. در مرحله قطع خط، ابتدا شبکه انتقال به صورت یک گراف وزن دار نمایش داده می‌شود و کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس گر تعیین می‌گردند. سپس خطوطی از گراف که روی کوتاه‌ترین مسیرها نیستند، با توجه به مکان حس گرها به خطوط مجازی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مرحله برخط با کمک زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از حس گرهای نصب شده در شبکه، نقاطی از کوتاه‌ترین مسیرها و خطوط مجازی به دست آمده از مرحله قطع خط که احتمال وقوع خطا در آنها وجود داشته باشد، تعیین و سپس با استفاده از یک شاخص ارزیابی، نقطه دقیق خطا و زمان شروع خطا مشخص می‌گردد. روش پیشنهادی مستقل از نوع و امیدانس خطا بوده و می‌تواند برای هر شبکه انتقال با هر اندازه‌ای به کار رود. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای EMTP و MATLAB صحت عملکرد و دقت بالای روش پیشنهادی را تأیید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی خطا، امواج سیار، گراف شبکه، تبدیل ویولت، شبکه انتقال.

A Wide Area Traveling Wave-based Fault Location Method in Power Transmission Grid

F. Namdari¹, Assistant Professor; M. Salehi², PhD Student

1- Faculty of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: namdari.f@lu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: salehi.mo@fe.lu.ac.ir

Abstract: This paper proposes a new traveling wave-based fault location method for power transmission grids. The proposed method involves an online and an offline stage. In the offline stage, the transmission network is represented by a weighted graph. The shortest paths between any two sensors are determined. The branches of the graph that are not on at least one of the shortest path, are divided into virtual lines associated with the location of the sensors. In the online stage, according to first arrival time at different sensors, the points belonging to the shortest paths obtained during the offline stage with the possibility of having a fault are identified. Then using an evaluation index, the exact point of fault and the fault inception time are determined. The proposed method is independent of the fault type and can be utilized in transmission network with any size. Simulation studies carried out using EMTP software and MATLAB, verify high accuracy of the proposed method.

Keywords: Fault location, traveling waves, grid graph, wavelet transform, transmission grid.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰ و ۱۳۹۴/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۱۲

نام نویسنده مسئول: فرهاد نامداری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خرم‌آباد - کیلومتر ۵ جاده بروجرد - دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق قدرت.

۱- مقدمه

می‌شود. در مرحله برخط با توجه به زمان رسیدن امواج اولیه سیار که توسط حس‌گرها اندازه‌گیری می‌شوند، برای هرکدام از مسیرهای به‌دست‌آمده و خطوط مجازی در مرحله قبل، خطوطی که احتمال وقوع خطا روی آن‌ها وجود داشته باشد، مشخص می‌گردند و سرانجام با به کار بردن یک شاخص ارزیابی، مسیر و خط خطا دار به‌طور دقیق تعیین می‌شود. در این مقاله با تکنیک ارائه‌شده، تعداد زیادی از خطوط انتقال که احتمال وقوع خطا روی آن‌ها وجود نداشته باشد به‌طور خودکار حذف و در محاسبات فاصله خطا، وارد نمی‌شوند که این امر باعث کاهش حجم محاسباتی و افزایش سرعت پردازش اطلاعات می‌گردد.

روش‌های مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار علی‌رغم دارا بودن سرعت و دقت بالا دارای محدودیت‌هایی نیز هستند؛ که مهم‌ترین آن نیاز به تجهیزات اندازه‌گیری فرکانس بالا برای نمونه‌برداری است که البته توسعه‌های اخیر در فناوری مبدل‌های نوری جریان و ولتاژ، میزان نمونه‌برداری بالا برای ثبت سیگنال‌های گذرای خطا را امکان‌پذیر نموده است [۲۴-۲۶]. بنابراین با این‌گونه تجهیزات که قابلیت نمونه‌برداری با پهنای باند بلند و وسیع را دارند روش‌های مبتنی بر امواج سیار و روش پیشنهادی در این مقاله برای تحلیل خطا مؤثرتر و بهتر به کار برده می‌شوند.

۲- اصول مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار

هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه روی یک خط انتقال که مطابق شکل ۱ بین دو شین m و n قرار گرفته است امواج سیار از نقطه خطا f به سمت هر دو پایانه خط انتقال انتشار می‌یابند. با فرض این‌که هر دو شین مجهز به وسیله اندازه‌گیری فرکانس بالا (حس‌گر) باشند که با سیگنال سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) هم‌زمان شده باشند، زمان رسیدن اولین موج سیار از نقطه خطا به شین m و n به ترتیب با t_{sm} و t_{sn} نشان داده می‌شود و با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$t_{sm} = t_0 + \frac{xd_{mn}}{v} \quad (1)$$

$$t_{sn} = t_0 + \frac{(1-x)d_{mn}}{v} \quad (2)$$

که در آن، t_0 زمان شروع خطا، d_{mn} طول خط انتقال و v سرعت موج سیار است. واضح است که $0 \leq x \leq 1$ است. بنابراین با ترکیب روابط فوق، فاصله خطا روی خط انتقال و زمان شروع خطا به‌دقت می‌آید. چنانچه فقط یکی از شین‌ها مجهز به حس‌گر باشد، آنگاه فاصله خطا با توجه به اختلاف‌زمانی بین موج‌های سیار رفت و برگشتی از نقطه خطا به شین مجهز به حس‌گر به دست می‌آید. اما در یک شبکه انتقال که دارای تعداد زیادی خط انتقال و حلقه‌های (مش‌های) مختلفی باشد و تعداد محدودی از شین‌ها مجهز به وسایل اندازه‌گیری باشند، مسئله تعیین محل خطا، پیچیده‌تر خواهد بود زیرا مسیرهای مختلفی برای عبور امواج سیار از نقطه خطا تا حس‌گرهای نصب‌شده در شبکه وجود دارد و با توجه به مکان وقوع خطا این مسیرها تغییر خواهند کرد.

با توسعه سیستم‌های قدرت و افزایش تقاضای توان از سوی مصرف‌کننده، تشخیص دقیق مکان خطا و رفع سریع آن در بهبود پایداری گذرا، عملکرد، قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم قدرت نقش بسیار مهمی دارد [۳-۱]. در حال حاضر روش‌های مکان‌یابی خطا بر مبنای امواج سیار در سیستم‌های قدرت الکتریکی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا دارای مزایایی همچون دقت بالا، قابلیت انعطاف و ثبات می‌باشند [۴]. هنگام وقوع یک خطای اتصال کوتاه روی یک خط انتقال، امواج سیار ولتاژ و جریان از طریق خطوط انتقال با سرعتی نزدیک به سرعت نور در کل شبکه منتشر می‌گردند. بر این اساس، زمان شروع خطا و محل آن با توجه به ثبت و تحلیل امواج سیار فرکانس بالا و ماهیت آن‌ها تعیین می‌گردد [۵-۱۱]. ایده اولیه استفاده از تبدیل موجک گسسته^۱ و مؤلفه‌های مودال^۲ امواج سیار برای تخمین مکان خطا توسط [۸] بیان شد. روش‌های محل‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار در خطوط انتقال دو پایانه‌ای دو دسته‌اند. در دسته اول برای تعیین مکان خطا، از زمان رسیدن امواج سیار رفت و برگشت در یک پایانه خط استفاده می‌شود [۱۲-۱۴]. در دسته دوم با استفاده از اختلاف‌زمانی بین اولین موج‌های رسیده شده به هر دو پایانه خط انتقال، فاصله خطا محاسبه می‌گردد [۱۵-۱۷].

تعیین مکان خطا در سیستم‌های چند پایانه‌ای قدری پیچیده است زیرا مسیرهای مختلفی برای عبور امواج سیار از نقطه خطا تا حس‌گرهای نصب‌شده در شبکه وجود دارد و با توجه به مکان وقوع خطا این مسیرها تغییر خواهند کرد. در [۱۸-۲۰] یک روش بهینه‌سازی خطی برای تعیین مکان خطا در ناحیه گسترده^۲ با تعداد محدودی وسایل اندازه‌گیری هم‌زمان ولتاژ ارائه‌شده است. در [۲۱، ۲۲] یک روش برای تعیین مکان خطا در سیستم‌های چند پایانه DC پیشنهاد شده است. در [۲۳] ابتدا ساختار سیستم مکان‌یاب خطا مبتنی بر امواج سیار معرفی شده و سپس یک الگوریتم برای تشخیص خط خطا دار و فاصله خطا ارائه شده است.

در این مقاله یک روش جدید مبتنی بر امواج سیار ناحیه گسترده برای مکان‌یابی خطا در شبکه قدرت ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی بر اساس نمایش گراف شبکه قدرت، کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس‌گر نصب‌شده در شبکه و زمان رسیدن امواج اولیه سیار به آن‌ها یک دسته معادلات خطی برای تعیین زمان شروع و نقطه وقوع احتمالی خطا ارائه داده و بر اساس آن، یک شاخص ارزیابی به‌منظور تعیین زمان شروع و نقطه دقیق وقوع خطا معرفی کرده است. این روش دارای دو مرحله قطع خط و برخط است. در مرحله قطع خط شبکه به‌صورت یک گراف نمایش داده می‌شود و کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس‌گر تعیین می‌گردند. سپس خطوطی از گراف را که روی این مسیرها نباشند با توجه به حس‌گرها و مکان آن‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند که به هرکدام از خطوط تقسیم‌بندی شده یک خط مجازی گفته

۳- روش پیشنهادی تعیین مکان خطا در شبکه انتقال

۳-۱- مرحله قطع خط

در این مرحله به منظور تعیین مکان خطا، شبکه انتقال به صورت گراف بدون جهت وزن دار $G = (N, B, W)$ نمایش داده می‌شود که در این گراف، N مجموعه گره‌های گراف، نشان‌دهنده شین‌ها در شبکه انتقال، B مجموعه شاخه‌های گراف، نشان‌دهنده خطوط انتقال و W مجموعه وزن‌های گراف، نشان‌دهنده مدت‌زمان عبور امواج سیار از خطوط انتقال است. که مدت‌زمان عبور موج سیار از یک خط انتقال بین دو شین m و n به آسانی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{mn} = \frac{d_{mn}}{v} \quad (3)$$

که در آن، d_{mn} طول خط انتقال (m, n) و v سرعت موج سیار است. هنگامی که یک خطا در شبکه انتقال رخ می‌دهد امواج سیار تولید شده ناشی از خطا، در طول خطوط انتقال شبکه منتشر می‌شوند. امواج اولیه سیار در زمان‌های مختلفی به شین‌های مختلف شبکه می‌رسند که مکان خطا با کمک این زمان‌ها که توسط تعداد محدودی حس‌گر در شبکه اندازه‌گیری می‌شود، تعیین می‌گردد. زمان رسیدن موج اولیه سیار که توسط حس‌گر si اندازه‌گیری می‌شود، مدت‌زمان عبور موج اولیه سیار از کوتاه‌ترین مسیر بین نقطه وقوع خطا و حس‌گر si است.

در این مرحله از روش پیشنهادی، با فرض اینکه تعداد K تا حس‌گر در شبکه انتقال نصب شده باشد، کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو حس‌گر si و sj که $i, j \in \{1, 2, \dots, K\}$ با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده در [۲۵] مشخص می‌شود. با تعیین کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس‌گر، معلوم می‌شود که تعدادی از خطوط شبکه حداقل یک‌بار بر روی یکی از مسیرهای فوق گرفته و مابقی خطوط حداقل یک‌بار بر روی یکی از این مسیرها قرار نگرفته‌اند. بنابراین اگر بعد از تعیین کوتاه‌ترین مسیرها برای تمام جفت حس‌گرها، خط یا خطوطی از شبکه انتقال باقی بماند که حداقل یک‌بار روی یکی از مسیرها قرار نگرفته باشد، آنگاه هر خط از خطوط باقی‌مانده با توجه به مکان حس‌گرها به خطوط و شین‌های مجازی تقسیم‌بندی می‌شود.

مطابق با شکل ۲ اگر خط (m, n) خطی از خطوط باقی‌مانده باشد و حس‌گر sk یک حس‌گر از مجموعه K تا حس‌گر نصب شده در شبکه باشد، آنگاه نقطه z_k ، نقطه‌ای است که مدت‌زمان عبور موج سیار از آن تا حس‌گر sk از هر دو مسیر (z_k, n, sk) و (z_k, m, sk) یکسان است و به آن شین مجازی گفته می‌شود. بنابراین فاصله شین مجازی z_k تا شین m از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d_{mz_k} = \frac{d_{mn} + d_{nsk} - d_{msk}}{2} \quad (4)$$

که در آن، d_{mn} طول خط انتقال (m, n) است. d_{nsk} و d_{msk} به ترتیب فاصله کوتاه‌ترین مسیر بین دو شین m و n تا حس‌گر sk هستند. بر اساس این رابطه اگر خطا روی خط مجازی (m, z_k) رخ دهد، اولین موج سیاری که به حس‌گر sk می‌رسد از شین m عبور می‌کند و اگر

خطا روی خط مجازی (n, z_k) رخ دهد، اولین موج سیاری که به حس‌گر sk می‌رسد، از شین n عبور می‌کند. واضح است که حداکثر تعداد خطوط مجازی حاصل از تقسیم‌بندی یک خط، $K+1$ است. پس برای کل شبکه باقی‌مانده، حداکثر تعداد خطوط حاصل از تقسیم‌بندی، $(K+1)L_R$ خواهد شد که L_R تعداد کل خطوط باقی‌مانده از شبکه (خطوطی که حداقل یکبار روی کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر قرار نگرفته‌اند) است. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای تعیین کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس‌گر و خطوط مجازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳-۲- مرحله برخط

۳-۲-۱- تعیین زمان شروع و نقاط احتمالی وقوع خطا

مطابق با شکل ۴ اگر یک خطای اتصال کوتاه در لحظه t_0 روی خط انتقال (m, n) واقع در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر si و sj رخ دهد، با توجه به آنکه موج سیار اولیه رسیده شده به حس‌گرهای si و sj به ترتیب از کوتاه‌ترین مسیر بین نقطه f و حس‌گرهای si و sj عبور می‌کنند، زمان رسیدن اولین موج‌های سیار به حس‌گر si و sj که به ترتیب با t_{si} و t_{sj} نشان داده می‌شوند، با روابط زیر بیان می‌شوند:

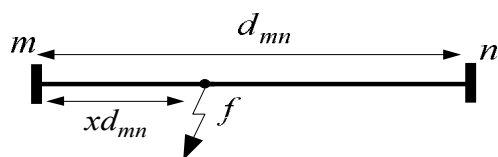
$$t_{si} = t_0 + xT_{ij} \quad (5)$$

$$t_{sj} = t_0 + (1-x)T_{ij} \quad (6)$$

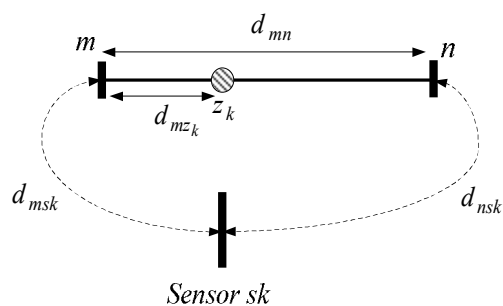
که در روابط (۵) و (۶)، T_{ij} مدت‌زمان عبور موج سیار از کوتاه‌ترین مسیر بین شین i و j است. واضح است که $0 \leq x \leq 1$ است. با ترکیب روابط (۵) و (۶)، زمان شروع خطا و x مربوط به کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر si و sj به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$t_0^{i,j} = \frac{t_{sum} - T_{ij}}{2} \quad (7)$$

$$x^{i,j} = \frac{t_d + T_{ij}}{2T_{ij}} \quad (8)$$



شکل ۱: مکان‌یابی خطا بر اساس امواج سیار در خط انتقال



شکل ۲: تقسیم‌بندی خط انتقال به خطوط و شین‌های مجازی

۳-۲-۳- شاخص ارزیابی برای تعیین دقیق زمان شروع و نقطه وقوع خطا

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، تعداد نقاطی از شبکه که احتمال وقوع خطا در آن‌ها وجود داشته باشد، تعیین می‌گردند. هرکدام از این نقاط وقوع احتمالی خطا بر روی یک خط یا خط مجازی قرار دارند. علاوه بر آن برای هرکدام از این نقاط، زمان شروع خطا نیز تعیین می‌شود. در این بخش با استفاده از یک شاخص ارزیابی، از بین نقاط احتمالی وقوع خطا و همچنین زمان‌های احتمالی شروع خطا، نقطه وقوع و زمان دقیق شروع خطا مشخص می‌گردد.

برای درک این موضوع، شکل ۵ را در نظر بگیرید که در آن فرض شده که خطا روی خط یا خط مجازی (m و n) رخ داده باشد. اگر تمام حس‌گرهایی که اولین موج سیار را حس می‌کنند به دو گروه X و Y تقسیم شوند، آنگاه مجموعه حس‌گرهایی گروه X ، حس‌گرهایی هستند که اولین موج سیار رسیده شده به آن‌ها از شین m عبور کرده و مجموعه حس‌گرهایی گروه Y ، حس‌گرهایی هستند که اولین موج رسیده شده به آن‌ها از شین n عبور کرده است. پس زمان رسیدن اولین موج سیار به هرکدام از حس‌گرهایی گروه X با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$t_{sx} = t_0^{i,j} + x'T_{mn} + T_{mx} \quad \forall x \in X \quad (12)$$

که در آن، T_{mx} مدت‌زمان عبور موج سیار از کوتاه‌ترین مسیر بین شین m و شین x است که حس‌گر sx در آن نصب شده است. T_{mn} مدت‌زمان عبور موج سیار از خط انتقال (m و n) است و x' با استفاده از رابطه (۱۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$x' = \frac{d}{vT_{mn}} \quad , \quad 0 \ll x' \ll 1 \quad (13)$$

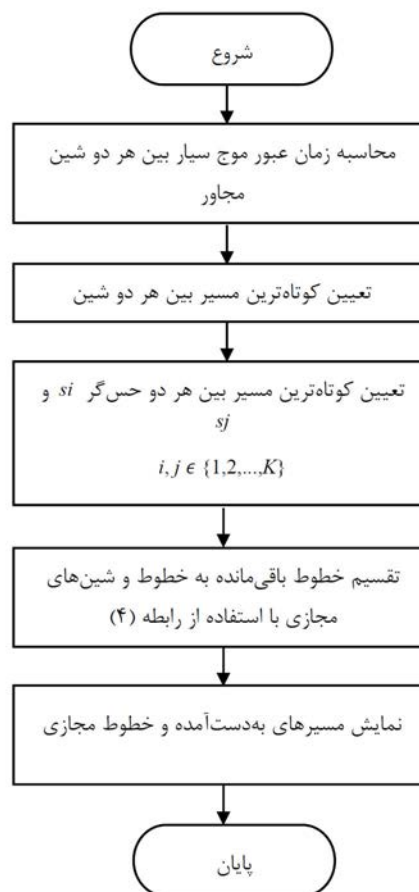
به همین ترتیب زمان رسیدن اولین موج سیار به هرکدام از حس‌گرهای گروه Y با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$t_{sy} = t_0^{i,j} + (1-x')T_{mn} + T_{ny} \quad \forall y \in Y \quad (14)$$

که در آن، T_{ny} مدت‌زمان عبور موج سیار از کوتاه‌ترین مسیر بین شین n و شین y است که حس‌گر sy در آن نصب شده است. بنابراین با استفاده از (۱۲) و (۱۴) شاخص ارزیابی خط (m و n) واقع در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر si و sj برای حس‌گر k از مجموعه حس‌گرها به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$ei(k)_{m,n} = \begin{cases} |(t_{sk} - T_{mk}) - (t_0^{i,j} + x'T_{mn})| & , k \in X \\ |(t_{sk} - T_{nk}) - (t_0^{i,j} + (1-x')T_{mn})| & , k \in Y \end{cases} \quad (15)$$

که در آن، t_{sk} زمان رسیدن اولین موج سیار به حس‌گر sk است. T_{mk} و T_{nk} به ترتیب مدت‌زمان عبور موج سیار از کوتاه‌ترین مسیر بین حس‌گر sk تا شین m و n است. به منظور آنکه خط انتقال (m و n) با تمام حس‌گرها ارزیابی گردد، شاخص ارزیابی خط انتقال (m و n) واقع در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر si و sj برای تمامی حس‌گرها به صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی تعیین کوتاه‌ترین مسیرهای موردنیاز بین هر دو حس‌گر و خطوط مجازی برای تعیین مکان خطا

که در روابط فوق:

$$t_{sum} = t_{si} + t_{sj} \quad (9)$$

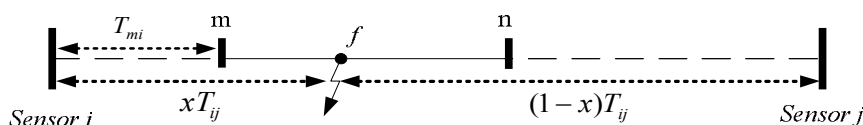
$$t_d = t_{si} - t_{sj} \quad (10)$$

بنابراین فاصله نقطه خطا تا شین m به صورت زیر تعیین می‌شود:

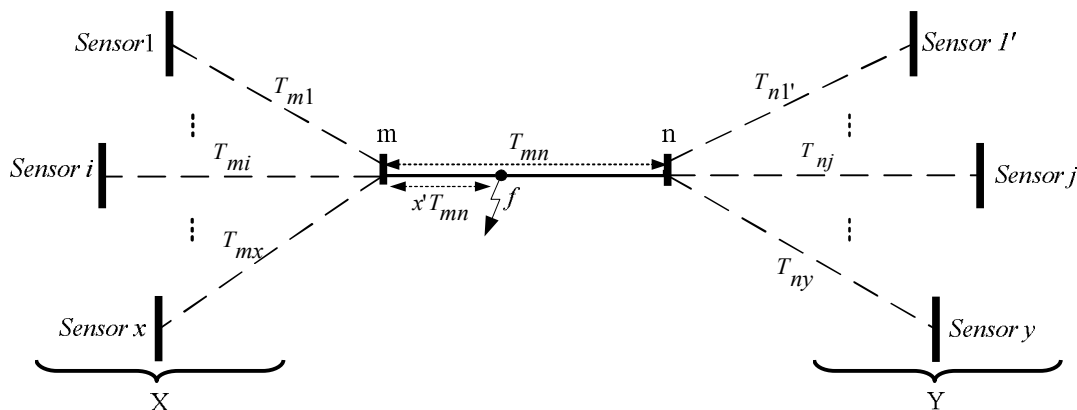
$$d = (x'^{i,j}T_{ij} - T_{mi})v \quad (11)$$

که T_{mi} مدت‌زمان عبور موج سیار از کوتاه‌ترین مسیر بین شین m و حس‌گر si و v سرعت موج سیار است.

نکته قابل توجه آنکه روابط (۵) تا (۱۰) برای تمام خطوط مجازی نیز صادق است. بنابراین روابط (۷) و (۸) برای تمام مسیرهای به‌دست‌آمده و خطوط مجازی از الگوریتم شکل ۳، به کار برده می‌شود. سرانجام تعدادی خط و یا خط مجازی که احتمال خطا روی آن‌ها وجود داشته باشد، با x و t_0 مربوط به خود تعیین می‌گردند. در بخش بعدی با به کار بردن شاخص ارزیابی برای هرکدام از این خطوط احتمالی، خطی که خطا روی آن رخ داده است، به طور دقیق مشخص می‌شود. به عبارت دیگر زمان دقیق شروع خطا و نقطه وقوع خطا نیز تعیین می‌گردد.



شکل ۴: خط انتقال خطا در (m و n) واقع در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس گر i و j



شکل ۵: تعیین مکان خطا مبتنی بر امواج سیار در ناحیه گسترده بر اساس اطلاعات وسایل اندازه‌گیری و کوتاه‌ترین مسیر بین آن‌ها

مرحله ۴: محاسبه x و t_0 برای هر یک از کوتاه‌ترین مسیرها و خطوط مجازی با استفاده از روابط (۷) و (۸) و تعیین زمان شروع و نقاط احتمالی خطا
 مرحله ۵: محاسبه شاخص ارزیابی برای نقاط احتمالی خطا با استفاده از رابطه (۱۶) و تعیین زمان شروع و نقطه دقیق وقوع خطا
 مرحله ۶: پایان
 فلوجارت الگوریتم تعیین زمان شروع و نقطه وقوع خطا در شکل ۶ نشان داده شده است.

۳-۳- اصول اساسی در اجرای تئوری امواج سیار

خطوط سه‌فاز دارای کوپلینگ الکترومغناطیسی قابل توجهی هستند. به منظور حذف اثر کوپلینگ بین فازها، به کار بردن روش امواج سیار و تعیین دقیق مکان خطا، سیگنال‌های ولتاژ اندازه‌گیری شده در حوزه فاز ابتدا توسط یک تبدیل مودال به مؤلفه‌های مودال مجزا تبدیل می‌شوند. ماتریس تبدیل حقیقی کلارک^۵ به همین منظور در این مقاله به کار برده شده است [۲۷].

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_a \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

که V_a ، V_b و V_c ولتاژهای فاز هستند. V_0 ولتاژ مد زمینی^۶ V_a و V_β ولتاژهای مد هوایی^۷ هستند. بنابراین مؤلفه‌های مودال با استفاده از تبدیل موجک مورد پردازش قرار می‌گیرند و زمان رسیدن امواج اولیه

$$EI_{m,n}^{i,j} = \sum_{k=1}^K ei(k)_{m,n}^{i,j} \quad (16)$$

که در آن، $EI_{m,n}^{i,j}$ شاخص ارزیابی کل خط (m و n) واقع در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس گر si و sj که با تمام حس‌گرها ارزیابی شده و $ei(k)_{m,n}^{i,j}$ شاخص ارزیابی خط (m و n) واقع در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس گر si و sj که فقط با حس گر sk ارزیابی شده است. همچنین K تعداد کل حس‌گرهای نصب شده در شبکه است. روابط (۱۵) و (۱۶) نه تنها برای خطوطی که در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس گر واقع شده‌اند، بلکه برای خطوط مجازی نیز صادق است.

واضح است که اگر خط انتقال یا خط مجازی (m و n) خطی باشد که خطا روی آن رخ داده، پس شاخص فوق از لحاظ تئوری باید مقدار صفر و از لحاظ عملی مقداری ناچیز داشته باشد. بنابراین شاخص فوق برای تمام نقاط احتمالی وقوع خطا محاسبه می‌شود و نقطه‌ای که شاخص ارزیابی مربوط به آن کمترین مقدار را داشته باشد، نقطه واقعی وقوع خطا است. بر این اساس زمان واقعی شروع خطا نیز به دست می‌آید.

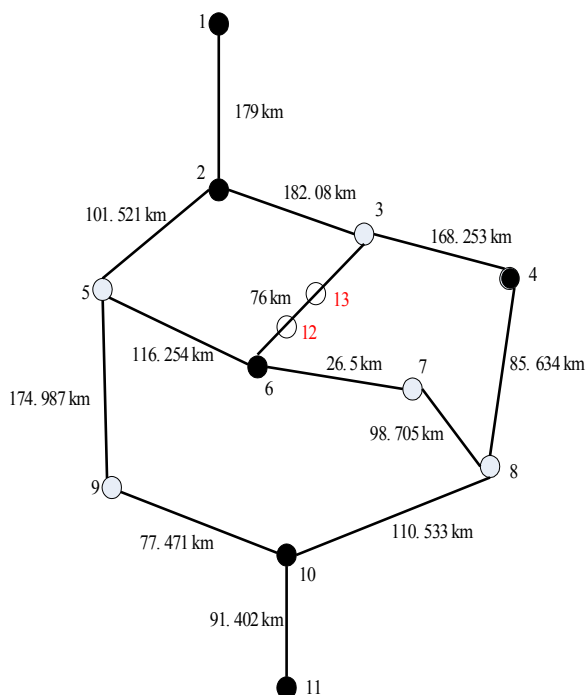
بعد از آنکه الگوریتم مرحله آفلاین برای شبکه مورد مطالعه به کار گرفته شود و کوتاه‌ترین مسیرها و خطوط و شین‌های مجازی مشخص گردید آنگاه الگوریتم مرحله آنلاین روش پیشنهادی با مراحل زیر به کار گرفته می‌شود:

- مرحله ۱: اندازه‌گیری سیگنال‌های ولتاژ در حوزه فاز
- مرحله ۲: تبدیل سیگنال‌های فاز به مؤلفه‌های مودال با استفاده از تبدیل کلارک
- مرحله ۳: تشخیص وقوع خطا با استفاده از تبدیل موجک مادر db4 و تعیین زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هر کدام از حس‌گرها

در شبیه‌سازی خطوط انتقال به‌صورت متقارن، بدون تلفات و با جابجایی منظم فازها فرض شده‌اند و از خطوط انتقال با ساختار نشان داده شده در [۹] و با مدل وابسته به فرکانس^{۱۱} در نرم‌افزار EMTP استفاده شده است زیرا این مدل نسبت به مدل خط انتقال با پارامترهای ثابت در تحلیل امواج سیار دقیق‌تر است. برای محاسبه سرعت موج سیار چند نوع خطا در فواصل معین از یک خط انتقال با طول مشخص اعمال شده و با اندازه‌گیری زمان‌های رسیدن اولین موج سیار به پایانه‌های خط انتقال سرعت موج سیار مد هوایی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v = \frac{L - 2d}{t_2 - t_1} \quad (18)$$

که در آن، L طول خط انتقال، d فاصله نقطه خطا تا یکی از پایانه‌های خط انتقال، t_1 و t_2 زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هریک از دو پایانه خط انتقال می‌باشند. که این زمان‌ها توسط تبدیل موجک با موجک مادر db4 در مقیاس ۱ اندازه‌گیری می‌شود انتخاب این مقیاس به دلیل رزولوشن زمانی زیاد و دقت بالا است. به‌منظور کاهش خطای اندازه‌گیری و افزایش دقت، سرعت متوسط موج سیار محاسبه شده که مقدار این سرعت مربوط به مد هوایی (α) ، ۲۹۹۱۴۷ کیلومتر بر ثانیه به دست آمده است. در مراجع [۲۰-۱۸] که از مدل خط انتقال وابسته به فرکانس استفاده شده و شبیه‌سازی با نرم‌افزار EMTP انجام شده این مقدار سرعت محاسبه شده است. طول خطوط انتقال و مدت زمان عبور موج سیار از آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. نکته قابل توجهه اینکه روش پیشنهادی می‌تواند برای هر شبکه انتقال بزرگ به‌آسانی به کار برده شود.



شکل ۷: شبکه قدرت مورد مطالعه ۵۰۰ kV HN [۲۶]

سیار به هرکدام از حس‌گرها با استفاده از مربع ضرایب تبدیل موجک (WTC^2) تعیین می‌گردد. در این مقاله از موجک مادر $(db4)^{12}$ به‌عنوان تبدیل موجک در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است و مربع ضرایب موجک (WTC^2) مربوط به مؤلفه مد هوایی ولتاژ (V_α) در محاسبات مکان خطا به کار رفته است.



شکل ۶: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی تعیین مکان خطا

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی روش پیشنهادی تعیین مکان خطا در این مقاله، شبکه قدرت (HN) ۵۰۰ کیلوولت [۲۶] مطابق شکل ۷ در نظر گرفته شده است. در این شبکه، حس‌گرها بر اساس اصول نصب آشکارسازهای مکان‌یاب خطا مبتنی بر امواج سیار در پست‌های شماره ۱، ۲، ۴، ۶، ۱۰ و ۱۱ نصب شده‌اند. تمام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار EMTP و MATLAB با فرکانس نمونه‌برداری ۱ مگاهرتز متناظر با پله زمانی شبیه‌سازی ۱ میکروثانیه انجام شده است. انتخاب فرکانس نمونه‌برداری بالا در این مقاله به دلیل افزایش دقت و رزولوشن زمانی زیاد در استفاده از تبدیل موجک است [۲۰-۱۸]. تا چندین سال قبل به دلیل اینکه ترانسفورماتورهای معمولی CT و CVT دارای پهنای باند فرکانسی محدودی بوده‌اند نمونه‌برداری با چنین فرکانسی تقریباً غیرممکن بوده است اما با پیشرفت چشم‌گیری که در فناوری الکترونیک قدرت و ساخت ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان نوری (OPT^1 و OCT^1) صورت گرفته است امکان نمونه‌برداری با فرکانس‌های بالا نیز فراهم شده است.

جدول ۲: کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس‌گر

| کوتاه‌ترین مسیر | حس‌گر |
|-----------------|----------|
| ۲،۱ | s1, s2 |
| ۴،۳،۲،۱ | s1, s4 |
| ۶،۵،۲،۱ | s1, s6 |
| ۱۰،۱۰،۹،۵،۲ | s1, s10 |
| ۱۰،۱۱،۱۰،۹،۵،۲ | s1, s11 |
| ۴،۳،۲ | s2, s4 |
| ۶،۵،۲ | s2, s6 |
| ۱۰،۹،۵،۲ | s2, s10 |
| ۱۱،۱۰،۹،۵،۲ | s2, s11 |
| ۴،۸،۷،۶ | s4, s6 |
| ۴،۸،۱۰ | s4, s10 |
| ۴،۸،۱۰،۱۱ | s4, s11 |
| ۶،۱۰ | s6, s10 |
| ۶،۱۰،۱۱ | s6, s11 |
| ۱۰،۱۱ | s10, s11 |

جدول ۳: زمان رسیدن امواج اولیه سیار به حس‌گرهای مختلف هنگام وقوع خطا روی خط (۲،۳)

| شین | ۱ | ۲ | ۴ | ۶ | ۱۰ | ۱۱ |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| زمان رسیدن (ms) | ۱۰/۹۱۷ | ۱۰/۳۱۷ | ۱۰/۲۹۹ | ۱۰/۵۵۴ | ۱۰/۲۵۸ | ۱۱/۵۶۴ |

با توجه به جدول ۴ کم‌ترین مقدار شاخص ارزیابی مربوط به خط (۲،۳) است که در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر s2 و s4 قرار گرفته است. بنابراین زمان شروع خطای به‌دست‌آمده ۱۰۰۴ / میلی‌ثانیه و فاصله نقطه خطا تا شین ۲ با استفاده از (۱۳) برابر است با:

$$d = x' T_{23} v = 0.5155 \times (608.6698 \text{ ms}) \times \left(2.99147 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} \right) = 93.863 \text{ km}$$

البته از آنجا که خط (۲،۳) در کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر s1 و s4 نیز قرار دارد، شاخص ارزیابی این خط مربوط به دو حس‌گر s1 و s4 نیز مقدار کمی دارد که دور از انتظار نیست. برای ارزیابی روش پیشنهادی، درصد خطا (% E) در تعیین فاصله خطا برای خط انتقال (m و n) با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\%E = \frac{|d^{\text{calculated}} - d^{\text{actual}}|}{d_{mn}} \times 100$$

بنابراین درصد خطا برای نتایج فوق برابر است با:

$$\%E = \frac{|93.863 - 93.827|}{182.08} \times 100 = 0.0197\%$$

سیستم مورد مطالعه در این مقاله در [۲۹] نیز مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است و برای همین حالت خطا، فاصله خطا را ۹۳/۹۹۳ کیلومتر به دست آورده است یعنی برای آن درصد خطا برابر است با:

$$\%E = \frac{|93.993 - 93.827|}{182.08} \times 100 = 0.0911\%$$

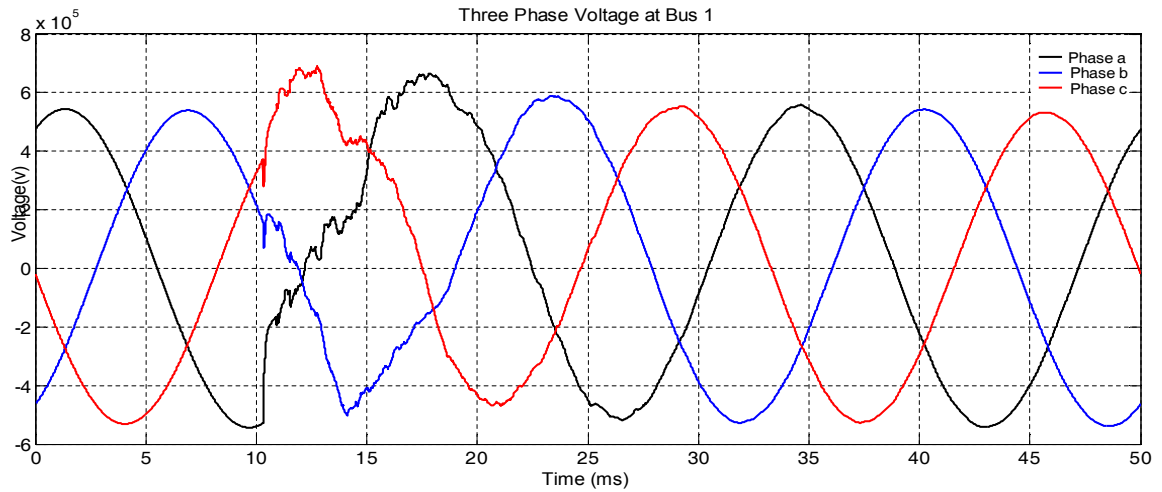
به‌منظور تعیین کوتاه‌ترین مسیرهای مورد نیاز بین هر دو حس‌گر، الگوریتم پیشنهادی شکل ۳ برای شبکه مورد نظر به کار رفته است و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده، با محاسبه کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس‌گر در مرحله اول، از بین تمام خطوط، خط (۶،۳) تنها خطی است که روی هیچ‌کدام از کوتاه‌ترین مسیرها قرار نگرفته است. بنابراین این خط با توجه به مکان حس‌گرها به خطوط و شین‌های مجازی تقسیم شده است که این خطوط شامل خط (۶،۱۲) به طول ۳۳/۴۱۴ km، خط (۱۲،۱۳) به طول ۶/۸۹۱ km و خط (۳،۱۳) به طول ۳۵/۶۹۵ km بوده و در شکل ۷ شین‌های مجازی ۱۲ و ۱۳ با دایره‌های هاشور زده مشخص گردیده‌اند که شین مجازی ۱۲ مربوط به حس‌گر s4 و شین ۱۳ مربوط به حس‌گرهای s1 و s2 است.

در سناریوی اول فرض می‌شود که یک خطا در لحظه ۱۰ میلی‌ثانیه روی خط (۲،۳) در فاصله ۹۳/۸۲۷ کیلومتر از شین ۲ رخ دهد. زمان رسیدن امواج سیار به هرکدام از حس‌گرها با استفاده از ضرایب تبدیل موجک (WTC) در مقیاس ۱ و موجک مادر (db4) محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است.

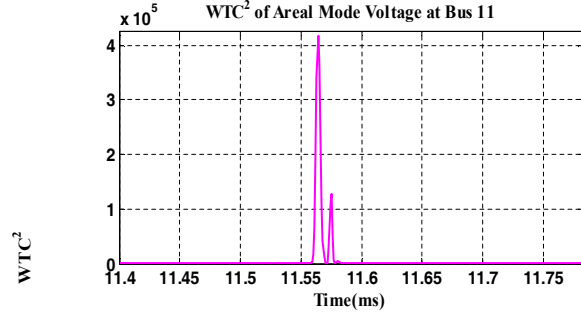
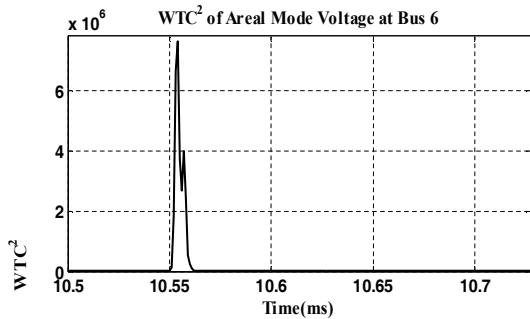
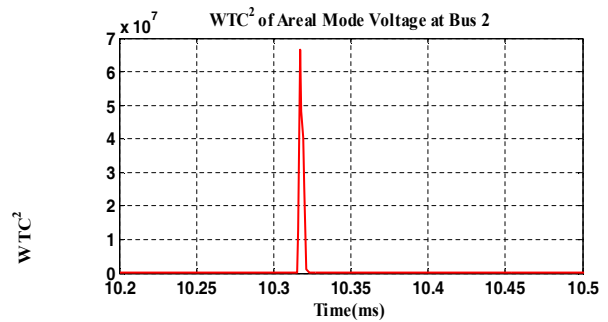
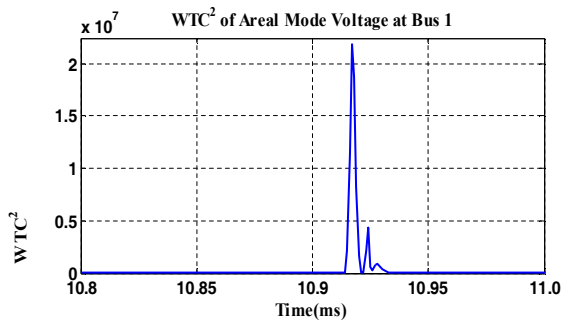
شکل موج ولتاژ سه‌فاز شین ۱ در شکل ۸ و مربع ضرایب موجک مد‌هوایی ولتاژ (WTC²) برای شین‌های ۱، ۲، ۶ و ۱۱ در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج حاصل از به کار بردن الگوریتم پیشنهادی تعیین مکان خطا برای شبکه مورد مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول شاخص ارزیابی خطوطی که مقدار x' آن‌ها منفی و یا بزرگ‌تر از ۱ بوده با بی‌نهایت (∞) مشخص شده است که نشان می‌دهد این خطوط با توجه به زمان ثبت شده توسط حس‌گرها نمی‌توانند از خطوط خطا دار باشند. همچنین سه ردیف آخر جدول مربوط به خطوط مجازی می‌باشند.

جدول ۱: طول خطوط انتقال و مدت زمان عبور موج سیار از آن‌ها

| خط انتقال | طول (km) | مدت زمان عبور موج سیار (μs) |
|-----------|----------|-----------------------------|
| ۱-۲ | ۱۷۹ | ۵۹۸/۳۷۳۸ |
| ۲-۳ | ۱۸۲/۰۸ | ۶۰۸/۶۶۹۸ |
| ۲-۵ | ۱۰۱/۵۲۱ | ۳۳۹/۳۷۱۵ |
| ۳-۴ | ۱۶۸/۲۵۳ | ۵۶۲/۴۴۸۰ |
| ۳-۶ | ۷۶ | ۲۵۴/۰۵۸۱ |
| ۴-۸ | ۸۵/۶۳۴ | ۲۶۸/۲۶۳۴ |
| ۵-۶ | ۱۱۶/۲۵۴ | ۳۸۸/۶۲۲۰ |
| ۵-۹ | ۱۷۴/۹۸۷ | ۵۸۴/۹۵۸۹ |
| ۶-۷ | ۲۶/۵ | ۸۸/۵۸۶۱ |
| ۶-۱۰ | ۲۰۹/۹ | ۷۰۱/۶۶۸۵ |
| ۷-۸ | ۹۸/۷۰۵ | ۶۹۹/۴۵۵۵ |
| ۸-۱۰ | ۱۱۰/۵۳۳ | ۳۶۹/۴۹۷۵ |
| ۹-۱۰ | ۷۷/۴۷۱ | ۲۵۸/۹۷۵۵ |
| ۱۰-۱۱ | ۹۱/۴۰۲ | ۳۰۵/۵۴۵۰ |



شکل ۷: ولتاژ سه‌فاز شین ۱ بعد از وقوع خطا روی خط (۲،۳)



شکل ۸: مربع ضرایب تبدیل موجک (WTC^2) مد هوایی ولتاژ در شین‌های ۱، ۲، ۶ و ۱۱ بعد از وقوع خطا روی خط (۲،۳)

جدول ۴: نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی تعیین مکان خطا هنگام وقوع خطا روی خط (۲،۳)

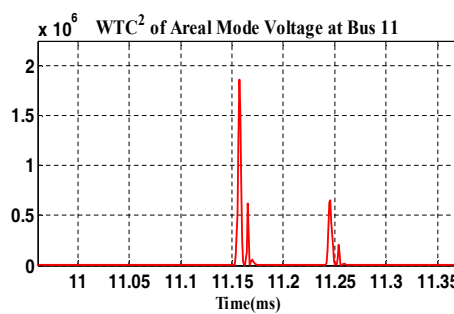
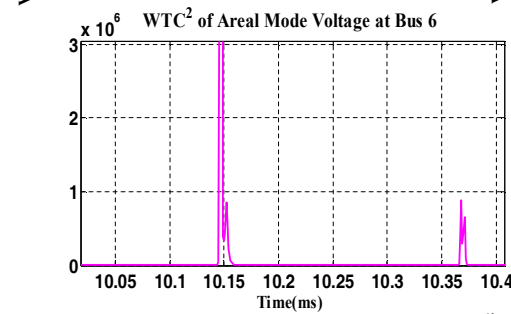
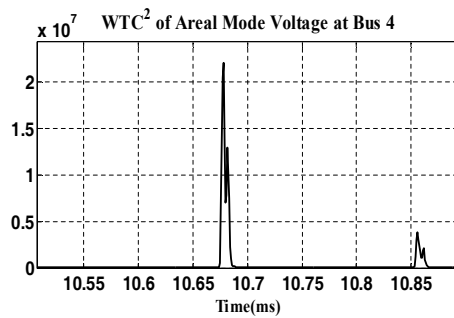
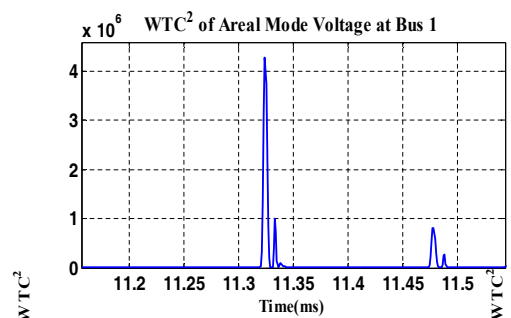
| حس‌گرها | t_0 (ms) | x' | خط | شاخص ارزیابی (EI) | حس‌گرها | t_0 (ms) | x' | خط | شاخص ارزیابی (EI) |
|---------|------------|--------|-----|-------------------|----------|------------|---------|-------|-------------------|
| s1, s2 | ۱۰/۳۱۸ | ۱/۰۰۱۴ | - | ∞ | s4, s6 | ۱۰/۳۵۶ | ۰/۶۶۸۷ | ۸,۷ | ۲۵۵۲/۴ |
| s1, s4 | ۱۰/۰۰۵ | ۰/۵۱۴۸ | ۳,۲ | ۷/۸۹۱ | s4, s10 | ۱۰/۷۲۳ | ۰/۴۵۵۵ | ۸,۴ | ۴۱۸۶/۱ |
| s1, s6 | ۱۰/۰۷۲ | ۰/۷۲۵۸ | ۵,۲ | ۸۹۵/۲۶۴۶ | s4, s11 | ۱۰/۷۳۳ | ۰/۴۵۴۷ | ۸,۴ | ۴۱۸۶/۶ |
| s1, s10 | ۱۰/۱۹۷ | ۰/۳۵۹۴ | ۵,۲ | ۸۹۵/۲۶۴۲ | s6, s10 | ۱۰/۵۵۵ | -۰/۳۴۸۷ | - | ∞ |
| s1, s11 | ۱۰/۱۹۷ | ۰/۳۵۸۷ | ۵,۲ | ۸۹۶/۱۷۳۹ | s6, s11 | ۱۰/۵۵۵ | -۰/۴۱۶۸ | - | ∞ |
| s2, s4 | ۱۰/۰۰۴ | ۰/۵۱۵۵ | ۳,۲ | ۶/۱۵۹ | s10, s11 | ۱۱/۲۵۸ | -۰/۰۶۸۱ | - | ∞ |
| s2, s6 | ۱۰/۰۷۲ | ۰/۷۲۳۳ | ۵,۲ | ۸۹۵/۲۹۸۹ | خط مجازی | ۱۰/۴۶۳ | -۰/۵۷۴۶ | ۱۲,۶ | ∞ |
| s2, s10 | ۱۰/۱۹۶ | ۰/۳۵۷۰ | ۵,۲ | ۸۹۵/۲۶۴۰ | خط مجازی | ۱۰/۳۰۸ | ۱/۰۰۱۹ | ۱۳,۱۲ | ∞ |
| s2, s11 | ۱۰/۱۹۶ | ۰/۳۵۶۳ | ۵,۲ | ۸۹۶/۱۷۴۸ | خط مجازی | ۱۰/۲۹۹ | ۰/۹۲۸۵ | ۱۳,۳ | ۲۳۷۰/۲ |

بنابراین در مقایسه با روش پیشنهادی در این مقاله، دقت روش پیشنهادی بیش‌تر است. نکته دیگر آنکه با استفاده از الگوریتم روش پیشنهادی علاوه بر فاصله خطا، زمان شروع خطا نیز با دقت بالا به دست آمده و از تعداد حس‌گرهای کم‌تری نسبت به روش [۲۶] برای تعیین زمان شروع و مکان خطا می‌تواند استفاده کند که در سناریوی دوم شبیه‌سازی نشان داده شده است.

در سناریوی دوم، یک خطای اتصال کوتاه در لحظه ۱۰ میلی‌ثانیه روی خط (۶،۳) در فاصله ۴۳ km از شین ۶ شبیه‌سازی شده است. علاوه بر آن در این سناریو تعداد حس‌گرها کاهش یافته و حس‌گرهای واقع در شین ۲ و شین ۱۰ حذف شده‌اند و فقط شین‌های ۱، ۴، ۶ و ۱۱ مجهز به حس‌گر می‌باشند. به کارگیری این روش پیشنهادی با تعداد حس‌گرهای کم، از مزایای آن محسوب می‌شود. در این حالت نیز خط

جدول ۵: زمان رسیدن امواج اولیه سیار به حس‌گرهای مختلف هنگام وقوع خطا روی خط (۶،۳)

| شین | ۱ | ۴ | ۶ | ۱۱ |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| زمان رسیدن (ms) | ۱۱/۳۲۴ | ۱۰/۶۷۸ | ۱۰/۱۴۷ | ۱۱/۱۵۷ |

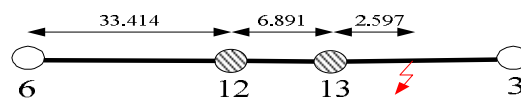


شکل ۹: مربع ضرایب تبدیل موجک (WTC^2) مد هوایی ولتاژ در شین‌های ۱، ۴، ۶ و ۱۱ بعد از وقوع خطا روی خط (۳،۶)

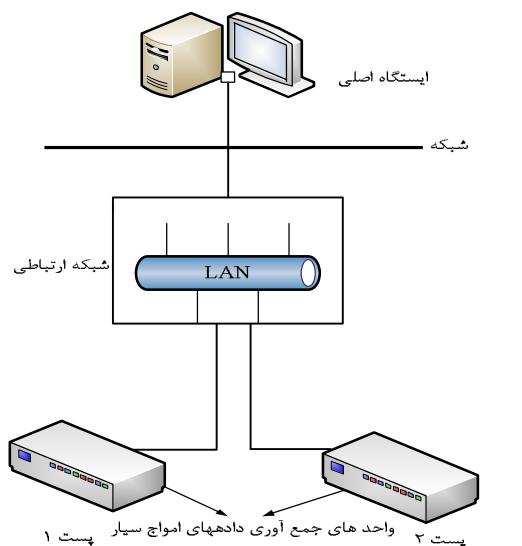
جدول ۶: نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم پیشنهادی تعیین مکان خطا هنگام وقوع خطا روی خط (۳،۶)

| حس‌گرها | t_0 (ms) | x' | خط | شاخص ارزیابی (EI) | حس‌گرها | t_0 (ms) | x' | خط | شاخص ارزیابی (EI) |
|---------|------------|--------|-------|-------------------|----------|------------|---------|---------|-------------------|
| S1,S4 | ۱۰/۱۱۶ | ۰/۰۰۱۳ | (۳،۴) | ۷۵۶/۴ | S6,S11 | ۱۰/۱۴۸ | -۰/۰۰۱۴ | - | ∞ |
| S1,S6 | ۱۰/۰۷۲ | ۰/۴۳۱۲ | (۵،۶) | ۴۴۵/۳ | خط مجازی | ۱۰/۰۰۴ | ۱/۳۴۸۰ | (۱۲،۱۳) | ∞ |
| S1,S11 | ۱۰/۱۹۷ | ۰/۳۲۳۷ | (۵،۹) | ۱۴۲۹/۶ | خط مجازی | ۱۰/۰۰۴ | ۰/۰۷۲۷۶ | (۳،۱۳) | ۴/۲ |
| S4,S6 | ۱۰/۰۶ | ۰/۶۹۶۴ | (۴،۸) | ۱۷۲۹/۹ | خط مجازی | ۱۰/۰۰۹ | ۱/۳۶۷۰ | (۶،۱۲) | ∞ |
| S4,S11 | ۱۰/۴۳۷ | ۰/۸۴۲۴ | (۴،۸) | ۱۶۵۴/۴ | | | | | |

با به کارگیری الگوریتم پیشنهادی تعیین مکان خطا، نتایج مطابق جدول ۶ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که کم‌ترین مقدار شاخص ارزیابی مربوط به خط مجازی (۳،۱۳) بوده و خطا روی این خط



شکل ۱۰: تعیین نقطه خطا روی خط (۳،۶)



شکل ۱۱: سیستم مکان‌یاب خطا مبتنی بر امواج سیار ناحیه گسترده

وسایل جمع‌آوری داده‌های امواج سیار نصب‌شده در پست‌ها، به‌طور پیوسته از خروجی ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان نمونه‌گیری می‌کنند و آن‌ها را در یک حافظه ثبت می‌کنند. هرگاه سیگنال‌های ورودی هرکدام از دستگاه‌های نصب‌شده در پست‌ها از مقداری که از قبل تنظیم شده بیش‌تر شود، آن واحد فعال شده و اطلاعات گذرای لازم را از طریق شبکه ارتباطی به ایستگاه اصلی ارسال می‌کند. در ایستگاه اصلی نرم‌افزار تحلیل امواج سیار در محیط ویندوز یک کامپیوتر معمولی اجرا می‌گردد و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی محل وقوع خطا و همچنین زمان شروع خطا تعیین می‌گردد. همچنین کاربر می‌تواند شکل موج‌های سیگنال‌های گذرا را تحلیل و مشاهده کند. البته لازم به ذکر است که هم‌زمان‌سازی نیز باید انجام شود که این کار می‌تواند با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی صورت گیرد. بنابراین با وجود زیرساخت‌های لازم که در بخش فوق به‌صورت خلاصه موارد اساسی آن‌ها ذکر شد، روش پیشنهادی مکان‌یابی خطا در شبکه واقعی قابل پیاده‌سازی خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار ناحیه گسترده در شبکه انتقال ارائه داده شد. در روش پیشنهادی ابتدا شبکه انتقال به‌صورت یک گراف نمایش داده شده است. سپس با توجه به تعیین خطوط مجازی و کوتاه‌ترین مسیرهای بین هر دو حس‌گر، نقاطی که احتمال وقوع خطا روی آن‌ها وجود داشته باشد مشخص شده است. در مرحله بعد با توجه زمان رسیدن امواج اولیه سیار به هرکدام از حس‌گرهای نصب‌شده در شبکه و به کار بردن یک شاخص ارزیابی، زمان دقیق شروع خطا و نقطه وقوع خطا تعیین شده است. در روش پیشنهادی تعداد محدودی از خطوط که احتمال خطا روی آن‌ها وجود داشته باشد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بنابراین حجم محاسباتی کاهش و سرعت پردازش اطلاعات افزایش یافته است. علاوه بر آن روش

رخ داده است. پس مطابق شکل ۱۰ فاصله نقطه خطا تا شین ۶ برابر است با:

$$d = 33.414 + 6.891 + 0.07276 \times 35.695 = 42.902 \text{ km}$$

که درصد خطا برابر است با:

$$\%E = \frac{|42.902 - 43|}{76} \times 100 = 0.128\%$$

با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود که زمان شروع خطا نیز ۱۰/۰۰۴ میلی‌ثانیه به دست آمده که با زمان واقعی شروع خطا اختلاف بسیار ناچیزی دارد. در الگوریتم روش پیشنهادی برای تعیین مکان و زمان شروع خطا از کوتاه‌ترین مسیر بین حس‌گرها استفاده شده است. بنابراین برای هر دو حس‌گر بر اساس زمان‌های ثبت‌شده توسط حس‌گرها و روابط (۷) و (۸) حداکثر یک نقطه وجود دارد که در معادلات خطی صدق کند به‌عبارت‌دیگر از بین چند خط انتقال که روی کوتاه‌ترین مسیر بین دو حس‌گر واقع هستند حداکثر یک خط وجود دارد که با توجه به زمان ثبت‌شده حس‌گرها، احتمال وقوع خطا روی آن وجود داشته باشد. بدین ترتیب در شبکه‌های بزرگ که مسیرها دارای خطوط بیشتری هستند الگوریتم پیشنهادی سریع‌تر با قطعیت تشخیص می‌دهد که تعداد زیادی از خطوط امکان وقوع خطا روی آن‌ها وجود نداشته و فقط تعداد محدودی از خطوط در محاسبات مرحله بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۵- امکان پیاده‌سازی روش پیشنهادی در شبکه واقعی

سابقه کاربرد روش‌های امواج سیار برای تعیین مکان در شبکه‌های قدرت به سال ۱۹۳۱ برمی‌گردد. تاکنون مکان‌یاب‌های خطا مبتنی بر امواج سیار در اکثر نقاط دنیا نصب و به اجرا گذاشته شده‌اند. به‌طورکلی روش پیشنهادی در این مقاله دارای دو بخش اساسی پردازش سیگنال و الگوریتم مکان‌یابی خطا است. درواقع تفاوت بیشتر روش‌های مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار مربوط به الگوریتم‌های ارائه‌شده در آن‌ها است و بخش پردازش سیگنال در همه آن‌ها مشترک است. برای بررسی امکان پیاده‌سازی روش پیشنهادی و روشن شدن این موضوع، ساختار و مراحل کلی سیستم مکان‌یاب خطا مبتنی بر امواج سیار و تجهیزات اساسی موردنیاز در این بخش بر اساس استاندارد IEC81650 [۲۳] معرفی می‌شود. ساختار کلی سیستم مکان‌یاب خطا در روش پیشنهادی را می‌توان به‌صورت شکل ۱۱ نشان داد. بر اساس این شکل سیستم مکان‌یابی خطا مبتنی بر امواج سیار ناحیه گسترده دارای سه قسمت اساسی است: ۱- واحدهای جمع‌آوری داده‌های امواج سیار که در پست‌های فرعی نصب می‌شوند ۲- ایستگاه اصلی که نرم‌افزار تحلیل امواج سیار را اجرا می‌کند و محل دقیق خطا را مشخص می‌نماید. ۳- شبکه ارتباطی (LAN) که اطلاعات به‌دست‌آمده توسط وسایل نصب‌شده در پست‌ها از طریق آن به ایستگاه اصلی فرستاده می‌شود.

- sampling at two ends," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 11, no. 1, pp. 441-447, 1996.
- [17] J. Izykowski, E. Rosolowski, P. Balcerek, M. Fulczyk, and M.M. Saha, "Accurate non-iterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 25, no. 1, pp. 72-80, 2010.
- [18] M. Korkali, H. Lev-Ari, and A. Abur, "Traveling-wave-based fault location technique for transmission grids via wide-area synchronized voltage measurements," *IEEE Trans Power Syst*, vol. 27, no. 2, pp. 1003-1011, 2012.
- [19] M. Korkali, and A. Abur, "Optimal deployment of wide-area synchronized measurements for fault-location observability," *IEEE Trans Power Syst*, vol. 28, no. 1, pp. 482-489, 2013.
- [20] M. Korkali, and A. Abur, "Robust fault location using least-absolute-value estimator," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 28, no. 4, pp. 4384-4389, 2013.
- [21] S. Azizi, S. Afsharnia, and M. Sanaye-Pasand, "Fault location on multi-terminal DC systems using synchronized current Measurements," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 63, pp. 779-786, 2014.
- [22] S. Azizi, M. Sanaye-Pasand, M. Abedini, and A. Hasani, "A traveling-wave-based methodology for wide-area fault location in multi-terminal DC systems," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 29, no. 6, pp. 2552-2560, 2014.
- [23] Y. Chen, D. Liu, and B. Xu, "Wide-area traveling wave fault location system based on IEC61850," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 1207-1215, 2013.
- [24] M.M. Saha, J.J. Izykowski, and E. Rosolowski, *Fault location on power networks*, 1st ed., London, Springer, 2010.
- [25] IEEE PSRC Special Report, "Practical aspects of Rogowski coil applications to relaying," *IEEE Power Engineering Society*, 2010.
- [26] K.P.A.N. Pathirana, A.D. Rajapakse, O.M.K.K. Nanayakkara, and R. Wachal, "Detecting fault generated surges in DC line of VSC HVDC schemes for travelling wave based fault location," *2012 CIGRÉ Canada Conference*, Canada, 2012.
- [27] E. Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems, Symmetrical and Related Components*, New York, Wiley, 1943.
- [28] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, PA, SIAM, 1992.
- L. Zewen, Z. Xiangjun, Y. Jiangang, D. Feng, and H. Huanhuan, "Wide area traveling wave based power grid fault network location Method," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 63, pp. 173-177, 2014
- پیشنهادی مستقل از نوع خطا و امیدانس خطا بوده و می‌تواند برای شبکه‌های انتقال بزرگ به‌آسانی به کار برده شود.
- مراجعه
- [1] X. Lin, H. Weng, and B. Wang, "A generalize method to improve the location accuracy of the single-ended sampled data and lumped parameter model based fault locators", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 31, no. 5, pp. 201-205, 2009.
- [2] D. Spoor, and J.G. Zhu, "Improved single-ended traveling-wave fault location algorithm based on experience with conventional substation transducers," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 23, no. 3, pp. 1714-1720, 2006.
- [3] Z. Xiangjun, Y. Xianggen, and L. Fuchang, "Study on fault location for transmission lines based on the sensor of travelling-wave," *Proc CSEE*, vol. 22, no. 6, pp. 42-46, 2002.
- [4] P. Jafarian, and M. Sanaye-Pasand, "A traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 25, no. 2, pp. 588-599, 2010.
- [5] P.F. Gale, P.V. Taylor, and P. Naidoo, "Traveling wave fault locator experience on Eskom's transmission network," *7th International Conference on Developments in Power System Protection*, Amsterdam, Netherlands, pp. 327-330, 2001.
- [6] S. Rajendra, and P.G. McLaren, "Travelling-wave techniques applied to the protection of teed circuits: multi-phase/multi-circuit system," *IEEE trans. Power App. Syst*, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3551-3557, 1985.
- [7] A.O. Ibe, and B.J. Cory, "A travelling wave-based fault locator for two- and three-terminal networks," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 1, no. 2, pp. 283-288, 1986.
- [8] F.H. Magnago, and A. Abur, "Fault location using wavelets," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 13, no. 4, pp. 1475-1480, 1998.
- [9] C.Y. Evrenosoğlu, and A. Abur, "Travelling wave based fault location for teed circuits," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 20, no. 2, pp. 1115-1121, 2005.
- [10] Z. Xiangjun, Y. Xianggen, and C. Deshu, "GPS travelling wave fault location systems for transmission network," *Automation Electr Power Syst*, vol. 23, no. 10, pp. 8-16, 1999.
- [11] A. Sharafi, M. Sanaye-Pasand, and P. Jafarian, "Ultra-high-speed protection of parallel transmission lines using current travelling waves," *IET Gener Transm Distrib*, vol. 5, no. 6, pp. 656-666, 2011.
- [12] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data," *IEEE Trans. Power App. Syst*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892-2898, 1982.
- [13] T. Kawady, and J. Stenzel, "A practical fault location approach for double circuit transmission lines using single end data," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 18, no. 4, pp. 1166-1173, 2003.
- [14] C.E.M. Pereira, and L.C. Zanetta, Jr., "Fault location in transmission lines using one-terminal post fault voltage data," *IEEE Trans. Power De.*, vol. 19, no. 2, pp. 570-575, 2004.
- [15] M.B. Dewe, S. Sankar, and J. Arrillaga, "The application of satellite time references to HVDC fault location," *IEEE Trans. Power Del*, vol. 8, no. 3, pp. 1295-1302, 1993.
- [16] M. Kezunovic, and B. Perunicic, "Automated transmission line fault analysis using synchronized

زیرنویس‌ها

¹ Discrete Wavelet Transform

² Modal Components

³ Wide - Area

⁴ Global Positioning System

⁵ Clarke's Real Transformation Matrix

⁶ Ground-Mode Voltage

⁷ Aerial-Mode Voltages

⁸ Daubechies-4 mother wavelet

⁹ Optical Current Transformer

¹⁰ Optical Potential Transformer

¹¹ Frequency - Dependent Model