

風力機智慧維護系統介紹

Wind Turbine Maintenance System

劉瑞弘、吳宗亮、鐘裕亮

工業技術研究院 機械與系統所

摘要

風力發電機之智慧維護系統由於可即時監測機組的運轉訊號，並透過分析演算法則加以解讀，進行系統的診斷、故障的預測，對於風力機運轉的可靠性有關鍵性的影響。本文將針對目前風力機對於維護系統需求、故障原因、解決方案等議題進行介紹，並同時了解目前全球的發展現況，最後並會針對維護系統所能提供的經濟效益進行分析。

關鍵字：風力發電機、狀態監控系統、智慧維護系統

Abstract

Wind turbine maintenance system has a key influence to the availability of the wind turbine. By using online monitoring of the operational signals, diagnostic algorithms, and fault prediction, the wind turbine system can run more stable. This article focuses on the requirements, fault causes, and solution of the maintenance of a wind turbine. Meanwhile, the development status worldwide and economic effect of the maintenance system will also be introduced.

Keywords: Wind turbine, Condition monitoring system, intelligent maintenance system

1. 前言

近幾年來，風力發電產業蓬勃發展，也帶動了技術的突破與進步。為了擷取更多的風能資源，提升經濟效益、降低成本，風力機的高度越來越高，尺寸也越來越大。目前陸地上的主流產品已經以 MW 起跳，以 1.5MW~2MW 為主。離岸系統則以 3MW 為主流，更大的容量由 5MW 到 7.5MW 都已經出現。可觀察

到風力機的發展趨勢，走向大型化以及離岸系統。

大型化離岸化之後帶來的挑戰，就技術觀點來看，首先面臨的就是系統可靠度的問題。因為大型化之後，故障率也跟著提升[1]。從圖 1 中可觀察到，風力機系統的單機容量在超過 1000kW 之後，故障率明顯的高出許多，這就直接影響了可靠性。再就能源成本來看[2]，可看到如圖 2 所列的公式；能源成本 COE (Cost of Energy)是考慮許多參數計算而得，包含了：

- ICC: 初期支出成本(硬體/安裝/運送/施工)
- FCR: 固定費用分攤
- LRC: 重要元件替換成本(以平均來估算)
- O&M: 營運維護(維護/人力/耗材/替換等)
- AEP_{NET} : 淨年發電量(故障/停機損失成本)
- AEP_{Gross} : 實際年發電量

在這些參數中，與可靠性 Reliability 相關參數有：

- 可用率 Availability：直接影響發電量 AEP
- 維護成本 O&M
- 元件替換成本 LRC

也就是說，改善以上三個參數便可以提高可靠性並且降低發電成本。而這三個參數都正好與系統的維護管理有關；維護系統發揮功能，便可以提高可用率、降低維護成本、當然也減少了元件替換的成本。這在離岸系統上尤其顯著。離岸系統位於海上的惡劣環境，故障率比起陸地上的系統高出許多，因此除了必須對於結構本身、零組件品質、運轉控制上更加要求之外，整機的監控維護系統所扮演的角色就更為重要。因為大型系統一旦發生故障後，所需修復的時間會更長，除了施工吊掛等問題，等待備料的時間也長，種種因素影響之下，會損失更多的發電量，等於是提高了營運成本。所以，目前狀態監控系統 (condition monitoring system) 或稱智慧維護系統

(intelligent maintenance system)已經成為大型風力發電系統中，不可或缺的一部分。

本文以大型風力發電系統的維護系統為對象，進行介紹。以下將就故障問題進行探討，然後介紹目前全球的發展狀況，進而從中整理出未來可能的解決方案，然後將就維護系統所能得到的經濟效益進行範例分析，以評估維護系統的可行性。最後將對未來發展規劃做一個總結。

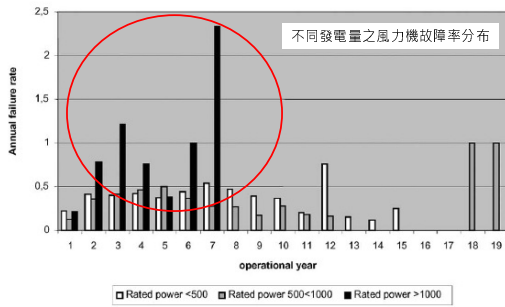


圖 1、不同發電量風力機故障率分佈[1]

$$COE = \frac{ICC * FCR + LRC}{AEP_{NET}} + O \& M$$

$$AEP_{NET} = AEP_{GROSS} * Availability * (1 - Loss)$$

COE Cost of Energy (\$/kWh)
 ICC Initial Capital Cost (\$)
 FCR Fixed Charge Rate (%/year)
 LRC Levelized Replacement Cost (\$/year)
 O&M Operations and Maintenance Costs (\$/kWh)
 AEP Annual Energy Production (kWh/year)

圖 2、能源成本計算公式[2]

2. 風力機故障分析

風力發電機製造廠商眾多，各廠牌各型號之風力機特性皆不盡相同，而且設置地點的氣候環境特性也可能有很大的差異，導致故障的原因以及比例分佈也不太一樣。不過大致上可整理出一些故障的基本可能：1)設計規格不符、2)製造品質不佳、3)場址風速過高超出設計等環境因素，系統如果存在這些問題，就是不穩定因子，會在風力機操作的某個時間點發聲，導致結構元件故障，影響可靠度。而故障的時間越長，損失發電量就越多，所需要付出的成本就越高。(故障成本=停機損失+維護成本)

德國的研究[3]中，從超過 1500 座風力機組 15 年的運轉數據中統計而得到的故障資訊，圖 3 是風力機中重要元件的故障比例分佈。從圖 3 中可發現，電子系統以及控制系統佔了最大的故障比例，表示電力

電機元件的故障次數最多。不過需要注意的是，這些電子元件雖然故障率高，但因為成本不高，備品易於取得，故障修復的時間很短，可以很快的讓系統重新啟動，繼續發電，對系統的影響其實不大。相反的，齒輪箱、傳動軸、發電機、葉片等這些大型元件的故障次數雖然少，比例很低，如果換算成每年的次數，平均一年的故障次數甚至不到一次。但是，一旦發生故障，從圖 4 可看到，需要很長的修復時間。因為像這些大型元件，如果沒有備品可以取得，就必須等上更長的時間，停機時間就會拉的更長(更多損失)，加上大型元件維護成本也高(運輸、吊掛成本)，對於系統營運的影響反而最嚴重。

研究中所顯示的統計結果，在不同風場中有相似的趨勢，在[4]的研究成果中，齒輪箱、傳動軸、葉片、發電機仍然需要較長的修復時間。此研究更進一步的整理得到：風力機系統中，75%的故障，只佔了 5%的停機時間；相對的，其餘 25%的故障，反而佔了 95%的停機時間。從這個以上研究與數據可瞭解到，如果要改善目前風力機故障對於系統所造成的影響，傳動系統(齒輪箱&軸承)、葉片、發電機應該是首要必須進行考慮的重要元件。

最後從風力機的故障原因來探討，從圖 5 可以發現，主要是元件缺陷(37%)以及系統控制問題(23%)所導致，可以得知大型元件在製造技術上的確還有很多需要克服的地方。而系統的控制也非常重要，不當的控制管理策略，反而使系統面臨故障的風險。其餘像是零件鬆脫(3%)、雷擊(3%)、結冰(3%)、電網故障(6%)、暴風(5%)等等也都是造成故障的主要原因，未來在技術之發展與改善空間還很大，可以針對這些原因來修正系統的設計。

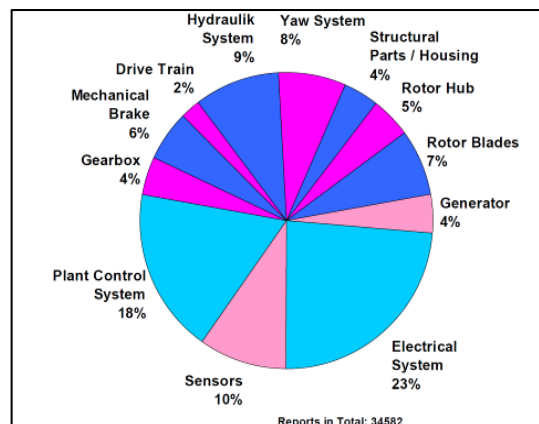


圖 3、風力機中各元件的故障比例[3]

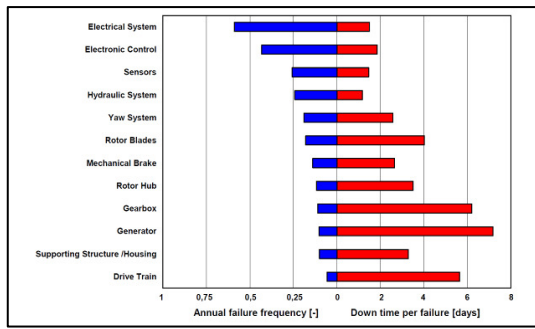


圖 4、風力機元件的故障頻率與修復時間[3]

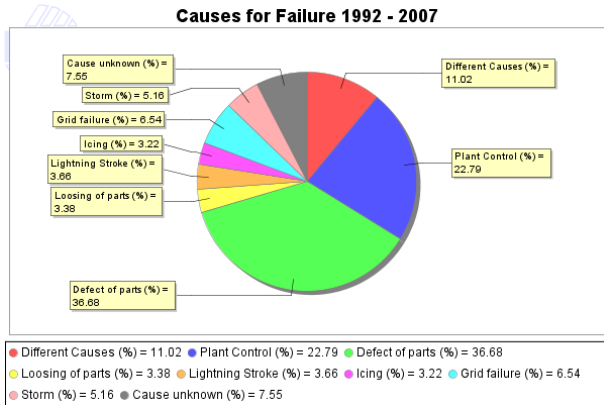


圖 5、風力機元件的故障原因 [3]

3. 風力機維護技術的重要性

為了提高風力機的可靠度，減少故障的發生次數，降低發電成本，可從兩個方向進行。第一是從上游改善；就是從系統設計製造技術上著手，針對故障率高且維護時間長的元件，了解其故障原因，進而改善設計或是製造流程與方法，以做出更可靠的元件，故障率自然可以減少。第二的方式就是在下游進行監控管理，避免故障發生。本文所介紹的維護系統，就是屬於第二種提升可靠度的方式。

而風力機系統的維護技術最大的優點就在於可以減少修正性維護次數。透過對系統的即時診斷，可以知道目前系統各元件的狀態，得知是否需要進行維護檢查。這樣一來，就不需要以固定週期的方式進行維護，可以視目前狀況判斷，降低了現場維護的次數，也就是降低維護成本。如圖 6 所見，預測維護不需像定期維護那樣以固定週期的時間進行維護。並且在故障發生點之前就對系統提出警告，避免重大零件故障的更換。一旦齒輪箱、葉片、發電機這類的大型重要元件故障損壞，那麼所損失的金額都將以千萬台幣計，可知減少修正性維護技術的重要性與好處。透過維護系統的預知技術，就可以在故障發生之前，通

知管理人員，先做好檢修之後，再視情況運轉。這也避免了因為元件設計不當、製造不良、或是承受過高的負載而可能產生的未預期故障。

不過就風力機的維護技術來看，與一般傳統設備有很大的不同之處。大型風力機屬於不易接近的設備，陸域風力機的機艙高度至少六七十公尺，維修不易，維護起來所需要的時間成本也就提高。尤其在離岸系統更能看出風力機維護的特殊性，因為離岸系統位於海上，海象氣候難以預測，不是說要維護就能夠派遣維修人員前往處理的。因此，這也突顯了風力機系統維護技術所更須具備的特性：診斷結果的正確性。因為一旦判斷錯誤，反而會有反效果，造成維修人力的派遣以及不當停機所造成的損失。

圖 7 為目前一般風力機維護系統於風力機內部的配置架構，維護系統(CMS, Condition Monitoring System)位於機艙，接收感測器所傳來的元件運轉負載訊號(Sensor cables)，然後透過網路傳輸的方式，將資訊傳遞給位於塔底的控制器(WEC Controller)。而為了能夠達到更完整的訊號監控，維護系統會比原本的監控系統需要更多的訊號回受。因此，必須再重要元件上，安裝必要的感測器，以得到更多更有用的資訊，協助維護系統進行故障的判斷。如圖 8 所示，就是一個維護系統可能必須要在風力機上額外安裝的感測器與裝設位置。從傳動系統的低速軸、齒輪箱、高速軸、以及發電機等等，都必須安裝感測器。

圖 9 所列為現有及未來的監測診斷系統所具有的功能及所爭取的應變時間，具有診斷及狀態模擬的系統 (Diagnostic and condition monitoring)，可以於元件損壞時發出警示 (Warning) 之後停機 (Alarm)，爭取預警時間中等，具有潛在損壞診斷的系統，多出注意 (Caution) 的階段，預警時間可以前推，提前進行檢修/維護規劃，防止無預警停機。

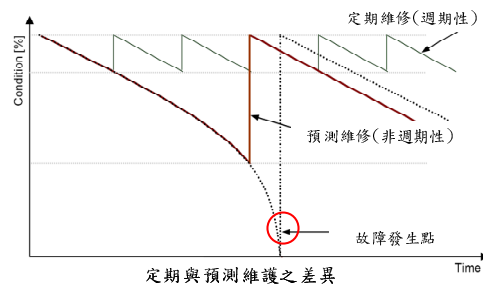


圖 6、定期維護與預測維護差異

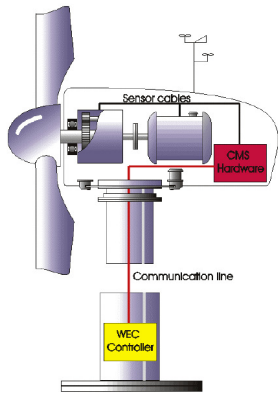


圖 7、維護系統風力機系統的關係[5]

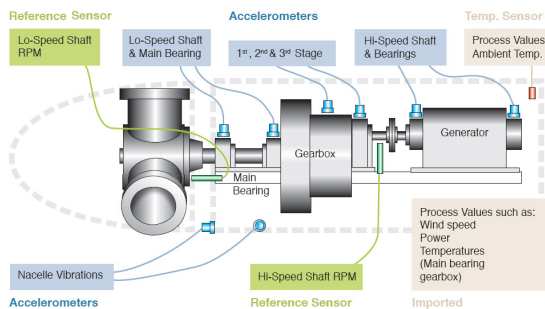


圖 8、維護系統感測器設置[6]

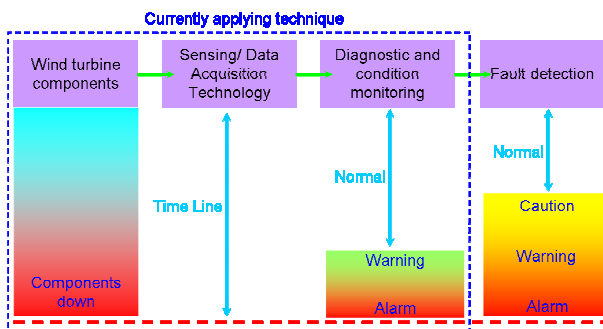


圖 9、預知診斷系統爭取之預警時間

4. 全球發展現況

風力機維護技術雖然比起其他風力機中的各重要技術發展的慢，但由於維護技術在其他傳統大型設備業也都是必須的技術。因此，可做為基礎進行學習修正，發展出合適於風力機的技术。從全球發展的現況資訊，也可以看到許多傳統設備監控大廠也都切入風力機維護市場，開發相關產品。表一整理了目前國際上監控系統商在風力機上的產品概述。

美商 GE 經由收購 Bently Nevada 獲得超過 50 年的 CMS 建置的經驗，源自 Bently Nevada 的 Trendmaster Pro 模組，提供優化的掃描式資料擷取選

輯及潛在損壞預警 (early detection of potential failures) 功能，進行維修/保養最佳規劃，並替換 walk-around programs，提昇整體監測系統效能。

丹麥 Brüel & Kjaer 為一經過認證的 CMS 軟、硬體設計製造商，此 CMS 主要被應用於風力機的監控診斷上，B&K 的專長為提供穩定且範圍廣的遠端即時監控風力場，並以振動診斷專家的豐富經驗進行監控，針對異常的重要風力機元件特徵，期能早期預知，其著名產品為 PULSE Platform 及 Test and Data Management；前者為噪音和振動分析平台之基礎軟體模組，其模組內容包括 FFT 分析及時域訊號擷取；後者為對擷取的訊號量測值進行資料管理，以利後端分析及元件性能趨勢建立。

德商 SKF 致力於軸承、潤滑系統及油封部件設計、安裝及維護系統開發上，憑藉對轉動機械超過 100 年的經驗，SKF 開發出 @ptitude Asset Management System 為其產品主軸，軟體的部分有三套：@ptitude Analyst、@ptitude Inspector 及 @ptitude Observer，結合分析技術、量測資料管理、專家診斷經驗及趨勢分析，提供使用者一決策判斷的參考。

丹麥 Roving Dynamics 主要目標為建立風力場預知診斷的解決方案，其硬體（各式感測器）採用市場上於風力機產業中經過多年驗證的標準件（如 Siemens hardware platform），輔以 Roving Dynamics 的產品 OPENpredictor，此產品整合訊號處理單元 and 已申請專利的 AutoDiagnosis™，其目標為將風力機組維護規劃最佳化，同時，提昇重要元件使用週期。Roving Dynamics 亦針對 40 種機械操作狀態及 20 種暫態狀態，不同的零組件及診斷方法以輪盤方式表示，其設備診斷輪盤圖(The Diagnostic Wheel)，如圖 10 所示。診斷零組件包括轉軸(Shaft)、轉子(Rotor)、葉片(Blades)、葉輪(Impellers)、聯軸器(Couplings)、齒輪箱(Gearboxes)及操作故障(Operational fault)。診斷分析方法包括時域分析、暫態特徵分析、頻譜分析、倒頻譜分析、階次追蹤分析、軸中心線檢測及固定百分比頻寬分析 10 種等。







德商 FAG 開發出整合專家經驗的 WiPro CMS 應用於風力機的診斷上，其特點為產品背後提供專家團隊 (The FIS service team) 支援及備詢，此團隊提供客戶資料分析診斷、訓練客戶自有的監控風力場、甚至代為監控風力場，這是 CMS 廠商中最接近 total solution 的服務。

德商 μSEN 提供一系列 Online Condition

Monitoring Systems，其中 VIBGUARD®、Omega Guard®、Ω-Guard、μ-Bridge、Ω-Expert 為主要產品，其產品著重於監測重要風力機元件（包括主要的軸承、變速箱和發電機）的早期故障診斷，"Ω-Guard®"and "VIBGUARD®"已經有裝置在超過 500 架（10 個不同的風力機系統商共 29 型）風力機的經驗，風力機功率由 250 KW 到 5 MW，μSEN 的對風力機動力單元的診斷依據主要有二，一是 μSEN 獨立架設的震動感測器所傳回之訊號，二是由現有風力機搭配使用的 condition monitoring system 所傳回之訊號，由 μSEN 所設計之邏輯判斷建立重要元件性能趨勢分析。

由一些主要廠商的監控系統中可以發現，現今使用於風力機上的監測診斷系統，對故障診斷和預防/預知保養的著墨較少，其原因不外乎為現今的診斷技術有二：一為倚賴專家豐富的經驗，由於風力機實為一相當複雜的迴轉機械系統，加上風場環境的不確定/不穩定性，通常專家經驗為最彈性也最能切中問題的解決方法，其問題在時程較長，而且無法整合於監測系統中，風力機運轉成本將大幅升高。二為建立專家系統、類神經網路式架構或是案件推理等運算法則，整合於 CMS 中進行長期持續的監測診斷，其問題有幾項：1、風力機操作樣本數仍屬太少；2、重要元件的故障特徵資料掌握於風力機系統商手中，非系統廠開發不易；3、需運用多個運算法則，始能涵蓋風力機處於多變環境中的動力特性。

表 1、國際監控系統商及其主要產品概述

	產品：Bentley nevada asset condition monitoring、技術：創新的線上即時資料擷取技術可同時監控超過數百個感測器。
	產品：VIBROCONTROL 6000 system、COMPASS 6000、技術：線上即時監控、故障診斷、適性監控策略 (adaptive monitoring strategy) 事件導向資料庫 (event-based data archiving concept)
	產品：SKF aptitude asset management system、技術：專業軸承、油封及換電 (Mechatronics) 整合監控診斷技術。
	產品：Wlnergy solution with OPENpredictor、技術：故障診斷、The Diagnostic Wheel。
	產品：WlPro、技術：故障診斷、預知保養技術。
	產品：Ω-Guard、μ-Bridge、Ω-Expert、技術：動力系統故障診斷、Body sound sensor 科技。

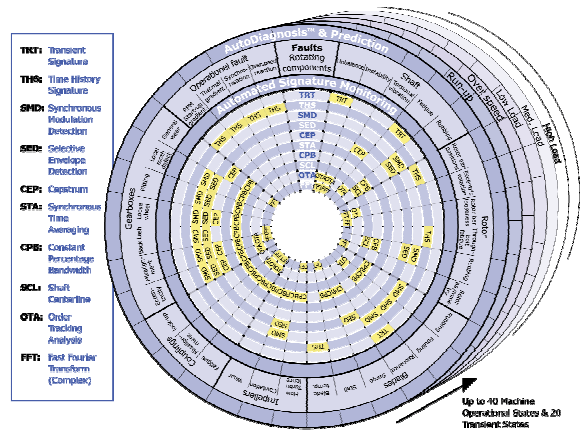


圖 10、設備診斷輪盤圖(The Diagnostic Wheel)

5. 維護系統的效益評估

如前段所描述的全球現況，目前維護系統技術已經有很多產品推出；但是，由於實績不多，加上風力機系統的故障並非說來就來，而且營運廠商也不會希望故障真的發生來測試維護系統。所以，目前的維護系統是否有其功效，還難以有統計數據來說明究竟是否有其作用。不過我們可以先從一些範例來觀察，維護系統可帶來的效益。透過兩個例子來計算智慧維護系統可以為風力機帶來的影響，以讓讀者能夠對維護系統有較深切的體認。

在荷蘭能源研究中心的研究報告[7]中對於齒輪箱軸承的故障所需的花費進行估算，初估約需要一萬六千五百歐元，粗略計算是七十五萬台幣。這其中的費用包含了：

1. 停止運轉時間造成的損失：包含訂購備品、運輸時間、以及實際的修復時間，約需 3780 歐元。
2. 人力成本：三個維修人員，每天工作八個小時，三天下來需要支出 4320 歐元。
3. 吊掛機具(Crane):租用費 3 天需要 2400 歐元。
4. 材料與耗材費用：6000 歐元。

就這樣的維護費用看來其實不會很高，尤其是軸承可能五年壞掉一次的話，平均分攤下來，每年的維護成本很低。但維護系統想要考慮的是：軸承的故障，可能導致齒輪箱甚至發電機的損壞，原本的小故障，變成了需要修復齒輪箱以及發電機的重大故障。齒輪箱的替換費用可能高達 1,500 萬台幣，以及 210 萬的大型吊掛機具費用。加上更長時間的修復所造成

的電力損失(30 天約 86 萬)與人力成本(10 天約 50 萬)，總計至少需要 1,846 萬元。如果以一台 2MW 風力機一整年可發的電力，位於滿發時數 3000 小時的風場，每度電 2 元來比較，一整年的收入為 1,200 萬。那麼，一次的齒輪箱故障就超過了一年的收入。所以，維護系統如果能夠在軸承故障初期就提出警告，那麼可以收到的效益其實不言可喻。

如果把這個狀況放到離岸式的風力發電系統上，由於所有等待時間、吊裝機具、陸地運輸、海上施工船、修復人力與修復時間等都至少是加倍的狀態下，支出的成本至少是陸域系統的兩倍，也就是可能至少需要 3,000 萬的費用，對於風場的營運影響就更大了。

6. 結論與未來發展規劃

本文從風力發電系統的可靠度需求為出發點，針對故障比例以及故障原因進行探討，進而說明了維護系統之於風力機的重要性。從全球目前的發展狀況，也可以了解到維護系統已經成為未來風力機系統上不可或缺的一個重要元件。透過效益的評估，更可以知道維護系統可以對系統營運帶來多少的影響；尤其離岸式系統，絕對是必須的元件。從台灣發展的角度來看，由於台灣目前已經有許多風場的設置，加上台灣的氣候環境特性與歐美不同，所產生的結果也有很大的差異性。所以，如果可以運用這些大量運轉的資訊，來進行分析處理，除了可以協助目前風場改善其運轉效率、提升系統可靠度之外；也可以發展出具特色的維護系統技術，在未來發展成為產品，應用到風力機的系統上。

致謝

本文為經濟部能源局補助之離岸式風力發電技術開發計畫(98-D0115)執行成果。感謝能源局的支援，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] Johan Ribrant; Lina Margareta Bertling, "Survey of Failures in Wind Power Systems With Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997–2005", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 1, MARCH 2007, p167-173
- [2] Christopher A. Walford, "Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind Turbine Operation and Maintenance Costs", SANDIA Report, March, 2006.
- [3] Berthold Hahn, Michael Durstewitz, Kurt Rohrig, "Reliability of Wind Turbines, Experiences of 15 years with 1,500 WTs", Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Germany.
- [4] ISET& TU Delft, "Reliability and downtime from two surveys including more than 15000 turbine years", <http://www.supergen-wind.org.uk/achievements.html>
- [5] Project report, "Advanced Maintenance and Repair for Offshore Wind Farms using Fault Prediction and Condition Monitoring Techniques (OffshoreM&R)", European Commission & ISET.
- [6] Bruel & Kjar Vibro, "Remote monitoring of wind turbines gives successful results", Uptime Magazine, Feb, 2007.
- [7] L.W.M.M Rademakers, H. Braam and T.W. Verbruggen, "R&D Needs for O&M Wind Turbines", ECN Wind Energy Report.
- [8] http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5322/is_200811/ai_n31170191/ (accessed on 2009/08/25)