

کنترل تحمل‌پذیر خطای مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر DFIGN بر اساس روش توسعه‌یافته مود لغزشی

مهرنوش کمرزرین، محمدحسین رفان و پرویز امیری

است [۳]. تشخیص و مکان‌یابی خطا و کنترل تحمل‌پذیر خطا برای افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن توربین‌های بادی ضروری است [۴]. هنگامی که خطایی وجود دارد، باید استراتژی جبران شرایط فعلی، توسط سامانه کنترل وجود داشته باشد [۵]. این دسته از سامانه‌های کنترلی به عنوان سامانه کنترل تحمل‌پذیر خطا شناخته می‌شوند [۶]. پس از تشخیص خطا، سامانه باید در صورت وجود خطا به کار خود ادامه دهد [۷] و [۸]. استراتژی کنترل تحمل‌پذیر خطا، تولید برق را افزایش می‌دهد و از خرابی توربین‌های بادی جلوگیری می‌کند [۹]. یکی از اصلی‌ترین بخش‌های یک توربین بادی که وظیفه تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را بر عهده دارد، ژنراتور و بسته به نوع آن، مبدل مورد نیاز است که با توجه به شرایط محیطی در معرض انواع عیوب قرار می‌گیرد. هنگامی که نفوذ انرژی بادی در سامانه‌های الکترونیک قدرت افزایش پیدا می‌کند، عملکرد این توربین‌ها، تحت خطاهای شبکه، خطاهای مبدل و آشوب‌های دیگر اهمیت زیادی پیدا می‌کند. مطلوب این است که در هنگام وقوع خطا و بعد از آن، توربین بادی همچنان به شبکه متصل باشد و به طور مؤثری به پایداری سامانه، کمک و از نوسان توان خروجی جلوگیری کند.

در دو دهه گذشته، در حوزه کنترل تحمل‌پذیر خطا، تحقیقات زیادی انجام شده است. مقالات [۱۰] تا [۱۴] و کتاب‌های [۱۵] و [۱۶] از جمله موارد پیشرو در این حوزه هستند. روش‌های ارائه‌شده در این حوزه به دو دسته روش‌های فعال و روش‌های غیر فعال دسته‌بندی می‌شوند.

روش‌هایی به منظور تشخیص خطا و کنترل تحمل‌پذیر خطای سامانه مبدل‌های پشت به پشت ژنراتور ارائه شده است. در خصوص پیشینه تحقیق روش‌های تشخیص خطا در مبدل‌های پشت به پشت، در [۱۷] روشی با استفاده از جریان‌های فاز نرمالیزه‌شده و قدر مطلق جریان فازها معرفی گردیده که در این مقاله، از یک آستانه تطبیقی استفاده شده است. در [۱۸]، یک روش بر اساس شبکه عصبی ارائه شده که مشکل زمان آموزش بالا دارد. در [۱۹]، روش جریان DC نرمالیزه‌شده مطلق، گسترش و بهبود داده شده که این روش در جریان‌های ضعیف دارای اثربخشی کمی است. مقاله [۲۰] و [۲۱] بر اساس FPGA و برای FT با افزودن دو سوئیچ است. در مبدل مربوط به DFIGN و در بالاتر از سرعت هم‌زمان مشکل هشدار اشتباه مشهود است که در [۲۲] این مشکل با استفاده از اندازه‌گیری جریان DC نرمالیزه‌شده مطلق^۱ حل شده است. یک روش بر اساس بردار پارک نرمالیزه قدر مطلق جریان^۲ ارائه شده و تشخیص را در ناحیه سنکرون تضمین می‌کند است، هرچند که این روش، دارای

چکیده: تشخیص عیب و کنترل تحمل‌پذیر خطای توربین بادی، موجب افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن آن می‌شود. یکی از اجزای الکتریکی توربین بادی با نرخ خطای بالا، مبدل توان است. در این مقاله، روش جدیدی به منظور کنترل تحمل‌پذیر خطای (FT) مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر ژنراتور دو سو تغذیه (DFIGN) ارائه شده است. با بروز خطا در هر یک از IGBTهای مبدل توربین بادی، عملکرد مبدل مخدوش شده و بخشی از سیگنال جریان هر ساق مبدل از بین می‌رود. کنترل‌کننده کلاسیک، این تغییر رفتار جریان را نمی‌تواند به نحو کاملی اصلاح کند، بنابراین سامانه عملکرد غیر عادی دارد و در نتیجه تولید توان با نوسانات زیادی همراه خواهد بود. به منظور جبران، در این مقاله یک روش جدید مبتنی بر کنترل مود لغزشی ارائه شده است. ابتدا با بروز خطا، سامانه تشخیص عیب، ساق معیوب را مشخص می‌کند و پس از پیکربندی مجدد سخت‌افزار، سامانه کنترل پیشنهادی مبتنی بر کنترل مود لغزشی، جایگزین سامانه کنترل کلاسیک و عملیات کلیدزنی می‌گردد. روش تشخیص عیب ارائه‌شده در این مقاله، مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی است و بر اساس تطبیق با پارامترهای عملکردی توربین بادی، توسعه داده شده است. روش FT پیشنهادی با استفاده از شبیه‌ساز سخت‌افزار در حلقه آزمایشگاهی با ژنراتور ۹۰ کیلووات DFIGN ارزیابی می‌شود. نتایج تجربی، دقت مناسب روش تشخیص عیب را نشان داده و از طرفی روش FT پیشنهادی به خوبی توانسته که جبران‌سازی خطای مدار باز IGBT را انجام دهد.

کلیدواژه: کنترل تحمل‌پذیر خطا، تشخیص عیب، توربین بادی، مبدل‌های پشت به پشت، کنترل تحمل‌پذیر مود لغزشی.

۱- مقدمه

امروزه موضوع انرژی و مسائل مربوط به آن یکی از چالش‌های مهم صنعت در جهان است. کیفیت، قابلیت اطمینان و تجدیدپذیری بودن انرژی از جمله نکات مهمی است که تولیدکنندگان و بهره‌برداران به عنوان دغدغه در نظر دارند [۱] و [۲]. یکی از روش‌های تأمین انرژی مورد نیاز که با توجه به منبع پایان‌ناپذیر آن در آینده نزدیک، جزء اصلی‌ترین روش‌های تولید انرژی خواهد بود، توربین بادی است. توربین بادی به عنوان یکی از مبدل‌های انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی، مستعد خطاهای مختلف

این مقاله در تاریخ ۲۲ مهر ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۳ خرداد ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

مهرنوش کمرزرین، دانشجوی دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، (email: kamarzarrin.mehrnoosh@sru.ac.ir).

محمدحسین رفان، استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، (email: refan@sru.ac.ir).

پرویز امیری، دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، (email: pamiri@sru.ac.ir).

1. Absolute Normalized DC Current

2. Current Absolute Normalized Park-Vector

مقاله از استراتژی DTC و با استفاده از SVM چهار برداره کنترل انجام می‌شود. در [۳۰] 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 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 ترکیب می‌کند. اثربخشی این روش از طریق داده‌های تست ثبت‌شده در شرایط مختلف عملکرد سالم و معیوب نشان داده شده است. در [۳۱]، یک روش جدید تشخیص عیب مبدل‌های قدرت برای سامانه توربین‌های بادی به منظور کاهش زمان خرابی، افزایش راندمان تعمیر و نگهداری و کاهش هزینه مدیریت سامانه پیشنهاد شده است. دقت تشخیص عیب را می‌توان به راحتی تحت تأثیر غیر خطی و نویز سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در شرایط کاری مختلف قرار داد. ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده در روش پیشنهادی، ابتدا با آنالیز حالت تجربی مجموعه پردازش می‌شود و یک سری توابع حالت ذاتی را می‌توان به دست می‌آورد. سپس آنتروپی هنجار بر طبق ویژگی‌های آماری، محاسبه گردیده و اطلاعات IMF-NE استخراج شده برای توصیف ویژگی‌های تشخیصی استفاده می‌شود. مقاله [۳۲] ارائه یک روش FTC با استفاده از مبدل مدولاسیون عرض پالس در یک مبدل AC/DC است که در چارچوب ریزشبه کار می‌کند. گروهی از بارهای به هم پیوسته و منابع انرژی تجدیدپذیر توزیع شده مانند مزرعه بادی، مزرعه فتوولتائیک خورشیدی و ذخیره انرژی باتری برای تشکیل یک ریزشبه در نظر گرفته می‌شوند. هدف، طراحی FTC مبتنی بر مدولاسیون عرض پالس به منظور عملکرد مناسب ریزشبه در شرایط ناشی از نقص عملکردهای ائتلاف شبکه است و روش کنترلی غیر فعال پیشنهادی بر اساس کنترل پیش‌بین می‌باشد.

در این مقاله، یک ساختار جدید کنترلی به منظور کنترل تحمل‌پذیر خطا در هنگام رخداد خطای مدار باز، در یکی از سوئیچ‌های مبدل سمت روتور و یا سمت شبکه در ژنراتورهای DFIG پیشنهاد شده است. در این روش پیش از رخداد خطا، ساختار مبدل به صورت مبدل معمولی شش ساق است. علاوه بر دوازده سوئیچ IGBT در این ساختار، سه سوئیچ دوجته (در اینجا تریاک) بین فازهای مبدل سمت روتور و مبدل سمت شبکه در نظر گرفته شده است. سوئیچ‌های دوجته می‌توانند تریاک، IGBT، پل دیودی و یا IGBT‌های موازی و معکوس باشند. در این مقاله به جهت حداقل کردن هزینه از تریاک استفاده می‌شود. با رخدادن خطا، تریاک مربوط به فازی که دچار خطا شده است، فعال گردیده و فرمان گیت IGBT‌های ساق معیوب قطع می‌شود. با این تغییر، مبدل دارای پنج ساق سالم خواهد بود که یکی از ساق‌ها به عنوان ساق مشترک بین مبدل سمت روتور و سمت شبکه قرار می‌گیرد. در این نوع مبدل به منظور کنترل، با توجه به این که تعداد IGBT‌ها به ده عدد کاهش می‌یابد. پس از تغییرات پیکربندی مجدد سخت‌افزاری، کنترل کننده کلاسیک و بخش SVM کنار رفته و کنترل کننده پیشنهادی جایگزین کنترل کننده PI می‌شود. روش پیشنهادی کنترل تحمل‌پذیر خطا بر اساس کنترل مود لغزشی است که علاوه بر کنترل فرایند در هنگام رخداد خطا، عملیات کلیدزنی را نیز انجام می‌دهد. برای پیاده‌سازی و ارائه روش پیشنهادی از ساختار آزمایشگاهی ۹۰ کیلووات استفاده می‌شود.

در این مقاله، از یک روش تولید و ارزیابی مانده مبتنی بر داده‌های

پیچیدگی تنظیمات و محاسبات و زمان پردازش بالا است [۲۳]. به منظور افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن توربین‌های بادی، یک روش تشخیص خطای جدید برای خطاهای مدار باز در مبدل‌های پشت به پشت توربین‌ها با استفاده از ژنراتورهای PMSG در [۲۴] پیشنهاد شده است. این روش، اولین روشی است که از دامنه لحظه‌ای به عنوان کمیت اصلی برای فرمول‌بندی متغیرهای تشخیصی استفاده می‌کند که می‌تواند حالات مختلف هر سوئیچ را به طور دقیق و بدون تأثیر تغییرات سرعت تشخیص دهد. این روش همچنین از تبدیل وزنی هیلبرت لغزشی برای تخمین دامنه لحظه‌ای برای حذف تأثیر نهایی و حمل اطلاعات چندخطایی مدار باز استفاده می‌کند. در این پژوهش برای تعیین محل سوئیچ‌های معیوب، یک روش مکان‌یابی با استفاده از پردازش تطبیقی نمونه‌های سیگنال برای حذف تأثیر تغییرات سرعت استفاده شده است. در نهایت، ترکیب این متغیرهای تشخیصی با آستانه‌های شناسایی، تشخیص و مکان‌یابی خطای مدار باز سوئیچ برای مبدل‌های سمت PMSG و سمت شبکه را ممکن می‌سازد. همچنین در خصوص مرور روش‌های کنترل تحمل‌پذیر خطا در مبدل‌های پشت به پشت، در [۲۰] به طراحی کنترل تحمل‌پذیر خطا بر اساس توپولوژی شش ساق به پنج ساق برای خطای مدار باز سوئیچ IGBT در مبدل پشت به پشت مبتنی بر ژنراتور DFIG پرداخته شده است. روش کنترلی مورد استفاده در این مقاله، روش PWM متداول است که با افزودن سیگنال توالی صفر (ZSS)، مبدل با توپولوژی پنج ساق کنترل شده است. افزودن ZSS تأثیری در ولتاژ خطا یا فاز ایجاد نمی‌کند، زیرا مقدار سیگنال یکسانی به مراجع اضافه می‌گردد اما برای کاهش هارمونیک جریان، درجه آزادی ایجاد می‌کند. اساس کنترلی این روش، استفاده از کنترل جهت‌یابی ولتاژ (VOC) است. مقاله [۲۵] به ارائه توپولوژی پنج ساق در توربین‌های DFIG با مبدل مشابه [۲۰] پرداخته است. در این مقاله علاوه بر خطای مدار باز، به خطای اتصال کوتاه نیز پرداخته شده است. مقاله [۲۶] به ارائه توپولوژی پنج ساق، با ساق مشترک پرداخته است. روش پیشنهادی کنترلی، مشابه [۲۰] است. در این مقاله از توپولوژی پنج ساق برای کنترل تحمل‌پذیر خطا استفاده نشده و این توپولوژی صرفاً به عنوان ساختار جدید در مبدل پشت به پشت معرفی شده است. در [۲۷] از روش استفاده‌شده در [۲۰] بهره برده شده و از یک ساق افزونه (هفت ساق) استفاده گردیده که با شش تریاک^۳ به شش فاز در مبدل‌های سمت شبکه و سمت روتور متصل شده و در صورت بروز خطا در یک ساق می‌تواند با روشن شدن تریاک مربوط، جایگزین ساق معیوب شود. با توجه به این که پس از بروز خطا همچنان مبدل به صورت مبدل معمولی شش ساق است، به منظور کنترل آن از روش مدولاسیون بردار فضایی (SVM) استفاده شده و روش کنترلی تغییر نمی‌کند. وجود دو IGBT افزونه، هزینه روش را افزایش می‌دهد. در [۲۸] به کنترل تحمل‌پذیر خطا در مبدل پشت به پشت در ژنراتور PMSG پرداخته شده است که در آن از روش کنترلی DTC اصلاح‌گردیده و با استفاده از یک Lookup table بهره برده شده است. در [۲۹]، کنترل تحمل‌پذیر خطا در مبدل سمت شبکه در ژنراتور PMSG ارائه گردیده که هر فاز مبدل سمت شبکه به نقطه سر وسط لینک DC متصل شده است. با ایجاد عیب در هر ساق مبدل سمت شبکه، لینک DC جایگزین ساق معیوب می‌شود. در این

1. Zero Sequence Signal
2. Voltage-Oriented Control
3. Triac
4. Space Vector Modulation

ژنراتور و خروجی آن، جریان‌های سمت روتور و سمت شبکه است. به منظور آموزش هر لایه، از شبکه عصبی پس‌انتشار (BPNN) استفاده شده است [۳۳].

۱-۲ بلوک اندازه‌گیری داده‌های ورودی

به منظور بررسی و تشخیص خطا، ابتدا می‌بایست اطلاعات مورد نظر جمع‌آوری گردد. هشت دسته سیگنال برای ورودی شبکه عصبی انتخاب شده است. داده‌های مورد نیاز شامل جریان سه‌فاز سمت مبدل روتور، جریان سه‌فاز سمت مبدل شبکه، توان و سرعت ژنراتور است که با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری (در بخش آزمایش‌ها ارائه می‌شود) مطابق شکل ۱ جمع‌آوری می‌گردد. این سیگنال‌ها نسبت به خطای مدار باز IGBT و تغییرات عملکرد توربین بادی در نواحی سنکرون، زیر سنکرون و فوق سنکرون حساس هستند.

۲-۲ بلوک پیش‌پردازش

به منظور آموزش مناسب باید بر روی داده‌های ورودی، پیش‌پردازش انجام شود. ابتدا داده‌های خارج از محدوده حذف می‌شوند و بررسی داده‌ها برای یافتن داده‌ها در محدوده مناسب انجام می‌گردد. با این حال برای تشخیص یک ناهنجاری، باید با داده‌ها با احتیاط رفتار شود. با استفاده از روش همبستگی متقابل، این پیش‌پردازش انجام گردیده و با تغییر سیگنال ورودی، یک سازگاری مناسب ایجاد می‌شود [۳۳].

۳-۲ بلوک آموزش

به منظور آموزش و مدل‌سازی سیگنال از ۱۵۰۰ داده و با شبکه عصبی با مشخصات شش پرسپترون چندلایه برای یک شبکه عصبی مصنوعی feed-forward با یک لایه ورودی، یک لایه مخفی و یک لایه خروجی، استفاده می‌شود. از این ۶ شبکه برای مدل‌سازی سیگنال‌های جریان‌های مبدل سمت روتور و سمت شبکه استفاده می‌شود. علاوه بر ورودی‌های جریان‌های سمت روتور و شبکه، از توان و سرعت ژنراتور نیز برای آموزش استفاده می‌گردد. این موضوع با توجه به رفتار توربین بادی در نواحی عملکردی مختلف، برای دستیابی به مدل دقیق‌تر، کمک‌کننده است. ساختار شبکه عصبی بر همگرایی آن تأثیر می‌گذارد و بنابراین تلاش گردید که بهینه‌ترین ساختار پیدا شود. ورودی‌ها و خروجی‌های مورد استفاده در مدل‌سازی در شکل ۱ آمده است. در بهترین شرایط با در نظر گرفتن معیار MSE، مقادیر شبکه عصبی، انتخاب و تعداد نرون‌های هر لایه با اجرای چندباره شبکه تعیین می‌شود. سه بردار $P(n-k)$ ، $I_{s,r,a,b,c}(n-i)$ و $\omega_s(n-k)$ به عنوان ورودی استفاده می‌شوند که در آنها P توان، ω_s سرعت ژنراتور و I جریان سمت استاتور و سمت روتور به تفکیک برای هر فاز است. از اطلاعات آزمایشگاهی برای آموزش پس از حذف اطلاعات خارج از محدوده و پیش‌پردازش استفاده می‌شود. همچنین از اطلاعات رفتار نرمال توربین یا ستاپ آزمایشگاهی برای آموزش استفاده گردیده است.

وقتی رفتار توربین طبیعی است و داده‌ها سالم هستند، در چنین شبکه‌ای، تعداد سلول‌های عصبی در لایه‌های میانی، ورودی و خروجی (N) مهم است. هدف از شش شبکه، مدل‌سازی جریان است و بنابراین نرون خروجی هر شبکه یک است. در مرحله آموزش، مقادیر مناسب k ، i و N باید در مرحله بهینه‌سازی تعیین شوند. ابتدا مقادیر اولیه این سه

جریان سمت روتور و سمت شبکه و همچنین توان و سرعت چرخشی ژنراتور برای تشخیص خطا بر اساس مدل شبکه عصبی مصنوعی، استفاده می‌شود. شبکه عصبی مصنوعی، رفتار نرمال سیگنال‌های جریانی را با دریافت ورودی جریان‌ها، هم‌زمان با سیگنال توان و سرعت ژنراتور، تولید می‌کند. با تفریق مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر مدل نرمال شبکه عصبی، مانده تولید می‌شود. در صورت تشخیص خطا بر اساس تعیین آستانه روی سیگنال مانده، سامانه پیشنهادی از حالت کنترل کلاسیک به حالت کنترل تحمل‌پذیر خطا تغییر وضعیت می‌دهد.

نوآوری‌های مقاله به شرح زیر است:

(۱) ساختار کنترلی جدیدی بر اساس روش توسعه‌یافته مود لغزشی به منظور کنترل مبدل پشت به پشت توربین بادی در شرایط خطا ارائه شده است.

(۲) روش پیشنهادی برای کنترل تحمل‌پذیر خطای مبدل پشت به پشت توربین بادی، مبتنی بر ژنراتور DFIG استفاده می‌شود.

(۳) اثبات پایداری و تجزیه و تحلیل روش پیشنهادی بر اساس نظریه لیاپانوف انجام شده است.

(۴) تشخیص عیب مدار باز سوئیچ‌های IGBT مبدل پشت به پشت توربین بادی توسط ANN، بر اساس تولید مانده انجام شده است.

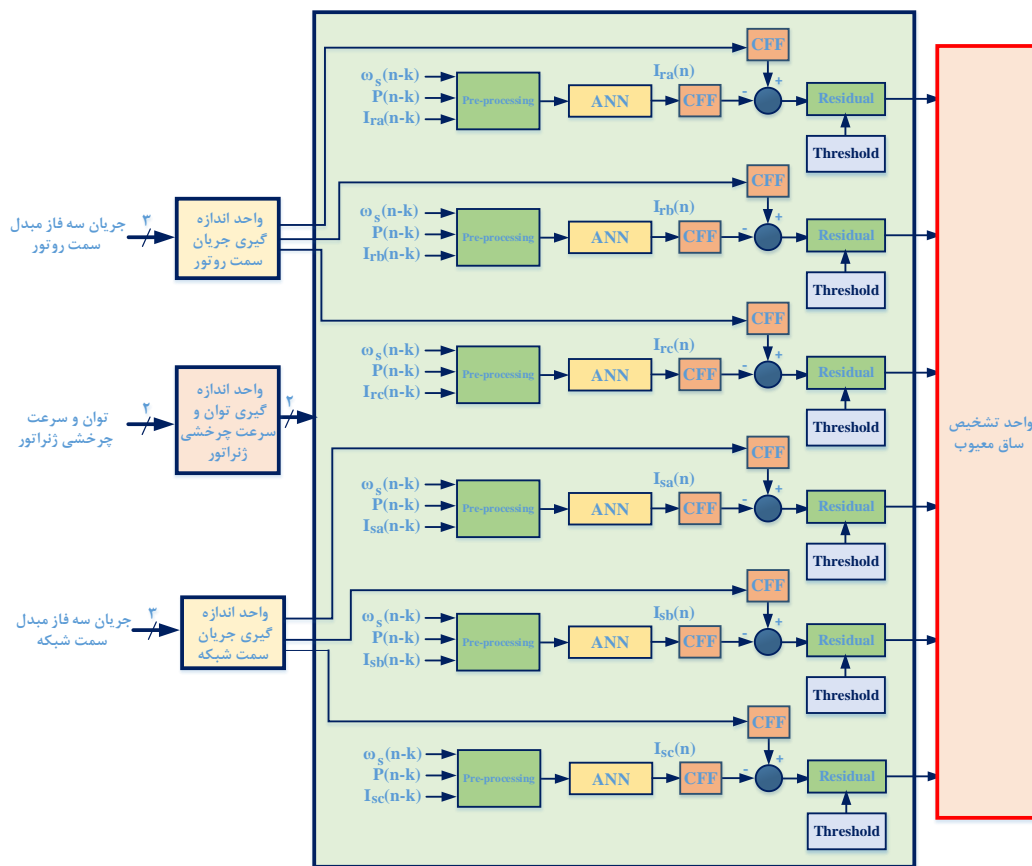
(۵) روش جدید کنترل تحمل‌پذیر خطا با سخت‌افزار ۹۰ کیلووات آزمایشگاهی تست شده است.

ساختار مقاله به این شرح است: در بخش دوم، تشخیص عیب خطای مدار باز مبدل پشت به پشت توضیح داده شده است. بخش سوم مقاله پیکربندی مجدد سخت‌افزاری در هنگام بروز خطای مدار باز است. در بخش چهارم، ساختار پیشنهادی مورد استفاده برای کنترل تحمل‌پذیر خطا توضیح داده شده است. سخت‌افزار آزمایشگاهی ۹۰ کیلووات در بخش پنجم معرفی می‌شود. نتایج آزمایش در بخش ششم ارائه شده و نهایتاً آخرین بخش مقاله، نتیجه‌گیری است.

۲- تشخیص خطای مدار باز سوئیچ IGBT

به روش محاسبه مانده و با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی

هر سامانه کنترل تحمل‌پذیر خطا، به بخش تشخیص خطا نیاز دارد. هنگامی که سیگنال خطا بیشتر از آستانه تعیین‌شده باشد، زیرسامانه کنترل تحمل‌پذیر خطا سعی می‌کند که با تغییر ساختار کنترل، خطا را جبران کرده و عملکرد سامانه را در سطح مطلوب نگه دارد. با استفاده از روش‌های مختلفی می‌توان تشخیص خطا را انجام داد که در این مقاله از روش تولید مانده استفاده شده است. روش‌های مختلفی برای تولید مانده وجود دارد. دو روش اصلی به عنوان روش‌های مبتنی بر مدل و مبتنی بر داده شناخته می‌شوند. در روش‌های مبتنی بر مدل (ماتریس حالت سامانه)، تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده از سامانه و سیگنال مدل ریاضی آن محاسبه گردیده و سپس ارزیابی مانده برای فرایند تشخیص خطا به دست می‌آید. تشخیص خطا دارای دو حالت سالم و غیر سالم بوده و مقدار مانده، تعیین‌کننده بین حالت سالم و معیوب است. به دلیل فقدان مدل‌های ریاضی دقیق در این مقاله، از مدل رفتار نرمال مبتنی بر روش شبکه عصبی مصنوعی به منظور تشخیص خطا استفاده می‌شود. شبکه عصبی مورد استفاده دارای چهار لایه است. ورودی‌های آن، سه سیگنال جریان سمت روتور، سه سیگنال جریان سمت شبکه، توان و سرعت



شکل ۱: ساختار پیشنهادی به منظور تشخیص خطا.

روتور و جریان مدل سازی نرمال شده سمت روتور می پردازند

$$F_{s-k;a,b,c} = \frac{|I_{sk}|_{RMS}}{|I_{sk}|_{AV}} \quad (۱)$$

$$\hat{F}_{s-k;a,b,c} = \frac{|\hat{I}_{sk}|_{RMS}}{|\hat{I}_{sk}|_{AV}} \quad (۲)$$

$$F_{r-k;a,b,c} = \frac{|I_{rk}|_{RMS}}{|I_{rk}|_{AV}} \quad (۳)$$

$$\hat{F}_{r-k;a,b,c} = \frac{|\hat{I}_{rk}|_{RMS}}{|\hat{I}_{rk}|_{AV}} \quad (۴)$$

و k مقادیر سه فاز a ، b و c است.

رفتارهای CFF در شرایط رخداد خطا با رفتار در شرایط سالم، متفاوت است و بنابراین عامل CFF به منظور تشخیص خطا مفید می باشد. در شرایط سالم اگر میزان مانده (تفریق CFF مدل سازی شده سالم از CFF اندازه گیری شده) منفی باشد، نشان می دهد که ساق مورد بررسی معیوب است. خطای مدل سازی شبکه عصبی در مدل سازی جریان سینوسی با این روش تا حد زیادی خنثی می شود. مثبت بودن این مانده، نشان دهنده سلامت ساق و سوئیچ ها است.

به منظور تشخیص خطا در هر ساق، در مبدل سمت روتور و شبکه از روابط زیر استفاده می شود

$$R_{r-k;a,b,c} = \hat{F}_{r-k} - F_{r-k} \quad (۵)$$

$$R_{g-k;a,b,c} = \hat{F}_{g-k} - F_{g-k} \quad (۶)$$

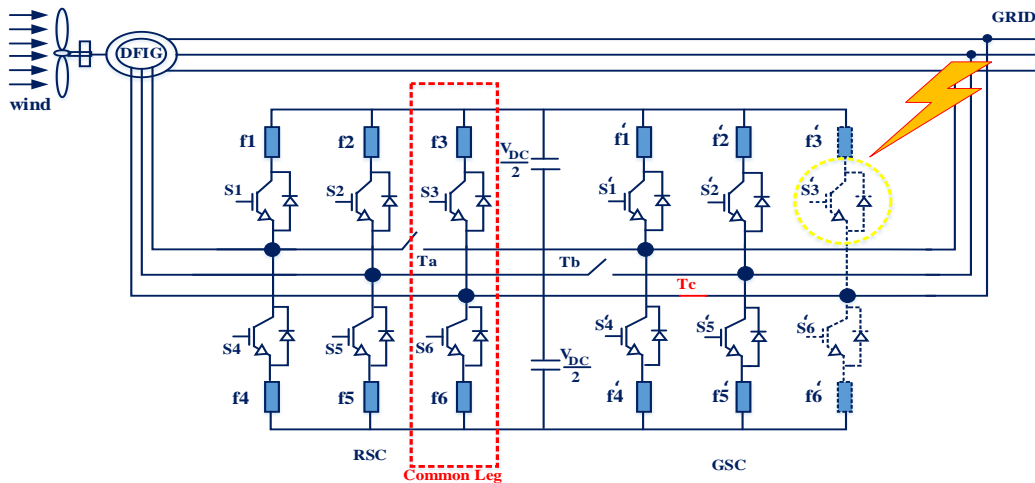
پارامتر شبکه آموزش داده می شود و سپس این موارد گام به گام تعیین می گردد: تعداد سلول های عصبی در لایه میانی، تعداد گام های داده های قبلی مربوط به جریان، توان و سرعت ژنراتور. در بهترین شرایط با در نظر گرفتن معیار MSE، این مقادیر استخراج شدند: $k = ۱$ ، $N = ۵$ و $i = ۱$.

۲-۴ بلوک ارزیابی و تست

به منظور ارزیابی و تست مدل آموزش دیده، از ۵۰۰ داده مجزا استفاده گردیده است. در این مرحله بر اساس داده های اندازه گیری شده، رفتار جریان های مدل شده بررسی می گردد و شبکه عصبی از مرحله آموزش به مرحله تست تغییر وضعیت می دهد و به تولید مانده کمک می کند.

۲-۵ بلوک تولید مانده

مانده بر اساس اختلاف سیگنال مدل شده و سیگنال اندازه گیری شده به دست می آید. به منظور تحلیل مانده به دست آمده و تشخیص ساق معیوب، ابتدا به محاسبه فاکتور شکل جریان (CFF) سیگنال جریان های اندازه گیری شده و سیگنال جریان های مدل شده پرداخته می شود. مقدار این خروجی در حالت عادی و بدون خطا $۱/۱۱۱$ و تفاوت بین دو خروجی، مقدار مانده را به دست می آورد. بر اساس آستانه تعیین شده، خطای مدار باز سوئیچ برای هر ساق مشخص می شود. پس از اندازه گیری جریان، با کمک این فاکتور، جریان نرمالیزه شده و اثر تغییرات جریان، خطای مدل شبکه عصبی و هشدار اشتباه را خنثی می کند. روابط (۱) تا (۴) به ترتیب به تعریف فاکتور CFF، جریان اندازه گیری نرمال شده سمت شبکه، جریان مدل سازی شده نرمال شده سمت شبکه، جریان اندازه گیری نرمال شده سمت



شکل ۲: پیکربندی سخت‌افزاری کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز در میدل پست به پشت در توربین بادی مبتنی بر DFIG در بروز یک خطا.

سخت‌افزار میدل، کنترل آن نیز دچار ایراد شده و نیاز به بازطراحی نرم‌افزاری وجود دارد. بهترین روش از لحاظ توپولوژی‌های سخت‌افزاری مورد استفاده در میدل پست به پشت توربین بادی مبتنی بر DFIG، توپولوژی پنج ساق با ساق مشترک است. این روش دارای حداقل تعداد ترایاک است و در صورت بروز خطا در ساق هر سمت از میدل پست به پشت (سمت روتور و یا سمت شبکه)، امکان بازیابی برای آن وجود دارد. توپولوژی پیشنهادی به صورت شکل ۲ ارائه گردیده که در آن از سه ترایاک T_a ، T_b و T_c استفاده شده است. در صورت بروز خطا و تشخیص مکان آن توسط سامانه تشخیص و مکان‌یابی خطا، گیت مربوط به هر دو IGBT آن ساق توسط کنترل‌کننده، صفر و ترایاک مربوط روشن می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۲، IGBT S_3' مدار باز شده و ساق ششم حذف می‌شود و ترایاک T_c روشن خواهد شد. در این حالت میدل به صورت پنج ساق حاصل شده و کنترل پنج ساق به آن اعمال می‌شود که ساق سوم، ساق مشترک است.

۴- روش پیشنهادی کنترل تحمل‌پذیر خطای مدار باز سوئیچ IGBT در میدل پست به پشت

کنترل مود لغزشی، به عنوان یک روش کنترلی غیر خطی مقاوم در برابر ناپیچینی‌های ساختاری معرفی می‌گردد [۳۴] تا [۳۶]. به طور کلی در کنترل‌کننده مود لغزشی، سطح لغزشی تعیین می‌گردد که منجر به کاهش مرتبه سامانه شده و با انتخاب ضرایب مناسب، پایداری سامانه را تضمین کند [۳۳] و [۳۵].

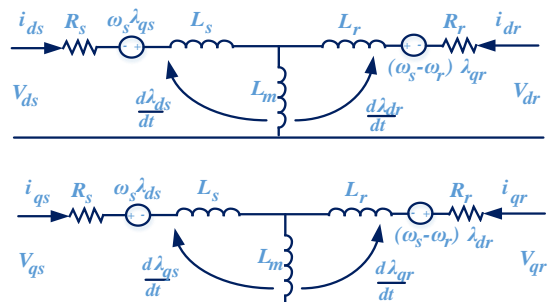
به منظور طراحی کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا، مدل ریاضی DFIG با استفاده از قاب مرجع سنکرون dq به صورت شکل ۳ در نظر گرفته شده است. همان طور که مشخص است، معادلات سیم‌پیچ روتور و استاتور به صورت زیر می‌باشند

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_s \lambda_{qs} \quad (7)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_s \lambda_{ds} \quad (8)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (9)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (10)$$



شکل ۳: مدار معادل d-q DFIG در قاب مرجع سنکرون.

که در آن $R_{r-k:a,b,c}$ مانده مربوط به میدل سمت روتور و $R_{g-k:a,b,c}$ مانده مربوط به میدل سمت شبکه است. سپس با در نظر گرفتن یک سطح آستانه به تشخیص خطا پرداخته می‌شود. عبور از سطح آستانه تعیین‌شده به معنی یک وضعیت غیر طبیعی در جریان‌های هدف است. برای تعیین آستانه، اگر مدل رفتار نرمال دقیقاً بر مقادیر اندازه‌گیری منطبق بود، این مقدار صفر خواهد بود. با توجه به این که خطای شبکه عصبی در مدل‌سازی‌ها با CFF نرمال می‌شود و این مانده حول صفر نوسان می‌کند، مقدار دقیق آستانه -0.1 است. تکنیک محاسبه این است که پس از انجام عملیات آماری روی سیگنال در محدوده زمانی، سیگنال مانده ایجاد شود. این روش میزان هشدارهای کاذب (FAR) و نرخ هشدار اشتباه (MAR) را کاهش می‌دهد. ساختار تشخیص خطا با این تکنیک، قوی و در برابر تغییرات نقاط کاری، شرایط متغیر توربین بادی و سیگنال‌های مختل، پایدار است.

۳- پیکربندی مجدد سخت‌افزاری میدل پست به پشت در صورت بروز خطای مدار باز در یک سوئیچ IGBT

همان طور که در بخش مقدمه توضیح داده شد، کنترل تحمل‌پذیر خطا در میدل‌های پشت به پشت توربین بادی، شامل دو رویکرد سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است. از آنجایی که با مدار باز شدن یک سوئیچ IGBT در واقع، گیت آن سوئیچ باز شده و از مدار خارج می‌شود، از لحاظ سخت‌افزاری تغییر ایجاد شده و نیاز به بازسازی سخت‌افزاری وجود دارد. همچنین از آنجایی که کنترل‌های تعریف‌شده در میدل‌های پشت به پشت بر مبنای منبع ولتاژ بر اساس ساختار آنها طراحی می‌شوند، با تغییر در

1. False Alarms Rate
2. Misses Alarm Rate

$$S_d = e_d + C_d \int e_d dt \quad (۱۹)$$

$$S_q = e_q + C_q \int e_q dt \quad (۲۰)$$

که C_d و C_q ضرایب مثبت هستند. بر اساس روابط مدل ریاضی DFIG و با جایگزینی (۱۲) تا (۱۴) در (۷) تا (۱۰) و مشتق زمانی جریان‌های روتور در قاب dq، رابطه زیر به دست خواهد آمد

$$\frac{di_{rd}}{dt} = \frac{V_{rd}}{L'_r} - \frac{R_r}{L'_r} i_{rd} - \frac{L_m}{L_s L'_r} \frac{d\lambda_{sd}}{dt} - \omega_r (i_{rq} + \frac{L_m}{L_s L'_r} \lambda_{sq}) \quad (۲۱)$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = \frac{V_{rq}}{L'_r} - \frac{R_r}{L'_r} i_{rq} - \frac{L_m}{L_s L'_r} \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + \omega_r (i_{rd} + \frac{L_m}{L_s L'_r} \lambda_{sd}) \quad (۲۲)$$

که در آن $L'_r = L_r (1 - \frac{L_m}{L_s})$ است.

با استفاده از (۱۹) تا (۲۲)، دینامیک متغیرهای گیت IGBTها به صورت زیر بیان خواهد شد

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_d \\ \dot{S}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_d \\ \Gamma_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L'_r} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

$$\Gamma_d = f(i_{rd}^*, i_{rd}, i_{rq}^*, i_{rq}, \omega_r, \lambda_{sd}, \lambda_{sq}) \quad (۲۴)$$

$$\Gamma_q = f(i_{rd}^*, i_{rd}, i_{rq}^*, i_{rq}, \omega_r, \lambda_{sq}, \lambda_{sd}) \quad (۲۵)$$

بر طبق (۱۹)، (۲۰) و (۲۳)، درجه نسبی سامانه یک است زیرا با یک بار مشتق‌گیری زمانی از متغیرهای گیت IGBTها، سیگنال‌های کنترلی V_{rd} و V_{rq} ظاهر خواهند شد. از آنجایی که برای طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر مود لغزشی، برای همگرایی به صفر و پایداری، سامانه کنترلی مرتبه یک کافی است، با اعمال قانون کنترلی مرتبه اول، رابطه زیر به دست خواهد آمد

$$V_r = V_r \cdot \text{sgn}([S_a \ S_b \ S_c]^T) \quad (۲۶)$$

با جایگزینی (۱۸) و (۲۶) در (۲۳)، رابطه زیر به دست خواهد آمد

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_d \\ \dot{S}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_d \\ \Gamma_q \end{bmatrix} - \frac{2}{3} \frac{1}{L'_r} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} V_r \quad (۲۷)$$

رابطه (۲۷)، رابطه مستقیمی بین $[S_d \ S_q]^T$ و $[S_a \ S_b \ S_c]^T$ برقرار می‌کند که باید به گونه‌ای طراحی شود که با در نظر گرفتن (۲۶)، S_d و S_q در زمان محدود به صفر میل کنند. بنابراین شرایط مناسب برای $[S_a \ S_b \ S_c]^T$ را می‌توان به صورت رابطه زیر در نظر گرفت

$$[S_a \ S_b \ S_c]^T = M [S_d \ S_q]^T \quad (۲۸)$$

که M به صورت (۲۹) تعریف می‌شود

$$M = L'_r \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (۲۹)$$

از (۲۸)، $[S_a \ S_b \ S_c]^T$ به صورت رابطه زیر به دست خواهد آمد

معادلات شار استاتور و روتور در قاب مرجع سنکرون dq به صورت زیر می‌باشند

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (۱۱)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (۱۲)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (۱۳)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (۱۴)$$

با قراردادن (۱۱) تا (۱۴) در (۷) تا (۱۰)، می‌توان به یک مدل فضایی بر پایه جریان‌ها دست پیدا کرد.

طبق شکل ۲، سیگنال‌های $S_{1, \dots, 6}$ و همچنین $S'_{1, \dots, 6}$ ، سیگنال‌های باینری گیت‌های IGBT مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه هستند. همچنین $V_{ra, rb, rc}$ و $V_{ga, gb, gc}$ به ترتیب اختلاف ولتاژ بین نقطه میانی هر فاز و N برای دو مبدل سمت روتور و سمت شبکه در نظر گرفته می‌شوند. با این فرض رابطه بین ولتاژ هر فاز و سیگنال گیت هر IGBT به صورت رابطه زیر خواهد بود

$$V_r = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = V_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5 \ S_6]^T \quad (۱۵)$$

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = V_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times [S'_1 \ S'_2 \ S'_3 \ S'_4 \ S'_5 \ S'_6]^T \quad (۱۶)$$

با توجه به شباهت روابط در دو مبدل سمت شبکه و روتور، از این پس معادلات سمت روتور نوشته شده و به همین ترتیب، روابط برای مبدل سمت شبکه قابل تعمیم است. با معکوس کردن (۱۵)، (۱۷) به دست خواهد آمد

$$\begin{aligned} S_1 &= 0.5(1 + \frac{V_{ra}}{V_r}) & S_4 &= 1 - S_1 \\ S_2 &= 0.5(1 + \frac{V_{rb}}{V_r}) & S_5 &= 1 - S_2 \\ S_3 &= 0.5(1 + \frac{V_{rc}}{V_r}) & S_6 &= 1 - S_3 \end{aligned} \quad (۱۷)$$

با در نظر گرفتن (۷) تا (۱۰) در مدل‌سازی ریاضی DFIG، سیگنال ولتاژ روتور در قاب مرجع استاتور منتقل خواهد شد. همچنین رابطه بین ولتاژ روتور در قاب dq با ولتاژ سه‌فاز روتور مطابق با رابطه پارک و کلارک به صورت رابطه زیر خواهد بود

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

با هدف کنترل جریان با روش کنترلی مد لغزشی، در قاب dq، متغیرهای کلیدزنی IGBTها با در نظر گرفتن دو خطای جریان در قاب dq به فرم $e_d = i_{rd}^* - i_{rd}$ و $e_q = i_{rq}^* - i_{rq}$ ، طبق (۱۹) و (۲۰) تعریف می‌شوند

که $\text{sgn}(S_l) \neq \text{sgn}(S_m) = \text{sgn}(S_n)$ است، در حالی که $l \neq m \neq n$ و $l, m, n \in \{a, b, c\}$ می‌باشد و در نتیجه برای اطمینان از همگرایی، $\dot{V}_{lyp} < 0$ باید برای همه حالات l, m, n و n تضمین شود. به عبارت دیگر، $|g| > |f|$ باید برقرار باشد و بنابراین با در نظر گرفتن بدترین شرایط، رابطه زیر برقرار خواهد بود

$$V \geq \frac{9L_r'}{4} \max(|\Gamma_a|, |\Gamma_b|, |\Gamma_c|) \quad (37)$$

با این حال در عمل، سامانه با مقادیر کمتر از V پایدار باقی می‌ماند. بنابراین اگر شرایط موجود در (37) برقرار باشد، حتی در صورت وجود اغتشاش در ولتاژ شبکه، همگرایی جانبی S_d و S_q به صفر، با الگوریتم کنترلی پیشنهادی تضمین می‌شود.

این ساختار برای مبدل سمت شبکه نیز قابل تعمیم است. حال با فرض رخداد خطا در یک سوئیچ IGBT، پس از تشخیص ساق معیوب توسط سامانه تشخیص خطا، ابتدا فرمان گیت دو IGBT مربوط به آن ساق صفر شده و یک ساق به عنوان ساق مشترک بین دو مبدل قرار می‌گیرد. با این تغییر، دیگر دو مبدل به صورت مجزا در نظر گرفته نمی‌شوند و در این صورت، (31) با در نظر گرفتن 10 سوئیچ، بازنویسی و مابقی روابط برای این 10 سوئیچ تکرار می‌گردد. در نتیجه کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا با در نظر گرفتن 5 ساق، کنترل و سوئیچینگ مبدل را انجام می‌دهد. به عنوان مثال با فرض خرابی سوئیچ بالایی فاز سوم (فاز c) مبدل سمت روتور، ابتدا هر دو سوئیچ فاز c با صفر کردن گیت آنها حذف شده و سپس (15) و (16) به صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$V_{1, \dots, 10} = V \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5 \ S_6 \ S_7 \ S_8 \ S_9 \ S_{10}]^T \quad (38)$$

و سطح کنترلی مود لغزشی با در نظر گرفتن هر دو خطای جریان‌های روتور و استاتور در قاب dq تعریف می‌گردد و نهایتاً سیگنال کنترلی که باید اعمال گردد به صورت رابطه زیر خواهد بود

$$\begin{aligned} V_1 &= V \cdot \text{sgn}(S_{rd} \cos \theta_r + S_{rq} \sin \theta_r) \\ V_2 &= V \cdot \text{sgn}(S_{rd} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + S_{rq} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3})) \\ V_3 &= V \cdot \text{sgn}(S_{sd} \cos \theta_s + S_{sq} \sin \theta_s) \\ V_4 &= V \cdot \text{sgn}(S_{sd} \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) + S_{sq} \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3})) \\ V_5 &= V \cdot \text{sgn}(S_{sd} \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) + S_{sq} \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3})) \end{aligned} \quad (39)$$

ساختار نهایی پیشنهادی مقاله برای کنترل تحمل‌پذیر خطا بر اساس بلوک‌های مختلف تشریح‌شده مطابق با شکل 4 است.

$$\begin{aligned} [S_d \ S_q]^T [\dot{S}_d \ \dot{S}_q] &= M^{-1} [S_a \ S_b \ S_c]^T \cdot M^{-1} [\dot{S}_a \ \dot{S}_b \ \dot{S}_c] \\ &= (M^{-1})^T [S_a \ S_b \ S_c] \cdot M^T [|\Gamma_a| \ |\Gamma_b| \ |\Gamma_c|]^T - \frac{4}{9L_r'} V \times \begin{bmatrix} \text{sgn} S_a - 0.5 \text{sgn} S_b - 0.5 \text{sgn} S_c \\ \text{sgn} S_a - 0.5 \text{sgn} S_b - 0.5 \text{sgn} S_c \\ \text{sgn} S_a - 0.5 \text{sgn} S_b - 0.5 \text{sgn} S_c \end{bmatrix} \\ &= [S_a \ S_b \ S_c] [|\Gamma_a| \ |\Gamma_b| \ |\Gamma_c|]^T - \frac{4}{9L_r'} V \times [S_a \ S_b \ S_c] \times \begin{bmatrix} \text{sgn} S_a - 0.5 \text{sgn} S_b - 0.5 \text{sgn} S_c \\ \text{sgn} S_a - 0.5 \text{sgn} S_b - 0.5 \text{sgn} S_c \\ \text{sgn} S_a - 0.5 \text{sgn} S_b - 0.5 \text{sgn} S_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} S_a &= L_r' (S_d \cos \theta_r + S_q \sin \theta_r) \\ S_b &= L_r' (S_d \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + S_q \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3})) \\ S_c &= L_r' (S_d \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + S_q \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3})) \end{aligned} \quad (30)$$

بنابراین سیگنال کنترلی که باید اعمال شود، از جایگزینی (30) در (26) نتیجه می‌شود

$$\begin{aligned} V_{ra} &= V \cdot \text{sgn}(S_d \cos \theta_r + S_q \sin \theta_r) \\ V_{rb} &= V \cdot \text{sgn}(S_d \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + S_q \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3})) \\ V_{rc} &= V \cdot \text{sgn}(S_d \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + S_q \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3})) \end{aligned} \quad (31)$$

باید توجه گردد که عبارت ثابت L_r' در (30) حذف شده است، زیرا هیچ تأثیری در علامت $[S_a \ S_b \ S_c]^T$ ندارد. بنابراین سیگنال کنترلی فقط به حالت کلیدزنی انتخاب شده بستگی دارد و در برابر انحراف پارامترها حساس نیست. نهایتاً با استفاده از (31) و (17)، حالت‌های باینری کلیدزنی گیت IGBTها به دست می‌آید.

اثبات پایداری: در سامانه پایدار، متغیرهای کلیدزنی به صفر همگرا شده و بنابراین برای اثبات همگرایی، تابع لیاپانوف به فرم زیر تعریف می‌گردد

$$V_{lyp} = 0.5 [S_d \ S_q]^T [S_d \ S_q] \geq 0 \quad (32)$$

که می‌بایست مشتق زمانی آن منفی معین باشد. با مشتق‌گیری از (32)، رابطه زیر به دست می‌آید

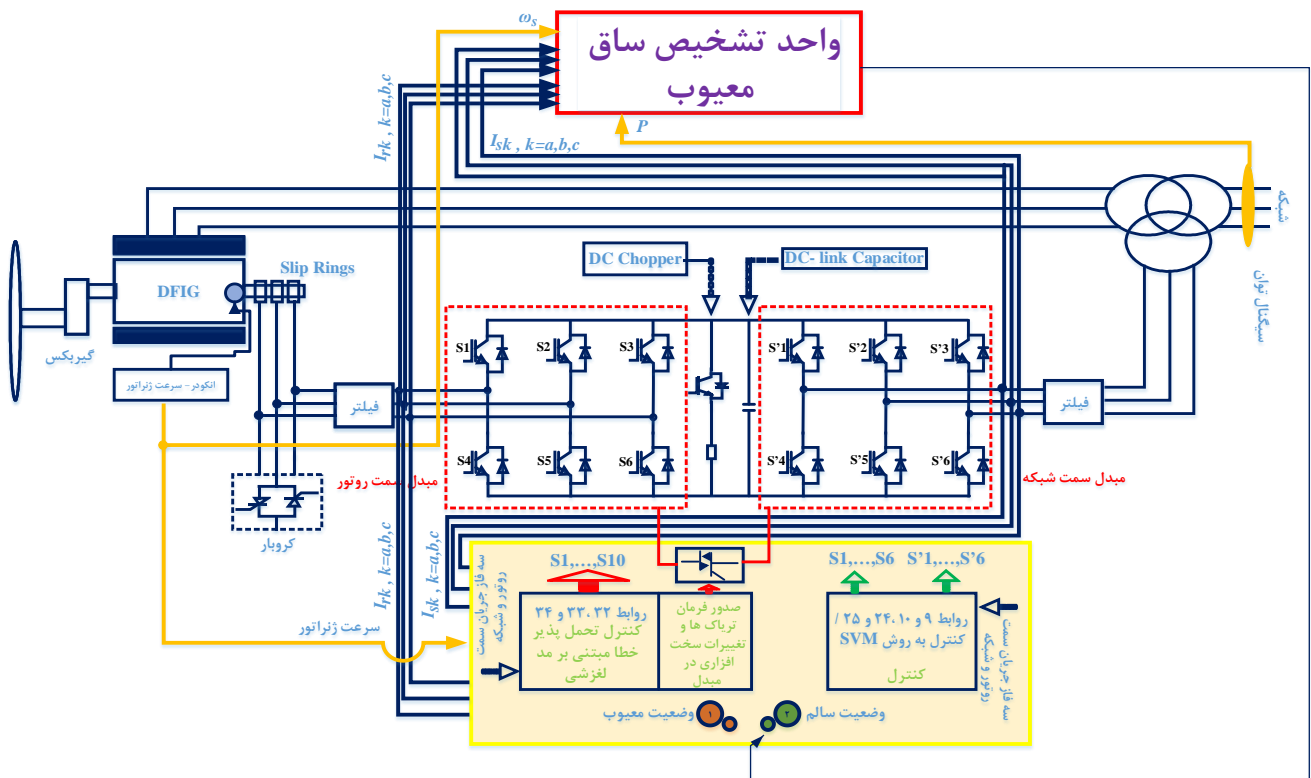
$$\begin{aligned} \dot{V}_{lyp} &= 0.5 ([\dot{S}_d \ \dot{S}_q]^T [S_d \ S_q] + [S_d \ S_q]^T [\dot{S}_d \ \dot{S}_q]) \\ &= [S_d \ S_q]^T [\dot{S}_d \ \dot{S}_q] \\ &= M^{-1} [S_a \ S_b \ S_c]^T \cdot M^{-1} [\dot{S}_a \ \dot{S}_b \ \dot{S}_c] \leq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

با اعمال (26) و (27) در (33)، (34) به دست خواهد آمد که در آن

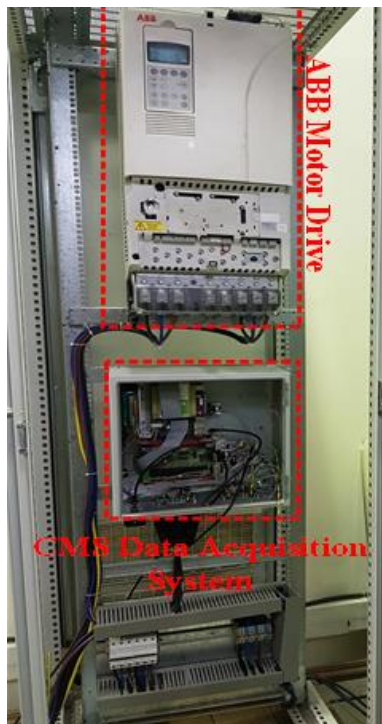
$$[|\Gamma_a| \ |\Gamma_b| \ |\Gamma_c|] = \frac{2}{3L_r'} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_d \\ \Gamma_q \end{bmatrix} \quad (35)$$

بسته به علامت‌های S_a ، S_b ، S_c ، 8 حالت ممکن از ترکیبات $\text{sgn}(S_a)$ ، $\text{sgn}(S_b)$ ، $\text{sgn}(S_c)$ وجود خواهد داشت. طبق (30)، هرگز نمی‌توان همه حالات +1 و -1 را به صورت همزمان باشد. بنابراین شش ترکیب باقی مانده که عبارت کلی برای \dot{V}_{lyp} که همه ترکیبات ممکن را نشان دهد، به صورت (36) خواهد بود

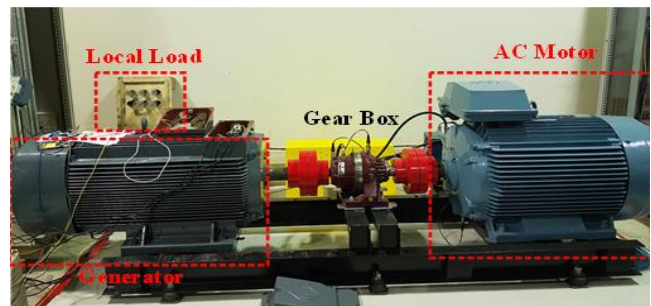
$$\begin{aligned} \dot{V}_{lyp} &= \underbrace{(S_a \Gamma_a + S_b \Gamma_b + S_c \Gamma_c)}_f \\ &\quad - \underbrace{\frac{4}{9L_r'} V \cdot (2|S_d| + |S_m| + |S_n|)}_g \end{aligned} \quad (36)$$



شکل ۴: ساختار پیشنهادی مقاله.



شکل ۶: تابلوی درایو و CMS.



شکل ۵: ساختار کلی تجهیزات متصل شده، موتور (سمت راست)، گیربکس (بخش میانی) و ژنراتور (سمت چپ).

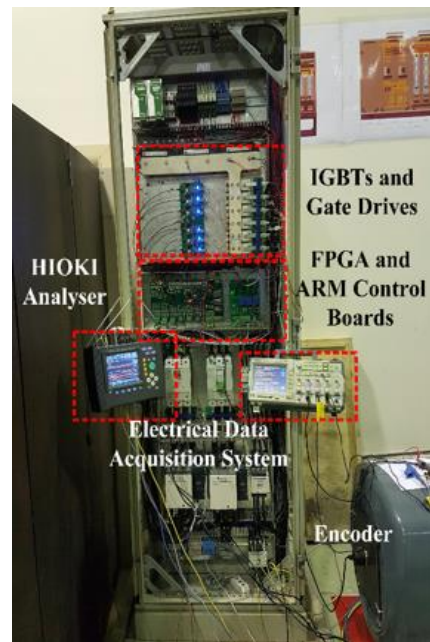
۵- ساختار سخت افزار آزمایشگاهی

یک سخت افزار آزمایشگاهی DFIG با توان خروجی ۹۰ kW به منظور ارزیابی روش تشخیص عیب و کنترل تحمل پذیر خطا توسعه داده شده است. این شبیه ساز شامل یک موتور محرک القایی ۱۱۰ kW ABB همراه با یک سامانه درایو، یک گیربکس خورشیدی با نسبت ۱ به ۳، یک ژنراتور VEM DFIG و یک مبدل شش شاخه پشت به پشت با برد کنترلی است. مبدل از یک سمت از طریق استاتور به شبکه و از سمت دیگر به روتور ژنراتور متصل است و دارای توان نامی ۳۰ kW می باشد. تصویر این شبیه ساز سخت افزاری در شکل ۵ آمده است. ژنراتور ۴ جفت قطب در فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۴۰۰ خط در نواحی عملکردی سنکرون (سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه)، زیر سنکرون و فوق سنکرون در سرعت ثابت و متغیر کار می کند. ستاپ از دو تابلو تشکیل شده است. تابلوی شکل ۶ از درایو مربوط به موتور و همچنین سامانه پایش وضعیت (CMS) برای اندازه گیری توان مبتنی بر پردازنده DSP تشکیل شده

است. سرعت باد شبیه سازی شده از طریق درایو موتور محرک به ستاپ اعمال می شود. الگوی باد از طریق واسط نرم افزاری LABView و بر اساس نمودار گشتاور-سرعت به درایو ABB-ACSA۸۰۰-۳۱ اعمال می شود. تابلوی دیگر (شکل ۷) مبدل پشت به پشت متشکل از دو منبع ولتاژ، از یک منبع خازنی ۷ میلی فاراد با ولتاژ لینک DC ۷۰۰ ولت، ترانسفورماتور ورودی و فیلتر خروجی ۵ میلی اهم ۸۰۰ میکروهانری تشکیل شده است. در طراحی برد توان مبدل از ۶ سوئیچ با دو IGBT متصل به هم امپیر مشترک استفاده شده است. یک مدار کروبار برای

جدول ۱: پارامترهای تجهیزات اصلی شبیه‌ساز سخت‌افزاری.

پیش‌رانه	
توان	۹۰ کیلووات
سرعت	۱۴۸۸ دور بر دقیقه
ولتاژ استاتور	۴۰۰ ولت
ولتاژ لینک DC	۷۰۰ ولت
فرکانس منبع ولتاژ	۵۰ هرتز
جریان	۱۹۹
گشتاور	۵۷۸ نیوتن متر
تعداد قطب	۴
اندوکتانس مغناطیسی	۱۲۰/۴ میلی‌هائری
cos Φ	۰/۸۸
مقاومت استاتور	۲۴/۸ میلی‌اهم
اندوکتانس استاتور	۴۴ میلی‌هائری
مقاومت روتور	۱۶/۶ میلی‌اهم
اندوکتانس روتور	۳۳ میلی‌هائری
اطلاعات کلی گیربکس	گیربکس تک طبقه با نسبت یک ۳۳/۳
اطلاعات کلی موتور محرک	۸ قطب، ۵۵ کیلووات، ۴۰۰ ولت، ۷۴۲ دور بر دقیقه
ایزولاسیون سیم‌پیچ استاتور	Thermal class ۱۵۵, optional ۱۵۵ [F(B)] to IEC/EN ۶۰۰۳۴-۱
مبدل	
مقاومت فیلتر	۵ میلی‌اهم
اندوکتانس فیلتر	۸۰۰ میکروهائری
فرکانس نمونه‌برداری	۱۰۰ کیلوهرتز
فرکانس سوئیچینگ	۲/۵ کیلوهرتز
کنترل	FOC
خازن لینک DC	۷ میلی‌فاراد



شکل ۷: تابلوی مبدل پشت به پشت.

جلوگیری از اتصال کوتاه وجود دارد. روش پیشنهادی تشخیص عیب و کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا برای مبدل بر اساس برد دیجیتال کنترلی مبتنی بر ARM/FPGA با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ کیلوهرتز برای کانال‌های A/D پیاده‌سازی شده است. سیگنال‌های کلیدزنی بر اساس فرکانس‌های ۲/۵ کیلوهرتز، تولید و از طریق فیبر نوری به گیت درایو، منتقل و به IGBT اعمال می‌شوند. پارامترهای شبیه‌ساز سخت‌افزاری در جدول ۱ آمده‌اند. برای اندازه‌گیری سیگنال‌های مورد نیاز در این مقاله از ساختاری مشابه شکل ۸ استفاده شده است. سرعت چرخشی ژنراتور با استفاده از تاکومتر و به عنوان ورودی در دستگاه CMS اندازه‌گیری می‌شود. سیگنال‌های کنترلی مورد نیاز در برد کنترل و در واحد آرشو داده FPGA ذخیره می‌گردد. آنالیزور توان Hioki، اطلاعات جریان/ولتاژ سه‌فاز روتور- استاتور را اندازه‌گیری می‌کند. اطلاعات توان از طریق سامانه ISTEK CMS اندازه‌گیری می‌شود. جدول ۲ اطلاعات کلی تجهیزات اندازه‌گیری شبیه‌ساز سخت‌افزاری را نشان می‌دهد. برای پیاده‌سازی سناریوی بازیابی ساختاری سخت‌افزار، پس از وقوع خطای مدار باز سوئیچ IGBT از مدار ترایاک استفاده می‌شود که این مدار، دستورات را از برد کنترل اصلی مبدل دریافت می‌کند (مشابه شکل ۸). با استفاده از ترایاک، یکی از شاخه‌ها به صورت مشترک استفاده می‌شود. در شکل ۹ نسبت تبدیل گیربکس، تعیین‌کننده سرعت ژنراتور خواهد بود که سرعت ژنراتور به عنوان یکی از ورودی‌های کانال تجهیز CMS اندازه‌گیری می‌گردد. سرعت موتور محرک از روی درایو خوانده می‌شود.

۶- نتایج آزمایش

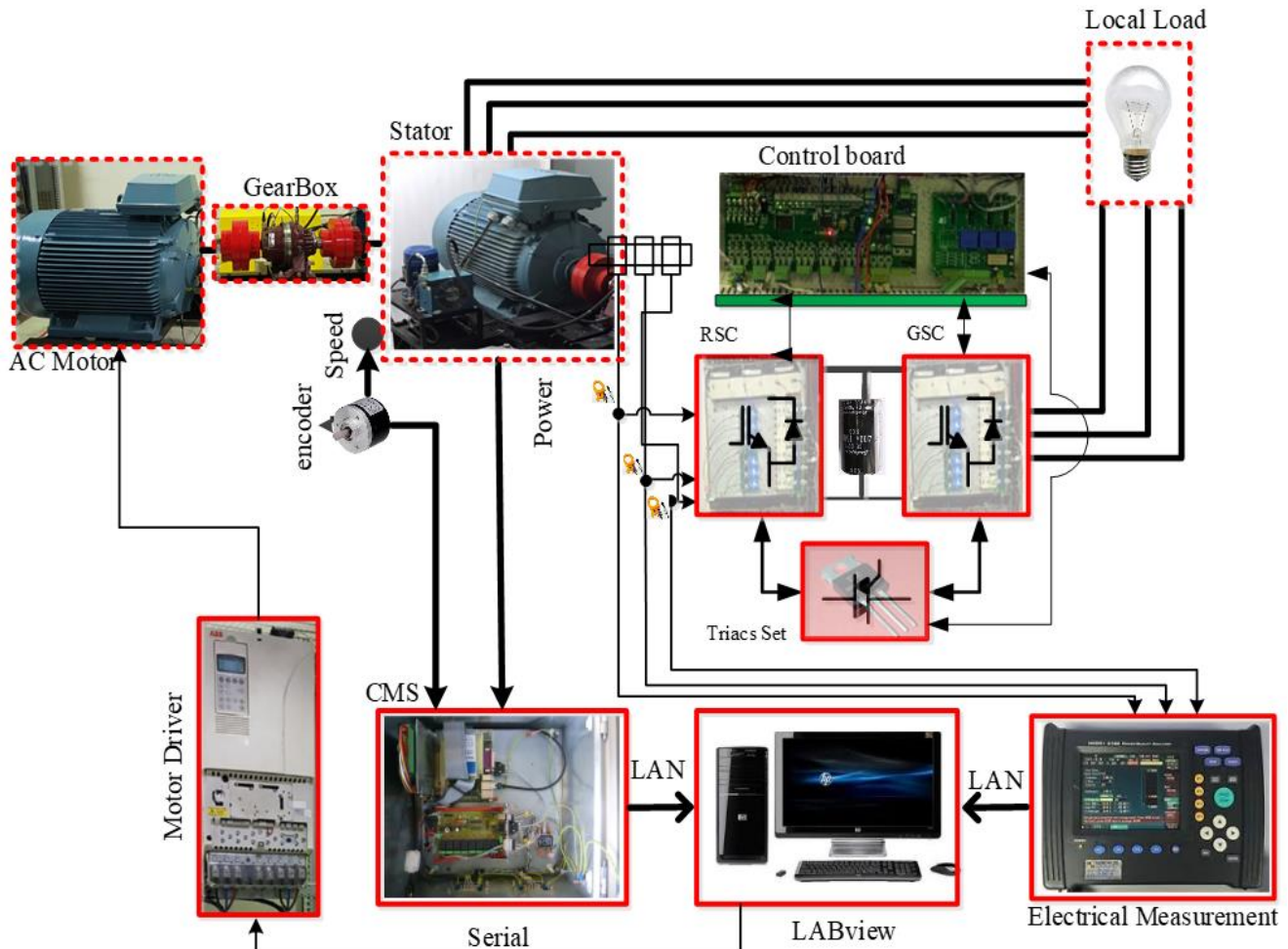
به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، دو سناریوی خطا روی سخت‌افزار آزمایشگاهی پیاده‌سازی شد. سناریوی اول رخداد خطا در سوئیچ پایین فاز دوم مبدل روتور و سناریوی دوم رخداد خطا در سوئیچ بالای فاز سوم مبدل سمت شبکه است. با این ۲ سناریو، نتایج حاصل از روش پیشنهادی در تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر خطا مورد ارزیابی قرار گرفته است. در آزمایش‌ها نواحی عملکردی توربین در سرعت‌ها و توان‌های مختلف، طبق شکل ۱۰ در نظر گرفته شده است.

۱-۶ ارزیابی تولید مانده

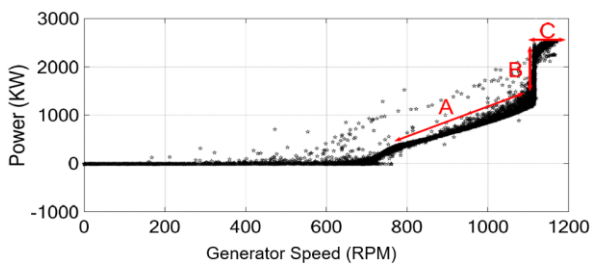
شکل ۱۱، ۱۵۰۰ نمونه یک حالت مدل شده سالم را که بر اساس رنج بادهای مختلف، توان‌های خروجی در نواحی مختلف عملکردی توربین بادی و جریان‌های مختلف برای مبدل سمت روتور و سمت شبکه، آموزش داده شده‌اند، نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر مدل شده و مقادیر جریان نمونه‌برداری شده در حالت بدون رخداد خطای مدار باز نزدیک به هم هستند.

در شکل ۱۲، خطای مدل ANN با در نظر گرفتن اختلاف مابین مقادیر واقعی و مقادیر مدل شده به دست می‌آید و به عنوان خطای پیش‌بینی مدل ANN نامیده می‌شود. طبیعی است که هر چه مقدار خطای به دست آمده از مدل شبکه عصبی کمتر باشد، در واقع مدل بهتری از سامانه به دست آمده است. هنگامی که خطای پیش‌بینی مدل شبکه عصبی کوچک است، توصیف اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر مدل شده آسان‌تر است. در حقیقت، مقدار مانده، مجموع خطای پیش‌بینی شبکه عصبی و خطای وجود و یا عدم وجود خرابی در سامانه است. به منظور ارزیابی مدل از ۵۰۰ نمونه داده‌های سالم اندازه‌گیری شده جریان به عنوان داده تست استفاده گردیده است.

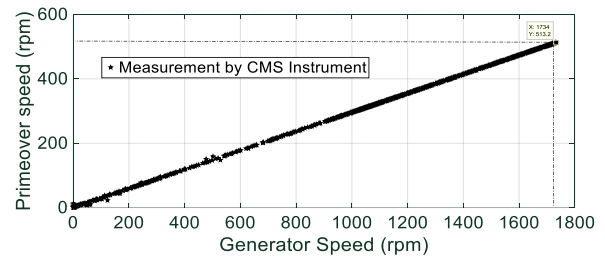
با تجزیه و تحلیل آماری سیگنال‌های شکل ۱۲، مقدار آستانه روی مانده (تفاوت CFF اندازه‌گیری شده از CFF مدل شده) برای عیب‌یابی شاخه معیوب ناشی از مدار باز شدن گیت IGBT ۱/۰- در نظر گرفته می‌شود. وقتی مانده از صفر کمتر گردد، نشانی از وجود خطا است.



شکل ۸: ساختار کلی ارتباطات و اندازه‌گیری در شبیه‌ساز سخت‌افزاری.



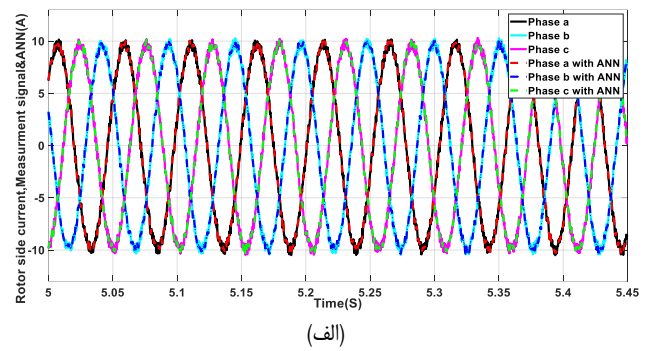
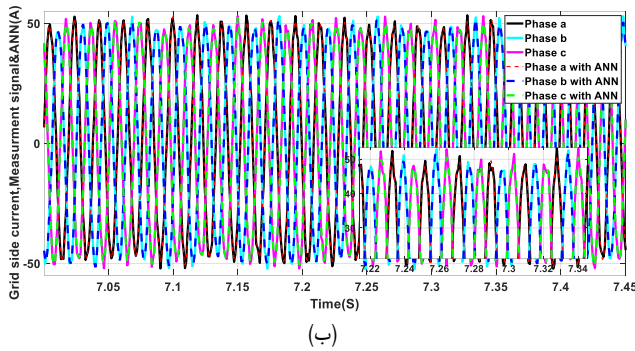
شکل ۱۰: نواحی عملکردی توربین بادی بر اساس نمودار توان-سرعت ژنراتور.



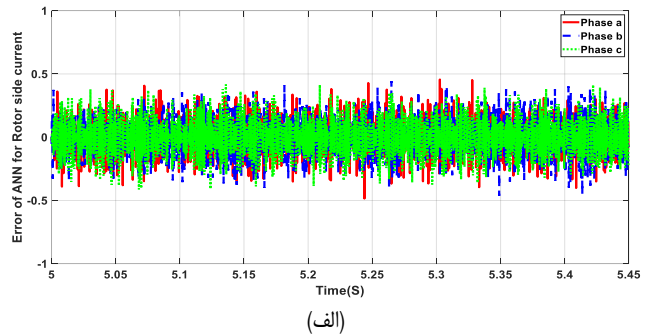
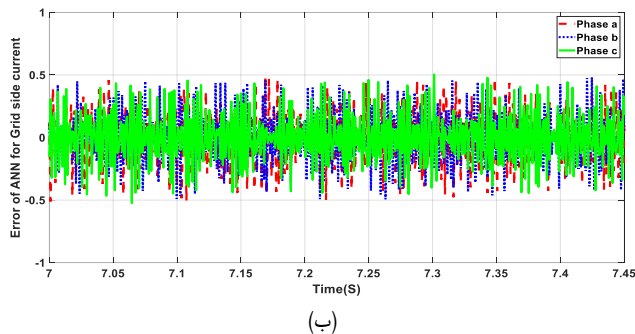
شکل ۹: نمودار نسبت سرعت موتور محرک به سرعت ژنراتور.

جدول ۲: خصوصیات سامانه‌های اندازه‌گیری نصب‌شده بر روی شبیه‌ساز سخت‌افزاری.

سامانه اندازه‌گیری کیفیت توان: Hioki	سامانه پایش وضعیت توربین باد: ISTEK
خصوصیات ورودی Single-phase ۲-wire, Single-phase ۳-wire, Three-phase ۳-wire (۳P۳W۲M, ۳P۳W۳M) or Three-phase ۴-wire, plus one extra input channel	کانال‌های ورودی
۴ کانال ولتاژی/۴ کانال جریانی	۸- کانال برای حسگرهای شتاب‌سنج ۴- کانال برای پارامترهای عملکردی توان، سرعت ژنراتور، زاویه گام پره و سرعت باد
خصوصیات اندازه‌گیری اندازه‌گیری پیوسته ۱۰ تا ۱۲ دوره متناسب با فرکانس اصلی ۵۰ یا ۶۰ هرتز	ساختار آرشیو داده حسگرها → ماژول DSP → کامپیوتر کامپیوتر → حافظه → منبع تغذیه
جریان ۲ مگاهرتز حسگر جریانی (کلامپی) تا ۱۰۰۰ آمپر	حسگر ۸ حسگر شتاب‌سنج با دقت ۱۰ mV/ms-2
فرکانس نمونه‌برداری حسگر	فرکانس نمونه‌برداری ۳۲ کیلوهرتز



شکل ۱۱: مدل‌سازی سیگنال جریان سه‌فاز، (الف) میدل سمت روتور و (ب) میدل سمت شبکه در شرایط آموزش حالت سالم، تحت جریان‌ها، بادها و توان‌های مختلف در همه نواحی عملکردی.



شکل ۱۲: خطای مدل‌سازی در حالت نرمال سیگنال جریان سه‌فاز، (الف) میدل سمت روتور و (ب) میدل سمت شبکه در شرایط آموزش حالت سالم، تحت جریان‌ها، بادها و توان‌های مختلف در همه نواحی عملکردی.

۶-۳ ارزیابی روش پیشنهادی در عیوب مدار باز سمت شبکه

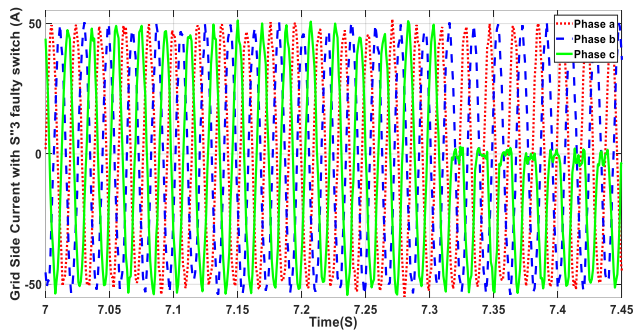
در شکل ۱۴-الف سه فاز جریان سمت شبکه نشان داده شده است. در شکل ۱۴-ب تا ۱۴-د مقادیر CFF جریان اندازه‌گیری شده و مدل شده به همراه پرچم‌های وجود یا عدم وجود عیب است. شکل ۱۴-ه مقادیر مانده برای سه فاز است. روش پیشنهادی برای عیوب سوئیچ‌های میدل سمت شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که دیده می‌شود در فاز سوم (سوئیچ بالایی)، عیب مدار باز سوئیچ، ایجاد و جریان این فاز پس از رخداد خطا تقریباً به حالت نیم‌سینوسی تبدیل شده است. با توجه به شکل ۱۴-د، در زمان $7/307$ گیت سوئیچ بالای فاز سوم میدل سمت شبکه، باز و پرچم در زمان $7/311$ زده می‌شود و دقیقاً وجود عیب در این سوئیچ را آشکار می‌کند. در این عیب پرچم در $7/311$ زده می‌شود که تقریباً 20% یک سیکل دوره جریان سمت شبکه است. سیگنال مانده در شکل ۱۴-ه نشان داده شده که مقادیر منفی، نشان وجود خطا در شاخه سوم میدل پست به پست سیمولاتور سخت‌افزاری است.

۶-۴ نتایج آزمایش‌ها برای کنترل تحمل‌پذیر خطا

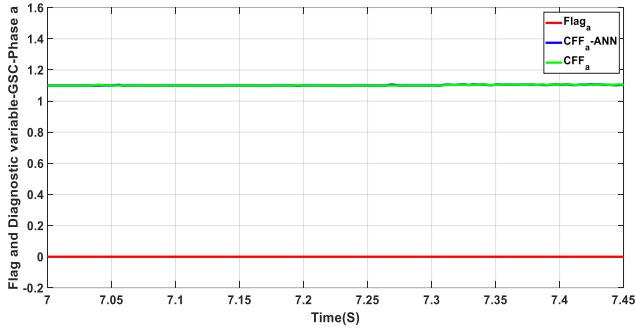
پس از تشخیص خطا، الگوریتم توسعه‌یافته شده کنترل تحمل‌پذیر خطا، عملیات جبران‌سازی را برای حفظ تولید توان و بازده ستاپ شبیه‌ساز انجام می‌دهد. در این گام پس از خاموش شدن هر دو گیت IGBT مربوط به ساق معیوب، با روشن شدن ترایاک مربوط، ساق مشترک تشکیل شده و با ۵ ساق میدل به کارکرد خود ادامه می‌دهد. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب جریان سه‌فاز میدل سمت روتور و ولتاژ لینک DC پس از رخداد خطا در این میدل را نشان می‌دهند. خطای رخ داده در سوئیچ پایین فاز دوم میدل سمت روتور بوده است که پس از تشخیص خطا در زمان $5/205$ ، کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطا توانسته تا به خوبی سیگنال سینوسی از دست

۶-۲ ارزیابی روش پیشنهادی در عیب مدار باز میدل سمت روتور

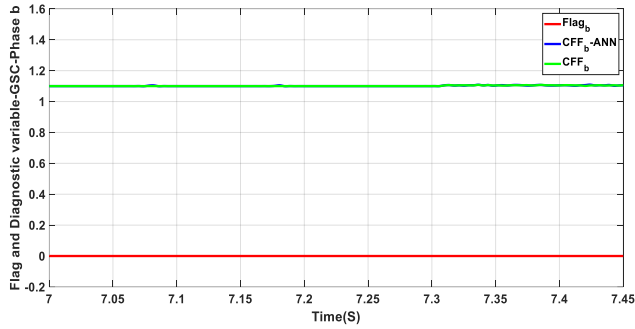
در شکل ۱۳-الف سه فاز جریان سمت روتور نشان داده شده است. در شکل ۱۳-ب تا ۱۳-د مقادیر CFF جریان اندازه‌گیری شده و مدل شده به همراه پرچم‌های وجود یا عدم وجود عیب است. شکل ۱۳-ه مقادیر مانده برای سه فاز است. در اولین سناریوی عیب در سوئیچ، یک عیب مدار باز در ساق شماره دو (سوئیچ پایین) برنامه‌ریزی می‌شود. هدف، میدل سمت روتور است و در زمان $5/191$ سوئیچ S5 مدار باز می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳-ج دیده می‌شود، تشخیص در زمان $5/196$ انجام شده است. در این حالت، رشد جریان به گونه‌ای است که نیم‌سیکل مثبت حذف شده و عملیات تشخیصی، پرچم سوئیچ S5 را بالا می‌برد. سیکل کامل $0/05$ ثانیه (50 میلی‌ثانیه) و زمان مورد نظر به اندازه 10 درصد یک سیکل است. مقدار مانده در فاز سوم (اختلاف CFF خروجی مقادیر اندازه‌گیری از CFF حاصل از شبکه عصبی) از آستانه عبور کرده است و منفی می‌شود. پس از وقوع خطا مشاهده می‌شود که جریان فاز معیوب برای مدت زمانی کوتاهی، صفر باقی می‌ماند و حول نقطه صفر نوسان می‌کند. بنابراین در مقایسه با مورد سالم، دامنه جریان ژنراتور و همچنین اعوجاج هارمونیک آنها افزایش می‌یابد. پس از آن، تلفات ژول و استرس‌های حرارتی در سیم‌پیچ روتور، همراه با تنش‌های مکانیکی شفت رخ می‌دهد. مطابق با شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد که با رخداد خطا در یک سوئیچ، اثر خطا در جریان و CFF فازهای دیگر مؤثر است. با رخداد خطا، CFF فازی که در آن سوئیچ معیوب وجود دارد از مقدار نرمال $1/1$ افزایش می‌یابد و اختلاف جریان اندازه‌گیری شده از جریان مدل شده به وسیله شبکه عصبی از آستانه تعریف شده عبور خواهد کرد و در نتیجه پرچم خطا در فاز معیوب زده می‌شود.



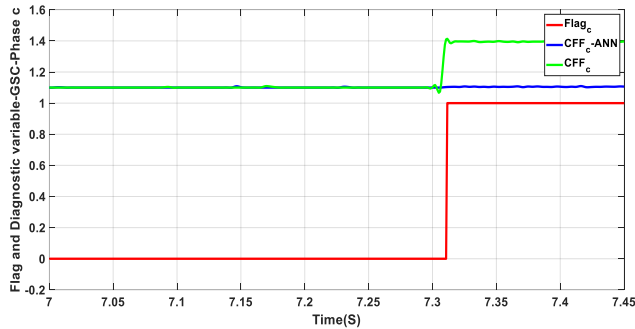
(الف)



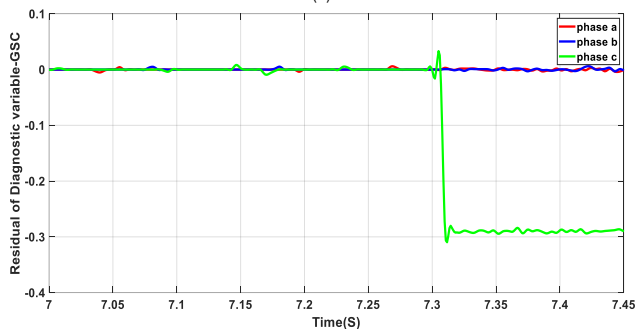
(ب)



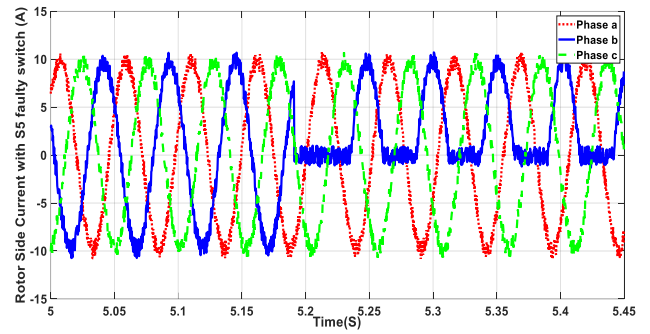
(ج)



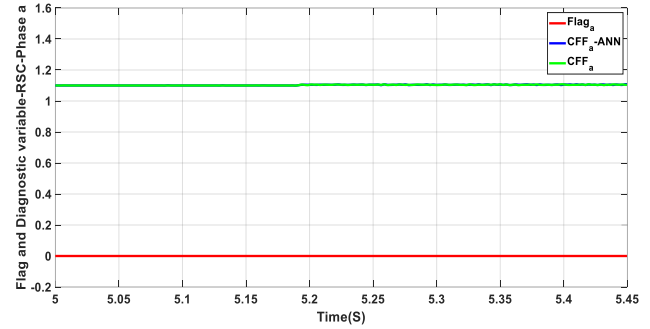
(د)



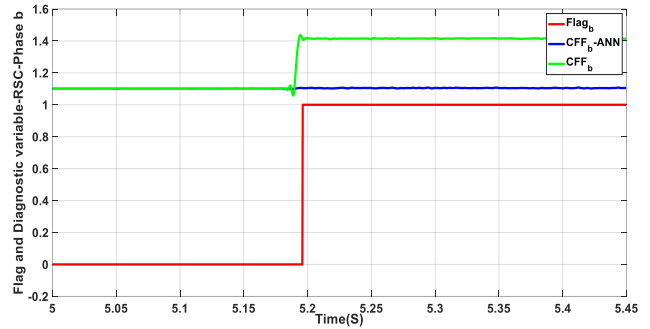
(ه)



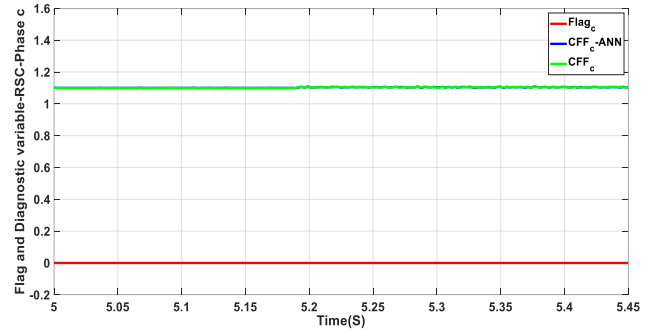
(الف)



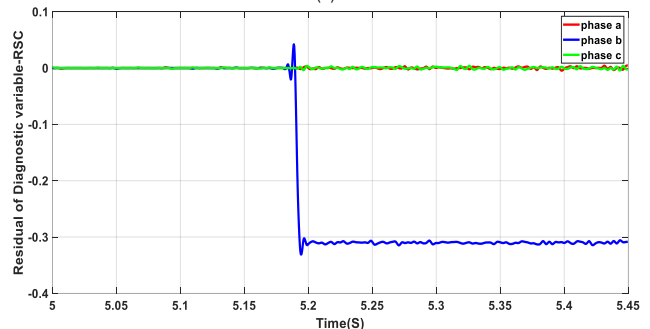
(ب)



(ج)



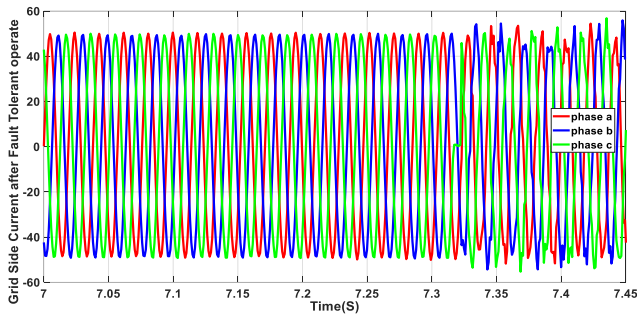
(د)



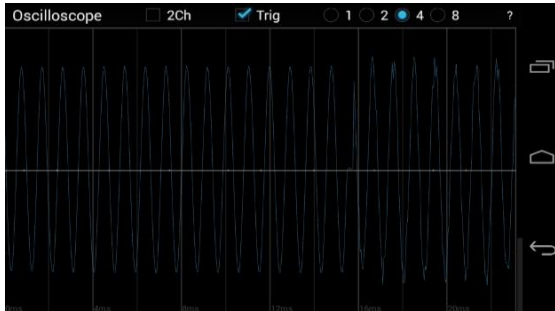
(ه)

شکل ۱۴: نتایج شبیه‌سازی عیوب چندگانه میدل سمت شبکه، (الف) گراف سه‌فاز، (ب) متغیر آشکارسازی عیب و پرچم عیب فاز a، (ج) متغیر آشکارسازی عیب و پرچم عیب فاز b، (د) متغیر آشکارسازی عیب و پرچم عیب فاز c و (ه) سیگنال مانده برای سه‌فاز.

شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی عیوب چندگانه میدل سمت روتور، (الف) گراف سه‌فاز، (ب) متغیر آشکارسازی عیب و پرچم عیب فاز a، (ج) متغیر آشکارسازی عیب و پرچم عیب فاز b، (د) متغیر آشکارسازی عیب و پرچم عیب فاز c و (ه) سیگنال مانده برای سه‌فاز.

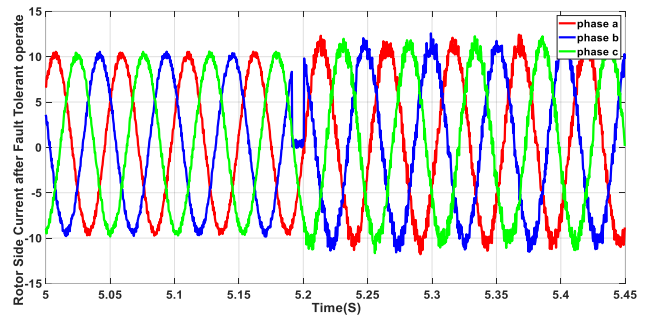


(الف)

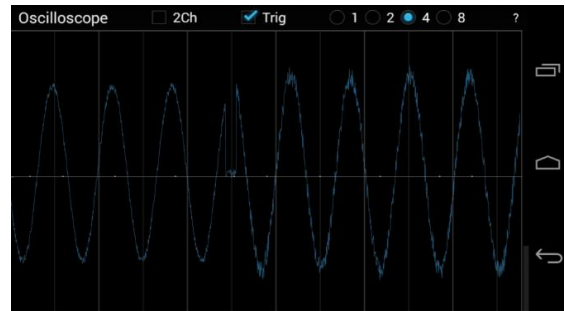


(ب)

شکل ۱۷: جریان سه‌فاز مبدل سمت شبکه با رخداد خطا در سوئیچ پایین فاز B با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی، (الف) خروجی اندازه‌گیری شده و (ب) خروجی ذخیره‌شده در اسیلوسکوپ فاز معیوب و کنترل‌شده با روش پیشنهادی.

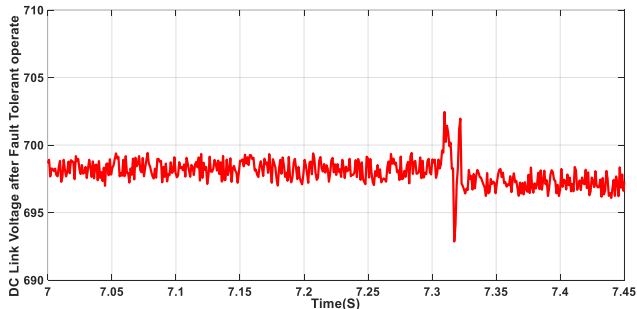


(الف)

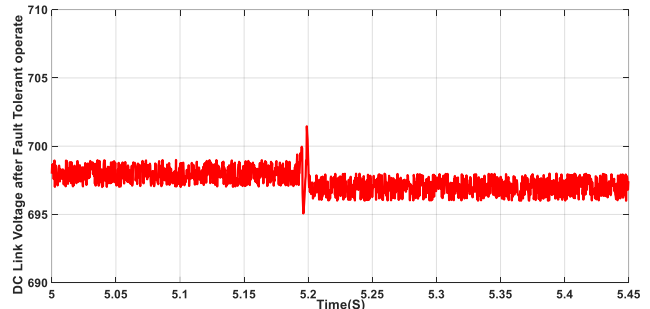


(ب)

شکل ۱۵: جریان سه‌فاز مبدل سمت روتور با رخداد خطا در سوئیچ بالای فاز c با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی، (الف) خروجی اندازه‌گیری شده و (ب) خروجی ذخیره‌شده در اسیلوسکوپ فاز معیوب و کنترل‌شده با روش پیشنهادی.



شکل ۱۸: ولتاژ لینک DC مبدل سمت شبکه با رخداد خطا در سوئیچ پایین فاز B با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی.



شکل ۱۶: ولتاژ لینک DC مبدل سمت روتور با رخداد خطا در سوئیچ بالای فاز c با کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی.

برای سوئیچ‌های هر یک از مبدل‌ها نشان می‌دهند.

شکل ۲۱ توان اکتیو و گشتاور توربین بادی در سناریوی اول و شکل ۲۲ توان اکتیو و گشتاور توربین بادی در سناریوی دوم، یعنی خطای سوئیچ بالای فاز سوم را نشان می‌دهد. مطابق با این دو شکل ملاحظه می‌گردد که الگوریتم کنترلی پیشنهادی اجازه می‌دهد تا مقادیر گشتاور و توان پس از بروز خطای مدار باز سوئیچ IGBT تا حد خوبی کنترل شوند و به گشتاور به نزدیکی نقطه مطلوب بازمی‌گردد. با توجه به این دو شکل ملاحظه می‌گردد که روش پیشنهادی، نواسانات گشتاور و توان اکتیو را تا حد خوبی حذف می‌کند و همچنین سامانه کنترل می‌تواند به سرعت به تغییرات ناگهانی پاسخ دهد.

۵-۶ آنالیز بر اساس شاخص‌های عددی

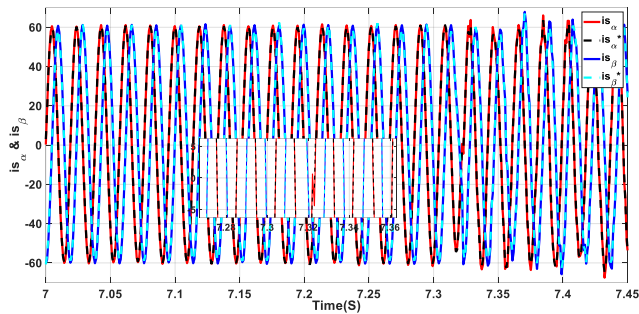
به منظور ارزیابی پارامتری روش پیشنهادی، نتایج عددی در حالت عملکرد نرمال و پس از اعمال کنترل تحمل‌پذیر خطا مقایسه گردید. جداول ۳ و ۴ به ترتیب این ارزیابی پارامتری را برای مبدل سمت شبکه و سمت روتور نشان می‌دهد.

مطابق با جدول ۳ ملاحظه می‌گردد که کنترل تحمل‌پذیر خطا پس از رخداد خطا در سمت شبکه با تقریب نسبتاً خوبی توانسته تا سیگنال جریان

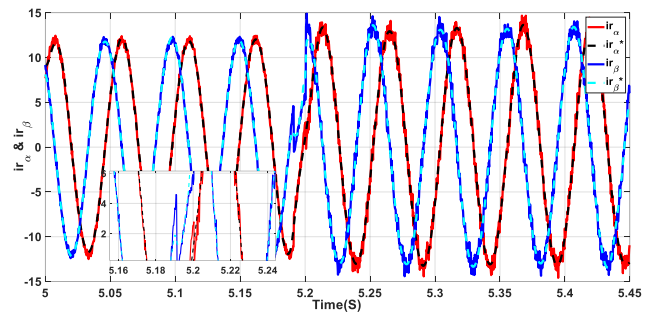
رفته را جبران و با استفاده از سوئیچ‌های جایگزین شده، سیگنال جدید را بازسازی کند. همچنین نوسان ایجادشده ناشی از ایجاد خطا در ولتاژ لینک DC با تقریب نسبتاً خوبی به سطح مطلوب رسیده است. این امر موجب استفاده بهینه‌تر از توربین بادی در شرایط خطای مدار باز سوئیچ می‌شود و توان توربین بادی تا حد قابل قبولی حفظ می‌گردد.

شکل ۱۷، جریان سه‌فاز مبدل سمت شبکه را نشان می‌دهد که حاصل کنترل تحمل‌پذیر خطای سوئیچ بالای فاز سوم در مبدل سمت شبکه است. ملاحظه می‌گردد که کنترل تحمل‌پذیر خطا در زمان ۷/۳۲۲ توانسته تا با استفاده از ساق مشترک، نیم‌سیکل از دست رفته جریان را جبران سازد. شکل ۱۸ ولتاژ لینک DC را با رخداد خطا در مبدل سمت شبکه نشان می‌دهد. در بازه رخداد، تشخیص تا کنترل تحمل‌پذیر خطا، ولتاژ لینک DC دچار نوسان شده و پس از اتصال تریاک مربوط و تشکیل ساختار پنج ساق و الگوریتم کنترلی پیشنهادی، با تقریب خوبی ولتاژ لینک DC به مقدار مطلوب رسیده است.

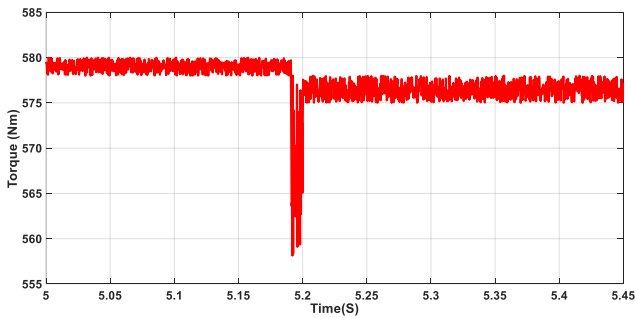
تحت شرایط خطایی توصیف‌شده در شکل‌های ۱۵-الف و ۱۷-الف، سیگنال‌های کنترلی، قبل و پس از استفاده از کنترل‌کننده مود لغزشی نشان داده شده‌اند. شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب جریان‌های قالب $\alpha\beta$ مربوط به دو مبدل سمت روتور و شبکه در حالت بروز خطای مدار باز را



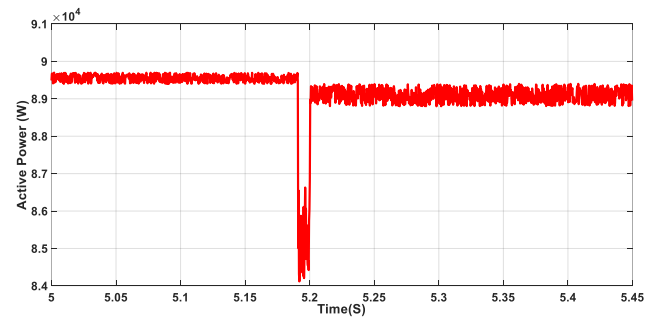
شکل ۲۰: جریان‌های قالب $\alpha\beta$ مربوط به مبدل سمت شبکه در حالت بروز خطا در این مبدل و پس از کنترل تحمل‌پذیر خطا.



شکل ۱۹: جریان‌های قالب $\alpha\beta$ مربوط به مبدل سمت روتور در حالت بروز خطا در این مبدل و پس از کنترل تحمل‌پذیر خطا.

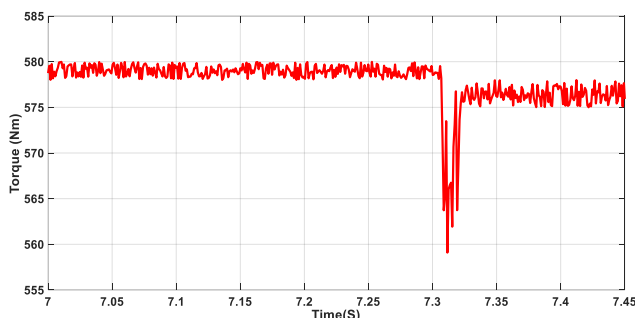


(ب)

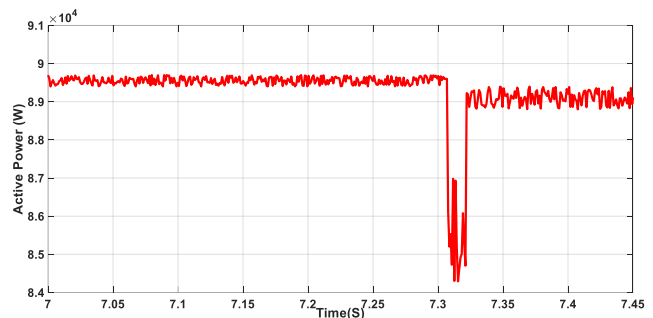


(الف)

شکل ۲۱: (الف) توان اکتیو و (ب) گشتاور توربین بادی در سناریوی اول با در نظر گرفتن رخداد خطای مدار باز سوئیچ IGBT در مبدل سمت روتور و کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی.



(ب)



(الف)

شکل ۲۲: (الف) توان اکتیو و (ب) گشتاور توربین بادی در سناریوی دوم با در نظر گرفتن رخداد خطای مدار باز سوئیچ IGBT در مبدل سمت شبکه و کنترل تحمل‌پذیر خطای پیشنهادی.

جدول ۴: مقایسه پارامتری مبدل سمت روتور در حالت عملکرد نرمال و کنترل تحمل‌پذیر خطا پس از رخداد خطا در سوئیچ پایین فاز دوم.

عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا	عملکرد نرمال	
۷,۱۶۳۶	۶,۸۹۶۲	RMS جریان
۶۹۷,۴۳۲۵	۶۹۹	متوسط V_{dc}
-۰,۴۷۲۱	-۰,۲۵۸۹	میانگین جریان

جدول ۳: مقایسه پارامتری مبدل سمت شبکه در حالت عملکرد نرمال و کنترل تحمل‌پذیر خطا پس از رخداد خطا در سوئیچ بالای فاز سوم.

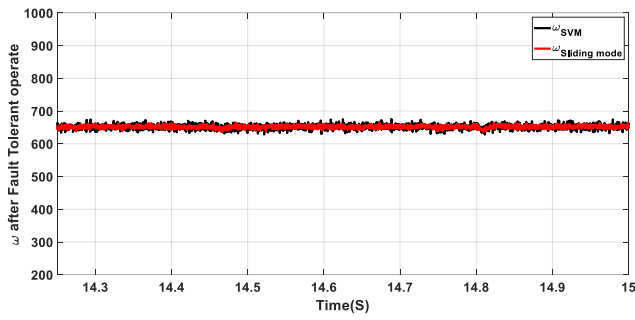
عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا	عملکرد نرمال	
۳۴,۸۶۷۰	۳۵,۰۲۳۴	RMS جریان
۶۹۷,۹۱۲۷	۶۹۹	متوسط V_{dc}
-۰,۵۶۰۹	-۰,۱۲۵۵	میانگین جریان

جدول ۵: مقایسه پارامترهای خروجی توربین در دو خطای مورد بررسی.

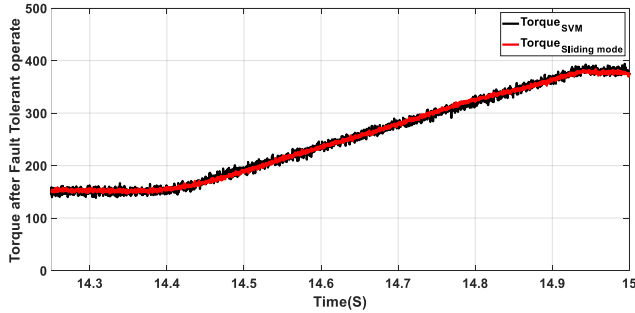
عملکرد نرمال (درصد)	عملکرد کنترل تحمل‌پذیر خطا (درصد)		
۰,۰۹۸۰	۰,۸۳۵۷	TWO توان	رخداد خطا در مبدل سمت شبکه
۰,۱۰۱۵	۰,۴۱۴۷	TWO گشتاور	
۰,۰۹۸۶	۰,۶۹۷۲	TWO توان	رخداد خطا در مبدل سمت روتور
۰,۱۰۰۱	۰,۳۳۸۰	TWO گشتاور	

روتور نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که مقادیر جریانی پس از کنترل تحمل‌پذیر خطا به مقدار نرمال نزدیک بوده و سیگنال به خوبی جبران‌سازی شده است. جدول ۵ پارامترهای خروجی توان و گشتاور

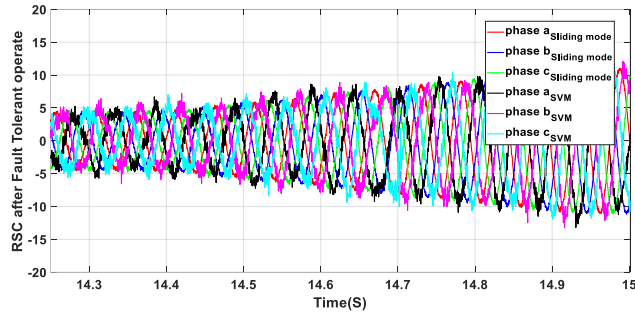
را جبران کند. معیار RMS و متوسط جریان به حالت نرمال نزدیک بوده و ولتاژ لینک DC به خوبی کنترل شده است. جدول ۴ پارامترهای عددی مربوط به رخداد خطا را در مبدل سمت



(الف)



(ب)

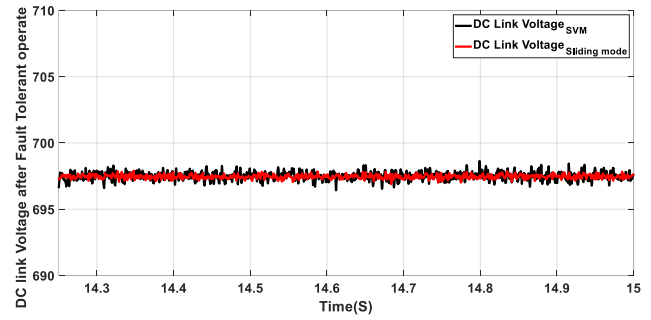


(ج)

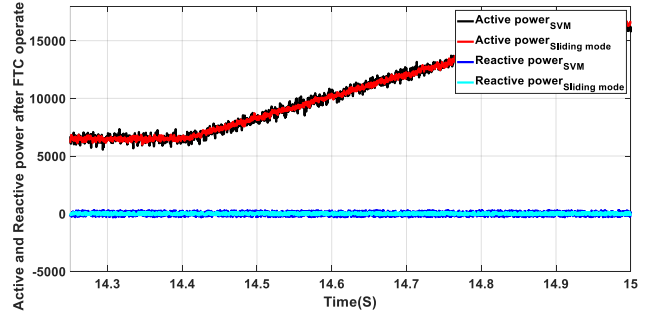
شکل ۲۴: نتایج تجربی در شرایط گذرا برای میدل سمت روتور در سرعت ثابت و تغییرات گشتاور برای دو کنترل‌کننده مود لغزشی و SVM در حالت تک‌خطا و بازآرایی سخت‌افزار ۵ ساق، (الف) سرعت، (ب) گشتاور و (ج) جریان روتور در شرایط فعالیت FTC.

می‌شوند. به منظور مقایسه روش تشخیص خطا در فاصله زمانی حدود یک دقیقه و با سرعت متغیر، دو سناریو اجرا گردیده است. فرض شده که یک خطا در سوئیچ فاز یک روتور وجود دارد و نرخ FAR و MAR بر اساس سیگنال مانده بر اساس ANN و SMO بررسی شده است (خطا در چند نوبت ایجاد و حذف می‌شود). در سناریوی دوم خطایی وجود ندارد و سامانه در حالت نرمال است و باز هم سیگنال مانده بر اساس ANN و SMO در فاصله یک دقیقه ارائه شده است. بر اساس بررسی‌های آماری، روش ANN علی‌رغم سالم‌بودن سامانه، ۵ بار اعلام خطا کرده که این تأثیرپذیری روش را در مقابل شرایط گذرا نشان می‌دهد و این حالت یعنی به اشتباه فعال کردن FTC بر اساس کنترل‌کننده مود لغزشی. این در حالی است که SMO-SAT حتی یک بار هم در حالت سالم به دام اشتباه نیفتاده است. در حالت دارای خطا نیز همواره SMO-SAT به درستی تشخیص عیب داده است اما روش ANN یک بار از پنج بار اعلام خطا نکرده است.

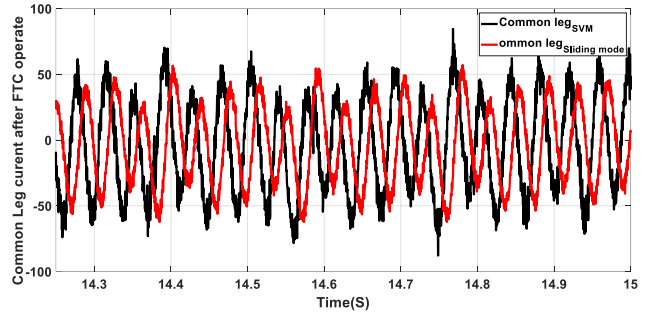
برای مقایسه دو روش SVM و کنترل‌کننده مود لغزشی در فاز FTC، سناریوی تک‌خطا در فاز دوم سمت روتور در سوئیچ S_4 اعمال می‌شود. نتایج در شرایط تغییرات گشتاور در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ منعکس شده است. تغییر مقدار گشتاور از ۱۵۰ نیوتن‌متر تا ۳۸۰ نیوتن‌متر در سرعت ثابت ۶۵۰ دور در دقیقه است. توان فعال مرجع بر اساس این شکل، خود



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۳: نتایج تجربی در شرایط گذرا برای میدل سمت روتور در سرعت ثابت و تغییرات گشتاور برای دو کنترل‌کننده مود لغزشی و SVM در حالت تک‌خطا و بازآرایی سخت‌افزار ۵ ساق، (الف) ولتاژ لینک DC، (ب) توان فعال و راکتیو و (ج) فاز b جریان روتور.

توربین در ۲ حالت نرمال و پس از رخداد خطا را برای ۲ خطای بررسی‌شده در میدل سمت شبکه و سمت روتور نشان می‌دهد که در آن TWO نوسانات شکل موج کلی گشتاور و توان است که به صورت رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود

$$TWO = \frac{\sqrt{X_{rms}^2 - X_{ave}^2}}{|X_{ave}|} \times 100\% \quad (40)$$

که در این رابطه متغیر X دو مقدار گشتاور (T_e) و توان (P) را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین X_{rms} و X_{ave} به ترتیب مقدار RMS و مقدار متوسط متغیر تعریف شده است. مطابق با جدول ۵ ملاحظه می‌گردد که کنترل تحمل‌پذیر خطا توانسته تا با تقریب خوبی رفتار عملکردی توربین را در دو پارامتر توان و گشتاور برای رخداد خطا در هر یک از میدل‌های سمت روتور و سمت شبکه به مقدار نرمال نزدیک کند.

برای مقایسه بهتر روش پیشنهادی با روش تشخیص خطای مدل، رفتار نرمال ANN با آستانه ثابت مقایسه گردید و سپس دو روش FTC پنج ساق مبتنی بر SVM و کنترل‌کننده مود لغزشی به لحاظ پارامتری عددی در دنبال کردن مرجع کنترلی و استخراج گراف‌های کنترلی مقایسه

جدول ۶: تجزیه و تحلیل عملکرد HIL با خطای چندگانه سمت روتور و طرح FTC چهار پایه AR-MPC در شرایط تغییرات سرعت و در گشتاور ثابت ۵۰٪ و تک خطا در سوئیچ S_p .

شرایط آزمایش	بدون خطا و سالم/ ده ثانیه/ شش ساق / -	پس از خطا S_p / ده ثانیه/ پنج ساق، تریاک T_a روشن / ساق مشترک
P_{HIL}^{TWO}	۰٫۰۸۵۷	۰٫۰۸۴۰۹
$I_{a,b,c}^{RMS}$	۱۵٫۷۵۴	۱۴٫۱۲۵
P. F	۰٫۸۸	۰٫۸۷
$ I_{a,b,c}^{Ave.} $	۰٫۱۹۰۷	۰٫۱۹۰۷
$V_{dc-link}^{Ave.}$	۶۹۹٫۰۱۷	۶۹۷٫۸۳۵۴
P_{HIL}^{TWO}	۰٫۰۹۱۲	۱٫۰۲۱۵
$I_{a,b,c}^{RMS}$	۱۵٫۷۵۹	۱۳٫۷۴۳
P. F	۰٫۸۸	۰٫۸۵
$ I_{a,b,c}^{Ave.} $	۰٫۲۵۸۹	۱۲٫۱۶۴۸
$V_{dc-link}^{Ave.}$	۶۹۹٫۰۲۴	۶۹۷٫۱۳۹۸

شبکه عصبی مصنوعی مود لغزشی

SMO-SAT SVM

سوئیچ مبدل پشت به پشت توربین باد مبتنی بر DFIG نشان داده‌اند. روش جدید کنترل تحمل‌پذیر خطا با سخت‌افزار ۹۰ کیلووات آزمایشگاهی تست شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که ساختار پیشنهادی در تشخیص و جبران عیوب مبدل سمت شبکه و سمت روتور و همچنین در تشخیص عیوب یک ساق مؤثر است.

مراجع

- [1] A. Damesghi and M. H. Refan, "A new strategy for short-term power-curve prediction of wind turbine based on PSO-LS-W SVM," *Iranian J. of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 392-403, Dec. 2018.
- [2] م. رحیمی و م. ر. اسماعیلی، "طراحی کنترل‌کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی ۷۱۰ kW-DFIG نصب‌شده در سایت بینالود،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۴، صص. ۱۲۳-۱۳۴، زمستان ۱۳۹۵.
- [3] A. Damesghi, M. H. Refan, and P. Amiri, "Wind turbine doubly fed induction generator rotor electrical asymmetry detection based on an adaptive least mean squares filtering of wavelet transform," *Wind Engineering*, vol. 45, no. 2, pp. 138-159, Apr. 2021.
- [4] A. Damesghi and M. H. Refan, "Combination of condition monitoring and prognosis systems based on current measurement and PSO-LS-SVM method for wind turbine DFIGs with rotor electrical asymmetry," *Energy Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 203-232, 2021.
- [5] Z. Jiang, M. Karimirad, and T. Moan, "Dynamic response analysis of wind turbines under blade pitch system fault, grid loss, and shutdown events," *Wind Energy*, vol. 17, no. 9, pp. 1385-1409, Sept. 2014.
- [6] ی. شیبویی، ا. ریخته‌گر غیائی و س. خان‌محمدی، "طراحی کنترل‌کننده تحمل‌پذیر خطای مد لغزشی ترمینال غیر تکین برای سیستم‌های غیر خطی بر مبنای فیلتر کالمن توسعه‌یافته تطبیقی،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۴، صص. ۱۷۳-۱۸۳، زمستان ۱۳۹۵.
- [7] H. Schulte and E. Gauterin, "Fault-tolerant control of wind turbines with hydrostatic transmission using takagi-sugeno and sliding mode techniques," *Annual Reviews in Control*, vol. 40, pp. 82-92, 2015.
- [8] J. Lan, R. J. Patton, and X. Zhu, "Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation," *Renewable Energy, Part B*, vol. 116, pp. 219-231, Feb. 2018.
- [9] H. Badihi, Y. Zhang, and H. Hong, "Fault-tolerant cooperative control in an offshore wind farm using model-free and model-based fault detection and diagnosis approaches," *Applied Energy*, vol. 201, pp. 284-307, Sept. 2017.
- [10] M. Blanke, R. Izadi-Zamanabadi, S. A. Bøgh, and C. P. Lunau, "Fault-tolerant control systems-a holistic view," *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 5, pp. 693-702, May 1997.
- [11] R. J. Patton, "Fault-tolerant control system: the 1997 situation," in *Proc. of the IFAC Symp. Fault Detection, Supervision and Safety, SAFEPROCESS'97*, pp. 1033-1055, Kingston Upon Hull, England, Aug. 1997.
- [12] M. Blanke, W. C. Frei, F. Kraus, J. R. Patton, and M. Staroswiecki, "What is fault-tolerant control?," in *IFAC Proc. Volumes*, vol. 33, no. 11, pp. 41-52, Jun. 2000.

را در کنترل‌کننده مود لغزشی بهتر از SVM دنبال می‌کند. شکل ۲۴ تغییرات جریان روتور سه‌فاز را در بازه تغییرات گشتاور به خوبی نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده عملکرد خوب روش کنترلی کنترل‌کننده مود لغزشی در قیاس با SVM است. مشاهده می‌شود که توان راکتیو در طول عملیات گذرا با حفظ ضریب توان در محدوده صفر باقی می‌ماند. همچنین توان فعال ضمن حفظ پایداری، علی‌رغم وجود سوئیچ معیوب و اختلالات، از مرجع خود پیروی می‌کند.

بر اساس جدول ۶ و بررسی نتایج عددی دیده می‌شود که عملکرد کنترلی مود لغزشی در پس از خطا در طرح FTC مؤثرتر و دارای کارایی بهتری است.

۷- نتیجه گیری

عیب مدار باز سوئیچ مبدل توربین بادی از عیوب رایج و با نرخ بالا در آن است. یک روش تشخیص خطای مدار باز بر اساس شبکه عصبی مصنوعی، در مبدل پشت به پشت توربین بادی مبتنی بر ژنراتور DFIG با در نظر گرفتن کنترل تحمل‌پذیر خطای آن بر اساس کنترل‌کننده مود لغزشی با تغییرات سخت‌افزاری در این مقاله ارائه گردیده که سرعت تشخیص در آن از روش‌های غیر هوشمند بیشتر است. در این روش با استفاده از فاکتور CFF، اثرات تغییرات جریان، خطای مدل شبکه عصبی و هشدار اشتباه خنثی می‌شود. ساختار تشخیص خطا با این تکنیک، قوی و در برابر تغییرات نقاط کاری، شرایط متغیر توربین بادی و سیگنال‌های مختل، پایدار است. روش تشخیص خطا در این مقاله مبتنی بر تولید مانده و با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی است. در روش کنترل تحمل‌پذیر خطا، ساق معیوب با باز شدن گیت هر دو IGBT در یک ساق توسط کنترل‌کننده، کنار رفته و یکی از ساق‌ها به عنوان ساق مشترک بین دو مبدل سمت شبکه و سمت روتور قرار می‌گیرد و سپس با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی مبتنی بر مود لغزشی مرتبه اول، کنترل تحمل‌پذیر خطا انجام می‌شود. الگوریتم کنترلی پیشنهادی، نیازی به استفاده از کنترل‌کننده‌های کلاسیک و همچنین PWM و یا SVM به منظور سوئیچینگ ندارد. برای بررسی پایداری روش پیشنهادی، اثبات پایداری و تجزیه و تحلیل روش پیشنهادی بر اساس نظریه لیاپانوف انجام شده است. الگوریتم کنترلی پیشنهادی اجازه می‌دهد تا مقادیر گشتاور و توان پس از بروز خطای مدار باز سوئیچ IGBT تا حد خوبی کنترل شوند. نتایج آزمایشگاهی متنوعی در مقاله ارائه شده که همه آنها کارایی، دقت و سرعت روش پیشنهادی را در تشخیص و کنترل تحمل‌پذیر عیب مدار باز

- turbines," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 3793-3802, Apr. 2021.
- [31] 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, Article ID: 114851, May 2020.
- [32] 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.
- [33] M. Kamarzarrin, M. H. Refan, and A. Dameshghi, "A new fault-tolerant control of wind turbine pitch system based on ANN model and robust and optimal development of MRAC method," *Tabriz J. of Electrical Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 83-95, Spring 2021.
- [34] C. A. Evangelista, F. Valenciaga, and P. Puleston, "Multivariable 2-sliding mode control for a wind energy system based on a double fed induction generator," *International J. of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 13, pp. 10070-10075, Jul. 2012.
- [35] M. Kamarzarrin and M. H. Refan, "Intelligent sliding mode adaptive controller design for wind turbine pitch control system using PSO-SVM in presence of disturbance," *J. of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 31, pp. 912-925, Mar. 2020.
- [36] J. Liu, X. Chen, and J. Wang, "Sliding mode control to stabilization of a tip-force destabilized shear beam subject to boundary control matched disturbance," *Journal of Dynamical and Control Systems*, vol. 22, pp. 117-128, 2016.
- مهرنوش کمرزین** مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران در سال ۱۳۹۲ و مدرک کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۹۴ در رشته مهندسی برق کنترل از دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران و در سال ۱۴۰۱ دکتری خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی اخذ کرده است. علایق تحقیقاتی او شامل GPS، توربین‌های بادی، تشخیص خطا و کنترل تحمل‌پذیر، کنترل تطبیقی، ارتباطات بی سیم و شبکه با تمرکز بر رادپوهای شناختی و سیستم‌های الکترونیک آنالوگ است. او اکنون کارشناس فرآیند توربین‌های بادی در شرکت مهندسی و ساخت مینا برق و کنترل مینا (مکو) است.
- محمدحسین رفان** مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۵۱ در رشته مهندسی الکترونیک از دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران دریافت کرده است. پس از ۱۲ سال کار و تجربه در صنعت، مجدداً در سال ۱۳۶۸ شروع به تحصیل کرد و مدرک کارشناسی ارشد و همچنین دکتری خود را در همین رشته و همان دانشگاه به ترتیب در سال ۱۳۷۱ و ۱۳۷۸ اخذ نمود. وی در حال حاضر استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران است. وی نویسنده حدود ۱۰۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های بین‌المللی است. علایق تحقیقاتی او شامل GPS، DCS و سیستم اتوماسیون، توربین‌های بادی، تشخیص خطا و کنترل تحمل‌پذیر خطا و کنترل تطبیقی است.
- پرویز امیری** متولد ۱۳۴۹ است. وی مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۷۳ از دانشگاه مازندران، مدرک کارشناسی ارشد را از دانشگاه خواجه نصیر طوسی در سال ۱۳۷۶ و دکتری خود را از دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۸۹ دریافت کرده است. کلیه مقاطع تحصیلی در رشته مهندسی برق (الکترونیک) بوده است. علاقه اصلی تحقیقاتی او شامل طراحی مدارهای الکترونیکی در صنایع است. علاقه اولیه تحقیقاتی او در مدارهای الکترونیکی RF و قدرت، با تمرکز بر طراحی مدارهای توان خطی است. وی در حال حاضر دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران است.
- [13] M. Blanke, M. Staroswiecki, and N. E. Wu, "Concepts and methods in fault-tolerant control," in *Proc. of the American Control Conf.* vol. 4, pp. 2606-2620, Arlington, VA, USA, 25-27 Jun. 2001.
- [14] J. Jiang, "Fault-tolerant control systems-an introductory overview," *Acta Automatica Sinica*, vol. 31, no. 1, pp. 161-174, Jan. 2005.
- [15] R. Isermann, "Fault-diagnosis systems," Springer Verlag, 2006.
- [16] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki, and J. Schröder, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, vol. 2, Berlin: Springer, 2006.
- [17] H. Zhao and L. Cheng, "Open-switch fault-diagnostic method for back-to-back converters of a doubly fed wind power generation system," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 4, pp. 3452-3461, Apr. 2018.
- [18] 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.
- [19] 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 Trans. on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 816-821, Mar. 2011.
- [20] M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate, and M. R. Zolghadri, "FPGA-based fast detection with reduced sensor count for a fault-tolerant three-phase converter," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 3, pp. 1343-1350, Aug. 2013.
- [21] W. Sae-Kok, *Converter Fault Diagnosis and Post-Fault Operation of a Doubly-Fed Induction Generator for a Wind Turbine*, Doctoral Dissertation, University of Strathclyde, 2008.
- [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, Mar. 2017.
- [23] M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate, and M. R. Zolghadri, "FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3360-3371, Aug. 2013.
- [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 generation system based on instantaneous amplitude estimation," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, Article ID: 3512413, 13 pp. 13, 2021.
- [25] A. Gaillard, P. Poure, and S. Saadate, "FPGA-based reconfigurable control for switch fault tolerant operation of WECS with DFIG without redundancy," *Renewable Energy*, vol. 55, pp. 35-48, Jul. 2013.
- [26] M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate, and M. R. Zolghadri, "Five-leg converter topology for wind energy conversion system with doubly fed induction generator," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3187-3194, Nov. 2011.
- [27] M. Shahbazi, P. Poure, and S. Saadate, "Real-time power switch fault diagnosis and fault-tolerant operation in a DFIG-based wind energy system," *Renewable Energy, Part B*, vol. 116, pp. 209-218, Feb. 2018.
- [28] A. Kontarček, M. Nemeč, P. Bajec, and V. Ambrožič, "Single open-phase fault detection with fault-tolerant control of an inverter-fed permanent magnet synchronous machine," *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, vol. 55, no. 4, pp. 474-486, 2014.
- [29] N. M. Freire and A. J. M. Cardoso, "A fault-tolerant direct controlled PMSG drive for wind energy conversion systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 2, pp. 821-834, Feb. 2014.
- [30] M. N. Soares, Y. Mollet, M. Kinnaert, J. Gyselinck, and J. Helsen, "Multiphysical time-and frequency-domain fault detection and isolation technique for power-electronic converters in DFIG wind