

A Novel Fault Location Method for More Electric Aircraft Distribution System

Mehran Hashemian¹, Roozbeh Kamali², Mohammad Reza Soltanpour³

¹ Dept. of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science & Technology, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Dept. of Electrical Engineering, Shahid Sattari University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract:

Despite all the advantages that More Electric Aircrafts (MEA) provide to conventional aircrafts, increasing the electric power demand and the operating voltage in these aircraft, has led to expanding the aircraft distribution system, increasing the cable used, and subsequently, increasing the probability of fault. In this type of aircrafts, due to the limitations in the structure and available space on the aircraft, cables are often located outside the sight and aircraft gaps. Therefore, in this paper, in order to increase aircraft safety and reduce the maintenance time, a novel fault location method is proposed, which determines the fault occurrence and exact location of all faults. For this purpose, in this paper, first by using the wavelet analysis of fault currents, the fault occurrence and the zone of fault is determined. Then, using positive sequence of distributed cable model as well as unsynchronized voltage and current of the both terminals of the fault zone, the exact location of fault using a two-step algorithm combining the PSO and the Newton method is obtained. The proposed method is implemented in an aircraft distribution system using MATLAB/SIMULINK, and the simulation results confirm the accuracy and high precision of the proposed method.

Keywords: Wavelet Analysis, Intermittent Arc Fault, Aircraft Distribution System, Fault Location.

تشخیص وقوع و مکان خطا در سیستم توزیع برق هواپیما

سیدمهران هاشمیان عطاآبادی^۱، روزبه کمالی^۲، محمدرضا سلطانپور^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

m.hashemian@eng.ui.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - تهران - ایران

roozbeh.kamali89@yahoo.com

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - تهران - ایران

soltanpour@ssau.ac.ir

چکیده: با وجود تمام مزایای هواپیماهای با تجهیزات الکتریکی بیشتر (MEA)^۱ نسبت به هواپیماهای متداول، افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و ولتاژ بهره‌برداری در این نوع هواپیماها، سبب گسترده‌شدن سیستم توزیع برق هواپیما، افزایش کابل‌های استفاده‌شده و در نتیجه، افزایش احتمال وقوع خطا شده است. در این نوع هواپیماها با توجه به محدودیت‌های موجود در ساختار و فضای هواپیما، کابل‌ها بیشتر در مکان‌های خارج از دید و شکاف‌ها قرار دارند. بر اساس این، در این مقاله به منظور افزایش ایمنی هواپیما و کاهش مدت زمان تعمیرات در شرایط وقوع خطا، الگوریتم مکان‌یابی خطایی ارائه می‌شود؛ این الگوریتم ضمن تعیین وقوع خطا، مکان دقیق آن را به صورت آنلاین تعیین می‌کند. برای این منظور در این مقاله ابتدا با تحلیل موجک جریان خطوط، وقوع خطا و ناحیه خطادار تعیین می‌شوند. سپس با استفاده از مدار معادل توالی مثبت مدل گسترده کابل و همچنین ولتاژ و جریان غیرسنکرون در ابتدا و انتهای ناحیه خطادار، مکان دقیق خطا با استفاده از یک الگوریتم دو مرحله‌ای ترکیبی از الگوریتم PSO و روش تکراری نیوتون، مستقل از پارامترهای کابل به دست می‌آید. مسئله مدنظر روی سیستم توزیع برق هواپیما با MATLAB/SIMULINK انجام شد و نتایج شبیه‌سازی، درستی عملکرد و دقت زیاد روش پیشنهادی را تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل موجک، خطای قوس متناوب، سیستم توزیع برق هواپیما، مکان‌یابی خطا

۱- مقدمه

[۱]. در این ساختار، برخی ادوات مکانیکی و هیدرولیکی با معادل الکتریکی آن جایگزین می‌شوند. این جایگزینی ادوات و همچنین تغییر سیستم توزیع الکتریکی از جمله تغییر سطح ولتاژ، سبب کاهش حجم و وزن هواپیما و در نتیجه، کاهش مصرف سوخت، تولید آلودگی و در نهایت اثرات زیست‌محیطی هواپیما می‌شود [۲]. همچنین استفاده از این ساختار سبب افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود و همچنین امکان تعمیر و نگهداری به صورت مستقیم در هواپیما را فراهم می‌کند.

اما با وجود همه مزایایی که هواپیماهای الکتریکی نسبت به هواپیماهای متداول فراهم می‌کنند، افزایش وابستگی به

هواپیماهای با تجهیزات الکتریکی بیشتر (MEA) با هدف بهبود عملکرد هواپیما از قبیل بهبود مصرف سوخت، کاهش هزینه نگهداری و اثرات زیست محیطی ارائه شده‌اند

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۷

نام نویسنده مسئول: محمدرضا سلطانپور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - دانشکده مهندسی برق

قوس مناسب است؛ اما هنوز اطلاعاتی درباره مکان خطا در اختیار قرار نمی‌دهد. همچنین انتخاب مکان مناسب برای این ادوات نیز در تعیین خطای قوس از دیگر پیچیدگی‌های استفاده از مدار شکن‌های قوس است.

تا کنون روش‌های مختلفی به منظور مکان‌یابی خطا در سیستم توزیع برق هوایما ارائه شده‌اند. به‌طور کلی روش‌های موجود براساس تکنیک استفاده‌شده، داده‌های مورد نیاز و روش حل به چند گروه تقسیم می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی با تمرکز بر توسعه روش‌های مبتنی بر تکنیک انعکاس امواج صورت گرفته است [۷]. در این روش‌ها معمولاً یک موج به درون کابل، ارسال و براساس موج منعکس شده وقوع خطا و مکان آن تخمین زده می‌شود. روش‌های مبتنی بر انعکاس از لحاظ تکنیک استفاده‌شده به روش‌های بررسی انعکاس در حوزه زمان [۸]، در حوزه فرکانس [۹]، بررسی توالی زمانی انعکاس در حوزه زمان (STDR^۰) [۱۰] و بررسی انتشار طیف زمانی انعکاس (SSTD^۱) [۱۰] تقسیم‌بندی می‌شوند. استفاده از این روش‌ها در تعیین خطا در خطاهای شدید مناسب است؛ اما به تعیین خطاهای ضعیف از قبیل قوس متناوب قادر نیست. همچنین این روش‌ها نیازمند اطلاع از سرعت سیر موج درون کابل و پارامترهای کابل است که با کمی تغییرات در طول زمان ممکن است دقت و کارایی خود را از دست بدهند [۱۱]. همچنین در حالت کلی استفاده از این روش‌ها در حالت آفلاین و در شرایطی انجام می‌گیرد که هوایما روی زمین است؛ بنابراین هنوز احتمال وقوع خطای قوس متناوب وجود خواهد داشت که تنها در طول پرواز اتفاق می‌افتد. در [۱۲] به‌منظور بررسی مکان خطا از روش اندازه‌گیری مقاومت کابل استفاده شده است. این روش نیز نیازمند جداسازی کابل است که عملی نیست. در [۱۳] از ویژگی انتقال اطلاعات از طریق خطوط قدرت (PLC) به‌منظور تعیین وقوع و مکان خطا براساس رفتار موج حامل ارائه شده است. این روش نیازمند نصب تعدادی فرستنده و گیرنده در نقاط مختلف کابل‌ها است که در سیستم‌های توزیع هوایما امکان آن وجود ندارد. در [۱۴] روشی براساس تخمین امپدانس خودی خط به خط هارمونیک به‌منظور تعیین وقوع و مکان خطا ارائه شده

انرژی الکتریکی در این نوع هوایماها نیازمند تغییر سیستم توزیع هوایما و تغییر فرکانس سیستم است [۳]. همچنین گرایش هوایماها به سمت استفاده بیشتر از انرژی الکتریکی سبب گسترده‌شدن سیستم توزیع و در نتیجه، افزایش تعداد کابل‌های استفاده‌شده به‌منظور ارسال انرژی الکتریکی برای تغذیه بارهای مختلف می‌شود. عملکرد درست و بدون خطای این کابل‌ها در امنیت و عملکرد هوایما و ارضای بارها تأثیر مستقیم دارد [۴]. افزایش سطح ولتاژ و تعداد کابل‌ها در سیستم توزیع به افزایش خطاهای شدید در سیستم منجر می‌شود. همچنین افزایش فرکانس نیز احتمال وقوع پدیده قوس الکتریکی را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین در کل به استرس بر سیستم‌های حفاظتی و کنترلی منجر می‌شود. با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و تغییر سطح ولتاژ سیستم توزیع برق هوایماهای نسل جدید احتمال وقوع انواع خطا در سیستم توزیع انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. به‌منظور افزایش امنیت و عملکرد هوایما و کاهش وزن و هزینه تعمیرات، مادامی که هوایما در زمین باشد، وجود سیستم نظارتی به‌منظور تعیین وقوع و مکان دقیق انواع خطا در این سیستم توزیع بسیار ضروری است.

به‌طور کلی خطاهایی که در سیستم توزیع برق هوایما رخ می‌دهد، به دو دسته خطاهای شدید (اتصال کوتاه) و خطاهای ضعیف^۲ (از قبیل خطاهای قوس متناوب^۳ حدود ۳۷٪) تقسیم می‌شوند [۵]. از میان خطاهای رخ داده در هوایما تعیین وقوع و مکان دقیق خطای قوس متناوب در سیستم توزیع پیچیده به دلیل ماهیت این نوع خطاها و کوتاه‌بودن دامنه و مدت زمان آن بسیار مشکل است [۶]. این نوع خطا به دلایلی از قبیل نفوذ رطوبت در کابل‌ها، لرزش یا استرس‌های مکانیکی، به‌صورت تصادفی و تنها در طول پرواز رخ می‌دهد. رخداد متناوب این خطا و تشخیص‌ندادن آن در طولانی مدت به آتش‌سوزی بوردها، قطعی بار یا حوادث دیگر در حین پرواز منجر می‌شود. با توجه به کوتاه‌بودن کابل‌ها و همچنین کوچک‌بودن جریان عبوری از آنها استفاده از ادوات حفاظتی متداول از قبیل مدارشکن‌های قدرت حرارتی (TCB)^۴ برای خطاهای قوس متناوب با دامنه کوچک و مدت زمان کوتاه مناسب نیست [۶]. استفاده از مدارشکن‌های قوس برای تعیین وقوع خطای

خطا را بیان می‌کند. سپس نتایج شبیه‌سازی روی سیستم توزیع برق هواپیماهای نمونه در بخش ۳ انجام شده‌اند. نتیجه‌گیری در بخش ۴ بیان شده است.

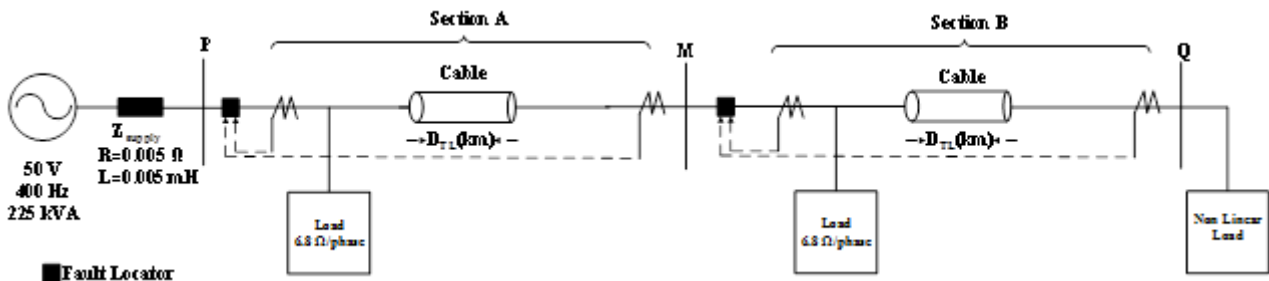
۲- الگوریتم پیشنهادی تعیین و مکان‌یابی خطا

همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد به دلیل ماهیت برخی خطاها از جمله خطاهای قوس متناوب، وجود سیستم نظارتی آنلاین به منظور تعیین وقوع و مکان خطا در سیستم توزیع برق هواپیما بسیار ضروری است. شکل (۱) سیستم توزیع برق هواپیماهای نمونه موجود در [۱۴] را نشان می‌دهد. این سیستم شامل دو ناحیه A و B، هر ناحیه دارای یک کابل و تعدادی بار مقاومتی و غیرخطی است. با توجه به مرجع [۱۶] و وجود کنترلرهای حالت جامد (SSPCs) در سیستم توزیع برق هواپیماهای مدرن، به دلیل قابلیت مناسب این ادوات در دستیابی به ولتاژ و جریان کابل‌ها، طراحی ساده و قابلیت اطمینان زیاد، سایز کوچک و وزن پایین، قابلیت کنترل از راه دور و قابلیت تریپ در شرایط خطا، در این مقاله از ویژگی این ادوات برای تعیین وقوع و مکان‌یابی خطا استفاده شده است. همچنین می‌توان با استفاده از ویژگی قطع (تریپ) این ادوات به منظور کاربردهای حفاظتی نیز استفاده کرد. برای این منظور این ادوات مطابق شکل (۱) در ابتدا و انتهای کابل‌ها و خطوط بار در نظر گرفته شده‌اند.

است. همچنین در [۱۵] مکان‌یابی خطا در کابل‌های هواپیما براساس روش حداقل مربعات انجام شده است. از جمله معایب این روش‌ها آفلاین بودن آنها و ناتوان بودن در تشخیص خطاهای قوس متناوب است. در [۴] به منظور تشخیص خطای قوس از مقایسه جریان بار اندازه‌گیری شده در هر لحظه با جریان بار مرجع استفاده شده است. در [۱۶] با استفاده از ویژگی هواپیماهای دارای کنترلرهای حالت جامد (SSPCs) روشی به منظور تعیین وقوع و مکان خطا در سیستم توزیع هدایما ارائه داده است. در این مقاله روش مدلسازی ماتریس ABCD (ماتریس انتقال) برای تعیین دقیق مدل بار در شرایط خطا و بدون خطا ارائه شده است. همچنین در این روش براساس تغییرات گذرای مدار مدل بار و پارامترهای کابل خطای قوس متناوب نیز رؤیت پذیرند.

در این مقاله روش جدیدی برای تعیین وقوع و مکان دقیق انواع خطا در سیستم توزیع برق هواپیما براساس ولتاژ و جریان غیرسنکرون ابتدا و انتهای کابل‌ها و مدل توزیع شده کابل ارائه شده است. برخلاف روش‌های ارائه شده در مقالات قبل، روش مدنظر به صورت آنلاین قادر به تعیین انواع خطای اتصال کوتاه و قوس متناوب، مستقل از پارامترهای کابل‌ها، زاویه سنکرونیزه و مقاومت خطا است. همچنین روش پیشنهادی قادر به تعیین دقیق پارامترهای کابل و زاویه سنکرونیزه است.

ترتیب ارائه مطالب در این مقاله به این صورت است. بخش ۲ الگوریتم پیشنهادی به منظور تعیین وقوع و مکان

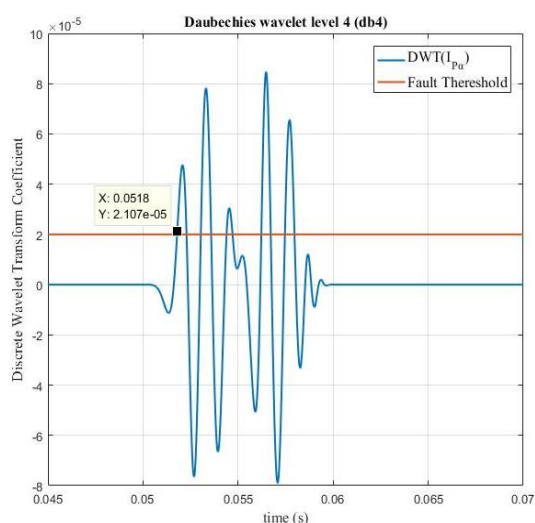


شکل (۱): سیستم مورد مطالعه [۱۴]

در گام دوم ناحیه وقوع خطا تعیین می‌شود و در نهایت در گام سوم مکان دقیق خطا براساس ناحیه خطای تعیین شده به دست می‌آید.

روش پیشنهادی در این مقاله از سه گام به منظور تعیین وقوع و مکان خطا به صورت آنلاین مطابق شکل (۲) تشکیل شده است. در گام نخست، ابتدا وقوع خطا تعیین می‌شود.

پالس‌هایی در لحظات پس از وقوع خطا مطابق شکل (۳) است. در شکل (۳) خطای قوس متناوب در لحظه ۰/۰۵ ثانیه رخ داده است. با تعریف کردن مقدار آستانه ضریب موجک مطابق شکل (۳)، مقادیر بیشتر از آستانه، لحظات وقوع خطا در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب مقدار مناسب آستانه بستگی به نوع استفاده از این تحلیل موجک دارد. هرچه مقدار آستانه کوچک‌تر باشد، حساسیت بیشتر می‌شود و امکان اشتباه در تشخیص نیز افزایش می‌یابد. همچنین اگر مقدار آستانه بزرگ انتخاب شود، ممکن است برخی خطاها تشخیص داده نشود. در این مقاله به منظور انتخاب مقدار مناسب برای آستانه، ابتدا خطا در مکان‌های مختلف شبیه‌سازی شده است، سپس تحلیل موجک انواع خطاهای مختلف در مکان‌های مختلف، بررسی و براساس اطلاعات به دست آمده از آنها مقدار این آستانه برابر 2×10^{-5} انتخاب شده است.



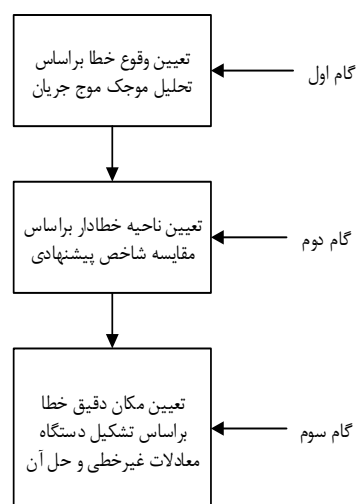
شکل (۳): ضرایب تحلیل موجک جریان مد هوایی باس P برای تعیین وقوع خطا

۲-۲- گام دوم: تعیین ناحیه خطادار

در این گام پس از تعیین وقوع خطا، ناحیه خطادار براساس ضرایب تحلیل موجک دامنه جریان مد هوایی به دست می‌آید. اساس کار به این صورت است که با توجه به این نکته که وقوع خطا در یک ناحیه سبب تغییرات بزرگ‌تری در رفتار آن ناحیه نسبت به نواحی دیگر می‌شود، ابتدا در هر ناحیه تحلیل موجک اختلاف دامنه جریان مد هوایی ابتدا و انتهای هر ناحیه مطابق رابطه (۲) با تعریف

۲-۱- گام نخست: تعیین وقوع خطا

با توجه به بخش ۱، در این مقاله هدف، تعیین وقوع خطا در حین پرواز و به صورت آنالاین است. زمانی که خطایی رخ می‌دهد، شکل موج ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده نسبت به شرایط عادی دچار تغییراتی می‌شوند؛ بنابراین با تحلیل این ولتاژ و جریان‌ها، وقوع خطا تشخیص داده می‌شود. با توجه به قابلیت مناسب تحلیل موجک در استخراج اطلاعات گذرای سیگنال و دنبال کردن تغییرات سیستم، در این مقاله به منظور تعیین وقوع خطا از تحلیل موجک جریان مد هوایی^۹ باس‌ها به صورت آنالاین استفاده شده است.



شکل (۲): مراحل روش پیشنهادی

با توجه به اینکه خطوط سه‌فاز، دارای کولپلینگ الکترومغناطیسی چشمگیری‌اند، به منظور حذف اثر کولپلینگ بین فازها و استفاده از جریان‌ها در تحلیل‌های موجک، از تبدیل کلارک مطابق (۱) استفاده شده است [۱۷]. در (۱)، $I_{0\alpha\beta}$ و I_{abc} به ترتیب جریان مودال (0: مد زمینی^۱، 1 و 2 مد هوایی) و فازند.

$$I_{0\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} I_{abc} \quad (1)$$

در شرایط عادی بهره‌برداری از سیستم، شکل موج تحلیل موجک جریان باس‌ها در صفر مطلق است [۱۷]. در صورت وقوع هر نوع خطایی این شکل موج‌ها دارای

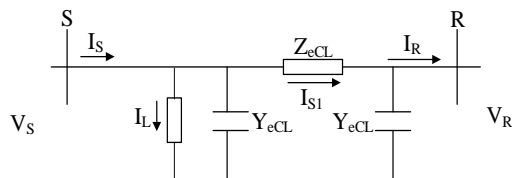
$$\begin{aligned} V_R &= V_R e^{j\delta} \\ I_R &= I_R e^{j\delta} \end{aligned} \quad (3)$$

در این رابطه منظور از V_R و I_R مقادیر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در انتهای هر ناحیه پس از تشخیص ناحیه خط‌آدار در گام دوم و δ زاویه سنکرونیزه است.

شکل (۵) مدار معادل π توالی مثبت ناحیه خط‌آدار در شرایط عادی بهره‌برداری را نشان می‌دهد [۱۹]. روش پیشنهادی براساس مدل گسترده کابل بوده و تأثیر خازن کابل به‌طور کامل در نظر گرفته شده است. پارامترهای معادل استفاده‌شده در شکل (۵) نیز به‌صورت (۴) تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} Z_{CL} &= r_{CL} + jx_{CL} \quad \& \quad Y_{CL} = jb_{CL} \\ \gamma_{CL} &= \sqrt{Z_{CL} Y_{CL}} \quad \& \quad Z_{eCL} = \sqrt{\frac{Z_{CL}}{Y_{CL}}} \\ Z_{eCL} &= Z_{CL} \sinh(\gamma_{CL} D_{CL}) \\ Y_{eCL} &= \frac{\tanh(\gamma_{CL} D_{CL}/2)}{Z_{eCL}} \end{aligned} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، Z_{CL} ، Y_{CL} به ترتیب امپدانس و ادمیتانس کابل، r_{CL} ، x_{CL} ، b_{CL} مقاومت، راکتانس و سوسپتانس کابل و γ_{CL} و Z_{eCL} نیز ثابت انتشار و امپدانس مشخصه کابل براساس مدل خط انتقال گسترده است [۱۹].



شکل (۵): مدار معادل π توالی مثبت ناحیه خط‌آدار در شرایط عادی بهره‌برداری

با توجه به شکل (۵)، معادلات KVL به‌صورت (۵) نوشته می‌شوند.

$$f_1(x) \square V_s - Z_{eCL}(I_s - Y_{eCL}V_s - I_L) - V_R = 0 \quad (5)$$

به همین ترتیب، معادلات KCL در باس فرستنده به‌صورت (۶) بیان می‌شوند.

$$f_2(x) \square I_s - Y_{eCL}V_s - I_L - I_R - Y_{eCL}V_R = 0 \quad (6)$$

مدار معادل π توالی مثبت ناحیه خط‌آدار در حین خطا نیز می‌توان به‌صورت شکل (۶) نشان داده می‌شود [۱۹].

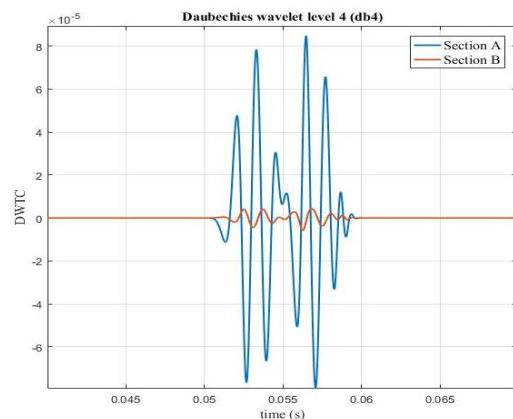
ضریب $DWTC^{[1]}$ انجام می‌شود. در این رابطه، منظور از DWT تحلیل موجک سیگنال مدنظر و i و j مقادیر ابتدا و انتهای خط‌آدار. سپس با مقایسه ضرایب $DWTC$ به‌دست‌آمده در نواحی مختلف، ناحیه‌ای که دامنه بزرگ‌تری داشته باشد، ناحیه خط‌آدار تعیین می‌شود. شکل (۴) مقایسه ضرایب $DWTC$ به‌دست‌آمده برای نواحی A و B نشان داده شده در شکل (۱) برای خط‌آی موجود در ناحیه A را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است ضرایب $DWTC$ ناحیه خط‌آدار (ناحیه A) مقادیر بزرگ‌تری نسبت به نواحی دیگر دارد.

$$DWTC_{ij} = DWT(|I_{ia}| - |I_{ja}|) \quad (2)$$

پس از انجام این دو مرحله، ناحیه خط‌آدار تعیین می‌شود و می‌توان براساس ناحیه به‌دست‌آمده و با توجه به قابلیت قطع ادوات SSPCs، ناحیه خط‌آدار را در صورت نیاز ایزوله کرد.

۲-۳- گام سوم: تعیین مکان دقیق خطا

پس از تعیین ناحیه خط‌آدار در گام دوم، در این بخش مکان دقیق خطا براساس مقادیر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در ابتدا و انتهای هر ناحیه تعیین می‌شود. در این بخش فرض بر این است که مقادیر اندازه‌گیری شده بین ابتدا و انتهای کابل غیرسنکرون‌اند؛ البته با توجه به کوتاه‌بودن کابل‌ها میزان اختلاف زاویه سنکرونیزه کوچک است. این اختلاف زاویه مطابق با (۳) بیان می‌شود [۱۸].



شکل (۴): مقایسه ضرایب تحلیل موجک $DWTC$

ناحیه A و B

تشخیص وقوع و مکان خطا در سیستم توزیع برق هوایما

غیرخطی را با مجهولات X حل کرد. با استفاده از (۵)، (۶) و (۸) و با تعریف $F(X)$ مطابق (۱۰) براساس مرجع [۱۹]، ۵ معادله مستقل به صورت (۱۱) بیان می شوند.

$$\begin{aligned} F_{2i-1}(X) &= \operatorname{Re}(f_i(X)), & i=1, \dots, 3 \\ F_{2i}(X) &= \operatorname{Im}(f_i(X)), & i=1, \dots, 2 \end{aligned} \quad (10)$$

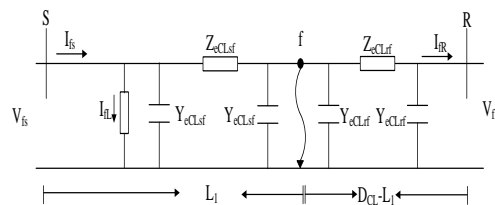
که در (۱۰) منظور از $\operatorname{Re}(\cdot)$ و $\operatorname{Im}(\cdot)$ قسمت حقیقی و موهومی توابع است.

$$\begin{cases} F_1(l_1, \delta, r_{CL}, x_{CL}, b_{CL})=0 \\ F_2(l_1, \delta, r_{CL}, x_{CL}, b_{CL})=0 \\ \vdots \\ F_5(l_1, \delta, r_{CL}, x_{CL}, b_{CL})=0 \end{cases} \quad (11)$$

۳- حل دستگاه معادلات غیرخطی

در سال‌های اخیر روش‌های تکراری مختلفی به منظور حل دستگاه غیرخطی از جمله روش متداول نیوتن [۲۰]، چندجمله‌ای تیلر [۲۱]، روش تجزیه جملات [۲۲]، روش اختلال هوموتوبی [۲۳] و روش‌های دیگر ارائه شده‌اند که تفاوت روش‌های موجود در سرعت همگرایی و میزان وابستگی به شرایط اولیه بیان می‌شود. به‌طور کلی استفاده از روش نیوتن بهترین روش برای حل این دستگاه‌ها است؛ اما همگرایی و دقت این روش وابستگی شدیدی به مقادیر حدس اولیه دارد و در صورتی که حدس اولیه به‌درستی انتخاب نشود، نمی‌توان به جواب درست رسید [۲۲]؛ بنابراین در این مقاله فرآیند دو مرحله‌ای برای حل دستگاه معادلات غیرخطی مطابق شکل (۷) پیشنهاد شده است. با توجه به شکل (۷) در گام نخست، مسئله حل دستگاه معادلات غیرخطی تبدیل به مسئله بهینه‌سازی مستقل از شرایط اولیه می‌شود. در گام دوم، پاسخ‌های به‌دست آمده از مرحله نخست که مقادیر نزدیک به جواب دستگاه معادلات غیرخطی‌اند، به‌عنوان شرایط اولیه در روش نیوتن بهبودیافته استفاده می‌شوند.

در این شکل، نشان‌دهنده مکان خطا به فاصله l_1 از ابتدای خط (باس فرستنده) است. پارامترهای معادل استفاده شده در شکل (۵) به صورت (۷) تعریف می‌شوند.



شکل (۶): مدار معادل π توالی مثبت ناحیه خطا در حین خطا

$$\begin{aligned} Z_{eCLsf} &= Z_{eCL} \sinh(\gamma_{CL} L_1) \\ Y_{eCLsf} &= \frac{\tanh(\gamma_{CL} L_1/2)}{Z_{eCL}} \\ Z_{eCLrf} &= Z_{eCL} \sinh(\gamma_{CL} (D_{CL} - L_1)) \\ Y_{eCLrf} &= \frac{\tanh(\gamma_{CL} (D_{CL} - L_1)/2)}{Z_{eCL}} \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، Z_{eCLsf} ، Y_{eCLsf} ، Z_{eCLrf} و Y_{eCLrf} به ترتیب امپدانس و ادمیتانس در سمت راست و چپ ناحیه خطا در هستند.

با توجه به شکل (۶) معادلات KVL به صورت (۸) بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} f_3(X) &= V_{fs} - Z_{eCLsf}(I_{fs} - Y_{eCLsf}V_{fs} - I_{fl}) - \\ & - Z_{eCLrf}(I_{fr} + Y_{eCLrf}V_{fr}) - V_{fr} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

که در رابطه (۸) V_{fs} ، V_{fr} و I_{fr} به ترتیب ولتاژ و جریان خطا در باس‌های ارسال و دریافت‌اند.

با توجه به روابط (۳) تا (۸) و هدف مقاله که مکان‌یابی خطا مستقل از پارامترهای کابل با استفاده از ولتاژ و جریان‌های غیرسنکرون ابتدا و انتهای کابل است، مجهولات مسئله به صورت (۹) بیان می‌شوند.

$$x = [L_1 \quad \delta \quad r_{cl} \quad x_{cl} \quad b_{cl}] \quad (9)$$

ماتریس X ماتریسی متشکل از ۵ مجهول شامل مکان خطا (L_1)، زاویه سنکرونیزه (δ) و پارامترهای کابل است. با توجه به تئوری دستگاه معادلات غیرخطی، در صورتی که ۵ معادله مستقل موجود باشد، می‌توان دستگاه معادلات

بعد در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله با توجه به ماهیت پیوسته مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم PSO به منظور حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است.

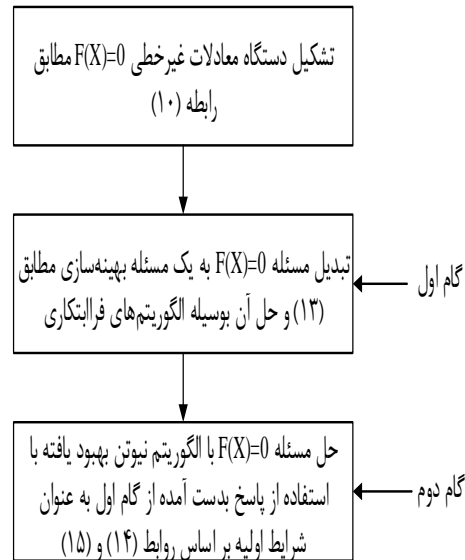
(۲) مرحله دوم:

در صورتی که شرایط اولیه نزدیک به جواب مسئله باشد، بهترین روش برای حل دستگاه معادلات غیرخطی استفاده از روش نیوتن است. با توجه به پاسخ به دست آمده از مرحله نخست و نزدیکی پذیرفتنی آن به جواب مسئله، در این مرحله از روش نیوتن بهبودیافته ارائه شده در [۲۴] مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) استفاده شده است.

$$z^{(k)} = x^{(k)} - J_F(x^{(k)})^{-1} F(x^{(k)}) \quad (15)$$

$$x^{k+1} = x^k - 6 \left[J_F(x^k) + 4J_F\left(\frac{z^k + x^k}{2}\right) + J_F(z^k) \right]^{-1} F(x^k) \quad (16)$$

در روابط (۱۵) و (۱۶)، $k = 0, 1, \dots$ و $J_F(x^{(k)})$ بیان‌کننده ماتریس ژاکوبین تابع F در تکرار k ام است. شکل (۸) فلوجارت کلی روش پیشنهادی به منظور تعیین وقوع و مکان دقیق خطا در سیستم توزیع برق هواپیما را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، ابتدا ولتاژ و جریان‌های مورد نیاز از طریق ادوات SSPCs از ابتدا و انتهای کابل‌ها و خطوط بار جمع‌آوری می‌شوند. سپس در گام پردازش سیگنال، فازور ولتاژ و جریان‌ها با استفاده از تبدیل فوریه گسسته در فرکانس اصلی استخراج می‌شوند. در گام بعدی وقوع خطا براساس تحلیل موجک مد هوایی جریان باس‌ها بررسی می‌شود. در صورت وقوع خطا، در گام بعد ناحیه خطادار، تعیین و ولتاژ و جریان آن ناحیه به‌عنوان ورودی به گام تعیین مکان خطا استخراج می‌شود. تشکیل دستگاه معادلات غیرخطی براساس (۱۱) و حل دستگاه معادلات براساس روش ترکیبی PSO و نیوتون بهبودیافته نیز در گام آخر انجام می‌شود.



شکل (۷): روش پیشنهادی به منظور حل دستگاه معادلات غیرخطی

توضیح هر مرحله در ادامه بیان می‌شود:

(۱) مرحله نخست:

به‌طور کلی در یک مسئله غیرخطی هدف حل معادله (۱۲) است. در رابطه (۱۲)، همان دستگاه معادلات غیرخطی نشان داده شده در (۱۱) است. با در نظر گرفتن تابع $Q(X)$ مطابق (۱۲)، مسئله حل دستگاه معادلات غیرخطی رابطه (۱۱) به صورت مسئله یافتن مینیمم تابع $Q(X)$ مطابق با مرجع [۲۴] تبدیل می‌شود.

$$F(X) = 0 \quad (12)$$

$$Q(X) = F^2(X) \geq 0 \quad (13)$$

رابطه (۱۳) به دستگاه معادلات غیرخطی چندمعادله چندمجهول به صورت رابطه (۱۳) تعمیم داده می‌شود.

$$Q(X) = F_1^2(X) + \dots + F_n^2(X) \quad (14)$$

در صورتی که مینیمم مطلق معادله (۱۴) در نقطه (x_1^*, \dots, x_n^*) صفر باشد، نقطه (x_1^*, \dots, x_n^*) پاسخ دستگاه معادلات غیرخطی نیز در نظر گرفته می‌شود. در این گام پاسخ به دست آمده نزدیک به جواب مسئله است؛ اما برای دستیابی به پاسخ دقیق‌تر، این پاسخ شرایط اولیه در مرحله

تشخیص وقوع و مکان خطا در سیستم توزیع برق هوایما

تخمین پارامترهای کابل و زاویه سنکرونیزه نیز با (۱۹) ارزیابی می‌شود.

$$\frac{|\text{مکان واقعی خطا} - \text{مکان تخمین زده شده}|}{|\text{کل طول خط}|} \times 100 \quad (18)$$

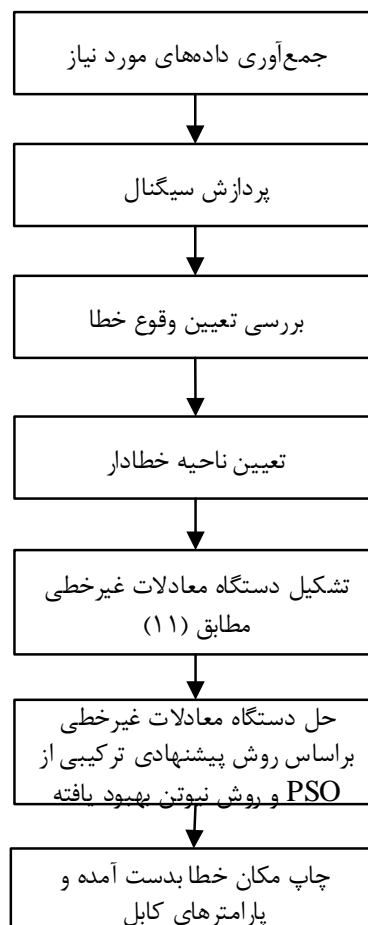
$$\frac{|\text{مقدار واقعی پارامتر} - \text{مقدار تخمین زده شده}|}{|\text{مقدار واقعی پارامتر}|} \times 100 \quad (19)$$

الگوریتم پیشنهادی در شرایط مختلف از قبیل وقوع خطا در مکان‌های مختلف، انواع خطاهای شدید (خطای تکفاز، دوفاز و سه‌فاز) و خطای قوس متناوب با مقاومت خطا و زاویه سنکرونیزه مختلف بررسی شده است. در همه موارد مطالعاتی، روند تکرار زمانی پایان می‌یابد که میزان تغییر مکان خطای به دست آمده نسبت به مرحله قبل کمتر از 10^{-6} باشد. همچنین شرایط اولیه استفاده شده برای X ، نیز مطابق ماتریس نشان داده شده در (۱۷) است [۱۴].

$$X_0 = [0.5 \quad 0 \quad 1e-3 \quad 1e-3 \quad 1e-5] \quad (20)$$

شکل (۹) تحلیل موجک جریان مد هوایی باس‌های P ، Q و M سیستم توزیع نشان داده شده در شکل (۱) را در صورت وقوع خطای تکفاز در ناحیه B در لحظه 0.3 ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است در لحظه وقوع خطا مقدار ضرایب تحلیل موجک از میزان آستانه تعریف شده (2×10^{-5}) ، بیشتر و این لحظه، خطا تشخیص داده می‌شود. این شکل کارایی روش پیشنهادی در تعیین خطا را نیز اثبات می‌کند.

شکل (۱۰) نیز مقایسه ضرایب تحلیل موجک $DWTC$ ناحیه A و B نشان داده شده در شکل (۱) در صورت وقوع خطای تکفاز در ناحیه B در لحظه 0.3 ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، این موضوع مشخص می‌شود که ناحیه خطادار (ناحیه B) دارای ضرایب $DWTC$ بزرگ‌تری نسبت به نواحی بدون خطا است و درستی روش استفاده شده به منظور تعیین ناحیه خطا را بیان می‌کند.



شکل (۸): روش پیشنهادی به منظور حل دستگاه معادلات غیرخطی

۴- سیستم مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت کارایی روش پیشنهادی با نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK بررسی شده است. برای این منظور از سیستم توزیع نمونه ارائه شده در [۱۴] مطابق شکل (۱) استفاده شده است. شبیه‌سازی خطای قوس متناوب در این مقاله با مدل‌سازی مقاومت قوس R_{arc} مطابق (۱۷) انجام شده است [۱۶].

$$R_{arc} = 6.8e^{-(0.001375 \times i_{arc})} \quad (17)$$

در این مقاله از مقادیر پریونیت در ولتاژ مبنای 50 ولت و توان 100 کیلو-ولت-آمپر استفاده شده است [۱۴]. درستی مکان‌یابی انجام شده با (۱۸)، ارزیابی و همچنین خطای

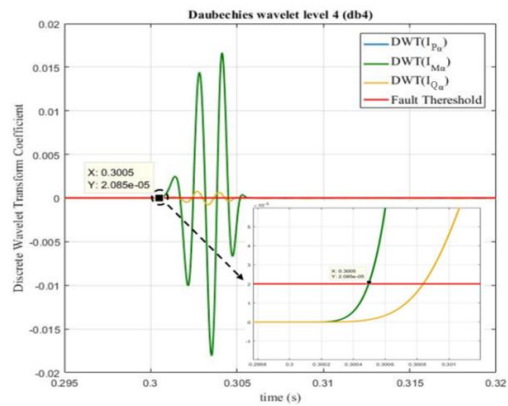
یکی از مهم‌ترین معایب روش‌های پیشین ناتوانی در تعیین خطای قوس متناوب است. شکل (۱۱) تحلیل موجک جریان مد هوایی باس‌های P، Q و M سیستم توزیع نشان داده شده در شکل (۱) را در صورت وقوع خطای قوس متناوب در ناحیه A در لحظه ۰/۰۵ ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص می‌شود با انتخاب مناسب آستانه به میزان 2×10^{-5} ، در لحظه ۰/۰۵۱۸ ثانیه وقوع خطا تعیین می‌شود.

جدول (۲) نتایج حاصل از مکان‌یابی خطا با استفاده از روش پیشنهادی در خطای قوس متناوب با مقاومت قوس مطابق (۱۷) را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول نیز این موضوع شایان ذکر است که روش پیشنهادی دارای قابلیت مکان‌یابی خطای قوس متناوب با دقت مناسب است.

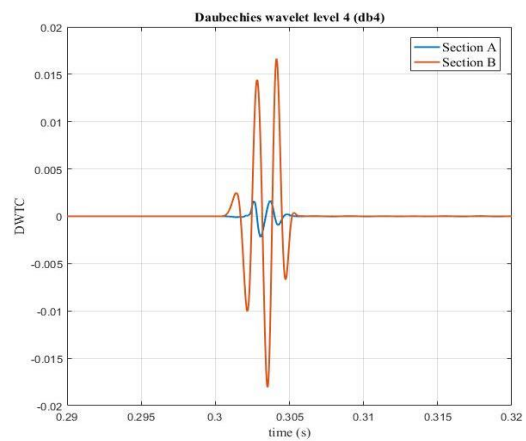
جدول (۱): نتایج مکان‌یابی خطا به روش پیشنهادی برای

خطاهای شدید

نوع خطا	مکان واقعی خطا (p.u.)	مکان تخمین زده شده (p.u.)	درصد خطای
			روش پیشنهادی (%)
LG	۰/۲	۰/۲۰۱۸	۰/۱۸۵
	۰/۵	۰/۴۹۹۱	۰/۰۸۱
	۰/۸	۰/۸۰۲۰	۰/۲۰۱
LL	۰/۲	۰/۱۹۸۸	۰/۱۱۹
	۰/۵	۰/۵۰۰۶	۰/۰۵۹
	۰/۸	۰/۸۰۱۳	۰/۱۳۷
LLG	۰/۲	۰/۱۹۸۷	۰/۱۲۶
	۰/۵	۰/۴۹۹۳	۰/۰۶۹
	۰/۸	۰/۷۹۸۶	۰/۱۴۱
LLL	۰/۲	۰/۱۹۸۹	۰/۱۰۳
	۰/۵	۰/۴۹۹۵	۰/۰۴۷
	۰/۸	۰/۸۰۱۳	۰/۱۳۴



شکل (۹): تحلیل موجک جریان مد هوایی باس‌های P، Q و M در صورت وقوع خطای تکفاز در ناحیه B



شکل (۱۰): مقایسه ضرایب تحلیل موجک DWTC ناحیه A و B در صورت وقوع خطای تکفاز در ناحیه B

پس از بررسی درستی روش پیشنهادی در تعیین خطا، به‌منظور بررسی درستی روش پیشنهادی در مکان‌یابی خطا در خطاهای شدید، خطاهای متنوع از جمله خطای LL، LLG و LLL و مقاومت خطای 10Ω و زاویه سنکرونیزه $(\delta) 10^0$ بررسی شده است. همان‌طور که در بخش (۲) بیان شد به دلیل کوتاه‌بودن خطوط میزان اختلاف زاویه سنکرونیزه کوچک است؛ اما در این قسمت روش پیشنهادی در صورت وجود اختلاف بزرگ نیز نتایج مناسب ارائه می‌دهد. جدول (۱) نتایج حاصل از مکان‌یابی خطا در ناحیه A در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده در جدول (۱) نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در تعیین خطای شدید با مقدار درصد خطای تخمین پایین است.

تشخیص وقوع و مکان خطا در سیستم توزیع برق هوایما

در این مقاله برای ارزیابی تأثیر شرایط اولیه بر رفتار همگرایی الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی در شرایط اولیه با مقادیر مختلف انجام شده است؛ برای مثال، تعداد تکرار مورد نیاز برای همگرایی در شرایط اولیه مختلف برای خطای قوس متناوب در مکان ۰/۲ پریونیت با مقاومت خطای ۱۰Ω در جدول (۴) بررسی شده است. با مشاهده این جدول مشخص می‌شود شرایط اولیه در تعداد تکرار و درستی آن تأثیر چشمگیری ندارد.

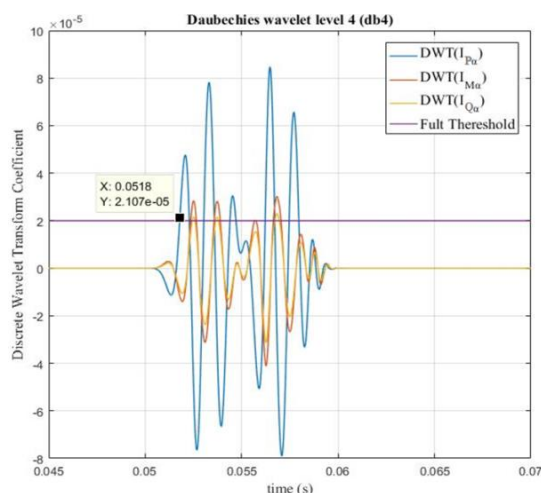
جدول (۴): رفتار همگرایی روش پیشنهادی با شرایط اولیه

مقاومت خطای قوس متناوب در مکان ۰/۲ پریونیت با ۱۰Ω

تعداد تکرار	مقدار اولیه مقدار اولیه مقدار اولیه			مقدار اولیه $\delta(p.u.)$	مقدار اولیه $L_1(p.u.)$
	$b_{CL}(p.u.)$	$x_{CL}(p.u.)$	$r_{CL}(p.u.)$		
۱۱	1×10^{-5}	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰	۰/۱
۸	1×10^{-6}	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰	۰/۲
۵	1×10^{-7}	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۵

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید به‌منظور مکان‌یابی انواع خطای اتصال کوتاه و قوس متناوب در سیستم توزیع برق هوایما ارائه شده است. روش پیشنهادی متشکل از سه مرحله است. در مرحله نخست، وقوع خطا براساس تحلیل موجک جریان باس‌ها مشخص می‌شود. در مرحله دوم، ناحیه خطادار براساس تحلیل موجک اختلاف دامنه ولتاژ ابتدا و انتهای کابل‌ها مشخص می‌شود. در مرحله سوم، پس از تعیین ناحیه خطادار، مکان خطا براساس فرآیند دو مرحله‌ای تعیین می‌شود. در گام نخست، دستگاه معادلاتی غیرخطی براساس مدار معادل توالی مثبت سیستم و ولتاژ و جریان ابتدا و انتهای ناحیه خطادار تشکیل می‌شود. سپس این دستگاه معادلات غیرخطی با الگوریتم ترکیبی حل می‌شود. در این الگوریتم ترکیبی ابتدا مسئله حل دستگاه معادلات غیرخطی تبدیل به مسئله بهینه‌سازی می‌شود و سپس پاسخ به‌دست آمده، شرایط اولیه در روش تکراری نیوتن قرار داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در تعیین وقوع خطا و همچنین دقت



شکل (۱۱): تحلیل موجک جریان مد هوایی باس‌های P, Q و

M در صورت وقوع خطای قوس متناوب در ناحیه A

جدول (۲): نتایج مکان‌یابی خطا به روش پیشنهادی برای

خطاهای قوس متناوب

نوع خطا	مکان واقعی خطا (p.u.)	درصد خطای روش پیشنهادی (%)
قوس	۰/۲	۰/۱۱۵
متناوب	۰/۵	۰/۰۷۴
	۰/۸	۰/۱۴۱

در میان ویژگی‌های بیان‌شده برای روش پیشنهادی، یکی از مزایای کاربردی روش پیشنهادی، قابلیت تخمین پارامترهای کابل و زاویه سنکرونیزه بین داده‌ها است. جدول (۳) پارامترهای تخمین زده شده برای خطای تک‌فاز به زمین با مقاومت خطای ۱۰Ω و زاویه سنکرونیزه ۱۰° را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده قابلیت روش پیشنهادی در تخمین پارامترهای کابل با دقت مناسب است.

جدول (۳): تخمین پارامترهای کابل با روش پیشنهادی

مکان واقعی خطا (p.u.)	درصد تخمین r_{CL} خطای	درصد تخمین x_{CL} خطای	درصد تخمین b_{CL} خطای
۰/۲	۰/۵۳۲	۰/۱۴۷	۰/۳۵۶
۰/۵	۰/۳۶۹	۰/۱۰۹	۰/۶۵۴
۰/۸	۰/۶۱۲	۰/۲۱۱	۰/۴۹۹

- Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, No. 2, pp. 306-315, 2003.
- [10] P. Smith, C. Furse, and J. Gunther, "Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location," *IEEE sensors journal*, Vol. 5, No. 6, pp. 1469-1478, 2005.
- [11] S. Schuet, D. Timucin, and K. Wheeler, "A model-based probabilistic inversion framework for characterizing wire fault detection using TDR," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 5, pp. 1654-1663, 2011.
- [12] C. Furse and R. Haupt, "Down to the wire [aircraft wiring]," *IEEE Spectrum*, Vol. 38, No. 2, pp. 34-39, 2001.
- [13] Z. Liu, R. J. Fuller, W. Yu, Y. Ye, and G. G. Liu, "Power line communication based aircraft power distribution system with real time wiring integrity monitoring capability," ed: Google Patents, 2011.
- [14] Q. Zhou, M. Sumner, and D. Thomas, "Fault location for aircraft distribution systems using harmonic impedance estimation," *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 2, No. 3, pp. 119-129, 2012.
- [15] X.-L. Liu, "Fault location system of aircraft cable based on principle of least squares solution," *Journal of Communication and Computer*, Vol. 7, No. 8, pp. 80-83, 2010.
- [16] A. Yaramasu, Y. Cao, G. Liu, and B. Wu, "Aircraft electric system intermittent arc fault detection and location," *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol. 51, No. 1, pp. 40-51, 2015.
- [17] P. E. Argyropoulos and H. Lev-Ari, "Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, No. 5, pp. 2215-2223, 2015.
- [18] N. I. Elkalashy, T. A. Kawady, W. M. Khater, and A.-M. I. Taalab, "Unsynchronized fault-location technique for double-circuit transmission systems independent of line parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 31, No. 4, pp. 1591-1600, 2016.
- [19] Y. Liao and N. Kang, "Fault-location algorithms without utilizing line parameters based on the distributed parameter line model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 2, pp. 579-584, 2009.
- [20] F. Ahmad, E. Tohidi, and J. A. Carrasco, "A parameterized multi-step Newton method for solving systems of nonlinear equations," *Numerical Algorithms*, Vol. 71, No. 3, pp. 631-653, 2016.
- [21] B. I. Yun, "A non-iterative method for solving non-linear equations," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 198, No. 2, pp. 691-699, 2008.
- [22] S. Abbasbandy, "Extended Newton's method for a system of nonlinear equations by modified Adomian decomposition method," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 170, No. 1, pp. 648-656, 2005.
- مناسب روش پیشنهادی در مکان‌یابی خطا مستقل از پارامترهای کابل و سنکرون‌بودن اطلاعات است. همچنین روش پیشنهادی قابلیت تشخیص مناسب خطای قوس متناوب به‌صورت آنالین را دارد که از آن برای تعیین وقوع خطا در حین استفاده می‌شود. همچنین با توجه به اینکه روش پیشنهادی براساس ادوات SSPCs است، از قابلیت قطع این ادوات و الگوریتم مکان‌یابی پیشنهادی برای حفاظت سیستم توزیع برق هواپیما استفاده می‌شود.

مراجع

- [1] J. Rosero, J. Ortega, E. Aldabas, and L. Romeral, "Moving towards a more electric aircraft," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 22, No. 3, pp. 3-9, 2007.
- [2] J. Brombach, T. Schroeter, A. Luecken, and D. Schulz, "Optimizing the weight of an aircraft power supply system through a +/-270 VDC main voltage," *Gen*, Vol. 360, p. 800, 2012.
- [3] C. Avery, S. Burrow, and P. Mellor, "Electrical generation and distribution for the more electric aircraft," in *Universities Power Engineering Conference*, 2007. UPEC 2007. 42nd International, 2007, pp. 1007-1012: IEEE.
- [4] J. Andrea, M. Buffo, E. Guillard, R. Landfried, R. Boukadoum, and P. Teste, "Arcing fault in aircraft distribution network," in *Electrical Contacts, 2017 IEEE Holm Conference on*, 2017, pp. 317-324: IEEE.
- [5] B. Sarlioglu and C. T. Morris, "More electric aircraft: Review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 1, No. 1, pp. 54-64, 2015.
- [6] D. Izquierdo, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, and A. Lázaro, "Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: State of the art," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 47, No. 3, pp. 1538-1550, 2011.
- [7] C. Furse, Y. C. Chung, C. Lo, and P. Pendayala, "A critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults," *Smart Structures and Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 25-46, 2006.
- [8] M.-K. Smaïl, T. Hacib, L. Pichon, and F. Loete, "Detection and location of defects in wiring networks using time-domain reflectometry and neural networks," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1502-1505, 2011.
- [9] C. Furse, Y. C. Chung, R. Dangol, M. Nielsen, G. Mabey, and R. Woodward, "Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring," *IEEE Transactions on*

[24] M. A. Noor and M. Waseem, "Variants of Newton's method using fifth-order quadrature formulas: revisited," *Journal of applied mathematics & informatics*, Vol. 27, No. 5_6, pp. 1195-1209, 2009.

[23] A. Golbabai and M. Javidi, "A new family of iterative methods for solving system of nonlinear algebraic equations," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 190, No. 2, pp. 1717-1722, 2007.

¹ More Electric Aircraft

² Intermittent Arc Fault

³ Chafe Fault

⁴ Thermal Circuit Breaker

⁵ Sequence Time Domain Reflectometry

⁶ Spread Spectrum Time Domain Reflectometry

⁷ Power Line Communication

⁸ Solid State Controller

⁹ Aerial Mode

¹⁰ Ground Mode

¹¹ Discrete Wavelet Transform Coefficient