Journal of Systems Smartening and Data Processing
Vol. 2 - No. 4 - Winter 2025

Improving Wind Turbine Gearbox Reliability Using SCADA and CMS Data: A Review with Case Studies

Abdolreza Rastitalab, ***Assistant Professor***

[1] **Department of Mechanical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran**

Ab.Rastitalab@iau.ac.ir

Received: 27 January 2025 **Revised:** 24 April 2025 **Accepted:** 28 April 2025

Abstract:

The gearbox in wind turbines, as one of the key components of the energy transmission system, plays an essential role in the performance and efficiency of wind turbines. However, the failure rate of the transmission system is significantly higher than for other turbine components, such as blades and generators, which is a major problem in the wind sector. These failures are usually due to several factors, including underestimation of actual operating loads, exposure to unexpected loads and unusual working conditions, design defects, and insufficient maintenance and repair. Considering the complexity of gearbox repair procedures, the high cost of replacement, and the long turbine service life, which directly results in lower revenues for operators, the main concern is to improve the reliability of this component. Moreover, the trend towards larger wind turbines and their deployment in remote and inaccessible locations makes the need for efficient and accurate gearbox monitoring more important than ever. This requires the use of advanced condition monitoring technologies and supervisory control and data acquisition systems (SCADA) that can continuously monitor the performance of the gearbox and detect possible failures at an early stage. In this respect, the integration of SCADA and condition monitoring systems can significantly improve fault detection and prediction, allowing operators to better plan maintenance activities, reduce costs and minimise turbine shutdowns., enabling operators to better plan maintenance activities, reduce costs, and minimize turbine shutdowns. This paper reviews common failure scenarios for wind turbine gearboxes and assesses different SCADA and CMS based monitoring methods. It shows, through two case studies, how these technologies can be used to detect and predict early faults and highlights the benefits of each approach. The findings highlight that the combined use of SCADA and CMS data is an effective solution for improving the reliability and productivity of wind turbines.

Keywords: Wind Turbine Gearbox, SCADA and CSM data, uncertainty, failure prediction.

Corresponding Author: Dr. Abdolreza Rastitalab
Corresponding Author Address: Department of Mechanical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran.

بهبود پایداری جعبه‌دنده توربین بادی با پایش هوشمند: تحلیل روش‌های SCADA و CMS

عبدالرضا راستی طلب، استادیار

گروه مکانیک، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران

Ab.Rastitalab@iau.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸ **تاریخ بازنگری مقاله:** ۱۴۰۴/۰۲/۰۴ **تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

چکیده:

جعبه دنده‌های توربین‌های بادی به عنوان یکی از اجزای کلیدی سیستم انتقال قدرت، نقش حیاتی در عملکرد و بهره‌وری این توربین‌ها ایفا می‌کنند. با این حال، نرخ خرابی جعبه دنده‌ها در مقایسه با سایر اجزای توربین، به ویژه پره‌ها و ژنراتورها، به طور قابل توجهی بالاتر است که این موضوع چالش‌های عمده‌ای را برای صنعت انرژی باد به وجود آورده است. این خرابی‌ها معمولاً ناشی از عوامل متعددی از جمله دست‌کم گرفتن بارهای عملیاتی واقعی، مواجهه با بارهای غیرمنتظره و شرایط کاری غیرعادی، نقص‌های طراحی و همچنین نگهداری و سرویس‌دهی نامناسب هستند. با توجه به پیچیدگی‌های فرایند تعمیرات جعبه‌دنده، هزینه‌های بالای جایگزینی آن و توقف‌های طولانی‌مدت توربین که مستقیماً منجر به کاهش درآمد بهره‌برداران می‌شود، افزایش قابلیت اطمینان این بخش به یکی از دغدغه‌های اصلی تبدیل شده است. علاوه بر این، با روند افزایش ابعاد توربین‌های بادی و استقرار آنها در مناطق دورافتاده و سخت‌گذر، نیاز به پایش مؤثر و دقیق جعبه‌دنده‌ها بیش‌ازپیش احساس می‌شود. این امر مستلزم استفاده از فناوری‌های پیشرفته پایش وضعیت و سیستم‌های کنترل و اکتساب داده‌ها (SCADA) است که بتوانند به‌صورت مستمر عملکرد جعبه‌دنده را رصد کرده و خرابی‌های احتمالی را به‌صورت زودهنگام شناسایی کنند. در این راستا، ادغام داده‌های حاصل از سیستم‌های SCADA و سیستم‌های پایش وضعیت (CMS) می‌تواند دقت تشخیص و پیش‌بینی خرابی‌ها را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد و به بهره‌برداران امکان دهد تا با برنامه‌ریزی بهتر تعمیرات، هزینه‌ها و زمان توقف توربین‌ها را کاهش دهند. این مقاله با بررسی الگوهای رایج خرابی جعبه‌دنده‌های توربین بادی و ارزیابی روش‌های مختلف پایش مبتنی بر SCADA و CMS، به ارائه دو مطالعه موردی می‌پردازد که نشان می‌دهد چگونه می‌توان با استفاده از این فناوری‌ها، تشخیص و پیش‌بینی زودهنگام خرابی‌ها را بهبود بخشید و مزایای هر روش را برجسته کرد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که استفاده هم‌زمان از داده‌های SCADA و CMS، راهکاری مؤثر برای ارتقای قابلیت اطمینان و بهره‌وری توربین‌های بادی است.

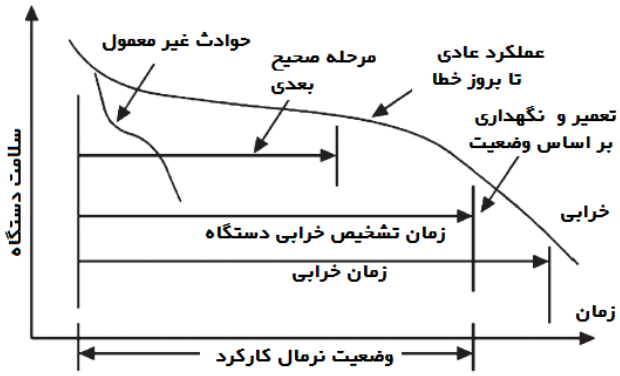
کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، گیربکس توربین بادی، تحلیل داده‌های **SCADA** و **CMS**،پیش‌بینی خرابی گیربکس

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عبدالرضا راستی طلب

نشانی نویسنده‌ی مسئول: فارس-داریون- دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون

۱- مقدمه

صنعت مدرن توربین‌های بادی با نرخ خرابی بالای گیربکس در مقایسه با سایر زیرمجموعه‌های توربین بادی (WT) مواجه شده است که دلایل مختلفی دارد؛ از جمله، دست‌کم گرفتن بارهای عملیاتی واقعی، بارهای اضافی غیرمنتظره ناشی از شرایط عملیاتی غیرمعمول، طراحی معیوب اجزای گیربکس و نگهداری ضعیف[1] . گیربکس‌های توربین‌های بادی بر اساس استانداردهای IEC برای عمر ۲۰ سال طراحی شده‌اند، اما بیشتر آنها عمر کوتاه‌تری دارند. در طول ۲ دهه گذشته، صنعت تجربیات زیادی برای بهبود قابلیت اطمینان گیربکس‌ها که یکی از گران‌ترین زیرمجموعه‌های توربین‌های بادی هستند، آموخته است. این بهبودهای تدریجی توسط مطالعات پایگاه‌های داده عمومی درباره قابلیت اطمینان توربین‌های بادی تأیید شده‌اند[2] . با این حال، یک مطالعه نشان می‌دهد که فناوری گیربکس به بلوغ رسیده و گیربکس‌های توربین‌های بادی به دلیل سایش و خستگی، قابلیت اطمینان ثابت یا کمی دارند و از دیدگاه نگهداری توربین‌های بادی، اپراتورها به دلایلی از جمله هزینه‌های بالای تعویض پس از خرابی، هزینه بالای خارج کردن گیربکس از توربین و نصب مجدد آن به دلیل نیاز به جرثقیل و روش‌های تعمیر پیچیده، نگران قابلیت اطمینان گیربکس‌ها هستند[3] .



شکل (۱): پیشرفت وضعیت ماشین آلات تا بروز خرابی و نشان دهنده مزایای پایش (مانیتورینگ)

بررسی‌های عمومی [4]، نشان می‌دهند که گیربکس بیشترین زمان توقف را در مقایسه با سایر اجزای توربین‌های بادی دارد، در حالی که گیربکس به تنهایی می‌تواند مسئول یک‌سوم از کل زمان از دست‌رفته در دسترسی به توربین‌های بادی باشد. داده‌های مربوط به یک مزرعه بادی دریایی نشان داده‌اند [5]که در صورت وقوع خرابی گیربکس، زمان توقف می‌تواند تا ۵۵/۲٪ از کل زمان سالانه و تلفات انرژی تا ۵۲/۰٪ از تولید سالانه باشد[6] . گزارش‌های مربوط به مزارع بادی دریایی نیز برخی مشکلات جدی گیربکس را در مراحل اولیه عملیات نشان داده‌اند. یکی از عوامل مؤثر در زمان توقف طولانی گیربکس توربین‌های بادی، پیچیدگی روش‌های تعمیر گیربکس، به‌ویژه در محیط دریایی است که نه‌تنها به لجستیک ویژه‌ای مانند کشتی پشتیبانی تعمیرات و کشتی جرثقیل نیاز دارد، بلکه به شرایط آب‌وهوایی مناسب نیز نیاز است تا کارها به‌صورت ایمن انجام شوند[7] .

برای توربین‌های بادی بزرگ با محرک گیربکس، اکثر تولیدکنندگان از طراحی سه‌مرحله‌ای با پیکربندی پیچیده استفاده می‌کنند،[8] همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است. مرحله دنده‌های سیاره‌ای شفت کم‌سرعت (LSS) شامل دنده‌های سیاره‌ای در یک حامل سیاره‌ای هم‌محور با یک دنده خورشیدی و یک دنده حلقه‌ای است. دنده‌های سیاره‌ای در مراکز ثابت حامل سیاره‌ای می‌چرخند. ورودی کم‌سرعت از حامل سیاره‌ای است که حرکت را از طریق دنده‌های سیاره‌ای به دنده خورشیدی منتقل می‌کند. مرحله شفت با سرعت متوسط (ISS) از دنده‌های مارپیچی موازی استفاده می‌کند، همان‌طور که شفت پرسرعت (HSS) نیز از این نوع دنده‌ها استفاده می‌کند که سپس به انتهای محرک ژنراتور متصل می‌شود. مزیت هرگونه نظارت باید ارائه تشخیص، شناسایی و پیش‌بینی برای یک نقص اولیه باشد، تا زمان کافی برای کاهش نقص از طریق تعمیر، نگهداری یا تعویض فراهم شود، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است و این باید هدف هرگونه نظارت اعمال‌شده بر توربین‌های بادی، از جمله گیربکس توربین بادی باشد[9] .

در پاسخ به نگرانی‌های مربوط به قابلیت اطمینان گیربکس، همکاری‌هایی بین تولیدکنندگان اصلی تجهیزات (OEMs) توربین‌های بادی (WT)، گیربکس و یاتاقان، مشاوران و مهندسین روان‌کاری به‌منظور بهبود پیش‌بینی نیرو، طراحی، ساخت و عملکرد گیربکس ایجاد شده است. با توجه به هزینه‌های بالقوه و مشکلات تعمیر و نگهداری، تولیدکنندگان و اپراتورهای توربین‌های بادی در حال اتخاذ استراتژی‌های نگهداری پیشگیرانه برای گیربکس‌های توربین‌های بادی هستند؛ بنابراین، نظارت بر گیربکس به بخشی ضروری از برنامه نظارت بر وضعیت (CM) کل توربین بادی تبدیل شده است تا از این استراتژی پشتیبانی کند. در این میان، نظارت بر ارتعاشات، محبوب‌ترین روش CM برای گیربکس‌ها است، اگرچه چالش‌های فنی نیز وجود دارد [10].

رویکرد چند پارامتری برای نظارت بر وضعیت ماشین‌آلات الکتریکی به این جهت پیشنهاد شد تا اطمینان تشخیص CM افزایش‌یافته و هشدارهای کاذب کاهش یابد. این روش از روابط بین سیگنال‌های مختلف استفاده می‌کند. علاوه بر این، ابزارهای تحلیلی مناسب برای این سیگنال‌ها نیز برای استخراج ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر را بر وظیفه تشخیصی دارند، ضروری هستند. تحقیقات گذشته نشان دادند که یک طرح تشخیصی دوبعدی مبتنی بر دو پارامتر (انرژی نسبی‌بسته‌های موجک و آنتروپی کل بسته‌های موجک) استخراج شده از یک سیگنال، خطاها را هنگام تشخیص بین چندین عیب کاهش می‌دهد. تحقیقاتی در مورد فیزیک خرابی زیرمجموعه‌ها انجام شده است تا مدل‌های تحلیلی خوبی برای CM ایجاد شود. تحقیقات اخیر در زمینه توربین‌های بادی بر روی زیرمجموعه‌های بحرانی توربین‌های بادی از جمله گیربکس، ژنراتور و مبدل متمرکز شده است. به‌عنوان‌مثال در یک تحقیق، خرابی یاتاقان توربین بادی را بر اساس یک مدل فیزیک خرابی گیربکس پیش‌بینی کردند، و در تحقیقی دیگر خرابی ژنراتور توربین بادی را بر اساس یک تکنیک تخمین حالت غیرخطی پیش‌بینی گردید. در شکل ۲ دو روش تحلیل هشدار SCADA و CMSپیشنهاد و نشان داده شده است، یعنی مبتنی بر توالی زمانی و مبتنی بر احتمال، برای تشخیص سیستم‌های پکیج و مبدل[11] .

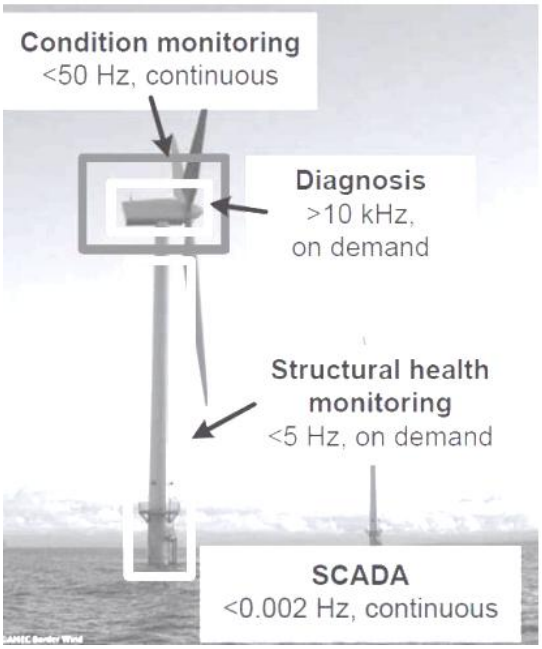
در این مقاله بر روی گیربکس متمرکز شده است، ابتدا با مرور قابلیت اطمینان گیربکس توربین‌های بادی و خلاصه‌سازی، حالت‌های خرابی معمول بررسی می‌شود و سپس دو مطالعه موردی اندازه‌گیری را مرور می‌کند، با استفاده از داده‌های سیستم کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده‌ها (SCADA) و سپس داده‌های سیستم نظارت بر وضعیت (CMS) از گیربکس‌های توربین‌های بادی با عیوب شناخته شده تحت‌نظر قرار می‌گیرد[12] .

۲- قابلیت اطمینان در گیربکس توربین‌های بادی

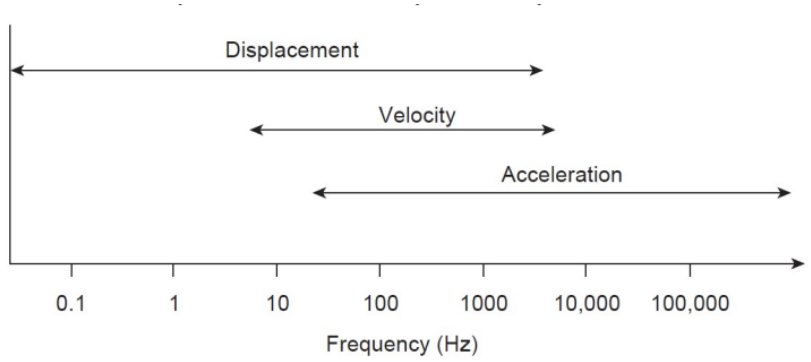
برای درک بهتر قابلیت اطمینان گیربکس‌های توربین‌های بادی (WT)، مطالعاتی شامل پیش‌بینی قابلیت اطمینان و تحلیل حالت‌های خرابی، اثرات و بحرانی‌بودن می‌تواند انجام شود. یک پیش‌بینی خوب برای قابلیت اطمینان گیربکس‌های توربین‌های بادی تنها از طریق همکاری بین اپراتورهای مزارع بادی، تولیدکنندگان اصلی تجهیزات توربین‌های بادی، گیربکس و یاتاقان‌ها قابل‌دستیابی است. اصول کلی قابلیت اطمینان برای یک گیربکس سه‌مرحله‌ای توسط شامل: مرحله سرعت بالا، مرحله سرعت متوسط موازی، مرحله سرعت متوسط سیاره‌ای و سیستم روان‌کاری است[13] . سیستم روان‌کاری تأثیر مهمی بر قابلیت اطمینان گیربکس دارد. از سوی دیگر، مشاهدات میدانی نشان داده‌اند [14]که بیشتر خرابی‌های گیربکس‌های توربین‌های بادی به‌ظاهر از یاتاقان‌ها شروع می‌شوند تا از چرخ‌دنده‌ها. در بررسی‌ها گزارش شده است که هر خرابی یاتاقان گیربکس می‌تواند منجر به زمان توقف متوسط تا ۶۰۰ ساعت شود.

مهم‌ترین خرابی‌های یاتاقان در یاتاقان‌های سرعت بالا (HSS)، یاتاقان‌های سیاره‌ای و یاتاقان‌های سرعت متوسط (ISS) رخ می‌دهد. یکی از عوامل اصلی که به پیچیدگی این مسئله می‌افزاید، مربوط به فرایند طراحی گیربکس است. بخش زیادی از فرایند ارزیابی عمر طراحی یاتاقان‌ها، مختص تولیدکنندگان گیربکس و یاتاقان‌ها است. بااین‌حال، دانش دقیق از بارهای توربین بادی و پاسخ‌های گیربکس که به رفتارهای پیش‌بینی‌نشده یاتاقان‌ها منجر می‌شود، ممکن است به‌خوبی درک نشده باشد[15] .بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده در این زمینه، از جمله برخی تحلیل‌های FMECA، پنج حالت خرابی برجسته در گیربکس‌های توربین‌های بادی شامل: خرابی یاتاقان‌های سرعت بالا، خرابی یاتاقان‌های سیاره‌ای، خرابی یاتاقان‌های سرعت متوسط وخرابی

چرخ‌دنده می‌باشد. این موارد نشان می‌دهد که برای بهبود قابلیت اطمینان گیربکس‌های توربین‌های بادی، توجه ویژه‌ای به طراحی، مواد و سیستم‌های نگهداری و روان‌کاری باید معطوف شود.



شکل (۲): فرکانس‌های تشخیص وضعیت توربین بادی



شکل (۳): نمودار تغییر موقعیت مکانی، سرعت و شتاب گیربکس توربین بر اساس فرکانس کنترلی دریافتی

۲-۱- انواع حالت‌های خرابی چرخ دنده گیربکس توربین بادی

در اینجا پنج حالت خرابی برجسته در گیربکس‌های توربین‌های بادی (WT) به طور خلاصه بیان شده است:

۱. خرابی چرخ‌دنده‌های سیاره‌ای: این نوع خرابی می‌تواند ناشی از تنش‌های مکانیکی بیش از حد، سایش یا خستگی مواد باشد که به مرور زمان باعث شکست چرخ‌دنده‌های سیاره‌ای می‌شود.

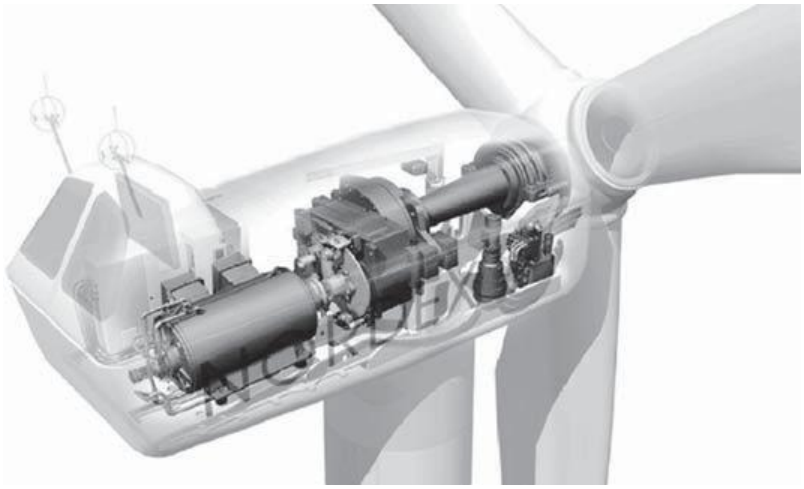
۲.خرابی یاتاقان‌های سیاره‌ای: یاتاقان‌های سیاره‌ای به دلیل بارهای زیاد و شرایط کاری سخت، مستعد خرابی هستند. این خرابی‌ها می‌توانند منجر به لرزش‌های غیرعادی و افزایش اصطکاک شوند.

۳.خرابی یاتاقان‌های سرعت متوسط: یاتاقان‌های سرعت متوسط نیز به دلیل بارهای دینامیکی و شرایط کاری دشوار، ممکن است دچار خرابی شوند که این امر می‌تواند عملکرد کلی گیربکس را تحت تأثیر قرار دهد.

۴. خرابی یاتاقان‌های سرعت بالا: یاتاقان‌های سرعت بالا به دلیل سرعت چرخش بالا و بارهای زیاد، مستعد خرابی هستند و خرابی این یاتاقان‌ها می‌تواند باعث ایجاد لرزش و نویز شدید شود.

۵. اختلال در سیستم روان‌کاری: سیستم روان‌کاری، نقش حیاتی در عملکرد روان و کارآمد گیربکس دارد. هرگونه اختلال در این سیستم، مانند کاهش سطح روغن یا آلودگی روغن، می‌تواند منجر به افزایش اصطکاک، سایش و در نهایت خرابی اجزای گیربکس شود.

این حالات خرابی در شکل‌های ۳ و۴ نشان می‌دهند که برای بهبود قابلیت اطمینان گیربکس‌های توربین‌های بادی، توجه ویژه‌ای به طراحی، مواد، سیستم‌های نگهداری و روان‌کاری باید معطوف شود.



شکل (۴): شماتیک نمایش قرار گیری گیربکس در توربین بادی

۲-۲ -مروری بر روش‌های تحلیل سیگنال SCADA

در روزهای اولیه توسعه توربین‌های بادی مدرن و بزرگ (WT)، این توربین‌ها به جز بازرسی‌های دوره‌ای، تحت نظارت خاصی قرار نمی‌گرفتند. برای نظارت بر عملکرد کلی توربین‌های بادی، مانند عملکرد و بازده، سیستم‌های SCADA نصب شدند. با بزرگ‌تر و گران‌تر شدن توربین‌های بادی، سیستم‌های پیچیده‌تر نیز به‌منظور بهبود حفاظت از این دارایی‌های پرهزینه اضافه شدند. امروزه، بسیاری از سیستم‌های CMS بر تفسیر سیگنال‌های ارتعاشی تمرکز دارند تا سلامت گیربکس توربین‌های بادی را ارزیابی کنند. یک نظرسنجی انجام‌شده توسط کنسرسیوم فناوری‌های انرژی بادی نشان می‌دهد که از بین ۲۰ سیستم CMS تجاری موجود برای توربین‌های بادی، ۱۴ سیستم قابلیت نظارت بر ارتعاشات گیربکس را ارائه می‌دهند. برخی از اپراتورهای باتجربه توربین‌های بادی با موفقیت از این تکنیک‌های مبتنی بر ارتعاش برای تشخیص آسیب‌های اولیه گیربکس استفاده کرده‌اند و در نهایت از خرابی کامل گیربکس جلوگیری کرده‌اند[16] .

بااین‌حال، در مقایسه با سیستم‌های SCADA، سیستم‌های CMS هنوز استانداردسازی نشده‌اند؛ بنابراین، صنعت در تلاش است تا کاربرد سیستم‌های استاندارد SCADA را به نظارت بر وضعیت اجزای توربین‌های بادی گسترش دهد. این تلاش‌ها به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد کلی توربین‌های بادی انجام می‌شود. تشخیص خرابی‌های گیربکس توربین‌های بادی (WT) با استفاده از داده‌های SCADA در تحقیقات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است[17] و در این مطالعه از تکنیک‌های تشخیص ناهنجاری برای شناسایی دماهای غیرعادی بر اساس مدل‌های داده‌ای استفاده شده است.

۲-۳- معیارهای اندازه گیری قابلیت اطمینان گیربکس بر اساس داده‌های SCADA و CMS

اپراتورهای توربین‌های بادی، به‌طور مداوم هشدارهای و داده‌های سیگنال‌های SCADA را به‌صورت مستمر نظارت می‌کنند. داده‌های SCADA معمولاً با فرکانس بالا نمونه‌برداری شده و سپس به‌طور میانگین در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای ثبت می‌شوند. برخی از اندازه‌گیری‌های رایج مرتبط با گیربکس که توسط SCADA انجام می‌شوند، عبارت‌اند از: دمای روغن سامپ گیربکس، فشار روغن گیربکس، دمای یاتاقان‌های سرعت بالا و همچنین هشدارهای رایج مرتبط با گیربکس که توسط سیستم SCADA نظارت می‌شوند عبارت‌اند از: دمای یاتاقان‌ها و روغن گیربکس، عملکرد پمپ روغن الکتریکی گیربکس، وضعیت فیلتر.
فشار روغن گیربکس و وضعیت فیلتر روغن به‌طور مستقیم با عملکرد پمپ روغن مرتبط هستند. فشار روغن، فیلترهای روان‌کاری و عملکرد پمپ، همگی توسط SCADA نظارت می‌شوند. اگر پمپ متوقف شود و فشار روغن پایین بیاید یا فیلتر روغن مسدود شود، SCADA باید هشدارهایی را به اپراتور ارسال کند، زیرا چنین خرابی‌هایی می‌توانند منجر به آسیب‌های فاجعه‌بار در گیربکس شوند.

۲-۴- سیگنال‌های مرتبط با گیربکس در سیستم‌های CMS

سیگنال‌های CMS مرتبط با گیربکس توربین‌های بادی، از دو منبع اصلی جمع‌آوری می‌شوند. مبدل‌های ارتعاشی که این مبدل‌ها معمولاً به شکل شتاب‌سنج هستند و در موقعیت‌های مختلفی روی گیربکس نصب می‌شوند سیگنال‌ها را از چهار شتاب‌سنج در موقعیت‌های زیر ثبت می‌کند:

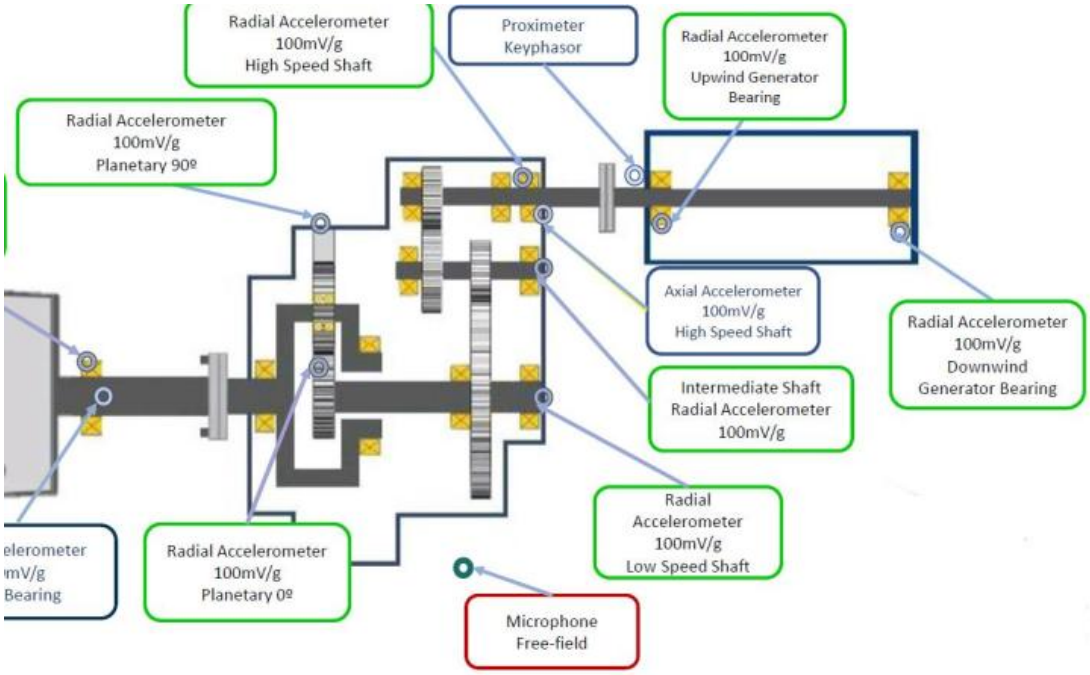
۱. انتهای شفت سرعت پایین، جهت عرضی
۲. انتهای شفت سرعت بالا، جهت عمودی
۳. انتهای شفت سرعت بالا، جهت عرضی
۴. انتهای شفت سرعت بالا، جهت محوری

شمارنده ذرات روغن این دستگاه‌ها برای ثبت ذرات فلزی و غیرفلزی با اندازه‌های مختلف که در سیستم روغن‌کاری گیربکس در گردش هستند، استفاده می‌شوند. این ذرات توسط سیستم گردش روغن فیلتر می‌شوند. در جدول ۱ با بررسی تعداد ذرات فلزی و غیرفلزی ثبت‌شده توسط این مبدل‌ها، اطلاعات مفیدی برای تشخیص اینکه آیا یک عیب در حال توسعه است یا خیر، به دست می‌آید. این داده‌ها به اپراتورها کمک می‌کنند تا مشکلات احتمالی را در مراحل اولیه شناسایی کرده و از خرابی‌های بزرگ‌تر جلوگیری کنند

جدول ۱: سیگنال‌های SCADAوCMS مشاهده شده از گیربکس یک توربین بادی

مشاهده حالت‌های شکست	شکست چرخ‌دنده سیاره‌ای	شکست در بلبرینگ چرخ‌دنده سیاره‌ای	شکست بلبرینگ ISS	شکست بلبرینگ HSS	عدم کارکرد صحیح سیستم روغن‌کاری
سیگنال SCADA	دمای روغن	دمای روغن	دمای روغن	دمای بلبرینگ HSS	سطح فشار روغن، وضعیت فیلتر روغن
سیگنال CMS	تعداد لرزش بلبرینگ ISS ; ناخالصی موجود در روغن شامل ذرات غیرفلزی	سیگنال لرزش بلبرینگ؛ISS تعداد ناخالصی موجود در روغن شامل ذرات فلزی	سیگنال لرزش بلبرینگ HSS و؛ISS تعداد ناخالصی موجود در روغن شامل ذرات فلزی	سیگنال لرزش بلبرینگ HSS (عمودی، افقی، محوری) ;تعداد ناخالصی موجود در روغن شامل ذرات فلزی	
سیگنال‌های اضافی	سرعت روتور	سرعت ژنراتور	دمای محفظه موتور		

در رولرهای یاتاقان، قفســـه‌های یاتاقان یا چرخ‌دنده‌ها می‌توانند از طریق منافذ ذرات روغن را دریافت کنند. بااین‌حال، تفســـیر دقیق داده‌های ذرات روغن دشوار است[18] و برخی مشکلات عملی در انتخاب اندازه مناسب نمونه‌گیری از ذرات وجود دارد. شـــکل ۵، خلاصـــه‌ای از اندازه‌گیری‌های تجاری SCADA و CMS را نشـــان می‌دهد که برای نظارت بر گیربکس توربین بادی (WT) مفید هستند. با تنظیم شتاب‌سنج، حسگرها تا حد امکان نزدیک به محورهای سرعت بالا (HSS) و سرعت پایین (LSS) گیربکس نصـب می‌شـوند تا بهترین کیفیت سـیگنال‌ها به دسـت آید. این جدول به اپراتورها و تولیدکنندگان کمک می‌کند تا سلامت گیربکس را به‌طور جامع نظارت کرده و خرابی‌های احتمالی را در مراحل اولیه شناسایی کنند.



شکل (۵): چیدمان گیربکس توربین بادی همراه با نمایش نحوه تنظیم تجهیزات اندازه گیری

۲-۵-تشخیص خرابی و پیش بینی آن با استفاده ا ز سیگنال‌های SCADA

به‌عنوان یک جزء کلیدی در سیستم انتقال قدرت، گیربکس توربین بادی (WT)، انرژی جنبشی را از روتور توربین به ژنراتور از طریق تبدیل سرعت چرخشی و گشتاور انتقال می‌دهد. عملکرد گیربکس توربین بادی با سیستم‌های مکانیکی معمولی متفاوت است، زیرا گشتاور اعمال‌شده به‌صورت تصادفی تغییر می‌کند. این موضوع به‌عنوان یکی از دلایل اصلی خستگی چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها در نظر گرفته می‌شود که منجر به ایجاد حالت‌های خرابی گیربکس و تأثیر بر عمر آن می‌گردد. تحلیل ریشه‌ای خرابی‌های گیربکس نیازمند درک دقیق اثرات محیط عملیاتی و آسیب‌های تجمیعی ناشی از خستگی با چرخه‌های بالا و پایین است. این کار با استفاده از اطلاعات گیربکس و زیرمجموعه‌های مجاور آن، مانند روتور و ژنراتور، و از طریق تحلیل انتقال انرژی جنبشی و تلفات حرارتی انجام می‌شود. این امر را می‌توان به‌سادگی با نظارت بر بازده انتقال و سرعت چرخشی و ارتباط آن‌ها با افزایش دما برای پیش‌بینی خرابی گیربکس انجام داد.

بر اســاس قانون اول ترمودینامیک، انرژی جنبشــی ورودی به گیربکس (E) را می‌توان به‌صـورت فیزیکی به‌عنوان مجموع انرژی جنبشــی خروجی P_{GB} و تلفات حرارتی Q_{GB} ضـرب در مدت زمان T_i بیان کرد، همان‌طور که در رابطه زیر نشـان داده شـده است:

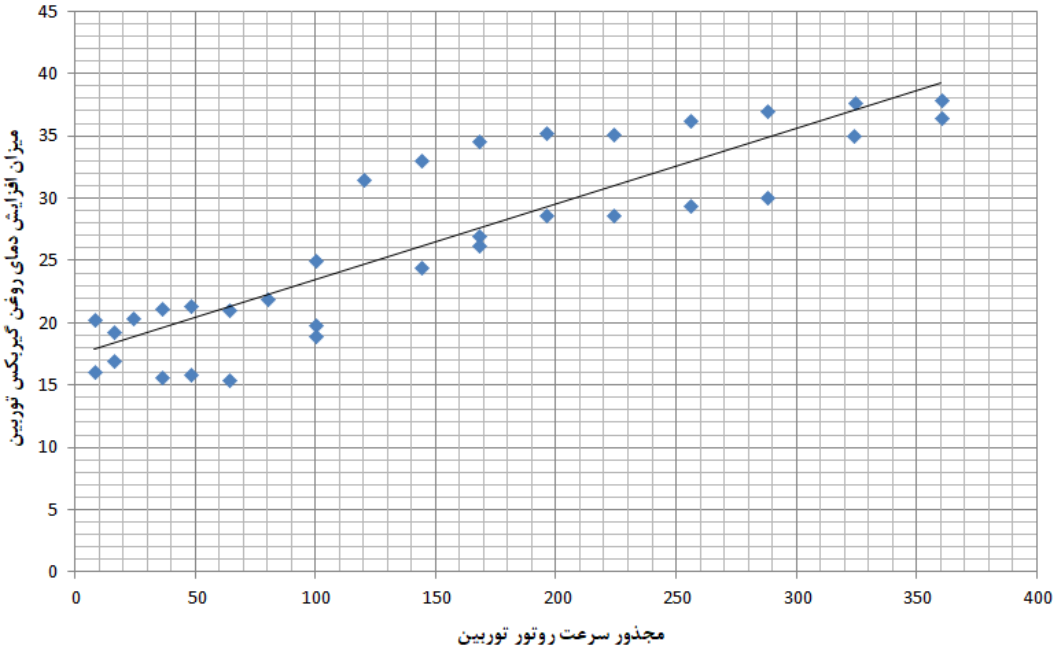
(۱)

$$E= P_{GB}\, T_i - Q_{GB} T_i$$

ازآنجایی‌که رابطه فوق برای یک مرحله از جعبه‌دنده ثابت اســـت، ناکارآمدی مرحله دنده متناســـب با تغییرات دما به‌ســـرعت نوسانی گیربکس خواهد بود. هنگامی که یک خرابی در مرحله دنده رخ می‌دهد، تغییرات دمای روغن گیربکس باید در پاسخ به کاهش بازدهی افزایش یابد.

۳- نتایج شبیه سازی

در ادامه، معادلات فوق بر روی داده‌های گذشـته‌نگر SCADA (سیسـتم کنترل و نظارت بر داده‌ها) از یک توربین بادی (WT) با توان ۲ مگاوات و ســرعت متغیر در ســه دوره متوالی با طول یکســان اعمال شــده‌اند. در این مورد، بر اســاس گزارش تعمیر و نگهداری، یک خرابی فاجعه‌بار در چرخ‌دنده سیاره‌ای جعبه‌دنده توربین بادی در زمان خرابی رخ می‌دهد.



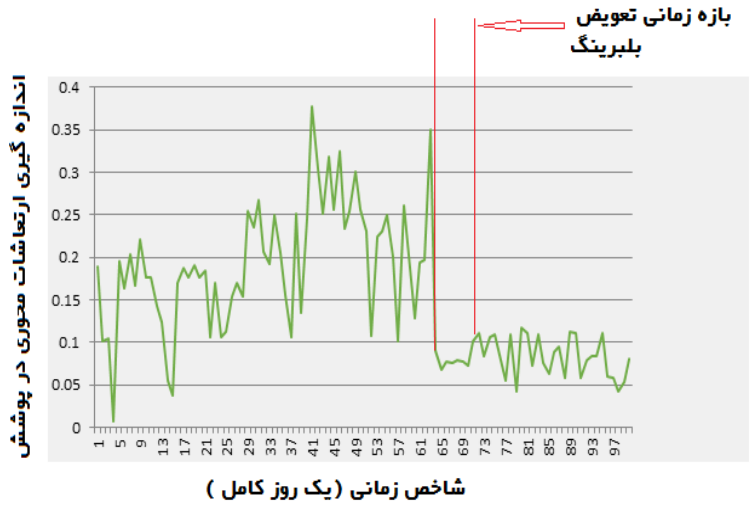
شکل (۶): نمودار افزایش دمای روغن گیربکس (درجه سانتی گراد) برحسب مجذور سرعت روتور توربین بادی

در شکل ۶ مطالعه موردی، یک اپراتور سیستم نظارت بر وضعیتCMS را روی ناوگان توربین‌های بادی دو سرعته ۱.۳ مگاواتی خود مستقر کرد و موفق به تشخیص چندین عیب یاتاقان در گیربکس‌ها و ژنراتورها شد. در یک مثال، اپراتور یک عیب یاتاقان ISS گیربکس را با استفاده از تحلیل طیفی تشخیص داد که توسط تغییر در دامنه پوشش ارتعاش، که از طریق جداسازی دامنه سیگنال ارتعاش خام در حوزه زمان به دست آمده بود، فعال شد. نتایج به صورت بازنگری از CMS گرفته شده‌اند تا نشان دهند چگونه می‌توان یک عیب را با استفاده از چندین سیگنال برای بهبود اطمینان تشخیص و با استفاده از انرژی تجمیعی به جای محور زمان معمولی سیگنال، تشخیص داد. در طول تعویض یاتاقان، هنگام ترسیم در برابر انرژی حذف می‌شوند. این دوره‌های تولید صفر به یک نقطه واحد کاهش می‌یابند که باعث می‌شود روند تغییرات ارتعاش واضح‌تر شده و روند کلی بهتر تعریف شود و تفسیر سیگنال ساده‌تر گردد.

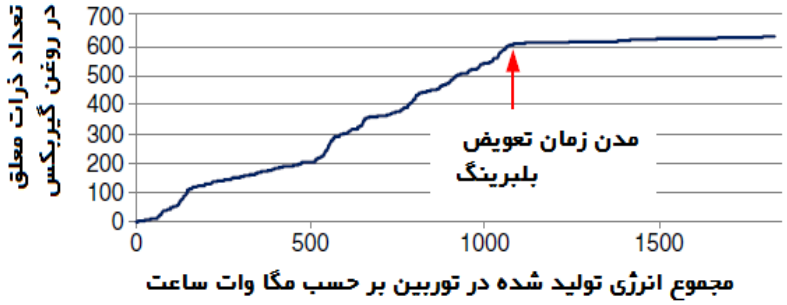
شکل ۶ نشان می‌دهد که این اثر برای نرخ تولید ذرات، که توسط گرادیان در شکل نشان داده شده است، بیشتر مشهود شود. این نرخ لزوماً به طور آنی برای یک توربین بادی که تحت بار متغیر کار می‌کند، تغییر نمی‌کند. این به این دلیل است که نرخ تولید ذرات ممکن است توسط دوره‌های بار بالا، پایین یا صفر پوشیده شود. از آنجایی که ذرات بیشتری در بارهای بالاتر نسبت به بارهای پایین‌تر تولید می‌شوند، مفید است که تعداد ذرات روغن را در برابر انرژی تولید شده همانطور که در شکل ۶ نشان

داده شده است، ترسیم کنیم. این شکل روندهای هموارتری را نشان می‌دهد و می‌تواند مستقیماً با سیگنال‌های ارتعاش، بدون مشکلات مرتبط با شرایط کارکرد بار متغیر، مقایسه شود.

شکل‌های ۷ و ۸ حوزه انرژی پوشش ارتعاش محوری HSS گیربکس و تعداد ذرات روغن را نشان می‌دهد که سه منطقه متمایز را مشخص می کند. ارتعاش پوشش داده شده با انرژی تولید شده افزایش می‌یابد. این به وضوح نشان می‌دهد که یک عیب وجود دارد. با این حال، قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد زیرا توربین بادی وارد دوره دوم می‌شود و این در زمانی است که ارتعاش کاهش می‌یابد و نشان می‌دهد که عیب ممکن است از بین رفته باشد. بسته به نحوه تنظیم هشدارها، ممکن است یک اپراتور کم‌تجربه فرض کند که سیگنال صرفاً تحت تأثیر تغییرپذیری بالا قرار دارد و ممکن است در تصمیم‌گیری تعمیر و نگهداری بر اساس این سیگنال واحد یا قانون هشدار ساده، تردید کند.



شکل (۷): نمودار توزیع گسترده ذرات ناخالصی موجود در روغن گیربکس توربین بادی در یک روز کامل بر حسب ارتعاشات محوری



شکل (۸): نمودار مجموع انرژی تولید شده در توربین بر حسب تعداد ذرات معلق در روغن

۴-نتیجه گیری

این مقاله، تحلیل‌هایی از سیگنال‌های نظارتی SCADA و CMS مربوط به گیربکس‌های توربین‌های بادی را ارائه کرده است. مطالعه موردی بر روی داده‌های گذشته از توربین‌های بادی ۲ مگاواتی با سرعت متغیر و ۱/۳ مگاواتی با دو سرعت که دارای خرابی‌های گیربکس از قبیل: خرابی چرخدنده و یاتاقان سیاره‌ای، خرابی یاتاقان شفت میانی، خرابی یاتاقان شفت سرعت بالا (HSS) و اختلال در سیستم روان‌کاری بودند انجام شد. مطالعه موردی سیگنال‌های SCADA روی یک توربین بادی ۲ مگاواتی با سرعت متغیر نشان داد که با نظارت بر افزایش دمای روغن گیربکس، توان خروجی و سرعت چرخش، می‌توان خرابی

مرحله سیاره‌ای گیربکس را پیش‌بینی و تشخیص داد. همچنین، مطالعه موردی سیگنال‌های CMS با استفاده از داده‌های ارتعاش، ذرات روغن و سیگنال‌های توان در یک توربین بادی ۰/۱ مگاواتی با دو سرعت، نشان داد که تحلیل تعداد ذرات بزرگ آلاینده روغن و سیگنال‌های ارتعاش در مقایسه با انرژی تجمعی تولیدشده، قادر به تشخیص خرابی یاتاقان شفت میانی گیربکس بوده است.

References
مراجع

[1] E. Byon, Y. Ding, "Condition-Based Maintenance for Wind Power Generation Systems Considering Environmental Factors", *Renewable Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 1882–1894, 2010.

[2] P. J. Tavner, et al., "Reliability Analysis for Wind Turbines", *Wind Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 377–395, 2008.

[3] J. Helsen, et al., "The Dynamics of Planetary Gear Sets Used in Wind Turbines", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 2, pp. 719–728, 2011.

[4] W. Musial, et al., "Trends in Wind Turbine Generator Systems", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 174–185, 2012.

[5] Y. Guo, et al., "Gearbox Reliability Collaborative (GRC) Failure Analysis Report", *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Rep. NREL/TP-5000-51885, 2012.

[6] J. Carroll, A. McDonald, and D. McMillan, "Failure Rate, Repair Time and Downtime Cost of Offshore Wind Turbines", *Wind Energy*, vol. 19, no. 6, pp. 1107–1119, 2016.

[7] A. R. Nejad, et al., "Drivetrain Reliability in Wind Turbines: Review, Classification, and Recommendations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109300, 2019.

[8] M. Reder, N. Y. Yürüşen, J. J. Melero, "Data-Driven Learning Framework for Associating Weather Conditions and Wind Turbine Failures", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 169, pp. 554–569, 2018.

[9] R. B. Randall, J. Antoni, "Rolling Element Bearing Diagnostics-A Tutorial", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 2, pp. 485–520, 2011.

[10] Y. Feng, et al., "Condition Monitoring of Wind Turbine Gearboxes Using Vibration Analysis Techniques", *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 73–82, 2013.

[11] J. Antoni, "The Spectral Kurtosis: A Useful Tool for Characterising Non-Stationary Signals", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 2, pp. 282–307, 2016.

[12] Y. Lei, et al., "An Adaptive SK Technique and Its Application for Fault Detection of Rolling Element Bearings", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 48, no. 1-2, pp. 120–137, 2014.

[13] M. Zhao, et al., "Deep Learning-Based Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearboxes", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 6345–6355, 2020.

[14] O. Janssens, et al., "Convolutional Neural Network-Based Fault Detection for Rotating Machinery", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 377, pp. 331–345, 2016.

[15] A. Smith, et al., "Lessons from 15 Years of UK Offshore Wind Farm Operations: Reliability Trends and Cost Reductions", *Renewable Energy*, vol. 220, p. 119543, 2024.

[16] L. Zhang, et al., "AI-Driven Predictive Maintenance for Offshore Wind Turbines: A Case Study of Hornsea Project", *Applied Energy*, vol. 359, p. 122678, 2024.

[17] R. Johnson and K. Müller, "Robotic Inspection and Repair of Offshore Wind Foundations: A Game Changer for O&M", *Ocean Engineering*, 2023.

[18] C. Gray, S. Watson, "Physics of Failure Approach to Wind Turbine Condition Based Maintenance", *Wind Energy*, vol. 13, no. 5, pp. 395–405, 2010.