

# 輕風啓動，微風發電

## — 高雄市前鎮地區夏季風電能蘊藏量之研究

鄧財文 中央氣象局墾丁氣象雷達站

關鍵詞：海陸風 風力發電 風能密度

### 摘要

本研究利用中央氣象局高雄氣象站 1998~2007 年觀測資料統計分析高雄市前鎮沿海地區夏季風電能蘊藏量，結果顯示高雄沿海地區夏季海風風向以偏西風(西風與西北西風)為主，陸風風向以東北東風為主，風速以海風強而陸風偏弱，前者高達 3.7m/s，而後者僅在 2m/s 上下。

在風能探討方面，以小型風力發電機(如旗津風車公園為 1kW)起動風速為 3m/s 而言，高雄市前鎮沿海地區風力機在夏季時每日可持續發電的有效時數大約 7 小時。而月風能密度夏季平均為 12823 Watt/m<sup>2</sup>，其中以七月最高，可達每月 15754Watt/m<sup>2</sup>，風電能蘊藏量平均為 5.13 度/m<sup>2</sup>，七月可達 6.3 度/m<sup>2</sup>，前鎮地區沿海夏季海陸風風速穩定，但平均風力不大，若要作為發電來源以小型風力發電機為較佳選擇。

### 一、前言

面對煤炭、石油等不可再生燃料日益枯竭的威脅，以及日益嚴峻的能源困局，風能、太陽能等可再生能源已在世界範圍內受到重視。其中，風力發電是新能源中技術最成熟、最具規模開發條件及商業化發展前景的可再生能源技術。同時，風能資源又是清潔能源，根據國際綠色和平組織和世界風能協會共同發佈的《風力12》預計，2020年世界電力12%將來自風電，將大大減少因火力發電給大氣層帶來的危害。風能的合理開發和利用可以有效緩解目前能源匱乏及燃料資源給環境帶來的污染問題，在遠期有可能成為世界上重要的替代能源。

由於高雄旗津的風車公園(如圖一)，公園內設置七座風力發電風車，藉由海上風力的導引，風力發電風車白天轉動發電，將電能儲存起來，到了晚上可提供風車公園，從入夜後六點至十點的照明，是全國首座觀光、休閒兼環保的風力發電休閒公園。因此想了解在前鎮地區究竟有多少風電能蘊藏量。

本研究利用中央氣象局高雄氣象站 1998~2007 年共 10 年的氣象資料，透過資料的分析，藉以評估高雄市前鎮地區夏季風能的特徵及估計其風電蘊藏量。



圖一：高雄旗津的風車公園

### 二、風能的計算

#### (一)有效風能

在現代風力發電裝置的實際操作上，風力機的輸出功率(發電量)與風速的大小有關，由於自然界的風速是極不穩定的，因此風力發電機發出的電能一般是不能直接用在電器上的，必須先要用蓄電池儲存起來，以供日後使用。

另外，風力機在風速大於切入風速時才會開始運轉，當達到起動風速時，即開始輸出電力。當達到額定風速時，即以固定發電量(額定功率)輸出電力。當風速達到尾舵收捲風速(furling wind speed)時，發電量將降低。若大於停機風速時，為避免風車葉片變形損壞，風車必須停止運轉。故在切入風速與停機風速之間的風速稱為工作風速(或有效風速)，而從起動

風速至停機風速範圍內的風速為發電風速，從額定風速至停機風速之間，發電機的發電量固定(即為額定發電量)。工作風速所占的時間愈長，風能資源愈豐富，故此風速段的風能稱為有效風能，該風速範圍內的單位面積平均風能密度稱為有效風能密度。

以旗津風車公園的小型風力發電機(額定功率1KW)而言，切入風速為 2.5 m/s，起動風速大約為 3 m/s，額定風速為 11 m/s，尾舵收捲風速為 13 m/s。當風速到達 13 m/s 時，發電量將由額定功率 1200watt 降低至 900watt，停機風速為 20m/s。

## (二)風能密度的計算

風能泛指流動的空氣所具備的動能，主要是因太陽的輻射能傳送到地球表面時，因為地表受熱不均勻，造成各地溫差之不同，進而形成氣壓差，最後引發空氣之流動。因此，可以說風能是由太陽能轉換而來的。流動的空氣所具備的動能如第(1)式：

$$(1) \quad K = \frac{1}{2} mV^2$$

第(1)式中 V 為風速，m 為空氣的質量，所以單位面積單位時間內流過的空氣質量為：

$$(2) \quad m = \rho \cdot V \cdot A \cdot \Delta t$$

第(2)式中 A 為與空氣流動方向垂直的截面積(單位為  $m^2$ )或掃風面積(swept area)，若以風力發電之風車而言，其掃風面積與風葉片所形成的掃風直徑(d)的關係為：

$$(3) \quad A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$\Delta t$  為時間， $\rho$  為空氣的密度( $kg/m^3$ )，以下式計算：

$$(4) \quad \rho = \frac{1.276}{1+0.00366T} \left( \frac{P-0.378e}{1000} \right)$$

(4)式中 P 為氣壓(百帕)，e 為水汽壓(百帕)，T 為氣溫( $^{\circ}C$ )，P 可直接由氣象觀測資料計算而得。

因此單位時間氣流所產生的功率(單位為瓦)為

$$(5) \quad W = \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot A \cdot C_p$$

功率乘以發電時間就是發電量。發電量常用的單

位為千瓦小時(kW-h)。1 kW-h 等於 1 度電。

由第(5)式可知，風能與風速的三次方成正比，然而理論上，對於一部葉片迎風面積為 A 的風力發電機而言，其最大的風能轉換為機械能之效率為 0.593，此即所謂的貝茲極限(Betz limit)，所以一般評估風能轉換為機械能時，通常將第(5)式乘以功率係數(power coefficient)  $C_p$ ，來代表轉換後的機械功率：

$$(6) \quad W = \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot A \cdot C_p \cdot \eta$$

其中  $C_p$  與風速、風力機的轉速及風力機葉片的設計參數有關。如果再考慮機械能與電能的損耗，則上式必須再乘以損耗係數  $\eta$ ，才是風力機的淨發電量(Sharma and Madawala, 2007)，如下式：

$$(7) \quad W = \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot A$$

根據建置廠商的資料，旗津風車公園風力機的功率係數最大為 0.4，而風速到達額定風速、尾舵收捲風速時的損耗係數  $\eta$  分別為 0.63 與 0.50。

在風能資源的評估上，是以風能密度為代表一個地方風能資源多寡的指標，若不考慮轉換效率和機械與電能的損耗。風能密度( $Watt/m^2$ )是氣流垂直通過單位面積的風能，如下式：

$$(8) \quad W = \frac{1}{2} \rho V^3$$

## 三、研究結果

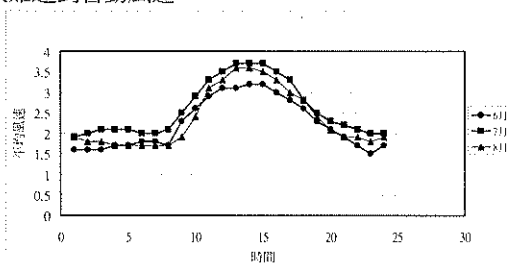
1. 高雄地區海陸風系統的發生極為明顯，1998~2007 年前鎮地區夏季各月逐時最多風向如表一所示，可知夏季夜間下午 7 點至早上 8 點(六月份提早至下午 5 點)大致吹南南東到東北東方向之偏東風，白天則以吹偏南與西北西風為主，西風與西北風次之。參考江(2007)之海陸風風向的定義，定義高雄市的海風方向為  $192^{\circ} \sim 304^{\circ}$ (南南西-西北西)，陸風風向為  $12^{\circ} \sim 124^{\circ}$ (北北東-東南東)，所以從過去十年的風向統計表可看出，高雄市夏季(尤其在盛夏 7、8 月)海陸風系統特徵非常明顯，而從白天的純海風到夜間的純陸風之間，有大約 7 小時的過渡時間(以 8 月為例)。

2. 前鎮地區夏季發生頻率最高的風向為南南東風和南風，1998~2007 年間夏季各風向發生的頻率與各風向的平均風速如表二，由此表可知，海風系統( $192^{\circ} \sim 304^{\circ}$ )以西風發生頻率最高，西北西風次之，而陸

風系統(12°~124°)則以東北東風最高，東北風次之。值得注意的是，南南東與南風是過去十年內發生頻率最高的風向，分別達 13.6%與 12.4%，這可能是其他天氣系統的影響，留待後面討論。

3. 前鎮地區海風系統平均風速大於陸風系統平均風速有 1m/s 以上，如表二，在各風向之平均風速方面，海風系統以西北西風為最大，平均風速為 2.93m/s，西風次之；陸風系統則以東北風與東北東風為最大，平均風速約為 1.77m/s，北北東風次之，所以海風系統平均風能比陸風系統平均風能大。而平均風速最高與次高之南南東風與西北風分別高達 3.32m/s 與 3.15m/s，應為其他天氣系統所造成，留待後面討論。

4. 前鎮地區上午 10 時到下午 17 時是風力發電的主要時間，1998~2007 年間夏季各月份逐時平均風速如表三和圖二，由表可見，夏季自上午 8 點起風速即不斷遞增，大約在上午 10 點已經達到切入風速(七月提早到 9 點，而 8 月延後至 11 點)，風力機開始啟動運轉，到 11 點時達到起動風速，風力機開始輸出電力，然後一直持續至下午 5 點(6 月提前至下午 4 點)。之後風速逐漸減弱，夜間都在 2 米/秒上下，大部分時間較難達到啟動風速。



圖二：1998 - 2007 年間前鎮地區夏季各月逐時平均風速變化圖

5. 前鎮地區風力發電之有效風速每日可達 6~7 小時左右，有效風速(3~20m/s)出現時數是評估風能資源的重要依據，1998~2007 年間前鎮地區夏季各月份有效風速出現時數統計如表四，十年月平均有效風速出現時數以 7 月最多，8 月次之，6 月最少，而日平均有效風速出現時數分別為 7.7 小時、7.2 小時與 6.4 小時。從氣候的觀點而言，在高雄市沿海地區，風力機在夏季時每日可持續發電的有效時數大約 6~7 小時，所以夏季高雄市沿海地區有效風能可算是非常豐富。

6. 前鎮地區夏季每日平均有效風能密度約為 417watt/m<sup>2</sup>，1998 - 2007 年間前鎮地區夏季逐年每月總有效風能密度如表五，夏季月總平均風能密度在 9353 watt/m<sup>2</sup>與 15754watt/m<sup>2</sup>之間，以 7 月的總平均

風能密度最大，七月日平均風能密度達 508watt/m<sup>2</sup>，各月份不同年度的差別也頗大，7 月份在 2006 年高達 28326watt/m<sup>2</sup>，而 1999 年則只有 6521 watt/m<sup>2</sup>，8 月份在 2005 年高達 32202watt/m<sup>2</sup>，而 2001 年則只有 5255 watt/m<sup>2</sup>，相差將近 6 倍之多，此一原因留待後面討論。

7. 前鎮地區 14 公尺高處夏季每月風電能蘊藏量約為 5.13 kW-h/m<sup>2</sup>，我們考量以旗津風車公園風力機為參考標準風能轉換機械能之效率係數最高約為 0.4，則前鎮地區夏季風電能蘊藏量(單位為 kW-h/m<sup>2</sup>或度/m<sup>2</sup>)約如表六所示，每月電能蘊藏量約 3.7~6.3kW-h/m<sup>2</sup>，此外由於風力和高度有密切相關，若將風力發電機設立於較高處，則風電能蘊藏量會更為提高，風速和高度之關係如第(10)式，若以旗津風車公園風力機葉片所形成的掃風直徑為 1.25 米為標準，設立高度約為 24 公尺高，則單座風力發電機風電能蘊藏量夏季每月約達 6.55~11.04kW-h，以 7 月較高，惟此計算是在未考慮機械能與電能等損耗下所得出的結果。

#### 四、討論

1. 高雄市的海陸風現象非常明顯，由本研究所得之結果顯示，夏季白天十點過後海風開始強盛，午後 1~3 時為海風最強的時間，海風平均風速可達 3.7m/s，而陸風平均風速僅在 2m/s 上下，我們認為這和太陽的照射有明顯關係，白天陽光提供足夠的熱力，使海風有較為充沛的能量，夜晚冷卻以後，陸風的能量也減弱了，所以陸風的強度比海風要小，如果這樣的想法是正確的，那冬季的海陸風是不是會比較不明顯？這值得我們對冬天的情況進行下一步的研究。

2. 海陸風並非前鎮地區最盛行的風向，根據表二，1998~2007 年前鎮地區最盛行的風向是，南南東風與南風是過去十年內發生頻率最高的風向，分別達 13.6%與 12.4%，這種風向並非在我們定義的海陸風內，應該是其他天氣系統所造成，高雄地區夏季最常感受的就是颱風，查閱過去十年來中央氣象局在夏季發布颱風警報的颱風總共有 38 個，其中對台灣南部有影響的颱風共有 32 個，而其中以登陸東部北上或登陸東北部從西北部出海者居多，詳細比對原始資料後發現，發生頻率最高的南南東風與南風大多是受到颱風或其引入之西南氣流的影響，可見颱風對高雄地區的夏季的風向影響很大。

3. 前鎮地區每日平均可提供發電之有效時間約為 6~7 小時，如表三和圖四所示，大約由上午 10 點已經達到切入風速，風力機開始啟動運轉，到 11 點時

達到起動風速，風力機開始輸出電力，然後一直持續至下午 5 點左右，夜間風力較弱都在 2m/s 上下無法用來風力發電。風力發電考量的不只是風力大小，需要穩定的風力和避免極端強風，以前鎮區夏季來看風力算是穩定，而出現極端強風(20m/s 以上)的機率也不算多，大約在颶風天才容易出現，此外有效風速出現的機率也是考量設置風力發電機的重要資訊，研究結果由表四顯示前鎮地區日平均有效風速出現時數在一日當中出現機率為 7、8 兩月大約佔總時數的 30%，而 6 月約僅佔 27%，對小型風力機而言可以提供相當穩定的風能，但若建置的風力機較大時所需之啟動風速也較高，此時可能建在較高的地方才可以。

4. 不同年份即使同一月份的風能密度也常有明顯差異，這些差異大多來自如颱風或西南氣流的發生，例如 2006 年 7 月風能密度高達 28326 watt/m<sup>2</sup>，當年該月份接連有碧利斯和凱米兩個颱風，其中凱米颱風中心還穿越台灣南部地區，而 2005 年 8 月風能密度高達 32202 watt/m<sup>2</sup>，當年該月份則有瑪莎和泰利兩個颱風影響台灣，其中瑪莎颱風雖未登陸卻引入西南氣流，而泰利颱風則強烈颶風且穿越台灣中部，所以夏季除了海陸風之外，颱風和其所引入的西南氣流也扮提供演風力的重要角色。

5. 前鎮地區 14 公尺高處的風力測量來看，夏季每月有效風能密度平均約為 12823 watt/m<sup>2</sup>，若轉換算風電能蘊藏量夏季每月平均約僅 5.13kW-h/m<sup>2</sup>，若以旗津風車公園風力機建置於 24 公尺高為例，單座風力發電機夏季風電能蘊藏量每月平均約 11.44kW-h，約當提供學校每間教室 9 盞 2 排 28W 的 T5 節能日光燈(共 504W)持續使用約 22.7 小時，不過這是在未考慮風能機械能的轉換效率，以及機械能與電能等所有損耗下所得出的結果。

6. 整體而言，以前鎮地區而言，考量夏季風的型態，雖然海陸風可以提供穩定和持續的風力，但風速不算太大(指 14 公尺高度)，並不適合大型風力機，如果要獲得更多的電力，風力機可以小型為主(啟動風速不用太高)，但可將建置高度拉高以獲得較佳效益。

## 六、結論與建議

1. 本研究利用中央氣象局高雄氣象站觀測資料統計分析前鎮沿海地區夏季風的特徵，結果顯示高雄沿海地區夏季海陸風特徵非常明顯，海風風向以偏西風(西風與西北西風)為主，陸風風向以東北東風為主，風速以海風強而陸風偏弱，前者高達 3.7m/s，而後者僅在 2m/s 上下，海風可在白天提供風力發電穩定的有效風力。

2. 以小型風力發電機(如旗津風車公園為 1kW)起動風速為 3 m/s 而言，高雄沿海地區風力機在夏季時每日可持續發電的有效時數為 7 小時，大約從上午 11 點至下午 5 點，但並不適合大型風力發電機。

3. 評估風能資源的重要參數有效風速出現時數的 10 年內平均統計結果顯示，以七月的 238 小時最多，8 月 223 小時次之，6 月 192 小時最少。而平均每日有效風速出現時數約為 7.2 小時，這與第二點結論非常一致。

4. 風能密度統計結果顯示，七月的平均風能密度最高，達 15754Watt/m<sup>2</sup>，6 月最少，只有 9353Watt/m<sup>2</sup>。

5. 風電能蘊藏量計算結果顯示，以七月最多，約達 6.3 度/ m<sup>2</sup> 的電能，8 月次之，6 月最少，只有 3.74 度/ m<sup>2</sup> 的電能。

6. 本研究僅針對前鎮地區夏季風的型態進行風電能蘊藏量的評估，建議可以對整年數據進行統計與整理，以全盤了解整年的風型態，尤其是季風的部份。

7. 本研究未來建議可以實際建置一組風力發電機，以便具有更實際的觀測數據可以進行對比，並了解理論能量和實際可用能量之間的差異，尤其風能的穩定性並不如其他能量，實際的觀測要比長時間的平均值運算要重要許多。

## 參考文獻

1. 朱佳仁(民 95)。風工程概論。台北：科技圖書有限公司。
2. 郭興家(民 96)。風力發電技術。台北：新文京開發出版有限公司。
3. 江宙君(民 96)。海陸風對台灣沿海地區空氣品質之影響。國立中央大學大氣物理 研究所碩士論文。
4. Sharma, R. N. and U. Madawala, 2007: The Concept of A Smart Wind Turbine System, 16th Australasian FluidMechanics Conference, Crown Plaza, Gold Coast, Australia, 2-7 December, 2007.
5. <http://www.unienergy.com.tw> (旗津風車公園風力發電機相關技術資料)
6. <http://rdc28.cwb.gov.tw> 中央氣象局颱風資料