

## فاصله یابی محل خطای اتصال کوتاه در شبکه های شعاعی با استفاده از ثبت نمونه های فرکانس بالای سیگنال ولتاژ خطادر ابتدای فیدر و تحلیل آن به کمک تبدیل موجک

نیکی مسلمی<sup>۱</sup>

داود جلالی<sup>۱</sup>

جواد عسگری<sup>۲</sup>

۱- پژوهشکده برق- پژوهشگاه نیرو

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی اصفهان

تهران - ایران

اصفهان - ایران

سرعت سیر موج که از اطلاعات خط و برنامه EMTP بدست آمده، ارائه میدهد.

**کلید واژه:** فاصله یابی خطا - شبکه توزیع - خطای اتصال کوتاه - تبدیل موجک - تبدیل مدال

### ۱- مقدمه

از مهمترین مشکلات موجود در شبکه های توزیع کشور، بالا بودن تلفات، افت ولتاژ غیرمجاز و قطعی های طولانی برق می باشد که با توجه به حجم زیاد سرمایه گذاری انجام گرفته در این شبکه ها و لزوم بهره برداری مناسب، ارائه راهکارهایی جهت کم نمودن این قطعی ها ضروری می باشد. روشی که هم اکنون جهت فاصله یابی خطا در اکثر شرکتهای توزیع مورد استفاده قرار میگیرد، یک روش کاملاً دستی و تجربی می باشد. در این روش با توجه به اطلاعاتی که بعضاً مشترکین یا دیسپاچینگ در اختیار مراکز حوادث قرار می دهند، به کمک تجربه یا مانورهای متوالی به محل یابی و پاکسازی خطا می پردازند.

**چکیده** - اگر خطای اتصال کوتاه در یک نقطه از هادی انتقال انرژی الکتریکی رخ دهد، سیگنالهای خطا حاوی امواج فرکانس بالا خواهند بود. این امواج به صورت اغتشاش هایی بر روی سیگنال اصلی سوار می باشند. امواج فرکانس بالای ایجاد شده در اثر خطا پس از تولید در محل خطا در هر دو جهت بر روی خط حرکت کرده و بالاخره پس از انعکاس های متوالی از نقاط انفصال موجود بر روی خط میرا میگردند. با ثبت این سیگنالهای فرکانس بالا در ابتدای فیدر، میتوان اطلاعات بسیار خوبی از نوسانات آن بدست آورد. زمانهای ثبت شده برای نوسانات فرکانس بالا همان لحظه های برخورد امواج خطا به باس پست می باشند و با استفاده از آن می توان فاصله محل خطا را از این باس بدست آورد. این مقاله نحوه استخراج زمانهای انعکاس متوالی موج ایجاد شده در اثر خطا از باس پست و نقطه خطا را با استفاده از تبدیل موجک نشان می دهد و روشی برای تعیین محل خطا از ابتدای فیدر با استفاده از این اختلاف زمانی و

در هر حال در روشهای دستی نه تنها زمان بازیابی شبکه بسیار زیاد است بلکه عمر تجهیزات الکتریکی نیز با قطع و وصل زیر جریان اتصال کوتاه کاهش می‌یابد و خسارت‌های مالی فراوان به شرکت توزیع (ناشی از عدم فروش برق در ساعات بازیابی شبکه به مصرف‌کننده) تحمیل می‌شود. ارائه روشی که بتواند محل وقوع خطا را نشان دهد، کمک و راهنمای مناسبی برای بهره‌برداران جهت یافتن محل واقعی خطا و جداسازی و برطرف نمودن عیب می‌باشد. به این ترتیب علاوه بر تسریع در بازیابی شبکه، طول عمر تجهیزات شبکه نیز افزایش می‌یابد. بطور کلی، روشهای محلیابی خطا در خطوط هوایی و کابل‌های زمینی براساس فرکانس کارشان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- روش‌هایی که بر پایه نمونه برداری سیگنال‌های فرکانس قدرت بعد از وقوع خطا می‌باشند.

۲- روش‌هایی که بر پایه نمونه برداری فرکانس بالا از سیگنال خطا می‌باشند.

روش‌های اول معمولاً در فرکانس قدرت عمل می‌کنند در این روشها پس از استخراج فازورهای ولتاژ و جریان بعد از خطا از سیگنال خطا، با مطالعاتی بر روی آنها فاصله محل خطا از ابتدای فیدر تعیین می‌شود. روش‌های این دسته از قدیمی‌ترین روشهای موجود در تعیین محل خطا می‌باشند. در اغلب روشهای این دسته معمولاً با مقایسه امپدانس ظاهری قبل و بعد از خطا فاصله محل خطا از ابتدای فیدر بدست می‌آید [ ۵، ۳، ۲، ۴، ۱]. در روش‌های دوم که به روش‌های امواج سیار معروفند نمونه‌های فرکانس بالای سیگنال خطا بسیار مهم می‌باشند. سابقه کاربرد روش‌های امواج سیار برای تعیین محل خطا در خطوط هوایی و کابلها به سال ۱۹۳۱ بر می‌گردد. در طول دهه ۱۹۴۰ از این روش بیشتر برای انرژی‌دار کردن کابل‌های زیرزمینی استفاده می‌کردند [۶]. در حال حاضر اغلب روش‌های تعیین محل خطا در خطوط هوایی روش‌هایی از دسته اول می‌باشند که براساس تعیین راکتانس ظاهری خط در

حین زمانی است که جریان خطا در حال گذر از خط می‌باشد و از مقدار اهمی این راکتانس فاصله محل خطا تا ابتدای خط با توجه به پارامترهای خط بدست می‌آید. در این روش‌ها مشاهده شده است که خطا، هنگامی که جرعه ناشی از خطا پایدار نباشد یا مقاومت خطا زیاد باشد یا خط از دو سو تغذیه گردد و یا خطوط موازی تنها در قسمتهایی از خط خطا دیده وجود داشته باشد، بسیار افزایش می‌یابد. بکار بردن این روش‌ها بخصوص برای حالتی که در شبکه خازن جبران سری وجود داشته باشد و یا خطوط DC و یا مدارهای چند سو تغذیه داشته باشد بسیار نامناسب است و میتوان گفت که این روش‌ها همواره به پارامترهایی مانند مقاومت خطا و اطلاعات بار بسیار حساسند. [ ۷، ۸].

کمبودهای روش‌های امپدانسی از سالهای قبل تا بحال مشخص بوده است و تحقیقات برای یک روش مناسب براساس امواج سیار از سال ۱۹۵۰ تا به حال در جریان است. یک تغییر ناگهانی در توپولوژی خطوط انتقال قدرت یا کابلها موجب ایجاد پهنای باند فرکانسی وسیعی در سیگنال ولتاژ می‌گردد. مقدار اولیه سیگنال ولتاژ بعد از خطا به فاکتورهایی مانند محل خطا روی خط، مقاومت مسیر خطا و از همه مهمتر لحظه وقوع خطا وابسته است. مؤلفه‌های فرکانسی ایجاد شده مانند موجهایی از نقطه خطا در هر دو سمت منتشر می‌گردند. زمانی که این موجها به یک نقطه انفعال دیگر روی خط می‌رسند، مقداری از آنها از نقطه انفعال عبور کرده و مقداری هم منعکس می‌گردند. در حوزه فرکانس دامنه مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، حال آنکه سرعت آنها با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد.

براساس تئوری می‌توان گفت که نمونه‌های امواج سیار تولید شده توسط خطا حامل اطلاعاتی درباره نوع و محل خطا می‌باشند که میتوان از آنها برای تعیین فاصله محل خطا استفاده کرد. اما روش موجود در تعیین محل خطا براساس امواج سیار دارای نواقصی می‌باشد اولاً اگر خطایی دارای زاویه آغاز ولتاژ

نزدیک صفر باشد تعداد زیادی مؤلفه‌های امواج سیار ایجاد نمی‌کند و دوما برای یک خطای نزدیک به ابتدای خط اختلاف زمانی بین لحظه رسیدن موج اول و موج منعکس شده آن از محل خطا بسیار کم می‌باشد و نمی‌توان آنها را از هم تشخیص داد [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲].

در این مقاله روشی ارائه شده است که از تبدیل موجک برای رفع این مشکلات در تعیین محل خطا به کمک امواج سیار استفاده میکند. با استفاده از تئوری امواج سیار زمان سیر گذرها در طول خط بین محل خطا و رله‌ها بدست می‌آید. رزلوشن زمانی زیاد در تحلیل موجک به کمک آشکارسازی مؤلفه‌های فرکانس بالا گذراهای خطا آمده است. پس از تبدیل سیگنالهای ولتاژ به مؤلفه‌های مدالشان از مؤلفه جزئی مد ناحیه‌ای در فرکانس‌های بالا برای تعیین محل انواع خطاها استفاده می‌گردد. این روش قبلاً در [۱۳] برای تعیین فاصله محل خطا در شبکه‌های انتقال با نصب ثبات در تمامی شینه‌ها ارائه شده است. این مقاله نشان می‌دهد که با قرار دادن ثبات در ابتدای فیدر نیز می‌توان فاصله محل خطا از سر فیدر را بدست آورد. از آنجا که شبکه‌های توزیع دارای ساختار شعاعی می‌باشند و امکان اندازه‌گیری سیگنالهای خطا تنها در پست‌ها موجود است، در صورت نصب ثباتهای فرکانس بالا در این پست‌ها میتوان با این روش فاصله محل خطا از ابتدای فیدر را با دقت مناسب بدست آورد.

## ۲- تبدیل موجک

در انتقال یک سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس با استفاده از تبدیل فوریه اطلاعات حوزه زمان سیگنال از دست میرود. هنگام نگاه کردن به تبدیل فوریه یک سیگنال غیرممکن است که بتوان گفت که در چه زمانی حوادث در سیگنال اتفاق افتاده است. به منظور پیشنهادی برای جبران کمبود ذکر شده در تبدیل فوریه، دنیس گابور<sup>۱</sup> تبدیل فوریه را برای یک مقطع

<sup>۱</sup> - Dennis Gabor

زمانی کوچک برای سیگنال انجام داد. این تکنیک را پنجره‌بندی<sup>۲</sup> سیگنال گویند. تعمیم گابور، تبدیل فوریه زمان - کوتاه<sup>۳</sup> (STFT) نامیده شد. STFT یک مقایسه مرتب از نمای زمان - فرکانس سیگنال را نمایش میدهد که حاوی اطلاعاتی در مورد هر دوی آنها میباشد. اطلاعات بدست آمده از سیگنال به این روش دارای دقت محدودی است و اندازه پنجره انتخاب شده در STFT تعیین کننده دقت آن میباشد. کاستی اصلی STFT در ثابت بودن پنجره برای همه فرکانس‌ها و عدم امکان تغییر سائز پنجره برای زمان‌های بسیار کوتاه می‌باشد. تحلیل موجک قادر به نمایش سیگنال به وسیله یک تکنیک پنجره‌بندی نواحی با سائزهای مختلف می‌باشد بطوریکه امکان استفاده از پنجره‌های زمانی بزرگ در مواقع نیاز به اطلاعات دقیق در فرکانس‌های پائین و پنجره‌های زمانی کوچکتر هنگامی که نیاز به اطلاعات فرکانس بالاست را مقدور می‌سازد. از دیدگاه بانک فیلتر، این تصور بدان معناست که با افزایش فرکانس میانی فیلترها، دقت زمانی نیز افزایش میابد چرا که مدت وقوع و یا پیروید پدیده‌های فرکانس بالاتر، کمتر است. یکی از پیشرفت‌های اصلی که توسط تبدیل موجک صورت میگیرد قابلیت تحلیل محلی<sup>۴</sup> سیگنال می‌باشد که برای تحلیل یک ناحیه کوچک از سیگنال وسیعی صورت می‌گیرد.

یک موجک یک شکل موج با مدت زمانی محدود می‌باشد که دارای مقدار موثر صفر است. موجک‌های بی‌قاعده و نامتقارن هستند و در ضمن انرژی متمرکز و محدود و حول یک نقطه دارند. تبدیل موجک شامل شکستن یک سیگنال به سیگنال‌های انتقال داده شده و تغییر مقیاس داده شده سیگنال موجک اصلی<sup>۵</sup> (موجک مادر<sup>۶</sup>) است و لذا تحلیل سیگنالهایی با تغییرات تیز با موجک‌ها بهتر از تحلیل فوریه با موج‌های سینوسی میباشد و می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات محلی نیز با

<sup>۲</sup> - Windowing

<sup>۳</sup> - Short Term Fourier Transform

<sup>۴</sup> - Local Analysis

<sup>۵</sup> - Original Wavelet

<sup>۶</sup> - Mother Wavelet

موجک‌ها بهتر تحلیل می‌شود.

تبدیل موجک یک تبدیل خطی می‌باشد که تخصیص زمانی را در مولفه‌های فرکانسی مختلف سیگنال داده شده حفظ می‌کند. با در نظر گرفتن یک تابع مقیاس و یک تابع موجک می‌توان نوشت:

$$\varphi(x) = \sum_K h(k) \sqrt{2} \varphi(2x - k) \quad (1)$$

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_K (-1)^k h(-k+1) \varphi(2x - k) \quad (2)$$

که ضرائب  $h(k)$  به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$h(k) = \langle \varphi(x), \varphi(2x - k) \rangle$$

پس یک خانواده از توابع را می‌توان به عنوان یک ترکیب خطی از توابع مقیاس و موجک با شیفت‌ها و تاخیرها بیان کرد:

$$\varphi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \varphi(2^j x - k) \quad (4)$$

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k) \quad (5)$$

معمولاً فضای بیان شده توسط  $\varphi_{j,k}$  و  $\psi_{j,k}$  با شیفت  $k$  به ترتیب  $W_j$  طراحی شده‌اند. به طوریکه:

$$V_0 \subset \dots \subset V_j \subset \dots \subset L^2 \quad (6)$$

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j \quad (7)$$

هر تابع  $b(x) \in L^2$  را می‌توان به عنوان یک ترکیب خطی از توابع مقیاس و موجک که طبق روابط (4) و (5) تعریف شده، بیان کرد.

$$f(x) = \sum_K c_{j,k} \varphi_{j,k} + \sum_j \sum_K \omega_{j,k} \psi_{j,k} \quad (8)$$

که

$$c_{j,k} = \langle f(x), \varphi_{j,k} \rangle$$

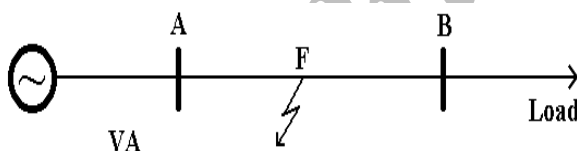
$$\omega_{j,k} = \langle f(x), \psi_{j,k} \rangle$$

در حقیقت در تبدیل موجک گسسته، یک جفت فیلتر بالاگذر و پائین‌گذر در هر مقیاس بر روی تابع اصلی و مشتقات آن عمل می‌کنند. با این کار تقریب‌هایی از تابع اصلی بدست می‌آید که هر کدام اطلاعات بیشتری مربوط به تابع اصلی در مقیاس جزئی (باند فرکانسی) خاص خودش می‌دهد. مقیاس

اول یک پهنای باند فرکانسی وسیعی را در انتهای طیف فرکانسی سیگنال اصلی پوشش می‌دهد. و مقیاس‌های بالاتر فرکانس‌های پائین‌تر با پهنای باند کمتر را در بر می‌گیرند. مقیاس اول دارای بالاترین رزولوشن زمانی است، در حالیکه مقیاس‌های بالاتر دارای پریودهای زمانی بالاتر، به صورت افزایشی می‌باشند. در این روش از تابع موجک دابچیز بعنوان موجک مادر در همه تبدیل‌ها استفاده شده است [۱۳].

### ۳- تئوری روش

یک خط انتقال تک‌فاز بدون تلفات با طول  $l$  بین باس  $A$  و بار  $B$  با امپدانس مشخصه  $Z$  و سرعت سیر موج  $v$  طبق شکل (۱) در نظر بگیرید. در این شبکه ثباتی با نرخ نمونه‌برداری بالا (بالای ۵۰ KHz) در نقطه  $A$  وجود دارد. با قرار دادن خطا در نقطه  $F$  به فاصله  $x$  از باس  $A$ ، امواجی در سیگنال ولتاژ و جریان ایجاد می‌شود. این امواج در نقطه  $F$  تشکیل می‌شوند و به سمت  $A$  و  $B$  حرکت می‌کنند پس از برخورد به هر مانعی مقداری از این امواج منعکس شده و مقداری دیگر به راه خود ادامه می‌دهند و از مانع می‌گذرند.



شکل ۱: دیاگرام تک‌خطی نمونه

مقدار انعکاس و گذر موج از یک مانع به مشخصات مانع بستگی دارد. اصطلاحاً بسته به اینکه مانع سخت یا نرم باشد، نسبت موج منعکس شده به موج گذرنده بیشتر یا کمتر خواهد شد. ثبات باس  $A$  تعداد زیادی امواج سیار را دریافت می‌کند. این تعداد به دامنه اولیه اغتشاش، امپدانس مشخصه خط، تعداد انشعابات و امپدانس آنها و همچنین به فاصله مانع و نقطه  $F$  از باس  $A$  بستگی دارد. شکل (۲) دیاگرام تیس مربوط به خطای  $F$  در شکل (۱) را نشان می‌دهد. اولین موجی که در نقطه خطا

دلایلی موجی که از B منعکس می‌گردد دارای دامنه بزرگی باشد و پس از رسیدن به نقطه A قابل مقایسه با سایر امواج دریافتی در باس A باشد آنگاه طبق شکل (۲) فاصله زمانی دو پیک اول در این حالت دو برابر مدت زمانی است که موج از F تا B می‌رود.

آنگاه فاصله محل خطا از باس A از رابطه زیر بدست می‌آید.

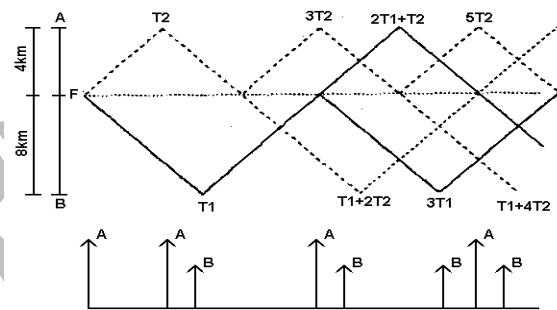
$$x = l - \frac{t_d \times v}{2} \quad (10)$$

در این رابطه  $l$  فاصله بین باس A تا بار B می‌باشد.  $t_d$  اختلاف زمانی بین لحظه رسیدن موج اول و موج دوم به باس A می‌باشد. این اختلاف زمانی دو برابر زمان سیر موج از محل خطا تا بار B می‌باشد.  $v$  نیز سرعت سیر موج در خط می‌باشد.

در شبکه های توزیع بدلیل ساختار شعاعی و وجود بار در انتهای خط مقدار موجی که از نقطه F به سمت B حرکت می‌کند و پس از برخورد منعکس می‌گردد در مقابل موجی که از F به سمت A حرکت می‌کند ناچیز است و لذا می‌توان با دقت بسیار خوبی همواره می‌توان از رابطه (۹) استفاده کرد، حتی اگر خط در نیمه دوم خط رخ دهد. در این حالت هر چند موج برگشتی از B زودتر از موج منعکس شده از A به F باس A می‌رسد اما این موج دارای دامنه کمی می‌باشد و می‌توان آن را نادیده گرفت.

با مشخص بودن  $v$  و یافتن  $t_d$  برای هر شکل موج خطا می‌توان فاصله محل خطا تا سرفیدر را محاسبه کرد. در خطوط انتقال سه فاز به دلیل اینکه هادی‌ها دارای اندوکتانس‌های متقابل هستند و ولتاژ هر فاز تابعی از جریان همان فاز و فازهای دیگر است، سرعت موجها در فازها ثابت و مستقل از هم نمی‌باشد. بنابراین سرعت امواج سیار موجود در ولتاژ هر فاز به مشخصات فازهای دیگر وابسته است و به همین دلیل در هر فاز یک سرعت برای امواج وجود ندارد [۱۴] و برای بکار بردن روابط (۹) و (۱۰) در خطوط سه فاز باید سرعت سیر موج در خط  $v$  مشخص شود. با تبدیل ولتاژها و جریان‌های فاز به

تولید شده و مستقیماً به سمت A حرکت کرده، پس از  $T_2$  ثانیه بعد از آغاز خطا به باس A برخورد می‌کند و از آن منعکس می‌گردد و دوباره به سمت نقطه F حرکت می‌کند. پس از برخورد به نقطه F مقداری از آن منعکس شده و مقداری دیگر از F می‌گذرد. موج منعکس شده از F دوباره به باس A می‌رسد. زمانی که این موج به باس A می‌رسد  $3T_2$  از لحظه وقوع خطا می‌گذرد. با استفاده از اختلاف زمانی این دو موج می‌توان زمان لازم برای سیر موج از نقطه خطا تا باس A را بدست آورد.



شکل ۲: دیاگرام تیس مربوط به شکل (۱)

باین تفاسیر فاصله محل خطا تا باس A، اگر خط در نیمه اول خط رخ دهد. از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$x = \frac{t_d \times v}{2} \quad (9)$$

در این رابطه  $t_d$  اختلاف زمانی بین لحظه رسیدن موج اول و موج دوم به باس A می‌باشد. این اختلاف زمانی ۲ برابر زمان لازم برای رسیدن موج از محل خطا به نقطه A می‌باشد.  $v$  سرعت انتشار موج در خط می‌باشد. سرعت سیر موج در خط تنها به ساختار خط بستگی دارد.  $x$  فاصله محل خطا تا ثابت می‌باشد.

موجی که از نقطه F در لحظه خطا به سمت B حرکت کرده است نیز یک چنین سرنوشتی دارد با این تفاوت که در نقطه B منبعی وجود ندارد و اصطلاحاً مانع نرم است و دامنه موج منعکس شده بسیار کم می‌باشد. اگر خط در نیمه دوم خط AB رخ دهد و در نقطه B منبعی وجود داشته باشد و یا به

مولفه مدالشان می‌توان به سرعت‌های ثابت و مستقلی برای هر مد دست یافت. این تبدیل به کمک ماتریس مدال [۱۴، ۱۵، ۱۶] صورت می‌گیرد. ماتریس‌های مدال ماتریس‌هایی هستند که ماتریس امیدانس شبکه را قطری می‌کنند. با تبدیل مدال بر روی سیگنال ولتاژ سه فاز می‌توان به سه شکل موج مستقل از هم رسید. برای خطوط جابجا نشده ماتریس مدال وابسته به فرکانس و مختلط می‌باشد. در اینجا فرض بر این است که از قسمت موهومی درایه‌های ماتریس صرف‌نظر گردد [۱۴]. یک راه کاربردی برای محاسبه ماتریس مدال استفاده از نرم‌افزار EMTP می‌باشد که به کمک آن می‌توان در برنامه کمکی جی‌ماری مقدار ماتریس مدال جریان و ولتاژ اعم از جزء حقیقی و موهومی را به عنوان خروجی درخواست داد و در صورتیکه خط جابجا شده باشد برای این منظور می‌توان از ماتریس معروف کلارک<sup>۱</sup> که یک ماتریس حقیقی می‌باشد، استفاده کرد. ماتریس‌های مدال برای یک نوع آرایش یک‌نمی‌باشند. بلکه از هر ماتریسی که بتواند ماتریس امیدانس شبکه را قطری کند می‌توان استفاده کرد. با داشتن ماتریس مدال می‌توان سیگنال‌های ولتاژ و جریان را از حوزه فاز به حوزه مدال

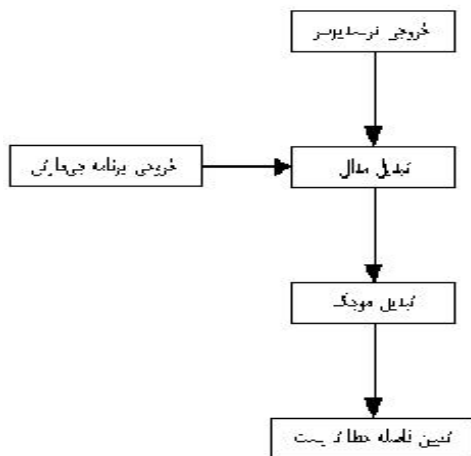
برد. [۱۷ و ۱۳]

$$S_{mode} = T \times S_{phase} \quad (11)$$

$S_{mode}$ : ماتریس مولفه‌های مدال سیگنال ولتاژ می‌باشد،  $T$  ماتریس مدال و  $S_{phase}$  ماتریس سیگنال ولتاژ سه فاز می‌باشد. اولین مد (mode 1) همان مد زمین است و تنها در حالیکه مسیری به زمین وجود داشته باشد این مد دارای مقدار قابل ملاحظه‌ای است. در حالت کلی به دلیل اینکه در خط‌های معمول یا در ساختار شبکه همواره مقداری عدم تقارن وجود دارد، این مد دارای مقدار غیر صفر می‌باشد. تنها هنگامی که شبکه کاملاً متقارن باشد و خط نیز متقارن باشد مقدار این مولفه صفر خواهد بود. مولفه مد دوم (mode 2) به مد ناحیه‌ای

<sup>1</sup> Clark

پس از تبدیل مدال سیگنال ولتاژ خط به مولفه‌های مدال می‌توان با تبدیل موجک سیگنال مد ۲، نوسانات فرکانس بالای سوار بر آن را جدا کرد. این کار با استخراج مولفه جزئی سیگنال ولتاژ خط در مد ۲ توسط تبدیل موجک بدست می‌آید. این سیگنال مهم‌ترین اطلاعات اغتشاش‌های ایجاد شده در اثر خط را به همراه دارد. انتخاب پایین‌ترین مقیاس به دلیل رزولوشن زمانی زیاد آن می‌باشد. با مطالعه بر روی این سیگنال می‌توان گفت که زمان پیک اول این موج زمانی است که موج خط از محل خط برای اولین بار به نقطه A رسیده است و پیک دوم نشان دهنده زمانی است که این موج پس از انعکاس از نقطه خط دوباره به باس A برخورد کرده است [۱۳].



**شکل ۳:** الگوریتم برنامه فاصله یابی خط با استفاده از فاصله زمانی دو پیک متوالی

با این کار می‌توان از خواص منحصر به فرد موجک‌ها برای تشخیص زمان وقوع خط استفاده کرد، در صورت عدم استفاده

از موجک‌ها نمی‌توان موجهای منعکس شده از محل خطا را به راحتی تشخیص داد. این امر بخصوص در شبکه‌هایی که انشعابات زیاد و فواصل کم دارند بیشتر به چشم می‌خورد [۱۸].

#### ۴- ارائه الگوریتم فاصله یابی خطا با استفاده از فاصله زمانی دو پیک متوالی اولیه به کمک موجکها

الگوریتم این روش در شکل (۳) آمده است. پس از نمونه‌برداری فرکانس بالا [۱۳ و ۱۷] از سیگنال ولتاژ سه فاز نسبت به زمین در سر فیدر می‌توان از این نمونه‌ها در مراحل بعدی استفاده کرد. نرخ نمونه‌برداری از روی دقت مطلوب و سرعت سیر موج در مد ۲ خط تعیین میشود.

در شکل (۴) مشاهده می‌گردد که سرعت سیر موج در خطوط در مد ۲ بیشتر از مد ۱ می‌باشد نیز شیب سرعت سیر موج در مد ۱ شدیدتر از سرعت سیر موج در مد ۲ است. با توجه به اینکه سرعت سیر موج در مد ۲ تقریباً در فرکانس‌های بالا ثابت می‌باشد می‌توان به منظور استفاده از یک سرعت ثابت در روابط (۹) و (۱۰) فرکانس‌هایی را برای نمونه‌برداری را از روی سرعت سیر موج در مد ۲ بدست آورد.

البته هر چه نرخ نمونه‌برداری بالاتر باشد دقت روش به دلیل افزایش رزولوشن زمانی بیشتر میشود و دقیق‌تر می‌توان زمان برخورد موج با باس A را پیدا کرد اما برای این منظور باید هزینه سنگین تری پرداخت. تا چند سال قبل به دلیل اینکه ترانس‌های معمولی خود به مثابه فیلترهای برای مؤلفه‌های فرکانس بالا عمل می‌کردند، نمونه‌برداری با چنین نرخ بالایی تقریباً غیرممکن بود. اما هم‌اکنون با پیشرفت چشمگیری که در تکنولوژی الکترونیک قدرت و ساخت ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ نوری<sup>۱</sup> (OPT, OCT) صورت گرفته است امکان نمونه برداری با فرکانس‌های بسیار بالا حتی بیش از ۱۰۰ KHz فراهم شده است. با افزایش نرخ نمونه‌برداری هزینه

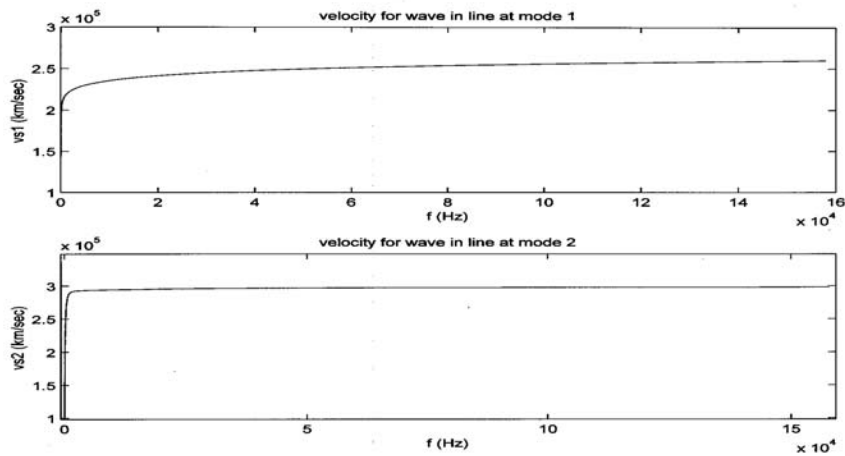
<sup>۱</sup> - Optic Current Transformer /Optic Power Transformer

OCT و OPT ها هم افزایش می‌یابد [۱۹ و ۲۰ و ۲۱].

سیگنال‌های نمونه برداری شده باید در حافظه ذخیره گردد. ولی نیازی به نگهداری یک سیکل کامل در هر لحظه در حافظه نمیباشد که این امر خود یکی از مزایای مهم موجک‌ها نسبت به تبدیل فوریه است. به این ترتیب با صرفه جویی در حافظه، حجم محاسبات نیز به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و لذا می‌توان گفت این روش از سرعت بالایی برخوردار خواهد بود [۱۳ و ۲۲].

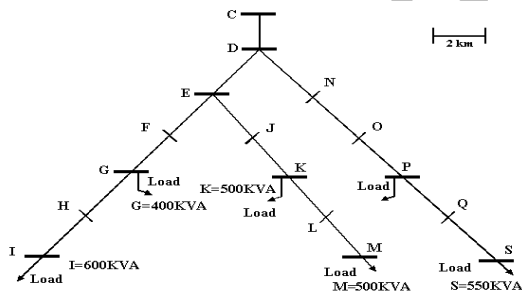
پس از تبدیل سیگنال ولتاژ سه فاز به محیط مدال برای تعیین زمان رخ داد خطا و تحلیل خطا در سیگنال‌های مد ۱ و مد ۲ از تبدیل موجک استفاده می‌گردد. تحلیل موجک در این برنامه با استفاده از جعبه ابزار matlab صورت گرفته است.

در ابتدا سیگنال ولتاژ مد ۱ و مد ۲ توسط موجک‌ها نویززدایی می‌گردد. این کار بدلیل از بین بردن نوسانات با دامنه بسیار پائین که در اثر نمونه‌برداری و یا شبیه‌سازی سیگنال خطا در EMTP رخ داده است، صورت می‌گیرد. نویززدایی سیگنال، با استفاده از موجک مادر Daubechies در ۴ سطح صورت می‌گیرد. پس از نویززدایی، سیگنال ولتاژ مد ۲ به مولفه‌های جزئی‌اش به کمک موجک‌های db2 تجزیه می‌گردد. پس از بازسازی مولفه‌های جزئی سیگنال می‌توان آن‌ها را به صورت سیگنال‌هایی برحسب زمان مشاهده نمود و تخصیص زمان - مقیاس را با این کار حفظ کرد. پس از استخراج مولفه جزئی سطح ۱ سیگنال ولتاژ مد ۲، مشاهده می‌شود که سیگنال حاوی اطلاعات خوبی از محل خطا می‌باشد. برای از بین بردن و یا ضعیف کردن اثر نویز در سیگنال می‌توان آن را به توان دو رساند. تبدیل فوریه این مولفه‌های جزئی پهنای باند فرکانسی و مهمترین فرکانس هر سیگنال را نشان میدهد و آنگاه با استفاده از ماتریس سرعت برحسب فرکانس سیگنال مد ۲، در فرکانس مربوطه، سرعت سیر موج مشخص میگردد [۱۶].



شکل (۴): تغییرات سرعت در مد ۱ و مد ۲ برحسب فرکانس

روش برای تعیین محل خطا بدست آمده است. این شبکه مانند یک شبکه توزیع دارای انشعاب در نظر گرفته شده است و در ادامه رفتار خطا در نقاط مختلف شبکه بررسی شده است. با قرار دادن خطای سه فاز در نقاط مختلف شبکه شکل موج‌های ولتاژ سه فاز ثبت شده در نقطه C در حافظه ذخیره گردیده است، این شکل موجها داده‌های ورودی الگوریتم برنامه و یا به عبارت دیگر خروجی‌های ترنس‌دیوسر می‌باشند.



شکل ۵: شبکه نمونه شعاعی دارای انشعاب

اگر  $\Delta t = 0.167 \times 10^{-6}$  در برنامه EMTP که برای

شبیه‌سازی خطای سه فاز انتخاب شده باشد و خطا در  $0.1 \text{ ms}$  بعد از شروع زمان شبیه‌سازی رخ داده باشد از سیگنالها با فرکانس  $150 \text{ KHz}$  نمونه‌برداری شده باشد، در شکل (۶-الف) سیگنال خطای سه فاز ثبت شده در نقطه C برای خطای اتصال کوتاه سه فاز در نقطه D نشان داده شده است. شکل های (۶-ب)

با توجه به مولفه‌های جزئی سیگنال خطا در مد ۲، با استفاده از نصف اختلاف زمانی بین دو پیک اول در مولفه جزئی مقیاس اول مد ۲ می‌توان مدت زمانی که طول می‌کشد تا موج از نقطه خطا به ثبات برسد را بدست آورد. این موضوع به مفهوم دیگرام لیس شکل (۲) و مفهوم مؤلفه های جزئی در موجک‌ها برمی‌گردد.

هر چه تعیین زمان پیک اول و دوم دقیق‌تر باشد دقت روش بالاتر خواهد بود. انتخاب مقیاس اول مولفه مدال ۲ به دلیل فرکانس بالای نمونه‌ها و رزولوشن زمانی زیاد این مقیاس نسبت به سایر مقیاس‌ها می‌باشد. زمان پیک اول در حقیقت  $\Delta t$  ثانیه پس از وقوع خطا و زمان پیک دوم  $3 \Delta t$  پس از آغاز خطا است. مشخص است که در مقیاسهای پائین‌تر موجکها فشرده‌تر خواهند بود و به همین دلیل تقریب استفاده از مقدار ماکزیمم برای لحظه رخ داد خطا در مقیاسهای پائینتر کمتر می‌باشد [۱۳].

#### ۵- نتایج تست بر روی شبکه نمونه

شبکه شعاعی نمونه انتخاب شده در این مقاله یک فیدر با سه شاخه و ۶ انشعاب است و اطلاعات آن مطابق با یک شبکه حقیقی ۲۰ کیلوولت انتخاب شده است (شکل (۵)). با قرار دادن خطای سه فاز و تکفاز در نقاط مختلف این شبکه نتایج

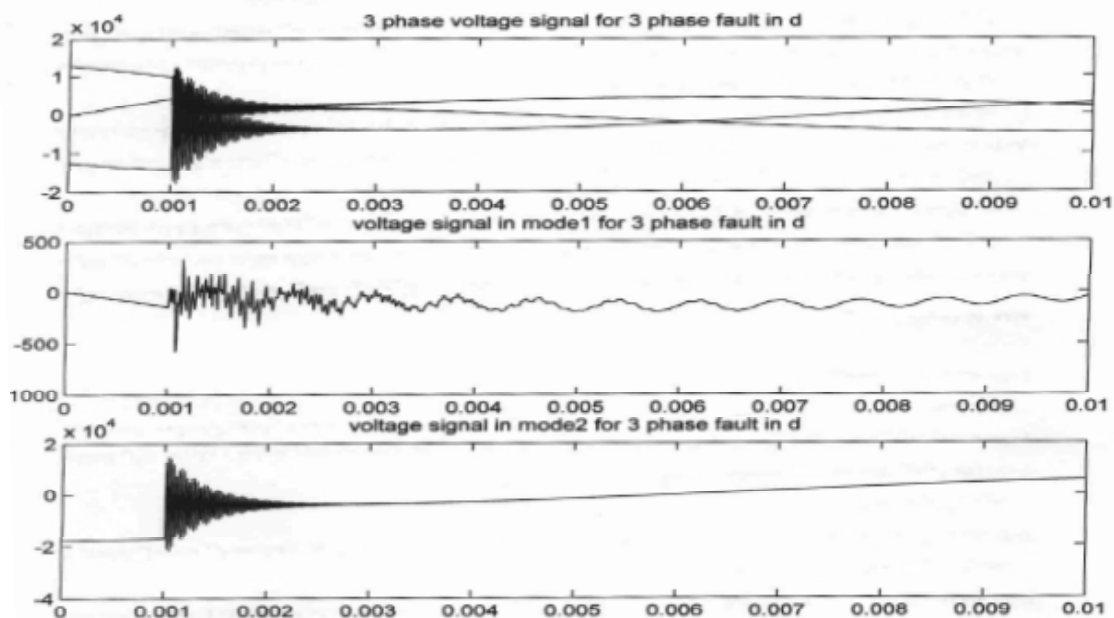
ب) و (ج-۶) سیگنالهای مد ۱ و مد ۲ سیگنالهای شکل (۶-الف) را نشان میدهند. پس از استخراج سیگنالهای خطای اتصال کوتاه سه فاز در نقاط مختلف و یافتن سیگنال مد ۲ آنها با استفاده از تحلیل موجک میتوان سیگنال ضرائب جزئی هر کدام را بدست آورد. مولفه های جزئی سیگنال مد ۲ در شکل (۷) نشان داده شده است که میتوان با استفاده از آنها مدت زمان بین دو پیک متوالی یا  $td$  را محاسبه کرد. جدول (۱) نتایج شبیه سازی خطای اتصال کوتاه سه فاز را در این شبکه نشان می دهد.

در جدول (۱) مشاهده می شود که دقت روش برای نقاط مختلف مناسب است و مقادیر بدست آمده برای خطا در نقاط O و F و J که به فواصل ۶ کیلومتری از باس C می باشند، مساوی است و بنابراین پاسخ بدست آمده یکه نمی باشد و نمیتوان محل خطا را به این روش تعیین کرد ولی فاصله محل خطا از ابتدای فیدر با دقت بسیار مناسبی مشخص میگردد.

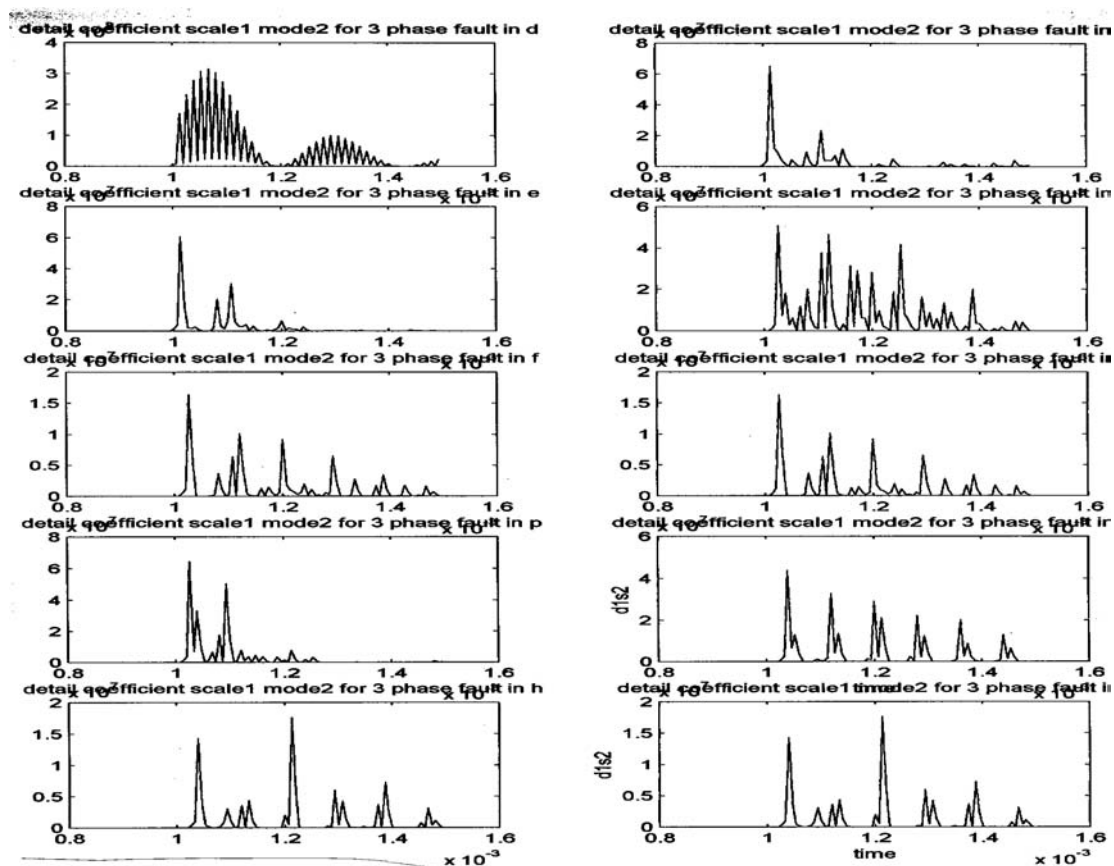
با قرار دادن خطای تکفاز در نقاط مختلف شبکه شکل (۵) شکل موجهای سیگنال سه فاز خطا و سیگنال مد ۱ و مد ۲ آن و

همچنین مولفه های جزئی سیگنال مد ۱ و مد ۲ در مقیاس ۱ در شکلهای (۸-الف) ، (۸-ب) ، (۸-ج) و (۹) مشاهده میگردد. فاصله های محاسبه شده برای محل های مختلف خطا با استفاده از شکل موجهای شبیه سازی شده در شکل (۹) در جدول (۲) نشان داده شده است. در این مرحله نیز شبیه سازی با فرکانس  $150 \text{ KHZ}$  صورت گرفته است. در ضمن در این نوع خطا، مقاومت مسیر خطا به زمین  $10 \Omega$  در نظر گرفته شده است. با استفاده از این شکل موجها می توان فاصله مکان خطای تکفاز از باس C را بدست آورد.

در جدول (۲) عدد بدست آمده برای خطا در نقطه Q نشان می دهد که اطلاعات پیک دوم این موج صحیح نمی باشد به عبارت دیگر موجک نشان دهنده پیک دوم مربوط به موج منعکس شده از C به نقطه خطا و انعکاس متوالی آن از نقطه خطا به C نمی باشد.



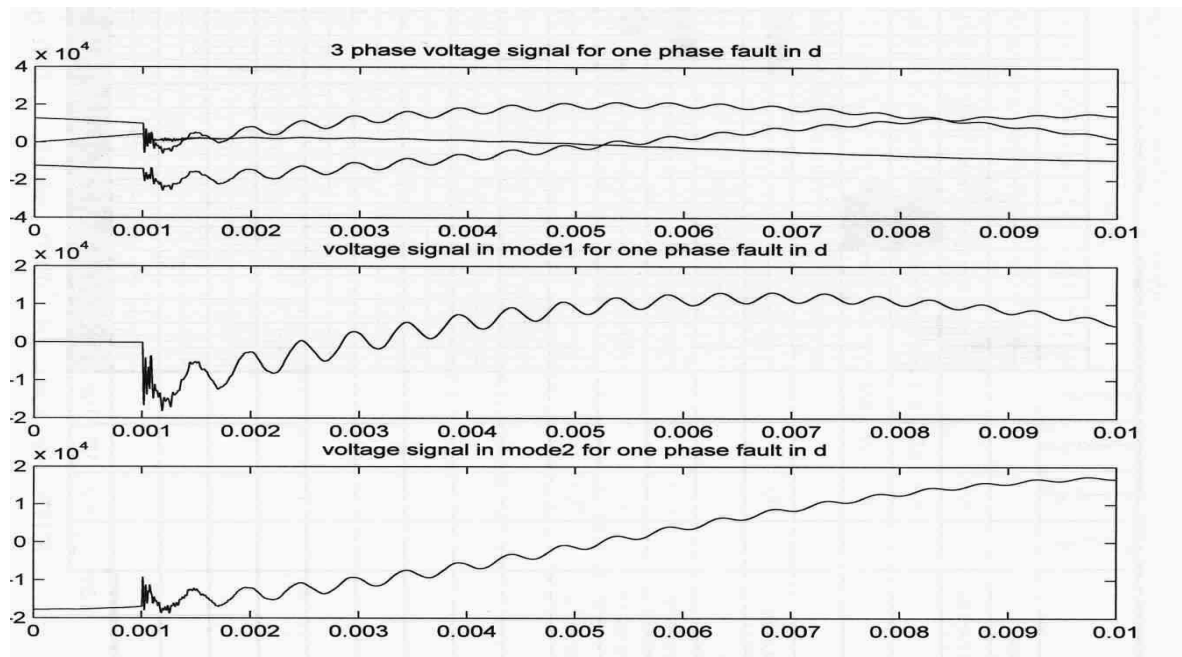
شکل ۶: شکل موج سیگنال ولتاژ سه فاز در نقطه C با وجود خطای سه فاز در نقطه D و مولفه های مد ۱ و مد ۲ آن



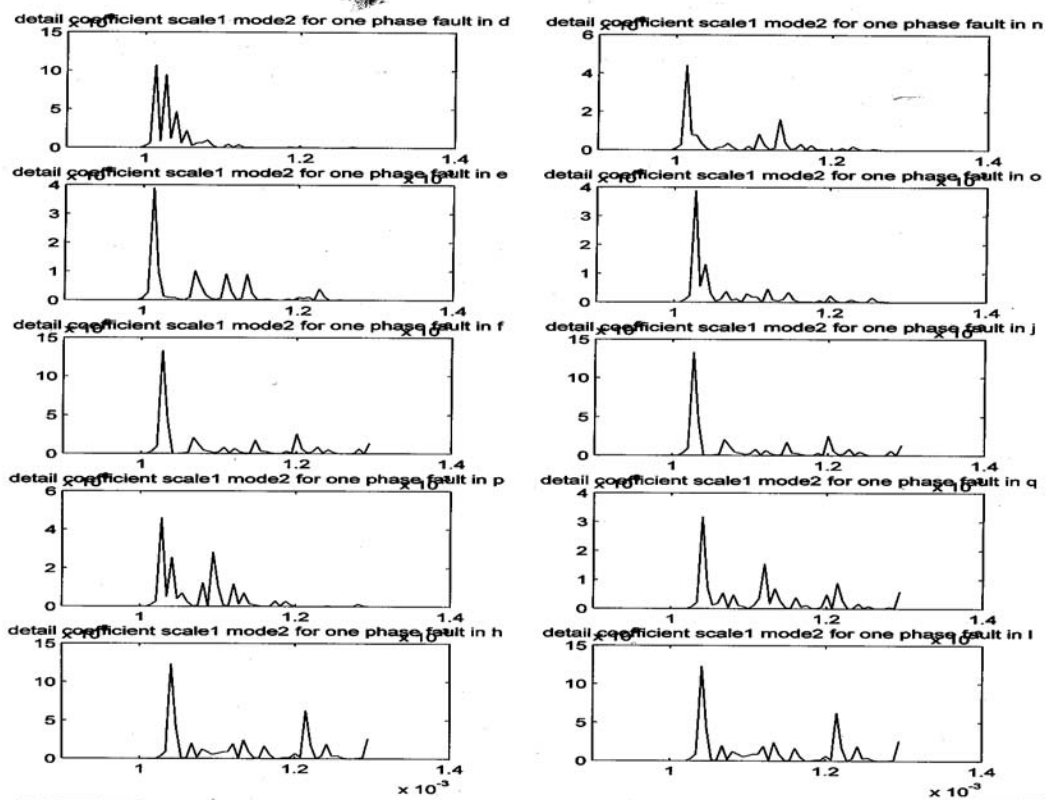
شکل ۷: شکل موج مولفه‌های جزئی مد ۲ مقیاس ۱ برای خطای اتصال کوتاه سه فاز در D و E و N و O و F و J و P و Q و L و H

جدول ۱: نتایج تست روش برای خطای اتصال کوتاه سه فاز روی شبکه نمونه شعاعی دارای انشعاب

محل خطا	زمان پیک اول (ms)	زمان پیک دوم (ms)	سرعت سیر موج (km/s)	فاصله محاسبه شده برای محل خطا (km)	خطای برحسب (%)
خطا در ۲ Km D	۱/۰۱۳۸	۱/۰۲۷۲	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۱/۹۹۴۸	-۰/۲۶
خطا در ۴ Km E	۱/۰۱۳۸	۱/۰۴۰۵	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^۰$	۳/۹۷۷۶	-۰/۵۶
خطا در ۴ Km N	۱/۰۱۳۸	۱/۰۴۰۵	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^۰$	۳/۹۷۷۶	-۰/۵۶
خطا در ۶ Km O	۱/۰۲۷۲	۱/۰۶۷	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۵/۹۲۵	-۱/۲
خطا در ۶ Km F	۱/۰۲۷۲	۱/۰۶۷	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۵/۹۲۵	-۱/۲
خطا در ۶ Km J	۱/۰۲۷۲	۱/۰۶۷	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۵/۹۲۵	-۱/۲
خطا در ۸ Km P	۱/۰۲۷۲	۱/۰۸۰۶	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۷/۹۴۹۶	-۰/۶۲
خطا در ۱۰ Km Q	۱/۰۴۰۵	۱/۱۰۷	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۹/۸۹۹۸	-۱
خطا در ۱۰ Km L	۱/۰۴۰۵	۱/۱۰۷	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۹/۸۹۹۸	-۱
خطا در ۱۰ Km H	۱/۰۴۰۵	۱/۱۰۷	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^۰$	۹/۸۹۹۸	-۱



شکل ۸: شکل موج سیگنال ولتاژ سه فاز در نقطه C با وجود خطای تکفاز در نقطه D و مولفه‌های مد ۱ و مد ۲ آن



شکل ۹: شکل موجهای مولفه‌های جزئی مد ۲ مقیاس ۱ برای خطای تکفاز در نقاط D و E و N و O و F و J و P و Q و L و H

**جدول ۲:** نتایج تست روش برای خطای اتصال کوتاه تکفاز روی شبکه نمونه شعاعی دارای انشعاب

خطا بر حسب (%)	فاصله محاسبه شده برای محل خطا (km)	سرعت سیر موج (km/s)	زمان پیک دوم (ms)	زمان پیک اول (ms)	محل خطا
-۰/۲۶	۱/۹۹۴۸	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۰۲۷۲	۱/۰۱۳۸	خطا در ۲ Km D
-۰/۶۳	۲/۹۷۴۸	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۰۴۰۵	۱/۰۱۳۸	خطا در ۴ Km E
-۰/۶۳	۳/۹۷۴۸	$۲/۹۷۷۴ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۰۴۰۵	۱/۰۱۳۸	خطا در ۴ Km N
-۰/۶۸	۵/۹۵۹	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۰۶۷۲	۱/۰۲۷۲	خطا در ۶ Km O
-۰/۶۸	۵/۹۵۹	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۰۶۷۲	۱/۰۲۷۲	خطا در ۶ Km F
-۰/۶۸	۵/۹۵۹	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۰۶۷۲	۱/۰۲۷۲	خطا در ۶ Km J
-۰/۷۴	۷/۹۴۰۳	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۰۸۰۵	۱/۰۲۷۲	خطا در ۸ Km P
۱۹/۳	۱۱/۹۳۲	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۱۲۰۶	۱/۰۴۰۵	خطا در ۱۰ Km Q
-۰/۶۳	۹/۹۳۶۶	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۱۰۷۲	۱/۰۴۰۵	خطا در ۱۰ Km L
-۰/۶۳	۹/۹۳۶۶	$۲/۹۷۹۵ \times ۱۰^{\circ}$	۱/۱۰۷۲	۱/۰۴۰۵	خطا در ۱۰ Km H

این روش نسبت به روشهای امیدانسی بسیار مناسب تر می باشد. در ضمن بدلیل عدم نیاز این روش به اطلاعات خاصی مانند نوع خطا، زمان خطا، مقاومت خطا، زاویه آغاز خطا و از همه مهمتر اطلاعات بار که معمولاً به سختی در شبکه توزیع در دسترس است، نسبت به روشهای امیدانسی از این لحاظ بسیار ارجح می باشد. در ضمن با روند خوبی که در ساخت و فراگیر شدن تجهیزات الکترونیک نوری طی می شود در آینده امکان نصب OCT و OPT هایی با نرخ نمونه برداری بسیار بالا در شبکه وجود خواهد داشت و دقت روش افزایش چشمگیری می یابد.

در این مقاله نشان داده شده است که می توان سرعت سیر موج در مد ۲ را بدست آورد و از آن در محاسبه محل خطا بهره جست که از این لحاظ نسبت به روش [۱۳] ارجح می باشد و همچنین مشخص شده است که روش به سرعت سیر موج در مد ۲ بسیار حساس نیست و سرعت سیر موج در مد ۲ را می توان با تقریب خوبی در فرکانس های بالا ثابت فرض کرد برخلاف سرعت سیر موج در مد ۱ که تغییرات شدیدتری دارد و به همین دلیل استفاده از مد ۲ به منظور محاسبه فاصله خطا در همه انواع خطا بهتر می باشد.

## ۶- نتیجه گیری

از مطالعات انجام شده بر روی روش می توان نتیجه گرفت که این روش برای نقاط نزدیک به ابتدای فیدر دارای دقت مناسبی است اما ممکن است برای نقاط دور از سر فیدر دقت خوبی نداشته باشد. اگرچه در این روش برای فاصله یابی خطا در شبکه توزیع به دلیل شعاعی بودن برخلاف شبکه انتقال [۱۳] نیازی به مطالعه مولفه مد زمین ندارد، اما به دلیل وجود انشعابات زیاد در شبکه توزیع گاهی موج برگشتی از باس اندازه گیری پس از منعکس شدن از نقطه خطا در مسیرهای مختلف میرا می گردد و به دلیل دامنه کوچکش به سختی در بین موجهای برگشتی از سایر باسها قابل شناسایی است. با وجود یک کاربر آشنا با مفهوم امواج سیار و موجکها، تشخیص موج منعکس شده موج اول از محل خطا کاری ممکن می باشد. گاهی با تحلیل سیگنال با چندین موجک مادر کاربر می تواند به پاسخ قطعی تری برسد، یا حتی با مشخص بودن محدوده خطا می توان سیگنال برگشتی از محل خطا را در بین موجکها تشخیص دهد، برای شبکه هایی که در آنها انشعاب زیادی وجود نداشته باشد و یا خطوط طولانی باشند،

## مراجع

- [11] Bo, A. Q., Johns, A. T. and Agarwal, R. K., "A Novel Fault Locator based on the Detection of Fault Generated High Frequency Transients", Sixth International Conference on Developments in Power System Protection, PP. 197-200, 1997
- [12] Bo, Z. Q., Weller, G., Jiang, F. and Yang, Q. X., "Application of GPS Based Fault Location Scheme for Distribution System" Proceeding of Conf. Power System Tech, Vol. 1, PP. 53-57, 1998
- [13] Magnago, F. H. and Abur, A., "Fault Location Using Wavelet", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, PP. 1475-1480, October 1998
- [14] Dommel, H.W., Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)
- [15] Alternative Transients Program, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon.
- [۱۶] مسلمی، ن. و عسکری، ج، بررسی و انتخاب روش مناسب تعیین محل خطا در شبکه فشار متوسط توزیع، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۱
- [17] Abur, A. and Magnago, F. H., "Use of Time Delays between Model Components in Wavelet Based Fault Location", Electrical Power and Energy Systems Journal, Vol. 22, PP. 397-403, 2000
- [18] MATLAB User's Guide, The Math Work Inc., Natick, MA.
- [19] Ranjendra, S. and Madaren, P. G., "Travelling-Wave Techniques Applied to the Protection of Teed Circuits: Principle of travelling-wave techniques", IEEE Trans. on Power APP. and Syst., Vol. PAS-104, No. 12, PP. 3544-3550, December 1995
- [20] Shaha-Eldin, E. H. and McLaren, P. G., "Travelling Wave Distance Protection Problem areas and Solutions", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, PP. 894-902, July 1988.
- [21] Blake, J., Transwadi, P. and de Carvlho, R. T., "In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 11, No. 1, PP. 116-121, January 1996.
- [22] Computation of Line Parameters -Theatrical Background, LEC EMTP Summer Course, KATHOLIEKE University Leuven- Belgium, Leuven, 15-19, July 1991
- [1] Das, R., Sachdev, M. S. and Sidhu, T. S., "A Fault Location for Subtransmission and Distribution Lines", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle Washington, CD Rom, ISBN: 0-7803-6423-6, 2000
- [2] Zhu, J., Lubkeman, D. L. and Girgis, A. A., "Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, PP. 801-809, April 1997
- [3] Reinei, C. A. and Alvarez, R. C. "Load Research for Fault Location in Distribution Feeders", IEE Proc.-Gener. Trans. and Distrib. Vol. 146, No. 2, PP. 115-120, March 1999
- [4] Elkateb, M. M., Burdi, M. K. and Johns, A. T., "Design Progress of a New Distribution System Fault Locator", CIRED 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Electricity Distribution, Vol. 2, PP. 2.22.1-2.22.4, 1993
- [5] Tenschert, W., "Fault Location Using Fault Distance Measurement of Digital Relays", Electricity Distribution, CIRED 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Electricity Distribution, Vol. 4, PP. 4. 20.1-4.20.4, 1993
- [6] Steiner, J. P., Weeks, W. L. and Ng, H. W., "An Automated Fault Locating System", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 7, Issue: 2, PP. 967-978, April 1992
- [7] Grossley, P., Davidson, M., and Gale, P., "Fault Location Using Travelling Wave", IEE Colloquium on Instrumentation in the Electrical Supply Industry, PP. 6/1-6/3, 1993
- [8] Sneddom, M. and Gale, P., "Fault Location on Transmission Lines", IEE Colloquium on Operational Monitoring of Distribution and Transmission System, PP. 2/1-2/3, 1997
- [9] Bo, Z. Q., Weller, G. and Redfern, M. A., "Accurate Fault Location Technique for Distribution System Using Fault-Generated High-Frequency Transient Voltage Signal", IEE Proc.-Gener. Trans. and Distrib., Vol. 146, No.1, PP. 73-79, January. 1999
- [10] Bo, Z. Q., Redfern, M. A. and Weller, G. C., "Positional Protection of Transmission Line Using Fault Generated High Frequency Transient Signals", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, Issue: 3, PP. 888-894, July 2000