

陸域風力機塔架監測及延役評估

劉聿宸¹ 陳儀諺² 邱仲民² 蘇進國³ 宋裕祺⁴

¹國立臺北科技大學土木系 碩士生

¹國立臺北科技大學土木系 博士生

國立臺北科技大學 離岸風電工程研究中心 計畫經理

⁴國立臺北科技大學 講座教授

摘要

台灣自 2000 年公佈「風力發電示範系統設置補助辦法」開始，本土化風力發電零組件產業鏈即積極投入陸域及離岸風力機的開發、製造與生產，迄今最早運轉之陸域風力機廢續面臨使用壽命即將到期的議題，惟先期風力機設計考量一般環境載重及極端環境之不確定性，常採用較嚴謹的假設條件和較高之安全係數，間接使得風力機實際運轉壽命可能會超過原設計使用期限，造成過於保守與不符經濟效益之結果。有鑑於此，本研究針對國內北部地區風力機之塔架疲勞壽命進行評估，並藉由塔架內部安裝之感測器負載量測成果，採用 S-N 曲線與雨流計次法計算構件累積疲勞損傷量，另根據機器學習方法預測得之平均風速關係，建立環境風速的長期機率分佈函數，進而推算風力機塔架於生命週期內的累積疲勞損傷總量，再搭配現況調查的安全檢測成果，即可作為風力機延役評估的重要參考依據。

關鍵字：風力機、延役、快速傅立葉轉換、疲勞限度狀態

Keywords：Wind Turbine, Lifetime Extension, Fast Fourier Transform, Fatigue Limit State

1. 前言

臺灣科技產業快速發展且民眾生活品質提升造成能源需求不斷攀升，而本土天然資源有限且逾九成能源仰賴進口，使得政府面臨全球氣候變遷與能源供應穩定的雙重挑戰，故行政院近 8 年提出「2050 淨零排放」路徑及策略，以推動綠色供應鏈與加速減碳為方針，積極發展在地化再生能源產能，並自 2000 年起直接推動陸域風電建置，另逐步規劃台灣海峽風場，祈能邀集國內、外開發商攜手建設固定式與浮動式離岸風電，化氣候風險為綠色轉型契機，達成與世界共同邁向淨零目標。根據 2024 年 7 月底能源署公開資料[1]顯示，國內陸域風電共 439 座風力機，其總裝置容量約 915 MW，而年發電量達 6.24 億度，此一自產綠電對全台電力供應貢獻良多，惟風力機設計年限約 20 至 25 年，早期設置機組迄今即將面臨除役議題，爰此風力機支撐結構與發電設備之運維與延役研究係成現今重要發展方向。

在陸域風力機研究方面，João Pacheco 等人[2]以葡萄牙北部一座 2MW 的陸域風力機為例，探討不同監測儀器、數量及佈設方式對整體系統損傷識別的影響，並指出將感測器安裝於塔架約 2/3 高處，對主要彎曲模態具高度靈敏性，能有效提升模態識別與損傷偵測的準確性與穩定

性。此外，Xiao-Ling Zhang[3]等人以單樁式離岸風力機為例，採用時域分析法並結合雨流計次法及 S-N 曲線概念，對支撐結構的疲勞損傷進行系統性地分析，另根據風載重的實際監測結果，得到風速的長期機率分佈函數，如此即可評估不同風況下的疲勞損傷值，藉此可推算離岸風力機在生命週期內的總累積疲勞損傷值。另於風電規範與認證方面，DNVGL-ST-0262 [4]及 DNVGL-SE-0263[5]分別說明風力機延役及其認證方式，延役評估範圍包含葉片、轉子機艙、機械元件、塔架、基礎、控制及保護系統、電力設備等，而延役評估方法則包含延役檢測 (Lifetime Extension Inspection, LEI)、簡易法(Simplified Approach)、詳細法 (Detailed Approach)和機率法(Probabilistic Approach)等，各種方法主要係以不同評估原則分析風力機載重及其受力情形，搭配現場檢測、監測或養護結果來決定風力機的延役期限。

本研究參與臺灣北部沿海地區陸域風力機監測計畫，經不同儀器配設及長達一整多年的監測成果，期能進行風力機延役評估研究，惟風力機資料採集與監控系統(Supervisory Control and Data Acquisition System, SCADA)資料取得不易，故研究過程另採機器學習技術進行風載重及其機率分佈模擬，搭配塔架底部應變計和塔架不同高程之加速度計監測成果，採 S-N 曲線與雨流計次法計算構件累積疲勞損傷量，完成風力機塔架延役認證所需執行之監測與評估工作，相關研究過程與成果冀能提供風工程實務領域所用。

2. 陸域風力機簡介及監測儀器配置

本研究對象為北部沿海地區陸域風力機(如圖一所示)，該風力機總高度達 114.91 公尺，塔架結構採用分段變斷面進行設計，共分為五個塔段銲接，其鋼板厚度約為 2.5 公分~5.5 公分，並配備重量達 148.5 公噸的機艙組件。另對於監測儀器與配置部分，本研究將風力機支撐結構監測系統細部區分為：(1)感測器；(2)現地監測系統設備；(3)遠端/雲端監測系統。感測器主要係以光纖光柵感測器(Fiber Grating Sensor, FGS)為主，其種類包含加速度計、應變計和溫度計等，而現地監測系統設備則以一台不鏽鋼觀測箱內置資料收集器、工業電腦、網路設備和不斷電系統等為主，所有感測器經由現地監測系統設備將訊號傳送至雲端監測系統中，研究人員可利用手機、筆電或桌上型電腦上網登入後觀看即時監測數據與統計資料。



圖一：陸域風力機外觀及儀器配置

3. 鋼結構疲勞分析

鋼結構疲勞係指其在長期承受動態應力變化下所產生的損壞現象，主要用於評估材料、結構或機械部件在反覆載重或振動下的損壞程度與使用年限，而短期疲勞損傷評估係為單一時序區間內，藉由監測資料進行該時序內的損傷量分析，其作法通常亦可再細分為三個部分，包括隨機載重處理、平均應力修正及損傷量計算等，藉由此短期疲勞損傷評估結果可推估長期損傷範疇，常用於無法進行長期監測下的應變作為。本研究利用 Python 程式自行研發監測數據之疲勞循環演算法，可得到不同風速或事件下的馬可夫應力矩陣，並在分析時考慮平均應力的影響，另以 Goodman 理論進行修正，最後參考 DNV-RP-C203[6]所提出的 S-N 曲線，以 Miner 法則進行累積疲勞損傷的計算，其公式如下：

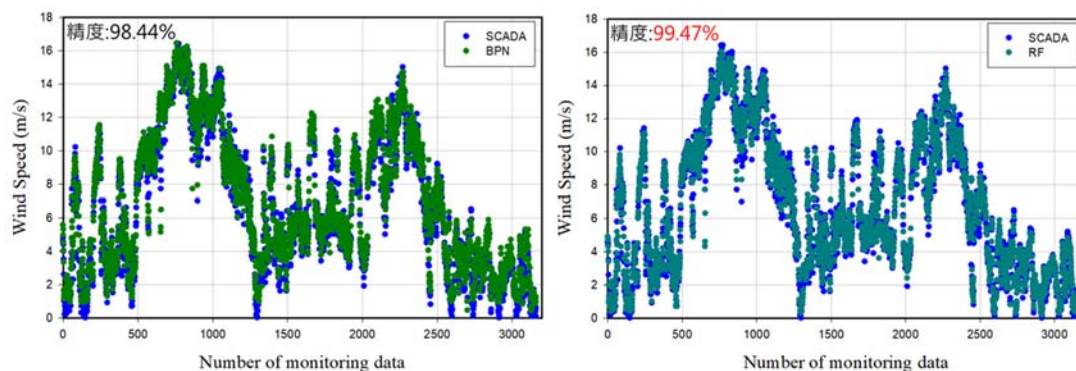
$$\log N = \log \bar{a} - m \log \left(\Delta \sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right) \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{\bar{a}} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\Delta \sigma)^m \leq \eta = \frac{1}{DFF} \quad (2)$$

其中， N 為應力變化範圍 $\Delta \sigma$ 內的預測疲勞循環次數， m 為 S-N curve 中負的倒數斜率， $\log \bar{a}$ 為 S-N curve 中以 $\log N$ 為水平軸時的軸距， D 為累積疲勞損傷， n_i 與 N_i 為不同應力下之循環次數， DFF 為設計疲勞因子， η 為 DFF 的倒數。

4. 平均風速預測

本研究過程經監測感測器可蒐集沿塔架不同高程之雙向加速度振動資訊，惟 SCADA 記錄之系統風速資料僅有兩個月資訊，故參考國際文獻研究成果，視環境風速與塔架振動加速度呈高度正相關，並以加速度為輸入變數、平均風速為輸出目標，分別採用倒傳遞神經網路與隨機森林演算法進行機械學習。對於加速度變數之輸入，主要選取 6610 筆現地加速度監測資料，而輸出之平均風速目標則以 SCADA 記錄風速為主，分析結果如圖二所示。其中，以倒傳遞神經網路進行模擬結果，輸出之平均風速與 SCADA 資訊之精準度為 98.44%；另以隨機森林演算法執行機械學習後，可得輸出風速與 SCADA 資料精準度達 99.47%。有鑑於此，後續研究將以隨機森林演算法作為平均風速推估方法。



圖二：倒傳遞神經網路與隨機森林演算法預測成果

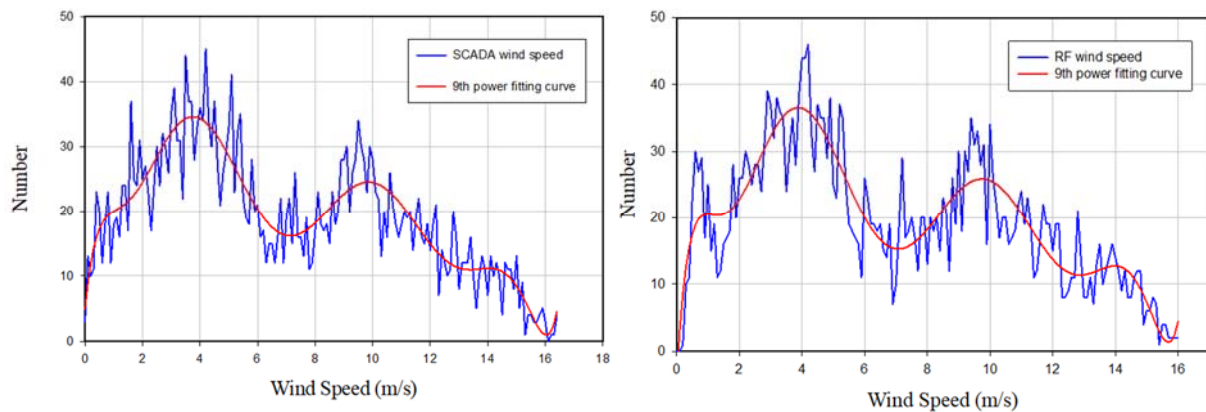
5. 風速機率分佈擬合

針對長期風速機率分佈之模擬，本研究曾採韋伯分佈對平均風速及其機率密度函數 (Probability Density Function, PDF) 進行擬合，惟其成效不佳故另以高次項函數執行擬合研究。此方法係根據整個監測期間內的平均風速數據建立高次項數學模型，並使用最小二乘法計算多項式的係數以提升模擬效果，其函數如下：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (3)$$

其中 y 為高次項機率分佈函數； $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 為多項式係數，主要利用最小二乘法計算求得，而 x 為平均風速變數， n 為次方數，本研究使用 9 次方進行後續分析。

圖三所示資料係以 2022 年 8 月 28 至 29 日，分別由 2 種不同平均風度來源資料之 9 次方函數擬合結果：(1) SCADA 記錄所得平均風速；(2) 本研究採隨機森林演算法，由加速度感測器資料進行機械學習後之平均風速。由結果顯示，高次項函數擬合效果可有效捕捉平均風速數據之趨勢及變化，此結果可提高後續風力機塔架受風載重之累積疲勞損傷分析的正確性。

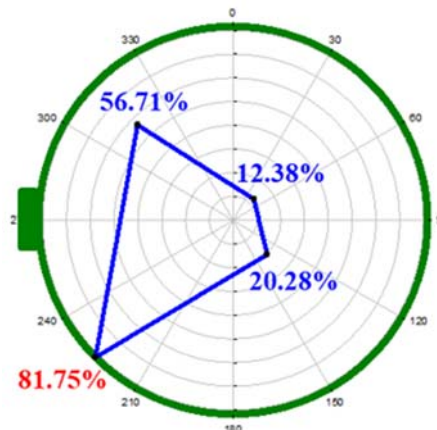


圖三：2022 年 8 月 28 至 29 日 SCADA 與隨機森林演算法預測之風速 9 次方函數擬合結果

6. 設計年限內之總累積疲勞損傷量評估及延役建議

評估陸域風力機塔架於設計年限之總累積疲勞損傷量評估前，本研究先彙整塔架內加速度感測器之一整年監測資數據，並據此以隨機森林模型推估風力機所在工址之一整年平均風速變化，藉此可進行風速機率分佈之擬合工作。

再者，針對塔架之疲勞損傷部分，本研究先假設鋼結構材料與塔架受力係數彈性範圍，固可利用虎克定律將監測所得之應變數據轉換成應力，即可通過雨流計次法獲取單筆數據的應力幅值及其相應的循環載重次數，再根據風力機於各種平均風速下之特定反應，可進行鋼結構應力的馬可夫矩陣修訂，配合前節所述風速機率分佈擬合成果，即可求得一整年之累積疲勞損傷。另一方面，假定陸域風力機之設計年限為 20 年，並於未考量風力機老劣化及極端環境載重影響下，即可據此推估求得風力機塔架之總累積疲勞損傷如圖四所示，亦可作為後續延役評估時之參考依據。



圖五：設計年限之總累積疲勞損傷量預估結果

7. 結論與建議

本研究針對陸域風力機支撐結構，以塔架健康診斷及累積疲勞損傷量評估為目標，利用應變計、加速度計及溫度計等 15 個感測器，由超過一整年之監測數據及部分 SCADA 資料，先建構工址平均風速推估及長期風速機率分佈運算方法，再利用風力機於不同風速之反應，以及 DNV 所建議之雨流法和 S-N 曲線評估累積疲勞損傷之過程，推算塔架於監測一整年的健康狀況，並藉此計算設計年限內的總累積疲勞損傷和延役的可行性。相關簡要結論與建議如下：

1. 風力機實際運維過程，建議能取得 SCADA 所記錄之完整資料，其後即可利用適當的監測感測器配置，求得塔架於特定時序區間或完整年份之疲勞損傷量，並得作為後續管養或除役與延役的參考依據。。
2. 監測過程並未遭遇颱風或地震等極端環境載重，故場址之平均風速、機率分佈函數和疲勞損傷推估，對於塔架於全生命週期內之真實反應仍具變異性。此外，本研究亦未探討材料老劣化或腐蝕所帶來之影響，建議未來可進行更長期的監測工作，以提高評估的準確性。

8. 參考文獻

- [1]. <https://www.taipower.com.tw/2289/2363/2380/2383/10556/normalPost>
- [2]. J. Pacheco, G. Oliveira, F. Magalhães, C. Moutinho, and Á. Cunha, "Evaluation of low cost vibration based damage detection systems," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1037, 2018.
- [3]. Xiao-Ling Zhang, Bing-jie Zhang, Dong Wang, Cheng-shun Xu, "Fatigue damage analysis method of offshore wind turbine foundation", *Ocean Engineering*, Volume 302, 15 June 2024.
- [4]. Der Norske Veritas, DNVGL-ST-0262, Lifetime extension of wind turbines, Standard, 2016.
- [5]. Der Norske Veritas, DNVGL-SE-0263, Certification of lifetime extension of wind turbines, Service Specification, 2016.
- [6]. Der Norske Veritas, DNVGL-RP-C203, Fatigue design of offshore steel structures, Recommended Practice, 2019.