

## 【中文題目】

---

MW 級陸域風力機之塔架振動分析與檢測

## 【英文題目】

---

Vibration Analysis and Monitoring of Wind Turbine Tower

## 【作者名、單位】

---

吳孟儒/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 副研究員  
陳錦城/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 研究員  
劉瑞弘/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 工程師  
張家銘/工研院綠能所 資源應用技術組 動能與溫差發電技術研究室 經理/資深工程師  
03-5917530、M.R.Wu@itri.org.tw

## 關鍵詞(Keywords)

---

- 風力發電機 Wind Turbine
- 振動分析 Vibration Analysis
- 振動監測 Vibration Monitoring

## 摘要((Abstract)

---

本文探討風力發電機塔架會造成自然頻率差異的影響成因，包括風力機塔架組件設計參數、量測法蘭面間隙問題、建立原始設計型式風力機與具有法蘭面間隙風力機 3D 模型；以此為基礎藉由數值模擬計算風力機塔架的自然頻率理論值，同時，也詳細列出法蘭面高強度螺栓鎖固理論、實際鎖固扭力值，確保法蘭面螺栓適當鎖固兩節塔架，並在具有間隙之風力機法蘭面進行實地非破壞性檢測，確保每顆螺栓的完整性，確保目前塔架法蘭面的結構強度不因螺栓造成影響。並進一步實際在塔架法蘭面上裝置監測系統，直接量測塔架振動數據並分析，詳細記錄長時間塔架振動頻率趨勢。

This report is about the impact factors of wind turbine tower natural frequency, included the geometry of flange

gaps and all the bolts on the tower flanges. Meanwhile, this report investigates the wind turbine tower flange gap problem.

About the original designed fundamental natural frequency, this report rebuilt the 3D model of the designated wind turbine tower from the original design specification. About the tower 3D model with flange gaps, the survey work and the statistical analysis of flange gaps geometry were completed. Based on these two 3D models, the 3D grid data, the vibration solution shows the difference of the fundamental frequency.

To the Bolts, this report illustrates the ideal bolt torque of turbine tower. All the bolts go through the non-destructive testing and the results show there is no rift on all the bolts.

This report also successfully built and design and a condition monitoring system (CMS). The detection of frequency value can be analyzed simultaneously through CMS the system. By matching the dominant peaks in the Fourier spectra of the obtained frequency with the characteristic frequency of tower, the wind turbine tower health status can be evaluated.

## 1. 前言

---

台灣風力發電發展已數十年，並在十幾年前開始推動大型陸域風場機組的示範計畫，目前已經有超過 300 部 MW 級的風力發電機，總容量超過 600 MW，主要分布座落在台灣西部沿海一帶，目前陸域風場運維技術已漸漸成熟，然而在運維過程中，會有非典型問題發生，因此進口風力機可衍伸更多研究議題。

大型風力機系統是由許多次大型部件、次系統所組成，包括葉片、輪轂、機艙等，次系統包含電力轉換、傳動系統、控制系統等，每部分硬體、軟體都是經過嚴謹設計與重複流程，再經過整體整合後，才能讓風力機順利穩定的運轉發電。在風力發電機在設計過程中，除了各個元件的設計製造都必須符合規格；在運轉上時的動態監控、運轉效能與安全性更是在後續運維所需監測的重點項目，包括長期轉子運轉頻率、塔架頻率。在台灣環境中，許多自歐洲進口的風力機組設計之初並未考慮到這樣的氣候，加上運行初期，在維修保養上的經驗尚未完全建立累積，因此風力機可能會出現原廠並未考慮到的現象，例如風力機塔架之鎖固法蘭面可能出現縫隙，可能導致自然振動頻率變化而造成的重大安全事故，因此必須對於自然振動頻率的影響成因有所深入探討，了解風力機的主結構參數以及各法蘭面螺栓等議題為本文的重點對象[1]。

## 2. 風力機塔架介紹

---

大型風力發電機從外觀組件來看，一般由葉片(Blades)、輪轂(Hub)、機艙 (Nacelle)、發電機(Generator)、塔架(Tower)等等關鍵元件所組成，其中在機艙內還可能包含增速齒輪箱(Gearbox)與其他次系統組成。其中本文所討論的塔架功用為承載葉片、輪轂、機艙、發電機所有重量，在設計流程上會依照風況與風力機容量等設計條件，訂定其高度。塔架建置在小型風力機上，並無太大問題。目前以 2 MW 以上風力機為市場主流，塔架高度也隨著容量提高而增高，高度可達 120 m 左右。

### 2.1 風力機基本振動影響參數

風力機主結構從地面基礎開始建造，分別為：塔架、機艙、發電機、輪轂、以及葉片；塔架再依據結構而共

分成三節，如圖 1 所示，基礎至下塔架為地面層，由 M36 螺栓鎖固；下塔架至中塔架稱為下塔-中塔法蘭面，由 128 顆 M30 螺栓鎖固；中塔架至上塔架稱為中塔-上塔法蘭面，由 90 顆 M30 螺栓鎖固；第三樓層為上塔架與機艙連接面，整座塔架必須承受機艙、發電機、輪轂、以及三隻葉片的重量，共承受約 100 噸的重量，如表 1 所示。

表 1、大型風力機塔架所需承受之質量表

名稱	數量	質量(噸)	總質量(噸)
機艙	1	17	17
發電機	1	48	48
輪轂	1	17	17
葉片	3	6	18
		合計	100

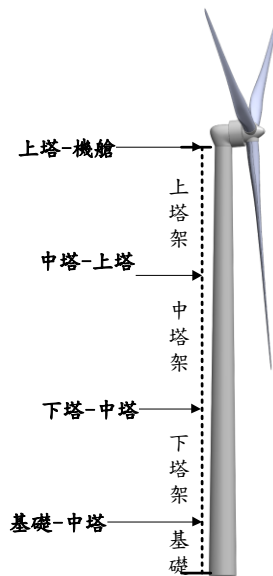


圖 1、風力機塔架分層圖

## 2.2 風力機法蘭面之高強度螺栓

在塔架法蘭面連結面是由高強度螺栓所鎖固，當良好的高強度螺栓在正常的鎖固扭力值下，高強度螺栓有適當的應變變形量，可將法蘭面以預力夾緊達到為完全面接觸，應對整體風力機的自然頻率或工作頻率有較小的影響，因此要確保風力機塔架具有穩定的機械性質，高強度螺栓的完整性、嚴謹的螺栓鎖固工法。由於各層螺栓規格不盡相同，依據每層法蘭面的螺栓規格，必須經過螺栓鎖固方程式確保螺栓鎖固扭力值，如下列數學式所示。

$$T = KF_p D$$

$$F_p = cF_i = cA_t \sigma_y$$

其中 K 為扭轉係數，基本是可由螺栓與螺帽接觸面處理決定，可分為潤滑處理與無潤滑處理，其潤滑處理後的係數 K 值範圍為 0.1~0.15， $F_p$  為設計預緊力，D 為螺栓直徑， $F_i$  為螺栓承受負載， $A_t$  為螺栓有效受壓截面積， $\sigma_y$  為螺栓抗拉強度。經由鎖固方程式可算出風力機法蘭面的螺栓所需要的鎖固扭力值。

### 2.3 風力機塔架法蘭面間隙現象

風力機塔架是由兩三節塔架組成並非一體成形，因此連結法蘭面會有大小不一間隙，以肉眼實際觀察每樓層的法蘭面上，出現可見的不等距間隙，間隙可能因組裝、運轉震動、環境因素等有所不同，此間隙現象可能造成風力機整體結構強度與振動頻率問題，因此必須以採取多點探測的量測形式，確定風力機塔架法蘭面的間隙開口程度，持續觀測法蘭面間隙的未來成長。

風力機塔架法蘭面間隙量測主要是針對各樓層的螺栓位置部分，每層以五顆間隔的採樣模式做量測，並依據各螺栓編號做為間隙的圓周座標座落位置。圖 2 為法蘭面間隙部分圖。



圖 2、法蘭面間隙部分圖

在風力機法蘭面間隙的量測統計中，螺栓編號一號放置於 X 軸上正端以逆時針方式定位各螺栓，建構出法蘭面的裂縫深度與高度，經過統計運算，此樓間隙深度平均為 58.3 mm，標準差為 16.18，最大值為 90 mm。由於第一樓層的壁厚約為 400 mm，因此可知道目前平均裂縫佔壁厚的 14.6%，建立塔架橫向剖面的間隙深度，圖 3 為深度放大 10 倍後與原始理想塔架真圓的的差異性，可發現其間隙深度並沒有一定規律，鏽蝕的間隙並無因為風力機重量質心位置而有非常大的影響。

在風力機法蘭面間隙的高度量測統計，螺栓編號一號放置於圓點位置，建構出法蘭面的間隙高度平均為 2.58 mm，標準差為 0.55，最大值為 3.75 mm，如圖 4 所示。

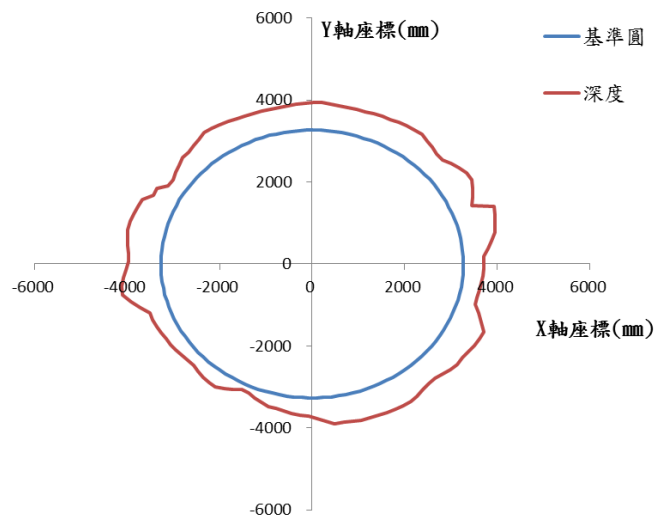


圖 3、第一樓層的法蘭面裂縫深度

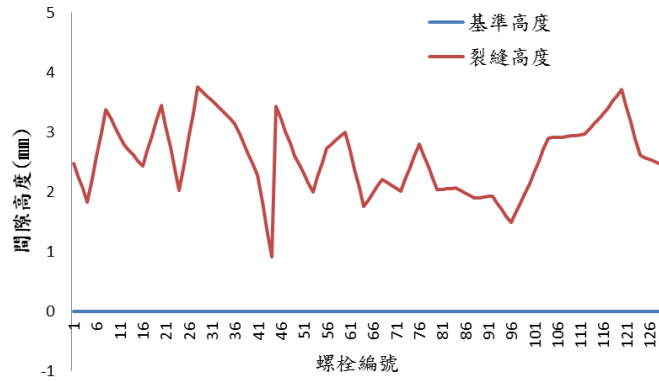


圖 4、第一樓層的法蘭面裂縫高度

在風力機法蘭面間隙的深度量測統計，螺栓編號一號放置於 x 軸上正端以逆時針方式定位各螺栓，建構出法蘭面的裂縫深度，經過統計運算，此裂縫深度，經過統計運算，此樓間隙深度平均為 42.12 mm，標準差為 14.78，最大值為 81 mm。由於第二樓層的壁厚約為 400 mm，因此可知道目前平均裂縫佔壁厚的 10.5%，圖 5 為深度放大 10 倍後與原始理想塔架真圖的的差異性，可發現其間隙深度並沒有一定規律，鏽蝕的間隙並無因為風力機重量質心位置而有非常大的影響。

在間隙的高度量測統計，螺栓編號一號放置於圓點位置，建構出法蘭面的間隙平均為 1.74 mm，標準差為 0.77，最大值為 3.21 mm，如所示圖 6。

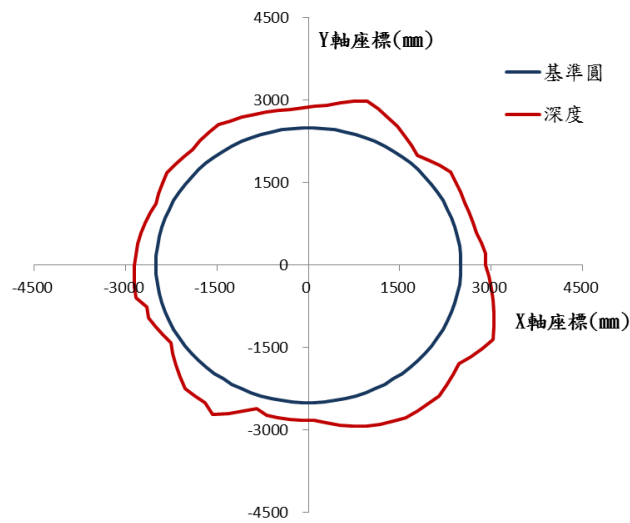


圖 5、第二樓層的法蘭面裂縫深度

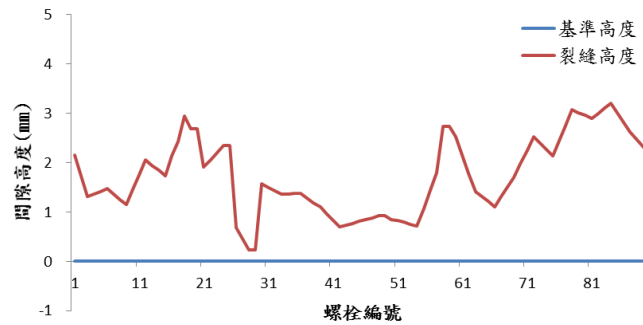


圖 6、第二樓層之法蘭面裂縫高度

由本次間隙量測統計，可了解第一樓層の間隙深度(14.6%)大於第二樓層の間隙比例(10.5%)，第一樓層所要承受的質量較重，經長時間的疲勞振動會導致第一樓層間隙深度較深，在裂縫中有非常多的生鏽鐵屑與髒汙，因此可能裂縫深度無法完全量測，造成量測精度的不精確，預估實際深度應比本次量測質還要大。

### 3. 塔架法蘭面振動分析

本章闡述風力機振動頻率理論基礎，並依據法蘭面間隙測量測統計結果，建立風力機原設計 3D 模型與具有間隙破損的風力機 3D 模型，並由 ANSYS 數值模擬軟體進行振動分析。

#### 3.1 塔架振動理論與設定

每個結構系統都具備獨特的自然振動頻率，會依據其幾何、材質、以及固定邊界而有所變異，而最低頻的自然振動頻率稱為基本自然振動頻率。數值模擬中常使用模態分析，預估結構系統所設計的基本自然振動頻率，所得的結果可以達到以下目的：避開機構總組部件發生共振現象，使機構因共振遭受破壞。自然振動頻率可以代表一個結構的整體剛度，不同的振動形狀所相對的頻率代表該變形下的剛度數值，依此可以評估整體結構所需要加強的部位。同時，自然振動頻率可應用於動力分析，結構反應的放大現象。

風力機設計過程中，風力機塔架的自然振動頻率與葉輪轉子的轉動頻率息息相關，風力機工作運轉會造成塔架承受不斷變化的額外負載，由於葉輪持續旋轉，但轉速會變化，使得旋轉頻率並非固定，因此一般以每一轉的發生次數來代表其頻率，即一般常見的  $nP$  ( $n$  times per revolution)， $nP$  中的  $P$  代表的是每圈(Per revolution)，也就是風力機每轉一圈會有  $n$  次的負載，常見負載包括葉片所承受的重力負載(1P)、風剪切(wind shear, 1P、2P、3P)、塔架陰影效應(tower shadow, 1P、2P、3P、4P)、轉向誤差(yaw error, 1P)、結構載荷(3P、6P、9P)等。其中風力機葉輪轉動頻率每轉一圈一次，稱為 1P(1 time per revolution)；三葉片的風力機由於每轉一圈會對結構造成三次的影響，此轉動頻率稱為 3P；包含塔架以及軸承、發電機等傳動鏈元件都與此頻率息息相關。1P 與 3P 將振動頻率區分為三個區間振動頻率，而大型風力機塔架的基本自然頻率落在第二區間，因此維持塔架自然頻率在適當的範圍，才不會導致共振現象，使結構反應放大。

基於以上理論，配合表 1 的質量繪製大型風力機塔架 3D 模型，可建立國內大型風力機之數值模型，運用 ANSYS 數值模擬軟體，依據各細部幾何形狀進行網格切割，如圖 7 所示，並在軟體介面中輸入風力機塔架邊界

條件與機艙、發電機、輪轂葉扇等機械性質，以進行振動頻率的模擬分析。



圖 7、風力機整體網格切割

### 3.2 塔架振動數值模擬結果

經由 ANSYS 數值模擬軟體所計算出風力機塔架的設計基礎自然頻率為 0.4336 Hz ;匯入分別具有下塔-中塔間隙與中塔-上塔間隙風力機 3D 模型，可以分別得到 0.4338 Hz 與 0.4391 Hz，從各別樓層間隙可以發現高層的間隙會使自然頻率變化較大，將具有上下兩層間隙塔架 3D 模型匯入，其自然頻率為 0.4392，比設計值高，如圖 8 所示。此趨勢的可能原因為風力機塔架質量微量減少，導致自然頻率有上升的趨勢，然而這會導致法蘭面承受應力面積縮小，壓力變大，而有應力集中的現象，引起結構的整體強度稍微下降。再者，在實際風力機層面上，機艙、發電機、以及輪轂內部會因為內部物件配置而使塔架質心與理論質不同，因此必須依據模擬的自然頻率值，預留一定的安全頻率範圍以彌補理論與實際質的差異。

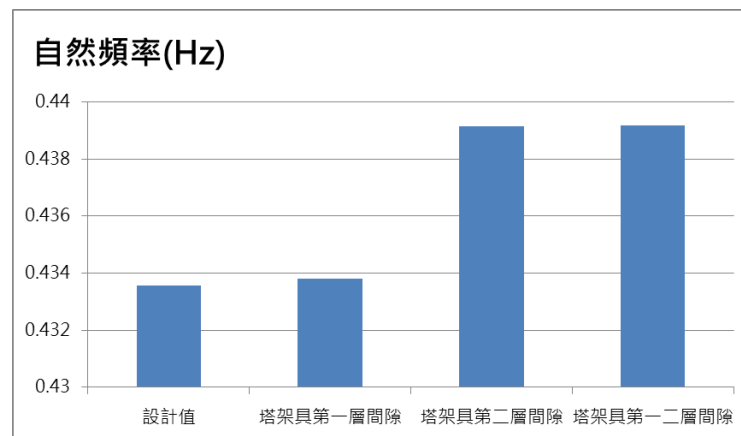


圖 8、風力機塔架自然頻率比較圖

## 4. 塔架法蘭面實際測試與數據分析

### 4.1 實際測試系統架構

NI Compact DAQ 系統將感測器量測作業整合了電壓、電流與數位訊號，為一混合式量測系統，具有 8 槽式 NI Compact DAQ 乙太網路機箱，其中外接 NI 9234 具備(4 個通道、 $\pm 5\text{ V}$ 、每通道 51.2 kS/s 取樣率、24 位元 IEPE) 及 NI 9401 具備(8 個通道、5 V/TTL)。在振動感測器方面，圖 9 顯示了振動傳感器，左邊為三軸加速度規，右邊為單軸低頻加速規，目前在機艙頂部採用三軸加速度規(Model 65 Isotron accelerometer)，具有敏感度(Voltage sensitivity 100 mV/g)/加速度範圍 80 g /頻率範圍 $\pm 3\text{dB}$ (Amplitude response 0.4 to 14 KHz) /輸出格式:IEPE 相容規格，於塔架第一層級第二層採用低頻振動感測器 (PCB 393B31) 具有高靈敏度及高性能之低頻加速規，用以檢測大型風力機塔架檢測振動之加速規，具備單軸訊號之擷取，敏感度 Sensitivity ( $\pm 5\%$ ) 10.0 V/g/加速度範圍 Measurement Range 0.5 g pk/ 頻率範圍 Frequency Range ( $\pm 5\%$ ) 0.1 to 200 Hz/輸出格式:IEPE 相容規格。透過加速規的振動信號量測可以長時間紀錄塔架振動信號以利後續分析。



圖 9、振動傳感器，左邊為三軸加速度規，右邊為單軸低頻加速規



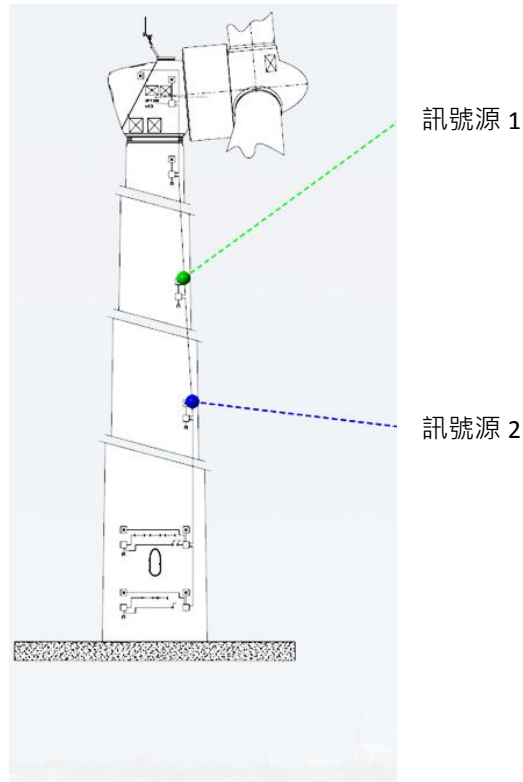


圖 10、感測位置

#### 4.2 塔架法蘭面量測數據與分析

具備網路遠端登入與監看功能，可透過遠端登入帳號可以觀察風力機塔架即時狀態，圖 11 為風力機塔架振動監控系統啟用畫面。圖 12 可見振動頻率趨勢分析，藉由趨勢分析可以看出長時間振動所產生的變化，觀察一整年資訊；包含冬天的東北季風時期以及夏天的颱風時所監測到的資訊，以利評估更具可靠之結論。圖 13 為風力機塔架即時訊號監測與振幅頻譜監控介面，塔架所標示為加速感測器所放置位置，塔架旁邊為時間面振動信號訊號，右邊為振幅頻譜，右下角分別為塔架 1 倍基頻、2 倍基頻、葉片轉速 1P 頻率及 2P 頻率，透過即時畫面可以觀察出塔架目前狀況，當所測得之塔架頻率與葉片轉速頻率接近時可以即時觀察。



圖 11、風力機塔架振動監控系統啟用畫面

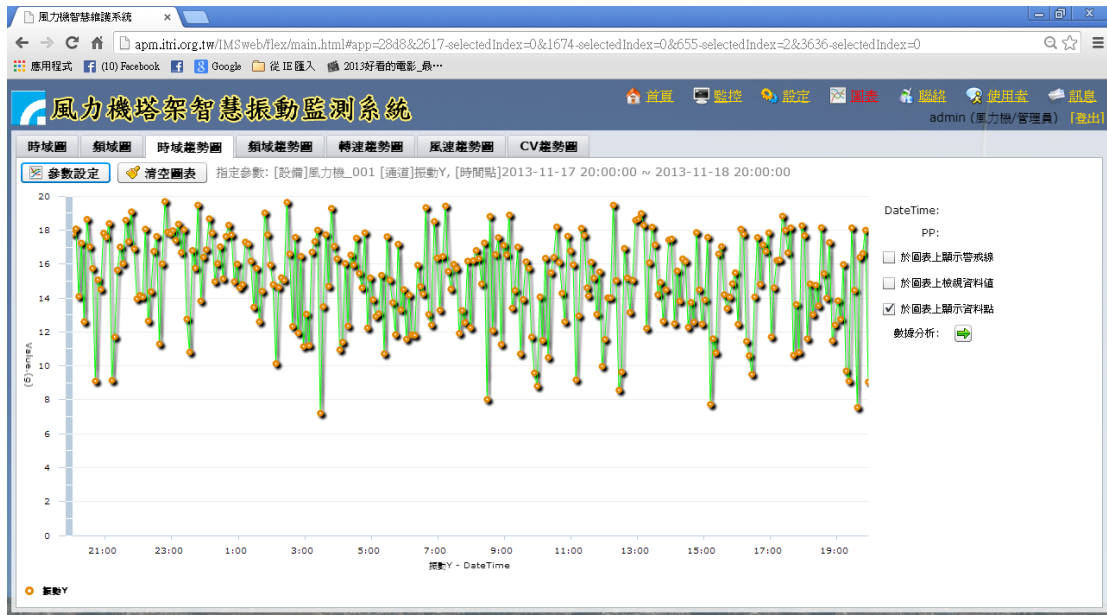


圖 12、振動頻率趨勢分析



圖 13、即時訊號監測與振幅頻譜分析

圖 14 為風力機塔架頻率分析，以實測發電量 400 KW 為例，塔架 1st 為 0.45 Hz；塔架 2rd 為 3.48 Hz；根據 GL 的陸域風力機設計規範塔架基頻/倍頻與風力機葉片轉速 1P/3P 必須符合正負 5 % 容許誤差。圖 15 為監測系統之警戒值設定判斷與預警功能，圖中紅色線為警戒值之設定，可以透過警戒值之設定，當振動振幅過大時系統會發出警訊，有效確保風力機塔架安全[2]。

若是分析風力機具有法蘭面間隙的情形，以正負 10 % 保守來評估塔架 1st 範圍介於 0.405 Hz~0.495 Hz 之間，這頻率區間必須避開葉片轉速 1P 所產生之頻率，目前大型風力機運轉 1500 KW 所對應的轉速為 21.6 rpm；2000 KW 所對應的轉速為 22.4 rpm；由圖 16 可以看出 2000 KW 時的轉速 1P 頻率為 0.37 Hz，仍符合安全標準範圍內，可判定目前此法蘭面間隙情形並不會造成風力機運轉時的共振現象。

根據推算葉片轉速可達 25 rpm 時葉片轉速 1P 頻率才會接近塔架的 1st 的 0.45 Hz；因此轉速 25~26 rpm 時必須特別注意；3P 的頻率在 9~10 rpm 時亦會接近 0.45 Hz，因此也是必須特別注意的轉速；但由於 3P 轉速所對應到塔架 1st 基頻 0.45 Hz 時轉速較低，持續的時間也不會太長，因此對塔架之共振頻率影響較低。若進一步考慮法蘭面產生之影響，以數值模擬之結果塔架 1st 頻率反而有偏高的趨勢，但仍需持觀察法蘭面間隙與塔架的振動量，繼續監測轉子轉速與塔架 1st 基頻是否有共振產生。

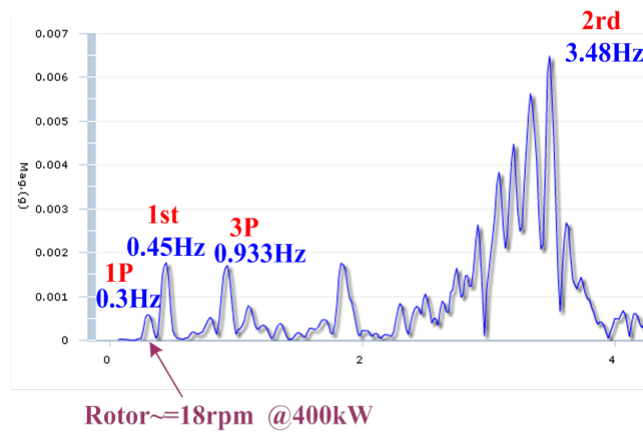


圖 14、塔架頻率分析

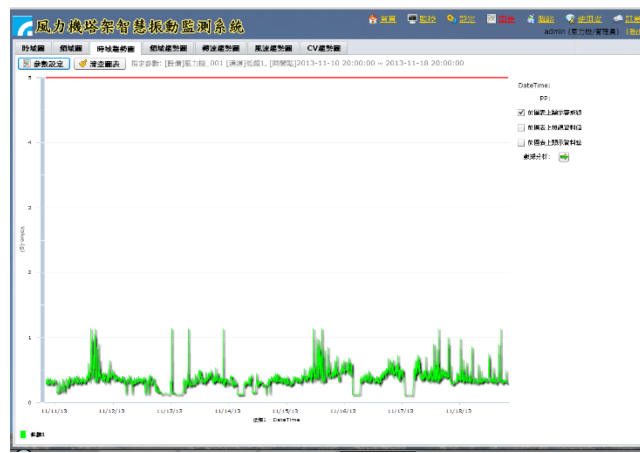


圖 15、監測系統之警戒值設定判斷與預警功能

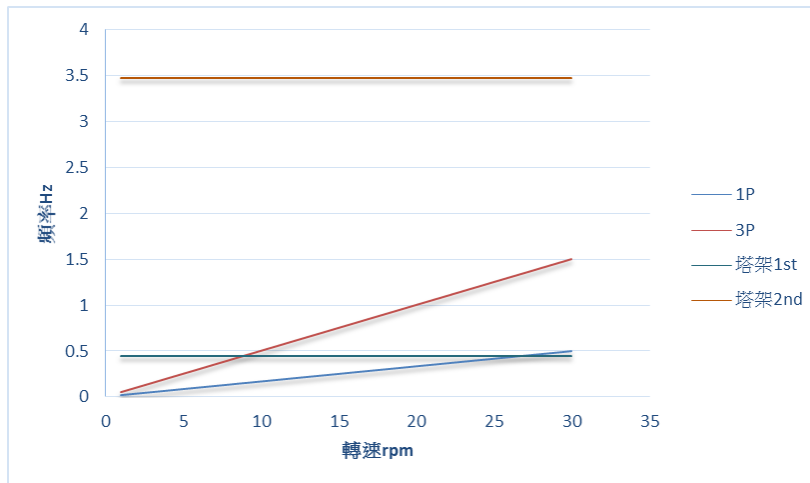


圖 16、塔架轉速-頻率分析

## 5. 結論

針對大型風力發電機完成法蘭面間隙問題剖析與振動頻率分析，同時建置塔架法蘭面的監測分析系統。透

過「塔架法蘭面問題剖析」、「塔架法蘭面量測」、「塔架法蘭面振動分析」、以及「塔架法蘭面監測系統與數值分析」等內容，分別說明法蘭面間隙現象，經由實地探測法蘭面間隙深度與高度以建立風力機塔架之不同模型，針對有間隙與無間隙兩不同風力機模型，透過三維網格進行模擬分析其自然振動頻率，得到自然頻率會因間隙有無而變動，其間隙可能會造成塔架強度稍微下降。

另一方面針對塔架法蘭面上螺栓部分，以螺栓理論鎖固值與正常施作工法連結兩塔架法蘭面，再以非破壞檢測確保螺栓並無因目前間隙而產生裂傷。藉由振動監測系統之安裝與資料分析，監測塔架安全餘裕與振動頻譜，進行監測與分析報告，以便在重大故障未發生之前，預先得知某些徵兆並預做處理。

## 誌謝

---

本文為經濟部能源局補助之陸海域風力發電設置推動及技術研發計畫 (104-D0106)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] 劉瑞弘,“風力機結構負載與共振模態之分析”機械工業雜誌,vol 319, pp26-33, 2009.
- [2] EWEA Report, “Prioritizing Wind Energy Research – Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector”, pp27-28, July 2005.