

Condition Monitoring System für die Zustandsüberwachung der rotierenden Komponenten einer Windkraftanlage

Estefania ARTIGAO *, Tasos CHATZILOUKAS**,
 Jesus Antonio JIMENEZ GARRIDO ***, Lars SCHUBERT ****, Slim SOUA ***,
 Hannelore WESSEL-SEGEBADE *****
 * Brunel University, Cambridge, Großbritannien
 ** Innora S.A., Koropi, Attiki, Griechenland
 *** TWI Ltd, Cambridge, Großbritannien
 **** Fraunhofer IKTS-MD, Dresden
 ***** DGZfP e.V., Berlin

Einführung

Derzeit sind die eingesetzten Verfahren zur Zustandsüberwachung von Windkraftanlagen äußerst zeitaufwendig und kostspielig. Auch erzielen diese Verfahren nicht immer die vom Betreiber gewünschte Zuverlässigkeit und betriebliche Effizienz. Berichte mit Überwachungsdaten von Windkraftanlagen beschränken sich auf wenige historische Fälle. Ganz selten liegen diese für bestimmte Sensoren, wie z.B. Schallemission, vor. Um dem entgegen zu wirken, soll in einem EU-Forschungsprojekt ein Verfahren zur Datenanalyse entwickelt werden. Dafür werden die Daten von drei Techniken integriert werden:

- Schallemission (AE),
- Operationelle Modalanalyse (OMA) und
- Motorstrom-Analyse (MCSA).

Herangehensweise

Diese drei Systeme wurden für die Entwicklung der Grundüberwachung wie folgt eingesetzt:

- MCSA am Generator,
- OMA an der Antriebseinheit (einschl. des Getriebes) und
- AE an der Hochleistungsachse.

Daten über den Strom, die Vibration und die Schallemission wurden über einen gewissen Zeitraum aufgenommen und zum Trainieren des Überwachungssystems verwendet. Für jede angewendete Technik wurden unterschiedliche Signalverarbeitungsverfahren eingesetzt, um die Betriebseigenschaften der Windkraftanlage zu bestimmen. Aus diesen während dieser Einführungsphase gewonnenen Eigenschaften wurde eine Signatur ermittelt, die sowohl das Verhalten von Generator, Getriebe und Welle der Windkraftanlage unter normalen

Betriebsbedingungen als auch Grenzwerte für bestimmte Belastungstrends widerspiegelt. Der Überwachungsprozess vergleicht dann aktuelle Datensätze mit den gespeicherten, die von der Basisstation in der Anfangsphase ermittelt und ausgewertet wurden.

Das Poster stellt die Entwicklung der Signatur der drei angewendeten Messverfahren und deren Anwendung an den drei genannten Komponenten (Generator, Antrieb einschl. Getriebe und Achse) einer WINDMASTER300 WT Anlage vor.

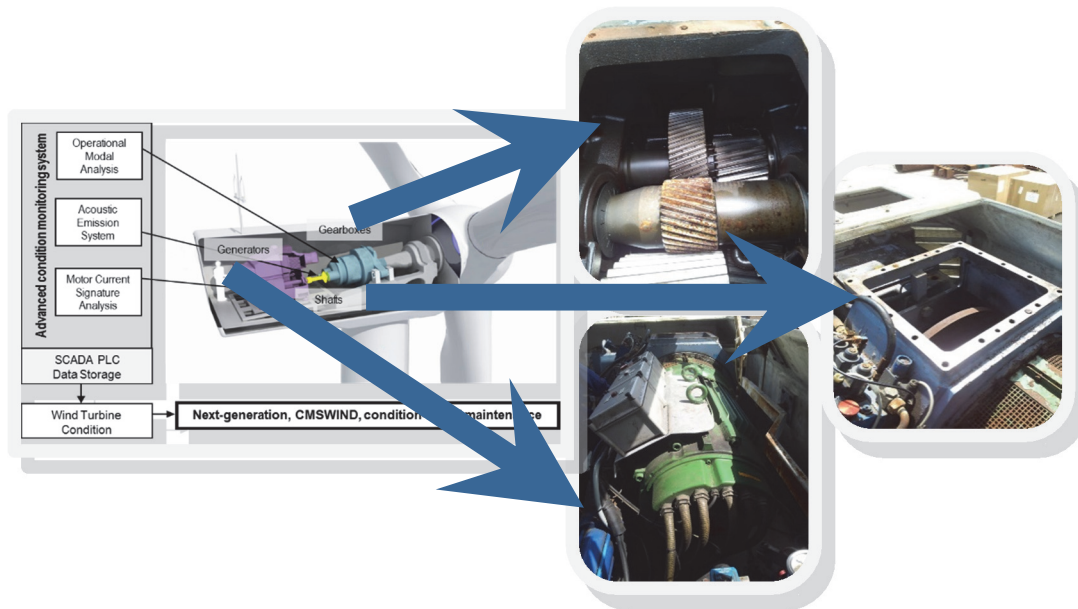


Abb. 1: CMSWind System angewendet bei einer WINDMASTER300 WT Anlage

Motorstrom-Analyse (Motor Current Signature Analysis; MSCA)

MCSA ist ein Verfahren zur Aufnahme des Motorstromes mit anschließender Signalverarbeitung und Signalanalyse zur Feststellung unterschiedlichster Fehlverhalten [2]. Das Prinzip, das sich hinter MSCA verbirgt, ist, dass unter der theoretischen Annahme fehlender Ober- und Unterwellen das Frequenzspektrum aus nur einer Spitze bestehen würde. Durch Identifizierung und Analyse der fehlerbezogenen Wellenanteile kann man den Zustand des Generatorstromes bestimmen.

Die unterschiedlichen Frequenzanteile, die von Störungen in Induktionsmaschinen herrühren, sind gut bekannt. Kurze Intervalle um diese durch Fehler verursachten Frequenzanteile herum werden beobachtet. Relevante Eigenschaften der beobachteten Intervalle werden markiert. Es wird eine Signatur entworfen, die als Basis für die Zustandseinschätzung dient. Ziel dieser Verlaufsanalyse ist es, während des Generatorbetriebes zulässige und nicht-zulässige Signalschwellen einzurichten.

Im Folgenden wird die für die WINDMASTER30 Windkraftanlage ermittelte Signatur für den Schadensfall einer gebrochenen Drehflügelstange dargestellt.

Die „Bins“- Einteilung (x-Achse) entspricht zehn unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Generators. „Crest factor“ (y-Achse) entspricht dem Mittelwert des Spitzenfaktors $\pm$ Standardabweichung für das ausgewählte Merkmal.

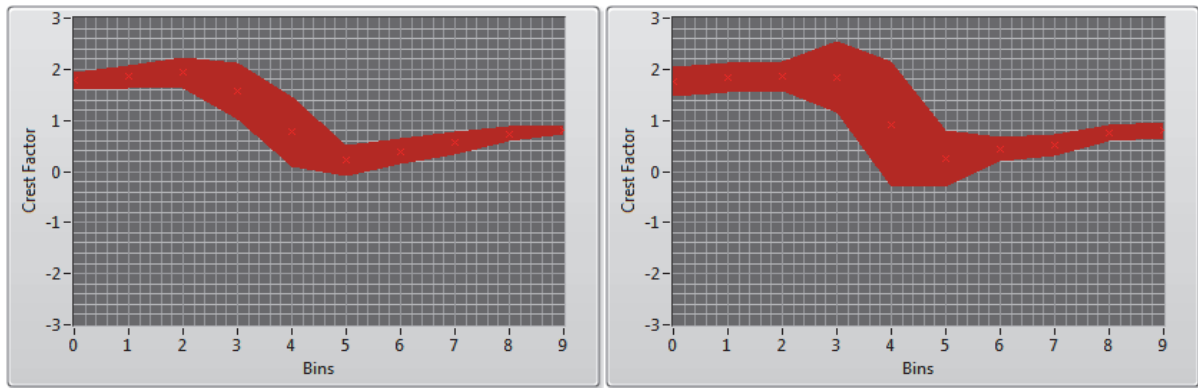


Abb. 2: Signatur des Fehlerintervalls des linken und rechten Seitenbandes der gebrochenen Drehflügelstange

Operationelle Modalanalyse (Operational Modal Analysis; OMA)

Die Operationelle Modalanalyse basiert auf der Extraktion natürlicher Frequenzen, die Ableitung der Struktur, die mit der jeweiligen Frequenz und der Modendämpfung korrespondiert [3]. Das Modenverhalten einer komplexen Struktur wie z.B. des Antriebes hängt nicht nur von Materialparameter wie Masse, Festigkeit und Dämpfung ab, sondern auch von den Auflagern, der Aufspannung und den Dämpfern. Wenn sich die Struktur ändert, verhalten sich die Frequenz, Gestalt und Dämpfung des Modes entsprechend.

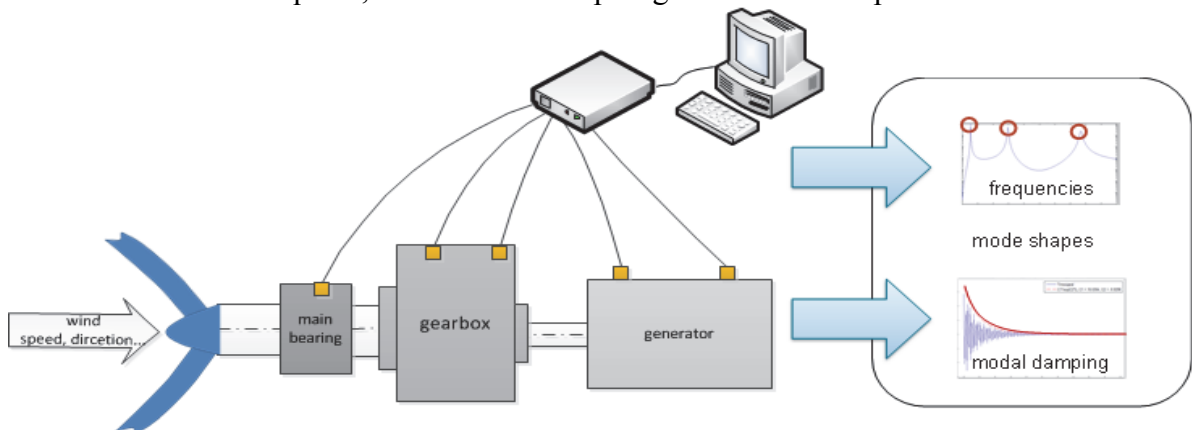


Abb. 3: Prinzip der operationellen Modalanalyse

Für die Durchführung der operationellen Modalanalyse wurde die Antriebseinheit an fünf Stellen mit dreiachsigen Beschleunigungssensoren ausgestattet. Die Abschätzung der Modelfrequenzen der Struktur wurde mit Hilfe der Frequenzbereichszerlegungsmethode am stillstehenden Antrieb durchgeführt. Im Falle einer rotierenden Windturbine bestehen die empfangenen Beschleunigungssignale aus Überlagerungen von Frequenzen wegen des Modalverhaltens und der Oberschwingungsfrequenzen hervorgerufen durch die Rotation der Achse, durch Antrieb und Auflager. Letzterer muss unbedingt berücksichtigt werden und sollte für eine erfolgreiche operationelle Modalanalyse unterbunden werden.

In den Experimenten, die bisher durchgeführt worden sind, beruht die Extraktion der Struktur nur auf unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten. Daher konnten einige Strukturmoden noch nicht für jede Geschwindigkeit ermittelt werden. Unterschiedliche Parameter (zum Beispiel die Signalleistung) in unterschiedlichen Frequenzbereichen (es wurden nur Strukturfrequenzen herausgefiltert) wurden berechnet und als Parameter für die Charakterisierung der Teststruktur eingesetzt. Der Einsatz der Überwachungsalgorithmen bei einer in Betrieb befindlichen Windkraftanlage erfordert eine angepasste Referenzdatenbank,

die unter realen Betriebsbedingungen erstellt wurde unter Berücksichtigung von Änderungen des Windes und anderen Umgebungseinflüssen.

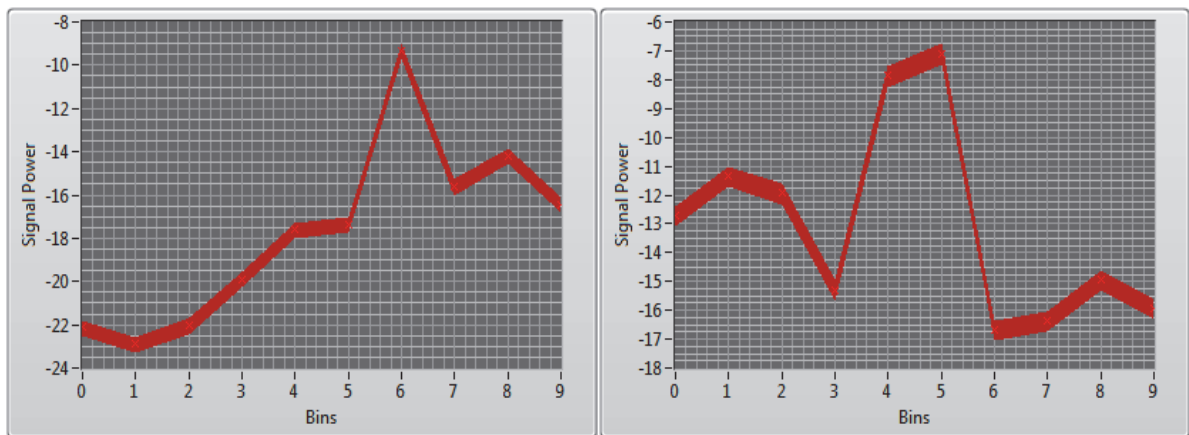


Abb. 4: Signalverlauf für die Eigenschaft “Signalleistung” für OMA für zwei Frequenzbereiche (links: $f = 10 \text{ Hz} - 20 \text{ Hz}$; rechts: $f = 67 \text{ Hz} - 83 \text{ Hz}$)

Schallemission (Acoustic Emission; AE)

Schallemission AE beruht auf der Erzeugung von kurzlebigen elastischen Wellen, die durch eine plötzliche Verlagerung der Beanspruchung im Material erzeugt wird. Wenn eine Struktur einem externen Erreger ausgesetzt wird (Änderung des Drucks, der Belastung oder der Temperatur), triggern örtliche begrenzte Quellen den Energieabfall in Form von Spannungswellen. Diese breiten sich an der Oberfläche aus und können so von Sensoren aufgezeichnet werden.

Um Schallemission zu untersuchen muss dem Untersuchungsobjekt keine zusätzliche Energie zugeführt werden; Schallemission lauscht einfach nach Energien, die vom Objekt ausgehen. Während des Trainingsprozesses formt der Grad an Schallemission-Aktivitäten während mehrfacher Belastungszyklen die Signatur-Entwicklung für die Hochleistungsachse. Diese Aktivität (wie auch in den vorherigen Methoden bestimmt durch Extraktion der Eigenschaften), die das Auftauchen von Fehlfunktionen bestimmt, wird zu einem späteren Zeitpunkt überwacht werden.

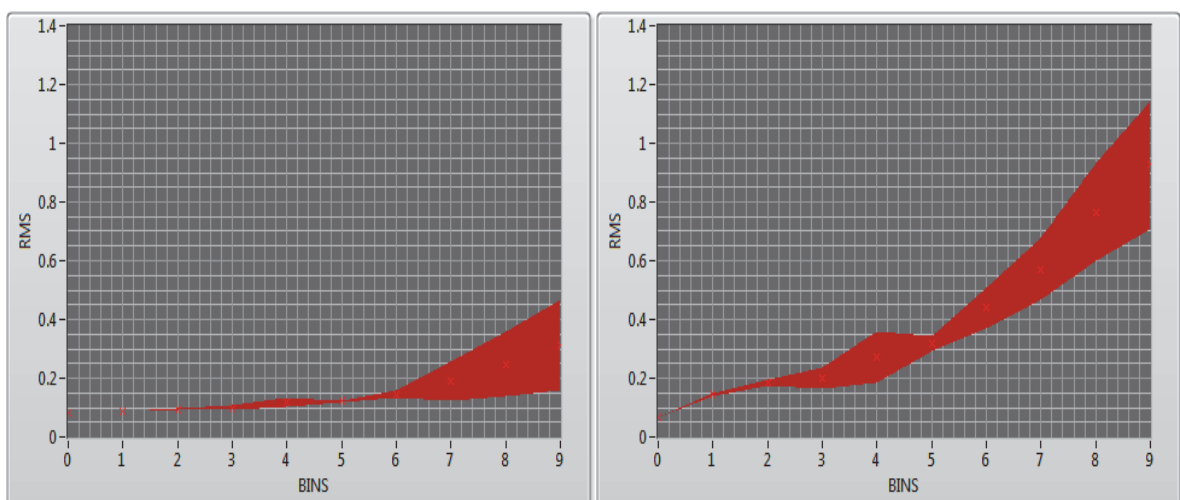


Abb. 5: AE-RMS-Signal Signatur für Niedrig- (links) und Hochleistungsachsen (rechts)

Zwei resonante Schallemissionssensoren wurden auf der Niedrig- und Hochleistungsachse der WINDMASTER300 Windkraftanlage montiert zur Extraktion der Eigenschaften und Entwicklung der Grundüberwachung. Bei der Eigenschaft, die in den obigen Ausdrücken gezeigt wird, handelt es sich um das RMS Signal. Es wurde mit 2 Mega Samples/s während 1 Sekunde aufgenommen. Dabei gibt der Wert der $\pm$ Standardabweichung des RMS die Grenzen für „normale“ Betriebsbedingungen für das untersuchte Bauteil an. Weitere Eigenschaften bezogen auf Fehlerdetektion wurden ebenfalls untersucht.

Hardware

Die für die Signalerfassung durch die drei beschriebenen Verfahren erforderliche Hardware wurde an die Erfordernisse des Projektes angepasst. Die Systemarchitektur verwendet mehrere Messwertaufnehmer-Module (MCSA, OMA und AE), die die analogen Sensoren mit einer Rate von bis zu 2MSPS auslesen. Jedes Modul fragt den Sensor/die Sensoren in einem bestimmten Zeitfenster ab, speichert die Daten temporär und überträgt sie über Ethernet zum Server. Für das Schallemissions-Modul war eine spezielle Entwicklung erforderlich. In diesem Fall wurden die Messwertaufnehmer an der rotierenden Hochleistungsachse befestigt. Die Notwendigkeit der Montage der Erfassungs-Hardware an rotierenden Teilen erfordert die Entwicklung von kundenspezifischer Hardware.

Spezifikation:

- Niedriger Stromverbrauch, einfacher Netzanschluss (Spitzenstromverbrauch unter 5 W; vor Ort erzeugt).
- Kleine Einrichtung (80x100x30 mm).
- Ethernet- und Wireless-Verbindung, die eine einfache, mit geringem Aufwand mögliche Installation mit bestehenden Ethernet-Netzwerken erlaubt.
- Möglichkeit der Digitalisierung des Signals mit einer Auflösung von 16 Bit in Nähe des analogen Messwertaufnehmers (Minimierung des elektrischen Rauschens unter schwierigen Umgebungsbedingungen wie z.B. im Maschinenhaus einer Windkraftanlage).
- 16 Kanal Analog-Digital-Wandler-Speicherkarte (200 kSPS/Kanal gleichzeitig).
- Oder 1 Kanal Hochgeschwindigkeits-Analog-Digital-Wandler-Speicherkarte (2MSPS).
- Vollständige Konfiguration an Ort und Stelle durch die Datenverbindung (Kanäle, Abtastrate, Abtastlänge, Ablaufkoordinierung, Eingabebereich, Verbindungseinstellungen).
- Präzises Zeitprotokoll, implementiert für eine einfache und präzise Synchronisation.
- Modulares System (kann einfach erweitert werden durch das Anfügen weiterer Module).
- Datenspeicherung in HDF5 (offene hierarchische Speicherorte).
- Programmierbares Triggern und Planen des Einsatzes für jedes Modul.

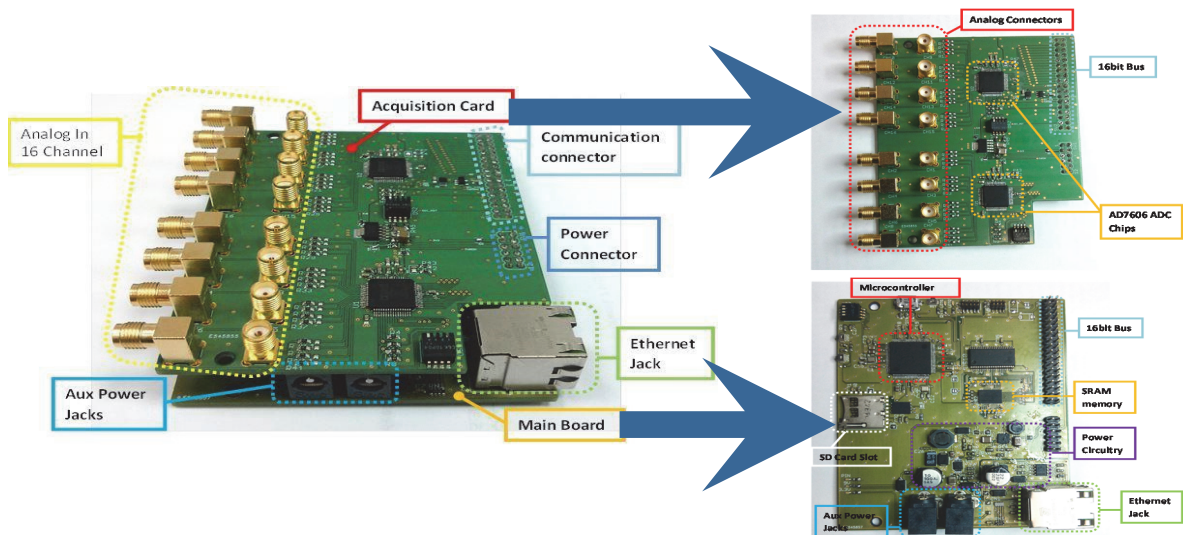


Abb. 6: Hardware maßgeschneidert entwickelt für das CMSWind-Projekt

Zusammenfassung

Da Überwachungsdaten von Windkraftkraftanlagen kaum vorhanden sind, befasst sich das Projekt zuerst mit der Entwicklung einer Messbasis. Dazu wird in der Anfangsphase ein Trainingsprozess durchgeführt, in dem die Daten, die für die Messbasis benötigt werden, ermittelt werden. Nachdem diese von den drei unterschiedlichen Verfahren aufgenommen wurden, wird jeder einzelne Datensatz dem korrespondierenden Schacht (= bin) zugewiesen. Diese Daten werden hochgerechnet. Sie definieren den normalen Betrieb der Windkraftanlage. Nachdem die Messbasis erstellt wurde, beginnt die Überwachungsphase. Neue Datensätze werden mit den Basisdaten verglichen. Befinden sich diese nicht innerhalb der gesetzten Grenzen, wird das Überwachungssystem einen Alarm auslösen und den gestörten Betrieb des entsprechenden Teiles der Windkraftanlage anzeigen.

Danksagung

Die oben beschriebenen Ergebnisse wurden im Rahmen CMSWind Projekts erarbeitet. CMSWind ist ein Europäisches Forschungs- und Entwicklungsprojekt, das teilweise im Rahmen des „FP7 Framework Research for SME Associations“ unter der Grant Agreement Nummer 286854 gefördert wird.

Referenzen

- [1] S. Soua, B. Bridge, L. Cebulski, T-H. Gan, “Statistical analysis of accelerometer data in the online monitoring of a power slip ring in a wind turbine”. IOP Publishing, Februar 2012.
- [2] Mohamed El Hachemi Benbouzid, “A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.5, Oktober 2000.
- [3] T. Jacob, M. Zundel, “Comparison between classic experimental modal analysis and operational modal analysis using the example of a wind turbine gear box”, VDI-Berichte Nr. 2168, 2012.