



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Identification and Diagnosis of Power Semiconductor Switches Open-Circuit Failure in Neutral Point Clamped Multilevel Inverter

Ayub Islami^a, Yousef Neyshabouri^{a,*} , Mohammad Farhadi Kangarlu^a, Reza Behinfaraz^a

^a. Faculty of Electrical and Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-12-22

Revised: 2024-05-20

Accepted: 2024-06-11

Keywords:

Multilevel inverters;
Neutral point clamped
Inverter;
Switch fault detection
and diagnosis;
Neural networks.

ABSTRACT

This article presents the open switch fault detection and diagnosis of neutral point clamped inverters using neural networks. The neutral point clamped inverter consist of four power semiconductor switches with two clamp diodes in each phase. As the number of power semiconductor switches in the inverter increases, the probability of fault occurrence significantly increases. Therefore, for ensuring uninterrupted operation and preventing additional damage during faults, rapid fault diagnosis is essential for the fault tolerant systems. In this study, a neural network based system is developed for the detection and diagnosis of open switch faults in one or two power semiconductor switches in neutral point clamped inverter. The proposed method relies on measuring the inverter output currents and calculating their average values, which are then used for training the neural network. The proposed system covers open switch fault diagnosis for one or two switches. The mentioned system was simulated in the MATLAB/SIMULINK environment, and the result demonstrate accuracy and rapid fault diagnosis for semiconductor power switches within a fundamental cycle.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32673.2587>

© 2025 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/>)

* Corresponding Author.

E-mail address: y.neyshabouri@urmia.ac.ir

How to cite this article:

Islami, A. , Neyshabouri, Y. , Farhadi Kangarlu, M. and Behinfaraz, R. (2025). Identification and Diagnosis of Power Semiconductor Switches Open-Circuit Failure in Neutral Point Clamped Multilevel Inverter. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 95-109. doi: 10.22075/jme.2024.32673.2587

شناسایی و جایابی خطای مدار باز کلیدهای نیمه‌هادی قدرت در اینورتر چند سطحی مهار نقطه خنثی

ایوب اسلامی^۱، یوسف نیشابوری^{۱*}، محمد فرهادی کنگرلو^۱، رضا بهین فراز^۱

چکیده	اطلاعات مقاله
مقاله حاضر، تشخیص خطای مدار باز کلیدهای نیمه‌هادی قدرت در اینورتر مهار نقطه خنثی را با استفاده از شبکه عصبی مورد مطالعه قرار داده است. با توجه به اینکه اینورتر مهار نقطه خنثی، شامل چهار کلید نیمه‌هادی قدرت و دو دیود کلمپ در هر فاز است، افزایش تعداد کلیدها در اینورترهای چند سطحی احتمال وقوع خطا را افزایش می‌دهد پس تشخیص و جایابی سریع کلید معیوب برای رفع سریع خطا و مقاوم‌سازی اینورتر در برابر آن ضروری است. برای دستیابی به این هدف، سیستم‌های مبتنی بر شبکه عصبی برای تشخیص خطای مدار باز در یک یا دو کلید نیمه‌هادی روی اینورترهای مهار نقطه خنثی سه فاز سه سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی تشخیص خطا، بر اساس اندازه‌گیری جریان خروجی اینورتر و محاسبه مقدار متوسط آن استوار است همچنین برای آموزش شبکه عصبی از مقدار متوسط جریان هر سه فاز خروجی استفاده شده است. سیستم تشخیص خطای پیشنهادی، ۶۰ حالت خطا و یک حالت عملکرد بدون خطا را پوشش می‌دهد. این سیستم در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده، دقت و سرعت تشخیص وقوع خطای مدار باز را برای کلیدهای نیمه‌هادی قدرت در یک سیکل مرجع نشان می‌دهد.	دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲
	واژگان کلیدی: اینورتر چندسطحی، اینورتر مهار نقطه خنثی، تشخیص و جایابی خطای کلیدهای قدرت، شبکه عصبی.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32673.2587>

© 2025 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/>)

۱- مقدمه

تعداد دینامیکی ولتاژ بین کلیدها به مرحله توسعه صنعتی در محرکه‌های الکتریکی رسیده است بنابراین در این مقاله، تشخیص خطای مدار باز کلیدهای اینورتر مهار نقطه خنثی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه تعداد زیاد کلیدهای نیمه‌هادی، احتمال وقوع خطا در اینورترهای چند سطحی را افزایش می‌دهد به منظور بالابردن قابلیت اطمینان اینورترهای چند سطحی و مقاوم‌سازی در برابر وقوع خطا، تشخیص به موقع آن امری ضروری است چنانچه بر اساس مطالعات انجام شده، ۳۲ درصد از خطاها در یک اینورتر، وقوع خطا روی کلیدهای

امروزه استفاده از اینورترهای چند سطحی در کاربردهای ولتاژ و توان‌های بالا نظیر خطوط انتقال جریان مستقیم، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر فتوولتائیک و بادی، جبران سازی توان راکتیو و محرکه موتورهای الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است [۱]. ساختار پایه اینورترهای چند سطحی، شامل اینورترهای مهار نقطه خنثی، پل آبشاری، خازن شناور و مدولار می باشد [۲]. در این بین، اینورتر مهار نقطه خنثی با توجه به خصوصیات ذاتی مانند کاهش تلفات کلیدزنی، لینک dc مشترک و عدم مشکل

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: y.neyshabouri@urmia.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

استناد به این مقاله:

• بر پایه تحلیل سیگنال^۴

تمامی روش‌های فوق، از دو بخش "تشخیص خطا"^۵ و "جایابی خطا"^۶ تشکیل شده‌اند؛ بخش تشخیص خطا، وقوع خطای کلید و بخش جایابی، تعیین دقیق کلید معیوب را بر عهده دارد [۴]. در [۵] تشخیص خطا بر پایه مدل و تحلیل سیگنال در اینورتر پل آبشاری^۷ پنج سطحی مورد بررسی قرار گرفته و از اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ خروجی و ولتاژ خروجی نرمال شده برای تشخیص خطا استفاده شده است. در ابتدا میزان اعوجاج ولتاژ خروجی با مقادیر آستانه^۸، مقایسه شده و در صورت وقوع خطای مدارباز کلیدهای نیمه‌هادی این مقدار از آستانه تجاوز کرده و سیستم تشخیص خطا فعال می‌شود سپس با مقایسه مقادیر ولتاژ خروجی نرمال شده و مقدار آستانه آن‌ها محل تقریبی کلید معیوب در زمان حداکثر دو سیکل مرجع مشخص می‌گردد. در این مطالعه، با توجه به وابستگی شدید سیستم تشخیص خطا به مقادیر آستانه، امکان تشخیص اشتباه وجود دارد و تعیین مقادیر مناسب برای آستانه، در صحت عملکرد سیستم تشخیص خطا تأثیر زیادی خواهد گذاشت. از دیگر معایب روش تشخیص خطای استفاده شده در این مقاله می‌توان نیاز به حس‌گر ولتاژ خروجی اشاره نمود که به صورت پیش‌فرض در بیشتر اینورترها نصب نمی‌گردد. در [۶]، روشی برای تشخیص خطای مدارباز کلید در مبدل مهار نقطه خنثی تودرتو^۹ "بر پایه مدل" ارائه شده است. در این روش علاوه بر ولتاژ و جریان خروجی، از مقدار ولتاژ خازن‌های شناور نیز برای تشخیص خطا استفاده می‌گردد. در ابتدا ولتاژهای خروجی با مقادیر مورد انتظار مقایسه شده و در صورت اختلاف با آن‌ها، سیستم تشخیص خطا فعال می‌شود سپس از جهت جریان برای تعیین تقریبی محل وقوع خطا در نیمه بالایی یا پایینی ساق استفاده شده است. در نهایت با بررسی میزان اختلاف ولتاژ لینک dc محل دقیق کلید معیوب در زمان یک سیکل مرجع، مشخص خواهد شد. از معایب این روش می‌توان به امکان تشخیص خطای اشتباه با تغییر شرایط و فرکانس کاری اینورتر به دلیل وابستگی به مقادیر آستانه و همچنین نیاز به حس‌گر اضافی در اینورتر اشاره کرد. در [۷] از سیستم تشخیص خطا مبتنی بر اعوجاج هارمونیک کل^{۱۰} ولتاژ خروجی و همچنین

نیمه‌هادی قدرت می‌باشد [۳]. خطای کلیدها عمدتاً به دو نوع "اتصال کوتاه" و "مدارباز" تقسیم می‌شود. در خطای اتصال کوتاه، با توجه به احتمال گسترش آن و امکان وارد شدن خسارات متعدد، تشخیص خطا و حفاظت توسط روش‌های سخت‌افزاری مانند فیوزها، کلیدهای الکترونیکی و مدارهای راه‌انداز کلید انجام می‌گیرد و روش‌های تشخیص و حفاظت نرم‌افزاری بیشتر نقش پشتیبان برای حفاظت سخت‌افزاری را دارند در مقابل خطای مدارباز، در اثر عدم دریافت پالس در گیت کلید نیمه‌هادی و یا خطاهای داخلی کلید پیش می‌آید و باعث قطع عبور جریان می‌گردد. این امر، باعث اعوجاج ولتاژ و جریان خروجی اینورتر شده و اگر در کوتاه مدت برطرف نگردد، موجب بروز خسارت در اینورتر خواهد شد. با توجه به استفاده از حفاظت‌های سخت‌افزاری در برابر خطای اتصال کوتاه، در چند میکروکنترلر خطای اتصال کوتاه به خطای مدارباز تبدیل می‌شود از این رو، تحقیقات انجام شده در این زمینه بیشتر روی تشخیص خطای مدارباز تمرکز دارند و مطالعه پیش رو هم تشخیص وقوع خطای مدارباز برای یک یا دو کلید نیمه‌هادی قدرت در اینورتر مهار نقطه خنثی سه فاز را مورد بررسی قرار داده است.

در یک طبقه‌بندی کلی، روش‌های تشخیص خطای مدارباز کلیدهای نیمه‌هادی قدرت به دو دسته "تشخیص خطا بر پایه سخت‌افزار" و "تشخیص نرم‌افزاری خطا" تقسیم می‌شوند [۳]؛ در رویکرد اول، به ازای هر کلید تعدادی حس‌گر به مدار راه‌انداز کلیدها جهت اندازه‌گیری ولتاژ و جریان اضافه شده است و برای تشخیص خطای هر کلید از آن‌ها استفاده می‌شود اما به دلیل نیاز به سنسورهای زیاد، افزایش ابعاد سیستم و هزینه تمام شده، راهکار چندان مناسبی نیستند. در حالی که در رویکرد دوم، از شکل موج-های ولتاژ و جریان خروجی اینورتر به عنوان نشان‌گر خطا استفاده می‌شود. به همین دلیل، عمده مطالعات انجام شده بر توسعه روش‌های نرم‌افزاری تشخیص خطا انجام شده است [۳]. روش‌های نرم‌افزاری تشخیص خطا به سه دسته کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- بر پایه مدل^۲
- بر پایه اطلاعات^۳

⁷ H-bridge

⁸ Threshold

⁹ Nested neutral point clamped (NNPC)

¹⁰ Total harmonic distortion (THD)

² Model base

³ Data base

⁴ Signal processing base

⁵ Fault Detection

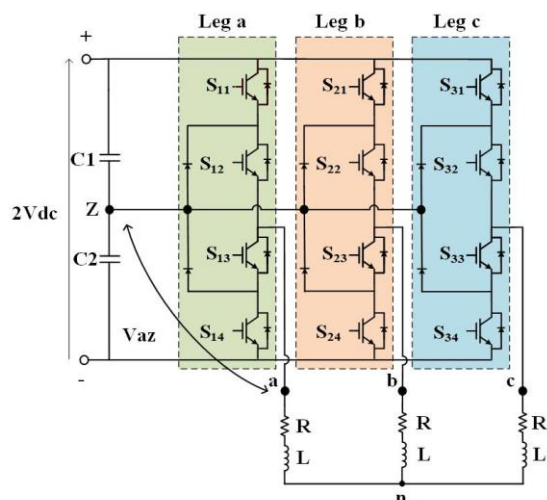
⁶ Fault localization

یک کلید نیمه‌هادی وجود دارد. در [۱۲] از تبدیل موجک بر روی جریان خروجی اینورتر به عنوان روش تشخیص خطا استفاده نموده است. در این مقاله جهت تشخیص و مشاهده شرایط گذرای خطای مدارباز کلید از تحلیل جریان تبدیل یافته به فضای فرکانس-زمان با استفاده از تبدیل موجک گسسته استفاده شده است. در این روش نیز امکان تشخیص خطای مدارباز در یک کلید را مورد بررسی قرار است. در [۱۳] از شبکه عصبی کانولوشن برای تشخیص خطای اینورتر پل آبشاری استفاده شده است. در این پژوهش، از تبدیل طیف نگاره^{۱۳} جریان خروجی اینورتر به عنوان ورودی سیستم شبکه عصبی استفاده شده و آموزش شبکه عصبی بر اساس تصویر طیف جریان خروجی انجام شده است. این سیستم تنها خطای مدارباز یک کلید را تشخیص داده و مدت زمان تشخیص خطا مورد بررسی قرار نگرفته است. در [۱۴] از شبکه عصبی در تشخیص خطای مدارباز کلید اینورتر مهار نقطه خنثی فعال استفاده شده است همچنین از پارامترهای ولتاژ، جریان خروجی، ولتاژ لینک dc و زاویه ولتاژ به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده نموده است. این روش امکان تشخیص خطای مدارباز یک کلید را داشته و در آن به زمان تشخیص خطا، اشاره‌ای نشده است.

تاکنون، در بیشتر روش‌های تشخیص خطای موجود، تشخیص خطای مدارباز، فقط روی یک کلید مورد بررسی قرار گرفته است و در بسیاری از روش‌ها، نیاز به نصب حس‌گرهای اضافی روی اینورتر وجود دارد. این مسئله موجب افزایش پیچیدگی در ساختار سیستم کنترل شده و بر هزینه تمام‌شده سیستم تشخیص خطا تأثیر می‌گذارد. به علاوه، این روش‌ها قابل پیاده‌سازی بر روی سیستم‌های اینورتری (نظیر محرکه‌های الکتریکی) که قبلاً طراحی شده نیستند. از سوی دیگر، با توجه به ساختار اینورتر مهار نقطه خنثی و امکان گسترش خطای مدارباز کلیدها به دلیل وقوع نامتعادلی در ولتاژ خازن‌های لینک dc، سیستم تشخیص خطا با قابلیت آشکارسازی خطای چند کلید، ضرورت پیدا می‌کند. روش پیشنهادی، قابلیت تشخیص خطای مدارباز در دو کلید نیمه‌هادی را دارا است. به علاوه، در روش پیشنهادی از جریان خروجی اینورتر به عنوان پارامتر تشخیص خطا استفاده شده است. که حس‌گرهای آن به صورت پیش فرض در اکثر اینورترها جهت مقاصد کنترلی

متوسط آن استفاده شده است. با وقوع خطا در هر کدام از کلیدهای اینورتر پل آبشاری، میزان اعوجاج هارمونیک در محدوده مشخصی تغییر خواهد کرد و از این اصل جهت تشخیص خطای مدارباز هر کلید استفاده شده است. روش مذکور، خطای مدارباز یک کلید را در زمان دو سیکل مرجع تشخیص می‌دهد. روش ارائه شده در [۸]، تشخیص خطای مبدل مهار نقطه خنثی ترکیبی فعال^{۱۱} را با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن مورد بررسی قرار داده است. در این روش با استفاده از مقادیر جریان لحظه‌ای خروجی و ولتاژ لینک dc سیستم آموزش داده شده است. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به نصب سنسور اضافی اشاره کرد. روش بررسی شده فقط امکان تشخیص خطای مدارباز یک کلید را دارد. در [۹] از شبکه عصبی چندلایه برای طبقه‌بندی و تشخیص خطا در اینورتر مهار نقطه خنثی آبشاری سه فاز سه سطحی استفاده شده است. ولتاژ پل اینورتر برای اخذ اطلاعات علائم خطا در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، برای استخراج ویژگی خطا از تبدیل فوریه سریع سیگنال استفاده می‌گردد. در این روش، با تعیین برجسب‌های مربوط به شبکه عصبی و باروش "پس انتشار" آموزش انجام می‌شود. این روش نیازمند یک حس‌گر ولتاژ اضافی در هر فاز است که باعث افزایش هزینه تمام شده می‌شود. در این روش، تشخیص خطای مدارباز فقط برای یک کلید مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۰] برای تشخیص خطای مدارباز کلید در اینورتر مهار نقطه خنثی سه فاز سه سطحی از ولتاژ پل اینورتر و تغییرات در مؤلفه‌های هارمونیک آن برای استخراج اطلاعات علائم خطا استفاده می‌شود. از معایب این روش می‌توان به تأثیر سطوح مختلف نویز در سیگنال جهت تعیین دقیق کلید معیوب و نیاز به نصب سنسور اضافی ولتاژ پل اشاره کرد. در این روش، تشخیص خطای مدارباز یک کلید بررسی شده است. در [۱۱] از تبدیل فوریه سریع^{۱۲} جریان خروجی برای تشخیص خطای مدارباز در اینورتر سه فاز سه سطحی مهار نقطه خنثی استفاده شده است. طیف فرکانسی جریان خروجی با استفاده از تبدیل فوریه سریع به دست می‌آید و از این ویژگی برای تشخیص خطای اینورتر استفاده می‌شود. زمان تشخیص خطا در این روش حدود دو سیکل مرجع است. در این روش، تنها امکان تشخیص وقوع خطای مدارباز برای

¹³ Spectrogram¹¹ Hybrid active neutral point clamped¹² Fast Fourier Transform

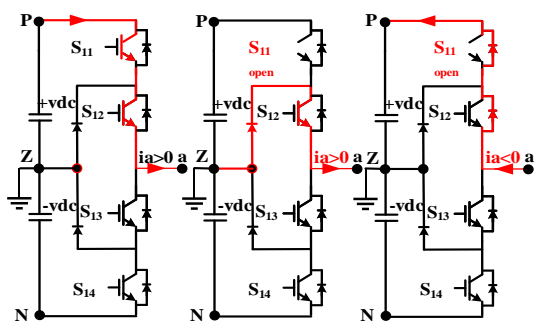


شکل ۱- ساختار اینورتر مه‌ار نقطه خنثی سه فاز سه سطحی

جدول ۱- حالت‌های کلیدزنی یک‌فاز اینورتر

حالت‌های کلیدزنی	ولتاژ خروجی	وضعیت کلیدهای قدرت			
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
P	+V _{dc} /2	on	on	off	off
O	0	off	on	on	off
N	-V _{dc} /2	off	off	on	on

مطابق شکل (۲) وقوع خطای مدارباز کلید فقط روی حالت کلیدزنی P تأثیر گذاشته و در خروجی مابقی حالت‌ها تأثیری ندارد در حالیکه وقوع خطای مدارباز در کلید S₁₂ و یا S₁₃ علاوه بر حالت‌های کلیدزنی P و N در حالت کلیدزنی O نیز تأثیر خواهد گذاشت. شکل‌های (۴) و (۵) نیز تأثیر وقوع خطا در مسیر جریان خروجی را نشان می‌دهد. همچنین وقوع خطای مدارباز در کلید S₁₄ فقط تأثیر بر حالت کلیدزنی N مطابق شکل (۷) خواهد گذاشت. جدول ۲ حالت‌های کلیدزنی موجود در صورت وقوع خطای مدارباز کلیدهای قدرت را نشان می‌دهد [۱۶].



شکل ۲- مسیر جریان خطای مدارباز جهت کلید S₁₁ حالت p (ج جریان منفی ب) جریان مثبت الف) حالت بدون خطا

تعبیه شده‌اند.

۲- اینورتر مه‌ار نقطه خنثی در شرایط نرمال و خطای مدارباز کلید

اینورتر مه‌ار نقطه خنثی سه فاز سه سطحی در هر فاز از چهار کلید نیمه‌هادی و دو دیود مه‌ار تشکیل شده است. این ساختار فقط نیاز به یک لینک dc دارد [۱۵]. نقطه وسط دیودهای مه‌ار در هر ساق، مطابق شکل (۱)، به وسط خازن‌های لینک dc متصل است و این نقطه به عنوان نقطه خنثی در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲- تحلیل عملکرد اینورتر مه‌ار نقطه خنثی در حالت بدون خطا^{۱۴}

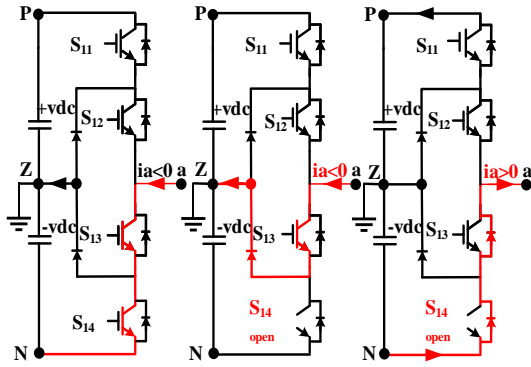
سیگنال‌های فرمان کلیدها که از خروجی سیستم مدولاسیون به دست می‌آید توسط مدار راه‌انداز کلیدها به پایه گیت کلیدهای نیمه‌هادی اعمال می‌شوند در نتیجه، ولتاژ سه فاز در خروجی اینورتر تولید خواهد شد. سیگنال فرمان "یک" بیانگر وضعیت وصل و سیگنال فرمان "صفر" بیانگر وضعیت خاموش بودن کلید است. از این رو روشن بودن هم‌زمان کلیدهای S₁₁ و S₁₂ حالت کلیدزنی P را تشکیل خواهد داد و ولتاژ پل آن معادل $V_{az}=V_{dc}/2$ می‌باشد. روشن کردن هم‌زمان کلیدهای S₁₂ و S₁₃، منجر به حالت کلیدزنی O و سطح ولتاژ $V_{az}=0$ خواهد شد. همچنین روشن کردن کلیدهای S₁₃ و S₁₄ حالت کلیدزنی N را ایجاد نموده و منجر به تولید سطح ولتاژ $V_{az}=-V_{dc}/2$ می‌شود. جدول ۱ حالت‌های کلیدزنی یک فاز از اینورتر مذکور را نشان می‌دهد.

۲-۲- تحلیل عملکرد اینورتر مه‌ار نقطه خنثی در حالت وقوع خطای مدارباز کلید^{۱۵}

با توجه به تقارن مداری، بررسی و تحلیل وقوع خطای مدارباز کلید، فقط روی یکی از فازها انجام شده است. به صورت پیش‌فرض جهت جریان از اینورتر به بار به عنوان جهت مثبت $i > 0$ معرفی می‌گردد. وقوع خطای مدارباز منجر به عدم تشکیل سطوح ولتاژ در خروجی اینورتر شده و در نتیجه بعضی از مسیرهای جریان از طریق کلیدهای معیوب قطع خواهد شد. در شکل‌های (۷-۲)، مسیرهای جریان برای حالت‌های مختلف خطا در یک فاز از اینورتر نشان داده شده است.

¹⁵ Open switch fault operation

¹⁴ Normal operation



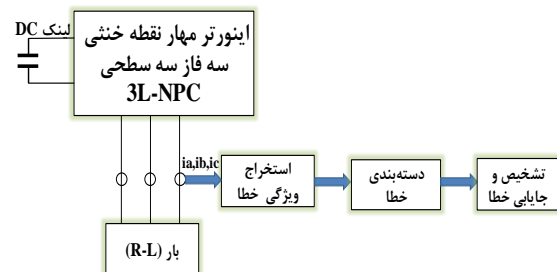
شکل ۷- مسیر جریان خطای مدارباز جهت کلید S_{14} حالت N (ج) جریان منفی (ب) جریان مثبت (الف) حالت بدون خطا

جدول ۲- حالات کلیدزنی حین وقوع خطای مدارباز کلیدها

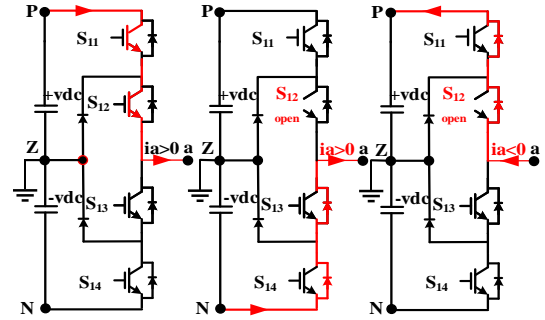
ولتاژ واقعی	ولتاژ مورد انتظار	حالات از دست رفته	حالات کلیدزنی	کلید معیوب	جریان
0	$+v_{dc}/2$	P	N, O	S_{11}	$i > 0$
$-v_{dc}/2$	$+v_{dc}/2$	P	N	S_{12}	
$+v_{dc}/2$	0	O	P, O, N	S_{13}	$i < 0$
NA	NA	-	P, O, N	S_{14}	
NA	NA	-	P, O, N	S_{11}	$i < 0$
NA	NA	-	P, O, N	S_{12}	
$+v_{dc}/2$	0	O	P	S_{13}	$i < 0$
$+v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	N	P, O	S_{14}	
0	$-v_{dc}/2$	N	P, O	S_{14}	

۳- روش پیشنهادی تشخیص خطای مدارباز کلید

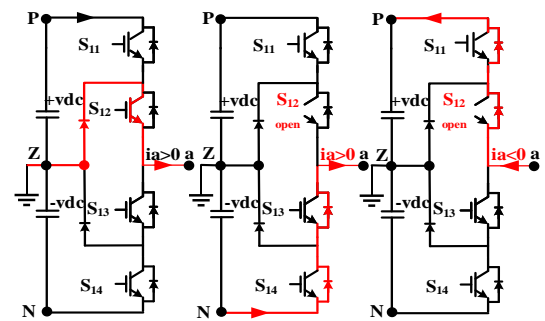
سیستم تشخیص خطای پیشنهادی از سه بخش اصلی استخراج ویژگی^{۱۶}، طبقه‌بندی^{۱۷} آن توسط شبکه عصبی و تشخیص و جایابی خطا^{۱۸} تشکیل شده است. بلوک دیاگرام سیستم تشخیص خطا در شکل (۸) نشان داده شده است.



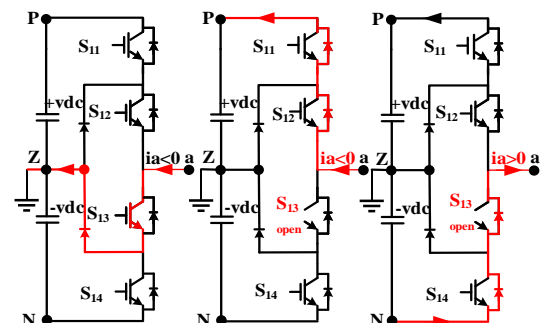
شکل ۸- بلوک دیاگرام سیستم تشخیص خطای پیشنهادی



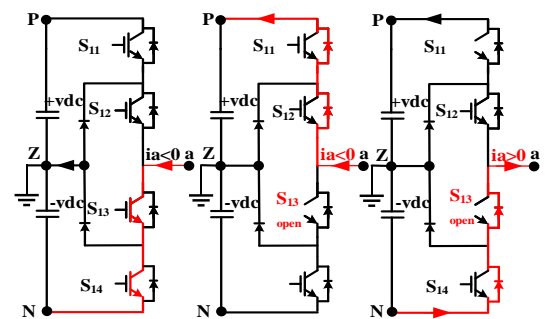
شکل ۳- مسیر جریان خطای مدارباز جهت کلید S_{12} حالت P (ج) جریان منفی (ب) جریان مثبت (الف) حالت بدون خطا



شکل ۴- مسیر جریان خطای مدارباز جهت کلید S_{12} حالت O (ج) جریان منفی (ب) جریان مثبت (الف) حالت بدون خطا



شکل ۵- مسیر جریان خطای مدارباز جهت کلید S_{13} حالت O (ج) جریان منفی (ب) جریان مثبت (الف) حالت بدون خطا



شکل ۶- مسیر جریان خطای مدارباز جهت کلید S_{13} حالت N (ج) جریان منفی (ب) جریان مثبت (الف) حالت بدون خطا

¹⁸ Fault detection and localization

¹⁶ Fault feature extraction

¹⁷ Fault classification

۳-۱- استخراج ویژگی خطا

در این بخش از متوسط جریان‌های سه فاز خروجی اینورتر به عنوان ویژگی خطا استفاده می‌شود. در حالت عملکرد بدون خطا متوسط جریان فازها نزدیک به صفر می‌باشد و به محض وقوع خطای مدارباز کلید در یکی از فازها، مقدار متوسط در فاز با کلید معیوب از صفر منحرف شده و آفست می‌گیرد. تغییر به گونه‌ای است که در صورت وقوع خطا برای کلیدهای نیمه بالایی ساق هر فاز، میزان آفست ایجاد شده به صورت منفی ظاهر خواهد شد و متوسط جریان مربوطه به سمت منفی منحرف می‌گردد همچنین برای وقوع خطا در نیمه پایینی ساق هر فاز میزان آفست مثبت می‌شود. این ویژگی منحصر به فرد به عنوان ورودی بخش طبقه‌بندی و جهت آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه محاسبه مقدار متوسط هر سیگنال به صورت مستقل از تغییرات فرکانس است، این ویژگی امکان عملکرد صحیح سیستم تشخیص خطای پیشنهادی در فرکانس‌های کاری مختلف را دارد. در روش پیشنهادی، امکان پیاده‌سازی سیستم تشخیص خطا برای کاربردهای با فرکانس متغیر را فراهم می‌سازد. رابطه‌های (۳-۱) نحوه محاسبه متوسط جریان هر فاز را نشان می‌دهد.

$$I_a_ave = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_a(t) dt \quad (1)$$

$$I_b_ave = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_b(t) dt \quad (2)$$

$$I_c_ave = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c(t) dt \quad (3)$$

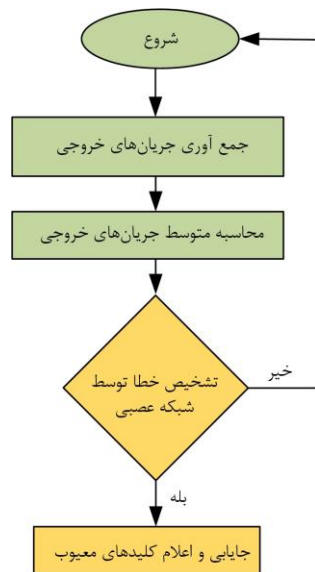
برای محاسبه میزان متوسط جریان به صورت مستقل از فرکانس خروجی اینورتر، می‌توان از تشخیص گذر از صفر شکل موج مرجع و لبه بالارونده آن استفاده کرد. با این روش متوسط جریان خروجی مستقل از فرکانس به دست می‌آید. بعد از تعیین مقادیر متوسط جریان خروجی، بردار ویژگی^{۱۹} $I(t)$ را که بیانگر مقادیر متوسط جریان سه فاز خروجی است، مطابق رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$I(t) = [I_a_ave, I_b_ave, I_c_ave] \quad (4)$$

بعد از تعیین بردار ویژگی جریان، این بردار به عنوان ورودی شبکه عصبی و به مرحله طبقه‌بندی اعمال می‌شود. با توجه به اینکه در حین عملکرد اینورتر امکان تغییر جریان خروجی اینورتر به دلیل تغییرات بار یا تغییر در شاخص مدولاسیون اینورتر وجود دارد بر این اساس جهت آموزش صحیح و درک این مطلب توسط سیستم شبکه عصبی ضروری است که بردار ویژگی حاوی اطلاعات کافی از حالت‌های مختلف عملکردی اینورتر برای آموزش باشد. این امر لازمه داشتن dataset با تنوع بیشتری از شرایط مختلف کاری و شاخص‌های مدولاسیون است. همچنین تا حد امکان بایستی سعی شود در dataset اطلاعات تکراری ظاهر نگردد. در راستای تهیه dataset جامع، موارد زیر باید لحاظ گردد:

- پس از به دست آوردن بردار متوسط جریان‌های خروجی که بایستی رنج وسیعی از شاخص مدولاسیون‌ها را شامل شود و به دلیل محدودیت ایجاد شدن اطلاعات تکراری، پنج شبکه آموزشی تهیه می‌گردد. هر شبکه در محدوده ۲۰ درصد تغییرات شاخص مدولاسیون عمل می‌نماید؛ برای نمونه، یکی از شبکه‌ها در رنج ۸۰-۱۰۰ درصد شاخص مدولاسیون به ازای مقادیر ۸۰، ۸۵، ۹۰، ۹۵ و ۱۰۰ درصد از شاخص مدولاسیون دسته‌بندی کرده و به ازای آن dataset ایجاد می‌شود. بردار متوسط جریان‌های خروجی در ۶۰ حالت خطای مدارباز کلیدهای نیمه‌هادی، برای رنج وسیعی از شاخص‌های مدولاسیون و مطابق دسته‌بندی ذکر شده در بالا ایجاد می‌شود.
 - بردار متوسط جریان‌های خروجی جهت ورودی حالت عملکردی بدون خطا برای رنج وسیعی از شاخص‌های مدولاسیون ایجاد می‌شود.
- در کل dataset ورودی به ازای تمامی حالت‌های کاری برای هر شبکه عصبی، معادل یک ماتریس با ابعاد 3×915 به دست می‌آید. شکل (۹) بلوک دیاگرام بخش استخراج ویژگی سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

¹⁹ Feature vector



شکل ۱۰- فلوجارت سیستم تشخیص خطای پیشنهادی

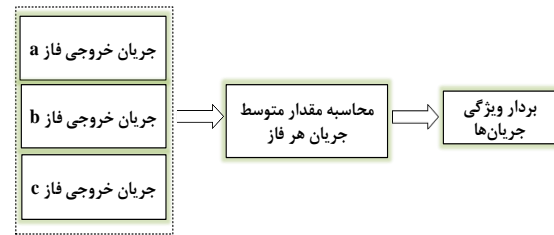
سیستم پیشنهادی، رخداد خطای مدارباز جهت ۱۲ عدد کلید تکی و ۴۸ حالت خطای کلید دوبل، در ساق‌های مختلف را تشخیص می‌دهد. برای تمامی حالت‌های خطا و بدون خطا یک کد دودویی منحصر به فرد تولید خواهد شد. جدول ۴ تعدادی از برچسب حالت‌های خطای مدارباز کلیدها را نشان می‌دهد.

جدول ۳- شبکه آموزشی سیستم تشخیص خطا

بازه اندیس مدولاسیون	شبکه‌های عصبی
۰/۸ - ۱	۱
۰/۸ - ۰/۶	۲
۰/۶ - ۰/۴	۳
۰/۴ - ۰/۲	۴
۰/۲ - ۰	۵

جدول ۴- دسته‌بندی خطاهای اینورتر

حالت	نوع خطا	خروجی باینری
۱	بدون خطا	۰۰۰۰۰۰۰۰
۲	S ₁₁	۰۰۰۰۰۰۰۱
...
۱۲	S ₃₄	۰۰۰۰۱۱۰۰
۱۳	S ₁₁ & S ₂₁	۰۰۰۰۱۱۰۱
...
۶۱	S ₂₄ & S ₃₄	۰۰۱۱۱۱۰۰



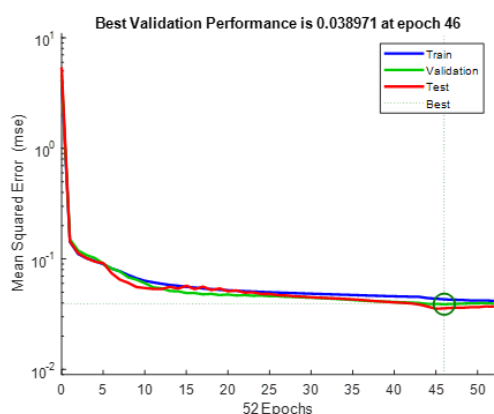
شکل ۹- بلوک دیاگرام بخش استخراج ویژگی خطا

۳-۲- طبقه‌بندی خطا توسط شبکه عصبی

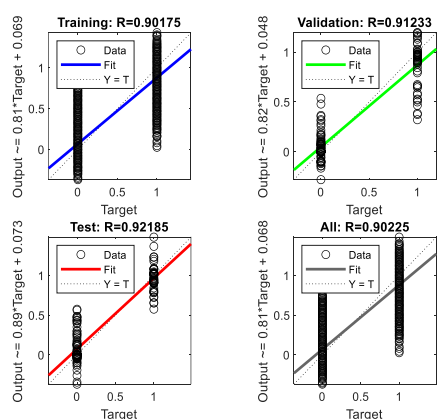
بعد از مرحله استخراج ویژگی و آماده‌سازی dataset، اطلاعات به دست آمده جهت آموزش به شبکه عصبی داده می‌شود. در این تحقیق از شبکه عصبی سه لایه با شبکه پیش‌خور استفاده شده و تعداد گره‌های ^{۲۰} لایه میانی با توجه به تست‌های اولیه و به شرط فراهم آوردن حداقل مجذور مربعات خطا تعیین شده است. روش آموزش نظارتی انتخابی در این مرحله لونیبرگ مارکوارت^{۲۱} است. از مزایای این روش نسبت به دیگر روش‌ها می‌توان به آموزش سریع و عدم نیاز به حافظه زیاد اشاره کرد. در این روش، ورودی فقط از یک جهت پردازش شده و اطلاعات همیشه از یک جهت وارد سیستم شده همچنین به صورت برگشتی ظاهر نخواهد شد. برای هر کدام از حالت‌های عملکردی عادی و خطادار، خطای تعیین شده که مجموعاً ۶۱ حالت می‌باشد، یک برچسب ۸ بیتی جهت خروجی تعیین می‌گردد. برای عملکرد سیستم تشخیص خطا در رنج وسیعی از شاخص‌های مدولاسیون متشکل از ۵ شبکه عصبی که هر کدام محدوده‌ای از شاخص مدولاسیون را پوشش می‌دهد، استفاده می‌کنیم. جدول ۳ شبکه‌های آموزشی را برای بازه وسیعی از شاخص مدولاسیون و با پله‌های ۰/۰۵ نشان می‌دهد. همانگونه که قبلاً ذکر شد dataset کلی به ازای تمامی شاخص‌های مدولاسیون آماده می‌گردد. در این روش، هدف از آموزش، ایجاد یک رابطه صحیح بین کل حالت‌های عملکردی سالم و خطادار اینورتر و خروجی‌های سیستم تشخیص خطا می‌باشد. تعداد گره‌های لایه میانی شبکه عصبی را به صورت دستی و با شرط حصول حداقل مجذور مربعات خطا تعیین شده است. شکل (۱۰) ساختار و فلوجارت سیستم تشخیص خطای شبکه عصبی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

²¹ Levenberg-Marquardt²⁰ Nodes

متوسط جریان کوچک بوده و با وقوع خطای مدارباز برای کلید میانی، نیمه بالای ساق آفست dc عدد بزرگ‌تری خواهد شد.



شکل ۱۱- رگرسیون شبکه عصبی آموزشی



شکل ۱۲- نمایش نمودار عملکرد سیستم شبکه عصبی

جدول ۶- پارامترهای شبکه عصبی آموزشی

۹۱۵×۳	پیش بینی کننده‌ها
۹۱۵×۸	پاسخ
تصادفی	تقسیم داده‌ها
لونیبرگ مارکوارت	الگوریتم یادگیری
خطای میانگین مربعات	عملکرد
جدول ۷- نتایج شبکه عصبی	
	نتایج یادگیری
۰/۹۰۱۷	آموزش
۰/۹۱۲۳	اعتبارسنجی
۰/۹۲۱۸	آزمایش

شکل‌های (۱۴-۱۵) وقوع خطای مدارباز برای کلیدهای S11 و S12 را به همراه صحت عملکرد سیستم تشخیص خطا نشان می‌دهد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

اعتبارسنجی روش پیشنهادی توسط مدل شبیه‌سازی شده اینورتر ماهر نقطه خنثی سه فاز سه سطحی در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات آن سیستم در جدول ۵ آمده است.

بعد از آموزش شبکه عصبی به ازای dataset ورودی و جهت پوشش تمامی شاخص‌های مدولاسیون، شبکه عصبی با سه لایه ورودی، ۷۵ لایه میانی و هشت لایه خروجی مطابق جدول ۶ به دست آمده است. در شبکه عصبی، رگرسیون^{۲۲} داده به معماری شبکه و فرآیند آموزشی اشاره دارد که برای پیش‌بینی یا مدل‌سازی از ورودی به خروجی‌ها استفاده می‌شود. اعتبارسنجی^{۲۳} مدل نیز مدل را با استفاده از داده‌های موجود ارزیابی می‌نماید و رگرسیون داده‌های تست، عملکرد سیستم آموزشی را به ازای داده‌هایی که سیستم با آن‌ها آموزش ندیده است، مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج شبکه عصبی نیز در جدول ۷ بیان شده است. شکل (۱۱) میزان رگرسیون مربوط به سیستم آموزشی را برای dataset ورودی و تست آن که از خروجی سیستم تشخیص خطا به دست آمده است را نشان می‌دهد. نمودار عملکرد سیستم شبکه عصبی با ۴۶ تکرار که توسط شبکه آموزشی به دست آمده، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در شرایط عملکرد بدون خطا شکل موج جریان خروجی کاملاً متقارن بوده و در نتیجه مقدار متوسط جریان‌های خروجی متعادل و نزدیک صفر می‌باشد. شکل (۱۳) شکل موج جریان‌های خروجی اینورتر و مقدار متوسط آن را در حالت بدون خطا نمایش می‌دهد.

جدول ۵- مشخصات سیستم شبیه‌سازی شده

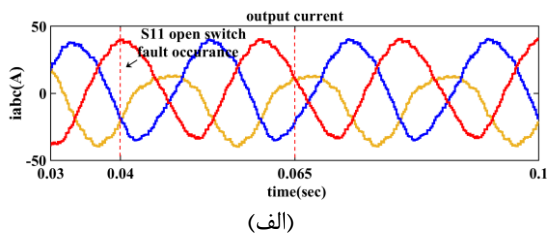
مقادیر	پارامترها
۹۰۰ ولت	ولتاژ لینک dc
۱۰ اهم	مقاومت بار
۱۶ میلی‌هائری	اندوکتانس بار
۵۰ هرتز	فرکانس خروجی
۱۰۰۰ هرتز	فرکانس کلیدزنی

۴-۱- تشخیص خطای مدارباز کلیدهای نیمه بالایی

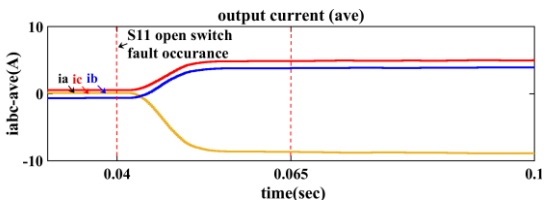
با وقوع خطای مدارباز در کلیدهای نیمه بالایی هر ساق، جریان خروجی فاز معیوب مقداری آفست dc می‌گیرد، در صورت مدارباز شدن کلید بالایی هر ساق، میزان آفست dc

²³ Validation

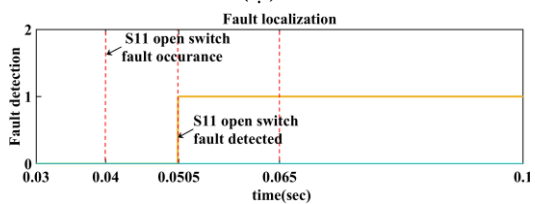
²² Regression



(الف)

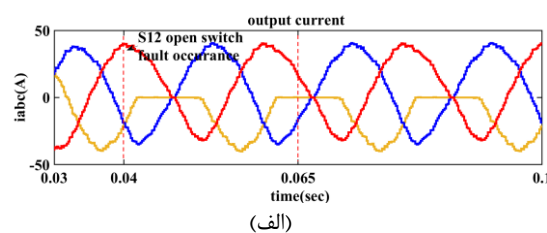


(ب)

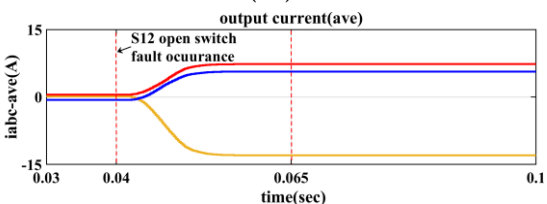


(پ)

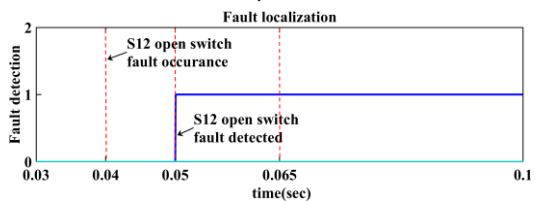
شکل ۱۴- خطای کلید S_{11} ، (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱ کیلوهرتز



(الف)



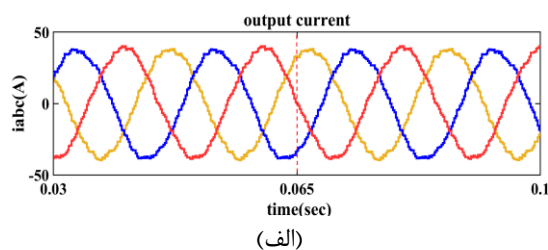
(ب)



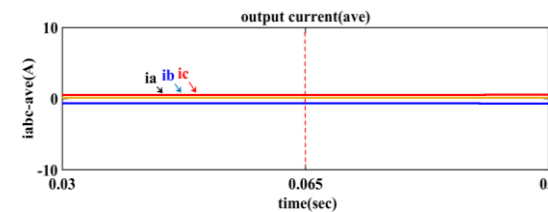
(پ)

شکل ۱۵- خطای کلید S_{12} ، (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱ کیلوهرتز

با توجه به اینکه سیستم پیشنهادی در تشخیص خطا از مقدار متوسط جریان‌های خروجی به عنوان ویژگی تشخیص خطا استفاده می‌کند، این پارامتر وابستگی کمتری به تغییرات در پارامترهای فرکانس، شاخص مدولاسیون و فرکانس کلیدزنی اینورتر دارد بنابراین، سیستم به ازای فرکانس‌های کلیدزنی بالاتر نیز دقت عملکرد خود را حفظ نموده است. جهت راستی آزمایشی عملکرد سیستم تشخیص خطا، در فرکانس کلیدزنی ۱۰ کیلوهرتز نیز شبیه‌سازی انجام شده و نتایج آن در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



(الف)

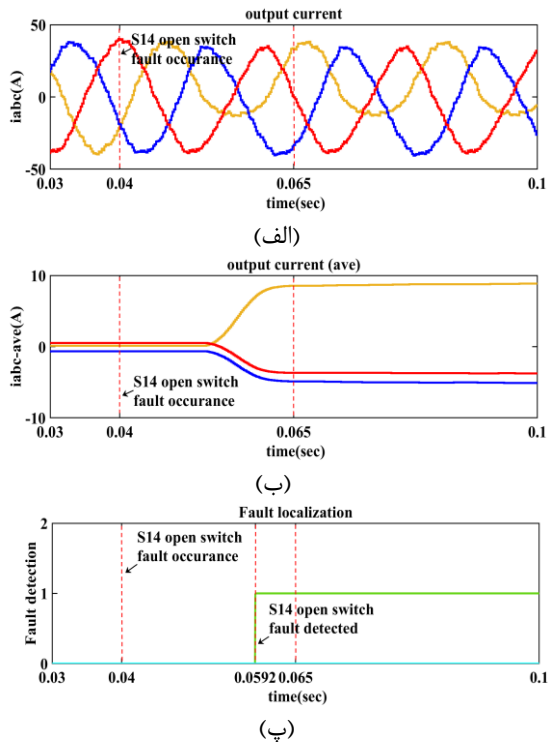


(ب)

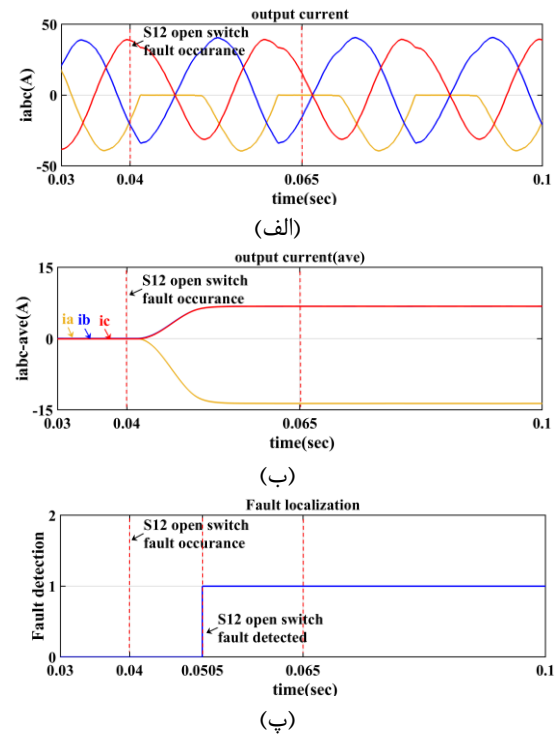
شکل ۱۶- حالت بدون خطا، (الف) جریان سه فاز خروجی، (ب) متوسط جریان‌های خروجی

۲-۴- تشخیص خطای مدارباز کلیدهای نیمه پایینی

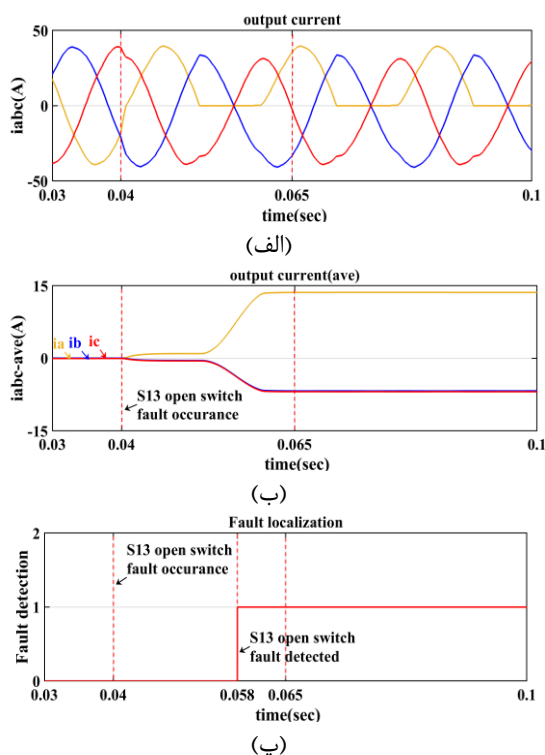
اثر وقوع خطای مدارباز کلیدهای نیمه پایینی هر ساق، عکس حالت وقوع خطای کلیدهای نیمه بالایی ساق بوده و با وقوع خطا جریان متوسط فاز معیوب آفست مثبت گرفته و میزان این آفست، در کلید میانی بیشتر از کلید خارجی است. شکل‌های (۱۷-۱۸) وقوع خطای مدارباز را به ترتیب برای کلیدهای S_{13} و S_{14} به همراه صحت عملکرد سیستم تشخیص خطا نشان می‌دهد. مطابق نتایج شبیه‌سازی، سیستم تشخیص خطا، خطای مدارباز کلید را در زمان کمتر از یک سیکل مرجع آشکار می‌کند. در شکل (۱۹) سیستم تشخیص خطا به ازای فرکانس کلیدزنی ۱۰ کیلوهرتز نیز شبیه‌سازی شده و نتایج مربوطه صحت عملکرد سیستم تشخیص خطا را نشان می‌دهد.



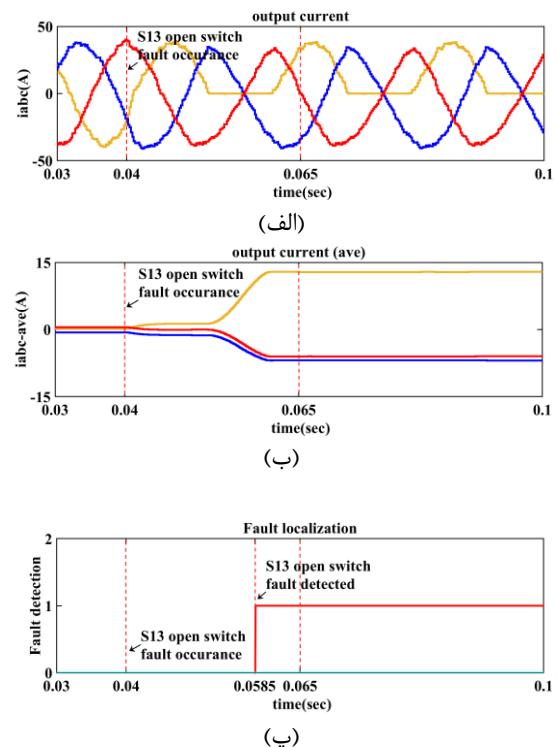
شکل ۱۸- خطای کلید S_{14} ، (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱ کیلوهرتز



شکل ۱۶- خطای کلید S_{12} ، (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱۰ کیلوهرتز



شکل ۱۹- خطای کلید S_{13} (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱۰ کیلوهرتز



شکل ۱۷- خطای کلید S_{13} ، (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱ کیلوهرتز

۳-۴- تشخیص خطای مدارباز دو کلید

الگوی تشخیص خطای مدارباز دو کلید اینورتر نیز مشابه روش تشخیص خطای یک کلید و مطابق توضیحات بخش‌های ۱-۴ و ۲-۴ است. روش پیشنهادی قابلیت تشخیص رخداد هم‌زمان خطای مدارباز دو کلید در دو ساق یا به عبارتی در دو فاز مختلف را دارد. در شکل (۲۰)، وقوع خطای مدارباز هم‌زمان در دو فاز برای کلیدهای S_{12} و S_{22} نشان داده شده است. با وقوع خطا در کلید S_{12} ، نیم سیکل مثبت جریان فاز a صفر شده و در نتیجه جریان متوسط مربوطه آفست منفی می‌گیرد همچنین، با وقوع خطای مدارباز کلید S_{22} نیز به همان ترتیب فاز a نیم سیکل مثبت فاز b صفر شده و علاوه بر این‌ها، جریان متوسط آن آفست منفی می‌گیرد. بنابراین با توجه به منحصر به فرد بودن اثرات خطای یاد شده، سیستم تشخیص وقوع خطا را آشکار می‌کند. با وقوع خطا برای کلیدهای S_{11} و S_{34} دامنه‌ی نیم سیکل مثبت جریان فاز a نسبت به حالت بدون خطا کم

شده ولی به صورت کامل صفر نخواهد شد و همچنین وقوع خطای مدارباز در فاز c نیز دامنه نیم سیکل منفی جریان با توجه به بیرونی بودن کلید معیوب کاهش خواهد یافت. پیرو تغییرات در مقادیر لحظه‌ای، مقادیر متوسط جریان‌های خروجی نیز تغییر نموده و این خصوصیت اساس آموزش شبکه عصبی می‌باشد. به این ترتیب، سیستم تشخیص خطای پیشنهادی، خطای مدارباز در کلیدهای مورد بحث را مطابق شکل (۲۱) و در زمان حداکثر یک سیکل مرجع به وضوح نشان می‌دهد.

۵- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های بررسی شده

در این بخش روش‌های کاربردی در تشخیص خطای مدارباز کلید از نقطه نظر روش، پارامتر، زمان و گستره تشخیص خطا مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۸ مقایسه تعدادی از روش‌های تشخیص خطای بررسی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۸- مقایسه روش‌های تشخیص خطا

مرجع	روش تشخیص خطا	پارامترهای تشخیص خطا	نیاز به سنسور اضافی	زمان تشخیص	تعداد نمونه‌های آموزشی	نوع اینورتر	گستره تشخیص
[۵]	مدل و تحلیل سیگنال	ولتاژ خروجی اینورتر	دارد	۴۰ میلی‌ثانیه	-	پل آبشاری پنج سطحی سه فاز	یک کلید
[۶]	مدل	جریان، ولتاژ خروجی و ولتاژ لینک dc	دارد	۲۰ میلی‌ثانیه	-	مهار نقطه خنثی تودرتو تک فاز	یک کلید
[۱۰]	تحلیل سیگنال (تبدیل موجک)	ولتاژ پل خروجی	دارد	-	-	مهار نقطه خنثی سه فاز	یک کلید
[۱۱]	تحلیل سیگنال (تبدیل فوریه)	جریان خروجی	ندارد	۴۰ میلی‌ثانیه	-	مهار نقطه خنثی سه فاز	یک کلید
[۱۳]	شبکه عصبی (طیف نگاره)	جریان خروجی	ندارد	-	۲۵۷×۲۳۳×۶۴	پل آبشاری	یک کلید
[۱۴]	شبکه عصبی	جریان، ولتاژ خروجی، ولتاژ لینک dc و زاویه ولتاژ	دارد	-	-	مهار نقطه خنثی اکتیو	یک کلید
[۸]	شبکه عصبی	دامنه جریان خروجی، زاویه جریان و ولتاژ لینک dc	ندارد	-	۱×۳×۱۰۰	مهار نقطه خنثی اکتیو	یک کلید
روش پیشنهادی	شبکه عصبی	متوسط جریان سه فاز خروجی	ندارد	۲۰ میلی‌ثانیه	۹۱۵×۳	مهار نقطه خنثی سه فاز	دو کلید

تبدیل‌های فوریه و موجک استفاده کرده‌اند. همچنین در [۱۳ و ۱۴] از روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی با پارامترهای به ترتیب، جریان، ولتاژ خروجی و ولتاژ لینک dc همراه با زاویه ولتاژ بهره گرفته است. در حالی که در روش پیشنهادی از شبکه عصبی مبتنی بر متوسط جریان خروجی اینورتر در تشخیص خطا استفاده شده است.

۵-۲- زمان تشخیص خطا

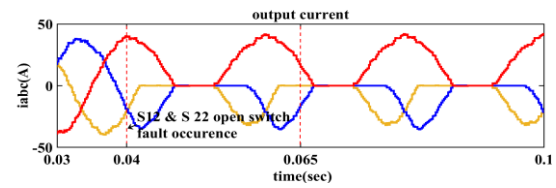
در روش‌های [۵، ۶ و ۱۱] زمان تشخیص به ترتیب ۴۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌ثانیه ثبت شده است و در روش‌های [۱۰، ۱۳ و ۱۴] به زمان تشخیص اشاره‌ای نشده اما در روش پیشنهادی، زمان تشخیص خطا کمتر از یک سیکل مرجع است و از جنبه زمانی جزو روش‌های تشخیص آنلاین محسوب می‌شود.

۵-۳- گستره تشخیص خطا

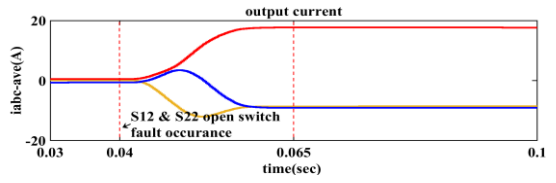
در [۵، ۶، ۱۰، ۱۱، ۱۳ و ۱۴] تنها وقوع خطای مدار باز یک کلید را تشخیص می‌دهد اما در روش پیشنهادی توانایی تشخیص وقوع هم‌زمان خطای مدار باز در یک یا دو کلید را دارد.

۶- نتیجه‌گیری

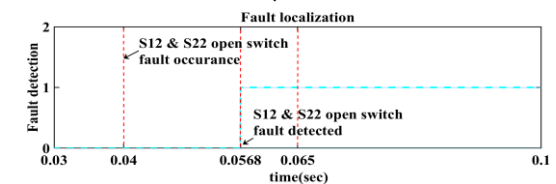
در این مقاله، روشی برای تشخیص و جایابی خطای مدار باز کلید نیمه‌هادی در اینورتر مهار نقطه خنثی پیشنهاد شد. مقدار متوسط جریان خروجی اینورتر مهار نقطه خنثی سه فاز سه‌سطحی به عنوان ویژگی خطای مدار باز کلیدهای قدرت استفاده شده است. به محض وقوع خطای مدار باز در کلیدها، شکل موج‌های جریان خروجی خاصیت تقارن خود را از دست داده و مقدار متوسط جریان خروجی بسته به محل وقوع خطا آفست dc می‌گیرد. فراوانی و تنوع dataset ورودی جهت طبقه‌بندی خطای مدار باز کلیدها، امکان تشخیص خطای مدار باز یک یا دو کلید در فازهای مختلف را فراهم می‌کند. در نهایت سیستم تشخیص خطای مبتنی بر شبکه عصبی برای دسته‌بندی و آموزش وقوع ۶۰ حالت خطا و یک حالت عملکرد بدون خطا آموزش داده شده است. نتایج شبیه‌سازی ذکر شده در بخش چهارم، اثربخشی سیستم تشخیص و جایابی خطای مدار باز را در یک سیکل مرجع نشان می‌دهد؛ همچنین در سیستم تشخیص خطای پیشنهادی از حس‌گرهای جریان خروجی اینورتر که به صورت پیش‌فرض در اکثر اینورترها جهت مقاصد کنترلی وجود دارد، استفاده شده است. این امر مقرون به صرفه بودن پیاده‌سازی سیستم پیشنهادی را تأیید می‌نماید.



(الف)

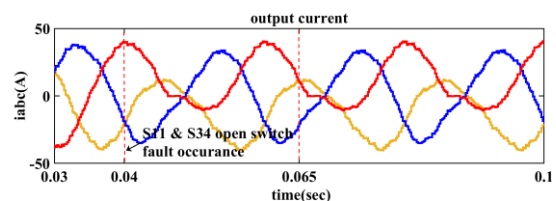


(ب)

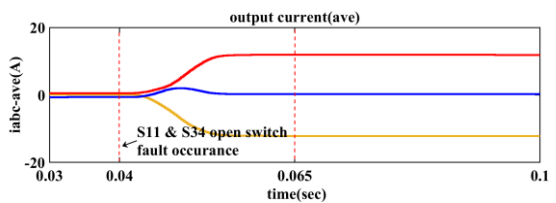


(پ)

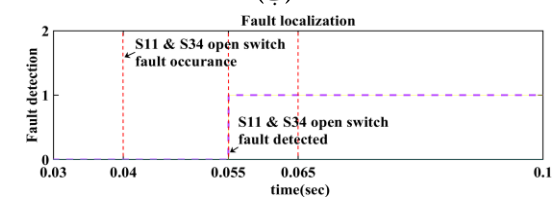
شکل ۲۰- خطای کلیدهای S12 و S22، (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱ کیلوهرتز



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۲۱- خطای کلیدهای S11 و S34، (الف) جریان خروجی لحظه‌ای، (ب) متوسط جریان‌های خروجی و (پ) خروجی سیستم تشخیص خطا در فرکانس کلیدزنی ۱ کیلوهرتز

۵-۱- روش و پارامتر تشخیص خطا

در مقالات [۵ و ۶] از روش بر پایه مدل و از پارامترهای ولتاژ خروجی اینورتر به همراه ولتاژ لینک dc استفاده شده است. مقاله‌های [۱۰ و ۱۱] از روش تحلیل سیگنال توسط

تعارض منافع:

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی:

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان:**ایوب اسلامی:**

مطالعه و تحلیل مبدل، استخراج و تحلیل داده‌ها، شبیه‌سازی، نگارش پیش‌نویس اصلی

یوسف نیشابوری:

روش‌شناسی، تحلیل و بررسی نتایج، اعتبار سنجی، بررسی و ویرایش محتوا

محمد فرهادی کنگرلو:

روش‌شناسی، تحلیل رفتار مبدل، اعتبار سنجی

رضا بهین فراز:

تحلیل و اعتبار سنجی داده‌های شبیه‌سازی شبکه عصبی

منابع مالی:

در انجام پژوهش هیچ منابع مالی مورد استفاده قرار نگرفته است.

مراجع

- [1] M. Hosseinpour, and Ali Seifi. "A Novel Multilevel Inverter Topology Aiming Reduction the Switch Count and Converter Cost." *Journal of Modeling in Engineering* 18, no. 60 (2020): 71-85.
- [2] B. Hosseini Montazer, J. Olamaei, M. Hosseinpour, and B. Mozafari. "A Generalized Bidirectional Structure for Multi-Level Inverter with Low Number of Power Electronic Devices." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 66 (2021): 37-51.
- [3] B. Masri, H.A. Sheikh, N. Karami, H.Y. Kanaan, and N. Moubayed. "A Review on Artificial Intelligence Based Strategies for Open-Circuit Switch Fault Detection in Multilevel Inverters." *In IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1-8. IEEE, 2021.
- [4] K. Nallathambi. "An Extensive Review on Fault Detection and Fault-Tolerant Control of Multilevel Inverter with Applications." *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 12, no. 2 (2022): 768-98.
- [5] P. Mehta, S. Sahoo, and M. Kumar. "A Fault-Diagnosis and Tolerant Control Technique for Five-Level Cascaded H-Bridge Inverters." *IET Circuits, Devices & Systems* 15, no. 4 (2021): 366-76.
- [6] M. Hassanifar, M. Shamouei-Milan, Y. Neyshabouri, D. Nazarpour, and S. Golshannavaz. "Fast Detection and Localization of Open-Circuit Switch Faults in Nested Neutral Point Clamped (NNPC) Inverter." *In 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*, pp. 1-6. IEEE, 2020.
- [7] A.M. Naqvi, P. Tripathi, and S.P. Singh. "Fault detection and fault-tolerant operation of a seven-level inverter." *In 2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON)*, pp. 1-5. IEEE, 2023.
- [8] S.H. Kim, D.Y. Yoo, S.W. An, Y.S. Park, J.W. Lee, and K.B. Lee. "Fault detection method using a convolution neural network for hybrid active neutral-point clamped inverters." *IEEE Access* 8 (2020): 140632-140642.
- [9] P. Han, X. He, H. Ren, Y. Wang, X. Peng, Z. Shu, S. Gao, Y. Wang, and Z. Chen. "Fault diagnosis and system reconfiguration strategy of a single-phase three-level neutral-point-clamped cascaded inverter." *IEEE Transactions on Industry Applications* 55, no. 4 (2019): 3863-3876.
- [10] D. Chen, Y. Ye, and R. Hua. "Fault diagnosis of three-level inverter based on wavelet analysis and Bayesian classifier." *In 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 4777-4780. IEEE, 2013.
- [11] K.H. Chao, and C.H. Ke. "Fault diagnosis and tolerant control of three-level neutral-point clamped inverters in motor drives." *Energies* 13, no. 23 (2020): 6302.
- [12] S. Valipour, S.S. Moosavi, D.A. Khaburi, and A. Djerdir. "An open-circuit fault detection method using wavelet transform for cascaded h-bridge multilevel inverter." *In 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-5. IEEE, 2017.
- [13] S. Rokocakau, G. Tresca, G. Cirrincione, P. Zanchetta, R. Kumar, M. Cirrincione, and L. Frosini. "Fault Detection in Cascaded H-Bridge Inverters using Spectrogram Analysis and Convolutional Neural Networks." *In 2023 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2023 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 1-6. IEEE, 2023.

- [14] L.M. Halabi, H.A. Gamal Al-Kaf, and K.B. Lee. "Efficient Fault Detection for Open Circuit Faults in HANPC Inverters Using Artificial Neural Network for Motor Drive Applications." *In 2023 IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*, pp. 1-6. IEEE, 2023.
- [15] H. Feshki Farahani. "A New Topology for Single Phase Voltage Source Multilevel Inverter Based on Reduction of Semiconductor Switches." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 52 (2018): 97-108.
- [16] M.R. Mullali Kunnontakath Puthiyapurayil, M.N. Nasirudeen, Y.A. Saywan, M.W. Ahmad, and H. Malik. "A review of open-circuit switch fault diagnostic methods for neutral point clamped inverter." *Electronics* 11, no. 19 (2022): 3169.