

Doi: 10.71666/jipet.2024.998747

Research Article

Performance Improvement of the Single Pole Auto Reclose Using a New Mother Wavelet**Saeid Zoghi Khosrowshahi¹, Ms.c, Larissa Khodadadi², Assistant Professor, Mousa Vaezipour³,
Lecturer, Mahsa Khodadadi⁴, Assistant Professor**¹Manufacturing Engineering- Tabriz University of Applied Science and Technology, Tabriz, Iran²Department of Electrical Engineering- Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran³Department of Mechanical Engineering- Technical and Vocational University, Tabriz, Iran⁴Department of Electrical Engineering- Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran
zosaeed501@gmail.com, lkhodadadi@iaut.ac.ir, vaezimos@gmail.com, mahsa.khodadadi@gmail.com**Abstract**

In this paper, a novel wavelet-based method is proposed to improve the performance of the single-pole auto reclose (SPAR). Despite earlier approaches, a new mother wavelet is developed in this study to carry out the adaptive reclosing instead of using standard wavelets. However, the innovation of the research goes beyond this. The paper's originality also includes the use of a new combination of filter bank coefficients and the proposal of a two-threshold logic to distinguish between permanent and transient faults and to identify the secondary arc extinction time. In order to evaluate the performance of the proposed method, a typical 400 KV transmission line from Iran's national grid is simulated under different fault scenarios and various operating conditions in EMTP-RV transient mode software. The obtained results demonstrate the optimal accuracy of the suggested technique to distinguish between permanent and transient faults. Additionally, secondary arc extinction is detected at a faster rate compared to existing methods. On the other hand, the proposed method does not impose a heavy computational load, and its implementation is quite affordable.

Keywords: auto-reclose, electric arc, new mother wavelet, transient faults, wavelet transform**Received:** 13 February 2023**Revised:** 19 May 2023**Accepted:** 13 June 2023**Corresponding Author:** Dr. Larissa Khodadadi**Citation:** S. Zoghi-Khosrowshahi, L. Khodadadi, M. Vaezipour, M. Khodadadi, "Performance improvement of the single pole auto reclose using a new mother wavelet", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 62, pp. 67-92, September 2025 (in Persian).

Doi: 10.71666/jipet.2024.998747

مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد بازبست اتوماتیک تک-پل با استفاده از یک موجک مادر نوین

سعید ذوقی خسروشاهی^۱، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، لاریسا خدادادی^۲، استادیار، موسی واعظی پور^۳، مربی،
مهسا خدادادی^۴، استادیار

۱- گروه ماشین‌سازی تبریز- دانشگاه جامع علمی- کاربردی، تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی برق- واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- گروه مهندسی مکانیک- دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تبریز، ایران

۴- گروه مهندسی برق- واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

zosaeed501@gmail.com, lkhodadadi@iaut.ac.ir, vaezimos@gmail.com, mahsa.khodadadi@gmail.com

چکیده: در این مقاله روشی نوین مبتنی بر تبدیل موجک برای بهبود عملکرد بازبست اتوماتیک تک پل پیشنهاد شده است. برخلاف روش‌های موجود، از موجک‌های استاندارد استفاده نشده و یک موجک مادر جدید برای انجام بازبست تطابقی معرفی شده است. با این حال نوآوری روش پیشنهادی تنها منحصر به معرفی یک موجک جدید نیست. از نوآوری‌های دیگر مقاله می‌توان به استفاده از ترکیبی جدید از ضرایب بانک فیلتری و همچنین پیشنهاد منطق دو آستانه‌ای برای تفکیک خطاهای دائم از گذرا و تشخیص خاموشی قوس ثانویه اشاره کرد. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، یک خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت از شبکه برق ایران تحت شرایط مختلف بهره‌برداری و خطاهای گوناگون در نرم‌افزار حالت گذرای EMTP-RV شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصله نشان‌گر تفکیک دقیق خطاهای گذرا از خطاهای دائم و تشخیص سریع‌تر خاموشی قوس ثانویه توسط روش پیشنهادی است. از طرفی دیگر روش پیشنهادی بار محاسباتی سنگینی را به شبکه تحمیل نمی‌کند و اجرای آن کاملاً مقرون به صرفه است.

کلمات کلیدی: بازبست اتوماتیک، تبدیل موجک، خطاهای گذرا، قوس الکتریکی، موجک مادر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر لاریسا خدادادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تبریز- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

خطوط انتقال از مهم‌ترین و آسیب‌پذیرترین بخش‌های سیستم قدرت هستند. این خطوط به دلیل گستردگی جغرافیایی در معرض خطاهای مختلفی قرار دارند. با این حال، آمارها نشان می‌دهد بیش از ۹۰ درصد از خطاهای خطوط انتقال فشارقوی از نوع تک‌فاز به زمین بوده و اکثر آن‌ها ماهیت گذرا دارند [۱،۲]. خطاهای گذرا معمولاً در اثر رخداد‌های طبیعی مانند صاعقه، طوفان و یا برخورد موقت اشیاء خارجی به خطوط انتقال ایجاد می‌شوند و معمولاً همراه با قوس الکتریکی هستند [۳،۴]. پس از تشخیص رخداد خطا توسط رله‌های حفاظتی، با قطع کلیدهای دو طرف خط، جریان اتصال کوتاه قطع شده و قوس الکتریکی خاموش می‌شود [۵،۶]. پس از برطرف شدن خطا کلیدهای دو طرف خط می‌توانند دوباره بسته شوند. به این عمل بازبست گفته می‌شود [۳]. اگر تأخیر زمانی کافی برای دیونیزه شدن مسیر خطا و هوای اطراف قوس در نظر گرفته شود، به احتمال زیاد بازبست موفق خواهد بود و سیستم هر چه سریع‌تر به حالت عادی بازمی‌گردد [۱]. بازبست موفق کلیدها باعث میرا شدن نوسانات، بهبود پایداری شبکه، جلوگیری از گسترش خطا در شبکه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت شده، همچنین باعث تداوم برق‌رسانی به مشترکین می‌گردد [۵]. متأسفانه هیچ تضمینی وجود ندارد که بازبست حتماً موفق خواهد بود. در صورتی که محیط برای برقراری دوباره قوس فراهم باشد و یا بازبست روی خطای ماندگار انجام شود، بازبست ناموفق خواهد بود و ممکن است باعث جزیره‌ای شدن و ناپایداری شبکه شود. همچنین در بازبست ناموفق تنش ناشی از خطا نه یک‌بار بلکه چندین بار به تجهیزات سیستم مانند ژنراتورها و ترانسفورماتورها اعمال می‌شود که آسیب احتمالی به سیستم قدرت و تجهیزات آن را دوچندان می‌کند [۴].

در شبکه‌های قدرت امروزی سیستم غالباً در نزدیکی حدود پایداری بهره‌برداری می‌شود. در این شرایط افزایش زمان بین قطع کلید و بازبست آن می‌تواند پایداری سیستم قدرت را تهدید کند [۶]. در نتیجه طراحان به دنبال کمینه‌سازی زمان بازبست هستند تا هرچه سریع‌تر شبکه را به حالت عادی بازگردانده و پایداری شبکه را بهبود بخشند. اما بازبست سریع احتمال بازبست ناموفق را افزایش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین فاکتورها در بازبست موفق زمان دیونیزاسیون است. زمان دیونیزاسیون، زمانی است که پس از خاموشی قوس بایستی سپری شود تا اطمینان حاصل گردد هوای یونیزه شده اطراف قوس پخش شده و در صورت برقراری ولتاژ، قوس دوباره ایجاد نخواهد شد [۱]. خاموشی قوس و دیونیزه شدن هوای اطراف آن به عوامل مختلفی مانند سطح ولتاژ، میزان جریان اتصال کوتاه، سرعت رفع خطا، فاصله هادی‌ها، سرعت باد و میزان تزویج مدار با هادی‌های مجاور بستگی دارد. بسیاری از عوامل فوق‌ماهیتی تصادفی دارند. این در حالی است که در صنعت برق معمولاً یک زمان ثابت برای بازبست اتوماتیک در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن بسته به سطح ولتاژ ۱۰ تا ۳۰ سیکل قدرت است [۵].

بازبست اتوماتیک به سه نوع بازبست تک‌فاز، بازبست چندفاز و بازبست سه‌فاز تقسیم‌بندی می‌شود [۷]. از آنجایی که غالب خطاهای گذرای که در خطوط انتقال روی می‌دهند از نوع خطای تک‌فاز هستند [۸]، این مقاله به بررسی بازبست تک‌فاز می‌پردازد. در بازبست تک‌فاز تنها کلید مربوط به فاز خطا دار باز و دوباره بسته می‌شود. این موضوع می‌تواند باعث شارش توان از سایر فازها و بهبود پایداری سیستم قدرت گردد. عیب بزرگ بازبست تک‌فاز زمان دیونیزاسیون طولانی‌تر آن است. وجود تزویج الکترومغناطیسی و علی‌الخصوص الکترواستاتیکی بین فاز خطا دار و فازهای سالم منجر می‌شود که قوس زمان بیشتری برقرار بماند [۷]. به‌طور کلی قوس به دو نوع قوس اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی می‌شود. قوس اولیه در حین خطا و قوس ثانویه پس از قطع کلیدها و در اثر تزویج متقابل بین فازهای سالم و فاز خطا دار ایجاد می‌شود [۳]. وجود قوس ثانویه باعث استمرار قوس الکتریکی در محل خطا شده و موفقیت عمل بازبست با زمان دیونیزاسیون ثابت را تهدید می‌کند [۶].

با توجه به اشکال‌های موجود در بازبست سنتی، روش‌های زیادی توسط محققین به‌منظور بازبست هوشمند و تطابقی معرفی شده است. این روش‌ها ابتدا ماهیت خطا از نظر دائمی یا گذرا بودن را تعیین می‌کنند و در صورت گذرا بودن خطا، زمان خاموشی قوس را تشخیص می‌دهند. روش‌های بازبست اتوماتیک در سیستم‌های قدرت فشارقوی را می‌توان به سه گروه مختلف تقسیم‌بندی کرد. روش‌های مبتنی بر مدل ریاضی و فیزیکی، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال [۸].

از روش‌های مبتنی بر مدل ریاضی و فیزیکی می‌توان به روش ارائه شده در مرجع [۸] اشاره کرد. در این روش از فازور ولتاژ و آنالیز مودال جهت تشخیص خاموشی و احتراق مجدد قوس در خطوط انتقال جبران‌نشده استفاده شده است. مرجع [۹] استفاده از امپدانس حلقه خط را برای خطوط جبران شده توسط راکتورهای شنت پیشنهاد کرده است. در خطاهای گذرا پس از خاموشی قوس امپدانس حلقه خط بیشتر متأثر از خازن‌های زمین است و ماهیت خازنی دارد. در حالی که در خطاهای ماندگار امپدانس ناچیز مسیر اتصال کوتاه، خازن‌های زمین را بای پس می‌کند. در نتیجه امپدانس حلقه خط در خطای ماندگار ماهیتی خازنی خواهد داشت. در مرجع [۱۰] یک روش مبتنی بر ولتاژ مؤلفه صفر برای بازست تطابقی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۱] از ویژگی‌های قسمت حقیقی و موهومی فازور ولتاژ فاز خطدار جهت تشخیص خاموش شدن قوس در خطوط جبران‌نشده بهره برده شده است. در مرجع [۱۲] از مشتق اول اندازه ولتاژ برای تشخیص نوع خطا و از ترکیب مشتق‌های اول اندازه و زاویه ولتاژ جهت تشخیص خاموشی قوس بهره برده شده است. همان‌گونه که بیان شد بسیاری از عوامل مؤثر در خاموشی قوس ماهیت تصادفی دارند. در مرجع [۱۳] طرحی با استفاده از حامل خط قدرت^۱ (PLC) برای بازست تطابقی ارائه شده است. در این روش سیگنال‌های هر دو سمت خط با استفاده از PLC انتقال یافته و با هم مقایسه می‌شوند. با مقایسه سیگنال‌های PLC پیش و پس از رخداد خطا خاموشی قوس ثانویه و زمان مناسب برای بازست تعیین می‌گردد. روش‌های مبتنی بر مدل ریاضی و فیزیکی مفهوم ساده‌ای دارند و از لحاظ محاسباتی و هزینه اجرا بار سنگینی به شبکه نمی‌افزایند. اما با توجه به ماهیت فرکانس بالای قوس کارایی چندانی در بحث بازست از آن‌ها انتظار نمی‌رود.

در روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، بیش از همه از شبکه عصبی مصنوعی^۲ (ANN) برای بازست هوشمند استفاده شده است [۱۴، ۱۵]. در شبکه‌های عصبی مصنوعی از یک ساختار تصمیم‌گیری مشابه سیستم عصبی مغز انسان استفاده می‌شود. در این ساختار، لایه‌های مختلفی از نورون‌ها وجود دارد که به همدیگر متصل هستند و با تنظیم ضرایب وزنی این اتصال‌ها، شبکه عصبی آموزش می‌بیند [۱۴]. در مرجع [۱۵] از شبکه عصبی مصنوعی بهینه‌شده که در آن فرآیند یادگیری با سه روش مختلف انجام می‌شود جهت تشخیص خطاهای گذرا و خاموشی قوس استفاده شده است. با توسعه شبکه‌های عصبی عمیق در چند سال اخیر، از این شبکه‌ها نیز به‌منظور بهبود عملکرد بازست اتوماتیک تک پل استفاده شده است [۱۶، ۱۷]. در مرجع [۱۶] با استفاده از حافظه کوتاه-مدت طولانی^۳ (LSTM) نوع خطا از منظر دائمی یا گذرا بودن تشخیص داده شده و زمان خاموشی قوس ثانویه پیش‌بینی می‌شود تا عملیات بازست موفقیت‌آمیز باشد. در مرجع [۱۷] نیز با انجام مقایسه بین روش‌های مختلف، کارایی شبکه عصبی کانولوشنی^۴ (CNN) در تشخیص ماهیت خطا و زمان خاموشی قوس ثانویه در محیط‌های نویزی نشان داده شده است. علاوه بر شبکه‌های عصبی، از سایر روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین نیز در انجام بهتر بازست تطابقی استفاده شده است. در مرجع‌های [۱۸] و [۱۹] از ترکیب منطق فازی با شبکه عصبی برای ارائه طرحی تطبیقی در بازست اتوماتیک بهره برده شده است. در مرجع [۶] نیز ابتدا مدلی ریاضی از شرایط حاکم بر سیستم قدرت در زمان باز شدن کلید و بازست ارائه شده است و سپس با استفاده از این مدل، یک ماشین بردار پشتیبان^۵ (SVM) جهت تشخیص زمان خاموشی قوس در خطوط جبران شده پیشنهاد شده است. به‌طور کلی با دیجیتالی شدن سیستم قدرت، استفاده از روش‌های داده‌محور به‌منظور غلبه بر پیچیدگی‌های سیستم نیز افزایش یافته است. این روش‌ها سرعت بالایی در تشخیص دارند و برای سیستم‌های بسیار پیچیده مناسب هستند، اما نیازمند حجم وسیعی از داده‌های دقیق و باکیفیت برای آموزش ماشین هستند که به علت نادر بودن خطا در سیستم قدرت ممکن است چندان در دسترس نباشد [۷، ۲۰]. همچنین این روش‌ها نمی‌توانند روشی کلی جهت بازست تطابقی در همه سیستم‌های قدرت ارائه دهند. این بدان معنی است که اگر ماشین برای یک سیستم قدرت آموزش ببیند، برای سایر سیستم‌ها قابل استفاده نخواهد بود و در صورت تغییر سیستم، بایستی فرآیند یادگیری دوباره انجام شود [۸، ۱۱]. همچنین در صورتی که سناریوی پیش‌بینی‌نشده در سیستم رخ دهد این روش‌ها ممکن است عملکرد مناسبی ارائه ندهند [۲۱].

عمده روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال را روش‌های مبتنی بر آنالیز مؤلفه‌های هارمونیک تشکیل می‌دهند. در مرجع [۲۲] یک فیلتر هارمونیک دیجیتال جهت اندازه‌گیری میزان هارمونیک‌های سیگنال ولتاژ برای انجام بازست تطابقی پیشنهاد شده است. در مرجع [۳] شکل موج ولتاژ ابتدای خط آنالیز شده و از پنج هارمونیک اول آن به‌منظور تشخیص خطاهای گذرا از خطاهای دائم و انجام هر چه سریع‌تر بازست استفاده شده است. در مرجع [۲۳] میزان اعوجاج هارمونیک کلی^۶ (THD)

سیگنال‌های ولتاژ و جریان با استفاده از تبدیل فوریه گسسته^۷ (DFT) محاسبه شده و با استفاده از آن‌ها طرحی برای بازبست اتوماتیک ارائه گردیده است. اکثر روش‌های مبتنی بر آنالیز مؤلفه‌های هارمونیک از تبدیل فوریه گسسته (DFT) و یا تبدیل فوریه سریع^۸ (FFT) جهت تخمین مؤلفه‌های هارمونیک استفاده می‌کنند [۸]، درحالی‌که در مرجع [۲۴] از تبدیل موجک^۹ جهت استخراج و آنالیز مؤلفه‌های هارمونیک سیگنال ولتاژ در فاز خطادار به منظور انجام بازبست تطابقی استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر هارمونیک ممکن است در اثر سایر عوامل هارمونیک‌زا دچار عملکرد اشتباه گردند. هم‌چنین این روش‌ها بیشتر برای خطوط جبران نشده کاربرد دارند [۸،۱۲]. زیرا ممکن است راکتورهای شنت با خازن خط دچار رزونانس شده و هارمونیک‌ها زیر سنکرون ایجاد کنند. این موضوع فرآیند محاسبه هارمونیک‌ها و تشخیص زمان خاموشی قوس را مختل می‌کند [۱۲]. علاوه بر روش‌های مبتنی بر آنالیز هارمونیک روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک نیز توسط بسیار از محققین مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۴] با پردازش حالت‌های گذرای فرانکس بالای سیگنال ولتاژ توسط تبدیل موجک، خطاهای گذرا و دائم تفکیک شده و با تشخیص خاموشی قوس ثانویه، بازبست تطابقی انجام می‌شود. در مرجع [۱۸] با استفاده از نتایج حاصله از تبدیل موجک یک اندیس برای نمایش ویژگی‌های سیگنال ولتاژ و تفکیک خطاهای دائم و گذرا محاسبه می‌شود. با توجه به نتایج تحقیقات محققین می‌توان دریافت تبدیل موجک روشی مؤثر و سریع جهت استخراج ویژگی‌های سیگنال‌های گذرا و تعیین مشخصات آن‌ها فراهم می‌آورد [۷،۱۸]. علاوه بر روش‌های مبتنی بر آنالیز هارمونیک و تبدیل موجک روش‌های دیگری نیز در حوزه روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال معرفی شده‌اند. در مرجع [۲۵] طرحی تطابقی برای بازبست اتوماتیک در خطوط جبران شده توسط راکتورهای شنت ارائه شده است. این طرح از اعوجاج مؤلفه‌های فرانکس بالا جهت تشخیص خاموشی قوس‌های بلندمدت و از توان راکتیو مؤلفه‌های فرانکس پایین جهت تشخیص خاموشی قوس‌های کوتاه‌مدت استفاده می‌کند. در مرجع [۲۶] نیز طرحی تطابقی برای بازبست اتوماتیک بر اساس امواج سیار ارائه شده است. در این مرجع از زمان رسیدن امواج سیار به هر پایانه، طول و سرعت امواج سیار برای این منظور استفاده می‌شود. نکته مهمی که باید در روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال به آن توجه کرد این است که دقت این روش‌ها شدیداً به کیفیت و دقت داده‌های اندازه‌گیری شده وابسته است و مقدار بالایی برای فرانکس نمونه‌برداری در این روش‌ها نیاز است [۷].

با توجه به کاستی‌هایی نظیر احتمال بازبست ناموفق، تهدید پایداری زاویه در اثر تأخیر در انجام بازبست، عدم دقت کافی در شرایط مختلف بهره‌برداری و تحمیل هزینه و بار محاسباتی سنگین، روش موجود و روش‌های پیشنهاد شده در مقالات برای انجام بازبست اتوماتیک کافی نبوده و نیاز به روشی مناسب جهت بهبود عملکرد بازبست اتوماتیک تک پل هم‌چنان احساس می‌شود. از سویی دیگر با توجه به اثبات کارایی تبدیل موجک در تحلیل حالت‌های گذرای سیستم قدرت، در مرجع‌های مختلفی از این تبدیل برای بهبود عملکرد بازبست تطابقی استفاده شده است [۲۱،۲۴]. در نتیجه اصل استفاده از تبدیل موجک، نوآوری این مقاله نبوده و نوآوری اصلی این پژوهش معرفی یک موجک مادر نوین و اثبات کارایی آن در تشخیص سریع‌تر خاموشی قوس ثانویه است. باین حال نوآوری مقاله تنها محدود به این موضوع نیست. به منظور رفع ابهام، نوآوری‌های مقاله به شرح زیر خلاصه شده‌اند:

- معرفی یک موجک مادر نوین مطابق با شرایط ریاضی حاکم بر موجک‌ها
 - استفاده از ترکیبی جدید از ضرایب مربوطه به جزئیات بازسازی
 - پیشنهاد منطق دو آستانه‌ای برای اولین بار به منظور تفکیک خطاهای دائم از گذرا و تشخیص خاموشی قوس ثانویه
- ادامه مقاله به شرح ذیل سازمان یافته است. بخش دوم شامل مدل‌سازی اجزای مختلف سیستم قدرت و مدل‌سازی قوس الکتریکی است. بخش سوم به تشریح روش پیشنهادی می‌پردازد. در بخش چهارم شبیه‌سازی‌های گوناگون به منظور ارزیابی روش پیشنهادی انجام گردیده است. بخش پنجم مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و سایر روش‌ها ارائه داده و در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مدل‌سازی سیستم و قوس الکتریکی

به‌منظور بررسی روش پیشنهادی یک سیستم قدرت نمونه با استفاده از اطلاعات شبکه برق ایران در نرم‌افزار EMTP-RV شبیه‌سازی شده است. شبکه مورد استفاده خط ۴۰۰ کیلوولتی است که دو پست عباسپور و انجیرک را به هم متصل می‌کند. شکل (۱) دیاگرام تک‌خطی شبکه تحت مطالعه را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی تک‌تک اعضای این شبکه اشاره می‌شود. شایان ذکر است که اجزای سیستم با در نظر گرفتن شاخصه‌های غیرخطی و وابسته به فرکانس آن‌ها مدل شده‌اند.

۲-۱- شبکه

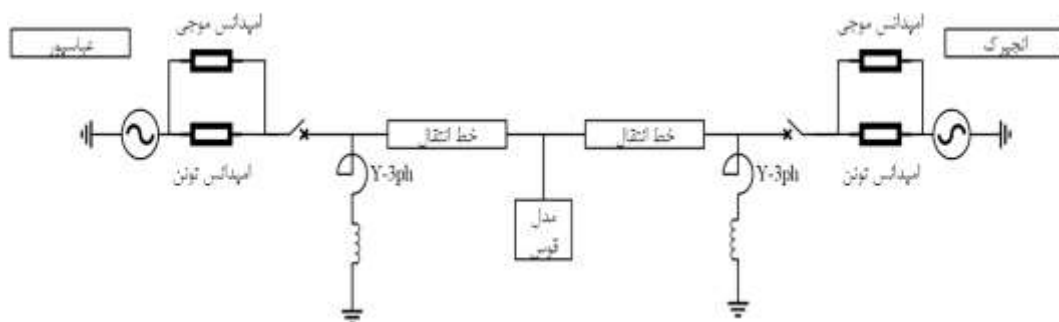
به‌منظور مدل‌سازی شبکه در هر پست از مدار معادل تونن استفاده شده است. با استفاده از مطالعات اتصال کوتاه، امپدانس تونن شبکه برای مؤلفه مثبت و مؤلفه صفر در هر یک از پست‌ها مطابق جدول (۱) حاصل شده است [۵]. با توجه به این‌که این مسئله با حالت گذرای سیستم قدرت سروکار دارد، امپدانس موجی منابع نیز به‌صورت مقاومتهای موازی با امپدانس تونن هر شبکه مدل شده است. مقدار امپدانس موجی ۲۰۰ اهم در نظر گرفته می‌شود [۵،۶].

۲-۲- خط انتقال

به‌منظور مدل‌سازی خط انتقال در مطالعات حالت گذرا باید از مدل وابسته به فرکانس استفاده شود. در این پژوهش نیز از مدل جی-مارتی^{۱۰} برای این منظور استفاده شده است [۲۷]. شکل (۲) آرایش فازها و خطوط زمین (گارد) را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که در ایران از هادی تیپ کرلو^{۱۱} برای سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت استفاده می‌شود، از این هادی برای خطوط فاز استفاده شده است. ویژگی‌های این هادی و هادی استفاده شده برای خطوط زمین (گارد) در جدول (۲) بیان شده است. طول این خط انتقال ۲۶۴ کیلومتر است [۵،۶]. به‌منظور بررسی تأثیر شرایط مختلف هر دو حالت ترانسپوز شده و ترانسپوز نشده در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. مقاومت ویژه زمین ۱۰۰ اهم-متر فرض می‌شود و از اثر پوستی نیز صرف‌نظر می‌شود.

۲-۳- راکتور شنت

در خطوط انتقال طولانی به‌منظور جلوگیری از اضافه ولتاژهای ناشی از اثر فرانتی از راکتورهای شنت به‌منظور جبران‌سازی خط در حالت بی‌باری استفاده می‌شود [۶]. در خط عباسپور-انجیرک نیز از راکتورهای شنت با قدرت ۵۰ مگاوار در هر دو انتهای خط استفاده شده است. به‌منظور مدل‌سازی این راکتورها از سلف‌هایی با راکتانس ۳۲۰۰ اهم استفاده شده است [۵]. از طرفی معمولاً در شرایط پرباری این راکتورها از مدار خارج می‌شوند.



شکل (۱): دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

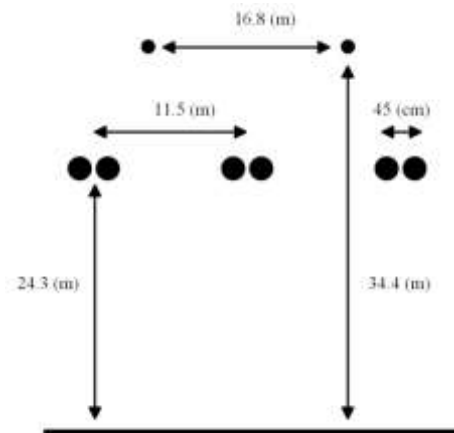
Figure (1): Single-line diagram of the simulated power system

Table (1): Equivalent impedance of sources

جدول (۱): امپدانس معادل منابع

امپدانس (اهم)	عباسپور	انجیرک
R_1	۰/۸	۰/۴۸
X_1	۱۰/۴	۷/۰۴

R_0	۶/۰۸	۰/۴۸
X_0	۲۳/۲	۶/۴



شکل (۲): آرایش خط انتقال [۶]

Figure (2): Transmission line arrangement [6]

Table (2): Characteristics of the used conductors [6]

جدول (۲): ویژگی هادی‌های مورد استفاده [۶]

کمیت	هادی فاز	هادی زمین (گارد)
تعداد هادی	۳ فاز ۲ باندل	۲ هادی
نوع هادی	کرلو	آلومولید ۷ شماره ۸
مساحت هادی (میلی متر مربع)	۵۲۵/۵	۵۸/۶

در نتیجه در شبیه‌سازی‌ها، خط هم بدون جبران‌سازی موازی و هم در حضور راکتورهای شنت مدل شده است. روش پیشنهادی باید بتواند در هر دو حالت نسبت به تعیین نوع خطا و تشخیص زمانی خاموشی قوس عملکرد مطمئن و قابل اطمینانی داشته باشد [۶]. روش‌های مختلفی توسط محققین جهت کاهش انرژی قوس و کمینه کردن زمان دیونیزاسیون پیشنهاد شده است. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها استفاده از راکتورهای شنت سه فاز است که نقطه خنثی آن‌ها توسط سلف تک‌فازی (موسوم به سلف نوترال) زمین می‌شود [۱۲]. اندازه این سلف به نحوی تعیین می‌شود که جریان خازنی که از فازهای سالم به سمت قوس جاری می‌شود را خنثی کند و قوس ثانویه سریع‌تر خاموش گردد [۶]. بهترین مقدار امپدانس برای سلف نوترال طبق نتایج مرجع [۵] برابر ۹۲۷ اهم است که مقدار سلف معادل آن ۲/۹۵ هانری خواهد بود. برای بررسی اثرات این موضوع بر خاموشی قوس، نقطه خنثی راکتورها در حالت‌های مختلف زمین شده است.

۴-۲- مدل‌سازی قوس

زمانی که خطای تک‌فاز به زمینی رخ می‌دهد یک کانال و ستون از یون‌های داغ در هوا تشکیل شده و جریان اتصال کوتاه از مسیر قوس الکتریکی (قوس اولیه) بسته می‌شود. پس از زمانی کوتاه رله‌های حفاظتی وجود خطا را تشخیص داده و کلید مربوطه در هر دو انتهای خط باز می‌شوند تا فاز خطادار را از سایر قسمت‌های شبکه ایزوله کند [۳]. در این شرایط شارش انرژی از دو فاز سالم ادامه می‌یابد و به دلیل تزویج سلفی و خازنی بین فازهای سالم و فاز خطادار، مقداری ولتاژ در قسمت جداد شده فاز خطادار القا می‌شود. در این صورت علی‌رغم این‌که کلیدهای هر دو انتهای خط برای فاز خطادار باز هستند، ولتاژ القاشده جریان خطا را تغذیه کرده و باعث استمرار قوس الکتریکی در محل خطا می‌شود که به آن قوس ثانویه گفته می‌شود. قوس ثانویه مانع از خاموشی قوس شده و منجر به طولانی شدن زمان دیونیزاسیون می‌شود [۴، ۵]. به منظور مدل‌سازی قوس از مدل قیزیل‌چای^{۱۲} استفاده می‌شود [۲۸]. این مدل از هدایت (کنداکتانس) متغیر با زمان به منظور بیان ریاضی تعادل انرژی کانال قوس استفاده

می‌کند. برای این منظور از معادله دیفرانسیل (۱) استفاده می‌شود [۵،۶] که در آن ثابت زمانی قوس، g هدایت آنی قوس و متغیر بازمان G هدایت قوس ثابت است. هدایت قوس ثابت مقدار هدایت قوس است زمانی که تحت شرایط خارجی ثابت جریان قوس به مدت طولانی ثابت بماند. مقدار هدایت قوس ثابت (G) توسط رابطه (۲) تعیین می‌شود [۴].

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} (G - g) \quad (1)$$

$$G = \frac{|i_{arc}|}{(u_0 + r_0 |i_{arc}|) \cdot I_{arc}(t)} \quad (2)$$

که در آن $I_{arc}(t)$ طول لحظه‌ای قوس، u_0 ولتاژ مشخصه قوس به ازای طول قوس، r_0 مقاومت مشخصه قوس به ازای طول قوس و i_{arc} بیانگر جریان قوس (جریان اتصال کوتاه عبوری از کانال قوس) است [۵،۶]. برای محاسبه ثابت زمانی قوس (τ) نیز از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$\tau(I) = \tau_0 \left(\frac{I_{arc}(t)}{I_0} \right)^\alpha \quad (3)$$

که در آن τ_0 ثابت زمانی اولیه قوس، I_0 طول اولیه قوس و α ضریبی است که از بازه $(-0.1, -0.6)$ انتخاب می‌شود. در این مقاله مقدار α برابر -0.5 در نظر گرفته می‌شود. مطابق این رابطه ثابت زمانی قوس به صورت معکوس با طول آن رابطه دارد. با توجه به رابطه‌های بیان شده، مدل در نظر گرفته شده برای قوس ثانویه وابسته به طول قوس است و تغییر طول قوس بازمان مهم‌ترین عاملی است که در طول مدت زمان برقراری قوس و خاموشی آن اثرگذار است [۵]. حتی اگر طول قوس اولیه ثابت فرض شود، زمان و طول قوس ثانویه با تغییر مشخصات قوس نظیر جریان قوس، مقاومت قوس، همرفت حرارتی، رطوبت هوا، سرعت و جهت باد تغییر می‌کند [۴،۵]. در نظر گرفتن این عوامل تصادفی به صورت دقیق در محاسبات عددی امری بسیار دشوار است، با این حال تغییرات طول قوس توسط رابطه (۴) زیر قابل تخمین است زمانی که سرعت باد بین صفر تا ۱ متر بر ثانیه باشد.

$$I(t - t_s) = \begin{cases} 10 \times I_0 (t - t_s) & t > 0.1 + t_s \\ I_0 & t \leq 0.1 + t_s \end{cases} \quad (4)$$

که در آن I_0 طول اولیه قوس و t_s زمان عملکرد کلید برای باز کردن خط است. مطابق رابطه فوق تا 0.1 ثانیه بعد از باز کردن کلید طول قوس ثابت است و پس از آن با افزایش زمان، طول قوس نیز افزایش می‌یابد [۴]. بر اساس رابطه‌های بیان شده این مدل قوس نیازمند تعدادی پارامتر ورودی است که باید با توجه به شرایط محیطی از پیش تعیین شوند و رفتار قوس با تغییر رفتار آن‌ها تغییر می‌کند. در شبیه‌سازی‌ها از مجموعه داده‌های مختلف برای مدل‌سازی قوس در نرم‌افزار EMTP-RV استفاده شده است.

۳- روش پیشنهادی

همان‌گونه که در بخش پیشینه پژوهش بیان شد کارایی تبدیلی مویک در تشخیص حالت‌های گذرای سیستم قدرت و خاموشی قوس ثانویه در مراجع بسیاری نشان داده شده است. در این پژوهش نیز از این روش استفاده شده، با این تفاوت که یک مویک مادر نوین پیشنهاد شده است.

۳-۲- تبدیل مویک

تبدیل فوریه برای تحلیل سیگنال‌های ایستا و فاقد حالت گذرا مانند سیگنال سینوسی فرکانس قدرت مناسب است و برای تحلیل حالت‌های گذرای سیستم محدودیت دارد. در صورتی که فرکانس‌های ظاهر شده در سیگنال در زمان‌های مختلف یک بازه رخ دهد، کل تبدیل فوریه در این بازه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین زمان دقیق رخداد مؤلفه‌های گذرا و مدت برقراری آن‌ها قابل تشخیص نیست [۴،۱۸]. مشکل مذکور توسط تبدیل مویک قابل رفع است. این تبدیل روشی جایگزین برای شکستن سیگنال به عناصر اصلی آن پیشنهاد می‌کند. تبدیل مویک سیگنال را به وسیله توابع سینوسی و یا چندجمله‌ای‌های مثلثاتی بسط

نمی‌دهد، بلکه این کار با استفاده از مقیاس دهی^{۱۳} (انبساط و انقباض) و انتقال^{۱۴} سیگنال موجک مادر انجام می‌شود [۴،۱۸]. برخلاف تبدیل فوری در تبدیل موجک طول پنجره ثابت نیست و برای فرکانس‌های بالا از طول پنجره کوچک‌تر و برای فرکانس‌های پایین از طول پنجره بزرگ‌تر استفاده می‌شود [۲۹]. در نتیجه پنجره تبدیل موجک به صورت خودکار برای فرکانس‌های مختلف تنظیم می‌شود و میزان شباهت سیگنال را با موجک مادر تبدیل شده می‌سنجد. از طرفی دیگر تبدیل موجک یک تبدیل در حوزه زمان-فرکانس است یعنی علاوه بر بیان شدت محدوده فرکانسی زمان رخداد آن را نیز بیان می‌کند [۱۸]. با توجه به ویژگی‌های تبدیل موجک می‌توان پی برد که این تبدیل برای آنالیز حالت‌های گذرای سیستم قدرت بسیار مناسب است. تبدیل موجک انواع مختلفی دارد که بسته به شرایط مسئله از آن‌ها استفاده می‌شود. از آن جمله می‌توان به تبدیل موجک پیوسته^{۱۵} و تبدیل موجک گسسته^{۱۶} اشاره کرد. تبدیل موجک پیوسته مطابق رابطه (۵) از انتگرال حاصل ضرب سیگنال مورد بررسی در تابع موجک مادر تبدیل شده محاسبه می‌شود [۳۰].

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

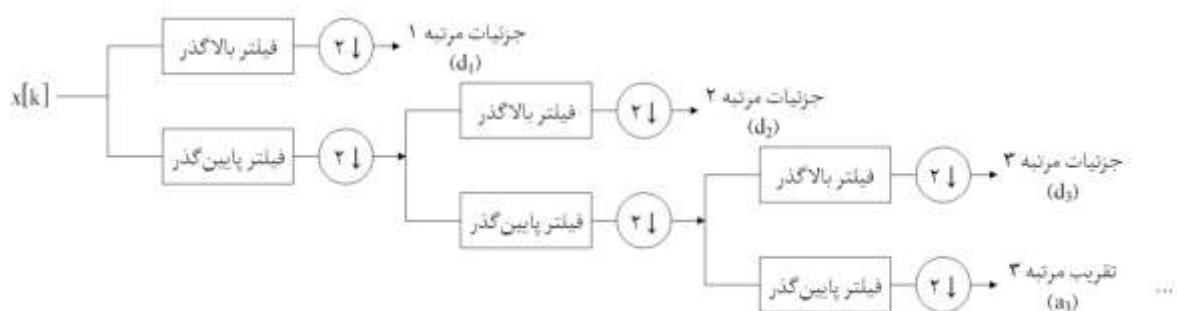
که در آن $x(t)$ تابع سیگنال مورد بررسی، $\psi(t)$ تابع موجک مادر، b عامل انتقال موجک مادر و a عامل انقباض و انبساط موجک مادر است. تبدیل موجک پیوسته یک نسخه دیجیتالی هم دارد که تبدیل موجک گسسته نامیده می‌شود. در تبدیل موجک گسسته از مقادیر گسسته برای پارامترهای مقیاس دهی و انتقال استفاده می‌شود. این تبدیل برای سیگنال‌های گسسته و یا سیگنال‌هایی که نمونه‌برداری شده‌اند، مناسب است. تبدیل موجک گسسته توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۳۰].

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x[k] \psi\left[\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (6)$$

که در آن پارامتر مقیاس دهی ($a=a_0^m$) به صورت توان‌های صحیح مثبتی از یک عدد ثابت انتخاب می‌شوند. این عدد ثابت (a_0) معمولاً برابر ۲ است. عامل انتقال ($b=nb_0 a_0^m$) نیز از اعداد طبیعی انتخاب می‌شوند [۱۸]. یکی از روش‌های اجرای تبدیل موجک گسسته استفاده از بانک فیلتری است که در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق شکل، سیگنال در مرحله اول توسط فیلترهایی که با استفاده از تبدیل موجک ساخته می‌شوند به دو مؤلفه فرکانس بالا (جزئیات^{۱۷}) و فرکانس پایین (تقریب^{۱۸}) تقسیم می‌شود. همین روند در مرحله بعد بر روی مؤلفه تقریب انجام می‌گیرد. با انجام این کار می‌توان سیگنال را در باندهای مختلف فرکانسی دسته‌بندی نمود. تعداد داده در هر یک از مؤلفه‌ها نصف تعداد داده در مرحله قبل است تا بار محاسباتی چندان افزایش نیابد. به این نوع نمونه‌برداری نمونه‌کاهی^{۱۹} گفته می‌شود [۱۸،۲۱]. پس می‌توان نتیجه گرفت که تبدیل موجک یک ابزار ایده آل جهت استخراج حالت‌های گذرای فرکانس بالا ناشی از قوس ثانویه ارائه می‌دهد.

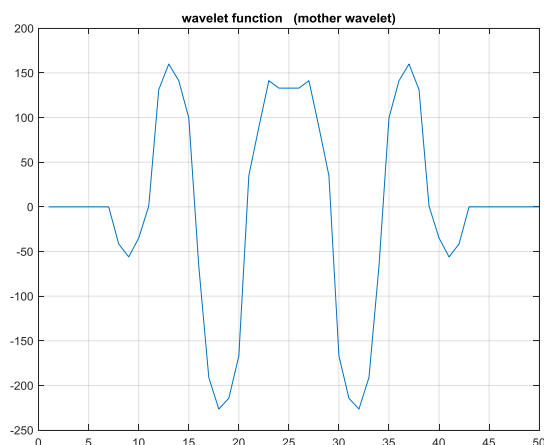
۲-۳- موجک مادر نوین

هر خانواده از موجک‌ها دارای شکل متفاوتی بوده و برای هدفی ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه می‌توان برای هر منظوری یک خانواده جدید از موجک‌ها تعریف نمود به شرطی که کارایی آن برای مسئله مورد نظر اثبات شود و در شرایط لازم برای موجک مادر صدق کند.



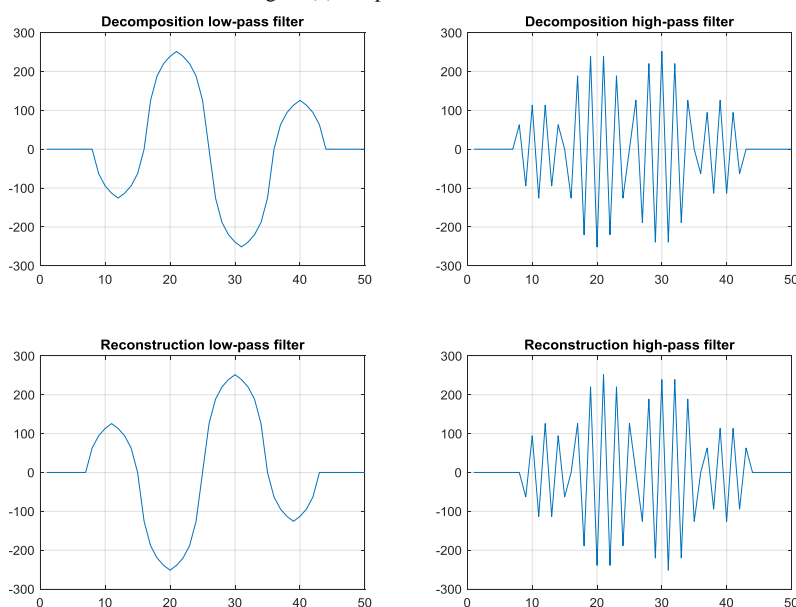
شکل (۳): نحوه اجرای تبدیل موجک گسسته توسط روش بانک فیلتری

Figure (3): How to implement discrete wavelet transform by filter bank method



شکل (۴): موجک مادر پیشنهادی

Figure (4): Proposed mother wavelet



شکل (۵): فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر ایجادشده توسط موجک مادر پیشنهادی

Figure (5): High-pass and low-pass filters produced by the proposed mother wavelet

شروطی که باید موجک مادر دارا باشد این است که دارا طول محدود باشد، به صورت نوسانی میرا شود و همچنین مقدار متوسط آن صفر باشد. با توجه به این که شرایط لازم برای موجک مادر شرایط سخت‌گیرانه‌ای نیست، در نتیجه موجک‌ها می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشند. موجک مادر شرایط اختیاری دیگری نیز دارد. موجک مادر می‌تواند متعامد^{۲۰} یا متعامد دوطرفه^{۲۱} باشد یا نباشد و همچنین می‌تواند متقارن باشد یا نباشد [۳۰].

شکل (۴) موجک مادر پیشنهادی توسط این مقاله را نشان می‌دهد. مطابق شکل این موجک دارای طول محدودی است، به صورت نوسانی میرا شده است و مقدار متوسط آن نیز صفر است. در نتیجه شرایط لازم برای یک موجک مادر را دارد. همچنین موجک پیشنهادی متعامد نیز هست. با توجه به این موضوع فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذری که توسط این موجک ایجاد می‌شود و در بانک فیلتری استفاده می‌گردد، مطابق شکل (۵) خواهد بود. نحوه به دست آوردن فیلترهای مذکور مطابق روشی است که در مرجع [۳۱] بیان شده است. اطلاعات تکمیلی پیرامون موجک پیشنهادی شامل مقادیر تابع موجک، مقادیر تابع انتقال و همچنین روابط ریاضی حاکم بین توابع و فیلترها در قسمت ضمیمه آورده شده است.

۳-۳- روش پیشنهادی بر اساس موجک مادر نوین

در مقالات گوناگون روش‌های متنوعی با استفاده از ترکیب‌های مختلف از ضرایب تجزیه^{۲۲} و بازسازی^{۲۳} ارائه شده است. در این پژوهش نیز از ترکیب ضرایب مربوط به جزئیات بازسازی^{۲۱} استفاده شده است. بدین صورت که در ابتدا از سیگنال ولتاژ با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز نمونه‌برداری می‌شود و در پنجره‌های ۱۰۰ تایی در ۵ طبقه مورد پردازش قرار می‌گیرند. در نتیجه این پردازش توسط فیلترهای مختلف و با استفاده از موجک مادر پیشنهادی، سیگنال ورودی به ۵ ضریب جزئیات و ۱ ضریب تقریب تقسیم می‌شود. در مرحله بعد مقدار مؤثر^{۲۵} (RMS) جزئیات مرتبه ۲۶^۵ (dd₅) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$dd_5(i) = \text{RMS}\{d_5(i-99:i)\} = \sqrt{\frac{1}{100} \left(\sum_{j=0}^{99} d_5^2(i-j) \right)} \quad (7)$$

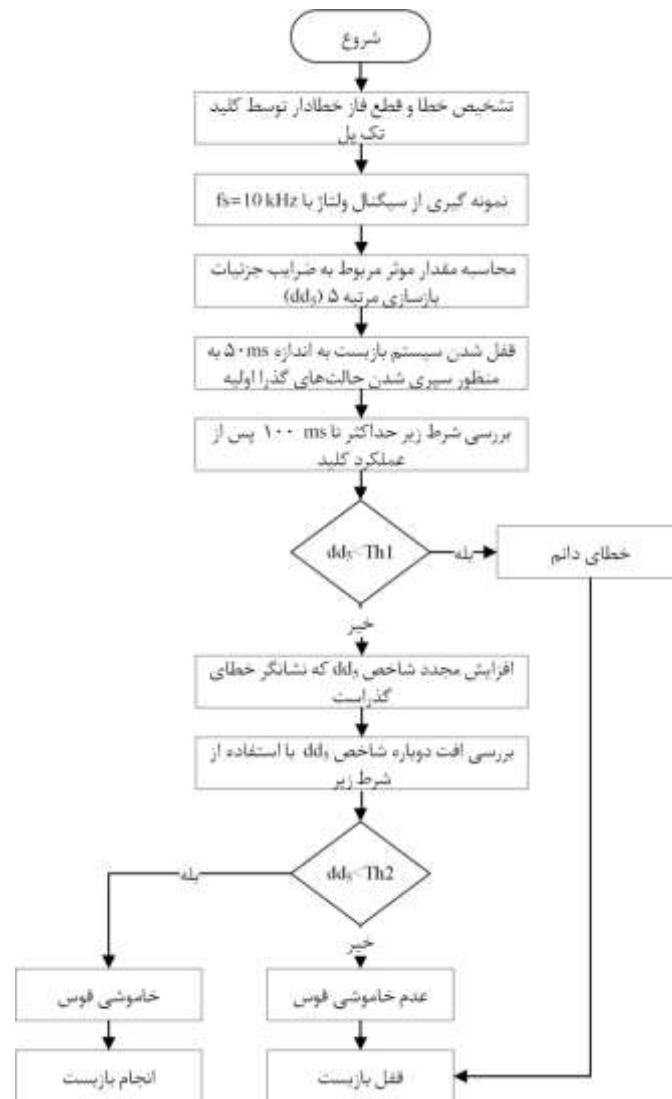
با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، حالت‌های گذرای در اثر کلیدزنی ایجاد می‌شود و حدود ۵۰ میلی‌ثانیه در سیستم باقی می‌ماند. این موضوع باعث جهش dd₅ در لحظات ابتدایی پس از قطع کلید می‌شود. البته با میرا شدن این حالت‌های گذرا مقدار dd₅ نیز به سرعت کاهش می‌یابد. اما در صورت وجود قوس مقدار dd₅ دوباره افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع در روش پیشنهادی اگر مقدار dd₅ پس از میرا شدن حالت‌های گذرای کلید زنی از حد آستانه اول^{۲۷} (Th1) تجاوز نکند، نشانگر این است که خطا از نوع دائمی است و همراه قوس نیست و نباید عملیات بازست انجام شود. مدت زمان بررسی این موضوع حداکثر تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه پس از عملکرد کلید است. این بدین معنی است که روش پیشنهادی در کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه نوع خطا را از لحاظ دائمی یا گذرا بودن تشخیص می‌دهد. در صورتی که مقدار dd₅ از حد آستانه مذکور عبور کند نشانگر این است که خطا از نوع موقت بوده و همراه قوس است. در نتیجه بایستی تا خاموشی قوس صبر شود و سپس عملیات بازست انجام گیرد. خاموشی قوس باعث افول دوباره dd₅ می‌شود. در این مرحله اگر مقدار dd₅ از حد آستانه دوم^{۲۸} (Th2) کمتر شود، تشخیص داده می‌شود که قوس خاموش شده است. مقدار Th1 برابر ۲/۵×۱۰^{۱۷} و Th2 برابر ۵×۱۰^{۱۷} با انجام آزمایش‌های بسیار در حالت‌های مختلف بهره‌برداری و آنالیز حساسیت مشخصات متفاوت قوس تعیین شده است. فلوجارت شکل (۶) روش پیشنهادی را به صورت خلاصه بیان می‌کند.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف بیان می‌شود. در حالت‌های گوناگون روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته و کارایی آن نشان داده می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار حالت گذرای EMTP-RV انجام شده است. برای اجرای روش پیشنهادی نیز از نرم‌افزار متلب استفاده گردیده است. شایان‌ذکر است که در تمامی حالت‌های شبیه‌سازی به‌منظور در نظر گرفتن نویز اندازه‌گیری، نویز سفید گوسی با نسبت سیگنال به نویز (SNR) برابر ۶۰ دسی‌بل به سیگنال اندازه‌گیری شده اضافه شده است. نتایج حاصله نشانگر مقاومت روش پیشنهادی در برابر نویز اندازه‌گیری است.

۴-۱- خطای موقت در خط ترانسپوز شده

فرض می‌شود خطای گذرای در فاز a در وسط خط انتقال رخ دهد. در شرایطی که خط به‌طور کامل ترانسپوز شده است و مقاومت خط ناچیز فرض می‌شود. در این صورت شکل موج ولتاژ فاز خطادار در دو باس انتهایی خط مطابق شکل (۷) خواهد بود. مطابق شکل، خطا در لحظه ۰/۱ ثانیه رخ می‌دهد و در لحظه ۰/۲ ثانیه کلیدهای دو طرف عمل می‌کنند. پس از عملکرد کلید، شاهد حالت‌های گذرای کلید زنی و ایجاد قوس الکتریکی هستیم. از طرفی قوس الکتریکی به علت تزویج بین فازهای سالم و فاز خطادار به فرم قوس ثانویه استمرار یافته و موفقیت عملیات بازست را تهدید می‌کند. با توجه به شکل فوق می‌توان گفت که شکل موج ناشی از قوس الکتریکی و علی‌الخصوص قوس ثانویه دارای شکل نامنظم، مقطعی و فرکانس بالا است. در نتیجه تبدیل موجک می‌تواند گزینه مناسبی برای تشخیص حضور یا قطع قوس ثانویه باشد. از طرفی توجه به شکل موج ولتاژ در هنگام حضور قوس و مقایسه آن با موجک‌های استاندارد این حقیقت را روشن می‌سازد که موجک‌های معمول و استاندارد شباهتی با شکل موج ولتاژ حین قوس ثانویه ندارند.



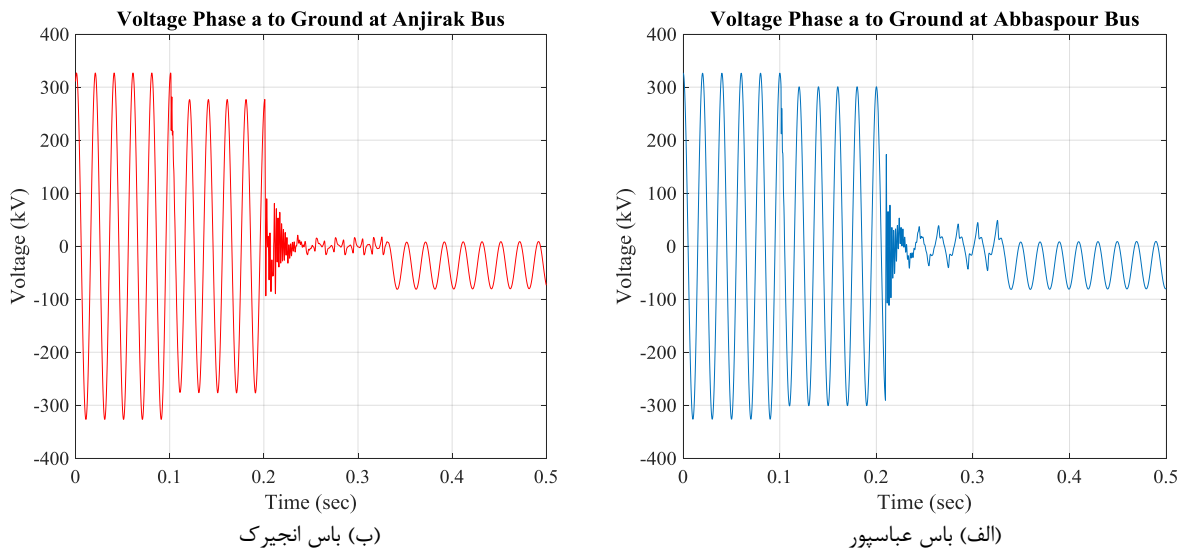
شکل (۶): فلوجارت روش پیشنهادی

Figure (6): Flowchart of the proposed method

در نتیجه بهتر است یک موجک جدید برای این منظور تعریف شود. با توجه به این موضوع و با استفاده از بانک فیلتری ساخته شده بر اساس موجک جدید، از مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ (dds) به منظور تفکیک نوع خطا و تشخیص خاموشی قوس ثانویه استفاده می‌شود. شکل (۸) این مقدار را برای زمان‌های پس از باز شدن کلیدهای طرفین نشان می‌دهد. شکل (۸) نشان می‌دهد که مقدار شاخص dds از مقدار $Th1$ کمتر نشده و به میزان لازم زیر این سطح باقی نمی‌ماند. در نتیجه در مرحله اول تعیین می‌شود که خطا از نوع موقت است. در مرحله دوم با کاهش مقدار dds از حد آستانه‌ای $Th2$ خاموشی قوس تشخیص داده می‌شود. این موضوع در باس عباسپور در لحظه $۰/۳۳۷۷$ ثانیه و در باس انجیرک نیز در لحظه $۰/۳۳۷۸$ ثانیه تشخیص داده می‌شود. با استفاده از شکل اصلی ولتاژ مشاهده می‌شود که لحظه واقعی خاموشی قوس $۰/۳۳۱۹$ ثانیه است و این یعنی تأخیر روش پیشنهادی کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه است. جدول (۳) زمان خاموش قوس و زمان تشخیص این موضوع را برای رخداد خطاهای گذرا در فازهای مختلف، محل‌های مختلف خطا و در حضور مقاومت‌های خطای گوناگون نشان می‌دهد. منظور از مقاومت خطا در این حالت حداقل مقاومت خطا بدون در نظر گرفتن مقاومت قوس الکتریکی است. مطابق نتایج حاصله تفاوت چندانی در زمان خاموشی قوس برای فازهای مختلف وجود ندارد. علت این موضوع ترانسپوز شدن کامل خط است. همچنین تغییر محل خطا در خاموشی قوس و فرآیند تشخیص آن تقریباً بی‌تأثیر است. با این حال افزایش مقاومت خطا باعث خاموشی سریع‌تر قوس می‌شود. در تمام حالت‌ها روش پیشنهادی با تأخیر کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه می‌تواند خاموشی قوس را تشخیص دهد.

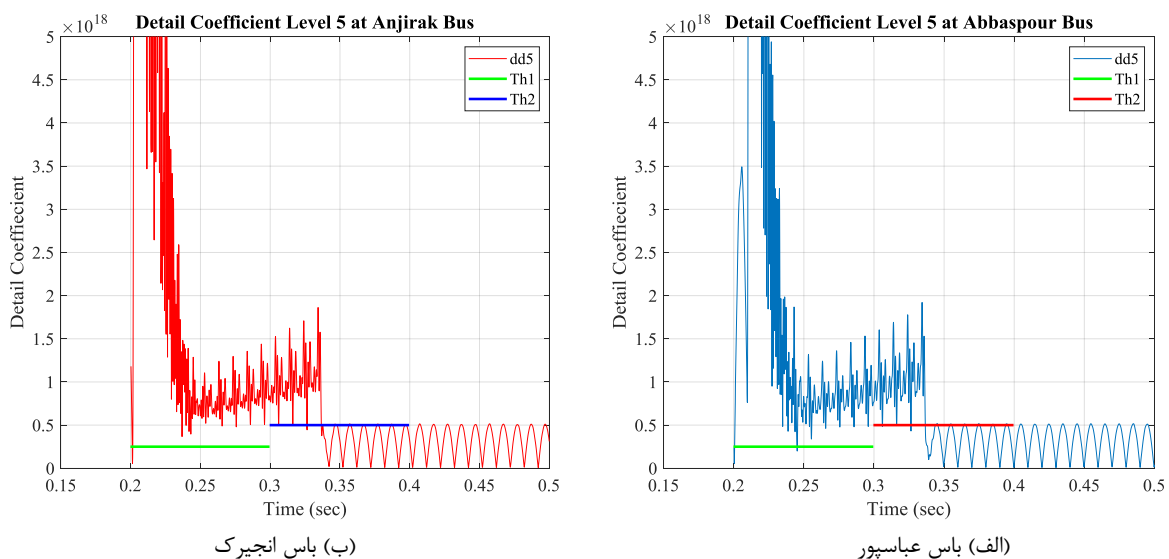
۴-۲- تأثیر ترانسپوز نشدن خط بر زمان خاموشی قوس

در این حالت فرض می‌شود خط انتقال ترانسپوز نشده است. سایر شرایط مشابه حالت قبل است یعنی خطای گذرای در فاز a در وسط خط رخ دهد و مقاومت خطا ناچیز فرض می‌شود. در این صورت شکل موج ولتاژ فاز خطا در دو انتهای خط مطابق شکل (۹) خواهد بود. شکل (۱۰) مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ (dd_5) را برای زمان‌های پس از باز شدن کلیدهای طرفین نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق مشخص می‌شود که مقدار شاخص dd_5 به میزان کافی زیر سطح Th1 باقی نمی‌ماند و با افزایش دوباره dd_5 تشخیص داده می‌شود که خطا از نوع گذرا است. در مرحله دوم با کاهش مقدار dd_5 از حد آستانه‌ای Th2 خاموشی قوس تشخیص داده می‌شود. با توجه به این موضوع خاموشی قوس در باس عباسپور در لحظه ۰/۳۹۵۸ ثانیه و در باس انجیرک در لحظه ۰/۳۹۵۷ ثانیه تشخیص داده می‌شود. از طرفی مطابق شکل موج ولتاژ مشخص می‌شود که قوس در لحظه ۰/۳۸۸۹ ثانیه خاموش شده است، که نشانگر تأخیر بسیار ناچیز روش پیشنهادی است. به این نکته بایستی دقت شود که به علت این که خط ترانسپوز نشده است، میزان القای ولتاژ توسط فازهای سالم بیشتر بوده و قوس ثانویه مدت بیشتری استمرار می‌یابد.



شکل (۷): شکل موج ولتاژ زمانی که خط ترانسپوز شده در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک

Figure (7): Voltage waveform when the line is fully transposed at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

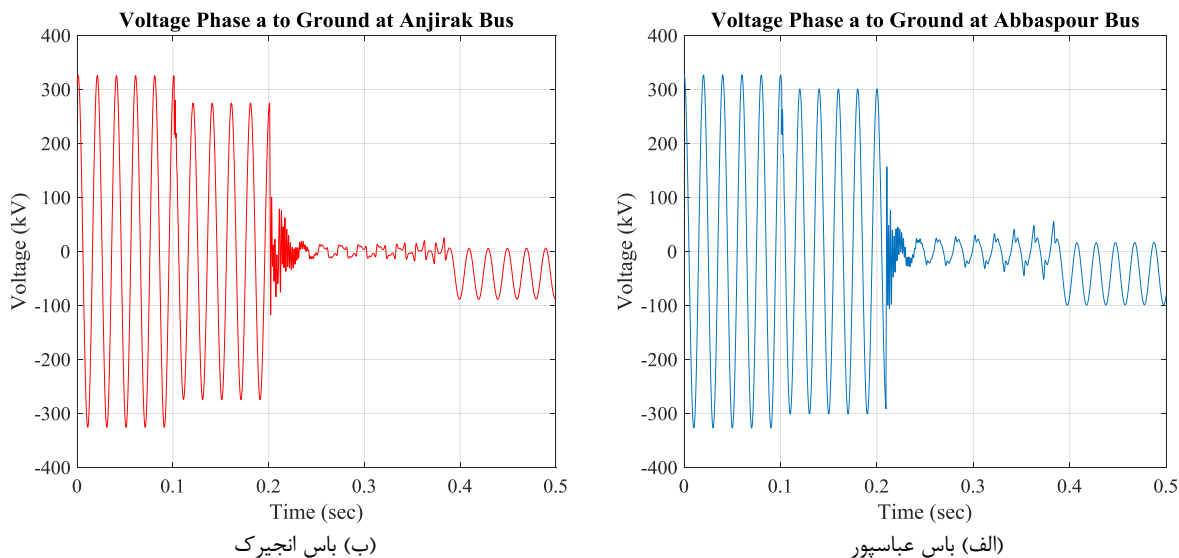


شکل (۸): مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ زمانی که خط ترانسپوز شده در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک

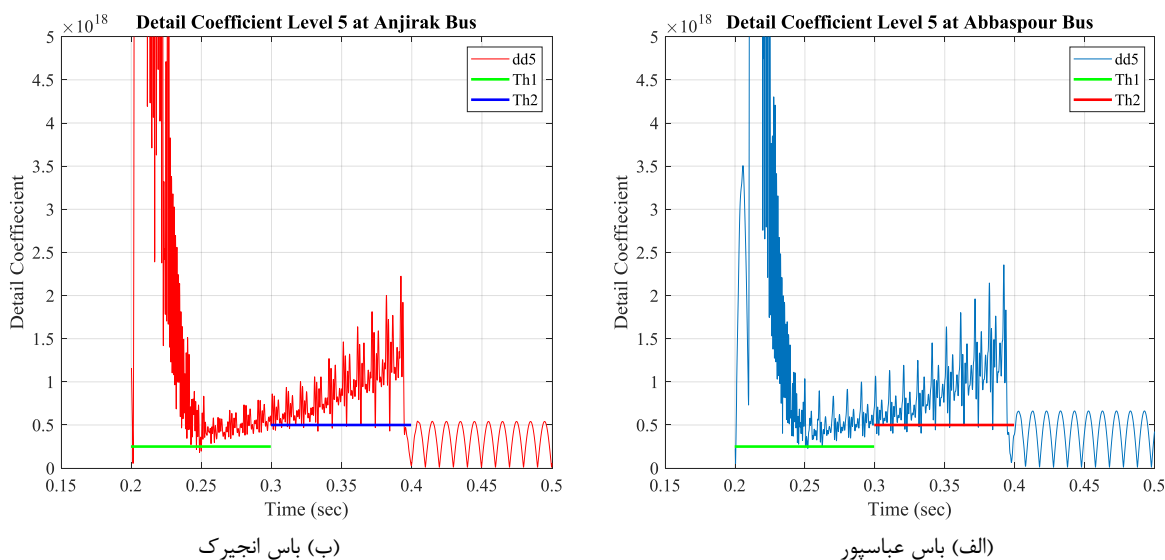
Figure (8): RMS value of 5th order detail when the line is fully transposed at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

Table (3): Sensitivity analysis for transient faults with different conditions for the fully transposed line
جدول (۳): آنالیز حساسیت برای خط‌های گذرا با شرایط متفاوت برای خطی که ترانسپوز شده است

حالت شبیه‌سازی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
زمان خاموشی قوس (میلی‌ثانیه)	۳۳۲	۳۳۰	۳۲۷	۳۳۲	۳۳۲	۳۳۱	۳۲۰
زمان تشخیص داده‌شده (میلی‌ثانیه)	۳۳۸	۳۳۴	۳۳۱	۳۳۷	۳۳۸	۳۳۸	۳۲۸
فاز خط‌دار	a	b	c	a	a	a	a
محل خطا از باس عباسپور (کیلومتر)	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲	۲۴۰	۲۰	۱۳۲	۱۳۲
مقاومت خطا (اهم)	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰۰



شکل (۹): شکل موج ولتاژ زمانی که خط ترانسپوز نشده در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (9): Voltage waveform when the line is not transposed at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses



شکل (۱۰): مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ زمانی که خط ترانسپوز نشده در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (10): RMS value of 5th order detail when the line is not transposed at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

جدول (۴) زمان تشخیص خاموش قوس و تأخیر در تشخیص را برای رخداد خطای گذرا در فازهای مختلف، محل‌های مختلف خطا و در حضور مقاومت‌های خطای گوناگون را برای زمانی که خط ترانسپوز نشده است نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود زمانی که خط ترانسپوز نشده است مدت استمرار قوس برای فاز وسط (b) بیشتر از دو فاز کناری است. علت این موضوع کمتر بودن

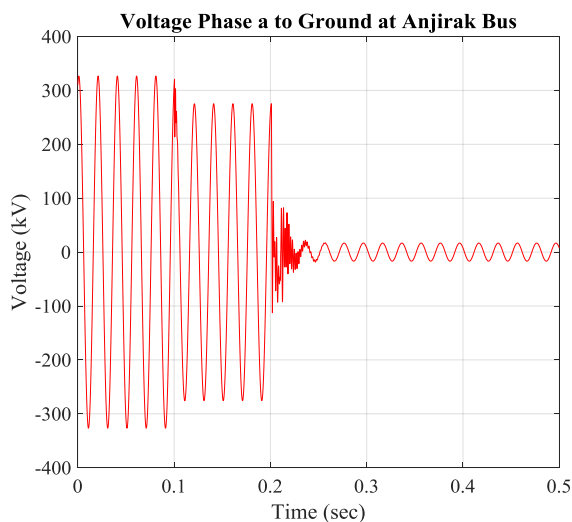
فاصله متوسط هندسی^{۲۹} در این حالت و القای بیشتر فازهای سالم بر فاز وسط است. مطابق نتایج حاصله تغییر محل خطا در خاموشی قوس و فرآیند تشخیص آن تقریباً بی تأثیر است. همچنین افزایش مقاومت خطا باعث خاموشی سریع تر قوس می شود. در تمام حالات روش پیشنهادی با تأخیر کمتر از ۱۰ میلی ثانیه می تواند خاموشی قوس را تشخیص دهد.

۳-۴- نحوه تشخیص خطای دائم

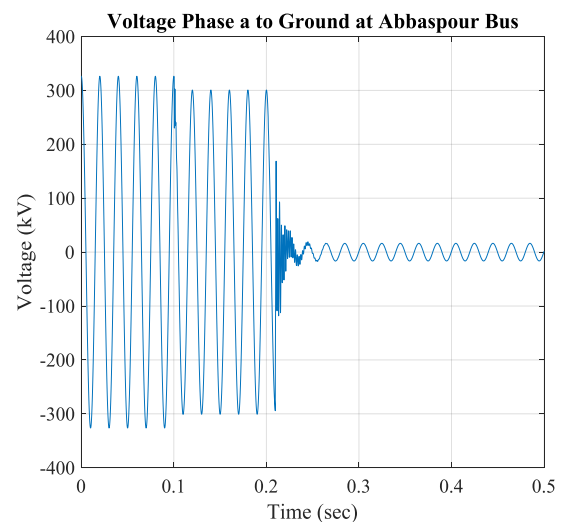
در این قسمت می خواهیم امنیت روش پیشنهادی را بررسی کنیم. برای این منظور فرض می شود مشابه حالت های قبل خطایی در وسط خط برای فاز a رخ دهد با این تفاوت که خطا گذرا نیست و به صورت دائم در سیستم باقی می ماند. خط به طور کامل ترانسپوز شده و مقاومت خطا ناچیز است. در این صورت شکل موج ولتاژ فاز خطا دار که در دو انتهای خط مشاهده و اندازه گیری می شود مطابق شکل (۱۱) خواهد بود. مشاهده می شود برخلاف حالت های قبل، شکل موج ولتاژ پس از قطع کلیدهای طرفین و سپری شدن حالت های گذرای ناشی از کلید زنی فاقد اعوجاج بوده و کاملاً سینوسی است که نشانگر عدم وجود قوس است. شکل (۱۲) مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ (dd₅) را برای زمان های پس از باز شدن کلیدهای طرفین نشان می دهد. مطابق شکل در اثر حالت های گذرای پس از کلید زنی افزایش قابل ملاحظه ای در مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ (dd₅) رخ می دهد، پس از سپری شدن و میرا شدن این حالت های گذرا مقدار شاخص dd₅ به مقداری کمتر از مقدار آستانه ای Th1 کاهش یافته و تا ۱۰۰ میلی ثانیه پس از قطع کلید در این محدوده باقی می ماند و برخلاف حالت های قبل هیچ افزایش دوباره ای در مقدار شاخص dd₅ ایجاد نمی شود. در نتیجه روش پیشنهادی عدم رخداد قوس را تشخیص داده و دیگر نیازی به بررسی خاموشی یا عدم خاموشی قوس نیست و خطای تشخیص داده شده از نوع دائمی خواهد بود.

Table (4): Sensitivity analysis for transient faults with different conditions when the line is not transposed
جدول (۴): آنالیز حساسیت برای خطاهای گذرا با شرایط متفاوت زمانی که خط ترانسپوز نشده است

حالت شبیه سازی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
زمان خاموشی قوس (میلی ثانیه)	۳۸۹	۳۹۸	۳۸۷	۳۸۹	۳۸۸	۳۷۹	۳۷۷
زمان تشخیص داده شده (میلی ثانیه)	۳۹۶	۴۰۶	۳۹۵	۳۹۶	۳۹۶	۳۸۶	۳۸۶
فاز خطا دار	a	b	c	a	a	a	a
محل خطا از باس عباسپور (کیلومتر)	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲	۲۴۰	۲۰	۱۳۲	۱۳۲
مقاومت خطا (اهم)	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰۰



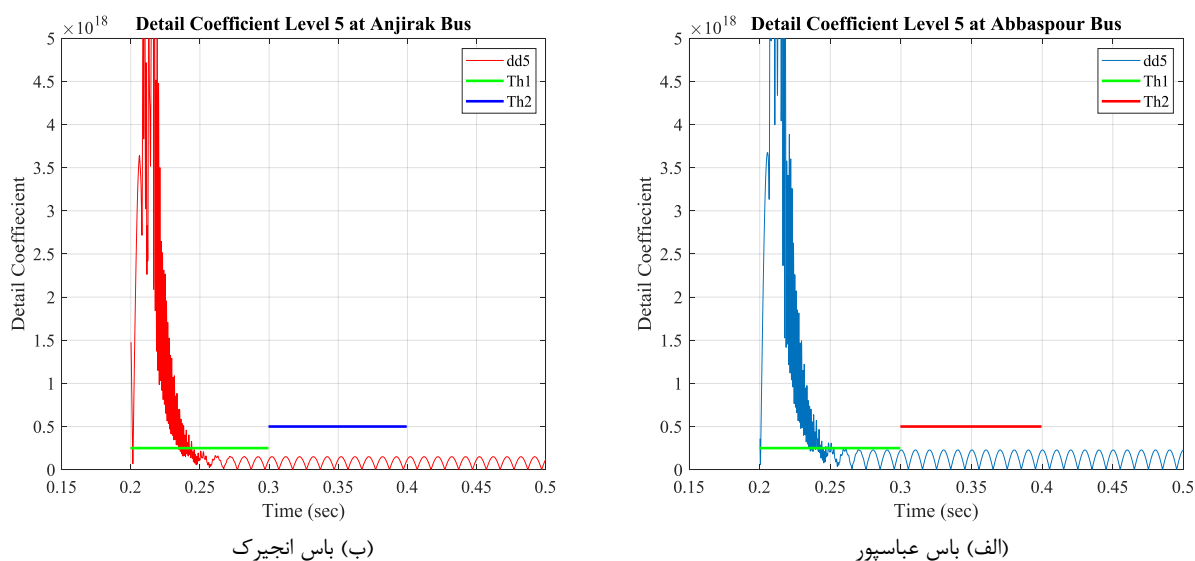
(ب) باس انجیرک



(الف) باس عباسپور

شکل (۱۱): شکل موج ولتاژ زمانی که خطا دائم است در باس های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک

Figure (11): Voltage waveform when the fault is permanent at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses



شکل (۱۲): مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ زمانی که خطا دائم است در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (12): RMS value of 5th order detail when the fault is permanent at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

Table (5): Sensitivity analysis for permanent faults in different phases with various fault resistances
جدول (۵): آنالیز حساسیت برای خطاهای دائم در فازهای مختلف و با مقاومت خطای گوناگون

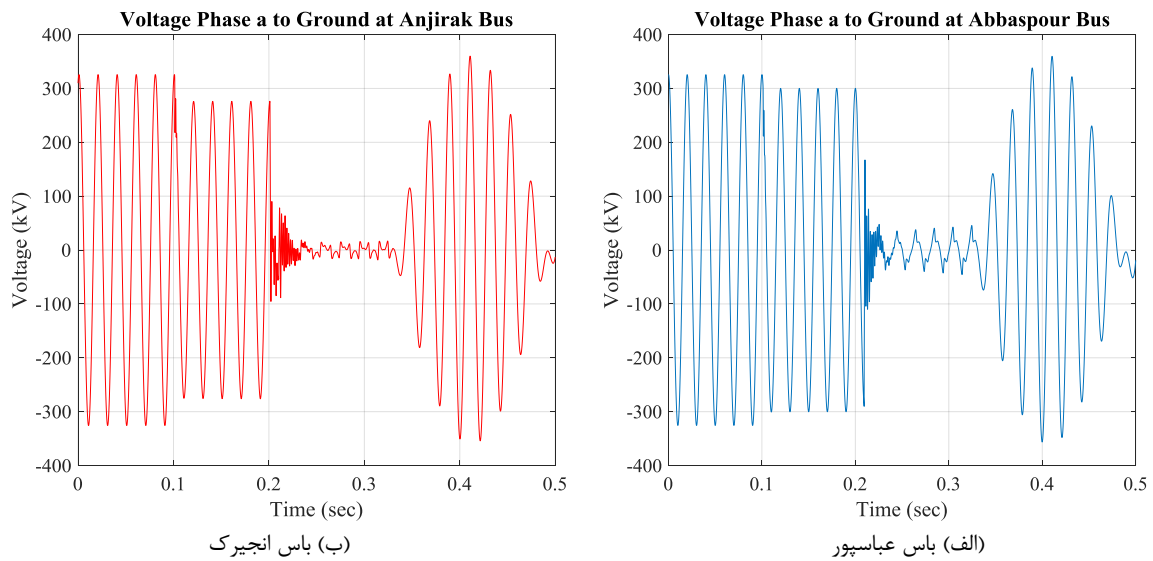
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	حالت شبیه‌سازی
دائمی	دائمی	دائمی	دائمی	دائمی	دائمی	دائمی	نوع خطای تشخیص داده شده
a	A	a	a	c	b	a	فاز خطادار
۲۰	۲۴۰	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲	محل خطا از باس عباسپور (کیلومتر)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰	۰	۰	۰	مقاومت خطا (اهم)

جدول (۵) نوع خطای تشخیص داده شده را برای رخداد خطای دائم در فازهای مختلف، محل‌های مختلف خطا و در حضور مقاومت‌های خطای گوناگون را نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصله روش پیشنهادی نوع خطا را در خطاهای دائم با مقاومت خطای بالا نیز به درستی تشخیص می‌دهد.

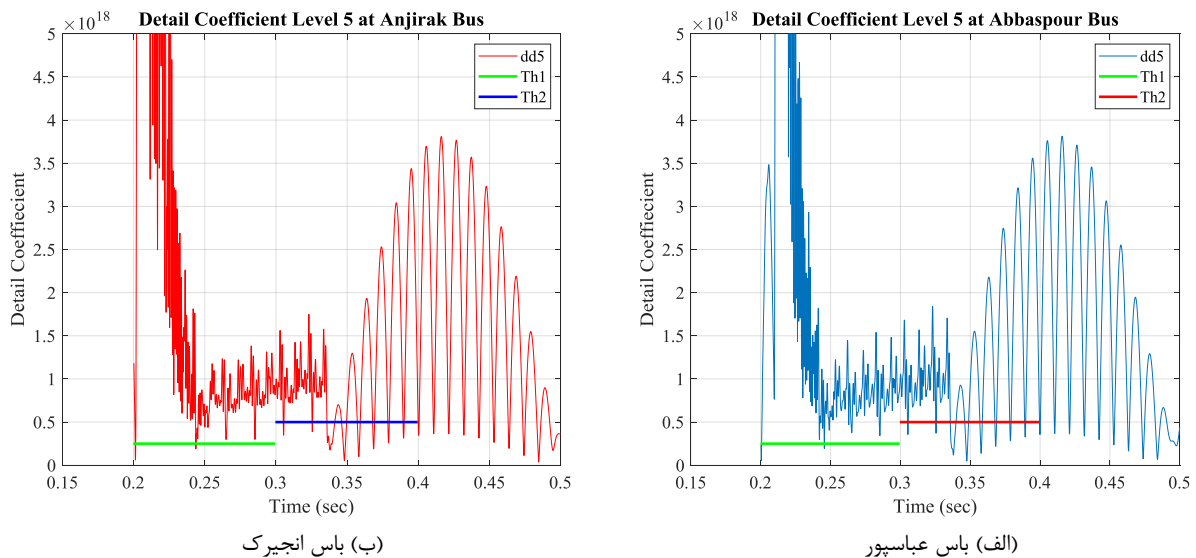
۴-۴- تأثیر راکتورهای شنت و نحوه زمین شدن آن‌ها

در این بخش به بررسی خطاهای گذرا در حضور راکتور شنت پرداخته می‌شود. برای این منظور دو راکتور شنت به قدرت ۵۰ مگاوار و به امپدانس ۳۲۰ اهم به دو انتهای خط افزوده می‌شود. مقدار توان و امپدانس این راکتورها مطابق واقعیت انتخاب شده است [۴، ۵]. در مرحله اول نقطه خنثی این راکتورها به صورت مستقیم زمین شده است. مشابه حالت‌های قبل یک اتصال کوتاه گذرا در فاز a در وسط خط با مقاومت خطای ناچیز ایجاد می‌شود درحالی‌که خط هم ترانسپوز شده است. در این صورت شکل موج ولتاژ دیده شده در دو سر خط مطابق شکل (۱۳) خواهد بود.

مطابق شکل فوق مشخص است که حضور راکتور شنت باعث رخ دادن رزونانس در شبکه می‌شود. به عبارت دیگر با خاموش شدن قوس سلف موجود در راکتورها با خازن خط رزونانس کرده و شبکه در حالت تشدید قرار می‌گیرد. این حالت همان‌گونه که مشاهده می‌شود باعث ایجاد اضافه ولتاژ و اضافه جریان‌هایی شدید در شبکه می‌شود که می‌تواند باعث آسیب به تجهیزات گردد. باین حال شکل زیر مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ (dd5) را برای زمان‌های پس از باز شدن کلیدهای طرفین نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): شکل موج ولتاژ زمانی که نقطه خنثی راکتورها مستقیم زمین شده است در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (13): Voltage waveform when the neutral points of the reactors are directly grounded at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

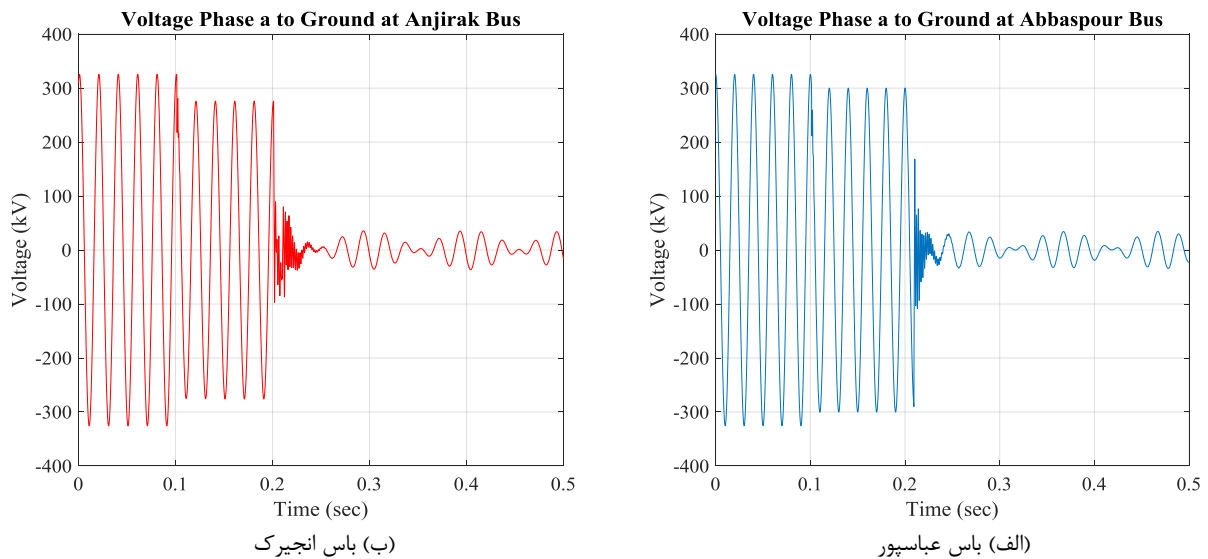


شکل (۱۴): مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ زمانی که نقطه خنثی راکتورها مستقیم زمین شده است در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (14): RMS value of 5th order detail when the neutral points of the reactors are directly grounded at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

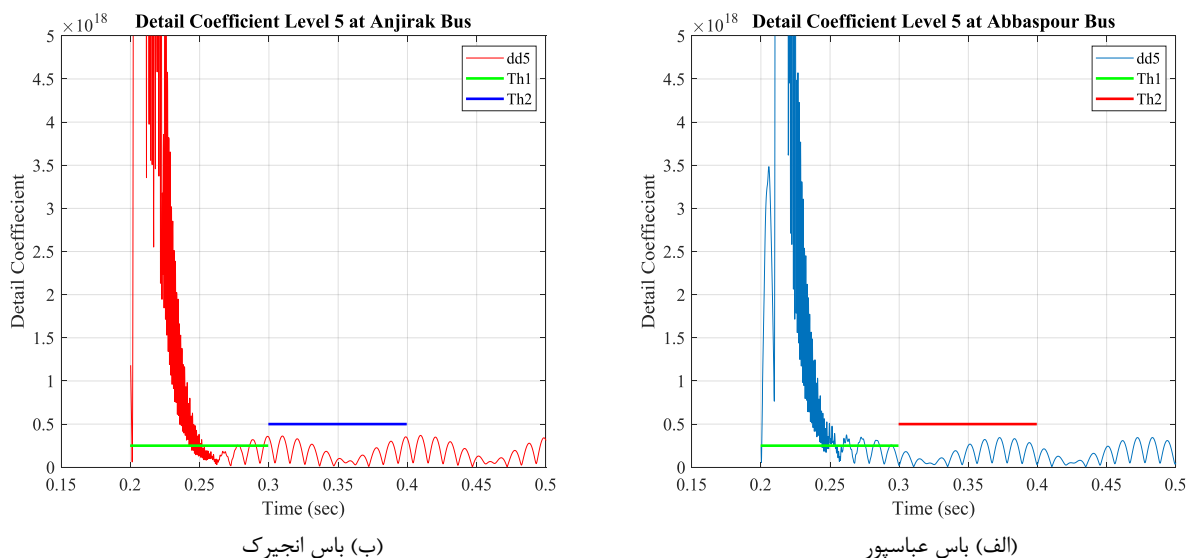
با توجه به شکل فوق و عدم کاهش مقدار dd_5 به کمتر از سطح Th_1 و همچنین افزایش دوباره مقدار dd_5 ، ابتدا تشخیص داده می‌شود که خطا از نوع گذرا است، اما به علت رخ دادن رزونانس در سیستم، تشخیص افول دوباره شاخص dd_5 و خاموش شدن قوس ثانویه دچار مشکل می‌شود. باین حال روش پیشنهادی توانست خاموشی قوس را در لحظه $0/337$ ثانیه در باس عباسپور و در لحظه $0/337$ ثانیه در باس انجیرک تشخیص دهد. علت این موضوع این است که روش پیشنهادی دومین افول dd_5 را به‌عنوان خاموشی قوس ثانویه در نظر می‌گیرد. در نتیجه خاموشی قوس در این حالت را نیز به‌درستی تشخیص می‌دهد. در مرحله بعد نقطه خنثی این راکتورها با استفاده از سلف نوترال زمین می‌شود. مقدار بهینه این سلف مطابق نتایج حاصله در مرجع [۵] برابر $2/95$ هانری انتخاب می‌شود. در این صورت شکل موج ولتاژ دیده‌شده در دو سر خط به شکل زیر خواهد بود. نتایج فوق نشان‌گر این است که قوس چندانی تشکیل نمی‌شود و بلافاصله نیز خاموش می‌گردد. یعنی سلف نوترال موجود در نقطه خنثی راکتور شنت کاملاً با خاصیت خازنی خط که عامل اصلی ایجاد قوس ثانویه است رزونانس ایجاد کرده و باعث خاموشی خودبه‌خود و

فوری قوس می‌گردد. شکل زیر مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ (dd_5) را برای زمان‌های پس از باز شدن کلیدهای طرفین نشان می‌دهد.

توجه دقیق به شکل فوق نشان می‌دهد که در هر دو شکل برای مقطع‌هایی هرچند کوتاه شرط کمتر بودن dd_5 از حد آستانه $Th1$ نقض شده است. در نتیجه تشخیص داده می‌شود که خطا از نوع گذرا است. به‌طور کلی مقدار $Th1$ در هر سیستم به نحوی تعیین می‌شود که در برابر خطاهای دائم با مقاومت بالا ایمن بوده و عملکرد نابجا نداشته باشد و از طرفی در خطاهای گذرا در حضور راکتور شنت با سلف نوترال دارای عملکرد صحیح باشد. با توجه به این موضوع مقدار $Th1$ برابر $2/5 \times 10^{17}$ برای این سیستم در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۵): شکل موج ولتاژ زمانی که نقطه خنثی راکتورها توسط سلف نوترال زمین شده در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (15): Voltage waveform when the neutral points of the reactors are grounded by the neutral inductor at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses



شکل (۱۶): مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ زمانی که نقطه خنثی راکتورها توسط سلف نوترال زمین شده است در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک

Figure (16): RMS value of 5th order detail when the neutral points of the reactors are grounded by the neutral inductor at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

پس از تشخیص گذرا بودن خطا، روش پیشنهادی در لحظه $0/301$ ثانیه افول دوباره $dd5$ و خاموشی قوس را تشخیص می‌دهد. همان‌گونه که بیان شد در این حالت قوس چندانی تشکیل نمی‌شود و این صبر روش پیشنهادی تنها برای تمییز خطای گذرا از خطای دائم است. به‌طور کلی در صورت استفاده از سلف نوترال در نقطه خنثی راکتور و انتخاب مناسب مقدار آن می‌توان با در نظر گرفتن زمانی ثابت برای سپری شدن حالت گذرای ناشی از کلید زنی بازبست را به‌سرعت انجام داد.

جدول (۶) تأثیر نحوه زمین کردن نقطه خنثی راکتور را بر روند خاموشی قوس نشان می‌دهد. در تمامی حالات یک خطای گذرا در فاز a در وسط خط به طول ۲۶۴ کیلومتر قرار داده می‌شود و خط کاملاً ترانسپوز شده است. مقاومت خطا نیز ناچیز فرض می‌شود.

مطابق نتایج حاصله نحوه زمین کردن راکتور شنت تأثیر بسیار زیادی در زمان خاموشی قوس دارد. اگر راکتور زمین نشده باشد یا مستقیم زمین شود تقریباً مشابه حالتی است که اصلاً راکتوری در سیستم وجود ندارد. همچنین مقدار سلف نوترال نیز بسیار مهم است. اگر مقدار سلف نوترال مناسب انتخاب شود اصلاً قوسی تشکیل نمی‌شود، اما در صورتی که مقدار آن خیلی کم و یا خیلی زیاد باشد همچنان قوس وجود خواهد داشت.

۵-۴- مشخصه‌های مختلف قوس

در این قسمت به بررسی عملکرد روش پیشنهادی در برابر مشخصه‌های مختلف قوس پرداخته می‌شود. در تمامی حالت‌های قبل، از مشخصات قوس مطابق با مقادیر ستون آخر جدول (۷) استفاده شده است. در این قسمت از مشخصات دیگری مطابق با مقادیر سایر ستون‌های جدول (۷) برای شبیه‌سازی قوس استفاده می‌شود. برای این منظور فرض می‌شود یک خطای گذرا در حضور قوس با مشخصاتی مطابق با ستون اول جدول (۷)، در فاز a در وسط خط به طول ۲۶۴ کیلومتر رخ دهد در حالی که خط کاملاً ترانسپوز شده است و مقاومت خطا نیز ناچیز فرض می‌شود. در این صورت شکل موج ولتاژ دیده‌شده در دو سر خط مطابق شکل (۱۷) خواهد بود. شکل (۱۸) مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ را برای زمان‌های پس از باز شدن کلیدهای طرفین نشان می‌دهد. مطابق شکل موج ولتاژ مشخص است که در این حالت قوس مدت‌زمان کمتری استمرار می‌یابد و در لحظه $0/302$ ثانیه خاموش می‌شود. روش پیشنهادی نیز با استفاده از منطق دو آستانه‌ای و با توجه به عدم افول شاخص $dd5$ به زیر سطح $Th1$ ابتدا گذرا بودن خطا را به‌درستی تعیین می‌کند و سپس با توجه به کاهش مقدار $dd5$ از حد آستانه‌ای $Th2$ با تأخیری کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه، خاموشی قوس را تشخیص می‌دهد. به‌نحوی که خاموشی قوس در باس عباسپور در لحظه $0/309$ ثانیه و در باس انجیرک در $0/308$ ثانیه تشخیص داده می‌شود. جدول (۷) عملکرد روش پیشنهادی را برای مشخصه‌های مختلف قوس نشان می‌دهد. مقادیر بیان شده برای مشخصات قوس مطابق مقادیر ارائه‌شده در مرجع‌های [۵] و [۳۲] است. نتایج حاصله نشان از کارایی روش ارائه‌شده و موجک پیشنهادی برای تمام حالت‌ها و مشخصه‌های قوس است.

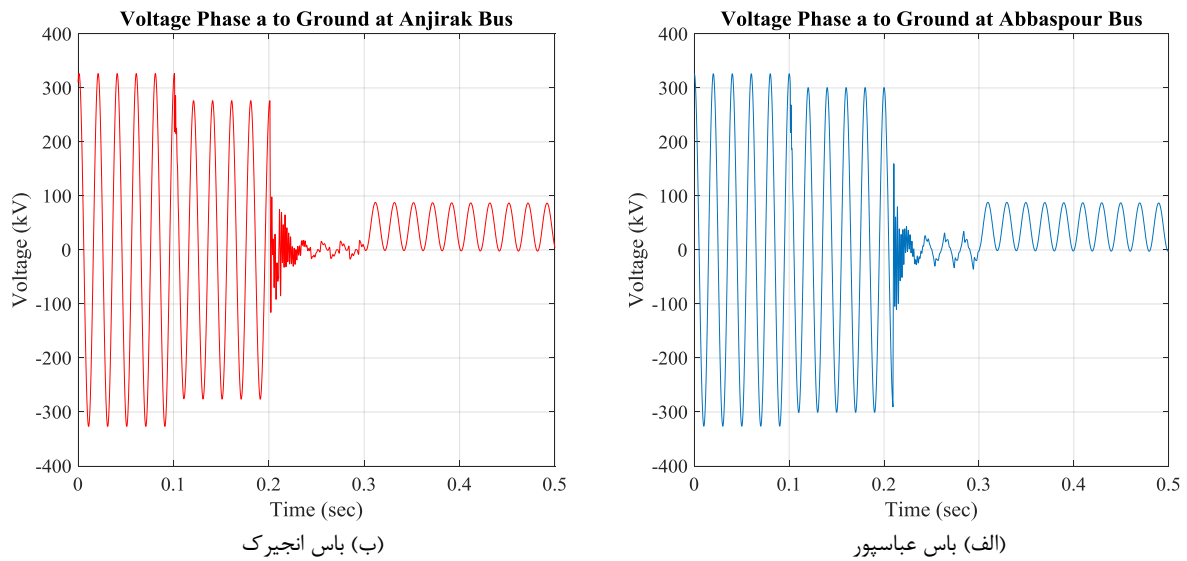
۵- مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

در این پژوهش روشی مبتنی بر تبدیل موجک برای تشخیص خاموشی قوس ثانویه ارائه شد. تفاوت این روش با سایر روش‌های مشابه، معرفی یک موجک مادر نوین بود. در این قسمت نتایج روش پیشنهادی با نتایج حاصله از سایر مقاله‌ها که آن‌ها نیز از تبدیل موجک استفاده کرده‌اند از چند منظر مقایسه می‌شود.

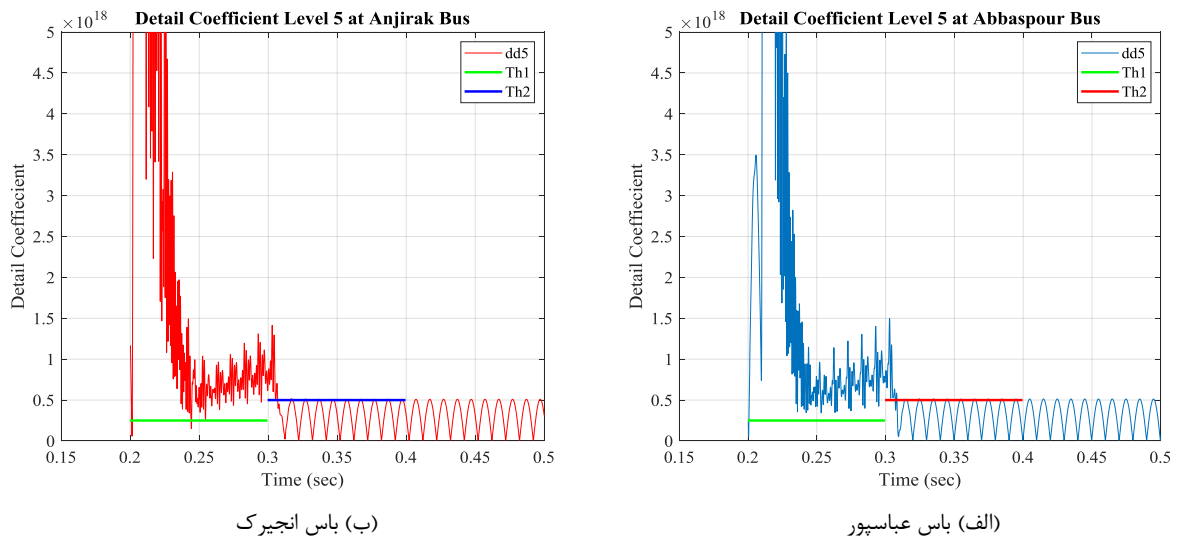
Table (6): Sensitivity analysis for the impact of the reactor's neutral point grounding technique

جدول (۶): آنالیز حساسیت برای تأثیر نحوه زمین کردن نقطه خنثی راکتور

حالت شبیه‌سازی	بدون راکتور	راکتور زمین نشده	راکتور مستقیم زمین شده	با سلف نوترال (۰/۲۹۵ هانری)	با سلف نوترال (۲/۹۵ هانری)	با سلف نوترال (۲۹/۵ هانری)
زمان خاموشی قوس (میلی ثانیه)	۳۳۱	۳۲۵	۳۳۳	۳۱۴	قوسی تشکیل نمی‌شود	۲۹۲
زمان تشخیص داده‌شده (میلی ثانیه)	۳۳۷	۳۲۹	۳۳۷	۳۱۷	۳۰۱	۳۰۱



شکل (۱۷): شکل موج ولتاژ با مشخصه‌های قوس متفاوت در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (17): Voltage waveform with different arc characteristics at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses



شکل (۱۸): مقدار مؤثر جزئیات مرتبه ۵ زمانی که مشخصه قوس متفاوت است در باس‌های (الف) عباسپور و (ب) انجیرک
Figure (18): RMS value of 5th order detail when the characteristic of the arc is different at, a) Abbaspour, b) Anjirak buses

Table (7): Sensitivity analysis for the effect of different arc characteristics

جدول (۷): آنالیز حساسیت برای تأثیر مشخصه‌های قوس مختلف

مورد شبیه‌سازی	۱	۲	۳	۴
u_0 (ولت بر متر)	۸۰۰	۹۰۰	۱۱۰۰	۱۲۰۰
τ_0 (میلی ثانیه)	۰/۵۵۵	۱	۰/۸۳۳	۰/۷۱۴
l_0 (متر)	۳/۱۵	۴	۳/۵	۳/۵
زمان خاموشی قوس (میلی ثانیه)	۳۰۲	۳۴۱	۳۴۲	۳۳۲
زمان تشخیص داده‌شده (میلی ثانیه)	۳۰۹	۳۴۸	۳۴۸	۳۳۸

جدول (۸) نشانگر برتری روش پیشنهادی است. مشاهده می‌شود روش پیشنهادی علاوه بر این که مزیت سایر روش‌ها را دارد، از تأخیر کمتری نیز نسبت به سایر پژوهش‌ها برخوردار است و در کمتر از ۱۰ میلی ثانیه خاموشی قوس را تشخیص می‌دهد.

Table (8): Comparison of the proposed method in this article with similar methods

جدول (۸): مقایسه روش پیشنهادی در این مقاله با سایر روش‌های مشابه

روش پیشنهادی	[۲۴]	[۲۱]	[۴]	پژوهش / کمیت
کمتر از ۱۰	۱۰	۱۷	۱۲	تأخیر در تشخیص خاموشی قوس (میلی ثانیه)
بله	خیر	خیر	بله	تشخیص در خط‌های ترانسپوز نشده
بله	بله	بله	بله	تشخیص خطای دائم
بله	بله	بله	بله	تشخیص خطاهای با مقاومت بالا
بله	بله	بله	بله	تشخیص خطای گذرا در حضور راکتور شنت
بله	خیر	خیر	خیر	در نظر گرفتن مشخصات مختلف قوس

Table (9): Comparison of the proposed method in this article with methods from other groups

جدول (۹): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌هایی از سایر گروه‌ها

تبدیل موجک (روش پیشنهادی)	پردازش سیگنال [۱۲]	هوش مصنوعی [۶]	مدل فیزیکی [۱۲]	پژوهش / کمیت
بله	بله	بله	بله	تفکیک خطای گذرا از خطای دائم
کمتر از ۱۰	۴۰	۱۴	۳۰	تأخیر در تشخیص خاموشی قوس ثانویه (میلی ثانیه)
بله	بله	بله	بله	تشخیص درست در حالت‌های مختلف
پایین	متوسط	متوسط	پایین	هزینه اجرایی
متوسط	متوسط	بالا	پایین	بار محاسباتی

همچنین برخلاف سایر پژوهش‌ها، شرایط گوناگون بهره‌برداری از سیستم و مشخصات قوس‌های مختلف نیز در نظر گرفته شده است.

در قدم بعدی علاوه بر روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک، روش پیشنهادی با روش‌هایی از سایر گروه‌ها نیز مقایسه می‌شود که در جدول (۹) آمده است. در این مقایسه علاوه بر ارزیابی مسائل علمی و فنی، روش‌های مختلف از نظر هزینه اجرایی و بار محاسباتی نیز مورد مقایسه قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می‌شود روش پیشنهادی نسبت به تمامی روش‌هایی که از گروه‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند، با تأخیر کمتری خاموشی قوس ثانویه را تشخیص داده است. همچنین از آن جایی که روش پیشنهادی به تجهیزات اضافی نظیر کانال مخابراتی بین دو باس انتهایی خط نیاز ندارد، هزینه اجرایی آن پایین است. مزیت روش‌های مبتنی بر مدل فیزیکی این است که برخلاف روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، بار محاسباتی پایینی دارند. با این حال، روش پیشنهادی نیز بار محاسباتی زیادی ندارد و با به‌روزرسانی نرم‌افزار رله‌های دیجیتال قابل پیاده‌سازی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر تبدیل موجک به‌منظور بهبود عملکرد بازست اتوماتیک تک-پل پیشنهاد شد. با این که تبدیل موجک پیش‌تر نیز برای این هدف استفاده شده، اما نوآوری اصلی مقاله در توسعه یک موجک مادر جدید است. از طرفی دیگر در روش پیشنهادی از ترکیبی جدید از ضریب‌های بانک فیلتری استفاده شده است. از ویژگی‌های روش پیشنهادی می‌توان به دقت مناسب آن در تفکیک خطاهای دائم از خطاهای گذرا اشاره کرد. به‌نحوی که با استفاده از منطق دو آستانه‌ای خطاهای دائم با مقاومت خطای تا ۱۰۰ اهم نیز به‌درستی تشخیص داده شده و از عملکرد نابجای سیستم بازست جلوگیری می‌شود. همچنین روش پیشنهادی در تشخیص خاموشی قوس ثانویه بسیار سریع بوده و نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌های مختلف نشانگر آن است که میزان تأخیر روش پیشنهادی کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه است. به‌عبارت‌دیگر روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به روش‌های مشابه که از موجک‌های استاندارد استفاده می‌کنند و همچنین روش‌هایی از سایر گروه‌ها، عملکرد سریع‌تری دارد. همچنین چون روش پیشنهادی به تجهیزات خاصی نیاز ندارد، بار عملیاتی و اقتصادی آن پایین است. از طرفی دیگر برخلاف روش‌های مبتنی

بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، روش پیشنهادی بار محاسباتی زیادی را بر سیستم حفاظتی تحمیل نمی‌کند و می‌تواند به آسانی به نرم‌افزار رله‌های دیجیتال افزوده شود.

References

مراجع

- [1] P.M. Anderson, C. Henville, R. Rifaat, B. Johnson, S. Meliopoulos, "Power system protection", 2nd Edition, New York: Wiley-IEEE Press, Jan. 2022 (ISBN: 978-1-119-51314-8).
- [2] M.R. Rezaei, S.R. Hadian-Amrei, M.R. Miveh, "An improved method for online fault location based on the phasor measurement unit in transmission lines considering the thermal limit", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 61-78, Sept. 2023 (in Persian) (doi: 20.1001.1.23223871.1402.1-4.53.4.8).
- [3] M. Jannati, B. Vahidi, S.H. Hosseini, H.R. Baghaee, "A new adaptive single phase auto-reclosure scheme for EHV transmission lines", *Proceeding of the IEEE/MEPCON*, pp. 203-207, Aswan, Egypt, Mar. 2008 (doi:10.1109/MEPCON.2008.4562389).
- [4] M. Sanaye-Pasand, A. Kadivar, "Design of an online adaptive auto-reclose algorithm for HV transmission lines", *Proceeding of the IEEE/POWERI*, pp. 1-5, New Delhi, India, April 2006 (doi: 10.1109/POWERI.2006.1632609).
- [5] M.R. Dadash-Zadeh, M. Sanaye-Pasand, A. Kadivar, "Investigation of neutral reactor performance in reducing secondary arc current", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2472-2479, Oct. 2008 (doi: 10.1109/TPWRD.2008.923089).
- [6] S.A. Ahmadi, M. Sanaye-Pasand, P. Jafarian, H. Mehrjerdi, "Adaptive single-phase auto-reclosing approach for shunt compensated transmission lines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 36, no. 3, pp. 1360-1369, June 2021 (doi: 10.1109/TPWRD.2020.3007392).
- [7] A. Mehdi, C.H. Kim, A. Hussain, J.S. Kim, S.J.U. Hassan, "A comprehensive review of auto-reclosing schemes in AC, DC, and hybrid (AC/DC) transmission lines", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 74325-74342, May 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077938).
- [8] K.M.C. Dantas, F.V. Lopes, K.M. Silva, F.B. Costa, N.S.S. Ribeiro, "Phasor-based single-phase auto-reclosing scheme for non-compensated transmission lines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 37, no. 1, pp. 219-229, Feb. 2022 (doi: 10.1109/TPWRD.2021.3055853).
- [9] P. Liu, W. Shao, G. Song, "Single-phase adaptive reclosure scheme using impedance property of fault loop in shunt-reactored transmission lines", *Proceeding of the IEEE/APAP*, pp. 154-157, Xi'an, China, Oct. 2019 (doi: 10.1109/APAP47170.2019.9224891).
- [10] S. Jamali, A. Parham, "New approach to adaptive single pole auto-reclosing of power transmission lines", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 4, no. 1, pp. 115-122, Jan. 2010 (doi: 10.1049/iet-gtd.20-09.0058).
- [11] I. Zalitis, A. Dolgicers, J. Kozadajevs, "An adaptive single-pole automatic reclosing method for uncompensated high-voltage transmission lines", *Electric Power Systems Research*, vol. 166, pp. 210-222, Jan. 2019 (doi: 10.1016/j.epsr.2018.10.012).
- [12] F. Zhalefar, M.R. Dadash Zadeh, T.S. Sidhu, "A high-speed adaptive single-phase reclosing technique based on local voltage phasors", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1203-1211, June 2017 (doi: 10.1109/TPWRD.2015.2388474).
- [13] R.J. Hamidi, H. Livani, "Adaptive single-phase auto-reclosing method using power line carrier signals", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 96, pp. 64-73, Mar. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2017.09.033).
- [14] Z.S. Hussain, A.J. Ali, A.A. Allu, R.K. Antar, "Improvement of protection relay with a single phase autoreclosing mechanism based on artificial neural network", *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 505-514, Mar. 2020 (doi: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp505-514).
- [15] H. Khorashadi-Zadeh, "Artificial neural network approach for autoreclosure in transmission lines", *Proceeding of the IEEE/PTC*, pp. 1-4, St. Petersburg, Russia, June 2005 (doi: 10.1109/PTC.2005.4524653).
- [16] F. Hatami, M. Jannati, M. Shams, "A deep long Short-Term memory based scheme for auto-reclosing of power transmission lines", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 141, pp.108105, Oct. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108105).
- [17] M. Saad, C.H. Kim, N. Munir, "Single-phase auto-reclosing scheme using particle filter and convolutional neural network", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 37, no. 6, pp. 4775-4785, Dec. 2022 (doi: 10.1109/TPWRD.2022.3159256).
- [18] H. Khorashadi-Zadeh, Z. Li, "Transmission line single phase auto reclosing scheme based on wavelet transform and adaptive fuzzy neuro inference system", *Proceeding of the IEEE/NAPS*, pp. 43-48, Las Cruces, NM, USA, Sept. 2007 (doi: 10.1109/NAPS.2007.4402284).

- [19] S. Vasilic, M. Kezunovic, "Fuzzy ART neural network algorithm for classifying the power system faults", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1306-1314, Apr. 2005 (doi: 10.1109/TPWRD.20-04.834676).
- [20] K. Behrouz-Dehkordi, H. Movahednejad, M. Sharifi, "Comprehensive review on data-driven techniques in smart power grids", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 15, no. 57, pp. 133-162, June 2024 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1403.15.57.9.8).
- [21] B. Sahoo, S.R. Samantaray, "Wavelet-based auto-reclosing technique for TCSC compensated lines connecting windfarm", *Proceeding of the IEEE/NPSC*, pp. 1-6, Tiruchirappalli, India, Dec. 2018 (doi: 10.1109/NPSC.2018.8771764).
- [22] O. Dias, M.C. Tavares, "Implementation and performance evaluation of a harmonic filter for use in adaptive single-phase reclosing", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 9, pp. 2261-2268. June 2017 (doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1630).
- [23] H. Khorashadi-Zadeh, Z. Li, "Design of a novel phasor measurement unit-based transmission line auto reclosing scheme", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 5, no. 8, pp. 806-813. Aug. 2011 (doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0744).
- [24] A.R. Adly, R.A. El-Sehiemy, A.Y. Abdelaziz, "An optimal/adaptive reclosing technique for transient stability enhancement under single pole tripping", *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 348-358, Oct. 2017 (doi: 10.1016/j.epr.2017.06.005).
- [25] C. Xie, F. Li, "Adaptive comprehensive auto-reclosing scheme for shunt reactor-compensated transmission lines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 35, no. 5, pp. 2149-2158, Oct. 2020 (doi: 10.1109/TPWRD.201-9.2961981).
- [26] O.D. Naidu, A.K. Pradhan, P. Krishnamurthy, "Traveling wave based adaptive auto-reclosing and fault location for three-terminal mixed lines", *Proceeding of the IEEE/GTDAAsia*, pp. 466-471, Bangkok, Thailand, Mar. 2019 (doi: 10.1109/GTDAAsia.2019.8715973).
- [27] J.R. Marti, "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147-157, Jan. 1982 (doi: 10.1109/TPAS.1982.317332).
- [28] L. Prikler, M. Kizilcay, G. Ban, P. Handl, "Modeling secondary arc based on identification of arc parameters from staged fault test records", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, no. 8, pp. 581-589, Oct. 2003 (doi: 10.1016/S0142-0615(03)00018-8).
- [29] O.A.S. Youssef, "New algorithm to phase selection based on wavelet transforms", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 908-914, Oct. 2002 (doi:10.1109/PSS.2002.1043435).
- [30] I. Daubechies, "Ten lectures on wavelets", 1st Edition, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, Aug. 1992 (ISBN: 978-0-89871-274-2).
- [31] R.C. Guido, "A note on a practical relationship between filter coefficients and scaling and wavelet functions of discrete wavelet transforms", *Applied Mathematics Letters*, vol. 24, no. 7, pp. 1257-1259, July 2011 (doi: 10.1016/j.aml.2011.02.018).
- [32] S. Jamali, A.G. Baayeh, "Detection of secondary arc extinction for adaptive single phase auto-reclosing based on local voltage behaviour", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 4, pp. 952-958, Mar. 2017 (doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0960).

ضمیمه

در تعریف ریاضی یک موجک جدید مقادیر تابع موجک (موجک مادر) و تابع انتقال (موجک پدر) حائز اهمیت است و طراحی فیلترها بر اساس این توابع انجام می‌شود. جدول (۱۰) مقادیر این توابع را برای موجک پیشنهادی در این مقاله بیان می‌کند. به‌منظور بیان معادلات ریاضی موجک پیشنهادی باید دو مرحله را در نظر گرفت. مرحله نخست بررسی شرایط لازم برای تعریف یک موجک مادر است. مطابق شرایط اساسی بیان شده در مرجع‌های [۱۸] و [۳۰] تابع موجک باید دارای ویژگی‌های زیر باشد: ۱- دارای طول محدود باشد. مطابق شکل (۴) مقاله و جدول (۱۰)، موجک مادر پیشنهادی طول زمانی محدودی دارد و می‌توان با تعداد نمونه محدود (۵۰ نمونه) آن را بیان کرد.

۲- به‌صورت نوسانی میرا شونده باشد. برخلاف تبدیل فوریه که در آن توابع پایه سینوسی نوسانات دائمی دارند، تابع موجک مادر در تبدیل موجک باید دارای نوسانات میرا شونده باشد. به‌عبارت‌دیگر، تابع موجک باید از صفر شروع و به صفر میرا شود. توجه به شکل (۴) مقاله و مقادیر جدول (۱۰) نشانگر این است که موجک پیشنهادی این شرط را نیز داراست.

۳- مقدار متوسط آن صفر باشد. برای این منظور بایستی مجموع مقادیر تابع موجک مادر صفر باشد. مقدار مجموع تابع موجک مادر معرفی شده مطابق رابطه زیر برابر صفر است.

$$\sum_n \psi[n] = 2.8 \times 10^{-4} \approx 0 \quad (8)$$

با توجه به این که تابع موجک پیشنهادی تمامی شرایط و ویژگی‌های اساسی مورد نیاز برای تعریف یک موجک را دارا است، می‌توان از این تابع در تبدیل موجک استفاده کرد.

همان‌گونه که در مقاله تصریح شد، یکی از روش‌های اجرای تبدیل موجک گسسته استفاده از بانک فیلتری است. نکته مهم در استفاده از این روش، طراحی فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر مربوط به تجزیه و بازسازی است. روابط زیر نحوه استخراج فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر مورد استفاده در بانک فیلتری را مطابق مطالب بیان شده در مرجع‌های [۳۰] و [۳۱] را نشان می‌دهد. در مرحله اول با استفاده از مقادیر تابع انتقال (موجک پدر) و رابطه زیر، فیلتر پایین‌گذر مربوط به جزئیات بازسازی (LoR) ساخته می‌شود.

$$\Phi(x) = \sum_n \text{LoR}[n] \Phi(2x-n) \quad (9)$$

با در نظر گرفتن پیش‌فرض تعامد برای موجک پیشنهادی، سایر فیلترها با استفاده از روابط زیر حاصل می‌شود [۳۱].

$$\text{LoD}[n] = \text{LoR}[M-n+1] \quad (10)$$

$$\text{HiD}[n] = (-1)^n \text{LoR}[n] \quad (11)$$

$$\text{HiR}[n] = \text{HiD}[M-n+1] = (-1)^n \text{LoR}[M-n+1] \quad (12)$$

که در آن‌ها LoR فیلتر پایین‌گذر مربوط به جزئیات بازسازی، LoD فیلتر پایین‌گذر مربوط به جزئیات تجزیه، HiD فیلتر بالاگذر مربوط به جزئیات تجزیه و HiR فیلتر بالاگذر مربوط به جزئیات بازسازی است. نتایج حاصله مطابق جدول (۱۱) است. با توجه به مقادیر بیان شده در این جدول، شکل‌های مربوط به فیلترهای مذکور مطابق شکل (۵) مقاله خواهد بود. همچنین رابطه زیر بین تابع موجک (مادر) و تابع انتقال (پدر) و فیلترهای فوق برقرار است [۳۱].

$$\psi(x) = \sum_n \text{HiD}[n] \Phi(2x-n) \quad (13)$$

Table (10): Wavelet function and scale function values for the proposed wavelet

جدول (۱۰): مقادیر تابع موجک و تابع انتقال برای موجک پیشنهادی

ردیف	مقدار تابع انتقال (موجک پدر)	ردیف	مقدار تابع موجک (موجک مادر)
۱	$1/0.1 e^{-19}$	۱	$1/95 e^{-36}$
۲	$-2/57 e^{-5}$	۲	$-1/26 e^{-7}$
۳	$-5/0.3 e^{-5}$	۳	$-2/41 e^{-7}$
۴	$-7/39 e^{-5}$	۴	$-3/46 e^{-7}$
۵	$-9/64 e^{-5}$	۵	$-0/0.0457$
۶	$-0/0.0012$	۶	$-0/0.0795$
۷	$-0/0.0014$	۷	$-0/0.0923$
۸	$-0/46711$	۸	$-41/5513$
۹	$-0/70.061$	۹	$-56/0.863$
۱۰	$-0/84.072$	۱۰	$-34/8976$
۱۱	$-0/93412$	۱۱	$0/830.209$
۱۲	$-0/84.075$	۱۲	$131/273$
۱۳	$-0/70.067$	۱۳	$159/9357$
۱۴	$-0/46721$	۱۴	$141/24.04$
۱۵	$-0/0.0026$	۱۵	$99/6993$
۱۶	$0/933641$	۱۶	$-66/4572$
۱۷	$1/40.0589$	۱۷	$-191/0.91$
۱۸	$1/634.059$	۱۸	$-226/398$
۱۹	$1/774139$	۱۹	$-214/352$
۲۰	$1/867524$	۲۰	$-166/995$
۲۱	$1/774127$	۲۱	$34/8954$
۲۲	$1/634.036$	۲۲	$89/3116$
۲۳	$1/40.0554$	۲۳	$141/24.0$
۲۴	$0/933594$	۲۴	$132/9328$
۲۵	$-0/0.0032$	۲۵	$132/9339$
۲۶	$-0/93424$	۲۶	$132/9349$
۲۷	$-1/40.119$	۲۷	$141/2444$
۲۸	$-1/63467$	۲۸	$89/318.0$
۲۹	$-1/77475$	۲۹	$34/8992$
۳۰	$-1/86814$	۳۰	$-166/996$
۳۱	$-1/77474$	۳۱	$-214/356$
۳۲	$-1/63465$	۳۲	$-226/4.06$
۳۳	$-1/40.116$	۳۳	$-191/1.01$
۳۴	$-0/9342$	۳۴	$-66/4759$
۳۵	$-0/0.0027$	۳۵	$99/692.0$
۳۶	$0/466695$	۳۶	$141/236$
۳۷	$0/70.0185$	۳۷	$159/9331$
۳۸	$0/84.0285$	۳۸	$131/277$
۳۹	$0/933691$	۳۹	$0/839.035$
۴۰	$0/84.0314$	۴۰	$-34/8844$
۴۱	$0/70.0242$	۴۱	$-56/0.699$
۴۲	$0/466782$	۴۲	$-41/53.02$
۴۳	$-0/0.0016$	۴۳	$0/0.698$
۴۴	$-0/0.0014$	۴۴	$0/0.44.0$
۴۵	$-0/0.0012$	۴۵	$0/0.21.0$
۴۶	$-9/64 e^{-5}$	۴۶	$4/39 e^{-7}$
۴۷	$-7/39 e^{-5}$	۴۷	$3/46 e^{-7}$
۴۸	$-5/0.3 e^{-5}$	۴۸	$2/41 e^{-7}$
۴۹	$-2/57 e^{-5}$	۴۹	$1/26 e^{-7}$
۵۰	.	۵۰	.

Table (11): Filter bank coefficients
جدول (۱۱): مقادیر ضرایب بانک فیلتری

LoR	LoD	HiD	HIR	ردیف
-1/36 e-17	0	1/36 e-17	0	۱
0/00346	0/00346	0/00346	-0/00346	۲
0/00678	0/00678	-0/00678	0/00678	۳
0/00996	0/00996	0/00996	-0/00996	۴
0/01299	0/01299	-0/01299	0/01299	۵
0/01587	0/01587	0/01587	-0/01587	۶
0/01862	0/01862	-0/01862	0/01862	۷
62/9275	-0/2121	62/9275	-0/2121	۸
94/3831	-62/8827	-94/3831	-62/8827	۹
113/257	-94/3335	113/257	94/3335	۱۰
125/841	-113/203	-125/841	-113/203	۱۱
113/261	-125/782	113/261	125/782	۱۲
94/3915	-113/199	-94/3915	-113/199	۱۳
62/9401	-94/3257	62/9401	94/3257	۱۴
0/03535	-62/871	-0/03535	-62/871	۱۵
-125/776	0/0368	-125/776	-0/0368	۱۶
-188/681	125/8507	188/681	125/8507	۱۷
-220/133	188/758	-220/133	-188/758	۱۸
-239/004	220/2124	239/004	220/2124	۱۹
-251/584	239/085	-251/584	-239/085	۲۰
-239/002	251/667	239/002	251/667	۲۱
-220/13	239/086	-220/13	-239/086	۲۲
-188/676	220/215	188/676	220/215	۲۳
-125/77	188/762	-125/77	-188/762	۲۴
0/04329	125/856	-0/04329	125/856	۲۵
125/856	0/04329	125/856	-0/04329	۲۶
188/762	-125/77	-188/762	-125/77	۲۷
220/215	-188/676	220/215	188/676	۲۸
239/086	-220/13	-239/086	-220/13	۲۹
251/667	-239/002	251/667	239/002	۳۰
239/085	-251/584	-239/085	-251/584	۳۱
220/2124	-239/004	220/2124	239/004	۳۲
188/758	-220/133	-188/758	-220/133	۳۳
125/8507	-188/681	125/8507	188/681	۳۴
0/0368	-125/776	-0/0368	-125/776	۳۵
-62/871	0/03535	-62/871	-0/03535	۳۶
-94/3257	62/9401	94/3257	62/9401	۳۷
-113/199	94/3915	-113/199	-94/3915	۳۸
-125/782	113/261	125/782	113/261	۳۹
-113/203	125/841	-113/203	-125/841	۴۰
-94/3335	113/257	94/3335	113/257	۴۱
-62/8827	94/3831	-62/8827	-94/3831	۴۲
0/2121	62/9275	-0/2121	62/9275	۴۳
0/01862	0/01862	0/01862	-0/01862	۴۴
0/01587	0/01587	-0/01587	0/01587	۴۵
0/01299	0/01299	0/01299	-0/01299	۴۶
0/00996	0/00996	-0/00996	0/00996	۴۷
0/00678	0/00678	0/00678	-0/00678	۴۸
0/00346	0/00346	-0/00346	0/00346	۴۹
0	-1/36 e-17	0	1/36 e-17	۵۰

1. Power line carrier (PLC)
2. Artificial neural network (ANN)
3. Long short-term memory (LSTM)
4. Convolutional neural network (CNN)
5. Support vector machine (SVM)
6. Total harmonic distortion (THD)
7. Discrete Fourier transform (DFT)
8. Fast Fourier transform (FFT)
9. Wavelet transform
10. JMarti
11. Curlew
12. Kizilcay
13. Scale
14. Shift
16. Continuous wavelet transform (CWT)
16. Discrete wavelet transform (DWT)
17. Detail
18. Approximation
19. Down-sampling
20. Orthogonal
21. Biorthogonal
22. Decomposition
23. Reconstruction
24. Reconstruction detail coefficients
25. Root mean square (RMS)
26. RMS value of the fifth order details (dd5)
27. First threshold (Th1)
28. Second threshold (Th2)
29. Geometric mean distance (GMD)