



垂直軸風力發電機的應用定位與技術發展

新高能源科技股份有限公司總經理/陳震良

關鍵字：風力機最大功率點追蹤、功率係數、葉尖速度比、功率性能測試、耐久性測試、噪音測試、安全及功能測試、葉片靜態負載測試

摘要

本文提供6項適合小型風力機的應用定位，並針對該應用定位必須具備之屬性，檢討7小項應該積極發展的相關技術。包含：低風速提升發電量加強最大功率追蹤、高風速提升發電量的減轉速保護控制、風力機的機械強度藉由設計增強、風力機氣動噪音及機械噪音降低、風力機的避震設計抑制振動傳遞、下風處尾部渦流影響區域的減小、高樓屋頂高亂流區功率性能的提升。

一、前言

從歷年核災事件暴露出過度依賴集中性發電時面對危機的束手無策，此後全球包括先進國家都積極推展分散式發電，以降低對於電網的過度依賴。傳統小規模之分散式發電係以柴油發電機來運作，但油耗運補成本非常高，特別是地處偏遠的離網區基站，例行性油耗運補在交通及人力成本上都使維護營運成本高昂，故紛紛開始考慮裝置再生能源發電，期望能降低維運成本。

二、應用定位

在分散式發電目標市場中，國內廠商在風力發電機找到了自己應用定位，分別依離網、併網敘述如下：

(一)離網分散式發電

根據聯合國所設定的目標，預計在2015年讓6億發展中國家鄉村及偏遠地區的人口有電可用。傳統建設集中式發電廠佈設電網拉線到用戶端的方式在這些地區成本太高並不可行，在電網架設不到的用電端設置離網(off grid)分散式發電系統較為便宜可行。風力發電機系統在離網分散式發電的主要應用有：

1. 離網監控/電信基地台(系統供電)(圖1、2、3)



圖1 韓國先進通訊 (SKT) 基地台應用

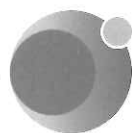


圖2 中國西藏中國電信基地台應用



圖3 中國新疆中國移動基地台應用

2. 風光互補路燈(圖4、5)



圖4 日本茨城縣稻敷郡阿見町行政中心
停車場的風光互補路燈系統應用



圖5 中國上海青草沙水庫風
光互補路燈系統應用

3. 極地科研基地站(系統供電)(圖6)



圖6 南極韓國科研基地站應用

(二) 併網分散式發電(圖7)

仰賴集中式發電之供電結構易因區域性故障引發連鎖事故，例如集中式電廠或電網的關鍵性匯流排遭受破壞，而造成大規模停電，影響電源供應安全。如能納入併網(on grid)分散式發電，發電在地優先使用，當發電電力不足時可由電網捕齊，發電電力在地消耗不完時可併入電網售出，供給鄰近區域使用，是一種能享受電網便利又大幅提昇電網自癒能力並提高分散式電源利用效率的應用方式。風力發電機系統在併網分散式發電的主要應用有：



1. 出風口電力回收系統(併網系統供電)



圖7 台灣台中友達光電廠出風口電力回收系統應用

2. 都會區屋頂(併網系統供電)(圖8、9、10、11)



圖8 香港特別行政區政府機電工程署大樓屋頂應用



圖9 韓國Tesco賣場屋頂應用

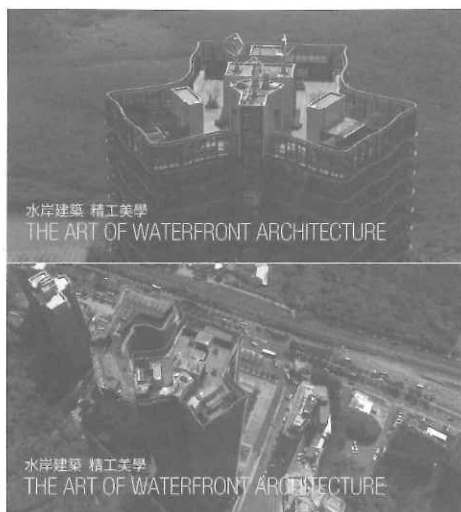


圖10 台灣淡水藍海紅樹林海納川大樓屋頂應用(擷取自建商宣傳影片)



圖11 PNN報導台灣交通部公路總局新大樓屋頂應用

3. 社區風力發電廠(併網系統供電)(圖12)



圖12 NHK報導日本北海道根室市齒舞村亞洲第一座小型風力機發電廠併聯運轉

三、技術發展

為了滿足上述市場定位，針對鎖定應用目標必須具備的屬性積極發展相關技術，分別敘述如下：

(一)離網區應用發電必須足夠充裕而可靠

由於小型風力發電機離網應用一般設置於運補維護相對困難的地方，功率性能及系統可靠度必須非常重視。風力發電機系列針對離網分散式發電發展的主要技術有：

1.低風速提升發電量加強最大功率追蹤

風的動能傳遞成風力機的轉動機械動能之轉化程度，均由風的速度和風力機的轉速所控制。一開始不轉動的風力機在固定風速下有下述變化過程：隨著風能藉由風阻力或是風升力轉移給風力機葉片變成轉動機械動能的過程，風力機的轉速會越來越快，轉加速度也會越來越大直到轉速達到某個值，此時風力機具有最大扭矩，一旦轉速超過該值，葉片承受風載的扭力矩就會變小，轉速增加的變化也慢慢減緩，直到扭力矩為零時達到終端值最大轉速。

風力機的轉動機械動能等於扭力矩乘以轉速，所以在相同風速下存在具有最大能量的轉速，轉更快或轉更慢風力機的轉動機械動能都較小，在最大能量轉速下抽取其最大能量，稱為風力發電機的「最大功率點追蹤」(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。從風力機系統中被取走的電能越多，風力機剩下的轉動機械動能就會越少，轉速就會降低，此時減少被取走的電能，風力機剩下的轉動機械動能就會增加，轉速就會增加，控制風力機在固定風速下維持轉速在風力機最大能量狀況的方式就是藉由調控抽電大小來達成。

但是自然界風速的變化太快，單純以試誤回饋的方式做MPPT根本追不上風速的變化，當風力機的轉速無法控制維持在該風速下具有最大轉動機械動能情況下時，風力機根本無法從風能中擷取最大的能量，要再轉換成電能的效率就更低了。若可以先快速掌握某風速下風力機能從風

能中擷取最大的能量的大概值再做追蹤微調，就能大幅降低MPPT的時間，提升發電效率。

這樣的技術在國際上風力機業界一般稱為查表法，由於風能與風速的三次方成正比，而轉化成風力機的轉動機械動能也與風速的三次方成正比，在各個風速下風力機具有的最大能量也與其最大能量轉速的三次方成正比，關鍵就在於找到這個正比常數是多少。由於各個風速下同一類型相同參數的風力機之氣體動力特性也具有相似性，可以在風洞中測試不同風速下的轉速/能量變化，再將實驗數據無因次正規化，即可得到各風速均相同的一條能量轉化效率 C_p 對葉尖速度比TSR的變化曲線，這是同一類型相同參數之風力機的特性曲線，只要掌握該曲線最大 C_p 值及其TSR值，即可預先掌握某風速下風力機能從風中可擷取最大的能量。

從理論上風力機的 C_p 值上限為 $16/27=0.59259\dots$ ，這還未考慮風力機尾流空氣旋轉必須再扣掉的能量，如果有風力機廠商宣稱其 C_p 值大於六成則可推論應是詐騙行為，宣稱 C_p 值大於1更是能量無中生有，違反能量守恆定律。但在自然定律的限制下如果掌握了風力機控制器/變流器和風力機葉片氣體動力特性及發電機發電特性之間的匹配，即可提升風力機的發電量，其中自然界風速快速變化是一個關鍵，所以發電效率無法從馬達拖動機台得出，也無法從風速固定/緩慢變化的風洞實驗確定，一定要從實場做功率性能測試才能知道結果，其測試方法依循的規範是IEC61400-12-1，其測試結果要有公正性，測試場地及所有儀器必須取得TAF認證，目前亞洲只有台灣標準檢驗局輔導的兩個測試單位：金工中心位於七股的測試場及大電力位於澎湖的測試場具有這樣的資格。

2.高風速提升發電量的減轉速保護控制

風力機在擷取風的動能將其轉化成轉動機械動能的過程中，可能會因為風速過高風力負載太大或是風力機轉速過大離心力超過其機械強度上限而損壞，所以一般

風力機在設計時必須考量到過速保護，這在IEC61400-2小型風力機設計規定中有一系列試算必須依循，在規範中簡易負載模式的負載案例E即是評估最大轉速下風力機的極限負載；負載案例H則是評估最大風推力下風力機剎停時的極限負載。

由於原有IEC規範中並沒有垂直軸風力機適用的簡易負載模式，所以國內廠商從2010年起即與核能研究所合作開發垂直軸風力機適用的簡易負載模式，並與氣動彈性模式的電腦計算做比對，該長期合作計畫最後納入標準檢驗局的計畫，成果在2014年變成CNS15176-2-1暨GB/T 29494「小型垂直軸風力機設計、性能及安全要求」的附錄B，同年6月日本亦將相似的簡易負載模式納入JSWTA-0001的附錄C。國際能源總署(IEA)風能系統研究發展合作協定第27工作組會議(IEA Wind Task 27)對於台灣該研究成果相當注重，預計將會作為修訂IEC61400-2下一個版本的基礎。

有了上述簡易負載模式計算，可以快速確認負載案例E中最大轉速下風力機的極限負載是以離心力做主控，而且條件比負載案例H中最大風推力下的極限負載嚴苛多了，所以一般風力機的過速保護就是發生在高風速條件下的過轉速保護，對於水平軸風力機通常採用改變葉片攻角的變槳設計避免高風速條件下過轉速，至於不容易低成本高強度下旋轉葉片的垂直軸風力機則可採用改變葉片翼型或是以非接觸方式進行減轉速保護，將風力機的轉速控制在安全的範圍內。

若沒有高風速下風力機的過轉速保護設計，風力機被迫必須在轉速失控飆升前剎停，因此錯失在高風速下擷取高效電能的機會，如果有可靠有效的過轉速保護設計，不但可以提升高風速時的發電功率，也可以增加累積的發電量，而其成果必須從實際風力機試測場做功率性能測試才能知道結果，其測試方法依循的規範是IEC61400-12-1。而在增加風力機功率效能的同時必須先確保風力機的安全性，所以風力機也必須通過實場做的長時間

耐久性測試，其測試方法依循的規範是IEC61400-2及CNS15176-2附錄G。此外風力機過轉速保護的效果也會呈現在實場做的安全及性能測試中，其測試方法依循的規範是IEC61400-2及CNS15176-2附錄G。

(二)都會住宅區應用必須兼顧安全與舒適

由於小型風力發電機併網應用一般設置於廠房或都會住宅區(residential zone)人多的地方，對安全及舒適性必須非常重視。風力發電機系統在併網分散式發電的主要技術發展有：

1.風力機的機械強度藉由設計增強

國內廠商利用分析美國Sandia國家實驗室做的大量風洞實驗數據，並在工廠內自製風扇牆進行大量實驗檢證，其混合葉片的設計讓風力機兼具阻力型的易啟動及升力型的高效率，達流斯懸曲線葉片設計則使葉片應力分布在切線方向如同拱橋具有最佳機械強度，所以受高樓屋頂渦流影響的安全顧慮較小。

此外達流斯葉片把機翼也當連接支撐的設計，葉片如同無窮翼長的機翼沒有邊緣端，所以流速慢壓力大的機翼下表面氣流不會沿著機翼邊緣翻到流速快壓力小的機翼上表面，沒有翼尖渦，所以也沒有翼尖能量損失(Tip loss)及翼尖渦剝離造成的風力機葉片振動。依據CNS15176-2-1附錄B的簡易負載模式估算負載案例A，國內廠商各型風力機正常運轉20年葉片疲勞損傷程度只有6~8%，這項估算也已經通過雨滴法搭配氣動彈性模式的電腦計算做比對，簡易負載模式更為保守。所有風力機機械強度藉由設計增強的結果均可透過耐久性測試(IEC61400-2及CNS15176-2附錄G)、功能與安全測試(IEC61400-2及CNS15176-2附錄G)、葉片靜態負載測試(IEC61400-23及CNS15176-2-1)再做檢證。

2.風力機氣動噪音及機械噪音降低

風力發電機的噪音主要區分成葉片尖端尾緣渦剝離的壓力變化造成的高頻氣動噪音以及齒輪箱與發電機線圈振動所造成的低頻機械噪音。其中高頻氣動噪音與相對葉片風速的六次方成正比，風力機的葉尖

速度TSR比定義成葉尖切線速度與來流風速的比值，就是相對葉片風速的概念，風力機採垂直軸設計其最大能量TSR較水平軸風力機小，加上達流斯葉片的連續性設計，所以高頻氣動噪音遠較水平軸風力機小。

風力發電機採用無齒輪箱的同步直驅設計，除了少了齒輪箱的能量損耗，也避免了齒輪箱的機械低頻噪音。至於發電機線圈振動所造成的低頻機械噪音，主要是因為發電機線圈共振能量累積造成的噪音振動放大，只要能增加包覆線圈材質的機械強度並濾除線圈反覆接收的週期性電磁感應，就能抑制發電機線圈振動所造成的低頻機械噪音。

所有降低噪音的努力成果都可以透過取得TAF認證的風力機測試場進行各風速的噪音測試，其測試方法依循的規範是IEC61400-11及CNS15176-2附錄G，測試出來的噪音值可分別以AWEA及BWEA的方式表示。雖然測試的方法都是依循IEC61400-11，但是AWEA標準是要求推算在年平均風速每秒5公尺而全年95%的情形均不超過的噪音值，如果風速分布機率採用瑞利分布，則該噪音值相當於bin法風速每秒10公尺下距離風力機60公尺的噪音值。

至於BWEA標準則是要求推算在年平均風速每秒5公尺而全年90%的情形均不超過的噪音值，如果風速分布機率採用瑞利分布，則該噪音值相當於bin法風速每秒8公尺下的噪音值，BWEA標準還將噪音依bin法風速及距風力機距離兩變數繪成2D的噪音圖，並由此推算最接近民宅噪音值小於合格值45dB(A)的最短距離。

同時IEC61400-11還會將噪音分頻量測，通常以1/3八音度頻譜的方式呈現分頻噪音量測結果，所以可以將完整噪音測試與台灣環保署的噪音管制標準做對照，該標準將風力機噪音依4類土地使用分區、日日夜夜3個時段、分別對200Hz以下低頻噪音及全頻噪音訂定標準，其中全頻噪音採與背景音量相比增量管制，以反應風力機噪音與風速有關卻與距離平方成反比的特性。

3.風力機的避震設計抑制振動傳遞

風力機由於受到風推力大小變化而振動，在風力機塔柱頂端裝設多軸向加速規既可量測到主要風向的振動加速度遠大於垂直風向的振動加速度，在主要風向的振動如果沒有避震隔離處理，振動將隨著塔柱傳遞下來，這對於在屋頂設置的風力機是致命的，除了大樓本身可將振動噪音共鳴放大，對於塔柱基礎的疲勞損傷也會折損安全性。

國內廠商在風力機加入避震設計，除了可有效吸收受風推力之振動，還可抑制共振的能量累積，估計可將塔柱振動減少80%以上。所有減振的成果均可依循VDI3834的規範進行塔柱頂端振動量測。依照VDI3834之規範，測試計算之振動加速度需低於0.3 m2/s方能視為安全範圍；若介於0.3~0.5 m2/s則視為警戒範圍，若高於0.5 m2/s則視為嚴重振動，建議停機處理。依據2013年標準檢驗局進行的兩岸垂直軸風力機測試比對計畫的量測，台灣代表測試風機為新高公司風力機型號DS3000 (3kW風機)，其依循VDI3834規範量到的振動加速度為0.261 m2/s低於0.3 m2/s，可以安全長時間運轉。

4.下風處尾部渦流影響區域的減小

風吹過風力機時風能會被風力機擷取走導致風速變小，由於流體的連續性風力機處的風速是風力機上下游風速的算術平均值，當風力機能擷取最大能量時下游風速是上游風速的1/3，若要將下游風速回復到與上游風速一樣，則必須藉由側邊流管氣流的擴散將高風速區的風能混入低風速區，待經過一段距離的風能混合加入後才能回復原有上游風速。

由於水平軸風力機下游的尾流區通常呈現渦街的型態，下游的低風速區很難混入側邊風能，一般要距離8倍以上轉子直徑的長度才能約略回復原本來流風速。至於垂直軸風力機由於葉片在水平各方位角旋轉，可將風力機剝離的渦在下風處打散而加速側邊風能混合，所以在距離6倍以上轉子直徑的長度後可約略回復原本來流

風速。國內廠商設計的達流斯葉片為連續性，讓尾部渦流影響區域減到最小，如新高公司風力機型號DS3000經過核能研究所CFD計算模擬，在同時考察風速(Velocity)及渦度(Vorticity)的回復情況，下風處尾部渦流影響區域約略只有3倍轉子直徑的長度，此特性讓該風力機可以較密集架設。

5.高樓屋頂高亂流區功率性能的提升

垂直軸風力機的優點是四面八方皆迎風而不必追風，不會有水平軸風力機在大樓屋頂風搓出渦流並擴展至其下風處最高2倍大樓高、最遠20倍大樓高的高紊流區內追不到風向的情形。

為了釐清各式風力機在城市建物屋頂上風能利用的情況，IEA Task 27進行了國際團隊間的研究分工，緣於此分工，2014年在經濟部標準檢驗局申請科發基金補助「中小型風力機驗證技術規範與參照國際標準會議計畫」項下，我國配合進行屋頂高紊流的風力機性能量測計畫，此量測計畫由標檢局委託台灣大學和金工中心分別在南北各擇一處進行屋頂高紊流量測。台灣大學的量測選在位於淡水的台北海洋技術學院，其屋頂原本架設的風力機為市售風力機型號DS3000。

目前IEA Task 27進行的這項釐清高樓屋頂高亂流區功率性能的國際團隊間研究分工除了台灣團隊外，還包括美國、澳洲、日本、愛爾蘭和西班牙的五個團隊也在進行高紊流環境(特別是城市建築屋頂)的量測計畫，並配合CFD進行驗證分析。其中美國是由NREL風能研究中心的團隊在NASA詹森太空中心的屋頂進行紊流量測，可見世界各國都非常重視風力機在高樓屋頂高亂流區功率性能的表現。

四、結論

針對適合小型風力機應用定位必須具備之屬性，本文檢討了兩大類共7小項應該積極發展的相關技術。包含：低風速提升發電量加強最大功率追蹤、高風速提升發電量的減轉速保護控制、風力機的機械強度藉由設計增強、風力機氣動噪音及機械噪音降低、風力機的避震設計抑制振動傳遞、下風處尾部渦流影響區域的減小、高樓屋頂高亂流區功率性能的提升。每一項相關技術都有應對的，不論是已經頒布或正在研發中的測試規範，值得相關產業留意。

參考文獻

1. AWEA 9.1, 2009, AWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard
2. CNS15176-2附錄G，小型風力機設計規定，2011年11月。
3. CNS15176-2-1，風力機—第2-1 部：小型垂直軸風力機設計、性能及安全要求，2012年11月。
4. IEC 61400-2, 2006/3, Wind turbines - Part 2: Design requirements for small wind turbines
5. IEC 61400-11, 2006/11, Wind turbine generator systems -Part 11: Acoustic noise measurement techniques
6. IEC 61400-12-1, 2005/12, Wind turbines -Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines
7. IEC TS61400-23, 2001/04, Wind turbine generator systems -Part 23:Full-scale structural testing of rotor blades
8. RenewableUK, 2014/01, Small Wind Turbine Standard
9. VDI3834 / Part 1, 2009/03, Measurement and evaluation of the mechanical vibration of wind energy turbines and their components Onshore wind energy turbines with gears