

افزایش سرعت و دقت تشخیص عیب مدار باز مبدل پشت به پشت توربین بادی DFIG به منظور استفاده در کنترل تحمل پذیر خطای مدار باز سوئیچ IGBT

مهرنوش کمرزین^۱، محمد حسین رفان^۲

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
 ۲- دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، Refan@sru.ac.ir

چکیده

پایش وضعیت و عیب‌یابی توربین بادی، موجب افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن آن می‌شود. یکی از رایج‌ترین انواع توربین بادی، نوع DFIG با مبدل پشت به پشت است. نرخ عیب مدار باز سوئیچ IGBT مبدل، در مقایسه با نرخ کل خطا در توربین بادی قابل توجه است. مدار باز شدن IGBT مبدل توربین بادی، موجب نقصان در جریان خروجی مبدل و در نتیجه کاهش عملکرد تولید توان توربین بادی خواهد شد. به منظور کنترل تحمل‌پذیر خطا در مبدل پشت به پشت نیاز به روشی دقیق و سریع در تشخیص عیب مدار باز است. در این مقاله عیب مدار باز گیت IGBT مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر DFIG، با استفاده از یک روش جدید با تمرکز بر افزایش سرعت و دقت، آشکارسازی و مکان‌یابی می‌شود. روش پیشنهادی ارزان قیمت بوده و برای آشکارسازی و تعیین مکان عیب، به سنسور و سخت‌افزار اضافه نیاز ندارد. تشخیص عیب بر اساس استراتژی فیوژن در سطح ویژگی است. برای ارزیابی ساختار پیشنهادی از یک بستر شبیه‌سازی مبتنی بر داده‌های واقعی توربین بادی ۲/۵ مگاوات شرکت مینا استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها، موثر و مقاوم بودن روش پیشنهادی را در تشخیص عیوب تنها و چندگانه‌ی همزمان و غیر همزمان، در یک ساق یا ساق‌های متفاوت مبدل سمت شبکه و سمت روتور نشان دادند. روش ارائه شده در مقایسه با سایر روش‌ها سریع و پیاده‌سازی آن آسان است.

واژه‌های کلیدی

مدار باز، IGBT، مبدل پشت به پشت، DFIG، فیوژن.

مقدمه

می‌شود و در صورت وقوع، توربین بادی خاموش می‌گردد. اما عیب مدار باز IGBT مبدل توربین بادی باعث از کار افتادن توربین بادی نمی‌شود، بلکه در شرایط عملکردی توربین بادی از جمله کیفیت توان، بهم زدن تعادل و بالانس بین فازها تاثیرگذار است [۳]. عیب مدار باز موجب نشت جریان آفست در فازها به خصوص فاز مربوط به همان سوئیچ خواهد شد. جریان آفست مورد نظر البته مشکلاتی را در مشخصه‌های IGBT نیز ایجاد می‌کند و این امر ممکن است موجب عیوب ثانویه و آسیب به کل ساختار کانورتر شود [۴]. تشخیص سریع این عیب سوئیچ و رفع آن موجب افزایش در دسترس‌پذیری توربین بادی خواهد شد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلف در خصوص آشکارسازی عیب مدار باز سوئیچ ارائه شده است. هر چند برخی از این روش‌ها بسیار دقیق هستند اما در خصوص پایش وضعیت مبدل توربین بادی امکان پیاده‌سازی در سامانه کنترل برای جبران‌سازی خطا اهمیت زیادی دارد. چنین روشی باید ساده باشد و دچار آلام اشتباه نشود. نیاز به سخت‌افزار و سنسور اضافه نداشته باشد، مقاوم باشد، خطاهای چندگانه و خطاهای همزمان سوئیچ را تشخیص دهد، ارزان قیمت و سریع باشد. در این مقاله عیب مورد مطالعه از مبدل توربین بادی

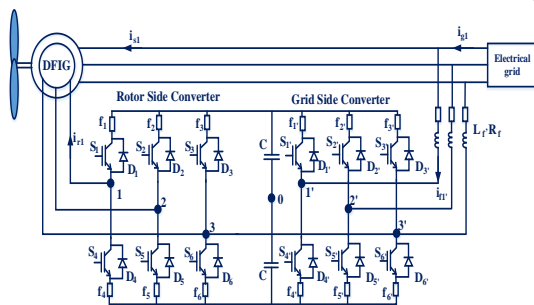
در مزارع بادی به سبب تنظیم توان راکتیو، بهبود کیفیت توان و سایر خصوصیات، تعداد زیادی از توربین‌های بادی دارای ژنراتور دو سو تغذیه^۱ هستند. این ژنراتورها از یک مبدل دو سوئه استفاده می‌کنند که شامل دو مبدل قدرت است. یک مبدل به شبکه و استاتور ژنراتور متصل است و مبدل دیگر به سیم‌پیچ روتور متصل است [۱]. نرخ عیوب مبدل توان در توربین بادی زیاد است. در مبدل‌های توان، نزدیک به ۳۵ درصد عیوب به واسطه سوئیچ‌های ترانزیستور دو قطبی با گیت عایق شده^۲ است. این عیوب اغلب به واسطه استرس‌های مکانیکی، خطا در مدار کنترل گیت، استرس حرارتی، قطع سیم و مشکلات جریانی است [۲]. دو عیب در بخش مبدل توربین بادی مطرح است، خطای مدار باز و اتصال کوتاه سوئیچ. بر خلاف خطای مدار باز که اغلب نرم‌افزاری حل می‌شود. عیب اتصال کوتاه سوئیچ اغلب به صورت سخت‌افزاری حل می‌شود. عیب اتصال کوتاه توسط سامانه حفاظت توربین بادی کنترل

^۱ Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)

^۲ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

مطلق بردار پارک نرمالیزه، مقدار میانگین جریان و قدر مطلق مقدار میانگین جریان در یک دوره، ایندکس معناداری برای آشکارسازی عیب مدار باز سوئیچ تولید می‌شود. این ایندکس برای تولید یک نشانه از زوال/استستی^۴ سوئیچ بر اساس فیوژن در سطح ویژگی استفاده می‌شود. این روش در مقابل نوسانات، اغتششات و تغییرات عملکردی توربین بادی که موجب آلامر اشتباه^۵ می‌شود، پایدار است و از طرفی دارای قابلیت اطمینان بالایی است که نرخ از دست رفتن آلامر^۶ آن تقریب صفر است. نوآوری مقاله، استفاده از استراتژی فیوژن در سطح ویژگی برای تشخیص عیب چندگانه و همزمان مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین بادی است. از بخش‌های برجسته مقاله مرور کامل پیشینه تحقیقات در این حوزه است.

سنجش و ارزیابی روش بر اساس یک شبیه‌ساز توربین بادی منطبق بر توربین بادی ۲/۵ مگاوات کهک متعلق به شرکت مپنا است. شبیه‌ساز مورد استفاده منطبق بر پارامترهای اجزای توربین واقعی است و بر اساس داده‌های واقعی سرعت باد کار می‌کند.



شکل ۱. توپولوژی توربین بادی مبتنی بر DFIG و مبدل پشت به پشت

ساختار مقاله به این صورت است؛ در بخش دوم مقاله مروری بر انواع روش‌های عیب‌یابی و تشخیص عیب مدار باز سوئیچ IGBT در انواع مبدل‌ها انجام شده است. این بخش یک مرور کامل است. روش پیشنهادی در بخش سوم بیان می‌شود. بخش چهارم مقاله ارائه‌ی بستر شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی شده است. بخش پنجم مقاله بحث و بررسی نتایج است و مقاله با بیان نتیجه‌گیری در بخش ششم پایان می‌یابد.

پیشینه تحقیقات

تحقیقات این حوزه را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم کرد. روش‌های تشخیص عیب مدار باز سوئیچ مبدل‌ها با کاربرد توربین بادی و دسته دوم کاربردهای غیر از توربین بادی. دسته اول خود به توربین‌های DFIG و PMSG تقسیم می‌شود. دسته

مدار باز سوئیچ IGBT است. برای بررسی بهتر و ارائه پیشینه تحقیقاتی مناسب از تحقیقات در حوزه تشخیص عیب مدار باز سوئیچ IGBT، مرور در دو دسته مختلف شامل روش‌های تشخیص عیب مبدل‌های توان در کاربردهای غیر توربین بادی و روش‌های تشخیص عیب مبدل توربین بادی در بخش دوم مقاله ارائه می‌شود. امروزه توربین‌های بادی اغلب مبتنی بر ژنراتورهای DFIG و ژنراتور سنکرون آهن ربای دائم^۲ هستند. هر دو دسته این ژنراتورها برای اتصال به شبکه از مبدل استفاده می‌کنند، با این تفاوت که ژنراتورهای PMSG از یک مبدل به صورت توان کامل و برابر با توان کل ژنراتور استفاده می‌کنند، اما توربین‌های DFIG از مبدل‌هایی با حدود ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور استفاده می‌کنند [۵]. در توربین‌های PMSG مبدل مابین شبکه و ژنراتور قرار می‌گیرد و ژنراتور به طور مستقیم با شبکه ارتباط ندارد اما در نوع توربین بادی DFIG استاتور ژنراتور به شبکه متصل می‌شود و روتور ژنراتور از طریق مبدل به شبکه متصل می‌شود. در هر دو این توربین‌ها از مبدل پشت به پشت استفاده می‌شود که از ۱۲ سوئیچ بهره می‌برند؛ شش سوئیچ برای سمت شبکه در هر دو نوع توربین و شش سوئیچ برای سمت روتور در توربین‌های مبتنی بر DFIG و یا شش سوئیچ برای سمت ژنراتور در توربین‌های مبتنی بر PMSG. توربین‌های تجاری اغلب به همین آرایش هستند، هر چند مبدل‌های نوع دیگر چون پشت سرهم، چند سطحی و ماتریسی در مقالات و برخی توربین‌ها به ندرت به کار گرفته شده‌اند. در توربین‌های PMSG از مبدل‌های توان بالا (بیش از سه مگاوات، برابر با توان کل توربین) بهره می‌برند و یا توربین‌های DFIG از مبدل‌های با توان ۸۰۰ تا ۱ مگاوات (تقریباً یک سوم توان کل توربین) استفاده می‌کنند. در همه این نوع مبدل‌های پشت به پشت، عیب مدار باز سوئیچ یک عیب رایج است.

در این مقاله توربین مورد مطالعه از نوع DFIG است و در شکل ۱ ساختار کلی آن نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که عیب مدار باز سوئیچ ممکن است که برای دو سوئیچ در یک ساق، دو سوئیچ در دو ساق، سوئیچ‌های همزمان در دو سمت شبکه و روتور به صورت همزمان و غیرهمزمان اتفاق بیافتد. روش موثر آن است که عیوب همزمان و غیرهمزمان چندگانه مبدل سمت شبکه و مبدل سمت روتور را آشکارسازی و مکان سوئیچ معیوب را مشخص کند.

در این مقاله از یک روش سریع، ساده و با قابلیت اطمینان بالا برای تشخیص عیب (آشکارسازی خطا و تعیین مکان خطا) استفاده می‌شود. روش بر اساس فیوژن در سطح ویژگی است. در این روش بر اساس ویژگی‌های فاکتور شکل جریان، قدر

^۴ Signature Of Degradation (SOD)

^۵ False Alarm Rate (FAR)

^۶ Miss Alarm Rate (MAR)

^۲ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

عیب سوئیچ مبدل پشت به پشت بر اساس دو معیار ولتاژ و زمان ارائه شده است. در مبدل مربوط به DFIG و در بالاتر از سرعت سنکرون مشکل آلامر اشتباه مشهود خواهد شد که در مراجع [۱۲-۱۳] این مشکل با استفاده از اندازه‌گیری جریان DC نرمالیزه شده مطلق حل شده است. در مقاله [۱۴] یک روش بر اساس بردار پارک نرمالیزه قدر مطلق جریان ارائه شده است و تشخیص را در ناحیه سنکرون تضمین می‌کند. در مرجع [۱۵] روشی با استفاده از جریان‌های فاز نرمالیزه شده و قدر مطلق جریان فازها معرفی شده است. در این مقاله از یک آستانه تطبیقی استفاده شده است. یک روش بر اساس شبکه عصبی ارائه شده است که مشکل زمان آموزش بالا دارد [۱۶]. در مقاله [۱۳] روشی بر اساس جریان DC نرمالیزه شده مطلق اعمال شده است و در مرجع [۱۷] این روش گسترش و بهبود داده شده است. مقاله [۱۸] بر اساس FPGA و برای کنترل تحمل پذیر خطا با افزودن دو سوئیچ است. روش‌های مبتنی بر FPGA در [۲۰-۱۸] نیز ارائه شده است. در [۲۱] روش تشخیص و جداسازی خطای در حوزه زمان-فرکانس چند فیزیکی برای مبدل‌های پشت به پشت در توربین‌های بادی DFIG با تمرکز بر خطای مدار باز سوئیچ پیشنهاد شده است. به منظور کاهش FAR در روش پیشنهادی، ترکیبی از شاخص‌های خطا بر اساس تجزیه و تحلیل سیگنال‌های الکتریکی در حوزه زمان-فرکانس و همچنین تجزیه و تحلیل سیگنال‌های ارتعاش در حوزه فرکانس با روش‌های جمع آماری، نظارت بر واریانس توان راکتیو، استفاده شده است. در [۲۲] به بررسی روش تشخیص خطا مبتنی بر شبکه حافظه کوتاه مدت طولانی^{۱۳} پرداخته می‌شود. این روش به منظور شناسایی عیب سوئیچ مدار باز مبدل پشت به پشت در یک توربین DFIG استفاده گردیده است. مطابق با نتایج شبیه‌سازی این روش در مقایسه با روش‌های دیگر مبتنی بر شبکه عصبی، خطا را با دقت با و حداقل تاخیر تشخیص می‌دهد. سیگنال‌های مورد استفاده در این روش به فاز ولتاژ و سه فاز جریان هستند. روش جدیدی مبتنی بر اثر کلی تجزیه حالت تجربی^{۱۴} و توابع حالت ذاتی^{۱۵} در [۲۳] به منظور تشخیص خطای مدار باز مبدل در توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG ارائه شده است.

پیشینه تحقیقات در کاربرد غیر از توربین بادی روش‌های سیگنال - پایه، جریان

این دسته شامل بردار پارک در مراجع [۲۴] و [۲۵]، میانگین بردار پارک در مراجع [۲۶]، روش جریان نرمالیزه DC و جریان

دوم شامل روش سیگنال - پایه مبتنی بر جریان، سیگنال-پایه مبتنی بر ولتاژ، مدل پایه و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی است.

پیشینه تحقیقات در کاربرد توربین بادی توربین‌های PMSG

در مقاله [۱] برای مبدل ژنراتور PMSG دو روش مجزا برای تشخیص مکان خطا و خطایابی سمت ژنراتور و سمت شبکه به کار گرفته شده است. مدل خطایابی بر اساس فاز بردار پارک است و مکان خطا در سمت شبکه بر اساس پلار تیه جریان تعیین می‌شود در حالیکه در سمت ژنراتور بر اساس مقادیر میانگین جریان نرمالیزه شده است. در مقاله [۲] از یک روش بلادرنگ مبتنی بر بردار پارک برای تشخیص خطای مدار-باز و مکان سوئیچ معیوب در مبدل AC/DC استفاده شده است. ژنراتور مربوطه از نوع PMSG بوده و از RMS جریان نرمالیزه شده برای خطایابی و تشخیص استفاده شده است. بر اساس همین ساختار ولی با دریافت ولتاژ لینک DC خطایابی و تشخیص سوئیچ مدار باز مبدل توربین بادی با ژنراتور PM در [۳] انجام شده است. در [۴] یک روش بر اساس مشاهده‌گر^۷ برای آشکارسازی و میانگین جریان برای مکان‌یابی عیب مدار باز سوئیچ مطرح شده است. در مقاله [۵] روشی بر اساس شیب زاویه فاز بردار پارک جریان سه فاز ژنراتور PMSG ارائه شده است. روش مبتنی بر شبکه عصبی و به عنوان روش هوشمند در [۶] ارائه شده است. در [۷] شبکه عصبی مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشن^۸ به عنوان یک روش تشخیص عیب استفاده می‌شود. روش توسعه یافته‌ی یادگیری ماشین مبتنی بر مدل مارکو پنهان^۹ و تجزیه و تحلیل اجزا^{۱۰} در تشخیص خطا کانورتور توربین بادی PMSG در [۸] ارائه شده است.

توربین‌های DFIG

در مقاله [۹] پیشنهاد شده است که برای مکانیابی خطا مبدل پشت به پشت ژنراتور DFIG از آنالیز ساختاری استفاده شود. در این مرجع برای بهبود عملکرد از روش میانگین متحرک وزن‌دار استفاده شده است. برای مبدل پشت به پشت DFIG چهار سوئیچ، روش‌هایی برای خطای سوئیچ مطرح شده است که این روش‌ها بر اساس بازیابی ساختار^{۱۱} هستند [۱۰]. در [۱۱] یک روش مبتنی بر FPGA^{۱۲} و سریع برای تشخیص

^۷ Observer

^۸ Convolutional Neural Network (CNN)

^۹ Hidden Markov Model (HMM)

^{۱۰} Principal Component Analysis (PCA)

^{۱۱} Reconfiguration

^{۱۲} Field-Programmable Gate Array (FPGA)

^{۱۳} Long Short-Term Memory (LSTM)

^{۱۴} Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)

^{۱۵} Intrinsic Mode Functions (IMF)

اساس تابع سوئیچ‌زنی ارائه شده است که بر اساس خطای ولتاژ بین مقدار تخمینی و اندازه‌گیری شده است.

روش‌های مدل-پایه

در دسته روش‌های مبتنی بر مدل، مشاهده‌گرها جایگاه ویژه‌ای دارند؛ بر اساس خطای جریان در [۳۲] برای عیب مدار باز سوئیچ، مشاهده‌گر طراحی شده است. بر اساس مشاهده‌گر انتگرال غیر خطی در [۵۵] و بر اساس مشاهده‌گر اسلایدینگ مود^{۱۸} [۵۶] روش‌های دیگری برای این عیب مطرح شده است. برای مبدل‌های مدولار و طراحی مشاهده‌گر بر اساس ولتاژ در [۵۷] عیب مدار باز سوئیچ IGBT تشخیص داده شده است. همچنین در مقاله [۵۸] یک روش مبتنی بر مشاهده‌گر برای درایوهای موتور برای خطاهای تنها و همزمان ارائه شده است که نیاز به سنسور اضافه ندارد. به طور کلی اشکال روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر وابستگی به پارامترهای سیستم است، اما عمدتاً روش‌های دقیقی هستند. در مورد درایو VSI موتورهای سنکرون PM مبتنی بر مشاهده‌گر لوتنبرگر^{۱۹} و اندازه‌گیری جریان، روشی برای تشخیص خطاهای سنسوری و مدار باز شدن IGBT در [۵۹] ارائه شده است. بر اساس طراحی مشاهده‌گر لوتنبرگر یک روش برای جبران خطای تحمل‌پذیر درایو PMSG ارائه شده است [۶۰]. خطای مدار باز سوئیچ درایو PWM بدون افزودن سنسور و سخت‌افزار اضافه بر اساس ولتاژ مرجع موجود در سیستم کنترل و با استفاده از مقاوم-سازی بر اساس مشاهده‌گر آشکارسازی شده است [۶۱]. در مقاله [۶۲] و برای مبدل سه فازه VSI PWM ژنراتور PMSM، خطای مدار باز به عنوان یک اعوجاج در ولتاژ در نظر گرفته شده است و سپس یک ولتاژ مرجع از روابط مربوط به این مبدل استخراج شده است. روش‌های مبتنی بر WT در [۶۳] ارائه شده است. روش‌های دیگر مدل-پایه شامل؛ روش مدل پایه مبتنی بر تولید بردار مانده از جریان [۶۴]، یک روش سریع پایه تابع سوئیچ زنی [۶۵]، افزودن فوتوکوپلر برای اندازه‌گیری ولتاژ [۶۶]، و یک روش برای PWM یکسوساز بر اساس تولید مانده مبتنی بر مدل مشاهده‌گر و فاکتور CFF با یک آستانه تطبیقی است [۶۶].

روش‌های هوش مصنوعی

در دسته روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز برای عیب مدار باز سوئیچ روش‌هایی ارائه شده است؛ از جمله در کاربردهای بلادرنگ [۶۷]، مبتنی بر شبکه عصبی و برای

مستقیم ساده در مراجع [۲۸-۲۷] است. در مراجع [۲۹] با استفاده از میانگین جریان نرمالیزه مطلق مشکل وابستگی روش بردار پارک و روش‌های جریانی به بار کاهش پیدا کرده است. کاهش وابستگی به بار و کاهش نرخ آلامر اشتباه در مرجع [۳۰] نیز توسعه داده شده است. از جمله روش‌های دیگر برای عیب مدار باز سوئیچ، روش مبتنی بر دانش و با استفاده از مسیر حرکت^{۱۶} جریان [۳۱]، فرکانس آنی بردار فضای جریان AC [۳۱]، آشکارسازی خطا بر اساس مرکز ثقل [۳۲] است. در مقاله [۳۳] بر اساس میانگین جریان فازها و میانگین مطلق، روشی برای آشکارسازی عیب مدار باز IGBT درایو طرح شده است. برای مبدل AC/DC بر اساس مسیر حرکت جریان در [۳۴] عیب مدار باز سوئیچ آشکارسازی شده است. روش‌های مبتنی بر بردار پارک و با استفاده از شناسایی الگو نیز برای تشخیص عیب مبدل استفاده شده است [۳۵-۳۶]. روش‌هایی بر اساس خطای جریان مرجع [۳۷] و خطای جریان نرمالیزه [۳۸] برای عیب مدار باز سوئیچ مبدل ارائه شده است. در [۳۹] یک روش بر اساس تشابه جریانی و بر اساس تشخیص الگو عیب ارائه شده است که مشکل این روش پیاده‌سازی پیچیده و زمان محاسباتی آن است. در [۴۰] برای عیب‌یابی سوئیچ‌های یک اینورتر منبع ولتاژ^{۱۷} از دو خروجی جریان در شکل آلفا-بتا استفاده شده است. برای اینورتر VSI و برای تک و دو سوئیچ بر اساس جریان‌های سه فاز خروجی موتور و محاسبه مانده‌ی حاصل از تفاضل جریان فازها، عیب مدار باز IGBT تشخیص داده می‌شود [۴۱]. در [۴۲] یک روش پیشرفته و سریع برای تشخیص عیب سوئیچ معیوب بر اساس طراحی مشاهده‌گر انحراف معیار جریان کنترلی ارائه شده است.

روش‌های سیگنال-پایه، ولتاژی

در دسته روش‌های سیگنال پایه استفاده از ولتاژ به جای جریان نیز مرسوم است که نیاز به سنسور ولتاژ اضافه دارد [۴۳-۴۴]، از جمله؛ مقایسه ولتاژ AC واقعی و کمیت مرجع در حوزه زمان [۴۵]، شناسایی با اندازه‌گیری ولتاژ سرتاسر سوئیچ پایین‌تر [۴۶]، بر اساس ولتاژ کلکتور امیتر [۴۷]، در مقاله [۴۸] و [۴۹] با استفاده از رفتار گیت و در [۵۰] بر اساس جریان مسقیم براسلس. روش‌های دیگر با استفاده از اندازه‌گیری ولتاژ شامل روش‌های مبتنی بر شیب تصحیح شده برای درایو VSI [۵۱]، گیت قابل برنامه‌ریزی برای مبدل‌های DC-DC [۵۲]، آنالیز سیگنال سوئیچ‌زنی PWM و ولتاژ خط به خط در زمان سوئیچ زنی [۵۳] هستند. در مرجع [۵۴] یک روش دیگر بر

^{۱۸} Sliding Mode

^{۱۹} Luenberger

^{۱۶} Trajectory

^{۱۷} Voltage Source Inverters (VSI)

درصد آلام اشتباه بسیار کمی در حالت گذار توربین بادی داشته باشد. به سبب دینامیک متغیر و ناپایدار مبدل پشت به پشت در ساختار DFIG، تشخیص عیب مدار باز سوئیچ، چالش‌هایی دارد و در مقالات به آن کم پرداخته شده است.

آشکارسازی خطای مدار باز سوئیچ بر اساس روش فیوژن در سطح ویژگی

در شکل ۱ ساختار توربین بادی از یک گیربکس، یک ژنراتور DFIG و یک مبدل پشت به پشت تشکیل شده است. مبدل پشت به پشت از یک مبدل سمت روتور و یک مبدل سمت شبکه تشکیل شده است و هر یک بر اساس ساختار مبدل منبع ولتاژ است. برای آشکارسازی خطا، جریان‌های سه فاز سمت شبکه و سه فاز سمت روتور استفاده می‌شود. این اطلاعات در سیستم کنترل مبدل اندازه‌گیری می‌شود.

برای آشکارسازی خطای مبدل از روش فیوژن در سطح ویژگی استفاده می‌شود. ساختار کلی روش پیشنهادی در این مقاله در شکل ۲ آمده است. برای فیوژن در سطح ویژگی از الگوریتم فاصله از مقدار نرمال استفاده شده است. فیوژن در سطح ویژگی موجب افزایش قابلیت اطمینان در تصمیم‌گیری می‌شود و باعث می‌شود که ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال که دارای نایقینی، ابهام و ناکاملی است برای آشکارسازی خطا مناسب شود. بر اساس فیوژن در سطح ویژگی یک ایندکس جدید برای آشکارسازی خطای مدار باز سوئیچ تولید می‌شود. مقدار نرمال ویژگی‌ها در شرایط بودن خطا، نقطه نرمال^{۲۱} نامیده می‌شود و ایندکس جدید SOD است. رابطه استخراج SOD به صورت (۱) است.

$$SOD(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_i(t) - U_{pj})^2} \quad (1)$$

در این رابطه SOD(t) نشان دهنده یک ایندکس از عیب سیستم، $U_i(t)$ مقدار اندازه‌گیری شده ویژگی زام و U_{pj} مقدار نرمال ویژگی زام است. ۴ ویژگی در این مقاله برای محاسبه SOD استفاده می‌شود. در ادامه این ۴ ویژگی و تاثیرپذیری آن‌ها نسبت به عیب مدار باز سوئیچ بررسی می‌شود.

ویژگی اول: فاکتور شکل جریان^{۲۲}

فاکتور CSF بر اساس نسبت مقدار RMS و مقدار میانگین قدر مطلق جریان تعریف می‌شود، دو مقدار CSF محاسبه می‌شود که اولی مقدار اندازه‌گیری شده در هر لحظه و دومی شکل نرمال این فاکتور است [۴].

$$U_{1,CSF}(t) = \frac{|i_c|_{rms}}{|i_c|_{avg}} \quad (2)$$

^{۲۱} Normal Point (NP)

^{۲۲} Current Shape Factor (CSF)

اینورترهای چند سطحه [۶۸] و بر اساس شناسایی الگو تابع [۶۹].

برخی از این روش‌ها مبتنی بر شناسایی الگو هستند که از سرعت لازم برای ترکیب با سیستم کنترل برخوردار نیست [۷۰]. روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک شامل مراجع [۷۳-۷۱] است، روش‌های تبدیل موجک شبکه عصبی [۷۴] و ANFIS^{۲۰}-موجک [۷۵] که عمدتاً مبتنی بر داده هستند برای تشخیص عیب ساق و سوئیچ معیوب ارائه شده است. در مقاله [۷۰] برای خطایابی و مکانیابی خطا مربوط به سوئیچ PWM-VSI از روش فازی که نیازمند اندازه‌گیری جریان خروجی استفاده شده است. مطابق با هر خطای مدار باز جریان خروجی یک الگو مشخص دارد که این الگو مشخص از بردار مربوط به جریان استاتور استخراج می‌شود، روش سیگنال-پایه تبدیل موجک-فازی در مرجع [۷۶] مطرح شده است، به گونه‌ای که جریان لینک DC، ورودی مدل تبدیل موجک برای استخراج ویژگی است. ویژگی‌ها در سرعت ثابت درایو از الگوهای جریانی استخراج و سپس مدل فازی وظیفه‌ی تقسیم‌بندی الگوها را بر عهده دارد. در [۷۷] بر اساس همکاری تبدیل موجک و فازی، خطای مدار باز سوئیچ IGBT در ماتریس مبدل تشخیص داده شده است.

آنالیز پیشینه تحقیقات حوزه تشخیص عیب مدار باز سوئیچ مبدل

روش‌های مبتنی بر ولتاژ عمدتاً نیاز به سنسور اضافه دارند و از طرفی در تشخیص عیوب همزمان و چندگانه ناتوان هستند. روش‌های مبتنی بر جریان عمدتاً وابسته به تغییرات جریان و بار هستند، هر چند این روش‌ها بهبود یافته اند اما در مقایسه با روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر از دقت پایینی در آشکارسازی خطا برخوردارند. روش‌های مبتنی بر مدل دقت بسیار خوبی دارند و چون بر اساس اطلاعات عمیق سیستم عمل می‌کنند دارای ویژگی مقاوم بودن هستند. اما اشکال عمده در آن وابستگی به دانش اطلاعات سیستم و پارامترهای ماشین است. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی دارای پیچیدگی زمانی زیادی هستند و برای تشخیص سریع و عملیات جبران‌سازی خطا مناسب نیستند. همچنین اغلب این روش‌ها وابسته به پایگاه داده غنی برای انواع الگوهای عیب هستند. این مرور جامع در مورد عیب‌یابی مدار باز سوئیچ‌ها در مبدل‌های توان نشان می‌دهد که روش‌های مختلف، هر کدام دارای معایب و مزایایی هستند. در کاربرد توربین بادی روشی مناسب است که در شرایط عملکردی و نقاط کاری متفاوت توربین بادی مقاوم باشد، دارای سرعت بالا برای ترکیب در سیستم کنترل باشد و

^{۲۰} Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS)

جایی که i_{jv} نشان دهنده جریان‌های سه فاز a ، b و c ، i_{jv} مقدار قدرمطلق میانگین جریان‌های فازهای j در طول یک دوره زمانی، k تعداد نمونه‌ها و N نشان‌دهنده تعداد نمونه‌ها در یک دوره زمانی است.

توربین‌های بادی سرعت متغیر، منبع تولید نویز و ناپایداری هستند. I_p از جنس سیگنال جریان است و برای تضمین قابلیت اطمینان آشکارسازی خطا در بار و سرعت متغیر کیفیت نمی‌کند. بنابراین از یک روش برای نرمال‌سازی این ایندکس استفاده می‌شود که ایندکس جدید تولیدی در مقابل شرایط گذرا مقاوم باشد. دامنه جریان بردار پارک، I ، فاکتور مورد نظر جهت نرمال‌سازی است. این ایندکس نسبت به خطای مدار باز حساس است و برای نرمال‌سازی I_p استفاده می‌شود، ایندکس جدید تولیدی با L نامگذاری شده و به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$L = I_p / I \quad (10)$$

در شرایط نرمال مقدار I_p برابر با صفر است، اما در شرایطی که یکی از سوئیچ‌ها دچار عیب شود دیگر این مقدار برابر صفر نیست چون جریان‌های سه فاز مشابه هم نیستند. خرابی هر سوئیچ موجب تغییر شکل جریان فاز مربوط به آن سوئیچ خواهد شد، در این حالت I_p دارای دامنه است که خود نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود خطا است. رفتار توصیف شده برای I_p دقیقاً در مورد L صادق است. در شرایط بدون عیب I برابر با صفر است و در حضور عیب این مقدار دارای دامنه خواهد بود و غیر صفر است، بنابراین محاسبه مانده برای رابطه (۱) و بر اساس این ویژگی ممکن می‌شود.

ویژگی سوم و چهارم: مقدار میانگین جریان و قدر مطلق مقدار میانگین جریان در یک دوره

در شرایط نرمال جریان سه فاز سمت روتور و سمت شبکه باید به صورت سینوسی کامل باشد، بنابراین خواهیم داشت [۶]؛

$$i_m = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

جایی که I_m دامنه حداکثر جریان، φ زاویه فاز اولیه و ω فرکانس زاویه‌ای است. نسبت جریان i_m با رابطه (۵) به صورت (۱۲) است.

$$I = I_m \sqrt{3/2} \quad (12)$$

بنابراین جریان نرمالیزه سه فاز از رابطه (۱۳) حاصل می‌شود.

$$i_{mN} = \frac{i_m}{\|i_s\|} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (13)$$

در یک دوره زمانی میانگین جریان نرمالیزه و قدر مطلق میانگین جریان نرمالیزه از رابطه (۱۴) و (۱۵) به دست می‌آید.

$$\bar{i}_{mN} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{mN} dt = 0 \quad (14)$$

$$|\bar{i}_{mN}| = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} |i_{mN}| dt = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{8}{3}} \cong 0.5 \quad (15)$$

مقدار $U_{p1,CSF}(t)$ که در حالت نرمال تعریف می‌شود به صورت (۳) حاصل می‌شود

$$U_{p1,CSF}(t) = \frac{|i_c|_{rms}}{|i_c|_{avg}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

بر اساس رابطه (۱) و بر اساس رابطه (۴) مقدار مانده حاصل می‌شود؛

$$R_{IGBT} = U_{1,CSF}(t) - U_{p1,CSF}(t) \quad (4)$$

در شرایط عملکرد در حالت سالم و حالت ایده‌آل مقدار مانده رابطه ۳ برابر با صفر است، اما در شرایط عملکرد واقعی و به واسطه مودهای مختلف عملکردی و وجود نویز این مقدار مانده دقیقاً برابر صفر نیست.

ویژگی دوم: قدر مطلق بردار پارک نرمالیزه^{۲۳}

روش آشکارسازی خطا باید در مقابل نرخ هشدار اشتباه^{۲۴} مقاوم باشد. در توربین بادی مبتنی بر DFIG در برخی نواحی عملکردی شکل موج جریان دچار نوسان می‌شود، که در نزدیکی ناحیه سنکرون اتفاق می‌افتد. جریان‌های ساده فاز روتور دارای پلاریته معکوس می‌شوند و جریان‌های سه فاز نامتوازن خواهد بود. این موضوع موجب افزایش FAR در نزدیکی ناحیه سنکرون می‌شود. برای جلوگیری از این اتفاق استفاده از مقادیر قدر مطلق میانگین جریان موثر است. چون مقادیر قدر مطلق جریان نسبت به تغییر پلاریته مقاوم هستند.

به طور معمول $i_{\alpha\beta}$ به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱]؛

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3} i_a - \frac{1}{3} i_b - \frac{1}{3} i_c, \quad i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c) \quad (5)$$

در رابطه (۴) i_a ، i_b و i_c جریان‌های سه فاز هستند. ماژول بردار پارک به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$I = \sqrt{i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2} \quad (6)$$

اگر در رابطه (۵)، i_a ، i_b و i_c جریان‌های سه فاز با i_{av} ، i_{bv} و i_{cv} جایگزین گردد، بردار دیگری مطابق با رابطه (۷) حاصل می‌شود.

$$i_{\alpha v} = \frac{2}{3} i_{av} - \frac{1}{3} i_{bv} - \frac{1}{3} i_{cv} \quad (7)$$

در رابطه (۷) i_{av} ، i_{bv} و i_{cv} مقادیر قدر مطلق میانگین جریان هر فاز هستند.

$$I_p = \sqrt{i_{\alpha v}^2 + i_{\beta v}^2} \quad (8)$$

مقادیر قدر مطلق میانگین جریان هر فاز مطابق با رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$i_{jv} = \frac{1}{N} \sum_{k=N+1}^k |i_j(n)| \quad (9)$$

^{۲۳} Absolute Normalized Park's Vector

^{۲۴} False Alarm Rate (FAR)

یک شبیه‌ساز توربین بادی برای ارزیابی روش پیشنهادی و شبیه‌سازی عیب مدار باز سوئیچ استفاده شده است. این شبیه‌ساز برای جمع‌آوری داده استفاده می‌شود و داده‌ی ورودی بر اساس اطلاعات واقعی توربین بادی ۲/۵ مگاوات سایت بادی کهک متعلق به شرکت مپنا است. توپولوژی سیمولاتور توربین بادی مطابق شکل (۱) است. این شبیه‌ساز بر اساس پارامترهای واقعی توربین ۲/۵ مگاوات مپنا در جدول (۲) طراحی شده است. در این شبیه‌ساز یک استراتژی کنترل برداری برای مبدل پشت به پشت استفاده شده است.

برای مبدل سمت روتور و مبدل سمت شبکه از تکنیک مدولاسیون بردار فضایی^{۲۵} بر اساس کنترل میدان مغناطیسی^{۲۶} و کنترل مغناطیسی ولتاژ شبکه^{۲۷} به ترتیب استفاده می‌شود. شبیه‌سازی عیب مدار باز IGBT با باز کردن سیگنال کنترل گیت انجام می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام شده شامل ۴ نمودار است؛ نمودار جریان‌های سه فاز؛ نمودار متغیر آشکارسازی عیب، نمودار متغیر مکان‌یابی عیب و نمودار پرچم عیب (برای ۶ سوئیچ).

ارزیابی مقاومت روش پیشنهادی در تغییرات پارامترهای DFIG

عملکرد روش پیشنهادی تشخیص عیب در تغییرات پارامترهای DFIG در این بخش بیان می‌شود. مقاومت روتور و اندوکتانس روتور در $t = 5s$ برای تغییرات در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۳) نشان‌دهنده شبیه‌سازی جریان و متغیرهای آشکارسازی در نقاط عملکردی سالم است. شکل (۳-الف) خروجی شبیه‌سازی‌ها در تغییرات گشتاور بار و مقاومتی ۱/۵ برابری مقدار نامی است. از شبیه‌سازی مشخص است که استفاده از فیوژن در سطح ویژگی موجب می‌شود که آلارم اشتباه اتفاق نیافتد و روش مقاوم است. در شکل (۳-ب) با گشتاور-بار ثابت اما تغییرات سرعت و در کاهش ۳۰ درصدی اندوکتانس سلف روتور نیز مقاوم بودن ایندکس پیشنهادی مبتنی بر فیوژن در سطح ویژگی نشان داده شده است. در شکل (۳-ج) با افزایش ۵۰ درصدی اندوکتانس سلف روتور در تثبیت گشتاور بار و تغییرات سرعت نیز مقاوم بودن روش پیشنهادی نشان داده شده است. این شبیه‌سازی‌های مقاوم بودن ایندکس حاصل از فیوژن در سطح ویژگی را در مقابل تغییرات پارامترهای DFIG نشان دادند.

با مقادیر نرمال حاصل شده از رابطه (۱۴) و رابطه (۱۵) و با فرض اینکه مقادیر این دو رابطه در وجود عیب از این اعداد متفاوت است از SOD بر پایه فیوژن ۴ ویژگی می‌توان برای آشکارسازی خطای عیب مدار باز سوئیچ هر ساق از مبدل پشت به پشت استفاده کرد. مقادیر SOD باید با سطح آستانه T_1 مقایسه شود. مقدار T_1 بر اساس آنالیز مقادیر SOD در شرایط عملکردی مختلف توربین بادی و شرایط متفاوت وجود عیب حاصل می‌شود. وجود عیب در هر ساق وابسته به ایندکس $SOD \geq 0.7$ است.

روش مکان‌یابی خطای سوئیچ

با استفاده از ایندکس $SOD \geq 0.7$ صرفاً ساق معیوب هر کدام از مبدل‌های سمت شبکه و سمت روتور مشخص می‌شود، اما تعیین کننده سوئیچ معیوب نیست. برای تعیین نوع سوئیچ معیوب از مقادیر میانگین جریان اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. به طور کلی میانگین جریان هر فاز در شرایط نرمال صفر و نزدیک به صفر است. اگر سوئیچ بالایی ساق معیوب شود، میانگین جریان فاز از حد آستانه T_2 کوچک‌تر می‌شود. اگر سوئیچ پایینی ساق معیوب باشد از حد آستانه T_2 بزرگ‌تر می‌شود. اگر در یک ساق هر دو سوئیچ معیوب باشد قطعاً میانگین جریان به صورت $-T_2 < i_{a,b,cAv} < T_2$ خواهد بود، جدول (۱) تعیین مکان عیب مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت است.

جدول ۱. تعیین مکان سوئیچ معیوب

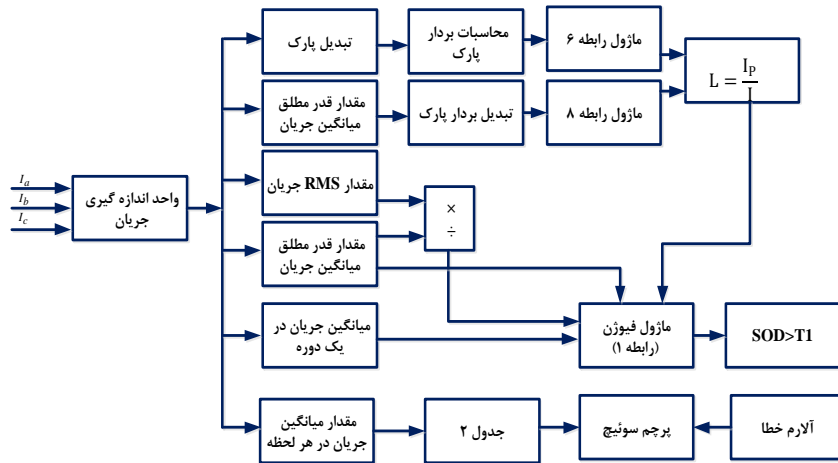
جریان میانگین سمت شبکه و سمت روتور			سوئیچ معیوب
$i_{c,Av}$	$i_{b,Av}$	$i_{a,Av}$	
-	-	$< -T_2$	$(s1 s1)$
-	$< -T_2$	-	$(s2 s2)$
$< -T_2$	-	-	$(s3 s3)$
-	-	$T_2 >$	$(s4 s4)$
-	$T_2 >$	-	$(s5 s5)$
$T_2 >$	-	-	$(s6 s6)$
-	-	$-T_2 < i_{a,Av} < T_2$	$(s1, s4 s1, s4)$
-	$-T_2 < i_{b,Av} < T_2$	-	$(s2, s5 s2, s5)$
$-T_2 < i_{c,Av} < T_2$	-	-	$(s3, s6 s3, s6)$
-	$< -T_2$	$T_2 >$	$(s2, s4 s2, s4)$
$T_2 >$	-	$< -T_2$	$(s1, s6 s1, s6)$
$< -T_2$	-	$T_2 >$	$(s3, s4 s3, s4)$
$T_2 >$	$< -T_2$	-	$(s2, s6 s2, s6)$
$< -T_2$	$< -T_2$	-	$(s3, s5 s3, s5)$

نتایج شبیه‌سازی

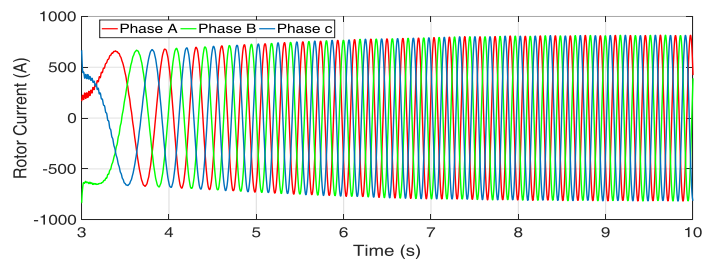
^{۲۵} Space Vector Modulation (SVM)

^{۲۶} Field Oriented Control (FOC)

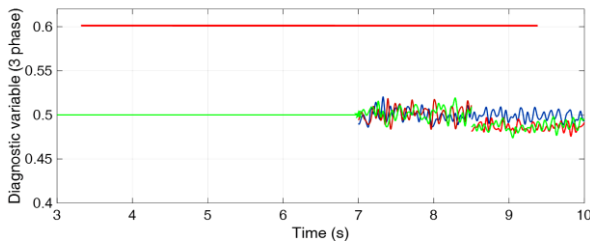
^{۲۷} Grid voltage Oriented Control (GOC)



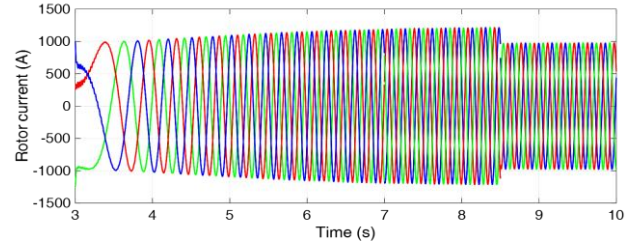
شکل ۲. ساختار پیشنهادی تشخیص عیب مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر فیوزن در سطح ویژگی



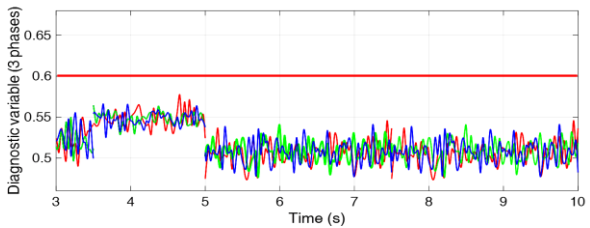
(الف)



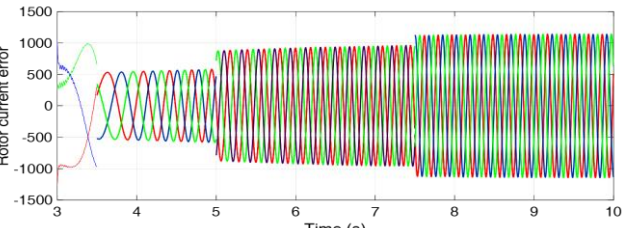
(ب)



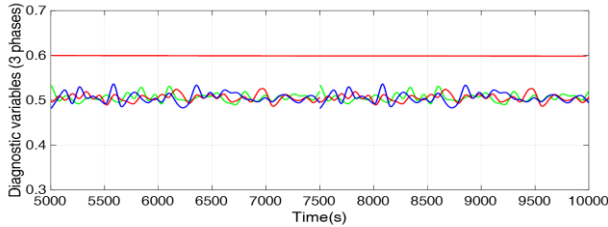
(ج)



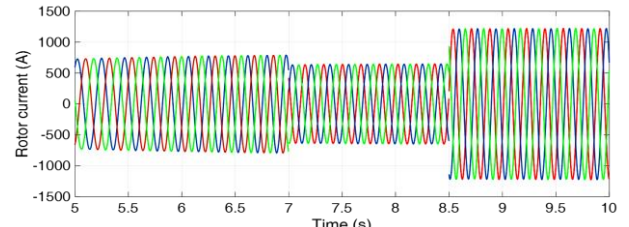
(د)



(ه)

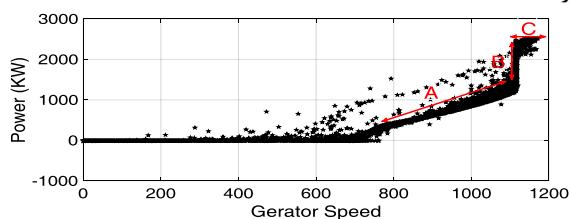


(و)

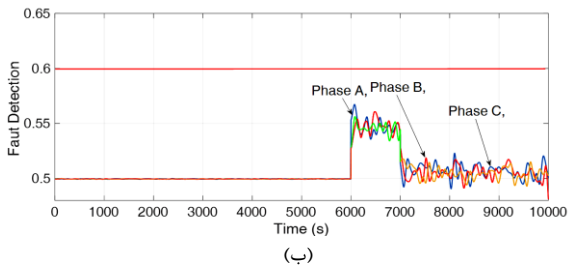
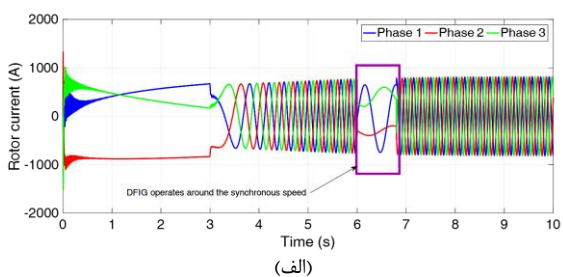


شکل ۳. سنجش مقاوم بودن ایندکس مبتنی بر فیوزن در مقابل تغییرات پارامترهای DFİG (الف) جریان سه فاز سمت روتور بدون تغییرات پارامترهای DFİG (ب) مقاومت روتور ۱/۵ برابر مقدار نامی با تغییرات گشتاور بار (ج) اندوکتانس سلف روتور ۰/۷ برابر اندوکتانس سلف روتور ۱/۵ برابر اندوکتانس نامی با تغییرات سرعت (د) اندوکتانس سلف روتور ۱/۵ برابر اندوکتانس نامی با تغییرات سرعت

مبدل سمت روتور است و در زمان ۵/۲۸۵ سوئیچ شماره ۲ (S2) مدار باز می‌شود، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود تشخیص در زمان ۵/۲۹۰ انجام شده است، در این حالت رشد جریان به گونه‌ای است که از T- کمتر می‌شود، پس نیم سیکل مثبت حذف شده و عملیات تشخیصی پرچم سوئیچ دو را بالا می‌برد. سپس در زمان ۶/۴۱۷ گیت سوئیچ شماره ۵ باز می‌شود، پرچم در زمان ۶/۴۲۲ زده می‌شود، سیکل کامل ۰/۰۲۰ است. زمان مورد نظر به اندازه نصف یک نیم سیکل است. در این حالت رشد جریان در تمامی نمونه‌ها بین $\pm T$ قرار می‌گیرد و تقریباً حول نقطه صفر متمرکز می‌شود. وجود عیب وقتی با این اتفاق توأم شود یعنی هم نیم سیکل بالا و هم پایین از بین رفته است.



شکل ۴. نواحی عملکردی توربین بادی بر اساس نمودار توان-سرعت ژنراتور



شکل ۵. نتایج شبیه‌سازی وقتی DFIG در سرعت سنکرون کار می‌کند؛ (الف) جریان‌های سه فاز (ب) رفتار تشخیص عیب

ارزیابی روش پیشنهادی در عیوب همزمان مدار باز سمت روتور

دو عیب مدار باز همزمان سمت روتور در ساق شماره یک و دو برنامه‌ریزی شده است (شبیه‌سازی شکل ۷) هدف مبدل سمت روتور است و در نمونه ۷/۲۸۶ سوئیچ شماره ۴ و ۲ همزمان مدار باز می‌شود. همان‌طور که در شکل (الف-۷) دیده می‌شود فازهای شماره ۱ و ۲ دچار اشکال شده است. در شکل (ب-۷) متغیر تشخیصی بر اساس فیوژن در مورد فازهای اول و دوم از حد آستانه عبور کرده است و وجود خطا را اعلام کرده است. در

جدول ۲. مقادیر پارامترهای توربین ۲/۵ مگاوات مینا

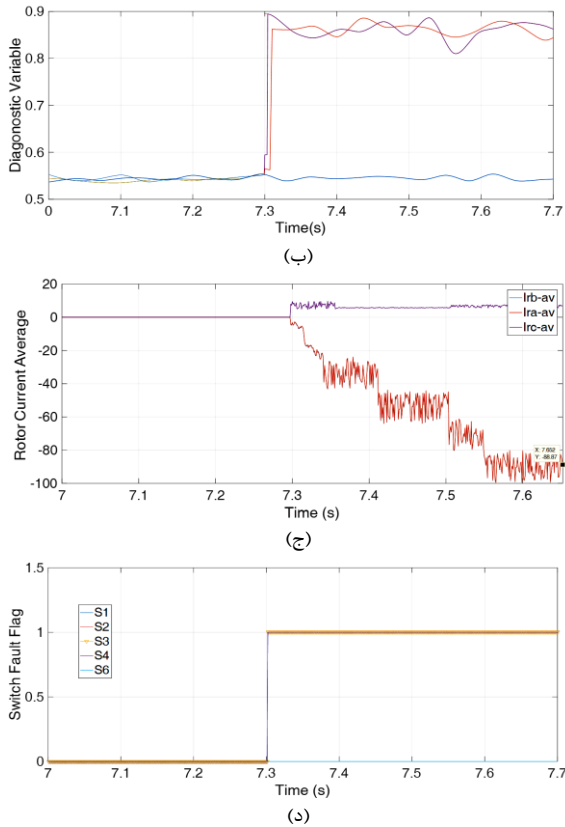
توربین بادی		ژنراتور DFIG	
توان نامی	۲/۵ مگاوات	سرعت باد	۱۱/۴۳ متر بر ثانیه
تعداد قطب‌ها	سه جفت	ضریب توان	۰/۴۳
سرعت (۵۰ هرتز)	۷۵۰-۱۳۱۰	تراکم هوا	۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب
ولتاژ نامی استاتور	۶۹۰ ولت	شعاع پره	۵۳ متر
مقاومت القایی	۰/۰۰۱۴ اهم	نسبت سرعت نوک	۹
فرکانس نامی	۵۰ هرتز	سطح پره	۸۴۹۵
مقاومت استاتور	۰/۰۰۱۴ اهم	شروع تولید	۳/۵ متر بر ثانیه
مقاومت روتور	۰/۰۰۱۴ اهم	پایان تولید	۲۵ متر بر ثانیه
اندوکتانس نشی استاتور	9.8e-5H	گیربکس	سه طبقه با ۷۹/۶:۱
اندوکتانس نشی روتور	8.6e-5H	مبدل پشت به پشت	
اندوکتانس مغناطیسی	1.69e-3H	فرکانس سوئیچینگ روتور	۲/۵ کیلو هرتز
نسبت تبدیل استاتور/روتور	۰/۳	فرکانس سوئیچینگ استاتور	۳ کیلوهرتز
مقاومت خط	۰/۰۰۰۱ اهم	خازن لینک DC/ولتاژ لینک DC	۲۲ میلی فاراد/۱۱۰۰ ولت

ارزیابی مقاومت روش پیشنهادی در سرعت سنکرون توربین بادی

در توربین بادی مبتنی بر DFIG در حوالی سرعت سنکرون (شکل ۴-ب) جریان‌های سه فاز دچار تغییرات رفتار می‌شود، این تغییرات رفتاری روی متغیر تشخیص عیب اثرگذار است و نرخ آلارم اشتباه بالا می‌رود. در همین ناحیه، نمودارهای سه فاز جریان در شکل (الف-۵) منعکس شده است. در شکل (ب-۵) واکنش روش تشخیص نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در حوالی ناحیه سنکرون روش پیشنهادی دچار آلارم پیشنهادی نمی‌شود. در این شکل نشان داده شده است که روش مبتنی بر ایندکس تولید شده از فیوژن، علی‌رغم اینکه در محدوده ناحیه سنکرون دچار بالازدگی می‌شود اما دچار آلارم اشتباه نمی‌شود، باید به این نکته توجه داشت که افزایش حد آستانه موجب کاهش حساسیت شده و نرخ اشتباه در تشخیص خطا را افزایش می‌دهد.

ارزیابی روش پیشنهادی در عیوب مدار باز چندگانه و همزمان سمت روتور

در اولین سناریو عیب در سوئیچ، دو عیب مدار باز در ساق شماره یک برنامه‌ریزی می‌شود (شبیه‌سازی شکل ۶). هدف

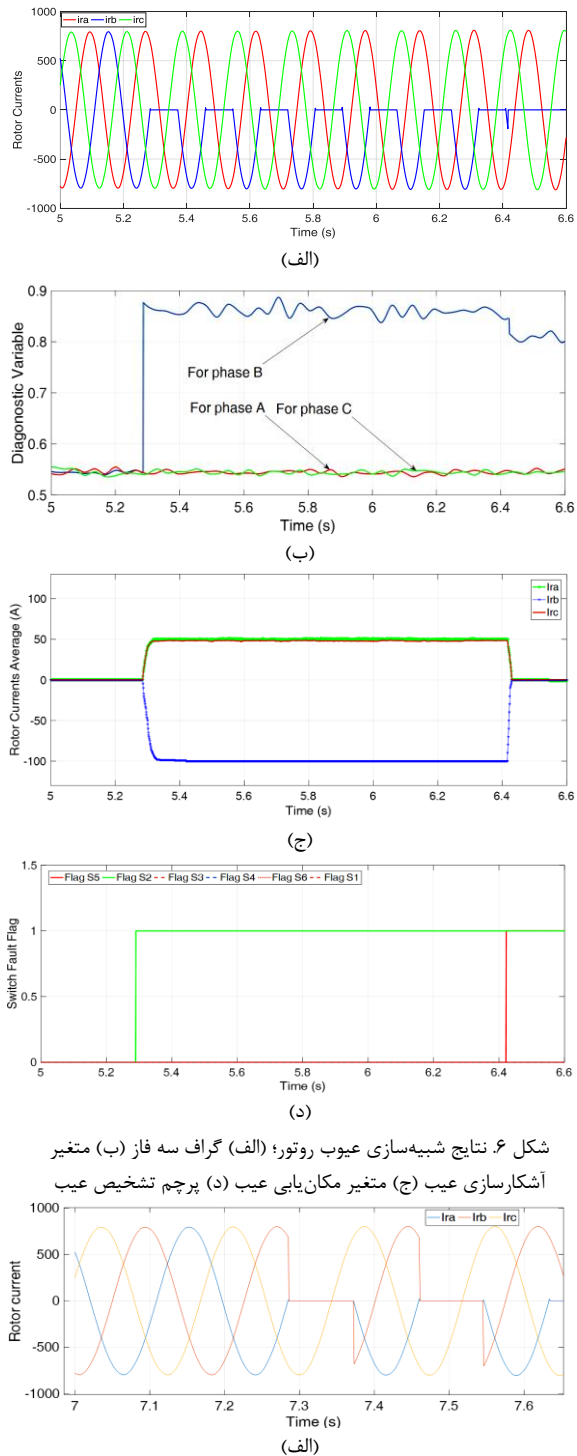


شکل ۷: نتایج شبیه‌سازی عیوب همزمان روتور؛ (الف) گراف سه فاز (ب) متغیر آشکارسازی عیب (ج) متغیر مکان‌یابی عیب (د) پرچم تشخیص عیب

ارزیابی روش پیشنهادی در عیوب مدار باز سمت شبکه

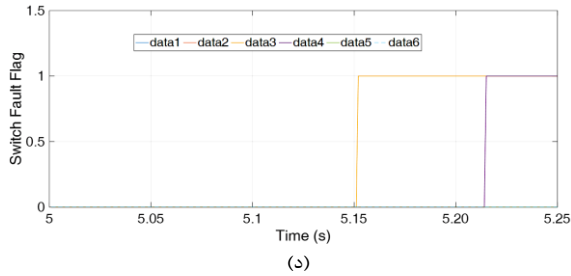
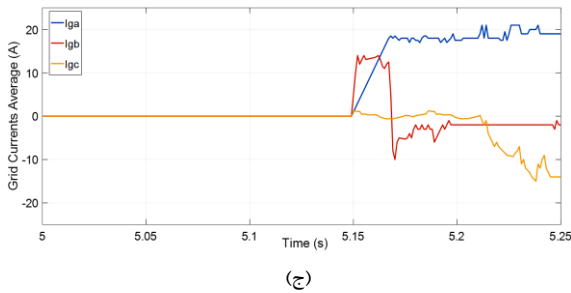
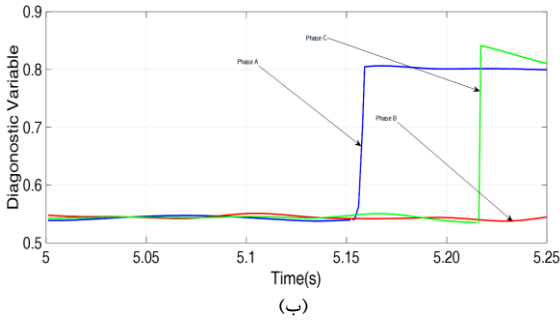
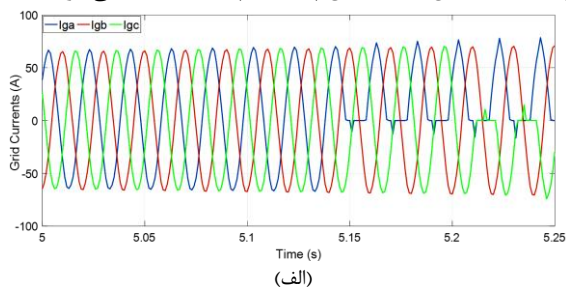
روش پیشنهادی برای عیوب چندگانه سوئیچ‌های سمت شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل (۸-الف) نمودارهای سه فاز سمت شبکه نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود در دو فاز مشکل ایجاد شده است. فاز شماره ۱ و فاز شماره ۲ تقریباً به حالت نیم سینوسی تبدیل شده‌اند. متغیر آشکارسازی خطا در شکل (۵-ب) بر اساس فیوژن ویژگی به خوبی وجود عیب در مبدل سمت شبکه را نشان داده‌اند و سطح سیگنال آشکارساز از حد آستانه برای فازهای ۱ و ۲ بالاتر رفته است. در شکل (۸-ج) میانگین جریان سه فاز نشان داده شده است که با توجه به میانگین مقادیر جریان و جدول (۱) مکان‌یاب عیب می‌توان به سوئیچ‌های معیوب پی برد. با توجه به شکل (۸-د) در زمان ۱۰/۱۰۳ گیت سوئیچ شماره ۱ باز می‌شود و پرچم در زمان ۱۰/۱۰۵ زده می‌شود و دقیقاً وجود عیب در سوئیچ ۱ را آشکار می‌کند. در همین شبیه‌سازی در زمان ۱۰/۳۷۵ گیت IGBT شماره ۵ قطع می‌شود، در این حالت مانده مربوطه منفی شده است و از طرفی میانگین جریان مربوط به این ساق (شماره ۲)، فاز دوم، از $T+$ بالاتر رفته که به معنی رشد سیگنال جریان در جهت سیکل مثبت است، پس قاعداً سیکل منفی حذف شده و تشخیص عیب برای IGBT شماره ۵ سمت شبکه ممکن می‌شود. در عیب اول پرچم در ۱۰/۱۰۵ و در عیب دوم

شکل (۷-ج) و در این حالت وجود همزمان خطا، رشد جریان به گونه‌ای است که از $T-$ کمتر می‌شود، پس نیم سیکل مثبت حذف شده و عملیات تشخیصی پرچم سوئیچ ۴ را بالا می‌برد، پرچم تشخیص عیب و علامت تشخیصی فاز دوم نیز همزمان با پرچم فاز اول زده می‌شود و وجود عیب در سوئیچ ۲ را اعلام می‌کند. بنابراین وجود عیب در فاز اول و دوم قطعی است و زمان تشخیص ثانیه ۷/۳۰۲ است. مطابق با شکل ۷ روش پیشنهادی توانسته است عیب همزمان در سوئیچ شماره ۴ از فاز اول و سوئیچ شماره ۲ از فاز دوم را تشخیص دهد.



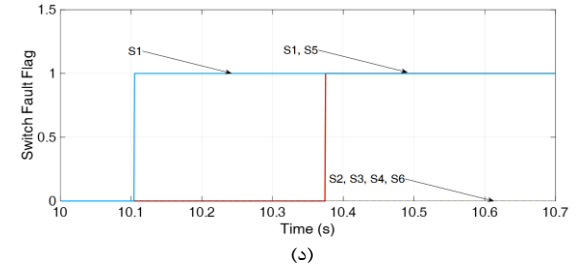
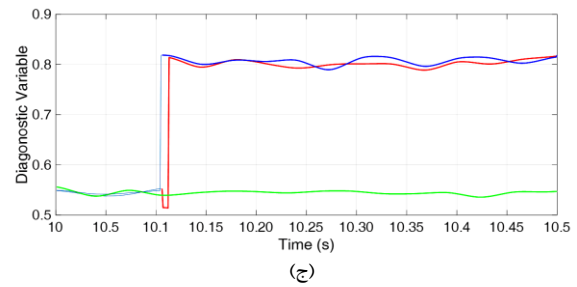
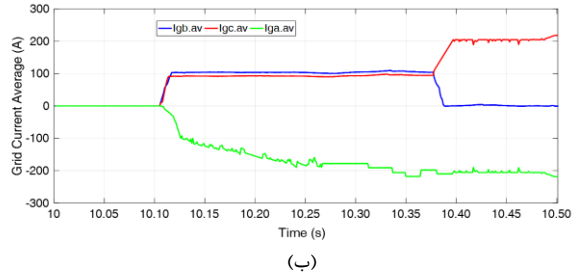
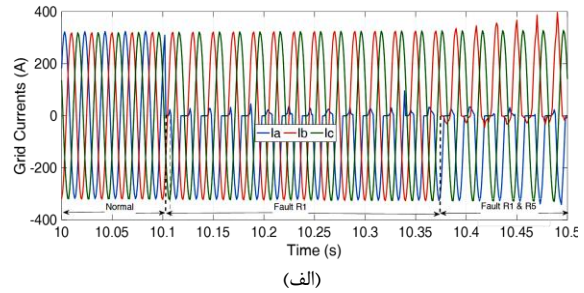
شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی عیوب روتور؛ (الف) گراف سه فاز (ب) متغیر آشکارسازی عیب (ج) متغیر مکان‌یابی عیب (د) پرچم تشخیص عیب

تشخیصی مبتنی بر فیوژن برای فاز ۱ از حد آستانه بیشتر می-شود و مقدار میانگین جریان آن نیز به سمت مقدار مثبت نمو می‌یابد (شکل ۹-ج). پرچم مربوط به سوئیچ شماره ۴ در شکل (۹-د) زده می‌شود، سپس در زمان ۵/۲۱۲ گیت سوئیچ ۳ از فاز سوم مدار باز می‌شود و پرچم در زمان ۵/۲۱۵ از ۰ به ۱ تغییر حالت می‌دهد. سایر پرچم‌ها در حالت صفر باقی می‌ماند، در شکل (۵-ج) میانگین جریان مربوط به فاز سوم به سمت مقدار منفی کشیده می‌شود و مقدار تشخیصی مربوط به این فاز از حد آستانه عبور می‌کند. در جدول (۳) یک مرور کلی و مقایسه‌ای برای روش‌های پایه‌ای تشخیص عیب مدار باز گیت IGBT انجام شده است. عموماً این روش‌ها به عنوان روش‌های پایه‌ای تشخیص عیب مبدل پشت به پشت استفاده می‌شوند.



شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی عیوب چندگانه مبدل شبکه در بار متغیر (بار و سرعت کم باد)؛ (الف) گراف سه فاز (ب) متغیر آشکارسازی عیب (ج) متغیر مکان‌یابی عیب (د) مکان‌یابی عیب (د) پرچم عیب

پرچم در ۱۰/۳۷۷ زده می‌شود که هر یک تقریباً ۱۰ درصد یک سیکل دوره جریان سمت شبکه است.



شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی عیوب چندگانه مبدل شبکه؛ (الف) گراف سه فاز (ب) متغیر آشکارسازی عیب (ج) متغیر مکان‌یابی عیب (د) پرچم عیب

ارزیابی روش پیشنهادی در بار متغیر

توربین بادی دارای نواحی عملکردی متغیر (سرعت متغیر و بار متغیر) است. ارزیابی روش پیشنهادی مبتنی بر فیوژن در تغییرات بار در شبیه‌سازی اخیر مورد نظر است. اطلاعات سرعت باد مربوط به توربین بادی واقعی که در ناحیه اول و دوم کاری است به عنوان ورودی به شبیه‌ساز توربین بادی داده می‌شود. هدف این است که عملکرد روش مبتنی بر فیوژن پیشنهادی در این مقاله در بار پایین مورد سنجش قرار گیرد. در مبدل سمت شبکه، گیت سوئیچ ۳ و ۴ به ترتیب از فاز سوم و فاز اول باز می‌شود. ابتدا گیت سوئیچ ۴ در زمان ثانیه ۵/۱۴۹ باز می‌شود و روش پیشنهادی در زمان حدود ۵/۱۵۲ تشخیص عیب این سوئیچ را اعلام می‌کند، در شکل (۹-ب) مقدار

جدول ۳: مقایسه روش‌های بررسی شده تشخیص خطا در حوزه‌ی مبدل توربین باد

روش	موثر بودن	زمان (میلی ثانیه)	پیاده‌سازی	دشواری تنظیمات	سیگنال مورد استفاده	وابستگی آستانه‌ها به سیگنال‌ها
بردار پارک [۱]	ابهام در جریان پایین	۲۰	متوسط	زیاد	جریان سه فاز	زیاد
جریان نرمالیزه [۲]	ضعیف در جریان کم	۱۸/۴	کم	کم	جریان سه فاز	-
تصحیح شده جریان نرمالیزه	خوب	۱۸/۴	کم	کم	جریان سه فاز	-
روش شیب [۵]	ضعیف در جریان کم	۳۸/۳	کم	زیاد	جریان سه فاز	زیاد
روش ساده DC [۱۰]	ضعیف در جریان کم	وابسته به بار	کم	متوسط	جریان سه فاز	زیاد
آشکارسازی خطا بر اساس مرکز ثقل [۲۷]	خوب		متوسط	-	جریان سه فاز	-
روش شناسایی الگو در حوزه زمان [۳۰]	پارامتر زیاد	-	زیاد	-	جریان سه فاز	زیاد
مقایسه ولتاژ AC واقعی و کمیت مرجع در حوزه زمان [۴۰]	حسگر زیاد	۵	زیاد	کم	ولتاژ	-
شناسایی با اندازه‌گیری ولتاژ سرتاسر سوئیچ پایین‌تر [۴۱]	خوب	۲/۷	متوسط	متوسط	ولتاژ	کم
روش WT شبکه عصبی [۶۹]	-	-	زیاد	کم	جریان سه فاز	-
سامانه ANFIS - موجک [۷۰]	-	-	زیاد	کم	جریان لینک DC	-
الگوریتم فازی - موجک [۷۱]	خوب اگر به خوبی طراحی گردد	-	زیاد	متوسط	جریان سه فاز	کم
شبکه عصبی CNN []	دقت خوب در حضور نویز گوسی - حساسیت کم به مدل - نیاز به داده زیاد آموزش	۱	زیاد	کم	جریان سه فاز و ولتاژ سه فاز	کم
یادگیری ماشین HMM-PCA []	خوب - نیاز به داده زیاد آموزش	-	زیاد	کم	جریان سه فاز	کم
حوزه زمان-فرکانس چند فیزیکی []	خوب - سرعت بالا	-	زیاد	زیاد	جریان سه فاز، سرعت ژنراتور و لرزش ژنراتور	کم
شبکه عصبی LSTM []	دقت و مقاومت بالا در حضور نوسانات باد و بایاس سنسور	۲/۲	زیاد	کم	جریان سه فاز و ولتاژ سه فاز	-
شبکه عصبی EEMD-IMF-NE []	متوسط	-	زیاد	کم	سه فاز ولتاژ	زیاد
روش پیشنهادی	خوب - دقت بالا	۲	کم	کم	سه فاز جریان	کم

مطابق با جدول (۳) با مقایسه‌ی شش پارامتر در روش‌های پایه-ای تشخیص عیب مدار باز گیت IGBT می‌توان معایب و مزایای هر روش را مرور نمود. ملاحظه می‌گردد در روش پیشنهادی، نرخ موثر بودن به معنای دقت بالا، تعادل مناسب بین نرخ FAR و نرخ هشدار کم‌شده^{۲۸}، پیاده‌سازی روش ساده و در نتیجه دشواری تنظیمات کم است. در روش پیشنهادی نیاز به سخت-افزار اضافه و سیگنال‌های متعدد از بخش‌های مختلف نداشته و با سه سیگنال جریان برای هر مبدل که در سیستم کنترل اندازه‌گیری می‌شود، تشخیص خطا را با دقت خوبی انجام می‌دهد. همچنین از آنجایی که آستانه محاسبه و سپس ثابت در نظر گرفته می‌شود، وابستگی آستانه به سیگنال‌ها کم است.

نتیجه‌گیری

عیب مدار باز سوئیچ مبدل توربین بادی از عیوب رایج و با نرخ بالا در توربین بادی است. ارائه‌ی یک روش مقاوم، با تعادل مناسب بین نرخ FAR و MAR، هدف این مقاله بوده است. بخش برجسته و نوآوری مقاله، استفاده از یک روش جدید مبتنی بر فیوژن ویژگی‌های فاکتور شکل جریان، قدر مطلق بردار پارک نرمالیزه، مقدار میانگین جریان و قدر مطلق مقدار میانگین جریان در یک دوره بر اساس تولید SOD برای آشکارسازی خطا استفاده شده است. نتایج نشان داده است که ایندکس حاصل شده از روش جدید در مقابل تغییرات پارامترهای توربین بادی و تغییرات بار در مقایسه با سایر روش‌ها مقاوم است. همچنین از این ایندکس برای آشکارسازی خطای سوئیچ استفاده شد و با ترکیب آن با مقدار میانگین جریان هر فاز مکان سوئیچ معیوب تشخیص داده شد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش در ویژگی سرعت تشخیص، پیاده‌سازی آسان‌تر و وابستگی به سطوح سیگنال برتر است.

^{۲۸} Miss Alarm Rate (MAR)

با توجه به دقت و سرعت روش پیشنهادی، از این روش در کارهای آینده به منظور کنترل تحمل پذیر خطای مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر DFIG استفاده خواهد شد.

شبیه سازی‌ها نشان داد که روش پیشنهادی در تشخیص عیوب چندگانه مبدل سمت شبکه و سمت روتور و همچنین در تشخیص عیوب همزمان موفق است.

مراجع

- City, Mexico. September 30-October 4, 2013. DOI: 10.1109/ICEEE.2013.6676032.
- [10] W. Sae-Kok, D.M. Grant and B.W. Williams, "System reconfiguration under open-switch faults in a doubly fed induction machine," IET Renewable Power Generation, vol. 4, no. 5, pp. 458-470, 2010. DOI: 10.1049/iet-rpg.2010.0005.
- [11] Sh. Karimi, A. Gaillard, Ph. Poure and Sh. Saadate, "FPGA-based real-time power converter failure diagnosis for wind energy conversion systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 12, pp. 4299-4308, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2008.2005244.
- [12] W. Sae-Kok and D.M. Grant, "Open switch fault diagnosis for a doubly-fed induction generator," 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 27-30 November, 2007. DOI: 10.1109/PEDS.2007.4487691.
- [13] W. Sae-Kok, Converter fault diagnosis and post fault operation of a doubly-fed induction generator for a wind turbine, Ph.D. Thesis, University of Strathclyde, 2008.
- [14] H. Zhao and L. Cheng, "Open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of DF wind turbine," IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 4, pp. 417-424, 2017.
- [15] H. Zhao and L. Cheng, "Open-Switch Fault-Diagnostic Method for Back-to-Back Converters of a Doubly Fed Wind Power Generation System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 4, pp. 3452-3461, 2018. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2705985.
- [16] X. You and W. Zhang, "Fault diagnosis of frequency converter in wind power system based on SOM neural network," Procedia Engineering, vol. 29, no. 4, pp. 3132-3136, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.453>.
- [17] P. Duan, K. Xie, L. Zhang, X. Rong, "Open switch fault diagnosis and system reconfiguration of doubly-fed wind power converter used in a microgrid," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 3, pp. 816-821, 2011. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2095470.
- [18] M. Shahbazi, M.R. Zolghadri, P. Poure and S. Saadate, "Fast Detection of Open-Switch Faults with Reduced Sensor Count for a Fault-Tolerant Three-Phase Converter," 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 16-17 Feb, 2011. DOI: 10.1109/PEDSTC.2011.5742479.
- [19] M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate and M.R. Zolghadri, "FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 8, pp. 3360-3371, 2013. DOI: 10.1109/TIE.2012.2200214.
- [20] M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate and M.R. Zolghadri, "FPGA-based fast detection with reduced sensor count for a fault tolerant three-phase Converter," IEEE Transactions on Industrial
- [1] N.M.A. Freire, J.O. Estima and A.J. Marques Cardoso, "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 9, pp. 3957-3967, 2013. DOI: 10.1109/TIE.2012.2207655.
- [2] P.S. Das and K.H. Kim, "Real-Time Multiple Open-Switch Fault Diagnosis in Three-phase AC/DC PWM Converter for PMSG Based Grid-Connected Wind Power Generation System," International Journal of Control and Automation, vol.7, no.9, pp.329-344, 2014.
- [3] P.S. Das and K.H. Kim, "Voltage-based On-Line Fault Detection and Faulty Switch Identification under Multiple Open-Switches in Grid-Connected Wind Power Converter," International Journal of Control and Automation, vol. 7, no. 11, pp. 401-416, 2014.
- [4] I. Jlassi, J.O. Estima and A.J. Marques Cardoso, "Multiple Open-Circuit Faults Diagnosis in Back-to-Back Converters of PMSG Drives for Wind Turbine Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 5, pp. 2689- 2702, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2342506.
- [5] K. Huang, J. Liu, S. Huang, Y. Yi and L. Zhou, "Converters open-circuit fault-diagnosis method research for direct-driven permanent wind power system," Transactions of China Electrotechnical Society, vol. 30, no. 16, pp. 129-136, 2015.
- [6] M. Trabelsi, M. Boussak, M. Benbouzid, "Multiple criteria for high performance real-time diagnostic of single and multiple open-switch faults in ac-motor drives: Application to IGBT-based voltage source inverter," Electric Power Systems Research, vol. 144, pp. 136-149, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.11.021>.
- [7] Z.Y. Xue, M.S. Li, K.S. Xiahou, T.Y. Ji and Q.H. Wu, "A Data-Driven Diagnosis Method of Open-Circuit Switch Faults for PMSG-Based Wind Generation System," In 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 481-487, 2019. DOI: 10.1109/DEMPED.2019.8864922.
- [8] A. Kouadri, M. Hajji, M.F. Harkat, K. Abodayeh, M. Mansouri, H. Nounou and M. Nounou, "Hidden Markov model based principal component analysis for intelligent fault diagnosis of wind energy converter systems," Renewable Energy, vol. 150, pp. 598-606, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.010>.
- [9] J. Mina and R. Pérez, "Fault Isolation based in Structural Analysis and EWMA of the set DFIG/Back-to-Back Converter of a Wind Energy Conversion System," 10th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico

- Industry Applications, vol. 34, no. 6, pp. 1318–1326, 1998. DOI: 10.1109/28.739017.
- [32] P. Gilreath and B.N. Singh, “A new centroid based fault detection method for 3-phase inverter-fed induction motors,” 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 30 January 2006, <http://10.1109/PESC.2005.1582009>. DOI: 10.1109/PESC.2005.1582009.
- [33] J.O. Estima and A.J. Marques Cardoso, “A New Approach for Real-Time Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis in Voltage-Source Inverters,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol.47, no. 6, pp. 2487–2494, 2011. DOI: 10.1109/TIA.2011.2168800.
- [34] I.M. Won-Sang, K. Jang-Sik, K. Jang-Mok, L. Dong-Choon, and L. Kyo-Beum, “Diagnosis Methods for IGBT Open Switch Fault Applied to 3-Phase AC/DC PWM Converter,” Journal of Power Electronics, vol. 12, no. 1, pp.120-127, 2012.
- [35] D. Diallo, M.E.H. Benbouzid, D. Hamad, and X. Pierre, “Fault detection and diagnosis in an induction machine drive: A pattern recognition approach based on concordia stator mean current vector,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 3, pp. 512-519, 2005. DOI: 10.1109/TEC.2005.847961.
- [36] D.U. Campos-Delgado, J.A. Pecina-Sanchez, D.R. Espinoza and E.R. Arce-Santana, “Diagnosis of open-switch faults in variable speed drives by stator current analysis and pattern recognition,” IET Electric Power Applications, vol. 7, no. 6, pp. 509–522, 2013. DOI: 10.1049/iet-epa.2013.0015.
- [37] J.O. Estima and A.J. Marques Cardoso, “A new algorithm for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-fed PWM motor drives by the reference current errors”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 8, pp. 3496 – 3505, Aug. 2013. DOI: 10.1109/TIE.2012.2188877.
- [38] J.O. Estima and A.J. Marques Cardoso, “A novel diagnostic method for single power switch open-circuit faults in voltage-fed PWM motor drives,” SPEEDAM, 14-16 June 2010. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5545024.
- [39] F. Wu and J. Zhao, “Current Similarity Analysis Based Open-Circuit Fault Diagnosis for Two-Level Three-Phase PWM Rectifier,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 5, pp. 3935-3945, 2017. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2587339.
- [40] J. Lamb and B. Mirafzal, “Open-Circuit IGBT Fault Detection and Location Isolation for Cascaded Multilevel Converters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4846-4856, 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2674629.
- [41] F. Wu and J. Zhao, “A real-time multiple open-circuit fault diagnosis method in voltage-source-inverter fed vector controlled drives,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 2, pp. 1425–1437, 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2422131.
- [42] H. T. Eickhoff, R. Seebacher, A. Muetze and E.G. Strangas, “Enhanced and Fast Detection of Open Switch Faults in Inverters for Electric Drives,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. Informatics, vol. 9, no. 3, pp. 1343-1350, 2013. DOI: 10.1109/TII.2012.2209665.
- [21] M.N. Soares, Y. Mollet, M. Kinnaert, J. Gyselinck and J. Helsen, “Multiphysical Time-and Frequency-Domain Fault Detection and Isolation Technique for Power-Electronic Converters in DFIG Wind Turbines,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 4, pp. 3793-3802, 2020. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3021306.
- [22] Z.Y. Xue, K.S. Xiahou, M.S. Li, T.Y. Ji and Q.H. Wu, “Diagnosis of multiple open-circuit switch faults based on long short-term memory network for DFIG-based wind turbine systems,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 3, pp. 2600-2610, 2019. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2908981.
- [23] J. Liang, K. Zhang, A. Al-Durra and D. Zhou, “A novel fault diagnostic method in power converters for wind power generation system,” Applied Energy, vol. 266, pp. 1148-51, (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114851>.
- [24] A.M.S. Mendes and A.J. Marques Cardoso, “Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed ac drives, by the average current Park’s vector approach,” IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC’99. Proceedings (Cat. No.99EX272). DOI: 10.1109/IEMDC.1999.769220.
- [25] C. Kral and K. Kafka, “Power electronics monitoring for a controlled voltage source inverter drive with induction machines,” 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37018). DOI: 10.1109/PESC.2000.878841.
- [26] J.A.A. Caseiro, A.M.S. Mendes and A.J. Marques Cardoso, “Fault diagnosis on a PWM rectifier ac drive system with fault tolerance using the average current Park’s Vector approach,” International Electric Machines and Drives Conference, 3-6 May 2009. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075281.
- [27] K. Rothenhagen and F.W. Fuchs, “Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for ac variable speed drives,” European Conference on Power Electronics and Applications, 11-14 Sept. 2005. DOI: 10.1109/PESC.2004.1354769.
- [28] K. Rothenhagen and F.W. Fuchs, “Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers,” 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551, 20-25 June 2004. DOI: 10.1109/PESC.2004.1354769.
- [29] W. Sleszynski, J. Nieznanski, and A. Cichowski, “Open-transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4681-4688, 2009. DOI: 10.1109/TIE.2009.2023640.
- [30] J.O. Estima and A.J. Marques Cardoso, “Fast fault detection, isolation and reconfiguration in fault-tolerant permanent magnet synchronous motor drives,” Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 15-20 Sept. 2012. DOI: 10.1109/ECCE.2012.6342310.
- [31] R. Peugeot, S. Courtine and J.P. Rognon, “Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model,” IEEE Transactions on

- inverters,” *Electronics Letters*, vol. 49, no. 17, pp. 1089-1091, 2013. DOI: 10.1049/el.2013.0641.
- [55] F. Wu and J. Zhao, “Current similarity analysis-based open-circuit fault diagnosis for two-level three-phase PWM rectifier,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 3935-3945, 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2587339.
- [56] S. Li and L. Xu, “Fault detection for modular multilevel converters based on sliding mode observer,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 4867-4872, 2013. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2242093.
- [57] C. Choi and W. Lee, “Design and evaluation of voltage measurement-based sectoral diagnosis method for inverter open switch faults of permanent magnet synchronous motor drives,” *IET Electric Power Applications*, vol. 6, no. 8, pp. 526-532, 2012. DOI: 10.1049/iet-epa.2011.0315.
- [58] D.U. Campos-Delgado and D.R. Espinoza-Trejo, “An observer-based diagnosis scheme for single and simultaneous open-switch faults in induction motor drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 671-679, 2011. DOI: 10.1109/TIE.2010.2047829.
- [59] I. Jlassi, J.O. Estima, S.Kh. El Khil, N.M. Bellaaj and A.J.M. Cardoso, “A Robust Observer-Based Method for IGBTs and Current Sensors Fault Diagnosis in Voltage-Source Inverters of PMSM Drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2894-2905, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2016.2616398.
- [60] I. Jlassi, and S.Kh. El Khil, “A MRAS-Luenberger observer based fault tolerant control of PMSM drive,” *Journal of Electrical Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 48-62, 2014.
- [61] N.M.A. Freire, J.O. Estima and A.J.M. Cardoso, “A voltage-based approach without extra hardware for open-circuit fault diagnosis in closed loop PWM AC regenerative drives,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 4960-4970, 2014. DOI: 10.1109/TIE.2013.2279383.
- [62] S.M. Jung, J.S. Park, H.W. Kim, K.Y. Cho and M.J. Youn, “An MRAS-Based Diagnosis of Open-Circuit Fault in PWM Voltage-Source Inverters for PM Synchronous Motor Drive Systems,” *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2514-2526, 2013. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2212916.
- [63] B.D.E. Cherif and A. Bendiabdellah, “Detection of two-level inverter open-circuit fault using a combined DWT-NN approach,” *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2018, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1976836>.
- [64] Q.T. An, L. Sun and L.Zh. Sun, “Current residual vector switch fault diagnosis of inverters in PMSM drive systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2814-2827, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2360834.
- [65] Q.T. An, L.Z. Sun, K. Zhao, and L. Sun, “Switching function model based fast-diagnostic method of open-switch faults in inverters without sensors,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 1, pp. 119-126, 2011. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2052472.
- [66] A. Ben Yousse, S. Kh. El Khil and I. S. Belkhdja, “Open-circuit fault diagnosis and voltage sensor fault tolerant control of a single phase pulsed width 53, no. 6, pp. 5415-5425, 2017. DOI: 10.1109/TIA.2017.2718973.
- [43] C. Gan, J. Wu, S. Yang, Y. Hu, and W. Cao, “Wavelet Packet Decomposition-Based Fault Diagnosis Scheme for SRM Drives With a Single Current Sensor,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 303 – 313, 2016. DOI: 10.1109/TEC.2015.2476835.
- [44] M. Trabelsi, M. Boussak, P. Mestre, M. Gossa, “An improved diagnosis technique for IGBTs open-circuit fault in PWM-VSI-fed induction motor drive,” 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 27-30 June 2011. DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984487.
- [45] R.L.A. Ribeiro, C.B. Jacobina, E.R.C. Silva and A.M.N. Lima, “Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 587-593, 2003. DOI: 10.1109/TPEL.2003.809351.
- [46] O.S. Yu, N.J. Park and D.S. Hyun, “A novel fault detection scheme for voltage fed PWM inverter,” *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 6-10 Nov. 2006. DOI: 10.1109/IECON.2006.347541.
- [47] Q.T. An, L.Z. Sun, L. Sun, and T.M. Jahns, “Low-cost diagnostic method for open-switch faults in inverters,” *IET. Electronics Letters*, vol. 46, no. 14, pp. 1021-1022, 2010. DOI: 10.1049/el.2010.0611.
- [48] M.A. Rodríguez-Blanco and et all, “Fault Detection for IGBT Using Adaptive Thresholds During the Turn-on Transient,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1625-1633, 2015. DOI: 10.1109/TIE.2014.2364154.
- [49] M.A. Rodriguez-Blanco and et all, “A failure-detection strategy for IGBT based on gate-voltage behavior applied to a motor drive system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1625 - 1633, 2011. DOI: 10.1109/TIE.2010.2098355.
- [50] B.G. Park and et all, “Simple fault diagnosis based on operating characteristic of brushless direct-current motor drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1586-1593, 2011. DOI: 10.1109/TIE.2010.2072895.
- [51] M. Trabelsi, M. Boussak, and M. Gossa, “Multiple IGBTs open circuit faults diagnosis in voltage source inverter fed induction motor using modified slope method,” *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 6-8 Sept. 2010. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608044.
- [52] M. Shahbazi, E. Jamshidpour, P. Poure, S Saadate, and M.R. Zolghadri, “Open- and short-circuit switch fault diagnosis for nonisolated DC-DC converters using field programmable gate array,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 4136 – 4146, 2013. DOI: 10.1109/TIE.2012.2224078.
- [53] M. Trabelsi, M. Boussak and M. Gossa, “PWM-Switching pattern-based diagnosis scheme for single and multiple open-switch damages in VSI-fed induction motor drives,” *ISA Transactions*, vol. 51, no. 2, pp. 333-344, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2011.10.012>.
- [54] Q.T. An, L. Sun and L.Z. Sun, “Hardware-circuit-based diagnosis method for open-switch faults in

- inverter using wavelet decomposition,” *Journal of Electrical Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 222–234, 2008.
- [73] C. Gan, J. Wu, S. Yang, Y. Hu, and W. Cao, “Wavelet Packet Decomposition-Based Fault Diagnosis Scheme for SRM Drives With a Single Current Sensor,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 303 – 313, 2016. DOI: 10.1109/TEC.2015.2476835.
- [74] F. Charfi, F. Sellami, K. Al-Haddad, “Fault diagnosis in power system using wavelet transforms and neural networks,” 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 9-13 July 2006. DOI: 10.1109/ISIE.2006.295798.
- [75] M.R. Mamat, M. Rizon and M.S. Khanniche, “Fault detection of 3-phase VSI using wavelet-fuzzy algorithm,” *American Journal of Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 1642–1648, 2006.
- [76] M.A. Awadallah and M.M. Morcos, “Automatic Diagnosis and Location of Open-Switch Fault in Brushless DC Motor Drives Using Wavelets and Neuro-Fuzzy Systems,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp.104-111, 2006. DOI: 10.1109/TEC.2004.841502.
- [77] P.G. Potamianos, E.D. Mitronikas and A.N. Safacas, “Open-Circuit Fault Diagnosis for Matrix Converter Drives and Remedial Operation Using Carrier-Based Modulation Methods,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 1, pp. 531-545, 2014. DOI: 10.1109/TIE.2013.2240639.
- modulated rectifier,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 131, pp. 234-252, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.10.005>.
- [67] M.A. Masrur, Z. Chen, and Y. Murphey, “Intelligent diagnosis of open and short circuit faults in electric drive inverters for real-time applications,” *IET Power Electron*, vol. 3, no. 2, pp. 279-291, 2010. DOI: 10.1049/iet-pel.2008.0362.
- [68] S. Khomfoi and L.M. Tolbert, “Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 3, pp.1062 -1069, 2007. DOI: 10.1109/TPEL.2007.897128.
- [69] O. Ondel, G. Clerc, and E. Boutleux, “Fault detection and diagnosis in a set inverter–induction machine through multidimensional membership function and pattern recognition,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 2, pp. 431-441, 2009. DOI: 10.1109/TEC.2008.921559.
- [70] F. Zidani, D. Diallo, M. Benbouzid, and R. Nait-Said, “A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 586–593, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2007.911951.
- [71] M. Aktas and V. Turkmenoglu, “Wavelet-based switching faults detection in direct torque control induction motor drives,” *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 4, no. 6, pp. 303–310, 2010. DOI: 10.1049/iet-smt.2009.0121.
- [72] H.B.A. Sethom and M.A. Ghedamsi, “Intermittent default detection and localisation on a PWM