

# 風機驅動鏈行星齒輪之故障特徵分析與壽命預測

蔡秉軒\* 林益煌\*<sup>1</sup> 蔡進發\*\* 宋家驥\*\*

\*國立臺灣海洋大學 機械與機電工程學系, 海洋工程科技中心  
\*\*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

關鍵詞：行星齒輪系、故障特徵分析、壽命預測

## 摘 要

本研究探討風力發電機驅動鏈架構中之行星齒輪的故障特徵分析與壽命預測，動軸系行星齒輪係於風力發電機驅動鏈之應用極為重要，以狹小空間傳遞高動力負載。然其振動行為與定軸系齒輪相較更為複雜，欲掌握其故障特徵之難度亦相對提高。本研究以行星齒輪不同劣化程度之振動時域訊號進行分析，探索齒輪故障特徵頻率幅值的變動狀況、包絡分析(Envelope Analysis)之影響、及邊頻的差異。行星齒輪於劣化狀態下，就其振動時域訊號進行頻譜分析時，可發現其故障特徵主要以齒輪嚙合頻率兩側間距為行星齒輪故障特徵頻率之邊頻呈現，其幅值隨劣化程度加劇而成長。而經由包絡分析則能於頻譜中有效追蹤其齒輪故障特徵頻率，若齒輪之劣化程度加劇，行星齒輪故障特徵頻率幅值隨之成長，且其倍頻及邊頻皆亦可清晰呈現並隨持續之劣化而增長。經由訊號處理萃取之故障特徵於不同劣化狀態下之差異，可作為建立特徵指標之重要參考依據，經由特徵指標之運用可據以進行剩餘使用壽命之預測，有效監控風力發電機機艙驅動鏈之行星齒輪系操作狀態，以供風機維運之重要參考。

## 前 言

本研究探討風力發電機機艙驅動鏈行星齒輪系之故障診斷，由於風機機艙需於狹小空間進行高精密之大動力負載傳遞，傳統之平行軸系已不符所需，有賴行星齒輪系之運用，經由多個行星齒輪分擔源自風機葉片之龐大負荷。而行星齒輪系包含動軸系之行星齒輪，使得運用振動分析評估其運轉健康狀態時更為艱難。本研究考慮美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)之 5 MW 風力發電機驅動鏈架構，計算其齒輪系之特徵頻率，就第一階行星齒輪系之行星齒輪於不同劣化程度之振動時序進行分析，萃取行星齒輪故障特徵並分析其於不同劣化程度下之差異，進而掌握風力發電機機艙驅動鏈行星齒輪系之故障狀態，作為建立特徵指標之重要參考依據，以有效監控風機機艙驅動鏈之運作，進行及時之維護排程，避免不預期停機所造成之龐大成本損失與運轉安全顧慮。

我國能源政策的積極推動，再生能源成為重要發展之目標，近年來國內離岸風電預計將於 2025 年增至 5.5GW，其大幅度之成長可促成大量投資與建設，進一步有效推展在地供應鏈，以創造更多工作機會，而後更預計自 2026 年至 2035 年，

以 10 年 10 GW 之規模持續進行大幅度增長之推動。風機面臨極端氣候造成多類型故障，零組件受損降低設備使用壽命，甚至導致不預期停機而無法發電，實為離岸風電產業運維之重要課題。

研究顯示離岸風電產業運維所遭遇之海象、船隊、及人員調配等多元問題[1]將大幅增加運維之成本，預測維修為運維之首選，可有效降低成本負擔。風力發電機設計之預期使用壽命與實際使用壽命有明顯之落差，Gray & Watson [2]提及之陸域風力發電機案例，其停機主因有高達三分之一為齒輪箱故障，統計報告[3]顯示齒輪及軸承故障為風機齒輪箱故障重要原因。為有效降低運維成本並提高離岸風機之可靠度，可透過量測與分析旋轉機械之振動時域訊號，建立驅動鏈之健康狀態診斷技術，進而監控驅動鏈中齒輪及軸承等零組件之運作狀況。本研究所探討之行星齒輪系故障特徵分析，考慮 NREL 之 5MW 風力發電機架構[4]，運用 Feng & Zuo [5]及 Feng et al. [6]提出之數值模擬，建立行星齒輪系之故障振動時域訊號，經訊號處理以萃取 Miao & Zhou[7]提及之行星齒輪系齒輪嚙合頻率及其各齒輪之故障特徵頻率，供後續建立風力發電機驅動鏈特徵指標之重要參考依據。Zappalà, et al. [8]探索齒輪故障之偵測自動化，邊頻特性之運用亦有文獻論及[9, 10]。Saxena,

<sup>1</sup> 責任作者 (yhl2@email.ntou.edu.tw)

et al. [11]探討剩餘使用壽命之預測架構，Coble [12]導入單調性(Monotonicity)與趨勢性(Trendability)概念，提供故障特徵之重要性排序，作為預測模型建立時特徵指標擇用之參考。本研究首先探討行星齒輪不同劣化程度之故障特徵特性，並進一步分析壽命預測之可行性及預測系統之效能。

## 行星齒輪系故障特徵頻率

行星齒輪系之故障特徵研究係以訊號處理萃取齒輪嚙合頻率及各齒輪故障特徵頻率，進而探討故障特徵頻率主頻及其邊頻隨劣化程度不同之差異，作為監控行星齒輪系中各齒輪健康狀態之重要指標。行星齒輪系架構由太陽齒輪、行星齒輪、環齒輪、及行星架組成，其特徵頻率由各齒輪齒數、行星齒輪個數、及轉速決定，方程式(1)-(4)依序為齒輪嚙合頻率、太陽齒輪故障特徵頻率、行星齒輪故障特徵頻率、及環齒輪故障特徵頻率之計算。考慮美國國家再生能源實驗室(NREL) 5MW 風機驅動鏈幾何參數及最高額定轉速，計算其齒輪特徵頻率如表 1 所示。

$$F_{mesh} = [Z_{ring}Z_{sun} / ((Z_{ring} + Z_{sun}))]f_{sun} \quad (1)$$

$$F_{sun} = [Z_{ring} / (Z_{ring} + Z_{sun})]f_{sun}N_p \quad (2)$$

$$F_{planet} = Z_{ring}Z_{sun} / [Z_{planet}(Z_{ring} + Z_{sun})]f_{sun} \quad (3)$$

$$F_{ring} = [Z_{sun} / (Z_{ring} + Z_{sun})]f_{sun}N_p \quad (4)$$

其中 $F_{mesh}$ 為行星齒輪系之齒輪嚙合頻率， $F_{sun}$ 、 $F_{planet}$ 、及 $F_{ring}$ 依序為太陽齒輪、行星齒輪、及環齒輪之故障特徵頻率， $Z_{sun}$ 、 $Z_{planet}$ 、及 $Z_{ring}$ 依序為太陽齒輪、行星齒輪、及環齒輪之齒數， $f_{sun}$ 為太陽齒輪轉速(Hz)， $N_p$ 為行星齒輪數量。

## 故障特徵萃取及分析

快速傅立葉變換(Fast Fourier Transform, FFT)係快速計算序列的離散傅立葉變換(Discrete Fourier Transform, DFT)，將計算 DFT 的複雜度從原本之 $O(N^2)$ ，降低為 $O(N \log(N))$ ，其中 $N$ 為資料數量。Cooley 和 Tukey [13]於 1965 年合作發表著名的快速傅立葉變換的演算法，將 DFT 分解為較小長度的多個 DFT，為最常見的 FFT 演算法，傅立葉變換的快速計算被列為二十世紀前十大演算法

之一[14]。

包絡分析係提取訊號系列之包絡，其為解析訊號(analytic signal)之幅值，解析訊號可由使用希爾伯特(Hilbert)中實現的離散傅立葉轉換取得。首先移除訊號序列之平均值，在計算包絡之後再行加回，其為快速傅立葉變換的頻譜調製信號。包絡分析可用於機械診斷[15, 16]，調查故障狀況對機械特徵頻率的調製效果，其適用場域包含變速箱、渦輪、和電動馬達中的故障偵測，包絡分析可有效用於運轉機械局部故障之診斷。

取自 NREL 5MW 風機驅動鏈之第一階齒輪系參數(表 1)及其驅動鏈配置示意圖(圖 1)，由 Feng et al. [6]所探討行星齒輪系動力學分析並提出之時域振動訊號數值模擬，經導入訊號雜訊比(Signal to Noise Ratio, SNR)為 1:1 之白噪音，模擬在雜訊狀態下，行星齒輪於不同損傷之振動時序(圖 2)，由左而右行星齒輪劣化程度依序為輕度、中度、及重度，劣化程度之定義因設備而異，本文案例分析中之劣化係泛指齒輪因逐步耗損造成之振動加劇的情況，重度劣化相較於輕度劣化振幅已有明顯增長，介於其間的狀況列為中度劣化。此三筆振動時序之取樣頻率為 1024 Hz，取樣時間為 1000 秒。

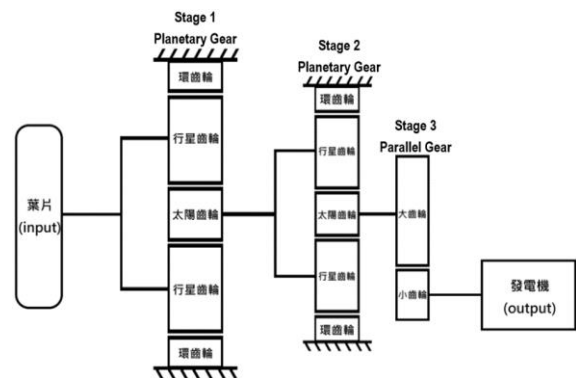


圖 1. NREL 5MW 風機驅動鏈配置示意圖

表 1. NREL 5MW 風機驅動鏈參數

第一階行星齒輪系			
	環齒輪	行星齒輪(3 個)	太陽齒輪
齒數(齒)	56	17	19
節徑(mm)	2520	765	855
輸入轉速及特徵頻率			
行星架輸入轉速 rpm (Hz)		12.1 (0.202)	
太陽齒輪輸出轉速 rpm (Hz)		47.763 (0.796)	
行星齒輪系嚙合頻率 (Hz)		11.293	
太陽齒輪故障特徵頻率 (Hz)		1.783	
行星齒輪故障特徵頻率 (Hz)		0.664	
環齒輪故障特徵頻率 (Hz)		0.605	

由振動時序觀察設備受損之情形，一般常以方均根(RMS)作為判斷依據之一，此類型特徵包含所有結構之振動量，對於特定之組件損傷難以準確掌握其健康狀態，易受其它振動之掩蓋埋沒而不易凸顯。若設備之零組件受損，其特有故障特徵頻率會呈現於頻譜，故透過掌握故障特徵頻率於頻譜圖中之幅值變化，可作為判斷健康狀態之重要參考依據，不易受其它振動或雜訊之干擾。

運用快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)及包絡分析(Envelope Analysis)分析行星齒輪故障振動時序，於頻譜中探討於不同劣化狀態下其故障特徵之變化，進而有效建立行星齒輪之故障特徵指標。行星齒輪輕度劣化振動時序經快速傅立葉轉換(圖 3)，縱軸 Amplitude 之單位 g，代表重力加速度( $9.81 \text{ m/s}^2$ )，圖中 X, Y 參數分別代表頻率(Hz)及振幅(g)。行星齒輪系嚙合頻率(11.29 Hz)清晰呈現於頻譜中，且兩側有間距為行星架轉速(0.202 Hz)之邊頻(11.09Hz, 11.49Hz)及間距為行星齒輪故障特徵頻率(0.664 Hz)之邊頻(10.63Hz, 11.96Hz)。若將振動時序經包絡分析後再進行快速傅立葉轉換(圖 4)，其頻譜中清晰呈現行星齒輪故障特徵頻率(0.664 Hz)及兩側間距為行星架轉速(0.202 Hz)之邊頻。

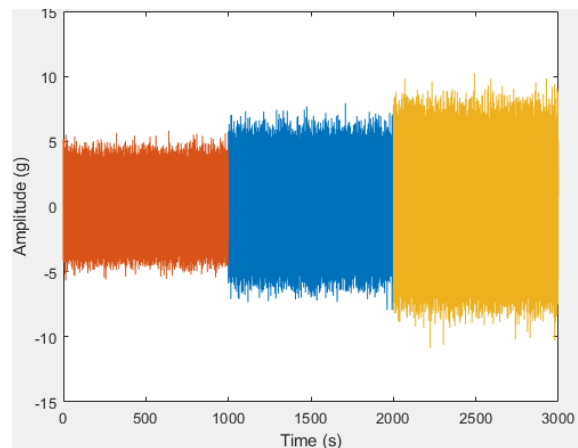


圖 2. 不同劣化程度之行星齒輪故障振動時序

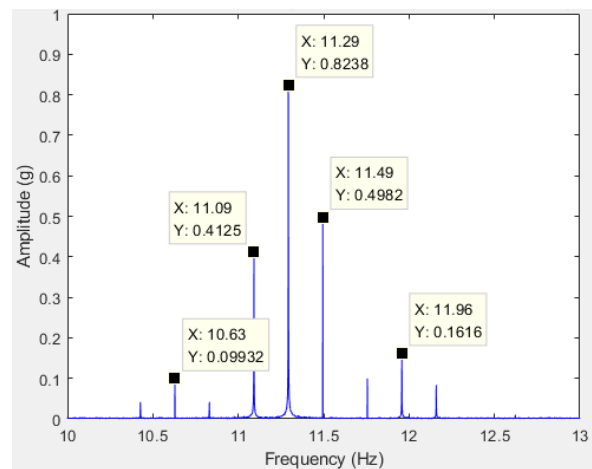


圖 3. 行星齒輪輕度劣化振動時序之頻譜

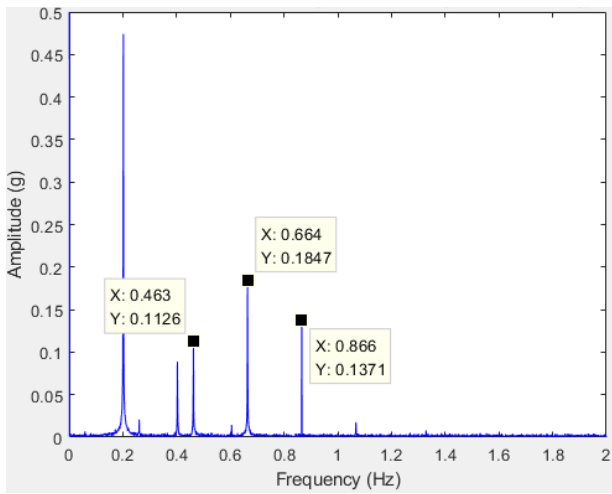


圖 4. 行星齒輪輕度劣化振動時序經包絡分析之頻譜

行星齒輪中度劣化振動時序之快速傅立葉轉換(圖 5)顯示行星齒輪系嚙合頻率(11.29 Hz)及兩側有間距為行星架轉速(0.202 Hz)之邊頻仍清晰呈現於頻譜，但其幅值皆無明顯變化，間距為行星齒輪故障特徵頻率(0.664 Hz)之邊頻則不僅清晰呈現，其兩側邊頻幅值較輕度劣化有顯著之成長。若將振動時序經包絡分析後再進行快速傅立葉轉換(圖 6)，行星齒輪故障特徵頻率(0.664 Hz)及兩側間距為行星架轉速(0.202 Hz)之邊頻皆有明顯成長，故障特徵頻率主頻幅值之成長約增至輕度劣化之三倍，且於二倍故障特徵頻率(1.329 Hz)處亦有明顯峰值呈現。

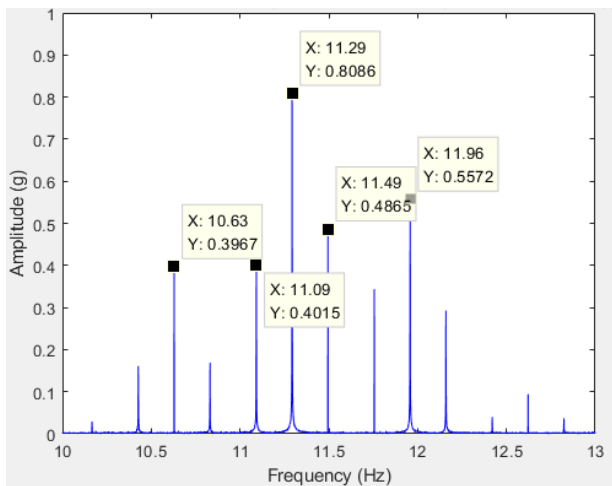


圖 5. 行星齒輪中度劣化振動時序之頻譜

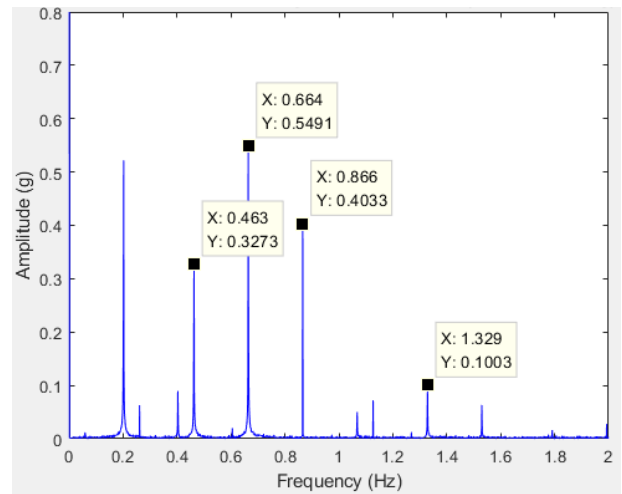


圖 6. 行星齒輪中度劣化振動時序經包絡分析之頻譜

圖 7 顯示行星齒輪重度劣化振動時序之快速傅立葉轉換，行星齒輪系嚙合頻率(11.29 Hz)及兩側間距為行星架轉速(0.202 Hz)之邊頻幅值仍無明顯變化，間距為行星齒輪故障特徵頻率(0.664 Hz)之兩側邊頻幅值則持續成長，相較於中度劣化之成長幅度超過 50%，百分比成長幅值計算方式為(後者幅值-前者幅值)/前者幅值 x 100。將振動時序經包絡分析後再進行快速傅立葉轉換(圖 8)，行星齒輪故障特徵頻率主頻(0.664 Hz)及兩側間距為行星架轉速(0.202 Hz)之邊頻持續明顯成長，故障特徵頻率主頻幅值較中度劣化成長約 24%，且其二倍故障特徵頻率(1.329 Hz)及其兩側邊頻幅值亦有明顯變化，二倍故障特徵頻率主頻幅值則成長約 154%。

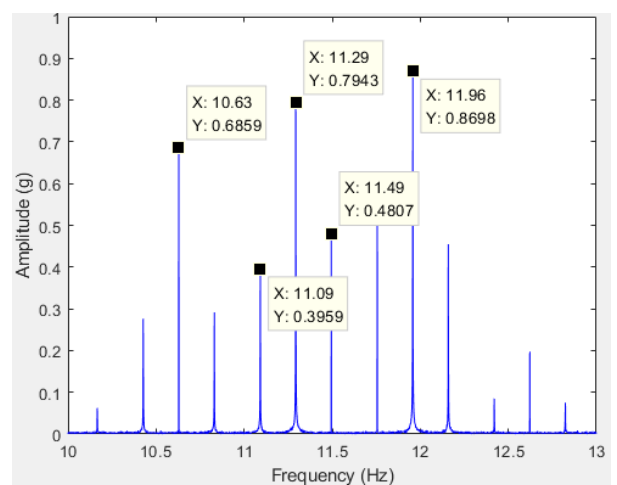


圖 7. 行星齒輪重度劣化振動時序之頻譜圖

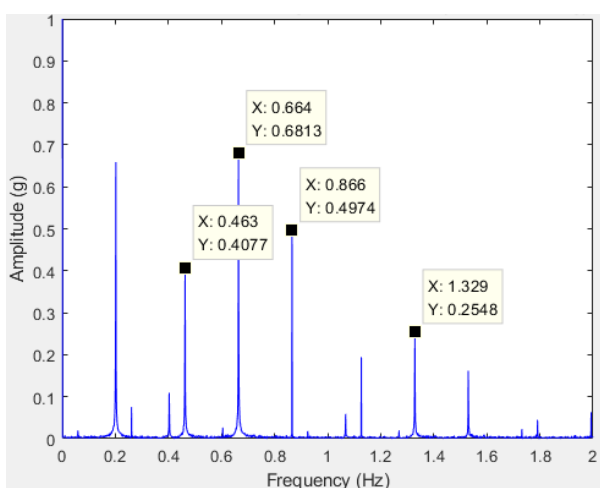


圖 8. 行星齒輪重度劣化振動時序經包絡分析之頻譜圖

### 行星齒輪之壽命預測

圖 9 為行星齒輪持續劣化之原始時域振動訊號(每天一筆 1000 秒之資料, 共計 100 天)。由左至右依序為輕度劣化至嚴重受損, 其中最左端為接近健康狀態之振動訊號。於時域訊號可觀察振幅值之變化。

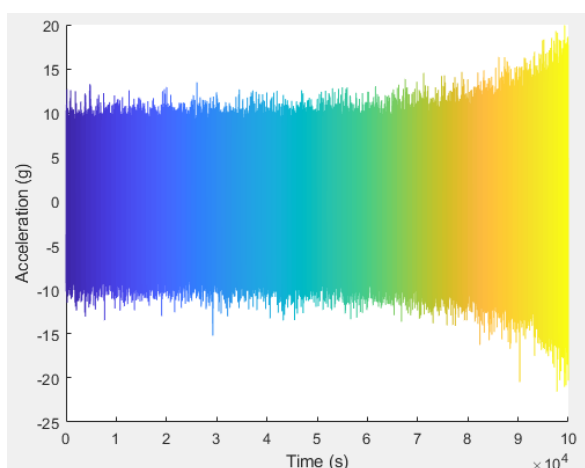


圖 9 行星齒輪持續劣化之原始時域振動訊號

因齒輪受損時於邊頻會有明顯幅值之成長, 為建構剩餘使用壽命(Remaining Useful Life, RUL)之數學模型, 本研究導入行星齒輪持續劣化之原始時域振動訊號, 選用邊帶功率因數(Sideband Power Factor, SBPF) 故障特徵指標[17], 其表示式如下:

$$SBPF = (\text{Center mesh frequency amplitude})^2 + \sum_{i=-5}^{+5} (\text{Sideband amplitude}_i)^2 \quad (5)$$

文獻中亦可見邊帶能量比(Sideband Energy Ratio)之運用, 但會因中心頻率幅值過低而造成誤判, 本案例分析取 40%之原始資料訓練數學模型, 即以前面 40 天之資料進行訓練, 後面 60 天之資料則用於進行剩餘使用壽命預測之效能驗證, 並以線性加權平均之方式計算, 以提高早期預警之配重, 強調早期精準預測之重要性。圖 10 顯示剩餘使用壽命之性能分析, 其中 $\alpha$ 為預測之信心區間設定範圍(20%誤差內), 圖 11 為剩餘使用壽命於信心區間內之精準預測機率值, 其中紅色虛線為線性加權數值, 第一天預測之加權數值為 1, 逐日遞減至零, 本例之加權平均精準預測機率为 96.07%。

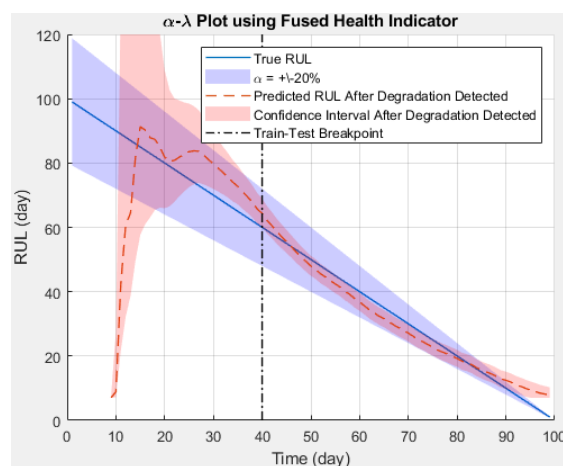


圖 10 剩餘使用壽命之性能分析

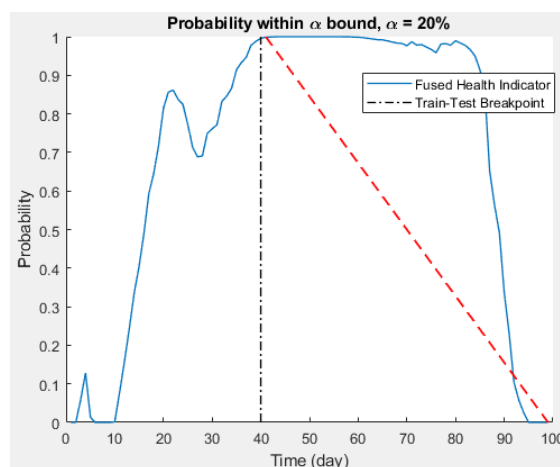


圖 11 剩餘使用壽命於信心區間內之精準預測機率值

## 結 論

行星齒輪之原始振動時序經由快速傅立葉轉換，其頻譜圖中齒輪嚙合頻率兩側間距為行星齒輪故障特徵頻率之邊頻幅值隨劣化程度加劇而成長，其由輕度劣化至重度劣化之漲幅可達400%以上，可作為建立故障特徵指標之依據。將行星齒輪故障振動時序經包絡分析再進行快速傅立葉轉換，其頻譜圖中可清晰掌握行星齒輪故障特徵頻率及兩側間距為行星架轉速之邊頻，隨齒輪劣化程度加劇，其故障特徵頻率主頻及邊頻皆隨之成長，甚至呈現二倍行星齒輪故障特徵頻率，且亦隨劣化程度加劇而成長，其中故障特徵頻率主頻之幅值漲幅高達268%，邊頻幅值之漲幅亦可達到250%以上，可有效運用以建立特徵指標。本研究顯示剩餘使用壽命預測模型經適當訓練後，其預測精準度頗佳，可供風機維運之重要參考。

## 致 謝

本研究承蒙科技部經費補助(計畫編號: MOST-109-3116-F-002-002-CC1)，謹致謝意。

## 參 考 文 獻

- Carroll, J., A. McDonald, I. Dinwoodie, D. McMillan, M. Revie, and I. Lazakis, "Availability, operation and maintenance costs of offshore wind turbines with different drive train configurations," *Wind Energy*, Vol. 20, pp. 361-378 (2017).
- Gray, C.S. and S.J. Watson, "Physics of failure approach to wind turbine condition based maintenance," *Wind Energy*, Vol. 13, pp. 395-405 (2010).
- Sheng, S., "Wind turbine gearbox reliability data base, condition monitoring, and O&M research update," NREL/PR-5000-66028, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, USA (2016).
- Nejad A.R., Y. Guo, Z. Gao, and T. Moan, "Development of a 5 MW reference gearbox for offshore wind turbines," *Wind Energy*, Vol. 19, pp. 1089-1106 (2016).
- Feng, Z.P. and M. J. Zuo, "Vibration signal models for fault diagnosis of planetary gearboxes," *J. Sound Vib.*, Vol. 331, 4919-4939 (2012).
- Feng, Z.P., D. Zhang, M. Zuo, "Planetary gearbox fault diagnosis via joint amplitude and frequency demodulation analysis based on variational mode decomposition," *Appl. Sciences*, Vol. 7(8), 775; doi:10.3390/app7080775 (2017).
- Miao, Q. and Q. Zhou, "Planetary gearbox vibration signal characteristics analysis and fault diagnosis," *Shock and Vib.*, Vol. 2015, pp. 1-8 (2015).
- Zappalà, D., P.J. Tavner, and C.J. Crabtree, "Gear fault detection automation using Windcon frequency tracking," *Proceedings European Wind Energy Conference*, Copenhagen, Denmark, April (2012).
- Zappalà, D., P. Tavner, C. Crabtree, and S. Sheng, "Sideband algorithm for automatic wind turbine gearbox fault detection and diagnosis," *IET Renew. Power Generation*, Vol. 8, pp. 380-389 (2014).
- Pattabiraman, T.R., K. Srinivasan, and K. Malarmohan, "Assessment of sideband energy ratio technique in detection of wind turbine gear defects," *Case Studies Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 2, pp. 1-11 (2015).
- Saxena, A., J. Celaya, B. Saha, S. Saha, and K. Goebel, "Metrics for offline evaluation of prognostic performance," *Inter. J. Prognostics and Health Management*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-20 (2010).
- Coble, J. B., *Merging data sources to predict remaining useful life—an automated method to identify prognostic parameters*, Doctoral dissertation, The University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA (2010).
- Cooley, J. and J.W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," *Mathematics of Computation* Vol. 19, pp. 297-301 (1965).
- Dongarra, J., F. Sullivan, "Guest Editors Introduction to the top 10 algorithms". *Computing in Science & Engineering*, IEEE. Vol. 2, No. 1, pp. 22-23 (2000).
- Randall, R.B., J. Antoni, S. Chobsaard, "The relationship between spectral correlation and envelope analysis for cyclostationary machine signals: application to ball bearing diagnostics," *Mech. Syst. Signal Process.* Vol. 15, No. 5, pp. 945-962 (2001).
- Abboud, D., J. Antoni, S. Sieg-Zieba, M. Eltabach, "Envelope analysis of rotating machine vibrations in variable speed conditions: A comprehensive treatment," *Mech. Syst. Signal Process.* Vol. 84, Part A, pp. 200-226 (2017).
- 林益煌、林立璿、蔡進發、宋家驥, "風力發電機驅動鏈高速軸齒輪之故障診斷," *中國造船暨輪機工程學刊*, Vol.37, No.2, pp.83-90 (2018).

# ANALYSIS OF FAULT FEATURES AND LIFE PREDICTION OF A PLANETARY GEAR IN WIND TURBINE DRIVETRAIN

P.-H. Tsai\* Y.-H. Lin\* J.-F. Tsai\*\* C.-C. Sung\*\*

\* Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Center of Excellence for Ocean Engineering,  
National Taiwan Ocean University

\*\* Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

Keywords: Planetary Gear Train, Fault Characteristic Analysis, Life Prediction

## ABSTRACT

This study explores the analysis of the planetary gear fault characteristics and life prediction in wind turbine drivetrain. The application of the moving shaft planetary gear train in wind turbine drivetrain is extremely important to transmit high power loads in a small space. However, its vibration behavior is much more complicated than that of the fixed-axis gear train, and it is relatively difficult to grasp its fault characteristics. This study analyzes the time-domain vibration signals of the planetary gears with different degrees of deterioration, and explores the changes in the amplitude of the gear fault characteristic frequency, the influence of envelope analysis, and the difference in sideband frequencies. When the planetary gear degrades, the time-domain vibration signal of the planetary gear is analyzed by spectral analysis. It can be found that the fault characteristic is mainly the appearance of the sidebands around the gear meshing frequency, with the spacing distance being the planetary gear fault characteristic frequency, and the associated amplitudes grow with the degree of deterioration. Through envelope analysis, the fault characteristic frequency of the gear can be effectively tracked in the spectrum. If the deterioration of the gear is intensified, the amplitude of the fault characteristic frequency of planetary gear will grow accordingly, and its harmonics and sideband frequencies can also be clearly observed and grow with the proceeding deterioration. The differences in the fault characteristics extracted by signal processing under different degradation states can be used as an important reference basis for establishing characteristic indexes. Subsequently, the remaining useful life can be estimated such that the operating conditions of the planetary gear train of the drivetrain can be effectively monitored and serve as important reference for wind turbine operation and maintenance.

(Manuscript received Nov. 4, 2020,

Accepted for publication Jan. 13, 2021)