



Semnan University



Research Article

## Fault Detection and Classification in Two -Interconnected AC Microgrid at by Modal and Superimposed Analysis

Saber Armaghany<sup>a</sup>, Zahra Moravej<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 2023-12-23

Revised: 2024-03-29

Accepted: 2024-04-28

#### Keywords:

Islanded two interconnected AC microgrid;  
Current based protection scheme;  
Internal/External fault detection and classification;  
Modal and superimposed analysis;  
Mathematical morphology.

### ABSTRACT

In this paper, a new method is proposed for low fault resistance fault detection and classification in two interconnected microgrid with tie line connection in island situation (Islanded two interconnected AC microgrid). The proposed method classifies the types of faults based on modal and superimposed fault current analysis. In order to analyze the modal, the Clarke transform is used so that the zero-sequence current can be monitored. Also, mathematical morphology method is used to find the amount of injected fault current in signal processing context. In this article, the theory of mathematical morphology is proposed using signal closing filter to identify amplitude changes and distortion in the measured current through time domain analysis. This theory is implemented in this paper to identify and classify all types of faults in a timely manner. Additionally, comparing to another signal processing methods based on frequency domain analysis or frequency-time domain, it has the advantage of requiring a telecommunication system with lower bandwidth and cost. The proposed method for classifying single-phase to ground, two-phase to ground, and three-phase faults in two microgrids connected through a tie line has been simulated as a case study. The numerical results illustrate the efficiency and effectiveness of the proposed method in classifying the types of faults with small resistance.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32742.2593>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Zahra Moravej.

E-mail address: [zmoravej@semnan.ac.ir](mailto:zmoravej@semnan.ac.ir)

#### How to cite this article:

Armaghani, S., & Moravej, Z. (2024). Fault Detection and Classification in Two -Interconnected AC Micro-grid by Using Modal and Superimposed analysis. Journal of Modeling in Engineering, 22(79), 135-152. doi: 10.22075/jme.2024.32742.2593

# شناسایی و طبقه‌بندی خطا در دو ریز شبکه متناوب (AC) متصل بهم با استفاده از تحلیل مدال و جریان خطای تزریقی

صابر ارمانی<sup>۱</sup>، زهرا مروج<sup>۱\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲	در این مقاله، روش جدید برای طبقه‌بندی انواع خطا با مقاومت کوچک در ریز شبکه‌های متناوب دوتایی متصل بهم از طریق خط ارتباطی و در وضعیت جزیره‌ای پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی، انواع خطا را بر اساس تحلیل مدال جریان و تحلیل جریان خطای تزریقی به ریز شبکه طبقه‌بندی می‌کند. به منظور تحلیل مدال، از تبدیل کلارک استفاده می‌شود تا جریان توالی صفر قابل پایش باشد؛ و برای یافتن مقدار جریان خطا تزریق شده، از روش ریخت‌شناسی ریاضی بکار گرفته شده است. در این مقاله، تئوری ریخت‌شناسی ریاضی با استفاده از فیلتر استخراج کننده پوش سیگنال، برای شناسایی تغییرات دامنه و اعوجاج در جریان از طریق تحلیل حوزه زمان، پیشنهاد شده است؛ تا شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا به صورت بهنگام انجام شود؛ و نسبت به انواع روش‌های پردازش سیگنال مبتنی بر تحلیل حوزه فرکانس-زمان دارای مزیت نیازمندی به سیستم مخابرات با پهنای باند و هزینه کمتر است. روش پیشنهادی برای طبقه‌بندی انواع خطای تکفاز به زمین، دو فاز بهم و به زمین، و سه فاز در ریز شبکه متصل بهم از طریق خط ارتباطی متناوب به عنوان نمونه موردی پیاده‌سازی شده است؛ و نتایج عددی، کارایی و موثر بودن روش پیشنهادی در طبقه‌بندی انواع خطا با مقاومت کوچک در ریز شبکه متناوب متصل بهم از طریق خط ارتباطی را به اثبات می‌رساند.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
ریز شبکه‌های متناوب متصل بهم در وضعیت جزیره‌ای، طرح حفاظت مبتنی بر جریان، طبقه‌بندی انواع خطا، تحلیل مدال و جریان تزریقی، روش ریخت‌شناسی ریاضی.	
DOI: <a href="https://doi.org/10.22075/jme.2024.32742.2593">https://doi.org/10.22075/jme.2024.32742.2593</a>	
© 2024 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> )	

## ۱- مقدمه

بهره‌گیری مطلوب با بازده‌ای بیشتر حاصل شود. در نتیجه ریز شبکه‌ها در حقیقت شبکه‌های توزیع فعال هستند که جایگزین منابع تولید انرژی سنتی مانند نیروگاه‌های حرارتی خواهند شد. همچنین ریز شبکه‌ها شامل سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و مصرف‌کننده می‌شود که بهره‌برداری از آن از طریق سیستم‌های پایش و حفاظت کنترل می‌شود [۱]. در شرایط بهره‌برداری نرمال، معمولاً ریز شبکه‌ها از طریق کلیدهای قدرت به شبکه توزیع متصل هستند (که به آن PCC اطلاق می‌گردد)؛ تا با شبکه تبادل

ریز شبکه‌ها، شبکه‌های کوچک متشکل از تولید، انتقال، و مصرف انرژی الکتریکی هستند؛ که منابع تجدیدپذیر و یا تولید پراکنده مانند توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی، و ژنراتورهای دیزل، منابع اصلی تولیدکننده انرژی الکتریکی در درون آن‌ها محسوب می‌شود. زیرا ملاحظات فنی-اقتصادی، و زیست محیطی باعث شده است که بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر در قالب شبکه بهم متصل کوچک افزایش روزافزون پیدا کند؛ تا

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [zmoravej@semnan.ac.ir](mailto:zmoravej@semnan.ac.ir)

۱. دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استناد به این مقاله:

ارتباطی متصل هستند دچار عملکرد اشتباه شود. بدین سبب، طرح حفاظت که قادر به تفکیک خطای داخلی و خارجی در ریزشبكة‌های متصل بهم باشد بسیار با اهمیت است [۲].

از طرفی دیگر، وجود منابع تجدیدپذیر در ریزشبكة‌ها در وضعیت جزیره‌ای باعث می‌شود که دامنه جریان خطا کوچک باشد و روش‌های حفاظت سنتی مانند رله‌های اضافه جریان و یا دیستانس دچار اشتباه در شناسایی و عملکرد شوند [۴]. بدین سبب، حفاظت ریزشبكة‌ها و ریزشبكة‌های متصل بهم نیازمند تدوین طرح حفاظت جدید و نوین هستند. بعلاوه، تدوین طرح حفاظت به منظور شناسایی و تفکیک خطای داخلی و خارجی و طبقه‌بندی خطا با کمترین نیازمندی به ارتباطات مخابراتی، با کمترین نیازمندی به نصب رله‌ها در یک خط، و با کمترین نیازمندی به اندازه‌گیری سیگنال (اندازه‌گیری یکی از سیگنال‌های جریان و یا ولتاژ بجای اندازه‌گیری همزمان ولتاژ و جریان) از اولویت‌های حفاظت در ریزشبكة‌ها و ریزشبكة‌های متصل بهم محسوب می‌شود [۲].

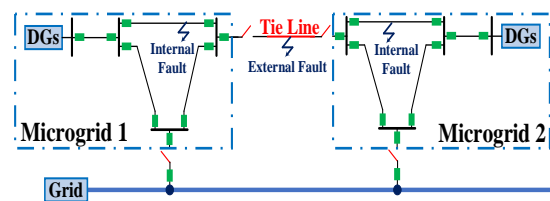
### ۱-۳- مروری بر ادبیات موضوع

مفهوم تشخیص خطا و طبقه‌بندی خطا در ریزشبكة‌های متصل بهم از سال ۲۰۱۶ میلادی مطرح شده است [۲]. در نتیجه، مراجع کمی موضوع تشخیص و تفکیک خطای داخلی و خارجی مورد مطالعه قرار داده‌اند. اما روش‌های مختلفی برای شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا در شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبكة‌های منفصل توسط محققان پیشنهاد شده است که در قالب ۴ دسته اصلی دسته‌بندی می‌شوند؛ که مروری بر مطالعات انجام شده توسط محققان دیگر در زمینه حفاظت شبکه‌های فعال و ریزشبكة‌های منفصل، می‌تواند در تدوین طرح حفاظت ریزشبكة‌های متصل بهم با هدف تشخیص و تفکیک خطای داخلی و خارجی و طبقه‌بندی آن مفید واقع شود.

روش‌های شناسایی و دسته‌بندی انواع خطا در شبکه‌های توزیع فعال و ریزشبكة‌های منفصل عبارتند از: (۱) روش‌های تحلیل فرکانس [۵، ۶]، (۲) روش‌های تحلیل امواج سیار [۷]، (۳) روش توابع پردازش سیگنال ترکیبی با روش‌های داده‌کاوی [۸-۱۷]، (۴) روش تحلیل مودال و پردازش سیگنال در حوزه زمان [۱۸-۳۱].

با توجه به کوچک بودن دامنه جریان خطا در ریزشبكة‌ها در وضعیت جزیره‌ای، روش تحلیل فرکانس جریان و ولتاژ

انرژی نمایند. اما در شرایط وقوع خطا در شبکه (ویا در ریزشبكة‌ها)، شبکه مذکور از نقطه PCC از شبکه توزیع (ویا فوق توزیع) جدا شده و در حالت جزیره‌ای قرار خواهند گرفت؛ در این شرایط بعضی از بارهای موجود در ریزشبكة‌ها خاموش خواهند شد. به منظور بهره‌برداری با قابلیت اطمینان بالا، چندین ریزشبكة به یکدیگر متصل می‌شوند. به وضعیتی که چندین ریزشبكة به یکدیگر متصل می‌شوند، ((ریزشبكة‌های متصل بهم)) گفته می‌شود.



شکل ۱- شماتیک دو ریزشبكة‌ها متصل بهم از طریق خطوط ارتباطی AC

### ۱-۲- چالش حفاظت در ریزشبكة‌های متصل بهم

ریزشبكة‌های متصل بهم می‌تواند از طریق خطوط ارتباطی AC، DC، و یا کلیدهای قدرت به یکدیگر متصل شوند [۲، ۳]. شماتیک دو ریزشبكة متصل بهم با خط ارتباطی AC در شکل (۱) نشان داده شده است. اگر چه بهره‌برداری از ریزشبكة‌های متصل بهم با خط ارتباطی AC بلحاظ بهره‌برداری دارای قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به ریزشبكة‌های منفصل (تک ریزشبكة) هستند، اما دارای چالش‌های فراوان تری از نقطه نگاه شناسایی خطا نسبت به تک ریزشبكة‌ها هستند. زیرا ساختار شبکه تغییر می‌کند و قابلیت انتشار خطا از یک ریزشبكة به ریزشبكة دیگر امکان‌پذیر می‌شود. بدین سبب، یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در حفاظت ریزشبكة‌های متصل بهم، شناسایی و تفکیک خطای داخلی و خارجی است (به ویژه در خطوطی از ریزشبكة‌ها که به خطوط ارتباطی بین ریزشبكة‌ها متصل می‌شوند). همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، خطای داخلی به خط‌هایی گفته می‌شود که در هر یک از ریزشبكة‌ها اتفاق می‌افتد. در حالی که، خطای خارجی به خط‌هایی اطلاق می‌شود که در خط ارتباطی بین ریزشبكة‌ها اتفاق بافتد. در نتیجه، وجود خطای داخلی در یک ریزشبكة، ممکن است موجب عملکرد اشتباه رله‌های نصب شده در خط ارتباطی (ویا ریزشبكة دیگر) شود. بعلاوه ممکن است وقوع خطا در خط ارتباطی باعث شود که رله‌های نصب شده در خطوطی از ریزشبكة‌ها که به خط

در [۲۴] پیشنهاد شده است. همچنین روش‌های فیلتر حوزه زمان مانند فیلتر زاویه امپدانس [۲۵]، فیلتر کالمن [۲۶]، و ریخت‌شناسی ریاضی [۲۷-۲۹] به عنوان روش‌های پردازش سیگنال نوین، در سال‌های اخیر در شناسایی خطا در ریزشکبه‌ها پیشنهاد شده و کاربرد پیدا کرده‌اند. روش ریخت‌شناسی ریاضی، ساده و سریع سیگنال را پردازش کرده و ویژگی‌های را از سیگنال استخراج می‌کند [۳۰]. بدین سبب، کاربرد گسترده‌ای در مباحث مختلف حفاظت در سیستم‌های قدرت پیدا کرده است [۳۰]. اما روش ریخت‌شناسی ریاضی برای طبقه‌بندی انواع خطا در ریزشکبه‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است.

#### ۱-۴-انگیزه برای تحقیق

مقایسه کیفی بین اهداف و روش حفاظت پیشنهادی در این مقاله با مراجع دیگر در جدول ۱ تشریح شده است تا انگیزه برای تحقیق مشخص شود. با توجه به جدول ۱، تمام روش‌های تشریح شده، در ریزشکبه‌های منفرد (منفصل) در حالت جزیره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته شده‌اند؛ و برای ریزشکبه‌های دوتایی متصل بهم با خط ارتباطی AC مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در حالی که، تمام چالش‌هایی که تشریح شد، در ریزشکبه‌های دوتایی متصل بهم نیز مطرح است. شناسایی خطای داخلی/خارجی چالشی است که در حفاظت ریزشکبه‌های متصل بهم تعریف می‌شود و در ریزشکبه تکی موضوعیت ندارد. در حالی که طبقه‌بندی انواع خطا در حفاظت ریزشکبه متصل بهم و ریزشکبه تکی مطرح می‌شود. به طور مثال، شناسایی خطای داخلی با استفاده از حفاظت اضافه جریان جهت دارد در ریزشکبه‌های متصل بهم در [۳۱] پیشنهاد شده است. در حالی که روش پیشنهادی در [۳۱] قادر به شناسایی خطای خارجی نیست. بعلاوه، طرح حفاظت [۳۱] مبتنی بر ارتباط مخابراتی، و اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در ابتدای خط است. در نتیجه، طرح [۳۱] با چالش‌هایی مانند ایجاد امنیت در تبادل اطلاعات در بستر مخابراتی و هزینه بالا روبرو است. همچنین طبقه‌بندی انواع خطا در ریزشکبه‌های متصل بهم موضوعی است که برای اولین بار در این مقاله مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و در [۳۱] مورد مطالعه قرار نگرفته است.

#### ۱-۵-نوآوری‌های مقاله

در این مقاله، به منظور طبقه‌بندی انواع خطا در ریزشکبه متصل بهم با استفاده از طرح حفاظت غیرمتمرکز (که نیازمندی سیستم مخابرات با هزینه زیاد را کاهش می‌دهد)،

در [۵، ۶] پیشنهاد شد. روش‌های تحلیل فرکانس بر اساس تحلیل هارمونیک سوم، پنجم، و هفتم برنامه‌ریزی شده‌اند [۵، ۶]. روش‌های تحلیل فرکانسی معمولاً نیازمند محاسبات زیاد است، و در نتیجه موجب افزایش زمان مورد نیاز برای تشخیص و طبقه‌بندی انواع خطا خواهد شد. روش تحلیل امواج سیار با استفاده از تحلیل و تعیین علامت امواج خطا در خطوط انتقال یکی از روش‌های موثر در شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا محسوب می‌شود [۷]. اما روش تحلیل امواج سیار، روشی مناسب برای تشخیص خطا در شبکه انتقال است. زیرا معمولاً طول خطوط در شبکه توزیع و یا ریزشکبه‌ها کوتاه است؛ که موجب افزایش فرکانس نمونه برداری به منظور بکارگیری از روش تحلیل امواج سیار در حفاظت شبکه‌های توزیع فعال و یا ریزشکبه‌ها خواهد شد. روش‌های داده‌کاوی سیگنال اندازه‌گیری شده، از انواع تبدیل‌های حوزه زمان-فرکانس مانند موجک [۸]، تبدیل اس [۹] برای شناسایی و یا طبقه‌بندی انواع خطا استفاده می‌کنند؛ که بکارگیری از روش‌های مذکور موجب افزایش زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات، و افزایش فرکانس نمونه برداری می‌شود. به منظور غلبه بر نقایص تشریح شده برای تبدیل موجک و اس، روش‌های مذکور با روش‌های شناسایی الگو [۱۰] مانند ماشین‌های پشتیبان بردار [۱۱، ۱۲]، شبکه عصبی [۱۳]، درخت تصمیم [۱۴]، [۱۵]، و آموزش عمیق [۱۶، ۱۷] ترکیب می‌شوند. اما استفاده از روش پردازش الگو باعث می‌شود که شناسایی خطا و طبقه‌بندی انواع خطا در شبکه توزیع فعال و یا ریزشکبه‌ها با دو چالش مواجه شود. بکارگیری از روش شناسایی الگو موجب افزایش ارتباطات مخابراتی به منظور ساختن طرح حفاظت متمرکز خواهد شد. ساختار حفاظت متمرکز در شبکه‌های توزیع فعال و یا ریزشکبه‌ها باعث استفاده از سیستم‌های مخابراتی با قیمت و هزینه بالا می‌شود. بعلاوه، بکارگیری از روش شناسایی الگو، نیازمند آموزش با اطلاعات زیاد و نزدیک به واقعیت است.

در مقابل، بکارگیری از روش تحلیل مودال مانند تبدیل کلارک [۱۸] و پارک [۱۸-۲۱] در شناسایی خطا در شبکه‌های توزیع فعال و یا ریزشکبه‌ها بسیار موثر هستند. بعلاوه، شناسایی خطا با استفاده از تئوری جریان خطای تزریقی در حوزه زمان در [۲۲، ۲۳] پیشنهاد شده است. زیرا ساده و سریع خطا را شناسایی می‌کنند. روش تحلیل حساسیت روش دیگر شناسایی خطا در حوزه زمان است که

از تبدیل مدال، استخراج ویژگی دامنه و اعوجاج جریان خطا با استفاده از فیلتر ریخت‌شناسی ریاضی استفاده شده است.

جدول ۱- مقایسه کیفی از اهداف و روش حفاظت بین مراجع مختلف و روش پیشنهادی

طبقه‌بندی خطا	خط ارتباطی	روش حفاظت				سیگنال‌های پایش شده		تعداد رله		تشخیص خطا		مدل ریزش‌بکه		مراجع
		حوزه زمان	پردازش سیگنال و داده‌کاوی	امواج سیار	تحلیل فرکانس	ولتاژ	جریان	۲	۱	خارجی	داخلی	متصل بهم	منفرد	
					*	*	*	*	*	*	*	*	[۵]	
					*		*	*		*	*	*	[۶]	
	*			*		*		*		*	*	*	[۷]	
			*				*	*		*	*	*	[۸]	
	*		*				*	*		*	*	*	[۹]	
*	*		*			*	*	*		*	*	*	[۱۰]	
*	*		*			*	*	*		*	*	*	[۱۱]	
*	*		*			*	*	*		*	*	*	[۱۲]	
*	*		*				*	*	*	*	*	*	[۱۳]	
*	*		*			*	*	*		*	*	*	[۱۴]	
*	*		*				*	*	*	*	*	*	[۱۵]	
*	*		*				*	*	*	*	*	*	[۱۶]	
*	*		*				*	*	*	*	*	*	[۱۷]	
		*					*	*	*	*	*	*	[۱۸]	
	*	*				*	*	*		*	*	*	[۱۹]	
	*	*					*	*	*	*	*	*	[۲۰]	
	*	*				*	*	*	*	*	*	*	[۲۱]	
	*	*				*	*	*		*	*	*	[۲۲]	
*		*					*	*	*	*	*	*	[۲۳]	
	*	*				*	*	*		*	*	*	[۲۴]	
	*	*				*	*	*	*	*	*	*	[۲۵]	
*		*					*	*	*	*	*	*	[۲۶]	
		*					*	*	*	*	*	*	[۲۷]	
	*	*					*	*	*	*	*	*	[۲۸]	
		*				*	*	*	*	*	*	*	[۳۰]	
	*	*				*	*	*	*	*	*	*	[۳۱]	
*		*					*	*	*	*	*	*	پیشنهادی	

- تدوین راهکار حفاظت بدون نیاز به شبکه ارتباط مخابراتی، نصب تنها یک رله در خط، و اندازه‌گیری فقط سیگنال جریان
- استخراج ویژگی دامنه و اعوجاج از سیگنال جریان خطا از طریق روش ریخت‌شناسی ریاضی
- استفاده از تحلیل مدال به منظور تدوین معیارهای طبقه‌بندی‌کننده
- پیشنهاد تابع ویژگی به منظور انجام طبقه‌بندی

تابع ویژگی از دامنه و اعوجاج جریان خطای تزریقی برای طبقه‌بندی انواع خطای تک‌فاز به زمین، دوفاز بهم، دوفاز بهم به زمین، سه فاز بهم در ریزش‌بکه دوتایی متصل بهم در وضعیت جزیره‌ای طبقه‌بندی می‌شوند. بعلاوه، شرایط عدم خطا و برقدار کردن ناگهانی بار بزرگ نیز از وقوع انواع خطا تفکیک می‌شود. نوآوری‌های مقاله عبارتند از:

- پیشنهاد روش شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا در دو ریزش‌بکه‌ها متصل بهم از طریق خط ارتباطی AC

$$T_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $i_{abc}$  جریان در حوزه زمان است،  $i_{\alpha\beta 0}$  جریان به ترتیب در مد  $\alpha$ ،  $\beta$ ، و توالی صفر است. جریان‌های مدال برای تحلیل جریان خطای تزریق شده استفاده می‌شود. تحلیل جریان تزریق شده توسط روش ریخت‌شناسی ریاضی انجام می‌شود. روش ریخت‌شناسی ریاضی در بخش ۲-۳ تشریح شده است.

## ۲-۲- مطالعه تزریق جریان خطا

از آنجایی منابع اصلی تولیدکننده انرژی الکتریکی در ریزشبه‌ها در وضعیت جزیره‌ای، منابع تجدیدپذیر است؛ دامنه جریان خطا کم است و اثرات آن به صورت اعوجاج در جریان ویا ولتاژ خواهد بود. همچنین به دلیل وجود اثر متقابل بین خطوط، اعوجاج از فازی به فاز دیگر انتقال می‌یابد که اندازه انتقال آن به مقدار تزویج بین خطوط ارتباط دارد. بدین سبب، اعوجاج‌های هارمونیک در تبدیل مدال نیز انتقال خواهد یافت. بدین ترتیب، با استخراج ویژگی دامنه و اعوجاج جریان‌های مدال، امکان طبقه‌بندی انواع خطا در این مقاله ایجاد شده است. استخراج ویژگی دامنه و اعوجاج توسط جریان خطای تزریق شده به جریان‌های مدال با استفاده از روش ریخت‌شناسی ریاضی انجام شده است؛ که در بخش ۲-۳ تشریح خواهد شد.

## ۲-۳- روش ریخت‌شناسی ریاضی

روش ریخت‌شناسی ریاضی، در حقیقت روش تبدیل غیر خطی است که تغییرات سریع در سیگنال را می‌تواند شناسایی کند. بدین سبب، ابزار تحلیلی مناسب برای طرح حفاظت در ریزشبه‌ها است. بر خلاف روش‌های تبدیل فوریه و موجک که مبتنی بر استخراج ویژگی‌ها و معیارهای فرکانسی، ویا فرکانسی-زمان هستند، روش ریخت‌شناسی ریاضی، ویژگی‌ها و معیارهای حوزه زمان را استخراج می‌کند. بدین سبب، بکارگیری از روش ریخت‌شناسی ریاضی باعث می‌شود که زمان مورد نیاز برای استخراج مولفه‌ها به مراتب کمتر از زمان انجام محاسبات در روش‌های فوریه ویا تبدیل موجک باشد. بعلاوه، روش ریخت‌شناسی ریاضی بلحاظ پیاده‌سازی، ساده‌تر است. زیرا

• پیشنهاد قوانین با الگوی درختی برای طبقه‌بندی انواع خطا

## ۱-۶- بخش‌بندی مقاله

ادامه این مقاله به این شرح بخش‌بندی می‌شود که روش شناسی برای طرح روش پیشنهادی در بخش دوم تشریح شده است، در بخش سوم روش پیشنهادی برای طبقه‌بندی انواع خطای در ریزشبه‌های دوتایی متصل بهم از طریق خط ارتباطی AC توضیح داده شده است، کارایی مدل پیشنهادی در بخش چهارم از طریق نتایج عددی اثبات شده است، و بخش پنجم از این مقاله به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

## ۲- تئوری‌های کاربردی در روش پیشنهادی

در این بخش، تئوری مورد نیاز برای تدوین روش پیشنهادی جهت طبقه‌بندی انواع خطای تک‌فاز به زمین، دو فاز بهم، دو فاز بهم و به زمین، و سه فاز، و همچنین طبقه‌بندی وضعیت عدم خطا از وضعیت افزایش ناگهانی بار بزرگ، تشریح می‌شود. به منظور انجام طبقه‌بندی با استفاده از روش پیشنهادی، بکارگیری از سه تئوری ضروری است که عبارتند از: (۱) تئوری تبدیل مدال (کلارک)، (۲) تئوری تزریق جریان خطا، (۳) تئوری تحلیل حالت گذرای سیگنال با روش ریخت‌شناسی ریاضی. در ادامه این بخش، تئوری‌های مذکور تشریح می‌شوند.

## ۲-۱- تبدیل مُدال

تبدیل مدال به منظور استخراج جریان توالی صفر از جریان اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. جریان سه فاز قبل از خطا دارای جریان توالی صفر با مقدار قابل اغماض است و با وقوع انواع خطای زمین، جریان توالی صفر ایجاد می‌شود. بدین سبب، در این مقاله از تحلیل جریان توالی صفر برای طبقه‌بندی انواع خطای زمین نسبت به خطاهای فاز بهم استفاده می‌شود. از طرفی دیگر، تبدیل کلارک دارای خصوصیت بازتاب‌دهندگی جریان خطای تزریق شده، نسبت به تبدیل پارک است. بدین سبب جریان‌های محور  $\alpha$  و  $\beta$  نیز برای تحلیل جریان خطای تزریقی استفاده می‌شود. تبدیل کلارک پیشنهادی در رابطه (۱) تشریح شده است.

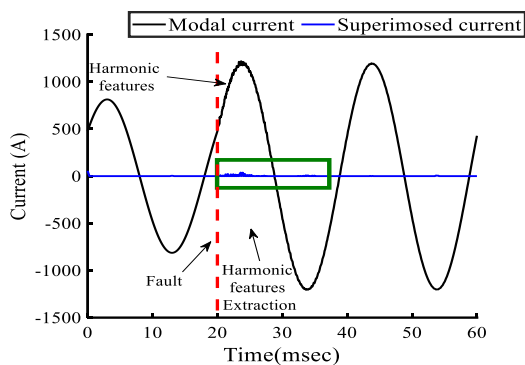
$$i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, i_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$i_{\alpha\beta 0} = T_{\theta} i_{abc}$$

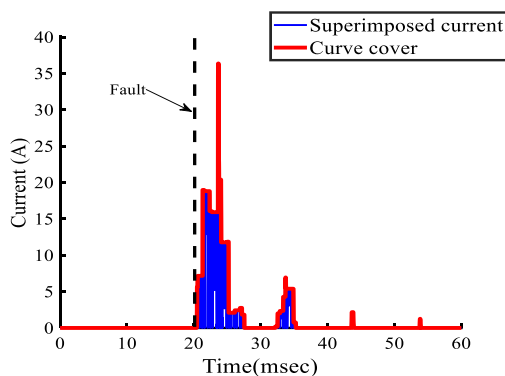
$$f_{grad}^1 = f(n) - [f(n) \bullet g(m)] \quad (6)$$

$$f_{grad} = f_{grad}^1(n) - [f_{grad}^1(n) \bullet g(m)]$$

که در آن  $f_{grad}$  مولفه اعوجاج در حوزه زمان را از سیگنال اصلی استخراج می‌کند. نمونه‌ای از ویژگی اعوجاج استخراج شده توسط فیلتر پیشنهادی و پوش اعوجاج استخراج شده توسط فیلتر رابطه (۵) به ترتیب در شکل (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده است.

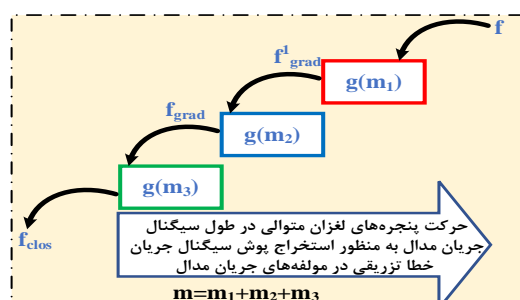


الف



ب

شکل ۲- جریان مدال و استخراج مولفه‌های اعوجاج با استفاده از روش ریخت‌شناسی ریاضی، الف) جریان مدال و جریان خطای تزریقی، ب) جریان خطای تزریقی و پوش جریان خطای تزریقی



شکل ۳- شماتیک حرکت پنجره‌های لغزان سه‌گانه به منظور استخراج پوش سیگنال جریان خطای تزریقی به جریان‌های مدال

در روش ریخت‌شناسی ریاضی از عملگرهای جبری مانند جمع، ماکزیمم، و مینیمم استفاده می‌شود.

روش ریخت‌شناسی ریاضی بر اساس ساختار تابع شناخته‌شده‌ای طرح ریزی شده است که به آن مولفه ساختاری گفته می‌شود، و وظیفه آن پردازش سیگنال است. بدین سبب، تابع مولفه ساختاری در طول سیگنال حرکت می‌کند. تابع مولفه ساختاری برای پردازش سیگنال به صورت ثابت با مقدار صفر تعیین می‌شود؛ که نقش پنجره لغزان را ایفا خواهد کرد. عملگرهای انقباض و انبساط مهم‌ترین عملگرهای روش ریخت‌شناسی ریاضی هستند. عملگر انقباض باعث فشرده شدن سیگنال و عملگر انبساط باعث گسترش یافتن سیگنال خواهد شد.

۲-۳-۱- فیلترهای اصلی روش ریخت‌شناسی ریاضی همان‌طور که تشریح شد، عملگر انقباض ( $\ominus$ ) و انبساط ( $\oplus$ ) عملگرهای اصلی روش ریخت‌شناسی ریاضی هستند. عملگرهای انقباض و انبساط به ترتیب در روابط (۳) و (۴) تشریح شده‌اند.

$$f_{ero} = f(n) \$ g(m)$$

$$= \min \{ f(n+m) - g(m) \}$$

$$(n+m) \in D_f, m \in D_g \quad (3)$$

$$f_{dil} = f(n) ! g(m)$$

$$= \max \{ f(n-m) + g(m) \}$$

$$(n+m) \in D_f, m \in D_g \quad (4)$$

که در آن  $f$  سیگنال اصلی،  $g$  تابع مولفه ساختاری،  $D_f$  و  $D_g$  به ترتیب دامنه سیگنال اصلی و تابع مولفه ساختاری است. پوش سیگنال می‌تواند از ترکیب عملگرهای انقباض و انبساط که در رابطه (۵) تشریح شده است استخراج شود.

$$f_{clos} = f(n) \bullet g(m)$$

$$= [f(n) ! g(m)] \$ g(m) \quad (5)$$

### ۲-۳-۲- استخراج جریان خطای تزریقی

در این مقاله از رابطه (۵) برای استخراج ویژگی تغییر دامنه جریان استفاده می‌شود؛ و همان‌طور که تشریح شد، جریان خطا در ریزشکبه‌ها در وضعیت جزیره‌ای به صورت اعوجاج در جریان ویا ولتاژ اندازه‌گیری نمود پیدا می‌کند. بدین سبب، استخراج مولفه ریخت اعوجاج در جریان مدهای  $\alpha$  و  $\beta$  و صفر از طریق عملگری که در رابطه (۶) تشریح شده است، قابل حصول است.

### ۲-۳-۳- استخراج بهنگام ویژگی با پنجره لغزان

#### متوالی سه‌گانه

پوش سیگنال اعوجاج در جریان خطای تزریق شده با استفاده از سه عملگر بدست آمده است (با توجه به روابط (۶) و (۵))؛ بدین سبب، تعداد سه پنجره لغزان نیاز است. در نتیجه، برای یافتن پوش سیگنال جریان خطای تزریقی، نیازمند نمونه‌برداری به تعداد مجموع طول‌های هر سه پنجره لغزان است. شکل ۳ شماتیک لغزش سه پنجره لغزان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، برای تولید یک نمونه پوش سیگنال اعوجاج جریان خطای تزریقی به جریان‌های مدال نیاز است که تعداد  $m = m_1 + m_2 + m_3$  نمونه از سیگنال جریان مدال تهیه شود. به عبارت دیگر، زمانی که پنجره مربوط به پوش سیگنال جریان تزریقی در نمونه شماره ۱ قرار دارد، پنجره  $g(m_1)$  به تعداد  $m$  نمونه بر روی سیگنال اصلی اندازه‌گیری شده لغزیده است، و تعداد  $m_2 + m_3$  نمونه سیگنال  $f_{grad}^1$  را تولید کرده است. بعلاوه، پنجره  $g(m_2)$  به تعداد  $m_2 + m_3$  بر روی سیگنال تولیدی  $f_{grad}^1$  لغزیده است و تعداد  $m_3$  سیگنال  $f_{grad}$  را تولید کرده است. در نتیجه، نحوه لغزش سه‌گانه پنجره‌های لغزان متوالی  $g(m_1)$ ،  $g(m_2)$  و  $g(m_3)$ ، استخراج ویژگی پوش سیگنال اعوجاج جریان خطای تزریقی بهنگام انجام می‌شود.

#### ۳- روش پیشنهادی

در این بخش، روش پیشنهادی برای طبقه‌بندی انواع خطا در ریزش‌بکه‌های دوتایی متصل بهم در وضعیت جزیره‌ای بر مبنای پوش سیگنال جریان خطای تزریقی به جریان‌های مدال تشریح می‌شود. فرض اصلی این مقاله، طرح غیرمتمرکز برای طبقه‌بندی انواع خطا است؛ که وقوع خطا در یک ریزش‌بکه توسط رله‌های دیگر در ریزش‌بکه دیگر قابل شناسایی نباشد؛ و این وظیفه بدون ارتباط مخابراتی و تنها توسط رله‌ها در محل انجام شود. بدین سبب، معیارهای طبقه‌بندی کننده پیشنهادی خصوصیت غیرمتمرکز بودن را ایجاد می‌کنند. لازم به ذکر است که، هدف از اتصال ریزش‌بکه‌ها به یکدیگر در وضعیت جزیره‌ای این است که بتوان از ریزش‌بکه‌ای که دارای مازاد تولید است به ریزش‌بکه‌ای که دچار کمبود تولید شده انتقال پیدا کند؛ تا بارهای کمتری در ریزش‌بکه‌ها دچار خاموشی شوند. بدین سبب، جهت عبور توان در خط ارتباطی ثابت است. از اینرو، جهت عبور توان در خطوطی از ریزش‌بکه‌ها که به خط ارتباطی متصل هستند (چالش تفکیک خطای داخلی از

خطای خارجی برای خطوط ارتباطی و خطوطی از ریزش‌بکه‌ها که به خطوط ارتباطی متصل شده‌اند تعریف می‌شود) نیز ثابت است. در نتیجه، تغییر جهت عبور توان در ناحیه حفاظتی با طرح حفاظت پیشنهادی اتفاق نخواهد افتاد؛ و تغییر جهت عبور جریان در ناحیه حفاظتی با تعریف خطای داخلی و خارجی به عنوان چالش و نگرانی در طرح حفاظتی مطرح نخواهد شد.

این بخش شامل دو بخش اصلی می‌شود که عبارتند از: (۱) قوانین طبقه‌بندی کننده انواع خطا بر اساس ویژگی‌های پوش سیگنال جریان تزریق شده، (۲) فرآیند تنظیم آستانه، و (۳) روندنمای روش پیشنهادی

#### ۳-۱- قوانین طبقه‌بندی کننده

با فرض استخراج شدن ویژگی پوش سیگنال دامنه و اعوجاج جریان خطای تزریقی در هر یک از جریان‌های مدال با استفاده از فیلترهای پیشنهادی؛ از روش پنجره نمونه‌برداری ساکن با طول ثابت برای طبقه‌بندی انواع خطا استفاده می‌شود. به این معنا که تعداد  $n$  نمونه از پوش جریان خطای تزریقی به جریان‌های مدال پایش می‌شود و قوانین برای تعداد  $n$  نمونه اعمال می‌شود. در صورتی که هیچ خطایی وجود نداشت، تعداد  $n$  نمونه دیگر از پوش جریان خطای تزریقی پایش شده و قوانین بر روی آن اعمال می‌شود. در صورتی که خطا طبقه‌بندی شده وجود داشت، قوانین نوع خطا را تشخیص خواهد داد. شاخص بیشینه تغییرات دامنه جریان مدال که از رابطه (۵) بدست خواهد آمد، در روابط (۷) تا (۹) تشریح شده است.

$$\Delta I_{clos}^0 = I_{clos}^0(n) - I_{clos}^0(1) \quad (7)$$

$$\Delta I_{clos}^\alpha = I_{clos}^\alpha(n) - I_{clos}^\alpha(1) \quad (8)$$

$$\Delta I_{clos}^\beta = I_{clos}^\beta(n) - I_{clos}^\beta(1) \quad (9)$$

که در آن  $n$  نمونه آخر در پنجره ساکن است،  $I_{clos}^0$ ،  $I_{clos}^\alpha$ ،  $I_{clos}^\beta$  به ترتیب جریان توالی صفر،  $\alpha$ ، و  $\beta$  خروجی از فیلتر رابطه (۵) است، و  $\Delta I_{grad-clos}^0$ ،  $\Delta I_{grad-clos}^\alpha$ ،  $\Delta I_{grad-clos}^\beta$  به ترتیب تغییرات دامنه جریان توالی صفر،  $\alpha$ ، و  $\beta$  است. همچنین شاخص بیشینه اعوجاج جریان که از بکارگیری روابط (۶) و (۵) بدست می‌آید، برای پنجره ساکن در روابط (۱۰) تا (۱۲) تشریح شده است.

$$\Delta I_{grad-clos}^0 = \max_{i=1:n} \{I_{grad-clos}^0(i)\} \quad (10)$$

$$\Delta I_{grad-clos}^\alpha = \max_{i=1:n} \{I_{grad-clos}^\alpha(i)\} \quad (11)$$



جریان به پیک جریان مد  $\alpha$  بین  $\beta$  است، و NZN تعداد بیشینه پوش جریان خطا غیر صفر تزریقی به جریان‌های مدال است. در خطاهای تکفاز به زمین و دوفاز بهم-به زمین، NZM حداکثر برابر عدد ۶ و حداقل برابر ۱ است. اما در خطای دوفاز بهم-سه فاز، مقدار NZN حداکثر برابر عدد ۴ و حداقل برابر عدد ۱ است، NZN در برقرار کردن بار حداکثر برابر عدد ۱ است؛ و در بدون خطا حداکثر برابر عدد صفر است. قوانین به ازای تحلیل تغییرات در پوش سیگنال جریان خطای تزریق شده به جریان مدال در جدول ۲ تشریح شده است. با توجه به جدول ۲، اگر سیگنال دیجیتال تغییرات پوش جریان توالی صفر دارای مقدار غیر صفر باشد، خطا تکفاز به زمین و یا دوفاز بهم به زمین شناسایی خواهد شد؛ اگر مقدار مذکور برابر صفر باشد، انواع خطای دوفاز بهم، سه فاز، بدون خطا، برقرار شدن ناگهانی بار بزرگ طبقه‌بندی خواهد شد. به منظور طبقه‌بندی انواع خطا، در این مقاله از مقایسه روابط (۱۴) و (۱۵) با آستانه استفاده شده است.

### ۳-۲- فرآیند تنظیم مجدد آستانه

توصیف و تشریح روشی برای تنظیم آستانه، پارامتری بسیار مهم در شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا با استفاده از طرح حفاظتی مبتنی بر تعریف آستانه است. با توجه به جدول ۱، تعداد ۵ آستانه (Th1، Th2، Th3، Th4، و Th5) برای شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا در دو ریزشکه متناوب

$$\Delta I_{grad-clos}^{\beta} = \max_{i=1:n} \{I_{grad-clos}^{\beta}(i)\} \quad (12)$$

که در آن  $\Delta I_{grad-clos}^{\beta}$ ،  $\Delta I_{grad-clos}^{\alpha}$ ،  $\Delta I_{grad-clos}^0$  به ترتیب بیشینه دامنه اعوجاج تزریق شده به جریان مد  $0$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$  در پنجره ساکن است.

برای جداسازی نوع خطای زمین از خطاهای غیر زمین، از پایش پوش جریان خطای تزریقی به جریان توالی صفر استفاده می‌شود که در رابطه (۱۳) تشریح شده است.

$$I_G^0 = \Delta I_{clos}^0 + \Delta I_{grad-clos}^0 \quad (13)$$

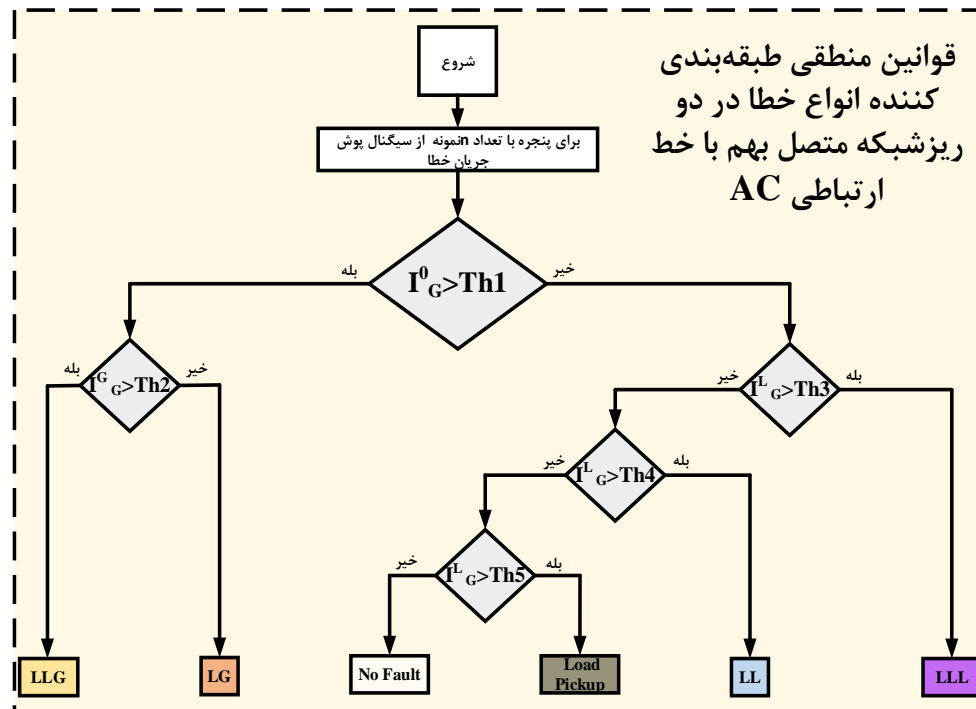
که در آن  $I_G^0$  تابع شاخص شناسایی خطا در توالی صفر است، اگر  $Th1$  آستانه تعیین کننده وجود خطا در جریان توالی صفر باشد، بیشتر بودن رابطه (۱۳) از آستانه  $Th1$  نشان‌دهنده خطاهای تکفاز به زمین و یا خطای دوفاز بهم به زمین خواهد بود. با توجه به رابطه (۱۳)، دو قانون بر اساس جریان خطای تزریقی به جریان‌های مدال  $\alpha$  و  $\beta$  تعریف می‌شود که در روابط (۱۴) و (۱۵) تشریح شده است؛ که در آن  $I_G^G$  تابع شاخص تفکیک کننده خطای تکفاز به زمین از خطای دوفاز بهم-به زمین است،  $I_G^L$  تابع شاخص تفکیک کننده خطای دوفاز بهم از خطای سه فاز و برقرار کردن ناگهانی بار است،  $\lambda$  ضریب هم‌مقیاس کننده دامنه جریان خطا و دامنه اعوجاج ایجاد شده،  $\psi_G^G$  ضریب اولویت دهی وجود اعوجاج در مد  $0$  نسبت به وجود اعوجاج در مدهای  $\alpha$  و  $\beta$  است،  $\psi_G^L$  نسبت بیشینه تغییرات دامنه

$$I_G^G = \left( \frac{NZN}{6} \right) \times \left( \Delta I_{grad-clos}^{\alpha} + \Delta I_{grad-clos}^{\beta} - \psi_G^G \times \Delta I_{grad-clos}^0 \times \lambda \times \Delta I_{clos}^0 \right) \quad (14)$$

$$I_G^L = \left( \frac{NZN}{4} \right) \times \psi_G^L \times \left( \frac{\Delta I_{clos}^{\alpha}}{\lambda} \times \frac{\Delta I_{clos}^{\beta}}{\lambda} + \left| \frac{\Delta I_{clos}^{\beta} - \Delta I_{clos}^{\alpha}}{\lambda} \right| + \left| \Delta I_{grad-clos}^{\beta} - \Delta I_{grad-clos}^{\alpha} \right| \right) \quad (15)$$

جدول ۲- قوانین منطقی برای تعیین نوع خطا

قوانین منطقی تغییرات						پوش سیگنال
قانون ۶	قانون ۵	قانون ۴	قانون ۳	قانون ۲	قانون ۱	
<Th1	<Th1	<Th1	<Th1	>Th1	>Th1	$I_G^0$
-	-	-	-	>Th2	<Th2	$I_G^G$
Th6<.<Th5	Th5<.<Th4	Th4<.<Th3	>Th3	-	-	$I_G^L$
بدون خطا	برقرار کردن بار	دوفاز بهم	سه فاز	دوفاز بهم-به زمین	تکفاز به زمین	تعیین نوع خطا



شکل ۴- روندنمای قوانین طبقه‌بندی کننده انواع خطا در دو ریزشکبه متصل بهم با خط ارتباطی AC

با توجه به شکل (۴)، گام‌های روش پیشنهادی به این شرح است که:

**گام اول)** پوش جریان خطای تزریقی در جریان مدال با استفاده از روابط (۶) و (۵) محاسبه می‌شود

**گام دوم)** تعداد نمونه  $n$  از پوش جریان خطا در هر جریان مدال پایش می‌شود

**گام سوم)** بیشینه سیگنال پوش جریان خطای تزریقی به جریان توالی صفر با مقدار آستانه  $Th1$  مقایسه می‌شود.

**گام چهارم)** اگر بیشینه مقدار پوش جریان خطای تزریقی به جریان توالی صفر بیشتر از آستانه  $Th1$  باشد، مقدار شاخص  $I_G^0$  محاسبه و گام پنجم اجرا می‌شود؛ در غیر این صورت گام ششم اجرا می‌شود.

**گام پنجم)** اگر مقدار شاخص  $I_G^0$  از آستانه  $Th2$  بیشتر باشد، نوع خطا دوفاز بهم-به زمین تشخیص و طبقه‌بندی می‌شود؛ و در غیر این صورت، خطای تکفاز به زمین تشخیص داده می‌شود و گام یازدهم اجرا خواهد شد.

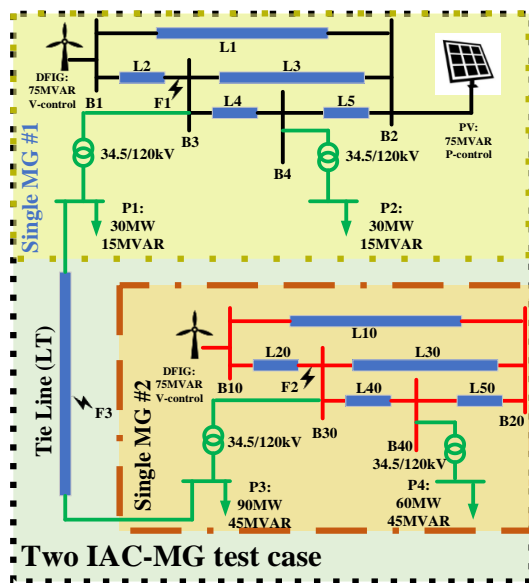
**گام ششم)** شاخص  $I_G^L$  محاسبه شده و با آستانه  $Th3$  مقایسه می‌شود.

**گام هفتم)** اگر مقدار  $I_G^L$  بیشتر از آستانه  $Th3$  باشد، نوع خطا سه فاز بهم تشخیص داده و طبقه‌بندی شده و گام

متصل بهم تعریف شده است. از آنجایی که  $Th1$  تغییرات جریان توالی صفر را مقایسه می‌کند، نیازی به تنظیم مجدد وجود ندارد. اما به ازای شرایط بهره‌برداری جدید، یا باشد که دیگر آستانه‌ها تنظیم مجدد شوند. به منظور تنظیم آستانه‌ها، تعداد سناریوهای مختلف خطای داخلی و خارجی، انواع مختلف خطای متقارن و نامتقارن، برقدار کردن ناگهانی بار، و مقاومت خطای مختلف به ازای شرایط بهره‌برداری و ساختار شبکه‌ای جدید ریزشکبه‌ها، تولید می‌شود. سناریوهای مختلف تولید شده، در نرم‌افزار  $EMTP_{RV}$  شبیه‌سازی می‌شود؛ و جریان‌های سه فاز به نرم‌افزار MATLAB منتقل می‌شوند. مقدار عددی شاخص‌های پیشنهادی در این مقاله، به کمک تحلیل مُدال و ریخت‌شناسی ریاضی محاسبه شده و تمایز بین مقادیر شاخص‌ها به ازای خطاهای داخلی و خارجی، و انواع خطاهای متقارن و نامتقارن تعیین می‌شود؛ تا برای مَعین نمودن آستانه‌ها مورد استفاده قرار بگیرند. در نهایت، مقادیر آستانه‌های تعیین شده برای تنظیم رله‌ها در شرایط بهره‌برداری واقعی استفاده می‌شوند.

### ۳-۳- روندنمای طبقه‌بندی کننده

روندنمای روش پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۵- دیاگرام تک خطی ریزشبه نمونه

پارامترهای خط ارتباطی بین دو ریزشبه و همچنین خطوط موجود در ریزشبه در جدول ۳ تشریح شده است.

جدول ۳- پارامترهای منابع تولید پراکنده

طول	پارامترهای الکتریکی						خط
	$C^0$ $\mu\text{F}/\text{km}$	$L^0$ $\text{mH}/\text{km}$	$R^0$ $\Omega/\text{km}$	$C^+$ $\mu\text{F}/\text{km}$	$L^+$ $\text{mH}/\text{km}$	$R^+$ $\Omega/\text{km}$	
۱۰۰	۰/۰۱۲۶	۰/۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۳	۰/۳	L1
۵۰	۰/۰۱۲۶	۰/۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۳	۰/۳	L2
۷۵	۰/۰۱۲۶	۰/۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۳	۰/۳	L3
۵۰	۰/۰۱۲۶	۰/۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۳	۰/۳	L4
۵۰	۰/۰۱۲۶	۰/۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۳	۰/۳	L5
۱۰۰	۰/۰۱۲۶	۰/۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۳	۰/۳	LT

خطوط ریزشبه شماره ۲ نیز مشابه پارامترهای خطوط ریزشبه شماره ۱ است. توربین‌های بادی موجود در ریزشبه نمونه مورد مطالعه در وضعیت کنترل ولتاژ است؛ همچنین واحد فتوولتائیک در وضعیت کنترل توان اکتیو قرار دارد. محدوده مجاز تولید توان منابع تجدیدپذیر و پراکنده در ریزشبه‌های نمونه مورد مطالعه با یکدیگر برابر در نظر گرفته شده است و برابر مقدار ۷۵ مگاوات آمپر است. شماتیک بلوک دیاگرام وضعیت کنترل ولتاژ توربین‌های بادی در شکل (۶) نشان داده شده است. وضعیت کنترل ولتاژ در حقیقت مقدار ولتاژ مرجع تنظیم شده را ردیابی می‌کند. جزئیات تکمیلی از وضعیت کنترل ولتاژ توربین‌های بادی که در این مقاله مدل‌سازی شده است در [۳۲] تشریح شده است. همچنین، وضعیت کنترل توان اکتیو که معمول‌ترین فرضیه در مدل‌سازی واحدهای فتوولتائیک است، و در [۳۳] تشریح شده است؛ در این مقاله مدل‌سازی شده است. بلوک دیاگرام کنترل توان اکتیو که در واحد

یازدهم اجرا می‌شود؛ در غیر این صورت، گام هشتم اجرا می‌شود.

**گام هشتم)** اگر مقدار  $I_G^L$  بیشتر از آستانه Th4 باشد، نوع خطا دو فاز بهم تشخیص داده و طبقه‌بندی شده و گام یازدهم اجرا می‌شود؛ در غیر این صورت، گام نهم اجرا می‌شود.

**گام نهم)** اگر مقدار  $I_G^L$  بیشتر از آستانه Th5 باشد، نوع تغییرات در دسته بردار شدن ناگهانی بار بزرگ طبقه‌بندی شده و گام دهم اجرا می‌شود؛ در غیر این صورت، گام دهم اجرا می‌شود.

**گام دهم)** اعلام عدم وجود خطا و پاک کردن پنجره نمونه و اجرای گام اول. اگر سیگنال دیجیتال جریان خطای تزریقی به مد  $\alpha$  بزرگ‌تر از عدد صفر بود گام یازدهم اجرا می‌شود.

**گام یازدهم)** پایان روند طبقه‌بندی و تشخیص خطا.

#### ۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این بخش از مقاله، عملکرد روش پیشنهادی برای طبقه‌بندی انواع خطا در دو ریزشبه متصل بهم با خط ارتباطی AC مورد مطالعه قرار گرفته است. ریزشبه AC متصل بهم دوتایی در نرم افزار EMTPRV شبیه‌سازی شده است.

#### ۴-۱- دو ریزشبه متصل بهم مورد مطالعه

دیاگرام تک خطی دو ریزشبه ۳۴/۵ کیلوولت که با خط ارتباطی با ولتاژ ۱۲۰ کیلوولت به یکدیگر متصل شده‌اند در شکل (۵) نشان داده شده است. ریزشبه نمونه مورد مطالعه در این مقاله، متشکل از دو ریزشبه مشابه به یکدیگر است که مقادیر پارامترهای آن در [۲۳] تشریح شده است. در حقیقت، ریزشبه مورد مطالعه در این مقاله شکل توسعه یافته ریزشبه [۲۳] است که به صورت دو ریزشبه متصل بهم تبدیل و به عنوان نمونه مورد پیشنهاد شده است. همچنین به ریزشبه [۲۳]، واحد فتوولتائیک نیز اضافه شده است. بعلاوه، به دلیل صحت سنجی عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا، از منابع سنکرون در بهره‌برداری ریزشبه مورد مطالعه استفاده نشده است. زیرا وجود منابع سنکرون به دلیل بالا بودن سطح اتصال کوتاه، باعث افزایش دامنه خطا خواهند شد و امر شناسایی خطا با استفاده از روش‌های مبتنی بر پایش و تحلیل جریان را با چالش کمتری روبرو خواهد کرد.

جدول ۴- پارامترهای منابع تولید پراکنده

منابع	مقادیر نامی				کنترل کانورتور	
	توان مگاوات آمپر	ولتاژ	kv	فرکانس	PWM	نمونه برداری
توربین بادی	۷۵	۳۴/۵	۲	۱۲۵۰۰	۲۵۰۰	
فتوولتائیک	۷۵	۳۴/۵	۲	۱۲۵۰۰	۴۵۰۰	

جدول ۵- پارامترهای بار استاتیکی

شماره ریزشبه	شماره بار	مقدار نامی		
		توان کتیو مگاوات	توان راکتیو مگاوار	ولتاژ کیلوولت
۱	۱	۳۰	۱۵	۱۲۰
	۲	۳۰	۱۵	۱۲۰
۲	۱	۳۰	۴۵	۱۲۰
	۲	۳۰	۴۵	۱۲۰

جدول ۶- مقادیر آستانه و پارامتر تعریف شده در روش

پیشنهادی

محل خطا	Th1	Th2	Th3	Th4	Th5	$\lambda$	$\psi^G$
F1	۱	۰	۳۰۰	۲۲	۰/۵	۱۰۰	۰/۶
F2	۱	۰	۳۰۰	۲۲	۰/۵	۱۰۰	۰/۵
F3	۱	۰	۳۰	۱/۶	۰/۱	۱۰۰	۳

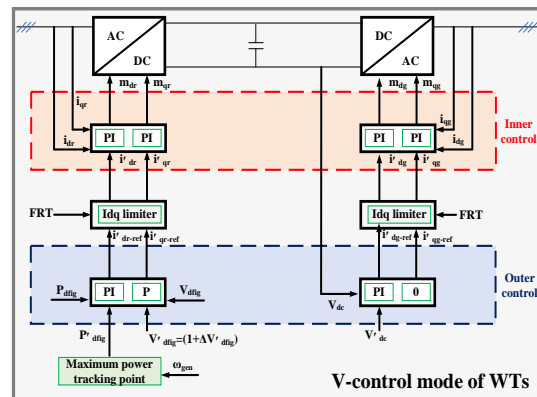
۴-۲- سناریوهای خطا در دو ریزشبه متصل بهم

از آنجایی که چالش اصلی در طبقه‌بندی انواع خطا در دو ریزشبه متصل بهم (با توجه به شکل ۵)، وقوع خطا در خطوط L20، LT، و L2 است، سناریوهای مختلف از وقوع انواع خطا در سه محل F1، F2، و F3 تولید می‌شود. مقاومت خطا به زمین (تکفاز به زمین، و دوفاز بهم به زمین) در تمام سناریوهای تولید شده در بخش‌های ۴-۳ تا ۴-۶ برابر صفر است و تاثیر مقادیر مختلف مقاومت خطا در بخش ۴-۷ مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفته است. مقادیر مختلف آستانه برای محل خطاهای F1، F2، و F3 در جدول ۶ تشریح شده است.

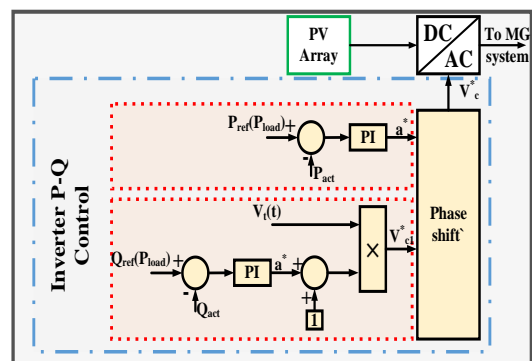
۴-۳- طبقه‌بندی انواع خطا در خط L2

در این بخش وقوع انواع خطا در انتهای خط شماره ۲ شبیه‌سازی می‌شود. زمان وقوع خطا در ۲۰ میلی ثانیه بوده است و جریان تا ۶۰ میلی ثانیه پایش می‌شود.

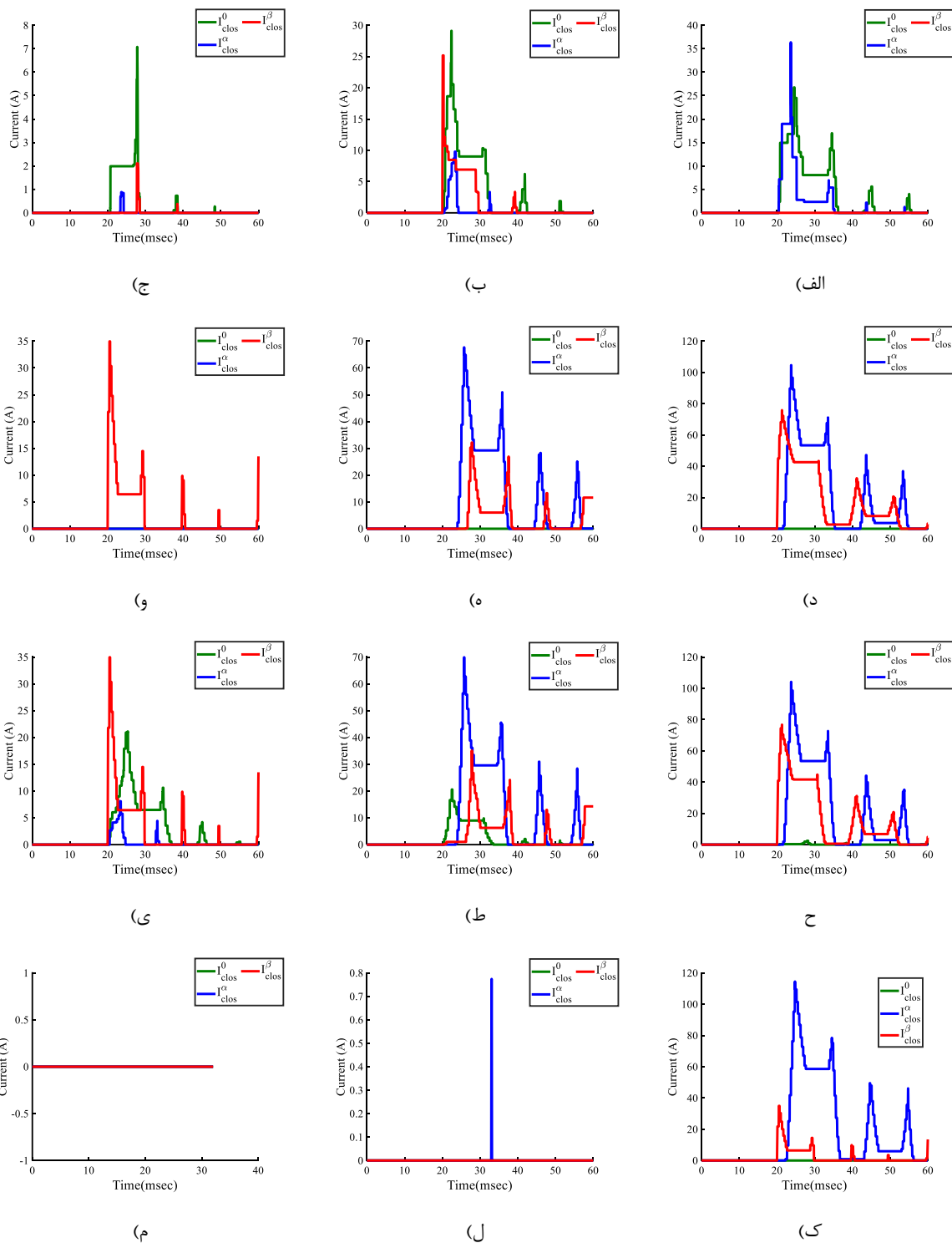
فتوولتائیک مدل‌سازی شده است در شکل (۷) نشان داده شده است. پارامترهای حلقه‌های کنترلی توربین‌های بادی و فتوولتائیک مدل‌سازی شده در این مقاله در جدول ۴ تشریح شده‌اند. بعلاوه، پارامترهای بارهای استاتیکی ریزشبه‌های نمونه موردی در جدول ۵ تشریح شده است. با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، جهت پخش توان در خط ارتباطی از سوی ریزشبه شماره ۱ به ریزشبه شماره ۲ است. جهت عبور توان از خط ارتباطی LT در دو ریزشبه متصل بهم مورد مطالعه از ریزشبه شماره ۱ به ریزشبه شماره ۲ است و همواره ثابت است. همچنین جهت عبور توان در خط L2 در ریزشبه ۱ همواره در جهت تزریق توان به خط ارتباطی LT است. بعلاوه، جهت انتقال توان در خط L20 در ریزشبه شماره ۲ در جهت تامین بار متصل به انتهای خط ارتباطی در ریزشبه شماره ۲ است. بدین سبب، تغییرات جهت انتقال توان در ناحیه‌های حفاظتی که تفکیک خطای داخلی از خارجی در آن‌ها مطرح خواهد بود همواره ثابت است.



شکل ۶- بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ در مدل‌سازی توربین بادی



شکل ۷- بلوک دیاگرام کنترل توان اکتیو در مدل‌سازی واحد فتوولتائیک



شکل ۸- تغییرات پوش جریان خطای تزیقی به جریان های مدال، الف) خطای تکفاز فاز A به زمین، ب) خطای تکفاز B به زمین، ج) خطای تکفاز C به زمین، د) خطای دوفاز AB بهم، ه) خطای دوفاز AC بهم، و) خطای دوفاز BC بهم، ح) خطای دوفاز AB بهم- به زمین، ط) خطای دوفاز AC بهم- به زمین، ی) خطای سه فاز ABC بهم، ل) افزایش بار P1، م) بدون خطا

مستقیماً از تعریف آستانه استفاده کرد. بدین سبب، شاخص‌های  $I_G^L$  و  $I_G^G$  در این مقاله تعریف شده است. مقادیر شاخص‌های  $I_G^L$  و  $I_G^G$  به ازای هر یک از انواع خطاهای متقارن و نامتقارن در جدول ۷ تشریح شده است.

جدول ۸ - سناریوهای مختلف از انواع خطا در ریزشکبه شماره ۲ (خط L20) و عملکرد روش پیشنهادی در طبقه‌بندی خطا

نوع خطا در L20	$I_G^L$	$I_G^G$	$I_G^0$	طبقه‌بندی خطا از رله L20
تکفاز AG	-	-۱۸/۷۶	۱۸/۱۲	LG
تکفاز BG	-	-۶۳/۱۷	۳۲/۳۳	LG
تکفاز CG	-	-۰/۰۶	۰/۰۵	LG
دو فاز بهم ABG	-	۱۷۷/۳۹	۴۰۳/۴	LLG
دو فاز بهم ACG	-	۵۱/۲۵	۲۰/۵۱	LLG
دو فاز بهم BCG	-	۳۹/۶۷	۱۸/۰۵	LLG
دو فاز بهم AB	۲۴/۳۹	-	.	LL
دو فاز بهم AC	۱۵۴/۲۹	-	.	LL
دو فاز بهم BC	۷۵/۳۳	-	.	LL
سه فاز ABC	۳۴۷/۱۷	-	.	LLL
برق‌دار کردن بار P3	۳/۴۳	-	.	Load Pickup
زمان شناسایی و طبقه‌بندی خطا				۲۰ میلی‌ثانیه

#### ۴-۴- طبقه‌بندی انواع خطا در خط L20

در این بخش، انواع خطا در ریزشکبه شماره ۲ شبیه‌سازی می‌شود تا عملکرد روش پیشنهادی در طبقه‌بندی انواع خطا مورد بررسی قرار بگیرد. فرض می‌شود انواع خطا در خط L20 اتفاق بیافتد. زیرا خط L20 به خط ارتباطی بین دو ریزشکبه متصل است. نتایج حاصل از شاخص‌های  $I_G^L$ ،  $I_G^G$  و  $I_G^0$  مربوط به انواع خطا در خط L20 در جدول ۸ تشریح شده است. همچنین مدت زمان لازم برای شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا در این بخش برابر ۲۰ میلی‌ثانیه است. جدول ۸، دقت روش پیشنهادی در طبقه‌بندی انواع خطا در ریزشکبه شماره ۲ را اثبات می‌کند.

#### ۴-۵- طبقه‌بندی انواع خطا در خط LT

در این بخش، انواع خطا در خط ارتباطی بین دو ریزشکبه شماره ۱ و ۲ شبیه‌سازی می‌شود تا عملکرد روش

جدول ۷ - سناریوهای مختلف از انواع خطا در ریزشکبه شماره ۱ (خط L2) و عملکرد روش پیشنهادی در طبقه‌بندی خطا

نوع خطا در L2	$I_G^L$	$I_G^G$	$I_G^0$	طبقه‌بندی خطا از رله L2
تکفاز AG	-	-۳۶/۸۹	۲۶/۷۵	LG
تکفاز BG	-	-۵۸/۴۶	۲۹/۱۱	LG
تکفاز CG	-	-۱۴/۳۲	۷/۰۸	LG
دو فاز بهم ABG	-	۲۰۵/۸۸	۲/۴۷	LLG
دو فاز بهم ACG	-	۹۲/۰۸	۲۰/۵۸	LLG
دو فاز بهم BCG	-	۸/۷۶	۲۱/۱۱	LLG
دو فاز بهم AB	۸۸/۶۴	-	.	LL
دو فاز بهم AC	۲۸۲/۵۶	-	.	LL
دو فاز بهم BC	۱۰۱/۰۶	-	.	LL
سه فاز ABC	۷۲۰/۵۷	-	.	LLL
برق‌دار کردن بار P1	۰/۵۴	-	.	Load Pickup
زمان شناسایی و طبقه‌بندی خطا				۲۰ میلی‌ثانیه

جریان‌های پوش جریان‌های خطای تزریقی به هر یک از جریان‌های مدال در شکل (۸-الف تا م) نشان داده شده است. بعلاوه، تعداد نمونه‌برداری در پنجره مربوط به اعمال قوانین برابر به اندازه یک سیکل در نظر گرفته شده است که با فرکانس نمونه برداری به مقدار ۱۰ کیلوهرتز برابر ۲۰۰ نمونه خواهد شد. زیرا تغییرات در یک سیکل با دقت بیشتر طبقه‌بندی خواهند شد. بدین سبب، مدت زمان لازم برای شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا با روش پیشنهادی برابر ۲۰ میلی‌ثانیه است. همانطور که از شکل (۸) مشخص است، مقادیر پوش جریان خطای تزریقی به جریان توالی صفر به ازای خطای تکفاز به زمین (شکل ۸-الف تا ج) و دوفاز بهم- به زمین (شکل ۸-ح تا ی) مقادیر غیر صفر دارند. مقادیر پوش جریان خطای تزریقی به جریان توالی صفر در خطای دوفاز بهم- به زمین بسیار کمتر از مقادیر پوش جریان خطای تزریقی به جریان‌های مد  $\alpha$ ، و  $\beta$  است. بعلاوه، مقادیر پوش جریان خطای تزریقی به جریان توالی صفر در خطای دو فاز بهم (شکل ۸-د تا و)، سه فاز (شکل ۸-ک)، برقدار کردن بار (شکل ۸-ل) برابر عدد صفر است. همچنین، تغییرات پوش جریان خطای تزریقی به هر یک از جریان‌های مدال دارای الگوی یکسانی نیستند که بتوان

شماره ۱) باشد و سیگنال‌های جریان خط L20 (ریزشبکه شماره ۲) و خط ارتباطی LT پایش شده و به روش پیشنهادی اعمال می‌شود. در این صورت نتایج حاصل از بکارگیری روش پیشنهادی در جدول ۱۰ تشریح شده است.

جدول ۱۰- سناریوهای مختلف از انواع خطا در خط ارتباطی بین ریزشکه شماره ۱ و ۲ (خط LT) و عملکرد روش

نوع خطا در L2	$I_G^L$	$I_G^G$	$I_G^0$	نوع خطا در L2
تکفاز AG	۰/۵۷	-	۰	تکفاز AG
تکفاز BG	۰/۰۸	-	۰	تکفاز BG
تکفاز CG	۰/۷۵	-	۰	تکفاز CG
دو فاز بهم ABG	۱۵/۲	-	۰	دو فاز بهم ABG
دو فاز بهم ACG	۱۲/۳	-	۰	دو فاز بهم ACG
دو فاز بهم BCG	۶/۲	-	۰	دو فاز بهم BCG
دو فاز بهم AB	۱/۳۲	-	۰	دو فاز بهم AB
دو فاز بهم AC	۱/۲۱	-	۰	دو فاز بهم AC
دو فاز بهم BC	۴/۷۸	-	۰	دو فاز بهم BC
سه فاز ABC	۲۰/۲۲	-	۰	سه فاز ABC
برق‌دار کردن بار P1	۰/۴	-	۰	برق‌دار کردن بار P1
نوع خطا در L2	$I_G^L$	$I_G^G$	$\Delta I_{\text{clos}}^0$	نوع خطا در L2
تکفاز AG	۰/۳	-	۰	تکفاز AG
تکفاز BG	۱/۲	-	۰	تکفاز BG
تکفاز CG	۰	-	۰	تکفاز CG
دو فاز بهم ABG	۰/۷۷	-	۰	دو فاز بهم ABG
دو فاز بهم ACG	۰	-	۰	دو فاز بهم ACG
دو فاز بهم BCG	۱/۴	-	۰	دو فاز بهم BCG
دو فاز بهم AB	۱/۵۳	-	۰	دو فاز بهم AB
دو فاز بهم AC	۰/۰۱	-	۰	دو فاز بهم AC
دو فاز بهم BC	۰/۳۳	-	۰	دو فاز بهم BC
سه فاز ABC	۰/۷۷	-	۰	سه فاز ABC
برق‌دار کردن بار P1	۰/۱۱	-	۰	برق‌دار کردن بار P1

پیشنهادی در طبقه‌بندی انواع خطا مورد بررسی قرار بگیرد.

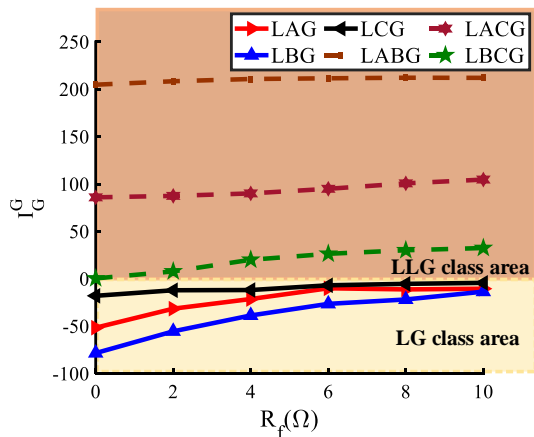
جدول ۹- سناریوهای مختلف از انواع خطا در خط ارتباطی (خط LT) و عملکرد روش پیشنهادی در طبقه‌بندی خطا

نوع خطا در LT	$I_G^L$	$I_G^G$	$I_G^0$	نوع خطا در LT
تکفاز AG	-	-۲۰/۱۵	۴/۱۵	تکفاز AG
تکفاز BG	-	-۲۳/۰۵	۲/۳۶	تکفاز BG
تکفاز CG	-	-۴/۱۲	۱۵۴/۱۱	تکفاز CG
دو فاز بهم ABG	-	۵/۱۵	۵۴۵/۴۲	دو فاز بهم ABG
دو فاز بهم ACG	-	۱/۲۷	۱۹۲/۸۲	دو فاز بهم ACG
دو فاز بهم BCG	-	۳/۲۲	۳۹۲/۸۹	دو فاز بهم BCG
دو فاز بهم AB	۱۵/۹۹	-	۰	دو فاز بهم AB
دو فاز بهم AC	۱۵/۹۵	-	۰	دو فاز بهم AC
دو فاز بهم BC	۲/۵۰	-	۰	دو فاز بهم BC
سه فاز ABC	۴۴/۷۵	-	۰	سه فاز ABC
برق‌دار کردن بار P1	۰/۱۱	-	۰	برق‌دار کردن بار P1
برق‌دار کردن بار P3	۰/۸۹	-	۰	برق‌دار کردن بار P3
زمان شناسایی و طبقه‌بندی خطا		۲۰ میلی‌ثانیه		

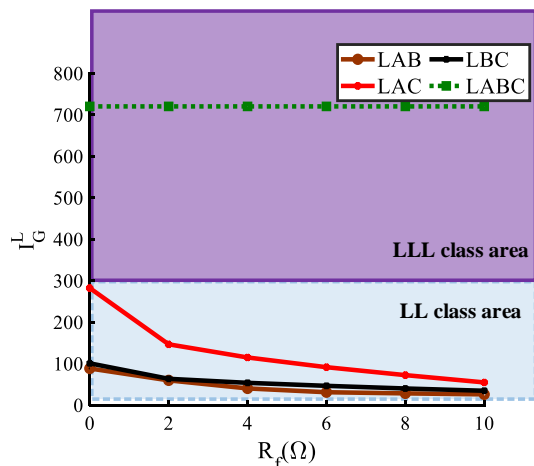
محل خطا در وسط خط ارتباطی در نظر گرفته شده است. و فرض می‌شود انواع خطا در خط LT اتفاق بیافتد. نتایج حاصل از شاخص‌های  $I_G^L$ ،  $I_G^G$ ،  $I_G^0$  مربوط به انواع خطا در خط LT در جدول ۹ تشریح شده است. همچنین مدت زمان لازم برای شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا در این بخش برابر ۲۰ میلی‌ثانیه است. جدول ۹، دقت روش پیشنهادی در طبقه‌بندی انواع خطا در خط ارتباطی ریزشکه شماره ۱ و ۲ را اثبات می‌کند.

#### ۴-۶- تاثیر وقوع خطا بر طبقه‌بندی نوع خطا

از آنجایی که شناسایی و طبقه‌بندی خطا در محل وقوع خطا باعث می‌شود تا نیاز به وجود سیستم مخابراتی پرهزینه کاهش یابد، در این بخش محلی بودن روش پیشنهادی مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد؛ تا بی‌نیازی روش پیشنهادی به سیستم مخابراتی پرهزینه به اثبات برسد. بدین سبب، فرض می‌شود که وقوع انواع خطا در خط L2 (ریزشبکه



الف



ب

شکل ۹- تغییرات معیارهای  $I_G^G$  و  $I_G^L$  به ازای تغییرات مقاومت خطا، الف) تغییرات  $I_G^G$ ، ب) تغییرات  $I_G^L$

#### ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، وقوع انواع خطا در دو ریزشکبه متصل بهم از طریق خطوط ارتباطی AC طبقه‌بندی شد. به منظور انجام طبقه‌بندی، روش جدید پیشنهاد شد؛ که دلیل استفاده از تحلیل حوزه زمان دارای سرعت بالا در طبقه‌بندی است و همچنین طبقه‌بندی انواع خطا را به صورت محلی طبقه‌بندی می‌کند. بدین سبب، نیازمند سیستم مخابراتی با هزینه زیاد در حفاظت ریزشکبه‌ها نیست. روش پیشنهاد از تحلیل مدال و استخراج ویژگی‌ها در حوزه زمان استفاده می‌کند. از آنجایی که وقوع خطا دامنه جریان قبل از وقوع خطا را تغییر می‌دهد و همچنین آن را دچار اعوجاج می‌کند، تحلیل جریان خطای تزریق شده به منظور انجام طبقه‌بندی انواع خطا پیشنهاد شده است. به منظور تحلیل جریان خطای تزریق شده، از روش ریخت‌شناسی ریاضی استفاده شده است. خصوصیت تغییر دامنه و اعوجاج جریان خطا

جدول ۱۰ تشریح می‌کند که اگر خطا در ریزشکبه شماره ۱ اتفاق بیافتد، از دیدگاه رله‌های  $L20$  و  $LT$  به صورت برقرار کردن ناگهانی بار ویا بدون خطا طبقه‌بندی می‌شود. همچنین تشریح می‌کند که وقوع انواع خطای فاز به زمین (تکفاز و دوفاز بهم و به زمین) در ریزشکبه شماره ۱، باعث می‌شود که جریان توالی صفر به ریزشکبه شماره ۲ ویا خط ارتباطی انتشار نیابد. همچنین مدت زمان لازم برای شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا در این بخش برابر ۲۰ میلی‌ثانیه است. در نهایت، جدول ۱۰، خصوصیت محلی بودن روش پیشنهادی در طبقه‌بندی نوع خطا (که تشریح کننده عدم نیاز به سیستم مخابراتی با هزینه زیاد است) را به اثبات می‌رساند.

#### ۴-۷- تاثیر مقاومت خطا در طبقه‌بندی انواع خطا

در این بخش، سناریوهای مختلف از مقاومت خطا کوچک بین صفر تا ۱۰ اهم با گام تغییرات ۲ اهم در ریزشکبه اول تولید شده است که نتایج آن در شکل (۹-الف و ب) نشان داده شده است. همچنین مدت زمان لازم برای شناسایی و طبقه‌بندی انواع خطا در این بخش برابر ۲۰ میلی‌ثانیه است. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در برابر تغییرات مقاومت خطا، نتایج عدد برای طبقه‌بندی انواع خطاهای فاز به زمین و خطاهای فاز بهم به ترتیب در شکل‌های (۹-الف و ب) نشان داده شده‌اند. همانطور که از شکل (۹-الف و ب) مشخص است، روش پیشنهادی با مقادیر آستانه تشریح شده در جدول ۶ می‌تواند نوع خطا را به ازای افزایش مقاومت خطا تا ۱۰ اهم به طور صحیح طبقه‌بندی کند. همچنین، با افزایش مقاومت خطا تا ۱۰ اهم، معیار  $I_G^G$  افزایش می‌یابد؛ که باعث می‌شود خطاها در دسته تکفاز به سمت عدد صفر میل کرده و در نهایت موجب تعریف مقدار جدید آستانه به ازای مقاومت‌های خطا بیشتر از عدد ۱۰ اهم شود. بعلاوه، مقدار معیار  $I_G^L$  برای خطاهای دوفاز بهم به ازای افزایش مقاومت خطا کاهش یافته و به مقدار مرز با طبقه ((برقرار کردن ناگهان بارهای بزرگ)) نزدیک شود. به طوریکه، طبقه‌بندی انواع خطاهای دوفاز بهم به ازای مقاومت کوچک تر از ۱۰ اهم به صورت صحیح طبقه‌بندی شده است و تمایز مطلوبی با خطاهای سه فاز بهم دارد. در حالی که به ازای مقاومت‌های بیشتر از ۱۰ اهم، لازم است که مقادیر آستانه تشریح شده در جدول ۶ مجدداً تنظیم شود.



استفاده می‌کنند و دارای ساختار پیچیده‌تری با نیازمندی به استفاده از وسایل اندازه‌گیری بیشتری خواهند بود.

- آستانه‌های تعریف شده در روش پیشنهادی ثابت نبوده و با تغییر مقاومت خطا نیازمند تنظیم مجدد است. به‌طوریکه روش پیشنهادی در کاربردهای طبقه‌بندی انواع خطا با مقاومت کوچک مطلوب عمل خواهد کرد. و برای طبقه‌بندی انواع خطا با مقاومت بالا نیازمند تنظیم مجدد آستانه است؛ که جزء اهداف این مقاله قرار نداشته و در آینده مورد تحقیق قرار خواهد گرفت.

توسط روش ریخت شناسی ریاضی از جریان قبل از خطا استخراج شده و ویژگی‌های طبقه‌بندی نوع خطا، بر اساس خصوصیت‌های استخراج شده از جریان خطای تزریق شده تعریف می‌شوند. نتایج عددی از بکارگیری روش پیشنهادی، کارایی این روش را اثبات کردند؛ و نشان دادند که:

- روش پیشنهادی تنها از سیگنال‌های جریان برای طبقه‌بندی استفاده می‌کند، و عمل طبقه‌بندی را به‌هنگام و با دقت بالا انجام می‌دهد. در حالی که، روش‌های طبقه‌بندی خطا در ریزشیکه‌ها (که از سوی محققان دیگر پیشنهاد شده است) از سیگنال ولتاژ و جریان

## مراجع

- [1] L. Bagherzadeh, H. Shahinzadeh, and G.B. Gharehpetian. "Scheduling of distributed energy resources in active distribution networks considering combination of techno-economic and environmental objectives." *In 2019 International Power System Conference (PSC)*, pp. 687-695. IEEE, 2019.
- [2] J. De La Cruz, Y. Wu, JE. Candelo-Becerra, J.C. Vásquez, and J.M. Guerrero. "A review of networked microgrid protection: Architectures, challenges, solutions, and future trends." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* (2023).
- [3] B. John, A. Ghosh, M. Goyal, and F. Zare. "A DC power exchange highway based power flow management for interconnected microgrid clusters." *IEEE Systems Journal* 13, no. 3 (2019): 3347-3357.
- [4] S. Abuzari, and P. Omid. "Coordination of overcurrent relays in microgrids according to the input and output of resources." *Modeling in Engineering* 20, no. 70 (2022): 33-49 (in Persian)
- [5] D.C. Yu, and S.H. Khan. "An adaptive high and low impedance fault detection method." *IEEE Transactions on Power Delivery* 9, no. 4 (1994): 1812-1821.
- [6] H. Bai, J.H. Gao, Li. Wei, K. Wang, and M.F. Guo. "Detection of High-Impedance Fault in Distribution Networks Using Frequency-Band Energy Curve." *IEEE Sensors Journal* (2023).
- [7] M. Banafer, and S.R. Mohanty. "Traveling wave based primary protection and fault localization scheme for MTDC grid considering IEC 61869-9 measurement standard." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (2023).
- [8] S.h. Som, and R.S. Subhransu. "Wavelet based fast fault detection in LVDC micro-grid." *In 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 87-92. IEEE, 2017.
- [9] E.M. Amiri, and B. Vahidi. "Integrated protection scheme for both operation modes of microgrid using S-Transform." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 121 (2020): 106051.
- [10] S.h. Baloch, S.S. Samsani, and M.S. Muhammad. "Fault protection in microgrid using wavelet multiresolution analysis and data mining." *IEEE Access* 9 (2021): 86382-86391.
- [11] P. Venkata, V. Pandya, and A.V. Sant. "Data mining model based differential microgrid fault classification using svm considering voltage and current distortions." *J. Oper. Autom. Power Eng* 11, no. 3 (2023): 162-172.
- [12] R. Aiswarya, D.S. Nair, T. Rajeev, and V. Vinod. "A novel SVM based adaptive scheme for accurate fault identification in microgrid." *Electric Power Systems Research* 221 (2023): 109439.
- [13] J.B. Thomas, S.G. Chaudhari, K.V. Shihabudheen, and N.K. Verma. "CNN-based transformer model for fault detection in power system networks." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 72 (2023): 1-10.
- [14] S. Baloch, and M.S. Muhammad. "An intelligent data mining-based fault detection and classification strategy for microgrid." *IEEE Access* 9 (2021): 22470-22479.
- [15] Z. Moravej, and M. Ghahremani. "High impedance fault detection and classification based on pattern recognition." *In Modernization of Electric Power Systems: Energy Efficiency and Power Quality*, pp. 487-512. Cham: Springer International Publishing, 2023.

- [16] J.Q. James, Y. Hou, A.Y. Lam, and V.O. Li. "Intelligent fault detection scheme for microgrids with wavelet-based deep neural networks." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 2 (2017): 1694-1703.
- [17] L.M. Kandasamy, and K. Jaganathan. "Intelligent Fault Diagnosis Using Deep Learning for a Microgrid with High Penetration of Renewable Energy Sources." *Electric Power Components and Systems* 51, no. 4 (2023): 332-350.
- [18] E.B. Rocha, O.E. Batista, and D.S.L. Simonetti. "Differential analysis of fault currents in a power distribution feeder using ABC,  $\alpha\beta 0$ , and DQ0 reference frames." *Energies* 15, no. 2 (2022): 526.
- [19] S. Ansari, and O.H. Gupta. "Differential negative sequence power angle-based protection of microgrid feeders." *Electric Power Components and Systems* 49, no. 18-19 (2022): 1417-1431.
- [20] A. Farshadi, B.K. Eydi, H. Nafisi, H. Askarian-Abyaneh, and A. Beiranvand. "Rate of Change of Direct-Axis Current Component Protection Scheme for Inverter-Based Islanded Microgrids." *IEEE Access* (2023).
- [21] H. Lahiji, F.B. Ajaei, and R.E. Boudreau. "Non-pilot protection of the inverter-dominated microgrid." *IEEE Access* 7 (2019): 142190-142202.
- [22] S. Ansari, O.H. Gupta, and O.P. Malik. "Fault Detection for Microgrid Feeders using Features Based on Superimposed Positive-Sequence Power." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* (2023).
- [23] A.M. Jarrahi, H. Samet, and T. Ghanbari. "Protection framework for microgrids with inverter-based DGs: A superimposed component and waveform similarity-based fault detection and classification scheme." *IET Generation, Transmission & Distribution* 16, no. 11 (2022): 2242-2264.
- [24] N.K. Sharma, and S.R. Samantaray. "PMU assisted integrated impedance angle-based microgrid protection scheme." *IEEE Transactions on Power Delivery* 35, no. 1 (2019): 183-193.
- [25] P.T. Manditereza, and R.C. Bansal. "Protection of microgrids using voltage-based power differential and sensitivity analysis." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 118 (2020): 105756.
- [26] F. Mumtaz, K. Imran, S.B.A. Bukhari, K.K. Mehmood, A. Abusorrah, M.A. Shah, and S.A.A. Kazmi. "A Kalman filter-based protection strategy for microgrids." *IEEE Access* 10 (2022): 73243-73256.
- [27] M. Čuljak, H. Pandžić, and J. Havelka. "Mathematical Morphology-Based Fault Detection in Radial DC Microgrids Considering Fault Current from VSC." *IEEE Transactions on Smart Grid* (2022).
- [28] C. Zhou, G. Zou, S. Zhang, M. Zheng, J. Tian, and T. Du. "Mathematical Morphology Based Fault Data Self Synchronization Method for Differential Protection in Distribution Networks." *IEEE Transactions on Smart Grid* (2022).
- [29] Q.H. Wu, Z. Lu, and T. Ji. *Protective relaying of power systems using mathematical morphology*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [30] F. Hojatpanah, F.B. Ajaei, and H. Tiwari. "Reliable detection of high-impedance faults using mathematical morphology." *Electric Power Systems Research* 216 (2023): 109078.
- [31] F. Zhang, and L. Mu. "New protection scheme for internal fault of multi-microgrid." *Protection and Control of Modern Power Systems* 4, no. 2 (2019): 1-12.
- [32] T. Kauffmann, U. Karaagac, I. Kocar, S. Jensen, J. Mahseredjian, and E. Farantatos. "An accurate type III wind turbine generator short circuit model for protection applications." *IEEE Transactions on Power Delivery* 32, no. 6 (2016): 2370-2379.
- [33] S. Adhikari, F. Li, and H. Li. "PQ and PV control of photovoltaic generators in distribution systems." *IEEE Transactions on Smart Grid* 6, no. 6 (2015): 2929-2941.