

تشخیص عیب مدار باز مبدل پشت‌به‌پشت ژنراتور DFIG توربین باد سرعت متغیر با استفاده از ترکیب روش‌های مدل - پایه و سیگنال - پایه

عادل دمشقی^۱، محمدحسین رفان^{۲*}

^۱دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

A.dameshghi@sru.ac.ir

^۲دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

Refan@sru.ac.ir

چکیده: پایش وضعیت و عیب‌یابی توربین باد، موجب افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن توربین می‌شود. مدار باز شدن ترانزیستور دو قطبی گیت - عایق (IGBT) در مبدل توربین باد موجب تضعیف جریان خروجی مبدل می‌شود و در نتیجه عملکرد تولید توان توربین باد دچار اختلال می‌شود. در این مقاله، عیب مدار باز گیت IGBT در مبدل پشت‌به‌پشت توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه در ابتدا آشکارسازی و سپس مکان‌یابی شده است. روش پیشنهادی ارزان‌قیمت است و برای آشکارسازی و تعیین مکان عیب از سنسور اضافه، استفاده نمی‌کند. آشکارسازی عیب بر اساس استراتژی مدل-پایه است، برای تولید مانده از یک مشاهده‌گر مبتنی بر مدل کالمن بر اساس استخراج ماتریس حالت جریان‌های سه فاز از ژنراتور القایی دوسو تغذیه سمت شبکه و سمت روتور استفاده شده است و سپس ارزیابی مانده انجام می‌شود. مکان عیب بر اساس استراتژی سیگنال-پایه و استخراج ویژگی میانگین از سیگنال زمانی تعیین شده است. برای ارزیابی ساختار پیشنهادی از یک شبیه‌ساز توربین بادی ۲/۵ مگاوات بر اساس داده واقعی، استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که روش پیشنهادی، عیوب چندگانه و هم‌زمان را در یک شاخه یا شاخه‌های متفاوت سمت شبکه و روتور تشخیص می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: توربین باد، مبدل پشت‌به‌پشت، مانده، سیگنال - پایه، مدل - پایه.

* نویسنده مسئول

است. سیگنال‌های مورد استفاده سه فاز جریان سمت استاتور^۲ (شبکه) و سه فاز جریان سمت روتور^۳ است، برای تشخیص مکان سوئیچ معیوب از آنالیز سیگنال - پایه و بر اساس استخراج ویژگی آماری میانگین سیگنال جریان مربوط به سوئیچ معیوب استفاده شده است. در این مقاله، به منظور مقابله با شرایط گذرای توربین باد سرعت متغیر، از آستانه تطبیقی^۴ استفاده شده است. سنجش و ارزیابی روش بر اساس یک شبیه‌ساز توربین باد منطبق بر توربین بادی ۲/۵ مگاوات کهک متعلق به شرکت مپنا^۵ است. شبیه‌ساز مورد استفاده منطبق بر پارامترهای اجزای توربین واقعی است و بر اساس داده‌های واقعی سرعت باد کار می‌کند. در بخش دوم مقاله، مروری بر انواع روش‌های عیب‌یابی و تشخیص عیب مدار باز سوئیچ IGBT در انواع مبدل‌ها انجام شده است، بخش سوم مقاله، مدل‌سازی زیر بخش الکتریکی است و ابزار ارزیابی مورد استفاده در این بخش تشریح می‌گردد. روش پیشنهادی در بخش چهارم بیان می‌شود. بخش پنجم مقاله، شبیه‌سازی و ارائه نتایج است، در بخش ششم مقاله، مقایسه و بحث در خصوص نتایج انجام شده است، مقاله با بیان نتیجه‌گیری در بخش هفتم پایان می‌یابد.

۲. مروری بر کارهای گذشته

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 باد، امکان پیاده‌سازی در سامانه کنترل اهمیت زیادی دارد، چنین روشی باید ساده باشد و دچار هشدار اشتباه نشود. نیاز به سخت‌افزار و سنسور اضافه نداشته باشد، مقاوم باشد، خطاهای چندگانه و خطاهای هم‌زمان را تشخیص دهد و ارزان‌قیمت و سریع باشد. روش‌های ارائه شده تاکنون دارای اشکالاتی چون سرعت کم، هشدار اشتباه، ازدیاد سنسور و پیچیدگی هستند، عدم تطابق با شرایط عملکردی، عدم تطبیق با تغییرات سرعت و جریان گذار از جمله دیگر اشکالاتی است که در روش‌های مختلف مشاهده شده است. یکی از روش‌های جلوگیری از هشدار اشتباه در تشخیص عیب مدار باز سوئیچ، استفاده از روش "زمان مرده"^۶ است [۱۱]، اما عملکرد این روش نامناسب است. اکثر

انرژی باد به‌عنوان یک انرژی تجدیدپذیر و پاک با سرعت بالایی در حال رشد و گسترش است [۱، ۲]، توربین باد، انرژی مکانیکی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، توربین باد از تجهیزات متفاوت مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده است که هر کدام دارای درصدهای متفاوتی از نرخ خرابی هستند [۲، ۳]، این خرابی‌ها، منجر به خاموشی‌های کوتاه و بلند مدت در توربین باد می‌شوند [۴]، برخی از اجزای توربین باد دارای نرخ خرابی بالایی هستند، اما نرخ خاموشی این قطعات پایین است یا حتی موجب خاموشی نمی‌شود. خرابی این تجهیزات موجب افت توان و نزول بازده توربین باد می‌شود [۵]. شکل (۱) نمودارهای تحلیلی بررسی دو فاکتور خاموشی و نرخ خطای توربین باد را متناسب با اجزای مختلف نشان می‌دهد، در یک قاعده کلی ۷۵ درصد از خطاها فقط ۵ درصد خاموشی‌ها را ایجاد می‌کنند، در حالی که ۲۵ درصد از خطاها ۹۵ درصد خاموشی‌ها را ایجاد می‌کنند [۶].

یکی از اجزای الکتریکی توربین باد با نرخ خطای بالا، مبدل توان است. دو عیب در بخش مبدل توربین باد، شامل خطای اتصال باز و اتصال کوتاه سوئیچ مبدل پشت به پشت مطرح است. برخلاف 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 تحت کنترل است و توربین باد خاموش می‌گردد، اما عیب اتصال باز ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق شده^۱ (IGBT) مبدل توربین باد باعث از کار افتادن توربین باد نمی‌شود، بلکه در شرایط عملکردی توربین باد از جمله افت توان اثرگذار است. از جمله نتایج این عیب بهم‌زدن تعادل و بالانس بین فازهاست، عیب مدار باز موجب نشت جریان منشعب در فازها به خصوص فاز مربوط به همان سوئیچ خواهد شد. واکنش میان جز منشعب و میدان، تولید جهش در گشتاور و در فرکانس جریان استاتور می‌کند، این امر موجب کاهش حداکثر میانگین در دسترس برای مبدل می‌شود. جریان منشعب مورد نظر البته مشکلاتی را در مشخصه‌های IGBT نیز ایجاد می‌کند و موجب عیوب ثانویه می‌شود [۷-۱۱].

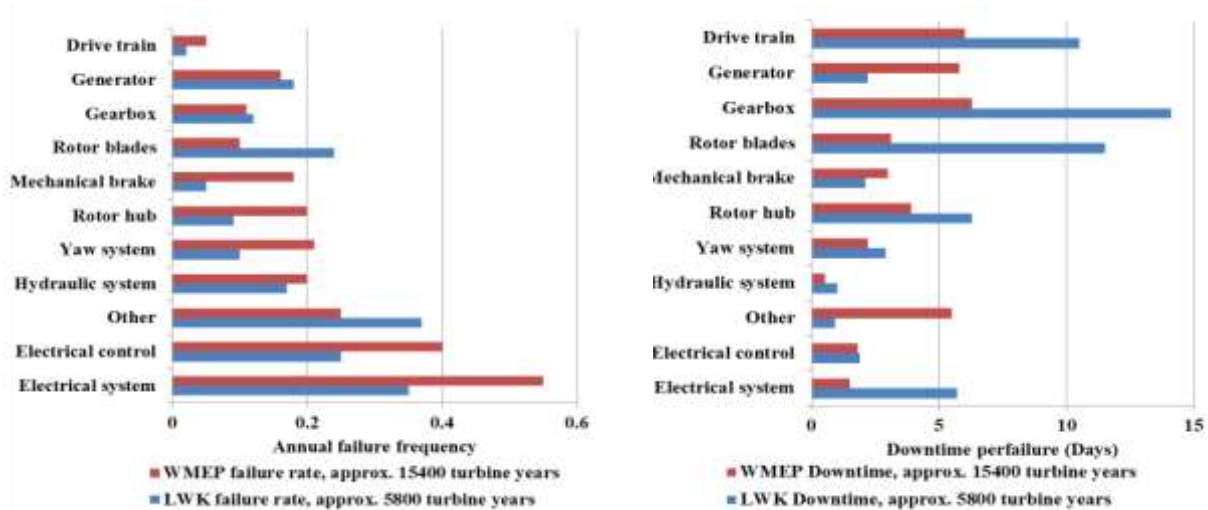
استراتژی کلی در تشخیص عیب به دو دسته مدل - پایه و سیگنال - پایه تقسیم می‌شود، در این مقاله، ترکیبی از روش‌های سیگنال - پایه و مدل - پایه استفاده شده است، برای وجود یا عدم وجود عیب بر اساس تولید مانده (مدل - پایه) عمل می‌شود، روش مدل - پایه بر اساس ماتریس حالت جریان سمت شبکه و روتور

2. Stator Side
3. Rotor Side
4. Adaptive threshold
5. Iran Power Plants Management Company (MAPNA)
6. Dead Time

1. Insulated-Gate Bipolar Transistor

اطلاعات ماقبل این جریان بر تفاضل جریان q از اطلاعات ماقبل این جریان حاصل می‌شود، در این مرجع، برای محاسبه مسیر بردار فضای جریان از تبدیل پارک استفاده شده است، این روش برای تشخیص شاخه معیوب است و مکان شاخه معیوب بر اساس خاصیت قطبی جریان میانگین (مثبت/منفی) تعیین شده است. روش جریان مستقیم ساده [۱۳-۱۴]، از میانگین جریان فاز استفاده می‌کند، مقادیر بزرگ جریان فاز با یک آستانه مقایسه شده تا شاخه معیوب شناسایی شود، برای مکان‌یابی خاصیت قطبی مقدار میانگین استفاده شده است، در خصوص مبدل‌هایی که متشکل از ۴، ۶، ۱۲ یا حتی بیشتر IGBT هستند نیز تحقیقاتی در سال‌های اخیر ارائه شده است. در مرجع [۱۵]، مبدل سه‌فاز برای ژنراتور هم‌زمان مغناطیس دائم^۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله، خطای اتصال باز به‌عنوان یک اعوجاج در ولتاژ در نظر گرفته شده است و سپس یک ولتاژ مرجع از روابط مربوط به این مبدل استخراج شده است که هر گونه انحراف از آن ولتاژ مرجع مطابق با آستانه‌های مشخص، نشان‌دهنده خطا است. در مرجع [۱۶]، به خطایابی و تشخیص خطا در ساختار مبدل‌های چندطبقه و برای ژنراتور سنکرون پرداخته شده است. در این مقاله، بر اساس جریان خروجی روش خطایابی مدار باز سوئیچ انجام شده است.

این روش‌ها بر اساس میانگین‌گیری جریان عمل می‌کنند که تغییرات سرعت موجب هشدار اشتباه می‌شود، برای عیب‌یابی سوئیچ‌ها روش‌هایی ارائه شده است؛ روش بردار پارک [۱۲]؛ آشکارسازی خطای مدار باز و مکان‌یابی سوئیچ خراب با استفاده از محاسبه بردار فضای جریان متناوب در یک دوره انجام می‌شود، در ابتدا، میانگین جریان‌ها محاسبه می‌شود و سپس تبدیل بردار پارک^۱ برای رسیدن به دامنه و زاویه فاز جریان متناوب اعمال می‌شود، برای یک سامانه بی‌عیب میانگین (دامنه) تقریباً برابر با صفر است و بردار فضای مربوطه دایروی است. روش جریان نرمالیزه DC [۱۳، ۱۴]، این روش گسترش داده شده و بهبود یافته، روش بردار پارک است که وابستگی روش قبل را به بار کاهش می‌دهد. ابتدا جریان، نرمالیزه شده است، این مقدار به‌عنوان، مانده است که حاصل تقسیم میانگین جریان هر فاز به جذر مربعات ضرایب اصلی جریان‌های سه‌فاز است، این مانده با یک آستانه مقایسه و تصمیم‌گیری انجام شده است. روش جریان نرمالیزه DC^۱ بهبود یافته [۱۳-۱۴]، روش جریان نرمالیزه در سامانه کنترل حلقه بسته دارای ضعف‌هایی است، این مشکل در روش بهبودیافته با محدودسازی دامنه و مقایسه مقادیر بزرگتر مانده با حد آستانه برطرف می‌شود. روش شیب [۱۵]، برای آشکارسازی خطا، شیب بردار فضای جریان بر اساس تقسیم تفاضل جریان d از

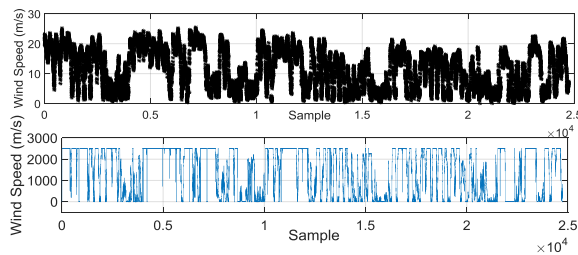


شکل (۱): رابطه تکرار خرابی و خاموشی از دو مطالعه بر روی توربین‌ها بادی اروپا در طول ۱۳ سال [۶].

– فازی در مرجع [۲۲] مطرح شده است، به‌گونه‌ای که جریان لینک DC ورودی مدل تبدیل موجک برای استخراج ویژگی است، ویژگی‌ها در سرعت ثابت از الگوهای جریانی استخراج می‌شود، سپس مدل فازی وظیفه تقسیم‌بندی الگوها و در واقع تعیین مکان خطا را بر عهده دارد. تکنیک‌های مبتنی بر مشاهده‌گر برای عیوب تنها و هم‌زمان و بر اساس استفاده از ورودی ولتاژ در مراجع [۲۳–۲۶] مطرح شده است. این روش‌ها به اندازه کافی استقلال داشته و نیاز به سنسور اضافه ندارد. اما مشکل اصلی در این روش‌ها وابستگی به دانش پارامترهای ماشین است. روش دیگری که برای عیب‌یابی مبدل توربین باد استفاده می‌شود، استفاده از تبدیل موجک گسسته است [۲۷].

۳. ابزار ارزیابی و شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در تشخیص عیب مدار باز سوئیچ مبدل، از یک شبیه‌ساز توربین باد استفاده شده است. شبیه‌ساز مورد نظر در محیط سیمولینک/مطلب^۵ پیاده‌سازی شد، توربین شبیه‌سازی شده بر اساس اطلاعات توربین ۲/۵ مگاوات کهک مینا طراحی گردید. بخش الکتریکی این شبیه‌ساز، متشکل از ژنراتور DFIG و مبدل پشت‌به‌پشت با جزئیات و دقت بالا منطبق بر نمونه واقعی مدل گردید. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی توربین مشابه جدول (۱) است. در شکل (۲) سرعت باد جمع‌آوری شده از سایت بادی کهک نشان داده شده است، از این اطلاعات به‌عنوان ورودی شبیه‌ساز استفاده شده است. اطلاعات جمع‌آوری شده در بازه زمانی ۶ ماهه با میانگین ۵ دقیقه‌ای بوده است. در شکل (۳) توان و جریان سه‌فاز سمت شبکه و سمت روتور برای همه نواحی عملکردی شامل ناحیه اول (سرعت باد زیر ۴ متر بر ثانیه، عدم تولید توان)، ناحیه دوم (سرعت باد از ۴ تا ۱۲ متر بر ثانیه، تولید توان، کنترل گشتاور)، ناحیه چهارم سرعت باد از ۱۲ تا ۲۵ متر بر ثانیه (توان نامی ۲/۵ مگاوات، کنترل زاویه گام پره) در ازای ورود داده. سرعت باد واقعی جمع‌آوری شده از سایت توربین‌های بادی کهک مینا نمایش داده شده است.



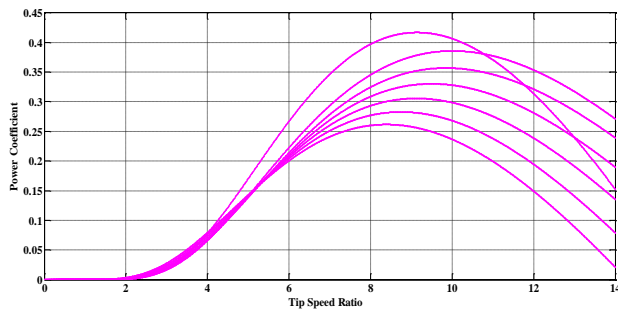
شکل (۲): اطلاعات سرعت باد جمع‌آوری شده از سایت کهک.

روش ارائه شده بر اساس تغییر در نمودارهای جریانی است و نیاز به هیچ‌گونه تجهیز یا سنسور اضافه ندارد، بر اساس انحرافات ایجاد شده در جریان و نقاط عبور از صفر برای سوئیچ‌های مختلف خطای مدار باز آزمایش شده است و نمونه مورد نظر به‌طور آزمایشگاهی پیاده‌سازی و مورد آزمایش واقعی قرار گرفته است. در مرجع [۱۷]، به مبدل ژنراتور PMSG پرداخته است که روش پیشنهادی برای خطایابی و تشخیص خطای مدار باز IGBT در دو نمونه واقعی مورد آزمایش قرار گرفته است. 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 خاصیت قطبی جریان تعیین شده است در حالی که، در سمت ژنراتور بر اساس مقادیر میانگین، جریان نرمالیزه شده است. از یک روش بلادرنگ^۱، برای تشخیص خطای مدار باز و مکان سوئیچ معیوب بر اثر مدار باز در مبدل AC/DC استفاده شده است [۱۸]. ژنراتور مربوطه از نوع PMSG بوده و از RMS^2 جریان نرمالیزه شده، برای خطایابی و تشخیص استفاده شده است. روش ارائه شده نیاز به سنسور و سخت‌افزار اضافه ندارد و فقط نیازمند اطلاعات جریان اندازه‌گیری شده فازها است. جریان سه‌فاز دریافت می‌شود و سپس مقدار RMS و بردار پارک مربوط به جریان‌ها نیز محاسبه می‌شود و نسبت این دو به‌عنوان مقدار نرمالیزه استخراج می‌گردد [۱۸].

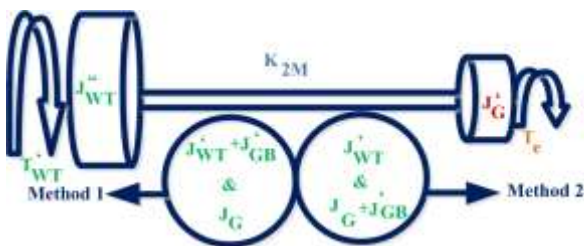
در مرجع [۱۹] بر اساس همین ساختار ولی با دریافت ولتاژ، خطایابی و تشخیص سوئیچ مدار باز مبدل انجام شده است. در مرجع [۲۰]، پیشنهاد شده است که برای تعیین مکان خطای مبدل پشت‌به‌پشت ژنراتور القایی دوسو تغذیه^۳ (DFIG) از آنالیز ساختاری استفاده شود، سپس مانده تولید شده برای تعیین مکان خطای مدار باز استفاده شود. برای بهبود عملکرد از روش میانگین متحرک وزن‌دار استفاده شده است و مانده تولیدی برای آنالیز به این روش داده شده است. در مرجع [۲۱]، برای خطایابی و جداسازی خطا^۴ (FI) مربوط به مبدل سه‌فاز از روش فازی که نیازمند اندازه‌گیری جریان خروجی است 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، این روش نیاز به دو سنسور دارد و مدل فازی برای تشخیص مکان خطا، بر اساس دسته‌بندی الگوها عمل می‌کند. روش مورد نظر به‌طور واقعی بر روی یک شبیه‌ساز سخت‌افزاری اجرایی شده است. روش سیگنال – پایه تبدیل موجک

1. Realtime
2. root mean square
3. Doubly Fed Induction Generator
4. Fault Isolation

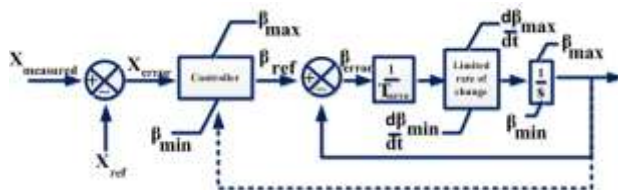
در مدل سازی آیرودینامیک توربین بادی، ابتدا توان حاصل از انرژی باد متناسب نسبت سرعت نوک بر حسب رادیان^۱ و زاویه گام پره بر حسب درجه مدل می شود، در این بخش، ضریب بهره‌وری توان بسیار مهم است، C_p حاصل برای توربین تحت مطالعه به صورت شکل (۴) است، λ نسبت سرعت نوک است. مدل سازی رانش گر به صورت دو جرعه خواهد بود (شکل ۵). مدل سازی یا^۲ انجام می گیرد و کنترل آن بر اساس تناسبی-انتگرالی (PI) خواهد بود. کنترل زاویه گام پره نیز به صورت یک تابع درجه دوم و بر اساس کنترل کننده تناسبی-انتگرالی- مشتقی (PID) خواهد بود (شکل ۶)، β زاویه پیچ (درجه) است.



شکل (۴): رابطه‌ی بین C_p و λ در توربین بادی معمولی.

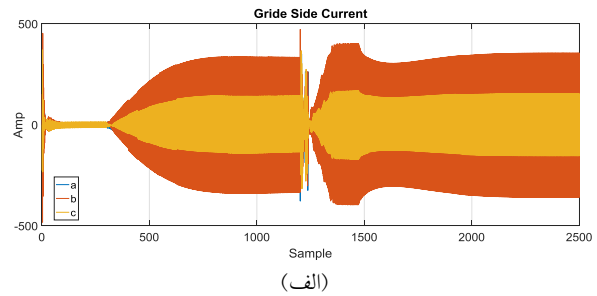


شکل (۵): مدل رانشگر دو جرعه.

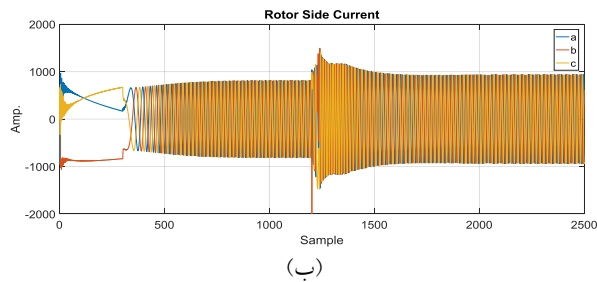


شکل (۶): بلوک دیاگرام کنترل زاویه گام پره.

DFIG، دارای محاسنی چون عملکرد با سرعت متغیر روتور است، در حالی که فرکانس و دامنه ولتاژ تولید شده در مقدار ثابتی نگه داشته می شود، در نتیجه تولید توان الکتریکی در سرعت های پایین تر باد و کنترل ضریب توان محقق می شود. ساختار مورد استفاده شامل دراو، ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده^۳ (WRIG) ۶ قطب با



(الف)



(ب)

شکل (۳): سیگنال های الکتریکی خروجی شبیه ساز. الف: جریان سه فاز سمت شبکه (ب) جریان سه فاز سمت روتور.

۱.۱.۳ مدل سازی

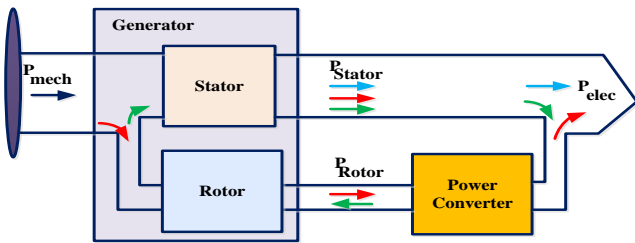
برای پیاده سازی روش پیشنهادی، بخش های مختلف توربین باد مدل شده است [۲۷]. اما از تشریح کامل مدل سازی سرعت باد اعمال شده به پره های توربین بر اساس توزیع رایلی مدل می شود.

جدول (۱): پارامترهای شبیه ساز متناسب با توربین ۲/۵ مگاواتی.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
تعداد پره	۳	نوع مبدل	پشت
قطر پره	۱۰۳ متر	فرکانس سوئیچینگ	۲.۵ KHz روتور ۳ KHz شبکه
سطح پره	۸۴۹۵	خازن لینک DC	۲۲ mF
کلاس توربین	۳	ولتاژ لینک DC	۱۱۰۰ ولت
نوع گیربکس	Planet Gear، سه بخش با نسبت ۱/۷۹.۶		
نوع ژنراتور	DFIG	وزن روتور	۵۲۰۰۰ Kg
تعداد قطب	سه جفت	Armature resistance	۰.۰۰۱۴ ohm
سرعت	۷۵۰-۱۳۱۰ u/min (۵۰H)	توان	۲۵۰۰ KW at ۱۲/۱۳ m/s
ولتاژ ژنراتور	۶۹۰ V	آغاز تولید	۳.۵/۴ m/s
اندوکتانس	Llr= 8.6e-5H, Lls= 9.8e-5, Lm=0.00169H	پایان تولید	۲۵ m/s

1. Radians
2. YAW
3. Wound Rotor Induction Generator

مستقیم با مبدل قدرت، کنترل می‌شود. بنابراین گشتاور تولیدی در DFIG می‌تواند به‌طور مستقیم با کنترل جریان روتور کنترل شود و مکان زاویه‌ای آن، وابسته به شار استاتور است. مبدل سمت روتور برای کنترل گشتاور ژنراتور نیازمند کنترل مستقیم جریان روتور است. این کار با اعمال ولتاژ مناسب به سیم‌پیچ روتور انجام می‌شود. مبدل سمت شبکه برای تنظیم کردن ولتاژ لینک DC بین دو مبدل استفاده می‌شود. این مبدل، شامل یک حلقه کنترل بیرونی می‌باشد که ولتاژ لینک DC را کنترل می‌کند و تلاش می‌کند تا آن را در مقدار نامی نگه دارد. شارش توان در DFIG در حالت سنکرون (سبز)، زیر سنکرون (آبی) و فوق سنکرون (قرمز) به‌صورت شکل (۸) است [۲۷-۲۹]. به‌منظور بررسی جریانی ماشین DFIG، به مدل‌سازی این ماشین در قالب dq' پرداخته شده است.



شکل (۸): نحوه شارش توان در DFIG.

شکل (۹) مدل ماشین DFIG است. این شکل برای هر دو قطب d و q قابل استفاده است. در شکل (۹)، i_s ، i_r و ω به ترتیب به شار، ولتاژ، جریان و فرکانس زاویه‌ای اشاره دارد. همچنین زیرنویس s ، r و m به ترتیب به استاتور، روتور و مغناطیسی اشاره دارد که در آن R و L نشان‌دهنده مقاومت و اندوکتانس سیستم است.

$$u_{s,d} = -R_s i_{s,d} + \omega_s J \lambda_{s,q} - \frac{d\lambda_{s,d}}{dt} \quad (3)$$

$$u_{r,d} = -R_r i_{r,d} - (\omega_s - \omega_r) J \lambda_{s,q} - \frac{d\lambda_{r,d}}{dt} \quad (4)$$

$$u_{s,q} = -R_s i_{s,q} + \omega_s J \lambda_{s,d} - \frac{d\lambda_{s,q}}{dt} \quad (5)$$

$$u_{r,q} = -R_r i_{r,q} - (\omega_s - \omega_r) J \lambda_{s,d} - \frac{d\lambda_{r,q}}{dt} \quad (6)$$

$$\lambda_{s,d} = L_s i_{s,d} + L_m i_{r,d} \quad (7)$$

$$\lambda_{r,d} = L_m i_{s,d} + L_r i_{r,d} \quad (8)$$

$$\lambda_{s,q} = L_s i_{s,q} + L_m i_{r,q} \quad (9)$$

$$\lambda_{r,q} = L_m i_{s,q} + L_r i_{r,q} \quad (10)$$

از طرفی $L_r = L_{lr} + L_m$ و $L_s = L_{ls} + L_m$ نشان‌دهنده اندوکتانس استاتور و روتور است و خواهیم داشت:

1. Direct-Quadrature

استاتور متصل به ولتاژ متوسط شبکه، از طریق ترانسفورمر و روتور، سیم‌پیچ‌های ایزوله شده، شبکه متصل شده از طریق اسلیپ - رینگ و مبدل الکترونیک قدرت مربوطه است. مبدل توان، فرکانس روتور را کنترل می‌کند و بنابراین سرعت روتور می‌تواند بالاتر و پایین‌تر از سرعت هم‌زمان استاتور باشد که از طریق فرکانس شبکه و تعداد قطب‌های سیم‌پیچ استاتور تعیین می‌شود.

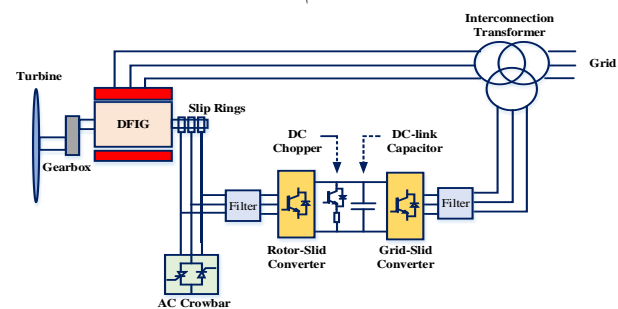
در شکل (۷) اجزای اصلی DFIG آورده شده است. در ساختمان DFIG، روتور ژنراتور برای بهینه کردن نرخ تغییر سرعت (λ) تحت سرعت متغیر عمل می‌کند. λ به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{wind}} \quad (1)$$

که در آن V_{tip} سرعت چرخش پره‌ها و V_{wind} سرعت باد می‌باشد. سرعت چرخش پره‌ها با استفاده از معادله زیر حاصل می‌شود:

$$V_{tip} = \Omega \times r \quad (2)$$

که در آن Ω سرعت مکانیکی توربین بادی و r شعاع دایره چرخش می‌باشد که در واقع طول پره‌های توربین می‌باشد، از این رابطه مشخص است که ماکزیمم کردن بازده به‌طور مستقیم به توانایی تغییر سرعت چرخشی وابسته است. سرعت روتور ژنراتور برای عملکرد در یک بازه متغیر سرعت، کنترل می‌شود. بنابراین ژنراتور در هر دو حالت زیر سنکرون و فوق سنکرون، به‌طور معمول بین $\pm 30\%$ از سرعت سنکرون عمل می‌کند. روتور به وسیله مبدل سه‌فاز که با استفاده از رینگ‌های لغزان به روتور سیم‌پیچی شده متصل است کنترل می‌شود. استاتور به‌صورت مستقیم به شبکه وصل می‌شود در حالی که روتور از طریق یک مبدل به شبکه متصل می‌گردد. مبدل‌ها فقط باید توان روتور را فراهم کنند که به‌طور معمول 30% توان نامی توربین است [۶]. مقدار گشتاور ایجادشده به میدان مغناطیسی استاتور و روتور و به زاویه این دو نسبت به هم بستگی دارد.



شکل (۷): اجزای اصلی DFIG.

میدان استاتور تابعی از ولتاژ و فرکانس شبکه متناسب با سرعت سنکرون است. شار روتور وابسته به جریان روتور است که به‌صورت

۱.۴. استخراج ماتریس حالت سیستم

با فرض $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ و $I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ و با توجه به شکل (۹) شار استاتور و روتور مطابق با رابطه‌ی (۱۷) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

که در آن $L_r = L_{lr} + L_m$ و $L_s = L_{ls} + L_m$ به ترتیب اندوکتانس استاتور و روتور است.

با توجه به رابطه‌ی اخیر جریان روتور و استاتور به ترتیب تابعی از شار روتور و استاتور است، در نتیجه:

$$\frac{d\lambda_s}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} I_2 + \omega_s J\right) \lambda_s + \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \lambda_r - u_s \quad (18)$$

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = -\frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \lambda_s - \left(\frac{R_r}{\sigma L_r} I_2 + (\omega_s - \omega_r) J\right) \lambda_r - u_r \quad (19)$$

از آنجایی که شار معمولاً قابل اندازه‌گیری نیست، معادلات وابسته به جریان روتور و استاتور با جایگزینی روابط (۱۸) و (۱۹) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \frac{di_s}{dt} = & -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} I_2 + \left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r\right) J\right) i_s + \\ & \left[\frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} I_2 - \frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_r J\right] i_r + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} u_r - \frac{1}{\sigma L_s} u_s \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_r}{dt} = & -\left(\frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} I_2 + \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_r J\right) i_s + \\ & \left[\frac{R_r}{\sigma L_r} I_2 + \left(\omega_s + \frac{1}{\sigma} \omega_r\right) J\right] i_r - \frac{1}{\sigma L_r} u_r - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} u_s \end{aligned} \quad (21)$$

با بازنویسی معادله (۲۰) و (۲۱) به صورت ماتریس حالت، مدل فضای حالت سمت شبکه DFIG رابطه (۲۳) است:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (22)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$\dot{x}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} I_2 + \left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r\right) J\right) & \left[\frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} I_2 - \frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_r J\right] \\ \left[\frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} I_2 + \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_r J\right] & \left[\frac{R_r}{\sigma L_r} I_2 + \left(\omega_s + \frac{1}{\sigma} \omega_r\right) J\right] \end{bmatrix}}_A x(t) \quad (23)$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & -\frac{1}{\sigma L_s} \\ -\frac{1}{\sigma L_r} & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix}}_B u(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 1]x(t)$$

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$. بردار گشتاور الکترومغناطیسی به صورت زیر است:

$$\bar{T}_g = n_p \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} (\bar{\lambda}_s \times \bar{\lambda}_r) \quad (11)$$

دامنه گشتاور الکترومغناطیسی به صورت (۱۲) است:

$$T_g = n_p \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} (\lambda_{s,d} \lambda_{r,q} - \lambda_{s,q} \lambda_{r,d}) \quad (12)$$

پارامترهای توان و گشتاور اکتیو و راکتیو به صورت زیر است:

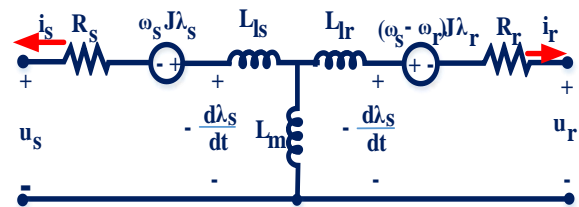
$$P_s = u_{s,d} i_{s,d} + u_{s,q} i_{s,q} \quad (13)$$

$$Q_s = u_{s,q} i_{s,d} - u_{s,d} i_{s,q} \quad (14)$$

$$P_r = u_{r,d} i_{r,d} + u_{r,q} i_{r,q} \quad (15)$$

$$Q_r = u_{r,q} i_{r,d} - u_{r,d} i_{r,q} \quad (16)$$

روابط بالا را به صورت برداری نیز می‌توان بیان کرد.

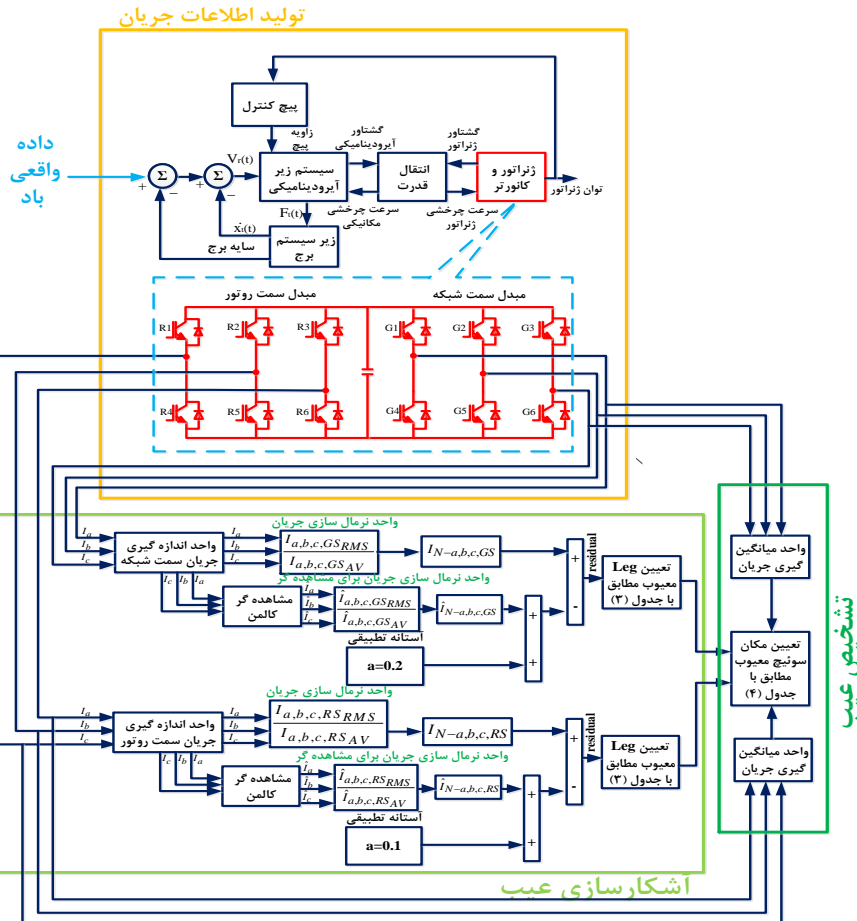


شکل (۹): مدل ماشین DFIG.

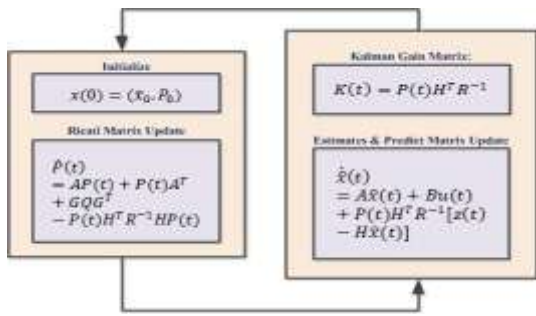
۴. ساختار پیشنهادی

ساختار کلی برای روش پیشنهادی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این شکل، شامل یک توربین باد است که توسط اطلاعات واقعی سرعت باد تغذیه می‌شود، ژنراتور جفت تغذیه که متصل به یک مبدل پشت‌به‌پشت است بخش بعدی این ساختار است، تولید داده الکتریکی وظیفه این بخش است. هسته اصلی ساختار شامل یک بخش آشکارساز عیب مدل پایه و یک بخش تشخیص عیب مبتنی بر استراتژی سیگنال پایه است بخش مدل پایه از یک بلوک اندازه‌گیری اطلاعات جریان (سمت شبکه و سمت روتور) و یک بلوک مشاهده‌گر کالمن^۱ تشکیل شده است. بلوک مشاهده‌گر، تخمین ماتریس‌های حالت سمت استاتور و سمت روتور را انجام می‌دهد. در این بخش، مانده تولید می‌شود و وضعیت شاخه معیوب مشخص می‌شود. بلوک دوم، وظیفه تشخیص مکان عیب را بر اساس استخراج ویژگی از سیگنال حوزه زمان بر عهده دارد، بر اساس این بلوک مکان دقیق سوئیچ معیوب مشخص می‌شود.

1. Kalman



شکل (۱۰): ساختار پیشنهادی برای عیب‌یابی مدار باز بودن سوئیچ IGBT مبدل پشت‌به‌پشت توربین باد.



شکل (۱۱): ساختار مشاهده‌گر مورد استفاده

جدول (۲): پارامترهای به کار رفته در مدل KF

پارامتر	توصیف	پارامتر	توصیف
$P(t)$	کواریانس حالت	$x(0)$	تخمین اولیه
Q	کواریانس نویز	H	مدل مشاهده‌گر
R	کواریانس نویز مشاهده‌گر	$\hat{x}(t)$	تخمین حالت
$z(t)$	بردار اندازه‌گیری	$K(t)$	بهره کالمن

۲.۴. فیلتر کالمن^۱ (KF)

فیلتر کالمن، یک روش موثر بازگشتی و یک الگوریتم ریاضی است که در آن در هر گام، اطلاعات مشاهدات ورودی غیر دقیق دریافت می‌گردد و سنجش بهینه از وضعیت واقعی سیستم صورت می‌گیرد [۳۰]. این سنجش، بر اساس به‌کارگیری مدل پیشگویی و مدل مشاهده است. مدل KF تخمینی از وضعیت دینامیک سیستم تحت بررسی را با استفاده از دو مدل ارائه می‌دهد: مدل‌های دینامیک و مشاهده. مدل دینامیک رفتارهای بردارهای وضعیت را تشریح می‌کند و مدل مشاهده بین اندازه‌گیری‌ها و بردار وضعیت ارتباط برقرار می‌کند. عملیات اساسی فیلتر کالمن مطابق با ساختار شکل (۱۱) تا حصول نتیجه در یک حلقه ادامه می‌یابد [۳۱]. تشریح پارامترهای اساسی به کار رفته در ساختار شکل (۱۱) به صورت اختصار در جدول (۲) آورده شده است.

1. Kalman Filter (KF)

۳.۴. آشکارسازی و مکان‌یابی عیب

ساختار مبدل پشت‌به‌پشت در ساختار کلی در شکل (۱۰) نشان داده شده است، روش آشکارساز باید بتواند وجود یا عدم وجود عیب را به‌طور کلی اعلام کند و هدف روش مکان‌یابی تعیین مکان دقیق سوئیچ معیوب است.

الف- آشکارسازی عیب

با توجه به اینکه از هر سه فاز جریان سمت شبکه و سمت روتور که در سیستم کنترل اندازه‌گیری می‌شود، در روش پیشنهادی استفاده می‌شود، پس از آشکارسازی عیب سوئیچ، احتمال تشخیص مکان دقیق سوئیچ معیوب ۵۰ درصد است، با توجه به اتصال فاز به وسط هر شاخه قاعدتاً سوئیچ بالا یا پایین معیوب است، همان‌طور که گفته شد آشکارساز عیب بر اساس تولید مانده و با کمک فیلتر کالمن (سازنده مدل فضای حالت سیستم) عمل می‌کند، جریان پس از اندازه‌گیری نرمالیزه می‌شود تا اثر تغییرات جریان، خنثی شده و از هشدار اشتباه جلوگیری شود. نرمال‌سازی جریان‌ها هم برای جریان‌های اندازه‌گیری شده و هم برای جریان‌های مدل‌شده، صورت می‌گیرد. روابط (۲۴) تا (۲۷) به ترتیب نشان‌دهنده جریان اندازه‌گیری نرمالیزه شده سمت شبکه، جریان اندازه‌گیری نرمالیزه شده سمت روتور و جریان مدل‌شده نرمالیزه سمت روتور است.

$$I_{N-a,b,c,GS} = \frac{I_{a,b,c,GS_{RMS}}}{I_{a,b,c,GS_{AV}}} \quad (24)$$

$$\hat{I}_{N-a,b,c,GS} = \frac{\hat{I}_{a,b,c,GS_{RMS}}}{\hat{I}_{a,b,c,GS_{AV}}} \quad (25)$$

$$I_{N-a,b,c,RS} = \frac{I_{N-a,b,c,RS_{RMS}}}{I_{N-a,b,c,RS_{AV}}} \quad (26)$$

$$\hat{I}_{N-a,b,c,RS} = \frac{\hat{I}_{N-a,b,c,RS_{RMS}}}{\hat{I}_{N-a,b,c,RS_{AV}}} \quad (27)$$

پس از محاسبات آماری در شرایط نرمال مقادیر نرمالیزه شده برای هر دو سمت و در هر دو حالت اندازه‌گیری و مشاهده‌گر حدود ۱ است، با هر گونه عیبی در سوئیچ‌ها این رفتار نرمال دچار تغییر می‌شود. با مقایسه مقادیر مدل‌شده و اندازه‌گیری شده، می‌توان به شاخه معیوب پی‌برد. در شرایط پایدار، اگر مانده تولیدی منفی باشد (زیر صفر) نشان‌دهنده این است که آن شاخه معیوب است و در همه حالات مثبت، سالم بودن شاخه را نشان می‌دهد، در این حالت، مانده تولید باید با آستانه صفر مقایسه شود. این روش، در تعیین شاخه معیوب کاراست اما در تعیین مکان سوئیچ معیوب ناتوان است. به‌طور کلی تقریباً تمام

روش‌هایی که امکان تعیین مکان سوئیچ معیوب را دارند بر اساس تعریف آستانه عمل می‌کنند. وقتی مسئله آستانه مطرح می‌شود دو مقوله نرخ هشدار غلط^۱ (FAR) و نرخ هشدار گم‌شده^۲ (MAR) مطرح می‌شود، در نگاه اول و عمومی اگر اولویت را به کاهش MAR بدهیم، در اثر آن FAR افزایش می‌یابد، خرابی سوئیچ مبدل توربین باد موجب افزایش بازدیدهای دوره‌ای مهندسی خواهد شد و هزینه تعمیر و نگهداری^۳ (O&M) را افزایش می‌دهد. بنابراین باید استراتژی اتخاذ کنیم که حداقل امکان هر دو خصوصیت FAR و MAR کمینه گردد. عدم رعایت این اصل، قابلیت اطمینان و مقاوم بودن تکنیک مورد استفاده را تحت تاثیر می‌گذارد. با توجه به شرایط گذرای توربین باد سرعت متغیر آستانه مورد نظر باید متغیر با شرایط عملکردی توربین باشد، توربین دارای ۴ پارامتر عملکردی اساسی شامل سرعت باد، توان، سرعت چرخشی ژنراتور و زاویه پیچ است. استفاده از یک آستانه تطبیقی موجب می‌شود که روش اصلی برای تشخیص در مقابل سرعت‌های گذرا و جریان‌های گذرا، پایدار باشد. تفاوت بین خروجی مشاهده‌گر و اندازه‌گیری شده در شرایط نرمال ناچیز است، با افزایش سرعت باد و توان این شرایط گذرا تشدید می‌شود، برای محاسبه اینکه این شرایط گذرا موجب افزایش چه مقداری از دامنه جریان می‌شود باید میانگین تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده جریان را از مقادیر مرجع محاسبه کنیم. برای توربین باد، کلاس‌های عملکردی متفاوت است، برای توربین تحت مطالعه، ۴ کلاس عملکردی در نظر گرفته شده است که مطابق شکل (۱۲) است. این ۴ کلاس از داده‌های اسکادا^۴ی ۶ ماهه یکی از واحدهای توربین بادی سایت کهک مپنا، حاصل شده است. برای هر یک از جریان‌های سه‌فاز سمت شبکه و سمت روتور در این ۴ کلاس، یک آستانه تطبیقی جمع‌شونده با آستانه اصلی در نظر گرفته شده است. مطابق محاسبات برای سمت شبکه، این آستانه ۰/۲ و برای سمت روتور برابر ۰/۱ است (نحوه انتخاب مقدار جمع‌شونده در بخش (۶) بیان می‌شود)، ضریب جمع‌شونده بهترین عامل برای جداسازی جریان اندازه‌گیری شده از جریان خروجی مشاهده‌گر است. در این حالت، همواره حد آستانه با شرایط عملکردی توربین تطبیق دارد و بیشتر از حد واقعی تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر خروجی مشاهده‌گر است. بنابراین ضرایب جمع‌شونده به خوبی در تعیین خطای سوئیچ، دخالت خواهند داشت. بر این اساس، معادلات زیر استخراج می‌شود و نتایج این معادلات برای آشکارسازی عیب در جدول (۳) آمده است.

1. False Alarm Rate
2. Miss Alarm Rate
3. Operations and Maintenance
4. SCADA



شکل (۱۲): کلاس‌های عملکردی توربین باد ۲/۵ مگاوات کهک مینا.

جدول (۳): آشکارساز عیب مدار باز سوئیچ.

آشکارساز			سوئیچ سمت روتور	آشکارساز			سوئیچ شبه
F_{RS_c}	F_{RS_b}	F_{RS_a}		F_{GS_c}	F_{GS_b}	F_{GS_a}	
+	+	-	R1	+	+	-	G1
+	-	+	R2	+	-	+	G2
-	+	+	R3	-	+	+	G3
+	+	-	R4	+	+	-	G4
+	-	+	R5	+	-	+	G5
-	+	+	R6	-	+	+	G6
+	+	-	R1-R4	+	+	-	G1-G4
+	-	+	R2-R5	+	-	+	G2-G5
-	+	+	R3-R6	-	+	+	G3-G6
+	-	-	R1-R5	+	-	-	G1-G5
+	-	-	R2-R4	+	-	-	G2-G4
-	+	-	R1-R6	-	+	-	G1-G6
-	-	+	R3-R4	-	-	+	G3-G4
-	-	+	R2-R6	-	-	+	G2-G6
-	-	+	R3-R5	-	-	+	G3-G5

جدول (۴): مکان‌یاب عیب مدار باز سوئیچ

مکان‌یاب			سوئیچ سمت روتور	مکان‌یاب			سوئیچ شبه
I_{RS_c}	I_{RS_b}	I_{RS_a}		I_{GS_c}	I_{GS_b}	I_{GS_a}	
+	+	-	R1	+	+	-	G1
+	-	+	R2	+	-	+	G2
-	+	+	R3	-	+	+	G3
+	+	-	R4	+	+	-	G4
+	-	+	R5	+	-	+	G5
-	+	+	R6	-	+	+	G6
+	+	-	R1-R4	+	+	-	G1-G4
+	-	+	R2-R5	+	-	+	G2-G5
-	+	+	R3-R6	-	+	+	G3-G6
+	-	-	R1-R5	+	-	-	G1-G5
+	-	-	R2-R4	+	-	-	G2-G4
-	+	-	R1-R6	-	+	-	G1-G6
-	-	+	R3-R4	-	-	+	G3-G4
-	-	+	R2-R6	-	-	+	G2-G6
-	-	+	R3-R5	-	-	+	G3-G5

۵. شبیه‌سازی

روش پیشنهادی در محیط SIMULINK و برای یک توربین ۲/۵

$$R_{GS,RS} = I_{N-a,b,c,GS,RS}^{observer} - I_{N-a,b,c,GS,RS}^{Mesurment} \geq 0 \rightarrow normal \quad (28)$$

$$R_{GS,RS} = I_{N-a,b,c,GS,RS}^{observer} - I_{N-a,b,c,GS,RS}^{Mesurment} \leq 0 \rightarrow fault \quad (29)$$

$$adaptive\ threshold_{GS} = 0.2 + fix\ threshold \quad (30)$$

$$adaptive\ threshold_{RS} = 0.1 + fix\ threshold$$

$$F = \left(I_{N-a,b,c,GS,RS}^{observer} + (0.1 \text{ or } 0.2) \right) - I_{N-a,b,c,GS,RS}^{Mesurment} \quad (31)$$

$$I_{a,b,c} \quad (31)$$

$$Detection\ variables = F_{GS,a,b,c} = I' - I \text{ is positive} \rightarrow normal\ leg$$

$$Detection\ variables = F_{RS,a,b,c} = I' - I \text{ is negative} \rightarrow faulty\ leg$$

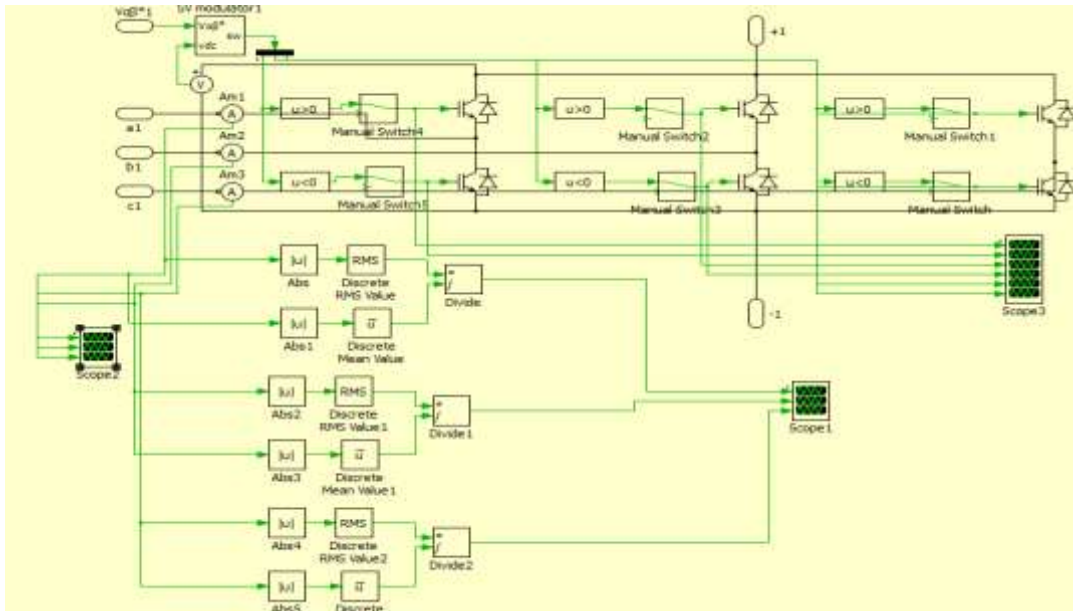
ب- تعیین مکان عیب بر اساس آنالیز رشد جریان

پس از آنکه بر اساس مانده تولیدشده، شاخه معیوب تشخیص داده شد، سیگنال جریان مربوط به آن شاخه مورد آنالیز قرار می‌گیرد. روش به این صورت است که با نمونه‌برداری از سیگنال جریان در بازه زمانی متغیر و پس از اعلام شاخه معیوب، از فاز - جریان مربوط به آن شاخه میانگین گرفته می‌شود، با استفاده از این مقدار میانگین و در مقایسه با یک آستانه ثابت در خصوص مکان سوئیچ معیوب اعلام نظر می‌شود.

در اینجا به صورت متناوب میانگین جریان‌ها نمونه به نمونه با آستانه مقایسه می‌شوند، حداکثر در یک نیم‌سیکل اگر نمو در جهت نیم‌سیکل، منفی باشد سوئیچ بالایی معیوب است و اگر نمو در جهت نیم‌سیکل، مثبت باشد سوئیچ پایینی معیوب است، این روش سرعت تشخیص را بسیار بالا می‌برد (جدول (۴) راهنمای مکان‌یابی عیب مدار باز سوئیچ است).

مگاوات مبتنی بر DFIG بر اساس پارامترهای واقعی توربین بادی مینا و اطلاعات واقعی سرعت باد مزرعه بادی کهک قزوین مورد ارزیابی قرار گرفت، برای مدار باز کردن سوئیچ از قطع گیت هر سوئیچ استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها، پرچم‌هایی برای وجود یا عدم وجود خطا با نام‌های $FG_i : i=1, \dots, 5, 6$ برای سمت شبکه و

برای سمت روتور تعریف شده است. با بالا آمدن هر کدام از پرچم‌ها وجود خطا اعلام می‌شود و زمان وقوع عیب معلوم می‌گردد. بخش شبیه‌ساز مدار باز کردن سوئیچ جهت آزمون‌های مختلف، مشابه شکل (۱۳) است. وقوع و مکان وقوع عیب سوئیچ بر اساس جدول (۳) و جدول (۴) مشخص می‌شود.



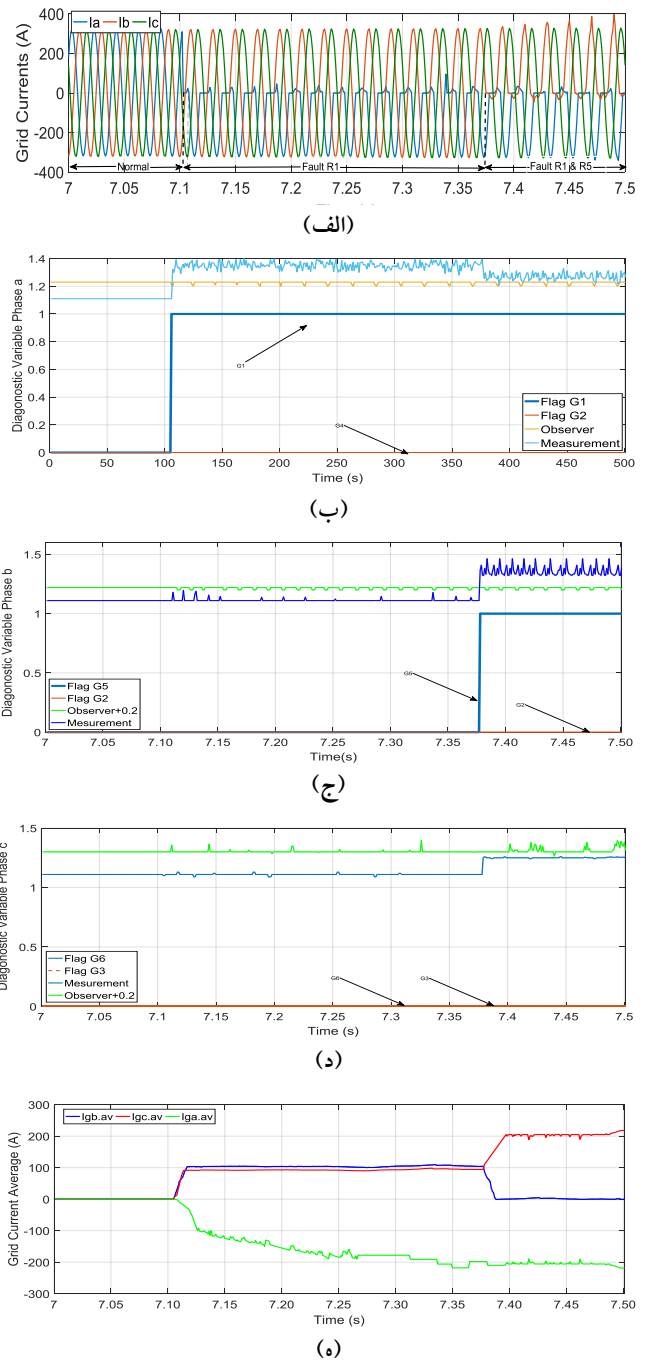
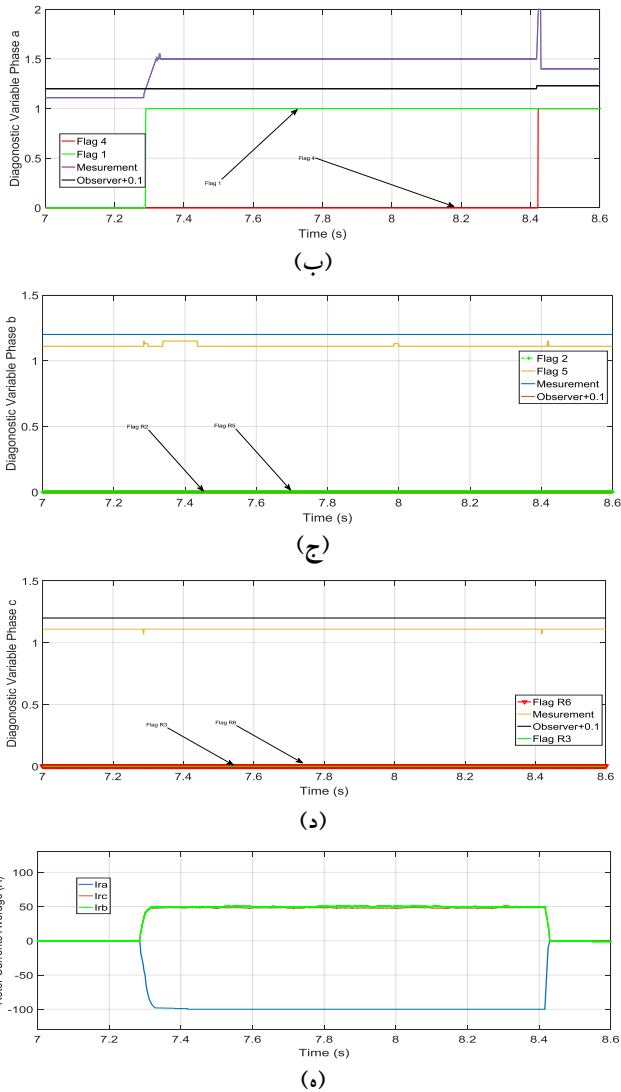
شکل (۱۳): زیر بخش مبدل برای مدار باز کردن گیت IGBT

درصد یک سیکل دوره جریان سمت شبکه است، گراف‌های مربوطه در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

ب- ارزیابی روش پیشنهادی در عیوب چندگانه سمت روتور
در سناریو بعدی دو عیب مدار باز در شاخه شماره یک، برنامه‌ریزی می‌شود (شبیه‌سازی شکل ۱۵). هدف، مبدل سمت روتور است و در زمان $7/285$ ثانیه سوئیچ شماره ۱ مدار باز می‌شود، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تشخیص در زمان $7/290$ ثانیه انجام شده است، در این حالت، رشد جریان به گونه‌ای است که از \pm کمتر می‌شود، پس نیم‌سیکل مثبت حذف شده و عملیات تشخیصی پرچم سوئیچ یک را بالا می‌برد، سپس در زمان $8/417$ ثانیه گیت سوئیچ شماره ۴ باز می‌شود، پرچم در زمان $8/422$ ثانیه زده می‌شود، سیکل کامل $0/20$ ثانیه است، زمان مورد نظر به اندازه نصف یک نیم‌سیکل است، در این حالت رشد جریان در تمامی نمونه‌ها بین \pm قرار می‌گیرد و تقریباً حول نقطه صفر متمرکز می‌شود، وجود عیب وقتی با این اتفاق توأم شود یعنی هم نیم‌سیکل بالا و هم پایین از بین رفته است، گراف‌های مربوطه در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

الف- ارزیابی روش پیشنهادی در عیوب چندگانه سمت شبکه

در اولین سناریو شبیه‌سازی، روش پیشنهادی برای عیوب چندگانه سوئیچ‌های سمت شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در زمان $7:103$ گیت سوئیچ شماره ۱ باز می‌شود و پرچم در زمان $7:105$ زده می‌شود. در این حالت سطح نرمالیزه I_a اندازه‌گیری شده از I'_a که خروجی مشاهده‌گر به اضافه $0/2$ است بالاتر رفته و یک نمونه جریان فاز a ، I_a ، از \pm کمتر پیدا شده است، این نشان می‌دهد که جریان در حال رشد در نیم‌سیکل منفی است و قطعاً نیم‌سیکل مثبت وجود ندارد. در همین شبیه‌سازی در زمان $7/375$ ثانیه گیت IGBT شماره ۵ قطع می‌شود، در این حالت، مانده مربوطه منفی شده است و از طرفی میانگین جریان مربوط به این شاخه (شماره ۲)، فاز دوم، از \pm بالاتر رفته که به معنی رشد سیگنال جریان در جهت سیکل مثبت است، پس قاعدتاً سیکل منفی حذف شده و تشخیص عیب برای IGBT شماره ۵ سمت شبکه ممکن می‌شود. در عیب اول، پرچم در $7/105$ ثانیه و در عیب دوم، پرچم در $7/377$ ثانیه زده می‌شود که هر یک تقریباً 10



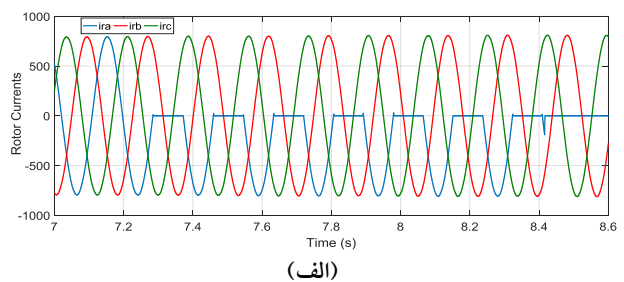
شکل (۱۵): نتایج شبیه‌سازی عیوب چندگانه سمت روتور، الف: جریان سه فاز سمت روتور، ب: متغیرهای تشخیصی فاز a، ج: متغیرهای تشخیصی فاز b، د: متغیرهای تشخیصی فاز c، ه: مقادیر میانگین جریان سه فاز.

ج- ارزیابی روش پیشنهادی در عیوب هم‌زمان سمت روتور و سمت شبکه

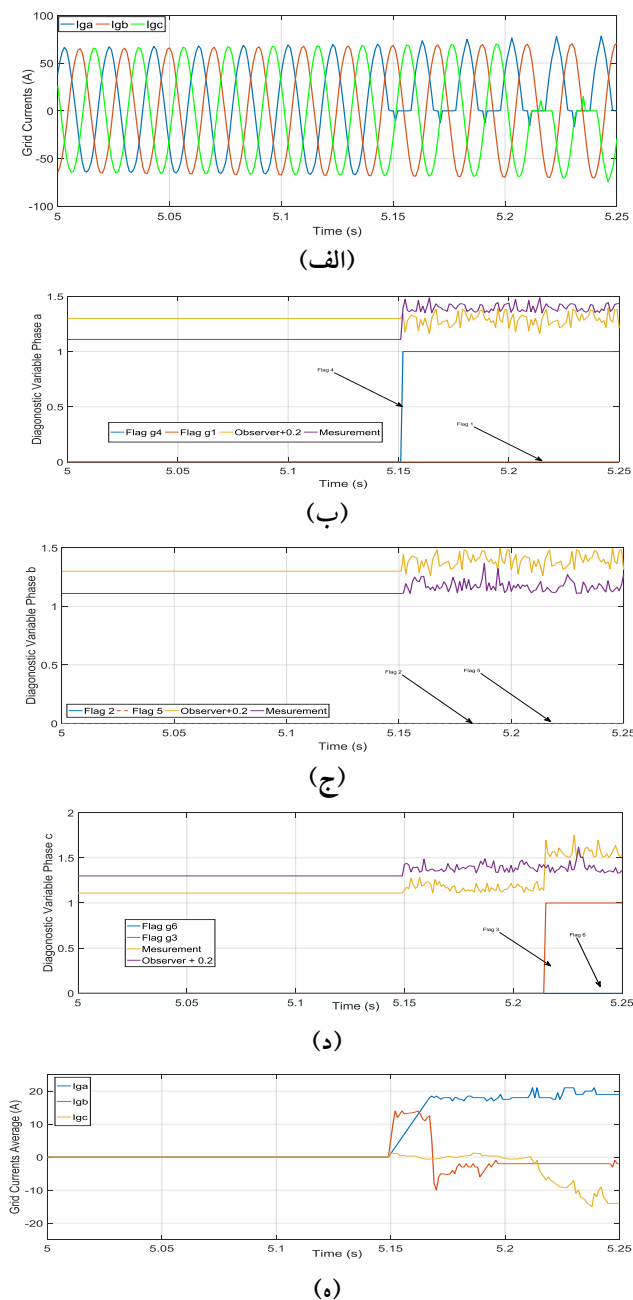
شکل (۱۴): نتایج شبیه‌سازی عیوب چندگانه سمت شبکه، الف: جریان سه فاز سمت شبکه، ب: متغیرهای تشخیصی فاز a، ج: متغیرهای تشخیصی فاز b، د: متغیرهای تشخیصی فاز c، ه: مقادیر میانگین جریان سه فاز

دو عیب مدار باز، هم‌زمان در شاخه شماره یک و دو، برنامه‌ریزی شده است (شبیه‌سازی شکل ۱۶). هدف، مبدل سمت روتور است و در نمونه ۷/۲۸۶ ثانیه سوئیچ شماره ۱ و ۵ هم‌زمان مدار باز می‌شود، همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در این حالت رشد جریان به گونه‌ای است که از i_c^* کمتر می‌شود، پس نیم‌سیکل مثبت حذف شده و عملیات تشخیصی پرچم سوئیچ یک را بالا می‌برد، پرچم تشخیص عیب و علامت تشخیصی فاز دوم نیز هم‌زمان با پرچم فاز اول زده می‌شود. بنابراین وجود عیب در فاز اول و دوم قطعی است، مطابق با شکل (۱۶-د) روش پیشنهادی توانسته است عیب هم‌زمان در سوئیچ

شکل (۱۴): نتایج شبیه‌سازی عیوب چندگانه سمت شبکه، الف: جریان سه فاز سمت شبکه، ب: متغیرهای تشخیصی فاز a، ج: متغیرهای تشخیصی فاز b، د: متغیرهای تشخیصی فاز c، ه: مقادیر میانگین جریان سه فاز

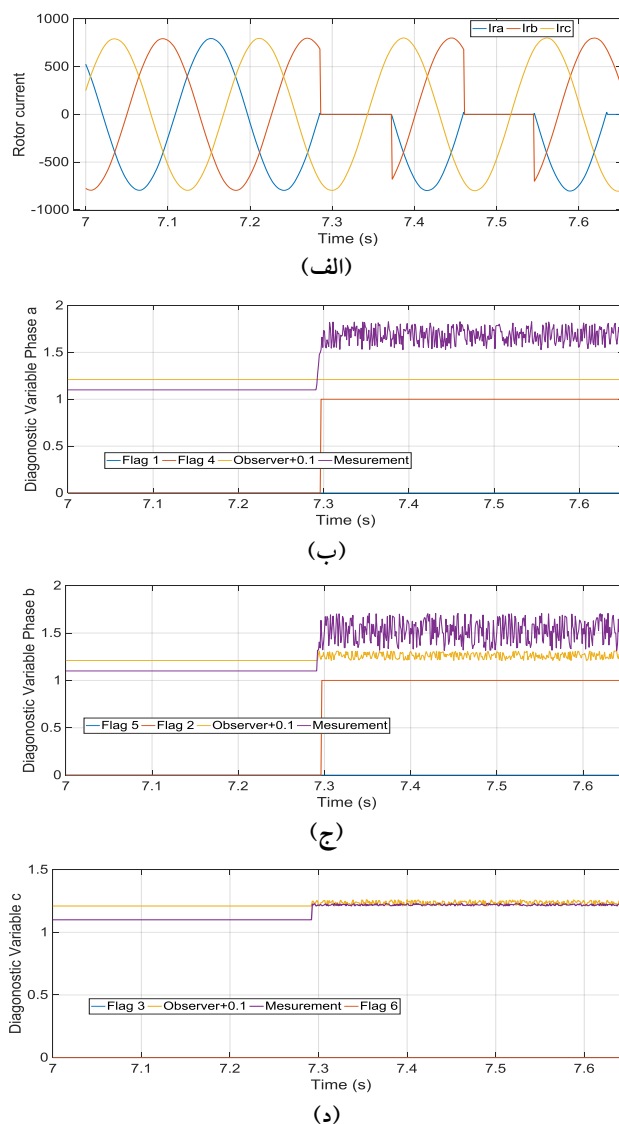


گیت سوئیچ ۳ و ۴ باز می‌شود، ابتدا گیت سوئیچ ۴ در زمان ثانیه ۵/۱۴۹ ثانیه باز می‌شود و روش، در زمان حدود ۵/۱۵۲ ثانیه، تشخیص عیب این سوئیچ را اعلام می‌کند، ابتدا از مانده منفی شده است و سطح نرمالیزه I_a اندازه‌گیری شده از I'_a که خروجی مشاهده‌گر به اضافه ۰/۲ است، بالاتر رفته و نمو جریان فاز a ، I_a ، از I'_a کمتر می‌گردد، سپس در زمان ۵/۲۱۲ ثانیه گیت سوئیچ ۳ مدار باز می‌شود و پرچم در زمان ۵/۲۱۵ ثانیه از ۰ به ۱ تغییر حالت می‌دهد. سایر پرچم‌ها در حالت ۰ باقی می‌ماند (شکل ۱۷).



شکل (۱۷): نتایج شبیه‌سازی، الف: جریان سه فاز سمت شبکه در بار و سرعت کم، ب: متغیرهای تشخیصی فاز a ، ج: متغیرهای تشخیصی فاز b ، د: متغیرهای تشخیصی فاز c ، ه: مقادیر میانگین جریان سه فاز.

شماره ۱ از فاز اول و سوئیچ شماره ۵ از فاز دوم را تشخیص دهد. در همین زمان و در نمونه ۷/۲۸۶ ثانیه سوئیچ شماره ۶ سمت شبکه مدار باز می‌شود، نتایج نشان داد که روش پیشنهادی توانسته است در زمان ۷/۲۹۹ ثانیه این عیب را آشکار کند و این فاصله زمانی برای تشخیص عیب، بیش از زمان تشخیص دو عیب هم‌زمان سمت روتور است.



شکل (۱۶): نتایج شبیه‌سازی در عیوب هم‌زمان سمت روتور، الف: جریان سه فاز سمت روتور، ب: متغیرهای تشخیصی فاز a ، ج: متغیرهای تشخیصی فاز b ، د: متغیرهای تشخیصی فاز c ، ه: مقادیر میانگین جریان سه فاز.

د- ارزیابی روش پیشنهادی در بار متغیر

توربین باد دارای نواحی عملکردی متغیر (سرعت متغیر و بار متغیر) است. ارزیابی روش پیشنهادی در تغییرات بار در این بخش مورد هدف است، اطلاعات سرعت باد که در ناحیه اول و دوم کاری است به‌عنوان ورودی به شبیه‌ساز داده می‌شود، هدف این است که عملکرد روش در بار پایین مورد سنجش قرار گیرد.

۶. بحث و مقایسه

یکی از مواردی که در روش ارائه شده دارای اهمیت است، تعیین صحیح مقادیر جمع‌شونده در تعیین آستانه تطبیقی است، تعیین آستانه برای مقایسه با مقدار میانگین جریان که در تعیین مکان عیب نقش دارد، بسیار پر اهمیت است. مقدار درست این مقادیر روی مقاوم بودن استراتژی پیشنهادی در شرایط عملکردی سالم و معیوب، تأثیرگذار است. به‌طور کلی بین سرعت آشکارسازی و مقاوم بودن الگوریتم مورد استفاده برای تشخیص عیب، باید موازنه برقرار باشد. اگر مقدار سطح آستانه کوچک باشد، دفعات اعلام هشدار افزایش می‌یابد، اما مقاوم بودن الگوریتم تحت تأثیر قرار می‌گیرد. اگر مقدار حد آستانه بالاتر رود، تا تحقق عبور از حد آستانه، زمان بیشتری صرف شده و در نتیجه زمان آشکارسازی و نرخ MAR افزایش می‌یابد، ولی مقاوم بودن نیز افزایش می‌یابد. در این مقاله، با توجه به اینکه معیار میانگین جریان، تعیین‌کننده است در هر لحظه میانگین‌گیری انجام می‌شود تا حد آستانه حاصل شود. به منظور تعیین مقدار جمع‌شونده با خروجی مشاهده‌گر سمت روتور، باید رفتار جریان نرمالیزه در شرایط سالم و ناسالم مورد بررسی قرار گیرد. با در نظر گرفتن بار و سرعت گذرا در شرایط عیوب تک و دو سوئیچ در یک شاخه، حداقل تغییرات ایجاد شده بر اثر این شاخه معیوب در جریان نرمالیزه از ۰/۱ بیشتر است، در حالی که در شرایط سالم ماکزیمم مقدار از ۰/۱ کمتر است. با بررسی جریان‌های نرمالیزه اندازه‌گیری شده و خروجی مشاهده‌گر سمت شبکه دیده می‌شود که ماکزیمم تغییرات در شرایط سالم از ۰/۲ بیشتر و در شرایط عیب شاخه (هر دو سوئیچ)، همواره از ۰/۲ بیشتر است. برای تعیین مقدار ج_۰ پس از مشخص شدن وجود یا عدم وجود عیب در یک شاخه که خروجی ارزیابی مانده است، اگر هر دو سوئیچ در یک شاخه معیوب شود، میانگین تغییرات حول نقطه صفر متمرکز است و در بدترین حالت بین ۰/۱ و ۰/۱- است. انتخاب عدد ۰/۱ بین سرعت آشکارسازی روش مقاوم بودن آن موازنه برقرار می‌کند. اکثر روش‌هایی که در تشخیص عیب مدار باز سوئیچ مبدل استفاده می‌شوند از روش‌های پایه‌ای جدول (۵) نشأت می‌گیرند.

جدول (۵): مقایسه برخی از روش‌های پایه‌ای تشخیص عیب مدار باز سوئیچ با روش پیشنهادی در این مقاله.

روشنی	کیفیت روش	زمان (m.s)	سیگنال	وابستگی آستانه
بردار پارک	ابهام در جریان پایین	۲۰	جریان سه فاز	زیاد
جریان نرمالیزه	ضعیف در جریان کم	۱۸/۴	جریان سه فاز	متوسط
تصحیح شده جریان نرمالیزه	خوب	۱۸/۴	جریان سه فاز	-
روش Slop	ضعیف در جریان کم	۳۸/۳	جریان سه فاز	زیاد
روش پیشنهادی	خوب	حداکثر یک نیم سیکل	جریان سه فاز	-

علاوه بر این روش‌ها، روش‌هایی بر اساس شناسایی آماری الگو [۳۲]، روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی [۳۳] و روش‌های مبتنی بر استخراج نشانه‌ها و استفاده از تبدیل موجک [۳۲]، [۳۴-۳۵] یا تبدیل موجک - فازی [۳۲] نیز، برای مبدل ارائه شده است که اطلاعات لازم برای مقایسه اعلام نشده بود، از طرفی روش‌های مبتنی بر الگو، اغلب خطای بیشتری داشته یا نیاز به کار در حالت آفلاین دارند که در حوزه توربین باد کارایی لازم را ندارند، هدف تشخیص سوئیچ معیوب، تعویض سریع آن و جلوگیری از افت توان توربین باد است، از طرفی روش‌های دیگری نیز وجود دارد که یا در تعیین مکان عیب ناتوان هستند یا کارایی لازم را برای تشخیص تعداد زیاد سوئیچ ندارند. مقالات کمی در حوزه تشخیص عیب مدار باز سوئیچ مبدل توربین باد، ارائه شده است. در جدول (۶)، مقایسه بین این روش‌ها و روش پیشنهادی این مقاله آورده شده است. روش پیشنهادی در این مقاله، دارای زمان سریع تشخیص عیب است و قابلیت تعیین مکان عیب همه سوئیچ‌ها را به‌صورت عیوب تک، هم‌زمان و چندگانه سوئیچ‌ها دارد، از طرفی از قابلیت اطمینان بالایی، برخوردار است و در تمامی نواحی عملکردی دارای نرخ اشتباه پایین است.

جدول (۶): مقایسه روش‌های تشخیص عیب سوئیچ مدار باز در مبدل پشت‌به‌پشت با کاربرد توربین بادی.

مرجع	روش	نیاز به سنسور	سیگنال	تشخیص عیوب چندگانه	تشخیص عیوب هم‌زمان
[۳۶]	مبتنی بر مشاهده‌گر و میانگین جریان	ندارد	سه فاز جریان	بله	بررسی نشده است
[۳۷]	قدمطلق بردار پارک جریان نرمالیزه	ندارد	سه فاز جریان	خیر	بررسی نشده است
[۳۸]	جریان نرمالیزه و آستانه تطبیقی	ندارد	سه فاز جریان	بله	بررسی نشده است
[۳۹]	بردار پارک	ندارد	سه فاز جریان	بله	بله
مقاله	مشاهده‌گر، فاکتور جریان و آستانه تطبیقی	ندارد	سه فاز جریان	بله	بله

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای تشخیص عیب سوئیچ مدار باز IGBT مدل پست به پست توربین باد مبتنی بر DFIG ارائه شده است که سریع و مقاوم است، این روش بر اساس اطلاعات سنسورهای موجود در سیستم کنترل توربین باد عمل می‌کند و نیاز به افزودن سخت افزار اضافه یا سنسور داده برداری اضافه ندارد، ویژگی کم هزینه بودن آن بسیار مهم است. این روش بر اساس یک ساختار مدل پایه و تولید مانده و سپس ارزیابی مانده بر اساس مقایسه با یک آستانه تطبیقی، به کشف شاخه معیوب می‌پردازد، سپس بر اساس یک ساختار سیگنال پایه و استخراج ویژگی میانگین جریان در یک بازه زمانی مشخص و مقایسه با آستانه ثابت به کشف سوئیچ معیوب می‌پردازد. این روش، از تعادل بین نرخ MAR و FAR برخوردار است. صحت روش، بر اساس

محیط شبیه سازی یک توربین واقعی ۲/۵ مگاوات و بر اساس پارامترهای واقعی توربین باد تجاری ارزیابی شد. روش مورد نظر با برخی از روش ها به لحاظ زمان آشکار سازی و قدرت تشخیص مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج از برتری روش پیشنهادی حکایت داشت. این روش، به خوبی قادر است عیوب هم زمان و غیر هم زمان چندگانه سوئیچ های سمت شبکه و روتور مدل پست به پست توربین باد مبتنی بر DFIG سرعت متغیر را تشخیص دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همکاری علمی و اجرایی شرکت مهندسی برق و کنترل مپنا (مکو) کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] Blaabjerg, F., Marco, L., and Ke, M., "Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 48, No. 2, pp.708-719, 2012.
- [2] Leung, D., Yang, Y., "Wind Energy Development and its Environmental Impact: a Review," Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 1, pp. 1031-1039, 2012.
- [3] رفان، محمدحسین؛ دمشق، عادل؛ کمزین، مهرنوش، «پیشگویی گام بلند سرعت باد مبتنی بر مدل ترکیبی (RNNGA)»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، سال ششم، شماره ۲، صفحه ۲-۱۱، تابستان ۱۳۹۵.
- [4] Wilkinson, M. R., *Condition Monitoring of Offshore Wind Turbines*, Ph.D. Thesis, University of Newcastle, UK, 2008.
- [5] Christopher, J., *Condition Monitoring Techniques for Wind Turbines*, Ph.D. Thesis, University of Durham, 2011.
- [6] Zaggout, M. N., *Wind Turbine Generator Condition Monitoring via the Generator Control Loop*, PhD thesis, University of Durham, 2013.
- [7] Mendes, A. M. S., Cardoso, A. J. M., Saraiva, E. S., "Voltage Source Inverter Fault Diagnosis in Variable Speed AC Drives, by Park's Vector Approach," in Proc. 7th Int. Conf. Power Electron. Variable Speed Drives, pp. 538-543, 1998.
- [8] Trabelsi, M., Boussak, M., Gossa, M., "Multiple IGBTs Open Circuit Faults Diagnosis in Voltage Source Inverter Fed Induction Motor Using Modified Slope Method", in Proc. 19th Int. Conf. Electr. Mach., Vol. 6, pp. 6-8, Sep. 2010.
- [9] Rothenhagen, K., Fuchs, F.W., "Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Three Phase Voltage Source Inverters for AC Variable Speed Drives", in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl., Vol. 10, pp. 1-10, 2005.
- [10] Rothenhagen, K., Fuchs, F. W., "Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Voltage Source Active Rectifiers," in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., pp. 4348-4354, 2004.
- [11] Jung, S.M., Park, J.S., Kim, H.W., Cho, K.Y., Youn, M.J., "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.
- [12] Mendes, A. M. S., Marques Cardoso, A. J., "Voltage Source Inverter Fault Diagnosis in Variable Speed AC Drives, by the Average Current Park's Vector Approach," in Proc. IEMDC, pp. 704-706, 1999.
- [13] Rothenhagen, K., Fuchs, F. W., "Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Three Phase Voltage Source Inverters for AC Variable Speed Drives, " in Proc. Eur. Power Electron. Appl. Conf, pp. 1-10. 2005.
- [14] Rothenhagen, K., Fuchs, F. W., "Performance of Diagnosis Methods for IGBT Open Circuit Faults in Voltage Source Active Rectifiers," in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf, pp. 4348-4354, 2004.
- [15] Peugeot, R., Courtine, S., Rognon, J. P., "Fault Detection and Isolation on a PWM Inverter by Knowledge-Based Model," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp. 1318-1326, 1998.
- [16] Freire, N.M.A., Estima, J.O., Marques Cardoso, A.J., "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 9, pp. 3957-3967, 2013.
- [17] Lee, J.S., Lee, K.B., Blaabjerg, F., "Open-Switch Fault Detection Method of a Back-to-Back Converter Using NPC Topology for Wind Turbine Systems," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 1, pp. 325-335, 2015 .
- [18] Freire, N.M.A., Estima, J.O., Marques Cardoso, A.J., "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 9, pp. 3957-3967, 2013.
- [19] Das, P.S., Kim, K.H., "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.
- [20] Das, P.S., Kim, K.H., "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.
- [21] Mina, J., Pérez, R., "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 City, Mexico. September 30-October 4, 2013.
- [22] Zidani, F., Diallo, D., Benbouzid, M.E.H., Naït-Said, R., "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.
- [23] Awadallah, M. A., Morcos, M. M., "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.
- [24] Trabelsi, M., Boussak, M., Gossa, M., "Multiple IGBTs Open Circuit Faults Diagnosis in Voltage Source Inverter Fed Induction Motor Using Modified Slope Method," in Proc. 19th Int. Conf. Electr. Mach., Vol. 6, pp. 6-8, Sep. 2010.
- [25] Ribeiro, R. L. A., Jacobina, C. B., Silva, E. R. C., Lima, A. M. N., "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.
- [26] Freire, N. M. A., Estima, J. O., Cardoso, A. J. M., "A Voltage-Based Approach Without Extra Hardware for Open-Circuit Fault Diagnosis in Closedloop PWM AC Regenerative Drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 9, pp. 4960-4970, 2014.
- [27] Aktas, M., Turkmenoglu, V., "Wavelet-Based Switching Faults Detection in Direct Torque Control Induction Motor Drives," IET Science, Measurement & Technology, Vol. 4, No. 6, pp. 303-310, 2010.
- [28] کمرزین، مهرنوش، طراحی کنترل‌کننده‌ی تطبیقی زاویه پره توربین باد، پایان‌نامه برای درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، صفحه ۵۳-۶۸، ۱۳۹۴.
- [29] رحیمی، محسن، «تحلیل دینامیک مبدل سمت شبکه و طراحی کنترل‌کننده خازن لینک DC در توربین-ژنراتورهای بادی با ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG)» نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، سال ششم، شماره ۱، صفحه ۱۶-۲۷، بهار ۱۳۹۵.
- [30] Mehra, R. K., "On The Identification of Variance and Adaptive Kalman Filtering," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 15, No. 2, pp.175-184, 1970.
- [31] Chaer W. S., Bishop R. H., Ghosh, J., "A Mixture-of-Experts Framework for Adaptive Kalman Filtering," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics, Vol. 27, No. 3, pp. 452-464, 1997.
- [32] Raison, B., Rostaing, G., Rognon, J. P., "Towards a Global Monitoring Scheme for Induction Motor Drives," in Proc. Int. Power Electron. Conf., pp. 1183-1188, 2000.
- [33] Masrur, M. A., Chen, Z., Zhang, B., Murphey, Y. L., "Model-Based Fault Diagnosis in Electric Drive Inverters Using Artificial Neural Network," in Proc. IEEE Gen. Meeting Power Eng. Soc., pp. 1-7, 2007.
- [34] Kral, C., Kafka, K., "Power Electronics Monitoring for a Controlled Voltage Source Inverter Drive with Induction Machines," in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., pp. 213-217, 2000.
- [35] Mamat, M. R., Rizon, M., Khanniche, M. S., "Fault Detection of 3-Phase VSI Using Wavelet-Fuzzy Algorithm," American Journal of Applied Sciences, Vol. 3, No. 1, pp. 1642-1648, 2006.
- [36] Jlassi, I., Estima O., Khil S. Kh., Bellaaj, N, M., Antonio Cardoso J. M., "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.
- [37] Zhao, H., Cheng, L., "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.
- [38] Zhao, H., Cheng, L., "Open Switch Fault Diagnostic Method for Back to Back Converters of Doubly Fed Wind Power Generation System," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 4, pp. 3452 - 3461, 2017.
- [39] Feire, N. M. A., Estima, J. O., Cardoso A. J. M., "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 9, pp. 3957 - 3967, 2012.