



به کارگیری گذراهای پس از قطع کلید به منظور تعیین مکان خطا در خطوط انتقال ترکیبی (هوایی/کابلی) با استفاده از تبدیل موجک

جواد ساده
استادیار گروه برق
sadeh@um.ac.ir

اسماعیل نیازی
دانشجوی کارشناسی ارشد- قدرت
sm_ni731@stu-mail.um.ac.ir

دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد- ایران

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی خطا، خطوط انتقال ترکیبی (هوایی/کابلی)، گذراهای فرکانس بالای پس از قطع کلید، تبدیل موجک

چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای پیدا کردن مکان خطا در خطوط انتقال ترکیبی (کابلی/هوایی) ارائه شده که به جای گذراهای ناشی از وقوع خطا، از گذراهای پس از قطع کلید استفاده می‌کند. روش پیشنهادی در این مقاله تنها از گذراهای ولتاژ ایجاد شده پس از قطع کلید در یک پایانه (پایانه ابتدایی خط انتقال هوایی) نمونه برداری کرده و با استفاده از تبدیل موجک و آشکار نمودن اولین برخورد امواج سیار به پایانه، بخش خطا (کابلی یا هوایی) را مشخص نموده و سپس با استفاده از اولین و دومین برخورد امواج سیار، مکان خطا را محاسبه می‌کند. این الگوریتم از مدل گسترده خط انتقال، تبدیل مدال و تبدیل موجک گسسته db4 استفاده می‌کند و قابل استفاده به صورت on-line به دنبال عملکرد کلید قدرت یا به صورت off-line و با استفاده از داده‌های ذخیره شده

توسط تجهیزات نمونه‌برداری دیجیتال است. مزیت طرح پیشنهادی در این مقاله نسبت به سایر الگوریتم‌هایی که از گذراهای پس از قطع کلید استفاده می‌کنند این است که قابل استفاده در خطوط انتقال ترکیبی بوده و علاوه بر تعیین مکان خطا، بخش خطا را نیز مشخص می‌کند. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته توسط جعبه‌ابزار SimPowerSystems نرم‌افزار MATLAB Simulink توانایی‌ها و دقت بالای روش پیشنهادی را برای پیدا کردن مکان خطا در حالات مختلف سیستم و انواع خطاهای رخ داده تأیید می‌کند.

مقدمه

استفاده از کابل‌های زیرزمینی و همچنین خطوط ترکیبی (هوایی/کابلی) به دلیل ملاحظات ایمنی و همچنین به منظور

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مرجع [۱] روشی برای پیدا کردن مکان خطا در خطوط ترکیبی با استفاده از شبکه‌های عصبی- فازی ارائه شده است. مرجع [۱۳] نیز روشی بر مبنای تحلیل امواج سیار ایجاد شده پس از وقوع خطا با استفاده از تحلیل موجک معرفی می‌کند که از ولتاژ دو پایانه نمونه‌برداری می‌کند. در مراجع [۱۴ و ۱۵] نیز الگوریتم‌هایی جهت مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال ترکیبی معرفی شده که به ترتیب از شبکه‌های عصبی و شبکه‌های استنتاج فازی- تطبیقی برای تعیین مکان خطا استفاده می‌کنند.

این مقاله الگوریتمی برای یافتن مکان خطا در خطوط انتقال ترکیبی ارائه می‌دهد که در آن تنها از گذراهای فرکانس بالای ولتاژ در یک پایانه (پایانه ابتدای خط هوایی) نمونه برداری می‌شود، لذا نسبت به الگوریتم‌هایی که از دو پایانه نمونه برداری می‌کنند دارای این مزیت است که نیازی به تجهیزات مخابراتی، استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی GPS و همچنین همزمان کردن داده‌ها ندارد. ضمناً الگوریتم پیشنهادی به جای استفاده از امواج سیار ناشی از وقوع خطا، از گذراهای ایجاد شده پس از قطع کلید استفاده می‌کند تا از مشکلات روش‌های رایج امواج سیار اجتناب کند. در این روش فرض بر این است که نوع خطا (تکفاز، دوفاز، سه‌فاز و ...) توسط الگوریتمی دیگر مشخص شده است. الگوریتم با استفاده از تبدیل مدال امواج ولتاژ سه‌فاز را به یک مد زمین‌ی و دو مد هوایی تبدیل می‌کند. سپس با استفاده از تبدیل موجک اولین دو مدین برخورد امواج سیار پس از لحظه قطع کلید آشکار شده و پس از تعیین بخش خطا، مکان خطا محاسبه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی توانایی تعیین مکان خطا در حالات مختلف سیستم و همچنین انواع خطاها را دارد و به علاوه به صورت on-line و off-line قابل استفاده است. در این الگوریتم از مدل گسترده خط انتقال استفاده شده و فرض بر این است که خطوط به طور کامل ترانسپوز شده‌اند و پارامترهای خط هوایی و کابلی در دسترس است. لازم به ذکر است که الگوریتم نسبت به مقاومت خطا، زاویه ولتاژ در هنگام وقوع خطا و نوع خطا حساسیتی ندارد.

بالا بردن قابلیت اطمینان در خطوط انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در مناطق شهری رو به گسترش است [۱ و ۲]. مکان‌یابی دقیق خطا باعث کاهش هزینه‌های مربوط به تیم اعزامی برای پیدا کردن محل خطا، کاهش زمان پیدا کردن مکان خطا، فراهم کردن امکان تغذیه بدون وقفه (یا با کمترین وقفه) مشترکین و مصرف‌کنندگان، بهبود کارایی سیستم قدرت و تشخیص نقاط ضعیف و آسیب‌پذیر سیستم می‌شود [۳]. روش‌های مکان‌یابی خطا که در حال حاضر در خطوط انتقال اعم از خطوط انتقال هوایی یا خطوط انتقال کابلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند [۴]: دسته اول روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس خط پس از وقوع خطا بوده که روش‌های امپدانس نام دارند و تنها از مؤلفه اصلی سیگنال‌های ولتاژ و جریان بهره می‌برند [۵] و دسته دوم روش‌های مبتنی بر تحلیل امواج سیار ایجاد شده پس از وقوع خطا می‌باشد [۶-۸].

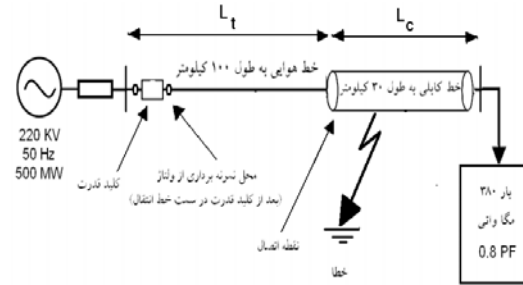
اکثر روش‌های مبتنی بر تحلیل امواج سیار، با استفاده از گذراهای ایجاد شده پس از وقوع خطا به محاسبه مکان خطا می‌پردازند که به دلیل عدم وابستگی به امپدانس منبع، مقاومت خطا، پخش بار و دقت بالاتر نسبت به روش‌های امپدانس در حال توسعه می‌باشند. استفاده از گذراهای ناشی از وقوع خطا با وجود مزایای عنوان شده، نسبت به خطاها و نویزهای سایر خطوط، زاویه ولتاژ در هنگام وقوع خطا، انعکاس امواج سیار از دیگر پایانه‌ها و تجهیزاتی که خارج از فاصله رله و نقطه خطا قرار دارند حساس بوده و در تشخیص خطاهای جلوی رله با مشکلاتی مواجه است [۹ و ۱۰]. لذا در مراجع [۹-۱۱] به جای استفاده از گذراهای ناشی از وقوع خطا، از گذراهای ایجاد شده پس از قطع کلید قدرت و در سمت خط انتقال و یا گذراهای دو سر کلید قدرت [۱۲] استفاده شده است تا علاوه بر استفاده از مزایای روش‌های امواج سیار از مشکلات آن‌ها اجتناب شود.

پیدا کردن مکان خطا در خطوط ترکیبی به دلیل نامساوی بودن سرعت انتشار موج و امپدانس توالی‌های مثبت، منفی و صفر در بخش هوایی و کابلی با پیچیدگی همراه است. در

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

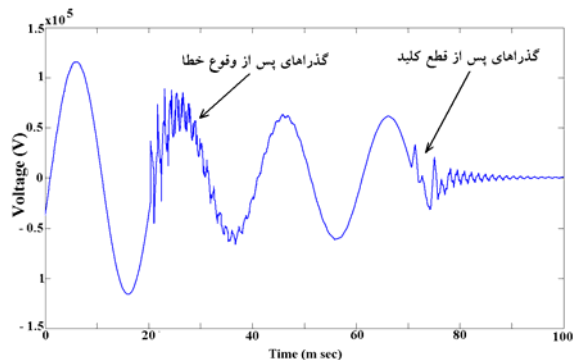
الگوریتم مکان‌یابی خطا در خطوط ترکیبی

چنانکه ذکر شد این مقاله الگوریتمی جهت مکان‌یابی خطا در خطوط انتقال ترکیبی با استفاده از گذراهای پس از قطع کلید ارائه می‌دهد. شکل ۱ نمایی از خط انتقال ترکیبی (هوایی/زمینی) را نشان می‌دهد که در آن خطای سه‌فاز به زمین در بخش کابلی اتفاق افتاده است.



شکل ۱: نمایی از خط انتقال ترکیبی

در شکل ۲ گذراهای ایجاد شده پس از وقوع خطا در لحظه ۲۰ میلی‌ثانیه پس از آغاز شبیه‌سازی و گذراهای ایجاد شده پس از قطع کلید در لحظه ۷۰ میلی‌ثانیه برای مقایسه مشاهده می‌شود.



شکل ۲: امواج گذرای پس از وقوع خطا و پس از قطع کلید

تبدیل مدال

تغییرات ناگهانی در سیستم مانند وقوع خطا باعث ایجاد امواج سیار ولتاژ و جریان در خطوط می‌شود. این امواج نقطه خطا در دو جهت منتشر شده و به پایانه‌ها و نقاط ناپیوستگی می‌رسند، در این نقاط بخشی از موج به بعد از ناپیوستگی نفوذ کرده و بخش دیگر منعکس می‌شود. این

پدیده تا میرایی امواج ادامه دارد. پاسخ معادله موج برای خط بدون تلفات را می‌توان به صورت دو موج پیشرو و پسرو بیان کرد [۱۶]:

$$(۱) \quad u(x, t) = f(x - vt) + f(x + vt)$$

$$(۲) \quad i(x, t) = \frac{1}{Z_0} [f(x - vt) - f(x + vt)]$$

$$(۳) \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$(۴) \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

$$(۵) \quad Z_0 = \frac{60 \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{\ln \left(\frac{4h}{r} \right)}$$

که و به ترتیب اندوکتانس و کاپاسیتانس واحد طول خط انتقال، امپدانس مشخصه و سرعت انتشار موج است. در سیستم سه فاز معادلات فوق تابع ولتاژ و جریان هر سه فاز می‌باشند. در این مقاله با استفاده از تبدیل موجک مدت زمان لازم برای اولین و دومین برخورد امواج سیار به محل رله (از لحظه قطع کلید) آشکارسازی و اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از آن‌ها بخش خطا و مکان خطا تعیین می‌شود. ولی از آن‌جا که در خطوط سه فاز کوپلینگ بسیار شدیدی بین ولتاژ و جریان‌های فازها وجود دارد لازم است که برای تجزیه و تحلیل آن‌ها توسط تبدیل موجک، به اثرات کوپلینگ بین فازها نیز توجه شود. لذا باید در ابتدا با استفاده از تبدیل مدال ولتاژها و جریان‌های سه‌فاز تبدیل به سه مؤلفه کاملاً مستقل شوند. این مؤلفه‌ها که شامل یک مؤلفه صفر (یا مؤلفه زمینی) و دو مؤلفه هوایی هستند کاملاً مستقل از هم بوده و می‌توانند به صورت مجزا از یکدیگر بررسی شوند. لذا حل مسئله به جای تحلیل سه‌فاز تبدیل به تحلیل تک‌فاز می‌شود. پس از آن می‌توان با استفاده از تبدیل موجک مؤلفه‌های مدال را به منظور تعیین بخش خطا و مکان خطا مورد بررسی قرار داد. معادلات ۶ و ۷ ارتباط بین مؤلفه‌های مدال و مؤلفه‌های سه‌فاز را نشان می‌دهد.

$$(۶) \quad U_p = T_{ii}^{-1} \times U_p$$

$$(۷) \quad I_p = T_{ii}^{-1} \times I_p$$

U و I مؤلفه‌های ولتاژ و جریان فازها بوده و اندیس‌های p و m مربوط به مقادیر فازی و مدال می‌باشد. T_{ii} و T_{ii} ماتریس-

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

می‌شود که در آن ضرائب مقیاس یا ضرائب تقریب از معادله زیر نتیجه می‌شوند:

$$s = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (9)$$

در رابطه فوق (t) پایه مقیاس نام دارد، j معرف مقیاس (فشرده‌گی یا کشیدگی) تابع موجک و k شیفت زمانی تابع موجک است. ضرائب موجک که ضرائب جزئیات نیز نامیده می‌شوند از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شوند:

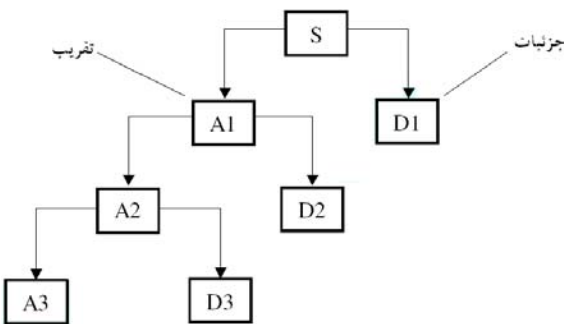
$$s = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (10)$$

(t) موجک مادر و (t) تابع مقیاس می‌باشد. (t) و (t) به ترتیب توابع مقیاس و موجک نام دارند که با انتخاب یک موجک مادر خاص به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$s(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (11)$$

$$s(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (12)$$

تاکنون در بیشتر الگوریتم‌های آشکارسازی خطا، تعیین نوع خطا، بخش خطا و مکان خطا از موجک‌های Daubechies استفاده شده است [۱۷]. در این مقاله از موجک db4 برای آشکارسازی اولین و دومین برخورد امواج سیار ولتاژ به محل رله (پس از قطع کلید) استفاده می‌شود. در تبدیل موجک سیگنال اصلی در هر مرحله به دو بخش تقریب و جزئیات تقسیم می‌شود و هر بخش نیز می‌تواند مجدداً با دقت بیشتر به دو بخش دیگر تقسیم شود. نمایی از این ساختار در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳: ساختار درختی تبدیل موجک

های تبدیل ولتاژ و جریان هستند. با استفاده از ماتریس‌های تبدیل کلارک، ودپل و کارنور می‌توان مؤلفه‌های سه‌فاز را به مدال تبدیل کرد. در این مقاله از ماتریس کلارک به منظور تبدیل مؤلفه‌های فازی ولتاژ به مدال به صورت زیر استفاده شده است [۱۶]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

مؤلفه صفر و مؤلفه‌های هوایی هستند. مؤلفه α قابل استفاده در تمامی انواع خطاها (تکفاز به زمین، دوفاز به زمین، سه فاز به زمین و سه فاز به هم) به غیر از خطای دوفاز به هم می‌باشد. در حالت اخیر از مؤلفه β به منظور محاسبه مکان خطا استفاده می‌شود [۱۳].

تبدیل موجک

از آنجا که سیگنال گذرا سیگنالی است که حالت غیر ثابت داشته و بر مؤلفه هارمونیک اصلی سوار است، لذا روش‌های متداول عددی (به عنوان مثال FFT) برای رسیدن به رزولوشن بالا در حوزه فرکانس و در عین حال، در حوزه زمان با مشکل مواجه هستند. داده‌ها، توابع و حتی عملگرها توسط تبدیل موجک به مؤلفه‌های فرکانسی متفاوت تقسیم شده و سپس هر مؤلفه با دقت متناسب با مقیاس آن مطالعه می‌شود. تبدیل موجک می‌تواند شباهت بین سیگنال و موجک‌ها (که مجموعه‌ای از امواج به سرعت میرا شونده و نوسانی هستند) را اندازه‌گیری کند. هر عضوی از مجموعه موجک، نمونه‌ای مقیاس شده و انتقال یافته (شیفت پیدا کرده) از یک تابع اصلی به نام موجک مادر است. هر تغییر ضعیف در سیگنال می‌تواند به صورت دقیق و به همراه جزئیات با درشت‌نمایی موجک‌های اصلی با یک مقیاس و نرخ نمونه‌برداری مناسب، مشاهده شود. مهمترین خاصیت تبدیل موجک مالتی رزولوشن بودن آن است که این امکان را می‌دهد که سیگنال پیچیده $f(t)$ به موجک‌ها و توابع مقیاس تبدیل شود. در این مقاله از تبدیل موجک گسسته برای مکان‌یابی خطا استفاده

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\begin{cases} T_1 = 2r & \text{Cable section} \\ T_1 < 2r & \text{Overhead section} \end{cases} \quad (13)$$

که در رابطه فوق τ مدت زمان لازم برای طی کردن مسیر رله تا محل اتصال خط هوایی و کابلی توسط امواج سیار است و از معادله ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$x = \frac{L_{\text{overhead}}}{v_0} \quad (14)$$

L_{overhead} طول خط هوایی و v_0 سرعت انتشار موج در خط هوایی است.

تعیین مکان خطا

روش پیشنهادی در این مقاله پس از تعیین بخش خطا به محاسبه فاصله خطا می‌پردازد. بنابراین بعد از اینکه تشخیص داده شد خطا در کدام بخش اتفاق افتاده است، با استفاده از زمان‌های اولین و دومین برخورد امواج سیار به محل رله مکان خطا مشخص می‌شود. اگر خطا در بخش کابلی رخ داده باشد، همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود T_1 زمان لازم برای رفت و برگشت موج ولتاژ از محل کلید تا نقطه اتصال خط هوایی و کابلی است. به این ترتیب T_2 زمان لازم برای رفت و برگشت موج ولتاژ از محل کلید قدرت تا نقطه وقوع خطا است. با مشاهده شکل و توجه به زمان‌های T_1 و T_2 کاملاً واضح است که تفاضل آن‌ها زمان لازم برای رفتن موج سیار ولتاژ از محل اتصال خط هوایی و کابلی تا نقطه خطا و بازگشت مجدد به نقطه ناپیوستگی است. اگر زمان لازم برای رسیدن موج سیار از محل اتصال خط هوایی و کابلی تا نقطه خطا τ_1 نامیده شود آنگاه:

$$T_2 - T_1 = 2 \times \tau_1 \quad (15)$$

و مکان خطا از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود:

$$x = L_{\text{overhead}} + v_0 \times \tau_1 \quad (16)$$

x فاصله خطا از محل ابتدای خط هوایی و v_0 سرعت انتشار موج در کابل است که از رابطه ۱۷ به دست می‌آید:

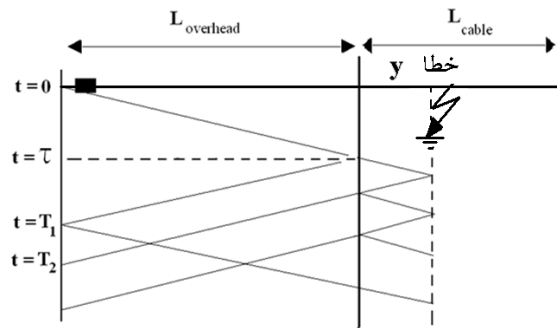
$$v_0 = \frac{L_{\text{overhead}}}{\tau_1} \quad (17)$$

v_0 و τ_1 اندوکتانس و کاپاسیتانس واحد طول کابل هستند.

در صورتی که خطا در بخش هوایی رخ داده باشد، T_1 زمان لازم برای رفت و برگشت موج ولتاژ از محل کلید تا نقطه

تعیین بخش خطا (کابلی یا هوایی)

در شکل ۴ نمودار نردبانی مربوط به یک خط انتقال ترکیبی (هوایی/زمینی) مشاهده می‌شود که در آن خطایی در بخش کابلی و به فاصله y از محل اتصال خط هوایی و کابلی رخ داده است. در این دیاگرام لحظه صفر زمانی است که خط انتقال توسط کلید قدرت قطع شده است.



شکل ۴: دیاگرام نردبانی

امواج سیار در طول خطوط منتشر شده و در برخورد با نقاط ناپیوستگی، قسمتی از موج نفوذ کرده و بخش دیگر منعکس می‌شود. اگر مدت زمان بین رفتن امواج از محل رله تا نقطه اتصال خط هوایی و کابلی تا زمان بازگشت مجدد به محل رله (که در شکل ۴ با T_1 نشان داده شده است) و همچنین مدت زمان لازم برای رفتن امواج از محل رله تا نقطه خطا و بازگشت آن به محل رله (که در شکل ۴ با T_2 نشان داده شده است) اندازه‌گیری شود می‌توان مکان خطا را مشخص نمود. البته ابتدا لازم است که بخش خطا مشخص شده سپس مکان خطا محاسبه شود.

با توجه به دیاگرام نردبانی نشان داده شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود که از زمان قطع خط انتقال توسط کلید قدرت، مدت زمان T_1 طول می‌کشد تا اولین موج به محل رله برخورد کند. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله تنها نیاز به آشکارسازی زمان اولین و دومین برخورد امواج سیار به محل رله را دارد و به دامنه امواج برخوردی نیازی ندارد. برای تعیین بخش خطا پس از آشکارسازی اولین برخورد و مشخص شدن زمان T_1 با استفاده از رابطه ۱۳ می‌توان بخش خطا را مشخص نمود.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

طول قسمت کابلی ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. خطوط سه فاز کاملاً ترانسپوز شده فرض شده‌اند. مشخصات خطوط و منبع تغذیه در جدول‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.

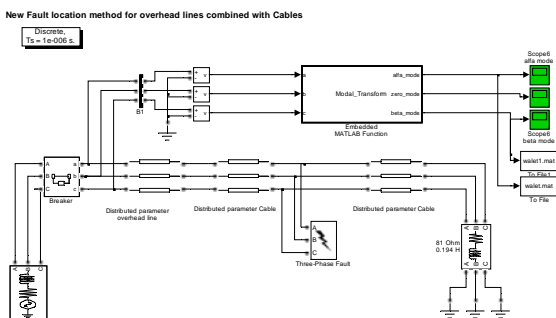
جدول ۱: مشخصات خطوط هوایی و کابلی

| پارامتر | توالی مثبت و منفی | توالی صفر | |
|---------|-------------------|-----------|----------|
| R Ω/km | ۰/۳۳۱۷ | ۰/۴۸۱۷ | خط هوایی |
| L mH/km | ۱/۳۲۶ | ۴/۵۹۵ | |
| C μF/km | ۰/۰۰۸۶۸۸ | ۰/۰۰۴۷۶۲ | |
| R Ω/km | ۰/۰۲۴ | ۰/۴۱۲ | خط کابلی |
| L mH/km | ۰/۴۲۷۸ | ۱/۵۳۳۸ | |
| C μF/km | ۰/۲۸۱۱ | ۰/۱۵۲۹ | |

جدول ۲: مشخصات منبع ولتاژ

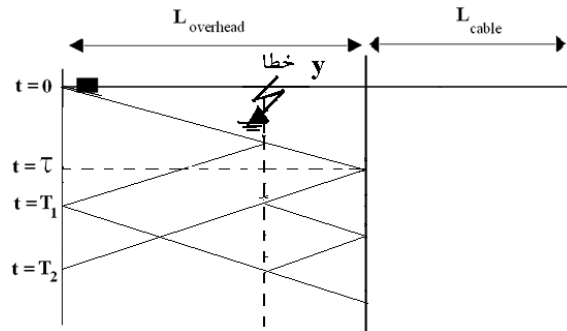
| ولتاژ | توان نامی | فرکانس | مقاومت | | اندوکتانس | |
|--------|-----------|--------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | | | توالی مثبت و منفی | توالی صفر | توالی مثبت و منفی | توالی صفر |
| 220 KV | 500 MVAR | 50 Hz | 13.96 Ω | 20.73 Ω | 0.35 H | 0.48 H |

چنانکه در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است نمونه برداری در پایانه ابتدایی خط هوایی و از سر کلید قدرت (سمت خط انتقال) انجام می‌شود. فرکانس نمونه برداری 1 MHz و فاصله گام‌های زمانی 1 μsec خواهد بود. شکل ۶ سیستم پیاده‌سازی شده در محیط نرم‌افزار MATLAB را نشان می‌دهد.



شکل ۶: سیستم شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار MATLAB

وقوع خطا است. T_2 نیز زمان لازم برای رفت و برگشت موج ولتاژ از محل کلید قدرت تا نقطه اتصال خط هوایی و کابلی است. شکل ۵ دیاگرام نردبانی مربوط به این وضعیت را نشان می‌دهد که در آن خطا در بخش هوایی و به فاصله y از محل اتصال خط هوایی و زمینی واقع شده است.



شکل ۵: دیاگرام نردبانی برای خطای رخ داده در بخش هوایی

در این حالت تفاضل زمان‌های T_1 و T_2 زمان لازم برای رفتن موج سیار ولتاژ از نقطه خطا تا محل اتصال خط هوایی و کابلی و بازگشت مجدد به نقطه خطا است. اگر زمان لازم برای رسیدن موج سیار از نقطه خطا تا محل اتصال خط هوایی و کابلی τ_2 نامیده شود آنگاه:

$$T_2 - T_1 = 2 \times \tau_2 \quad (18)$$

و مکان خطا از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$x = L_{overhead} - V_{oh} \times T_2 \quad (19)$$

x فاصله خطا از محل کلید قدرت و V_{oh} سرعت انتشار موج در خط هوایی است که از رابطه ۲۰ به دست می‌آید:

$$V_{oh} = \frac{1}{\sqrt{C_{oh} L_{oh}}} \quad (20)$$

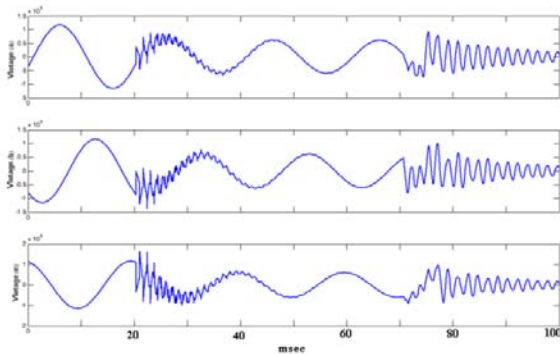
که C_{oh} و L_{oh} اندوکتانس و کاپاسیتانس واحد طول خط هوایی هستند.

ارزیابی روش پیشنهادی

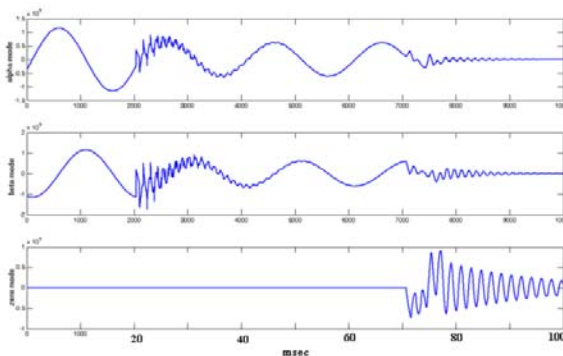
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، شبکه نمونه سه فاز ۲۲۰ کیلوولت که شامل خط ترکیبی (هوایی/کابلی) است توسط جعبه ابزار SimPowerSystems که از جعبه ابزارهای نرم‌افزار MATLAB است شبیه‌سازی شده است. طول خط هوایی سیستم مورد بررسی ۱۰۰ کیلومتر و

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

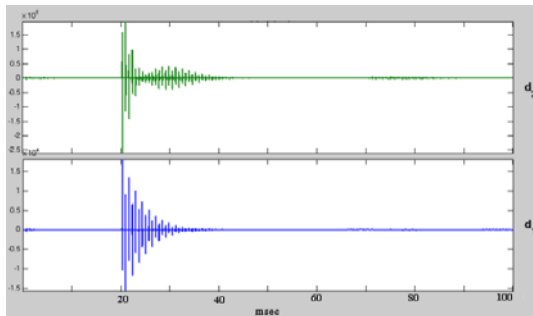
آمده که در شکل ۱۰ به صورت واضح‌تر (با کشیدگی در محور زمان) و به همراه زمان‌های T_1 و T_2 قابل مشاهده است.



شکل ۷: امواج ولتاژ سه‌فاز پس از وقوع خطا



شکل ۸: مؤلفه‌های α ، β و صفر



شکل ۹: تبدیل موجک db4 مؤلفه α از لحظه وقوع خطا

در جداول ۳ تا ۶ نتایج محاسبات مکان خطا برای خطاهای رخ داده در بخش کابلی در فاصله‌های خطای ۲، ۵، ۱۵ و ۲۵ کیلومتر آمده است. نتایج مربوط برای خطاهای تکفاز به زمین، دوفاز به زمین، سه‌فاز به زمین و زاویه ولتاژ منبع صفر می‌باشد. می‌توان نتیجه تغییر مقاومت خطا بر محاسبه مکان خطا در الگوریتم را در آن‌ها مشاهده کرد. در جدول ۷ نتایج برای خطاهای دوفاز به هم و سه‌فاز به هم در فاصله ۵ کیلومتر

عملکرد الگوریتم تحت شرایط مختلف سیستم، انواع گوناگون خطا، مقاومت‌های خطای گوناگون و زوایای متفاوت ولتاژ منبع مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. خطای محاسباتی برای مکان خطا از رابطه ۲۱ محاسبه می‌شود:

$$\% \text{ error} = \frac{|\text{Actual} - \text{Calculated}|}{\text{Actual}} \times 100 \quad (21)$$

به مکان واقعی خطا از محل پایانه ابتدایی خط انتقال هوایی و Calculated مکان محاسبه شده خطا از آن می‌باشد. در حالتی که خطا در بخش کابلی رخ داده باشد L طول بخش کابلی و در صورتی که خطا در بخش هوایی باشد L طول بخش هوایی است.

شبیه‌سازی برای خطاهای رخ داده در بخش کابلی برای فواصل ۲، ۵، ۱۵ و ۲۵ کیلومتر از محل اتصال خط هوایی و کابلی، مقاومت‌های خطای صفر، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ اهم، زوایای منبع صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه و برای خطاهای تکفاز به زمین، دوفاز به زمین، سه‌فاز به زمین، سه‌فاز به هم و دوفاز به هم انجام شده است. به عنوان مثال برای فاصله خطای ۱۵ کیلومتر از محل اتصال خط هوایی و کابلی، زاویه منبع ۶۰ درجه، مقاومت خطای ۱۰۰ اهم و خطای سه‌فاز به زمین، زمان‌های T_1 و T_2 به ترتیب ۰/۰۰۰۶۷۹ و ۰/۰۰۱۰۰۷ ثانیه اندازه‌گیری شده‌اند. از آنجا که T_1 برابر 2τ (۰/۰۰۰۶۷۹ ثانیه) است لذا بخش خطا در قسمت کابلی مشخص می‌شود و مکان خطای محاسبه شده برای این حالت ۱۵/۰۹۲ کیلومتر از محل اتصال خط هوایی و کابلی و خطای محاسباتی ۰/۳۰۷ درصد است.

همچنین برای حالتی که خطای دوفاز به زمین در بخش هوایی در فاصله ۳۴ کیلومتری از پایانه ابتدایی خط انتقال هوایی رخ داده و مقاومت خطا ۵۰ اهم و زاویه منبع صفر فرض شده، زمان‌های T_1 و T_2 به ترتیب ۰/۰۰۰۲۶۸ و ۰/۰۰۰۶۷۹ ثانیه اندازه‌گیری شده‌اند که به این ترتیب چون T_1 از 2τ کوچکتر است لذا بخش خطا در قسمت هوایی تعیین می‌شود و مکان خطا ۳۴/۰۷۹ کیلومتر محاسبه می‌شود که ۰/۰۷۹ درصد خطای محاسباتی دارد.

در شکل ۷ امواج ولتاژ سه‌فاز پس از وقوع خطا در لحظه ۲۰ میلی‌ثانیه و پس از قطع کلید در لحظه ۷۰ میلی‌ثانیه مشاهده می‌شود، در شکل ۸ مؤلفه‌های α ، β و صفر در همان بازه نشان داده شده‌اند. در شکل ۹ نیز نمونه‌ای از تبدیل موجک مؤلفه α

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی خطا در فاصله ۵ کیلومتری و زاویه ولتاژ صفر

| نوع خطا | مقاومت خطا Ω | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| تکفاز به زمین | ۰ | ۴/۹۶۴ | ۰/۱۲۰ |
| | ۵۰ | ۵/۰۱۵ | ۰/۰۵۰ |
| | ۱۰۰ | ۵/۰۶۴ | ۰/۲۱۳ |
| دوفاز به زمین | ۰ | ۵/۰۷۳ | ۰/۲۴۳ |
| | ۵۰ | ۴/۹۵۹ | ۰/۱۳۷ |
| | ۱۰۰ | ۵/۰۱۶ | ۰/۰۵۳ |
| سه‌فاز به زمین | ۰ | ۵/۰۳۱ | ۰/۱۰۳ |
| | ۵۰ | ۵/۰۲۲ | ۰/۰۷۳ |
| | ۱۰۰ | ۴/۹۸۱ | ۰/۰۶۳ |

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی خطا در فاصله ۱۵ کیلومتری و زاویه ولتاژ صفر

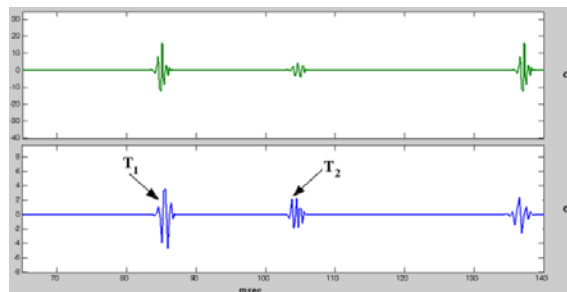
| نوع خطا | مقاومت خطا Ω | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| تکفاز به زمین | ۰ | ۱۵/۱۱۴ | ۰/۳۸۰ |
| | ۵۰ | ۱۵/۱۳۴ | ۰/۴۴۷ |
| | ۱۰۰ | ۱۴/۹۸۴ | ۰/۰۵۳ |
| دوفاز به زمین | ۰ | ۱۵/۰۳۹ | ۰/۱۳۰ |
| | ۵۰ | ۱۵/۰۴۵ | ۰/۱۵۰ |
| | ۱۰۰ | ۱۵/۰۳۰ | ۰/۱۰۰ |
| سه‌فاز به زمین | ۰ | ۱۵/۱۱۵ | ۰/۳۸۳ |
| | ۵۰ | ۱۴/۹۸۵ | ۰/۰۵۰ |
| | ۱۰۰ | ۱۵/۰۶۷ | ۰/۲۲۳ |

جدول ۶: شبیه‌سازی خطا در فاصله ۲۵ کیلومتری و زاویه ولتاژ صفر

| نوع خطا | مقاومت خطا Ω | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| تکفاز به زمین | ۰ | ۲۵/۰۲۲ | ۰/۰۷۳ |
| | ۵۰ | ۲۵/۰۳۱ | ۰/۱۰۳ |
| | ۱۰۰ | ۲۵/۱۱۵ | ۰/۳۸۳ |
| دوفاز به زمین | ۰ | ۲۴/۹۵۹ | ۰/۱۳۷ |
| | ۵۰ | ۲۴/۹۷۳ | ۰/۰۹۰ |
| | ۱۰۰ | ۲۵/۰۲۶ | ۰/۰۸۷ |
| سه‌فاز به زمین | ۰ | ۲۴/۹۸۴ | ۰/۰۵۳ |
| | ۵۰ | ۲۴/۹۸۵ | ۰/۰۵۰ |
| | ۱۰۰ | ۲۵/۰۶۱ | ۰/۲۰۳ |

مشاهده می‌شود که در آن برای تمامی حالات مقاومت خطا صفر در نظر گرفته شده است. در این جدول نتایج شبیه‌سازی برای سه حالت مختلف زاویه منبع ولتاژ شامل زاویه صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه مشاهده می‌شود.

در جداول ۸ و ۹ نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی برای پیدا کردن مکان خطا در بخش هوایی برای خطاهای تکفاز به زمین، دوفاز به زمین و سه‌فاز به زمین برای فاصله‌های خطای ۳۴، ۵۳ و ۹۸ کیلومتر و زاویه منبع صفر آورده شده است. نتایج جدول ۸ مربوط به مقاومت خطای صفر و جدول ۹ مقاومت خطای ۵۰ اهم می‌باشد. لازم به یادآوری است که در هر مرحله ابتدا با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده در مقاله، بخش خطا تعیین شده و سپس نتایج به دو دسته خطاهای رخ داده در بخش هوایی و خطاهای رخ داده در بخش کابلی تقسیم شده‌اند که نتایج حاصل در جداول آورده شده است.



شکل ۱۰: تبدیل موجک db4 مؤلفه α پس از قطع کلید تا لحظاتی بعد از آن

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی خطا در فاصله ۲ کیلومتری و زاویه ولتاژ صفر

| نوع خطا | مقاومت خطا Ω | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| تکفاز به زمین | ۰ | ۲/۰۶۳ | ۰/۲۱۰ |
| | ۱۰ | ۲/۰۸۹ | ۰/۳۰۰ |
| | ۵۰ | ۲/۱۲۳ | ۰/۴۱۰ |
| دوفاز به زمین | ۰ | ۱/۹۴۶ | ۰/۱۸۰ |
| | ۱۰ | ۱/۹۰۳ | ۰/۳۲۳ |
| | ۵۰ | ۱/۹۷۳ | ۰/۰۹۰ |
| سه‌فاز به زمین | ۰ | ۱/۹۵۹ | ۰/۱۳۷ |
| | ۱۰ | ۲/۰۸۹ | ۰/۳۰۰ |
| | ۵۰ | ۲/۰۱۶ | ۰/۰۵۳ |
| سه‌فاز به زمین | ۱۰ | ۱/۹۸۱ | ۰/۰۶۳ |
| | ۵۰ | ۲/۰۲۲ | ۰/۰۷۳ |
| | ۱۰۰ | ۲/۰۷۷ | ۰/۲۵۶ |

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

محاسبه مکان خطا با استفاده از تبدیل‌های موجک db2, db3, db5 ارائه شده است. ضمناً موجک‌های با درجه بالاتر به دلیل پهن‌تر شدن دامنه زمانی موجک و همچنین بیشتر شدن تعداد موجک‌ها خطای محاسباتی بیشتری را به همراه دارند که از ارائه نتایج مربوط به آن‌ها خودداری شده است.

جدول ۱۰: مقایسه نتایج شبیه‌سازی خطا در فاصله ۲ کیلومتری با استفاده از db2, db3, db4, db5 و مقاومت خطای صفر

| نوع خطا | مقاومت خطا Ω | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| تکفاز به زمین | Db2 | ۲/۱۶۵ | ۰/۵۵۰ |
| | Db3 | ۲/۱۳۳ | ۰/۴۴۳ |
| | Db4 | ۲/۱۲۳ | ۰/۴۱۰ |
| | Db5 | ۱/۸۴۶ | ۰/۵۱۳ |
| دوفاز به زمین | Db2 | ۱/۹۲۴ | ۰/۲۵۳ |
| | Db3 | ۱/۹۳۰ | ۰/۲۳۳ |
| | Db4 | ۱/۹۵۹ | ۰/۱۳۷ |
| | Db5 | ۲/۱۰۲ | ۰/۳۴۰ |
| سه‌فاز به زمین | Db2 | ۲/۰۵۶ | ۰/۱۸۹ |
| | Db3 | ۱/۹۶۹ | ۰/۱۰۳ |
| | Db4 | ۲/۰۲۲ | ۰/۰۷۳ |
| | Db5 | ۲/۰۸۹ | ۰/۲۹۷ |

با بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود که تغییر مقاومت خطا تأثیر قابل توجهی بر دقت الگوریتم پیشنهادی در این مقاله ندارد. از مقایسه نتایج ارائه شده در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که تغییر فاصله خطا بر دقت الگوریتم بی‌اثر می‌باشد. همچنین مقایسه ارقام مربوط به جدول ۷ که در آن به بررسی تغییر زاویه منبع به هنگام خطا می‌پردازد نشان از بی‌تأثیر بودن آن بر دقت الگوریتم دارد. البته این نتیجه دور از انتظار نیست، زیرا به هنگام قطع کلید پس از اینکه جریان به طور کامل قطع می‌شود، به دلیل غالب بودن خاصیت سلفی خطوط، ولتاژ در حداکثر مقدار خود قرار داشته و لذا مشکل نرم بودن پیشانی موج سیار ولتاژ در حالت زاویه‌های ولتاژ کوچک به کلی از بین می‌رود. با توجه به اینکه دقت اکثر روش‌های مکان‌یابی خطا که مبتنی بر

جدول ۷: خطا در فاصله ۵ کیلومتری و زوایای ولتاژ متفاوت

| نوع خطا | زاویه ولتاژ به هنگام خطا (درجه) | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|--------------|---------------------------------|----------------------|-------------------|
| دوفاز به هم | ۰ | ۵/۰۳۱ | ۰/۱۰۳ |
| | ۳۰ | ۵/۰۶۱ | ۰/۲۰۳ |
| | ۶۰ | ۴/۹۷۳ | ۰/۰۹۰ |
| سه‌فاز به هم | ۰ | ۵/۰۷۳ | ۰/۲۴۳ |
| | ۳۰ | ۵/۰۶۱ | ۰/۲۰۳ |
| | ۶۰ | ۴/۹۵۹ | ۰/۱۳۷ |

جدول ۸: خطا در بخش هوایی و زاویه ولتاژ صفر و مقاومت خطای صفر

| نوع خطا | مکان واقعی خطا (km) | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| تکفاز به زمین | ۳۴ | ۳۴/۰۱۲ | ۰/۰۱۲ |
| | ۵۳ | ۵۳/۰۹۸ | ۰/۰۹۸ |
| | ۹۸ | ۹۷/۹۷۸ | ۰/۰۲۲ |
| دوفاز به زمین | ۳۴ | ۳۴/۱۴۲ | ۰/۱۴۲ |
| | ۵۳ | ۵۲/۷۸۶ | ۰/۲۱۴ |
| | ۹۸ | ۹۸/۲۱۲ | ۰/۲۱۲ |
| سه‌فاز به زمین | ۳۴ | ۳۳/۶۵۷ | ۰/۳۴۳ |
| | ۵۳ | ۵۳/۳۲۹ | ۰/۳۲۹ |
| | ۹۸ | ۹۸/۰۶۶ | ۰/۰۶۶ |

جدول ۹: خطا در بخش هوایی و زاویه ولتاژ صفر و مقاومت خطای ۵۰ اهم

| نوع خطا | مکان واقعی خطا (km) | مکان محاسبه شده (km) | درصد خطای محاسبات |
|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| تکفاز به زمین | ۳۴ | ۳۴/۲۳۵ | ۰/۲۳۵ |
| | ۵۳ | ۵۳/۰۴۹ | ۰/۰۴۹ |
| | ۹۸ | ۹۸/۱۷۸ | ۰/۱۷۸ |
| دوفاز به زمین | ۳۴ | ۳۴/۰۷۹ | ۰/۰۷۹ |
| | ۵۳ | ۵۳/۰۹۹ | ۰/۰۹۹ |
| | ۹۸ | ۹۷/۷۶۳ | ۰/۲۳۷ |
| سه‌فاز به زمین | ۳۴ | ۳۳/۹۱۲ | ۰/۰۸۸ |
| | ۵۳ | ۵۳/۰۴۷ | ۰/۰۴۷ |
| | ۹۸ | ۹۷/۸۶۵ | ۰/۱۳۵ |

نتایج ارائه شده در جداول فوق مربوط به محاسبه مکان خطا با استفاده از تبدیل موجک db4 می‌باشد. در جدول ۱۰ نتایج

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

نسبت به روش‌های دوپایانه و روش‌هایی که از ولتاژ و جریان استفاده می‌کنند مقرون به صرفه‌تر است.

مراجع

- [1] C.K. Jung, K.H. Kim, J.B. Lee and B. Klocklb, "Wavelet and Neuro-Fuzzy Based Fault Location for Combined Transmission systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems Vol. 29, No. 6, July 2007, pp. 445-454
- [2] M.I. Gilany, E.M. Tag Eldin, M.M. Abdel Aziz and D.K. Ibrahim, "An Accurate Scheme for Fault Location in Combined Overhead Line With Underground Power Cable," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, San Francisco, CA, Jun. 12-16, 2005
- [3] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines", IEEE Std C37.114™-2004
- [4] Z. Qinghao and D.W.P. Thomas, "Accurate Fault Location Algorithms for Two-Parallel Transmission Lines Using One-End Data", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol.1, pp. 527-530, 28 Oct.-2 Nov. 2001
- [5] C. Eduardo, M. Pereira and L. Zanetta, "Fault Location in Transmission Lines Using One-Terminal Postfault Voltage data", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, No. 2, Apr. 2004, pp.570-575
- [6] H.Y. Zhuang, X. Lin and M. Chao, "A New Fault Location Method", IEEE Proceedings on Power System Technology, October 2002, Vol.2, pp. 1142-1145
- [7] J. Sadeh, N. Hadjsaid, A.M. Ranjbar and R. Feuillet, "Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No.3, July 2000, pp. 1027-1033
- [8] W. Dai, M. Fang and L. Cui, "Traveling Wave Fault Location System", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, Dalian, China, 2006
- [9] V. Faybisovich and M.I. Khoroshev, "Frequency Domain Double-Ended Method of Fault Location for Transmission Lines", Transmission and Distribution Conference and Exposition, Southern California, Alhambra, April 2008
- [10] E. Styvaktakis, M.H.J. Bollen and I.Y.H. Gu, "A Fault Location Technique Using High Frequency Fault Clearing Transients", IEEE Power Engineering Review, May 1999
- [11] L. Yongli, Z. Yi and M. Zhiyu, "Fault Location Method Based on the Periodicity of the Transient Voltage Travelling Wave", IEEE Proceedings.

تحلیل امواج سیار هستند به مقدار زاویه ولتاژ به هنگام خطا حساسیت زیادی دارد لذا عدم حساسیت الگوریتم پیشنهادی در این مقاله نسبت به زاویه ولتاژ یکی از مزایای مهم روش ارائه شده محسوب می‌شود. مشاهده نتایج جدول‌های ۸ و ۹ نیز نشان می‌دهد که دقت الگوریتم در بخش هوایی و کابلی تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارد. همچنین به وضوح دیده می‌شود که مقاومت خطا، فاصله خطا، زاویه ولتاژ به هنگام وقوع خطا و نوع خطا بر دقت الگوریتم در بخش هوایی نیز بی‌تأثیرند. نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ نیز نشان می‌دهد که موجک db4 نسبت به سایر موجک‌ها دقت بیشتری در محاسبه مکان خطا ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی نوین ارائه شده است که برای تعیین بخش خطا و مکان خطا در خطوط ترکیبی (هوایی/کابلی) به کار گرفته می‌شود. این الگوریتم بر خلاف روش‌های رایج مبتنی بر تحلیل امواج سیار، به جای استفاده از امواج سیار پس از وقوع خطا، از امواج سیار ایجاد شده پس از قطع کلید استفاده می‌کند. این امر سبب می‌شود که تأثیر نامطلوب تغییر زاویه ولتاژ منبع بر دقت الگوریتم برطرف شود، الگوریتم از امواج سیار منعکس شده از سایر خطوط تأثیری نپذیرد و همچنین قادر به تشخیص خطاهای جلوی رله باشد. شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار MATLAB علاوه بر تأیید دقت بالای الگوریتم نشان می‌دهد که روش پیشنهادی حساسیتی نسبت به مقاومت خطا و فاصله خطا نداشته و توانایی تشخیص انواع خطاهای تکفاز، دوفاز و سه‌فاز را دارد. با توجه به اینکه روش پیشنهادی در این مقاله تنها از ولتاژ یک پایانه نمونه برداری می‌کند لذا نسبت به روش‌های دو-پایانه و روش‌هایی که از امواج ولتاژ و جریان نمونه‌برداری می‌کنند دارای این مزیت است که تجهیزات نمونه‌برداری کمتری نیاز داشته و همچنین نیازی به تجهیزات مخابراتی، همزمان کردن داده‌ها و سیستم موقعیت یاب جهانی ندارد و

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

PowerCon. International Conference on Power System Technology, Vol. 3, Tianjin China, Nov. 2004, pp. 389-392

[۱۲] نوید غفارزاده و گئورگ قره پتیان، "روش نوین

جهت تعیین مکان خطا در خط انتقال به کمک

تبدیل موجک"، بیست و دومین کنفرانس بین

المللی برق آبان‌ماه ۱۳۸۶

[13] M.I. Gilany, E.M. Tag Eldin, M.M. Abdel Aziz and D.K. Ibrahim, "Travelling Wave-Based Fault Location Scheme for Aged Underground Cable Combined with Overhead Line", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 2, No. 2, Art. 1032, 2005

[۱۴] ح. افرادی و ج. ساده، "تعیین محل خطا در

خطوط انتقال ترکیبی (هوایی / کابلی) به کمک شبکه

عصبی"، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، آبان-

ماه ۱۳۸۶

[15] J. Sadeh and H. Afradi, "A new and accurate fault location algorithm for combined transmission lines using Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System", Electric Power Systems Research, Volume 79, No. 11, Nov. 2009, pp. 1538-1545

[16] A. Elhaffar and M. Lehtonen, "Travelling Waves Based Earth Fault Location in 400-kV Transmission Network Using Single-End Measurement", Large Engineering Systems Conference on Power Engineering 2004, LESCOPE-04, 28 - 30 July 2004, pp. 53 - 56.

[17] A.H. Osman, O.P. Malik, "Transmission Line Distance Protection Based on Wavelet Transform", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, No. 2, April 2004, pp. 515 - 523.