

تشخیص خطأ با استفاده از توالی مثبت، منفی و صفر جریان و ولتاژ نقاط مختلف ریز شبکه ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توپولوژی ریز شبکه

رضا اسلامی^۱، سیدحسین حسام الدین صادقی^۲، حسین عسکریان ابیانه^۲

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند- تبریز- ایران

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

eslami@sut.ac.ir- sadeghi@aut.ac.ir- askarian@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص خطأ در ریز شبکه ها با در نظر گیری عدم قطعیت در توپولوژی آن ها پیشنهاد می- شود. روش پیشنهادی با استفاده از تبدیل های موجک و S تحقق می یابد. با استفاده از این تبدیل ها ویژگی های مولفه های سه فاز و همچنین توالی های مثبت، منفی و صفر شکل موج های جریان و ولتاژ در نقاط مختلف شبکه که در تشخیص وقوع خطأ، محل خطأ، نوع خطأ و فاز های درگیر موثر هستند، استخراج می شوند. به دلیل آنکه روند تشخیص خطأ در روش پیشنهادی مستقل از توپولوژی ریز شبکه می باشد، لذا ویژگی بارز آن، قابلیت تشخیص در انواع مختلف حالات دینامیکی پیش آمده در ریز شبکه می باشد. برای بررسی میزان کارایی روش پیشنهادی، این روش بر روی یک ریز شبکه نمونه اعمال گردیده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که روش تشخیص خطای پیشنهادی به خوبی قابلیت تشخیص و تمییز خطاهای ماندگار رخ داده از اغتشاشات گذرا ایجاد شده در ریز شبکه را دارد. همچنین مقایسه تبدیل S و موجک در فرایند تشخیص خطأ در ریز شبکه ها نشان می دهد که اگرچه با استفاده از تبدیل موجک، سرعت رسیدن به تصمیم نهایی سریعتر است، اما دقت تبدیل S بویژه در ایجاد تمایز بین حالات گذرا و خطاهای دائم، ویژگی برتر این تبدیل است.

واژه های کلیدی: تشخیص خطأ- توالی های مثبت، منفی و صفر- تبدیل موجک- تبدیل S- انرژی سیگنال

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول : سیدحسین حسام الدین صادقی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

۱- مقدمه

بطوریکه کارایی این روش‌ها در کلیه ساختارهای عملکردی ریزشبکه با چالش مواجه خواهد شد. در مطالعه [۱۹] خطا با مانیتورینگ THD و لتاژ خروجی منابع تولید پراکنده و مقایسه آن با یک مقدار آستانه تشخیص داده می‌شود. مطالعه [۲۰] نیز از آنالیز هارمونیکی برای تشخیص خطا استفاده می‌کند. در این مطالعه از نسبت جریان توالی صفر به جریان توالی مثبت در هارمونیک پنجم برای تشخیص خطا استفاده می‌شود. اما از آنجا که روش ارائه شده در این مطالعه از جریان توالی صفر برای تشخیص خطا استفاده می‌کند، تنها خطاهای فاز به زمین توسط آن قابل تشخیص هستند.

عدم توجه به ساختار دینامیک ریزشبکه، مشکل در تشخیص انواع خطاهای (خطاهای معمولی و امپدانس بالا) و عدم توانایی تشخیص حالات گذرا از خطاهای دائم مشکلاتی است که در مطالعات گذشته دیده می‌شود. از این‌رو در این مقاله یک روش جدید برای تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها، پیشنهاد می‌شود. روش ارائه شده در این مقاله از تبدیلات موجک^۱ و S^۲ و توالی‌های مثبت، منفی و صفر شکل‌موج‌های جریان و لتاژ برای تشخیص خطا بهره می‌برد. از ویژگی روش ارائه شده آن است که این روش قادر به پاسخگویی نسبت به کلیه حالات دینامیک میکروگرید می‌باشد. بنابراین با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله نیازی به تغییر استراتژی حفاظتی با تغییر در توپولوژی بهره‌برداری از میکروگرید نیست. اطلاعات به دست آمده از پردازش سیگنال‌های جریان و لتاژ برای تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع خطا و فازهای درگیر در خطا استفاده می‌شود. تبدیل S استفاده شده با استفاده از یک پنجره گوسی متغیر با فرکانس، نگاشتی در حوزه فرکانس ارائه می‌دهد که اغتشاشات رخ داده در شکل موج سیگنال مورد بررسی را باوضوح بیشتری نشان داده و بنابراین تشخیص خطا را آسانتر می‌کند. یکی دیگر از نوآوری‌های روش پیشنهادی، قابلیت عملکرد صحیح آن در انواع توپولوژی‌های مختلف ریزشبکه می‌باشد. روش ارائه شده بر روی یک ریزشبکه نمونه پیاده‌سازی شده است. نتایج حاکی از موفقیت این روش در تشخیص انواع خطاهای در حالات مختلف بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها هستند.

۲- شرح مشکل

در ریزشبکه‌ها به دلیل کوتاهی خطوط، وقوع خطا در یک نقطه از شبکه می‌تواند منجر به وقوع اغتشاش در نقاط دیگر شبکه گردد. این مسئله در شبکه نمونه شکل (۱) نشان داده شده است. به ازای وقوع خطا در نقطه F شکل (۱) سیگنال‌های جریان دیده شده در مازولهای خطوط مختلف شبکه، در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. همانطور که از شکل (۲) مشخص است، با وقوع خطا در نقطه F، شکل موج‌های جریان در خطی که خطا در آن واقع شده با خطوط اطراف آن، تقریباً بر هم منطبق هستند. این مسئله تشخیص محل دقیق خطا را با

هزینه‌ی بالای انرژی، سرمایه‌گذاری‌های اندک برای ساخت نیروگاه‌های بزرگ انرژی و خطوط انتقال در مسافت‌های طولانی، گرمایش زمین، مستهلك شدن زیرساخت‌های سیستم‌های انرژی در حال استفاده، افزایش آگاهی نسبت به محدود بودن منابع تولید انرژی، ارتقا استانداردهای مصرف انرژی و نهایتاً افزایش تعداد بارهای DC به دلیل پیشرفت در سیستم‌های برقی سبب شدن تا بروزرسانی سیستم‌های امروزی انرژی امری غیرقابل اجتناب گردد. بهمنظر مدیریت عرضه‌ی انرژی در آینده، به سیستم‌های انرژی ساختارپذیر، منعطفتر و دارای اطلاعات بیشتر در شبکه‌های توزیع با ولتاژ پایین نیازمند خواهیم بود [۳-۱].

بدین دلیل، ریزشبکه‌ها که ساختار تلفیق شده از واحدهای تجدیدپذیر تولید انرژی الکتریکی و ذخیرسازهای انرژی الکتریکی و بارهای مصرفی می‌باشند، ساختار جدید و جذابی بوده و استفاده از این نوع ساختار به شکل روز افزونی در حال افزایش است [۵-۳]. با وجود تمام مزایایی که برای ریزشبکه‌ها برشمehrده می‌شود، طرح‌های آن‌ها به دلایل مختلف تکنیکی هنوز در ابعاد آزمایشگاهی باقی مانده است. یکی از مهمترین این مسائل تکنیکی، چالش‌های پیش‌رو در حفاظت این شبکه‌ها می‌باشد [۶]. ساختار دینامیک ریزشبکه‌ها که در آن‌ها در هر لحظه یک منبع تولید پراکنده از شبکه خارج یا به شبکه متصل می‌گردد و نیز عملکرد ریزشبکه‌ها در دو مد نرمال و جزیره‌ای مهمترین مشکلات را در راه حفاظت موثر این شبکه‌ها ایجاد می‌کند [۷]. ساختار دینامیک ریزشبکه‌ها منجر به تنوع در دامنه و جهت جریان‌های خطا می‌گردد که این مسئله فرآیند تشخیص خطا را با مشکلات اساسی مواجه می‌نماید. این مسئله لزوم مطالعه در زمینه تبیین الگوهای مناسب حفاظتی برای ریزشبکه‌ها را مشخص می‌سازد [۸].

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه چالش‌های حفاظتی ریزشبکه‌ها و تبیین روش‌های مناسب برای حفاظت موثر این شبکه‌ها ارائه شده است. براین اساس مطالعات [۱۱-۹] به معرفی چالش‌های حفاظتی ریزشبکه‌ها پرداخته‌اند. روش‌های مختلف پیشنهاد شده در مطالعات گذشته برای حل این چالش‌ها در مطالعات [۸, ۹, ۱۲, ۱۳] دسته-بندی شده‌اند. این روش‌ها شامل آنالیز لتاژ، آنالیز هارمونیک، آنالیز موجک و آنالیز S می‌شوند. براین اساس مطالعه [۱۴] مانیتورینگ لتاژ خروجی منابع تولید پراکنده و انتقال آن‌ها از محور abc به dq و dq به abc مقدار آستانه در محور dq را برای تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها تعیین می‌کند. پیشنهاد می‌نماید. در [۱۵] با استفاده از طیف‌های ایجاد شده از امپدانس هارمونیکی و مقایسه آن‌ها توسط سرور مرکزی به تشخیص خطا می‌پردازد. استخراج انرژی سیگنال با استفاده از آنالیز تبدیل موجک در [۱۶, ۱۷] و آنالیز S در [۱۸] پیشنهاد شده است. در این مطالعات تنها یک ساختار ثابت برای ریزشبکه مدنظر قرار گرفته است

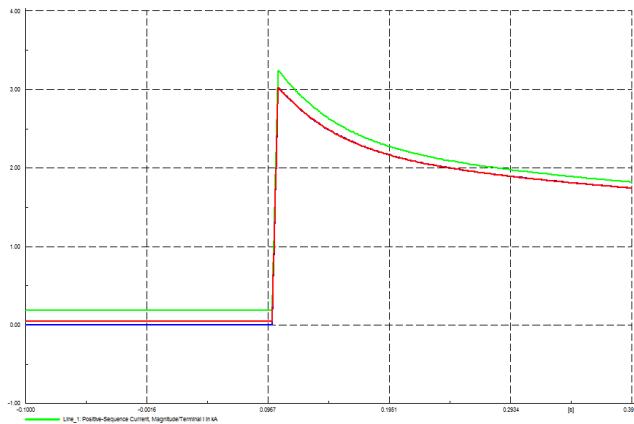
^۱Wavelet transform

^۲S transform

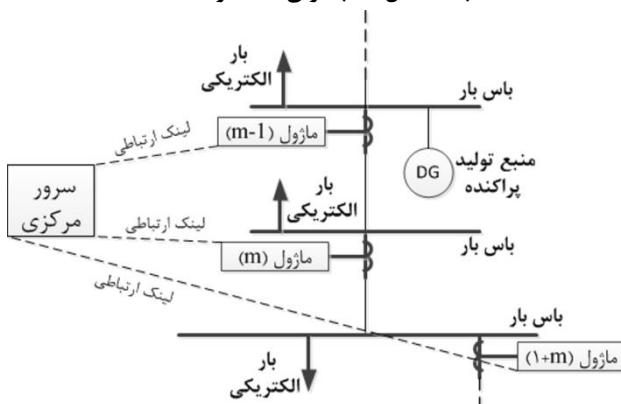
ماژول‌ها بطور مداوم از سیگنال‌های ولتاژ و جریان نمونه‌برداری نموده و از طریق الگوهای پیشنهاد شده در این مقاله به تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع و فازهای درگیر در آن می‌پردازند. لازم به ذکر است به منظور افزایش دقت در تشخیص خطا، استفاده از انحراف معیار و انرژی سیگنال حاصل شده از آنالیز توام‌توالی‌های صفر و مثبت و منفی و همچنین مولفه‌های سه‌فاز سیگنال ولتاژ و جریان، راهکار پیشنهادی این مقاله برای تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع و فازهای درگیر در آن می‌باشد.

۱-۳- آنالیزهای پیشنهاد شده برای تشخیص خطا

ساختار ریزشکه‌ها، با توجه به قطع و وصل منابع و بارهای مختلف موجود در شبکه، دچار تغییرات گسترده‌ای می‌شود که این تغییرات شکل موج جریان و ولتاژ نقاط مختلف شبکه را تغییر داده و این اتفاق تشخیص خطاهای احتمالی رخ داده در ریزشکه را دچار چالش‌های زیادی می‌کند. از این‌رو، این مقاله استفاده از تبدیلات موجک و S که ابزارهای سیار قوی در پردازش سیگنال‌های ولتاژ و جریان هستند را پیشنهاد می‌نماید.



شکل (۲): سیگنال‌های جریان خطا در ماژول‌های خطوط مختلف شبکه شکل (۱) به ازای خطا در نقطه F

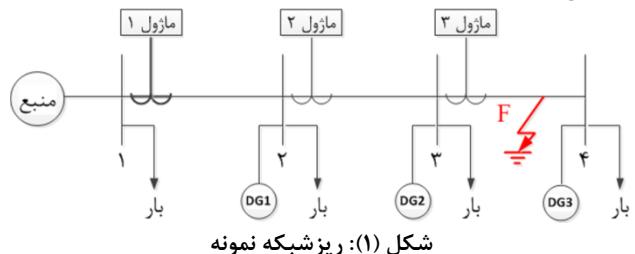


شکل (۳): بستر مورد نیاز برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی

استفاده از روش‌های سنتی با مشکل مواجه می‌نماید. همچنین این مسئله که در مطالعات گذشته تنها بر تشخیص وقوع خطا در این شبکه‌ها تکیه شده است، صحیح نمی‌باشد. چراکه عدم دقت در تعیین محل خطا و نوع خطا می‌تواند منجر به قطع بی‌مورد خطوط سالم و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان سیستم حفاظت گردد.

مسئله دیگری که روش‌های حفاظتی گذشته در زمینه ریزشکه‌ها را دچار چالش می‌کند، عدم توانایی این روش‌ها در تشخیص انواع خطاهای ممکن در شبکه است. همانطور که قبل اهم اشاره شد، در ریزشکه‌ها جریان اتصال کوتاه دارای تنوع بسیار است. گاهی این جریان اینقدر کم می‌شود که حتی تشخیص خطاهای معمولی نیز با چالش مواجه می‌شود. حال آنکه یکی از انواع مهم خطاهای محتمل در شبکه‌های برق، خطاهای امپدانس بالا است که در آن‌ها جریان خطای ایجاد شده بسیار کم می‌باشد [۲۱]. بنابراین این نوع خطا نیازمند روش‌های بسیار دقیق برای تشخیص می‌باشد. این مسئله موجب شده است که مطالعه [۲۱] طرح یک رله جدید را برای تشخیص این نوع خطاها ارائه دهد. رله جدید ارائه شده در [۲۱] تنها قادر به تشخیص خطاهای امپدانس بالا است و از خطاهای امپدانس پایین غافل شده است.

بنابراین پرواضح است که به منظور افزایش قابلیت اطمینان در ریزشکه‌ها، طرح‌های حفاظتی این شبکه‌ها باید بگونه‌ای توسعه یابند که قادر به حفاظت موثر شبکه در کلیه ساختارهای عملکردی آن باشند. همچنین حفاظت ریزشکه‌ها باید با استخراج مشخصات مختلف سیگنال‌های اختشاش قادر به تشخیص انواع خطاهای ممکن (نه فقط یک نوع خطای خاص) به همراه محل دقیق خطا باشد.



شکل (۱): ریزشکه نمونه

۳- روش جدید

شکل (۳) بستر مورد نیاز برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این مقاله را بمنظور تشخیص خطا در ریزشکه‌ها نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۳) مشخص است، در ابتدای خطوط، ماژول‌های (m) تا (1+m) تشخیص خطا نصب می‌گردند که از طریق لینک‌های مخابراتی با یک سرور مرکزی ارتباط دارند. لازم به ذکر است که این روش پیشنهادی را می‌توان به صورت غیرمتزکر و بدون استفاده از سرور مرکزی نیز پیاده‌سازی کرد، کافیست که تصمیماتی که در سرور مرکزی اتخاذ می‌شوند را به ماژول‌ها منتقل کرده و ماژول‌ها به وسیله ارتباط مخابراتی که باهم دارند، تصمیمات لازم را بگیرند.

سیگنال‌ها ($q = Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$) و m معرف شماره مازول‌ها ($m = 1 : M$) می‌باشد. بنابراین اجزای به دست آمده از تبدیل موجک سیگنال اصلی ($u_q^m(n)$ در مقیاس z در نمونه n ام سیگنال q در مازول m به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} WT_{u,q}^m(n) &= D_{q,1}^m(n) + A_{q,1}^m(n) = \\ D_{u,q,1}^m(n) + D_{u,q,2}^m(n) + A_{u,q,2}^m(n) &= \\ \dots &= \sum_{j=1}^J D_{u,q,j}^m(n) + A_{u,q,J}^m(n) \end{aligned} \quad (1)$$

حال اگر از سیگنال مورد نظر به تعداد N نمونه ($n = 1 : N$) مورد مطالعه قرار دهیم، در حالت کلی می‌توان سیگنال اصلی را در مازول m از حاصل جمع ($D_{u,q,j}^m(n)$ ها در مقیاس z به صورت تقریبی به صورت زیر به دست آورد:

$$WT_{u,q}^m \approx \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J D_{u,q,j}^m(n) \quad (2)$$

که در آن $u = i, v$ می‌باشد که i و v به ترتیب بیانگر سیگنال‌های جریان و ولتاژ هستند.

برای محاسبه انرژی سیگنال روش‌های متعددی وجود دارد که در این مقاله از آنتروپی شانون نرمالیزه نشده استفاده می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{u,q}^m = \sum_{n=1}^N \left(-\sum_{j=1}^J \left| D_{u,q,j}^m(n) \right|^2 \log \left| D_{u,q,j}^m(n) \right|^2 \right) \quad (3)$$

همچنین انحراف معیار اجزای به دست آمده، $STD_{u,q}^m$ ، برای محاسبه میزان پراکندگی اجزای به دست آمده از تبدیل موجک از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$STD_{u,q}^m = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \left(\left(-\sum_{j=1}^J \left| D_{u,q,j}^m(n) \right|^2 \log \left| D_{u,q,j}^m(n) \right|^2 \right) - \left(\frac{\sum_{n=1}^N \left(-\sum_{j=1}^J \left| D_{u,q,j}^m(n) \right|^2 \log \left| D_{u,q,j}^m(n) \right|^2 \right)}{N} \right)^2 \right)}{N}} \quad (4)$$

گذرای رخ داده در شبکه می‌باشد [۲۳]. تبدیل S یک تبدیل زمان-فرکانس می‌باشد که ویژگی‌های تبدیل موجک و تبدیل فوریه زمان-کوتاه را توامان دارد.

تبدیل S سیگنال ($u(t)$ در حوزه زمان، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \omega(\tau - t, f) \exp(-j2\pi f \tau) d\tau \quad (5)$$

که در آن ω پنجره گوسی متغیر با زمان است که انحراف معیار تابع گوسی برابر f می‌باشد که در آن روابط زیر برقرار است:

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{f}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\tau - t)^2 f^2}{2}\right) \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(\tau - t, f) d\tau = 1 \quad (7)$$

شایان ذکر است، با توجه به اینکه ماکزیمم مقدار تابع گوسی بر روی میانگین آن قرار دارد، لذا مقدار میانگین این پنجره بر روی t قرار

۱-۱-۳- تبدیل موجک

تبدیل موجک دارای خاصیت چند رزولوشنه است و برای تحلیل سیگنال‌های گذرا بسیار مناسب است [۲۲].

تبدیل موجک می‌تواند در استخراج سیگنال‌های ناخواسته و اجزاء فرکانسی گذرا در یک شکل موج، بسیار مناسب باشد. بنابراین بسیاری از اطلاعات خطأ در مولفه‌های حالت گذرا وجود دارد. بنابراین می‌توان از آن‌ها برای تعیین خطأ یا حالت گذرا غیر نرمال در شبکه یا سیستم قدرت، استفاده نمود. همچنین از این اطلاعات می‌توان برای آنالیز علل خطأ نیز استفاده نمود [۱۶].

سیگنال‌های حالات گذرا دارای مشخصاتی شامل فرکانس بالا و قطع لحظه‌ای هستند. آنالیز موجک مشخصاتی از سیگنال را آشکار می‌سازد که سایر روش‌ها از آشکار ساختن آن‌ها ناتوان هستند. عموماً آنالیز موجک سیگنال گذرا بوسیله الگوریتم‌های تجزیه سریع که قادر به تجزیه سیگنال در مقیاس‌های مختلف هستند، اجرا می‌شود. این کار بوسیله فیلتر نمودن سیگنال توسط فیلترهای پایین گذرا و بالا گذرا اجرا می‌شود. تقریب‌ها اجزاء مقیاس بالا و فرکانس پایینی هستند که با فیلترینگ پایین گذرا سیگنال حاصل می‌شوند. از سوی دیگر جزئیات اجزاء مقیاس پایین و فرکانس بالایی هستند که با فیلتر بالا گذرا سیگنال، حاصل می‌شوند. لازم به ذکر است که پهنای باند این دو فیلتر با هم برابر است [۱۶].

یک سیگنال گستته ($u_q^m(n)$ برای انتقال سریع در لحظه n و مقیاس z دارای ضرایب اجزاء فرکانس بالای ($D_{q,j}^m(n)$ و اجزاء فرکانس پایین ($A_{q,j}^m(n)$ می‌باشد، که در آن q معرف انواع مختلف

مقاله حاضر، با استفاده از $STD_{u,q}^m$ و $E_{u,q}^m$ ، $m = 1 : M$ ، $q = Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$ و $u = i, v$ به تشخیص وقوع خطأ.

محل خطأ، نوع خطأ و فازهای در گیر در آن خواهد پرداخت. با توجه به آنکه به هنگام وقوع خطأ در شبکه، اجزاء مختلف به دست آمده از تبدیل موجک سیگنال‌های جریان و ولتاژ نقاط مختلف شبکه، نسبت به حالت عادی شبکه دچار تغییرات شدیدی می‌شوند، لذا این تغییرات موجب تغییر مقدار انرژی و انحراف معیار سیگنال موردنظر شده و معیار و ملاک خوبی برای تشخیص خطأ در ریزشبکه مورد مطالعه خواهد بود.

۲-۱-۳- تبدیل S

تبدیل S دارای قابلیت تمیز بیشتری نسبت به سایر ابزارهای پردازش سیگنال در تشخیص خطاهای رخ داده در شبکه از حالات پایدار

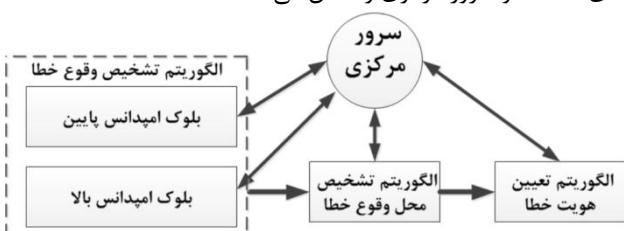
$u = i, v = Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$ ، $m = 1 : M$ و q که در آن، $Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$ می باشدند.

خروجی های تبدیل S یک ماتریس $N \times N$ خواهد بود که ماتریس S نامگذاری می شود. سطرهای ماتریس S توزیع فرکانسی سیگنال مورد بررسی را نشان داده و ستون های این ماتریس تغییرات فرکانس خاصی را به ازای تغییرات در زمان نشان خواهد داد. ماتریس $S_{u,q}^m$ حاصل از اعمال تبدیل S به سیگنال u_q^m به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{u,q}^m[lT, \frac{n}{NT}] = \begin{pmatrix} S_{u,q}^m[T, \frac{1}{NT}] & S_{u,q}^m[T, \frac{2}{NT}] & S_{u,q}^m[T, \frac{3}{NT}] & \dots & S_{u,q}^m[T, \frac{1}{T}] \\ S_{u,q}^m[2T, \frac{1}{NT}] & S_{u,q}^m[2T, \frac{2}{NT}] & S_{u,q}^m[2T, \frac{3}{NT}] & \dots & S_{u,q}^m[2T, \frac{1}{T}] \\ S_{u,q}^m[3T, \frac{1}{NT}] & S_{u,q}^m[3T, \frac{2}{NT}] & S_{u,q}^m[3T, \frac{3}{NT}] & \dots & S_{u,q}^m[3T, \frac{1}{T}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{u,q}^m[NT, \frac{1}{NT}] & S_{u,q}^m[NT, \frac{2}{NT}] & S_{u,q}^m[NT, \frac{3}{NT}] & \dots & S_{u,q}^m[NT, \frac{1}{T}] \end{pmatrix} \quad (9)$$

۲-۳- روش پیشنهادی برای تشخیص خطای

هدف مقاله حاضر، ارائه روشی قدرتمند برای تشخیص وقوع خطای محل خطای نوع خطای و فازهای درگیر در انواع خطای امپدانس پایین و امپدانس بالا می باشد. طرح کلی روش پیشنهادی در شکل (۴) آورده شده است. در روش پیشنهادی، اطلاعات مربوط به سیگنال های جریان و ولتاژ بین مازول های مختلف و سرور مرکزی توسط سه الگوریتم تشخیص وقوع خطای، تشخیص محل وقوع خطای و تعیین هوت خطا به اشتراک گذاشته می شود. شکل (۴) نحوه تبادل اطلاعات بین الگوریتم های مختلف و سرور مرکزی را نشان می دهد.



شکل (۴): بلوک دیاگرام روش تشخیص خطای پیشنهادی

۱-۲-۳- تشخیص وقوع خطای

برای اطمینان از تشخیص انواع خطاهای رخ داده بر حسب امپدانس خطای، الگوریتم تشخیص خطای برای دو حالت امپدانس خطای پایین و امپدانس خطای بالا آورده شده است. لازم به ذکر است، اگرچه استفاده از مشخصات الکتریکی در توالی مثبت یک راهکار مناسب برای تشخیص خطاهای امپدانس پایین است، اما با توجه به پایین بودن این مشخصات در خطاهای امپدانس بالا، لذا این مقاله استفاده از مشخصات توالی منفی را به عنوان راه حل تشخیص خطاهای امپدانس بالا در ریزشیکه ها پیشنهاد می نماید.

داده می شود تا باعث ایجاد تمرکز بیشتر در لحظه مورد نظر بر روی سیگنال مورد مطالعه گردد.

اگر از سیگنال مورد نظر به تعداد N نمونه که دوره زمانی هر نمونه باشد، مورد مطالعه قرار دهیم، تبدیل S گسسته مورد استفاده به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{u,q}^m[lT, \frac{n}{NT}] = \sum_{k=1}^N u_q^m(kT) \cdot \omega((k-l)T, \frac{n}{NT}) \cdot \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (8)$$

در ادامه ماتریس انرژی، $\mathbf{E}_{u,q}^m$ ، که درایه های آن مجذور دامنه درایه های ماتریس $S_{u,q}^m$ می باشد، تشکیل داده می شود.

انرژی سیگنال $E_{u,q}^m$ ، u_q^m ، به صورت رابطه زیر از حاصل جمع درایه های ماتریس انرژی به دست می آید:

$$E_{u,q}^m = \sum_{e=1}^N \sum_{g=1}^N |S_{u,q}^m[eT, \frac{g}{NT}]|^2 \quad (10)$$

و انحراف معیار ماتریس انرژی، $STD_{u,q}^m$ ، برای محاسبه میزان پراکندگی درایه های ماتریس انرژی از رابطه زیر محاسبه می شود:

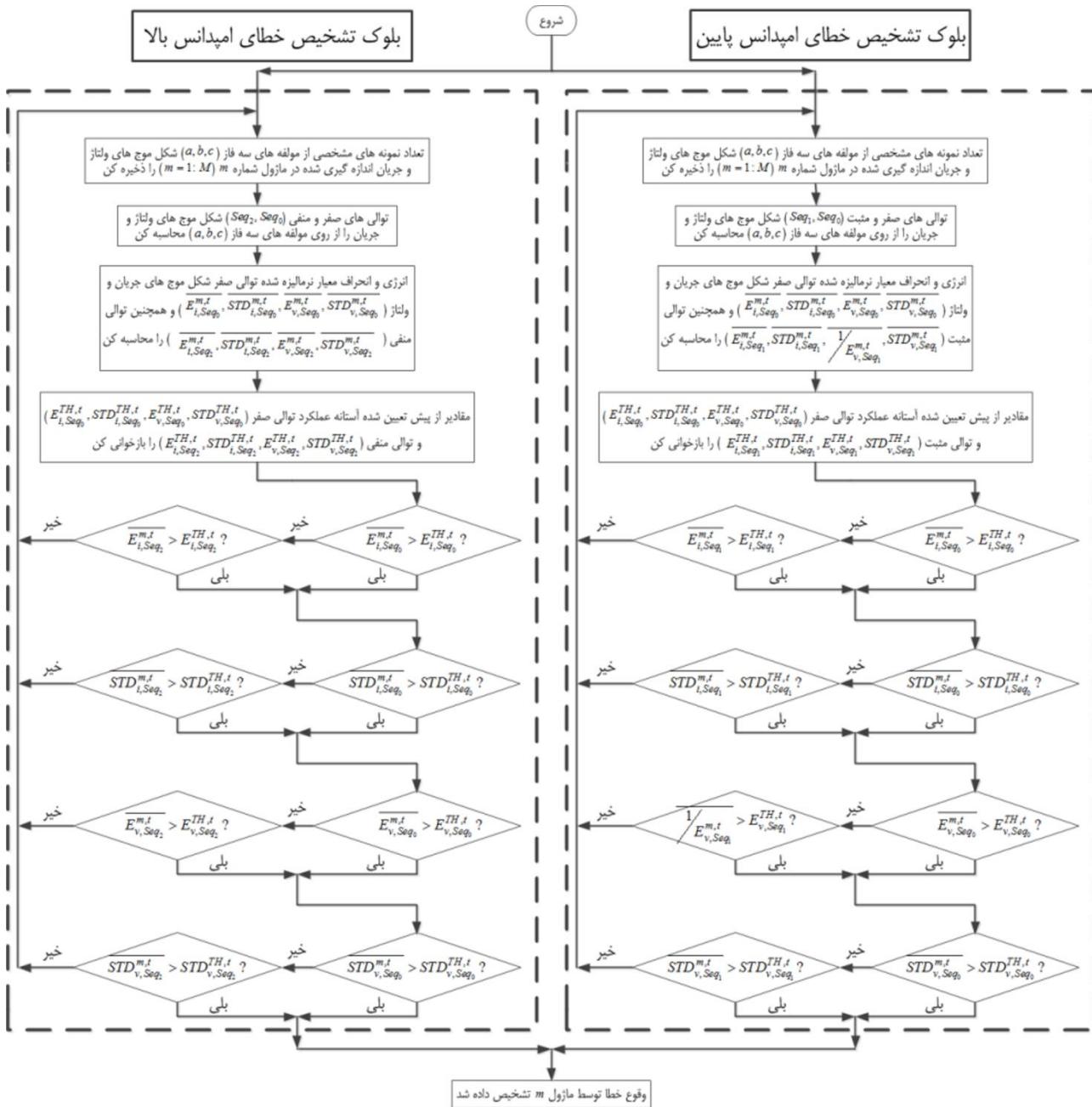
$$STD_{u,q}^m = \sqrt{\frac{\sum_{e=1}^N \sum_{g=1}^N (|S_{u,q}^m[eT, \frac{g}{NT}]|^2 - \frac{\sum_{e=1}^N \sum_{g=1}^N |S_{u,q}^m[eT, \frac{g}{NT}]|^2}{N^2})^2}{N^2}} \quad (11)$$

مقاله حاضر، با استفاده از $E_{u,q}^m$ و $STD_{u,q}^m$ ، $m = 1 : M$ ، $i = 1, 2, \dots, M$ و $v = Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$ به تشخیص وقوع خطای محل خطای، نوع خطای و فازهای درگیر در آن خواهد پرداخت. با توجه به آنکه به هنگام وقوع خطای در شبکه، درایه های ماتریس انرژی در فرکانس ها و زمان های مختلف سیگنال های جریان و ولتاژ نقاط مختلف شبکه، نسبت به حالت عادی شبکه دچار تغییرات شدیدی می شوند، لذا این تغییرات موجب تغییر مقدار انرژی و انحراف معیار سیگنال موردنظر شده و معیار و ملاک خوبی برای تشخیص خطای ریزشیکه مورد مطالعه خواهد بود.

لازم به ذکر است که به منظور مقایسه بهتر، مقادیر مختلف اندازه گیری شده از انرژی و انحراف معیار سیگنال های ولتاژ و جریان ثبت شده توسط مازول ها نسبت به بیشترین مقدار ثبت شده نرمالیزه گردیده اند و از این به بعد برای نشان دادن مقادیر نرمالیزه شده از علامت (-) برای پارامترهای مختلف استفاده شده است.

شده انرژی و انحراف معیار سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده مربوط به توالی صفر ($E_{i,Seq_0}^{m,t}, STD_{i,Seq_0}^{m,t}, E_{v,Seq_0}^{m,t}, STD_{v,Seq_0}^{m,t}$) که در آن $t = WT, ST$ به ترتیب بیانگر تبدیلات موجک و S هستند) در مازولی از مقادیر آستانه از پیش تعیین شده بیشتر شد، مازول مربوطه این اتفاق رو به عنوان وقوع خطا به سرور مرکزی گزارش می‌دهد. مقادیر آستانه از روی روش ارائه شده در مراجع [۱۶، ۲۳] به دست آمده است.

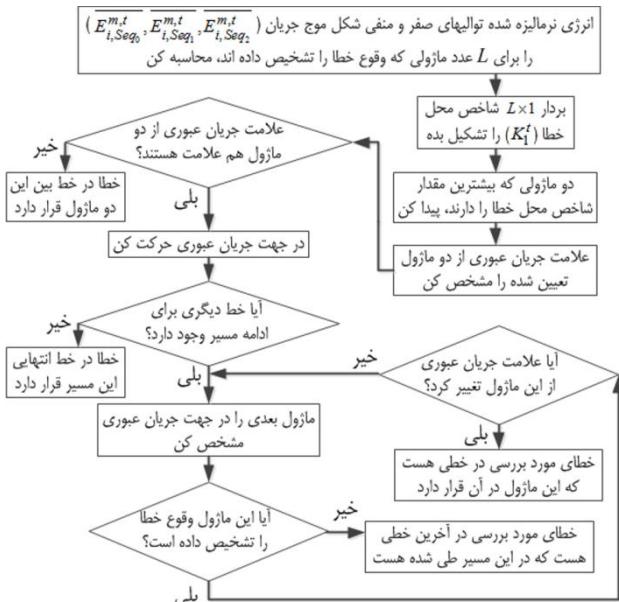
در الگوریتم تشخیص وقوع خطا که در شکل (۵) آورده شده است، وقوع خطا در ریزشبکه با مقایسه مقادیر نرمالیزه شده انرژی و انحراف آستانه از آنالیز توالی‌های صفر و مثبت و منفی سیگنال‌های ولتاژ و جریان قرائت شده توسط مازول‌های مختلف با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده، تشخیص داده می‌شود (مقادیر مرぼط به توالی صفر و مثبت در بلوک تشخیص خطای امپدانس پایین و مقادیر مرぼط به توالی صفر و منفی در بلوک تشخیص خطای امپدانس بالا). محاسبه مقادیر انرژی و انحراف معیار سیگنال‌های مختلف توسط تبدیلات موجک و یا S انجام می‌گیرد. زمانیکه هر ۴ مقدار نرمالیزه



شکل (۵): بلوک دیاگرام تشخیص وقوع خطا

(پارامترهای مرぼط به توالی مثبت در بلوک امپدانس پایین و پارامترهای مرぼط به توالی منفی در بلوک امپدانس بالا) نیز محاسبه شده و با مقدار آستانه مقایسه می‌شود تا اینکه این نوع خطاهای هم از

شایان ذکر است که برای تشخیص وقوع خطای دوفاز و سه‌فاز، به دلیل آنکه مقادیر مرぼط به پارامترهای توالی صفر مقادیر کوچکتری می‌باشند، لذا مقادیر مرぼط به پارامترهای توالی مثبت و منفی



شکل (۶): بلوک دیاگرام تشخیص محل وقوع خطا

لازم به ذکر است که در الگوریتم تشخیص محل خطا منظور از علامت جریان عبوری از مازول اینگونه تعریف می‌شود که اگر جریان عبوری از مازولی وارد خط تحت پوشش آن مازول شود دارای علامت مثبت و اگر چنانچه جریان عبوری از آن خط خارج شود، دارای علامت منفی خواهد بود.

۳-۲-۳- تشخیص نوع خطا

پس از تعیین محل وقوع خطا، لازم است فازهای درگیر در آن خطا تعیین شوند تا بهترین عکس العمل برای پاک کردن خطا بطوریکه کمترین بار خاموش گردد، اتخاذ گردد. بدین منظور مطابق شکل (۷)، از مقادیر نرماییزه شده انرژی توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل موج‌های ولتاژ و جریان در مازولی که بیشترین مقدار ساخت این خطا را دارد ($m = m'$)، استفاده می‌شود. برای اساس ساخت این شکل موج $K_2^{m',t}$ و $K_3^{m',t}$ مطابق روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$K_2^{m',t} = \overline{E_{i,Seq_0}^{m',t}} + \overline{E_{v,Seq_0}^{m',t}} \quad (13)$$

$$K_3^{m',t} = \overline{E_{i,Seq_1}^{m',t}} + \left(\frac{1}{\overline{E_{i,Seq_1}^{m',t}}} \right) + \overline{E_{i,Seq_2}^{m',t}} + \overline{E_{v,Seq_2}^{m',t}} \quad (14)$$

با محاسبه مقادیر $K_2^{m',t}$ و $K_3^{m',t}$ و مقایسه با مقادیر آستانه $K_2^{TH,t}$ ، $K_3^{TH,t}$ ، $K_{32}^{TH,t}$ ، $K_{31}^{TH,t}$ ، نوع خطای رخ داده تعیین گردیده و در ادامه برای تشخیص فازهای درگیر در خطا، انرژی فازهای سه‌گانه شکل موج جریان در مازولی که بیشترین مقدار ساخت این خطا را دارد ($E_{i,c}^{m',t}$ ، $E_{i,b}^{m',t}$ و $E_{i,a}^{m',t}$) محاسبه شده و مطابق الگوریتم شکل (۷)، فازهای درگیر در انواع خطابا نیز مشخص می‌گردد.

شایان ذکر است که حدود آستانه‌ای که برای تشخیص نوع خطا استفاده می‌شوند، با توجه به توپولوژی شبکه، بررسی رفتار انواع

دید الگوریتم تشخیص خطابا پیشنهادی پنهان نمانده و پر واضح است که با این کار قادر تشخیصی روش پیشنهادی بالا می‌رود. بنابراین هنگامی که هیچ یک از پارامترهای توالی صفر از حد آستانه خود بزرگتر نشد، نوبت به بررسی توالی مثبت و منفی آن پارامتر است. اگر توالی مثبت و منفی آن پارامتر از حد آستانه خود بزرگتر بود، این پارامتر شرط تشخیص خطا را برآورده است. در مورد توالی مثبت سیگنال ولتاژ، با توجه به اینکه به هنگام وقوع خطا مقدار این پارامتر کاهش می‌یابد، لذا معکوس مقادیر این پارامتر در محاسبات تشخیص خطا مورد بررسی قرار می‌گردد.

در این روش، حالت‌های مرزی (خطاهایی با پارامترهای تشخیصی کوچکتر) انتخاب شده و در تعیین مقادیر آستانه از آنها استفاده شده تا این روش قابلیت تشخیص همه خطاهای احتمالی را داشته و در برای حالات گذراخ داده در شبکه عکس‌العملی از خود نشان ندهد.

۲-۲-۳- تشخیص محل خطا

همانطور که قبل نیز بیان شد، از آنجاییکه طول خطوط در ریزشبکه‌ها کوتاه می‌باشند، لذا ممکن است که تعداد مازول‌های بیشتری (به طور مثال L عدد مازول) وقوع خطای امپدانس پایین (با امپدانس بالا) رخ داده را تشخیص دهنده. با توجه به اهمیت جلوگیری از برقی‌های بی‌مورد در ریزشبکه، بنابراین لازم است که محل وقوع خطا به درستی در ریزشبکه تشخیص داده شود. الگوریتم تشخیص محل وقوع خطا، با استفاده از مقادیر نرماییزه شده انرژی توالی‌های صفر و مثبت و منفی شکل موج جریان در L عدد مازولی که وقوع خطا را تشخیص داده‌اند، بردار شاخص محل خطا را به صورت زیر تشکیل می‌دهند:

$$K_1^t = \begin{bmatrix} \overline{2 \times E_{i,Seq_0}^{1,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{1,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{1,t}} \\ \overline{2 \times E_{i,Seq_0}^{2,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{2,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{2,t}} \\ \overline{2 \times E_{i,Seq_0}^{3,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{3,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{3,t}} \\ \vdots \\ \overline{2 \times E_{i,Seq_0}^{L,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{L,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{L,t}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن $t = WT, ST$ و $t = WT, ST$ به ترتیب بیانگر تبدیلات موجک و S هستند.

با تشکیل بردار شاخص محل خطا، محل خطا رخ داده توسط الگوریتم تشخیص محل وقوع خطا مطابق شکل (۶) تعیین می‌شود.

و با بسته شدن هر کدام از این کلیدها، ریز شبکه تبدیل به ریز شبکه حلقی خواهد شد. لازم به ذکر است برای استفاده از روش جدید پیشنهادی در تشخیص انواع خطأ، در این مقاله از سیگنال های ولتاژ و جریان با فرکانس نمونه برداری ۱۰ کیلوهرتز، ۱۰۰۰ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، برای دست آوردن نتایج شبیه سازی موارد مورد مطالعه در این مقاله از نرم افزار DIGSILENT Power Factory ۱۴.۱.۳ استفاده شده است.

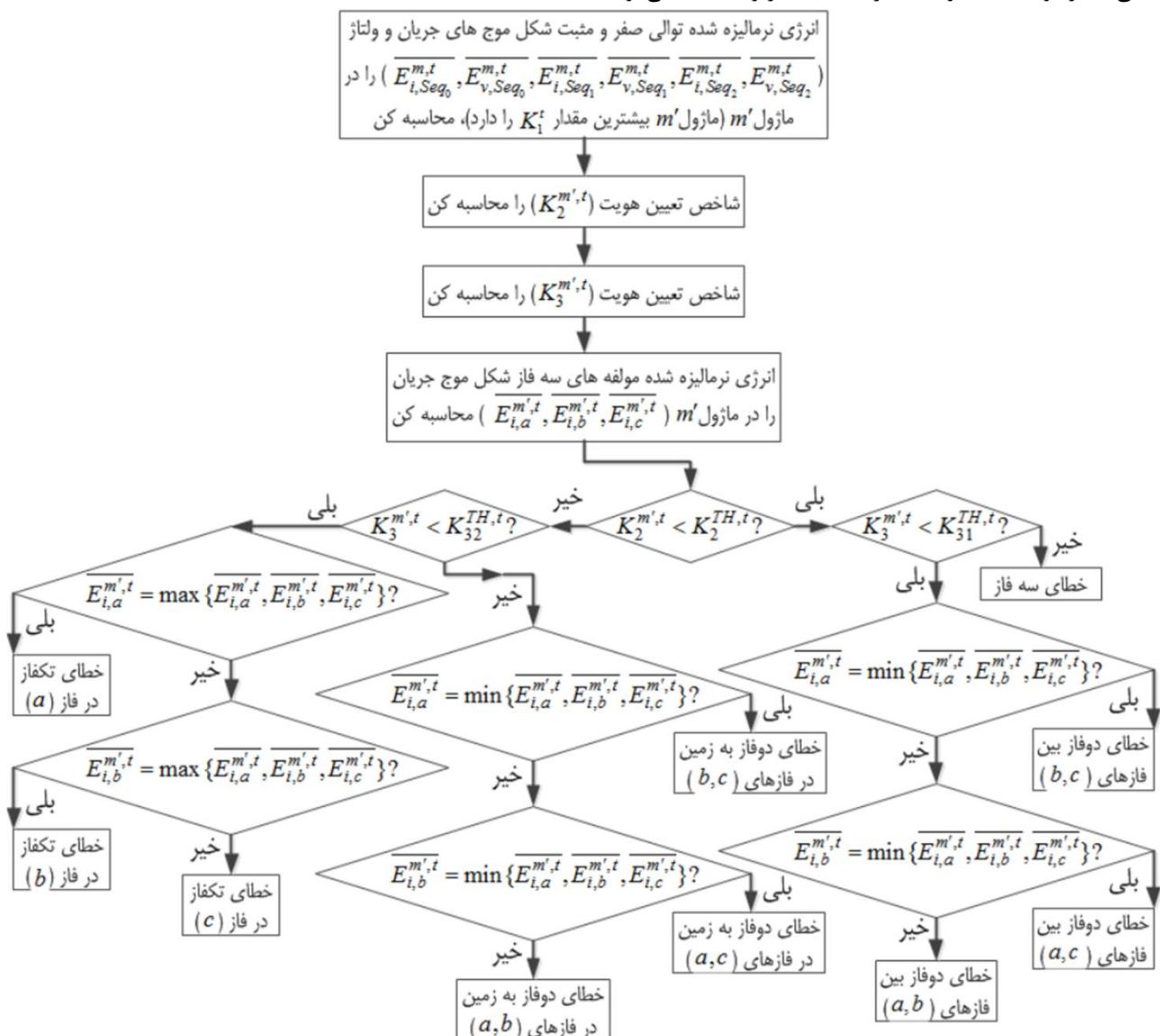
بر اساس توپولوژی های مختلف شبکه، انواع خطأ های احتمالی در نقاط مختلف شبکه بررسی شده و مقادیر $K_{31}^{TH,t}$ ، $K_2^{TH,t}$ و $K_{32}^{TH,t}$ برای تبدیل موجک به ترتیب برابر 0.384 ، 0.436 و 1.148 و برای تبدیل S به ترتیب برابر 0.755 ، 2.212 و 0.928 انتخاب شده اند.

خطأ های ممکن و آنالیز تغییرات مقادیر نرمالیزه شده انرژی سیگنال های جریان و ولتاژ در مولفه ها و توالی های مختلف به هنگام وقوع خطأ به دست می آیند.

نکته قابل توجه این است که روش تشخیص خطأ به کار رفته در این مقاله بر خلاف روش های قبلی [۲۴] توانایی تشخیص خطأ در هر توپولوژی از شبکه را دارد، چرا که روش ارائه شده مستقل از توپولوژی شبکه مورد بررسی می باشد.

۴- پیاده سازی روش پیشنهادی

به منظور ارزیابی میزان کارایی روش پیشنهادی، روش ارائه شده با استفاده از هر دو تبدیل موجک و S بر روی ریز شبکه شکل (۸) که جزئیات آن در [۲۵] ارائه شده است، پیاده سازی می شود. همانگونه که در توپولوژی ریز شبکه شکل (۸) مشخص هست، این ریز شبکه در حالتی که هر دو کلید S1 و S2 باز باشند، یک ریز شبکه شعاعی بوده



شکل (۷): بلوك دیاگرام تعیین هویت خطأ رخداده

با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مازول‌ها، با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده در جدول (۱)، مشخص می‌گردد که وقوع خطای توسط مازول‌های شماره ۷، ۸ و ۱۲ مطابق فلوچارت شکل (۵) تشخیص داده شده است.

بمنظور تعیین محل دقیق خطای، مانند فلوچارت ارائه شده در شکل (۶) از انرژی توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل موج جریان برای محاسبه اندیس K_I^{WT} استفاده می‌شود. مقادیر K_I^{WT} به همراه انرژی توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل موج جریان برای مازول‌هایی که خطای تشخیص داده‌اند، در جدول (۳) آورده شده است.

مطابق نتایج جدول (۳)، مشاهده می‌شود که مازول‌های ۷ و ۸ بیشترین مقدار اندیس K_I^{WT} را دارا می‌باشند. همچنین با توجه به علامت جریان در این دو مازول، محل خطای بر اساس فلوچارت شکل (۶) به درستی بر روی خط ۷ تشخیص داده می‌شود.

برای تعیین نوع خطای رخ داده، الگوریتم تعیین هویت خطای در مازول ۷ (مازولی که بیشترین مقدار اندیس تشخیص وقوع خطای را دارد) با استفاده از مقادیر نرمالیزه شده انرژی توالی صفر، مثبت و منفی شکل-

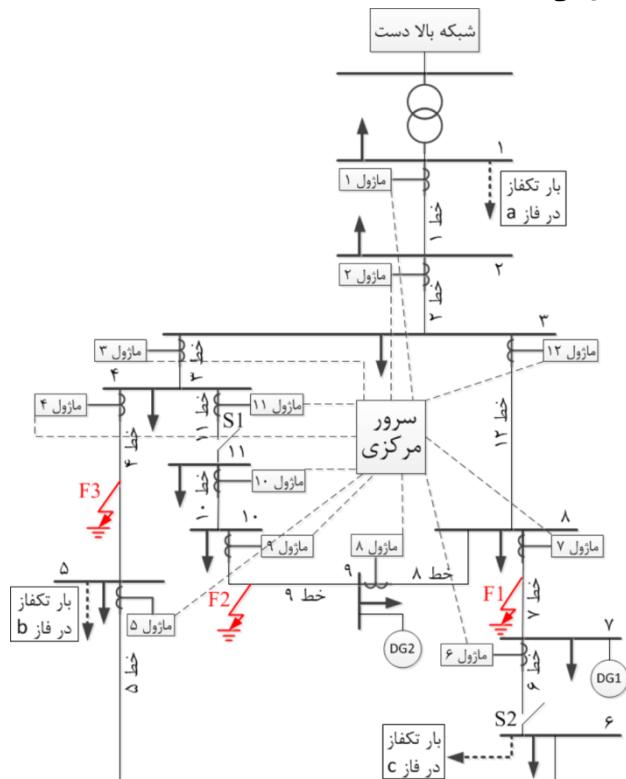
موج جریان $E_{i,Seq_1}^{7,WT} = 0.260825$ ، $E_{i,Seq_0}^{7,WT} = 0.110459$ ، $E_{v,Seq_1}^{7,WT} = 0.356456$ ، $E_{v,Seq_0}^{7,WT} = 0.093307$ ، $E_{v,Seq_2}^{7,WT} = 0.068834$ و $K_2^{7,WT} = 0.203767$ مقدار $K_{31}^{7,WT} = 0.610073$ به دست می‌آید.

۴-۱-۴- بررسی خطای متقارن در توپولوژی شعاعی (هر دو کلید S1 و S2 باز باشند)

به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی در تشخیص خطای متقارن رخ داده، یک خطای سه‌فاز با مقاومت خطای ۱۰۰ اهم در نقطه F1 بر روی خط ۷ ریزشبکه نمونه شکل (۸) قرار داده می‌شود. برای تعیین مقادیر آستانه انرژی و انحراف معیار توالی صفر، مثبت و منفی ولتاژ و جریان، شرایط و حالات مرزی که ممکن است عملکرد الگوریتم تشخیصی را دچار مشکل کند، در نظر گرفته می‌شود. این شرایط و حالات مرزی به صورتی تعیین می‌شوند که الگوریتم تشخیص خطای ارائه شده بتواند تمامی خطای متقارن رخ داده را تشخیص داده و در مقابل حالات گذراپایداری که در شبکه رخ می‌دهند، بی‌تفاوت باشد. مقادیر آستانه نرمالیزه شده انرژی و انحراف معیار توالی صفر، مثبت و منفی جریان و ولتاژ برای تبدیل موجک و S در جدول (۱) آورده شده است.

۴-۱-۱- تشخیص با استفاده از تبدیل موجک

جدول (۲) به ترتیب مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل F1 موجک را برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای در نقطه F1 نشان می‌دهد.



شکل (۸): ریزشبکه مورد مطالعه

جدول (۱): مقادیر آستانه نرمالیزه شده برای تبدیل‌های موجک و S

تبدیل S				تبدیل موجک			
نوع پارامتر	مقدار						

نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران سال ششم شماره ۱۲ پاییز وزمستان ۱۳۹۶

۰/۰۰۲۵۵۹	$\overline{STD_{i,Seq_0}^{TH,ST}}$	۰/۰۱۰۳۷۷	$\overline{E_{i,Seq_0}^{TH,ST}}$	۰/۰۰۰۹۴۲	$\overline{STD_{i,Seq_0}^{TH,WT}}$	۰/۰۰۲۴۱۴	$\overline{E_{i,Seq_0}^{TH,WT}}$
۰/۰۱۰۱۶۷	$\overline{STD_{i,Seq_1}^{TH,ST}}$	۰/۰۴۸۹۳۶	$\overline{E_{i,Seq_1}^{TH,ST}}$	۰/۰۰۱۸۷۱	$\overline{STD_{i,Seq_1}^{TH,WT}}$	۰/۰۰۸۶۱۴	$\overline{E_{i,Seq_1}^{TH,WT}}$
۰/۰۰۳۱۰۴	$\overline{STD_{i,Seq_2}^{TH,ST}}$	۰/۰۱۷۸۹۹	$\overline{E_{i,Seq_2}^{TH,ST}}$	۰/۰۰۱۳	$\overline{STD_{i,Seq_2}^{TH,WT}}$	۰/۰۰۳۵۷۱	$\overline{E_{i,Seq_2}^{TH,WT}}$
۰/۰۱۱۴۵	$\overline{STD_{v,Seq_0}^{TH,ST}}$	۰/۰۰۴۴۲۴	$\overline{E_{v,Seq_0}^{TH,ST}}$	۰/۰۰۶۴۹۱	$\overline{STD_{v,Seq_0}^{TH,WT}}$	۰/۰۰۲۱۰۵	$\overline{E_{v,Seq_0}^{TH,WT}}$
۰/۰۲۵۳۵۷	$\overline{STD_{v,Seq_1}^{TH,ST}}$	۰/۰۲۳۷۷۹	$\overline{\frac{1}{E_{v,Seq_1}^{TH,ST}}}$	۰/۰۱۵۶۳۵	$\overline{STD_{v,Seq_1}^{TH,WT}}$	۰/۰۰۶۹۷۵	$\overline{\frac{1}{E_{v,Seq_1}^{TH,WT}}}$
۰/۰۱۷۳۲	$\overline{STD_{v,Seq_2}^{TH,ST}}$	۰/۰۰۸۲۴۱	$\overline{E_{v,Seq_2}^{TH,ST}}$	۰/۰۰۴۷۸۱	$\overline{STD_{v,Seq_2}^{TH,WT}}$	۰/۰۰۳۲۰۱	$\overline{E_{v,Seq_2}^{TH,WT}}$

حدود ۳۰۰ms می‌باشد. به عبارت دیگر الگوریتم ارائه شده با استفاده از تبدیل موجک به درستی توانسته است خطای سه‌فاز رخ داده در خط ۷ را در کمتر از ۳۰۰ms تشخیص دهد. طبق رابطه (۱۸)، نتیجه‌می‌شود که خطای رخ داده از نوع سه‌فاز می‌باشد. لازم به ذکر است که زمان لازم برای تشخیص خطای در این روش

جدول (۲): مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل موجک برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای F1

سیگنال جریان				سیگنال ولتاژ				شماره مازول	
انحراف معیار ماتریس انرژی		انحراف معیار ماتریس انرژی		توالی منفی		توالی صفر			
توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر		
۰/۰۰۲۴۵۹	۰/۰۰۱۴۶۹	۰/۰۰۰۳۴۱	۰/۰۰۰۶۸۸	۰/۰۰۱۰۵۵	۰/۰۰۱۹۱	۰/۰۰۲۹۴۶	۰/۰۰۰۵۸۵	۱	
۰/۰۰۲۸۴۸	۰/۰۰۰۸۹۶۶	۰/۰۰۱۰۴۹	۰/۰۰۱۱۸	۰/۰۰۱۶۲۱	۰/۰۰۲۰۶۵	۰/۰۰۳۷۸۱	۰/۰۰۰۶۰۷	۲	
۰/۰۰۰۳۲۴	۰/۰۰۰۵۸۷	۰/۰۰۰۲۲۶	۰/۰۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰۳۰۹	۰/۰۰۱۸۵	۰/۰۰۷۱۹۲	۰/۰۰۰۷۶۸	۳	
۰/۰۰۰۱۸۶	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۰۰۲۰۹	۰/۰۰۰۰۴۱	۰/۰۰۲۶۶۱	۰/۰۰۰۸۹۶۸	۰/۰۰۵۸۸۹	۰/۰۰۰۷۲۸	۴	
۰/۰۰۰۱۴۸	۰/۰۰۰۴۷۷	۰/۰۰۰۱۶۸	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱۹۵	۰/۰۰۰۵۶۵۸	۰/۰۰۰۴۳۰۷	۰/۰۰۰۷۰۱	۵	
۰/۰۶۸۸۲۴	۰/۱۱۰۴۵۹	۰/۰۰۶۶۵۷	۰/۰۰۱۵۷۷	۰/۰۷۴۳۲۳	۰/۰۹۳۳۰۷	۰/۰۰۹۵۹۲	۰/۰۰۱۰۴۹	۷	
۰/۰۵۱۷۲	۰/۰۴۲۱۰۴	۰/۰۰۲۹۸۸	۰/۰۰۱۴۶۴	۰/۰۵۶۸۷۳	۰/۰۷۵۰۸۶	۰/۰۰۹۱۶۵	۰/۰۰۰۹۲۴	۸	
۰/۰۰۰۵۲۷	۰/۰۰۰۶۴۴	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۰۰۰۹۲	۰/۰۴۰۱۴۹	۰/۰۵۵۸۵	۰/۰۰۸۹۶۹	۰/۰۰۰۸۹۶	۹	
۰/۰۰۰۴۶۳	۰/۰۰۰۶۰۷	۰/۰۰۰۲۳۲	۰/۰۰۰۰۸۱	۰/۰۱۹۸۲۵	۰/۰۴۳۴۹۴	۰/۰۰۰۸۴۵۴	۰/۰۰۰۸۵۸	۱۰	
۰/۰۳۲۹۰۷	۰/۰۱۳۱۴۳	۰/۰۰۱۴۶۹	۰/۰۰۱۳۱۴	۰/۰۰۷۷۲۶	۰/۰۳۰۷۸۹	۰/۰۰۷۸۴۳	۰/۰۰۰۸۰۶	۱۲	

جدول (۳): مقادیر پارامترهای محاسبه شده در مازول‌هایی که وقوع خطای F1 را تشخیص داده‌اند

علامت جریان	مقدار اندیس K_1^{WT}	انرژی توالی منفی شکل موج جریان	انرژی توالی مثبت شکل موج جریان	انرژی توالی صفر شکل موج جریان	شماره مازول
عبوری از مازول	۰/۵۵۰۵۷۸	۰/۰۶۸۸۳۴	۰/۲۶۰۸۲۵	۰/۱۱۰۴۵۹	۷
مثبت	۰/۳۲۳۸۷۴	۰/۰۵۱۷۲	۰/۱۸۷۹۴۶	۰/۰۴۲۱۰۴	۸
مثبت	۰/۱۲۷۵۷۶	۰/۰۳۲۹۰۷	۰/۰۷۸۲۸۴	۰/۰۱۳۱۴۳	۱۲

برای تعیین محل وقوع خطای، مقادیر K_1^{ST} به همراه انرژی توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل موج جریان برای مازول‌هایی که خطای را تشخیص داده‌اند، در جدول (۵) آورده شده است. مطابق نتایج جدول (۵) و بر اساس فلوچارت شکل (۶) محل خطای به درستی بر روی خط ۷ تشخیص داده می‌شود.

۲-۱-۴-۲- تشخیص با استفاده از تبدیل S

جدول (۴) به ترتیب مقادیر نرمالیزه شده انرژی و انحراف معیار توالی منفی ولتاژ و جریان به دست آمده از تبدیل S را برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای F1 نشان می‌دهد.

از جدول (۴) مشخص است که وقوع خطای توسط مازول‌های شماره ۷، ۸ و ۱۲ تشخیص داده شده است.

جدول (۴): مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل S برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای F1

سیگنال جریان				سیگنال ولتاژ				شماره مازول
انرژی ماتریس انرژی	انحراف معیار ماتریس انرژی	انرژی ماتریس انرژی	انحراف معیار ماتریس انرژی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	
توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی
۰/۰۱۰۲۸۳	۰/۰۰۶۰۰۲	۰/۰۰۰۹۰۵	۰/۰۰۱۳۷۲	۰/۰۰۱۳۹۸	۰/۰۰۰۷۱۵	۰/۰۱۱۷۴۲	۰/۰۰۶۶۱۸	۱
۰/۱۷۹۴۱	۰/۰۴۰۳۴۷	۰/۰۰۱۰۴۹	۰/۰۰۴۷۷۸	۰/۰۰۲۵۹۸	۰/۰۰۱۸۳۷	۰/۰۱۴۴۳۲	۰/۰۰۸۱۳۴	۲
۰/۰۰۰۵۱۵	۰/۰۰۰۲۴۷	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۰۲۷۳۰۱	۰/۰۱۶۰۷۱	۰/۰۴۱۱۱۱	۰/۰۲۱۴۴	۳
۰/۰۰۰۱۴۲	۰/۰۰۰۲۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۳۶	۰/۰۱۹۳۷۱	۰/۰۰۸۵۸۸	۰/۰۳۲۳۷۷	۰/۰۱۶۸۸۵	۴
۰/۰۰۰۱۱۱	۰/۰۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۳۳	۰/۰۱۸۷۳۵	۰/۰۰۲۶۹۴	۰/۰۲۸۱۵۱	۰/۰۰۸۷۶۶	۵
۰/۳۳۴۰۳	۰/۲۲۲۰۰۳	۰/۰۰۹۲۴۵	۰/۰۰۸۸۸	۰/۰۳۷۰۴۴۵	۰/۰۲۳۰۹۰۴	۰/۱۲۰۵۹۲	۰/۰۶۲۸۹۱	۷
۰/۲۶۹۱۶۹	۰/۰۱۹۷۳	۰/۰۰۶۵۰۷	۰/۰۰۷۶۰۸	۰/۰۲۶۸۵۰۵	۰/۰۲۱۸۰۵۵	۰/۰۹۸۴۳۲	۰/۰۵۱۳۳۴	۸
۰/۰۰۰۹۷۱	۰/۰۰۰۶۵۵	۰/۰۰۰۰۷۲	۰/۰۰۰۰۲۷۱	۰/۱۳۹۴۹۹	۰/۱۳۹۴۰۲	۰/۰۷۷۶۹۸	۰/۰۴۰۵۲۱	۹
۰/۰۰۰۵۴۴	۰/۰۰۰۴۲۶	۰/۰۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۱۳۲	۰/۰۸۸۳۶۱	۰/۰۸۴۲۱۹	۰/۰۶۱۳۲۹	۰/۰۳۱۹۸۴	۱۰
۰/۲۰۹۲۵۶	۰/۱۰۰۶۵۴	۰/۰۰۴۸۲۶	۰/۰۰۶۲۹۴	۰/۰۴۷۶۹۷	۰/۰۲۹۷۹	۰/۰۴۹۹۸۳	۰/۰۲۶۰۶۷	۱۲

جدول (۵): مقادیر پارامترهای محاسبه شده توسط تبدیل S در مازول‌هایی که وقوع خطای F1 را تشخیص داده‌اند

علامت جریان عبوری از مازول	مقدار اندیس K_1^{ST}	انرژی توالی منفی شکل موج جریان	انرژی توالی مثبت شکل موج جریان	انرژی توالی صفر شکل موج جریان	شماره مازول
مثبت	۱/۳۷۴۵۴۴	۰/۳۳۴۰۳	۰/۵۹۶۵۰۸	۰/۲۲۲۰۰۳	۷
مثبت	۱/۰۴۷۵۳۳	۰/۲۶۹۱۶۹	۰/۳۷۴۴۱۸	۰/۲۰۱۹۷۳	۸
مثبت	۰/۶۶۲۶۸۸	۰/۲۰۹۲۵۶	۰/۲۵۲۱۲۳	۰/۱۰۰۶۵۴	۱۲

برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطا در نقطه F2 محاسبه می‌شود. جدول (۶) این مقادیر را نشان می‌دهد.

با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مازول‌ها، با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده در جدول (۱)، مشخص می‌گردد که وقوع خطای توسط مازول‌های شماره ۳، ۶، ۷، ۸ و ۱۲ مطابق فلوچارت شکل (۵) تشخیص داده شده است.

پس از تشخیص وقوع خطا، به منظور تعیین محل وقوع خطا، مطابق فلوچارت ارائه شده در شکل (۶) مقادیر K_1^{WT} به همراه انرژی نرمالیزه شده توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل موج جریان برای مازول‌هایی که خطا را تشخیص داده‌اند، در جدول (۷) آورده شده است.

مطابق نتایج جدول (۷)، مشاهده می‌شود که مازول‌های ۷ و ۸ بیشترین مقدار اندیس K_1^{WT} را دارا می‌باشند. همچنین با توجه به اینکه علامت جریان در این دو مازول منفی می‌باشد، درجهت جریان عبوری حرکت کرده و به مازول شماره ۹ می‌رسیم. از آنجا که مازول ۹ وقوع خطا را تشخیص نداده است، بنابراین بر اساس فلوچارت شکل (۶) محل خطا در آخرین خط طی شده در این مسیر می‌باشد که همان خط ۹ می‌باشد. بنابراین الگوریتم مربوطه، محل خطا را به درستی بر روی خط ۹ تشخیص می‌دهد.

برای تعیین نوع خطای رخ داده نیز مقادیر شاخص‌های تشخیص هویت خطای $K_{31}^{7,ST} = 1.738601$ و $K_2^{7,ST} = 0.452908$ محاسبه می‌شود که با مقایسه این مقادیر با مقادیر $K_{31}^{TH,ST} = 0.928$ و $K_2^{TH,ST} = 0.755$ طبق رابطه (۱۸)، نتیجه می‌شود که خطای رخ داده از نوع سه‌فاز می‌باشد. در این زمان لازم برای تشخیص خطا در این روش حدود ۳۸۰ms می‌باشد. به عبارتی دیگر الگوریتم ارائه شده با استفاده از تبدیل S به درستی توانست که خطای سه‌فاز رخ داده در خط ۷ را در کمتر از ۳۸۰ms تشخیص دهد.

۲-۴- بررسی خطای نامتقابن در توبولوژی حلقوی (کلید S1 باز و کلید S2 بسته باشند)

به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی در تشخیص خطاهای نامتقابن رخ داده در توبولوژی حلقوی، یک خطای تکفاز با مقاومت خطای ۵ اهم در نقطه F2 روی فاز b خط ۶ ریزشکه نمونه شکل (۸) قرار داده می‌شود. لازم به ذکر است، جهت ایجاد توبولوژی حلقوی، کلید S2 که در حالت قبل باز بود، بسته می‌شود.

۴-۱- تشخیص با استفاده از تبدیل موجک

ابتدا برای تشخیص وقوع خطا، مقادیر نرمالیز شده انرژی و انحراف معیار توالی صفر و مثبت ولتاژ و جریان به دست آمده از تبدیل موجک

جدول (۶): مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل موجک برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای F2

سیگنال جریان				سیگنال ولتاژ				شماره مازول	
انحراف معیار ماتریس انرژی									
توالی مثبت	توالی صفر								
۰/۱۴۶۲۷۸	۰/۱۵۲۴۶۷	۰/۰۱۴۷۵۶	۰/۰۰۶۲۴۵	۰/۰۲۷۷۷۱	۰/۰۰۷۶۳۷	۰/۰۲۰۰۲۸	۰/۰۱۰۱۳۱	۳	
۰/۱۳۲۹۵۴	۰/۰۸۴۹۲۵	۰/۰۰۸۸۳۴	۰/۰۰۴۷۶۹	۰/۰۱۸۹۲۴	۰/۰۰۴۰۴۹	۰/۰۱۸۰۹۲	۰/۰۰۹۳۵۱	۶	
۰/۱۸۴۸۱۳	۰/۳۶۳۶۴۳	۰/۰۲۶۶۸	۰/۰۰۹۱۶۸	۰/۲۴۴۵۰۳	۰/۱۶۰۶۵۳	۰/۰۶۲۷۳۲	۰/۱۰۷۲۳۱	۷	
۰/۲۵۲۳۸۷	۰/۰۵۰۵۵۹	۰/۰۳۴۱۵۳	۰/۰۱۰۸۴۹	۰/۳۱۹۵۹	۰/۲۱۳۸۱۴	۰/۰۷۱۷۷۴	۰/۱۱۲۵۰۳	۸	
۰/۱۶۵۶۷۶	۰/۲۴۷۸۹۹	۰/۰۱۹۰۷۴	۰/۰۰۷۷۹۹	۰/۰۶۵۴۲۲	۰/۰۲۷۶۲۵	۰/۰۲۷۵۰۴	۰/۰۱۱۵۴۴	۱۲	

طبق رابطه (۱۹)، نتیجه می‌شود که خطای رخ داده از نوع تکفار می‌باشد و با استفاده از مقادیر $E_{i,b}^{8,WT} = 0.828836$ ، $E_{i,a}^{8,WT} = 0.45674$ و $E_{i,c}^{8,WT} = 0.371461$ معلوم می‌شود که خطای مذکور در فاز b رخ داده است. همچنین لازم به ذکر است که زمان لازم برای تشخیص خطای در این روش حدود ۳۳۰ms می‌باشد. به عبارتی دیگر الگوریتم ارائه شده با استفاده از تبدیل موجک به درستی توانست که خطای تکفار رخ داده در فاز b خط ۹ را در کمتر از ۳۳۰ms تشخیص دهد.

در ادامه برای تعیین نوع خطای رخ داده، الگوریتم تعیین هویت خطای مازول ۸ (مازول) که بیشترین مقدار اندیس تشخیص وقوع خطای رخ دارد) با استفاده از مقادیر $E_{i,Seq_1}^{8,WT} = 0.252387$ ، $E_{i,Seq_0}^{8,WT} = 0.505559$ ، $\frac{1}{E_{v,Seq_1}^{8,WT}} = 0.31959$ ، $E_{v,Seq_0}^{8,WT} = 0.213814$ ، $E_{i,Seq_2}^{8,WT} = 0.219773$ ، $K_{32}^{8,WT} = 0.965186$ ، $K_2^{8,WT} = 0.719373$ ، $E_{v,Seq_2}^{8,WT} = 0.173437$ و $K_{32}^{TH,WT} = 1.148$ ، $K_2^{TH,WT} = 0.436$ و $K_{32}^{8,WT} = 0.965186$ را محاسبه می‌کند.

از مقایسه مقادیر به دست آمده برای $K_2^{8,WT} = 0.719373$ و $K_{32}^{TH,WT} = 1.148$ با مقادیر $K_2^{8,WT} = 0.436$ و $K_{32}^{8,WT} = 0.965186$

جدول (۷): مقادیر پارامترهای محاسبه شده توسط تبدیل موجک در مازول‌هایی که وقوع خطای F2 را تشخیص داده‌اند

علامت جریان عوری از مازول	مقدار اندیس K_1^{WT}	انرژی توالی منفی شکل موج جریان	انرژی توالی مثبت شکل موج جریان	انرژی توالی صفر شکل موج جریان	شماره مازول
	۰/۵۴۳۴۵۲	۰/۰۹۲۲۴	۰/۱۴۶۲۷۸	۰/۱۵۲۴۶۷	۳
	۰/۳۷۳۲۲۹	۰/۰۷۰۴۲۴	۰/۱۳۲۹۵۴	۰/۰۸۴۹۲۵	۶
منفی	۱/۰۷۱۳۹۱	۰/۱۵۹۲۹۲	۰/۱۸۴۸۱۳	۰/۳۶۳۶۴۳	۷
منفی	۱/۴۸۳۲۷۸	۰/۲۱۹۷۷۳	۰/۲۵۲۳۸۷	۰/۰۵۰۵۵۹	۸
	۰/۷۸۴۷۴۸	۰/۱۲۳۲۷۵	۰/۱۶۵۶۷۶	۰/۲۴۷۸۹۹	۱۲

S را برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای F2 در نقطه S نشان می‌دهد.

۴-۲-۴-۲- تشخیص با استفاده از تبدیل S

با هدف تشخیص وقوع خطای جدول (۸) مقادیر نرمالیزه شده انرژی و انحراف معیار توالی صفر و مثبت ولتاژ و جریان به دست آمده از تبدیل

جدول (۸): مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل S برای مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای F2

سیگنال جریان				سیگنال ولتاژ				شماره مازول	
انرژی ماتریس انرژی		انحراف معیار ماتریس انرژی		انرژی ماتریس انرژی		انحراف معیار ماتریس انرژی			
توالی مثبت	توالی صفر	توالی مثبت	توالی صفر	توالی مثبت	توالی صفر	توالی مثبت	توالی صفر		
۰/۰۱۴۱۹۳	۰/۰۰۵۵۳۹	۰/۰۰۷۳۴۱	۰/۰۰۰۸۵۱	۰/۰۰۱۰۸۸	۰/۰۰۱۶۷۲	۰/۰۰۰۵۷۹	۰/۰۴۵۳۳	۱	
۰/۰۳۱۹۳۱	۰/۰۰۶۱۱۶	۰/۰۰۸۳۹۱	۰/۰۰۱۴۵۳	۰/۰۰۱۷۹۲	۰/۰۰۲۷۷۲	۰/۰۰۹۴۹۶	۰/۰۰۷۴۱۷	۲	
۰/۲۷۷۳۸۴	۰/۱۸۹۲۸۳	۰/۰۲۶۲۹۴	۰/۰۷۴۳۱۸	۰/۰۴۱۱۴۸	۰/۰۳۶۳۷۳	۰/۰۵۴۹۳۵	۰/۰۳۷۳۱۹	۳	
۰/۰۷۹۲۰۱	۰/۰۲۵۸۸	۰/۰۱۳۸۱	۰/۰۰۴۵۳۶	۰/۰۱۵۰۱۳	۰/۰۰۸۸۱۳	۰/۰۲۰۰۹۵۵	۰/۰۰۹۷۴۸	۴	

۰/۰۵۳۳۲۱	۰/۰۲۰۶۰۳	۰/۰۱۲۵۷۵	۰/۰۰۳۴۰۲	۰/۰۰۳۰۸	۰/۰۰۴۱۰۵	۰/۰۱۱۷۷۷	۰/۰۰۸۹۹۹	۵
۰/۱۰۷۲۱۶	۰/۰۵۸۵۵۱	۰/۰۱۵۵۵۴	۰/۰۲۵۷۶۴	۰/۰۲۹۹۱۴	۰/۰۱۸۵۶۳	۰/۰۴۳۵۲۵	۰/۰۱۸۶۹۱	۶
۰/۴۸۹۸۲۲	۰/۴۷۸۲۳۸	۰/۰۸۱۱۲۴	۰/۱۱۳۰۶۹	۰/۴۴۲۲۵۷	۰/۳۰۶۶۸۵	۰/۱۲۲۲۱۲	۰/۱۵۲۱۳۳	۷
۰/۶۱۵۰۷۵	۰/۶۵۳۵۳۵	۰/۱۰۴۷۲۳	۰/۱۳۰۳۱۳	۰/۴۷۱۶۰۱	۰/۴۹۹۲۰۵	۰/۱۴۷۸۳۲	۰/۱۸۶۱۳۴	۸
۰/۰۰۱۷۶۹	۰/۰۰۰۹۱۸	۰/۰۰۰۶۵۶	۰/۰۰۰۱۰۸	۰/۲۴۴۴۲۱	۰/۲۰۴۳۹۷	۰/۰۹۸۴۷۶	۰/۱۰۱۴۵۶	۹
۰/۰۰۱۰۶۹	۰/۰۰۰۵۵۳	۰/۰۰۰۳۹۴	۰/۰۰۰۰۹۶	۰/۱۴۷۰۷۳	۰/۱۳۳۸۴۲	۰/۰۷۹۳۲	۰/۰۸۰۴۵۷	۱۰
۰/۳۶۹۴۶	۰/۳۳۹۱۶۴	۰/۰۶۶۲	۰/۰۹۴۸۵	۰/۰۷۵۲۷۷	۰/۰۶۳۱۷	۰/۰۶۵۷۴۸	۰/۰۵۳۴۲۸	۱۲

محل خطاباً بر اساس فلوچارت شکل (۶) به درستی بر روی خط ۹

تشخیص داده می‌شود.

در ادامه برای تعیین نوع خطای رخ داده، الگوریتم تعیین هویت خطاباً

در مازول ۸ (مازولی که بیشترین مقدار اندیس تشخیص وقوع خطاباً

دارد) با استفاده از مقادیر $E_{i,Seq_1}^{8,ST} = 0.615074$ ، $E_{i,Seq_0}^{8,ST} = 0.653535$ ،

$E_{v,Seq_0}^{8,ST} = 0.499205$ ، $E_{i,Seq_2}^{8,ST} = 0.569801$ ،

و $E_{v,Seq_1}^{8,ST} = 0.392661$ ، مقادیر

$K_2^{8,ST} = 1.15274$ و $K_{32}^{8,ST} = 2.049138$ را محاسبه می‌کند.

از مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مازول‌ها با مقادیر آستانه از

پیش تعیین شده در جدول (۱)، مشخص می‌گردد که وقوع خطاباً

توسط مازول‌های شماره ۳، ۶، ۷، ۸ و ۱۲ مطابق فلوچارت شکل (۵)

تشخیص داده شده است.

حال به منظور تعیین محل وقوع خطاباً، مطابق فلوچارت ارائه شده در

شکل (۶) مقادیر K_1^{ST} به همراه انرژی نرمالیزه شده توالی‌های صفر،

ثبت و منفی شکل موج جریان برای مازول‌هایی که خطاباً را تشخیص

داده‌اند، در جدول (۹) آورده شده است.

از مقادیر جدول (۹) نتیجه می‌شود که مازول‌های ۷ و ۸ بیشترین

مقدار اندیس K_1^{ST} را دارا می‌باشند. به مانند استدلال قسمت قبل،

جدول (۹): مقادیر پارامترهای محاسبه شده توسط تبدیل S در مازول‌هایی که وقوع خطاباً F2 را تشخیص داده‌اند

شماره مازول	ارزی توالی صفر شکل موج جریان	ارزی توالی مثبت شکل موج جریان	انرژی توالی منفی شکل موج جریان	مقدار اندیس K_1^{ST}	علامت جریان عوری از مازول
۳	۰/۱۸۹۲۸۳	۰/۲۷۷۳۸۴	۰/۱۳۰۵۳۷	۰/۷۸۶۴۸۷	
۶	۰/۰۵۸۵۵۱	۰/۱۰۷۲۱۶	۰/۰۴۸۲۷۵	۰/۲۷۷۲۵۹۲	
۷	۰/۴۸۹۸۲۲	۰/۴۷۱۶۰۱	۰/۳۷۳۹۸۶	۱/۸۲۰۲۸۴	منفی
۸	۰/۶۵۳۵۳۵	۰/۶۱۵۰۷۵	۰/۵۶۹۸۰۱	۲/۴۹۱۱۹۴۶	منفی
۱۲	۰/۳۶۹۴۶	۰/۳۱۹۳۶۳	۰/۲۱۹۳۶۳	۱/۲۶۷۱۵۲	

۳-۴- عکس العمل روش پیشنهادی در برابر کلیدزنی

برای نشان دادن قابلیت اطمینان و عملکرد صحیح روش پیشنهادی در برابر کلیدزنی‌های احتمالی در شبکه، عکس العمل روش پیشنهادی را در برابر یک نمونه کلیدزنی مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این کار فرض می‌کنیم در حالتی که هر دو $S1$ و $S2$ کلید باز هستند، منبع تولید پراکنده شماره ۲، از مدار خارج شود. تحلیل مربوطه که با استفاده از تبدیل S انجام شده است، در جدول (۱۰) آورده شده است. جدول (۱۰) مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل S را برای مازول‌های مختلف بعد از خروج DG2 نشان می‌دهد.

از مقایسه مقادیر به دست آمده با مقادیر $K_2^{TH,ST} = 0.755$ و

$K_{32}^{TH,ST} = 2.212$ طبق رابطه (۱۹)، نتیجه می‌شود که خطاباً رخ

داده از نوع تکفار می‌باشد و با استفاده از مقادیر $E_{i,a}^{8,ST} = 0.127275$

$E_{i,c}^{8,ST} = 0.215044$ و $E_{i,b}^{8,ST} = 0.803937$ معلوم می‌شود که خطاباً

مذکور در فاز b رخ داده است. همچنین لازم به ذکر است که زمان

لازم برای تشخیص خطاباً در این روش حدود ۴۰۰ms می‌باشد. به

عبارتی دیگر الگوریتم ارائه شده با استفاده از تبدیل S به درستی

توانست که خطاباً تکفار رخ داده در فاز b را در کمتر از ۴۰۰ms تشخیص دهد.

جدول (۱۰): مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل S با ضرب 10 برای مازول‌های مختلف بعد از خروج DG2 (مقادیر دارای علامت * از

مقادیر حدود آستانه مربوطه تجاوز کرده‌اند)

سیگنال جریان						سیگنال ولتاژ						شماره ماژول	
انرژی ماتریس انرژی			انحراف معیار ماتریس انرژی			انرژی ماتریس انرژی			انحراف معیار ماتریس انرژی				
توالی منفی	توالی مثبت	توالی صفر	توالی منفی	توالی مثبت	توالی صفر	توالی منفی	توالی مثبت	توالی صفر	توالی منفی	توالی مثبت	توالی صفر		
۱۲۹۶	۲۸۶۳	۱۴۶۳	۱۶۵	۳۰۳۰	۲۰۹	۳۹۳	۱۷۰۶	۲۴۲۶	۱۴۱۰	۳۸۱۱	۴۳۸۶	۱	
۱۷۱۶	۷۲۲۲	۳۴۰۲	۲۱۹	۴۵۴۸	۵۳۸	۶۲۱	۲۶۱۵	۱۵۶۰	۲۲۶۹	۴۹۷۹	۵۴۹۲	۲	
۱۲۴۷	۳۱۹۶	۱۳۵۶	۱۳۸	۲۸۱۸	۲۰۴	۴۲۰	۱۵۲۰	۱۰۰۳	۱۷۵۸	۳۵۱۴	۳۸۹۰	۳	
۸۱۱	۱۶۵۲	۵۹۲	۱۱۸	۱۵۷۰	۵۹	۲۳۰	۹۳۲	۱۴۲۱	۱۳۰۷	۲۵۹۴	۳۰۱۹	۴	
۴۴۳	۹۴۱	۳۲۶	۶۹	۸۷۷	۴۰	۱۵۰	۶۷۸	۴۲۸	۹۹۳	۱۸۷۲	۲۱۱۰	۵	
۴۹۹۶	۱۳۵۴۹	۸۳۳۹	۶۸۰	*۱۳۷۵۲	۱۲۹۵	۲۸۴۹	۱۰۰۲۴	*۸۲۲۹	۳۶۶۲	۱۴۹۲۳	*۱۲۷۱۴	۷	
۷۱۹۶	۱۹۲۳۷	*۱۱۳۰۷	۹۹۰	*۱۹۴۶۰	۲۰۲۹	۵۹۶۹	*۳۷۴۶۴	*۱۱۳۷۱	۴۷۰۲	*۳۱۶۹۴	*۱۴۸۱۹	۸	
۲۸۴۷	۶۶۸۵	۶۰۰۰	۲۶۵	۶۶۰	۶۲۴	۱۲۸۷	۴۷۱۵	۴۰۷۳	۲۲۸۹	۸۰۰۲	۱۰۶۴۴	۹	
۲۸۲۱	۴۷۳۷	۲۵۷۰	۳۵۱	۷۲۵۴	۳۵۲	۸۲۱	۳۳۳۳	۳۱۱۱	۱۸۷۵	۶۷۳۲	۸۱۰۹	۱۰	
۳۴۶۲	۱۰۲۱۸	۴۰۷۰	۴۲۹	۹۸۷۶	۸۱۷	۱۳۱۱	۵۵۴۰	*۵۳۶۴	۲۹۳۱	۹۴۰۶	۸۸۳۹	۱۲	

دارد در حالیکه آنالیز S با دقت و رزوشن (توانایی تفکیک حالات مختلف ایجاد شده در شبکه اعم از خطا و حالات گذرای پایدار به دلیل فرایند طی شده در دو حوزه زمان و فرکانس به هنگام اعمال تبدیل S) بالاتری فرآیند تشخیص را انجام می‌دهد. بنابراین با توجه به منعطف بودن روش پیشنهادی، این روش قابلیت پیاده‌سازی بر روی هر ریزشبکه نمونه را دارا می‌باشد.

با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مازول‌ها، با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده در جدول (۱)، مشخص می‌گردد که اگرچه مقدار برخی از پارامترها در برخی مازول‌ها از حد آستانه مربوطه بالاتر رفته است، ولی در کل مکانیزم تشخیص خطأ به درستی عمل کرده و این اتفاق را با وقوع یک خطأ تمیز داده است.

۵- نتیجه‌گیری

هر طرح حفاظتی که برای ریزشبکه‌ها ارائه می‌شود باید قادر به حفاظت موثر این شبکه‌ها در کلیه تپولوژی‌های عملکردی آن‌ها را داشته باشد. براین‌اساس مقاله حاضر یک طرح جامع را جهت تشخیص نوع خطأ، محل خطأ و فازهای درگیر در خطأ ارائه داد. مقاله حاضر با استخراج مولفه‌های سه‌فاز و همچنین توالی‌های مثبت، منفی و صفر شکل‌موجه‌های جریان و ولتاژ، فرآیند تشخیص خطأ را با دقت بسیار بالا انجام می‌دهد. مولفه‌های استخراج شده توسط آنالیزهای قدرتمند موجک و S مورد تحلیل قرار می‌گیرند. همچنین در این روش به دلیل آنکه دستور قطع سرور مرکزی صادر می‌شود، لذا در صورت عدم عملکرد صحیح مازول‌ها (به هر دلیلی) در پاک کردن خطأ، سرور مرکزی متوجه شده و بالا‌فصله دستور قطع را برای مازول مناسب بعدی صادر می‌کند. پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی تپولوژی‌های مختلف عملکردی یک ریز شبکه، نشان می‌دهد که این طرح قادر به حفاظت موثر ریزشبکه در کلیه تپولوژی‌های عملکردی این شبکه‌ها است. همچنین نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی نشان می‌دهد که با طرح دو بلوکه پیشنهادی برای تشخیص خطأ، این روش انواع خطاهای ممکن شامل خطاهای متقارن و نامتقارن و نیز خطاهای امپدانس پایین و حتی خطاهای امپدانس بالا را به راحتی می‌تواند تشخیص دهد. مقایسه آنالیز موجک و آنالیز S در روش پیشنهادی، اگرچه حکم به توانایی هر دو آنالیز در فرآیند تشخیص خطأ پیشنهادی می‌دهد، اما نشان می‌دهد که آنالیز موجک زمان کمتری را برای تشخیص خطأ نیاز

- [۲۰] State Transformer for the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, pp. 1096-1104, 2013.
- S. K. Rudion, N. Hatziaargyiou, S. Papathanassiou, K. Strunz, O. Ruhle, A. Orths, B. Rozel. Development of Benchmarks for Low and Medium Voltage Distribution Networks with High Penetration of Dispersed Generation [Online].
- [۹] A. A. Memon and K. Kauhaniemi, "A critical review of AC Microgrid protection issues and available solutions", Electric Power Systems Research, vol. 129, pp. 23-31, 2015.
- [۱۰] Z. Kai-Hui and X. Ming-Chao, "Impacts of microgrid on protection of distribution networks and protection strategy of microgrid", International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), pp. 356-359, 2011.
- [۱۱] M. A. Redfern and H. Al-Nasseri, "Protection of micro-grids dominated by distributed generation using solid state converters", 9th International Conference on Developments in Power System Protection, pp. 670-674, 2008.
- [۱۲] S. A. Hosseini, et al., "An overview of microgrid protection methods and the factors involved", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 64, pp. 174-186, 2016.
- [۱۳] P. Basak, et al., "A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 5545-5556, 2012.
- [۱۴] H. Al-Nasseri, et al., "A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [۱۵] S. A. Hosseini, et al., "presenting a new method for identifying fault location in microgrids, using harmonic impedance", Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering, vol. 39, pp. 167-182, 2015.
- [۱۶] A. M. El-Zonkoly, "Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation", Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 1482-1490, 2011.
- [۱۷] S. A. Saleh, et al., "Implementing and testing d-q WPT-based digital protection for micro-grid systems", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), pp. 1-8, 2011.
- [۱۸] S. R. Samantaray, et al., "Differential energy based microgrid protection against fault conditions", IEEE PES in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), pp. 1-7, 2012.
- [۱۹] H. Al-Nasseri and M. A. Redfern, "Harmonics content based protection scheme for Micro-grids dominated by solid state converters", 12th International Middle-East in Power System Conference, pp. 50-56, 2008.
- [۲۰] M. Petit, et al., "Directional relays without voltage sensors for distribution networks with distributed generation: Use of symmetrical components", Electric Power Systems Research, vol. 80, pp. 1222-1228, 2010.
- [۲۱] M. A. Zamani, et al., "A Protection Strategy and Microprocessor-Based Relay for Low-Voltage Microgrids", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, pp. 1873-1883, 2011.
- [۲۲] I. Daubechies, "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 36, pp. 961-1005, 1990.
- [۲۳] P. K. Ray, et al., "Disturbance detection in grid-connected distributed generation system using wavelet and S-transform", Electric Power Systems Research, vol. 81, pp. 805-819, 2011.
- [۲۴] P. Tatcho, L. Hui, J. Yu, and Q. Li, "A Novel Hierarchical Section Protection Based on the Solid