

# 大型風力機故障模式分析

## Failure Mode Analysis and Diagnostics of Large Wind Turbine Systems

王彥傑、劉瑞弘

工業技術研究院 機械與系統所

### 摘要

大型風力機運轉過程中，面對不斷變化的風況，元件承受變化劇烈的負載情況下，可靠度與可用率難以維持。如何預防風力發電機事故發生，確保風力發電場安全穩定的運轉及降低維修成本，需要一套功能完善、性能穩定的狀態監測和故障診斷系統。本文除介紹維護技術的演進之外，也針對風力機傳動鏈中之齒輪箱、軸承、軸以及發電機等關鍵元件進行故障模式的介紹。透過訊號處理工具進行故障分析模擬來達成智慧故障的診斷預測，減少風力機故障的發生。

關鍵字：風力發電機、故障模式分析、智慧維護系統

### Abstract

*Large scale wind turbine surfer various wind condition during operation. It is not easy to ensure the achievable reliability and availability levels in such severe loading in turbine components. To keep the wind turbine in operation and reduce maintenance costs, implementation of condition monitoring system (CMS) and fault detection system (FDS) is paramount. This article introduced the gearbox, bearing, shaft, and generator critical components failure modes. From signal analysis of wind turbine diagnosis system*

*establish different kind of failure mode. Through signal analysis algorithm extract the useful characteristic information diagnose signal to complete the intelligent maintenance system with suitable algorithm.*

*Keywords: Wind turbine, Failure mode effect analysis, intelligent maintenance system*

### 1. 前言

大型風力發電機的技術發展已經數十年，歐美在系統設計已有非常成熟的經驗，因此目前陸上型風力機的運轉可靠度已經越來越高；就瑞典研究長期數十年的數據來看，可靠度超過 95%[1]，而德國以 15 年來超過 1500 座風力機組所進行的統計，其可靠度甚至高達 98% 以上高效能表現[2]，這代表了風力機整體設計與製造技術已經到達一定的水平。不過，隨著風力機大型化以及離岸化的趨勢，風力機面臨了更大的挑戰。除了製造、材料、運輸等等成本都會提高之外，海上惡劣以及不易接近的環境因素，使得離岸風力機組的維護與陸上型有很大的差異性。因為一旦系統發生故障，並非隨時都能夠進行維修，必須考慮海上氣候、波浪狀況、維修船時間是否能配合等；而且海上施工的成本比陸域高出許多倍，如果出動過於頻繁反而會拖跨風場的營運。因此，未來在技術

上的發展，除了元件及系統本身的設計精進之外，在維護端，製造廠商能夠提供營運商什麼樣的服務保證，便是未來風力機製造商提升全球市場競爭力的關鍵。

本文以大型風力發電系統的維護系統為對象，從感測、訊號分析與人工智慧演算法等技術發展下使得風力發電機設備的故障診斷有長足的進展，在風力發電機設備走向大型化、精緻化與複雜化的同時，風力發電機組透過知識庫及推論機制為基礎的專家系統取代傳統專家經驗維修，提供智慧化的故障分析和故障診斷，在設備尚未損壞前透過預兆診斷技術分析結果指派維護工作增加設備備品調度與安排的管理，加速找出故障原因並解針對故障做最有效的處理使得維護設備的過程更加符合經濟效益、對於營運商來說提升維修效率、減少故障的發生與增加可用率目的為提高風力發電機生產效率，而智慧維護系統的縮短了故障停機的時間，提高設備使用率，未來更希望朝向免停機運轉目標邁進。

## 2. 維護技術發展趨勢

機械設備在發生故障之前，其實或多或少都有衰減的現象發生，舉凡像是磨耗、灰塵、附著物、腐蝕、表面傷害、裂痕、過熱、振動、噪音等等都是故障之前設備早就存在的物理量。只是使用端通常都是等到問題發生之後才去檢討，沒能在故障之前就採取措施。就像過去風力發電機故障診斷維護方式是透過監控系統持續記錄資料，然後透過一些極限警告值的設定，最後發生不正常停機時，才依據專家經驗來進一步辨識故障成因，實質上並無法對系統的可靠度做出改善。因此，風力機維護方式的改變，才是繼續提升可靠度的關鍵點。

維護診斷技術其實從過去到現在，由於時代不同，對於其功能的要求也不一樣。大致上可以分為四個階段[3]。最早是屬於針對

故障發生後才處理的模式，稱之為 Reactive Maintenance，這是一開始最基本的想法，因為對於系統或維護技術還沒有很完整了解。後來，進步到預防式的維護 (Preventive Maintenance)，也就是透過時間週期 (time based)、FMECA 失效模式分析來看使用時間等資訊進行維護，已經有更進一步的判斷依據來進行維護；第三個階段便是狀態式監控 (Condition based maintenance, CBM)，是透過系統設備各個狀態訊號的監控，來進行運轉狀態的評估，進而做出維護的管理決策。目前大部分的風力機系統已經漸漸採用的就是 CBM 的方式，一般也稱之為 CMS (condition monitoring system)。不過未來的趨勢，應該是更進一步，進步到可以預測以及預防的維護概念，讓 CMS 能夠透過診斷工具的加入，變得更具有智慧，能夠對於設備提出健康狀況的建議，如同醫生給病人的診斷一樣，然後對症下藥，改善系統。

## 3. 風力機故障模式介紹

風力發電機系統中主要關鍵元件的感測器分布圖如圖 1 所示，其中又分為軸向振動與徑向振動偵測，主要放置於主軸承、齒輪箱與發電機的銜接處，以利監控系統釐清問題分析故障原因。

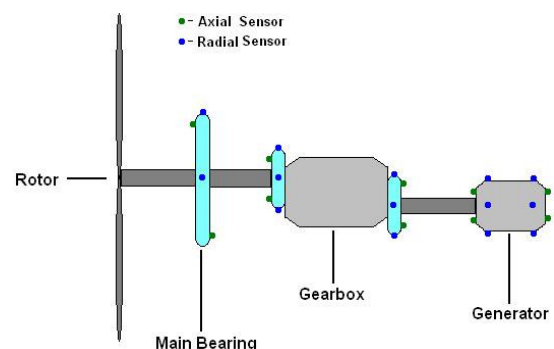


圖 1、風力機元件的感測器佈置區 [4]

風力機元件發生故障時透過頻譜分析取得震動訊號之外感測器類型如圖 2 分為震動分析、力矩分析、油品分析、溫度分析、音頻分析與定子電流分析，皆有各自的分析方式與優缺點，震動分析可靠度高，音頻分析可以對於低速狀態的偵測準確，定子電流偵測可以不需要額外感測器情況下快速分析發電機的狀態，所以優良的智慧維護系統必須要有以上各類的可靠感測器的協助才能建立符合需求的系統。

齒輪箱訊號分析			
感測器	監控元件	優點	缺點
震動分析	齒輪箱	可靠度高	昂貴
	軸承	標準化流程(ISO10816)	感測器頻寬不足
力矩分析	轉子	運算速度快	受外在干擾
	齒	直接測量轉子負載	昂貴
油品分析	軸承	直接將軸承狀態特徵化	受外在干擾
溫度分析	軸承	限制軸承為閉迴路由路系統	線上偵測昂貴
音頻分析	軸承	標準化(IEE 841)	需要嵌入式溫度偵測
	齒	低速偵測準確	多樣因素影響溫度
定子電流	軸承	不需要額外感測器	需要高的取樣率
	齒	可以早預測	低訊雜比
		不易受到負載擾動干擾	不易貴
		不需要額外感測器	難以偵測初期故障
		不受外在干擾	位移比力量準
		容易改善	

圖 2、齒輪箱訊號分析

當風力發電機中機械發生故障時採用頻譜分析儀分析震動訊號，透過傅立葉分析歸結出故障類型與震動特徵之關係整理，可作為機械故障類型之診斷，常見的故障類型可分為以下幾類：轉子系統、軸承系統、齒輪系統與電機轉子。如圖 3 中所示為轉子故障類型、分析方法、故障特徵與頻譜圖，而轉子不平衡是旋轉機械最常見的故障類型，風力發電機中轉子佔很大的比重以震動訊號為分析及辨識時如頻譜圖表示的徑向震動，而震動頻率為轉子的轉速頻率，故隨著轉速增加震動量跟著會變大。

軸彎曲之現象可能為材質或者固定不當，而非永久性的彎曲為轉子有大的負載或者轉子在變速的過程中產生，當達到某固定速度則會逐漸減小，而此兩種的差異尤瑪達

穩定後的振動量作為區別。另外安裝造成的不對中問題是由轉子與轉子間聯軸器連接安裝誤差所產生，通常轉子徑向振動出現轉速 1 倍頻與 2 倍頻若是 2 倍頻現象產生則不對中情況更為嚴重。鬆動是轉子系統常見的故障之一，由於鬆動常伴隨著非線性的現象產生，會引起轉子的分數諧波共振，由圖中表示之頻譜特徵為頻率的 1/2 與 1/3 倍轉速，還同時存在轉速頻率振動故其故障特徵為有豐富的轉速頻諧波，並且有轉速 1.5 倍頻、2.5 倍頻...等產生。

故障類型	分析方法	故障特徵	備註
轉子不平衡	頻譜分析	1x 幅值較大，而諧波頻率較小	
	頻瀑分析	隨轉速增加幅值增大，當達臨界轉速時振動幅值增大	
軸彎曲	頻譜分析	1x 幅值較大，伴隨 2x、3x	
	頻瀑分析	初始振動大，振動隨轉速增加而增大	
不對中	頻譜分析	2x 幅值較大，伴隨 1x、3x	
	頻瀑分析	隨轉速增加幅值增大	
鬆動	頻譜分析	轉速頻率及諧波頻率有明顯增大的趨勢，並且有分數倍頻產生	
	頻瀑分析	隨轉速增加幅值增大	

圖 3、風力機元件的轉子故障類型 [5]

風力發電機的電機元件故障主要是磁性元件由於磁拉力分部不均勻造成的振動現象，通常此種故障當電源切斷的同時震動也隨之消失。氣隙不均為馬達定子中心與轉子軸心不重合時，產生的偏心現象造成的振動，此現象通常固定在一位子不隨轉子旋轉改變位子，此特徵為電源頻率的兩倍頻。轉子條斷裂或者鬆動通常為接觸不良發生而相位不平衡故障的特徵為六倍頻的頻率產生或者 2 倍頻中心頻率與 1/3 測帶頻叢的產生。

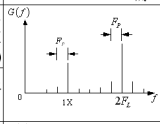
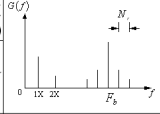
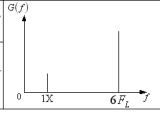
故障類型	分析方法	故障特徵	備註
氣隙不均	頻譜分析	有 $2F_i \pm nF_p$ 以及 $N_r \pm nF_p$ 之頻叢產生。(n=1,2,3,...)	 交流電源頻率 $F_i$ 磁場同步轉速： $N_s (rpm) = \frac{60 \times F_i}{P/2}$ 馬達極數： $P$
	頻瀑分析	當斷電時， $2F_i$ 激振頻率隨即消失	
轉子條斷裂	頻譜分析	有 $F_s \pm nF_r$ 之頻叢產生。(n=1,2,3,...)	 馬達轉速： $N_r$ 滑差頻率： $F_s = N_s - N_r$ 極通頻率： $F_p = P \times F_s$ 轉子條通過頻率： $F_b = B \times N_r$ 轉子條數： $B$
	頻瀑分析	當斷電時，振動隨即消失	
相不平衡	頻譜分析	產生 $1x$ 、 $2x$ 轉速頻率及 $6F_i$ 電源頻率	
	頻瀑分析	當斷電時，振動隨即消失	

圖4、電機轉子故障分析表

滾珠軸承的目的為減少傳遞轉動的摩擦、支撐旋轉物體與限制主軸的自由度，但當軸承發生故障容易導致其他元件的損壞更會影響其他元件的壽命，所以透過滾珠軸承的各部份組件包括內環、外環與滾珠，各損壞部位所產生的頻率如下圖所示，當軸承損傷伴隨許多側頻產生，因損傷位置的不同而有所不同，內環負責傳遞軸的負載，軸旋轉頻率為內環損傷振幅調變頻率，而滾珠傳遞負載於外環，因此滾珠公轉頻率為外環損傷振幅調變頻率。

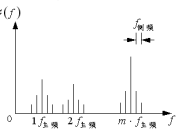
滾動軸承特徵頻率	特徵頻率計算公式	備註
滾子公轉頻率	$f_{\omega} = \frac{1}{2} f_s (1 - \frac{d}{D} \cos \alpha)$	 轉速頻率： $f_s$ 軸承節徑： $D$ 滾珠直徑： $d$ 接觸角： $\alpha$ 滾珠數： $Z$
滾動體通過外圈一點的頻率	$f_{\omega} = \frac{1}{2} f_s (1 + \frac{d}{D} \cos \alpha) Z$	
滾動體通過內圈一點的頻率	$f_n = \frac{1}{2} f_s (1 + \frac{d}{D} \cos \alpha) Z$	
滾動體通過內圈或外圈的頻率	$f_{\omega} = \frac{1}{2} f_s (1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha) \frac{D}{d}$	
外環損傷頻率	$m f_{\omega} \pm n f_{\omega} (m, n = 1, 2, 3, \dots)$	
內環損傷頻率	$m f_n \pm n f_n (m, n = 1, 2, 3, \dots)$	
滾珠損傷頻率	$m f_{\omega} \pm n f_{\omega} (m, n = 1, 2, 3, \dots)$	

圖5、軸承損傷頻譜分析表

#### 4. 故障分析演算法

廣義的故障診斷分為兩種：一種是故障模式分析、統計分析和可靠度分析的設備故障診斷。故障診斷的分析分為傳統的診斷方法、數學處理方法與智慧診斷方法。其中傳統的診斷方法包括：震動分析法、油質分析法、紅外線測溫法、噪音與聲波分析、非破

壞檢測技術...等;數學診斷處理方法包括:頻譜分析、頻瀑分析、軸心軌跡分析、小波分析、短時傅立葉分析...等信號處理方法，以機率統計為概念的診斷分析法如隱藏馬克夫理論、貝葉思理論，目的都是要達到功能失效評估 (machine performance degradation assessment system)、預測性維護與控制...等目標。

機械元件的故障意義上分為偏離正常運轉功能，而工業上用來描述偵測、預測或者分辨工業元件或系統即時健康狀態與故障的診斷可以稱為智慧故障診斷系統，是一種基於預診斷的方法偵測線上的性能衰退評估與錯誤模式的分類。

系統的狀態藉由感測器或控制器安裝在系統特殊位子來評估，而應用的原理為應變數為連續變數時，一般在進行預測時，最常用的統計工具就是「迴歸」(regression)，若反應變數為分類變數(categorical variable)或次序分類而不再是一個連續變數，這時通常採用的統計方法就是「對數線性模型」(log-linear model)，而邏輯斯迴歸就是其中的一種特殊形式。邏輯斯迴歸模型是由 J. Berkson 提出於 1994 年提出，用於解決每次試驗結果只有成功或失敗二種可能的資料，欲了解其中成功機率如何受某些因素的影響。要被預測或被瞭解的變項叫做依變項 (Dependent variable)，傳統線性迴歸的迴歸係數 (regression coefficient) 的解釋為「當自變項增加一個單位，依變項則會增加多少單位」，但是在 Logistic regression 的迴歸係數解釋為「當自變項增加一個單位，依變項 1 相對依變項 0 的機率會增加幾倍」。所以 Logistic regression 是在描述一個狀態是因為改變了某種感測器參數造成越接近健康或者故障的機率的預測，所以對於 Logistic regression 來說除了迴歸係數的解釋方法不太相同之外，基本上可說傳統線性迴歸跟 Logistic regression 是一樣的分析。

邏輯斯迴歸模型反應變數，代表著某種事件，其可能情形有二類，分別令值為 0 或 1；而變數可以是連續變數或類別變數，而  $f(z)$  為在  $z$  下成功的機率，範圍介於 0 和 1 之間，如圖 6 所示，此機率值受因素  $z$  的影響，若  $f(z)$  與  $z$  的關係滿足：

以下方程式可以解釋 logistic 回歸函數行為

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad \text{or} \quad f(z) = \frac{e^z}{1 + e^z}$$

其中  $X$  為正無窮到大負的無窮大， $f(z)$  介於 0~1 之間的一個分布狀態

其中變數  $z$  定義為

$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k,$$

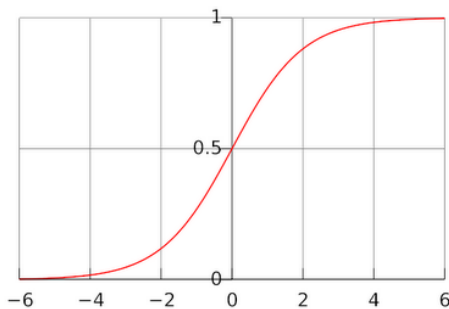


圖6、變數範圍

## 5. 故障診斷模擬

本文測試以及訓練資料以五種感測器來源分割資料為健康與故障，並提供四種不同的狀態讓系統診斷，系統在學習時告訴系統正常對應的值為 0.95，故障值為 0.05，而該值代表字正常樣本之間的距離值。

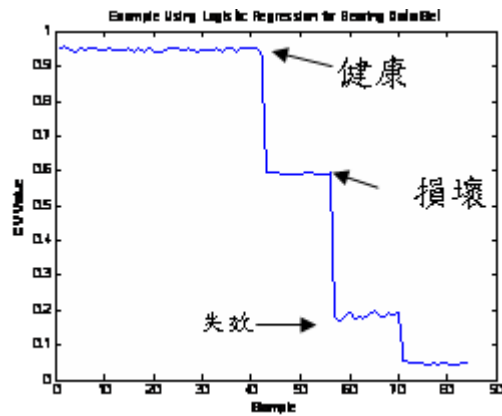


圖7、健康評估情形計算結果

## 6. 結論與未來發展規劃

風力發電機組的故障診斷分析具備有更合理的分配維護工作改善備品管理、加速故障排除，提高維修效率與降低成本，進而提高風力發電的經濟效益，也對於維修人員可以改善運轉操作情況減少機組故障的發生提高發電效率。透過運轉資料的診斷分析也足夠為風力發電機組的設計開發提供建議，從設計上改良風力機經常故障的零組件提升風力機品質。所以風力發電機組的狀態評估針對機組健康狀態不佳時對惡化原因作出診斷，並且提供提早安排規劃維修的計畫成為目前發展診斷維護分析系統的重要需求。

未來風力機故障診斷可朝向診斷健康管理的模式 (Prognostics and Healthy Management, PHM[3])，以達到更理想接近無故障的系統效能表現。不過 PHM 未來還有許多挑戰需解決[3]，從技術角度來說，系統複雜度、資料擷取的品質與正確性、對於未來使用行為的無法預測(極不穩定的風況)、以及最後的一點：診斷技術很難進行驗證，因為像風力機這樣大型的設備，很難在診斷系統判斷“可能”發生故障後，就進行拆卸並檢視內部的健康狀況，這是預測診斷面臨的難題，必須要有更一致性的狀態監控技術。

## 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(99-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] ISET& TU Delft, “Reliability and downtime from two surveys including more than 15000 turbine years “, <http://www.super-gen-wind.org.uk/achievements.html>
- [3] Jay Lee, IMS training materials from University of Cincinnati, IMS Center, 2010 年 8 月。
- [4] Comparison of different wind turbine concepts due to their effects on reliability upwind.eu [PDF]S Faulstich, B Hahn - Upwind Deliverable, 2009
- [5] 王俊傑, 2007 年, 旋轉機械故障診斷方法之探討。