

ارائه یک روش جدید به منظور مکان‌یابی سوئیچ معیوب مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر DFIG با کاربرد

کنترل تحمل‌پذیر خطای توربین بادی

مهرنوش کمزربین^۱، محمد حسین رفان^۲، و پرویز امیری^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، refan@sru.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

چکیده

یکی از رایج‌ترین توربین‌های بادی، نوع DFIG با مبدل پشت به پشت 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. در این مقاله یک روش جدید برای تشخیص و مکان‌یابی عیب مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین بادی ارائه شده است. روش پیشنهادی ارزان قیمت بوده و برای آشکارسازی تعیین مکان عیب به سنسور و سخت‌افزار اضافه نیاز ندارد. برای آشکارسازی فاز معیوب و برای مقابله با پدیده چاترینگ مبدل‌های DFIG، از تولید مانده مبتنی بر مشاهده گر مقاومت مود لغزشی با تابع SAT استفاده می‌شود. مشاهده گر بر اساس استخراج ماتریس حالت جریان ۶‌های سه فاز DFIG سمت شبکه و روتور عمل می‌کند. برای ارزیابی مانده و کاهش نرخ آلازم اشتباه در مقابل تغییرات نقاط کار و جریان‌های گذرا از آستانه تطبیقی مبتنی بر روش فازی استفاده می‌شود. برای ارزیابی ساختار پیشنهادی از یک تست‌بنچ سخت‌افزاری ۹۰ کیلووات توربین بادی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها موثر بودن و مقاومت روش پیشنهادی را در تشخیص عیب‌های چندگانه همزمان و غیر همزمان در شاخه‌های متفاوت سمت شبکه و روتور نشان دادند. روش ارائه شده در مقایسه با سایر روش‌ها سریع‌تر و پیاده‌سازی آن آسان‌تر است.

واژه‌های کلیدی

عیب مدار باز، IGBT مبدل پشت به پشت، DFIG، تشخیص و مکان‌یابی خطا.

مقدمه

های توربین‌های بادی در [۲] نشان می‌دهد که حدود ۳۸٪ از خرابی‌های این سیستم مربوط به خرابی ترانزیستورهای دوقطبی با گیت عایق شده^۱ می‌باشد. این عیوب اغلب به واسطه استرس‌های مکانیکی، خطا در مدار کنترل گیت، استرس حرارتی، قطع سیم و مشکلات جریانی است [۳]. دو عیب در بخش مبدل توربین بادی مطرح است: خطای اتصال باز و اتصال کوتاه سوئیچ. عیب اتصال کوتاه توسط سامانه حفاظت توربین بادی کنترل می‌شود و توربین بادی خاموش می‌گردد. اما عیب اتصال باز IGBT مبدل توربین بادی باعث از کار افتادن توربین بادی نمی‌شود، بلکه در شرایط عملکردی توربین باد از جمله کیفیت توان، بر هم زدن تعادل و بالانس بین فازها تاثیرگذار است [۴]. به منظور اقدام جبرانی مناسب در مقابل وقوع خطای مدار باز سوئیچ، تشخیص سریع این عیب و رفع آن در کاربردهای مختلف درایو مطرح شده است. با مرور روش‌های ارائه شده جهت تشخیص و مکان‌یابی خطا، در مقاله [۵] پیشنهاد شده است که برای مکان‌یابی خطا مبدل پشت به پشت ژنراتور DFIG از آنالیز ساختاری استفاده شود.

موضوع قابلیت اطمینان و در دسترس بودن یکی از مسائل مهم در صنعت توربین‌های بادی است که در آن توقف‌های پیش-بینی نشده ممکن است ضررهای اقتصادی بزرگی را به همراه داشته باشد. در مزارع بادی به سبب تنظیم توان راکتیو، بهبود کیفیت توان و سایر خصوصیات، تعداد زیادی از توربین‌های بادی دارای مبدل دو سوپه هستند که پشت به پشت عمل می‌کنند؛ امروزه توربین‌های بادی اغلب مبتنی بر ژنراتورهای DFIG و PMSG هستند. هر دو دسته‌ی این ژنراتورها برای اتصال به شبکه از مبدل استفاده می‌کنند. با این تفاوت که ژنراتورهای PMSG از یک مبدل به صورت کامل و برابر با توان کل ژنراتور استفاده می‌کنند، اما توربین‌های DFIG از مبدل‌هایی با حدود ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور استفاده می‌کنند [۱]. در هر دوی این توربین‌ها از ۱۲ سوئیچ استفاده می‌شود؛ شش سوئیچ برای مبدل سمت شبکه و شش سوئیچ برای مبدل سمت روتور از نوع (DFIG) و مبدل سمت ژنراتور از نوع (PMSG). نرخ عیوب در سوئیچ‌های نیمه هادی مبدل توان در توربین بادی زیاد است. بررسی انجام شده بر روی خرابی-

^۱ Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)

سه فاز جریان هستند. روش جدیدی مبتنی بر اثر کلی تجزیه حالت تجربی و توابع حالت ذاتی در [۱۹] به منظور تشخیص خطای مدار باز مبدل در توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG ارائه شده است. در [۲۰]، یک روش بر اساس مشاهده‌گر برای آشکارسازی و میانگین جریان برای مکان‌یابی عیب مدار باز سوئیچ مطرح شده است. برای مبدل پشت به پشت DFIG، روش‌هایی برای عیب سوئیچ مطرح شده است، که این روش‌ها بر اساس بازیابی ساختار هستند [۲۱]. در [۲۲] یک روش بر اساس بردار پارک نرمالیزه قدر مطلق جریان ارائه شده است و تشخیص را در ناحیه سنکرون تضمین می‌کند. در [۲۳]، 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 تشخیص و جداسازی خطای حوزه زمان و فرکانس برای مبدل‌های الکترونیک قدرت توربین‌های بادی با ژنراتور DFIG، با تمرکز بر خطاهای مدار باز سوئیچ IGBT، در [۲۴] ارائه شده است. به منظور کاهش هشدار اشتباه، رویکرد پیشنهادی نشانگرهای خطا را بر اساس تجزیه و تحلیل دامنه زمان و فرکانس سیگنال‌های الکتریکی و همچنین آنالیز دامنه فرکانس سیگنال‌های ارتعاش ترکیبی می‌کند. اثربخشی روش از طریق داده‌های تست ثبت شده در شرایط مختلف عملکرد سالم و معیوب نشان داده شده است. در [۲۵]، یک روش بر اساس شبکه عصبی ارائه شده است که مشکل عمده آن زمان آموزش زیاد است. در [۲۶]، روش جریان DC نرمالیزه شده مطلق، گسترش و بهبود داده شده است. مقاله [۲۷-۲۸] نیز تشخیص عیب مدار باز سوئیچ بر اساس FPGA است. در این روش، از یک روش برای یکسوساز مدولاسیون عرض پالس بر اساس تولید مانده مبتنی بر مدل مشاهده‌گر و عامل فاکتور شکل جریان^۴ با یک آستانه تطبیقی استفاده شده است. در مقاله [۲۹] از اتصال فاز a سمت PMSG، با یک تریاک به نقطه N ترانس به FTC عیب مدار باز مبدل سمت شبکه پرداخته شده است. در این مقاله یک مبدل کنترل‌پذیر خطای کم هزینه، با قابلیت کنترل توان در خطاهای مدار باز IGBT پیشنهاد شده است. توپولوژی پیشنهادی این مقاله علاوه بر استفاده از مبدل پنج ساق، استفاده از نقطه خنثی ترانسفورماتور و سه سوئیچ یکسوساز سه فاز است. در استراتژی کنترلی پیشنهادی این مقاله، به منظور رسیدن به ریبیل گشتاور کم و فرکانس سوئیچینگ ثابت، از کنترل گشتاور مستقیم با SVM استفاده می‌شود.

ساختار مبدل مورد بررسی در این مقاله یک مبدل دو سوپه برای ژنراتور DFIG است. در این مقاله از یک روش جدید

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^۲ هستند [۶]. در [۷] یک روش مبتنی بر FPGA و سریع برای تشخیص 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 آلارم اشتباه مشهود خواهد شد، که در مراجع [۸-۹] این مشکل با استفاده از اندازه‌گیری جریان DC نرمالیزه شده مطلق، حل شده است. در مقاله [۱۰] یک روش بر اساس بردار پارک نرمالیزه قدر مطلق جریان، ارائه شده است و تشخیص را در ناحیه سنکرون تضمین می‌کند. در مرجع [۱۱] 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 در [۱۲] ارائه شده است که مشکل زمان آموزش بالا و پیچیدگی محاسباتی دارد. در مقاله [۹] روشی بر اساس جریان DC نرمالیزه شده مطلق، اعمال شده است و در مرجع [۱۳] این روش گسترش و بهبود داده شده است. مقاله [۱۴] بر اساس FPGA و برای کنترل تحمل‌پذیر خطا با افزودن دو سوئیچ است. مساله اصلی در این روش استفاده از تجهیز اضافه است که هزینه‌ی پیاده‌سازی را بالا می‌برد. هرچند که قابلیت اطمینان و کیفیت سیگنال در این روش مطلوب است. روش‌های مبتنی بر FPGA در [۱۶-۱۴] نیز ارائه شده است. در [۱۷] روش تشخیص و جداسازی خطا 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 ثابت نرخ هشدار اشتباه^۳ 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 [۱۸] به بررسی روش تشخیص خطا مبتنی بر شبکه‌ی حافظه کوتاه مدت طولانی 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 بالا و حداقل تاخیر تشخیص می‌دهد. سیگنال‌های مورد استفاده در این روش به فاز ولتاژ و

^۲Structural Recovery^۳False Alarm Rate (FAR)^۴Current Form Factor (CFF)

سمت روتور، که به سیم پیچ روتور ژنراتور متصل است (مشابه ساختار شکل (۱-الف))، هر مبدل مشابه ساختار معمول اینورتر منبع ولتاژ^۵ است که از شش سوئیچ IGBT تشکیل شده است. ساختار کلی تشخیص عیب مدار باز سوئیچ IGBT بر اساس اندازه گیری جریان های سه فاز استاتور و روتور است. این اطلاعات در سامانه کنترل سمت روتور و شبکه موجود است و نیاز به افزودن حسگر اضافه و سخت افزار داده برداری ندارد. علاوه بر این اطلاعات جریانی، توان کل و سرعت چرخشی مکانیکی ژنراتور نیز در ساختار کلی در طراحی مشاهده گر و آستانه تطبیقی استفاده می شوند. شکل (۱-ب) از سه طبقه تشکیل شده است. طبقه اول شامل توربین بادی و واحد اندازه گیری سیگنال های مورد نیاز است. طبقه دوم بخش آشکارسازی عیب است و شامل واحدهای مشاهده گر، تولید مانده و ارزیابی مانده بر اساس آستانه تطبیقی است. طبقه سوم بخش مکان یابی عیب است و شامل واحد بردار پارک و واحد میانگین گیری است. بنابراین ساختار پیشنهادی مشاهده گر بر اساس ۸ سیگنال مورد استفاده در واحدهای کنترلی مبدل مشابه شکل (۱-ج) توسعه داده شده است.

آشکارسازی عیب بر اساس مدل مشاهده گر

اختلاف بین خروجی اصلی و خروجی تخمین زده شده با مشاهده گر، مانده است. یک مشاهده گر مقاوم مبتنی بر SMO برای تخمین جریان های سه فاز استاتور و روتور در این بخش مورد هدف است. مشاهده گر با استفاده از ماتریس حالت سامانه، تشکیل شده با اطلاعات و پارامترهای موجود در سامانه کنترل طراحی می شود. مانده حاصل از اختلاف خروجی ها، بر اساس همجوشی در سطح ویژگی تولید می شوند. پس از تولید مانده، ارزیابی مانده بر اساس آستانه تطبیقی انجام می شود و پرچم وجود عیب یا عدم وجود عیب نمایش داده می شود.

مدل حالت DFIG

مدل ماتریس حالت واقعی DFIG در این بخش توسعه داده شده است. مدل دینامیکی DFIG بر اساس قالب dq استخراج می شود. معادلات حالت از روابط ولتاژ استاتور و روتور حاصل می شود. روابط معادلات حالت با چند فرض استخراج می شود: (۱) سیم پیچ استاتور و روتور متقارن هستند و متقارن تغذیه می شوند. (۲) مقاومت سیم پیچ ثابت است. (۳) اشباع سلف و تلفات هسته آهن ناچیز است. مدل عمومی فضای حالت در رابطه (۱) آمده است:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

تشخیص عیب جدید بر اساس مشاهده گر مود لغزشی استفاده شده است. در این روش جریان های مبدل سمت شبکه و سمت روتور بر اساس مشاهده گر مدل سازی می شود؛ در این مقاله از یک آستانه تطبیقی مبتنی بر پارامترهای عملکردی توربین بادی (سرعت ژنراتور و توان) استفاده شده است که ضعف هشدار اشتباه در آن برطرف شده است. آشکارسازی عیب در روش پیشنهادی بر اساس یک مدل مشاهده گر است که بر مشکل ضعف مدل های مشاهده گر قبلی در هنگام وقوع پدیده چاترینگ در کاربرد توربین بادی غلبه کرده است. در این مشاهده گر برای مقابله با پدید چاترینگ در سوئیچ ها از تابع SAT به جای Sign استفاده شده است. بر اساس اختلاف CFF مقادیر جریان اندازه گیری شده و جریان خروجی مشاهده گر مانده محاسبه می شود و نهایتاً برای آشکارسازی خطای یک شاخه، آستانه تطبیقی روی مانده اعمال می گردد؛ مهم ترین و اصلی ترین نوآوری های مقاله:

- ✓ ارائه یک روش تشخیص عیب مقاوم و جدید بر اساس مشاهده گر مود لغزشی با تابع SAT و آستانه تطبیقی
- ✓ استفاده ترکیبی از روش های سیگنال-پایه و مدل-پایه، برای تشخیص وجود یا عدم وجود عیب در یک فاز بر اساس تولید مانده (مدل-پایه)
- ✓ ارائه یک ساختار کم هزینه و با کمترین سخت افزار اضافه برای تشخیص و مکان یابی خطای مدار باز سوئیچ IGBT
- ✓ استفاده از آستانه تطبیقی مبتنی بر پارامترهای عملکردی توربین بادی (سرعت ژنراتور و توان) به منظور رفع تشخیص هشدار اشتباه
- ✓ پیاده سازی سخت افزاری روش پیشنهادی بر روی تست بنچ ۹۰ کیلو وات

ساختار مقاله به این شکل است؛ در بخش دوم مقاله ساختار پیشنهادی تشخیص عیب و ارزیابی مانده بر اساس آستانه تطبیقی مبتنی بر روش فازی ارائه می شود. بخش سوم به شبیه سازی و بحث و بررسی در خصوص نتایج بدست آمده پرداخته شده است. در بخش چهارم تست بنچ سخت افزاری ۹۰ کیلووات مبتنی بر ساختار DFIG تشریح گردیده است. بخش پنجم آزمایش ها و نتایج مستخرج از آن آورده شده است و در نهایت بخش ششم نتیجه گیری است.

ساختار پیشنهادی تشخیص عیب

ساختار مبدل پشت به پشت ژنراتور توربین بادی از دو مبدل تشکیل شده است. یکی در سمت شبکه که به سیم پیچ استاتور ژنراتور وصل شده است و سمت شبکه قرار دارد و مبدل دوم

^۵ Voltage Source Inverter (VSI)

$$u = [U_{sd} \ U_{sq} \ U_{rd} \ U_{rq}]^T \quad (2)$$

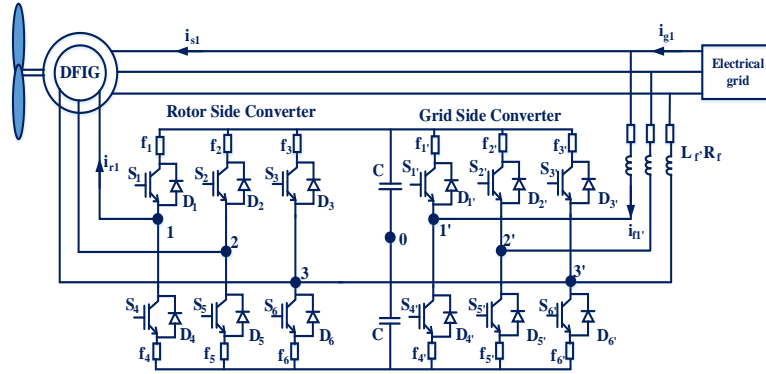
جریان‌های استاتور و روتور در رابطه (۳) آمده است.

$$x = [I_{sd} \ I_{sq} \ I_{rd} \ I_{rq}]^T \quad (3)$$

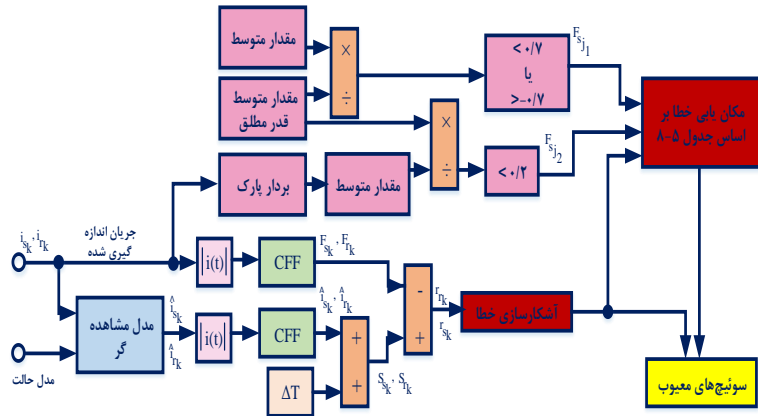
که A ماتریس سامانه DFIG با رتبه 4×4 است و B ماتریس

ورودی با رتبه 4×4 است. ولتاژهای استاتور و روتور به صورت

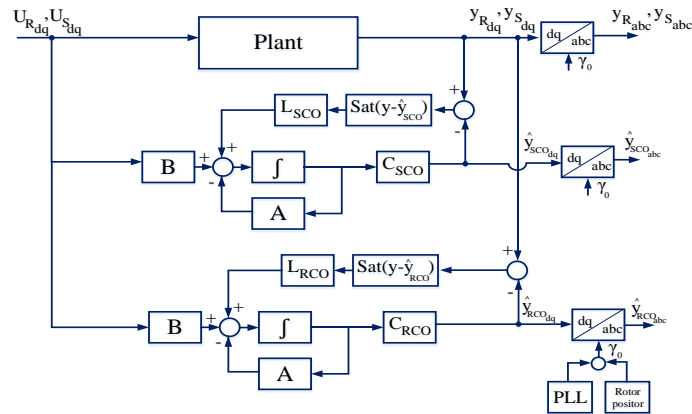
رابطه (۲) با برداری u نشان داده شده است.



الف



ب



ج

شکل ۱. ساختار کلی پیشنهادی برای تشخیص عیب مدار باز سونچ‌های مبدل پشت به پشت مبتنی بر SMO و آستانه تطبیقی، الف- ساختار مبدل پشت به پشت

با نمایش سونچ‌ها، ب- ساختار کلی تشخیص عیب مبدل، ج- ساختار مشاهده‌گر SMO

باید به ماتریس خطی تبدیل شود. ماتریس‌های تولید شده

نسبت به جریان، به عنوان حالت‌ها و سرعت چرخشی، خطی

هستند. با توجه به خطی‌سازی ماتریس A رابطه (۱) به رابطه

(۲) تبدیل می‌شود:

$$\begin{aligned} A &= A_0 + A_1 p \omega_m \\ \dot{x} &= A_0 x + A_1 p \omega_m x + Bu \end{aligned} \quad (5)$$

خروجی‌ها در y ترکیب می‌شوند و C ماتریس خروجی است.

$$y = Cx \quad (4)$$

ماشین‌های القایی همانند DFIG از یک خاصیت غیرخطی به

دلیل وابستگی به سرعت چرخشی ماشین برخوردارند. این

موجب می‌شود ماتریس A از رابطه (۱) به سرعت چرخشی

وابسته باشد. برای طراحی یک مشاهده‌گر، ماتریس غیرخطی

شود. مشاهده گر از دو بخش پیشرو فیدبک تشکیل شده است. بخش پیشرو مشاهده گر، مدل سامانه است. برای یک مشاهده گر غیر ایده آل به واسطه نایقینی پارامتر، دینامیک مدل نشده سامانه و اغتشاش بین خروجی مدل و سامانه اختلاف وجود دارد. از این اختلاف برای تصحیح مشاهده گر استفاده می شود. بهره فیدبک به گونه ای انتخاب می شود که این اختلاف را به سمت صفر هدایت کند. مطابق با شکل (۱) سامانه قابل مشاهده است اگر جریان های استاتور و روتور اندازه گیری شود. برای طراحی مشاهده گر مبتنی بر SMO، برای مشاهده گر جریان استاتور^۷ و مشاهده گر جریان روتور^۸ سامانه باید به فرم کانونیکال^۹ تبدیل شود. رابطه مشاهده گر به صورت (۸) در نظر گرفته می شود:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{S,R} &= A_0 \hat{x} + A_1 p \omega_m \hat{x} + Bu + \\ P_{S,R}^{-1} &\begin{bmatrix} (\Gamma_{S,R}^1(e_{y-S,R}))_{2 \times 1} \\ (P_1^{-1} \Gamma_{S,R}^2(e_{y-S,R}))_{2 \times 1} \end{bmatrix} \hat{y}_{S,R} = C_{G,R} \hat{x}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

مطابق با سامانه DFIG رتبه ماتریس های A و B، n = 4 است، جایی که $\hat{y}_{S,R}$ نشان دهنده ی جریان های خروجی مشاهده گر است، \hat{y}_G برابر با $\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix}$ و \hat{y}_R برابر با $\begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$ است. $P_{S,R}^{-1}$ یک ماتریس برای انتقال در فرم کانونیکال است و برابر با $\begin{bmatrix} C_{S,R} \\ R_{1,S,R} \end{bmatrix}$ است. ماتریس C مرتبط به مشاهده گر و در طراحی دو مشاهده گر SCO و RCO نقش موثری دارد. اگر همه حسگرها برای فیدبک سامانه استفاده می شود، ماتریس C مربوط به سامانه، یک ماتریس واحد و معکوس پذیر رتبه کامل^{۱۰} است و دینامیک مشاهده گر وابستگی به سرعت نخواهد داشت. جایی که $R_{1G,R}$ یک ماتریس دلخواه است، به گونه ای که P یک ماتریس غیر منفرد^{۱۱} است و $R_1 \in R^{(n-m) \times m}$

مدل فضای حالت DFIG بر اساس مشاهده جریان استاتور، جریان روتور و ولتاژ استاتور به صورت (۶) است. که p تعداد جفت قطب است. ω_m ، فرکانس مکانیکی روتور و ω_A ، فرکانس چرخشی قاب مرجع است. C یک ماتریس واحد است. مقاومت روتور و استاتور به ترتیب با R_R و R_S نشان داده می شود. از طرفی اندوکتانس روتور و استاتور به صورت L_R و L_S نوشته می شود. M، القای متقابل^۶ است و σ از رابطه زیر حاصل می شود:

$$\sigma = 1 - M^2 L_S^{-1} L_R^{-1} \quad (7)$$

با تعریف انجام شده در رابطه (۷) و در نظر گرفتن ω_A به راحتی می توان سامانه را از حالت استاتور ثابت شده به قاب مرجع سنکرون یا هر قاب دیگر تبدیل کرد. در حالتی که استاتور ثابت است، $\omega_A = 0$ ، در حالی که در سامانه جهت دار، فرکانس زاویه ای به صورت $\omega_A = \omega_S = 2\pi 50 S^{-1}$ است.

طراحی SMO برای جریان های استاتور و روتور

آشکارسازی عیب در این روش بر اساس ارزیابی مانده تولید شده حاصل از اختلاف جریان مدل شده و جریان اندازه گیری شده است. مشاهده گر مطابق با شکل (۱-ج) بر اساس SMO طراحی شده است. هدف مشاهده گر تخمین جریان های سمت استاتور و سمت روتور است. بهره ی فیدبک کنترلی در طراحی یک مشاهده گر تضمینی برای کمینه سازی عیب بین حالت تخمینی مشاهده گر و مدل سامانه است. موازنه بین پایداری و سرعت مشاهده گر بسیار مهم است. استفاده از بهره فیدبک کنترلی متغیر، از طریق یک تابع کنترل سوئیچینگ سرعت بالا همانند Sgn ممکن می شود. چنین تابعی، مسیر سامانه را مجبور به حضور در یک سطح لغزشی می کند. به چنین مودی، مود لغزشی گفته می شود. این مشاهده گر، با افزایش ضریب بهره، دارای سرعت بالا و همگرایی بهتری نسبت به مشاهده گر لوتنبرگر است [۳۰]. از فواید SMO، مقاوم بودن در برابر اغتشاش و تغییرات پارامتری، پاسخ مناسب در وجود اندازه گیری غیر دقیق و شرایط گذرا است [۳۱-۳۲]. هر چند SMO خاصیت مقاوم بودن دارد اما نوع کلاسیک آن مشکلاتی دارد که استفاده از آن را در محیط واقعی دشوار کرده است. از جمله این مشکلات پدیده چاترینگ است. این پدیده در حالتی که دینامیک سامانه سریع است، برای حسگرها، عملگرها و پردازشگر اطلاعات، درایو و مبدل در محیط های واقعی اتفاق می افتد و توسط فرکانس های بالای سوئیچینگ تحریک می شود. برای مقابله با این پدیده در طراحی مشاهده گر، استفاده از تابع Sat به جای تابع Sgn پیشنهاد شده است [۳۰]. مشکل چاترینگ با استفاده از تابع نرم به جای کنترل on/off حل می -

Stator Current Observer (SCO) ۷

Rotor Current Observer (RCO) ۸

Canonical ۹

Full Rank ۱۰

Non-Singular ۱۱

Mutual Inductance-۶

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & p\omega_A & \frac{MR_R}{\sigma L_s L_R} & 0 \\ -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ -p\omega_A & \frac{MR_R}{\sigma L_s L_R} & 0 & 0 \\ \frac{MR_R}{\sigma L_s L_R} & 0 & -\frac{R_R}{\sigma L_R} & p\omega_A \\ 0 & \frac{MR_s}{\sigma L_R L_s} & -p\omega_A & -\frac{R_R}{\sigma L_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{M^2}{\sigma L_s L_R} & 0 & \frac{M}{\sigma L_s} \\ -\frac{M^2}{\sigma L_s L_R} & 0 & \frac{M}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{1}{\sigma} \\ \frac{M}{\sigma L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma} & 0 \end{bmatrix} p\omega_m \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_R L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_R L_s} \\ -\frac{M}{\sigma L_R L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_R} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_R L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \\ U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ولتاژهای استاتور و روتور به عنوان ورودی احتیاج دارند. با توجه به غیر واحد بودن دو ماتریس طراحی شده، هر دو مشاهده گر به سرعت وابسته خواهند بود. وابستگی مشاهده‌گر به سرعت در کاربرد توربین بادی با سرعت متغیر یک حسن است.

تولید مانده

جریان‌های سه فاز سمت روتور و سمت شبکه برای هدف تشخیص عیب جمع‌آوری می‌شود. برای تولید مانده از ویژگی CFF [33] استفاده شده است. برای هر فاز این فاکتور محاسبه می‌شود و البته از خروجی مشاهده‌گر نیز این فاکتور محاسبه می‌شود. مقدار این خروجی در حالت نرمال ۱/۱۱۱ است و البته تفاوت آن دو خروجی، مقدار مانده است. بر اساس وضع یک آستانه روی این مانده عیب مدار باز سوئیچ برای هر شاخه مشخص می‌شود. آنگاه برای تعیین سوئیچ معیوب دو گزینه باقی می‌ماند، سوئیچ بالا یا پایین در شاخه‌ای معلوم.

ارزیابی مانده بر اساس آستانه تطبیقی

معمولاً در تشخیص عیب سوئیچ مدار باز از آستانه ثابت استفاده می‌شود. این روش برای حالتی که ماشین دور ثابت باشد، همانند اکثر موتورها که دارای درایو می‌باشند، خالی از اشکال است. اما اگر ماشین سرعت متغیر باشد، همانند توربین-های PMSG و DFIG، استفاده از آستانه ثابت کارایی ندارد. در مقالاتی که از آستانه تطبیقی استفاده شده است معمولاً یک مقدار جمع‌شونده به آستانه ثابت مانده حاصل از دو سمت مبدل (برای PMSG و DFIG) اضافه می‌شود. هر چند این مقادیر در مقالات به خوبی عمل کرده‌اند، اما در این رساله از یک روش تطبیقی مبتنی بر فازی استفاده می‌شود که در آن مقدار جمع‌شونده در نواحی مختلف عملکردی متفاوت است. آستانه ثابت در این بخش مقدار ۱/۱ دارد و مقدار جمع‌شونده به صورت ΔT مطابق با جدول (۱) افزوده می‌شود. اختصاص آستانه به نواحی مربوط به سرعت ژنراتور و توان بر اساس شکل (۲-الف) و (۲-ب) است.

جدول ۱. جدول راهنما برای تعیین قوانین فازی به منظور تعیین آستانه تطبیقی

		توان					
		SS	S	M	L	LL	
سرعت ژنراتور	SS	S	N	N	N	N	ΔT
	S	N	M	N	N	N	
	M	N	N	LL	LL	N	
	L	N	N	N	SS	SS	
	LL	N	N	N	L	L	

A: S = +0.0, B: M = +0.2, C: LL = +0.3, D: SS = -0.1, E: L = 0.1

ماتریس R_1 متناسب با ماتریس C، برای دو سمت شبکه و روتور طراحی می‌شود، P_1^{-1} یک ماتریس غیر منفرد و معکوس-ناپذیر است، $P_1 = \begin{bmatrix} D_1 A_{12} \\ R_2 \end{bmatrix}$ ، جایی که $A_{12} \in R^{(n-m) \times (n-m)}$ ماتریس دلخواه است، $R_2 \in R^{(n-m) \times (n-m)}$ و PAP^{-1} و $A_{12} \in R^{(m) \times (n-m)}$ و $m_1 \leq m, m_1 \leq (n-m)$ ماتریس دلخواه $D_1 \in R^{m_1 \times m}$ به گونه‌ای انتخاب می‌شود که رتبه ماتریس $\{D_1 A_{12}\}$ برابر با m_1 باشد، در این تعریف داریم:

$$\begin{aligned} \Gamma_{G,R}^1(e_y) &= L_1 \text{Sat}(e_{y-G,R}) \\ \Gamma_{G,R}^2(e_{y-G,R}) &= L_2 \text{Sat}(D_1 Z_1) \end{aligned} \quad (9)$$

جایی که $L_2 \in R^{m_1 \times m_1}$ و $L_1 \in R^{m \times m}$ ، $e_{y-G,R} = y - C_{G,R} \hat{x}$ ماتریس بهره فیدبک هستند که به منظور پایداری مشاهده‌گر بر اساس تجربه و آزمایش‌ها تنظیم می‌شوند، تابع Sat صورت (۱۰) تعریف می‌شود:

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 1 \\ x & -1 < x < 1 \\ -1 & x \leq -1 \end{cases} \quad (10)$$

Z_1 از حل رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$Z_1 = L_{1-G,R} \text{Sat}(e_{y-G,R}) + \beta e^{-e_y/\mu} \quad (11)$$

که در آن β یک عدد ثابت است و μ ثابت زمانی فیلتر کنترل^{۱۲} است. در این روش دو مشاهده‌گر برای هر سمت (شبکه و روتور) طراحی می‌شود، ماتریس C مرتبط به این دو مشاهده‌گر به ترتیب مطابق رابطه (۱۲) و (۱۳) است. ماتریس خروجی هر مشاهده‌گر غیر واحد است و معکوس پذیر نیست.

$$C_{SCO} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C_{RCO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

این ماتریس مشخص‌کننده حسگرهای فیدبک برای هر ماتریس است. رتبه ماتریس برابر با m است. برای آشکارسازی عیب سوئیچ مدار باز سمت شبکه و سمت روتور به دو مشاهده‌گر برای هر سمت احتیاج است. برای طراحی SMO-SCO از جریان سمت روتور، برای فیدبک بهره مشاهده‌گر استفاده می‌شود. این مشاهده‌گر به عیب‌های سوئیچ سمت شبکه حساس است. برای طراحی SMO-RCO از جریان سمت شبکه، برای فیدبک بهره مشاهده‌گر استفاده می‌شود. این مشاهده‌گر به عیب‌های سوئیچ سمت روتور حساس است. هر دو مشاهده‌گرها به

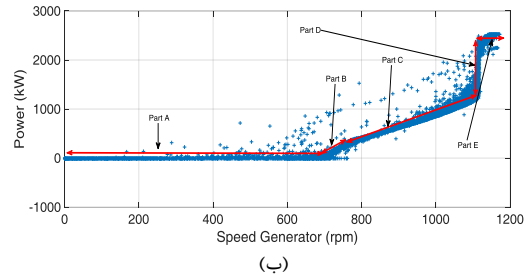
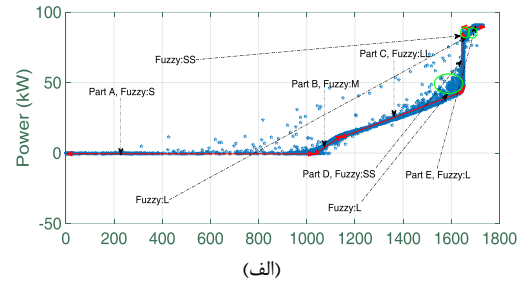
^{۱۲} Equivalent Control Filter Time Constants (ECFTC)

یک سوئیچ معیوب شود آنگاه مقدار میانگین با مقدار قدر مطلق برابر می‌شود و نسبت دارای مقدار ۱ یا -۱ خواهد بود. بنابراین با تعیین یک آستانه مشخص T سوئیچ معیوب براحتی قابل تشخیص است، در این حالت $F_{Sj1} > 0.7$ یا $F_{Sj1} < -0.7$ خواهد بود. اگر عیوب مربوط به سوئیچ‌های دو میدل متفاوت باشد، می‌توان بر اساس قوانین یک میدل، میدل دیگر را مورد بررسی قرار داد. اگر دو سوئیچ مدار باز شود، آنگاه سه حالت عیب امکان رخ دادن وجود دارد. حالت اول مدار باز شدن دو سوئیچ در دو سمت میدل، در این حالت تشخیص عیب بر اساس حالت قبل انجام می‌شود. اگر دو سوئیچ یک سمت باشد، یا آن دو سوئیچ در یک شاخه هستند یا اینکه در دو شاخه متفاوت هستند. اگر یک سوئیچ از شاخه ۱ و سوئیچ دیگر از شاخه ۲ مدار باز شود، آنگاه نمودار جریان شاخه سوم نیز نیم سیکل خواهد شد (به سبب توازن بین فازها). به عنوان مثال اگر سوئیچ S1 از شاخه ۱ و سوئیچ S3 از شاخه ۲ مدار باز شود، آنگاه سوئیچ S3 نمی‌تواند نیم سیکل منفی را عبور دهد، بنابراین برای فاز ۱ و ۲ دارای مقدار -۱ است و برای فاز سوم دارای مقدار مثبت ۱ است. اما اگر دو سوئیچ در یک فاز معیوب شود، مقدار F_{Sj1} که نسبت میانگین جریان به قدر مطلق میانگین جریان است، برابر با صفر (مشابه حالت سالم) خواهد بود و این موضوع باعث عدم تفکیک این حالت با حالت سالم خواهد بود. اما مقدار قدر مطلق میانگین می‌تواند تعیین کننده باشد، چون در حالت سالم این مقدار بزرگ‌تر از صفر است و تنها در حالتی که هر دو سوئیچ معیوب باشد این مقدار برابر با صفر خواهد بود، اما برای غلبه بر مشکلات بار، سرعت و تغییرات پارامترها از بردار پارک جریان استفاده می‌شود. بنابراین مقدار F_{Sj2} نسبت مقدار قدر مطلق میانگین جریان به مقدار بردار پارک است. اگر این F_{Sj2} نسبت به یک حد آستانه سنجش شود، یک متغیر برای تعیین مکان عیب خواهد بود. بر اساس آنالیزها و در سنجش وضعیت‌های مختلف مقدار آستانه 0.7 تعیین می‌شود. بنابراین منطق، تعیین مکان عیب بر اساس رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) تشریح می‌شود.

$$\text{Fault localization 1: } F_{Sj1} = \begin{cases} -1 & \alpha = \frac{i_{jav}}{i_{jv}} \geq 0.7 \\ 0 & -0.7 < \alpha = \frac{i_{jav}}{i_{jv}} < 0.7 \\ 1 & \alpha = \frac{i_{jav}}{i_{jv}} \leq -0.7 \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Fault localization 2: } F_{Sj2} = \begin{cases} 1 & \beta = \frac{i_{jv}}{I_{av}} \leq 0.2 \\ 0 & \beta = \frac{i_{jv}}{I_{av}} > 0.2 \end{cases} \quad (15)$$

بر اساس روابط بالا جدول (۲) برای مکان‌یابی سوئیچ به دست می‌آید که برای بخش سمت روتور میدل و سمت شبکه میدل کاربرد دارد.



شکل ۲. نمودار توان-سرعت ژنراتور برای تعیین سطوح آستانه بر اساس فازی، (الف) شبیه‌ساز سخت‌افزاری (ب) توربین باد

این آستانه روی قابلیت اطمینان و مقاوم بودن روش پیشنهادی اثرگذار است. با آستانه ثابت، FAR و نرخ از دست دادن اشتباه^{۱۳} بالا می‌رود. برای مقابله با آن، روش‌های تشخیص عیب باید در مقابل تغییرات سرعت و جریان گذار مقاوم باشند. در حالت سالم اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده از مقدار مشاهده‌گر ناچیز است، اما وقتی یک سوئیچ معیوب می‌شود، این اختلاف بزرگتر می‌شود به گونه‌ای که از حد آستانه بالاتر می‌رود. مقادیر آستانه افزوده به گونه‌ای است که همه تغییرات دینامیکی ناشی از پیچ، جریان گذرا و تغییرات سرعت در آن دیده شده است.

تشخیص مکان سوئیچ معیوب

هر چند روش‌های قبلی بر اساس مقدار میانگین جریان برای تعیین مکان سوئیچ معیوب کاراست، اما به منظور افزایش قابلیت اطمینان و جلوگیری از تعیین اشتباه مکان سوئیچ معیوب از همجوشی تصمیم سه ویژگی استفاده می‌شود. در کادر قرمز رنگ شکل (۱-ب) بلوک دیاگرام آن نشان داده شده است. از سه ویژگی مقدار میانگین جریان، مقدار میانگین قدر مطلق جریان و بردار پارک جریان استفاده می‌شود. از متغیر شناسایی F_{Sj1} برای مکان‌یابی سوئیچ معیوب استفاده می‌شود، F_{Sj1} یک متغیر برای مکان‌یابی عیب سوئیچ معیوب بر اساس نسبت مقدار میانگین جریان به مقدار میانگین قدر مطلق جریان است. z نشان‌دهنده فاز a، b و c است. در شرایط نرمال، مقدار میانگین هر فاز جریان صفر است و حتما مقدار قدر مطلق آن بیش از صفر است، اما در هر حال F_{Sj1} صفر خواهد بود که به معنی عدم وجود عیب است (رابطه (۱۴)). اگر

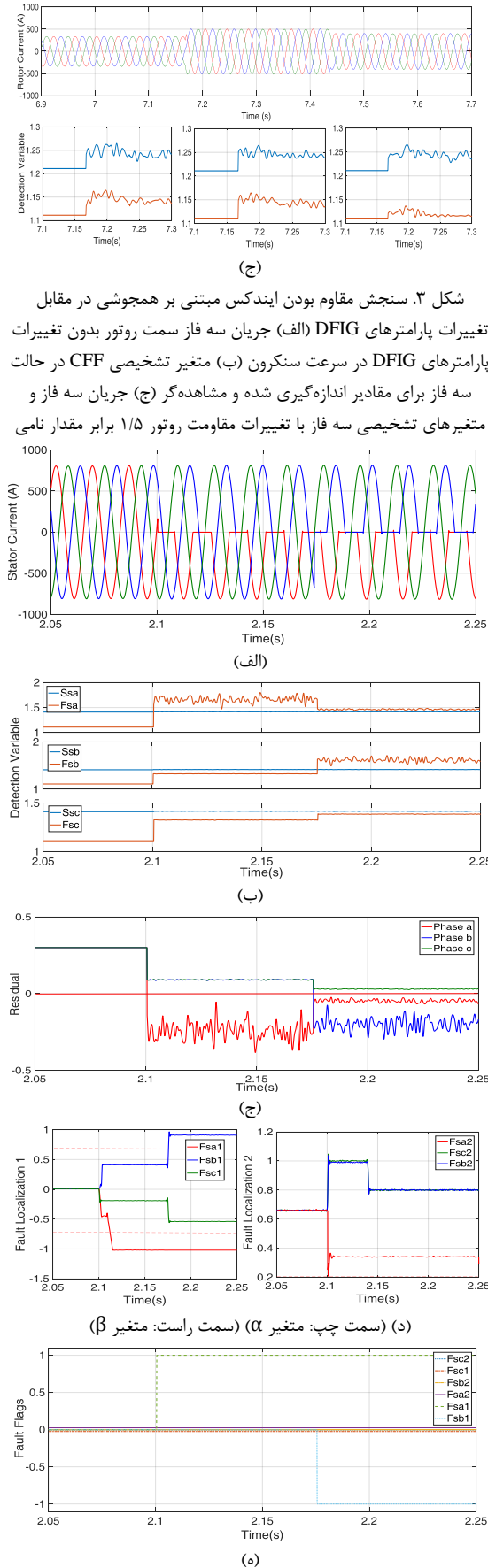
^{۱۳} Miss Alarm Rate (MAR)

شبیه‌سازی، بحث و تجزیه تحلیل

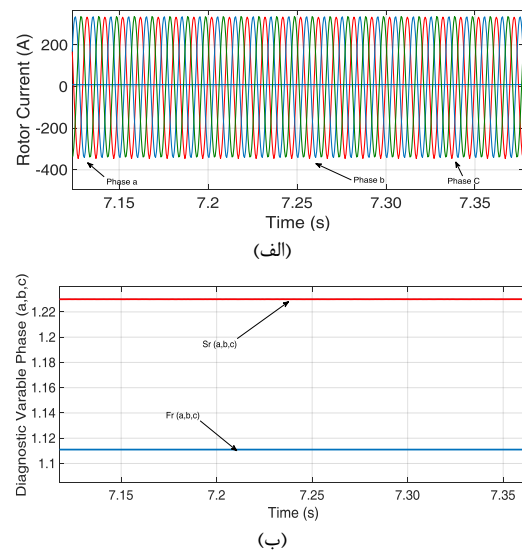
شبیه‌سازی‌ها در بستر شبیه‌ساز نرم‌افزاری توربین بادی ۲/۵ مگاوات انجام شده است. مقادیر آستانه و آستانه تطبیقی طبق توضیحات ارائه شده در بخش قبل تنظیم می‌شود. عملکرد روش تشخیص عیب پیشنهادی در مقابل تغییرات مقاومت روتور (۱/۵ برابر حالت واقعی) مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۳) مقادیر CFF خروجی اندازه‌گیری و خروجی مشاهده‌گر را نشان می‌دهد. تفاضل این دو از هم به عنوان مانده، در زیر آستانه تطبیقی است و در این حالت نرخ FAR صفر است. از شبیه‌سازی مشخص است که استفاده از CFF موجب می‌شود که آلارم اشتباه اتفاق نیافتد و روش مقاوم است. این شبیه‌سازی مقاوم بودن ایندکس حاصل از مشاهده‌گر را در مقابل تغییرات پارامترهای DFIG نشان داده است. شکل (۳-الف) سه فاز روتور در حالت سالم را نشان می‌دهد. شکل (۳-ب) خروجی CFF برای مشاهده‌گر و مقدار اندازه‌گیری شده در حالت سالم نشان می‌دهد. شکل (۳-ج) نشان دهنده جریان‌های سه فاز به همراه متغیرهای تشخیصی سه فاز به صورت جداگانه است. بر اساس طراحی انجام شده برای ایجاد عیب، فرض بر این است که دو سوئیچ S1 و S5 از سمت مبدل سمت شبکه دچار عیب مدار باز شده‌اند. نتایج در شکل ۴ آمده است.

تست پنج سخت‌افزاری ۹۰ کیلووات مبتنی بر ساختار DFIG

یک شبیه‌ساز سخت‌افزاری DFIG با توان خروجی ۹۰ کیلووات در شرکت مپنا (مکو) طراحی و ساخته شد.



شکل ۴. تشخیص عیب سوئیچ‌های مبدل در حالی که عیب در یک سمت



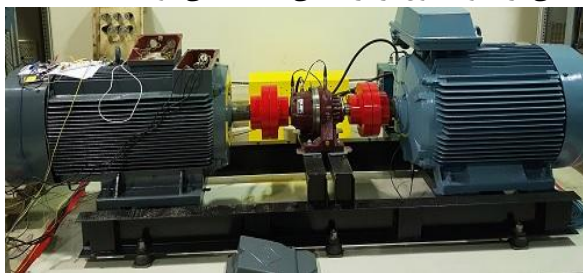
۳/۳۳ تشکیل شده است. گیربکس توسط یک موتور آسنکرون ۱۱۰ کیلووات ABB Motors چرخانده می‌شود. سامانه برای شبیه‌سازی عیب‌های استاتور و ژنراتور قابل استفاده است. تصویر کلی از این سه تجهیز متصل شده به هم در شکل (۵) نشان داده شده است.

مبدل با دو سوئیچ در دو شاخه متفاوت است؛ الف- جریان سه فاز، ب- خروجی CFF اندازه‌گیری و مشاهده گر ج- تولید مانده و ارزیابی مانده، د- متغیر تشخیصی α و متغیر تشخیصی β ، ه- پرچم تشخیص عیب سوئیچ‌ها این شبیه‌ساز سخت‌افزاری شامل یک موتور محرک با سامانه درایو، یک گیربکس، یک ژنراتور DFIG و یک مبدل است. به طور اساسی این سامانه از یک ژنراتور ۹۰ کیلووات VEM DFIG متصل شده به یک گیربکس خورشیدی با نسبت ۱ به

جدول ۲. جدول مکان‌یابی عیب سوئیچ مدار باز

F_{Sc2}	F_{Sb2}	F_{Sa2}	F_{Sc1}	F_{Sb1}	F_{Sa1}	سوئیچ معیوب	F_{Sc2}	F_{Sb2}	F_{Sa2}	F_{Sc1}	F_{Sb1}	F_{Sa1}	سوئیچ معیوب
۰	۰	۰	۱	-۱	۱	S1-S3	۰	۰	۰	۰	۰	۱	S1
۰	۰	۰	-۱	۰	۱	S1-S6	۰	۰	۰	۰	۰	-۱	S2
۰	۰	۰	۰	۱	-۱	S4-S2	۰	۰	۰	۰	۱	۰	S3
۰	۰	۰	۱	-۱	-۱	S4-S5	۰	۰	۰	۰	-۱	۰	S4
۰	۰	۰	۱	۰	-۱	S4-S3	۰	۰	۰	۱	۰	۰	S5
۰	۰	۰	-۱	۱	-۱	S4-S6	۰	۰	۰	-۱	۰	۰	S6
۰	۰	۰	۱	۱	-۱	S2-S3	۰	۰	۱	۰	۰	۰	S1-S4
۰	۰	۰	-۱	۱	۰	S-S6	۰	۱	۰	۰	۰	۰	S2-S5
۰	۰	۰	۱	-۱	۰	S5-S3	۱	۰	۰	۰	۰	۰	S3-S6
۰	۰	۰	-۱	-۱	۱	S5-S6	۰	۰	۰	-۱	۱	۱	S1-S2
۰	۰	۰	-۱	-۱	۱	S5-S6	۰	۰	۰	۰	-۱	۱	S1-S5

تشخیص عیب برای مبدل بر اساس برد دیجیتالی کنترلی مبتنی بر ARM/FPGA با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ Khz برای کانال‌های A/D با استفاده از PWM پیاده‌سازی شد. برای مبدل از راهبرد کنترل برداری استفاده شده است. به ترتیب برای مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه از کنترل برداری میدان مبتنی بر مدولاسیون بردار فضایی استفاده می‌شود.

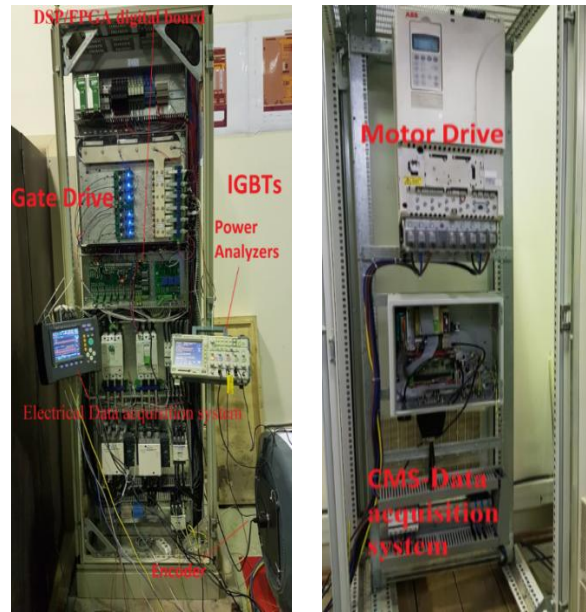


شکل ۵. ساختار کلی تجهیزات متصل شده؛ موتور (سمت راست) - گیربکس (بخش میانی) - ژنراتور (سمت چپ)

ساختار کلی شبیه‌ساز سخت‌افزاری توسعه داده شده در شکل (۸) نشان داده شده است. برای تحقق اهداف مقاله، اندازه‌گیری‌های مختلفی در شبیه‌ساز سخت‌افزاری طراحی شد. ساختار کلی اندازه‌گیری‌ها مشابه شکل (۹) است. بر اساس این ساختار سرعت چرخشی ژنراتور در فرآیند پایش وضعیت و عیب‌یابی مورد استفاده است که این سیگنال با استفاده از یک شمارنده اندازه‌گیری می‌شود. سیگنال‌های کنترلی شامل سیگنال‌های کنترلی روتور از طریق واحد آرشو داده FPGA در مرکز ساختار جمع‌آوری می‌شوند. اطلاعات الکتریکی دیگر از طریق دستگاه تحلیل‌کننده توان جمع‌آوری می‌شوند که شامل اطلاعات

سامانه قابلیت عملکرد در سرعت ثابت و متغیر را دارد. موتور محرک اولیه به گونه‌ای طراحی شده است که ژنراتور DFIG با ۴ قطب در نواحی عملکردی سنکرون، زیر سنکرون و فوق سنکرون کار کند. برای این منظور سرعت موتور ۷۵۰ دور بر دقیقه با فرکانس شبکه ۵۰ هرتز ۸ قطب انتخاب شد. نسبت تبدیل گیربکس باعث می‌شود که ژنراتور DFIG با سرعت سنکرون حدود ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در هر سه ناحیه عملکردی فعال شود. ژنراتور شبیه‌ساز سخت‌افزاری ۸ قطب بوده و قابلیت عملکرد در فرکانس ۵۰ هرتز و ۴۰۰ ولت را داراست. تابلو کنترل درایو مربوطه در شکل (۶) نشان داده شده است که بخش بالایی این تابلو شامل درایو مربوطه است. بخش دیگر کنترلی شبیه‌ساز سخت‌افزاری مربوط به مبدل ۵۰ کیلووات پشت به پشت است که در ساختار مورد استفاده ۳۰ کیلووات از توان آن استفاده می‌شود (یک سوم توان مربوط به ژنراتور). تابلو مبدل پشت به پشت مورد استفاده در این ساختار که به طور مستقیم در مدل‌سازی و شبیه‌سازی عیب مبدل مورد استفاده قرار می‌گیرد مطابق با شکل (۷) است. سامانه از دو مبدل منبع ولتاژ در ساختار پشت به پشت با توان بیشینه ۳۰ کیلووات، از یک بانک خازنی و یک فیلتر خروجی $5\mu H-80\Omega$ تشکیل شده است. آزمایش‌ها با ولتاژ لینک DC 700 ولت اجرا می‌شود. در طراحی برد توان مبدل از ۶ سوئیچ استفاده شده است که هر سوئیچ از دو IGBT متصل به هم در ساختار امیتر مشترک تشکیل شده است. یک مدار گیت درایو برای ایجاد ۱۲ سیگنال گیت طراحی شده است. کنترل‌کننده مبدل به همراه روش پیشنهادی

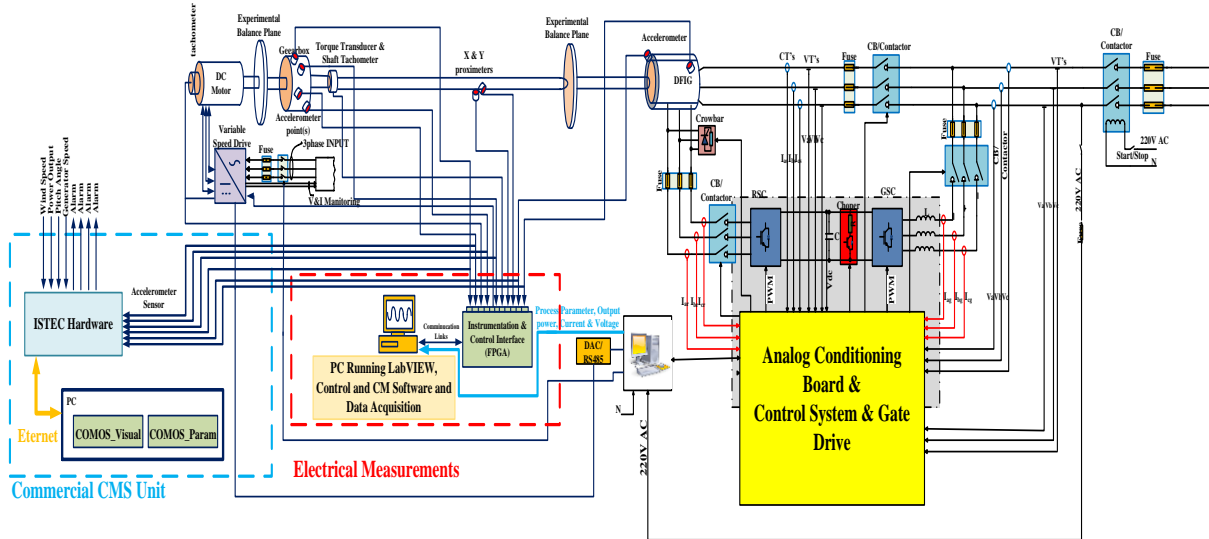
جریانی/ولتاژی سه فاز سمت روتور و سه فاز سمت استاتور است.



شکل ۶. تابلو درایو و CMS شکل ۷. تابلو مبدل پشت به پشت

اطلاعات توان از طریق سامانه CMS اندازه‌گیری می‌شود که توضیحات آن در بخش مربوط به توربین باد ارائه شد. سامانه مورد استفاده در شبیه‌ساز سخت‌افزاری دقیقاً مشابه سامانه استفاده شده در توربین‌های واقعی مزرعه بادی کهک قزوین است. این سامانه اندازه‌گیری سیگنال‌های لرزش از روی این شبیه‌ساز سخت‌افزاری را به صورت زیر با ۸ حسگر انجام می‌دهد. حسگرهای اندازه‌گیری لرزش از نوع شتاب‌سنج هستند. حسگرها از نوع شتاب‌سنج با دقت اندازه‌گیری مشخص^{۱۴} از طریق اتصال‌دهنده آهن‌ربایی به مکان مشخص روی شبیه‌ساز سخت‌افزاری متصل شده‌اند و اندازه‌گیری لرزش شبیه‌ساز سخت‌افزاری را انجام می‌دهند. دو حسگر در انتهای موتور محرک به نشانه قرارگیری حسگرها در یاتاقان اصلی توربین باد قبل از شفت سرعت پایین گیربکس جانمایی می‌شود. ۴ عدد حسگر مشابه جانمایی حسگرهای گیربکس توربین باد واقعی در گیربکس شبیه‌ساز سخت‌افزاری جانمایی می‌شود. دو عدد حسگر شتاب‌سنج روی ژنراتور در ابتدا و انتهای ژنراتور مشابه حالت واقعی در توربین بادی جانمایی می‌شود. پارامترهای شبیه‌ساز سخت‌افزاری ۹۰ کیلووات DFIG در جدول (۳) و (۴) آمده است. جدول (۳) اطلاعات کلی تجهیزات اندازه‌گیری شبیه‌ساز سخت‌افزاری را نشان می‌دهد و جدول (۴) شامل اطلاعات اجزای اصلی شبیه‌ساز سخت‌افزاری است.

^{۱۴} ۱۰ mV/ms-2

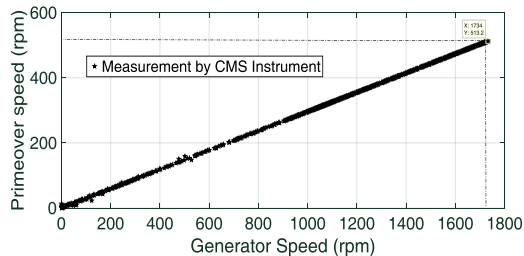


شکل ۸. ساختار کلی شبیه‌ساز سخت‌افزاری ۹۰ کیلووات DFIG

جدول ۳. خصوصیات سامانه‌های اندازه‌گیری نصب شده بر روی شبیه‌ساز سخت‌افزاری

سامانه پایش وضعیت توربین‌یاد: ISTECH		سامانه اندازه‌گیری کیفیت توان: Hioki	
کانال‌های ورودی		خصوصیات ورودی	
۸ کانال برای حسگرهای شتاب‌سنج ۴ کانال برای پارامترهای عملکردی توان، سرعت ژنراتور، زاویه گام پره و سرعت باد		انواع اندازه‌گیری	Single-phase 2-wire, Single-phase 3-wire, Three-phase 3-wire (3P3W2M, 3P3W3M) or Three-phase 4-wire, plus one extra input channel
ساختار آرشیو داده		کانال‌های ورودی	۴ کانال ولتاژی ۴ کانال جریانی
جریان		خصوصیات اندازه‌گیری	اندازه‌گیری پیوسته ۱۰ تا ۱۲ دوره متناسب با فرکانس اصلی ۵۰ یا ۶۰ هرتز
فرکانس نمونه‌برداری	۲ مگاهرتز	فرکانس نمونه‌برداری	۲ مگاهرتز
حسگر	۸ حسگر شتاب‌سنج با دقت ۱۰ mV/ms-2	حسگر	حسگر جریانی (کلامپی) تا ۱۰۰۰ آمپر

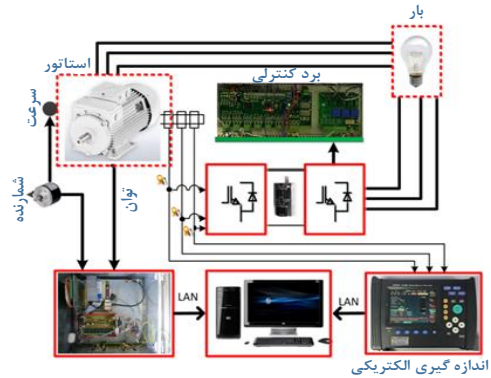
روی درایو خوانده می‌شود و سرعت ژنراتور از روی CMS خوانده می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار نسبت سرعت موتور محرک به سرعت ژنراتور

آزمایش‌ها

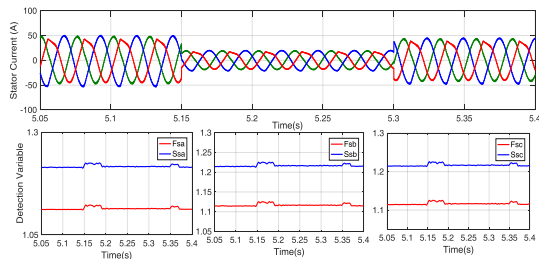
آزمایش‌ها در نواحی عملکردی مختلف، اعم از سرعت کم و زیاد انجام شده است. عیب مدار باز با استفاده از حذف سیگنال فرمان گیت IGBT اعمال می‌شود. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده



شکل ۹. ساختار کلی اندازه‌گیری در شبیه‌ساز سخت‌افزاری

در شکل (۱۰) نسبت تبدیل گیربکس تعیین‌کننده سرعت ژنراتور خواهد بود. سرعت ژنراتور به عنوان یکی از ورودی‌های کانال تجهیز CMS اندازه‌گیری می‌شود. سرعت موتور محرک از

ناحیه عملکرد از یک ناحیه به ناحیه دیگر تبدیل می‌شود. مقادیر CFF مربوط به Fsk همیشه در زیر آستانه‌های مربوطه Ssk باقی می‌ماند و هیچ هشدار اشتباهی ایجاد نمی‌شود. با این وجود، می‌توان دریافت که تمام متغیرهای تشخیص به دور از آستانه‌های تطبیقی خود باقی مانده‌اند. بنابراین، متغیرهای تشخیص تعریف شده می‌توانند بدون ایجاد هشدار اشتباه، سرعت و بار گذرای قوی را تحمل کنند و از این طریق مقاوم بودن الگوریتم را در این شرایط عملیاتی نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. نتایج آزمایشگاهی در مورد شکل موج‌های دامنه زمانی جریان‌های سه فاز DFIG و متغیرهای تشخیصی

ارزیابی روش در عیوب چندگانه مبدل سمت روتور

شکل (۱۲) نتایج آزمایشگاهی جریان‌های ژنراتور را به همراه متغیرهای شناسایی و مکان‌یابی نشان می‌دهد. با حذف سیگنال‌های فرمان گیت IGBT‌های S1 و S4 در زمان ۲/۴۴۱ و ۲/۵۲۱ ثانیه به ترتیب، یک عیب مدار باز در یک فاز ایجاد می‌شود. مشاهده می‌شود که پس از اولین وقوع عیب، جریان فاز معیوب برای مدت زمانی کوتاهی صفر باقی می‌ماند. در نتیجه، در مقایسه با مورد سالم، دامنه در دسترس جریان ژنراتور کاهش می‌یابد. وقتی مقدار CFF مربوط به Fsa به آستانه Ssa در فاز a فراتر رود (شکل (۱۲-ب)). مقدار مانده در شکل (۱۲-ج) برای فاز a با رنگ قرمز منفی می‌شود، از طرفی متغیر مکان‌یابی شماره ۱ یعنی α از ۰/۷- کمتر شود، در نتیجه خرابی S1 بر اساس جدول ۴-۲ آشکار می‌شود. این اتفاق ۱۵ میلی‌ثانیه پس از وقوع عیب، متناسب با ۱۵٪ از دوره جریان ژنراتور رخ می‌دهد. در نتیجه، پرچم شناسایی Fsa1 مقدار یک را می‌گیرد. عیب S4 توسط تعویض پرچم Fsa2 از صفر به یک، در زمان ۲/۵۹۱ ثانیه، در فاصله زمانی حدود ۷۰٪ دوره جریان ژنراتور، آشکار می‌شود. در شکل (۱۲-د) وقتی مقدار β در محدوده‌ی کوچکتر از ۰/۲ فرض می‌شود، وجود عیب توامان دو سوئیچ، در S1 و S4 قطعی خواهد بود. همه‌ی پرچم‌های دیگر مربوط به سوئیچ‌های سالم قبل و بعد از وقوع سناریوهای عیب صفر باقی می‌مانند.

در این بخش به منظور ارزیابی روش تشخیص عیب مدار باز گیت سوئیچ مبدل است. قابلیت اطمینان و مقاوم بودن روش تشخیص تحت تغییرات سرعت و جریان‌های گذرا تأیید می‌شود. سپس، عملکرد سامانه تشخیص عیب تحت عیب‌های مدار باز چندگانه در مبدل سمت روتور و مبدل سمت شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو آستانه برای متغیرهای تشخیصی بر اساس روابط (۱۴) و (۱۵) وجود دارد که آن دو آستانه بر اساس آزمایش‌ها، در دو مقدار ثابت ۰/۷ برای α و ۰/۲ برای β تنظیم شده‌اند. آستانه‌ها برای هر دو سمت مبدل عمل می‌کنند. ضریب بهره مشاهده‌گر برای تمام Lها ۲۵۰۰۰ تنظیم شد که موجب شده است دینامیک مشاهده‌گر بهترین پاسخ و کمترین اختلاف را از مقدار واقعی نشان دهد. این مقادیر با در نظر گرفتن مبادله‌ی بین مقاوم بودن روش تشخیص عیب در برابر هشدارهای اشتباه و زمان تشخیص بدست می‌آید.

مصونیت از هشدارهای اشتباه

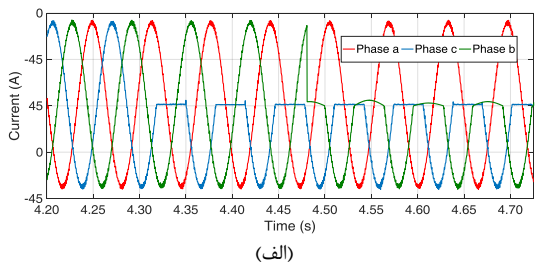
شکل (۱۱) نتایج آزمایشگاهی مربوط به شکل موج‌های جریان سه فاز ژنراتور را به همراه متغیرهای تشخیصی Fsk و Ssk تحت تغییرات سرعت نشان می‌دهد.

جدول ۴. پارامترهای تجهیزات اصلی شبیه‌ساز سخت‌افزاری

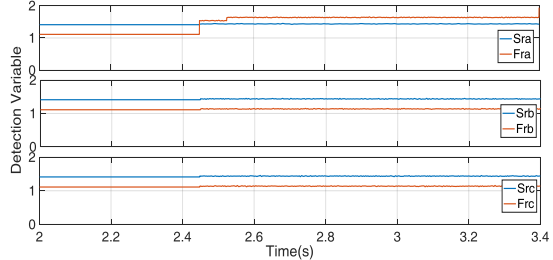
پیش‌رانه	
توان	۹۰ kW
سرعت	۱۴۸۸ دور بر دقیقه
ولتاژ استاتور	۴۰۰ V
ولتاژ لینک DC	۷۰۰ V
جریان	۱۹۹
گشتاور	۵۷۸ Nm
تعداد قطب	۴
اندوکتانس مغناطیسی	۱۲۰/۴ mH
Cos Φ	۰/۸۸
مقاومت استاتور	۲۴/۸ m Ω
اندوکتانس استاتور	۴۴ mH
مقاومت روتور	۱۶/۶ m Ω
اندوکتانس روتور	۳۳ mH
اطلاعات کلی گیربکس	گیربکس تک طبقه با نسبت یک ۳۳/۳
اطلاعات کلی موتور محرک	pole / 55 kW/ 400 v/ 742 rpm 8
مبدل	
مقاومت فیلتر	5m Ω
اندوکتانس فیلتر	800 μ H
فرکانس نمونه‌برداری	۱۰۰ kHz
فرکانس سوئیچینگ	۲/۵ kHz
کنترل	FOC

برای ارزیابی مقاوم بودن و عملکرد روش تشخیص عیب از دو سرعت مرجع استفاده شده است. مرجع سرعت در لحظه ۵/۱۵۰ ثانیه از ۸۰۰ به ۱۴۰۰ دور بر دقیقه تغییر می‌کند.

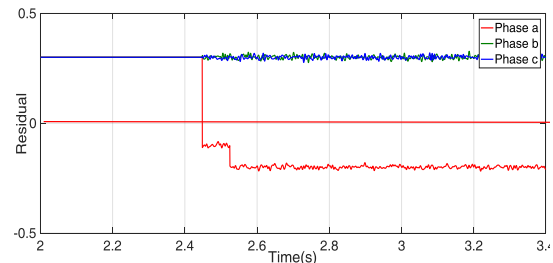
Fsc شبکه از آستانه تطبیقی Ssc عبور می کند و مقدار α کمتر از 0.7 می شود آشکار می شود که منجر به تغییر وضعیت F_{Sc1} به مقدار یک در زمان $4/330$ ثانیه (که مربوط به 40% از دوره جریان شبکه است) می شود. در مرحله بعد، مکان یابی خرابی S2 هنگامی حاصل می شود که مقدار F_{Sb} از آستانه S_{sb} بیشتر شود و α از آستانه 0.7 کمتر می شود ($4/50$ آشکارسازی انجام می شود که معادل 70% یک دور تناوب شبکه است). بنابراین، پرچم شناسایی F_{Sb1} از صفر به یک تغییر می کند و سوئیچ معیوب در فاز دوم و سوئیچ بالا مکان یابی می شود. البته با توجه به توازن فازها چون در دو فاز، عیب ایجاد شده است، شاخص α برای فاز اول بزرگتر از 0.7 می شود و F_{Sa1} به منهای 1 تغییر وضعیت می دهد. در هر دو عیب شاخص β بزرگتر از 0.2 و F_{Sc2} و F_{Sa2} دارای مقدار 0 است.



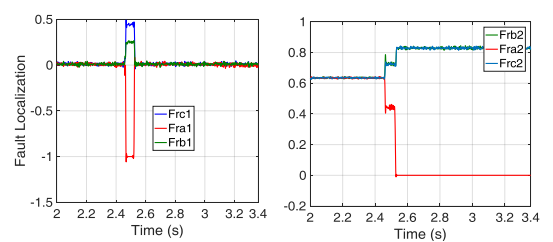
(الف)



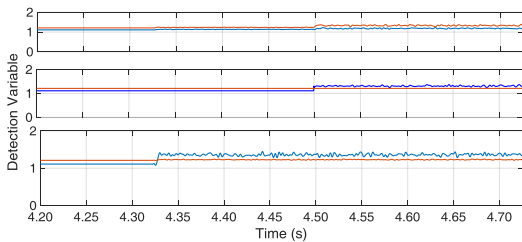
(ب)



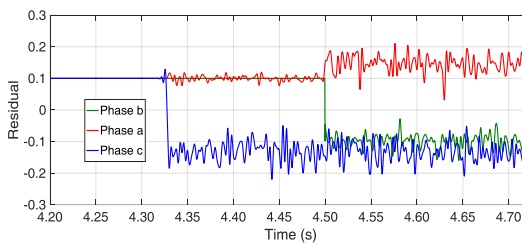
(ج)



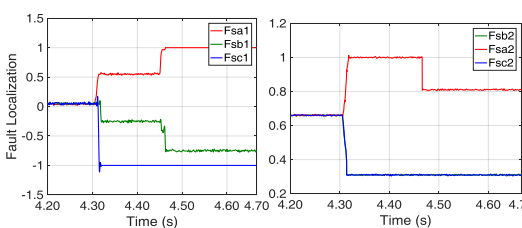
(د) (سمت چپ: متغیر α) (سمت راست: متغیر β)



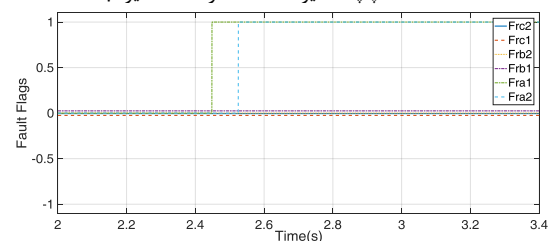
(ب)



(ج)



(د) (سمت چپ: متغیر α) (سمت راست: متغیر β)

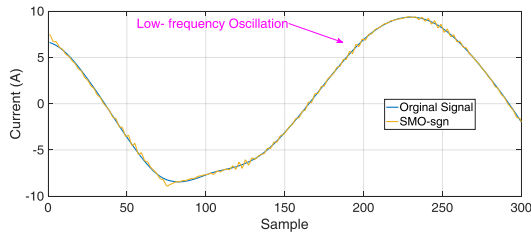


(ه)

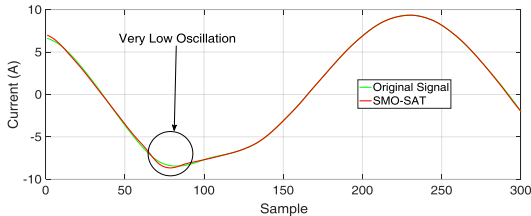
شکل ۱۲. تشخیص عیب سوئیچ های مبدل در حالتی که عیب در سمت مبدل روتور با دو سوئیچ در یک شاخه یکسان است (S_4 و S_1)؛ الف- جریان سه فاز، ب- خروجی CFF اندازه گیری و مشاهده گر ج- تولید مانده و ارزیابی مانده، د- متغیر تشخیصی α و متغیر تشخیصی β ، ه- پرچم تشخیص عیب سوئیچ ها

ارزیابی روش در عیوب چندگانه مبدل سمت شبکه

شکل (۱۳) نتایج به دست آمده برای عیب مدار باز دو سوئیچ IGBT های S_2 و S_3 را به ترتیب در $4/322$ و $4/486$ ثانیه نشان می دهد. اولین عیب در S_3 وقتی مقدار CFF مربوط به



شکل ۱۶. بررسی پدیده چاترینگ بر اساس نتایج مشاهده‌گر SMO با تابع sgn



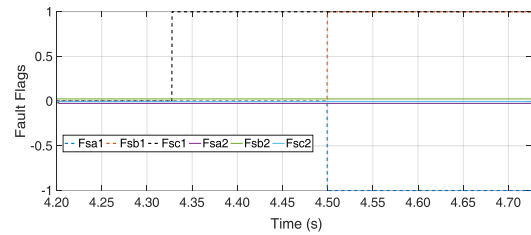
شکل ۱۷. بررسی پدیده چاترینگ بر اساس نتایج مشاهده‌گر SMO با تابع SAT

در جدول (۵) مقایسه روش توسعه داده شده در این مقاله با دو روش [۳۴-۳۵] که اخیراً برای تشخیص عیب مدار باز سوئیچ IGBT استفاده شده است، نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود اینکه کدام روش استفاده شود وابسته به کاربرد، داشتن یا نداشتن اطلاعات پارامترهای سامانه و امکانات موجود در توربین بادی است، اما به طور کلی روش ارائه شده در این مقاله محاسن بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش جدید تشخیص عیب را برای عیوب تنها و چندگانه مدار باز سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین باد DFIG در یک شاخه و یا چند شاخه ارائه کرده است. روش پیشنهادی مبتنی بر مشاهده‌گر مود لغزشی با تابع SAT و آستانه‌ی تطبیقی بود و دارای پایداری و سرعت تشخیص بالایی است. همچنین با پدید چاترینگ در سوئیچ‌ها مقابله می‌کند. روش ارائه شده بر اساس SMO مقاوم و بر اساس ترکیبی از روش-های سیگنال-پایه و مدل-پایه، برای تشخیص وجود یا عدم وجود عیب در یک فاز بر اساس تولید مانده (مدل-پایه) و مکان‌یابی عیب بر اساس یک راهکار سیگنال‌پایه است.

روش پیشنهادی برای تشخیص عیب ارزان قیمت بوده و نیاز به سخت‌افزار اضافه ندارد و همانند روش‌های افزونه نیاز به سوئیچ‌های IGBT و ترایاک اضافه ندارد و بر اساس اندازه‌گیری جریان سه فاز و مدل‌سازی مشاهده‌گر جریان‌های سه فاز است. آشکارسازی خطا و تشخیص عیب در یک شاخه بر اساس ارزیابی مانده متناسب با آستانه تطبیقی مبتنی بر پارامترهای عملکردی توربین بادی (سرعت ژنراتور و توان) به منظور رفع تشخیص هشدار اشتباه حاصل می‌شود. روش پیشنهادی بر اساس نتایج آزمایشگاهی دارای مقاومت بالا و همچنین سرعت تشخیصی مناسب در شرایط عملکردی و عیب‌های مختلف بوده

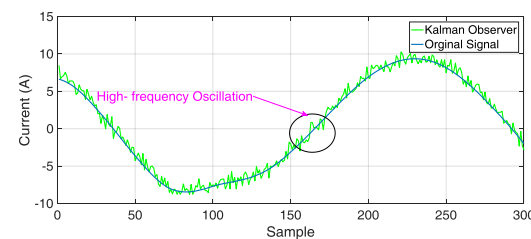


(ه)

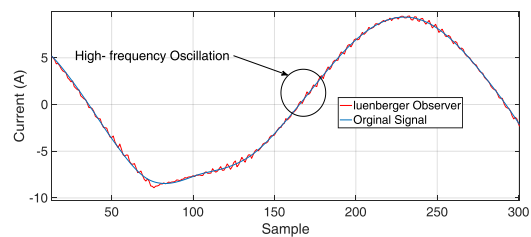
شکل ۱۳. تشخیص عیب سوئیچ‌های مبدل در حالتی که عیب در یک سمت مبدل با دو سوئیچ در دو شاخه متفاوت است؛ الف- جریان سه فاز، ب- خروجی CFF اندازه‌گیری و مشاهده‌گر ج- تولید مانده و ارزیابی مانده، د- متغیر تشخیصی α و متغیر تشخیصی β ، ه- پرچم تشخیص عیب سوئیچ‌ها آزمایش‌های گسترده‌ای برای دیگر ترکیب‌های عیب مدار باز سوئیچ در مبدل پشت به پشت انجام شد. نتایج به دست آمده مشابه نتایج ارائه شده است. آن‌ها ثابت می‌کنند که روش ارائه شده محدود به تشخیص و مکان‌یابی عیب یک سوئیچ مدار باز شده نیست و توانایی آشکارسازی چندین عیب را نیز دارد.

بحث و مقایسه با روش‌های دیگر

یکی از شرایطی که در تشخیص عیب سوئیچ مبدل مهم است، مقابله و پایداری در زمان وقوع پدیده چاترینگ است. در شکل (۱۴) نتایج مربوط به طراحی مشاهده‌گر برای جریان روتور فاز اول مبدل نشان داده است، مشاهده‌گر مربوطه فیلتر کالمن است. مطابق با شکل، یک نوسان بسیار شدید دیده می‌شود. این نوسان تقریباً در شکل (۱۵) که از مشاهده‌گر لوئنبرگر استفاده شده است، تکرار می‌شود. وقتی از SMO استفاده می‌شود، این نوسان کمتر می‌شود و در شبیه‌سازی شکل (۱۶) نشان داده شده است که دامنه نوسان کاهش پیدا کرده است. اما کمترین نوسان وقتی خواهد بود که از SMO با تابع SAT به جای تابع sgn استفاده شود (شکل (۱۷)).



شکل ۱۴. بررسی پدیده چاترینگ بر اساس نتایج مشاهده‌گر فیلتر کالمن



شکل ۱۵. بررسی پدیده چاترینگ بر اساس نتایج مشاهده‌گر لوئنبرگر

سالم به دست می آید. از این رو الگوریتم توسعه داده شده برای کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز سوئیچ IGBT، با توجه به نتایج بدست آمده و عملکرد روش پیشنهادی به خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

است. در مقابل تغییرات پارامتری سامانه مقاوم است و توانایی تشخیص عیوب همزمان و چندگانه مدار باز در مبدل‌های سمت شبکه و سمت روتور را دارد. الگوریتم به خوبی و با سرعت بالا شرایط گذرای حالت قبل از خطا به بعد از خطا را طی می‌کند. همچنین گراف‌های عملکردی توان و گشتاور توربین باد پس از تغییرات کنترلی بعد از عیب، مشابه حالت

جدول ۵: مقایسه روش‌های توسعه داده شده در این مقاله با روش‌های مقالات دیگر در کاربرد عیب‌یابی سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین بادی DFIG

روش	کیفیت روش	زمان (m.s)	سیگنال	وابستگی آستانه	پیاده‌سازی
فیلتر کالمن	دقیق نبودن ماتریس حالت	بین ۴۰ تا ۷۵٪ یک سیکل	جریان سه فاز	کم	در سطح سخت افزار پیچیده است.
SMO-SAT	خوب	بین ۱۰ تا ۷۰٪ یک سیکل	جریان سه فاز	کم	در سطح سخت افزار پیچیده است.
[۳۴]	ضعیف در جریان کم	بهتر است در یک سیکل باشد	جریان سه فاز	زیاد	در سطح سخت افزار آسان است.
[۳۵]	قابلیت اطمینان کم، عدم مقاومت در مقابل تغییرات سرعت	بهتر است در یک سیکل باشد	جریان سه فاز	زیاد	در سطح سخت افزار پیچیده است.

- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] 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. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0150>
- [11] 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
- [12] 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. <https://doi.org/10.6113/JPE.2019.19.2.443>
- [13] 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
- [14] M. Shahbazi, M.R. Zolghadri, P. Poure and S. Saadate, "Fast Detection of Open-Switch Faults with Reduced Sensor Count for a Fault-Tolerant

تشکر و قدردانی

این تحقیق توسط شرکت مهندسی برق و کنترل مینا (مکو) حمایت شده است. از این رو ما از همکاری‌های مربوط به این تحقیق سپاس گذاریم.

مراجع

- [۱] کمرزین، مهرنوش، "طراحی کنترل‌کننده تطبیقی زاویه پره توربین بادی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی.
- [2] K. Alewine and W. Chen, "A review of electrical winding failures in wind turbine generators," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 28, no. 4, pp. 8-13, 2012. DOI: 10.1109/EIC.2011.5996185
- [3] R. Dahiya, "Condition monitoring of wind turbine for rotor fault detection under non stationary conditions," Ain Shams Engineering Journal, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.04.002>
- [4] M. N. Zaggout, "Wind Turbine Generator Condition Monitoring via the Generator Control Loop," PhD thesis, University of Durham, 2013.
- [5] 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 City, Mexico. September 30-October 4, 2013. DOI: 10.1109/ICEEE.2013.6676032
- [6] 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

- Generation System Based on Instantaneous Amplitude Estimation,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-13, 2021. DOI: 10.1109/TIM.2021.3062683
- [25] X. You and W. Zhang, “Fault diagnosis of frequency converter in wind power system based on SOM neural network,” *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 3132-3136, 2012. <https://doi.org/10.6113/JPE.2019.19.2.443>
- [26] P. Duan, K.G. Xie, L. Zhang and 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, 2010. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2095470
- [27] 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, 2012. DOI: 10.1109/TIE.2012.2200214
- [28] 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 informatics*, vol. 9, no. 3, pp. 1343-1350, 2012. DOI: 10.1109/TII.2012.2209665
- [29] S. Jadidi, H. Badihi and Y. Zhang, “Passive Fault-Tolerant Model Predictive Control of AC/DC PWM Converter in a Hybrid Microgrid,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 12097-12102, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13215625>.
- [30] S. Shao, P.W. Wheeler, J.C. Clare and A.J. Watson, “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](https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2242093).
- [31] K. Rothenhagen and F.W. Fuchs, “Doubly fed induction generator model-based sensor fault detection and control loop reconfiguration,” *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, vol. 56, no. 10, pp. 4229-4238, 2009. DOI: [10.1109/TIE.2009.2013683](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2013683).
- [32] K. Rothenhagen and F.W. Fuchs, “Current sensor fault detection, isolation, and reconfiguration for doubly fed induction generators,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4239-4245, 2009. DOI: [10.1109/TIE.2009.2017562](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2017562).
- [33] E.F. Kubler, “The armature current form factor of a DC motor connected to a controlled rectifier,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 78, no. 3, pp.764-770, 1959. DOI: [10.1109/AIEEPAS.1959.4500430](https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1959.4500430).
- [34] 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. DOI: [10.1109/TPEL.2014.2342506](https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2342506).
- [35] 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, 2017. DOI: [10.1109/TPEL.2017.2705985](https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2705985).
- Three-Phase Converter,” *2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, 16-17 Feb, 2011. DOI: 10.1109/PEDSTC.2011.5742479
- [15] 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
- [16] 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 Informatics*, vol. 9, no. 3, pp. 1343-1350, 2013. DOI: 10.1109/TII.2012.2209665
- [17] M.N. Soares, Y. Mollet, M. Kinnaert, J. Gyselinck and J. Helsens, “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
- [18] 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
- [19] 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. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114851>
- [20] I. Jlassi, J.O. Estima, S.K. El Khil, N.M. Bellaaj and A.J.M. 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, 2014. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2342506
- [21] 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
- [22] 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. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0150>
- [23] H. Zha 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, 2017. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2705985
- [24] S. Xu, S. Tao, W. Zheng, Y. Chai, M. Ma and L. Ding, “Multiple Open-Circuit Fault Diagnosis for Back-to-Back Converter of PMSG Wind