

## ارزیابی و صحت‌سنجی روشی نوین برای تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها با در نظرگیری عدم قطعیت در توپولوژی آنها

رضا اسلامی<sup>۱</sup> و سید امیر حسینی<sup>۲</sup> و امیر عباس امیرجلیلی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه قدرت دانشکده برق، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز  
eslami@sut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده برق، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان  
hosseini.amir@gut.ac.ir

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
amirabbas.mirjalili@yahoo.com

### چکیده

مهمترین چالش در خروج طرح‌های ریزشبکه‌ها از ابعاد آزمایشگاهی، فرآیند تشخیص خطا در این شبکه‌ها است. به همین دلیل در این مقاله یک روش جدید تشخیص خطا در ریزشبکه‌ها با در نظرگیری عدم قطعیت در توپولوژی آن‌ها، پرداخته می‌شود. روش تشخیص خطای پیشنهادی با استفاده از تبدیل S تحقق می‌یابد. با استفاده از این تبدیل 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. بمنظور ارزیابی صحت عملکرد روش مورد بررسی در تشخیص انواع خطا و ایجاد تمایز میان خطاهای گذرا و دائم، از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. بدین منظور از شاخص قابلیت اطمینان ENS و درصد عملکردهای موفق سیستم حفاظت به ازای خطاهای رخ داده، استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با صحت عملکرد بسیار بالا قادر به تشخیص خطا در توپولوژی‌های مختلف ریزشبکه می‌باشد. همچنین این روش بخوبی قادر به تمییز خطاهای دائم از حالات گذرای شبکه می‌باشد.

### کلمات کلیدی

تشخیص خطا، پایداری، تبدیل S، انرژی سیگنال، انحراف معیار، صحت‌سنجی، شبیه‌سازی مونت کارلو

نیز عملکرد ریزشبکه‌ها در دو مد نرمال و جزیره‌ای مهم‌ترین مشکلات را در راه حفاظت موثر این شبکه‌ها ایجاد می‌کنند [۲]. 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 [۳].

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه چالش‌های حفاظتی ریزشبکه‌ها و تبیین روش‌های مناسب برای حفاظت موثر این شبکه‌ها ارائه شده است.

### ۱- مقدمه

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 [۱]. ساختار دینامیک ریزشبکه‌ها که در آنها در هر لحظه یک منبع تولید پراکنده از شبکه خارج یا به شبکه متصل می‌گردد و

سایر قسمت‌های این مقاله بدین شرح است. در بخش دوم روش تشخیص خطای مورد بررسی در این مقاله به همراه الگوریتم ارزیابی عملکرد آن، ارائه شده است. در بخش سوم این مقاله، روش پیشنهادی بر روی ریزشبه نمونه پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- معرفی و ارزیابی صحت عملکرد روش تشخیص خطا استفاده شده

ماژول‌های موجود در نقاط مختلف ریزشبه 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 توالی-های صفر، مثبت و منفی و همچنین مولفه‌های سه‌فاز سیگنال ولتاژ و جریان، راهکار روش پیشنهادی برای تشخیص وقوع خطا، محل خطا، نوع و فازهای درگیر در آن می‌باشد. به منظور محاسبه انحراف معیار و انرژی سیگنال‌های ولتاژ و جریان، این مقاله استفاده از تبدیل S را پیشنهاد می‌نماید.

### ۲-۱- تشخیص وقوع خطا

روند تشخیص وقوع خطا به این ترتیب است که از سیگنال‌های جریان و ولتاژ سه فاز در نقاط مختلف شبکه به تعداد  $N$  نمونه که دوره زمانی هر نمونه  $T$  می‌باشد، نمونه‌برداری می‌شود. سپس توالی‌های مثبت، منفی و صفر از روی مولفه‌های سه‌فاز برای سیگنال‌های نمونه‌برداری شده محاسبه گردیده و تبدیل S گسسته بر روی سیگنال‌های مختلف به دست آمده بصورت رابطه (۱) اعمال می‌گردد.

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

که در آن  $\omega$  پنجره گوسی متغیر با زمان،  $m=1:M$ ،  $u = i, v$  و  $q = Seq_0, Seq_1, Seq_2, a, b, c$  می‌باشند که  $i$  و  $v$  به ترتیب بیانگر سیگنال‌های جریان و ولتاژ هستند.

خروجی‌های تبدیل S یک ماتریس  $N \times N$  بصورت رابطه (۲) خواهد بود که ماتریس S نامگذاری می‌شود.

براین اساس مطالعات [۴-۶] به معرفی چالش‌های حفاظتی ریزشبه‌ها پرداخته‌اند. روش‌های مختلف پیشنهاد شده در مطالعات گذشته برای حل این چالش‌ها در مطالعات [۳, ۴, ۷, ۸] دسته‌بندی شده‌اند. این روش‌ها شامل آنالیز ولتاژ، آنالیز هارمونیک، آنالیز موجک و آنالیز S می‌شوند. براین اساس مطالعه [۹] 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 ریزشبه‌ها پیشنهاد می‌نماید. در [۱۰] با استفاده از طیف‌های ایجاد شده از امپدانس هارمونیک و مقایسه آن‌ها توسط سرور مرکزی به تشخیص خطا پرداخته می‌شود. استخراج انرژی سیگنال با استفاده از آنالیز تبدیل موجک در [۱۱, ۱۲] و آنالیز S در [۱۳] پیشنهاد شده است. در این مطالعات تنها یک ساختار ثابت برای ریزشبه مدنظر قرار گرفته است بطوریکه کارایی این روش‌ها در کلیه ساختارهای عملکردی ریزشبه با چالش جدی مواجه خواهد شد. در مطالعه [۱۴] خطا با مانیتورینگ THD و ولتاژ خروجی منابع تولید پراکنده و مقایسه آن با یک مقدار آستانه تشخیص داده می‌شود. مطالعه [۱۵] نیز از آنالیز هارمونیک 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 ریزشبه، ناتوانی 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 این رو در این مقاله یک روش جدید برای تشخیص خطا در ریزشبه‌ها، پیشنهاد و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روش ارائه شده در این مقاله از تبدیل S و توالی‌های مثبت، منفی و صفر شکل موج‌های جریان و ولتاژ برای تشخیص خطا بهره می‌برد. از ویژگی‌های روش ارائه شده آن است که این روش قادر به پاسخگویی نسبت به کلیه حالات دینامیک ریزشبه می‌باشد. روش جدید پیشنهادی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور صحت عملکرد این روش در تشخیص انواع خطا با استفاده از شاخص قابلیت اطمینان ENS و درصد عملکردهای موفق روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج صحت‌سنجی روش پیشنهادی برای خطاهای دائم و حالات گذرای شبکه بخوبی نشان می‌دهند که این روش با قابلیت اطمینان بسیار بالایی در تشخیص انواع خطا در توپولوژی‌های مختلف شبکه، موفق عمل نموده است.

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

از روی ماتریس خروجی تبدیل S، ماتریس انرژی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

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

از میان ماژول‌هایی که وقوع خطا را تشخیص داده‌اند، دو ماژولی که دارای بیشترین مقدار  $K_1$  هستند، مشخص شده و علامت جریان عبوری از این دو ماژول تعیین می‌شود. اگر جریان عبوری از این دو ماژول هم علامت نباشند، محل خطا در خط بین این دو ماژول قرار دارد. در غیر اینصورت اگر در مسیر جریان عبوری خط دیگری قرار ندارد، خطا در خط انتهایی این مسیر قرار دارد. اگر علامت جریان عبوری، در مسیر جریان عبوری خط دیگری قرار داشته باشد، ماژول بعدی در جهت جریان گشته و بررسی می‌شود که این ماژول وقوع خطا را تشخیص داده است یا خیر. اگر تشخیص نداده باشد، محل خطا در آخرین خط طی شده در این مسیر قرار دارد. ولی اگر تشخیص داده باشد و همچنین اگر علامت جریان عبوری از این ماژول تغییر کرده است، محل خطای مورد بررسی در خطی هست که این ماژول در آن قرار دارد. در غیر اینصورت ماژول بعدی در جهت جریان تعیین گشته و مراحل قبلی طی خواهد شد تا محل وقوع خطا تعیین گردد.

و در ادامه انرژی سیگنال و انحراف معیار سیگنال با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود.

$$E_{u,q}^m = \sum_{e=1}^N \sum_{g=1}^N |S_{u,q}^m [eT, \frac{g}{NT}]|^2 \quad (4)$$

$$STD_{u,q}^m = \sqrt{\frac{\sum_{e=1}^N \sum_{g=1}^N (|S_{u,q}^m [eT, \frac{g}{NT}]|^2 - \frac{\sum_{e=1}^N \sum_{g=1}^N |S_{u,q}^m [eT, \frac{g}{NT}]|^2}{N^2})^2}{N^2}} \quad (5)$$

برای تشخیص وقوع خطا، مقادیر انحراف معیار و انرژی سیگنال ولتاژ و جریان برای توالی‌های مختلف با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده مقایسه می‌گردد. اگر همه چهار مقدار هر کدام از توالی‌ها بالاتر از حد آستانه بود، خطا رخ داده است. در غیر اینصورت خطایی رخ نداده است.

## ۲-۲- تشخیص محل خطا

برای تعیین محل وقوع خطا برای ماژول‌هایی که تشخیص خطا داده‌اند، شاخص  $K_1$  با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$K_1^t = \begin{pmatrix} 2 \times \overline{E_{i,Seq_0}^{1,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{1,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{1,t}} \\ 2 \times \overline{E_{i,Seq_0}^{2,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{2,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{2,t}} \\ 2 \times \overline{E_{i,Seq_0}^{3,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{3,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{3,t}} \\ \vdots \\ 2 \times \overline{E_{i,Seq_0}^{L,t}} + \overline{E_{i,Seq_1}^{L,t}} + \overline{E_{i,Seq_2}^{L,t}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

## ۳-۲- تعیین نوع خطا

برای تعیین نوع خطای رخ داده، شاخص‌های  $K_2$  و  $K_3$  مطابق روابط (۷) و (۸) برای ماژول‌هایی که بیشترین مقدار شاخص  $K_1$  را دارد، محاسبه می‌شود.

$$K_2^{m,t} = \overline{E_{i,Seq_0}^{m,t}} + \overline{E_{v,Seq_0}^{m,t}} \quad (7)$$

با استفاده از شاخص‌های محاسبه شده در روابط (۷) و (۸)، فازهای درگیر در خط از روابط (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) تعیین می‌شوند.

$$K_3^{m,t} = \overline{E_{i,Seq1}^{m,t}} + \left( \frac{1}{E_{v,Seq1}^{m,t}} \right) + \overline{E_{i,Seq2}^{m,t}} + \overline{E_{v,Seq2}^{m,t}} \quad (۸)$$

برای خطاهای دوفاز:

$$\begin{aligned} K_2^{m,t} < K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} < K_{31}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,a}^{m,t}} &= \min\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای دو فاز بین فازهای } b \text{ و } c \\ K_2^{m,t} < K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} < K_{31}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,b}^{m,t}} &= \min\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای دو فاز بین فازهای } a \text{ و } b \\ K_2^{m,t} < K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} < K_{31}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,c}^{m,t}} &= \min\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای دو فاز بین فازهای } a \text{ و } c \end{aligned} \quad (۹)$$

برای خطاهای سه‌فاز:

$$K_2^{m,t} < K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} > K_{31}^{TH,t} \Rightarrow \text{خطای سه‌فاز} \quad (۱۰)$$

برای خطاهای تکفاز:

$$\begin{aligned} K_2^{m,t} > K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} < K_{32}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,a}^{m,t}} &= \max\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای تکفاز در فاز } a \\ K_2^{m,t} > K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} < K_{32}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,b}^{m,t}} &= \max\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای تکفاز در فاز } b \\ K_2^{m,t} > K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} < K_{32}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,c}^{m,t}} &= \max\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای تکفاز در فاز } c \end{aligned} \quad (۱۱)$$

برای خطاهای دوفاز به زمین:

$$\begin{aligned} K_2^{m,t} > K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} > K_{32}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,a}^{m,t}} &= \min\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای دو فاز به زمین بین فازهای } b \text{ و } c \\ K_2^{m,t} > K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} > K_{32}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,b}^{m,t}} &= \min\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای دو فاز به زمین بین فازهای } c \text{ و } a \\ K_2^{m,t} > K_2^{TH,t} \text{ و } K_3^{m,t} > K_{32}^{TH,t} \text{ و } \overline{E_{i,c}^{m,t}} &= \min\{\overline{E_{i,a}^{m,t}}, \overline{E_{i,b}^{m,t}}, \overline{E_{i,c}^{m,t}}\} \Rightarrow \text{خطای دو فاز به زمین بین فازهای } b \text{ و } a \end{aligned} \quad (۱۲)$$

به منظور صحت‌سنجی عملکرد الگوریتم تشخیص خطای پیشنهادی با توجه به آنکه پارامترها و عدم قطعیت‌های مدنظر مقاله حاضر متغیر با زمان می‌باشند، لذا از شبیه‌سازی مونت کارلوی ترتیبی استفاده می‌شود. جزئیات استفاده از این روش در [۱۶] ارائه شده است. در مدت زمان شبیه‌سازی با توجه به احتمال وقوع خطا در خطوط مختلف شبکه و رفتار دینامیک توپولوژی ریزش‌بکه، شاخص‌های قابلیت اطمینان مدنظر، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. فلوچارت پیاده‌سازی این روش در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، هفت زیربخش مدنظر قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در زیربخش‌های ایجاد شده، صحت عملکرد روش پیشنهادی به ازای وقوع خطاهای دائم و حالات گذرای غیر خطای شبکه (شامل ورود خطوط و ورود و خروج منابع تولید پراکنده) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در الگوریتم صحت‌سنجی ارائه شده در شکل (۱)، شاخص قابلیت اطمینان کل انرژی تامین نشده (ENS) و همچنین درصد عملکرد صحیح بر مبنای تعداد عکس‌العمل‌های صحیح روش تشخیص خطای پیشنهادی در برابر حالات گذرای ناشی از کلیدزنی و خطاهای راندوم قرار داده شده بر روی قسمت‌های مختلف شبکه مطابق رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد برای ۱۰۰۰ سال شبیه‌سازی می‌گردد.

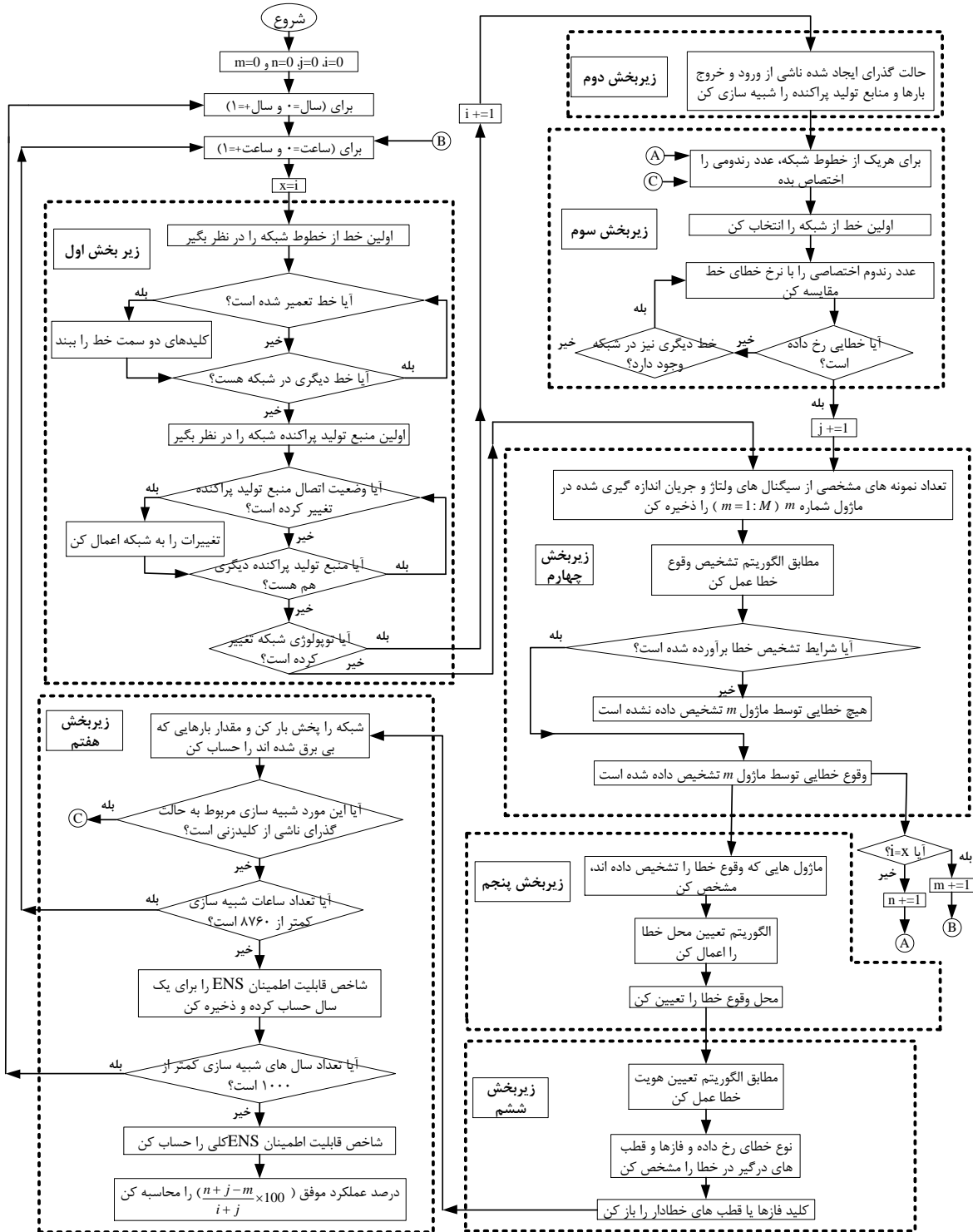
$$\text{Success percentage} = \frac{n + j - m}{i + j} \times 100 \quad (۱۳)$$

که در آن  $i$  تعداد کل حالات گذرای ناشی از کلیدزنی خطوط و منابع تولید پراکنده،  $n$  تعداد حالات گذرای که به درستی توسط الگوریتم پیشنهادی، تشخیص داده شده‌اند،  $j$  تعداد کل خطاهایی که بر روی نقاط مختلف شبکه قرار داده شده و  $m$  تعداد خطاهایی که به اشتباه توسط الگوریتم تشخیص خطای پیشنهادی، به عنوان خطا تشخیص داده نشده است، می‌باشند.

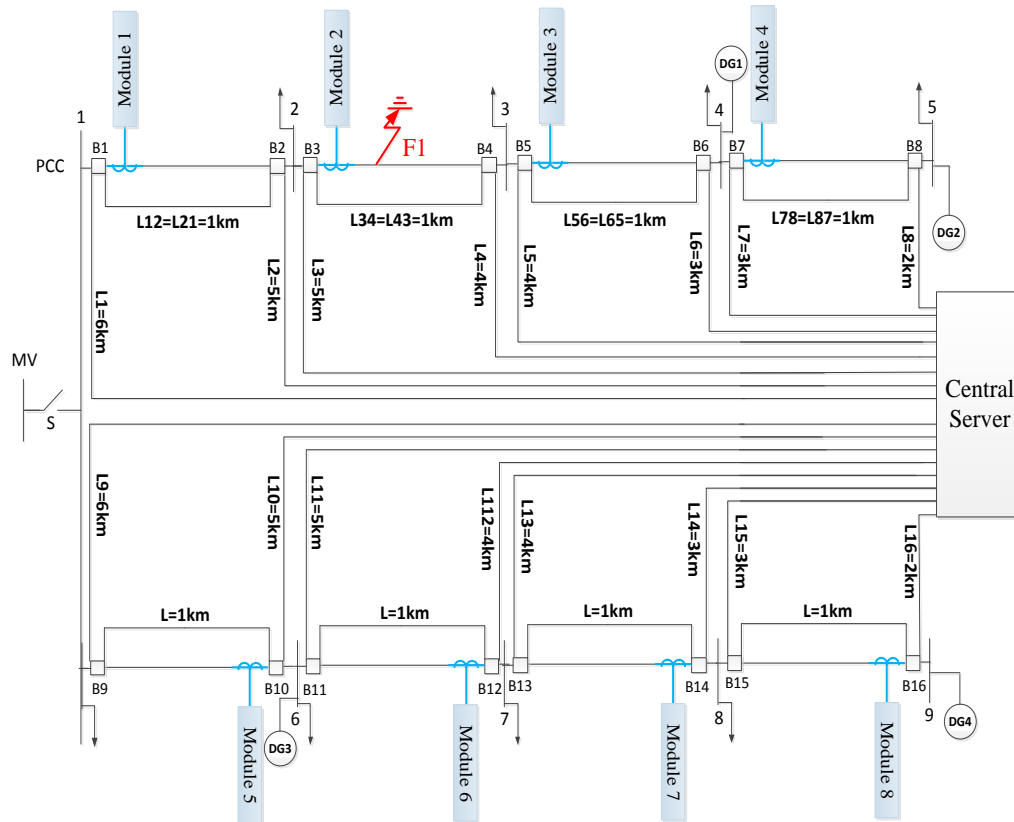
### ۳- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، این روش بر روی ریزش‌بکه نمونه شکل (۲) که دارای زیرساخت‌های اشاره شده می‌باشد و در مطالعه [۱۷] نیز استفاده شده است، پیاده‌سازی می‌شود. این ریزش‌بکه به شبکه بالادست از طریق باس ۱ متصل است. چهار منبع تولید پراکنده (۵ MW) در باس‌های ۴، ۵، ۶ و ۹ متصل است. مشخصات بارهای شبکه در جدول (۱) آورده شده است. مطابق این جدول بارها به سه نوع مسکونی، تجاری و صنعتی تقسیم شده‌اند. هزینه خاموشی هریک از بارها از مطالعه [۱۸]

استخراج شده است. بعلاوه منحنی روزانه بارها مطابق الگوهای ارائه شده در [۱۹] می‌باشد.



شکل (۱): الگوریتم ارزیابی صحت عملکرد با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو



شکل (۲): ریزشکبه مورد مطالعه برای ارزیابی روش پیشنهادی

برای تعیین مقادیر آستانه انرژی و انحراف معیار توالی صفر، مثبت و منفی ولتاژ و جریان، مطابق مراجع [۲۰، ۲۱] 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، عکس‌العملی نداشته باشد. مقادیر آستانه نرمالیزه شده انرژی و انحراف معیار توالی صفر، مثبت و منفی جریان و ولتاژ در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۳) به ترتیب مقادیر نرمالیزه شده انرژی و انحراف معیار توالی صفر، مثبت و ولتاژ و جریان به دست آمده را برای ماژول‌های مختلف بعد از وقوع خطا در نقطه  $F1$  نشان می‌دهد. از این جدول 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 شکل موج جریان برای ماژول‌هایی که خطا را تشخیص داده‌اند، در جدول (۴) آورده شده است. مطابق نتایج این جدول، محل خطا به درستی بر روی خط ۷ تشخیص داده می‌شود.

جدول (۱): مشخصات بارهای شبکه

شماره بار	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (MVar)	نوع بار
۲	۴.۸	۱.۵	تجاری
۳	۴.۵	۲.۵	صنعتی
۴	۲.۷	۰.۸	مسکونی
۵	۲.۵	۰.۵	مسکونی
۶	۲.۲	۰.۷	صنعتی
۷	۳.۴	۴	تجاری
۸	۲	۱	مسکونی
۹	۳	۱	مسکونی

### ۳-۱- بررسی رفتار روش پیشنهادی در مقابل خطای سه فاز

بمنظور ارزیابی روش پیشنهادی، در این قسمت به بررسی رفتار این روش نسبت به خطای سه‌فاز با مقاومت خطای ۱۰۰ اهم در نقطه  $F1$  بر روی خط ۷ ریزشکبه نمونه شکل (۲) پرداخته می‌شود.

جدول (۲): مقادیر نرمالیزه شده حدود آستانه

مقدار	نوع پارامتر	مقدار	نوع پارامتر
۰/۰۰۲۵۵۹	$STD_{i,Seq_0}^{TH,ST}$	۰/۰۱۰۳۷۷	$E_{i,Seq_0}^{TH,ST}$
۰/۰۱۰۱۶۷	$STD_{i,Seq_1}^{TH,ST}$	۰/۰۴۸۹۳۶	$E_{i,Seq_1}^{TH,ST}$
۰/۰۰۳۱۰۴	$STD_{i,Seq_2}^{TH,ST}$	۰/۰۱۷۸۹۹	$E_{i,Seq_2}^{TH,ST}$
۰/۰۱۱۴۵	$STD_{v,Seq_0}^{TH,ST}$	۰/۰۰۴۴۲۴	$E_{v,Seq_0}^{TH,ST}$
۰/۰۲۵۳۵۷	$STD_{v,Seq_1}^{TH,ST}$	۰/۰۲۲۷۷۹	$1/E_{v,Seq_1}^{TH,ST}$
۰/۰۱۷۳۲	$STD_{v,Seq_2}^{TH,ST}$	۰/۰۰۸۲۴۱	$E_{v,Seq_2}^{TH,ST}$

برای تعیین نوع خطای رخ داده نیز با استفاده از مقادیر

$$\overline{E_{i,Seq_2}^{7,ST}} = 0.33403, \overline{E_{i,Seq_1}^{7,ST}} = 0.596508, \overline{E_{i,Seq_0}^{7,ST}} = 0.222003$$

$$\text{و } \frac{1}{\overline{E_{v,Seq_1}^{7,ST}}} = 0.437618, \overline{E_{v,Seq_0}^{7,ST}} = 0.230904$$

مقادیر شاخص‌های تشخیص هویت خطای  $\overline{E_{v,Seq_2}^{7,ST}} = 0.370445$

با مقایسه این مقادیر با مقادیر  $K_{31}^{7,ST} = 1.738601$  و  $K_2^{7,ST} = 0.452908$  محاسبه می‌شود که با

$K_{31}^{TH,ST} = 0.928$  و  $K_2^{TH,ST} = 0.755$  مقادیر این مقادیر با مقادیر  $K_{31}^{TH,ST} = 0.928$  و  $K_2^{TH,ST} = 0.755$

طبق رابطه (۱۰)، نتیجه می‌شود که خطای رخ داده از نوع سه‌فاز می‌باشد.

جدول (۳): مقادیر نرمالیزه شده به دست آمده توسط مازول‌های مختلف بعد از وقوع خطای  $F1$

شماره مازول	سیگنال ولتاژ				سیگنال جریان			
	انحراف معیار ماتریس انرژی		انحراف معیار ماتریس انرژی		انرژی متوالی منفی		انرژی متوالی منفی	
۱	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی	توالی صفر	توالی منفی
۲	۰/۰۰۶۶۱۸	۰/۰۱۱۷۴۲	۰/۰۰۷۱۵	۰/۰۰۱۳۹۸	۰/۰۰۱۸۳۷	۰/۰۰۲۵۹۸	۰/۰۰۴۲۷۸	۰/۰۰۱۰۴۹
۳	۰/۰۰۸۱۳۴	۰/۰۱۴۴۳۲	۰/۰۱۶۰۷۱	۰/۰۰۲۷۳۰۱	۰/۰۰۱۸۳۷	۰/۰۰۲۵۹۸	۰/۰۰۴۲۷۸	۰/۰۰۱۰۴۹
۴	۰/۰۰۱۶۸۸۵	۰/۰۳۲۳۷۷	۰/۰۰۸۵۸۸	۰/۰۰۱۹۳۷۱	۰/۰۰۱۸۳۷	۰/۰۰۲۵۹۸	۰/۰۰۴۲۷۸	۰/۰۰۱۰۴۹
۵	۰/۰۰۸۷۶۶	۰/۰۲۸۱۵۱	۰/۰۰۲۶۹۴	۰/۰۱۸۷۳۵	۰/۰۰۲۶۹۴	۰/۰۰۲۶۹۴	۰/۰۰۲۶۹۴	۰/۰۰۲۶۹۴
۷	۰/۰۰۶۲۸۹۱	۰/۰۱۲۰۵۹۲	۰/۰۲۳۰۹۰۴	۰/۰۳۷۰۴۴۵	۰/۰۲۳۰۹۰۴	۰/۰۲۳۰۹۰۴	۰/۰۲۳۰۹۰۴	۰/۰۲۳۰۹۰۴
۸	۰/۰۰۵۱۳۳۴	۰/۰۰۹۸۴۳۲	۰/۰۲۱۸۰۵۵	۰/۰۲۶۸۵۰۵	۰/۰۲۱۸۰۵۵	۰/۰۲۱۸۰۵۵	۰/۰۲۱۸۰۵۵	۰/۰۲۱۸۰۵۵
۹	۰/۰۰۴۰۵۲۱	۰/۰۰۷۷۶۹۸	۰/۰۳۹۴۰۲	۰/۰۳۹۴۹۹	۰/۰۳۹۴۰۲	۰/۰۳۹۴۰۲	۰/۰۳۹۴۰۲	۰/۰۳۹۴۰۲
۱۰	۰/۰۰۳۱۹۸۴	۰/۰۰۶۱۳۳۹	۰/۰۰۸۴۲۱۹	۰/۰۰۸۸۳۶۱	۰/۰۰۸۴۲۱۹	۰/۰۰۸۴۲۱۹	۰/۰۰۸۴۲۱۹	۰/۰۰۸۴۲۱۹
۱۲	۰/۰۰۲۶۰۶۷	۰/۰۰۴۹۹۸۳	۰/۰۰۲۹۲۷۹	۰/۰۰۴۷۶۹۷	۰/۰۰۲۹۲۷۹	۰/۰۰۲۹۲۷۹	۰/۰۰۲۹۲۷۹	۰/۰۰۲۹۲۷۹

### ۳-۲- بررسی رفتار روش پیشنهادی با استفاده از روش مونت کارلو

در ادامه به منظور صحت‌سنجی عملکرد روش تشخیص خطای پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، برای در نظر گرفتن حالت دینامیک توپولوژی ریزش‌بکه، مشابه مطالعه [۲۲] فرض می‌شود منابع تولید پراکنده موجود در هر فیدر زمانی به شبکه متصل شوند که بار فیدر به ۹۷ درصد پیک بار برسد. همچنین به منظور سادگی محاسبات، فرض می‌شود که کلیه خطوط دارای نرخ خرابی و تعمیرات یکسان هستند. این مقادیر به ترتیب  $(f/year)$  و  $0.8$  و  $3 (hrs/f)$  در نظر گرفته شده‌اند. لازم

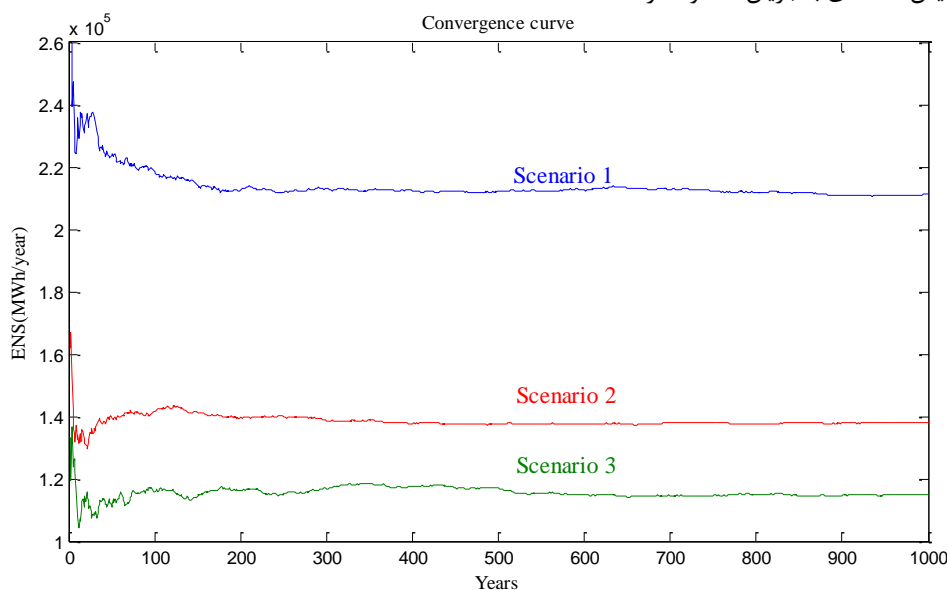
جدول (۴): مقادیر محاسبه شده پارامترهای مختلف توسط مازول‌هایی که وقوع خطای  $F1$  را تشخیص داده‌اند

شماره مازول	انرژی توالی صفر	انرژی توالی مثبت	انرژی توالی منفی	مقدار اندیس $K_1^{ST}$	علامت جریان عبوری از مازول
۷	۰/۰۲۲۲۰۰۳	۰/۰۵۹۶۵۰۸	۰/۰۳۳۴۰۳	۱/۳۷۴۵۴۴	مثبت
۸	۰/۰۲۰۱۹۷۳	۰/۰۳۷۴۴۱۸	۰/۰۲۶۹۱۶۹	۱/۰۴۷۵۲۳	مثبت
۱۲	۰/۰۱۰۰۶۵۴	۰/۰۲۵۲۱۲۳	۰/۰۲۰۹۲۵۶	۰/۶۶۲۶۸۸	مثبت

جدول (۵): شاخص‌های قابلیت اطمینان به دست آمده در هر سه سناریو

روش سنتی	روش مطالعه [۱۱]	روش پیشنهادی	
۲۱۳۰۰۰	۱۳۶۷۰۰	۱۱۳۴۰۰	ENS (MWh/yr)
۷۴۵۹	۷۰۴۶	۸۰۱۰	تعداد خطاهای رخ داده
۱۴۷۴۶	۱۵۰۵۵	۱۵۳۰۱	تعداد حالات گذرای رخ داده غیر خطا
۵۱.۹۶۳	۸۸.۲۷۲	۹۹.۴۳۸	درصد عملکرد موفق

شکل (۳) نحوه همگرایی شاخص قابلیت اطمینان ENS را در هر سه روش مدنظر، نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است الگوریتم مونت-کارلو در هر سه روش پس از ۱۰۰۰ سال به همگرایی رسیده است و روش پیشنهادی مقدار ENS بسیار بهتری را نسبت به دو روش دیگر ایجاد نموده است. این مسئله نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان روش جدید پیشنهادی بسیار بالاتر از سایر روش‌ها است.



شکل (۳): مقایسه نمودار همگرایی شبیه‌سازی مونت کارلو در سه سناریو

پیشنهادی و تعیین صحت عملکرد آن نسبت به روش‌های سنتی از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده گردید. با استفاده از این شبیه‌سازی شاخص قابلیت اطمینان ENS و درصد عملکردهای روش پیشنهادی با روش‌های سنتی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج ارزیابی‌های انجام شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دارای قابلیت اطمینان بسیار بالاتری نسبت به سایر روش‌های تشخیص خطا است. لازم به ذکر است صحت عملکرد روش‌های مدنظر براساس عملکرد بموقع آن‌ها در قبال خطاهای دائم و

به ذکر است قابلیت اطمینان منابع تولید پراکنده ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است.

سیستم مورد مطالعه در سه سناریوی مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در سناریوی اول فرض می‌شود خطا با استفاده از یک روش سنتی و براساس بالا بودن مقدار جریان از یک مقدار آستانه توسط سرور مرکزی تشخیص داده شود. در سناریوی دوم بر اساس الگوریتم تشخیص خطای ارائه شده در مطالعه [۱۱] به تشخیص خطا پرداخته شده است و نهایتاً در سناریوی سوم از روش جدید پیشنهادی در این مقاله برای تشخیص خطا بهره گرفته شده است. نتایج این سه سناریو در جدول (۵) با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به ذکر است در تمامی سناریوهای مذکور، حالات گذرای ناشی از ورود و خروج منابع تولید پراکنده و ورود خطوط بعنوان حالات گذرا در نظر گرفته شده است.

همانطور که از نتایج جدول (۵) مشخص است، روش پیشنهادی در این مقاله از نظر هر دو معیار ENS و درصد عملکردهای صحیح (نسبت به هر دو خطای دائم و گذرا)، عملکرد قابل قبول تری نسبت به روش‌های دیگر داشته است. دلیل این مسئله آن است که روش جدید پیشنهادی، دقت فوق‌العاده‌ای در تشخیص خطاهای با جریان محدود دارد.

## ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آنکه مهمترین چالش در بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها، موضوع تشخیص خطا در آن‌ها است، لذا در این مقاله یک روش جدید تشخیص خطا معرفی شد که از انرژی سیگنال که توسط انتقال S استخراج شده است، برای تشخیص خطا بهره می‌برد. بمنظور ارزیابی روش



- عدم عملکرد آن‌ها در قبال حالات گذرا سنجیده شده است. از جمله ویژگی‌های دیگر روش جدید تشخیص خطای پیشنهادی، مستقل بودن آن از توپولوژی ریزشبهه است. بنابراین با استفاده از روش جدید پیشنهادی، می‌توان ریزشبهه‌ها را در کلیه توپولوژی‌های عملکردی آن‌ها با قابلیت اطمینان بسیار بالا حفاظت نمود.
- ### مراجع
- [12] S. A. Saleh, R. Ahshan, M. A. Rahman, M. S. A. Khaizaran, and B. Alsayed, "Implementing and testing d-q WPT-based digital protection for micro-grid systems", *IEEE Annual Meeting in Industry Applications Society (IAS)*, pp. 1-8, 2011.
- [13] S. R. Samantaray, G. Joos, and I. Kamwa, "Differential energy based microgrid protection against fault conditions", in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1-7, 2012.
- [14] H. Al-Nasseri and M. A. Redfern, "Harmonics content based protection scheme for Micro-grids dominated by solid state converters", *12th International Middle-East Conference in Power System*, pp. 50-56, 2008.
- [15] M. Petit, X. Le Pivert, and L. Garcia-Santander, "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.
- [16] R. Billinton and A. Sankarakrishnan, "A comparison of Monte Carlo simulation techniques for composite power system reliability assessment", *IEEE Proceedings Conference in WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing.*, vol.1, pp. 145-150, 1995
- [17] W. K. A. Najy, H. H. Zeineldin, and W. L. Woon, "Optimal Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capability", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 1668-1677, 2013.
- [18] G. Wacker and R. Billinton, "Customer cost of electric service interruptions", *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, pp. 919-930, 1989.
- [19] M. Gilvanejad, H. A. Abyaneh, and K. Mazlumi, "Estimation of the overload-related outages in distribution networks considering the random nature of the electrical loads", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, pp. 855-865, 2013.
- [20] R. Eslami, S. H. H. Sadeghi, H. Askarian-Abyaneh, and A. Nasiri, "A Novel Method for Fault Detection in Future Renewable Electric Energy Delivery and Management Microgrids, Considering Uncertainties in Network Topology", *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, pp. 1118-1129, 2017.
- [21] رضا اسلامی، سیدحسام‌الدین صادقی، حسین عسکریان ابیانه، "تشخیص خطا با استفاده از توالی مثبت، منفی و صفر جریان و ولتاژ نقاط مختلف ریزشبهه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توپولوژی ریزشبهه"، ژورنال علمی پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، vol. 6, pp. 107-121, 1396.
- [22] S. A. Hosseini, B. Vahidi, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and M. Karami, "A seven-state Markov model for determining the optimal operating mode of distributed generators", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, p. 033114, 2015.
- [1] T. Liang, C. Schwaegerl, S. Narayanan, and Z. Jian Hui, "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.
- [2] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "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.
- [3] W. Jiang, Z.-y. He, and Z.-q. Bo, "The Overview of Research on Microgrid Protection Development", *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)*, pp. 692-697, 2010.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. A. Redfern and H. Al-Nasseri, "Protection of micro-grids dominated by distributed generation using solid state converters", *IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection, DPSP*, pp. 670-674, 2008.
- [7] S. A. Hosseini, H. A. Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, and A. Nasiri, "An overview of microgrid protection methods and the factors involved", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 174-186, 2016.
- [8] P. Basak, S. Chowdhury, S. Halder nee Dey, and S. P. Chowdhury, "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.
- [9] H. Al-Nasseri, M. A. Redfern, and F. Li, "A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters", *General Meeting of IEEE Power Engineering Society*, 2006.
- [10] S. A. Hosseini, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, and M. Karami, "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.
- [11] A. M. El-Zonkoly, "Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation", *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1482-1490, 2011.