



## مروری بر پرکاربردترین ماشین های الکتریکی و رویکردهای کنترلی در سیستم های تبدیل انرژی بادی

مجتبی ابراهیمی<sup>۱</sup>، دکتر حامد گرگین پور\*<sup>۲</sup>، دکتر ولی اله غفاری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل دانشگاه خلیج فارس. e.mojtaba.14@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی برق دانشگاه خلیج فارس. h\_gorgin@pgu.ac.ir

۳- استاد گروه مهندسی برق دانشگاه خلیج فارس. vghaffari@pgu.ac.ir

### خلاصه

با توجه به نگرانی های فزاینده در مورد بحران انرژی، گرمایش جهانی و کاهش ذخایر سوخت های فسیلی، انرژی بادی به عنوان یکی از فناوری های دارای رشد سریع در حوزه انرژی های تجدیدپذیر مطرح شده است. ماشین های الکتریکی و سیستم کنترل به عنوان دو بخش مهم از سیستم های تبدیل انرژی بادی نقشی حیاتی در تولید توان کارآمد و پایدار ایفا می کنند. در سال های اخیر توسعه ماشین های پیشرفته و رویکردهای کنترلی متنوعی به منظور افزایش راندمان، قابلیت اطمینان و کاهش آسیب پذیری این سیستم ها در برابر خطاهای داخلی و خارجی مورد توجه گسترده قرار گرفته است. این مقاله مروری به بررسی پرکاربردترین ماشین های الکتریکی در سیستم های تبدیل انرژی بادی و تحلیل ویژگی های آنها از منظرهای مختلف می پردازد. همچنین رویکردهای کنترلی رایج در این سیستم ها معرفی و مقایسه شده اند. در نهایت، چالش های موجود و روندهای نوظهور در زمینه بهبود عملکرد این ماشین ها و رویکردهای کنترلی مورد بحث قرار گرفته و به فرصت های پژوهشی آینده پرداخته می شود.

**کلمات کلیدی:** ماشین های الکتریکی، رویکردهای کنترلی، سیستم های تبدیل انرژی بادی، مغناطیس دائم.

### ۱. مقدمه

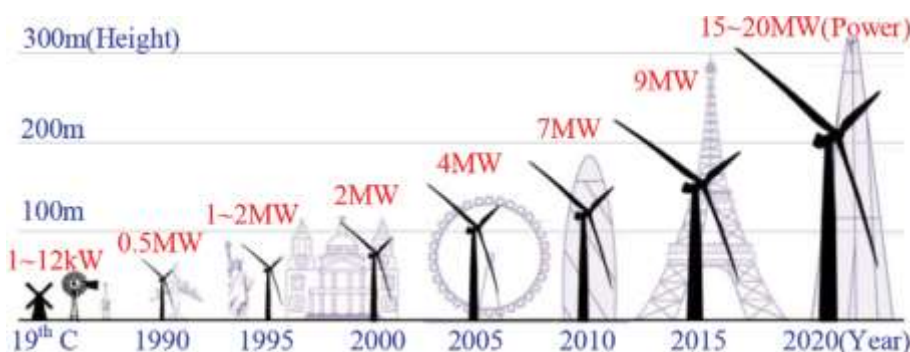
فناوری انرژی بادی در دو دهه گذشته با گسترش مرزهای بهره وری و قابلیت اطمینان در تأمین انرژی، رشد قابل توجهی را تجربه کرده است [۴-۱]. با توجه به نگرانی های جهانی در خصوص گرمایش زمین و کاهش منابع سوخت های فسیلی، سیستم های تبدیل انرژی بادی<sup>۱</sup> (WECS) به عنوان یکی از فناوری های تولید برق پیشرو از نظر اقتصادی و زیست محیطی مطرح شده و حتی از سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی، برق آبی و امواج اقیانوسی پیشی گرفته است. این سیستم ها ذاتاً پیچیده، دارای دینامیک غیرخطی، عدم قطعیت های پارامتری و اختلالات خارجی هستند. از این رو انتظار می رود توان الکتریکی تولید شده از باد که ماهیتی متناوب و تصادفی دارد را به حداکثر رسانده و هزینه های عملیاتی را به حداقل برسانند [۵].

توربین های بادی<sup>۲</sup> بسته به ترکیب سرعت ثابت یا متغیر و زاویه گام ثابت یا متغیر پرها دارای دسته بندی های مختلفی هستند. توربین های با زاویه گام ثابت به دلیل عدم توانایی در کاهش بارهای مکانیکی و سازه ای قادر به ارائه عملکرد قابل

<sup>1</sup> Wind Energy Conversion System (WECS)

<sup>2</sup> Wind Turbine

اطمینانی در تولید توان نیستند [۶]. در مقابل، توربین‌های با زاویه گام متغیر قادرند توان آیرودینامیکی جذب‌شده در شرایط سرعت باد بالا را محدود کرده و در توان نامی کار کنند. همچنین توربین‌های با سرعت متغیر توانایی تولید توان در شرایط باد متغیر را دارند؛ هرچند نیازمند مبدل‌های الکترونیک قدرت برای تضمین کیفیت توان و اتصال به شبکه می‌باشند [۷]. توربین‌های با سرعت ثابت نیز اگرچه دارای ساختار ساده‌تری هستند؛ اما از لحاظ استخراج انرژی بادی و کاهش تنش مکانیکی در شرایط باد متغیر کارایی کمتری را نشان داده‌اند [۸]. بر این اساس، ساختار غالب توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ طی دهه اخیر، توربین‌های با زاویه گام و سرعت متغیر بوده است. شکل ۱ افزایش تصاعدی اندازه توربین‌های بادی در دهه‌های گذشته را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سیر تکاملی در ارتفاع و توان توربین‌های بادی [۹]

ماشین‌های الکتریکی به‌عنوان فناوری کلیدی در توربین‌های بادی باید دارای ویژگی‌های خاصی باشند. چگالی گشتاور و توان بالا، راندمان زیاد، قابلیت اطمینان بالا، هزینه مناسب، انعطاف‌پذیری و کنترل آسان از جمله خصوصیات اصلی این ماشین‌ها می‌باشند [۱۰]. در این راستا، علاوه بر ماشین‌های مرسوم مانند ژنراتورهای القایی و سنکرون انواع جدیدی از ماشین‌های الکتریکی با ویژگی‌های جذاب برای تولید برق بادی معرفی شده‌اند. مزایا و معایب آن‌ها از منظرهای مختلفی مانند راندمان، هزینه و چگالی گشتاور و توان مورد بررسی قرار گرفته و همچنین مبادلات موجود در روش‌ها و استراتژی‌های مختلف برجسته شده‌اند.

از سوی دیگر، یکی از مسائل حیاتی در WECS آسیب‌پذیر بودن آن‌ها در برابر خطاهای مختلف حسگر، سیستم تحریک و اجزای مکانیکی است. خطاهای گیربکس به‌عنوان شایع‌ترین علت خرابی توربین‌ها شناخته می‌شوند؛ مخصوصاً در توربین‌های ساحلی که در شرایط باد و آب‌وهوای نامساعد کار می‌کنند. تعمیر و نگهداری این توربین‌ها به دلیل دسترسی دشوار، از لحاظ اقتصادی گران محسوب می‌شود [۱۱]. بنابراین، تضمین استخراج توان حداکثری همراه با توان اکتیو و راکتیو مطلوب، همواره چالش مهمی برای مهندسان بوده است. در نتیجه، تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در دانشگاه و صنعت برای توسعه رویکردهای کنترلی قابل اعتماد جهت افزایش راندمان تبدیل و کیفیت توان صورت گرفته است [۱۲-۱۷].

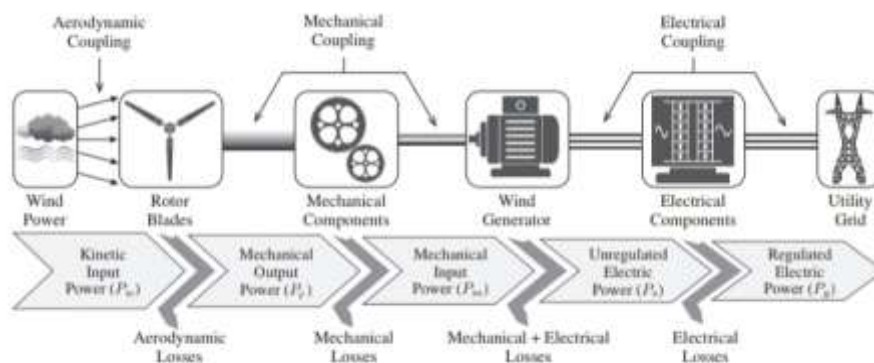
به طور خلاصه، WECS را می‌توان به سه بخش اصلی به این شرح طبقه‌بندی نمود [۱۸]:

۱. بخش مکانیکی شامل پره‌های توربین، گشتاور آیرودینامیکی و سیستم انتقال توان است. ورودی این بخش، انرژی جنبشی باد است که به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل شده و سپس از طریق سیستم انتقال توان به ژنراتور بادی منتقل می‌شود.
۲. بخش الکتریکی شامل ژنراتور، مبدل سمت ماشین<sup>۳</sup> (MSC)، مبدل سمت شبکه<sup>۴</sup> (GSC)، فیلترهای هارمونیک و ترانسفورماتور است. انرژی مکانیکی چرخشی تولید شده توسط بخش مکانیکی توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد.

<sup>3</sup> Machine Side Converter (MSC)

<sup>4</sup> Grid Side Converter (GSC)

۳. بخش کنترل شامل کنترل کننده‌های مختلفی برای انجام وظایف مورد نظر مانند: (الف) به حداکثر رساندن جذب توان باد، (ب) فراهم نمودن وضعیت عملکرد ایمن برای توربین با کنترل توان، جریان، ولتاژ، سرعت چرخشی و گشتاور با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و (ج) به حداقل رساندن فشار مکانیکی روی سیستم انتقال توان می‌باشد.  
 شکل ۲ یک نمودار بلوکی کلی از سیستم‌های تبدیل انرژی بادی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار بلوکی کلی سیستم‌های تبدیل انرژی بادی [۱۹]

بنابراین، مروری بر پرکاربردترین ماشین‌های الکتریکی و رویکردهای کنترلی در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی می‌تواند دیدگاه روشنی از وضعیت فعلی، چالش‌ها و فرصت‌های آینده را در این حوزه ارائه دهد. این مطالعه با هدف بررسی و مقایسه ماشین‌های الکتریکی رایج و تحلیل رویکردهای کنترلی مرتبط تلاش می‌کند تا ضمن برجسته‌سازی روندهای نوظهور، زمینه‌ای برای توسعه فناوری‌های پایدار و کارآمد در حوزه انرژی بادی فراهم آورد. این مقاله در بخش دوم خود به بررسی ماشین‌های الکتریکی پرکاربرد در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی می‌پردازد؛ سپس در بخش سوم رویکردهای کنترلی رایج در این سیستم‌ها را مورد تحلیل قرار داده و در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

## ۲. ماشین‌های الکتریکی پر کاربرد

سیستم‌های تولید برق بادی از نیروی باد برای به حرکت درآوردن روتور یک ژنراتور الکتریکی بهره می‌گیرند. پره‌های توربین به صورت آیرودینامیکی حرکت نیروی باد را جذب کرده و آن را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند؛ سپس ژنراتور الکتریکی انرژی مکانیکی چرخشی را به توان الکتریکی تبدیل می‌نماید. همانطور که گفته شد، ماشین‌های الکتریکی نقشی کلیدی در WECS برای تبدیل توان ایفا می‌کنند. در این بخش، علاوه بر ماشین‌های الکتریکی مرسوم به مطالعات کلیدی در مورد پیکربندی ماشین‌های الکتریکی کاربردی در تولید برق بادی با تأکید بر ماشین‌های مغناطیس دائم جدید پرداخته می‌شود.

### ۲-۱. ژنراتورهای بادی مرسوم

ژنراتورهای بادی مرسوم یعنی ماشین‌های القایی قفس سنجابی<sup>۵</sup> (SCIM) و ماشین‌های القایی روتور سیم‌پیچی<sup>۶</sup> (WRIM) از ابتدا در سیستم‌های محرکه ماشین‌های الکتریکی برای تولید برق بادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. SCIM ها به دلیل مزایایی مانند هزینه کم، قابلیت اطمینان بالا و عملکرد بدون نیاز به تعمیر و نگهداری گزینه‌های قابل قبولی برای توربین‌های بادی

<sup>۵</sup> Squirrel Cage Induction Machine (SCIM)

<sup>۶</sup> Wound Rotor Induction Machine (WRIM)

هستند. SCIM ها دارای یک روتور قفس سنجابی قوی حاوی میله‌های آلومینیومی یا مسی هستند که انتهای آن‌ها با حلقه‌های اتصال کوتاه، متصل شده‌اند. جریان بوجود آمده در اطراف میله‌های روتور، میدان مغناطیسی را برای تعامل با میدان مغناطیسی دوار ایجاد شده توسط سیم‌پیچ‌های استاتور، ایجاد می‌کند. با این حال، معایب اصلی SCIM های مورد استفاده در تولید برق بادی شامل جریان راه‌اندازی بالا و گشتاور راه‌اندازی ضعیف است. در مقابل، در WRIM ها سیم‌پیچ‌های روتور از طریق حلقه‌های لغزان به مقاومت خارجی متصل می‌شوند. WRIM ها را می‌توان با جریان هجومی کم و گشتاور راه‌اندازی بالا با تنظیم مقاومت خارجی راه‌اندازی نمود. علاوه بر این، WRIM ها در مقایسه با SCIM ها ضریب توان بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهند. با این حال، پیچیدگی و نیاز به تعمیر و نگهداری منظم مرتبط با جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان از معایب اصلی WRIM ها هستند. ماشین‌های القایی مرسوم، شامل SCIM ها و WRIM ها، معمولاً در سیستم‌های محرکه ماشین الکتریکی با سرعت ثابت استفاده می‌شوند. از آنجایی که این ماشین‌ها برای ادامه عملیات تولید خود، توان راکتیو شبکه را مصرف می‌کنند، به طرح‌های کنترلی پیچیده‌ای برای اصلاح ضریب توان نیاز دارند [۱۰].

ماشین‌های القایی دوسو تغذیه<sup>۷</sup> (DFIM) که بر پایه WRIM ها توسعه یافته‌اند، در تولید برق بادی محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. DFIM ها از یک WRIM با یک روتور سیم‌پیچی شده و یک مجموعه حلقه لغزشی با جاروبک‌های متصل به یک کنترل‌کننده تشکیل می‌شوند [۲۰]. سیم‌پیچ‌های استاتور DFIM ها به شبکه متصل می‌باشند، در حالی که سیم‌پیچ‌های روتور به کنترل‌کننده‌ای متصل هستند که جریان‌های روتور و شبکه را کنترل می‌کند. جریان ورودی در روتور از نظر فرکانس و زاویه فاز تنظیم می‌شود تا تغییرات سرعت توربین را جبران نماید. علاوه بر این، توان اکتیو و راکتیو تغذیه شده به شبکه نیز می‌تواند با این تنظیم بهینه شوند. از این رو، DFIM ها برای سیستم‌های محرکه ماشین الکتریکی با سرعت متغیر مناسب هستند. به منظور جلوگیری از مشکلات مرتبط با جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان، ماشین‌های القایی دوسو تغذیه بدون جاروبک<sup>۸</sup> (Brushless DFIM) از زمان ارائه اولیه توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۲۱]. برخلاف DFIM های مرسوم، Brushless DFIM های امروزی از دو مجموعه سیم‌پیچ استاتور یعنی سیم‌پیچ‌های قدرت و سیم‌پیچ‌های کنترل تشکیل شده است. سیم‌پیچ‌های قدرت به شبکه متصل هستند، در حالی که سیم‌پیچ‌های کنترل از طریق یک مبدل یا کنترل‌کننده با پیکربندی "پشت به پشت" برای جریان برق دو طرفه تغذیه می‌شوند. روتور دارای یک ساختار قفسی "تو در تو" یا شکل رلوکتانسی خاص است و برای تولید گشتاور، میدان مغناطیسی را وابسته به موقعیت شفت بین دو مجموعه سیم‌پیچ استاتور ایجاد می‌کند. Brushless DFIM ها با عدم وجود سیم‌پیچ‌های روتور، مزایایی از جمله افزایش قابلیت اطمینان و عملکرد بدون نیاز به تعمیر و نگهداری و همچنین کنترل انعطاف‌پذیر توان اکتیو و راکتیو را دارند، که چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای از آن‌ها در سیستم‌های محرکه ماشین‌های الکتریکی با سرعت متغیر نشان می‌دهد. اگرچه Brushless DFIM ها چندین دهه تکامل را پشت سر گذاشته‌اند، اما تحقیقات روی آن‌ها هنوز در مراحل اولیه قرار دارد. دلیل این امر این است که پیاده‌سازی عملی Brushless DFIM ها به دلیل پیچیدگی کنترل توان، بسیار چالش برانگیز می‌باشد [۲۲].

در مقایسه با ماشین‌های القایی آسنکرون که در بالا ذکر شد، ماشین‌های سنکرون که شامل ماشین‌های سنکرون با تحریک الکتریکی<sup>۹</sup> (EESM) و ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم<sup>۱۰</sup> (PMSM) هستند، پتانسیل استفاده در توربین‌های بادی با تحریک مستقیم را دارند. با حذف گیربکس، سیستم‌های تولید برق بادی تحریک مستقیم نوین مربوط به چرخ‌دنده‌ها و هزینه تولید کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نیاز به تعمیر و نگهداری منظم برای گیربکس نیز حذف می‌شود. EESM برای اولین بار با توان نامی ۰/۵ مگاوات در توربین‌های بادی با سرعت متغیر با تحریک مستقیم توسط شرکت "Enercon" آلمان در سال ۱۹۹۲ معرفی شد. استاتور EESM ها مشابه ماشین‌های القایی می‌باشد؛ در حالی که روتور ممکن است برجسته یا

<sup>7</sup> Doubly Fed Induction Machine (DFIM)

<sup>8</sup> Brushless

<sup>9</sup> Electrically Excited Synchronous Machine (EESM)

<sup>10</sup> Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)

استوانه‌ای باشد و توسط سیم‌پیچ‌های میدان پیچیده شود. سیم‌پیچ‌های میدان نیز توسط یک منبع جریان مستقیم<sup>۱۱</sup> (DC) از طریق جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان یا یک یکسوکننده چرخان تحریک می‌شوند. در مقابل، تحریک میدان مغناطیسی شکاف هوایی در PMSM ها توسط آهنرباهای دائم انجام می‌شود. PMSM ها به دلیل چگالی توان ذاتاً بالا و همچنین راندمان و قابلیت اطمینان بالا مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند [۲۳].

جدول ۱ خلاصه‌ای از نکات کلیدی در مورد این ماشین‌های الکتریکی مرسوم ارائه می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حدود ۴۸/۶ درصد از توربین‌های بادی مورد استفاده در صنعت DFIM و ۴۸/۱ درصد مبتنی بر SCIM هستند؛ در حالی که ۳/۲ درصد مبتنی بر PMSM بوده و سایر ماشین‌ها حدود ۰/۱ درصد توربین‌های بادی را تشکیل می‌دهند [۲۴]. اگرچه بیش از ۹۰ درصد از توربین‌های بادی موجود مجهز به ماشین‌های القایی هستند، اما PMSM ها به دلیل مزایای متمایز ذکر شده امیدوارکننده‌ترین گزینه‌ها در سیستم‌های تولید برق بادی می‌باشند. با بهبود عملکرد آهنرباهای دائم و توسعه الکترونیک قدرت پیشرفته، بسیاری از تولیدکنندگان مانند "General Electric"، "Vestas"، و "Siemens" در تلاشند تا از ماشین‌های القایی به PMSM ها تغییر رویه دهند [۹، ۲۵].

## ۲-۲. ژنراتورهای بادی مغناطیس دائم جدید

ماشین‌های ورنیر مغناطیس دائم<sup>۱۲</sup> (PMVM) به دلیل چگالی گشتاور بالا و ساختار مکانیکی ساده توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. یک PMVM معمولی از نظر پیکربندی ساختار مشابهی با یک PMSM معمولی دارد. با این حال، در PMSM های معمولی تعداد قطب‌های استاتور برابر با تعداد قطب‌های روتور است؛ در حالی که تعداد قطب‌های استاتور PMVM با تعداد قطب‌های روتور متفاوت است. به طور کلی، PMVM ها برای تأکید بر اثر "ورنیر" خود به تعداد نسبتاً کمی قطب استاتور و تعداد بسیار بیشتری قطب روتور مجهز شده‌اند. حرکت کوچک روتور مغناطیس دائم باعث حرکت زیاد شار پیوندی در سیم‌پیچ‌های آرمیچر استاتور می‌شود. با کمتر شدن سرعت روتور از سرعت میدان دوار، گشتاور نیز افزایش می‌یابد. از این رو، PMVM ها برای کاربردهای سرعت کم با گشتاور بالا مانند تولید برق بادی جذاب می‌باشند [۲۶].

در [۲۷] یک PMVM با سیم‌پیچ حلقوی دو استاتوره برای تولید برق بادی طراحی شده است. در این ماشین سیم‌پیچ‌های حلقوی روی هر دو استاتور داخلی و خارجی می‌چرخند و روتور نیز در وسط قرار دارد. پیکربندی بهینه می‌تواند به این ماشین در راستای افزایش چگالی توان و کاهش موجک گشتاور کمک کند. علاوه بر این، ولتاژ نامی را می‌توان با پیوستگی مدولاسیون بالا تحت تغییرات سرعت از طریق انتخاب مناسب حالت‌های عملیاتی حفظ نمود.

ماشین‌های روتور بیرونی عمدتاً به دلیل اتلاف حرارت بهتر و نصب آسان‌تر نسبت به نمونه‌های روتور داخلی مرسوم به ویژه در عملیات‌های تحریک مستقیم، برتری دارند. در [۲۸] یک PMVM با روتور خارجی و استاتور با قطب دندانه‌دار برای تولید برق بادی ارائه شده است. در این ماشین دندانه‌های استاتور در انتها به سه دندانه کوچکتر تقسیم می‌شوند. طبق مطالعات بررسی شده، این PMVM ها با روتور بیرونی می‌توانند عملکرد مطلوبی در سرعت‌های کم برای جذب مستقیم نیروی باد و تبدیل به برق ارائه دهند و همچنین طراحی میدان دوار با سرعت بالا را برای به حداکثر رساندن چگالی توان ممکن سازند. علاوه بر این، وجود استاتور با قطب دندانه‌دار به این ماشین‌ها در دستیابی به چگالی توان و ولتاژ خروجی بالاتر و همچنین کاهش حجم مواد اولیه و هزینه کلی کمک می‌کند. همه این ویژگی‌ها چشم‌اندازهای امیدوارکننده‌ای را برای تولید برق بادی نشان می‌دهند. مشخص شده است که ضریب توان این ژنراتورها با کاهش حجم ماشین به شدت کاهش می‌یابد؛ در حالی که حجم ماشین نیز به تعداد قطب‌های دندانه‌دار استاتور بستگی دارد.

<sup>11</sup> Direct Current (DC)

<sup>12</sup> Permanent Magnet Vernier Machine (PMVM)

جدول ۱- مقایسه ماشین‌های الکتریکی مرسوم در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی

مولفه مقایسه	SCIM	WRIM	DFIM	Brushless DFIM	EESM	PMSM
سرعت متغیر	سرعت ثابت یا نیمه متغیر	سرعت ثابت یا نیمه متغیر	سرعت متغیر	سرعت متغیر	سرعت متغیر	سرعت متغیر
نیاز به گیربکس	بله	بله	بله	بله	اختیاری	اختیاری
چگالی گشتاور	کم است، زیرا تحریک میدان مغناطیسی فقط از جریان استاتور ناشی می‌شود.	متوسط، زیرا جریان روتور تحریک شده خارجی می‌تواند تحریک میدان اضافی ایجاد کند.	متوسط، زیرا جریان روتور تحریک شده خارجی می‌تواند باعث تحریک میدان اضافی شود.	به دلیل وجود هر دو مولفه گشتاور ناهمزمان و همزمان، زیاد است.	کم است، زیرا روتور الکتریکی تحریک شده حجم زیادی دارد.	بالاترین میزان، به دلیل آهنربای دائم پرا انرژی
نیاز به نگهداری	کم است، به دلیل ساختار ساده و مستحکم	زیاد است، زیرا جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان نیاز به نگهداری منظم دارند.	زیاد است، زیرا جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان نیاز به نگهداری منظم دارند.	کم است، به دلیل عدم وجود جاروبک و حلقه‌های لغزان	زیاد است، زیرا جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان نیاز به نگهداری منظم دارند.	به دلیل ساختار نسبتاً ساده و مستحکم، نسبتاً کم است.
کیفیت توان	کم است، زیرا نوسانات برق اجتناب‌ناپذیر است و توان راکتیو شبکه را مصرف می‌کند.	اگرچه توان راکتیو شبکه را نیز مصرف می‌کند، اما جریان هجومی کم و ضریب توان بهبود یافته‌ای را نشان می‌دهد.	بالا است، به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی آن‌ها در کنترل توان اکتیو و راکتیو	بالا است، به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی آن‌ها در کنترل توان اکتیو و راکتیو	بالا است، به دلیل شکل موج ولتاژ خروجی سینوسی‌تر، تنظیم ولتاژ پایین و ضریب توان بهبود یافته	بالا است، به دلیل شکل موج ولتاژ خروجی سینوسی‌تر، تنظیم ولتاژ پایین و ضریب توان بهبود یافته
راندمان	کم است، به دلیل تلفات انرژی بالای ناشی از جریان‌های استاتور و روتور و تلفات بالای هسته	کم است، به دلیل تلفات انرژی بالا، تلفات هسته و تلفات حرارتی اضافی ناشی از مقاومت خارجی	زیاد است، زیرا هیچ تلفات حرارتی اضافی از مقاومت خارجی وجود ندارد.	زیاد است، زیرا هیچ تلفات حرارتی از جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان و همچنین مقاومت خارجی وجود ندارد.	متوسط است، به دلیل تلفات نسبتاً کم هسته، اما تلفات حرارتی از جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان وجود دارد.	بالاترین میزان است، به دلیل تلفات نسبتاً کم هسته و عدم تلفات حرارتی از جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان
قابلیت اطمینان	بالاترین است، به دلیل ساختار ساده و مستحکم	کم است، زیرا به جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان نیاز دارد.	کم است، زیرا به جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان نیاز دارد.	متوسط است، به دلیل عدم وجود جاروبک و حلقه‌های لغزان، اما سیم‌پیچ‌های کنترلی اضافی مورد نیاز است.	کم است، زیرا برای تحریک جریان روتور به جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان نیاز است.	زیاد است، به دلیل عدم وجود جاروبک‌ها، حلقه‌های لغزان و سیم‌پیچ‌های کنترلی اضافی
هزینه	کمترین هزینه، به دلیل ارزان بودن مواد	به دلیل مواد ارزان قیمت کم است، اما جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان اضافی دارد.	متوسط است، به دلیل وجود جاروبک‌ها، حلقه‌های گیره‌ای و مبدل‌های الکترونیک قدرت اضافی	زیاد است، به دلیل سیم‌پیچ‌های کنترلی اضافی و مبدل‌های الکترونیک قدرت اضافی	متوسط است، به دلیل دلیل دستگاه‌های اضافی برای تحریک جریان روتور	بالاترین است، به دلیل آهنربای دائم گران قیمت

برخلاف PMSM های معمولی که آهنربای دائم آن‌ها بر روی روتور قرار دارد، ماشین‌های مغناطیس دائم سوئیچینگ شار<sup>۱۳</sup> (FSPMM) دارای آهنربای دائم بر روی استاتور خود هستند. روتور FSPMM ها به دلیل ساختار ساده از نظر مکانیکی مقاوم است. استاتور آن‌ها نیز شامل بخش‌های دندانه استاتور لایه لایه، آهنربای دائم و سیم‌پیچ‌های متمرکز است. ماشین‌های FSPM به دلیل چگالی گشتاور بالا، دفع مطلوب حرارت و اساساً نیروی محرکه الکتریکی معکوس سینوسی، در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۹].

برای حذف گیربکس‌ها تعداد زیادی قطب در سیستم‌های تولید برق بادی با تحریک مستقیم مورد نیاز است. در [۳۰]، یک ژنراتور FSPM با تعداد ۱۲۰ قطب استاتور و ۱۰۰ قطب روتور ارائه شده است. این ژنراتور با تحریک مستقیم گزینه‌ای مناسب برای رقابت با سایر ژنراتورهای توربین‌های بادی در مقیاس کوچک می‌باشد که معمولاً در روستاها و مزارع بادی کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در [۳۱، ۳۲] یک FSPMM تحریک‌شده هیبریدی برای تولید برق بادی ارائه شده است. این ماشین مزایای هر دو ماشین مغناطیس دائم و ماشین‌های تحریک‌شده الکتریکی را با یکدیگر ادغام نموده که منجر به بهبود یافتن قابلیت افزایش و کاهش شار می‌شود.

برخلاف پیکربندی مرسوم ماشین‌های FSPM، در [۳۳، ۳۴]، یک ماشین FSPM با استاتور قسمت‌بندی شده برای تولید برق بادی ارائه شده است. در این ماشین سیم‌پیچ‌ها و آهنرباهای دائم در قسمت‌های مختلف استاتور از یکدیگر جدا شده‌اند. در نتیجه، FSPMM با استاتور قسمت‌بندی شده در مقایسه با پیکربندی‌های مرسوم چگالی گشتاور و راندمان بالاتری را از خود نشان می‌دهد.

ماشین‌های مغناطیس دائم معکوس‌کننده شار<sup>۱۴</sup> (FRPMM) به دلیل مزایای پیکربندی ساده روتور، پاسخ‌گویی سریع و چگالی توان بالا در چند سال گذشته مورد توجه قرار گرفته‌اند. در یک FRPMM کلاسیک روتور از نظر مکانیکی مانند ماشین‌های FSPM مقاوم است. یک جفت آهنربای دائم با قطب‌های متناوب روی سطح داخلی هر دندانه استاتور نصب شده است. علاوه بر این، سیم‌پیچ‌های دندانه‌ها معمولاً در اطراف دندانه‌های استاتور پیچیده می‌شوند. هنگامی که روتور می‌چرخد، برای هر دندانه استاتور مساحت دو بخش آهنربای دائم که مستقیماً رو به دندانه‌های روتور هستند، در برابر موقعیت روتور تغییر می‌کند؛ در نتیجه شکل موج‌های شار دوقطبی و نیروی محرکه برگشتی در سیم‌پیچ‌های دندانه‌ها ایجاد می‌گردد [۳۵].

در [۳۶] یک FRPMM با آهنرباهای دائم توزیع‌شده برای تولید برق بادی معرفی شده است. در این ماشین آهنرباهای دائم به طور مساوی در امتداد سطح داخلی استاتور توزیع شده‌اند. نشان داده شده است که ماشین FRPM پیشنهادی در مقایسه با هم‌تای معمولی خود دارای ۳۳ درصد گشتاور متوسط بالاتر و ۷۲ درصد موج گشتاور کمتر می‌باشد.

علاوه بر این، یک FRPMM با روتور بیرونی برای تولید برق بادی در [۳۷] طراحی شده است. مشخص شده است که این ماشین نسبت به هم‌تای روتور داخلی خود با ابعاد بیرونی و تعداد دور یکسان ۱/۲۵ برابر چگالی گشتاور بیشتری دارد.

ماشین‌های مغناطیس دائم دنده مغناطیسی<sup>۱۵</sup> (MGPM) بر اساس مفهوم دنده مغناطیسی که قادر به انتقال گشتاور بین یک شفت ورودی و یک شفت خروجی بدون تماس مکانیکی است، طراحی می‌شوند. اصل عملکرد این ماشین‌ها بر اساس مدولاسیون میدان‌های مغناطیسی تولید شده توسط دو روتور مغناطیس دائم از طریق قطعات قطب فرومغناطیسی می‌باشد [۳۸]. در این ماشین سیم‌پیچ‌های آرمیچر در استاتور و آهنرباهای دائم روی روتور به گونه‌ای طراحی شده‌اند که دارای تعداد قطب‌های مختلف و در نتیجه سرعت‌های مختلف باشند. قطعات قطب فرومغناطیسی چرخان به عنوان یک مدولاتور شار عمل کرده و دو میدان مغناطیسی استاتور و روتور را برای داشتن تعداد قطب و سرعت یکسان تطبیق می‌دهند؛ بنابراین، همانند یک چرخ‌دنده کاهنده گشتاور ثابتی تولید می‌شود. این گشتاور ثابت منجر به دستیابی به عملکرد تحریک

<sup>13</sup> Flux Switching Permanent Magnet Machine (FSPMM)

<sup>14</sup> Flux Reversal Permanent Magnet Machine (FRPMM)

<sup>15</sup> Magnetic Geared Permanent Magnet Machine (MGPM)



مستقیم با سرعت کم و گشتاور بالا می‌شود که برای تولید برق بادی مطلوب است. چندین ماشین مغناطیس دائم دنده مغناطیسی برای کاربرد تولید برق بادی طراحی شده است که این ماشین‌ها از نظر چگالی گشتاور نسبت به PMSM های معمولی دارای عملکرد بهتری هستند [۳۹، ۴۰].

در [۴۱] یک MGPMMS دوسو تغذیه برای تولید برق بادی طراحی شده است. در این ماشین روتور بیرونی به عنوان روتور اصلی عمل کرده و به پره‌های توربین متصل است؛ در حالی که روتور داخلی به پره‌های کمکی متصل بوده تا جذب انرژی باد را جبران کند. این دو روتور در جهت مخالف یکدیگر می‌چرخند. فرکانس القایی در سیم‌پیچ اصلی ژنراتور به دلیل سرعت‌های زاویه‌ای نسبی تقریباً دو برابر می‌شود. این پدیده بر اساس نظریه مدولاسیون شار است که در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی مطلوب می‌باشد. گشتاور این روتورهای دوگانه را نیز می‌توان با سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی کنترل نمود. از این رو، با یک رویکرد کنترلی مناسب می‌توان به راندمان حداکثری در تبدیل انرژی باد دست یافت.

در [۴۲] یک MGPMMS روتور بیرونی برای تولید برق بادی با تحریک مستقیم توسعه داده شده است. این ماشین یک سیستم یکپارچه شامل یک ماشین دنده مغناطیسی (بخش بیرونی) و یک PMSM نصب‌شده روی سطح (بخش داخلی) می‌باشد. بخش دنده مغناطیسی بیرونی با ۱۰۶ قطب مستقیماً توسط پره‌ها هدایت می‌شود؛ در حالی که بخش PMSM داخلی با ۱۰ قطب که توسط ۵۸ قطعه قطب مدوله شده است، به عنوان یک ژنراتور عمل می‌کند.

همچنین در [۴۳] نیز یک MGPMMS روتور بیرونی برای تولید برق بادی معرفی شده است. مزایای اندازه کوچک‌تر و وزن سبک‌تر این ماشین نسبت به همتایان خود برجسته شده است.

جدول ۲ خلاصه‌ای از مقایسه کیفی بین چند نوع مختلف از ماشین‌های مغناطیس دائم جدید با کاربرد در تولید برق بادی را نشان می‌دهد. این ماشین‌ها شامل PMSM های نصب شده روی سطح<sup>۱۶</sup>، PMVM ها، FSPMM ها، FRPMM ها و MGPMMS ها هستند. لازم به ذکر است که همه این ماشین‌ها بجز PMSM های نصب شده روی سطح، اصل تولید گشتاور یکسانی دارند. این اصل بر پایه اثر دنده مغناطیسی و مدولاسیون میدان مغناطیسی شکاف هوایی استوار است [۴۴، ۴۵]. همچنین باید توجه داشت که ماشین‌های مغناطیس دائم جدید هنوز به صورت تجاری در بازار توربین‌های بادی موجود نیستند؛ اگرچه توجه بیشتری را در دانشگاه‌ها به خود جلب کرده‌اند. با این حال، بررسی این ماشین‌ها به دلیل ویژگی‌های جذاب برای پژوهشگران دانشگاهی و مهندسان صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و مرجعی برای تولیدکنندگان باشد.

### ۳. رویکردهای کنترلی رایج

با در نظر گرفتن تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در سرعت و جهت باد، داشتن یک سیستم کنترل برای توربین بادی که قادر به سازگاری با نوسانات ناگهانی باشد ضروری است [۴۶]. همانطور که استفاده از نیروی باد در شبکه برق فراگیرتر می‌شود؛ چالش‌های جدیدی از لحاظ قابلیت اطمینان و پایداری شبکه به وجود می‌آید. این امر فرصت‌های جدیدی را برای توسعه رویکردهای کنترلی ایجاد می‌کند [۴۷].

برای دستیابی به ظرفیت کامل تولید برق و عملکرد ایمن WECS می‌توان چهار ناحیه بالقوه را بر اساس سرعت باد در منحنی توان تعریف نمود. در ناحیه ۱ سرعت باد بسیار پایین بوده و توربین قادر به تأمین توان مورد تقاضا نیست. بنابراین، توربین بادی خاموش می‌ماند. در مقابل، در ناحیه ۴ سرعت باد بسیار بالا بوده و توربین تحت تنش‌های مکانیکی شدیدی قرار دارد. در نتیجه، جهت جلوگیری از آسیب‌های احتمالی به اجزای مکانیکی توربین باید خاموش شود. در ناحیه ۲ (ناحیه بار جزئی) سرعت باد بالاتر از سرعت قطع توربین اما کمتر از سرعت نامی آن است. در ناحیه ۳ (ناحیه بار کامل) نیز سرعت باد در سرعت نامی توربین یا بالاتر از سرعت نامی آن می‌باشد. سرعت قطع توربین را می‌توان به عنوان حداقل سرعتی تعریف

<sup>16</sup> Surface Mounted

جدول ۲- مقایسه ماشین‌های مغناطیسی دائم جدید در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی

مؤلفه مقایسه	Surface Mounted PMSM	PMVM	FSPMM	FRPMM	MGPMM
مکان آهنربای دائم	روی سطح روتور نصب شده است.	روی سطح روتور نصب شده است.	توسط دندانه‌های استاتور احاطه شده است.	روی سطح دندانه استاتور نصب شده است.	عمدتاً روی سطح روتور نصب می‌شود.
قاعده عملکردی	جاذبه بین قطب‌های مغناطیسی استاتور و روتور	مدولاسیون شار	مدولاسیون شار	مدولاسیون شار	مدولاسیون شار
محدوده سرعت	سرعت متغیر، برای کاربرد سرعت پایین به قطب‌های مغناطیسی دائم بیشتری نیاز دارد.	سرعت متغیر، مناسب‌تر برای توربین بادی با تحریک مستقیم سرعت کم	سرعت متغیر، به دلیل ساختار روتور مقاوم، برای توربین بادی پرسرعت با گیربکس مناسب‌تر است.	سرعت متغیر، مناسب‌تر برای توربین بادی با تحریک مستقیم سرعت کم	سرعت متغیر، مناسب‌تر برای توربین بادی با تحریک مستقیم سرعت کم
نیاز به گیربکس	اختیاری	خیر	اختیاری	خیر	خیر
چگالی گشتاور	به دلیل مغناطیسی دائم پرا انرژی نسبتاً زیاد است.	به دلیل مؤلفه گشتاور رلوکتانسی اضافی تولید شده توسط آهنربای دائم و مؤلفه هارمونیک شکاف هوایی، بالاتر از PMSM ها است.	به دلیل اثرات متمرکز شدن شار، بالاتر از PMSM ها است.	بالاتر از PMSM ها است.	بالاترین مقدار، به دلیل هارمونیک‌های کاری متعدد مدوله شده توسط حلقه مدولاسیون
نیاز به نگهداری	به دلیل ساختار نسبتاً ساده و مستحکم، نسبتاً کم است.	به دلیل پیکربندی مشابه با PMSM ها، با آن‌ها قابل مقایسه است.	به دلیل چیدمان آهنرباهای دائم استاتور، کمتر از PMSM ها است.	به دلیل چیدمان آهنرباهای دائم استاتور، کمتر از PMSM ها است.	به دلیل ساختار پیچیده، نسبتاً بالا است.
کیفیت توان	زیاد است، به دلیل شکل موج ولتاژ خروجی سینوسی‌تر و تنظیم ولتاژ پایین	نسبتاً کم است، به دلیل ضریب توان پایین و تنظیم ولتاژ بالا	به دلیل نیروی محرکه برگشتی ذاتاً سینوسی و اعوجاج هارمونیک کل کمتر، بالاتر از PMSM ها هستند.	نسبتاً کم است، به دلیل تنظیم ولتاژ بالا	قابل مقایسه با PMSM ها
راندمان	بالاترین است، به دلیل کمترین تلفات هسته	به دلیل وجود سوپرهارمونیک‌های فراوان، نسبتاً کم است.	پایین است، به دلیل وجود سوپرهارمونیک‌های بسیار زیاد	پایین است، به دلیل وجود سوپرهارمونیک‌ها بسیار زیاد	به دلیل وجود سوپرهارمونیک‌های فراوان، نسبتاً کم است.
قابلیت اطمینان	به دلیل ساختار نسبتاً ساده و مستحکم، نسبتاً بالا است.	به دلیل پیکربندی مشابه با PMSM ها، با آن‌ها قابل مقایسه است.	به دلیل جداسازی فیزیکی و مغناطیسی بین فازها و ساختار روتور مقاوم، بالاتر از PMSM ها است.	به دلیل ساختار روتور مقاوم‌تر، بالاتر از PMSM ها است.	به دلیل ساختار پیچیده، نسبتاً پایین است.
هزینه	به دلیل استفاده از آهنربای دائم پرهزینه، بسیار بالا است.	قابل مقایسه با PMSM ها	کمتر از PMSM ها	کمتر از PMSM ها	به دلیل استفاده کم از آهنربای دائم، کمتر از PMSM ها است.

نمود که در آن توربین قادر به تولید توان مورد تقاضا خواهد بود. سرعت نامی نیز به عنوان سرعتی که در آن توربین به توان نامی خود می‌سد، تعریف می‌شود. بر این اساس، اهداف کنترلی WECS را می‌توان به سه دسته اصلی طبقه‌بندی نمود: (الف) استخراج حداکثر توان<sup>۱۷</sup> (MPE)، که در ناحیه ۲ با کنترل گشتاور ژنراتور انجام می‌گردد. (ب) تنظیم توان اکتیو و راکتیو که به طور گسترده در ناحیه ۳ با انجام تنظیم ولتاژ پیوند جریان مستقیم<sup>۱۸</sup> (DCLVR) ژنراتور، کنترل مبدل سمت شبکه و کنترل مبدل سمت ماشین و همچنین کنترل زاویه گام<sup>۱۹</sup> (PAC) دنبال می‌شود. (ج) کاهش بار که انتقال آرام از ناحیه ۲ به ناحیه ۳ را تضمین می‌نماید [۴۸].

کنترل کننده‌های کلاسیک تناسبی-انترگالی-مشتقی<sup>۲۰</sup> (PID) از جمله کنترل کننده‌های استاندارد و مرسوم هستند که به طور سنتی برای کنترل WECS مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۹]. با این حال، به دلیل عدم مقاومت در برابر اختلالات و تغییرات نقطه کار، رفتار غیرخطی توربین‌های بادی و احتمال وجود خطا نمی‌توان آن‌ها را به عنوان روش‌های کنترلی قابل اعتمادی در نظر گرفت. در این راستا، محققان استراتژی‌های کنترلی پیشرفته و نوآورانه مختلفی را جهت بهبود عملکرد سیستم کنترل WECS پیشنهاد کرده‌اند.

روش‌های کنترل مقاوم به طور گسترده در پژوهش‌ها و مقالات برای کاهش اثرات نامطلوب متغیر بودن سرعت باد و همچنین افزایش کیفیت توان مورد بررسی قرار گرفته که پرکاربردترین آن‌ها روش‌های  $H_2$  و  $H_\infty$  هستند [۵۱، ۵۰]. روش‌های خطی‌سازی فیدبک حالت<sup>۲۱</sup> (SFL) از دیگر رویکردهای طراحی کنترل غیرخطی مبتنی بر مدل هستند که غیرخطی بودن را از طریق فیدبک غیرخطی حفظ می‌کنند. با این حال، عملکرد آن‌ها به اطلاعات مدل سیستم متکی بوده و فاقد مقاومت در برابر عدم قطعیت‌های پارامتری و اختلالات خارجی می‌باشند. نویسندگان نیز در [۵۲] یک کنترل کننده SFL را برای کنترل توربین‌های بادی توسعه داده‌اند.

روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم مانند کنترل منطق فازی<sup>۲۲</sup> (FLC)، شبکه‌های عصبی<sup>۲۳</sup> (NN) و کنترل کننده‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری از دیگر رویکردهای پیشرفته بررسی شده هستند که پاسخی کارآمد و سریع برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها در WECS ارائه می‌دهند [۵۳، ۵۴، ۱۵]. در [۱۵] یک طرح کنترل تحمل‌پذیر خطا<sup>۲۴</sup> (FTC) مبتنی بر ناظر برای مقابله با مشکل MPE در حضور خطاهای حسگر ارائه شده است. به طور مشابه، نویسندگان در [۱۳، ۱۷، ۵۵] رویکردهای FTC مبتنی بر منطق فازی را برای کنترل توان توربین‌های بادی توسعه داده‌اند. از سوی دیگر، رویکردهای کنترل شکل‌دهی انرژی<sup>۲۵</sup> (ESC) در نشان دادن یک تفسیر فیزیکی واضح از انرژی مؤثر بوده‌اند. این رویکردها می‌توانند غیرخطی بودن سیستم را حفظ نموده و پیاده‌سازی کنترل کننده‌ها را ساده نمایند. در [۵۶] یک طرح ESC برای کاهش تداخل کنترل کننده‌ها در مزارع توربین بادی پیشنهاد شده است. از جمله مزایای طرح‌های ESC نسبت به رویکردهای کلاسیک می‌توان به این موارد اشاره کرد: (الف) کنترل کننده نیازی به مدل خطی شده مزرعه توربین بادی ندارد. (ب) طراحی ESC شامل هیچ فیلتری نیست؛ بنابراین انعطاف‌پذیری آن را برای فرکانس متغیر افزایش می‌دهد. (ج) مقاومت بهبود یافته‌ای را در برابر عدم قطعیت‌های پارامتری و اختلالات خارجی ارائه می‌نماید.

رویکردهای کنترل پیش‌بین مدل<sup>۲۶</sup> (MPC) از دیگر روش‌های پیشرفته پرکاربرد هستند [۵۷]. در [۵۸] یک FTC مبتنی بر MPC برای کاهش هزینه‌های اقتصادی توربین بادی از طریق کاهش فرسودگی و به حداکثر رساندن استخراج

<sup>17</sup> Maximum Power Extraction (MPE)

<sup>18</sup> Direct Current Link Voltage Regulation (DCLVR)

<sup>19</sup> Pitch Angle Control (PAC)

<sup>20</sup> Proportional Integral Derivative (PID)

<sup>21</sup> State Feedback Linearization (SFL)

<sup>22</sup> Fuzzy Logic Control (FLC)

<sup>23</sup> Neural Network (NN)

<sup>24</sup> Fault Tolerant Control (FTC)

<sup>25</sup> Energy Shaping Control (ESC)

<sup>26</sup> Model Predictive Control (MPC)

توان پیشنهاد شده است. همانطور که نویسندگان گزارش داده‌اند، طرح کنترل پیشنهادی مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب اصلی MPC را با استفاده از متغیرهای تصمیم‌گیری جدید به یک مسئله محدب تبدیل نموده و عملکرد بهتری را در مقایسه با MPC معمولی نشان می‌دهد. نویسندگان در [۵۹] یک طرح MPC مقاوم در برابر خطا را برای به حداکثر رساندن توان جذب شده به وسیله ردیابی سرعت بهینه ژنراتور یک توربین بادی که در ناحیه ۲ کار می‌کند، توسعه داده‌اند. یک ناظر مد لغزشی<sup>۲۷</sup> (SMO) تطبیقی نیز برای تخمین خطاهای حسگر و عملگر استفاده شده است. در کنار کنترل‌کننده‌های مختلف برخی از روش‌های کنترل از ناظرها برای تخمین حالت‌های ناشناخته سیستم و اختلال استفاده می‌کنند؛ زیرا همه حالت‌های سیستم همیشه در دسترس نبوده و دینامیک باد نیز ناشناخته است [۶۰]. اثرات بارهای نامتقارن و افت ولتاژ شبکه در شبکه‌های برق ایزوله بیشتر از شبکه‌های ملی مشاهده شده است. این مسائل باعث جریان‌های خروجی غیر سینوسی، نوسانات توان و گشتاور و همچنین تلفات توان نابرابر شده که منجر به فرسودگی در اجزای مکانیکی می‌گردد. برای مقابله با این مشکلات برخی از رویکردهای کنترل توان مستقیم مبتنی بر کنترل خطی جهت حذف موجک گشتاور، به حداقل رساندن نوسانات توان و جبران عدم تعادل جریان استاتور توسعه داده شده است [۱۴، ۶۱].

یک طرح کنترل مد لغزشی<sup>۲۸</sup> (SMC) مبتنی بر جبران اغتشاش در [۶۲] برای استخراج بهینه توان از توربین‌های بادی پیشنهاد شده است. دینامیک غیرخطی و مدل نشده سیستم، پارامترهای نامعین و تغییرات تصادفی سرعت باد در یک اغتشاش تجمیع شده و با توسعه یک اغتشاش مد لغزشی و مشاهده‌گر حالت تخمین زده شده‌اند. بر این اساس، طرح کنترل پیشنهادی اغتشاشات را به طور مؤثر جبران نموده، از محافظه‌کاری بیش از حد SMC جلوگیری کرده و عملکرد کنترلی مقاومی را ارائه داده است. همچنین، بررسی‌ها در شرایط عملیاتی مختلف نشان می‌دهد که طرح کنترل توسعه‌یافته پیشنهادی از نظر سازگاری، مقاومت در برابر اغتشاشات و دقت ردیابی از کنترل‌کننده PID معمولی، FLC و SMC معمولی دارای عملکرد بهتری می‌باشد. در میان رویکردهای کنترلی موجود، SMC به دلیل پاسخ دینامیکی سریع، عملکرد حالت گذرای خوب، پایداری و مقاومت در برابر تغییرات پارامترها و اختلالات خارجی روشی مناسب و مؤثر برای حل مسائل مختلف کنترل غیرخطی می‌باشد [۶۳-۶۹]. با این حال، اگرچه عملکرد ردیابی رضایت‌بخشی از روش SMC مرسوم در کاربردهای عملی وجود دارد، اما هنوز از برخی کاستی‌ها رنج می‌برد؛ مواردی مانند آسیب‌پذیری این روش در برابر نویز اندازه‌گیری، دشواری در دستیابی به پایداری مجانبی در حضور اختلالات، تولید سیگنال‌های کنترلی غیرضروری بزرگ برای غلبه بر عدم قطعیت‌های پارامتری و جدی‌ترین مورد یعنی پدیده چترینگ<sup>۲۹</sup> که با نوسانات فرکانس بالای ناشی از کنترل سوئیچینگ ناپیوسته مرتبط است [۷۰-۷۲]. به دلیل عدم وجود یک المان سوئیچینگ که قادر به تغییر به فرکانس بی‌نهایت باشد، اثرات پدیده چترینگ بر روی سیستم‌های کاربردی واقعی را نمی‌توان به طور دقیق تخمین زد [۷۳]. از این رو، معمولاً هدف از تلاش برای کاهش این پدیده، کاستن از عواقب آن خواهد بود [۷۴]. از آنجایی که WECS ها رفتاری بسیار غیرخطی از خود نشان داده و اغلب در محیط‌هایی با شرایط آب و هوایی دشوار کار می‌کنند؛ به لطف مزایای اثبات‌شده‌ی روش SMC، این رویکرد کنترلی نقشی تعیین‌کننده در کنترل توان و بهبود عملکرد WECS ها ایفا می‌کند [۷۵-۷۷]. جدول ۳ مقایسه‌ای از مزایا و معایب رویکردهای کنترلی که بیشترین پیاده‌سازی را روی سیستم‌های تبدیل انرژی بادی داشته‌اند، ارائه می‌دهد.

<sup>27</sup> Sliding Mode Observer (SMO)

<sup>28</sup> Sliding Mode Control (SMC)

<sup>29</sup> Chattering

جدول ۳- مقایسه‌ی پرکاربردترین رویکردهای کنترلی در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی

روش	مزایا	معایب
PI	<ul style="list-style-type: none"> <li>پاسخ سریع</li> <li>به حداقل رسیدن خطای حالت ماندگار</li> <li>سادگی طراحی و پیاده‌سازی</li> <li>قابلیت تنظیم مجدد کنترل‌کننده در محل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>حساسیت بالا به اختلالات خارجی و عدم قطعیت‌های پارامتری</li> <li>پاسخ حالت ماندگار نامناسب در طول حالت‌های گذرا</li> <li>خطای حالت ماندگار بالا برای سیستم‌های با دینامیک نامشخص</li> <li>عملکرد کنترلی ضعیف</li> </ul>
PID	<ul style="list-style-type: none"> <li>فراجش کم</li> <li>خطای حالت ماندگار حداقلی</li> <li>سادگی طراحی و پیاده‌سازی</li> <li>قابلیت تنظیم مجدد کنترل‌کننده در محل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>حساسیت بالا به اختلالات خارجی و عدم قطعیت‌های پارامتری</li> <li>عملکرد کنترلی بهتر در مقایسه با PI، اما همچنان ضعیف</li> </ul>
$H_{\infty}, H_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>عملکرد بهبود یافته در کنترل توان در مقایسه با روش‌های سنتی</li> <li>کاهش خطای ردیابی</li> <li>حذف اختلالات و نویز اندازه‌گیری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>نیاز به معادلات ریاضی پیچیده</li> <li>کنترل‌کننده عموماً از مرتبه بسیار بالایی برخوردار است که پیاده‌سازی آن را مشکل‌ساز می‌کند.</li> <li>پاسخ دینامیکی کند</li> </ul>
NN	<ul style="list-style-type: none"> <li>کنترل‌کننده خودآموز</li> <li>مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها و خطاهای پارامتری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>پاسخ کند و پیچیده</li> <li>نیاز به مجموعه داده‌های گسترده و جامع</li> </ul>
Fuzzy	<ul style="list-style-type: none"> <li>مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها و خطاهای پارامتری</li> <li>مناسب برای سیستم‌های غیرخطی کوچک و بزرگ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>روش کنترلی کند</li> <li>توسعه قوانین پیچیده</li> <li>به دلیل پارامترهای زیادی که باید تنظیم شوند، تنظیم دقیق آن مشکل‌ساز بوده و بهینگی کنترل‌کننده را تقریباً غیرممکن می‌سازد.</li> </ul>
MPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>عملکرد خوب در امور کنترلی مختلف WECS</li> <li>کاهش فرکانس سوئیچینگ</li> <li>بهینه‌سازی آنلاین</li> <li>حداقلی بودن خطای پیش‌بینی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>نیاز به فیلتر و مدل دقیق سیستم</li> <li>محاسبات ریاضی پیچیده و بار محاسباتی بالا</li> <li>حساس به عدم قطعیت‌های پارامتری</li> </ul>
SMC	<ul style="list-style-type: none"> <li>پاسخ دینامیکی سریع</li> <li>عملکرد حالت گذرای خوب و پایدار</li> <li>پایداری و مقاومت در برابر اختلالات خارجی و عدم قطعیت‌های پارامتری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>پدیده چترینگ</li> <li>سیگنال‌های کنترلی بزرگ برای غلبه بر اختلالات خارجی و عدم قطعیت‌های پارامتری</li> </ul>

#### ۴. نتیجه گیری

این مقاله مروری جامع بر مطالعات پیشرفته در حوزه ماشین‌های الکتریکی و رویکردهای کنترلی پرکاربرد در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی ارائه می‌دهد. با بررسی مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم در مقایسه با سایر ماشین‌های الکتریکی رایج در تولید برق بادی، از جمله ماشین‌های القایی قفس سنجایی، القایی روتور سیم‌پیچی، القایی دو سو تغذیه و سنکرون با تحریک الکتریکی، به عنوان گزینه‌ای بسیار امیدوارکننده مطرح می‌شوند. در نتیجه، ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم پیشرفته مانند ماشین رنیر و ماشین دنده مغناطیسی با تأکید بر الزامات کلیدی از جمله چگالی گشتاور و توان، راندمان، قابلیت اطمینان، هزینه و ... مورد بحث و مقایسه قرار گرفته‌اند. از طرفی، هنوز چالش‌های فنی زیادی در مورد ماشین‌های الکتریکی وجود دارد که باید بر آن‌ها غلبه شود. این در حالی است که مسائل

مدل سازی، مشکلات تولید، خرابی ماشین ها و همچنین کنترل بدون سنسور در شرایط غیرعادی نیز همچنان برجسته هستند. با این حال، فناوری های نوظهور در ماشین های الکتریکی نقش عمده ای در کارآمدی، قابلیت اطمینان و مقرون به صرفه تر شدن سیستم های تبدیل انرژی بادی ایفا می کنند.

از سوی دیگر، طبق منابع مطالعاتی مختلف صرف نظر از عملکرد شناخته شده رویکردهای کنترلی مرسوم در کاربردهای عملی، این رویکردها همچنان در ارائه عملکرد مطلوب در کنترل سیستم های تبدیل انرژی بادی نقاط ضعفی را نشان می دهند؛ به ویژه هنگامی که توربین های بادی با خطاهای مختلف، عدم قطعیت های پارامتری و اختلالات خارجی سروکار دارند. اگرچه دستیابی به عملکرد کنترلی مطلوب تنها به ساختار کنترل کننده وابسته نیست؛ اما تنظیم صحیح پارامترهای کنترل کننده و مدل سازی مناسب و واقع بینانه سیستم نیز نقش مهمی در اعتبارسنجی عملکرد طرح های کنترلی ایفا می کنند. علاوه بر این، پارامترهای کنترل کننده اغلب به صورت آفلاین و با آزمون و خطا از پیش محاسبه می شوند؛ بنابراین از ارائه مداوم بهترین عملکرد به ویژه در شرایط عملیاتی متغیر جلوگیری می نمایند. از این رو، رویه های تنظیم بهینه با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی و روش های مبتنی بر محاسبات نرم مانند منطق فازی، شبکه های عصبی و رویکردهای یادگیری می تواند منجر به ارائه پارامترهای دقیق تر شده و باعث عملکرد کنترلی بهتری شوند.

این مقاله به محققان و مهندسانی که به ماشین های الکتریکی پیشرفته و رویکردهای کنترلی موجود در سیستم های تبدیل انرژی بادی علاقه مند هستند، مرجع و طرح جامعی ارائه می دهد. این مطالعه می تواند برای ارائه پژوهش های انجام شده در این زمینه مفید بوده و منجر به ایجاد ایده های نوآورانه نیز گردد.

## ۵. مراجع

1. Tiwari R, Babu NR. Recent developments of control strategies for wind energy conversion system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Dec;66:268–85.
2. Jiang Z. Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021 Apr;139:110576.
3. Micallef D, Rezaeiha A. Floating offshore wind turbine aerodynamics: Trends and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021 Dec;152:111696.
4. Pape M, Kazerani M. An Offshore Wind Farm With DC Collection System Featuring Differential Power Processing. *IEEE Trans Energy Convers*. 2020 Mar;35(1):222–36.
5. Yang Z, Chai Y. A survey of fault diagnosis for onshore grid-connected converter in wind energy conversion systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Dec;66:345–59.
6. Njiri JG, Söffker D. State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 July;60:377–93.
7. Soliman MA, Hasanien HM, Al-Durra A, Alsaidan I. A Novel Adaptive Control Method for Performance Enhancement of Grid-Connected Variable-Speed Wind Generators. *IEEE Access*. 2020;8:82617–29.



8. Wang C, Wang L, Shi L, Ni Y. A Survey on Wind Power Technologies in Power Systems. In: 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE; 2007. p. 1–6.
9. Yaramasu V, Wu B, Sen PC, Kouros S, Narimani M. High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. Proc IEEE. 2015 May;103(5):740–88.
10. Chen H, Zuo Y, Chau KT, Zhao W, Lee CHT. Modern electric machines and drives for wind power generation: A review of opportunities and challenges. IET Renewable Power Gen. 2021 July;15(9):1864–87.
11. Howlader AM, Senjyu T. A comprehensive review of low voltage ride through capability strategies for the wind energy conversion systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016 Apr;56:643–58.
12. Zuo H, Bi K, Hao H. A state-of-the-art review on the vibration mitigation of wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020 Apr;121:109710.
13. Sharmila V, Rakkiyappan R, Joo YH. Fuzzy Sampled-Data Control for DFIG-Based Wind Turbine With Stochastic Actuator Failures. IEEE Trans Syst Man Cybern, Syst. 2021 Apr;51(4):2199–211.
14. Nian H, Cheng P, Zhu ZQ. Independent Operation of DFIG-Based WECS Using Resonant Feedback Compensators Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. IEEE Trans Power Electron. 2015 July;30(7):3650–61.
15. Kühne P, Pöschke F, Schulte H. Fault estimation and fault - tolerant control of the FAST NREL 5 - MW reference wind turbine using a proportional multi - integral observer. Adaptive Control & Signal. 2018 Apr;32(4):568–85.
16. Jlassi I, Cardoso AJM. Fault-Tolerant Back-to-Back Converter for Direct-Drive PMSG Wind Turbines Using Direct Torque and Power Control Techniques. IEEE Trans Power Electron. 2019 Nov;34(11):11215–27.
17. Shaker MS, Patton RJ. Active sensor fault tolerant output feedback tracking control for wind turbine systems via T–S model. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2014 Sept;34:1–12.
18. Bianchi FD, De Battista H, Mantz RJ. Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design. Springer Science & Business Media. 2006.
19. Yaramasu V, Wu B. Model predictive control of wind energy conversion systems. John Wiley & Sons. 2016.
20. Muller S, Deicke M, De Doncker RW. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. IEEE Industry Applications Magazine. 2002 May;8(3):26–33.
21. Hunt LJ. A new type of induction motor. J Inst Electr Eng. 1907;39(186):648–667.



22. Ademi S, Jovanovic MG, Hasan M. Control of Brushless Doubly-Fed Reluctance Generators for Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Trans Energy Convers.* 2015 June;30(2):596–604.
23. Gupta A, Jain DK, Dahiya S. Some Investigations on Recent Advances in Wind Energy Conversion Systems. In: 2012 IACSIT Coimbatore Conferences. 2012. p. 47–52.
24. Chatterjee S, Chatterjee S. Review on the techno - commercial aspects of wind energy conversion system. *IET Renewable Power Gen.* 2018 Oct;12(14):1581–608.
25. Li H, Chen Z. Overview of different wind generator systems and their comparisons. *IET Renew Power Gener.* 2008 June 9;2(2):123–38.
26. Wu F, M. El - Refaie A. Permanent magnet vernier machine: a review. *IET Electric Power Appl.* 2019 Feb;13(2):127–37.
27. Yu J, Liu C, Zhao H. Design and Multi-Mode Operation of Double-Stator Toroidal-Winding PM Vernier Machine for Wind-Photovoltaic Hybrid Generation System. *IEEE Trans Magn.* 2019 July;55(7):1–7.
28. Li J, Chau KT, Jiang JZ, Liu C, Li W. A New Efficient Permanent-Magnet Vernier Machine for Wind Power Generation. *IEEE Trans Magn.* 2010 June;46(6):1475–8.
29. Hoang E, Ahmed HB, Lucidarme J. Switching flux permanent magnet polyphased synchronous machines. In: European Conference on Power Electronics and Applications. 1997. p. 1–8.
30. Ojeda J, Simoes MG, Li G, Gabsi M. Design of a Flux-Switching Electrical Generator for Wind Turbine Systems. *IEEE Trans on Ind Appl.* 2012 Nov;48(6):1808–16.
31. Wang Y, Deng Z. A Controllable Power Distribution Strategy for Open Winding Hybrid Excitation Generator System. *IEEE Trans Energy Convers.* 2017 Mar;32(1):122–36.
32. Wang Y, Deng Z. Comparison of Hybrid Excitation Topologies for Flux-Switching Machines. *IEEE Trans Magn.* 2012 Sept;48(9):2518–27.
33. Evans DJ, Zhu ZQ, Zhan HL, Wu ZZ, Ge X. Flux-Weakening Control Performance of Partitioned Stator-Switched Flux PM Machines. *IEEE Trans on Ind Appl.* 2016 May;52(3):2350–9.
34. Mohamed EEM. Novel partitioned stator switched flux PM machines for wind generator applications. In: International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering. Aswan, Egypt; 2018. p. 427–434.
35. Deodhar RP, Miller TJE. The Flux-Reversal Machine: A New Brushless Doubly Salient Permanent-Magnet Machine. *IEEE Trans Ind Appl.* 1997 July;33(4):925–934.



36. Li D, Gao Y, Qu R, Li J, Huo Y, Ding H. Design and Analysis of a Flux Reversal Machine With Evenly Distributed Permanent Magnets. *IEEE Trans on Ind Applicat.* 2018 Jan;54(1):172–83.
37. More DS, Kalluru H, Fernandes BG. Outer Rotor Flux Reversal Machine for Rooftop Wind Generator. In: 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Edmonton, Alberta, Canada: IEEE; 2008. p. 1–6.
38. Atallah K, Howe D. A novel high-performance magnetic gear. *IEEE Trans Magn.* 2001 July;37(4):2844–6.
39. Crider JM, Sudhoff SD. An Inner Rotor Flux-Modulated Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed High-Torque Applications. *IEEE Trans Energy Convers.* 2015 Sept;30(3):1247–54.
40. Jiang Y, Zhang J, Li T. A Permanent Magnet Brushless Doubly Fed Generator With Segmented Structure. *IEEE Trans Magn.* 2018 Mar;54(3):1–4.
41. Luo X, Niu S. A Novel Contra-Rotating Power Split Transmission System for Wind Power Generation and Its Dual MPPT Control Strategy. *IEEE Trans Power Electron.* 2017 Sept;32(9):6924–35.
42. Rzymowski M, Woznica P, Kulas L. Single-Anchor Indoor Localization Using ESPAR Antenna. *Antennas Wirel Propag Lett.* 2016;15:1183–6.
43. Jian L, Chau KT, Jiang JZ. A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation. *IEEE Trans on Ind Applicat.* 2009;45(3):954–62.
44. Zhu X, Lee CHT, Chan CC, Xu L, Zhao W. Overview of Flux-Modulation Machines Based on Flux-Modulation Principle: Topology, Theory, and Development Prospects. *IEEE Trans Transp Electrific.* 2020 June;6(2):612–24.
45. Zhu ZQ. Overview of novel magnetically geared machines with partitioned stators. *IET Electric Power Appl.* 2018 May;12(5):595–604.
46. Palanimuthu K, Jung SW, Jung SY, Lee SR, Jeong JH, Joo YH. Increased power capture efficiency of large-scale wind turbines using model-free coordinated pitch, yaw, and torque control with wind direction estimation in diverse environmental conditions. *Ocean Engineering.* 2024 May;300:117482.
47. Osman AM, Alsokhiry F. Sliding Mode Control for Grid Integration of Wind Power System Based on Direct Drive PMSG. *IEEE Access.* 2022;10:26567–79.
48. Mousavi Y, Bevan G, Kucukdemiral IB, Fekih A. Sliding mode control of wind energy conversion systems: Trends and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2022 Oct;167:112734.



49. Ren Y, Li L, Brindley J, Jiang L. Nonlinear PI control for variable pitch wind turbine. *Control Engineering Practice*. 2016 May;50:84–94.
50. Surinkaew T, Ngamroo I. Robust power oscillation damper design for DFIG-based wind turbine based on specified structure mixed H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> control. *Renewable Energy*. 2014 June;66:15–24.
51. Das S, Subudhi B. A H<sub>∞</sub> Robust Active and Reactive Power Control Scheme for a PMSG-Based Wind Energy Conversion System. *IEEE Trans Energy Convers*. 2018 Sept;33(3):980–90.
52. Li P, Wang J, Wu F, Li H. Nonlinear controller based on state feedback linearization for series-compensated DFIG-based wind power plants to mitigate sub-synchronous control interaction. *Int Trans Electr Energy Syst*. 2019 Jan;29(1):e2682.
53. Barrios Aguilar ME, Coury DV, Reginatto R, Monaro RM. Multi-objective PSO applied to PI control of DFIG wind turbine under electrical fault conditions. *Electric Power Systems Research*. 2020 Mar;180:106081.
54. Sayeh KF, Tamalouzt S, Ziane D, Bekhiti A, Belkhier Y. Utilizing Fuzzy Logic Control and Neural Networks Based on Artificial Intelligence Techniques to Improve Power Quality in Doubly Fed Induction Generator - Based Wind Turbine System. Oyedepo SO, editor. *International Journal of Energy Research*. 2025 Jan;2025(1):5985904.
55. Kamal E, Aitouche A, Oueidat M. Fuzzy Fault-Tolerant Control of Wind-Diesel Hybrid Systems Subject to Sensor Faults. *IEEE Trans Sustain Energy*. 2013 Oct;4(4):857–66.
56. Li P, Wang J, Xiong L, Huang S, Ma M, Wang Z. Energy-Shaping Controller for DFIG-Based Wind Farm to Mitigate Subsynchronous Control Interaction. *IEEE Trans Power Syst*. 2021 July;36(4):2975–91.
57. Jimoh IA, Küçükdemiral IB, Bevan G. Fin control for ship roll motion stabilization based on observer enhanced MPC with disturbance rate compensation. *Ocean Engineering*. 2021 Mar;224:108706.
58. Jain T, Yame JJ. Fault-Tolerant Economic Model Predictive Control for Wind Turbines. *IEEE Trans Sustain Energy*. 2019 Oct;10(4):1696–704.
59. Ghanbarpour K, Bayat F, Jalilvand A. Dependable power extraction in wind turbines using model predictive fault tolerant control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020 June;118:105802.
60. Muñoz - Vázquez AJ, Parra - Vega V, Sánchez - Orta A, Romero - Galván G, Lara Alabazares D. Robust control of wind turbines based on fractional nonlinear disturbance observer. *Asian Journal of Control*. 2020 Sept;22(5):1801–10.



61. Brekken T, Mohan N, Undeland T. Control of a Doubly-Fed Induction Wind Generator Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. In: 2005 European conference on power electronics and applications. IEEE; 2005, p. 1–10.
62. Yang B, Zhong L, Yu T, Shu H, Cao P, An N, et al. PCSMC design of permanent magnetic synchronous generator for maximum power point tracking. *IET Generation Trans & Dist.* 2019 July;13(14):3115–26.
63. Bakhshande F, Bach R, Söffker D. Robust control of a hydraulic cylinder using an observer-based sliding mode control: Theoretical development and experimental validation. *Control Engineering Practice.* 2020 Feb;95:104272.
64. Mousavi Y, Zarei A, Jahromi ZS. Robust adaptive fractional-order nonsingular terminal sliding mode stabilization of three-axis gimbal platforms. *ISA Transactions.* 2022 Apr;123:98–109.
65. Tugal H, Cetin K, Han X, Kucukdemiral I, Roe J, Petillot Y, et al. Sliding Mode Controller for Positioning of an Underwater Vehicle Subject to Disturbances and Time Delays. In: 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Philadelphia, PA, USA: IEEE; 2022. p. 3034–9.
66. Banza AT, Tan Y, Mareels I. Integral sliding mode control design for systems with fast sensor dynamics. *Automatica.* 2020 Sept;119:109093.
67. Han X, Küçükdemiral I, Suphi Erden M. Time delay control with sliding mode observer for a class of nonlinear systems: Performance and stability. *Intl J Robust & Nonlinear.* 2021 Dec;31(18):9231–52.
68. Mousavi Y, Zarei A, Mousavi A, Biari M. Robust Optimal Higher-order-observerbased Dynamic Sliding Mode Control for VTOL Unmanned Aerial Vehicles. *Int J Autom Comput.* 2021 Oct;18(5):802–13.
69. Zhang J, Wang H, Zheng J, Cao Z, Man Z, Yu M, et al. Adaptive Sliding Mode-Based Lateral Stability Control of Steer-by-Wire Vehicles With Experimental Validations. *IEEE Trans Veh Technol.* 2020 Sept;69(9):9589–600.
70. Kelkoul B, Boumediene A. Stability analysis and study between classical sliding mode control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine. *Energy.* 2021 Jan;214:118871.
71. Morshed MJ, Fekih A. Design of a chattering-free integral terminal sliding mode approach for DFIG - based wind energy systems. *Optim Control Appl Methods.* 2020 Sept;41(5):1718–34.
72. Song J, Niu Y. Dynamic Event-Triggered Sliding Mode Control: Dealing With Slow Sampling Singularly Perturbed Systems. *IEEE Trans Circuits Syst II.* 2020 June;67(6):1079–83.

73. Liu X, Su X, Shi P, Shen C, Peng Y. Event-triggered sliding mode control of nonlinear dynamic systems. *Automatica*. 2020 Feb;112:108738.
74. Ni J, Liu L, Liu C, Hu X, Li S. Fast Fixed-Time Nonsingular Terminal Sliding Mode Control and Its Application to Chaos Suppression in Power System. *IEEE Trans Circuits Syst II*. 2017 Feb;64(2):151–5.
75. Ardjal A, Mansouri R, Bettayeb M. Fractional sliding mode control of wind turbine for maximum power point tracking. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019 Jan;41(2):447–57.
76. Jain A, Saravanakumar R. Intelligent Proportional Integral Terminal Sliding Mode Control for variable speed standalone wind energy conversion system. *Env Prog and Sustain Energy*. 2021 Mar;40(2):e13520.
77. Morshed MJ, Fekih A. Integral terminal sliding mode control to provide fault ride-through capability to a grid connected wind turbine driven DFIG. In: 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Seville: IEEE; 2015. p. 1059–64.