# تشخیص خطا با استفاده از توالی مثبت، منفی و صفر جریان و ولتاژ نقاط مختلف ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توپولوژی ریزشبکه

رضا اسلامی[1]،سیدحسین حسام‌الدین صادقی[2]،حسین عسکریان ابیانه[2]

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 خطا در ریزشبکه‌ها با در نظرگیری عدم قطعیت در توپولوژی آن‌ها پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی با استفاده از تبدیل‌های موجک و S تحقق می‌یابد. با استفاده از این تبدیل‌ها ویژگی‌های مولفه‌های سه‌فاز و همچنین توالی‌های مثبت، منفی و صفر شکل‌موج‌های جریان و ولتاژ در نقاط مختلف شبکه که در تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع خطا و فازهای درگیر موثر هستند، استخراج می‌شوند. به دلیل آنکه روند تشخیص خطا در روش پیشنهادی مستقل از توپولوژی ریزشبکه می‌باشد، لذا ویژگی بارز آن، قابلیت تشخیص در انواع مختلف حالات دینامیکی پیش آمده در ریزشبکه می‌باشد. برای بررسی میزان کارایی روش پیشنهادی، این روش بر روی یک ریزشبکه نمونه اعمال گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش تشخیص خطای پیشنهادی به خوبی قابلیت تشخیص و تمییز خطاهای ماندگار رخ داده از اغتشاشات گذرای ایجاد شده در ریزشبکه را داراست. همچنین مقایسه تبدیل S و موجک در فرایند تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها نشان می‌دهد 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 خطا- توالی‌های 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 حسام‌الدین صادقی

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

[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

## ۱- مقدمه

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

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 [۳-۵].

با وجود تمام مزایایی که برای ریزشبکه‌ها برشمرده 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 می‌کنند [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. براین‌اساس مطالعات [۹-۱۱] به معرفی چالش‌های حفاظتی ریزشبکه‌ها پرداخته‌اند. روش‌های مختلف پیشنهاد شده در مطالعات گذشته برای حل این چالش‌ها در مطالعات [۸, ۹, ۱۲, ۱۳] دسته‌بندی شده‌اند. این روش‌ها شامل آنالیز ولتاژ، انالیز هارمونیک، آنالیز موجک و آنالیز S می‌شوند. براین‌اساس مطالعه [۱۴] مانیتورینگ ولتاژ خروجی منابع تولید پراکنده و انتقال آن‌ها از محور abc به dq و تعیین مقدار آستانه در محور dq را برای تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها 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 بطوریکه کارایی این روش‌ها در کلیه ساختارهای عملکردی ریزشبکه با چالش مواجه خواهد شد. در مطالعه [۱۹] خطا با مانیتورینگ THD ولتاژ 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 خطاها (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[1] و S[2] و توالی‌های مثبت، منفی و صفر شکل‌موج‌های جریان و ولتاژ 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 ولتاژ 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 با وضوح 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 خطاها 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 ماژول‌های 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، تقریبا بر هم منطبق هستند. این مسئله تشخیص محل دقیق خطا را با

[1]Wavelet transform
[2]S transform



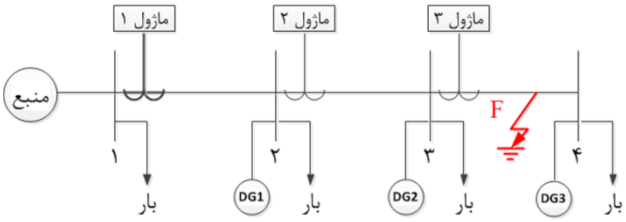
[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

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 ریزشبکه‌ها را دچار چالش می‌کند، عدم توانایی این روش‌ها در تشخیص انواع خطاهای ممکن در شبکه است. همانطور که قبلا هم اشاره شد، در ریزشبکه‌ها جریان اتصال‌کوتاه 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 ریزشبکه‌ها، طرح‌های حفاظتی این شبکه‌ها باید بگونه‌ای توسعه یابند که قادر به حفاظت موثر شبکه در کلیه ساختارهای عملکردی آن باشند. همچنین حفاظت ریزشبکه‌ها باید با استخراج مشخصات مختلف سیگنال‌های اغتشاش قادر به تشخیص انواع خطاهای ممکن (نه فقط یک نوع خطای خاص) به همراه محل دقیق خطا باشد.




**شکل (۱): ریزشبکه نمونه**

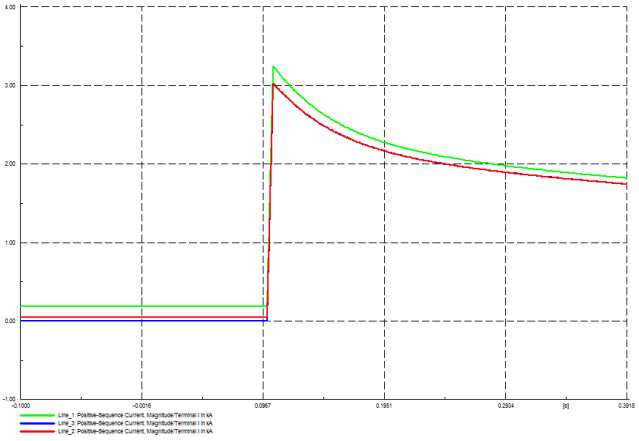
## ۳- روش جدید

شکل (۳) بستر مورد نیاز برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این مقاله را بمنظور تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۳) مشخص است، در ابتدای خطوط، ماژول‌های ( $m=1:M$ ) 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 غیرمتمرکز 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.

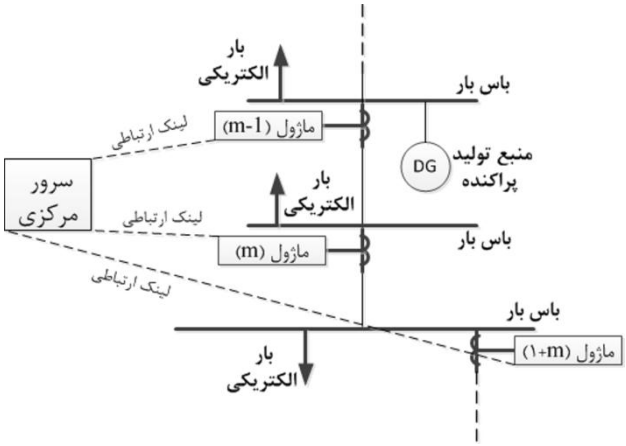
ماژول‌ها بطور مداوم از سیگنال‌های ولتاژ و جریان نمونه‌برداری نموده و از طریق الگوهای پیشنهاد شده در این مقاله به تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع و فازهای درگیر در آن می‌پردازند. لازم به ذکر است به منظور افزایش دقت در تشخیص خطا، استفاده از انحراف معیار و انرژی سیگنال حاصل شده از آنالیز تواما توالی‌های صفر 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.

### ۳-۱- آنالیزهای پیشنهاد شده برای تشخیص خطا

ساختار ریزشبکه‌ها، 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 ریزشبکه را دچار چالش‌های زیادی می‌کند. از این رو، این مقاله استفاده از تبدیلات موجک و S که ابزارهای بسیار 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**



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

### ۳-۱-۱- 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.

بسیاری از اطلاعات خطا در مولفه‌های حالت گذرا وجود دارد. بنابراین می‌توان از آن‌ها برای تعیین خطا یا حالت غیر نرمال در شبکه یا سیستم قدرت، استفاده نمود. همچنین از این اطلاعات می‌توان برای آنالیز علل خطا 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. معمولا 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 گذر و بالا گذر اجرا می‌شود. تقریب‌ها اجزاء مقیاس بالا و فرکانس پایینی هستند که با فیلترینگ پایین‌گذر سیگنال حاصل می‌شوند. از سوی دیگر جزئیات اجزاء مقیاس پایین و فرکانس بالایی هستند که با فیلتر بالاگذر سیگنال، حاصل می‌شوند. لازم به ذکر است که پهنای باند این دو فیلتر با هم برابر است [۱۶].

یک سیگنال گسسته $u_q^m(n)$ برای انتقال سریع در لحظه $n$ و مقیاس $j$ 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 سیگنال‌ها ( $q = Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$ ) و $m$ معرف شماره ماژول‌ها ( $m = 1:M$ ) می‌باشند. بنابراین اجزای به دست آمده از تبدیل موجک سیگنال اصلی $u_q^m(n)$ در مقیاس $j$ در نمونه $n$ ام سیگنال $q$ در ماژول $m$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} WT_{u,q}^m(n) &= D_{q,1}^m(n) + A_{q,1}^m(n) = \\ & D_{u,q,1}^m(n) + D_{u,q,2}^m(n) + A_{u,q,2}^m(n) = \\ & \ldots = \sum_{j=1}^{J} D_{u,q,j}^m(n) + A_{u,q,J}^m(n) \end{aligned} \quad (۱)$$

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 ماژول $m$ از حاصل جمع $D_{u,q,j}^m(n)$ ها در مقیاس $j$ به صورت تقریبی به صورت زیر به دست آورد:

$$WT_{u,q}^m \approx \sum_{n=1}^{N} \sum_{j=1}^{J} D_{u,q,j}^m(n) \quad (۲)$$

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:

$$E_{u,q}^m = \sum_{n=1}^{N} \left(-\sum_{j=1}^{J} \left|D_{u,q,j}^m(n)\right|^2 \log\left|D_{u,q,j}^m(n)\right|^2\right) \quad (۳)$$

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:

$$STD_{u,q}^m = \sqrt[2]{\frac{\sum_{n=1}^{N}\left(\left(-\sum_{j=1}^{J}\left|D_{u,q,j}^m(n)\right|^2 \log\left|D_{u,q,j}^m(n)\right|^2\right) - \left(\frac{\sum_{n=1}^{n}\left(-\sum_{j=1}^{J}\left|D_{u,q,j}^m(n)\right|^2 \log\left|D_{u,q,j}^m(n)\right|^2\right)}{N}\right)\right)^2}{N}} \quad (۴)$$

مقاله حاضر، با استفاده از $E_{u,q}^m$ و $STD_{u,q}^m$، ( $m = 1:M$ ، $q = Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$ و $u = i, v$ ) به تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع خطا و فازهای درگیر در آن خواهد پرداخت.

با توجه به آنکه به هنگام وقوع خطا در شبکه، اجزای 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 خطا در ریزشبکه مورد مطالعه خواهد بود.

### ۳-۱-۲- تبدیل S

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

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

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t).\omega(\tau - t, f).\exp(-j2\pi f \tau) d\tau \quad (۵)$$

که در آن $\omega$ پنجره گوسی متغیر با زمان است که انحراف معیار تابع گوسی برابر $1/f$ می‌باشد که در آن روابط زیر برقرار است:

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{f}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\tau - t)^2 f^2}{2}\right) \quad (۶)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(\tau - t, f) d\tau = 1 \quad (۷)$$

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



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

داده می‌شود 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 $T$ باشد، مورد مطالعه قرار دهیم، تبدیل S گسسته مورد استفاده به صورت زیر خواهد بود:

$$S_{u,q}^{m}[lT,\frac{n}{NT}]=\sum_{k=1}^{N}u_q^m(kT).\omega((k-l)T,\frac{n}{NT}).\exp(\frac{-j2\pi kn}{N}) \qquad (۸)$$

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

خروجی‌های تبدیل S یک ماتریس $N\times N$ خواهد بود که ماتریس S نامگذاری می‌شود. سطرهای ماتریس S توزیع فرکانسی سیگنال مورد بررسی را نشان داده و ستون‌های این ماتریس تغییرات فرکانس خاصی را به ازای تغییرات در زمان نشان خواهد داد.

ماتریس S، $\mathbf{S}_{u,q}^{m}$ حاصل از اعمال تبدیل S به سیگنال $u_q^m$ به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{S}_{u,q}^{m}[lT,\frac{n}{NT}]=\begin{pmatrix} S_{u,q}^{m}[T,\frac{1}{NT}] & S_{u,q}^{m}[T,\frac{2}{NT}] & S_{u,q}^{m}[T,\frac{3}{NT}] & \cdots & S_{u,q}^{m}[T,\frac{1}{T}] \\ S_{u,q}^{m}[2T,\frac{1}{NT}] & S_{u,q}^{m}[2T,\frac{2}{NT}] & S_{u,q}^{m}[2T,\frac{3}{NT}] & \cdots & S_{u,q}^{m}[2T,\frac{1}{T}] \\ S_{u,q}^{m}[3T,\frac{1}{NT}] & S_{u,q}^{m}[3T,\frac{2}{NT}] & S_{u,q}^{m}[3T,\frac{3}{NT}] & \cdots & S_{u,q}^{m}[3T,\frac{1}{T}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{u,q}^{m}[NT,\frac{1}{NT}] & S_{u,q}^{m}[NT,\frac{2}{NT}] & S_{u,q}^{m}[NT,\frac{3}{NT}] & \cdots & S_{u,q}^{m}[NT,\frac{1}{T}] \end{pmatrix} \qquad (۹)$$

در ادامه ماتریس انرژی، $\mathbf{E}_{u,q}^{m}$، که درایه‌های آن مجذور دامنه درایه‌های ماتریس S، $\mathbf{S}_{u,q}^{m}$ می‌باشد، تشکیل داده می‌شود.

انرژی سیگنال $u_q^m$، $E_{u,q}^m$، به صورت رابطه زیر از حاصل‌جمع درایه‌های ماتریس انرژی به دست می‌آید:

$$E_{u,q}^{m}=\sum_{e=1}^{N}\sum_{g=1}^{N}|S_{u,q}^{m}[eT,\frac{g}{NT}]|^2 \qquad (۱۰)$$

و انحراف معیار ماتریس انرژی، $STD_{u,q}^m$، برای محاسبه میزان پراکندگی درایه‌های ماتریس انرژی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$STD_{u,q}^{m}=\sqrt[2]{\frac{\sum_{e=1}^{N}\sum_{g=1}^{N}(|S_{u,q}^{m}[eT,\frac{g}{NT}]|^2-(\frac{\sum_{e=1}^{N}\sum_{g=1}^{N}|S_{u,q}^{m}[eT,\frac{g}{NT}]|^2}{N^2}))^2}{N^2}} \qquad (۱۱)$$

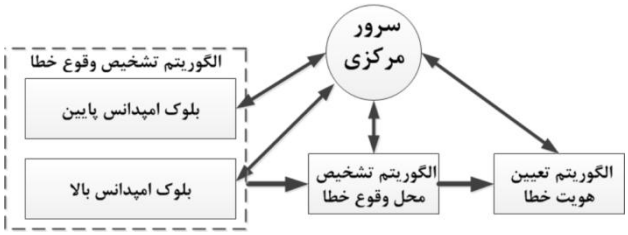
مقاله حاضر، با استفاده از $E_{u,q}^m$ و $STD_{u,q}^m$، ( $m=1:M$ ، $q=Seq_0,Seq_1,Seq_2,a,b,c$ و $u=i,v$ ) به تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع خطا و فازهای درگیر در آن خواهد پرداخت.

با توجه به آنکه به هنگام وقوع خطا در شبکه، درایه‌های ماتریس انرژی در فرکانس‌ها و زمان‌های مختلف 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 خطا در ریزشبکه مورد مطالعه خواهد بود.

لازم به ذکر است که به منظور مقایسه بهتر، مقادیر مختلف اندازه‌گیری شده از انرژی و انحراف معیار سیگنال‌های ولتاژ و جریان ثبت شده توسط ماژول‌ها نسبت به بیشترین مقدار ثبت شده نرمالیزه گردیده‌اند و از این به بعد برای نشان دادن مقادیر نرمالیزه شده از علامت ( $^{-}$ ) برای پارامترهای مختلف استفاده شده است.

## ۳-۲- روش پیشنهادی برای تشخیص خطا

هدف مقاله حاضر، ارائه روشی قدرتمند برای تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع خطا و فازهای درگیر در انواع خطای امپدانس پایین و امپدانس بالا می‌باشد. طرح کلی روش پیشنهادی در شکل (۴) آورده شده است. در روش پیشنهادی، اطلاعات مربوط به سیگنال‌های جریان و ولتاژ بین ماژول‌های مختلف و سرور مرکزی توسط سه الگوریتم تشخیص وقوع خطا، تشخیص محل وقوع خطا و تعیین هویت خطا به اشتراک گذاشته می‌شود. شکل (۴) نحوه تبادل اطلاعات بین الگوریتم‌های مختلف و سرور مرکزی را نشان می‌دهد.



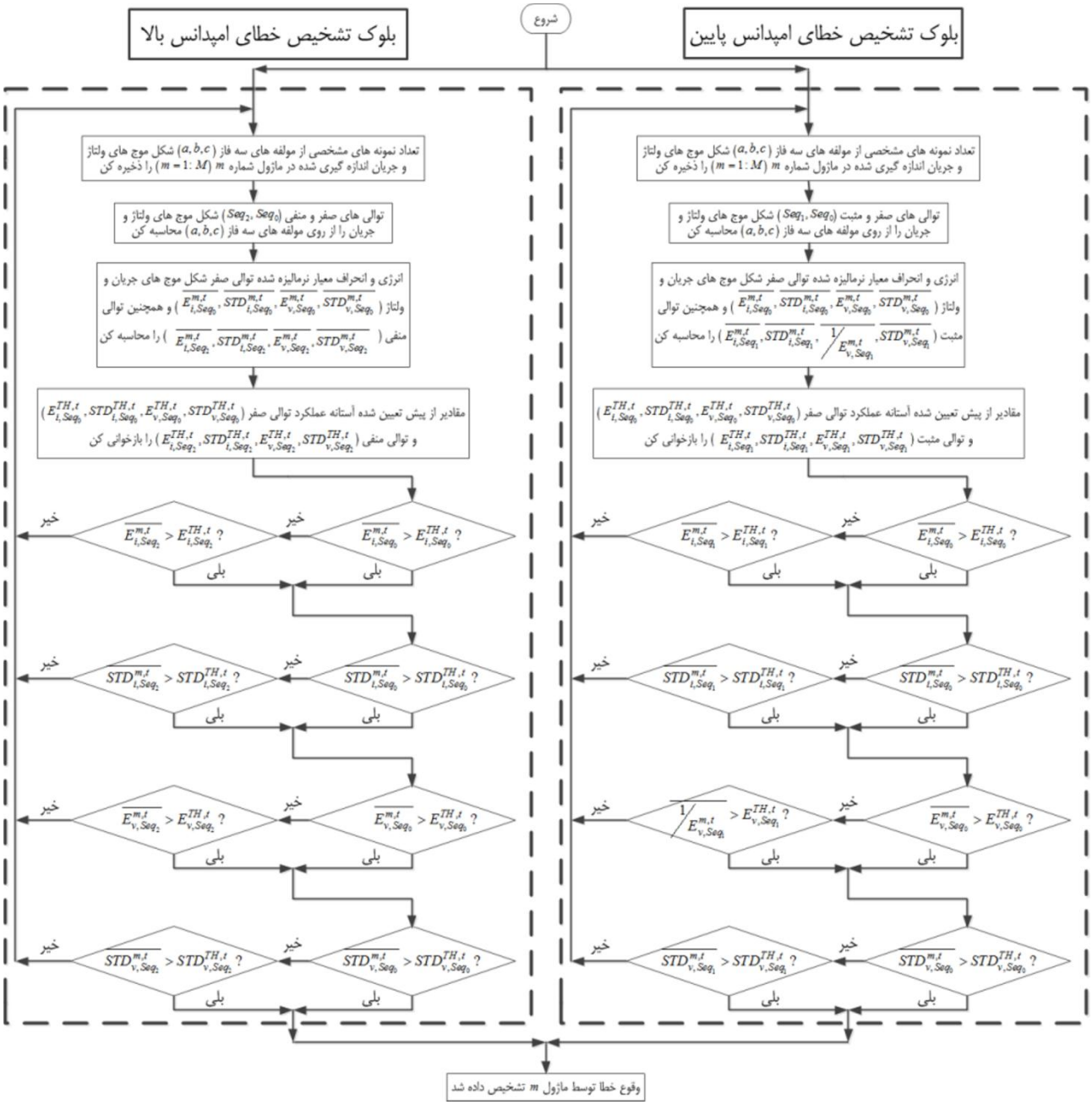

**شکل (۴): بلوک دیاگرام روش تشخیص خطای پیشنهادی**

### ۳-۲-۱- تشخیص وقوع خطا

برای اطمینان از تشخیص انواع خطاهای رخ داده بر حسب امپدانس خطا، الگوریتم تشخیص خطا 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 راه‌حل تشخیص خطاهای امپدانس بالا در ریزشبکه‌ها پیشنهاد می‌نماید.

[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

در الگوریتم تشخیص وقوع خطا که در شکل (۵) آورده شده است، وقوع خطا در ریزشبکه با مقایسه مقادیر نرمالیزه شده انرژی و انحراف معیار به دست آمده از آنالیز توالی‌های صفر و مثبت و منفی سیگنال‌های ولتاژ و جریان قرائت شده توسط ماژول‌های مختلف با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده، تشخیص داده می‌شود (مقادیر مربوط به توالی صفر و مثبت در بلوک تشخیص خطای امپدانس پایین و مقادیر مربوط 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 شده انرژی و انحراف معیار سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده مربوط به توالی صفر ( $\overline{E^{m,t}_{i,Seq_0}}, \overline{STD^{m,t}_{i,Seq_0}}, \overline{E^{m,t}_{v,Seq_0}}, \overline{STD^{m,t}_{v,Seq_0}}$ ) که در آن $t = WT, ST$ که $WT$ و $ST$ به ترتیب بیانگر تبدیلات موجک و S هستند) در ماژولی از مقادیر آستانه از پیش تعیین شده بیشتر شد، ماژول 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.




**شکل (۵): بلوک دیاگرام تشخیص وقوع خطا**

شایان ذکر است که برای تشخیص وقوع خطای دوفاز و سه‌فاز، به دلیل آنکه مقادیر مربوط به پارامترهای توالی صفر مقادیر کوچکتری می‌باشند، لذا مقادیر مربوط به پارامترهای توالی مثبت و منفی (پارامترهای مربوط به توالی مثبت در بلوک امپدانس پایین و پارامترهای مربوط به توالی منفی در بلوک امپدانس بالا) نیز محاسبه شده و با مقدار آستانه مقایسه می‌شود تا اینکه این نوع خطاها هم از



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

دید الگوریتم تشخیص خطای پیشنهادی پنهان نمانده و پر واضح است که با این کار قدرت تشخیصی روش پیشنهادی بالا می‌رود. بنابراین هنگامی‌که هیچ‌یک 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 کرده 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 برابر حالات گذرای پایدار رخ داده در شبکه عکس‌العملی از خود نشان ندهد.

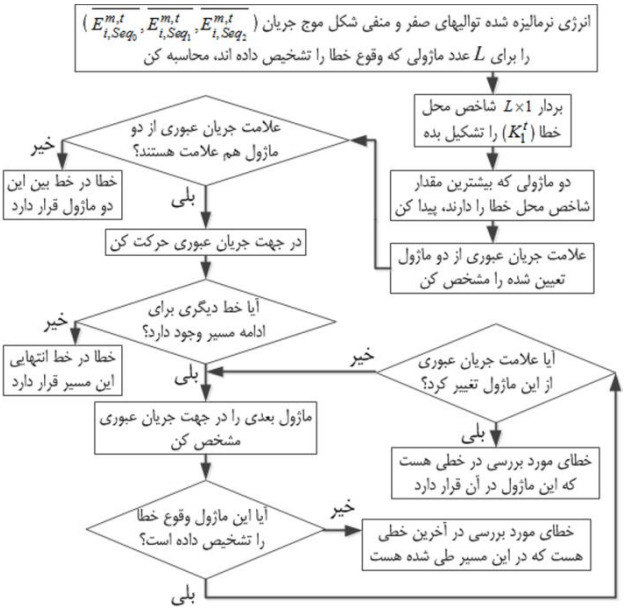
### ۳-۲-۲- تشخیص محل خطا

همانطور که قبلا نیز بیان شد، از آنجاییکه طول خطوط در ریزشبکه‌ها کوتاه می‌باشند، لذا ممکن است که تعداد ماژول‌های بیشتری (به طور مثال $L$ عدد ماژول) وقوع خطای امپدانس پایین (یا امپدانس بالا) رخ داده را تشخیص دهند. با توجه به اهمیت جلوگیری از بی‌برقی‌های بی-مورد 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 نرمالیزه شده انرژی توالی‌های صفر و مثبت و منفی شکل‌موج جریان در $L$ عدد ماژولی که وقوع خطا را تشخیص داده‌اند، بردار شاخص محل خطا را به صورت زیر تشکیل می‌دهند:

$$K_1^t = \begin{bmatrix} 2\times\overline{E_{i,Seq_0}^{1,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{1,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{1,t}} \\ 2\times\overline{E_{i,Seq_0}^{2,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{2,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{2,t}} \\ 2\times\overline{E_{i,Seq_0}^{3,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{3,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{3,t}} \\ \vdots \\ 2\times\overline{E_{i,Seq_0}^{L,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{L,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{L,t}} \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

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

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




**شکل (۶): بلوک دیاگرام تشخیص محل وقوع خطا**

لازم به ذکر است که در الگوریتم تشخیص محل خطا منظور از علامت جریان عبوری از ماژول اینگونه تعریف می‌شود که اگر جریان عبوری از ماژولی وارد خط تحت پوشش آن ماژول 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 عکس‌العمل برای پاک کردن خطا بطوریکه کمترین بار خاموش گردند، اتخاذ گردد. بدین منظور مطابق شکل (۷)، از مقادیر نرمالیزه شده انرژی توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل‌موج-های ولتاژ و جریان در ماژولی که بیشترین مقدار شاخص محل خطا را دارد ( $m = m'$ )، استفاده می‌شود. براین‌اساس شاخص‌های $K_2^{m',t}$ و $K_3^{m',t}$ مطابق روابط زیر محاسبه می‌گردند.

$$K_2^{m',t} = \overline{E_{i,Seq_0}^{m',t}} + \overline{E_{v,Seq_0}^{m',t}} \quad (۱۳)$$

$$K_3^{m',t} = \overline{E_{i,Seq_1}^{m',t}} + \overline{\left( 1 \big/ E_{v,Seq_1}^{m',t} \right)} + \overline{E_{i,Seq_2}^{m',t}} + \overline{E_{v,Seq_2}^{m',t}} \quad (۱۴)$$

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

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



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

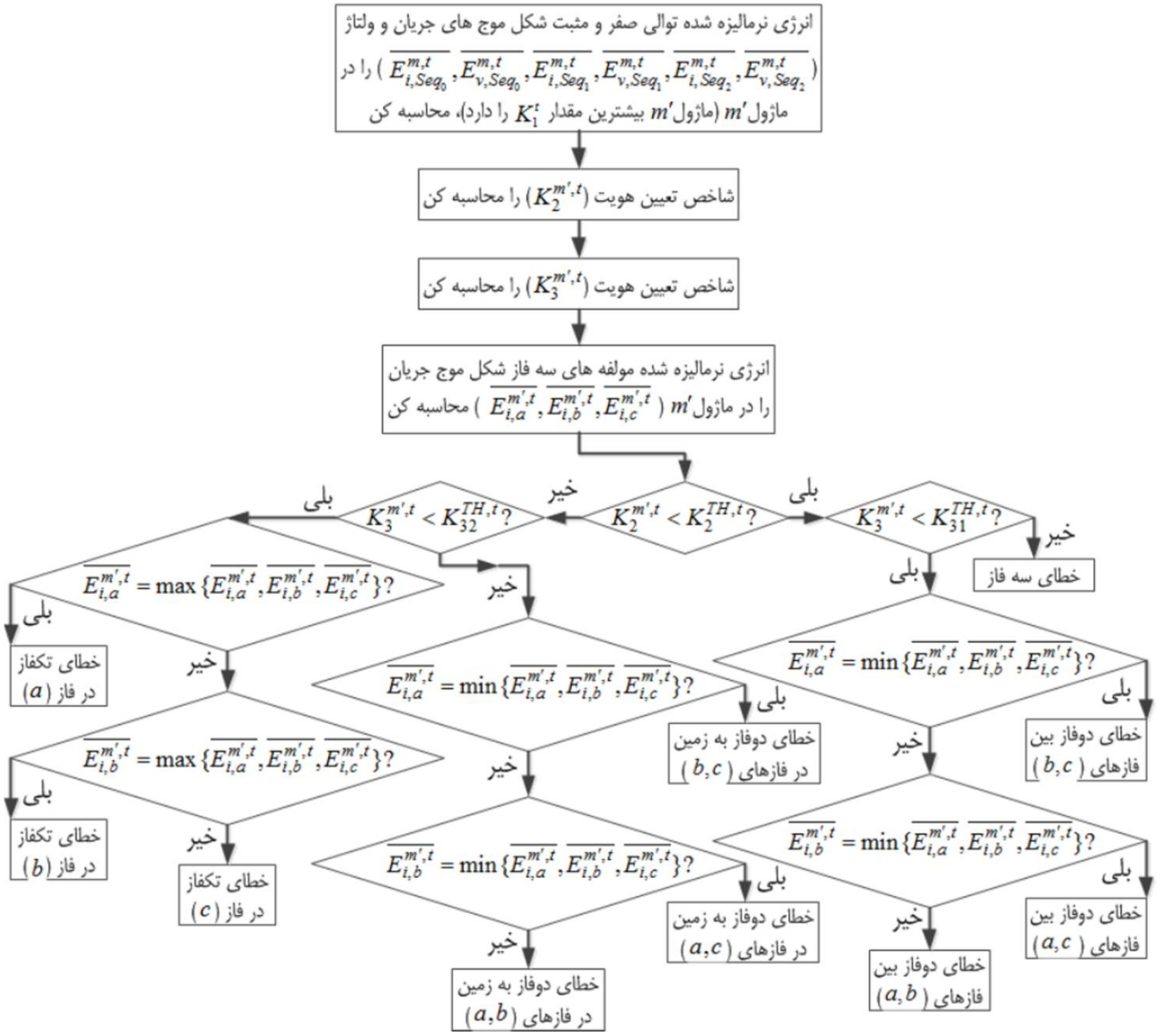
خطاهای ممکن و آنالیز تغییرات مقادیر نرمالیزه شده انرژی سیگنال-های جریان و ولتاژ در مولفه‌ها و توالی‌های مختلف به هنگام وقوع خطا به دست می‌آیند.

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

## ۴- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

به منظور ارزیابی میزان کارایی روش پیشنهادی، روش ارائه شده با استفاده از هر دو تبدیل موجک و S بر روی ریزشبکه شکل (۸) که جزئیات آن در [۲۵] ارائه شده است، پیاده‌سازی می‌شود. همانگونه که در توپولوژی ریزشبکه شکل (۸) مشخص هست، این ریزشبکه در حالتی‌که هر دو کلید $S1$ و $S2$ باز باشند، یک ریزشبکه شعاعی بوده و با بسته شدن هرکدام از این کلیدها، ریزشبکه تبدیل به ریزشبکه حلقوی خواهد شد. لازم به ذکر است برای استفاده از روش جدید پیشنهادی در تشخیص انواع خطا، در این مقاله از سیگنال‌های ولتاژ و جریان با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز، ۱۰۰۰ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، برای دست آوردن نتایج شبیه‌سازی موارد مورد مطالعه در این مقاله از نرم‌افزار DIgSILENT Power Factory 14.1.3 استفاده شده است.

بر اساس توپولوژی‌های مختلف شبکه، انواع خطاهای احتمالی در نقاط مختلف شبکه بررسی شده و مقادیر $K_2^{TH,t}$ ، $K_{31}^{TH,t}$ و $K_{32}^{TH,t}$ برای تبدیل موجک به ترتیب برابر $K_2^{TH,WT}=0.436$ ، $K_{31}^{TH,WT}=0.384$ و $K_{32}^{TH,WT}=1.148$ و برای تبدیل S به ترتیب برابر $K_2^{TH,ST}=0.755$ ، $K_{31}^{TH,ST}=0.928$ و $K_{32}^{TH,ST}=2.212$ انتخاب شده‌اند.




**شکل (۷): بلوک دیاگرام تعیین هویت خطای رخ داده**



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

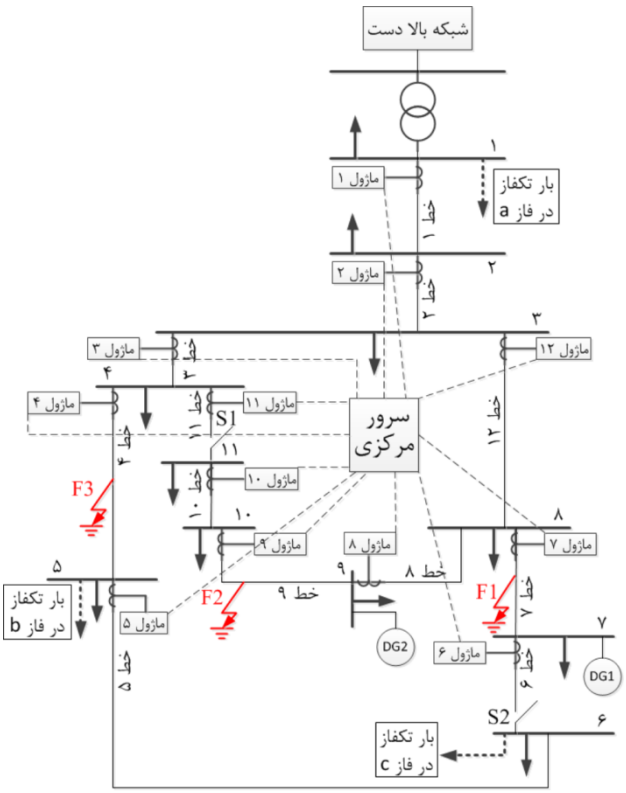
[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

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

به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی در تشخیص خطاهای 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 خطاهای رخ داده را تشخیص داده و در مقابل حالات گذرای پایداری 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 موجک را برای ماژول‌های مختلف بعد از وقوع خطا در نقطه $F1$ نشان می‌دهد.




**شکل (۸): ریزشبکه مورد مطالعه**

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

بمنظور تعیین محل دقیق خطا، مانند فلوچارت ارائه شده در شکل (۶) از انرژی توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل‌موج جریان برای محاسبه اندیس $K_1^{WT}$ استفاده می‌شود. مقادیر $K_1^{WT}$ به همراه انرژی توالی-های صفر، مثبت و منفی شکل‌موج جریان برای ماژول‌هایی که خطا را تشخیص داده‌اند، در جدول (۳) آورده شده است.

مطابق نتایج جدول (۳)، مشاهده می‌شود که ماژول‌های ۷ و ۸ بیشترین مقدار اندیس $K_1^{WT}$ را دارا می‌باشند. همچنین با توجه به علامت جریان در این دو ماژول، محل خطا بر اساس فلوچارت شکل (۶) به درستی بر روی خط ۷ تشخیص داده می‌شود.

برای تعیین نوع خطای رخ داده، الگوریتم تعیین هویت خطا در ماژول ۷ (ماژولی که بیشترین مقدار اندیس تشخیص وقوع خطا را دارد) با استفاده از مقادیر نرمالیزه شده انرژی توالی‌صفر، مثبت و منفی شکل-موج جریان $\overline{E_{i,Seq_0}^{7,WT}} = 0.110459$ ، $\overline{E_{i,Seq_1}^{7,WT}} = 0.260825$ ، $\overline{E_{i,Seq_2}^{7,WT}} = 0.068834$ ، $\overline{E_{v,Seq_0}^{7,WT}} = 0.093307$ ، $\overline{1/E_{v,Seq_1}^{7,WT}} = 0.356456$ و $\overline{E_{v,Seq_2}^{7,WT}} = 0.074323$ ، مقادیر $K_2^{7,WT} = 0.203767$ و $K_{31}^{7,WT} = 0.610073$ به دست می‌آید.

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

| تبدیل موجک | | | | تبدیل S | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| نوع پارامتر | مقدار | نوع پارامتر | مقدار | نوع پارامتر | مقدار | نوع پارامتر | مقدار |



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\overline{E_{i,Seq_0}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۲۴۱۴ | $\overline{STD_{i,Seq_0}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۰۹۴۲ | $\overline{E_{i,Seq_0}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۱۰۳۷۷ | $\overline{STD_{i,Seq_0}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۰۲۵۵۹ |
| $\overline{E_{i,Seq_1}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۸۶۱۴ | $\overline{STD_{i,Seq_1}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۱۸۷۱ | $\overline{E_{i,Seq_1}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۴۸۹۳۶ | $\overline{STD_{i,Seq_1}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۱۰۱۶۷ |
| $\overline{E_{i,Seq_2}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۳۵۷۱ | $\overline{STD_{i,Seq_2}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۱۳ | $\overline{E_{i,Seq_2}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۱۷۸۹۹ | $\overline{STD_{i,Seq_2}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۰۳۱۰۴ |
| $\overline{E_{v,Seq_0}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۲۱۰۵ | $\overline{STD_{v,Seq_0}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۶۴۹۱ | $\overline{E_{v,Seq_0}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۰۴۴۲۴ | $\overline{STD_{v,Seq_0}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۱۱۴۵ |
| $\overline{1/E_{v,Seq_1}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۶۹۷۵ | $\overline{STD_{v,Seq_1}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۱۵۶۳۵ | $\overline{1/E_{v,Seq_1}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۲۲۷۷۹ | $\overline{STD_{v,Seq_1}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۲۵۳۵۷ |
| $\overline{E_{v,Seq_2}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۳۲۰۱ | $\overline{STD_{v,Seq_2}^{TH,WT}}$ | ۰/۰۰۴۷۸۱ | $\overline{E_{v,Seq_2}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۰۸۲۴۱ | $\overline{STD_{v,Seq_2}^{TH,ST}}$ | ۰/۰۱۷۳۲ |

از مقایسه مقادیر به دست آمده برای $K_2^{7,WT}=0.203767$ و $K_{31}^{7,WT}=0.610073$ با مقادیر $K_2^{TH,WT}=0.436$ و $K_{31}^{TH,WT}=0.384$ طبق رابطه (۱۸)، نتیجه می‌شود که خطای رخ داده از نوع سه‌فاز می‌باشد. لازم به ذکر است که زمان لازم برای تشخیص خطا در این روش حدود $300ms$ 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 $300ms$ تشخیص دهد.

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

| شماره ماژول | سیگنال ولتاژ | | | | سیگنال جریان | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | |
| | توالی صفر | توالی منفی | توالی صفر | توالی منفی | توالی صفر | توالی منفی | توالی صفر | توالی منفی |
| ۱ | ۰/۰۰۰۵۸۵ | ۰/۰۰۲۹۴۶ | ۰/۰۰۱۹۱ | ۰/۰۰۱۰۵۵ | ۰/۰۰۰۶۸۸ | ۰/۰۰۰۳۴۱ | ۰/۰۰۱۴۶۹ | ۰/۰۰۲۴۵۹ |
| ۲ | ۰/۰۰۰۶۰۷ | ۰/۰۰۳۷۸۱ | ۰/۰۰۲۰۶۵ | ۰/۰۰۱۶۲۱ | ۰/۰۰۱۱۸ | ۰/۰۰۱۰۴۹ | ۰/۰۰۸۹۶۶ | ۰/۰۰۲۸۴۸ |
| ۳ | ۰/۰۰۰۷۶۸ | ۰/۰۰۷۱۹۲ | ۰/۰۱۸۵ | ۰/۰۰۳۰۱۹ | ۰/۰۰۰۰۴۷ | ۰/۰۰۰۲۲۶ | ۰/۰۰۰۵۸۷ | ۰/۰۰۰۳۲۴ |
| ۴ | ۰/۰۰۰۷۲۸ | ۰/۰۰۵۸۸۹ | ۰/۰۰۸۹۶۸ | ۰/۰۰۲۶۶۱ | ۰/۰۰۰۰۴۱ | ۰/۰۰۰۲۰۹ | ۰/۰۰۰۵۴ | ۰/۰۰۰۱۸۶ |
| ۵ | ۰/۰۰۰۷۰۱ | ۰/۰۰۴۳۰۷ | ۰/۰۰۵۶۵۸ | ۰/۰۰۱۹۵ | ۰/۰۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۱۶۸ | ۰/۰۰۰۴۷۷ | ۰/۰۰۰۱۴۸ |
| ۷ | ۰/۰۰۱۰۴۹ | ۰/۰۰۹۵۹۲ | ۰/۰۹۳۳۰۷ | ۰/۰۷۴۳۲۳ | ۰/۰۰۱۵۷۷ | ۰/۰۰۶۶۵۷ | ۰/۱۱۰۴۵۹ | ۰/۰۶۸۸۳۴ |
| ۸ | ۰/۰۰۰۹۲۴ | ۰/۰۰۹۱۶۵ | ۰/۰۷۵۰۸۶ | ۰/۰۵۶۸۷۳ | ۰/۰۰۱۴۶۴ | ۰/۰۰۲۹۸۸ | ۰/۰۴۲۱۰۴ | ۰/۰۵۱۷۲ |
| ۹ | ۰/۰۰۰۸۹۶ | ۰/۰۰۸۹۶۹ | ۰/۰۵۵۸۵ | ۰/۰۴۰۱۴۹ | ۰/۰۰۰۰۹۲ | ۰/۰۰۰۲۹۶ | ۰/۰۰۰۶۴۴ | ۰/۰۰۰۵۲۷ |
| ۱۰ | ۰/۰۰۰۸۵۸ | ۰/۰۰۸۴۵۴ | ۰/۰۴۳۴۹۴ | ۰/۰۱۹۸۲۵ | ۰/۰۰۰۰۸۱ | ۰/۰۰۰۲۳۲ | ۰/۰۰۰۶۰۷ | ۰/۰۰۰۴۶۳ |
| ۱۲ | ۰/۰۰۰۸۰۶ | ۰/۰۰۷۸۴۳ | ۰/۰۳۰۷۸۹ | ۰/۰۰۷۷۲۶ | ۰/۰۰۱۳۱۴ | ۰/۰۰۱۴۶۹ | ۰/۰۱۳۱۴۳ | ۰/۰۳۲۹۰۷ |

**جدول (۳): مقادیر پارامترهای محاسبه شده توسط تبدیل موجک در ماژول‌هایی که وقوع خطای $F1$ را تشخیص داده‌اند**

| شماره ماژول | انرژی توالی صفر شکل‌موج جریان | انرژی توالی مثبت شکل‌موج جریان | انرژی توالی منفی شکل‌موج جریان | مقدار اندیس $K_1^{WT}$ | علامت جریان عبوری از ماژول |
|---|---|---|---|---|---|
| ۷ | ۰/۱۱۰۴۵۹ | ۰/۲۶۰۸۲۵ | ۰/۰۶۸۸۳۴ | ۰/۵۵۰۵۷۸ | مثبت |
| ۸ | ۰/۰۴۲۱۰۴ | ۰/۱۸۷۹۴۶ | ۰/۰۵۱۷۲ | ۰/۳۲۳۸۷۴ | مثبت |
| ۱۲ | ۰/۰۱۳۱۴۳ | ۰/۰۷۸۳۸۴ | ۰/۰۳۲۹۰۷ | ۰/۱۳۷۵۷۶ | مثبت |

### ۴-۱-۲- 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 ماژول‌های مختلف بعد از وقوع خطا در نقطه $F1$ نشان می‌دهد.

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

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



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

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

| شماره ماژول | سیگنال ولتاژ | | | | سیگنال جریان | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | |
| | توالی صفر | توالی منفی | توالی صفر | توالی منفی | توالی صفر | توالی منفی | توالی صفر | توالی منفی |
| ۱ | ۰/۰۰۶۶۱۸ | ۰/۰۱۱۷۴۲ | ۰/۰۰۰۷۱۵ | ۰/۰۰۱۳۹۸ | ۰/۰۰۱۳۷۲ | ۰/۰۰۰۹۰۵ | ۰/۰۰۶۶۰۲ | ۰/۰۱۰۲۸۳ |
| ۲ | ۰/۰۰۸۱۳۴ | ۰/۰۱۴۴۳۲ | ۰/۰۰۱۸۳۷ | ۰/۰۰۲۵۹۸ | ۰/۰۰۴۷۷۸ | ۰/۰۰۱۰۴۹ | ۰/۰۴۰۳۴۷ | ۰/۱۷۹۴۱ |
| ۳ | ۰/۰۲۱۴۴ | ۰/۰۴۱۱۱۱ | ۰/۰۱۶۰۷۱ | ۰/۰۲۷۳۰۱ | ۰/۰۰۰۰۸۵ | ۰/۰۰۰۰۳۲ | ۰/۰۰۰۲۴۷ | ۰/۰۰۰۵۱۵ |
| ۴ | ۰/۰۱۶۸۸۵ | ۰/۰۳۲۳۷۷ | ۰/۰۰۸۵۸۸ | ۰/۰۱۹۳۷۱ | ۰/۰۰۰۰۳۶ | ۰/۰۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۲۱۵ | ۰/۰۰۰۱۴۲ |
| ۵ | ۰/۰۰۸۷۶۶ | ۰/۰۲۸۱۵۱ | ۰/۰۰۲۶۹۴ | ۰/۰۱۸۷۳۵ | ۰/۰۰۰۰۳۳ | ۰/۰۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۱۰۴ | ۰/۰۰۰۱۱۱ |
| ۷ | ۰/۰۶۲۸۹۱ | ۰/۱۲۰۵۹۲ | ۰/۲۳۰۹۰۴ | ۰/۳۷۰۴۴۵ | ۰/۰۰۸۸۸ | ۰/۰۰۹۲۴۵ | ۰/۲۲۲۰۰۳ | ۰/۳۳۴۰۳ |
| ۸ | ۰/۰۵۱۳۳۴ | ۰/۰۹۸۴۳۲ | ۰/۲۱۸۰۵۵ | ۰/۲۶۸۵۰۵ | ۰/۰۰۷۶۰۸ | ۰/۰۰۶۵۰۷ | ۰/۲۰۱۹۷۳ | ۰/۲۶۹۱۶۹ |
| ۹ | ۰/۰۴۰۵۲۱ | ۰/۰۷۷۶۹۸ | ۰/۱۳۹۴۰۲ | ۰/۱۳۹۴۹۹ | ۰/۰۰۰۲۷۱ | ۰/۰۰۰۰۷۲ | ۰/۰۰۰۶۵۵ | ۰/۰۰۰۹۷۱ |
| ۱۰ | ۰/۰۳۱۹۸۴ | ۰/۰۶۱۳۲۹ | ۰/۰۸۴۲۱۹ | ۰/۰۸۸۳۶۱ | ۰/۰۰۰۱۳۲ | ۰/۰۰۰۰۳۳ | ۰/۰۰۰۴۲۶ | ۰/۰۰۰۵۴۴ |
| ۱۲ | ۰/۰۲۶۰۶۷ | ۰/۰۴۹۹۸۳ | ۰/۰۲۹۲۷۹ | ۰/۰۴۷۶۹۷ | ۰/۰۰۶۲۹۴ | ۰/۰۰۴۸۳۶ | ۰/۱۰۰۶۵۴ | ۰/۲۰۹۲۵۶ |

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

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

برای تعیین نوع خطای رخ داده نیز مقادیر شاخص‌های تشخیص هویت خطای $K_2^{7,ST}=0.452908$ و $K_{31}^{7,ST}=1.738601$ محاسبه می‌شود که با مقایسه این مقادیر با مقادیر $K_2^{TH,ST}=0.755$ و $K_{31}^{TH,ST}=0.928$ طبق رابطه (۱۸)، نتیجه می‌شود که خطای رخ داده از نوع سه‌فاز می‌باشد. در این روش زمان لازم برای تشخیص خطا در این روش حدود $380ms$ 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 $380ms$ تشخیص دهد.

## ۴-۲- بررسی خطای نامتقارن در توپولوژی حلقوی (کلید $S1$ باز و کلید $S2$ بسته باشند)

به منظور بررسی توانایی روش پیشنهادی در تشخیص خطاهای نامتقارن رخ داده در توپولوژی حلقوی، یک خطای تکفاز با مقاومت خطای ۵ اهم در نقطه $F2$ روی فاز $b$ خط ۹ ریزشبکه نمونه شکل (۸) قرار داده می‌شود. لازم به ذکر است، جهت ایجاد توپولوژی حلقوی، کلید $S2$ که در حالت قبل باز بود، بسته می‌شود.

### ۴-۲-۱- تشخیص با استفاده از تبدیل موجک

ابتدا برای تشخیص وقوع خطا، مقادیر نرمالایز شده انرژی و انحراف معیار توالی صفر و مثبت ولتاژ و جریان به دست آمده از تبدیل موجک برای ماژول‌های مختلف بعد از وقوع خطا در نقطه $F2$ محاسبه می‌شود. جدول (۶) این مقادیر را نشان می‌دهد.

با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ماژول‌ها، با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده در جدول (۱)، مشخص می‌گردد که وقوع خطایی توسط ماژول‌های 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 شکل‌موج جریان برای ماژول‌هایی که خطا را تشخیص داده‌اند، در جدول (۷) آورده شده است.

مطابق نتایج جدول (۷)، مشاهده می‌شود که ماژول‌های ۷ و ۸ بیشترین مقدار اندیس $K_1^{WT}$ را دارا می‌باشند. همچنین با توجه به اینکه علامت جریان در این دو ماژول منفی می‌باشد، در جهت جریان عبوری حرکت کرده و به ماژول شماره ۹ می‌رسیم. از آنجا که ماژول 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.

[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

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

| شماره ماژول | سیگنال ولتاژ | | | | سیگنال جریان | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | |
| | توالی صفر | توالی مثبت | توالی صفر | توالی مثبت | توالی صفر | توالی مثبت | توالی صفر | توالی مثبت |
| ۳ | ۰/۰۱۰۱۳۱ | ۰/۰۲۲۰۲۸ | ۰/۰۰۷۶۳۷ | ۰/۰۲۷۷۷۱ | ۰/۰۰۶۲۴۵ | ۰/۰۱۴۷۵۶ | ۰/۱۵۲۴۶۷ | ۰/۱۴۶۲۷۸ |
| ۶ | ۰/۰۰۹۳۵۱ | ۰/۰۱۸۰۹۲ | ۰/۰۰۴۰۴۹ | ۰/۰۱۸۹۲۴ | ۰/۰۰۴۷۶۹ | ۰/۰۰۸۸۳۴ | ۰/۰۸۴۹۲۵ | ۰/۱۳۲۹۵۴ |
| ۷ | ۰/۱۰۷۲۳۱ | ۰/۰۶۲۷۳۲ | ۰/۱۶۰۶۵۳ | ۰/۲۴۴۵۵۳ | ۰/۰۰۹۱۶۸ | ۰/۰۲۶۶۸ | ۰/۳۶۳۶۴۳ | ۰/۱۸۴۸۱۳ |
| ۸ | ۰/۱۱۲۵۰۳ | ۰/۰۷۱۷۷۴ | ۰/۲۱۳۸۱۴ | ۰/۳۱۹۵۹ | ۰/۰۱۰۸۴۹ | ۰/۰۳۴۱۵۳ | ۰/۵۰۵۵۵۹ | ۰/۲۵۲۳۸۷ |
| ۱۲ | ۰/۰۱۱۵۴۴ | ۰/۰۲۷۵۰۴ | ۰/۰۲۷۶۲۵ | ۰/۰۶۵۴۲۲ | ۰/۰۰۷۷۹۹ | ۰/۰۱۹۰۷۴ | ۰/۲۴۷۸۹۹ | ۰/۱۶۵۶۷۶ |

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

از مقایسه مقادیر به دست آمده برای $K_2^{8,WT}=0.719373$ و $K_{32}^{8,WT}=0.965186$ با مقادیر $K_2^{TH,WT}=0.436$ و $K_{32}^{TH,WT}=1.148$ طبق رابطه (۱۹)، نتیجه می‌شود که خطای رخ داده از نوع تکفاز می‌باشد و با استفاده از مقادیر $\overline{E_{i,a}^{8,WT}}=0.45674$ ، $\overline{E_{i,b}^{8,WT}}=0.828836$ و $\overline{E_{i,c}^{8,WT}}=0.371461$ معلوم می‌شود که خطای مذکور در فاز $b$ رخ داده است. همچنین لازم به ذکر است که زمان لازم برای تشخیص خطا در این روش حدود $330ms$ می‌باشد. به عبارتی دیگر الگوریتم ارائه شده با استفاده از تبدیل موجک به درستی توانست که خطای تکفاز رخ داده در فاز $b$ خط ۹ را در کمتر از $330ms$ تشخیص دهد.

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

| شماره ماژول | انرژی توالی صفر شکل‌موج جریان | انرژی توالی مثبت شکل‌موج جریان | انرژی توالی منفی شکل‌موج جریان | مقدار اندیس $K_1^{WT}$ | علامت جریان عبوری از ماژول |
|---|---|---|---|---|---|
| ۳ | ۰/۱۵۲۴۶۷ | ۰/۱۴۶۲۷۸ | ۰/۰۹۲۲۴ | ۰/۵۴۳۴۵۲ | |
| ۶ | ۰/۰۸۴۹۲۵ | ۰/۱۳۲۹۵۴ | ۰/۰۷۰۴۲۴ | ۰/۳۷۳۲۲۹ | |
| ۷ | ۰/۳۶۳۶۴۳ | ۰/۱۸۴۸۱۳ | ۰/۱۵۹۲۹۲ | ۱/۰۷۱۳۹۱ | منفی |
| ۸ | ۰/۵۰۵۵۵۹ | ۰/۲۵۲۳۸۷ | ۰/۲۱۹۷۷۳ | ۱/۴۸۳۲۷۸ | منفی |
| ۱۲ | ۰/۲۴۷۸۹۹ | ۰/۱۶۵۶۷۶ | ۰/۱۲۳۲۷۵ | ۰/۷۸۴۷۴۸ | |

### ۴-۲-۲- تشخیص با استفاده از تبدیل S

با هدف تشخیص وقوع خطا، جدول (۸) مقادیر نرمالیزه شده انرژی و انحراف معیار توالی صفر و مثبت ولتاژ و جریان به دست آمده از تبدیل S را برای ماژول‌های مختلف بعد از وقوع خطا در نقطه $F2$ نشان می‌دهد.

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

| شماره ماژول | سیگنال ولتاژ | | | | سیگنال جریان | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | | انحراف معیار ماتریس انرژی | | انرژی ماتریس انرژی | |
| | توالی صفر | توالی مثبت | توالی صفر | توالی مثبت | توالی صفر | توالی مثبت | توالی صفر | توالی مثبت |
| ۱ | ۰۰۴۵۳۳ | ۰/۰۰۵۷۹ | ۰/۰۰۱۶۷۲ | ۰/۰۰۱۰۸۸ | ۰/۰۰۰۸۵۱ | ۰/۰۰۷۳۴۱ | ۰/۰۰۵۵۳۹ | ۰/۰۱۴۱۹۳ |
| ۲ | ۰/۰۰۷۴۱۷ | ۰/۰۰۹۴۹۶ | ۰/۰۰۲۷۷۲ | ۰/۰۰۱۷۹۲ | ۰/۰۰۱۴۵۳ | ۰/۰۰۸۳۹۱ | ۰/۰۰۶۱۱۶ | ۰/۰۳۱۹۳۱ |
| ۳ | ۰/۰۳۷۳۱۹ | ۰/۰۵۴۹۳۵ | ۰/۰۳۶۳۷۳ | ۰/۰۴۱۱۴۸ | ۰/۰۷۴۳۱۸ | ۰/۰۲۶۲۹۴ | ۰/۱۸۹۲۸۳ | ۰/۲۷۷۳۸۴ |
| ۴ | ۰/۰۰۹۷۴۸ | ۰/۰۲۰۹۵۵ | ۰/۰۰۸۸۱۳ | ۰/۰۱۵۰۱۳ | ۰/۰۰۴۵۳۶ | ۰/۰۱۳۸۱ | ۰/۰۲۵۸۸ | ۰/۰۷۹۲۰۱ |



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

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

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

حال به منظور تعیین محل وقوع خطا، مطابق فلوچارت ارائه شده در شکل (۶) مقادیر $K_1^{ST}$ به همراه انرژی نرمالیزه شده توالی‌های صفر، مثبت و منفی شکل‌موج جریان برای ماژول‌هایی که خطا را تشخیص داده‌اند، در جدول (۹) آورده شده است.

از مقادیر جدول (۹) نتیجه می‌شود که ماژول‌های ۷ و ۸ بیشترین مقدار اندیس $K_1^{ST}$ را دارا می‌باشند. به مانند استدلال قسمت قبل، محل خطا 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 خطا در ماژول ۸ (ماژولی که بیشترین مقدار اندیس تشخیص وقوع خطا را دارد) با استفاده از مقادیر $\overline{E_{i,Seq_0}^{8,ST}} = 0.653535$ ، $\overline{E_{i,Seq_1}^{8,ST}} = 0.615074$ ، $\overline{E_{i,Seq_2}^{8,ST}} = 0.569801$ ، $\overline{E_{v,Seq_0}^{8,ST}} = 0.499205$ ، $\overline{1/E_{v,Seq_1}^{8,ST}} = 0.471601$ و $E_{v,Seq_2}^{8,ST} = 0.392661$ ، مقادیر $K_2^{8,ST} = 1.15274$ و $K_{32}^{8,ST} = 2.049138$ را محاسبه می‌کند.

**جدول (۹): مقادیر پارامترهای محاسبه شده توسط تبدیل S در ماژول‌هایی که وقوع خطای $F2$ را تشخیص داده‌اند**

| شماره ماژول | انرژی توالی صفر شکل‌موج جریان | انرژی توالی مثبت شکل‌موج جریان | انرژی توالی منفی شکل‌موج جریان | مقدار اندیس $K_1^{ST}$ | علامت جریان عبوری از ماژول |
|---|---|---|---|---|---|
| ۳ | ۰/۱۸۹۲۸۳ | ۰/۲۷۷۳۸۴ | ۰/۱۳۰۵۳۷ | ۰/۷۸۶۴۸۷ | |
| ۶ | ۰/۰۵۸۵۵۱ | ۰/۱۰۷۲۱۶ | ۰/۰۴۸۲۷۵ | ۰/۲۷۲۵۹۲ | |
| ۷ | ۰/۴۷۸۲۳۸ | ۰/۴۸۹۸۲۲ | ۰/۳۷۳۹۸۶ | ۱/۸۲۰۲۸۴ | منفی |
| ۸ | ۰/۶۵۳۵۳۵ | ۰/۶۱۵۰۷۵ | ۰/۵۶۹۸۰۱ | ۲/۴۹۱۹۴۶ | منفی |
| ۱۲ | ۰/۳۳۹۱۶۴ | ۰/۳۶۹۴۶ | ۰/۲۱۹۳۶۳ | ۱/۲۶۷۱۵۲ | |

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 خطای رخ داده از نوع تکفاز می‌باشد و با استفاده از مقادیر $\overline{E_{i,a}^{8,ST}} = 0.127275$ ، $\overline{E_{i,b}^{8,ST}} = 0.803937$ و $\overline{E_{i,c}^{8,ST}} = 0.215044$ معلوم می‌شود که خطای مذکور در فاز $b$ رخ داده است. همچنین لازم به ذکر است که زمان لازم برای تشخیص خطا در این روش حدود $400ms$ می‌باشد. به عبارتی دیگر الگوریتم ارائه شده با استفاده از تبدیل S به درستی توانست که خطای تکفاز رخ داده در فاز $b$ خط ۹ را در کمتر از $400ms$ تشخیص دهد.

## ۴-۳- عکس‌العمل روش پیشنهادی در برابر کلیدزنی

برای نشان دادن قابلیت اطمینان و عملکرد صحیح روش پیشنهادی در برابر کلیدزنی‌های احتمالی در شبکه، عکس‌العمل 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 ماژول‌های مختلف بعد از خروج DG2 نشان می‌دهد.

**جدول (۱۰): مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده از تبدیل S با ضریب $10^{-6}$ برای ماژول‌های مختلف بعد از خروج DG2 (مقادیر دارای علامت * از مقادیر حدودآستانه مربوطه تجاوز کرده‌اند)**



[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

| شماره ماژول | سیگنال ولتاژ | | | | | | سیگنال جریان | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | انحراف معیار ماتریس انرژی | | | انرژی ماتریس انرژی | | | انحراف معیار ماتریس انرژی | | | انرژی ماتریس انرژی | | |
| | توالی صفر | توالی مثبت | توالی منفی | توالی صفر | توالی مثبت | توالی منفی | توالی صفر | توالی مثبت | توالی منفی | توالی صفر | توالی مثبت | توالی منفی |
| ۱ | ۴۳۸۶ | ۳۸۱۱ | ۱۴۱۰ | ۲۴۲۶ | ۱۷۰۶ | ۳۹۳ | ۲۰۹ | ۳۰۳۰ | ۱۶۵ | ۱۴۶۳ | ۲۸۶۳ | ۱۲۹۶ |
| ۲ | ۵۴۹۲ | ۴۹۷۹ | ۲۲۶۹ | ۱۵۶۰ | ۲۶۱۵ | ۶۲۱ | ۵۳۸ | ۴۵۴۸ | ۲۱۹ | ۳۴۰۲ | ۷۲۲۲ | ۱۷۱۶ |
| ۳ | ۳۸۹۰ | ۳۵۱۴ | ۱۷۵۸ | ۱۰۰۳ | ۱۵۲۰ | ۴۲۰ | ۲۰۴ | ۲۸۱۸ | ۱۳۸ | ۱۳۵۶ | ۳۱۹۶ | ۱۲۴۷ |
| ۴ | ۳۰۱۹ | ۲۵۹۴ | ۱۳۰۷ | ۱۴۳۱ | ۹۳۲ | ۲۳۰ | ۵۹ | ۱۵۷۰ | ۱۱۸ | ۵۹۲ | ۱۶۵۲ | ۸۱۱ |
| ۵ | ۲۱۱۰ | ۱۸۷۲ | ۹۹۳ | ۴۲۸ | ۶۷۸ | ۱۵۰ | ۴۰ | ۸۷۷ | ۶۹ | ۳۲۶ | ۹۴۱ | ۴۴۳ |
| ۷ | *۱۲۷۱۴ | ۱۴۹۲۳ | ۳۶۶۲ | *۸۲۲۹ | ۱۰۰۲۴ | ۲۸۴۹ | ۱۲۹۵ | *۱۳۷۵۲ | ۶۸۰ | ۸۳۳۹ | ۱۳۵۴۹ | ۴۹۹۶ |
| ۸ | *۱۴۸۱۹ | *۳۱۶۹۴ | ۴۷۰۲ | *۱۱۳۷۱ | *۳۷۴۶۴ | ۵۹۶۹ | ۲۰۲۹ | *۱۹۴۶۰ | ۹۹۰ | *۱۱۳۰۷ | ۱۹۲۳۷ | ۷۱۹۶ |
| ۹ | ۱۰۶۴۴ | ۸۰۰۲ | ۲۳۸۹ | ۴۰۷۳ | ۴۷۱۵ | ۱۲۸۷ | ۶۲۴ | ۶۶۶۰ | ۲۶۵ | ۶۰۰۰ | ۶۶۸۵ | ۲۸۴۷ |
| ۱۰ | ۸۱۰۹ | ۶۷۳۲ | ۱۸۷۵ | ۳۱۱۱ | ۳۳۳۳ | ۸۲۱ | ۳۵۲ | ۷۲۵۴ | ۳۵۱ | ۲۵۷۰ | ۴۷۳۷ | ۲۸۲۱ |
| ۱۲ | ۸۸۳۹ | ۹۴۰۶ | ۲۹۳۱ | *۵۳۶۴ | ۵۵۴۰ | ۱۳۱۱ | ۸۱۷ | ۹۸۷۶ | ۴۲۹ | ۴۰۷۰ | ۱۰۲۱۸ | ۳۴۶۲ |

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

## ۵- نتیجه‌گیری

هر طرح حفاظتی که برای ریزشبکه‌ها ارائه می‌شود باید قادر به حفاظت موثر این شبکه‌ها در کلیه توپولوژی‌های عملکردی آن‌ها را داشته باشد. براین‌اساس مقاله حاضر یک طرح جامع را جهت تشخیص نوع خطا، محل خطا و فازهای درگیر در خطا ارائه داد. مقاله حاضر با استخراج مولفه‌های سه‌فاز و همچنین توالی‌های مثبت، منفی و صفر شکل‌موج‌های جریان و ولتاژ، فرآیند تشخیص خطا 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 توسط سرور مرکزی صادر می‌شود، لذا در صورت عدم عملکرد صحیح ماژول‌ها (به هر دلیلی) در پاک کردن خطا، سرور مرکزی متوجه شده و بالافاصله دستور قطع را برای ماژول مناسب بعدی صادر می‌کند. پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی توپولوژی‌های مختلف عملکردی یک ریز شبکه، نشان می‌دهد که این طرح قادر به حفاظت موثر ریزشبکه در کلیه توپولوژی‌های عملکردی این شبکه‌ها- است. همچنین نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی نشان می‌دهد که با طرح دو بلوکه پیشنهادی برای تشخیص خطا، این روش انواع خطاهای ممکن شامل خطاهای متقارن و نامتقارن و نیز خطاهای امپدانس پایین و حتی خطاهای امپدانس بالا را به‌راحتی می‌تواند تشخیص دهد. مقایسه آنالیز موجک و آنالیز S در روش پیشنهادی، اگرچه حکم به توانایی هر دو آنالیز در فرآیند تشخیص خطای پیشنهادی می‌دهد، اما نشان می‌دهد که آنالیز موجک زمان کمتری را برای تشخیص خطا نیاز دارد در حالیکه آنالیز S با دقت و رزولوشن (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.

## مراجع


[۱] G. G. Karady and L. Xing, "Fault management and protection of FREEDM systems", IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-4, 2010.

[۲] P. Tatcho, et al., "A novel line section protection for the FREEDM system based on the solid state transformer", IEEEPower and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, 2011.

[۳] J. J. Justo, et al., "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review", Renewable and sustainable energy reviews, vol. 24, pp. 387-405, 2013.

[٤] C. R. Pinnegar and L. Mansinha, "Time-local Fourier analysis with a scalable, phase-modulated analyzing function: the S-transform with a complex window", Signal Processing, vol. 84, pp. 1167-1176,2004.

[٥] V. Terzija, et al., "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks",IEEE Proceedings, vol. 99, pp. 80-93, 2011.

[٦] T. Liang, et al., "From laboratory Microgrid to real markets - Challenges and opportunities",IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), pp. 264-271, 2011.

[۷] T. S. Ustun, et al., "Modeling of a Centralized Microgrid Protection System and Distributed Energy Resources According to IEC 61850-7-420",IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, pp. 1560-1567, 2012.

[۸] W. Jiang, et al., "The Overview of Research on Microgrid Protection Development", International Conference in Intelligent System Design and Engineering Application, pp. 692-697, 2010.


[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]

[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 in 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.

[۱٤] H. Al-Nasseri, et al., "A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.

[۱٥] S. A. Hosseini, et al., "presenting a new method for identifing fault location in microgrids, using harmonic impedance", Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering, vol. 39, pp. 167-182, 2015.

[۱٦] 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.

[۲٤] P. Tatcho, L. Hui, J. Yu, and Q. Li, "A Novel Hierarchical Section Protection Based on the Solid State Transformer for the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, pp. 1096-1104, 2013.

[۲٥] S. K. Rudion, N. Hatziargyiou, 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].

[ Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.5.4 ]