

کنترل تحمل پذیر عیب در توربین های بادی با استفاده از کنترل کننده مدلغزشی فازی

پریسا رضایی^۱، فائزه فریور^{۲*}، محمد منثوری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۲</p> <p>بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳</p> <p>پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹</p>	<p>این مقاله به طراحی کنترل کننده مقاوم برای توربین های بادی با استفاده از کنترل کننده ترکیبی مدلغزشی فازی پرداخته است. با توجه به رشد روزافزون بهره گیری از توربین های بادی و اهمیت قابلیت اطمینان و کارایی این سیستم ها، در این مقاله تحمل پذیری سیستم توربین بادی با استفاده از ترکیب روشهای کنترل کلاسیک غیرخطی و هوشمند در برابر رخداد عیب های احتمالی مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است. در طراحی کنترل کننده تحمل پذیر عیب از ترکیب کنترل کننده مدلغزشی بر پایه قانون دستیابی نمایی پیشرفته و سیستم فازی استفاده شده است و هدف کنترلی، ردیابی ورودی مرجع است در شرایطی که سیستم تحت شرایط رخداد عیب قرار دارد. همچنین، کنترل کننده طراحی شده قابلیت کاهش پدیده وزوز را نیز دارا می باشد. برای بررسی کارایی سیستم کنترلی پیشنهادی، از عیب های شبیه سازی شده با ویژگیهای مختلف نظیر دامنه، زمان رخداد و سرعت تغییر دینامیکی استفاده شده است. نتایج ارزیابی نشان می دهد که کنترل کننده طراحی شده در مقابل رخداد عیب سنسور و عیب عملگر در سیستم توربین بادی مقاوم است. همچنین، تنظیم ولتاژ خروجی به مقدار مرجع ثابت به خوبی صورت می پذیرد.</p>
<p>واژگان کلیدی:</p> <p>توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، تحمل پذیری عیب، کنترل کننده فازی، کنترل کننده مدلغزشی.</p>	

۱- مقدمه

سرعت و به طور نگران کننده ای افزایش خواهد یافت. لذا، توجه به بهره گیری از انرژی باد بسیار چشمگیر است. به طوری که آزمایشگاه انرژی های تجدید پذیر^۴ میزان رشد نصب توربین بادی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۶ را حدود ۳۰٪ تخمین زده است [۱]. ظرفیت توان تولیدی توربین های بادی نصب شده در جهان در شکل (۱) نشان داده شده است [۲ و ۳]. علیرغم

باتوجه به نیاز روز افزون به انرژی و کاهش منابع سوخت فسیلی، ضرورت حفظ محیط زیست و محدودیت در تامین برق، استفاده از انرژی های نو همچون انرژی باد، انرژی خورشیدی، پیل سوختی و غیره حائز اهمیت است. به گفته کارشناسان تقاضا برای تولید و مصرف انرژی در آینده به

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: f.farivar@srbaiu.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر- مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

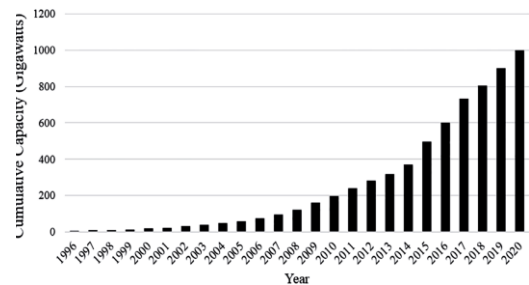
۲. استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر- مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

۳. استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

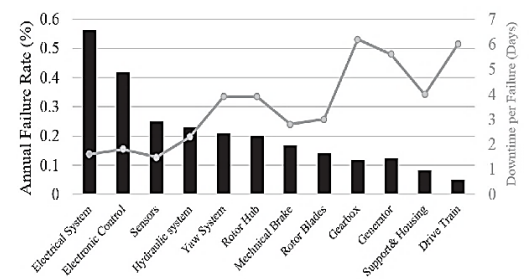
^۴ Renewable Energy Laboratory (NREL)

مرجع [۶] دو راه کار برای تحمل‌پذیری عیب در توربین‌های بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم را تحت عنوان‌های^۳ SSTPC و^۴ TSTPR پیشنهاد می‌دهد و با آنالیز نتایج تجربی، این دو روش را با هم مقایسه می‌کند. در این مقاله به مسئله مقاوم بودن کنترل‌کننده و تحمل‌پذیری در برابر عیب پرداخته نشده است. مقاله [۷] یک سیستم کنترل مد‌لغزشی را برای توربین بادی سرعت متغیر برای سیستم‌های تبدیل انرژی باد مستقیم^۵ که مجهز به ژنراتور سنکرون مغناطیس دائمی متصل به شبکه است، پیشنهاد می‌دهد. رویکرد مد‌لغزشی کارایی بسیار مطلوبی را در کنترل سیستم‌های غیرخطی پیچیده همانند سیستم‌های تبدیل انرژی باد مستقیم از خود نشان می‌دهد. استراتژی کنترلی پیشنهادی در این مقاله، قوانین دستیابی^۶ (رسیدن به سطح لغزش صفر) را بهبود می‌بخشد به نحوی که سبب کاهش پدیده وزوز و همچنین بهبود ویژگی‌های THD^۷ در مقایسه با قانون دستیابی مد‌لغزشی قدیمی و مرسوم می‌شود. در این مقاله به مسئله مقاوم بودن کنترل‌کننده و قابلیت تحمل‌پذیری در برابر عیب پرداخته نشده است. مرجع [۸] کنترل مقاوم توربین بادی تحت شرایط عیب شبکه را پیشنهاد می‌دهد که در آن کنترل‌کننده برای مبدل‌های پشت به پشت^۸ به منظور بهبود LVRT پیشنهاد شده است. در این مرجع کنترل‌کننده مد‌لغزشی با کنترل‌کننده انتگرالی-تناسبی قبلی در مبدل سمت ماشین و مبدل سمت شبکه جایگذاری شده است. در مقاله [۹]، الگوریتمی برای استخراج بیشینه توان از توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از منطق فازی نوع دو معرفی شده است. این کنترل‌کننده این امکان را فراهم می‌کند که اگر سرعت باد کمتر از سرعت نامی توربین باشد، بیشینه‌ی توان از سیستم استخراج شود. همچنین، منطق فازی نوع ۲ به منظور کنترل بهینه و نیز مقاومت در مقابل عدم قطعیت‌ها در سیستم اعمال شده است و طبق نتایج به دست آمده از مقاله استفاده از منطق فازی نوع ۲ در این مقاله سبب حذف اثرات نامطلوب عدم قطعیت‌ها در خروجی می‌شود. در مقاله [۱۰]، تشخیص عیب در یک توربین بادی شبیه

مزایای بیشتر، توربین‌های بادی سیستم‌های گران‌قیمتی هستند و هرگونه خرابی در آنها ممکن است منجر به خاموشی چند روزه سیستم گردند. شکل (۲) نمایانگر نمودار مربوط به درصد رخداد خرابی در توربین‌های بادی و میزان خاموشی سیستم برای هر خرابی است [۴]. از این‌رو، این مسئله حائز اهمیت است که بتوان قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها را بهبود بخشیده و در عین حال هزینه‌های نگهداری را پایین نگاه داشت و توان تولیدی را افزایش داد. بدین منظور، راهکارهای تشخیص و تفکیک عیب^۱ و کنترل تحمل‌پذیری عیب^۲ روش‌های مناسبی هستند. در ادامه، مطالعات پیشین مرتبط با موضوع این مقاله مرور می‌شود: در مرجع [۵]، یک الگوریتم تشخیص عیب برای مبدل توربین بادی تحت شرایط سرعت باد متغیر طراحی شده است. این الگوریتم به تشخیص عیبی تحت عنوان مسیر جریان نرمال شده مبتنی بر سرعت باد می‌پردازد و برای تشخیص دقیق رخداد و محل عیب مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱: ظرفیت توان تولیدی توربین‌های بادی نصب شده در جهان [۳ و ۲]



شکل ۲: درصد رخداد خرابی در توربین‌های بادی و میزان خاموشی سیستم برای هر خرابی [۴]

⁵ Wind Energy Conversion System (WECS)

⁶ Reaching Law (RL)

⁷ Total Harmonic Distortion

⁸ Back-To-Back

¹ Fault Detection and Isolation (FDI)

² Fault Tolerant Control (FTC)

³ Six-Switch Three-Phase Converters

⁴ Three-Switch Three-Phase Rectifier

مرجع با آنچه در این مقاله پیشنهاد شده، متفاوت است. همچنین، نوع و معادلات ژنراتور توربین بادی مورد بررسی مرجع [۱۵] نیز با این مطالعه، متفاوت است. در مقاله [۱۶]، کنترل کننده فازی مدلغزشی با استفاده از الگوریتم‌های اجتماع ذرات و جستجوی گرانش^۴ بهینه شده است. در مرجع [۱۷]، سیستم کنترلی پیشنهادی برای توربین باد ژنراتور سنکرون مغناطیس دائمی^۵، کنترل کننده مدلغزشی مبتنی بر سیستم فازی تاکاگی سوگنو است. در مقالات [۱۵]، [۱۶] و [۱۷] به مسئله مقاوم بودن کنترل کننده و تحمل پذیری در برابر عیب پرداخته نشده است. در مقاله [۱۸] یک کنترل کننده تاکاگی سوگنو^۶ فازی-تناسبی انتگرالی مشتقی برای بخش ژنراتور در سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائمی در توربین بادی دریایی^۷ ارائه شده است. مرجع [۱۹] یک روش کنترلی LVRT^۸ برپایه فازی را برای سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و سیستم ذخیره انرژی پیشنهاد می‌دهد. در مرجع [۲۰]، از کنترل غیرخطی بازگشت به عقب^۹ برای کنترل سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده است. مشخصات باد در شبیه‌سازی این مرجع از منطقه‌ای در مراکش اندازه‌گیری شده است تا پایداری سیستم را در شرایط واقعی بسنجد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش بازگشت به عقب مبتنی بر لیاپانوف نتایج خوبی را از خود نشان می‌دهد و اعتبار آن به وسیله ی یک توربین بادی ۲ مگاواتی اثبات شده است. در مراجع [۱۵] الی [۲۰]، تمرکز بر طراحی سیستم کنترلی است و در آنها به مسئله عیب در توربین‌های بادی پرداخته نشده است.

مرجع [۲۱]، تحمل‌پذیری عیب در توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تحت شرایط عیب حلقه باز را بررسی می‌کند. عیب‌های مدار باز در سمت مبدل ماشین سبب وقفه در جریان AC می‌شوند که به نوبه خود باعث هارمونیکها و ریپل‌زنی در خط ولتاژ DC می‌شوند. در این مرجع، نوع توربین بادی مورد استفاده از لحاظ ساختاری با آنچه در این مقاله پیشنهاد شده مشابه می‌باشد، اما نوع عیب مورد بررسی و

سازی شده با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت می‌گیرد. هدف مقاله [۱۰]، ارائه راه حلی ماندگار برای تشخیص و تفکیک عیب در توربین‌های بادی است.

در مقاله [۱۱]، روش مبتنی بر مدل همراه با فیلتر کالمن برای تحمل‌پذیری عیب در توربین بادی شناور پیشنهاد شده است. در این مقاله، از فیلتر کالمن برای تخمین زاویه گام به منظور تشخیص رخداد عیب استفاده شده است. مقاله [۱۲] طراحی کنترل مدلغزشی مبتنی بر انفعال برای حداکثر ردیابی نقطه توان^۱ در سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم را معرفی می‌کند. در مقاله [۱۳]، از دو استراتژی کنترلی برای توربین باد ژنراتور القایی دو سو تغذیه استفاده شده است. ابتدا استراتژی کنترل محور مستقیم با مدلاسیون بردار فضای سه سطحی و سپس استراتژی کنترل فازی مدلغزشی به همراه معکوس کننده مدلغزشی سه سطحی روی سیستم اعمال شده است. طبق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در شرایط پیاده‌سازی یکسان، توان اکتیو و راکتیو در توربین بادی ژنراتور القایی دوسو تغذیه تحت کنترل کننده فازی-مدلغزشی با استفاده از استراتژی مدلاسیون بردار فضای سه سطحی عملکرد بهتری نسبت به استراتژی کنترل محور مستقیم سه سطحی را داراست. در این مقاله، مسئله مقاوم بودن کنترل کننده و تحمل‌پذیری سیستم در برابر عیب مغفول مانده است. در مقاله [۱۴]، کنترل تحمل‌پذیر عیب برای توربین‌های بادی بوسیله یک کنترل کننده مدلغزشی فیدبک خروجی تطبیقی^۲ انجام گرفته است که در آن از یک کنترل کننده مقاوم برای کنترل سرعت روتور و نیروی باد در حضور عیب عملگر و عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. کنترل کننده پیشنهادی آن یک کنترل کننده مدلغزشی به همراه یک سطح انتگرالی و بهره‌ی تطبیقی است که ساختار کنترل کننده این مقاله با آنچه در این مقاله پیشنهاد خواهد شد، متفاوت است.

در مرجع [۱۵]، کنترل کننده فازی-مدلغزشی برای توربین بادی ژنراتور القایی دوسو تغذیه^۳ ارائه شده است که قواعد فازی و نحوه ترکیب کنترل کننده فازی و مدلغزشی در این

⁶ Takagi-Sugeno

⁷ Offshore Wind Turbines (OWTs)

⁸ Low-Voltage Ride-Through

⁹ Backstepping

¹ Maximum Power Point Tracking

² Adaptive Output Feedback-Sliding Mode Controller (AOFSMC)

³ Doubly-Fed Induction Generator (DIFG)

⁴ PSO-GSA

⁵ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

تناسبی-انتگرالی بر پایه الگوریتم حداقل میانگین مربعی^۴ مورد مقایسه قرار داده است که طبق نتایج آن روش پیشنهادی در این مرجع نرم^۵ بوده و بالازدگی^۶ کمتری دارد. مرجع [۲۶] یک طرح کنترلی مقاوم در خصوص ردیابی حداکثر نقطه‌ی توان توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم سرعت متغیر را ارائه می‌دهد. هدف طرح کنترلی این است که به وسیله الگوریتم ردیابی بهبود یافته، بیشینه نقطه توان به طور موثری توان تولیدی تحت سرعت بادهای متغیر را بهبود ببخشد. در مرجع [۲۷]، یک سیستم کنترلی جدید توربین بادی مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم برای یکپارچه‌سازی شبکه AC ضعیف را بدون استفاده از ردیابی حداکثر نقطه توان ارائه می‌دهد. در مراجع [۲۴] و [۲۶] و [۲۷] نیز به تحمل پذیری سیستم در برابر عیب توجه نشده است.

مرجع [۲۸]، یک طراحی کنترل تحمل‌پذیر عیب از طریق SOGI^۷ متعدد با حذف اغتشاشهای هارمونیک برای کاربردهای نوسان جریان ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم پنج فاز را پیشنهاد می‌دهد. مزیت آن استفاده از SOGI، اجرای آنلاین و استخراج کارآمد چند هارمونیک بدون در نظر گرفتن پارامترهای مدل سیستم است.

در مرجع [۲۹]، کنترل یکپارچه ژنراتور القایی دوسو تغذیه، محدودکننده جریان خطا و ذخیره‌سازی انرژی در مزارع بادی را معرفی می‌کند که در آن روشی برای کنترل هماهنگ ژنراتور القایی دوسو تغذیه، ابر رسانای ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی و ابر رسانای محدودکننده جریان خطا با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی ارائه شده است.

مرجع [۳۰]، مدل‌سازی مزرعه بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه با مدل‌سازی بخش مکانیکی با استفاده از خوشه‌بندی بر اساس ضریب توان جذب به جای سرعت باد به عنوان شاخص دسته‌بندی توربین را پیشنهاد می‌دهد. در مرجع [۳۱]، مدل تحلیلی جهت تعیین اثرات پارامترهای توربین بادی و مشخصه احتمالی سرعت باد بر میانگین قیمت گره‌ای بازار برق ارائه داده شده است.

استراتژی شناسایی عیب و طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی با آنچه در این مقاله آمده، متفاوت می‌باشد. مرجع [۲۲] تشخیص و تحمل‌پذیر مقاوم عیب را برای توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از اصل معادل‌سازی قطعیت را ارائه می‌دهد. در این مرجع، اصل معادل‌سازی قطعیت همراه با کنترل‌کننده مدل‌غزشی به منظور تشخیص و تحمل‌پذیری عیب و همچنین بیشینه ردیابی نقطه توان مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم توربین باد تحت عیب عملکرد بوده است. در این مرجع، نوع توربین بادی مورد مطالعه و نوع عیب مورد بررسی با آنچه در این مقاله مورد توجه است، مشابه می‌باشد اما کنترل‌کننده پیشنهادی و استراتژی شناسایی عیب متفاوت می‌باشد.

در مقاله [۲۳]، یک کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب تطبیقی برای توربین بادی سرعت متغیر که در ناحیه سرعت باد بالا عمل می‌کند را ارائه می‌دهد. کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب تطبیقی پیشنهادی در آن، یک رویکرد کنترل مد لغزشی با قانون انطباق را پیاده سازی می‌کند که در برابر عدم قطعیت های مرزهای بالا مقاوم باشد. هدف این سیستم کنترلی، کاهش اثر عیب‌های عملکرد و تنظیم توان ژنراتور به مقدار نامی و در نتیجه‌ی آن کاهش تنش‌های مکانیکی در ناحیه سرعت بالا است. عملکرد کنترل‌کننده در حضور چندین عیب عملکرد و شرایط باد آشفته ارزیابی شده است که طبق نتایج شبیه سازی عملکرد نرم، بهره کمتر و کاهش وزوز نسبت به رویکرد کنترل مدل‌غزشی استاندارد برای رویکرد پیشنهادی این مقاله به دست آمده است.

مرجع [۲۴] یک کنترل زمان محدود مقاوم^۱ برای توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائمی با استفاده از تابع لیاپانوف را پیشنهاد می‌دهد. در مرجع [۲۵] یک طرح کنترل تطبیقی برای توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائمی ارائه شده است که این طرح بر پایه‌ی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی^۲ و یک الگوریتم فیلترینگ تطبیقی به نام حداقل میانگین ریشه مربعی نمایی^۳ طراحی شده است. این مرجع ولتاژ و توان خروجی تحت عیب شبکه را با کنترل‌کننده

^۵ Smooth

^۶ Overshoot

^۷ Second-Order Generalized Integrators

^۱ Robust Finite-time

^۲ Proportional-Integral controller

^۳ Least Mean Square Root of Exponential (LMSRE)

^۴ Least Mean Square (LMS)

استفاده قرار گرفته است [۷]. شماتیک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در شکل (۳) آمده است.

۲-۲- مدل ریاضی توربین باد مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

گشتاور آیرودینامیکی تولیدی توسط نیروی باد از طریق بخش پیشرانه^۳ به ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم منتقل می‌شود. پس از آن ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و آن را از طریق یکسوکننده دیود، مبدل بوست، معکوس کننده نقطه خنثی بست و فیلتر L به شبکه منتقل می‌کند. شکل (۳) نمای کلی از عملکرد شبکه متصل به توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم بر پایه سیستم تبدیل انرژی بادی را نشان می‌دهد.

توان در دسترس باد و توان مکانیکی تولید شده توسط روتور به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آورده شده است. که ρ و v و A به ترتیب چگالی هوا، سرعت باد و سطح دوران پره‌های توربین است [۳۲]:

$$P_{\text{available}} = \frac{1}{2} A v^3 \omega \quad (1)$$

$$P_t = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

در روابط فوق ω سرعت زاویه‌ای روتور، R شعاع دوران روتور، C_p ضریب توان است که به دو متغیر β (زاویه گام) و λ (نرخ سرعت tip پره‌ها) وابسته است. ظرفیت تولیدی در سیستم تبدیل انرژی بادی معمولاً به وسیله منحنی توان سیستم تبدیل انرژی بادی مشخص می‌شود.

محدوده عملکرد سرعت باد در سیستم تبدیل انرژی بادی بین سرعت باد cut-in (یا همان $v_{\omega-min}$) و سرعت cut-out (یا همان $v_{\omega-max}$) است. زمانی که سرعت باد کمتر از $v_{\omega-min}$ یا بالاتر از $v_{\omega-max}$ باشد معمولاً سیستم توربین باد خاموش می‌شود. در زمانهایی که سرعت باد بین $v_{\omega-min}$ و سرعت نامی باشد سیستم در ناحیه کار فعال می‌باشد. شکل (۴) نمایانگر منحنی توان توربین بادی است.

هدف از این مقاله، طراحی کنترل‌کننده ترکیبی کلاسیک-هوشمند مبتنی بر کنترل مدلغزشی و سیستم‌های فازی برای سیستم‌های توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم است تا میزان تحمل‌پذیری عیب در این سیستم‌ها افزایش یابد.

نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- طراحی سیستم کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب برای توربین بادی
- بهره‌گیری از کنترل‌کننده ترکیبی کلاسیک-هوشمند مقاوم و تطبیقی مبتنی بر روش کنترل مدلغزشی و سیستم فازی
- طراحی عیب عملگر با ویژگی‌های مختلف نظیر دامنه، زمان رخداد و سرعت تغییر دینامیکی
- بررسی میزان تحمل‌پذیری سیستم در برابر رخداد عیب در حضور سیستم کنترلی طراحی شده

سایر بخش‌های این مقاله به شرح زیر می‌باشد: در بخش ۲ به توصیف مدل ریاضی توربین بادی مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته شده است. سپس سیستم کنترل تحمل‌پذیر عیب در بخش ۳ طراحی شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- معرفی سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

در این بخش، به معرفی سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته خواهد شد. در ابتدا، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم معرفی می‌شود. سپس، معادلات ریاضی سیستم توربین بادی آورده شده است.

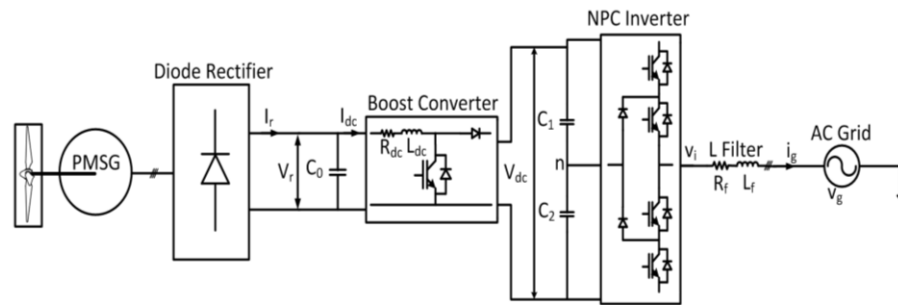
۲-۱- ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

در سیستم‌های ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم مبتنی بر سیستم تبدیل انرژی بادی، ژنراتور به طور مستقیم به وسیله مبدل انرژی به شبکه الکتریکی متصل است. در این مدل، یکسوساز دیود، مبدل تقویتی^۱، معکوس کننده ی نقطه خنثی^۲ و فیلتر به عنوان رابط بین توربین بادی و شبکه مورد

³ Drivetrain

¹ Boost

² Neutral Point Clamped (NPC)



شکل ۳: یک نمای کلی از عملکرد شبکه متصل به توربین بادی PMSG مبتنی بر WECS [7]

$$\frac{di_{dg}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{dg} + \frac{1}{L_f}v_{di} - \frac{1}{L_f}v_{dg} + \omega_g i_{qg} \quad (5)$$

$$\frac{di_{qg}}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_{qg} + \frac{1}{L_f}v_{qi} - \frac{1}{L_f}v_{qg} - \omega_g i_{dg} \quad (6)$$

که در آن R_f و L_f مقاومت و سلف فیلتر هستند. v_{dg} و v_{qg} ولتاژهای شبکه و v_{di} و v_{qi} ولتاژهای خروجی معکوس کننده نقطه خنثی بوده و i_{dg} و i_{qg} جریان‌های شبکه هستند و ω_g نمایانگر سرعت زاویه ای شبکه است. برداهای حالت و ورودی کنترلی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

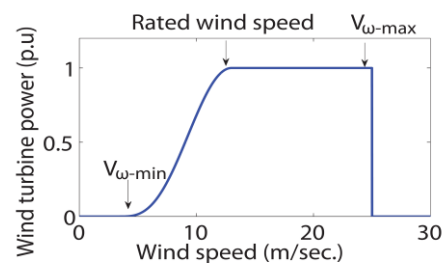
$$x = [I_{dc} \ V_{dc} \ i_{dg} \ i_{qg}]^T \quad (7)$$

$$u = [q \ v_{di} \ v_{qi}]^T \quad (8)$$

v_{di} و v_{qi} به عنوان ورودی های کنترلی در نظر گرفته شده اند و ورودی q ($0 < q < 1$)، یک پالس سیکل کاری مناسب برای تولید سیگنال سوئیچ برای مبدل بوست و معکوس‌کننده‌ی نقطه خنثی بست است که در بخش بعدی در رابطه (۲۳) معرفی خواهد شد.

۳- کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب پیشنهادی

در این بخش به طراحی کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب مبتنی بر کنترل مد‌لغزشی و سیستم فازی پرداخته می‌شود. در شکل (۵)، بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیشنهادی نشان داده شده است. در طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی، سیستم



شکل ۴: منحنی توان توربین بادی [۷]

۳-۲- معادلات ریاضی سیستم توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

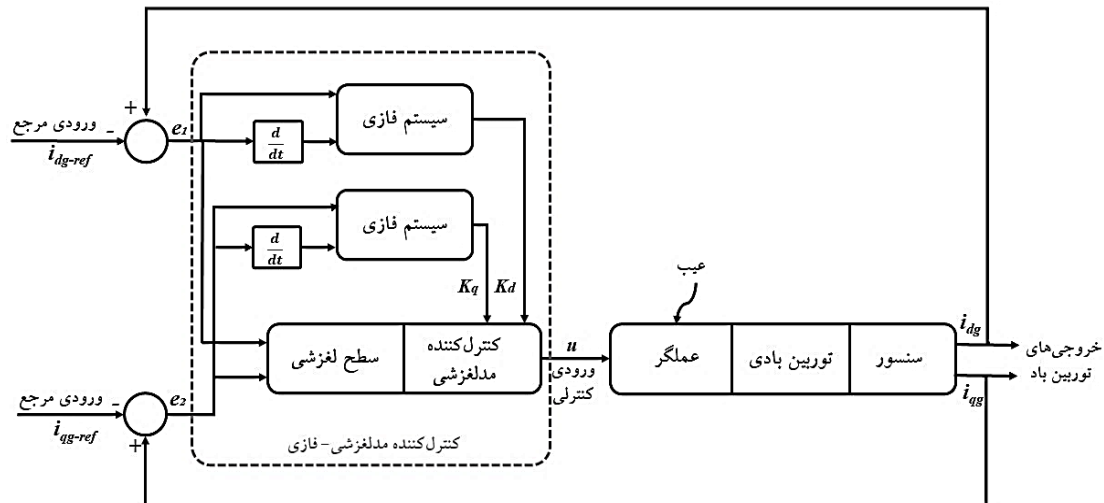
در این زیر بخش، معادلات حالت برای توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ارائه می‌شود که مطابق روابط زیر است [۷]:

$$\frac{dI_{dc}}{dt} = -\frac{R_{dc}}{L_{dc}}I_{dc} + \frac{1}{L_{dc}}V_r - \frac{(1-q)}{L_{dc}}V_{dc} \quad (3)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_0}I_{dc} - \frac{1}{C_0}I_{dg} \quad (4)$$

که در آن R_{dc} و L_{dc} به ترتیب مقاومت و سلف در مبدل تقویتی هستند. V_r و I_r به ترتیب ولتاژ و جریان خروجی یکسوکننده و V_{dc} نیز ولتاژ خط DC هستند. همچنین، $0 < q < 1$ پالس دوره کاری^۱ برای تولید سیگنال سوئیچ و I_{dc} جریان سلف است. V_{dc} به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده که بوسیله جریان شبکه کنترل می‌شود. معادلات فیلتر L نیز به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

^۱ Duty Cycle



شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترل کننده ترکیبی مدلفزشی- فازی پیشنهادی برای کنترل سیستم توربین بادی

مدلفزشی برای آن طراحی خواهد شد. سطوح لغزشی با استفاده از خطاهای کنترلی محاسبه می‌شود و در طراحی کنترل کننده مدلفزشی از آن استفاده می‌شود. برای دستیابی به عملکرد بهتر کنترل کننده اصلی و تطبیق پذیری آن با شرایط، ضرایب کنترل کننده مدلفزشی با استفاده از سیستم‌های فازی بصورت تطبیقی تنظیم می‌شود. از اینرو، دو سیستم فازی در بلوک کنترل کننده پیشنهادی در نظر گرفته شده است که ورودی‌های آنها خطاهای کنترلی و مشتقات آنها می‌باشد. در ادامه، به طراحی بخشهای مختلف این بلوک دیاگرام پرداخته می‌شود.

۲-۳- طراحی کنترل کننده مدلفزشی برای کلاس استاندارد سیستم‌های غیرخطی

در ادامه به طراحی کنترل کننده لغزشی و ترکیب آن با سیستم فازی پرداخته خواهد شد. هدف از طراحی کنترل کننده مدلفزشی، طراحی سیستم کنترل برای یک سیستم غیرخطی است که مدل سیستم با دقت معلوم نباشد، به گونه ای که سیستم پایدار شود و توانایی ردیابی ورودی مرجع را داشته باشد. سیستم غیرخطی مرتبه دوم با معادله حالت زیر مفروض است:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}) + g(x, \dot{x})u \quad (9)$$

استنتاج فازی^۱ به کنترل کننده مدلفزشی اضافه شده است تا ضرایب کنترل کننده را بصورت تطبیقی تنظیم نماید. در زمان رخداد عیب سیستم فازی به کمک کنترل کننده مدلفزشی آمده و برای بهبود عملکرد سیستم و افزایش تحمل پذیری عیب در سیستم توربین بادی ضرایب K_q و K_d را تنظیم می‌نماید و در نتیجه آن در کاهش اثر وزور نیز تاثیرگذار است. در این بخش، ابتدا بلوک دیاگرام ساختار کنترلی پیشنهادی، بخشهای مختلف آن و نحوه ترکیب کنترل کننده‌های کلاسیک و هوشمند معرفی می‌شود. سپس، روش عمومی طراحی کنترل کننده مدلفزشی برای کلاس استاندارد سیستم‌های غیرخطی، آورده شده است. در ادامه، به طراحی کنترل کننده مدلفزشی برای سیستم توربین بادی مورد مطالعه (معرفی شده در بخش ۲-۳) پرداخته می‌شود. همچنین، سیستم فازی و بکارگیری آن در ساختار کنترلی پیشنهادی در این بخش آمده است.

۱-۳- معرفی ساختار کنترل کننده پیشنهادی

بلوک دیاگرام سیستم کنترل کننده تحمل پذیر عیب طراحی شده برای توربین بادی در شکل (۵) آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، رخداد عیب در عملگر توربین بادی مورد نظر است. در سیستم کنترلی پیشنهادی، کنترل کننده اصلی سیستم توربین باد، از خانواده کنترل کننده‌های غیرخطی مقاوم است و یک کنترل کننده

^۱ Fuzzy Logic System (FLS)

جدول ۱: روش‌های CRL و PRL برای حذف پدیده وزوز و معایب آنها

روش	\dot{S} مشتق سطح لغزش	معایب روش
CRL	$\dot{S} = -\lambda S - K \text{sign}(S)$	عدم تطبیق‌پذیری قانون کنترل
PRL	$\dot{S} = -K S ^{\gamma x} \text{sign}(S)$	کاهش مقاوم بودن به سبب ترم نمایی $ S ^{\gamma x}$

که در روابط آمده در جدول $0 < \gamma x < 1$ و $K > 0$ است. لذا برای کاهش پدیده ی وزوز روش دیگری تحت عنوان روش قوانین دستیابی نمایی مطرح می‌شود [۳۵] و [۳۶] که طبق آن داریم:

$$\dot{S} = -\frac{K}{D(S)} \text{sign}(S) \quad (14)$$

$$D(S) = \alpha + (1 - \alpha)e^{-\beta x |S|} \quad (15)$$

که در آن $0 < \alpha < 1$ و $\beta x > 0$ است. این روش مزایای بسیاری همچون زمان دستیابی کمتر و کاهش پدیده وزوز را داراست. روش دیگر که مطرح می‌شود، روش قانون دستیابی نمایی پیشرفته^۳ است. این روش تمام مزایای روش قبلی را داراست و علاوه بر آن، سرعت دستیابی بالاتری را دارد. لذا، در این پژوهش به سبب آن که مزایای این روش از دست نرود و در عین حال تحمل‌پذیری عیب را در سیستم‌های توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم افزایش داشته باشد، برای بخش کنترل مد لغزشی از روش کنترل‌کننده مد لغزشی بر پایه‌ی قانون دستیابی نمایی پیشرفته استفاده می‌شود. در ادامه، نحوه تعریف ریاضی مشتق سطح لغزش \dot{S} مربوط به این روش آورده شده است [۷]:

$$\dot{S} = -\lambda S - \frac{K}{D(S)} |S|^{\gamma x} \text{sign}(S) \quad (16)$$

که در آن $D(S)$ در تمامی زمانها همواره مثبت می‌باشد. در این پژوهش همانطور که ذکر شد، کنترل‌کننده مدل‌گزشی با استفاده از سیستم استنتاج فازی بهبود یافته است تا تحمل‌پذیری بالاتری در برابر رخداد عیب داشته باشد.

که در این رابطه x و u به ترتیب بردارهای حالت و ورودی هستند و f و g نیز توابع غیرخطی سیستم هستند. در این مقاله فرض شده است که توابع f و g توابع غیرخطی معلوم و کراندار هستند. این توابع براحتی از مدل ریاضی سیستم معرفی شده در بخش ۲-۳، قابل محاسبه می‌باشد. همچنین با توجه به مدل سیستم داریم، $g(x, \dot{x}) \neq 0$. هدف، کنترلی ردیابی ورودی مرجع x_d است. لذا، سطح لغزش S برای سیستم مرتبه n به صورت زیر تعریف می‌شود [33]:

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} (x - x_d) \quad (10)$$

که در آن λ پارامتر اسکالر با مقدار مثبت ثابت است. در طراحی کنترل‌کننده‌های مدل‌گزشی، لازم است تا همواره تغییرات سطح لغزش برخلاف جهت سطح لغزش باشد تا در گذر زمان این تغییرات به سطح $S = 0$ همگرا شود که به معنی صفر شدن خطای کنترلی تعریف شده می‌باشد. از اینرو، معادله مربوط به مشتق سطح لغزش \dot{S} به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۳۳] و سپس ورودی کنترلی با هم ارزی مشتق رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$\dot{S} = -K \text{sgn}(S) \quad (11)$$

که در آن K یک ثابت مثبت است و sgn تابع علامت است. u کنترلی مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند [۳۳]:

$$u = u_{con} + u_{discon} \quad (12)$$

$$u = \frac{1}{g} (-f + \dot{x}_d - \lambda x - K \text{sgn}(S)) \quad (13)$$

در رابطه (۱۲)، u_{discon} بخش گسسته موجود در u کنترلی است که مربوط به تابع sgn است و منجر به پدیده وزوز می‌شود. در رابطه (۱۳)، x بردار متغیرهای حالت سیستم رابطه (۹) است و \dot{x}_d مشتق دوم حالت مطلوب سیستم است.

از جمله راه‌کارهای متعدد برای حذف یا تضعیف پدیده وزوز می‌توان به روش CRL^۱ [۳۴]، روش PRL^۲ [۷] اشاره نمود که هر یک به نوبه خود دارای معایبی هستند. معایب آنها در جدول ۱ آورده شده است.

³ Enhanced Exponential Reaching Law (EERL)

¹ Constant-Proportional Rate Reaching Law method

² Power Rate Reaching Law

$$v_{qi} = R_f i_{qg} + L_f \omega_g i_{dg} + v_{qg} + L_f \frac{di_{qg-ref}}{dt} - L_f \lambda_q S_q - L_f \frac{\hat{K}_q}{D_q(S_q)} |S_q|^\gamma \text{sign}(S_q) \quad (22)$$

همانطور که در رابطه (۸) در بخش ۲-۳ (معرفی مدل ریاضی توربین بادی) آورده شد، یکی از ورودی‌های سیستم q می‌باشد. این ورودی یک سیگنال با مقدار عددی بین صفر و یک است که به عنوان سیگنال سویچ برای مبدل بوست و معکوس‌کننده‌ی نقطه خنثی بست، مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال سویچینگ q از رابطه (۲۳) قابل محاسبه است:

$$q = -\frac{R_{dc}}{V_{dc}} i_{dc} + \frac{(V_{dc} - V_{dco})}{V_{dc}} + \frac{L_{dc}}{V_{dc}} \frac{di_{dc-ref}}{dt} - \frac{L_{dc}}{V_{dc}} \lambda_{dc} S_{dc} - \frac{L_{dc}}{V_{dc}} \frac{K_{dc}}{D_{dc}(S_{dc})} |S_{dc}|^\gamma \text{sign}(S_{dc}) \quad (23)$$

در روابط فوق، مقادیر $D_a(S)$ ، $D_q(S_q)$ و $D_{dc}(S_{dc})$ به ترتیب از روابط (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) قابل محاسبه است:

$$D_{dc}(S_{dc}) = \alpha_{dc} + (1 - \alpha_{dc}) e^{-\beta_{dc}|S_{dc}|} \quad (24)$$

$$D_a(S_a) = \alpha_a + (1 - \alpha_a) e^{-\beta_a|S_a|} \quad (25)$$

$$D_q(S_q) = \alpha_q + (1 - \alpha_q) e^{-\beta_q|S_q|} \quad (26)$$

و در رابطه فوق $S_{dc} = i_{dc} - i_{dc-ref}$ است.

۳-۴ سیستم استنتاج فازی

هدف از طراحی کنترل‌کننده مدلفزشی-فازی، تطبیق‌پذیری ضرایب ورودی کنترلی بدست آمده از روش مدلفزشی است. در طراحی بخش سیستم استنتاج فازی کنترل‌کننده ترکیبی، سیگنال‌های خطا و مشتق خطا مطابق روابط (۲۷) و (۲۸) به عنوان ورودی سیستم فازی و ضرایب K_a و K_q به عنوان خروجی سیستم فازی در نظر گرفته می‌شوند. سیستم استنتاج فازی طراحی شده در این مقاله روش حداقل-حداکثر ممدانی می‌باشد.

۳-۳ طراحی کنترل‌کننده مدلفزشی برای سیستم توربین بادی مورد مطالعه

برای یافتن ورودی کنترلی با استفاده از روش مدلفزشی، با تعریف $S_d = i_{dg} - i_{dg-ref}$ و $S_q = i_{qg} - i_{qg-ref}$ و در نظر گرفتن رابطه (۱۶) برای \hat{S} مطابق با روش قوانین دستیابی‌نمایی پیشرفته خواهیم داشت:

$$\dot{S}_d = \frac{di_{dg}}{dt} - \frac{di_{dg-ref}}{dt} = -\lambda_d S_d - \frac{\hat{K}_d}{D_d(S_d)} |S_d|^{\gamma_x} \text{sign}(S_d) \quad (17)$$

$$\dot{S}_q = \frac{di_{qg}}{dt} - \frac{di_{qg-ref}}{dt} = -\lambda_q S_q - \frac{\hat{K}_q}{D_q(S_q)} |S_q|^{\gamma_x} \text{sign}(S_q) \quad (18)$$

در روابط فوق، $D_q(S_q)$ و $D_d(S_d)$ مقادیری مثبت و قابل محاسبه از رابطه (۲۴) و (۲۵) می‌باشد. با جایگذاری روابط (۵) و (۶) در (۱۷) و (۱۸) داریم:

$$\dot{S}_d = -\frac{R_f}{L_f} i_{dg} + \frac{1}{L_f} v_{di} - \frac{1}{L_f} v_{dg} + \omega_g i_{qg} - \frac{di_{dg-ref}}{dt} = -\lambda_d S_d - \frac{\hat{K}_d}{D_d(S_d)} |S_d|^{\gamma_x} \text{sign}(S_d) \quad (19)$$

$$\dot{S}_q = -\frac{R_f}{L_f} i_{qg} + \frac{1}{L_f} v_{qi} - \frac{1}{L_f} v_{qg} - \omega_g i_{dg} - \frac{di_{qg-ref}}{dt} = -\lambda_q S_q - \frac{\hat{K}_q}{D_q(S_q)} |S_q|^{\gamma_x} \text{sign}(S_q) \quad (20)$$

سپس با هم ارزی طرفین روابط (۱۷) و (۱۹) با هم و همچنین، طرفین طرفین روابط (۱۸) و (۲۱) با هم، رابطه معادلات ورودی کنترلی مطابق زیر بدست می‌آید:

$$v_{di} = R_f i_{dg} - L_f \omega_g i_{qg} + v_{dg} + L_f \frac{di_{dg-ref}}{dt} - L_f \lambda_d S_d - L_f \frac{\hat{K}_d}{D_d(S_d)} |S_d|^{\gamma_x} \text{sign}(S_d) \quad (21)$$

پایگاه قواعد فازی مورد استفاده در کنترل‌کننده طراحی شده نیز در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: پایگاه قواعد مورد استفاده در سیستم استنتاج فازی

$K_q & K_d$	e				
	NB	NS	ZO	PS	PB
\dot{e}	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	VB	VS	M	S	M
NS	VB	M	VS	M	VS
ZO	S	VS	M	M	VB
PS	VS	M	S	VS	M
PB	M	S	M	VB	VB

روشهای متداول بخش غیرفازی ساز، روش مرکز ثقل، میانه ماکزیمم، روش مرکز مجموع ها و روش میانگین وزنی است. برای سیستم استنتاج پیشنهادی از روش مرکز ثقل استفاده شده است که رابطه آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z^* = \frac{\int \mu_i(G)GdG}{\int \mu_i(G)dG} \quad (30)$$

که در آن Z^* یک مقدار غیرفازی، μ_i توابع عضویت و (G) متغیر خروجی است.

۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، شبیه‌سازی‌های انجام شده و نتایج آن ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی مطابق با مرجع [7] آورده شده است. پارامترهای WECS مبتنی بر PMSG، ضرایب C_p ، پارامترهای توربین بادی و پارامترهای EERL مبتنی بر کنترل مدلفزشی با استفاده از جداول مرجع [7] تنظیم شده است.

۴-۱- بررسی میزان تحمل‌پذیری توربین باد در برابر عیب عملگر با دامنه کوچکتر

برای بررسی میزان تحمل‌پذیری و مقاوم بودن کنترل‌کننده، عیب عملگر به صورت تناوبی^۱ و جمع‌شونده به ورودی‌های v_{qi} و v_{di} اعمال می‌شود. عیب‌های اعمال شده در شکل (۸) و شکل (۹) نشان داده شده است. حداکثر دامنه عیب‌های اعمال شده در شکل (۹) به جهت بررسی میزان مقاوم بودن سیستم کنترلی طراحی شده سه برابر بزرگتر از شکل (۸) در نظر گرفته شد.

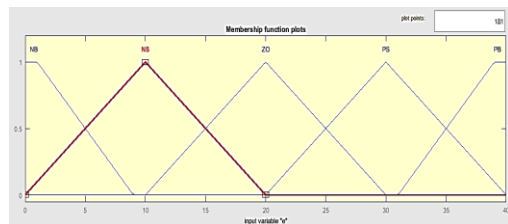
$$e_1 = i_{dg} - i_{dg-ref} \quad (27)$$

$$e_2 = i_{qg} - i_{qg-ref} \quad (28)$$

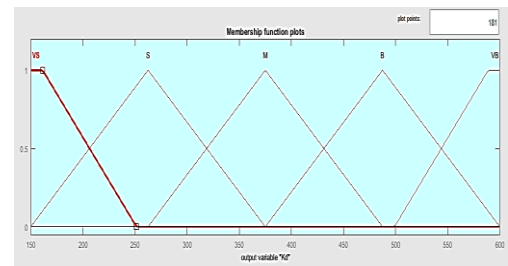
توابع عضویت فازی برای ورودی و خروجی مطابق با متغیرهای فازی تعریف شده در جدول ۲ در شکل (۶) و شکل (۷) نشان داده شده است.

جدول ۲: متغیرهای فازی برای ورودی و خروجی سیستم فازی

$e \ \& \ \dot{e}$ (ورودی)	$K_q \ \& \ K_d$ (خروجی)
NB: بزرگ منفی	VS: خیلی کوچک
NS: کوچک منفی	S: کوچک
ZO: صفر	M: متوسط
PS: کوچک مثبت	B: بزرگ
PB: بزرگ مثبت	VB: خیلی بزرگ



شکل ۶: توابع عضویت مربوط به ورودی‌ها

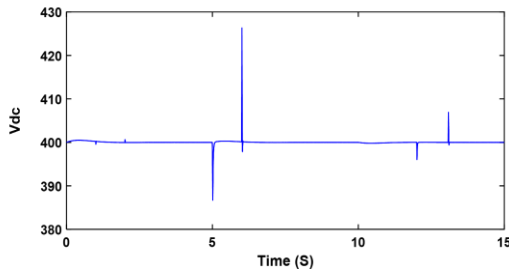


شکل ۷: توابع عضویت مربوط به خروجی

پس از فازی‌سازی پارامترهای ورودی و خروجی، مرحله بعد بیان قواعد فازی است که در آن ورودی‌ها (خطا و مشتق خطا) به عنوان مقدم و خروجی (ضرایب K_q و K_d) به عنوان تالی است. به طور کلی قواعد فازی عبارت‌هایی با ساختار اگر-آنگاه فازی به صورت زیر می‌باشد:

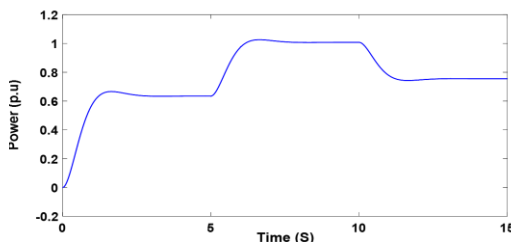
$$R(i): \quad \text{If } e \text{ is } A^i \text{ and } \dot{e} \text{ is } B^i \text{ THEN } K_d \text{ (or } K_q) \text{ is } C^i. \quad (29)$$

¹ intermittent

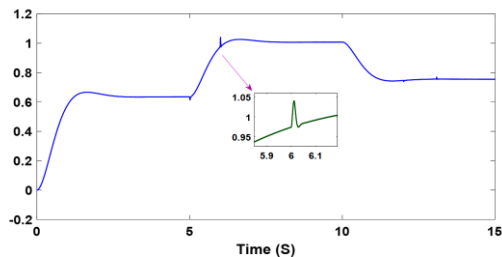


شکل ۱۰- ب (کنترل کننده مدلغزشی): خروجی V_{dc} در حضور عیب عملگر شکل ۸

همچنین، نمودار اثر عیب بر توان تولیدی ژنراتور کنترل شده با کنترل کننده تحمل پذیر پیشنهادی و کنترل کننده مدلغزشی به ترتیب در شکل (۱۱-الف) و شکل (۱۱-ب) آمده است.

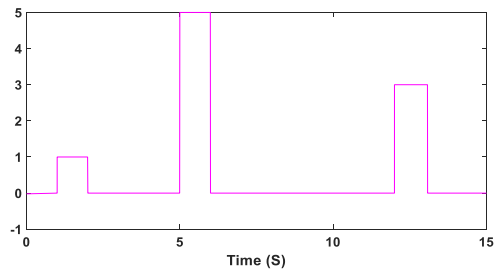


شکل ۱۱-الف (کنترل کننده مدلغزشی- فازی پیشنهادی): توان تولیدی در حضور عیب عملگر شکل ۸

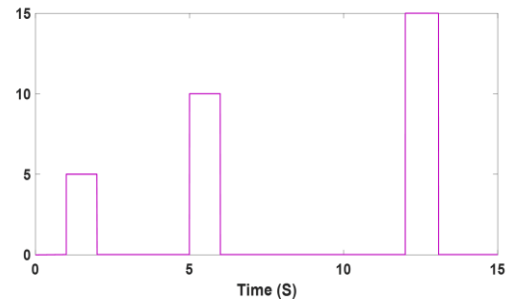


شکل ۱۱-ب (کنترل کننده مدلغزشی): توان تولیدی در حضور عیب عملگر شکل ۸

همانطور که در نمودارها قابل مشاهده است، زمانی که عیب تناوبی به سیستم توربین بادی اعمال می شود، اثر این عیب بر روی خروجی سیستم با کنترل کننده مدلغزشی بسیار مشهود است به طوری که ماکسیمم پیک ولتاژ V_{dc} تا ۴۲۷ ولت نیز می رسد، در حالیکه این پیک ولتاژ V_{dc} در حضور کنترل کننده ترکیبی پیشنهادی ماکزیمم تا ۴۰۱/۵ ولت می شود. همچنین، نمودار شکل موج توان تولیدی ژنراتور

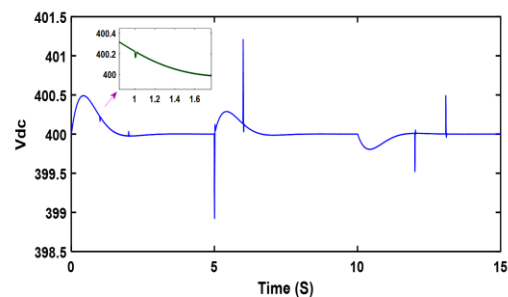


شکل ۸: عیب تناوبی با دامنه کوچکتر- ماکزیمم دامنه ۵

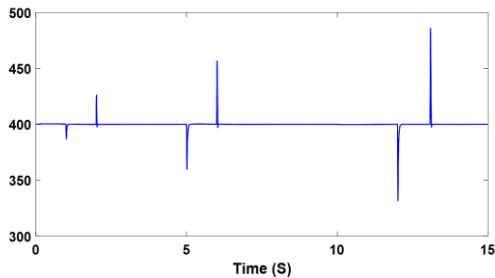


شکل ۹: عیب تناوبی با دامنه بزرگتر از شکل ۸- ماکزیمم دامنه ۱۰

برای بررسی عملکرد سیستم توربین بادی، نمودارهای خروجی ولتاژ سیستم و توان تولیدی ژنراتور ارائه شده است. همچنین، برای ارزیابی کارآمدی سیستم کنترل کننده تحمل پذیر ترکیبی مدلغزشی- فازی، نتایج حاصل از حضور این کنترل کننده با نتایج سیستم کنترلی مدلغزشی کلاسیک مقایسه شد. ابتدا، عیب عملگر نشان داده شده در شکل (۸) به سیستم توربین باد اعمال شد. نمودار اثر عیب بر خروجی ولتاژ V_{dc} در حضور کنترل کننده پیشنهادی مدلغزشی-فازی و کنترل کننده مدلغزشی کلاسیک به ترتیب در شکل (۱۰-الف) و شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است.

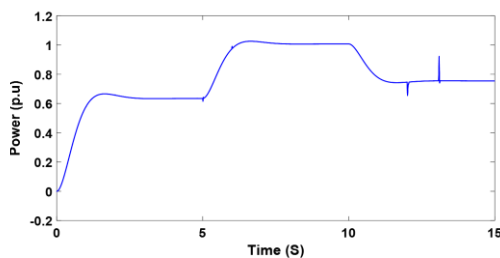


شکل ۱۰-الف (کنترل کننده مدلغزشی- فازی پیشنهادی): خروجی V_{dc} در حضور عیب عملگر شکل ۸

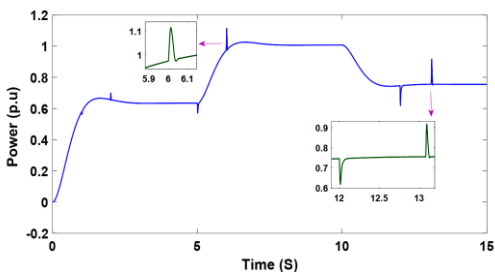


شکل ۱۲-ب (کنترل‌کننده مد‌لغزشی): خروجی V_{dc} در حضور عیب عملگر شکل ۹

نمودار اثر عیب بر توان تولیدی ژنراتور تحت کنترل‌کننده تحمل‌پذیر پیشنهادی و کنترل‌کننده مد‌لغزشی به ترتیب در شکل (۱۳-الف) و شکل (۱۳-ب) آمده است.



شکل ۱۳-الف (کنترل‌کننده مد‌لغزشی - فازی پیشنهادی): توان تولیدی در حضور عیب عملگر شکل ۹



شکل ۱۳-ب (کنترل‌کننده مد‌لغزشی): توان تولیدی در حضور عیب عملگر شکل ۹

همانطور که در نمودارها قابل مشاهده است، زمانیکه عیب تناوبی به سیستم اعمال می‌شود، اثر عیب بر خروجی‌های سیستم توربین باد با کنترل‌کننده مد‌لغزشی بسیار مشهود است، بطوریکه ماکزیمم پیک ولتاژ V_{dc} در عیب ۵ ولت تا ۴۲۷ ولت نیز می‌رسد، در حالیکه این پیک ولتاژ V_{dc} در زمانیکه سیستم با کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی کنترل می‌شود، ماکزیمم تا ۴۰۱/۱۹ ولت می‌رسد. در عیب به بزرگی ۱۰ ولت نیز در حضور کنترل‌کننده مد‌لغزشی برپایه قانون دستیابی نمای پیشرفته، ولتاژ V_{dc} به میزان ۴۵۸ می‌شود و

نیز با استفاده از کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک، بسیار نرم‌تر عمل می‌کند. برای ارزیابی بهتر، شاخص‌های خطا برای خروجی‌های متغیرهای ولتاژ و توان مطابق روابط زیر محاسبه شده و در جدول ۴ آورده شده است.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (31)$$

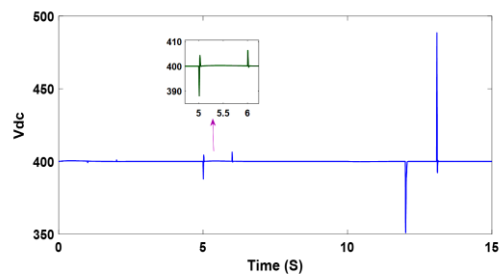
$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (32)$$

جدول ۴: شاخص‌های خطا برای بررسی عملکرد سیستم در حضور عیب تناوبی شکل ۸ با حداکثر دامنه پنج ولت

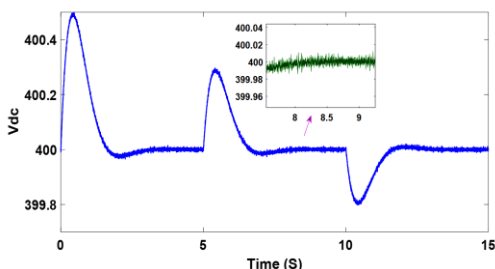
کنترل‌کننده	خطای متغیرهای خروجی	IAE	ISE
کنترل ترکیبی مد‌لغزشی-فازی	V_{dc}	۹۰۷۸	۲۵۳۵،۵
	P_g	۲۰۷۰۳۰	۴۹۰۰۸۰
کنترل مد‌لغزشی	V_{dc}	۱۶۸۸۱	۹۹۷۲۳
	P_g	۴۴۵۸۱۰	۳۱۷۸۰۰۰

۲-۴- بررسی میزان تحمل‌پذیری توربین باد در برابر عیب عملگر با دامنه‌های بزرگ

در این بخش از شبیه‌سازی، عیب عملگر نشان داده شده در شکل (۹) به سیستم توربین باد اعمال شد. همانطور که مشاهده می‌شود، اندازه دامنه عیب تا دو برابر بزرگتر در نظر گرفته شده است تا میزان مقاوم بودن کنترل‌کننده پیشنهادی بهتر بررسی شود. نمودار اثر عیب بر خروجی ولتاژ V_{dc} در حضور کنترل‌کننده پیشنهادی مد‌لغزشی-فازی و کنترل‌کننده مد‌لغزشی کلاسیک به ترتیب در شکل (۱۲-الف) و شکل (۱۲-ب) نشان داده شده است.



شکل ۱۲-الف (کنترل‌کننده مد‌لغزشی - فازی پیشنهادی): خروجی V_{dc} در حضور عیب عملگر شکل ۹



شکل ۱۴-ب (کنترل کننده مدلغزشی): خروجی V_{dc} در شرایط کاری نرمال (بدون رخداد عیب)

از مقایسه شکل (۱۴-الف) و شکل (۱۴-ب) مشهود است که پدیده وزوز در خروجی ولتاژ سیستم توربین بادی کنترل شده با کنترل مدلغزشی-فازی به میزان قابل توجهی کمتر از زمانی است که سیستم توربین بادی با استفاده از کنترل مدلغزشی کلاسیک کنترل می‌شود.

۴-۴- مقایسه با نتایج سایر مقالات

در ادامه، برای مقایسه با نتایج سایر مقالات، عیب عملگر معرفی شده در مقاله [8] به سیستم توربین بادی اعمال شد. در آن مقاله هدف تنظیم ولتاژ خروجی به مقدار مرجع مطلوب بود. نمودار خروجی ولتاژ V_{dc} سیستم توربین بادی کنترل شده با کنترل کننده پیشنهادی مدلغزشی-فازی و کنترل کننده مدلغزشی کلاسیک و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی [8] و در حضور عیب عملگر مرجع [8] به ترتیب در شکل (۱۵-الف) و شکل (۱۵-ب) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، عملکرد سیستم در حضور این عیب و با بودن سیستم کنترل ترکیبی پیشنهادی خوب است و خروجی ولتاژ V_{dc} بخوبی تنظیم می‌شود.

همچنین، نمودار توان اکتیو سیستم توربین بادی کنترل شده با کنترل کننده پیشنهادی مدلغزشی-فازی و کنترل کننده مدلغزشی کلاسیک و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی [8] و در حضور عیب عملگر [8] به ترتیب در شکل (۱۶-الف) و شکل (۱۶-ب) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، نمودار توان اکتیو در شرایط حضور عیب و با سیستم کنترلی پیشنهادی، دارای نوسانات بسیار کم و حتی در برخی موارد قابل چشم پوشی است.

با استفاده از کنترل کننده ترکیبی پیشنهادی این ولتاژ حداکثر ۳،۴۰۶ ولت می‌باشد. همچنین نمودار شکل موج توان تولیدی ژنراتور با کنترل کننده ترکیبی پیشنهادی نسبت به کنترل کننده مدلغزشی، نرم تر رفتار می‌کند.

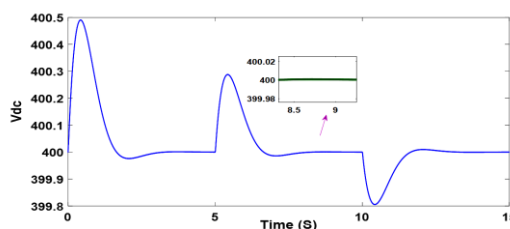
همچنین، ولتاژ V_{dc} به خوبی تنظیم و کنترل می‌شود و نزدیک به عدد ثابت ۴۰۰ ولت نگه داشته می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، ولتاژ V_{dc} بسیار سریع تنظیم شده و تا رخداد میزان عیب ۱۰، کنترل کننده ترکیبی پیشنهادی می‌تواند ولتاژ V_{dc} را در محدوده نزدیک به ۴۰۰ ولت تنظیم نماید. در جدول ۵، شاخص‌های خطا برای خروجی‌های متغیرهای ولتاژ و توان در حضور عیب نشان داده شده در شکل (۹) آورده شده است.

جدول ۵: شاخص‌های خطا برای بررسی عملکرد سیستم در حضور عیب تناوبی شکل ۹ با حداکثر دامنه ده ولت

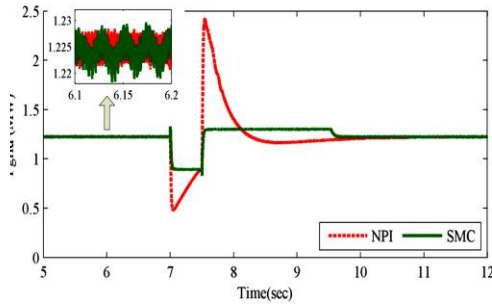
کنترل کننده	خطای متغیرها	IAE	ISE
کنترل ترکیبی	V_{dc}	۱۱۶۰۸	۱۷۷۳۲
	P_g	۲۴۴۱۷۰	۳۹۰۱۷۰۰
کنترل مدلغزشی	V_{dc}	۴۸۸۵۷	۱۰۸۳۴۰۰
	P_g	۹۱۵۱۵۰	۲۶۳۸۷۰۰۰۰

۴-۳- بررسی میزان کاهش پدیده وزوز

در ادامه، برای بررسی اثر کنترل کننده تحمل پذیر مدلغزشی-فازی بر پدیده وزوز، سیستم در شرایط کاری نرمال در نظر گرفته می‌شود. در این ورودی کنترلی سیستم، تابع علامت با تابع اشباع جایگزین شده است. نمودار خروجی ولتاژ V_{dc} با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی مدلغزشی-فازی و کنترل کننده مدلغزشی کلاسیک به ترتیب در شکل (۱۴-الف) و شکل (۱۴-ب) نشان داده شده است.



شکل ۱۴-الف (کنترل کننده مدلغزشی-فازی پیشنهادی): خروجی V_{dc} در شرایط کاری نرمال (بدون رخداد عیب)



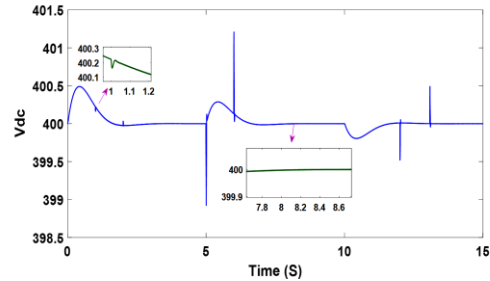
شکل ۱۶-ب (کنترل‌کننده مد‌لغزشی [۸] و کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی [۸]): توان اکتیو در حضور عیب عملگر مرجع [۸]

لذا، کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده مرجع [۸] مقاوم بوده و از قدرت بالای تحمل‌پذیری عیب برخوردار است. علاوه بر آن، کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مد‌لغزشی و تناسبی-انتگرالی طراحی شده در مرجع [۸]، بسیار نرم‌تر بوده و نوسانات بسیار کمتری در مقایسه با آن دارد.

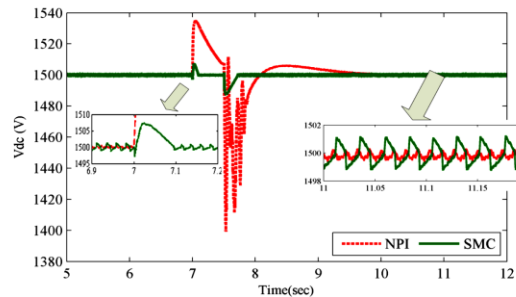
علاوه بر مقایسه با مقاله مرجع [۸] که صورت‌پذیرفت، روش پیشنهادی این مقاله در مقایسه با سایر مقالاتی که به شناسایی عیب و طراحی کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب برای سیستم توربین‌بادی (با معادلات همانند سیستم این مقاله) پرداخته‌اند که در بیشینه تحقیق در مراجع [۲۱] و [۲۲] و [۲۳] و [۲۵] و [۲۸] آمده است، عملکردی بهتر در ردیابی ورودی مرجع و حذف اثر عیب داشته است.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب مبتنی بر کنترل مد‌لغزشی و سیستم فازی برای سیستم‌های توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم طراحی شد. در سیستم کنترل ترکیبی طراحی شده، کنترل مد‌لغزشی موجب افزایش مقاوم بودن و سیستم فازی موجب تطبیق‌پذیری کنترل‌کننده شده است. این نحوه ترکیب و بهره‌مندی از مزایای کنترل‌کننده‌های کلاسیک و هوشمند سبب افزایش تحمل‌پذیری سیستم توربین بادی در برابر رخداد عیب عملگر می‌شود. انواع عیب عملگر با اندازه‌های مختلف روی سیستم اعمال شد و نتایج حاصله نشان داد که میزان توان تولیدی ژنراتور و ولتاژ خروجی V_{dc} ورودی مرجع مطلوب متناظر را به خوبی ردیابی می‌کنند و سیستم عملکرد خوبی دارد و در

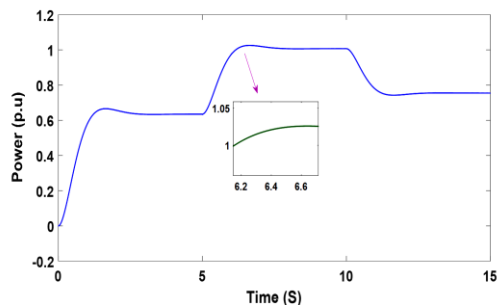


شکل ۱۵-الف (کنترل‌کننده مد‌لغزشی-فازی پیشنهادی): خروجی V_{dc} در حضور عیب عملگر مرجع [۸]



شکل ۱۵-ب (کنترل‌کننده مد‌لغزشی [۸] و کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی [۸]): خروجی V_{dc} در حضور عیب عملگر مرجع [۸]

همانگونه که نتایج نشان می‌دهد، درصد تاثیر عیب روی خروجی ولتاژ V_{dc} در سیستم توربین بادی تحت کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی بسیار کمتر از کنترل‌کننده مد‌لغزشی مرجع [۸] است. بطوریکه در حضور کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی، زمانی که اندازه عیب به بزرگی ۱ ولت است این تاثیر قابل چشم‌پوشی است و ولتاژ V_{dc} تقریباً تغییر نمی‌کند و زمانی که بزرگی عیب ۳ و ۵ ولت است، ولتاژ V_{dc} به ترتیب به اندازه ۰.۵، ۱.۱۹ و ۱ واحد تغییر می‌کند که باز هم در مقایسه با اندازه ولتاژ مطلوب ۴۰۰ ولت قابل اغماض است.



شکل ۱۶-الف (کنترل‌کننده مد‌لغزشی-فازی پیشنهادی): توان اکتیو در حضور عیب عملگر مرجع [۸]

نامطلوب پدیده وزوز را دارد. در ادامه این پژوهش، طراحی کنترل کننده فازی نوع دو به دلیل مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت و همچنین ترکیب آن با روش‌های کنترل کلاسیک مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

برابر عیب مقاوم است. بررسی شاخص‌های خطا، کارایی کنترل کننده طراحی شده را تایید می‌کند. کنترل ترکیبی پیشنهادی نسبت به کنترل کننده کلاسیک مدله‌غزشی عملکردی مقاوم‌تر دارد و همچنین، قابلیت کاهش اثر

مراجع

- [1] K. E. Johnson and P. A. Fleming, "Development, implementation, and testing of fault detection strategies on the National Wind Technology Center's controls advanced research turbines", *Mechatronics*, Vol. 21, NO. 4, 2011, pp. 728–736.
- [2] S. Simani, "Overview of modelling and advanced control strategies for wind turbine systems", *Energies*, Vol. 8, NO. 12, 2015, pp. 13395–13418.
- [3] F. Shi and R. Patton, "An active fault tolerant control approach to an offshore wind turbine model", *Renewable Energy*, Vol. 75, 2015, pp. 788–798.
- [4] S. Faulstich, B. Hahn, and P. J. Tavner, "Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment", *Wind Energy*, Vol. 14, NO. 3, 2011, pp. 327–337.
- [5] Y. Qiu, H. Jiang, Y. Feng, M. Cao, Y. Zhao, and D. Li, "A New Fault Diagnosis Algorithm for PMSG Wind Turbine Power Converters under Variable Wind Speed Conditions", *Energies*, Vol. 9, NO. 7, 2016, pp. 548.
- [6] N. M. A. Freire and A. J. M. Cardoso, "Fault-Tolerant PMSG drive with reduced dc-link ratings for wind turbine applications", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 2, NO. 1, 2013, pp. 26–34.
- [7] S. M. Mozayan, M. Saad, H. Vahedi, H. Fortin-Blanchette, and M. Soltani, "Sliding Mode Control of PMSG Wind Turbine Based on Enhanced Exponential Reaching Law", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, NO. 10, 2016, pp. 6148–6159.
- [8] M. Nasiri, J. Milimonfared, and S. H. Fathi, "Robust control of PMSG-based wind turbine under grid fault conditions", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 8, NO. 13, 2015, pp. 1–13.
- [9] S. Hesari and M. N. Azghandi, "Maximum power extraction from permanent magnet synchronous generator in wind power energy systems using Type-2 Fuzzy Logic", *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 7, NO. 4, 2018, pp. 392–400.
- [10] S. Simani and C. Turhan, "Fault Diagnosis of a Wind Turbine Simulated Model via Neural Networks", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, NO. 24, 2018, pp. 381–388.
- [11] S. Cho, Z. Gao, and T. Moan, "Model-based fault detection, fault isolation and fault-tolerant control of a blade pitch system in floating wind turbines", *Renewable energy*, Vol. 120, 2018, pp. 306–321.
- [12] B. Yang et al., "Passivity-based sliding-mode control design for optimal power extraction of a PMSG based variable speed wind turbine", *Renewable energy*, Vol. 119, 2018, pp. 577–589.
- [13] H. Benbouhenni, "Comparative Study Between Direct Vector Control and Fuzzy Sliding Mode Controller in Three-Level Space Vector Modulation Inverter of Reactive and Active Power Command of DFIG-Based Wind Turbine Systems", *International Journal Of Smart Grid*, Vol.2, NO.4, 2018, pp. 188–196.
- [14] A. Azizi, H. Nourisola, and S. Shoja-Majidabad, "Fault tolerant control of wind turbines with an adaptive output feedback sliding mode controller", *Renewable energy*, Vol. 135, 2019, pp. 55–65.
- [15] M. Benmeziane, S. Zebirate, A. Chaker, and Z. Boudjema, "Fuzzy sliding mode control of doubly-fed induction generator driven by wind turbine", *International Journal of Power Electronics and Drive System*, Vol. 10, NO. 3, 2019, pp. 1592–1602.
- [16] N. Bounar, S. Labdai, and A. Boulkroune, "PSO–GSA based fuzzy sliding mode controller for DFIG-based wind turbine", *ISA transactions*, Vol. 85, 2019, pp. 177–188.
- [17] S. Sumbekov, B. D. H. Phuc, and T. D. Do, "Takagi–Sugeno fuzzy-based integral sliding mode control for wind energy conversion systems with disturbance observer", *Electrical Engineering*, Vol. 102, NO. 3, 2020, pp. 1141–1151.

- [18] L. Pan and X. Wang, "Variable pitch control on direct-driven PMSG for offshore wind turbine using Repetitive-TS fuzzy PID control", *Renewable Energy* 159, Vol. 159, 2020, pp. 221–237.
- [19] C. Kim and W. Kim, "Coordinated Fuzzy-Based Low-Voltage Ride-Through Control for PMSG Wind Turbines and Energy Storage Systems", *IEEE Access*, Vol. 8, 2020, pp. 105874–105885.
- [20] Y. El Mourabit, A. Derouich, A. El Ghzizal, N. El Ouanjli, and O. Zamzoum, "Nonlinear backstepping control for PMSG wind turbine used on the real wind profile of the Dakhla-Morocco city", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 30, NO. 4, 2020, pp.12297.
- [21] R. Bolbolnia, E. Heydari, and K. Abbaszadeh, "Fault Tolerant Control in Direct-Drive PMSG Wind Turbine Systems under Open-Circuit Faults", *The 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference, PEDSTC 2020*, 2020, pp.1–5.
- [22] A. Chand, L. Khan, Q. Khan, Z. A. Khan, A. Ur Rehman, and S. Ahmed, "Robust Fault Diagnosis and Fault Tolerant MPPT Control of PMSG-WECS using Certainty Equivalence Principle", *The 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies: Idea to Innovation for Building the Knowledge Economy, iCoMET 2020*, 2020, pp.1–6.
- [23] A. Fekih, S. Mobayen, and C. C. Chen, "Adaptive robust fault-tolerant control design for wind turbines subject to pitch actuator faults", *Energies*, Vol. 14, NO. 6, 2021, pp. 1791.
- [24] R. Pourebrahim, A. M. Shotorbani, F. P. G. Márquez, S. Tohidi, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Robust control of a PMSG-based wind turbine generator using lyapunov function", *Energies*, Vol. 14, NO. 6, 2021, pp. 1712.
- [25] M. H. Qais, H. M. Hasanien, and S. Alghuwainem, "A novel LMSRE-based adaptive PI control scheme for grid-integrated PMSG-based variable-speed wind turbine", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 125, 2021, pp. 106505.
- [26] A. Dali, S. Abdelmalek, A. Bakdi, and M. Bettayeb, "A new robust control scheme: Application for MPP tracking of a PMSG-based variable-speed wind turbine", *Renewable Energy*, Vol. 172, 2021, pp. 1021–1034.
- [27] Y. Li, X. Yuan, J. Li, H. Xiao, Z. Xu, and Z. Du, "Novel grid-forming control of PMSG-based wind turbine for integrating weak AC grid without sacrificing maximum power point tracking", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 15, NO. 10, 2021, pp. 1613–1625.
- [28] Z. Liu, T. Tang, A. Houari, M. Machmoum, and M. F. Benkhoris, "An ftc design via multiple sogis with suppression of harmonic disturbances for five-phase pmsg-based tidal current applications", *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 9, NO. 6, 2021, pp. 574.
- [۲۹] مسعود اسماعیلی، مصطفی صدقی زاده، حسام یار محمدی، "کنترل یکپارچه ژنراتور القایی، محدودکننده جریان خطا و ذخیره ساز انرژی در مزارع بادی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۸۸–۱۰۰.
- [۳۰] سامان احمدی، ایمان پورفر، امین ساکی، "مدلسازی مزرعه بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسوتغذیه با معادل سازی بخش مکانیکی با استفاده از خوشه‌بندی بر اساس ضریب جذب توان"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۰، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱۶۹–۱۸۲.
- [۳۱] الهه زکی خانی، مهدی صمدی، محمد ابراهیم حاجی آبادی، "ارائه‌ی مدلی تحلیلی جهت تعیین اثرات پارامترهای توربین بادی و مشخصه احتمالی سرعت باد بر میانگین قیمت گره‌ای بازار برق"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۲، پائیز ۱۳۹۹، صفحه ۳۱–۴۲.
- [32] J. V. Ringwood and S. Simani, "Overview of modelling and control strategies for wind turbines and wave energy devices: Comparisons and contrasts", *Annual Reviews in Control*, Vol. 40., 2015, pp. 27–49.
- [33] J.J. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall; 1991.
- [34] W. Gao and J. C. Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach", *IEEE transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, NO. 1, 1993, pp. 45–55.
- [35] C. J. Fallaha, M. Saad, H. Y. Kanaan, and K. Al-Haddad, "Sliding-mode robot control with exponential reaching law", *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 58, NO. 2, 2011, pp. 600–610.