مروری بر روش‌های مختلف پایش وضعیت توربین بادی

ایرج هرسینی[1]، علی حاجی‌زاده نمین[2]

۱ استادیار و عضو هیئت علمی دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، کرج

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، کرج، a.hajyzadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸

چکیده

توربین بادی عبارت است از مجموعه‌ای پیچیده از سیستم‌های الکترومکانیکی که انرژی جنبشی باد را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. امروزه استفاده از توربین‌های بادی بسیار رواج یافته است. این ادوات بیشتر در محیط‌های بسیار نامساعد کار می‌کنند و به‌همین دلیل در معرض انواع خرابی‌ها قرار می‌گیرند. در این مقاله، به مرور و بررسی انواع روش‌های عیب‌یابی و پایش وضعیت قسمت‌های متنوع توربین بادی (مانند سیستم انتقال توان، پره‌ها، برجک و یاتاقان‌ها) پرداخته می‌شود. از جمله مهمترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های آنالیز ارتعاشات، تحلیل درخت عیب، آزمایش فراصوت و جر این‌ها اشاره داشت. روش‌های مذکور می‌توانند علاوه بر اینکه وقوع خرابی در سیستم توربین بادی را پیشگیری نمایند و مانع از کار افتادگی آن شوند، سبب صرفه‌جویی در هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات توربین‌ها شده و میزان دقت و کیفیت شناسایی خرابی‌ها را بهبود بخشند. بر این اساس، روش نشر آوایی نسبت به روش آنالیز ارتعاشات دقیق‌تر و در مدت زمان کمتری به وجود عیب پی می‌برد. این در حالی است که روش فراصوت تنها تخمینی از محل و نوع عیب به‌دست می‌دهد؛ گفتنی است دقیق‌ترین روشی که امروزه در امر عیب‌یابی توربین بادی استفاده می‌شود، روش رادیوگرافی است.

واژگان کلیدی: توربین بادی، عیب‌یابی، پایش وضعیت، مدیریت نگه‌داری

۱. مقدمه

از اوائل سال ۱۹۸۰ م بود که استفاده از انرژی باد در جهان فراگیر شد. طبق گزارش‌های سازمان جهانی انرژی، بین سال های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ م استفاده از توربین بادی در کشورهای دنیا ۲۰ درصد افزایش یافت و هم‌اکنون در نزدیک به ۸۰ کشور جهان توربین‌های بادی مشغول به تولید برق می‌باشند و به ظرفیت تولیدی ۲۴۰ گیگاوات در انتهای سال ۲۰۱۱ م رسیده‌اند. بیشتر توربین‌های بادی برای عمری نزدیک به ۲۰ سال طراحی می‌شوند، این در حالی است که بسیاری از آنها به‌دلیل عدم بهره‌گیری از سیاست‌های نگه‌داری و تعمیرات پس از ۵ سال از کار می‌افتند [۱]. توربین بادی عبارت است از مجموعه‌ای پیچیده از سیستم‌های الکترومکانیکی که انرژی جنبشی باد را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. بیشتر توربین‌های بادی دارای سه

پره می‌باشند که با نیروی باد به حرکت درمی‌آیند. این حرکت توسط هاب[1] به شفت اصلی و از آن به جعبه‌دنده انتقال داده می‌شود. سپس شفت سرعت بالا که از جعبه‌دنده خارج شده و سرعتی تا حدود ۱۲۰۰ دور در دقیقه را دارا می‌باشد، این دور را به ژنراتور انتقال داده و سبب تولید برق می‌شود. در شکل ۱ اجزای اصلی توربین بادی نمایش داده شده است [۲].

۲. تعریف نگه‌داری

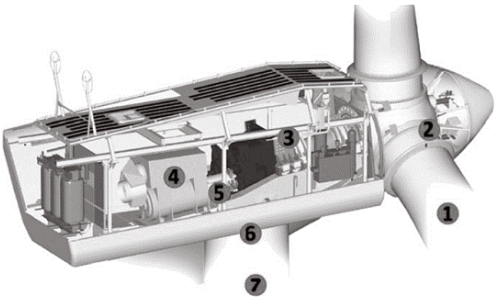
نگه‌داری به امری گفته می‌شود که کارکرد تمامی اجزای یک سیستم را کنترل و اطمینان حاصل می‌کند که این اجزاء وظایفی را که برای انجام آنها طراحی شده‌اند به‌درستی انجام می‌دهند [۳].

۲-۱. نگه‌داری همراه با اصلاح خرابی‌ها و برنامه‌ریزی براساس وضعیت دستگاه

امروزه نگه‌داری برای هر دو هدف پیشگیری و تعمیر خرابی‌ها انجام می‌شود. این در حالی است که در گذشته نگه‌داری براساس برنامه‌ریزی مشخصی نبوده و هرگاه بخشی از دستگاه دچار یک عیب جدی می‌شد و کل سیستم از کار می‌ایستاد، امور اصلاحی از جمله تعویض یا تعمیر آن بخش صورت می‌گرفت که این امر موجب خسارات فراوان اقتصادی می‌شد (شکل ۲). نگه‌داری پیشگیرانه بدین صورت انجام می‌شود که براساس یک برنامه‌ریزی مشخص برای هر قطعه، یک زمان بازرسی در نظر گرفته شده و چنانچه قطعه نیاز به تعویض یا تعمیر داشت، این امر صورت می‌گیرد تا کل سیستم یکباره دچار از کار افتادگی نشود (شکل ۳). از جمله اقداماتی که در نگه‌داری توربین‌های بادی انجام می‌شود می‌توان به تعویض روغن، فیلتر روغن و همچنین تنظیم سفتی پیچ‌ها با گشتاورسنج اشاره کرد. گفتنی است قطعات براساس عوامل محیطی ممکن است پیش از زمان تعیین‌شدهٔ بازرسی معیوب گردند، به‌همین دلیل باید بازرسی به‌صورت مداوم انجام و وضعیت قطعه بررسی شود تا از بروز خرابی‌های جدی جلوگیری به‌عمل آید. به این روش نگه‌داری بر مبنای وضعیت[2] اطلاق می‌گردد. نگه‌داری بر اساس وضعیت با استفاده از داده‌های دریافتی از دستگاه‌های اندازه‌گیری و تحلیل و بررسی این داده‌ها صورت می‌پذیرد [۳].

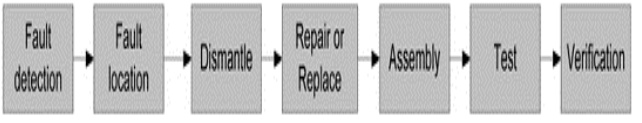
۳. روش‌های پایش وضعیت توربین‌های بادی

برخی از عیوب از جمله ایجاد خوردگی، سوراخ و جز این‌ها، که در توربین بادی رخ می‌دهند، با چشم و بدون نیاز به تجهیزات قابل تشخیص‌اند؛ حال آنکه بسیاری دیگر، از جمله ایجاد ترک در پره‌ها، اتصال کوتاه در ژنراتور و گرمای بیش از حد جعبه‌دنده و جز این‌ها که سبب از کار افتادن کل سیستم می‌گردند، بدین صورت قابل تشخیص نبوده و این امر اهمیت پایش وضعیت توربین بادی را در دوره‌های زمانی مشخص نشان می‌دهد. در شکل ۴ توزیع میزان خرابی توربین‌های بادی به‌ترتیب ظرفیت تولید انرژی الکتریکی نمایش داده شده است [۴].

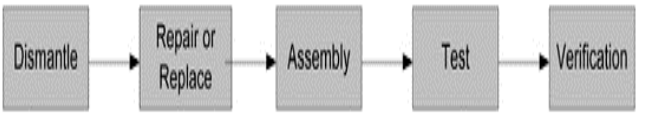


شکل ۱. اجزای اصلی توربین بادی [۲]

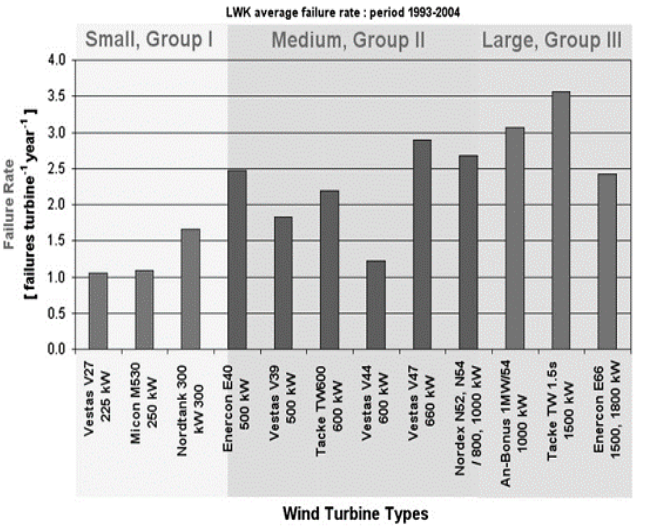
۱) پره، ۲) روتور، ۳) جعبه‌دنده، ۴) ژنراتور، ۵) یاتاقان، ۶) سیستم انحرافی، ۷) برجک



شکل ۲. روند یک برنامهٔ نگه‌داری اصلاح‌کننده [۳]



شکل ۳. روند یک برنامهٔ نگه‌داری پیشگیرانه [۳]



شکل ۴. توزیع میزان خرابی توربین‌های بادی که به‌ترتیب ظرفیت تولید انرژی الکتریکی آنها مرتب شده است [۵]

سیستم پایش وضعیت[۳] توربین بادی ترکیبی از حسگرها و تجهیزات تحلیل سیگنال است که نشان‌دهندهٔ وضعیت هر یک از قسمت‌های سیستم براساس یکی از روش‌ها یا تکنیک‌هایی از جمله آنالیز ارتعاشات، آنالیز صدا، آنالیز روغن، اندازه‌گیری کرنش و ترموگرافی می‌باشد. در توربین بادی از این روش‌ها بیشتر برای بررسی قسمت‌هایی چون پره‌ها، جعبه‌دنده، ژنراتور، یاتاقان‌ها و برجک توربین استفاده می‌گردد. این بازرسی به دو صورت درون‌خطی (جمع‌آوری داده‌ها و بازرسی وضعیت قسمت‌های مختلف به‌صورت لحظه‌ای انجام می‌گردد) و برون‌خطی (داده‌ها در بازه‌های زمانی مشخص توسط تجهیزات اندازه‌گیری به‌دست می‌آیند) صورت می‌گیرد [۶].

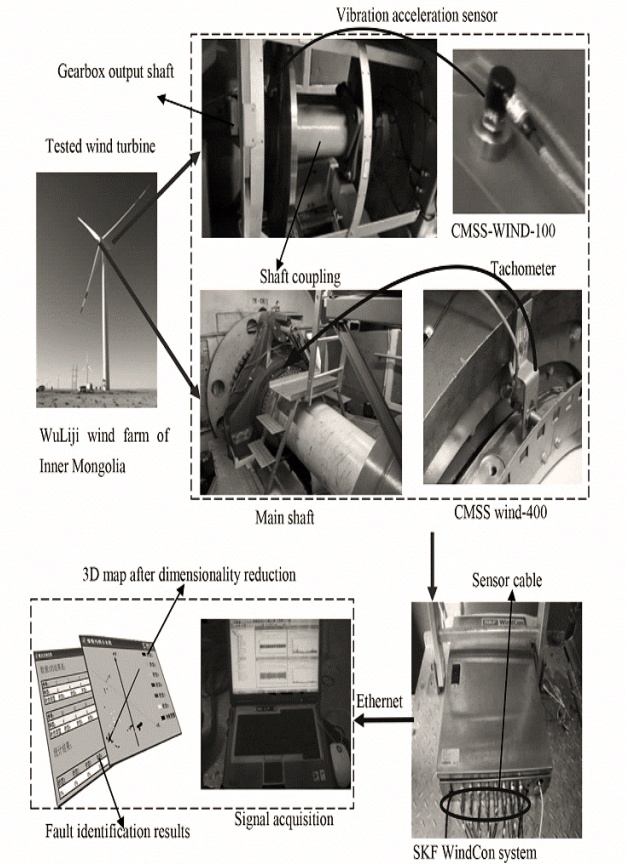
۳-۱. روش‌های پایش وضعیت به‌کمک آنالیز ارتعاشات

این روش‌ها از جمله محبوب‌ترین روش‌هایی هستند که به‌خصوص برای پایش وضعیت بخش‌های دوار مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای فرکانس‌های مختلف حسگرهای متفاوتی نیاز است که می‌توان از جمله این حسگرها به ترانسفورماتورهای موقعیت اشاره کرد که برای فرکانس‌هایی با رنج کم، حسگرهای سرعت که برای فرکانس‌هایی با رنج متوسط و حسگرهای شتاب‌سنج برای فرکانس‌هایی با رنج بالاتر هستند، اشاره داشت. استفاده از روش آنالیز ارتعاشات در پایش وضعیت جعبه‌دنده و یاتاقان‌ها نیز بسیار مرسوم است. به‌منظور آنالیز سیگنال ارتعاشی، روش‌های متعددی نظیر تبدیل فوریه سریع[۴] و تبدیل موجک[۵] وجود دارد. تبدیل موجک به دو روش تبدیل پیوسته و تبدیل گسسته تقسیم می‌گردد؛ اطلاعات موجود در موجک پیوسته بسیار زیاد و اضافی است و منجر به افزایش بی‌دلیل بار محاسباتی می‌گردد، لذا از موجک گسسته که از لحاظ پیاده‌سازی بسیار ساده‌تر و بهینه‌تر است استفاده می‌شود. شکل ۵ نمونه‌ای از روند کلی دریافت و پردازش سیگنال از سیستم انتقال توان یک توربین بادی را نمایش می‌دهد. همچنین حسگرهایی که معمولاً برای داده‌برداری به‌منظور عیب‌یابی به‌کمک آنالیز ارتعاشات مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت اند از: شتاب‌سنج، سرعت‌سنج، میکروفون و جز این‌ها [۷].

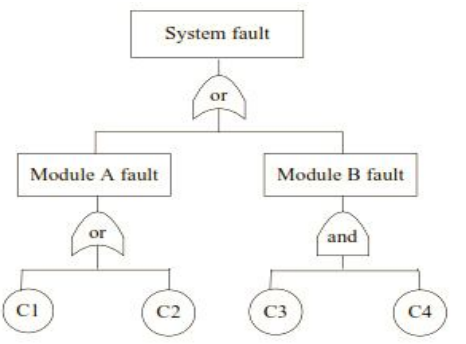
۳-۲. روش تجزیه و تحلیل درخت عیب[۶]

یکی از محبوب‌ترین روش‌هایی که به‌صورت دیاگرام تمامی دلائلی که ممکن است منجر به بروز خرابی شوند را به تفصیل توضیح می‌دهد، روش درخت عیب است. همچنین این روش

سبب می‌شود اهمیت هر یک از دلائل اولیه‌ای که ممکن است سبب بروز عیب شوند، مشخص گردد تا بتوان برنامه‌ریزی دقیقی برای انجام امور نگه‌داری پیشگیرانه به‌خصوص با توجه به شرایط غیرقابل پیش‌بینی محیطی انجام داد. تمامی این پردازش‌ها شامل دو بخش اصلی است: انتخاب داده‌های مورد نیاز بخش پایش وضعیت جهت تجزیه و تحلیل از بین تعداد بیشماری داده و اینکه هر یک از این داده‌ها چه تأثیری بر متغیرهای پایش وضعیت کل سیستم دارند. هر دو این موارد تأثیر شایانی بر دقت مدل ارائه‌شده دارند. در مدل درخت عیب از دو عبارت منطقی "و" و "یا" استفاده می‌گردد تا به‌کمک آنها بتوان دلیل اصلی خرابی را از میان تعداد زیادی از عوامل یافت (شکل ۶).



شکل ۵. پلت‌فرم دریافت سیگنال و تشخیص عیب به روش آنالیز ارتعاشات [۸]



شکل ٦. نمودار درخت عیب [۹]

تحلیل با استفاده از درخت عیب روشی قابل درک، منطقی و کاربردی در عیب‌یابی جعبه‌دنده توربین بادی است. درخت عیب با تحلیل عیوب ایجادشده در اجزای جعبه‌دندهٔ توربین بادی به توضیح دلائل بروز این عیوب پرداخته و سپس یک سیستم

متخصص که بر پایهٔ تحلیل‌های درخت عیب استوار باشد برای تشخیص این عیوب به‌کار گرفته می شود [۹]. تحلیل درخت عیب یک روش مبتنی بر بیان گرافیکی است که دلائل بروز عیب در سیستم را از کل تا جز به‌صورت شجره‌نامه‌ای بیان می‌کند. درخت عیب به شرح پارامترهای متنوعی چون دلائل، پیامدها، میزان احتمال و اهمیت بروز یک عیب می‌پردازد.

۳-۳. روش آزمایش فراصوت

از این روش به‌صورت گسترده برای ارزیابی وضعیت برجک و پره‌های توربین بادی استفاده می‌شود. روش فراصوت اطلاعات خوبی از شرایط ساختارهای سطحی و زیرسطحی به‌دست می‌دهد. نشر امواج فراصوت، سبب به‌دست‌آمدن تخمینی مناسب از محل و نوع عیب می‌گردد که با توجه به این تخمین می‌توان روشی قابل قبول برای رفع آن انتخاب کرد. همچنین با استفاده از الگوریتم تحلیل سیگنال متشکل از دو روش به نام‌های زمان - فرکانس و روش تبدیل موجک وان اطلاعات بیشتری استخراج کرد [۱۰].

۳-۴. روش نشر آوایی[۷]

آزاد سازی سریع انرژی کرنشی و ایجاد موج های الاستیک به‌هنگام تغییر ساختار ماده رخ می‌دهد که این امر با استفاده از روش نشر آوایی قابل تشخیص می‌باشد. همچنین برای تشخیص ایجاد یا رشد ترک مهمترین روش مورد استفاده نشر آوایی است که سبب می‌گردد این عیب زودتر از روش آنالیز ارتعاشات قابل تشخیص باشد. همچنین این روش برای پایش وضعیت یاتاقان‌هایی که تحت بارهای شعاعی با سرعت‌های مختلفی در حال حرکت‌اند مورد استفاده قرار می گیرد [۱۱].

۳-۵. روش آشکارسازی عیب به‌وسیلهٔ رادیوگرافی

این روش با استفاده از عکس‌های اشعهٔ ایکس ساختار کلی قسمت‌های مختلف سیستم را مورد ارزیابی قرار می‌دهد، اما امروزه در امر عیب‌یابی توربین بادی بسیار محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. این در حالی است که این روش یکی از دقیق‌ترین روش‌هایی است که تاکنون ابداع شده و توانایی گرفتن عکس از ذراتی را دارد که فاصلهٔ آنها حتی کمتر از ۵۰ میکرون می‌باشد. همچنین عکس‌هایی که با اشعهٔ ایکس گرفته می‌شود می‌توانند بسیار دقیق جابه‌جایی لایه‌های ساختاری و وجود ترک را در پره‌های توربین بادی نشان دهند [۱۲].

۳-۶. روش ترموگرافی

این روش غالباً برای پایش وضعیت بخش‌های الکتریکی توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این تکنیک تنها به‌صورت برون‌خطی انجام می‌شود و طرز کار آن بدین‌صورت است که با کمک یک دوربین مادون قرمز از نقاط مختلف قطعات یک سیستم، عکس یا فیلم گرفته و نقاط با دماهای گوناگون با رنگ‌های مختلف نمایش داده می‌شوند. نکتهٔ مهم اینکه نقاطی که با دمای بالاتر وجود دارند بیشتر مستعد وجود عیب می‌باشند. با استفاده از این دوربین‌های مادون قرمز می‌توان توزیع دما روی سطح پره‌های توربین بادی را به‌دست آورد. سپس با استفاده از عکس یا فیلم حاصله که نمایشگر نقاط با دماهای مختلفی روی پره‌ها می‌باشد به‌وجود یا عدم وجود ترک روی پره‌های توربین بادی پی‌برد [۱۳].

۴. روش پردازش داده‌ها

صرف‌نظر از اینکه چه تکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، توانایی یک سیستم پایش وضعیت به دو عامل اساسی وابسته است: تعداد و نوع حسگرها و روشی که جهت ساده‌سازی و استخراج اطلاعات مهم از بین تعداد زیادی از سیگنال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک وسیلهٔ اندازه‌گیری الکترونیکی، داده‌ها را فراهم کرده و به اپراتور یا سایر سیستم‌های کنترلی این داده‌ها را توزیع می‌کند. نحوهٔ ایجاد این داده‌ها بدین‌صورت است که متغیرهای مورد نیاز (از جمله ولتاژ، دما و جریان در یک مدار) اندازه‌گیری شده و سپس این داده‌ها به‌صورت سیگنال درمی‌آیند. برای اینکه کار عملکرد بهتری داشته باشد، یک بخش تصمیم‌گیری در سیستم پایش وضعیت قرار داده می‌شود تا تعداد و نوع قابل قبولی از حسگرها مورد استفاده قرار گیرد. سپس روش‌های بهینه‌سازی با استفاده از پردازشگرهای دیجیتال برای پردازش سیگنال ها به‌کار می‌رود تا علاوه بر پردازش سیگنال، مرتب‌سازی آنها نیز صورت گیرد. امروزه با استفاده از شبکهٔ اینترنت و سیستم بی‌سیم، داده‌ها از سرور یک مزرعهٔ توربین بادی به مرکز کنترل فرستاده می‌شوند. این داده‌ها

توسط یک کامپیوتر جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل می‌شوند تا عملکرد کلی توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گیرند [۱۴].

۵. نتیجه‌گیری

بهره‌گیری از برنامه‌های نگه‌داری و تعمیرات سبب جلوگیری از خرابی کلی سیستم و به‌تبع آن جلوگیری از زیان مالی فراوان می‌شود. برای هر یک از قسمت‌های مختلف توربین بادی، روش‌های متفاوتی به‌منظور پایش وضعیت به‌کار گرفته می‌شود. در این مقاله، مزایا و معایب برخی از این روش‌ها بررسی شد. بر این اساس، در روش نشر آوایی به‌علت بررسی تغییرات ساختار ماده به‌سبب آزادسازی انرژی کرنشی، تشخیص عیب در مقایسه با روش آنالیز ارتعاشات دقیق‌تر و سریع‌تر است. روش آزمایش فراصوت نیز خصوصیات دقیقی از شرایط ساختارهای سطحی و زیر سطحی ماده به‌دست می‌دهد که از این اطلاعات می‌توان برای ارزیابی محل و نوع عیب در برجک و پره‌های توربین بادی به‌صورت تخمینی استفاده نمود. در عیب‌یابی به روش رادیوگرافی، جابه‌جایی لایه‌های ساختاری و وجود ترک در پره‌های توربین بادی توسط تصاویر اشعهٔ ایکس به‌طور دقیق نمایان می‌گردد. همچنین در عیب‌یابی توسط ترموگرافی، علاوه بر تشخیص موجودیت ترک روی پره‌ها، بخش‌های الکتریکی توربین بادی هم مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای پیش‌بینی طول عمر و حداکثر میزان تنش قابل تحمل در پره‌های توربین بادی می‌توان از روش اندازه‌گیری مقدار کرنش استفاده نمود. نکتهٔ شایان ذکری که تاکنون محققان توجه کمتری نسبت به آن داشته‌اند، این است که برای هر یک از قسمت‌های توربین بادی با استفاده از تکنیک‌هایی چون تحلیل حالات خرابی و آثار آنها میزان بروز هر یک از عیوب اجزاء مشخص گردیده و سپس می‌توان به بهینه‌سازی آن اجزا پرداخت تا کمتر دچار آسیب شوند.

٦. مآخذ

[1] Gellermann, T., *Requirements for Condition Monitoring Systems for Wind Turbines*, AZT Expertentage, Allianz .2013.

[2] de Novaes Pires G, Alencar E, Kraj A. *Remote conditioning monitoring system for a hybrid wind diesel system-application at Fernando de Naronha Island*,Brasil. http://www.ontario-sea.org (19-07-10).

[3] M. Ben-Daya, S.O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic, D. Ait-Kadi, *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, Springer-Verlag London, 2009.

[4] J. Knezevic, *Reliability, Maintainability, and Supportability: a Probabilistic Approach*, McGraw-Hill, 1993.

[5] P.J. Tavner, F. Spinato, G.J.W. van Bussel, E. Koutoulakos, *Reliability of Different Wind Turbine Concepts with Relevance to Offshore Application*, Brussels European Wind Energy Conference, April 2008.

[6] Fausto Pedro García Márquez, Andrew Mark Tobias, Jesús María Pinar Pérez, Mayorkinos Papaelias, *Condition Monitoring of Wind Turbines: Techniques and Methods,* Renewable Energy, Vol. 46, PP. 169-178, 2012.

[7] Z. Hameed, Y.S. Hong, Y.M. Cho, S.H. Ahn, C.K. Song, *Condition Monitoring and Fault Detection of Wind Turbines and Related Algorithms: A Review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, No. 1, PP. 1-39, 2009.

[8] Baoping Tang, Tao Song, Feng Li, Lei Deng, *Fault Diagnosis for a Wind Turbine Transmission System Based on Manifold Learning and Shannon Wavelet Support Vector Machine*, Renewable Energy, Vol. 62, PP. 1-9, 2014.

[9] Zhu Xuejun, Chen Yu, *The Research of Intelligent Fault Diagnosing Methods Based on FTA*, Microcomputer Information, Vol. 21, No. 6, PP. 123-124, 2005.

[10] Yang Zhi-Ling, Wang Bin, Dong Xing-Hui, Liu Hao, Expert *System of Fault Diagnosis for Gear Box in Wind Turbine,* Systems Engineering Procedia, Vol. 4, PP. 189-195, 2012.

[11] M. Castaings, P. Cawley, *The Generation, Propagation and Detection of Lamb Waves in Plates Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 100, No. 5, PP. 3070-7, 1996.

[12] E. Jasiuniene, R. Raisutis, R. Sliteris, A. Voleisis, A. Vladisauskas, D. Mitchard, and M. Amos, *NDT of Wind Turbine Blades Using Adapted Ultrasonic and Radiographic Techniques*, Insight- Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 51, No. 9, PP. 477-83, 2009.

[13] R. Raisutis, E. Jasiuniene, R. Sliteris, A. Vladisauskas, *The Review of Non-Destructive Testing Techniques Suitable for Inspection of the Wind Turbine Blades*, Ultragarsas (Ultrasound), Vol. 63, No. 1, PP. 26-30, 2008.

[14] G. Levitin, *Genetic Algorithms in Reliability Engineering*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91, No. 9, PP. 975-6, 2006.

پی‌نوشت

1. hub
2. condition based maintenance
3. condition monitoring systems
4. fast- Fourier transform
5. wavelet transform
6. fault tree analysis
7. acoustic emission