

# 風力發電機之槳距控制對功率與噪音影響評估——以核研所25 kW水平軸風力機為例

林彥廷<sup>1\*</sup>

## 摘 要

本論文實驗量測與分析核能研究所25kW水平軸風力發電機之發電功率與運轉噪音。量測方法依照IEC61400-11量測要求，並利用CESVA公司之SC310手持式聲波噪音量測儀記錄25 kW風力機之1/3八音度聲音特性與每秒平均聲噪。量測方式亦採用全頻噪音記錄並透過FFT (Fast Fourier Transform)轉換解析地面聲噪。研究結果顯示葉片槳距角調整為80度之待機位置時，平均風速由2.5 m/s增加8.5 m/s將造成背景全頻噪音由49 dB(A)提升到57 dB(A)。而採用最低葉片槳距角5度運轉時，高速風況下地面量測之氣動力噪音則與待機狀態相似。而在高風速下低頻噪音於槳距角80度與5度分別為44.48 dB(A)與51.78 dB(A)。FFT頻譜圖結果呈現槳距角變化條件下聲頻約在180 Hz、320 Hz、560 Hz與580 Hz有明顯差異。在發電功率方面，在相同的風速下較低的槳距角呈現出較高的轉速與發電功率，槳距角5度於風速9.24 m/s之最高運轉效率與發電功率分別為28.81%與17 kW，啟動槳距角45度於風速7.18 m/s之最高運轉功率以及發電功率則分別為2.08%與580 W。槳距角5度約比槳距角15度所產生的發電功率增加1.5倍，但所產生的氣動力噪音呈現相近數值。

**關鍵詞：**25 kW水平軸風力機、氣動力噪音、槳距角控制、發電功率

## 1. 前 言

由於臺灣缺乏初級能源因此能源皆仰賴國外進口，但利用傳統燃煤或天然氣火力發電之尾氣對大氣的排放易造成環境汙染與引發溫室效應，並衝擊生態系統與自然環境。故臺灣必須積極開發適合自生優勢之綠色能源以解決前述議題。臺灣為位於北回歸線之海島且於冬季與夏季分別有東北季風與西南氣流通過，因此風能為可利用之綠色能源。於106年6月底止，臺灣大型風力機組亦已安裝建置345部，其中國營台電公司169部，其他民間企業176部，總裝置容量為690 MW，至106年6月之總發電量為8

億895萬度。預計114年裝置容量達9,952 MW。此外，政府也透過國內離岸風機設置之能源國家型計畫，並整合產官學研各界之科技研發資源，以協助相關技術的建立順利推動此國家重大的風力發電政策。風力發電機是被廣泛運用於風場與季風帶之綠能發電技術。由於製造設備偏向於基礎建設之重工業產業，因此被歐美國家與中國大陸等能源產業大力推廣。但臺灣社會為地狹人稠的居住環境，因此風力機之安裝位置則容易影響居住環境，如聲波噪音與視覺影響。故相對於大型風力機位於人口密度低之海岸安裝環境，30 kW以下之風力機系統比大型風力機系統更適合裝置於都會區並提供電

<sup>1</sup> 行政院原子能委員會核能研究所機械及系統工程專案 副研究員  
\*通訊作者電話: 03-4711400#3356, E-mail: [yantinglin@iner.gov.tw](mailto:yantinglin@iner.gov.tw)

收到日期: 2018年10月09日  
修正日期: 2019年01月09日  
接受日期: 2019年04月02日

力需求，經濟部也於107年提供每度8.6元新臺幣之躉購電價補助再生能源業者安裝30 kW風力機系統，如表1所示。但由於中小型風力機安裝於城市與人口稠密處容易造成運轉噪音汙染，可能對周遭居民造成生活困擾。因此在規劃大型或中小型安裝風力發電機通常必須距離住家超過三百公尺以上，才能使產生的聲波噪音低於45 dBA以被背景噪音所覆蓋。

根據過去的風力機噪音研究文獻(Bruijn *et al.*, 1984；Hubbard and Shepherd, 1991；Guidati *et al.*, 2000)，風力發電機之聲波噪音的可區分為兩類，分別為因為驅動元件與齒輪組震動所產生的機械噪音，另一為風力機葉片旋轉所產生的聲波氣動力噪音。機械震動噪音對於風力

機整體的噪音量佔有一定的比例，而機械噪音可利用聲波吸收材料(Wagner *et al.*, 1996)貼附於機艙內表面以消除機械震動所產生的噪音。葉片氣動力噪音則直接對環境傳遞因此難以消除(Jakobsen and Andersen, 1993；Oerlemans *et al.*, 2007)，其聲波噪音的來源又可區分為兩類：上游流場之紊流作用於葉片上造成之振動噪音散射，另一類為風力機葉片與上游風速流場交互作用所產生的噪音。風力機葉片之噪音亦可再分成各類聲波噪音產生機制(Brooks *et al.*, 1989)，其中最主要的兩類為紊流邊界層造成的後緣聲波噪音與葉片翼尖渦流聲波噪音。早期的風力機噪音研究主要著重於定位出聲波噪音源但近期的研究則聚焦於噪音源的消除。根

表1 107年度再生能源(太陽光電除外)發電設備電能躉購費率(經濟部公告 2018)

再生能源類別	分類	裝置容量級距	躉購費率(元/度)		
風力	陸域	1瓩以上不及30瓩	8.6685		
		30瓩以上	有安裝或具備LVRT者	2.7669	
			無安裝或具備LVRT者	2.7315	
	離岸	1瓩以上	固定20年躉購費率 <sup>註1</sup> (上限費率) <sup>註2</sup>		5.8498
			階梯式躉購費率 <sup>註3</sup>	前10年	7.1177
				後10年	3.5685
川流式水力	無區分	1瓩以上	2.7988		
地熱能	無區分	1瓩以上	固定20年躉購費率 <sup>註4</sup>		5.1956
			階梯式躉購費率 <sup>註5</sup>	前10年	6.1710
				後10年	3.5685
生質能	無厭氧消化設備	1瓩以上	2.5765		
	有厭氧消化設備		5.0161		
廢棄物	無區分	1瓩以上	3.8945		
其他(海洋能、氫能或其他經中央主管認定可永續利用之能源)	無區分	1瓩以上	2.3226		

註1：屬離岸型風力發電設備，選擇適用固定20年躉購費率者，躉購費率為5.8498元/度。  
 註2：屬離岸型風力發電設備競標適用對象者，其上限費率為5.8498元/度。  
 註3：屬離岸型風力發電設備，選擇適用階梯式躉購費率者，前10年適用費率為7.1177元/度，後10年起適用費率為3.5685元/度。  
 註4：屬地熱能發電設備，選擇適用固定20年躉購費率者，躉購費率為5.1956元/度。  
 註5：屬地熱能發電設備，選擇適用階梯式躉購費率者，前10年適用費率為6.1710元/度，後10年起適用費率為3.5685元/度。

據目前的風力機發展現況，風力機的運轉速度有時必須受限於噪音的影響，且大多是透過試誤法改變翼尖造型以降低氣動力聲波噪音。又根據Sandia針對美商奇異公司2.3 MW原型風力機(Oerlemans and Schepers, 2009)之噪音量測研究，葉片設計對噪音的影響類型並歸納出以下現象：1. 風力機葉片噪音聲波噪音通常大於機械噪音，且通常機械噪音皆來自於機艙內部。2. 風力機葉片的最大聲波噪音大多來自於翼尖端附近。該研究透過地面麥克風設備對風力機之環繞量測，葉片下游的聲波噪音略比葉片上游多15 dB。此上下游的聲噪差異符合氣動力學對於後緣聲噪的理論分析。此外，由於都普勒效應(Doppler effect)與聲噪源的結合效應，地面所測得的聲波噪音通常大於實際聲噪值，且紊流流入聲波噪音主要表現在風力機聲波噪音頻譜中的低頻段。同樣須注意的是，由於製造缺陷或運轉損壞所造成的葉片表面缺陷可能導致非常響亮的氣動力噪音源。

風力機葉片後緣所產生的噪音主要可區分為兩種過程(Barone, 2011)：後緣鈍端(Blunt TE)所造成的卡門渦街(Kármán vortex street)效應之聲波噪音以及紊流邊界層造成後緣聲波噪音(TBL-TE)。Blunt TE發生在葉片翼型末段因製造或設計所產生的有限厚度所形成的鈍形末端。當此末端大小相對於翼型後緣之邊界層厚度形成一定比例後，將於此末端形成渦流效應。渦流效應將造成壓力擾動而形成聲波噪音，且聲波噪音通常相對強烈並形成較窄的頻段。Blunt TE聲噪對於新型與大尺寸的風力機葉片通常不會造成顯著的影響，此類聲波噪音源可採用降低後緣厚度消除。TBL-TE的聲波噪音稱為後緣噪音，是由紊流擾動葉片邊界層而在後緣處產生寬頻段聲噪的輻射擴散。後緣聲波噪音的理論聲壓可定義如下(Williams and Hall, 2011；Howe, 1978；Oerlemans and Schepers, 2009)：

$$Pre^2 \propto \frac{\rho_0^2}{c^2} \frac{U^5 L \delta}{r^2} D \quad (1)$$

上式中， $r$  為後緣到量測點的距離、 $Pre^2$  為聲壓的強度、聲速與流體密度分別為  $c$  與  $\rho_0$ ， $L$  為風力機葉片翼長、 $\delta$  為後緣處的邊界層厚度、後緣附近的外流場流速為  $U$  以及  $D$  是由採樣點到邊緣角度所構成的方向性函數。由於風力機葉片翼尖端的速度為轉速與半徑之乘積，因此在聲噪的強度約為風速之5次方關係限制了風力機葉片旋轉的速度。故在理論關係式的定義下，增加15%的葉片轉動速度則會提高3 dB的聲波噪音。因此在設計良好之風力機葉片可在噪音法規要求內提供更高速度之風力機轉速。本論文分析核研所25 kW水平軸風力機在固定槳距角位置之轉速、風速與聲波噪音值之相互關係，並分析量測氣動力噪音於各槳距角之頻譜結果與發電功率，以確認核研所25 kW風力機於各槳距角與環境風速之運轉功率與聲波噪音關係。

## 2. 核能研究所25 kW水平軸風力發電機

核研所於2005年開發25 kW水平軸風力發電機，其目的為建立國內自主風力機技術並透過此實驗平台開發與實驗風能相關技術並建立商業規範與推廣中小型風力發電機組(蘇煒年與張欽然，2009)，如圖1。核研所25 kW風力機為切入風速4 m/s、額定風速12 m/s與切出風速22 m/s之上風型三葉式風力機，風力機規格符



圖1 核研所25 kW水平軸風力發電機(拍攝於核研所)



合IEC 61400-1 Class-IA標準並通過系統功能與結構安全檢核，系統規格與結構分別如表2與圖2所示。25 kW風力機採用主動式控制系統，如可隨環境風速與轉子轉速改變攻角之風力機葉片槳距角轉動系統(Pitch control)、自動追風的機艙偏航系統(Yaw control)以及確保轉子可在緊急情況下安全減速、剎車或停止旋轉之主軸剎車控制系統(Shaft brake control)等。整體風力機系統並設有各類監控系統如：風速與風向監測、發電機與逆變器發電功率、溫度與轉速資訊以及各類震動及噪音訊號與結構元件應變

表2 核研所25 kW水平軸風力機規格(本研究整理)

風力機等級	IEC Class-IA
設計標準	IEC-61400-1
葉片數目	3
上風型 / 下風型	Upwind
額定輸出功率	25 kW
輪轂高度	25 m
切入風速	4 m/s
額定功率風速	11 m/s
切出風速	25 m/s
額定功率葉片轉速	60 ~ 75 RPM
尖端速度比	< 5.0
葉片氣動力效率	> 35%
機械效率	> 95%
發電機效率	> 92%
電力轉換系統效率	> 85%
槳距角控制	主動式控制 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$
方向控制	主動式控制 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$
煞車裝置	碟式煞車@低速軸
發電機	永磁式發電機
齒輪比	5
發電機起動扭力	$\sim 40$ N-m

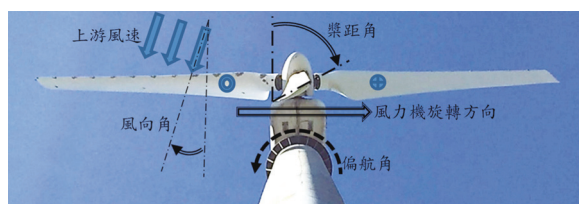
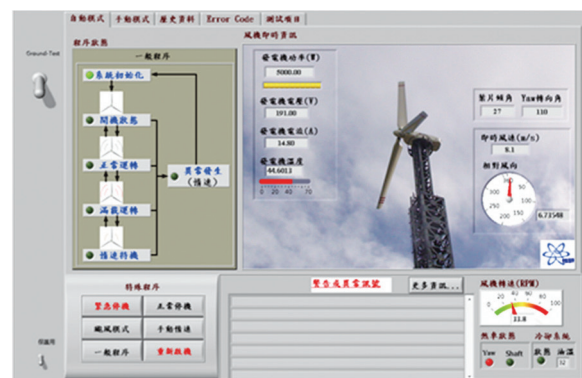


圖2 風力機葉片槳距角變化示意圖(拍攝於核研所)

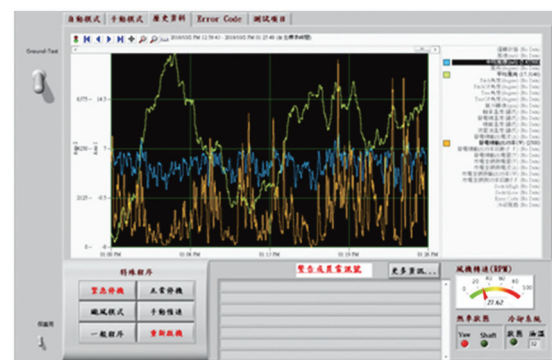
資訊擷取。機械系統控制主要採用液壓系統完成葉片槳距角轉動與偏航角的調控，並於控制系統與葉片末端安裝防雷擊保護裝置。風力機控制系統採用NI LabView人機介面，並開發自動運轉與手動運轉模式，如圖3(a)與圖3(b)。其自動運轉模式可提供自動追風、自動槳距角調控、滿載運轉、恆速運轉、特定功率輸出、颱風模式與發電效率-結構負荷等控制模式以發電量為優先模式。手動模式則可提供固定偏航角、固定槳距角與調整轉速-功率曲線模式運



(a)自動運轉模式



(b)手動控制模式



(c)歷史資料模式

圖3 核研所25 kW水平軸風力發電機人機介面(本研究製作)

轉，以提供各類風力機運轉研究開發使用。人機介面於歷史資料完整記錄運轉風力機之(平均)風速、(平均)風向、槳距角、(平均)逆變器發電功率及其電壓電流、(平均)發電機發電功率與其電流電流、槳距角、方位角、發電機與機艙溫度、油壓系統溫度與系統功率因數，詳如圖3(c)。

核研所25 kW風力機葉片設計以FX63-137為葉片之主要截面。FX63-137係以最大化Cl-Cd比值為目標且針對滑翔翼飛機所設計之翼截面。然而該翼截面之最大厚度約為弦長之13.7%，其尺寸不足以提供足夠之葉片根部設計結構支撐。因此，本風力機葉片以原始之Camber Line，分別增厚30%成為FX63-300翼型，以及減薄12%成為FX63-120翼型。FX63-300翼型用於根部幾何以提供內部箱型樑支撐結構，而FX63-120用於翼尖端以減低葉片氣動力噪音；最後在FX63-300與FX63-137截面之間，以及FX63-137與FX63-120截面之間分別插入厚度漸近變化之翼截面以將葉片厚度及外形平順變化。核研所25 kW風力機葉片之最終翼截面配置如表3所示。核研所25 kW風力機不僅以擷取最大功率為目標，更注重安全與穩定性運

轉，其風力機旋轉直徑為12.46 m，尺寸適合安裝於城市與郊區等區域，並可應用於併網或是孤島運轉模式。

### 3. 風力機運轉資料量測方式

風力機運轉資料係透過各類擷取訊號安裝於風力機各組件以獲得運轉資訊，而風力機之發電量與驅動系統之機械傳動與電源轉換器之效率亦必須校正，以確保風力機總發電效率合乎設計效率與量測數據之正確性。於本研究中25 kW水平軸風力機利用核研所自製之200 kW地面動力測試平台(Dyno)完成輸入轉速與功率對輸出功率之關係。該動力平台可根據風力機系統導入葉片轉子在環境風速下的氣動力特性曲線(RPM to Nm)以輸出轉速與功率並進行各零件之整體運轉效能測試，如發電機與齒輪箱等。根據動力平台與串接電阻負載測試風力機系統機效率得知，本風力發電機轉子於60 RPM時，傳動系統至電源轉換器之效率為93.4%，而在30 RPM之上轉換效率可達在91%以上。故由電力輸出可推算氣動力扭矩，並用於未來計算流體力學之葉片設計驗證，系統架構如圖4所示。關於量測控制系統方面，核研所25 kW水平軸風力機採用National Instrument所開發之CompactRIO控制器，其與地面控制電腦之通訊介面採用乙太網路。在風力機本體亦於槳距角、方位角與發電機位置安裝分別安裝編碼器(Encoder)以量測各部件位置與轉速。為精確擷取風力機各部件轉速與位置訊號，需將運轉角度( $\theta$ )經過感測器量測後，轉換成電壓訊號以提供控制器接收。本研究利用編碼器轉換成方波訊號後，再利用Decoder 解碼成12位元訊號以獲得所需資訊。對於風速風向量測系統則採用YOUNG Model-05103以獲得機艙頂端之環境風速與風向。該儀器可提供風速範圍為0至100 m/s以及與±0.3 m/s誤差，並透過AC弦波訊號在風速加快則輸出頻率越高方式提供量測訊號，之後由Model 18112電路模組將風速0-100 m/s對

表3 核研所25 kW風力機葉片翼截面配置表(本研究整理)

翼展位置 (r/L) r/L：翼截面位置與 翼長比例	翼截面
0.0642	圓
0.0995	圓
0.1765	FX63-300
0.2327	FX63-280
0.2889	FX63-250
0.3451	FX63-210
0.4012	FX63-175
0.4574	FX63-155
0.5136	FX63-137
0.85	FX63-137
0.925	FX63-128
1.0	FX63-120

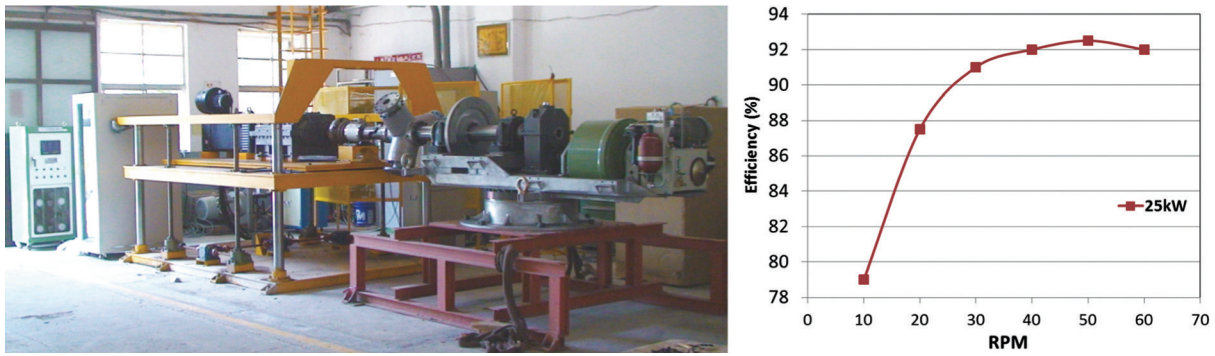


圖4 200 kW地面動力測試平台(拍攝於核研所)與風力機傳動效率曲線(本研究繪製)

應輸出4-20 mA電流訊號，而環境風向量測亦在0-360°之間輸出4至20 mA電流訊號。最後由Rich Electric公司之併網電源轉換器產品完成風力機量測與控制負載。

風力機運轉時實際量測步驟如下：

1. 於風力機開機狀態，調整葉片槳距角為90°待機狀態，如圖4所示。之後利用yaw偏航系統與利用風向儀對準上游來風。
2. 將風力機葉片槳距角調整到45°以啟動風力機運轉發電，並根據IEC 61400的要求。在對風角度偏差30°範圍內，連續10分鐘以上記錄風速、風向、風力機轉速與發電量等資訊。
3. 將葉片槳距角由45°逐漸調整到5°，並依照每5°間隔方式操作並收集數據。此時風力機依照翼型設計逐漸提高轉速與發電量。
4. 若量測過程出現風速過快產生過轉保護、風速低於啟動風速4 m/s以及風向與偏航角差異超過30°，則該項數據不予採用，以確保量測資料建構在正確風向與風速。
5. 當遇到瞬間陣風過快以至於啟動過轉保護造成槳距角上升，則該槳距角資料亦不予採用，需重新調整回正確槳距角重新累積至少10分鐘運轉數據，以確保量測資料係建立在固定槳距角的操作情境。

量測結果如圖5所示，由上而下為槳距角、轉速與機艙風速。由結果可看出槳距角資料為80°完成待機資料收集後，將槳距角修正為45°之連續量測10分鐘後向下修正5°量測，直到槳距角降為5°。風力機的轉速明顯與槳距角相

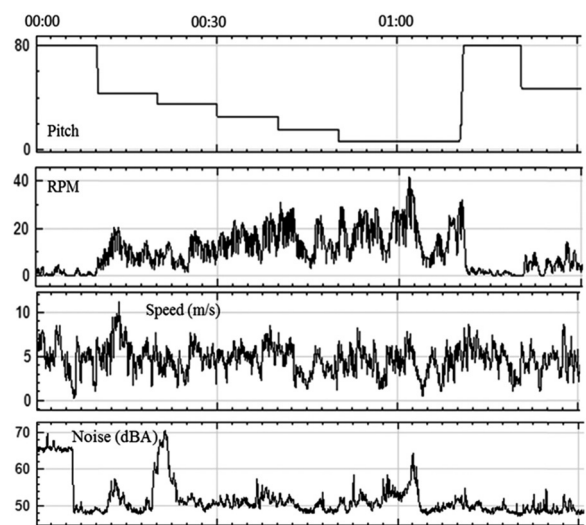


圖5 25 kW風力機量測連續數據資料(由上而下為槳距角、轉速與機艙風速)(本研究繪製)

關，隨著風力機槳距角下降轉速約由0 RPM上升到超過40 RPM。由量測風速歷史資料得知，機艙風速亦隨著槳距角的下降呈現出些微下降現象，約由槳距角8°之5 m/s風速下降到槳距角5°之3 m/s風速。

## 4. 動量理論與機艙風速修正

由於風力發電機風場其周邊多無獨立測風塔或雷射測風儀與雷達測風儀等風速風向儀。因此風力機機艙本體上方的風速風向儀為獲取大氣風速與風向資料唯一來源。但該量測儀器位於上風型風力機後端且靠近機艙，因此容易受渦流、尾流與邊界層影響而失準。本研究利用實驗量測與動量理論修正量測風速，以精確



上游風速並量測風力機於各葉片槳距角影響下氣動力噪音。

根據動量理論(Momentum theory) (Froude, 1889)，風力機葉片的運轉可透過柏努利定律(Bernoulli's principle)與致動圓盤理論(Actuator Disk Theory)定義出風力機葉片上下游流速，如圖6所示。即風力機前方入口流速與壓力為  $U_1$  及  $P_1$ ，在葉片表面前後的流速分別為  $U_2$  及  $U_3$ ，以及流過風力機末端的風速與壓力為  $U_4$  及  $P_4$ 。因為轉動圓盤片會由風能抽取能量，因此  $U_1 > U_{2/3} > U_4$ ，管流面積  $A_1 < A_{2/3} < A_4$ 。故根據上游風速  $U_1$  與風力機葉片後端的風速  $U_4$  之關係可由軸方向誘導係數  $a$  定義，如公式2。

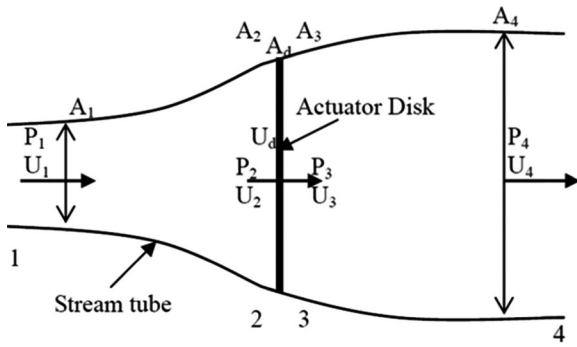


圖6 動量理論示意圖(Froude, 1889)

$$a = 1 - \frac{U_1 + U_4}{2U_1} \quad (2)$$

再假設上游流場與風力機下游尾流區域保持在相同壓力且風力機葉片區域前後的風速與截面積保持不變，風力機氣動力功率可以表示如下：

$$P_{aero} = 1/2 \rho A_{blade} U_1^3 [4a(1-a)^2] \quad (3)$$

其中  $\rho$  以及  $A_{blade}$  分別代表空氣密度與風力機葉片運轉截面積。

根據公式(2)與公式(3)，可推導出  $P_{aero}$ 、 $U_1$  與  $U_4$  的三次方多項式，如公式(4)所示：

$$U_1^3 + U_4 U_1^2 - U_4^2 U_1 - U_4^3 - \frac{4P_{aero}}{\rho A_{blade}} = 0 \quad (4)$$

上式中機艙風速量測值( $U_{measure}$ )假設為出口風速( $U_4$ )。核研所25 kW風力機經由地面運轉測

試得知機械效率約為0.95，以及透過逆變器計算其發電機效率為0.92，25 kW風力機系統結構圖請參考圖7。

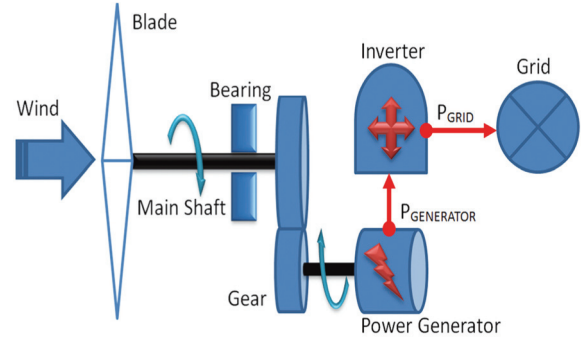


圖7 25 kW風力機系統結構圖(本研究繪製)

圖7表示風力機除氣動力效率轉換外，影響效率部件為軸承與齒輪組摩擦力，以及發電機效率、逆變器併網效率與操作策略。因此由量測之發電機輸出功率( $P_{generator}$ )可求得葉片擷取之功率，如公式(5)所示：

$$P_{aero} = \frac{P_{generator}}{0.92 \times 0.95} \quad (5)$$

故上游風速  $U_1$  可透過機艙風速、運轉發電功率與公式(5)帶入公式(4)後求根得出， $U_1$  實數解即是未受干擾之上游風速(牛山泉，2010；Lin *et al.*, 2017)，但計算出之結果依然存在對風偏航角度誤差與邊界層干擾，未來仍需透過SODAR (Sonic Detection And Ranging)或LIDAR (Light Detection and Ranging)校正以及利用偏航角誤差去除部分量測數據。

圖8為槳距角5°到45°時風力機機艙風速與上游風速的關係。由差異的趨勢可知，隨著槳距角的下降，上游的風速與機艙風速的差異逐漸加大且亦與上游風速成正比關係。根據動量理論原理，隨著槳距角的減少與外界風速的加快，風力機旋轉速度也隨之加快且產生更多輸出電力。因此造成葉片下游風能降低與流速減慢。根據曲線擬合計算，風力機運轉時機艙風速則可經由表4各式計算出。

利用表4的曲線擬合公式可快速修正各槳距角運轉時的葉片上游來流風速並建立正確的

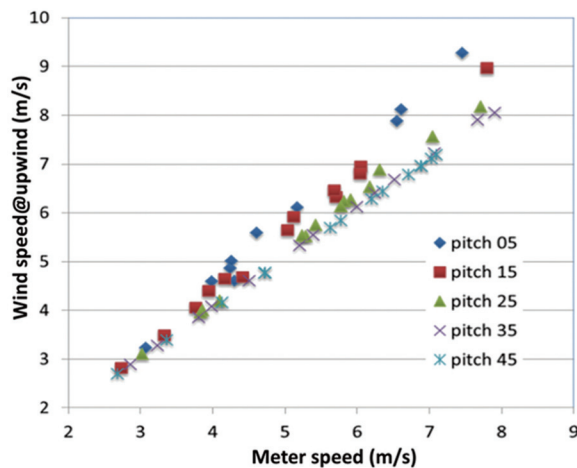


圖8 槳距角5°到45°之機艙風速與上游風速關係圖(本研究繪製)

表4 各槳距角之機艙風速與上游風速關係表(本研究整理)

槳距角	修正公式	決定係數 $R^2$
Pitch 05	$y = 1.3609x - 0.9160$	$R^2 = 0.9936$
Pitch 15	$y = 1.2197x - 0.5150$	$R^2 = 0.9965$
Pitch 25	$y = 1.1101x - 0.2881$	$R^2 = 0.9980$
Pitch 35	$y = 1.0314x - 0.0542$	$R^2 = 0.9998$
Pitch 45	$y = 1.0152x - 0.0314$	$R^2 = 1.0000$

$y = \text{Wind speed@upwind (m/s)}$  ;  $x = \text{Meter speed}$ .

風力機運轉效率。研究結果發現修正風速差異量隨槳距角減少以及風速上升而增加，約由槳距角5°的19%修正量到槳距角45°之1.2%修正量。

## 5. 聲波噪音量測方式與法規要求

依 IEC 61400-11 (IEC Standard, 2012)中 7.2.2規定，風力機噪音量測方法需採用A加權方式記錄聲波噪音並使用1/3八音度記錄頻譜。量測資料至少要連率記錄30次且積分時間不可大於1分鐘。量測風速必須記錄6、7、8、9與10 m/s且並容許正負0.5 m/s誤差。記錄聲波頻率為50~10,000 Hz，記錄時間最少為1分鐘並累積至少30筆數據。量測設備為採用西班牙CESVA Class1積分式全頻與低頻(頻譜)噪音計。該設備

符合Class 1 IEC 60651/60804/61572 (CNS 7129 第1型)量測標準；量測數據可提供L、Lmax、Lmin、Leq、LE、Lpeak、Ln(7x)、LAtm5等資料建立；系統麥克風為高靈敏度1/2極化電容式並含前置放大器，量測頻率為20 Hz~20 KHz及量測範圍由23 dB(A)~137 dB(A)，並具備1秒鐘1筆資料量測時間；頻譜功能提供1/1、1/3八音度與A、C、Z頻率加權，並可連續量測8小時。本次量測過程依照IEC 61400之要求並採用以10分鐘數據資料取平均，並為了降低風切噪音，麥克風前端裝配防風球。每次量測前皆需透過噪音校正裝置以確保噪音數據之可靠性。該CESVA噪音計校正設備採用標準音源方式校正噪音計並符合IEC 60942要求，主要透過其前置放大器與麥克風輸出94 dB與1 kHz，再以噪音計讀取確認誤差在1 dB內。如量測差異超過1 dB或是實驗室校正日期超過1年，則需將校正設備送回實驗室以標準音源校正。圖9則為核研所聲波噪音量測設備與聲音校正裝置。



圖9 聲波噪音量測設備與聲音校正裝置(拍攝於核研所)

而根據環保署對風力發電機的管制要求，風力機的噪音需被區分為全頻與低頻兩類。低頻噪音為20 Hz到200 Hz，其區分為日間、晚間與夜間之噪音管制並依地方政府規劃之住宅位置區分為四類，如表5。全頻噪音的管制要求只區分為日間晚間與夜間兩區分，但當風力機運轉噪音高於前述要求時，則採用增量管制要求，風力機運轉之增量全頻噪音需低於背景全頻噪音，如表6。此外環保署噪音管制要求著重在室內管制，室外環境並非管制範圍。根據IEC 61400-11與ISO 1996-2:2007 Annex (ISO Standards, 2007)之風力機噪音量測辦法，風力機之特徵Tone頻率之特性亦為本研究量測目的(如



表5 行政院環保署對風力機低頻噪音管制要求(本研究整理)

音量 管制區	時段 頻率	20 Hz至200 Hz		
		日間	晚間	夜間
第一類		39	39	36
第二類		39	39	36
第三類		44	44	41
第四類		47	47	44

表6 行政院環保署對風力機全頻噪音管制要求(本研究整理)

室內全頻噪音管制要求(20-20 kHz)
• 日間與晚間全頻噪音管制要求<50 dB(A)
• 夜間全頻噪音管制要求< 40 dB(A)
• 全頻背景與運轉噪音差=<5 dB(A)

表7 IEC 61400-11與ISO 1996-2:2007 Annex之特徵頻率要求(ISO Standards, 2007)

IEC 61400-11 & ISO 1996-2:2007 Annex D	
6.3-20 Hz	18 dB
25-125 Hz	15 dB
160-400 Hz	8 dB
500-10 kHz	6 dB
12.5-20 kHz	6 dB

表7)。在該規定說明利用1/3八音度量測的噪音值，如果有特徵頻率高於周圍頻率一定量時，則該噪音會容易被人耳辨識出而造成不悅。因此即使是全頻或低頻低於法規管制要求但如果在Tone特徵頻率呈現出高過特徵值時，則該風力機依然需要檢討風力機氣動力噪音表現。

## 6. 結果與討論

本實驗量測時間為106年6月到106年8月，量測結果如圖10到圖11。圖10為25 kW風力機

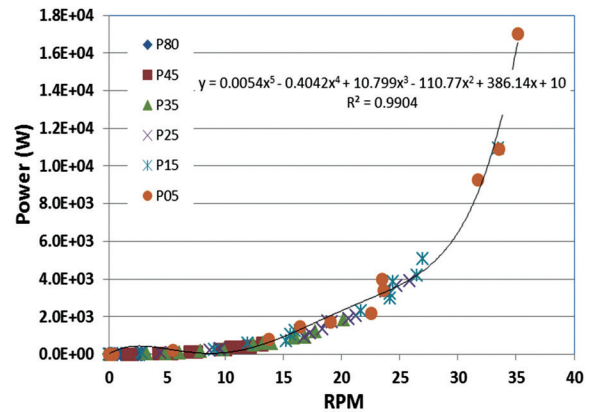


圖10 25 kW風力機轉速、槳距角與功率關係圖(本研究繪製)

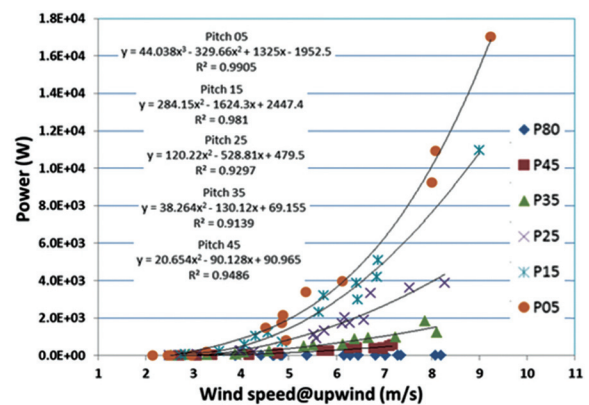


圖11 上游風速與風力機功率關係圖(本研究繪製)

轉速與功率關係圖，主要利用偏航裝置將風力機對準風向後開始收集運轉資料，並同時以10分鐘為周期在特定槳距角條件平均風力機轉速與發電功率等訊息。由結果輸出可得知風力機控制器發電抽載與轉速之關係，根據轉速輸出趨勢可看出約在轉速45 RPM可以達到25 kW額定功率，且在10 RPM以下發電量趨近於0。根據運轉數據收集可將風力機之轉速與功率關係透過回歸分析得到以下經驗式：

$$Power(w) = 0.0054\omega^5 - 0.4042\omega^4 + 10.799\omega^3 - 110.77\omega^2 + 386.14\omega + 10; R^2 = 0.9904 \quad (6)$$

圖11是依照表4公式換算出上游風速與發電功率關係圖。由結果可以看出在變化風速的環境下，當槳距角設定為45°到80°之間，風力機平均發電量為0，但隨著槳距角的下降風力機發

電量也隨之上升，且在槳距角低於 $25^{\circ}$ 時風速增加，發電量亦呈現指數上升。由結果可以得知在實際風力機運轉發電，槳距角 $5^{\circ}$ 於上游風速 $9.24\text{ m/s}$ 之最高運轉效率與發電功率約為 $28.81\%$ 與 $17\text{ kW}$ ，啟動槳距角 $45^{\circ}$ 於上游風速 $7.18\text{ m/s}$ 之最高運轉效率以及發電功率則約為 $2.08\%$ 與 $580\text{ W}$ 。而風速 $4\text{ m/s}$ 以下在任何槳距角設定幾乎無法發電。本量測也呈現出核研所 $25\text{ kW}$ 風力機葉片之效率在低槳距角位置有較佳的發電輸出，且呈現非線性的增加。此設計功率亦有其他好處，即在瞬間陣風超過風力機設計標準時，則風力機槳距角只需稍加增加則風力機的轉速與氣動力效率則可大幅下降，並提供風力機過轉安全保護。但由於操作的安全考量與實際風況問題，在高速上游風的數據因為過轉保護與風速不穩定之議題，本風力機並無量測到穩定且超過 $10\text{分鐘}$ 的 $10\text{ m/s}$ 以上風速。最後根據實際的動量理論與實際發電量的計算，核研所 $25\text{ kW}$ 風力機於槳距角 $5^{\circ}$ 到 $45^{\circ}$ 的發電功率與上游風速關係整理如表8。

圖12為根據固定葉片槳距角與上游風速的風力機轉動速度關係圖。數據顯示在固定風速條件下，槳距角的下降可增加風力機轉速，上游風速經計算最高達到風速 $9.24\text{ m/s}$ ，並達到約 $17\text{ kW}$ 。由圖11結果可知槳距角 $45^{\circ}$ 以上並無發電輸出能力，因此在葉片槳距角 $45^{\circ}$ 以上通常只用於幫助微風啟動之功效。此外由圖12可得知在約 $4\text{ m/s}$ 風速以下槳距角大於 $45^{\circ}$ 所產生的轉速高於槳距角 $5^{\circ}$ 。故較低的槳距角並無法在低風速環境下發電，但在高風速則可呈現最佳的功

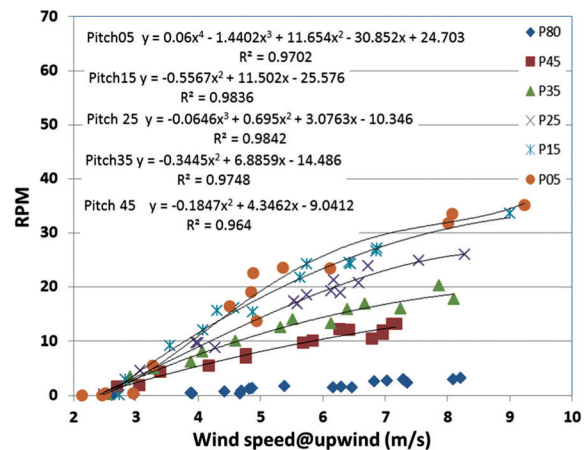


圖12 上游風速與風力機轉速關係圖(本研究繪製)

率輸出。由於風力機的運轉需考量瞬間陣風所造成的風力機過轉而超出設計安全標準，因此安全保護通常採用主軸轉速監控。故核研所 $25\text{ kW}$ 風力機於槳距角 $5^{\circ}$ 到 $45^{\circ}$ 的風力機轉速與上游風速關係整理如表9所示。

圖13為 $25\text{ kW}$ 風力機轉速與氣動力噪音關係圖，由趨勢判斷在固定葉片槳距角，轉速增加氣動力噪音也隨之增加。而由於風力機葉片設計是風力機轉速隨著風速上升與槳距角下降而提升，故在固定槳距角 $80^{\circ}$ 的待機條件所形成轉速上升與氣動力噪音的增加，可判定為背景噪音受風速的影響而增加。風速的影響約由 $2.5\text{ m/s}$ 增速到 $8.5\text{ m/s}$ 形成約 $49\text{ dB(A)}$ 上升到 $57\text{ dB(A)}$ 的氣動力噪音增量。由槳距角 $5^{\circ}$ 結果分析，無風速靠近 $0\text{ RPM}$ 呈現 $44\text{ dB(A)}$ 且隨著轉速增加到 $35\text{ RPM}$ 時則呈現 $58\text{ dB(A)}$ 氣動力噪音。因此以氣動力噪音的增加量來說，高風速之環境噪音增加量略大於風力機旋轉所形成的

表8 各槳距角之上游風速與風力機功率關係表(本研究整理)

槳距角	擬合公式	決定係數 $R^2$
Pitch 05	$y = 44.038x^3 - 329.66x^2 + 1325x - 1952.5$	$R^2 = 0.9905$
Pitch 15	$y = 284.15x^2 - 1624.3x + 2447.4$	$R^2 = 0.9810$
Pitch 25	$y = 120.22x^2 - 528.81x + 479.5$	$R^2 = 0.9279$
Pitch 35	$y = 38.264x^2 - 130.12x + 69.155$	$R^2 = 0.9139$
Pitch 45	$y = 20.654x^2 - 90.128x + 90.965$	$R^2 = 0.9486$
Pitch 80	$y = 0.0$	$R^2 = \text{N/A}$
$y = \text{Power(w)} ; x = \text{Wind speed@upwind (m/s)}$		

表9 各槳距角之上游風速與風力機轉速關係表(本研究整理)

槳距角	擬合公式	決定係數 $R^2$
Pitch 05	$y = 0.06x^4 - 1.4402x^3 + 11.654x^2 - 30.852x + 24.703$	$R^2 = 0.9702$
Pitch 15	$y = -0.5567x^2 + 11.502x - 25.576$	$R^2 = 0.9836$
Pitch 25	$y = -0.06462x^3 + 0.695x^2 + 3.0763x - 10.346$	$R^2 = 0.9842$
Pitch 35	$y = -0.3445x^2 + 6.8859x - 14.486$	$R^2 = 0.9842$
Pitch 45	$y = -0.1847x^2 + 4.3462x - 9.0412$	$R^2 = 0.9640$
$y = \text{RPM}$ ; $x = \text{Wind speed@upwind (m/s)}$		

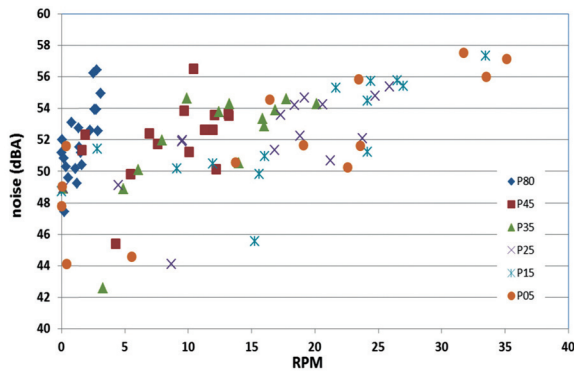


圖13 風力機轉速與全頻噪音量測結果(本研究繪製)

氣動力噪音，以核研所25 kW風力機為例，所增加的風力機氣動力噪音約為1.0 dB(A)。

圖14為25 kW風力機上游風速與風力機全頻噪音量測結果圖，量測結果呈現出在相同的風速下槳距角的降低會造成氣動力噪音的增加，且隨著風速的增加氣動力噪音更加明顯，在風速3 m/s約增加10 dB(A)而在8 m/s風速則增加6 dB(A)，整體氣動力噪音低於58 dB(A)。此現象可解釋為氣動力噪音dB(A)為指數，因此

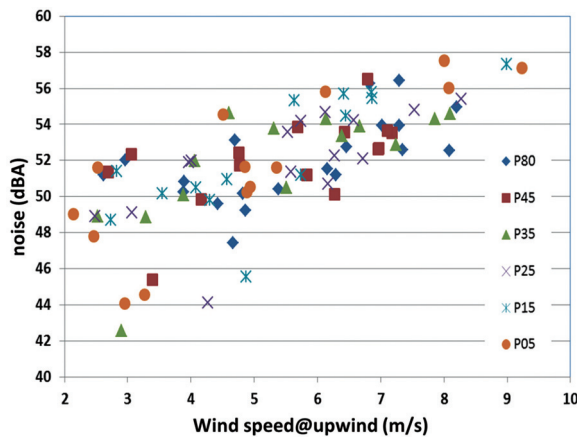


圖14 上游風速與風力機全頻噪音量測結果圖(本研究繪製)

提高1 dB(A)噪音輸出實際上的風壓是10倍增量。故以平均風速6 m/s為風力機運轉指標，風力機運轉時最多將產生6 dB(A)的噪音，亦根據環保署法規規定運轉噪音不得超過背景5 dB(A)，因此在風力機正下方之全頻噪音增量超過法規限值。圖15為上游風速與風力機全頻噪音擬合關係圖，其結果可應用於真實運轉時利用上游風速判斷風力機於待機或運轉時的全頻噪音預估值。由結果亦可判斷在高風速的情況下，背景全頻噪音值與風力機運轉全頻噪音值接近，滿足法規要求，但低頻法規要求於下一節檢核。

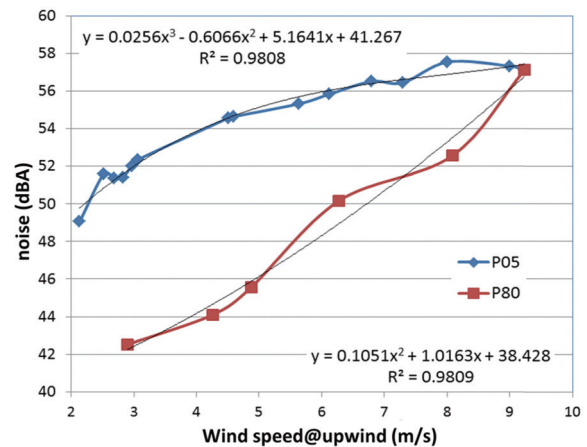


圖15 上游風速與風力機全頻噪音擬合關係圖(本研究繪製)

圖16為風力機在待機槳距角80°與最高速運轉槳距角5°之地面氣動力噪音FFT頻譜圖，由於700 Hz–20 kHz其振幅差異不大因此忽略顯示。由結果可看出在槳距角最大變化的條件下聲頻約在180 Hz、320 Hz、560 Hz與580 Hz有明顯差異，且背景噪音約分布在50 Hz到400 Hz之間。故依據環保署管制對200 Hz以下低頻噪



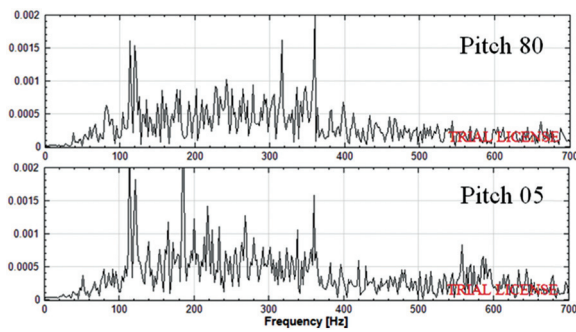


圖16 25 kW風力機全頻噪音頻譜資料(忽略700 Hz–20 kHz)(本研究繪製)

音的要求，320 Hz、560 Hz與580 Hz的鋒值影響可忽略討論。但低頻且位於200 Hz以下區域則需透過1/3八音度(Octave)分析低頻範圍(20 Hz–200 Hz)。

圖17為25 kW風力機在槳距角5°與80°運轉於地面1/3八音度低頻分析結果，其結果可看出在待機槳距角80°時背景噪音已於125 Hz範圍產生Tone值的特徵頻譜，其125 Hz之聲噪值約大於周邊12 dB(A)，其特徵值靠近但未超越IEC 61400-11之標準，整體低頻聲噪值約44.48 dB(A)。但隨著葉片槳距角降為5°，低頻區域隨之上升，整體低頻聲噪值達到51.79 dB(A)，已超越環保署法規要求，但Tone值的特徵頻率並無明顯變化趨勢。最後，圖18為25 kW風力機發電功率與氣動力噪音關係圖，由結果可看出以發電功率為需求則相應的噪音也顯著提高。當槳距角為5°可以達到最高17 kW，且產生的氣動力噪音與槳距角15°相近但所產生的發電功率

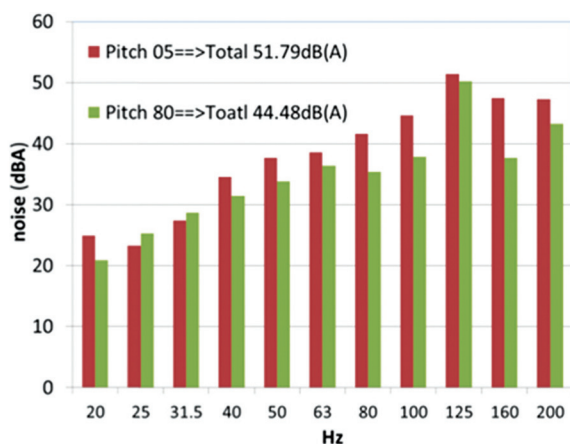


圖17 風力機1/3八音度低頻噪音量測結果(本研究繪製)

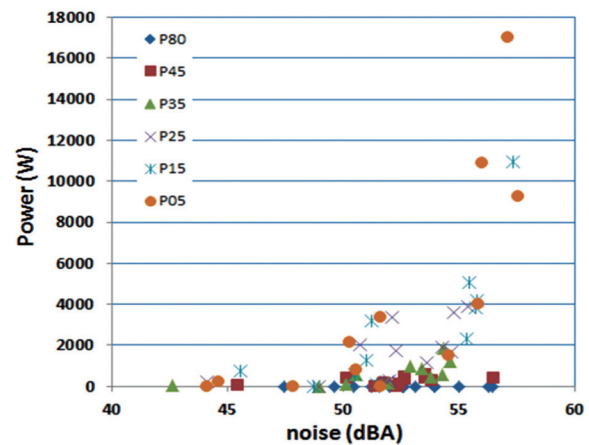


圖18 25 kW風力機發電功率與氣動力噪音關係圖(本研究繪製)

達到1.5倍差異。發電功率所產生的氣動力噪音也分布在55 dB(A)以上，故在高風速且背景噪音已達環保署要求的條件下槳距角應該越小越好以達到最佳發電效率。

## 7. 結 論

本論文利用核研所25 kW水平軸風力機完成全頻、低頻與FFT分析，並獲得上游風速、葉片槳距角與地面氣動力噪音與發電功率關係。於氣動力聲波噪音量測研究依循IEC 61400-11要求，並搭配對風後主動控制槳距角連續擷取10分鐘風速、轉速、發電量與聲波噪音。擷取數據呈現氣動力聲波噪音與轉速以及環境風速成正比關係，且降低槳距角可增加風力機轉速。研究結果發現修正風速的差異隨槳距角減少以及風速上升而增加，約由槳距角5°的19%修正量到槳距角45°之1.2%修正量。當槳距角為80°時上游風速由2.5 m/s增速到8.5 m/s造成地面噪音由49 dB(A)增加到57 dB(A)；當槳距角5°時無風速靠近0 RPM呈現44 dB(A)聲噪且隨著轉速增加到35 RPM時則呈現58 dB(A)氣動力噪音。FFT頻譜圖結果呈現槳距角變化條件下聲頻約在180 Hz、320 Hz、560 Hz與580 Hz有明顯差異。於地面1/3八音度低頻分析結果，其結果可看出在高風速下待機槳距角80°與運轉槳距角5°時整體低頻聲噪值分別為44.48 dB(A)

與51.79 dB(A)。本研究總結核研所25 kW風力機可通過臺灣環保署噪音要求，並通過低頻與Tone值之檢核要求。在發電功率方面，槳距角 $5^\circ$ 於9.24 m/s之最高運轉效率與發電功率約為28.81%與17 kW，啟動槳距角 $45^\circ$ 於風速7.18 m/s之最高運轉功率以及發電功率則約為2.08%與580 W。而風速4 m/s以下在任何槳距角設定幾乎無法發電。因此在實際應用以槳距角 $45^\circ$ 為啟動角，並以槳距角 $5^\circ$ 為運轉角度。槳距角 $15^\circ$ 所產生的發電功率低於槳距角 $5^\circ$ 之功率約35%，但所產生的氣動力噪音呈現相近數值。未來研究將針對低頻噪音分析以及運轉噪音抑制研究。

## 參考文獻

- 牛山泉，2010。風車工學入門—從基礎理論到風力發電技術，全華，臺灣。
- 經濟部公告，2018。中華民國一百零七年度再生能源電能躉購費率及其計算公式，經能字第10604606690號。
- 蘇煒年與張欽然，2009。25 kW風力機實驗數據分析與計算模型驗證，臺灣風能學術研討會，G3-03，臺北。
- Barone, Matthew F., 2011. Survey of Techniques for Reduction of Wind Turbine Blade Trailing Edge Noise, SAND2011-5252, SANDIA REPORT, Sandia National Laboratories.
- Brooks, T. F., D. S. Pope, and M. A. Marcolini, 1989. Airfoil self-noise and prediction. NASA Reference Publication 1218.
- Bruijn, A. de, W. J. Stam, and W. B. de Wolf, 1984. Determination of the acoustic source power levels of wind turbines. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Hamburg, Germany.
- Froude, R. E., 1889. "On the Part Played in Propulsion by Differences of Fluid Pressure," Trans. Inst. Naval Architects, Vol. 30, pp. 390.
- Guidati, G., J. Ostertag, and S. Wagner, 2000. Prediction and reduction of wind turbine noise: an overview of research activities in Europe. AIAA Paper 2000-0042.
- Howe, M. S., 1978. A review of the theory of trailing edge noise. J. Sound Vib., 61(3): 437-465.
- Hubbard, H. H. and K. P. Shepherd, 1991. Aeroacoustics of large wind turbines. J. Acoust. Soc. Am., 89(6): 2495-2508.
- IEC 61400-11:2012+AMD1:2018 CSV Consolidated version, Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques, International Electrotechnical Commission, 2018.
- ISO 1996-2:2007(en), Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of environmental noise levels, International Organization for Standardization, 2007.
- Jakobsen, J. and B. Andersen, 1993. Aerodynamical noise from wind turbine generators. Experiments with modification of full scale rotors. EFP j.nr. 1364/89-5, JOUR-CT 90-0107.
- Lin, Y. T., P. H. Chiu and C. C. Huang, 2017. "An experimental and numerical investigation on the power performance of 150 kW horizontal axis wind turbine," Vol. 113, pp. 85-93.
- Oerlemans, S., P. Sijtsma, and B. Mendez L'opez, 2007. Location and quantification of noise sources' on a wind turbine. J. Sound and Vibration, 299: 869-883.
- Oerlemans, S. and J. G. Schepers, 2009. Prediction of wind turbine noise and validation against experiment. International Journal of Aeroacoustics, 8(6): 555-584.
- Wagner, S., R. Bareiß, and G. Guidati, 1996. Wind Turbine Noise. Springer-Verlag, Berlin.
- Williams, Ffowcs J. E. and L. H. Hall, 2011. Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane. J. Fluid Mech., 40(4): 657-670.

# Impact Assessment of Pitch Control on Wind Turbine Power and Noise : A Case Study of INER 25 kW Wind Turbine

Yan-Ting Lin<sup>1\*</sup>

## ABSTRACT

This paper experimentally measures and analyzes the power generation and operating noise of a 25 kW horizontal axis wind turbine. The measurement method is based on the IEC61400-11 measurement standard, and uses CESVA's SC310 handheld acoustic noise meter to record the 1/3 octave sound characteristics and average sound noise per second of the 25 kW wind turbine. The measurement method also uses full-frequency noise recording and analyzes ground acoustic noise through FFT conversion. The results show that when the blade pitch angle is adjusted to a standby position of 80 degrees, the average wind speed is increased by 8.5 m/s from 2.5 m/s, which will increase the background full-frequency noise from 49 dB(A) to 57 dB(A). When operating at the lowest blade pitch angle of 5 degrees, the aerodynamic noise measured by the ground under high-speed wind conditions is slightly increased by 1 dB(A) compared with the noise of the standby state. At high wind speeds, the low frequency noise is 44.48 dB(A) and 51.78 dB(A) at the pitch angles of 80 degrees and 5 degrees, respectively. The FFT spectrogram results show that the acoustic frequency is significantly different at 180 Hz, 320 Hz, 560 Hz and 580 Hz under the variation of the pitch angle. In terms of power generation, the lower pitch angle exhibits higher rotational speed and power generation at the same wind speed. The maximum operating efficiency and power generation at a pitch angle of 5 degrees at a wind speed of 9.24 m/s are 28.81% and 17 kW, respectively. At a pitch angle of 45 degrees, the maximum operating efficiency and power generation at a wind speed of 7.18 m/s are 2.08% and 580 W, respectively. The power generation power at a pitch angle of 5 degrees is about 1.5 times higher than the power generated by a pitch angle of 15 degrees, but the generated aerodynamic noise exhibits similar values.

**Keywords:** 25 kW horizontal axis wind turbine, aerodynamic noise, pitch angle control, power generation.

---

<sup>1</sup> Associate researcher, Mechanical and System Engineering Program, Institute of Nuclear Energy Research.

\*Corresponding Author, Phone: +886-3-4711400#3356, E-mail: [yantinglin@iner.gov.tw](mailto:yantinglin@iner.gov.tw)

Received Date: October 9, 2018

Revised Date: January 9, 2019

Accepted Date: April 2, 2019