

## A Review on the Technical Challenges of Connecting Wind Energy Conversion Systems to the Grid

Majid Tavoosi<sup>1</sup>, Instructor, Ehsan Heydarian-Forushani<sup>2</sup>, Assistant Professor, Mohammad Hassan Amirioun<sup>3</sup>, Assistant Professor, Mohsen Parsa Moghaddam<sup>4</sup>, Professor

<sup>1</sup> Department of Skills and Entrepreneurship, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran.

<sup>4</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

### Abstract:

Wind power generation is making an increasingly significant contribution to global electricity production. The high penetration of wind power poses many operational and control challenges that affects the reliability and stability of power systems. In this Paper, the reported technical challenges caused by the grid integration of wind energy conversion system (WECS) and the proposed solutions methodologies represents. The wind-generating system components and architecture are investigated at the beginning of this article for analysis and stability studies purposes, then are addressed various technical challenges; each challenge is discussed individually, focusing on the bulk integration of wind energy into the power systems. Some solutions, including grids code, energy storage technologies, appropriate control strategies, and other methodologies employed to mitigate the effects of the integration, are also included. This review is ready-reckoner of essential topics for further research of wind energy and available technologies in this field. This review provides ready-reckoner of essential topics for grid integration of wind energy and available technologies in direction of overcome the related difficulties.

**Keywords:** Wind Energy, Grid Integration, Stability, Reliability, Resiliency, Voltage Support, Ride-through Capability, Frequency Response, Protection Challenges, Power Quality, Control Strategy, Energy Storage Systems (ESSs), Grid Codes.

**Received:** 25 March 2022

**Revised:** 5 July 2022

**Accepted:** 28 August 2022

**Corresponding Author:** Dr. Ehsan Heydarian-Forushani, heydarian@qut.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1965932.1031>





## مروری بر چالش های فنی اتصال سیستم های تبدیل انرژی باد به شبکه

مجید طاوسی<sup>۱</sup>، مربی، احسان حیدریان فروشانی<sup>۲</sup>، استادیار، محمدحسن امیریون<sup>۳</sup>، استادیار، محسن پارسا مقدم<sup>۴</sup>، استاد

۱- دانشکده مهارت و کارآفرینی واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۳- گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

**چکیده:** تولید برق بادی سهم قابل توجهی در تولید جهانی برق دارد. نفوذ بالای نیروی باد چالش های عملیاتی و کنترلی بسیاری را به همراه دارد که بر قابلیت اطمینان و پایداری سیستم های قدرت تأثیر می گذارد. در این مقاله، چالش های فنی گزارش شده ناشی از یکپارچه سازی سیستم تبدیل انرژی باد در شبکه و روش های راه حل های پیشنهادی ارائه شده اند. معماری و اجزاء سیستم تولید باد در ابتدای این مقاله برای اهداف تحلیل و مطالعات پایداری مورد بررسی قرار می گیرند، سپس به چالش های فنی مختلف پرداخته می شود؛ هر چالش به صورت جداگانه، با تمرکز بر ادغام عمده انرژی باد در سیستم های قدرت مورد بحث قرار می گیرد. برخی راه حل ها، از جمله کد شبکه، فناوری های ذخیره سازی انرژی، استراتژی های مناسب کنترل و سایر روش های مورد استفاده برای کاهش اثرات یکپارچه سازی، نیز گنجانده شده اند. این بررسی، مقدمه ای از موضوعات ضروری برای یکپارچه سازی شبکه انرژی بادی و فناوری های موجود در جهت غلبه بر مشکلات مربوطه را فراهم می کند.

**واژه های کلیدی:** انرژی باد، یکپارچه سازی شبکه، پایداری، قابلیت اطمینان، تاب آوری، پشتیبانی ولتاژ، قابلیت متصل ماندن به شبکه، پاسخ فرکانس، چالش های حفاظت، کیفیت توان، استراتژی کنترل، سیستم های ذخیره انرژی (ESS)، کدهای شبکه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

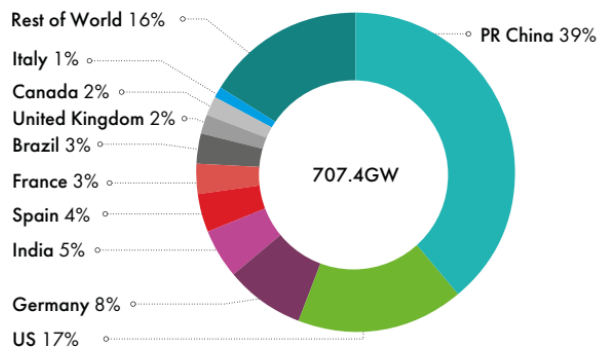
نویسنده مسئول: دکتر احسان حیدریان فروشانی، heydarian@qut.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1965932.1031>

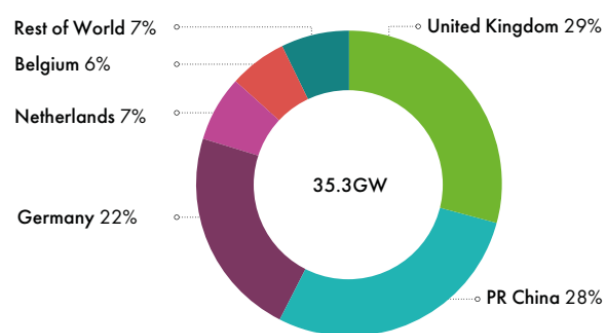
## ۱- مقدمه

طی سالیان اخیر، تولید انرژی الکتریکی از باد گسترش یافته است. مجموع ظرفیت تولید بادی نصب شده در انتهای سال ۲۰۲۰ در سطح جهان نزدیک به ۷۴۳ گیگاوات می‌باشد که رشد ۱۴ درصدی نسبت به سال ۲۰۱۹ را نشان می‌دهد. انرژی باد به عنوان منبع انتشار صفر CO<sub>2</sub>، دارای تعادل انرژی قابل توجهی است؛ بر اساس گزارش ارائه شده توسط شورای جهانی انرژی باد، با بیش از ۱۴۰۰۰۰ توربین بادی<sup>۱</sup> که در نزدیک به ۷۰ کشور جهان کار می‌کنند، صرفه جویی سالانه ۱/۵ میلیارد تن CO<sub>2</sub> تا سال ۲۰۲۰ حاصل شده است. براساس پیش بینی، کاهش سالانه انتشار تا سال ۲۰۳۰ به ۳/۲ میلیارد تن ارتقاء می‌یابد [۱ و ۲]. سیاست‌ها و قوانین کشورها برای گذار به انرژی پاک به پروژه‌های انرژی بادی بیشتری در آینده کمک خواهد کرد. مزارع بادی نصب شده در خشکی<sup>۲</sup>، بیشتر توسعه یافته‌اند و در سطح جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقابل، مزارع بادی فراساحلی<sup>۳</sup> هنوز در ابتدای راه توسعه هستند؛ دلیل این تفاوت بین دو فناوری به مسائل فنی، محدودیتهای ساختاری و هزینه مربوط می‌شود [۳]. شکل (۱) سهم جغرافیایی انرژی برق استخراج شده از باد، از نقطه نظر توسعه توربینهای بادی نصب در خشکی و فراساحل را نشان می‌دهد. سهم انرژی باد در تولید کل انرژی الکتریکی به واقعیتی تبدیل شده است که نمی‌توان آن را نادیده گرفت. بسیاری از کشورها انرژی بادی را در تولید بیش از ۲۰ درصد به اشتراک می‌گذارند. همه اینها چندین کشور را تشویق به وضع قوانین و سیاست‌هایی کرده است که به رشد این صنعت کمک می‌کند و در عین حال از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی این کشورها را حمایت می‌کند. جدول (۱) نمای کلی از برجسته‌ترین سیاست‌های شش کشور پیشرو در تولید انرژی الکتریکی از باد را ارائه می‌دهد.

Total installations onshore (%)



Total installations offshore (%)



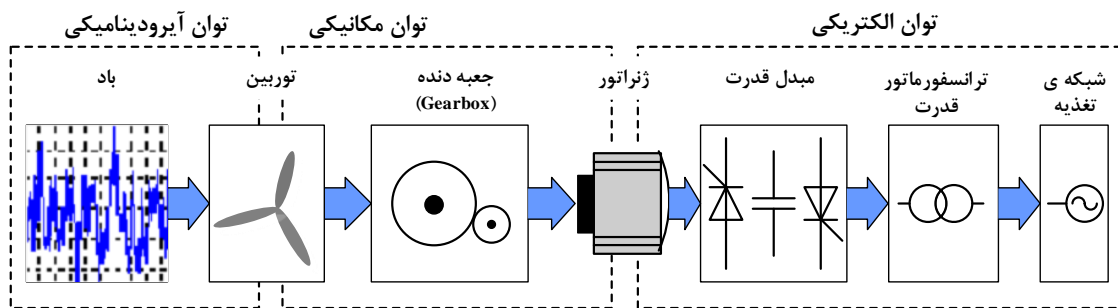
شکل (۱): ظرفیت نصب شده توربین‌های بادی در خشکی (onshore) و فراساحلی (offshore) در جهان تا انتهای سال ۲۰۲۰ [۱]

جدول (۱): سیاست‌های اصلی انرژی باد در کشورهای پیشرو در این صنعت

کشور	کل ظرفیت نصب شده WECS تا آخر ۲۰۲۰ [۱]	وضعیت سیاست تولید انرژی باد	نوع سیاست گذاری تولید انرژی باد
چین	۲۸۸۳۲۰ مگاوات	در حال اجرا یا جایگزین شده است	ابزارهای نظارتی؛ ارائه اطلاعات؛ کدها و استانداردها؛ تعرفه‌های تغذیه/حق بیمه؛ معافیت مالیاتی؛ سرمایه گذاری مستقیم
آمریکا	۱۲۲۳۱۷ مگاوات	در حال اجرا یا جایگزین شده است	کدها و استانداردها؛ پیشرفت تکنولوژی؛ کمک‌های مالی و یارانه‌ها؛ طرح‌های تعهدی؛ طرح‌های داوطلبانه عمومی؛ استاندارد نمونه کارهای تجدیدپذیر
آلمان	۶۲۸۵۰ مگاوات	در حال اجرا	تعرفه‌های تغذیه/حق بیمه؛ کمک‌های مالی و یارانه‌ها؛ برنامه ریزی استراتژیک
هند	۳۸۶۲۵ مگاوات	در حال اجرا یا جایگزین شده است	کمک‌های مالی و یارانه‌ها؛ گواهی سبز؛ تعرفه‌های تغذیه/حق بیمه؛ وام برنامه ریزی استراتژیک؛ معافیت مالیاتی
انگلیس	۲۳۹۳۷ مگاوات	در حال اجرا	تعرفه‌های تغذیه/حق بیمه؛ ابزارهای نظارتی؛ کدها و استانداردها
فرانسه	۱۷۹۴۶ مگاوات	در حال اجرا	برنامه ریزی استراتژیک؛ تعرفه‌های تغذیه / حق بیمه

سیستم تبدیل انرژی باد (WECS)<sup>۲</sup> وابسته به سائزی که دارد، به نقاط مختلف شبکه اعم از فشارضعیف (توربینهای بادی خانگی)، فشار متوسط (سیستم توزیع) و فشار قوی (شبکه انتقال و فوق توزیع) اتصال می‌یابد. توربین‌های بادی کوچک به شبکه‌های توزیع ۰/۴ کیلوولت تا ۳۳ کیلوولت متصل می‌شوند. گروه بزرگتری از توربینهای بادی نصب در خشکی، می‌توانند به سطح ولتاژهای بالاتر تا ۶۶ کیلوولت نیز متصل شوند و سرانجام توربینهای بادی فراساحلی به سطح ولتاژهای بالاتر تا ۱۰۰ کیلوولت متصل می‌شوند؛ بعلاوه در توربین‌های بادی فراساحلی که دور از خطوط انتقال هستند، استفاده از HVDC<sup>۵</sup> برای کاهش تلفات و ناپایداری مورد اقبال است [۴].

علی‌رغم رشد چشمگیر انرژی باد، همچنان چالش‌هایی برای محققان مثل ادغام آن به شبکه، طبیعت غیر قابل پیش بینی باد و مکان توربین بادی وجود دارد [۵] که البته مهمترین آن چالشهای مربوط به یکپارچه سازی WECSها در شبکه است و در تحقیقات اخیر، محققان در پی رسیدگی به این چالشها و کاهش تاثیر ادغام سیستم‌های تولید برق بادی به شبکه بوده‌اند. در ارتباط با چالشهای فنی حضور WECSها در شبکه، جنبه‌های مختلفی که در مطالعات گزارش شده عبارتست از: پیش بینی انرژی باد، پایداری و قابلیت اطمینان<sup>۶</sup> شبکه، پشتیبانی ولتاژ و فرکانس، حفاظت شبکه، کیفیت توان (PQ)<sup>۷</sup> و همچنین قابلیت متصل ماندن به شبکه در شرایط کاهش ولتاژ<sup>۸</sup> (LVRT). پژوهشگران در نوشتجات خود راهکارهای غلبه بر چالشهای ادغام WECS به شبکه را بررسی کرده و راهکارهای متفاوتی شامل استفاده از سیستمهای ذخیره انرژی (ESSs)<sup>۹</sup> برای افزایش انعطاف پذیری<sup>۱۰</sup> و تاب آوری<sup>۱۱</sup> سیستم، استفاده از کدهای شبکه و الزامات مربوطه برای اتصال نیروگاههای بادی به شبکه چین و پس از وقوع خطا، استفاده از استراتژی‌های کنترلی در مبدلهای واسط الکترونیک قدرت در WECSها و اعمال محدودیت و تعیین خط مشی برای میزان تولید WECSهای متصل به شبکه در شرایط مختلف بهره برداری از شبکه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این مقاله چالش‌های فنی را که شبکه‌ها در نتیجه یکپارچه‌سازی انرژی باد با آن مواجه هستند، مرور می‌کند. علاوه بر این، تحقیقات موجود را برای کاهش یا رسیدگی به تأثیر ادغام مورد بحث قرار می‌دهد. سازمان‌دهی مقاله به قرار زیر است: در بخش دوم مدل‌های عمومی WECS و مقایسه‌ی کوتاهی بین مشخصات آنها ارائه می‌گردد. در بخش سوم تاثیرگذارترین چالش‌های فنی در سیستم قدرت به صورت جداگانه مورد بحث قرار می‌گیرند. بخش چهارم با تمرکز بر ادغام عمده انرژی باد در شبکه‌های قدرت؛ برخی راه‌حل‌ها، از جمله استراتژی‌های کنترلی، فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، کد شبکه و برخی دیگر از روشهای محدودسازی تولید بادی در شبکه را ارائه می‌دهد. در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده در این زمینه آورده می‌شود.



شکل (۲): اجزای اصلی یک WECS

## ۲- معرفی WECS متصل به شبکه

### ۲-۱- معماری WECS

شکل (۲) فرآیند تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد در یک WECS را نشان می‌دهد. وزش باد پره‌های توربین باد را حول محور صفحه‌ی دوران می‌چرخاند و این چرخش به یک جعبه دنده<sup>۱۲</sup> منتقل می‌شود (البته ساختارهای چرخش مستقیم<sup>۱۳</sup> فاقد جعبه دنده نیز وجود دارد که در ادامه به ذکر آن پرداخته شده است). جعبه دنده سرعت چرخش را در حد مناسب برای ژنراتور افزایش می‌دهد و ژنراتور با استفاده از میدان‌های مغناطیسی انرژی چرخشی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توان خروجی ژنراتور که عموماً در ولتاژ پایین‌تر از سطح شبکه تولید می‌شود توسط یک ترانسفورماتور به ولتاژ متناسب با شبکه‌ی وصل شده تبدیل می‌گردد. همه‌ی سیستم‌های توربین باد مولفه‌های نشان داده شده در شکل (۲) را شامل می‌شوند و فقط طرز گنجاندن یا استثنا کردن مؤلفه‌ها ممکن



است عوض شود که این هم مربوط به نوع ژنراتور مورد استفاده است. WECS براساس ژنراتورهای بکار رفته در آنها به دو دسته کلی تقسیم بندی می شوند: توربین باد با ژنراتور سرعت ثابت ( $^4FSG$ ) و توربین باد با ژنراتور سرعت قابل تنظیم ( $^{15}ASG$ ). در سال‌های اخیر توربین‌های باد سرعت متغیر طرح‌های غلب در میان توربین‌های باد نصب شده بوده‌اند و برای حصول حداکثر بازدهی آیرودینامیکی در رنج وسیعی از سرعت‌های باد طراحی و نصب شده‌اند. با توجه به اینکه باد منبعی متغیر و غیر قابل پیش‌بینی با داشتن یک توربین باد سرعت متغیر تطابق سرعت چرخش توربین و سرعت باد، به طور پیوسته، به منظور گرفتن حدکثر نقطه توان ( $^6MPPT$ ) از باد وجود دارد. سیستم الکتریکی توربین باد سرعت متغیر پیچیده‌تر از توربین باد سرعت ثابت است. توربین‌های باد سرعت متغیر معمولاً با یک ژنراتور القایی یا سنکرون تجهیز می‌شوند و از طریق یک مبدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌گردند. نقش مبدل، کنترل سرعت ژنراتور متناسب با تغییر باد می‌باشد که در بخش بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مزایای عمومی توربین‌های باد سرعت متغیر نسبت نوع سرعت ثابت عبارتند از: افزایش انرژی گرفته شده از باد، بهبود کیفیت توان و کاهش فشارهای مکانیکی روی توربین باد. تعداد ژنراتورهای بکاربرده شده در ساختار سرعت متغیر نسبت به ساختار سرعت ثابت دارای افزایش است و چندین درجه آزادی در ترکیب نوع ژنراتور و نوع مبدل الکترونیک قدرت وجود دارد [۶].

ژنراتورهای القایی (از جمله  $^{18}SCIG$  و  $^{17}DFIG$ ) بصورت معمول نسبت به سایر ژنراتورها در این قبیل کاربردها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به دلیل مزایای زیادی مثل هزینه‌ی کاهش یافته‌ی واحد، استحکام، سبک‌سازی کاهش یافته، امکان طراحی و پیاده‌سازی ساختار الکترونیک قدرت در کسری از توان نامی، نگهداری آسان و حفاظت سرخود در برابر اضافه بارهای شدید و اتصال کوتاه‌هاست [۷]. از طرفی با پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت، ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم ( $^9PMSG$ ) با وجود سبک‌سازی افزایش یافته (بخصوص در موارد حذف جعبه دنده و یا استفاده از جعبه دنده تک مرحله‌ای)، جزء ژنراتورهای محبوب و پرکاربرد در WECS محسوب شده و در نصب‌های جدید مورد توجه هستند [۸]. برای WECS های مبتنی بر DFIG، جعبه دنده‌ها مورد نیازند، به خاطر اینکه یک DFIG کم سرعت چند قطب از لحاظ فنی نشدنی است. همچنین SCIGها مزایای بهره برداری سرعت متغیر را با بکارگیری ساختار الکترونیک قدرت با سبک‌سازی کاهش یافته ندارند و نمی‌توانند در سیستم‌های چرخش مستقیم استفاده شوند؛ بنابراین تعداد کارخانه‌های تولید کننده ساختارهای WECS مبتنی بر SCIG اندک است [۹]. در جدول (۱) برخی از ویژگی‌های سه ژنراتور معروف باد در رنج توان ۳ مگاوات ارائه و مقایسه شده است. برای همه‌ی ژنراتورهای نشان داده شده در جدول (۱) فرض شده است که مبدل‌های توان پشت به پشت برای وصل ژنراتورهای باد به شبکه استفاده میشوند. هزینه، وزن، سبک‌سازی و تلفات ژنراتورها با بکارگیری یک مقدار بین ۰ تا ۱۰۰ درصد ارزیابی شده است که مقدار ۱۰۰٪ متناظر با یک WECS استاندارد پیاده شده با یک DFIG با گیربکس ۳ مرحله‌ای است. طبق جدول (۲) مفیدترین ژنراتور، PMSG درایو مستقیم با تلفات توان حدود ۶۵٪ نسبت به WECS مبتنی بر DFIG است. با این وجود در هزینه، وزن و سبک‌سازی DFIG مزایای بهتری از ژنراتورهای چرخش مستقیم دارد. مسائل قابلیت اعتماد مربوط به یک گیربکس ۳ مرحله‌ای، نیاز به حلقه‌های لغزان و جاروبک‌ها و بعلاوه مسئله مقاوم بودن از مشکلات ژنراتور DFIG است. همچنین برخی مشکلات در تامین قابلیت اتصال ژنراتور به شبکه در شرایط خطا (LVRT) با این ژنراتور، استفاده از آنها را در محدود می‌کند [۱۰]. PMSGهای چند قطب با مبدل‌های پشت به پشت توان کامل در اکثر کارخانه‌های تولیدکننده توربین باد بزرگ پذیرفته شده‌اند و به تدریج جایگزین DFIG به عنوان ژنراتور اصلی در بازار انرژی باد شده‌اند. به طور کلی یک مزیت اضافی ژنراتورهای چرخش مستقیم، کاهش نویزی است که در اثر حذف جعبه دنده حاصل میشود [۱۱]. برای کاربرد‌های فراساحلی، قابلیت اعتماد افزایش یافته‌ی ژنراتورهای سنکرون چرخش مستقیم باعث افزایش میل به استفاده از این ژنراتورهاست [۳].

جدول (۲): مقایسه سه ژنراتور مورد استفاده در توربین‌های بادی بزرگ [۱۰]

نوع ژنراتور	وزن	شعاع استاتور	تخمین هزینه کل	تلفات	کارایی LVRT	کاهش نویز
DFIG با جعبه دنده سه مرحله‌ای	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	ضعیف	ندارد
ژنراتور سنکرون چرخش مستقیم	٪۸۵	٪۶۰	٪۱۲۰	٪۹۵	خوب	دارد
PMSG چرخش مستقیم	٪۴۵	٪۶۰	٪۱۰۵	٪۶۵	خوب	دارد

## ۲-۲- ساختار الکترونیک قدرت برای اتصال WECS به شبکه

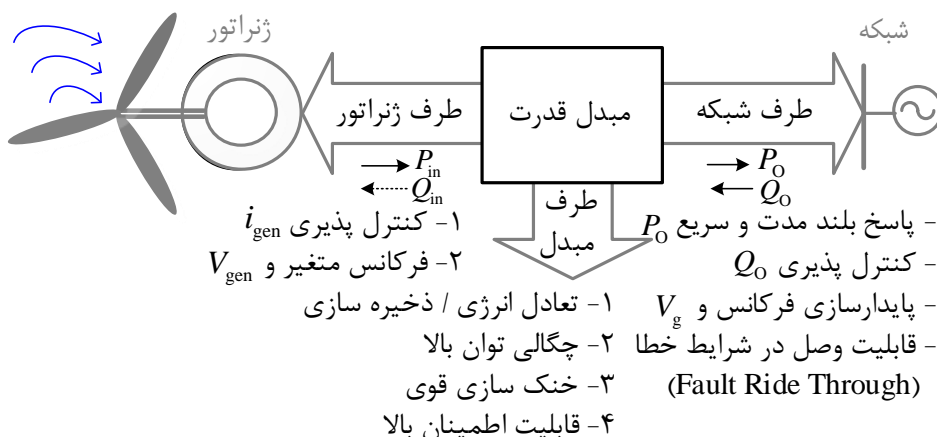
مبدل قدرت در WECS انرژی الکتریکی را برای برآوردن نیازهای شبکه برق و یا بارهای محلی تنظیم می‌کند. نیازهای ویژه به ساختار مبدل در WECS چنانکه در شکل (۳) نشان داده شده است می‌تواند در سه جنبه خلاصه شود:

**الف-** طرف ژنراتور باد: جریان روتور و یا جریان استاتور در ژنراتور توسط مبدل الکترونیک قدرت کنترل می‌شود تا گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور را تنظیم کند. کنترل جریان طرف ژنراتور نه تنها برای استخراج حداکثر انرژی، بلکه برای اطمینان از تعادل انرژی در زمانی که عدم تطابق اینرسی بین توان مکانیکی و الکتریکی وجود دارد، لازم است [۱۳].

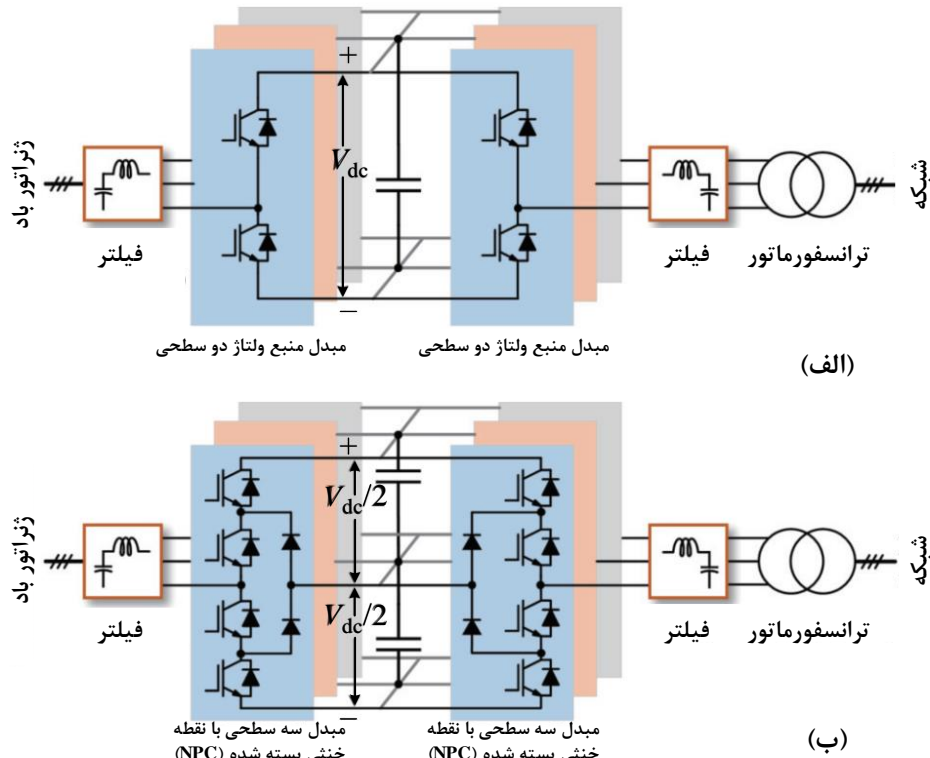
**ب-** طرف شبکه: الزامات اتصال WECS به شبکه، شامل همگام سازی<sup>۲۰</sup> شبکه، پاسخ در شرایط غیرعادی شبکه و پشتیبانی از شبکه، با هدف اطمینان از عملکرد ایمن در شرایط سطح نفوذ بالای<sup>۲۱</sup> انرژی باد است. به طور گسترده، نگران کننده ترین خواسته ها عبارت است از کیفیت توان، تزریق توان راکتیو، تنظیم فرکانس، و عملیات متصل ماندن WECS به شبکه در شرایط خطا. علاوه بر این، ارتباطات، پیش‌بینی توان، محدودیت نرخ رمپ و سایر الزامات در عمل تا جایی که به نیروگاه‌های بادی فراساحلی مربوط می‌شود، دیده می‌شود [۱۴].

**ج-** طرف مبدل: از آنجایی که مبدل قدرت، هسته WECS است، خرابی در مرحله پردازش توان بر کل عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد و منجر به بالارفتن هزینه های تعمیر و نگهداری، به ویژه با در شرایط نفوذ بالای انرژی باد می‌شود. پس، قابلیت اطمینان در WECS ها به طور فزاینده ای قابل توجه می‌شود [۱۵ و ۱۶]. علاوه بر این، برای اطمینان از انتقال نرمال توان هنگام اتصال به شبکه، معمولاً از یک ترانسفورماتور برای افزایش سطح ولتاژ استفاده می‌شود. در این مورد، مسائل مربوط به چگالی توان و اتلاف حرارت به دلیل محدودیت فضای فیزیکی محفظه پشت پره ها<sup>۲۲</sup> و برج توربین بادی در WECS باید به خوبی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، قابلیت تعادل و ذخیره انرژی باید در مرحله تبدیل توان ادغام شود تا از هزینه های اضافی ناشی از عدم تطابق توان بین توربین بادی و شبکه برق در کوتاه مدت جلوگیری شود [۱۷].

همانطور که در بخش قبل اشاره شد مبدل های قدرت در WECS با ژنراتورها و سطوح درجه بندی متفاوت توان، انواع و پیکربندی های مختلفی دارند. DFIG با مبدل های قدرت در مقیاس جزئی همچنان پیکربندی اصلی WECS است. برای توسعه WECS کارآمد، قابل اعتماد و فشرده، ژنراتورهای سنکرون مجهز به مبدل قدرت با ساینز کامل، PMSG یا ژنراتورهای القایی معمولی نقش فزاینده ای در بازار سیستم های برق بادی ایفا می‌کنند. همانطور که در بخش قبل بیان شد، پیش بینی می‌شود که پیکربندی با مبدل مقیاس کامل، بازار سیستم های قدرت بادی را در آینده همراه با توسعه سریع الکترونیک قدرت پوشش دهد [۱۸].



شکل (۳): نیازهای رایج برای عملکرد مبدل قدرت در سیستم های قدرت بادی، که در آن  $P_{in}$  و  $Q_{in}$  توان اکتیو و راکتیو منتقل شده از ژنراتور به مبدل قدرت هستند.  $i_{gen}$  و  $V_{gen}$  به ترتیب جریان و ولتاژ ژنراتور هستند،  $P_o$  و  $Q_o$  به ترتیب توان اکتیو و توان راکتیو مبادله شده بین مبدل قدرت و شبکه و  $V_g$  ولتاژ شبکه است [۱۲].



شکل (۴) : مبدل های قدرت رایج برای WECS، (الف) توپولوژی پشت به پشت منبع ولتاژ دو سطحی - (ب) توپولوژی پشت به پشت سه سطحی با نقطه خنثی بسته شده (اقتباس شده با توجه به بحث در [۱۳]).

## ۱-۲-۲- توپولوژی متداول مبدل قدرت در WECS

بسته به عوامل مختلف در WECS، توپولوژی مبدل قدرت متفاوت است. به عنوان مثال، رایج ترین مبدل برق در سیستم های WECS مبتنی بر DFIG، مبدل منبع ولتاژ دو سطحی است که ساختاری ساده با توان محدود دارد و از مبدل PWM پشت به پشت<sup>۲۳</sup> استفاده می کند که مزیت آن کنترل پذیری کامل قدرت با ساختار نسبتاً ساده و اجزای کم است (شکل ۴-الف). این مبدل یک راه حل اثبات شده، قوی و قابل اعتماد برای WECS با ولتاژ پایین است. در مقایسه، مبدل های قدرت چند سطحی برای WECS با ولتاژهای بالاتر و رتبه بندی توان بالاتر امیدوارکننده تر هستند. یک مبدل قدرت پشت به پشت سه سطحی با نقطه خنثی بسته شده (NPC)<sup>۲۴</sup> در شکل ۴-ب) نشان داده شده است. در مقایسه با مبدل پشت به پشت دو سطحی، توپولوژی پشت به پشت سه سطحی NPC می تواند به تنش های  $dv/dt$  کمتر بر روی نیمه هادی ها و سلف های کوچکتر برای فیلتر، به دلیل ولتاژهای خروجی چند سطحی دست یابد [۱۳]. در این مورد، مبدل های قدرت چند سطحی برای دستیابی به تبدیل توان در سطح ولتاژ متوسط ( $5 MV$ )<sup>۲۵</sup> با جریان های کمتر مناسب هستند. شایان ذکر است که نوسانات ولتاژ نقطه میانی (پیوند DC)<sup>۲۶</sup>، جهت عملکرد قابل اطمینان، باید به خوبی مورد بررسی قرار گیرد. با گسترش مستمر ظرفیت نصب شده در WECS، پیکربندی مبدل های چند سلولی (یعنی ماژول های واحد متصل به شکل یک آرایه) نیز امیدوارکننده می شوند و در آینده با افزایش سطح توان در سیستم های توربین بادی استفاده خواهند شد [۱۹ - ۲۱].

## ۱-۲-۲- سطوح کنترل در ساختار الکترونیک قدرت WECS

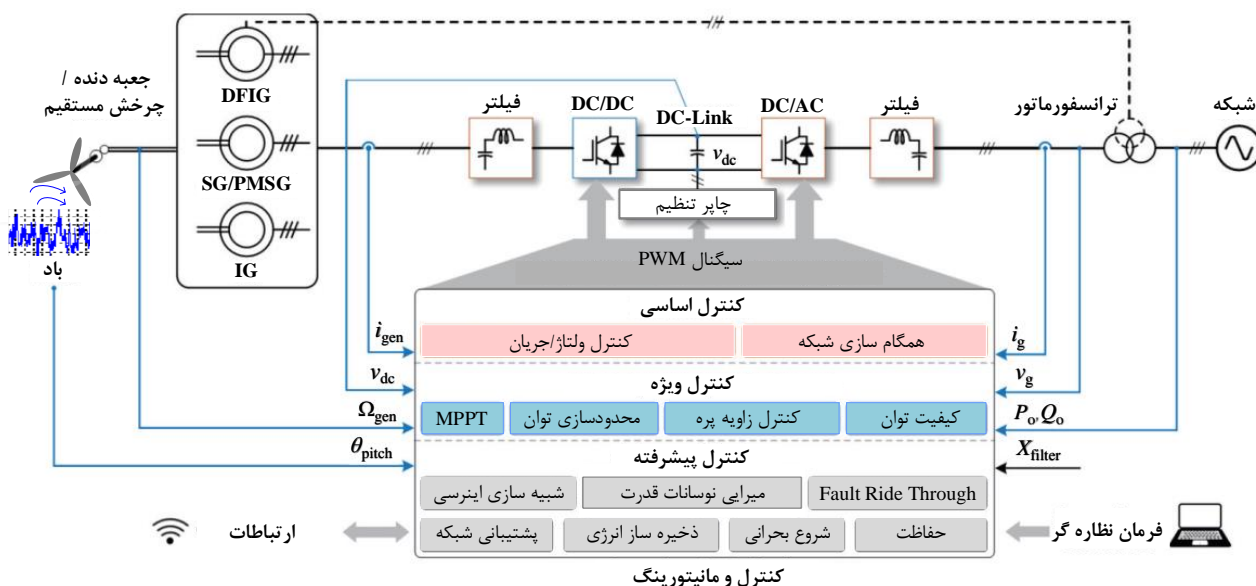
برای WECS ها با توجه به آنکه مقیاس های زمانی<sup>۲۷</sup> به دلایل مختلف متفاوت است، توربین مکانیکی و ساختار الکترونیک قدرت باید کنترل شوند. با توجه به تقاضاهای ویژه طرح شده در شکل (۳)، کنترل WECS معمولاً شامل سه سطح است و مطابق شکل (۵)، به شرح ذیل است:

**الف - کنترل اساسی:** مشابه همه مبدل های قدرت متصل به شبکه، کنترل اصلی مبدل های WECS، عمدتاً تنظیم جریان، تثبیت ولتاژ پیوند DC و همگام سازی شبکه را در نظر می گیرد. رایج ترین استراتژی کنترلی کماکان کنترل تناسبی-انتگرالی ( $PI$ )<sup>۲۸</sup> است؛

در حالی که کنترل رزونانسی-تناسبی (PR)<sup>۲۹</sup>، کنترل تکرارشونده و کنترل پیش‌بینی مدل نیز استفاده می‌شود. هدف از کنترل اساسی دستیابی به تبدیل توان کارآمد و قابل اعتماد است. علاوه بر این، کنترل اساسی باید عملکردهای حالت ماندگار و دینامیکی خوبی را برای اطمینان از عملکرد پایدار و ایمن ارائه دهد.

ب- کنترل ویژه: از آنجا که سرعت باد تغییر می‌کند و توان تولیدی نیز در نوسان است، بنابراین سیستم مکانیکی و مبدل قدرت باید به درستی کنترل شود تا با تنظیم سرعت چرخش توربین، برداشت انرژی به حداکثر برسد. هنگامی که سرعت باد کمتر از مقدار نامی باشد، توربین بادی می‌تواند یک زاویه شیب بهینه برای دستیابی به بهینه‌سازی توان پیدا کند (MPPT Control). اگر سرعت باد از مقدار نامی بیشتر شود، زاویه گام باید تنظیم شود تا توان تولیدی محدود شود (Pitch Angle Control)؛ بعنوان نمونه می‌توان به کار انجام شده در [۲۲] برای کنترل فرکانس از طریق کنترل زاویه اشاره داشت. در بهره برداری نرمال متصل به شبکه، WECS باید کنترل‌کننده‌های جریان مناسب را برای برآوردن الزامات کیفیت توان اتخاذ کند؛ کما اینکه روش‌های مختلف کنترل جریان پیشرفته شامل کنترل حالت لغزشی و کنترل فضای حالت مبتنی بر ناظر، برای اینورترهای منبع ولتاژ با فیلتر LCL مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۲۳].

ج- کنترل پیشرفته: بسیاری از توابع کنترل پیشرفته برای مبدل‌های قدرت WECS، به منظور فعال کردن یک سیستم هوشمند، قابل اعتماد و پشتیبانی از شبکه معرفی شده‌اند. به عنوان مثال، کنترل مبتنی بر قابلیت اطمینان مانند کنترل حرارتی و رویکرد ارزیابی قابلیت اطمینان ممکن است جهت اطمینان در رابطه با بالابودن دسترسی و هزینه‌های پایین نگهداری، و کاهش هزینه انرژی در طولانی مدت در مبدل قدرت WECS با ذخیره انرژی در نظر گرفته شود [۲۴ و ۲۵]. پاسخ به خطاهای شبکه (به عنوان مثال، عملیات متصل ماندن WECS به شبکه در خطای کاهش ولتاژ) و قابلیت پشتیبانی شبکه (تزریق یا جذب توان راکتیو) باید برای اطمینان از سازگاری WECS در ادغام با شبکه ارائه شود. زیرسیستم‌ها در WECS از قبیل مبدل‌های جانبی ژنراتور (MSC<sup>۳۰</sup>)، مبدل جانبی شبکه (GSC<sup>۳۱</sup>)، کربورار<sup>۳۲</sup>، چاپر تنظیم<sup>۳۳</sup> و کنترل‌کننده زاویه پره<sup>۳۴</sup> نیز باید برای عبور از شرایط غیرعادی شبکه، مانند میرایی نوسان توان، شبیه‌سازی اینرسی و متعادل‌سازی ولتاژ شبکه هماهنگ شوند [۲۶ - ۲۸].



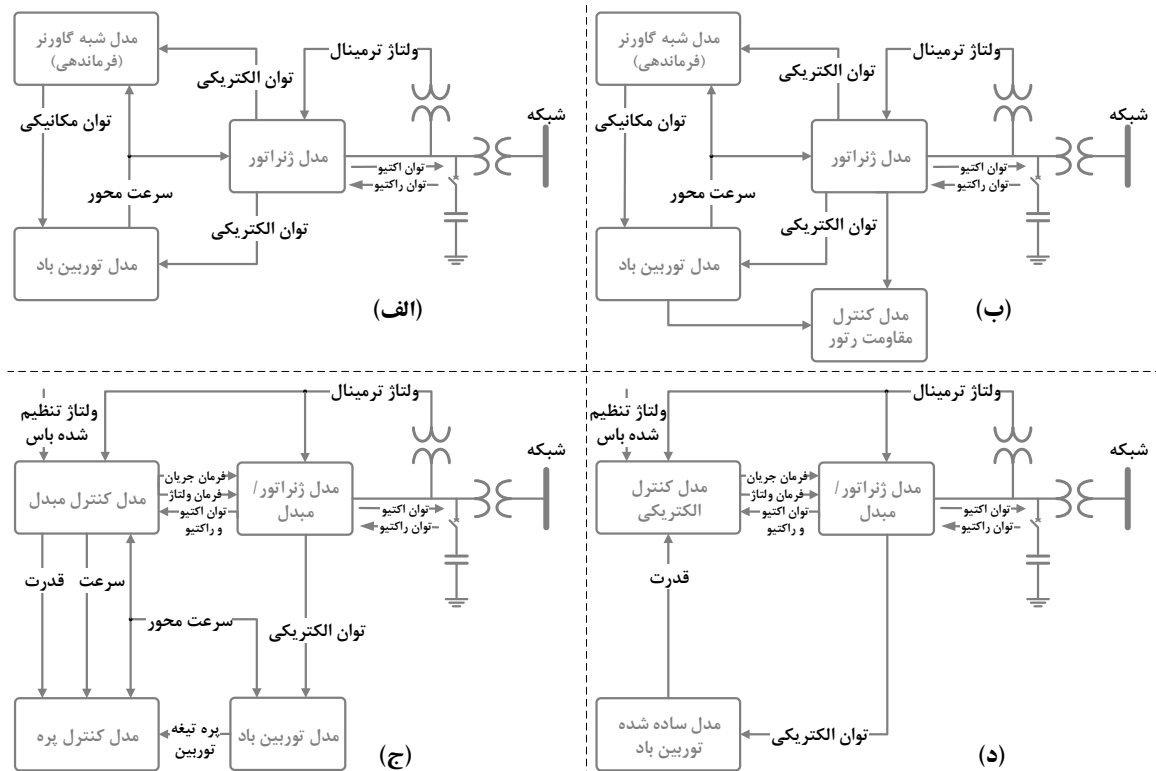
شکل (۵): ساختار عمومی کنترل برای WECS

### ۳-۲- مدل عمومی WECS متصل به شبکه

با توجه به تنوع ژنراتور و توابع کنترلی اعمال شده به ساختار الکترونیک قدرت، بویژه تحت مفهوم مزرعه بادی<sup>۳۵</sup> سرعت ثابت و سرعت متغیر، توسعه مدلهای ثابت برای خلاصه سازی WECSها انجام شده است که حاصل این تلاش چهار نوع مدل عمومی مورد استفاده برای WECS (نوع ۱، نوع ۲، نوع ۳ و نوع ۴) است [۲۹]. مدل‌های عمومی WECS در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. برای جزئیات بیشتر در مورد مدل‌سازی، توابع بلوکی و توسعه نرم‌افزار آنها برای اهداف تحلیل و مطالعات پایداری، خواننده می‌تواند به [۳۰ و ۳۱] مراجعه کند. مدل‌های عمومی مورد استفاده برای WECS به همراه اجزای اصلی به شرح زیر است [۳۲]:



- سیستم نوع ۱: در این مدل، SCIG استفاده می شود. خازنها برای ارائه توان راکتیو به ژنراتور و بصورت محدود به شبکه استفاده می شوند. از دیگر اجزای مورد استفاده جعبه دنده برای افزایش سرعت به حدود ۱۰۰ برابر است. این مدل معمولاً در مزرعه بادی سرعت ثابت مورد استفاده قرار می گیرد (شکل (۶-الف)).
- سیستم نوع ۲: در این مدل ژنراتور القایی از نوع رتور سیم بندی شده<sup>۳۶</sup> استفاده می شود. مشابه نوع اول خازنها برای ارائه توان راکتیو به ژنراتور و بصورت محدود به شبکه استفاده می شوند. همچنین از جعبه دنده برای افزایش سرعت به حدود ۱۰۰ برابر، حلقه های لغزان<sup>۳۷</sup> برای اضافه کردن مقاومت کنترلی به رتور و از مقاومت کنترلی جهت تغییر لغزش ژنراتور القایی استفاده می شود. این مدل نیز با وجود کنترل پذیری بهتر نسبت به نوع ۱، بدلیل محدودیتهای کنترلی در مزرعه بادی سرعت ثابت استفاده می شود (شکل (۶-ب)).
- سیستم نوع ۳: در این مدل که برای مزرعه بادی سرعت متغیر بکار می رود، از ژنراتور القایی رتور سیم بندی شده با مقاومت استاتیکی رتور (کنترل لغزش با مدار نصب ثابت روی رتور اپتوکوپلر<sup>۳۸</sup>) و DFIG با اتصال ساختار الکترونیک قدرت PWM پشت به پشت با قابلیت اتصال کربوار (که در پیوند DC مبدل نصب می شود) برای محافظت از سیم بندی رتور در طول رخداد خطا استفاده می شود؛ سیم پیچی سه فاز رتور با وصل کلید کربوار اتصال کوتاه می گردد و DFIG به یک ژنراتور القایی معمولی استاندارد تبدیل می شود (با توجه به اینکه باید در نظر بگیریم که در طول بهره برداری، کلیدزنی جریان بالا ممکن است موجب ایجاد گشتاورهای غیرمنتظره روی محور ژنراتور شود) [۳۳ و ۳۴]. همچنین جعبه دنده برای افزایش سرعت محور<sup>۳۹</sup> (نزدیک به ۱۰۰ برابر) جزء جدا ناپذیر در این مدل است (شکل (۶-ج)).
- سیستم نوع ۴: تفاوت عمده این مدل با مدل نوع ۳، در بخش محور ژنراتور و عدم استفاده از جعبه دنده (و یا استفاده از جعبه دنده با نسبت تبدیل سرعت کاهش یافته یا تک مرحله ای) و کاهش استفاده از توابع کنترلی مکانیکی مثل کنترل زاویه پره توربین است. در این مدل از ژنراتور القایی آهنربا دائم، ژنراتور سنکرون معمولی یا PMSG استفاده می شود. ساختار الکترونیک قدرت بصورت واسط بین استاتور ماشین و شبکه (از نوع پشت به پشت یا انواع دیگر کنترل کننده های ولتاژ متناوب<sup>۴۰</sup>) جهت حصول مقاصد کنترلی و تنظیم فرکانس ژنراتور برای اتصال به شبکه در شرایط تغییر باد استفاده می شود. جعبه دنده بصورت تک مرحله ای در ژنراتورهای سنکرون معمولی استفاده می شود و معمولاً در نسل مدرن PMSG حذف می شود و البته این حذف منجر به افزایش سایز ژنراتور و پره های توربین باد خواهد بود (شکل (۶-د)).



شکل (۶): مدلهای عمومی WECS، (الف) مدل نوع ۱- (ب) مدل نوع ۲- (ج) مدل نوع ۳- (د) مدل نوع ۴

### ۳- چالش‌های فنی اتصال WECS به شبکه

انرژی باد یکی از مهم‌ترین مشارکت‌کنندگان در شبکه‌های برق مدرن به عنوان یک منبع انرژی پاک و دوست‌دار محیط‌زیست است. ویژگی‌های منحصر به فرد سیستم‌های انرژی بادی، از جمله متناوب بودن، فناوری توربین و مسائل حفاظتی، چالش‌های جدیدی را برای یکپارچگی موفق و اقتصادی به شبکه‌ها به ارمغان می‌آورد [۳۵ - ۳۷]. این بخش به تأثیرات یکپارچه سازی WECS با شبکه می‌پردازد که باید به منظور حفظ ثبات و کیفیت انرژی عرضه شده به مشتریان در نظر گرفته شود.

#### ۳-۱- پیش‌بینی توان خروجی

قبل از معرفی نیروی باد در شبکه، اپراتورها علاقه مند به دانستن جزئیات تولید بودند، که به آنها در فرآیند تعهد واحدها و هزینه تولید واحد علاوه بر ذخیره ذخایر کمک می‌کند. افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر در ترکیب انرژی، به ویژه توربین‌های بادی در بسیاری از کشورها، اپراتورها را به بازنگری در مدیریت تامین به منظور حفظ انعطاف‌پذیری شبکه و افزایش کارایی برای یکپارچه‌سازی منبع تغذیه از توربین‌های بادی و سایر منابع انرژی متناوب سوق داده است [۳۸]. در مورد ادغام WECS با نفوذ بالا، پیش‌بینی نقش مهمی در کاهش هزینه تولید ایفا می‌کند؛ چرا که عدم پیش‌بینی مستلزم وجود ذخایر چرخان در مقادیر زیاد است. بعلاوه، رویدادهای غیر مترقبه (با شیب تند) می‌توانند قابلیت اطمینان شبکه را از بین ببرند. علیرغم اینکه با وجود WECS به عنوان منبع جدید تولید برق، به فرآیند پیش‌بینی در مدیریت شبکه کمک می‌شود [۳۹]، اما با این حال، هیچ استراتژی ایده‌آلی برای پیش‌بینی خود باد وجود ندارد، زیرا یکی از چالش‌برانگیزترین موارد پیش‌بینی در هواشناسی است. هر روش شناسی مزایا و معایب خود را دارد که ممکن است در موارد خاص معقول و در مواردی نامناسب باشد [۴۰]. بسته به نیاز عملیاتی، پیش‌بینی باد به چهار دوره زمانی (افق) تقسیم می‌شود که در جدول (۳) این طبقه بندی‌ها و با ارزش‌ترین کاربردهای آنها را نشان داده شده است. طبقه بندی پیش‌بینی‌ها بر اساس رویکردهای مورد استفاده به دو بخش پیش‌بینی قطعی و تحلیل عدم قطعیت تقسیم می‌شود. پیش‌بینی قطعی شامل چهار رویکرد فیزیکی، آماری، هوشمند و ترکیبی است. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت به سه پیش‌بینی احتمال، شاخص‌های ریسک و سناریوهای تولید تقسیم می‌شود [۴۱].

رویکرد فیزیکی مبتنی بر اطلاعات آب و هوا (از جمله دما، فشار، ارتفاع زمین و ...) برگرفته از ایستگاه‌های رصدی مختلف پراکنده در مناطق جغرافیایی با استفاده از معادلات دینامیکی (نظریه شبه ژئوستروفیک، معادلات اولیه و غیره) مدل‌سازی شده است. معروف‌ترین مدل پیش‌بینی، مشهور به پیش‌بینی عددی آب و هوا ( $^1NWP$ ) است [۴۱]. یکی از مشکلات این روش این است که به زمان محاسبه بیشتری نیاز دارد و بنابراین در پیش‌بینی کوتاه مدت نامناسب است. رویکردهای آماری و هوشمند مبتنی بر داده‌های تاریخی، اعم از باد یا برق تولید شده، منجر به پیش‌بینی تولید برق در آینده می‌شود. رویکرد آماری مبتنی بر سری‌های زمانی است و بیانگر نیاز ریاضی و علم آمار و احتمالات است. نمونه‌ای از مدل‌های مورد استفاده روش رگرسیون و زیرمجموعه‌های مختلف آن [۴۲ و ۴۳]، فیلتر کالمن [۴۴] و نظریه کوپولا [۴۵] است. آرچر و همکاران در [۴۶] پیش‌بینی نیروی باد را به عنوان یک موضوع چالش‌برانگیز برای یکپارچه‌سازی شبکه معرفی کردند و از مدل ARMA برای پیش‌بینی توان استفاده کردند. هوانگ و همکاران [۴۷] یک مدل آماری مبتنی بر توزیع اریب مختلط برای پیش‌بینی نیروی باد در شبکه انتقال چین ایجاد کردند. نایک و همکاران [۴۸] یک تکنیک ترکیبی مبتنی بر تجزیه حالت تجربی با رگرسیون هسته غیر تکراری را برای پیش‌بینی سریع و کارآمد سرعت/قدرت باد کوتاه‌مدت با استفاده از مجموعه‌های داده‌های دنیای واقعی توسعه دادند. الگوریتم‌های سری زمانی قوی و ساده هستند، اما قادر به پیش‌بینی موثر تولید انرژی بادی نیستند؛ زیرا ماهیت آنها کند و خطی است. بنابراین، آنها قادر به پیش‌بینی نوسانات غیر خطی و غیر ثابت نیروی باد به طور موثر نیستند. بهبود نوآورانه باعث توسعه ترتیبات هوشمند مانند استفاده از هوش مصنوعی (و زیرمجموعه آن مانند یادگیری ماشینی<sup>۴۲</sup> و یادگیری عمیق<sup>۴۳</sup>) در پیش‌بینی شده است. نتایج پیش‌بینی با استفاده از یک رویکرد هوشمند، درجه بالایی از دقت و سازگاری همراه با مزیت دیگری را نشان می‌دهد که می‌تولند با سری‌های زمانی غیرخطی به دلیل ماهیت تطبیقی و انعطاف‌پذیری آنها مقابله کند [۴۹ و ۵۰]. همچنین محققان رفتار تصادفی سرعت باد را با استفاده از روش‌های بسیاری از جمله تابع چگالی احتمال وایبول [۵۱]، روش مونت کارلو [۵۲]، تحلیل سری‌های زمانی [۵۳]، روش آماری [۵۴] و هوش مصنوعی [۵۵] مدل‌سازی کرده‌اند. سپس در مرحله بعد توان خروجی مزارع بادی را از روی منحنی‌های توان مربوط به سرعت باد محاسبه نموده‌اند. توابع ریاضی منحنی‌های توان ارائه شده توسط سازندگان برای ارتباط دقیق سرعت باد با توان‌های خروجی هستند [۵۶]. در [۵۷]،



تکنیک‌های احتمالی که با عدم قطعیت‌های سیستم‌های قدرت سر و کار دارند، مرور و مشخص شده است که شبیه‌سازی مونت کارلو ( $MCS^{۴۴}$ ) و تحلیل مبتنی بر سناریو ( $SBA^{۴۵}$ ) برای پیاده‌سازی بر روی تخمین نقطه‌ای و روش‌های احتمالی، ساده و آسان هستند. با این حال، تکنیک‌های  $MCS$  و  $SBA$  از نظر محاسباتی گران هستند.

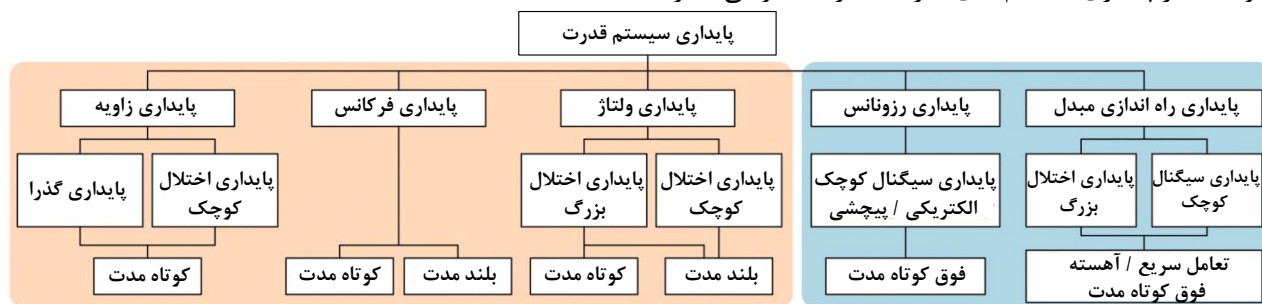
جدول (۳): افق زمانی برای پیش بینی باد [۳۲]

کاربرد	نمونه	مقیاس زمانی
تنظیم تصمیمات توزیع توان بصورت آنی		درون ساعتی (۵ تا ۶۰ دقیقه)
بارگیری‌های جدید، تعهد بعدی ساعت کار واحد تولید		کوتاه مدت (۱ تا ۶ ساعت پیش رو)
توزیع بار اقتصادی، تعهد واحدهای تولید و زمان بندی معاملات بازار		میان مدت (روزهای پیش رو)
طراحی منابع، تجزیه و تحلیل احتمالی		بلند مدت (هفته، فصل یا سال پیش رو)

### ۳-۲- پایداری

در مطالعات پایداری سیستم قدرت، تنظیم یک مدل مناسب برای توصیف یک پدیده فیزیکی مورد علاقه، به صورت سفارشی مهم است. با توجه به اینکه نیروی باد به یکی از منابع اصلی انرژی الکتریکی در آینده تبدیل خواهد شد، مدل سازی WECS یک موضوع تحقیقاتی اساساً مهم است. در حال حاضر، اپراتورهای سیستم، موسسات تحقیق و توسعه ( $R\&D^{۴۶}$ ) و توسعه دهندگان نرم‌افزار شبیه سازی سیستم قدرت، نیازهای مهم و فوری برای مدل سازی WECS دارند. به طور کلی، پدیده‌ها/رفتارهای دینامیکی مورد توجه در انواع مختلف مطالعات پایداری متفاوت است. بنابراین، مدل‌های مورد نیاز مربوطه نیز باید متفاوت باشند. قبل از انجام مدل‌سازی، لازم است بدانیم که یک مدل خاص را می‌توان برای کدام نوع مطالعات پایداری اعمال کرد. سپس الزامات و اهداف مدل را می‌توان به درستی جهت دهی کرد [۵۸]. با توجه به تعریف پایداری توسعه یافته و دسته بندی شده که توسط IEEE<sup>۴۷</sup> در سال ۲۰۲۰ منتشر شد [۵۹]، دسته بندی‌های پایداری سیستم‌های قدرت مدرن عمدتاً شامل پایداری زاویه، پایداری فرکانس، پایداری ولتاژ، پایداری رزونانس و پایداری راه اندازی مبدل<sup>۴۸</sup> است، همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است. یک ژنراتور سنکرون یک ممان اینرسی دارد و رفتار دینامیکی آن تا حد زیادی تحت تسلط فرآیندهای فیزیکی حرکت روتور است. بنابراین، پدیده‌های مرتبط با پایداری در سیستم‌های قدرت معمولی عمدتاً در مقیاس زمانی الکترومکانیکی (معمولاً ۰.۱-۲ هرتز) یا مقیاس‌های زمانی کندتر (مانند پدیده‌های ترمودینامیکی) هستند [۵۹]. در مقابل، رفتار دینامیکی تجهیزات تولید مبتنی بر الکترونیک قدرت در درجه اول توسط الگوریتم‌های

کنترل دیکته می‌شود. دینامیک کنترل نسبتاً سریع است و لحظه اینرسی واقعی ندارد. استفاده گسترده از تجهیزات الکترونیک قدرت از دو جنبه بر پایداری سیستم‌های قدرت متعارف تأثیر می‌گذارد [۵۸]:



طبقه بندی پایداری در ۲۰۰۴ توسط IEEE و CIGRE  
CIGRE: International Council on Large Electric Systems

طبقه بندی پایداری اخیراً اضافه شده توسط IEEE در سال ۲۰۲۰

شکل (۷): طبقه بندی پایداری سیستم‌های قدرت مدرن در شرایط نفوذ بالای ساختارهای الکترونیک قدرت؛ پایداری رزونانس و پایداری راه‌اندازی مبدل عمدتاً پدیده‌های دینامیکی (فوق‌العاده) در مقیاس کوتاه‌مدت را نشان می‌دهند مثل تعامل کنترل زیر سنکرون ( $^4SSCI$ ) و رزونانس زیر سنکرون ( $^5SSR$ ) [۶۰]. در اینجا، پایداری راه‌اندازی مبدل بیشتر به پایداری اغتشاش بزرگ و پایداری سیگنال کوچک طبقه بندی می‌شود.

**الف- ویژگی‌های انواع کلاسیک پایداری تغییر می‌کند [۵۹].** برای مثال، ویژگی‌های اینرسی ضعیف می‌شوند و پهنای باند پاسخ دینامیکی گسترده‌تر می‌شود. این تا حدی به این دلیل است که دینامیک توان مبدل‌های منبع ولتاژ تحت تأثیر دینامیک ولتاژ پیوند DC و یا حلقه‌های قفل فاز ( $^1PLLs$ ) قرار می‌گیرد، که هر دو دارای پهنای باند کنترلی تا ۱۰ هرتز یا حتی بالاتر هستند. ب- مسائل پایداری نوع جدید به وجود می‌آیند که در مجموع می‌توان به آن به عنوان پایداری راه‌اندازی مبدل [۵۹] اشاره کرد (که پایداری الکترومغناطیسی-مکانیکی  $^2$  [۶۱] یا پایداری سیستم کنترل  $^3$  [۶۲] نیز نامیده می‌شود). در این رابطه هم پایداری اغتشاش بزرگ و هم پایداری سیگنال کوچک گزارش شده است. ناپایداری راه‌اندازی مبدل می‌تواند منجر به خاموش شدن گروهی از تجهیزات تولید شود.

انواع مختلف پایداری که در بالا ذکر شد، کاربردهای متفاوت مدل‌های WECS را نشان می‌دهد. در گذشته، زمانی که استفاده از الکترونیک قدرت محدود بود، تأثیر آن بر دینامیک سیستم قدرت کم و قابل چشم‌پوشی بود. در مطالعات پایداری در سطح سیستم، مدل‌های WECS ساده شده، مانند مدل‌های ریشه میانگین مربع ( $RMS$ )  $^4$  و حتی مدل‌های بار منفی قابل قبول هستند. یک نظرسنجی CIGRE در سال ۲۰۱۷ گزارش داد که این دو مدل بیشتر توسط اپراتورهای سیستم استفاده می‌شوند [۶۳]. با این حال، در سال‌های اخیر، با رشد نفوذ الکترونیک قدرت، دیگر نمی‌توان تأثیر آنها را نادیده گرفت. بنابراین، پایداری راه‌اندازی مبدل برای ترکیب و بررسی اثر مبدل‌ها بر پایداری سیستم قدرت تعریف شد. برای مطالعات این نوع از پایداری، الزامات مدل ممکن است فراتر از دسترس مدل‌های RMS موجود باشد. برای این منظور، عوامل اضافی، مانند دینامیک سریع‌تر، باید در مدل‌سازی WECS در نظر گرفته شود.

مطالعات پایداری سیستم قدرت نه تنها به مطالعات تحلیلی مکانیزم‌های پایداری نیاز دارد بلکه محاسبات عددی (به عنوان مثال، شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل ارزش ویژه) نیز برای پیش‌بینی یا ارزیابی پایداری مورد نیاز است. این دو روش مطالعه دو نوع کاربرد از مدل‌های WECS را نشان می‌دهند. در مطالعات تحلیلی، ترجیحاً یک مدل ساده شده از WECS‌ها که بر دینامیک غالب تمرکز دارد [۵۸] استفاده می‌شود. در محاسبات عددی، یک مدل با دقت بالا از مزرعه بادی، برای اطمینان از صحت پیش‌بینی پایداری مورد انتظار است. برای کاهش ترتیب یک مدل مزرعه بادی، که شامل تعداد زیادی واحد WECS است، مدل‌سازی معادل انباشته ضروری است. ساده‌ترین مدل، معادل تک ماشینه است که توسط IEC 61400-27-1 [۶۴] توصیه شده است. با این حال، دقت و استحکام آن کمتر از معادل چند ماشینه است [۶۵ و ۶۶]. خاطرنشان می‌شود که مدل‌های WECS برای محاسبه جریان اتصال کوتاه، تنظیم حفاظت رله و غیره نیز مورد نیاز هستند [۶۷].



به طور کلی مسئله پایداری در WECS عمدتاً ناشی از هرگونه عدم قطعیتی است که در سمت توربین باد رخ می دهد و یا وجود یک خطا<sup>۵۵</sup> / اختلال<sup>۵۶</sup> در طرف شبکه. با افزایش ضریب نفوذ مزارع بادی متصل به شبکه، کنترل ویژگی های دینامیکی سیستم های قدرت، چالش برانگیزتر می شود [۶۸]. پدیده های مرتبط با SSR در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. نوسانات زیر فرکانس اصلی سیستم قدرت در مزرعه بادی متصل به شبکه در مجاورت خط انتقال جبران شده بصورت سری گزارش شده است [۶۹ و ۷۰]. برای رسیدگی به این موضوع، معمولاً یک تحلیل پایداری مبتنی بر امیدانس اتخاذ می شود که از نسبت های امیدانس های استخراج شده تحلیلی WECS و مدل های خطی سمت نقطه اتصال مشترک (PCC<sup>۵۷</sup>) شبکه، استفاده می کند. نمودارهای نایکوئیست<sup>۵۸</sup> از امیدانس های فوق الذکر بیشتر برای شناسایی فرکانس های پایین ایجاد کننده SSR بصورت بالقوه استفاده می کنند [۷۱].

### ۳-۲-۱- پایداری سیگنال کوچک

پایداری سیگنال کوچک به نحوه رفتار یک سیستم، زمانیکه تغییر جزئی در متغیرهای حالت آن رخ می دهد، اشاره دارد. این مسئله پایداری عموماً به دلیل کمبود گشتاور میرایی اتفاق می افتد که منجر به افزایش دامنه نوسانات روتور می شود. هر گونه تغییر در شرایط عملیاتی سیستم قدرت را می توان از طریق مقادیر ویژه ماتریس حالت سیستم تجزیه و تحلیل کرد [۷۲]. مطالعات پایداری سیگنال کوچک در مورد تغییرپذیری سیستم قدرت ناشی از WECS با استفاده از طرح های مختلف مانند تجزیه و تحلیل حداقل مربعات مبتنی بر تجزیه ارزش منفرد در ادبیات گزارش شده اند [۷۳]. چنین طرح هایی به درک اثرات تغییر بار در سمت شبکه و همچنین ناسازگاری سرعت باد بر روی پایداری زاویه ای سیگنال کوچک کمک می کند. یک طرح کنترل مستقیم درایو مبتنی بر DFIG در [۷۴] برای مطالعه پایداری سیگنال کوچک و پاسخ دینامیکی سیستم ارائه شده است. نتایج مقایسه برتری کنترل کننده پیشنهادی را تحت اختلالات سیستم در حالی که با یک سیستم باس بی نهایت منفرد و همچنین چهار ماشین مرتبط است، اثبات می کند. تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک WECS سرعت متغیر بزرگ در [۷۵] ارائه شده است. این روش از تجزیه و تحلیل انشعابات<sup>۵۹</sup> برای محاسبه مرزهای پایداری سیگنال کوچک، زمانی که سیستم در معرض تغییرات خط و بارگذاری قرار می گیرد، استفاده نموده است.

### ۳-۲-۲- پایداری گذرا و زاویه ای

پایداری گذرا توانایی شبکه برق برای حفظ سنکرونیزم در هنگام وقوع اختلالات بزرگ است. اختلالات شدید ممکن است شامل قطعی تجهیزات، کاهش اینرسی، تغییرات بار یا خطاهایی باشد که باعث انحراف زیاد زاویه روتور ژنراتور می شود. پاسخ سیستم تحت تأثیر رابطه غیرخطی توان-زاویه است. فاصله زمانی مورد توجه هنگام مشاهده پایداری گذرا معمولاً ۳ تا ۵ ثانیه پس از اختلال است. این دوره زمانی می تواند تا ۱۰ تا ۲۰ ثانیه در مورد سیستم بزرگ با نوسانات بین منطقه ای غالب، ادامه یابد [۷۶]. مطالعه ارائه شده در [۷۷] طرح کنترل بازخورد کارآمد را با استفاده از توان مکانیکی و همچنین توان کانال DC سیستم به عنوان هدف کنترلی برای افزایش پایداری گذرا مزرعه بادی متصل به هم اعمال می کند. در [۷۸] پس از ارائه یک مدل سازی دینامیکی دقیق از سیستم WECS در ناحیه کاری MPPT، با بهینه سازی ضرائب کنترل کننده های PI، پایداری گذرا و مشخصه های دینامیکی پاسخ سیستم در طی اختلال و پس از رفع اختلال را بهبود می بخشد. بهبود طرح دیگری در [۹۶]، از یک تکنیک بلادرنگ پیشرفته مربوط به انرژی جنبشی اصلاح شده برای محاسبه زمان پاکسازی بحرانی (CCT<sup>۶۰</sup>)، برای ارزیابی پایداری گذرا یک شبکه به هم پیوسته مجهز به WECS استفاده می کند. طرح های مربوط به کنترل تطبیقی برای تقویت پایداری گذرا در شبکه های مبتنی بر DFIG مؤثر هستند. این روش ها از شبکه های عصبی مبتنی بر برنامه ریزی پویا برای کنترل توان راکتیو استفاده می کنند و عملکرد حلقه بسته شبکه های برق متصل به باد را بهبود می بخشد [۷۹ و ۸۰]. طبق پژوهش یانگ و همکاران، افزایش نفوذ انرژی باد در شبکه، پایداری سیگنال کوچک را بهبود می بخشد [۸۱]. در کوتاه مدت، توان راکتیو توربین بادی ممکن است ناپایداری زاویه ای در سیستم قدرت ایجاد کند [۸۲]. گوتام و همکاران [۸۳] اثر افزایش مداوم تعداد WECS یکپارچه مبتنی بر DFIG را بر پایداری (گذرا و سیگنال کوچک) یک سیستم قدرت حجیم تحلیل کردند. نتایج حاکی از تغییر قابل توجهی در اینرسی کلی سیستم قدرت در رابطه با میزان تولید باد بود. هر چه سهم WECS در شبکه بیشتر باشد، اینرسی کمتر است. در [۸۴]، نویسندگان اثر WECS را بر رفتار گذرا سیستم قدرت بررسی کردند. نتایج، عملکرد برتر توربین های نوع DFIG را نسبت به توربین های مولد قفس سنجابی نشان داد. علاوه بر این، ادغام



بسیاری از WECS که به طور ضمنی جایگزین ژنراتورهای سنکرون می‌شوند، می‌تواند شبکه را بی‌ثبات کند. برای مقابله با ناپایداری زاویه ای شبکه های الکتریکی ادغام شده با مزارع بادی، جستجوگران باید این موضوع را عمیق تر بررسی کنند.

### ۳-۳- قابلیت اطمینان و تاب آوری شبکه

بلوک های سازنده قابلیت اطمینان شبکه را می‌توان در پشتیبانی فرکانس (با پایدار نگه داشتن آن در سیستم برق، با اطمینان از تعادل بین تولید و تقاضا و پاسخ سریع در موارد عدم تعادل با کاهش تولید یا تقاضا) و پشتیبانی ولتاژ (با حفظ آن در محدوده عملیاتی شبکه در مواقع کار معمول یا اضطراری برای جلوگیری از فروپاشی سیستم) خلاصه کرد [۸۵]. سیستم تولید متعارف، این خدمات را به عنوان بخشی اساسی از کار خود ارائه می‌دهد، اما ظهور منابع تجدیدپذیر مانند مزارع بادی به عنوان منبع برق، دینامیک شبکه را تغییر داده است [۸۶]. در ادامه خدمات قابلیت اطمینان که از نظر فرکانس و ولتاژ به شبکه قابلیت اطمینان می‌بخشد و همچنین موقعیت WECS در این سرویس‌ها، مشخص خواهد شد.

#### ۳-۳-۱- پشتیبانی ولتاژ

**الف- توان راکتیو و تنظیم ولتاژ:** منظور از پشتیبانی ولتاژ، توانایی سیستم در تامین توان راکتیو (پیشفاز یا پسفاز) با توجه به نیاز به حفظ ولتاژ شبکه در محدوده مجاز عملیاتی در موارد عملیات عادی یا اضطراری است. WECSها می‌توانند این سرویس را از طریق الکترونیک قدرت که بخشی از مدار کنترل هستند به شبکه ارائه دهند. این سرویس چه WECS در حال تولید توان باشد یا نه، در دسترس خواهد بود [۸۷].

ماشین‌هایی که برای تولید الکتریسیته از انرژی باد استفاده می‌شوند، عمدتاً ژنراتورهای القایی هستند که طبیعتاً توان راکتیو را مصرف می‌کنند (یعنی برای تحریک به منبع توان راکتیو نیاز دارند). بنابراین، آنها مزیت پشتیبانی از شبکه با توان راکتیو مانند ماشین‌های سنکرون را ندارند. اوپیلا و همکاران [۸۸] توانایی توربین های بادی را برای ارائه توان راکتیو به شبکه مورد مطالعه قرار دادند. به گفته نویسندگان، محدودیت های تعیین شده برای مقدار ولتاژ در نقطه PCC یکی از عواملی است که منجر به کاهش مقدار توان راکتیو موجود می‌شود. محسنی [۸۹] یک استراتژی کنترلی برای افزایش پشتیبانی توان راکتیو توربین های بادی متصل به شبکه AC از طریق مبدل های منبع ولتاژ طراحی کرد تا به کد شبکه دانمارکی پایبند باشد. این مطالعه پیشنهاد کرد که مبدل سمت شبکه توربین بادی، در هنگام خطای گذرا برای جلوگیری از افزایش مقادیر ولتاژ پیوند DC، بالاتر از حد مجاز، باید اجازه اضافه بارگذاری داشته باشد. در [۹۰ و ۹۱] تکنیک افزایش قابلیت متصل ماندن WECS هنگام وقوع خطا (FRT<sup>۱</sup>)، برای WECS مبتنی بر DFIG، برای پشتیبانی از توان اکتیو و راکتیو پیشنهاد شده است. طراحی مناسب سیستم های کنترل WECS برای استفاده بهینه از مزارع بادی با جایگزینی ژنراتورهای معمولی ضروری است. با این حال، توانایی مزارع بادی برای تولید یا جذب توان راکتیو به قدرت شبکه و طول خطوط انتقال بستگی دارد. نتایج مطالعه [۹۲] نشان می‌دهد که WECSها می‌توانند پشتیبانی از توان راکتیو را فراهم کنند. همچنین، هماهنگی بین منابع مختلف توان راکتیو مرتبط با WECS برای جلوگیری از مشکلات ناپایداری ضروری است. یک WECS می‌تواند با بهبود مشخصات ولتاژ از طریق فرآیند تولید و جذب توان راکتیو به انعطاف‌پذیری شبکه کمک کند [۹۳]. حفظ ولتاژ در محدوده عملیاتی همیشه به عنوان یکی از مسائل حیاتی در نظر گرفته می‌شود، به ویژه در هنگام معرفی فناوری جدید مرتبط با بار یا تولید برق. به عنوان مثال، نوسان خروجی توان باد باعث نوسانات ولتاژ و سوسو<sup>۲</sup> می‌شود که به تغییر سرعت باد و نوع مدل WECS بستگی دارد [۹۴]. ژنراتورهای سرعت ثابت، توان راکتیو را که به سرعت روتور متکی است، جذب می‌کنند [۹۵]. این پدیده مسئول ایجاد نوسانات ولتاژ در شبکه های برق است. با این حال، استقرار WECSهای با سرعت متغیر می‌تواند ۷۵ درصد از نوسانات ولتاژ تولید شده توسط توربین‌های سرعت ثابت را هموار کند [۹۶]. یکی از مشکلات اصلی این فناوری ناتوانی آن در برآوردن کدهای شبکه<sup>۳</sup> است، زیرا برای اتصال به شبکه به الکترونیک قدرت که به نوبه خود وظیفه کنترل توان راکتیو و ولتاژ ترمینال را بر عهده دارد، وابسته نیست [۹۷]. علاوه بر این، امپدانس اتصال کوتاه در نقطه اتصال بین WECS و شبکه، یکی دیگر از عوامل اساسی است که به نوسانات ولتاژ کمک می‌کند. برای یک امپدانس قابل توجه تر، نوسانات قابل توجهی در ولتاژ وجود خواهد داشت و بالعکس. یکی از ویژگی‌هایی که شبکه را ایمن می‌کند، داشتن جریان خطا بالا و ولتاژ انحراف کم و به عبارت دیگر امپدانس معادل کوچک است. راه‌حل‌های پیشنهادی در مورد ادغام WECS به شبکه‌های ضعیف شامل استقرار دستگاه‌های سیستم انتقال متناوب انعطاف‌پذیر





(FACTS<sup>۶۴</sup>) و اصلاح سیستم‌های کنترل نیروگاه است [۹۸]. به منظور مقابله با نوسانات ولتاژ، یک مطالعه نشان داد که نسبت انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌ها نباید از ۲۰ درصد تجاوز کند [۹۹]. مطالعات و تحلیل‌های شبیه‌سازی دیگری وجود دارد که نشان می‌دهد ضریب نفوذ می‌تواند بیشتر از ۲۰ درصد هم باشد؛ بعنوان مثال یک مطالعه انجام شده بر روی شبکه شورای هماهنگی برق غربی (WECC<sup>۶۵</sup>) در ایالات متحده نشان داد که نرخ نفوذ سالانه ۳۵ درصد از نظر فنی امکان‌پذیر است [۱۰۰].

ب- قابلیت متصل ماندن WECS به شبکه در حالت کاهش ولتاژ (LVRT) و خطا (FRT): توانایی مزارع بادی برای متصل ماندن به شبکه در طول خطاها یا افت ولتاژ برای یک دوره مشخص، قابلیت اتصال<sup>۶۶</sup> نامیده می‌شود. خطای رخ داده در یک منطقه خاص از شبکه ممکن است به خودی خود خطری نداشته باشد، اما از دست رفتن منابع تولید با وجود دستگاه‌های حفاظتی که در صورت ولتاژ پایین عمل می‌کنند، ممکن است منجر به فروپاشی کامل شود، بنابراین منابع تولید با تجهیز به یک سیستم جهت عبور از افت ولتاژ برای مدتی معین، طراحی می‌شوند؛ به طوری که دستگاه‌های حفاظتی بتوانند قطعات معیوب را جدا کرده و کنترل‌کننده‌ها شبکه را مجدداً متعادل کنند. WECS‌ها با کنترل‌کننده‌هایی طراحی شده‌اند که آنها را قادر می‌سازد تا در طول حوادث احتمالی مثل افت ولتاژ در شبکه بمانند [۱۰۱].

چندین تکنیک نوآورانه در نوشتجات از جمله طیف گسترده‌ای از استراتژی‌های کنترل، برای افزایش قابلیت اتصال سیستم در حالت ولتاژ پایین (LVRT) گزارش شده است. در میان بسیاری از استراتژی‌های کنترل، لیو و همکاران [۱۰۲] یک استراتژی کنترل یکپارچه بین یک مبدل باک بوست دو جهته و یک مبدل جانبی شبکه برای افزایش قابلیت اطمینان عملکرد یک WECS مبتنی بر PMSG پیشنهاد کرده‌اند. تکنیک اتخاذ شده در حالت عملیات عادی و تحت شرایط خطا کار می‌کند. پاسخ یک WECS به یک اتصال کوتاه به نوع مدل WECS بستگی دارد. به عنوان مثال، اگر خطا در ترمینال DFIG اعمال شود، جریان اتصال کوتاه می‌تواند به پنج تا شش پریونیت<sup>۶۷</sup> جریان نامی روتور برسد که می‌تواند به توربین آسیب برساند [۱۰۳ و ۱۰۴]. زو و همکاران [۱۰۵] راهبردی را برای افزایش قابلیت LVRT بر اساس کنترل شبیه‌سازی القایی برای هماهنگ کردن و محدود کردن ولتاژ روتور و جریان روتور پیشنهاد کرده‌اند. اندوکتانس معادل روتور با ولتاژ روتور نسبت مستقیم و با جریان روتور نسبت معکوس دارد، که نیاز به محدودیت‌هایی برای تنظیم مقادیر مجاز ولتاژ و جریان روتور دارد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که این استراتژی می‌تواند جریان پس از خطا را در محدوده قابل قبول کاهش داده و سرکوب کند. محمدی و همکاران [۱۰۶] یک مسیر خطای بهبود یافته برای یک توربین بادی مبتنی بر DFIG تحت خطاهای متقارن و نامتقارن پیشنهاد کرده‌اند. این استراتژی به کنترل مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه برای کاهش جریان اضافه روتور و استاتور و تزریق توان راکتیو به سمت شبکه برای پشتیبانی از بازیابی ولتاژ متکی است. همچنین نادری و همکاران [۱۰۷]، یک محدود کننده جریان خطا از نوع مقاومتی بصورت بهینه برای دستیابی به حداکثر قابلیت FRT با یک WECS سرعت ثابت ایجاد کرده‌اند. یک استراتژی کنترل برای LVRT در یک مزرعه بادی سرعت متغیر مبتنی بر PMSG در [۱۰۸] پیشنهاد شده است به گونه‌ای که یک مبدل قدرت سه سطحی با نقطه خنثی بسته شده (NPC)، پردازش و تبدیل توان را انجام می‌دهد. در [۱۰۹] یک محدود کننده جریان خطا از نوع پل غیر ابررسانا (BFCL<sup>۶۸</sup>) برای تقویت قابلیت FRT در WECS مبتنی بر DFIG توسعه داده شده، به طوری که نشان داده شده است که استراتژی کنترل نسبت به استراتژی مبتنی بر مقاومت ترمز دینامیک سری بهتر عمل می‌کند.

### ۳-۲-۳- پشتیبانی فرکانس

به طور کلی اتصال WECS به شبکه الکتریکی به کاهش اینرسی کلی سیستم کمک می‌کند و این اثر برای سیستم‌های ایزوله کوچکتر قابل توجه است [۱۱۰ و ۱۱۱]. استراتژی‌های کنترل در اکثر WECS‌ها، سیستم مکانیکی را از سیستم الکتریکی جدا می‌کند به طوری که در صورت بروز هرگونه اختلال، مشارکت WECS در اینرسی شبکه، کاهش می‌یابد. طبق گفته موررنتال [۱۱۲]، افزودن کنترل‌کننده کمکی به واحد کنترل مرکزی WECS می‌تواند نقطه تنظیم گشتاور را تغییر دهد تا با استفاده از جرم توربین بادی در طول یک اختلال، آن را با تغییرات فرکانس شبکه سازگار کند. با استفاده از همین مفهوم، نویسندگان در [۱۱۳] یک کنترل‌کننده برای کنترل توان خروجی یک PMSG، بر اساس فرکانس شبکه پیشنهاد کرده‌اند. در طول یک اختلال، توربین بادی می‌تواند از یک ژنراتور معمولی تقلید کند و با بهره‌برداری از انرژی جنبشی پنهان توربین بادی، از اینرسی پشتیبانی کند. روش کنترل فرکانس اولیه در [۱۱۴] به منظور مقابله با نوسانات فرکانس شبکه‌های الکتریکی اتخاذ شده است. شرکت زیمنس یک ژنراتور توربین بادی مبتنی بر



مبدل کامل با توانایی تنظیم فرکانس بالا یا پایین بر اساس وضعیت سیستم قدرت توسعه داده است [۱۱۵]. راه‌حل‌های دیگری مانند استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، استخراج انرژی جنبشی و کنترل بار را می‌توان برای حل مشکل تخریب فرکانس به دلیل نفوذ بالای WECS به شبکه اجرا کرد [۱۱۶]. به طور کلی در رابطه با تاثیر WECS بر فرکانس سیستم قدرت الکتریکی، موارد تفکیک شده زیر قابل توجه است:

**الف -** جبران افت فرکانس / پاسخ فرکانس سریع ( $FFR^q$ ): در مواقع اضطراری (از دست رفتن خط انتقال یا منبع تولید اولیه)، فرکانس سیستم با نرخی وابسته به اینرسی سیستم کاهش می‌یابد. دو راه برای جبران فرکانس کاهش یافته در این مرحله و کمک به رسیدن به فرکانس اصلی سیستم قبل از رسیدن به آستانه تحریک  $70$  رله‌های زیر فرکانس وجود دارد. اولین فرآیند به کمک گشتاور اینرسی بزرگی است که مشخصه ژنراتورهای بزرگ معمولی است. روش دوم تزریق مقدار زیادی از توان اکتیو در شبکه و ارائه انرژی جنبشی کافی در آنچه به عنوان پاسخ فرکانس سریع شناخته می‌شود، است. WECSها می‌توانند این خدمات را از طریق کنترل‌های اضافه شده ارائه دهند [۱۱۷].

**ب -** پاسخ فرکانس اولیه: مدیران شبکه این خدمت را با افزایش تولید برای جبران افت فرکانس یا کاهش در صورت تولید بیش از حد انجام می‌دهند و این یک پاسخ خودکار است که با خراب شدن فرکانس رخ می‌دهد. WECS نیز می‌توانند در حضور کنترل‌های مناسب در پاسخ فرکانسی اولیه شرکت کنند [۱۱۸].

**ج -** تنظیم فرکانس: این فرآیند توسط ژنراتورهایی انجام می‌شود که به سیگنال بازخورد پاسخ می‌دهند تا فرکانس را در مقدار بهره برداری نرمال تنظیم کنند. این سرویس در طول عملیات عادی یا دوره بهبودی پس از رخداد استفاده می‌شود. WECS به شرط وجود ظرفیت کافی در لحظه مورد نیاز (به شرط در دسترس بودن باد و توان تولیدی کمتر از حداکثر توان توربین) می‌توانند در این سرویس شرکت کنند [۱۱۹].

### ۳-۳-۳- انعطاف پذیری / تاب آوری

تغییرات، یک ویژگی کلی سیستم قدرت الکتریکی است، بنابراین منابع منعطف می‌توانند با این تغییرات، چه پیش بینی شده و چه به صورت تصادفی، مقابله کنند. انعطاف‌پذیری می‌تواند شامل افزایش سرعت در جهت‌های پایین و بالا، زمان راه اندازی سریع، زمان خاموش شدن سریع و حداقل سطح تولید پایدار باشد [۱۲۰]. طراحی این منابع و نوع سوخت مورد استفاده، از عناصر تأثیرگذار انعطاف‌پذیری است. WECS در صورتی که در حالت تولید و با واکنش سریع به دلیل استفاده از الکترونیک قدرت در کنترل باشند، می‌توانند در جهت نزولی به این خدمات کمک کنند. همچنین اگر در حالت محدود شده از قبل باشد، می‌تواند سرویس را در جهت صعودی ارائه دهد. البته علی‌رغم موارد فوق، ماهیت متناوب باد این سرویس را در صورت درخواست WECS بسیار پرهزینه می‌کند [۱۲۱]. تلاش‌هایی برای کاهش هزینه‌های استفاده از این سرویس از طریق WECS انجام شده است [۱۲۲ و ۱۲۳].

در پایان این بخش قابل ذکر است که نیروگاه آبی، بهترین تامین‌کننده قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری در سیستم قدرت است؛ توجه می‌کنیم که توربین بادی نیز می‌تواند خدمات بسیار خوبی در مورد LVRT و پشتیبانی از توان راکتیو انجام دهد و در کاهش فرکانس، تثبیت و تنظیم فرکانس بسیار خوب است. در مرحله بازیابی فرکانس و انعطاف‌پذیری عملکرد متوسطی خواهد داشت و این به دلیل هزینه است.

### ۳-۳-۴- انتقال، ارتباطات و امنیت WECS

به طور کلی مزارع بادی، دور از مراکز بارگذاری سنتی ساخته شده‌اند که بر زیرساخت‌های انتقال فشار ایجاد می‌کنند و نقطه دسترسی برق به شبکه را ضعیف‌تر می‌کنند [۱۲۴ و ۱۲۵]. استرس بر زیرساخت‌های انتقال یا ازدحام انتقال، دلیل شناخته شده‌ای برای کاهش تولید برق بادی در میان دلایل دیگر از جمله عرضه بیش از حد در دوره‌های کم باری، مکانیزم و سیاست بازار برق، تاب آوری و انعطاف‌پذیری شبکه و مسائل مربوط به اتصال است [۱۲۶ - ۱۲۹]. کاهش تولید WECS به دلیل ازدحام انتقال، اغلب منجر به بهره‌برداری از ژنراتورهای گران‌قیمت به جای تولید برق ارزان بادی می‌شود. ساخت یک کریدور انتقال از راه دور به زمان بیشتری نسبت به ساخت مزارع بادی نیاز دارد؛ بنابراین مانع از انتقال انرژی موجود به مراکز بار می‌شود. در پاسخ به نکات مزبور، آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر (NREL<sup>۱</sup>) یک فرآیند کاهش استرس ناشی از برق بادی را با گسترش مداوم زیرساخت‌های انتقال و







محدود کردن تولید برق بادی پیشنهاد کرد [۱۳۰]. با این حال، تحقیقات بیشتر در مورد تقویت زیرساخت‌های انتقال برای گنجاندن مفید انرژی بادی در ترکیب تولید انرژی، با اجتناب از محدود کردن ضروری است.

برای اطمینان از تامین برق بی وقفه و ایمن برای مشتریان، جنبه های ارتباطی و امنیتی برای شبکه های هوشمند بسیار حیاتی است. اطلاعات مزارع بادی که دور از مراکز بار قرار دارند باید از طریق پروتکل اینترنت برای نظارت و برنامه ریزی عالی در زمان واقعی، به مرکز کنترل منتقل شوند. با این حال، سیستم‌های نظارت و کنترل مزرعه بادی موجود در برابر حملات خارجی آسیب‌پذیر هستند و قطع برق استاکس‌نت و اوکراین به دلیل حملات مخرب، تصمیم‌گیرندگان سیستم قدرت را نگران امنیت داده‌های مزارع بادی کرده است [۱۳۱ و ۱۳۲]. ژانگ و همکاران [۱۳۳]، یک تکنیک ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت را با توجه به ازدست رفتن مزرعه بادی به دلیل حملات سایبری مختلف که نشان دهنده کاهش قابلیت اطمینان کلی سیستم است، توسعه داده اند. همچنین لای و همکاران [۱۳۴]، یک استراتژی دفاع امنیتی فعال را با ترکیب لیست سفید و ارزیابی وضعیت امنیتی پیشنهاد کرده اند که به از بین بردن نگرانی های امنیتی شبکه داده، کمک می کند و یکپارچگی دفاع امنیت سایبری را برای مزارع بادی افزایش می دهد. با این حال، نویسندگان معتقدند که کارشناسان سیستم انرژی و امنیت سایبری باید چندین ابتکار تحقیقاتی را در این زمینه از طریق تحقیقات مشترک انجام دهند.

### ۳-۴- چالشهای حفاظت

یکی از رایج ترین انواع خرابی سیستم برق، اتصال کوتاه است. بنابراین، دستگاه‌های حفاظتی برای ارائه محافظ طراحی شده‌اند که برای جلوگیری از دست دادن تجهیزات یا آسیب، چه از طرف تأمین‌کنندگان یا مصرف‌کنندگان در صورت اتصال کوتاه الکتریکی کار می‌کند. در توسعه آینده شبکه های برق، برنامه ریزان با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش اتصال کوتاه، تنظیمات این دستگاه ها را دوباره ارزیابی می کنند. ارزیابی سهم توربین‌های بادی در جریان کوتاه شبکه انتقال برای آگاهی از تأثیر این نیروگاه‌ها و تنش‌هایی که می‌توانند به عناصر شبکه وارد کنند، از اهمیت بالایی برخوردار است. تأثیر توربین‌های بادی و سهم آنها در جریان کوتاه به نوع توربین‌های بادی بستگی دارد. جدول (۴) سهم WECSها در جریان اتصال کوتاه، در مقایسه با منابع انرژی پراکنده (DERs)<sup>۷۲</sup> سنتی را نشان می‌دهد.

جدول (۴): سهم انواع مختلف DER در جریان خطا [۱۳۵]

نوع واحد DER	کمک به جریان خطا که در ترمینال ژنراتور ایجاد شده است
WECS مبتنی بر اینورتر سایز کامل	۱-۲ برابر جریان نامی اینورتر، مدت زمان بسته به روش کنترل از نیم سیکل تا چندین سیکل خواهد بود.
ژنراتور سنکرون با منبع تحریک مجزا	۵ تا ۱۰ برابر جریان نامی ژنراتور برای سیکل های فوق گذرا و گذرا، ۲ تا ۴ برابر جریان نامی ژنراتور در حالت ماندگار
ژنراتور القایی یا ژنراتور تحریک سرخود	۵ تا ۱۰ برابر جریان نامی ژنراتور برای چند سیکل اول، پس از ۵ تا ۱۰ سیکل ناچیز است.

سهم جریان خطا توسط WECS می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد سیستم حفاظتی در فیدرهای شبکه تأثیر بگذارد. این سهم که می‌تواند هماهنگی حفاظتی را دچار مشکل کند یا در برخی شرایط بهبود بخشد، اساساً به سه ویژگی بستگی دارد [۱۳۶]:

الف- تکنولوژی: مدل WECS می‌تواند بر میزان جریان خطا تأثیر بگذارد؛ WECS نوع ۱ و ۲ دارای ویژگی‌های یکسانی هستند که تفاوت جزئی نوع ۲ با مقاومت اضافی روتور نشان داده می‌شود و بنابراین سهم این دو نوع در جریان اتصال کوتاه تقریباً یکسان است. جریان اتصال کوتاه در نوع ۱، ۲ و ۳ بیشترین مقدار را دارد و در خطای ۳ فاز رخ می‌دهد و مقدار آن از ۳ تا ۶ برابر جریان نامی متغیر است. در مورد نوع ۴، جریان اتصال کوتاه مقداری برابر با ۱۱۰ درصد یا بیشتر از جریان نامی پیدا کرده و دلیل آن این است که مدار آن توسط یک مبدل از شبکه جدا شده است [۱۳۷ - ۱۳۹].

ب- مکان: در شبکه های شعاعی، مکان نصب WECS با توجه به رله‌های اصلی و پشتیبان سه نوع مشارکت خطا ایجاد می‌کند. در صورت نصب WECS در پایین دست حفاظت اصلی و پشتیبان، به دلیل عدم قرارگیری این منبع در مسیر رله‌های حفاظتی و محل وقوع خطا، با وجود آنکه از این منبع نیز برای محل خطا جریان تامین می‌شود، اما جریان عبوری از رله های حفاظتی تغییر نمی‌کند. نصب WECS در بین حفاظت اضافه جریان اصلی و پشتیبان، باعث کاهش جریان بالادست یا همان جریان عبوری از حفاظت پشتیبان و افزایش جریان نقطه اتصال WECS تا محل وقوع خطا یا همان جریان عبوری از حفاظت اصلی می‌شود. نصب WECS در بالادست



حفاظت اصلی و پشتیبان باعث افزایش جریان خطای عبوری از هر دو حفاظت می‌شود؛ اگرچه WECS به طور مساوی جریان حفاظت اصلی و پشتیبان را افزایش می‌دهد اما هماهنگی ممکن است در برخی شرایط از دست برود [۱۴۰]. اگر شبکه الکتریکی حلقوی باشد، علاوه بر متأثر بودن مقدار جریان خطا ناشی از حضور WECS، جهت جریان خطای عبوری از رله نیز ممکن است تغییر داشته باشد و این امر باعث عدم عملکرد یا ناهماهنگی دستگاه‌های حفاظتی خواهد بود و استفاده از روش‌های مختلف بازیابی حفاظتی از جمله استفاده از رله‌های جهتی و یا لزوم استفاده از روش‌های هوشمند یا آنلاین مبتنی بر بسترهای ارتباطی را تقویت می‌کند [۱۴۱].

ج- ضریب نفوذ: اصلی‌ترین عامل در نقض فاصله زمانی هماهنگی ( ${}^{CTI}$ ) رله‌های اصلی و پشتیبان که باعث می‌شود هماهنگی کاملاً از دست برود، سطح نفوذ WECS در اتصال به شبکه است. نرخ جریان کوتاه در PCC به تعداد و نوع توربین‌های بادی موازی متصل به شبکه بستگی دارد. شبکه‌های انتقال با چالش‌های حفاظتی متفاوتی به دلیل نفوذ توده‌ای نیروی باد از جمله مشکل زیر/بیش از حد تنظیماتی رله‌ها به دلیل تغییر امپدانس خطا مواجه هستند [۱۴۲].

در پاسخ، طرح‌های حفاظتی زیادی از جمله طرح مبتنی بر برنامه منطبق تطبیقی [۱۴۳]، طرح تنظیم رله دیستانس تطبیقی [۱۴۴] و رله دیفرانسیل هوشمند مبتنی بر داده کاوی [۱۴۵] پیشنهاد شده است. سطح جریان خطا، بعلاوه انتخاب و هماهنگی وسایل حفاظتی، چالش‌های اصلی ریزش‌بکه‌های همراه با باد است [۱۴۶]. در میان بسیاری از راه‌حل‌ها، طرح حفاظت اضافه جریان تطبیقی [۱۴۷]، ارتباط متمرکز با یک طرح پشتیبان محلی [۱۴۸]، طرح حفاظتی مبتنی بر تخمین فاصله خطا [۱۴۹]، طرح مبتنی بر سیستم استنتاج فازی [۱۵۰]، فرکانس نوسان و طرح مبتنی بر توان گذرا [۱۵۱]، رویکرد تخمین پارامتر [۱۵۲] و طرح مبتنی بر زمان-جریان معکوس و زمان-ولتاژ معکوس [۱۵۳]، طرح‌های حفاظتی پرکاربرد هستند. علاوه بر این، انتخاب نوع ژنراتور برای WECS، به عنوان مثال، ژنراتور سنکرون، ژنراتور القایی، یا ژنراتور با رابط مبدل نیز نقشی حیاتی در طراحی طرح حفاظتی شبکه‌های برق دارد [۱۵۴]. ژنراتورهای سنکرون دارای ویژگی‌های پایداری طولانی مدت با جریان بالا هستند، درحالی‌که جریان خطای ژنراتورهای القایی به تدریج کاهش می‌یابد. برعکس، جریان اتصال کوتاه ژنراتورهای رابط مبدل به دو یا سه برابر مقدار جریان نامی ژنراتورها محدود می‌شود. طرح‌های حفاظتی سنتی (یعنی رله‌های اضافه جریان) که در شبکه‌های توزیع استفاده می‌شوند، زمانی که تعداد زیادی DER در شبکه‌ها ادغام می‌شوند، از شبکه‌ها محافظت نمی‌کنند [۱۴۰]. علاوه بر چالش‌های ذکر شده، چالش‌های حفاظتی دیگری از جمله حفاظت کور، قطع کاذب، از دست دادن هماهنگی، مشکلات جزیره‌ای و مشکلات بازیابی خودکار برای شبکه‌های توزیع با DER در [۱۳۵] گزارش شده است. با وجود آنکه نویسندگان طرح‌های حفاظتی جدیدی را برای شبکه‌های توزیع برای رویارویی با چالش‌های ذکر شده پیشنهاد کرده‌اند؛ هنوز نیاز به توسعه طرح‌های حفاظتی جامع برای شبکه‌های سیستم قدرت با توجه به هر جنبه حفاظتی و همچنین تعیین نسبت‌های قابل اندازه‌گیری برای سطح نفوذ WECS در شبکه وجود دارد که در آن اپراتورهای سیستم نیاز به بررسی سیستم حفاظتی دارند.

### ۳-۵- مسئله کیفیت توان

WECS مانند سایر ژنراتورهای معمولی، باید برق با کیفیت توان قابل قبولی ارائه دهند. اختلالات PQ در WECS به طور منظم نظارت می‌شود تا بررسی شود که آیا خروجی با مقررات شبکه مجاز مطابقت دارد یا خیر. شایان ذکر است که مسائل مربوط به PQ شامل هارمونیک<sup>۴</sup>، سوسو زدن، کاهش/افزایش ولتاژ<sup>۵</sup>، گذرا و همچنین نوسانات ولتاژ و فرکانس می‌باشد. جدول (۵) برخی از مسائل PQ در شبکه را نشان می‌دهد [۱۵۵].

جدول (۵): مسائل PQ در سیستم‌های قدرت

شاخص PQ	عوامل	نتیجه	میزان تاثیر
هارمونیک	بارهای غیرخطی، کابلها، ترانسفورماتور	اتلاف توان، گرم شدن بیش از حد بار	میان
سوسو زدن	تغییر ولتاژ تغذیه	آسیب یا خرابی تجهیزات	میان
کاهش ولتاژ	کلیدزنی ناگهانی، جریان هجومی، سیم کشی ضعیف	مشکل اضافه بار، سیگنال گرفته شده	میان
افزایش ولتاژ	روشن و خاموش بار سنگین، خطا در طرف تغذیه	آسیب تجهیزات، از دست رفتن اطلاعات، اضافه گرما	خفیف
گذرا	مدارهای اسنابر روشنایی	از دست رفتن راندمان، اختلال در تجهیزات	شدید
ناپایداری فرکانس	بارگذاری زیاد	خرابی موتورها و بارهای حساس	خفیف

### ۳-۵-۱- هارمونیک

ادغام WECS در شبکه، هارمونیک‌ها را در سطوح مختلف شبکه تزریق می‌کند. برای تجزیه و تحلیل هارمونیک‌ها و ایجاد راه‌حلهایی برای کاهش آنها، باید عناصری را که در انتشار آنها نقش دارند، بشناسیم. عناصری که منبع هارمونیک در WECS هستند عبارتند از کابل‌های مورد استفاده در گذرگاه اتصال به شبکه، ترانسفورماتور، فیلترها، خازن‌ها، دستگاه‌های تصحیح ضریب توان و مبدل‌های الکترونیک قدرت [۱۵۶ و ۱۵۷]. مدل‌های تحلیل هارمونیک برای WECS نوع ۱، نوع ۲، نوع ۳ و نوع ۴ در [۱۵۸-۱۶۰] مورد بحث قرار گرفته است. چندین روش مورد استفاده برای تعیین هارمونیک‌ها در [۱۶۱] مورد بحث قرار گرفته است؛ از جمله روش پخش توان هارمونیکی، روش جریان اعوجاج و بدون اعوجاج، روش جمع آثار، روش تخمین حالت هارمونیک و روش فازور جریان و ولتاژ IEC. هارمونیک‌های تولید شده توسط یک WECS منفرد تا حدودی کوچک هستند، در حالی که این نرخ برای یک مزرعه بادی در PCC افزایش می‌یابد. رایج‌ترین هارمونیک‌های تزریق شده از WECS عبارتند از مرتبه ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۷ [۱۶۲]. چندین مطالعه در رابطه با مسئله تزریق هارمونیک ناشی از ادغام WECS به شبکه را انجام شده است. به عنوان مثال، طبق [۱۶۳]، ادغام یک WECS مبتنی بر PMSG به یک شبکه ولتاژ متوسط، هارمونیک‌هایی در محدوده فرکانس ۲ کیلوهرتز تا ۱۵۰ کیلوهرتز تولید می‌کند که می‌تواند به طور موثر منجر به اختلال در عملکرد ارتباطی خط برق شود. ریس و همکاران [۱۶۴] یک استراتژی کنترلی برای ادغام عملکرد فیلترها در WECS با مبدل سایز کامل ایجاد کرده‌اند تا هارمونیک‌های جریان تولید شده توسط هر WECS را کاهش دهند. استراتژی توسعه‌یافته، هارمونیک‌های جریان را با تنظیم زاویه و دامنه ولتاژ اینورتر کاهش می‌دهند، بنابراین هارمونیک‌های متفاوت از ولتاژ اینورتر باس بار حذف شده است. طبق بحث این مقاله، استراتژی پیشنهادی، هارمونیک‌ها را بدون نیاز به اصلاح سخت افزار حذف می‌کند. وارگاس و رامیرز [۱۶۵] یک مدل دامنه هارمونیک توسعه یافته را برای مطالعه فرکانس هارمونیک‌های حالت‌های گذرای مکانیکی و الکتریکی متغیرهای WECS پیشنهاد کرده‌اند. علاوه بر این، استقرار سیستم‌های مناسب ذخیره انرژی و فیلتر می‌تواند به کاهش هارمونیک‌های تزریق شده به دلیل ادغام WECS کمک کند [۱۶۶ و ۱۶۷]. به طور خلاصه، توسعه مبدل‌های قدرت به بررسی بیشتر برای سرکوب هارمونیک‌های تولید شده در یکپارچه سازی مزارع بادی برای ایجاد منابع قابل اعتماد نیاز دارد.

### ۳-۵-۲- سوسو زدن

سوسو زدن را می‌توان به عنوان تغییر سریع در ولتاژ تامین شده تعریف کرد که ممکن است برای مدت معینی ادامه داشته باشد به طوری که تغییرات نور الکتریکی را بتوان به صورت بصری تشخیص داد [۱۶۸]. مقدار نوسان ولتاژ  $k$  را می‌توان با تخمین زد:

$$k = 100 \times \frac{dV}{V_{Rated}} = 100 \times \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{Rated}} \quad (1)$$

که در آن  $V_{Rated}$  ولتاژ نامی است؛ در حالی که  $V_{min}$  و  $V_{max}$  بیانگر مقدار پیک ولتاژ از مقدار موثر نیم سیکل می‌باشند. استاندارد IEC-61400-21 کدهایی را برای تعریف الزامات PQ مربوط به WECS ایجاد می‌کند [۱۶۹]. بخشی از استاندارد مذکور از قرائت دامنه زمانی جریان و ولتاژ در پایانه‌های WECS برای اندازه‌گیری سوسو زدن‌های ناشی از عمل سوئیچینگ استفاده می‌کند. یک WECS به دلیل رابطه معکوس انتشار سوسو و ظرفیت اتصال کوتاه، سوسوهای بیشتری در شبکه‌های ضعیف تولید می‌کند [۱۷۰]. عامل مهم دیگری که بر سطح سوسو زدن تأثیر می‌گذارد، زاویه امپدانس شبکه است. کاهش انتشار سوسو را می‌توان با حفظ اختلاف زاویه ۹۰ درجه بین زاویه امپدانس شبکه و ضریب توان توربین به دست آورد. از آنجایی که WECS سرعت متغیر توانایی مدیریت توان راکتیو را دارند، سوسو زدن را می‌توان با تنظیم این توان راکتیو کاهش داد [۱۷۱].

### ۳-۵-۳- کاهش و افزایش ولتاژ

مطابق با استاندارد اروپایی EN-50161 و استاندارد IEEE-1159، کاهش موقت ولتاژ موثر در بازه‌ی ۰/۹ و ۰/۱ پریونیت از مقدار نامی، در طول نیم سیکل تا چند ثانیه به عنوان کاهش ولتاژ نامیده می‌شود، در حالی که افزایش ولتاژ یا ولتاژ بیش از حد، به معنی افزایش ولتاژ موثر در بازه‌ی ۱/۱ تا ۱/۸ پریونیت از مقدار نامی، از نیم سیکل تا یک دقیقه است [۱۷۲]. کاهش ولتاژ به دلیل نفوذ WECS ممکن است منجر به قطع اتصال شود، اگر ولتاژ به کمتر از حد معینی کاهش یابد. این کاهش ولتاژ همچنین می‌تواند منجر به عبور جریان بالا از طریق سوئیچ IGBT<sup>۶</sup> اینورتری شود که یک PMSG را به شبکه متصل می‌کند [۱۷۳]. حذف سریع افتادگی و

افزایش ولتاژ در چنین مواردی بسیار مهم است. از این رو، محدودیت‌های ولتاژ و مدت زمان مجاز در قوانین و مقررات شبکه کشورهای مختلف در جدول (۶) نشان داده شده است [۱۷۴].

جدول (۶): الزامات کاهش و افزایش ولتاژ و زمان آن

کشور	افزایش ولتاژ		کاهش (افتادگی) ولتاژ	
	میزان افزایش به درصد	زمان برحسب ثانیه	میزان افت به درصد	زمان بر حسب ثانیه
آلمان	۱۲۰	۰/۱	۰	۰/۱۵
دانمارک	۱۲۰	۰/۱	۲۰	۰/۵
انگلیس	-	-	۱۵	۰/۱۴
اسپانیا	۱۳۰	۰/۲۵	۰	۱/۵
ایتالیا	۱۲۵	۰/۱	۰	۰/۲
چین	-	-	۲۰	۰/۶۲۵
آمریکا	۱۴۰	۱	۱۵	۱

#### ۴- راهکارهای متداول برای کاهش تاثیر چالش‌های فنی اتصال WECS به شبکه

برای حل چالش‌های فنی ذکر شده در ارتباط با ادغام WECS در شبکه، مدل‌سازی دقیق، شبیه‌سازی و تکنیک‌های ارزیابی برای بررسی سیستم‌های قدرت و توسعه استراتژی‌های سازگاری مورد نیاز است. راه‌های سختی برای حل مشکلات با اندازه‌گیری بیش از حد همه چیز وجود دارد و نتیجه آن یک سیستم برق پرهزینه و ناکارآمد است. راه دیگر از طریق مسیرهای نرم برای حل مشکلات با کنترل بیشتر و بهره‌برداری بهینه و یک سیستم قدرت ارزان تر و کارآمدتر است [۱۷۵]. محققان مسیرهای نرمی را برای ادغام قابل اعتماد WECS در شبکه دنبال می‌کنند که آنها را از طریق دستاوردهای تاب‌آوری، پایداری و انعطاف پذیری بهتر قابل مشاهده و کنترل می‌کند. بسیاری از تکنیک‌ها در راه‌حلهای پیشنهادی در بخش‌های قبلی مورد بحث قرار گرفته‌اند. این بخش بر روی چند تکنیک انتخاب شده اما بسیار حیاتی برای اتصال موثر WECS به شبکه متمرکز است.

##### ۴-۱- کدهای شبکه

مشخصات فنی شبکه برق برای عملکرد ایمن، مطمئن، قابل اعتماد و اقتصادی معمولاً به عنوان کد شبکه شناخته می‌شود. هر کد شبکه ای توسط مقامات مسئول نظارت بر یکپارچگی و عملکرد سیستم قدرت طراحی شده است؛ محتوای آن می‌تواند از کشوری به کشور دیگر بر اساس نیاز مشارکت کنندگان در شبکه، به ویژه شرکت‌های انتقال، متفاوت باشد. این امر، شرایط ادغام هر مولد برق از جمله تولید مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر (DER) را دیکته می‌کند. همه تولیدکنندگان انرژی بادی باید به کدهای شبکه موجود که شامل الزامات تغییرات فرکانس و ولتاژ شبکه، اتصال در شرایط وقوع خطا (FRT)، توان راکتیو و ضریب توان است، پایبند باشند. نمونه‌هایی از کدهای شبکه برای WECSها در برخی کشورها در جدول (۷) آورده شده است [۱۷۶]. کدهای شبکه در اکثریت قریب به اتفاق کشورها توجه زیادی به قابلیت FRT برای WECS دارند. به عنوان مثال، کمیسیون تنظیم مقررات انرژی فدرال (FERC) تصریح کرده است که مزارع بادی باید توانایی اتصال به مدت ۶۲۵ میلی ثانیه یا ۱۰ سیکل در طول یک خطای سه فاز در سمت فشارقوی ترانسفورماتور پست را داشته باشند [۱۷۷]. با این حال، تغییر به سمت انرژی پایدار مستلزم به روز رسانی قابل توجهی از کدهای شبکه فعلی از طریق تجزیه و تحلیل پایداری شبکه‌های برق است.

##### ۴-۲- راهبرد نظارت و کنترل

همانطور که در بخش دوم توضیح داده شد، سطوح مختلف کنترلی در WECS با اهداف رعایت الزامات اتصال به شبکه و اطمینان از عملکرد توربین در محدوده‌های مجاز به دلیل نوسانات سرعت باد و همچنین به دست آوردن حداکثر توان ممکن از باد است [۱۷۸]. همچنین، دستگاه‌های کنترل، مشارکت توربین‌های بادی را برای پشتیبانی از شبکه در صورت خرابی که منجر به کاهش ولتاژ یا فرکانس می‌شود، امکان پذیر می‌کند. جدول (۸) روش‌های متداول کنترل در سطح ویژه و پیشرفته (جهت برآورده کردن الزامات شبکه) و تکنیک‌های مورد استفاده در WECS را نشان می‌دهد.



جدول (۷): الزامات کد شبکه در برخی کشورها [۱۷۶]

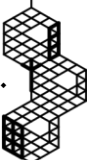
کشور	شاخص های کد شبکه	محدودیت فرکانس (Hz)	محدودیت ضریب توان	رنج مجاز نرخ توان اکتیو	رنج توان راکتیو بر حسب پریونیت
استرالیا		۴۹/۵ - ۵۰/۵	۰/۹۳ C - ۰/۹۳ L	۵ درصد (۱ دقیقه)	۰/۴۸۴
کانادا		۵۷/۵ - ۶۱/۷	۰/۹ C - ۰/۹۵ L	-	(-۰/۳۳) - (۰/۳۳)
دانمارک		۴۸/۵ - ۵۱	۰/۹۵ C - ۰/۹۵ L	۲۰ تا ۱۰۰ درصد (۵ دقیقه)	(-۰/۳۳) - (۰/۳۳)
آلمان		۴۹ - ۵۰/۵	۰/۹۵ C - ۰/۹۲۵ L	۱۰ درصد (۱ دقیقه)	-
ایرلند		۴۹/۵ - ۵۰/۵	۰/۹۵ C - ۰/۹۵ L	۱ تا ۳۰ مگاوات (۱ دقیقه)	(-۰/۳۳) - (۰/۳۳)
انگلیس		۴۷/۵ - ۵۰/۲	۰/۹۵ C - ۰/۹۵ L	-	-
اسپانیا		۴۹/۲ - ۵۰/۸	۰/۹۱ C - ۰/۹۱ L	۱۰ درصد (۱ دقیقه)	(-۰/۴) - (۰/۵)
برزیل		۵۸/۵ - ۶۱/۵	۰/۹۵ C - ۰/۹۵ L	۱۰ درصد (۱ دقیقه)	-

جدول (۸): استراتژیهای اصلی کنترل و نظارت در WECS [۳۲]

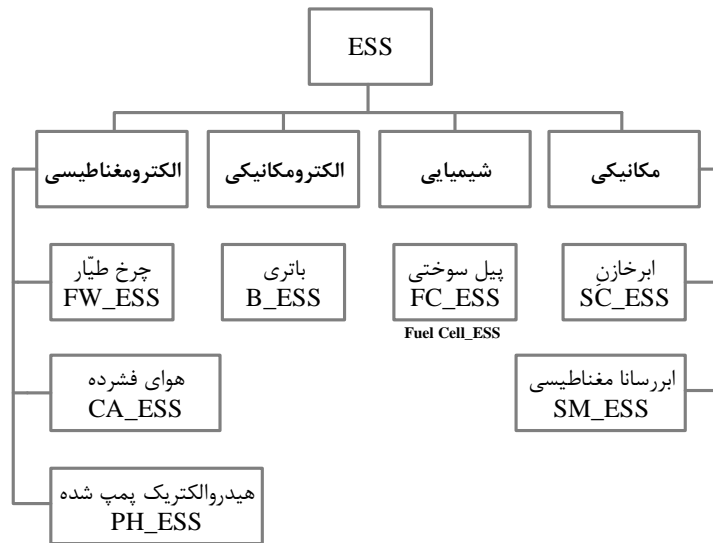
انواع	سطح کنترلی	تکنیک
کنترل گشتاور (MPPT)	ویژه	کنترل بهینه گشتاور نسبت سرعت نوک پره (TSR) <sup>۷۸</sup> جستجوی صعود به تپه کنترل مُد لغزشی فیدبک سیگنال توان
کنترل زاویه پره	ویژه	کنترل همزمان پره ها کنترل تک به تک پره ها
کنترل در رابطه با الزامات ادغام WECS در شبکه	پیشرفته	تنظیمات فرکانس کنترل توان راکتیو

#### ۴-۳- سیستم های ذخیره انرژی (ESS)

EES نقش مهمی در کنترل خروجی مزارع بادی و ارائه خدمات جانبی به سیستم قدرت دارد و افزایش نفوذ توان باد به شبکه، هموارسازی توان WECSها، کاهش تغییرات ولتاژ و فرکانس در PCC، افزایش پایداری سیستم در شرایط اغتشاش، میرایی نوسانات، افزایش قابلیت LVRT و قابلیت های FRT در WECSها را ممکن می سازد. علاوه بر این، ESS یکی از فناوری های حیاتی برای افزایش تاب آوری، انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان شبکه است. این فناوری همچنین می تواند به ادغام DER به طور موثر در شبکه و کاهش تقاضای اوج بار و قیمت برق در بازار رقابتی برق کمک کند [۱۷۶]. دستگاه های ذخیره انرژی موجود برای کاربردهای WECS را می توان همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، طبقه بندی کرد. بسیاری از EESهای مستقر در مقیاس بزرگ بر اساس هیدروالکترونیک پمپ شده (PH<sub>ESS</sub><sup>۷۹</sup>) و هوای فشرده (CA<sub>ESS</sub><sup>۸۰</sup>) هستند. حجم کل این دو فناوری معادل تنها ۳ درصد از کل ظرفیت تولید جهانی است [۱۷۹]. اخیراً باتری (B<sub>ESS</sub><sup>۸۱</sup>) به دلیل کاهش هزینه ها و راندمان تبدیل بالاتر، مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۱۸۰]. B<sub>ESS</sub> چالش های کنترل توان را در شبکه برق ایجاد می کند، زیرا پاسخ دینامیکی آن به دلیل چگالی توان کم، کند است. در مقابل ابرخازن (SC<sub>ESS</sub><sup>۸۲</sup>)، ابررسانای مغناطیسی (SM<sub>ESS</sub><sup>۸۳</sup>) و چرخ طیار (FW<sub>ESS</sub><sup>۸۴</sup>) می توانند تقاضای توان بالایی را تامین کنند که البته طول عمر آنها را کاهش می دهد [۱۸۱]. هر فناوری در ESS مزایا و معایب خود را دارد. تفاوت های اساسی بین ESSها در جدول (۹) ارائه شده است [۱۷۶]. همانطور که مشاهده می شود، هیچ یک از فناوری های ذخیره سازی موجود به دلیل محدودیت های فیزیکی، قادر به تامین انرژی و چگالی توان به طور همزمان نیستند. بنابراین، لازم است عملکرد گذرا و حالت پایدار سیستم ذخیره سازی در مدیریت انرژی با استفاده ترکیبی از ESSهای موجود که برای کاربردهای انرژی و توان بالا مناسب است، غنی شود [۳۲]. با توجه به ماهیت غیرقابل پیش بینی باد، متعهد شدن به تولید انرژی بادی توسط شرکتهای مربوطه دشوار است و به عنوان راه حلی مؤثر برای تثبیت ظرفیت، سیستم های ذخیره انرژی می توانند گزینه ای برای کاهش تصادفی بودن خطای انرژی باد



باشند. پیش‌بینی‌ها در کنار سیستم‌های ذخیره انرژی می‌توانند خروجی توربین را اصلاح کنند و نرخ مگاوات در دقیقه را کنترل کنند و منبع باد را تا حدودی در برنامه‌ریزی، قابل اعتماد می‌کنند.



شکل (۸): دسته بندی ESS

جدول (۹): مقایسه ESSها

فناوری	چگالی توان (وات بر کیلوگرم یا کیلووات بر مترمکعب)	چگالی توان (وات ساعت بر کیلوگرم یا کیلووات ساعت بر مترمکعب)	دمای کار	زمان دشارژ	زمان شارژ	زمان پاسخ	طول عمر (سال بر سیکل)	بلوغ	شاخص
باتری معمولی	۱۰۰۰۰ - ۲۴۰ / ۷۵	۲۵۰ - ۳۰ / ۷۵ - ۶۲۰	۲۵۰ - ۴۰	ثانیه - ۳ ساعت	دقیقه - ۱۶ ساعت	میلی ثانیه - ثانیه	۲۰ - ۳ ۱۰۸۳ * (۱-۴)	بالغ	
ابرخازن	۱۰۸۴ * (۴-۱۲) / ۱۰ - ۰/۱	۲۰ - ۱۰ / ۱۵ - ۰/۱	۸۵ - ۴۰	میلی ثانیه - ۱ ساعت	ثانیه - دقیقه	میلی ثانیه	> ۲۰ ۱۰۸۵ * ۵	میان	
چرخ طیار	۱۰۸۲ * (۴ - ۱۶ / ۵۰)	۸۰ - ۲۰ / ۱۳۰ - ۵	۴۰ - ۲۰	۱۵ ثانیه - ۱۵ دقیقه	کمتر از ۱۵ دقیقه	میلی ثانیه - ثانیه	> ۲۰ ۱۰۸۷	بالغ	
هوا فشرده	NA / ۰/۲ - ۰/۶	۳۰ - ۶۰ / ۱۲	محیط	ساعت - روز	دقیقه - ساعت	۱ - ۱۵ دقیقه	۲۰ - ۴۰ بدون محدودیت / اولیه	مراحل	
هیدروالکتتریک پمپ شده	NA / ۰/۱ - ۰/۲	۲ - ۰/۲ - ۱/۵ / ۰/۵	محیط	ساعت - روز	دقیقه - ساعت	ثانیه - دقیقه	۵۰ - ۱۰۰ / > ۵۰۰	بالغ	

اندازه بهینه سیستم ذخیره انرژی، چالشی است که محققان و اپراتورهای سیستم با آن مواجه هستند که نیاز به درک دقیق خطاهای پیش‌بینی انرژی باد دارد. ارزیابی اندازه بهینه ذخیره سازی، این راه حل را در مقایسه با همتایان، اقتصادی می‌کند. معمولاً توزیع خطاهای پیش‌بینی، یک توزیع نرمال فرض می‌شود، اما این مورد، توزیع مناسبی را در همه موارد نشان نمی‌دهد [۱۸۲ و ۱۸۳]. معمولاً سیگنال خطا در پیش‌بینی به عنوان سیگنال نویز اضافه شده به ظرفیت تولیدی، به کمک یکی از سه روش مدل مارکوف، مدل خط زمانی (مثلاً مدل ARMA) و مدل توزیع احتمال مشترک مدل‌سازی می‌شود [۱۸۴]. در [۱۸۵] از مدل رگرسیون ساده برای درک رفتار تصادفی خطاهای پیش‌بینی‌های روزانه استفاده شده است. این تحقیق دریافته است که ضریب همبستگی (بین دو ساعت متوالی) همیشه بین ۸۰-۹۰ درصد است و با کمک شبیه‌سازی مونت کارلو و مقدار همبستگی، ظرفیت مورد نیاز برای ذخیره سازی در این مقاله محاسبه شده است. نتایج همچنین نشان داده است که در صورت نادیده گرفتن همبستگی، برآورد ظرفیت مورد نیاز ناکافی است. شی و همکاران [۱۸۶] یک سیستم ذخیره انرژی ترکیبی (باتری و ابرخازن) را برای بدست آوردن اندازه بهینه ذخیره سازی و بهبود برنامه ریزی انرژی غیرقابل پیش‌بینی باد در کوتاه مدت پیشنهاد کرده‌اند. نتایج نشان داد که نوسانات در شرکت تولید و هزینه سیستم ذخیره سازی کاهش یافته است. گان و همکاران [۱۸۷] ظرفیت بهینه برای ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر بادی و خورشیدی<sup>۸۵</sup> و سیستم‌های ذخیره سازی را برای غلبه بر نوسانات برای اهداف برنامه ریزی، خلاصه کرده‌اند. مدل‌ها، روش‌ها و



برنامه‌های مورد استفاده برای بهینه‌سازی با توجه به حالت‌های ذخیره انرژی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. حضور سیستم‌های ذخیره انرژی در کنار WECS، نقش حیاتی در هموارسازی توان خروجی این سیستم دارد. پاسخ بسیار سریعتر همچنین می‌تواند اتکا به ژنراتورهای سنتی گران قیمت را کاهش دهد. علاوه بر این، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی قادر به ارائه تنظیم فرکانس، بهبود پروفیل ولتاژ، تصحیح کیفیت توان و پاسخ سریع به تقاضاهایی از جمله اصلاح پیک بار، جابجایی بار و مدیریت انرژی هستند [۱۸۸].

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، سعی شده است تحقیقات انجام شده در زمینه جنبه های فنی ادغام انرژی بادی با شبکه و نکات قابل استفاده خلاصه و برجسته شود. این بررسی در ابتدا بر مدل WECS های متصل به شبکه، لزوم استفاده از ساختار الکترونیک قدرت و راهبردهای کنترلی متمرکز می‌شود. نشان داده شده است که عملکرد قابلیت اطمینان، راندمان تبدیل، انعطاف پذیری شبکه و هزینه سیستم را می‌توان با بهبود توپولوژی‌های مبدل قدرت و استراتژی‌های کنترل بهبود بخشید. به طور کلی الکترونیک قدرت نقش اساسی در ادغام DER با شبکه و در تحقق انتقال انرژی برای یک جامعه پایدار و سبز دارد؛ این امر با کنترل پیشرفته و فناوری های اطلاعاتی پشتیبانی می‌شود. در ادامه، این مقاله چالش‌های فنی ادغام انرژی بادی در شبکه‌های برق را مورد بررسی و بحث قرار داده و روش‌های مربوط به راه‌حلهای موجود را روشن می‌کند. در میان چالش‌ها، تناوبی بودن انرژی بادی، پایداری، تهدیدات قابلیت اطمینان و تاب آوری شبکه، حفاظت و مسائل کیفیت توان ارائه شده است. همچنین راه حل های غلبه بر چالشها برای کاهش تاثیرات منفی ادغام WECS بر شبکه از جمله کدهای شبکه، راهبردهای نظارت و کنترل و سیستم‌های ذخیره انرژی بررسی شده است. امروزه، بسیاری از چالش‌های مورد بحث توسط سازندگان توربین‌های بادی برای کاهش مشکلات شبکه و حتی کمک به حل سایر مسائل مرتبط برطرف شده است. علاوه بر این، انتظار می‌رود بسیاری از روش‌های مربوطه در راه‌حلهای ابتکاری دیگر، در یک دوره بسیار کوتاه به دلیل پیشرفت فن آوری و تحقیقات گسترده‌ی در حال ظهور، ظاهر شوند. با این حال، هنوز نگرانی‌هایی در مورد ادغام انرژی بادی در شبکه‌های برق وجود دارد؛ از جمله مسائل مربوط به تناوبی بودن انرژی بادی، انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان. همچنین توسعه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ، افزایش طول عمر آن‌ها، استقامت آن‌ها در شرایط آب و هوایی سخت و کاهش هزینه‌های آن‌ها یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های شرکت‌ها و سازندگان ذخیره‌سازی انرژی محسوب می‌شود. بنابراین، محققین باید به این حوزه توجه بیشتری داشته باشند و راه حل‌هایی در مورد ظرفیت ذخیره سازی و چگونگی طولانی کردن دوره ذخیره سازی بیابند. علاوه بر این، به عنوان توسعه آینده این کار، تمرکز و بررسی چالش‌های مشابه و تاثیر آنها بر شبکه‌های توزیع بسیار مفید خواهد بود. همچنین پرداختن به راهکارهای تفصیلی ارائه شده برای رفع این چالش‌ها می‌تواند به عنوان توسعه این کار در نظر گرفته شود.

## مراجع

- [1] "Global Wind Energy Council," Latest news: Global Wind report 2021, Mar. 2021, Available at <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>.
- [2] R. adib, "Renewables 2021 Global Status Report: Renewable Energy Policy Network for The 21<sup>st</sup> Century," *National Technical University of Athens (NTUA)*, 2021, Available at [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf).
- [3] S. W. Ali, M. Sadiq, Y. Terriche, S. A. R. Naqvi, L. Q. N. Hoang, M. U. Mutarraf, M. A. Hassan, G. Yang, C.-L. Su, and J. M. Guerrero, "Offshore wind farm-grid integration: A review on infrastructure, challenges, and grid solutions," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102811–102827, July 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3098705.
- [4] P. Lakshmanan, R. Sun and J. Liang, "Electrical collection systems for offshore wind farms: A review," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 1078-1092, Sept. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.05050.
- [5] Z. Alnasir, and M. Kazerani, "A small-scale standalone wind energy conversion system featuring SCIG, CSI and a novel storage integration scheme," *Renewable Energy*, Vol. 89, pp. 360-370, Apr. 2016, doi:10.1016/j.renene.2015.12.041.



- [6] M. Tavoosi, "Dynamic modeling, stability analysis and control of wind turbines equipped with DFIG," Master's Thesis, Tehran, Islamic Azad University, Science and Research Branch, 2013.
- [7] M. Tazil, V. Kumar, R.C. Bansal, S. Kong, Z.Y. Dong, W. Freitas, and H.D. Mathur, "Three-phase doubly fed induction generators: an overview," *IET Electric Power Applications*, vol. 4, pp. 75-89, Nov. 2010, doi: 10.1049/iet-epa.2009.0071.
- [8] R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz and G. Asher, "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2776-2798, July 2013, doi: 10.1109/TIE.2013.2243372.
- [9] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. W. Bindner, P. E. Sørensen, and B. BakJensen, "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines," Denmark, *Forskningscenter Risoe*, Risoe-R No. 1205 (EN), Dec. 2001.
- [10] H. Polinder, F. F. A. van der Pijl, G. . -J. de Vilder and P. J. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 725-733, Sept. 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.875476.
- [11] A. Ragheb and M. Ragheb, "Wind turbine gearbox technologies," 2010 1st International Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC), 2010, pp. 1-8, doi: 10.1109/INREC.2010.5462549.
- [12] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang and X. Wang, "Distributed Power-Generation Systems and Protection," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, July 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2696878.
- [13] K. Ma, L. Tutelea, I. Boldea, D. M. Ionel, and F. Blaabjerg, "Power electronic drives, controls, and electric generators for large wind turbines—an overview," *Electric Power Components and Systems(T&F)*, vol. 43, no. 12, pp. 1406–1421, Jul. 2015, doi:10.1080/15325008.2015.1037470.
- [14] Tennet TSO GmbH, Requirements for offshore grid connections in the grid of TenneT TSO GmbH, Dec. 2012.
- [15] F. Blaabjerg, K. Ma and D. Zhou, "Power electronics and reliability in renewable energy systems," 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012, pp. 19-30, doi: 10.1109/ISIE.2012.6237053.
- [16] H. Wang, M. Liserre and F. Blaabjerg, "Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 17-26, June 2013, doi: 10.1109/MIE.2013.2252958.
- [17] Y. Liu, W. Du, L. Xiao, H. Wang, S. Bu and J. Cao, "Sizing a Hybrid Energy Storage System for Maintaining Power Balance of an Isolated System With High Penetration of Wind Generation," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3267-3275, July 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2482983.
- [18] Z. Tang, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 39-52, Jan. 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.02850.
- [19] B. Novakovic and A. Nasiri, "Modular Multilevel Converter for Wind Energy Storage Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 11, pp. 8867-8876, Nov. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2677314.
- [20] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas and J. Rodriguez, "Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081-1095, April 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2103910.
- [21] K. Ma and F. Blaabjerg, "Multilevel converters for 10 MW Wind Turbines," *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011, pp. 1-10.
- [22] Y. Liu, L. Jiang, Q. H. Wu and X. Zhou, "Frequency Control of DFIG-Based Wind Power Penetrated Power Systems Using Switching Angle Controller and AGC," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1553-1567, March 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2587938.
- [23] S. A. Khajehoddin, M. Karimi-Ghartemani and M. Ebrahimi, "Optimal and Systematic Design of Current Controller for Grid-Connected Inverters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 2, pp. 812-824, June 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2737987.
- [24] K. Ma and F. Blaabjerg, "Thermal optimised modulation methods of three-level neutral-point-clamped inverter for 10 MW wind turbines under low-voltage ride through," *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 6, pp. 920–927, Jul. 2012, doi: 10.1049/iet-pel.2011.0446.







- [25] Z. Qin, M. Liserre, F. Blaabjerg and Poh Chiang Loh, "Reliability-oriented energy storage sizing in wind power systems," *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, 2014, pp. 857-862, doi: 10.1109/IPEC.2014.6869688.
- [26] M. Mahzarnia, M. P. Moghaddam, P. T. Baboli and P. Siano, "A Review of the Measures to Enhance Power Systems Resilience," in *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 4059-4070, Sept. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.2965993.
- [27] Y. Peng et al., "Coordinated Control Strategy of PMSG and Cascaded H-Bridge STATCOM in Dispersed Wind Farm for Suppressing Unbalanced Grid Voltage," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 349-359, Jan. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2995457.
- [28] S. Ma, S. Li, Z. Wang and F. Qiu, "Resilience-Oriented Design of Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 2880-2891, July 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2894103.
- [29] "International Electrotechnical Commission. Technical Committee 88 Wind Turbines: Electrical Simulation Models Wind Turbines," *International Standard. International Electrotechnical Commission*, [Online], 2015, Available at <https://books.google.com.sa/books?id=t5HBtAEACAAJ>.
- [30] A. Ellis, Y. Kazachkov, E. Muljadi, P. Pourbeik and J. J. Sanchez-Gasca, "Description and technical specifications for generic WTG models — A status report," *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2011, pp. 1-8, doi: 10.1109/PSCE.2011.5772473.
- [31] K. Clark, N. W. Miller, and J. J. Sanchez-Gasca, "Modeling of ge wind turbine-generators for grid studies," *GE Energy*, vol. 4, pp. 0885-8950, Apr. 2010.
- [32] S. D. Ahmed, F. S. M. Al-Ismail, M. Shafiullah, F. A. Al-Sulaiman and I. M. El-Amin, "Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 10857-10878, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964896.
- [33] M. Kiani and W. Lee, "Effects of Voltage Unbalance and System Harmonics on the Performance of Doubly Fed Induction Wind Generators," *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1-7, doi: 10.1109/08IAS.2008.143.
- [34] J. LÓpez, E. Gubía, P. Sanchis, X. Roboam and L. Marroyo, "Wind Turbines Based on Doubly Fed Induction Generator Under Asymmetrical Voltage Dips," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 321-330, March 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914317.
- [35] X. Zhao, Z. Yan, Y. Xue, and X.-P. Zhang, "Wind power smoothing by controlling the inertial energy of turbines with optimized energy yield," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23374-23382, 2017, doi: 10.1109/access.2017.2757929.
- [36] I. Colak, G. Fulli, S. Bayhan, S. Chondrogiannis, and S. Demirbas, "Critical aspects of wind energy systems in smart grid applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 155-171, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.062.
- [37] M. T. Al-Nory, "Optimal decision guidance for the electricity supply chain integration with renewable energy: Aligning smart cities research with sustainable development goals," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 74996-75006, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2919408.
- [38] J. Lerner, M. Grundmeyer, and M. Garvert, "The importance of wind forecasting," *Renew. Energy Focus*, vol. 10, no. 2, pp. 64-66, Mar. 2009, doi: 10.1016/s1755-0084(09)70092-4.
- [39] G. Giebel and G. Kariniotakis, "Wind power forecasting a review of the state of the art," in *Renewable Energy Forecasting. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier*, pp. 59-109, 2017, doi: 10.1016/b978-0-08-100504-0.00003-2.
- [40] A. Lahouar and J. Ben Hadj Slama, "Hour-ahead wind power forecast based on random forests," *Renew. Energy*, vol. 109, pp. 529-541, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.064.
- [41] C. Monteiro, R. Bessa, V. Miranda, A. Botterud, J. Wang, G. Conzelmann, and I. Porto, "Wind power forecasting: State-of-the-art 2009," *Argonne Nat. Lab., Argonne, IL, USA, Tech. Rep. ANL/DIS-10-1*, Nov. 2009, doi: 10.2172/968212.
- [42] Y. Wang, Q. Hu, D. Meng, and P. Zhu, "Deterministic and probabilistic wind power forecasting using a variational Bayesian-based adaptive robust multi-kernel regression model," *Appl. Energy*, vol. 208, pp. 1097-1112, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.043.
- [43] H. Liu, E. Erdem, and J. Shi, "Comprehensive evaluation of ARMA-GARCH(-M) approaches for modeling the mean and volatility of wind speed," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 3, pp. 724-732, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.028.



- [44] C. D. Zuluaga, M. A. `lvarez, and E. Giraldo, "Short-term wind speed prediction based on robust Kalman filtering: An experimental comparison," *Appl. Energy*, vol. 156, pp. 321–330, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.043.
- [45] Y. Wang, H. Ma, D. Wang, G. Wang, J. Wu, J. Bian, and J. Liu, "A new method for wind speed forecasting based on copula theory," *Environ. Res.*, vol. 160, pp. 365–371, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.envres.2017.09.034.
- [46] C. Archer, H. Sim<sup>o</sup>, W. Kempton, W. Powell, and M. Dvorak, "The challenge of integrating offshore wind power in the U.S. Electric grid. Part I: Wind forecast error," *Renew. Energy*, vol. 103, pp. 346–360, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.11.047.
- [47] Y. Huang, Q. Xu, X. Jiang, T. Zhang, and Y. Yang, "Modelling correlated forecast error for wind power in probabilistic load flow," *Elektronika Elektrotehnika*, vol. 23, no. 5, pp. 61–66, Oct. 2017, doi: 10.5755/j01.eie.23.5.19244.
- [48] J. Naik, P. Satapathy, and P. Dash, "Short-term wind speed and wind power prediction using hybrid empirical mode decomposition and kernel ridge regression," *Appl. Soft Comput.*, vol. 70, pp. 1167–1188, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2017.12.010.
- [49] A. P. MarugEn, F. P. G. MÆrquez, J. M. P. Perez, and D. Ruiz-HernÆndez, "A survey of artificial neural network in wind energy systems," *Appl. Energy*, vol. 228, pp. 1822–1836, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.084.
- [50] A. Zendeheboudi, M. Baseer, and R. Saidur, "Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: A review," *J. Cleaner Prod.*, vol. 199, pp. 272–285, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.164.
- [51] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, "Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties," in *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 4, pp. 2541–2551, Oct. 2011, doi: 10.1109/tpwr.2011.2165972.
- [52] L. Cheng, J. Lin, Y.-Z. Sun, C. Singh, W.-Z. Gao, and X.-M. Qin, "A model for assessing the power variation of a wind farm considering the outages of wind turbines," in *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 432–444, Jul. 2012, doi: 10.1109/tste.2012.2189251.
- [53] P. Siano and G. Mokryani, "Evaluating the benefits of optimal allocation of wind turbines for distribution network operators," in *IEEE Syst. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 629–638, Jun. 2015, doi: 10.1109/jsyst.2013.2279733.
- [54] L. Xie, Y. Gu, X. Zhu, and M. G. Genton, "Short-term spatio-temporal wind power forecast in robust look-ahead power system dispatch," in *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 511–520, Jan. 2014, doi: 10.1109/tsg.2013.2282300.
- [55] M. S. Islam, M. Mohandes, and S. Rehman, "Erratum to: Vertical extrapolation of wind speed using artificial neural network hybrid system," *Neural Comput. Appl.*, vol. 28, no. 8, p. 2369, Aug. 2017, doi: 10.1007/s00521-016-2435-0.
- [56] S. Zolfaghari, G. H. Riahy, and M. Abedi, "A new method to adequate assessment of wind farms' power output," *Energy Convers. Manage.*, vol. 103, pp. 585–604, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.001.
- [57] A. R. Jordehi, "How to deal with uncertainties in electric power systems? A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, pp. 145–155, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.056.
- [58] X. He, H. Geng, and Gang Mu, "Modeling of wind turbine generators for power system stability studies: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, pp. 1-17, June 2021, doi:10.1016/j.rser.2021.110865.
- [59] N. Hatziairyriou et al., "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 3271-3281, July 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774.
- [60] J. Shaira, X. Xie, L. Wang, W. Liu, J. He, and H. Liu, "Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 99, pp. 159-168, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.047.
- [61] S. Peyghami, P. Palensky and F. Blaabjerg, "An Overview on the Reliability of Modern Power Electronic Based Power Systems," in *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 1, pp. 34-50, 2020, doi: 10.1109/OJPEL.2020.2973926.





- [62] M. Farrokhbabadi et al., "Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 13-29, Jan. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2925703.
- [63] G. Lammert, K. Yamashita, LDP. Ospina, H. Renner, SM. Villanueva, P. Pourbeik et al., "International industry practice on modelling and dynamic performance of inverter based generation in power system studies," *Cigre Science & Engineering 2017*, vol. 8, pp. 25-37, 2017.
- [64] IEC 61400-27-1, "electrical simulation models — generic models (edition 2.0)," *IEC*; 2020, Available at <https://webstore.iec.ch/publication/32564>.
- [65] X. He, and H. Geng, "An overview on wind farm modelling for power system stability studies," In: *8th renewable power generation conference (RPG 2019)*, pp. 1-8, 2019.
- [66] J. Zou, C. Peng, Y. Yan, H. Zheng, and Y. Li, "A survey of dynamic equivalent modeling for wind farm," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 4, pp. 956-963, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.157.
- [67] F. D. Kanellos and J. Kabouris, "Wind Farms Modeling for Short-Circuit Level Calculations in Large Power Systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1687-1695, July 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2022676.
- [68] M. K. Deshmukh and C. B. Moorthy, "Review on stability analysis of grid connected wind power," *Int. J. Elect. Electron. Eng. Res. Develop.*, vol. 3, 2014.
- [69] C. Buchhagen, C. Rauscher, A. Menze and J. Jung, "BorWin1 - First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids," *International ETG Congress 2015; Die Energiewende - Blueprints for the new energy age*, 2015, pp. 1-7.
- [70] Wind Energy Systems Sub-Synchronous Oscillations: Events and Modeling. Accessed: Nov. 19, 2020. [Online]. Available at [https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PES\\_TP\\_TR80\\_AMPS\\_WSSO\\_070920.html](https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PES_TP_TR80_AMPS_WSSO_070920.html).
- [71] M. Beza and M. Bongiorno, "On the Risk for Subsynchronous Control Interaction in Type 4 Based Wind Farms," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1410-1418, July 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2889181.
- [72] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994. Accessed: Mar. 28, 2021. [Online]. Available at <https://www.mheducation.co.in/html/9780070635159.html>.
- [73] W. Du, J. Bi, T. Wang and H. Wang, "Impact of grid connection of large-scale wind farms on power system small-signal angular stability," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 83-89, June 2015, doi: 10.17775/CSEEJPES.2015.00023.
- [74] F. Wu, X.-P. Zhang, and P. Ju, "Small signal stability analysis and control of the wind turbine with the direct-drive permanent magnet generator integrated to the grid," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 12, pp. 1661-1667, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2009.07.003.
- [75] X. Li, Zhiyuan Zeng, Jianzhong Zhou and Yongchuan Zhang, "Small signal stability analysis of large scale variable speed wind turbines integration," 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, pp. 2526-2530.
- [76] P. Kundur et al., "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [77] Q. Hui, J. Yang, X. Yang, Z. Chen, Y. Li and Y. Teng, "A robust control strategy to improve transient stability for AC-DC interconnected power system with wind farms," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 259-265, June 2019, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.00250.
- [78] M. Zamanifar, B.Fani, M.E.H.Golshana, and H.R.Karshenas, "Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II," *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 50-58, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2013.10.021.
- [79] W. Guo, F. Liu, J. Si, D. He, R. Harley, and S. Mei, "Approximate dynamic programming based supplementary reactive power control for DFIG wind farm to enhance power system stability," *Neurocomputing*, vol. 170, pp. 417-427, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.neucom.2015.03.089.
- [80] R. Yousefian, R. Bhattarai and S. Kamalasan, "Transient Stability Enhancement of Power Grid With Integrated Wide Area Control of Wind Farms and Synchronous Generators," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4818-4831, Nov. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2676138.
- [81] P. Yang, J. Zhang, X. Dong, and J. Zhang, "Impact of grid connection of large-scale wind power cluster on small signal stability of power system," in *Proc. 3rd Int. Conf. Mech., Control Comput. Eng. (ICMCCE)*, Sep. 2018, doi: 10.1109/icmce.2018.00081.



- [82] V. Vittal and R. Ayyanar, *Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy*. New York, NY, USA: Springer, 2013.
- [83] D. Gautam, V. Vittal, and T. Harbour, "Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1426–1434, Aug. 2009, doi: 10.1109/tpwrs.2009.2021234.
- [84] D. Naimi and T. Bouktir, "Impact of wind power on the angular stability of a power system," *Leonardo Electron. J. Practices Technol.*, vol. 7, no. 12, pp. 83–94, 2008.
- [85] NERC. Essential-Reliability-Services-Task-Force-(ERSTF). Accessed: Oct. 9, 2019. [Online]. Available at [https://www.nerc.com/comm/Other/Pages/Essential-Reliability-Services-Task-Force-\(ERSTF\).aspx](https://www.nerc.com/comm/Other/Pages/Essential-Reliability-Services-Task-Force-(ERSTF).aspx).
- [86] NERC. (2014). A Concept Paper on Essential Reliability Services that Characterizes Bulk Power System Reliability. [Online]. Available at <https://www.nerc.com/comm/Other/essntlrbltysrvckfrDL/ERSTFConceptPaper.pdf>.
- [87] Reliability Guideline—BPS-Connected Inverter-Based Resource Performance, NERC, Atlanta, GA, USA, 2018, p. 45.
- [88] D. F. Opila, A. M. Zeynu, and I. A. Hiskens, "Wind farm reactive support and voltage control," in *Proc. IEEE IREP Symp. Bulk Power Syst. Dyn. Control - VIII (IREP)*, Aug. 2010, doi: 10.1109/irep.2010.5563248.
- [89] M. Mohseni, "Enhanced reactive power support capability of fully rated converter-based wind generators," in *Proc. 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON)*, Nov. 2011, doi: 10.1109/iecon.2011.6119700.
- [90] D. Xie, Z. Xu, L. Yang, J. Ostergaard, Y. Xue, and K. P. Wong, "A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3302–3310, Aug. 2013, doi: 10.1109/tpwrs.2013.2240707.
- [91] S. Liu, Q. Yang, K. Jia, and T. Bi, "Coordinated fault-ride-through strategy for doubly-fed induction generators with enhanced reactive and active power support," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 2, pp. 203–211, Feb. 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0003.
- [92] A. Basit, F. Ali, M. Ishaq, S. Rashid, and S. Saher, "Overhead line length impact on reactive power support from wind power plant," in *Proc. IEEE 19th Int. Multi-Topic Conf. (INMIC)*, Dec. 2016, doi: 10.1109/inmic.2016.7840146.
- [93] J. Li, F. Liu, Z. Li, C. Shao, and X. Liu, "Grid-side flexibility of power systems in integrating large-scale renewable generations: A critical review on concepts, formulations and solution approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, pp. 272–284, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.109.
- [94] X. M. Liu, X. S. Niu, S. J. Jia, and J. Zhang, "Influence of wind power integration on power grid and its strategy," *Appl. Mech. Mater.*, vols. 347–350, pp. 1398–1403, Aug. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.347-350.1398.
- [95] D. Devaraj and R. Jeevajothi, "Impact of fixed and variable speed wind turbine systems on power system voltage stability enhancement," in *Proc. IET Conf. Renew. Power Gener. (RPG)*, 2011, doi: 10.1049/2Fcp.2011.0199.
- [96] M. Albadi and E. El-Saadany, "Overview of wind power intermittency impacts on power systems," *Electric Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 6, pp. 627–632, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.035.
- [97] O. Apata and D. T. O. Oyedokun, "Novel Reactive Power Compensation Technique for Fixed Speed Wind Turbine Generators," in *Proc. IEEE PES IAS Power Africa*, Jun. 2018, doi: 10.1109/powerafrica.2018.8521131
- [98] J. Liu, W. Yao, J. Wen, J. Fang, L. Jiang, H. He, and S. Cheng, "Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of gridconnected DFIG wind farm," in *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 545–557, Jan. 2020, doi: 10.1109/tste.2019.2897596.
- [99] B. Kroposki, "Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 5, no. 6, pp. 831–837, Nov. 2017, doi: 10.1007/s40565-017-0339-3.
- [100] Y. Zhou, D. D. Nguyen, P. C. Kjaer, and S. Saylor, "Connecting wind power plant with weak grid - Challenges and solutions," in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting*, Jul. 2013, doi: 10.1109/pesmg.2013.6672755.
- [101] DEIF. LVRT—Low Voltage Ride Through: Wind Power. Accessed: Oct. 9, 2019. [Online]. Available at <https://www.deif.com/wind-power/technology/lvrt—low>.





- [102] G. Liu, C. Zhang, S. Wang, and F. Shi, "An integrated control strategy of PMSG-based wind turbine generation system to improve its fault ride-through capability by using an energy storage device," in *Proc. Int. Conf. Renew. Power Gener. (RPG)*, 2015, doi: 10.1049/cp.2015.0309.
- [103] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. Overbye, *Power System Analysis & Design*, SI Version. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2012.
- [104] A. El-Sattar, N. Saad, and M. S. El-Dein, "Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 7, pp. 1240–1246, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2007.10.005.
- [105] D. Zhu, X. Zou, L. Deng, Q. Huang, S. Zhou, and Y. Kang, "Inductance-emulating control for DFIG-based wind turbine to ride-through grid faults," in *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 11, pp. 8514–8525, Nov. 2017, doi: 10.1109/tpel.2016.2645791.
- [106] J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, and S. Farhangi, "Improved fault ride through strategy for doubly fed induction generator based wind turbines under both symmetrical and asymmetrical grid faults," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 8, pp. 1114–1122, Sep. 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0586.
- [107] S. B. Naderi, M. Negnevitsky, A. Jalilian, M. T. Hagh, and K. M. Muttaqi, "Optimum resistive type fault current limiter: An efficient solution to achieve maximum fault ride-through capability of fixed-speed wind turbines during symmetrical and asymmetrical grid faults," in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 1, pp. 538–548, Jan. 2017, doi: 10.1109/tia.2016.2611665.
- [108] M. Y. Worku, M. A. Abido, and R. Iravani, "PMSG based wind system for real-time maximum power generation and low voltage ride through," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 1, Jan. 2017, Art. no. 013304, doi: 10.1063/1.4976141.
- [109] M. Alam, M. Abido, A. Hussein, and I. El-Amin, "Fault ride through capability augmentation of a DFIG-based wind integrated VSC-HVDC system with non-superconducting fault current limiter," *Sustainability*, vol. 11, no. 5, p. 1232, Feb. 2019, doi: 10.3390/su11051232.
- [110] G. Lalor, A. Mullane, and M. O'Malley, "Frequency control and wind turbine technologies," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1905–1913, Nov. 2005, doi: 10.1109/tpwrs.2005.857393.
- [111] S. Sang, C. Zhang, X. Cai, M. Molinas, J. Zhang, and F. Rao, "Control of a type-IV wind turbine with the capability of robust grid-synchronization and inertial response for weak grid stable operation," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 58553–58569, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2914334.
- [112] J. Morren, S. De Haan, W. Kling, and J. Ferreira, "Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 433–434, Feb. 2006, doi: 10.1109/tpwrs.2005.861956.
- [113] J. F. Conroy and R. Watson, "Frequency response capability of full converter wind turbine generators in comparison to conventional generation," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 649–656, May 2008, doi: 10.1109/tpwrs.2008.920197.
- [114] D. Ochoa and S. Martinez, "Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 4002–4011, Sep. 2017, doi: 10.1109/tpwrs.2016.2636374.
- [115] Siemens. Wind Turbine Technical Features—Turbine Technology. Accessed: Mar. 5, 2017. [Online]. Available at <https://www.siemens.com/global/en/home/markets/wind/turbines/technology/features.html>.
- [116] A. Attya, J. Dominguez-Garcia, and O. Anaya-Lara, "A review on frequency support provision by wind power plants: Current and future challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 2071–2087, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.016.
- [117] Fast Frequency Response in the NEM, Austral. Energy Market Operator, Melbourne, VIC, Australia, 2017.
- [118] E. Muljadi, V. Gevorgian, M. Singh, and S. Santoso, "Understanding inertial and frequency response of wind power plants," in *Proc. IEEE Power Electron. Mach. Wind Appl.*, Jul. 2012, doi: 10.1109/pemwa.2012.6316361.
- [119] J. H. Eto, J. Undrill, P. Mackin, and J. Ellis, "Frequency control requirements for reliable interconnection frequency response," Lawrence Berkeley Nat. Lab., Interconnection Freq. Response, Berkeley, CA, USA, 2018, pp. 1–116. [Online]. Available at <https://certs.lbl.gov/project/interconnection-frequency-response>.

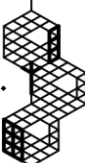


- [120] E. Hsieh and R. Anderson, "Grid flexibility: The quiet revolution," *Electr. J.*, vol. 30, no. 2, pp. 1–8, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.tej.2017.01.009.
- [121] R. Chen, J. Wang, A. Botterud, and H. Sun, "Wind power providing flexible ramp product," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 2049–2061, May 2017, doi: 10.1109/tpwrs.2016.2603225.
- [122] M. Cui, J. Zhang, H. Wu, and B.-M. Hodge, "Wind-friendly flexible ramping product design in multi-timescale power system operations," in *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1064–1075, Jul. 2017, doi: 10.1109/tste.2017.2647781.
- [123] X. Fang, B.-M. Hodge, V. Krishnan, and F. Li, "Potential of wind power to provide flexible ramping products and operating reserve," in *Proc. IEEE Power Energy Society Gen. Meeting (PESGM)*, Aug. 2018, doi: 10.1109/pesgm.2018.8586436.
- [124] R. Abhinav and N. M. Pindoriya, "Opportunities and key challenges for wind energy trading with high penetration in Indian power market," *Energy for Sustain. Develop.*, vol. 47, pp. 53–61, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.esd.2018.08.007.
- [125] X. Ma and Y. Zhou, "Coordination of generation and transmission planning for power system with large wind farms," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 1979–1985, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.01.302.
- [126] L. S. Vargas, G. Bustos-Turu, and F. Larrain, "Wind power curtailment and energy storage in transmission congestion management considering power plants ramp rates," in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting*, Jul. 2015, doi: 10.1109/pesgm.2015.7285712.
- [127] L. Bird, D. Lew, M. Milligan, E. M. Carlini, A. Estanqueiro, D. Flynn, E. Gomez-Lazaro, H. Holttinen, N. Menemenlis, A. Orth, P. B. Eriksen, J. C. Smith, L. Soder, P. Sorensen, A. Altiparmakis, Y. Yasuda, and J. Miller, "Wind and solar energy curtailment: A review of international experience," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 577–586, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.082.
- [128] Y. Gu and L. Xie, "Fast sensitivity analysis approach to assessing congestion induced wind curtailment," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 101–110, Jan. 2014, doi: 10.1109/tpwrs.2013.2282286.
- [129] L. Bird, J. Cochran, and X. Wang, "Wind and solar energy curtailment: Experience and practices in the United States," *Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-60983*, Mar. 2014, doi: 10.2172/1126842.
- [130] J. Jorgensen, T. Mai, and G. Brinkman, "Reducing wind curtailment through transmission expansion in a wind vision future," *Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-67240*, Jan. 2017, doi: 10.2172/1339078.
- [131] A. Nourian and S. Madnick, "A systems theoretic approach to the security threats in cyber physical systems applied to stuxnet," in *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 2–13, Jan. 2018, doi: 10.1109/tdsc.2015.2509994.
- [132] G. Bedi, G. K. Venayagamoorthy, R. Singh, R. R. Brooks and K. -C. Wang, "Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 847-870, April 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2802704.
- [133] Y. Zhang, Y. Xiang, and L. Wang, "Power system reliability assessment incorporating cyber attacks against wind farm energy management systems," in *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2343–2357, Sep. 2017, doi: 10.1109/tsg.2016.2523515.
- [134] J. Lai, B. Duan, Y. Su, L. Li, and Q. Yin, "An active security defense strategy for wind farm based on automated decision," in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting*, Jul. 2017, doi: 10.1109/pesgm.2017.8274638.
- [135] M. Meskin, A. Domijan, I. Grinberg, "Impact of distributed generation on the protection systems of distribution networks: analysis and remedies – review paper," *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 14, pp. 5944-5960, Nov. 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1652.
- [136] H. Hooshyar and M. E. Baran, "Fault Analysis on Distribution Feeders With High Penetration of PV Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2890-2896, Aug. 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2227842.
- [137] E. H. Camm et al., "Characteristics of wind turbine generators for wind power plants," in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting*, Jul. 2009, doi: 10.1109/pes.2009.5275330.
- [138] R. Walling et al., "Fault current contributions from wind plants," in *Proc. 68th Annu. Conf. Protective Relay Eng. (CPRE)*, Mar. 2015, pp. 137–227, doi: 10.1109/cpre.2015.7102165.





- [139] E. Muljadi, N. Samaan, V. Gevorgian, J. Li, and S. Pasupulati, "Short circuit current contribution for different wind turbine generator types," in *Proc. IEEE PES Gen. Meeting*, Jul. 2010, doi: 10.1109/pes.2010.5589677.
- [140] B. Fani, H. Bisheh and A. Karami-Horestani, "An offline penetration-free protection scheme for PV-dominated distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 157, pp. 1-9, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.11.020.
- [141] E. Abbaspour, B. Fani and A. Karami-Horestani, "Adaptive scheme protecting renewable-dominated micro-grids against usual topology-change events," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, pp. 1–13, May 2021, doi: 10.1049/rpg2.12193.
- [142] V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh, S. G. Srivani, and and, "Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 365–379, Dec. 2017, doi: 10.17775/cseejpes.2017.00030.
- [143] G. Yang, M. Dong, Z. Zhou, C. Zhou, D. Du, Z. Zhan, and D. Yang, "The influences and countermeasures of wind farm access to transmission line differential protection," in *Proc. IEEE Power Electron. Mach. Wind Appl.*, Jul. 2012, doi: 10.1109/pemwa.2012.6316373.
- [144] R. Dubey, S. Samantaray, B. Panigrahi, and G. Venkoparao, "Adaptive distance relay setting for parallel transmission network connecting wind farms and UPFC," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 65, pp. 113–123, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.09.033.
- [145] M. K. Jena and S. R. Samantaray, "Data-Mining-based intelligent differential relaying for transmission lines including UPFC and wind farms," in *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 8–17, Jan. 2016, doi: 10.1109/tnnls.2015.2404775.
- [146] L. Tripathy, M. K. Jena, and S. Samantaray, "Differential relaying scheme for tapped transmission line connecting UPFC and wind farm," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 245–257, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.02.024.
- [147] E. C. Piesciorovsky and N. N. Schulz, "Comparison of programmable logic and setting group methods for adaptive overcurrent protection in microgrids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 273–282, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.035.
- [148] V. Nougain, S. Mishra, and A. K. Pradhan, "MVDC microgrid protection using a centralized communication with a localized backup scheme of adaptive parameters," in *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 34, no. 3, pp. 869–878, Jun. 2019, doi: 10.1109/tpwr.2019.2899768.
- [149] L. Zhang, N. Tai, W. Huang, and Y. Wang, "Fault distance estimationbased protection scheme for DC microgrids," *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 1199–1203, Mar. 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8614.
- [150] A. Abdali, R. Noroozian, and K. Mazlumi, "Simultaneous control and protection schemes for DC multi microgrids systems," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 104, pp. 230–245, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.06.054.
- [151] R. Mohanty and A. K. Pradhan, "DC ring bus microgrid protection using the oscillation frequency and transient power," in *IEEE Syst. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 875–884, Mar. 2019, doi: 10.1109/jsyst.2018.2837748.
- [152] R. Mohanty and A. K. Pradhan, "Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach," in *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6328–6337, Nov. 2018, doi: 10.1109/tsg.2017.2708743.
- [153] M. Singh and A. Agrawal, "Voltage–current–time inverse-based protection coordination of photovoltaic power systems," *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, vol. 13, no. 6, pp. 794–804, Mar. 2019, doi: 10.1049/ietgtd.2018.6143.
- [154] U. Shahzad, S. Kahrobaee, and S. Asgarpoor, "Protection of distributed generation: Challenges and solutions," *Energy Power Eng.*, vol. 09, no. 10, pp. 614–653, 2017, doi: 10.4236/epe.2017.910042.
- [155] E. Hossain, M. R. Tür, S. Padmanaban, S. Ay and I. Khan, "Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 16816-16833, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2814981.
- [156] V. Preciado, M. Madrigal, E. Muljadi, and V. Gevorgian, "Harmonics in a wind power plant," in *Proc. IEEE Power Energy Society Gen. Meeting*, Jul. 2015, doi: 10.1109/pesgm.2015.7285774.
- [157] I. Colak, S. Sagiroglu, G. Fulli, M. Yesilbudak, and C.-F. Covrig, "A survey on the critical issues in smart grid technologies," *Renew.Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 396–405, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.036.



- [158] A. Y. Goharrizi, J. C. G. Alonso, E. Borisova, F. Mosallat, and D. Muthumuni, "Benchmark model of type-III wind turbine for research and development applications," in *Proc. IEEE Can. Conf. Elect. Comput. Eng. (CCECE)*, May 2018, doi: 10.1109/ccece.2018.8447781.
- [159] C. Ruiz, M. Znbiaga, G. Abad, D. Madariaga, and J. Arza, "Validation of a wind turbine harmonic model based on the generic type 4 wind turbine standard," in *Proc. 20th Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE ECCE Eur.)*, 2018, p. 1.
- [160] E. H. Mayoral, M. H. López, H. J. C. Marrero, and R. I. Cortez, "Harmonic analysis of the wind energy conversion system connected with electrical network," in *Compendium of New Techniques in Harmonic Analysis. London, U.K.: IntechOpen*, 2018, doi: 10.5772/intechopen.74584.
- [161] D. Schwanz, M. Bollen, and A. Larsson, "Some methods for harmonic emission determination in wind power plants," in *Proc. IEEE 18th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (ICHQP)*, May 2018, doi:10.1109/ichqp.2018.8378934.
- [162] H. García, J. Segundo, O. Rodríguez-Hernández, R. Campos-Amezcuca, and O. Jaramillo, "Harmonic modelling of the wind turbine induction generator for dynamic analysis of power quality," *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 104, Jan. 2018, doi: 10.3390/en11010104.
- [163] J. B. Noshahr, "Emission phenomenon of supra-harmonics caused by switching of full-power frequency converter of wind turbines generator (PMSG) in smart grid," in *Proc. IEEE 16th Int. Conf. Environ. Elect. Eng. (EEEIC)*, Jun. 2016, doi: 10.1109/eeeic.2016.7555625.
- [164] A. Reis, L. P. Moura, and J. C. de Oliveira, "Mitigation of harmonic current produced by wind turbine throughout converter switching control," in *Proc. 17th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (ICHQP)*, Oct. 2016, doi: 10.1109/ichqp.2016.7783477.
- [165] U. Vargas and A. Ramirez, "Extended harmonic domain model of a wind turbine generator for harmonic transient analysis," in *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, no. 3, pp. 1360–1368, Jun. 2016, doi: 10.1109/tpwrd.2015.2499701.
- [166] J. G. Ndirangu, J. N. Nderu, A. M. Muhia, and C. M. Maina, "Power quality challenges and mitigation measures in grid integration of wind energy conversion systems," in *Proc. IEEE Int. Energy Conf. (ENERGYCON)*, Jun. 2018, doi: 10.1109/energycon.2018.8398823.
- [167] C. Pazhanimuthu and S. Ramesh, "Grid integration of renewable energy sources (RES) for power quality improvement using adaptive fuzzy logic controller based series hybrid active power filter (SHAPF)," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 749–766, Jul. 2018, doi: 10.3233/jifs-171236.
- [168] A. F. Zobaa and S. H. E. A. Aleem, Eds., *Power Quality in Future Electrical Power Systems*. London, U.K.: Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [169] Rural Electrification, Wind Power, Standard IEC 61400-21:2008, IEC Webstore. Accessed: Jul. 22, 2020. [Online]. Available at <https://webstore.iec.ch/publication/5434>.
- [170] T. Sun, Z. Chen and F. Blaabjerg, "Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 896-905, Dec. 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.847993.
- [171] I. A. Ahmed and A. F. Zobaa, "Comparative power quality study of variable speed wind turbines," *Int. J. Energy Convers.*, vol. 4, no. 4, p. 97, Jul. 2016. Doi: 10.15866/irecon.v4i4.10828.
- [172] IEEE Approved Draft Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard P1159/D7, Apr. 2019. Accessed: Aug. 23, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8707146/versions#versions>.
- [173] M. N. Eskander and S. I. Amer, "Mitigation of voltage dips and swells in grid-connected wind energy conversion systems," *IETE J. Res.*, vol. 57, no. 6, pp. 515–524, Nov. 2011. doi: 10.4103/0377-2063.92267.
- [174] A. A. Alkahtani et al., "Power Quality in Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127104-127122, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3008042.
- [175] A. Ulbig, "Grid integration challenges of renewable energy sources and prospective solutions," presented at the *Swiss Federal Inst. Technol. Zurich*, 2013.
- [176] O. P. Mahela, and A. G. Shaik, "Comprehensive overview of grid interfaced wind energy generation systems," *Renew.Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 260-281, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.048.
- [177] FERC. (Sep. 21, 2016). Large Generator Interconnection Agreement (LGIA), Appendix G. Accessed: Jun. 2016. [Online]. Available at <https://www.federalregister.gov/d/05-11678/page-35010>.







- [178] National Research Council, Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology. Washington, DC, USA: Academies, 1991. [Online]. Available: <https://www.nap.edu/catalog/1824/assessment-of-research-needs-for-wind-turbine-rotor-materials-technology>.
- [179] W. Wu and B. Lin, "Application value of energy storage in power grid: A special case of China electricity market," *Energy*, vol. 165, pp. 1191–1199, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.202.
- [180] D. Larcher and J.-M. Tarascon, "Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage," *Nature Chem*, vol. 7, no. 1, pp. 19–29, Jan. 2015, doi: 10.1038/nchem.2085.
- [181] S. Hajiaghahi, A. Salemnia, and M. Hamzeh, "Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review," *J. Energy Storage*, vol. 21, pp. 543–570, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.est.2018.12.017.
- [182] J. Wu, B. Zhang, H. Li, Z. Li, Y. Chen, and X. Miao, "Statistical distribution for wind power forecast error and its application to determine optimal size of energy storage system," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 100–107, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.09.003.
- [183] B. M. Hodge and M. Milligan, "Wind power forecasting error distributions over multiple timescales," in *Proc. IEEE Power Energy Society Gen. Meeting*, Jul. 2011, doi: 10.1109/pes.2011.6039388.
- [184] W. Hu, Y. Min, Y. Zhou, and Q. Lu, "Wind power forecasting errors modelling approach considering temporal and spatial dependence," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 489–498, May 2017, doi: 10.1007/s40565-016-0263-y.
- [185] P. Haessig, B. Multon, H. B. Ahmed, S. Lascaud, and P. Bondon, "Energy storage sizing for wind power: Impact of the autocorrelation of day-ahead forecast errors," *Wind Energy*, Oct. 2013, doi: 10.1002/we.1680.
- [186] J. Shi, L. Wang, W.-J. Lee, X. Cheng, and X. Zong, "Hybrid Energy Storage System (HESS) optimization enabling very short-term wind power generation scheduling based on output feature extraction," *Appl. Energy*, vol. 256, Dec. 2019, Art. no. 113915, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113915.
- [187] J. Gan, J. Li, W. Qi, A. Kurban, Y. He, and S. Guo, "A review on capacity optimization of hybrid renewable power system with energy storage," in *Proc. E3S Web Conf.*, vol. 118, p. 02055, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911802055.
- [188] B. Singh, and P. K. Dubey, "istributed power generation planning for distribution networks using electric vehicles: Systematic attention to challenges and opportunities," *J. Energy Storage*, vol. 48, pp. 1–44, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104030.

## زیرنویس ها

- 
- 1 Wind Turbine
  - 2 Onshore
  - 3 Offshore
  - 4 Wind Energy Conversion Sysytem
  - 5 High Voltage Direct Current
  - 6 Reliability
  - 7 Power Quality
  - 8 Low Voltage Ride Through
  - 9 Energy Storage Systems
  - 10 Flexibility
  - 11 Resiliency
  - 12 Gear Box
  - 13 Direct Drive
  - 14 Fixed Speed Generator
  - 15 Adjustable Speed Generator
  - 16 Maximum Power Point Tracking
  - 17 Doubly Fed Induction Generator
  - 18 Squirrel Cage Induction Generator
  - 19 Permanent Magnet Synchronous Generator
  - 20 Synchronism
  - 21 High Penetration Level





- 22 Nacelle
- 23 Back to Back Pulse Width Modulation Converter
- 24 Neutral Point Clamped
- 25 Medium Voltage
- 26 DC Link
- 27 Time Scales
- 28 Proportional-Integral
- 29 Proportional Resonant
- 30 Machine Side Converter
- 31 Grid Side Converter
- 32 Crowbar
- 33 Braking Chopper
- 34 Pitch Angle Control
- 35 Wind Farm
- 36 Wounded Rotor
- 37 Slip Ring
- 38 Optislip
- 39 Shaft
- 40 Matrix Converter
- 41 Numerical Weather Prediction
- 42 Machine Learning
- 43 Deep Learning
- 44 Monte Carlo simulation
- 45 Scenario-Based Analysis
- 46 Research and Development
- 47 Institute of Electrical and Electronics Engineers
- 48 Converter-Driven Stability
- 49 Sub-Synchronous Control Interaction
- 50 Sub-Synchronous Resonance
- 51 Phase-Locked Loops
- 52 Electro-Magnetic-Mechanical (EMM) Stability
- 53 Control System Stability
- 54 Root Mean Square
- 55 Fault
- 56 Disturbance
- 57 Point Common Coupling
- 58 Nyquist
- 59 Bifurcation
- 60 Critical Clearing Time
- 61 Fault Ride Through
- 62 Flicker
- 63 Grid Codes
- 64 Flexible Alternative Current Transmission System
- 65 Western Electricity Coordination Council
- 66 Ride Through Capability
- 67 Per Unit
- 68 Bridge-type Fault Current Limiter
- 69 Fast Frequency Response
- 70 Pickup
- 71 National Renewable Energy Laboratory
- 72 Distributed Energy Resources
- 73 Coordination Time Interval
- 74 Harmonic
- 75 Sag/Swell Voltage
- 76 Insulated Gate Bipolar Transistor
- 77 Federal Energy Regulatory Commission
- 78 Tip Speed Ratio
- 79 Pumped Hydroelectric\_ESS





- 
- 80 Compressed Air \_ESS
  - 81 Battery \_ESS
  - 82 Super Capacitor \_ESS
  - 83 Superconducting Magnetic \_ESS
  - 84 Fly Wheel \_ESS
  - 85 Solar Energy

