

台灣地區結合風能與太陽能發電之可行性案例分析

Feasibility Analysis of Integrating Wind Energy and Solar Energy as a Hybrid Energy System in Taiwan

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士班研究生

杜逸龍

Yi-Long Tu

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

劉珮珊

Pei-Shan Liu

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張倉榮*

Tsang-Jung Chang

摘要

台灣地區在西部沿海、東北角、屏東半島與離島擁有適合發展風力發電的土地，但受到季風氣候的影響，導致每年的弱風期(4-9月)風力發電產生的電量不如預期。另一方面，台灣地區位處亞熱帶，陽光充足、日照時數長，在每年的弱風期恰為發展太陽能發電的最佳時期。因此本研究擬擷取風能與太陽能在不同時期的優勢且互補其不足之處，探討在台灣地區結合風能與太陽能發電之可行性。本研究以常被使用的小型 Jacob10 風機，做為風能結合太陽能發電先期評估的機型，並在考慮使用較少數量的太陽能面板與複合發電系統穩定度之下，搭配 2 倍風機率定功率的太陽能陣列。本研究選取新竹、梧棲、恆春與成功四個測站，分別代表台灣地區北、中、南與東部區域，並利用各測站 1996-1999 年的逐時風速與 1996-2004 年平均月累積日射量，估算此四個測站風能與太陽能並聯後的總發電量，以及分析其整年度與弱風期的供電穩定度。研究結果顯示，四個地區僅靠風力發電機在弱風期的月發電量約為 500kWh，一旦加入太陽能陣列發電時，所有月份的總發電量都提升至 2000kWh 以上，甚至有些弱風期月份的總發電量會大於強風期月份的總發電量，可見太陽能發電確能補助風力發電在弱風期發電量不足的現象，平衡全年度之發電穩定性。

關鍵詞：複合式能源，風能發電系統，日射量，日照延時，太陽能光電系統。

ABSTRACT

Taiwan has significant wind resource in the areas along the western coastline, southern peninsula, and several small surrounding islands. However, the efficiency of wind turbines during weak wind periods (from April to September) is much detracted

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市大安區羅斯福路四段一號，tjchang@ntu.edu.tw

because of the climatic features of the Asia monsoon. On the other hand, Taiwan is located in the subtropical region with sufficient solar radiation and ample sunshine duration during weak wind periods. As a result, this research is to analyze feasibility of integrating wind energy and solar energy as a hybrid energy system in Taiwan. Double rating power of PV systems is used to fit wind turbine systems. Thus, 180 solar panels Kyocera-KC-120 and Jacob10 wind turbine are integrated as a hybrid energy system to take advantages of both systems. Four locations (Hsinchu, Wuchi, Chengkung and Hengchun) in Taiwan are selected as the study cases, representing the northern, central, eastern and southern area of Taiwan, respectively. A measured data source of hourly mean wind speed (1996-1999) together with a monthly accumulated data source (1996-2004) at these four locations are studied and discussed. The result shows that the monthly energy outputs are about 500 kWh without using PV systems, but the monthly energy outputs are about 2000 kWh with the hybrid energy system during weak wind periods. It can be concluded that the hybrid energy system can improve the efficiency of wind turbines and keep the power supply stable during weak wind periods.

Keywords: Hybrid energy, Wind energy system, Solar radiation, Sunshine duration, PV system.

一、前 言

自從 1970 年代能源危機發生之後，世界各國逐漸意識到日漸枯竭的石化燃料須有替代能源方案，再加上近來全球溫室效應的日趨嚴重，使得綠色再生能源的開發，成了人類永續發展的課題之一，因此尋找乾淨且可再生的能源乃屬勢在必行。

近年來我國政府亦積極推動再生能源的發展，以發展條件來看，台灣挾帶地利之便，擁有東北季風與西南季風，加上中央山脈與福建武夷山系的地型效應，使得台灣具有得天獨厚、適合發展風力發電的風場，尤其是在台灣西部沿海、東北角、屏東半島與離島(Chang *et al.*, 2003；杜與張，2008)。但因為受限於季節季風因素的影響，風力發電在每年的 10 月到隔年的 3 月是台灣地區的強風時期，4 月到 9 月則是弱風期，如圖 1 所示。在圖 1 中的北部地區是指中央氣象局基隆、台北、鞍部、竹子湖、淡水、蘇澳、宜蘭與新竹等八個測站距地面 10 公尺處的平均風速，中部地區是指梧棲、台中、日月潭、阿里山

與玉山等五個測站距地面 10 公尺處的平均風速，南部地區是嘉義、台南、高雄與恆春等四個測站距地面 10 公尺處的平均風速，其月平均統計的資料是採中央氣象局 1961 年至 1999 年之逐時風速資料。由圖 1 中可看出，弱風期的月均風速明顯地比強風期弱。此外，根據經濟部能源委員會的資料顯示，台灣風力發電系統全年負載因子(Capacity Factor)可達 33.5% (麥寮風力發電示範系統)及 42.1% (澎湖中屯風力發電示範系統)，平均約為 37%，和國外風力發電系統之負載因子相近。但是我國風力發電發展條件和國外之差異在於：我國風力發電系統在夏季用電尖峰期時的供電能力非常差，僅不到冬季的一成(麥寮風力發電系統)或一成多(澎湖中屯風力發電系統)，不若丹麥的夏季風力發電量為冬季發電量的四成多，或是美國明尼蘇達州的三成多(郭，2003)。Chang and Tu (2007)亦指出麥寮風力發電廠在強風期的負載因子在 0.24 到 0.69 之間，在 4 月到 9 月的弱風期負載因子在 0.03 與 0.29 之間，顯示弱風期風力

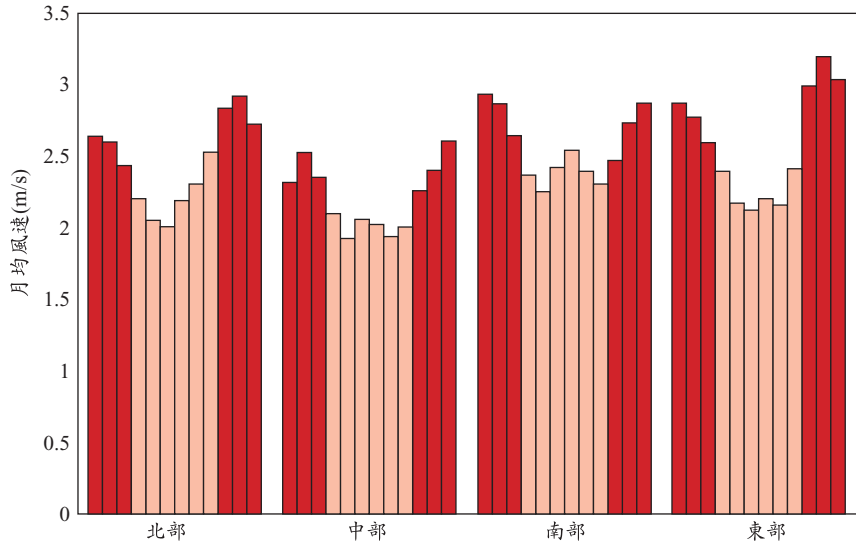


圖 1 台灣地區北、中、南與東部地區距地面 10 公尺處之月平均風速分佈圖

發電機組能提供的電力有限。

另一方面，因台灣位於亞熱帶地區，夏季日照時長且日射量而充足，隨著太陽能工業發展日漸茁壯且太陽能板發電效率逐漸提高，太陽能發電成為新興且被重視的再生能源，如何加以利用彌補風力發電在夏季發電不理想之現象，為本研究之重點。綜上所述，若結合這兩項再生能源，進行台灣地區強弱風期日射量分析，配合風能潛勢，同時並聯太陽能陣列與風機之複合發電系統，以改善風力發電在夏季發電量不足的缺點，避免台灣地區發電受到季候環境限制。

二、風力發電理論

在計算風能發電中，風速是造成風機運轉的主要因子，與風機產出的能量呈三次方正比的關係。文獻中有許多學者建立計算風能的模式理論，如 Li (2000)、Lun and Lam (2000)與 Lu 等 (2002)利用兩參數韋伯風速分佈所發展的數學方法研究香港風能潛勢與風力發電機特性。林 (2000)利用 MM5 大氣模式評估台灣地區風能蘊藏量。Methew 等(2002)提出萊利風速分佈的解析方法去研究風能密度在風速頻譜下可利用的能量和由風力發電機得到的能量。Tan and Islam (2004)建立功率係數(C_p)計算風機的輸出功率，

其中 C_p 是由 λ (翼端速度比)與 θ (葉片仰角)構成的函數值。Chang and Tu (2007)利用韋伯機率密度函數描述環境風場風速，配合風力發電機功率曲線能量公式而推得風機發電量，並與實際發電資料比較，證實以韋伯機率密度函數推估風機發電量，有良好的推估結果。因此本研究將沿用韋伯機率密度函數描述環境風場風速，並配合風力發電機性能曲線推估風機發電量。韋伯風速分佈機率密度函數與累積機率分佈函數如下所示。

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \dots\dots\dots(1)$$

$$F(V) = 1 - e^{-(V/c)^k} \dots\dots\dots(2)$$

其中 $f(V)$ 為風速機率密度函數， $F(V)$ 為風速累積機率分佈函數， k 為形狀參數， c 為尺度參數， V 為風速(m/s)。上述之形狀參數 k 與尺度參數 c 可利用下式的最大似法進行參數疊代

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i^k \ln(V_i)}{\sum_{i=1}^n V_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(V_i)}{n} \right)^{-1} \dots\dots\dots(3)$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^k \right)^{1/k} \dots\dots\dots(4)$$

其中 V_i 為時間階段 i 的風速， n 為非零風速資料點的個數。

當風場氣流掠過風車葉片掠過面積，其產生的能量與氣流速度的三次方成正比，可利用的風能如下所示

$$P(V) = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

其中 ρ 為空氣密度 (kg/m^3)， V 為風速 (m/s)， A 為風車葉片掠過面積 (m^2)。因此，風能密度可根據韋伯風速分佈機率密度函數如下表示 (Chang *et al.*, 2003)

$$\frac{P}{A} = \int_0^\infty P(V) f(V) dV = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) \dots\dots\dots (6)$$

其中 Γ 為 Gamma 函數。產生的風能密度根據韋伯

風速分佈機率密度函數如下表示

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{k+3}{k}\right) T \quad \dots\dots\dots (7)$$

其中 T 為時間 (hour)，若計算時間為一個月，則 $T = 720$ 小時。

風力發電機將風能轉換成電能時，風車的旋轉葉片會降低原先進入其內氣流的風速，當氣流遭旋轉葉片攔截時，其流動速度會降低，造成風能無法百分之百轉換成電能。風力發電機會在風速達到切入風速 V_I 後，才開始產生能量，並隨著風速增加而增加，直到風速達到率定風速 V_R 。當風速介於率定風速與切出風速 V_O 之間，風力發電機產生的能量維持極大定值 P_R ，而實際的風能產生的發電量是根據風力發電機性能曲線 (wind turbine performance curve) 而定，描述如下

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , \quad V < V_I \\ (a_1 V^5 + a_2 V^4 + a_3 V^3 + a_4 V^2 + a_5 V + a_6) P_R & , \quad V_I \leq V < V_R \\ P_R & , \quad V_R \leq V < V_O \\ 0 & , \quad V \geq V_O \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

其中 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 和 a_6 是風力發電機特性曲線的迴歸常數，而此風力發電機性能曲線可由購置廠商取得，以本研究所採用的風機 Jacob10 型為例，其 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 和 a_6 的值，分別為 0.00001481，-0.00064174，0.00988808，-0.07094082，0.37851889 和 -0.86159268。其率定

功率 P_R 為 10 kW，切入風速 V_I 為 3 m/s，率定風速 V_R 為 11 m/s，切出風速 V_O 為 25 m/s，輪轂高度為 30 m，規格如表 1 所示。

採韋伯風速分佈，結合(1)式及(8)式，風力發電機產生的發電量可以下式表示

$$E_{TA} = T \int_{V_I}^{V_O} P_T(V) f(V) dV = T P_R \int_{V_I}^{V_R} (a_1 V^5 + a_2 V^4 + a_3 V^3 + a_4 V^2 + a_5 V + a_6) \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV + T P_R \int_{V_R}^{V_O} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV \quad \dots\dots\dots (9)$$

上式的積分方程式，無法以解析的方法解得，必須以數值分析的方法推算，本研究採用高斯-雷建德六點積分法進行求解。

此外因為氣象測站的風速計設置高度彼此並不一致，而且較一般風機輪轂 (blade hub) 設置高度低，所以採這些風速資料之前，必須以式(10)之指數風速剖線方程式 (power law equation) 將各

氣象測站所測得的風速值，轉換成風力發電機距地面高度的風速值，而 Jacob10 型的風機輪轂高度為 30 公尺，因此本研究設定轉換的高度值為 30 公尺。

$$\frac{V(z)}{V_\delta} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad \dots\dots\dots (10)$$

表 1 Jacob10 風機規格表

風機型號	切入風速 (m/s)	率定風速 (m/s)	切出風速 (m/s)	率定功率 (kW)	風車葉片掠過面積 (m ²)	輪穀高度 (m)
Jacob10	3	11	25	10	65	30

表 2 四個地區測站之詳細資料

測站	測站海拔 高度(m)	風速計 高程 (m)	經緯度	α	δ
新竹	26.9	15.60	120°58'E, 24°48'N	0.194	350
梧棲	7.2	33.20	120°30'E, 24°15'N	0.130	267
恆春	21.9	14.30	120°44'E, 22°00'N	0.194	350
成功	33.5	12.80	121°21'E, 23°05'N	0.144	245

其中 $V(Z)$ 為在距地面 Z 高度之風速, V_δ 為在邊界層高度 δ 處之風速, α 是指數風速曲線係數。本研究選擇的氣象測站海拔高度、風速計高程、經緯度、邊界層高度 δ 以及指數風速曲線係數 α 整理在表 2。

三、太陽能發電理論

在太陽能發電系統中, 日射量與日照延時是影響其發電量之主要的因素。Mehmet and Ali (2005) 及 Marion 等(2005)都提及日射量影響發電量甚鉅。El-Rafey and El-Sherbiny (1988) 最先提出簡易太陽能計算模式被世界接受, 即每小時由太陽能光電系統產生的能量是由太陽面板所組成之太陽能陣列, 其面積大小、效率係數、晶片在面板上的填充率、功率條件效率及每小時天空日射量相乘所得, 因此影響太陽能發電的主要外在因子為各地區之日射量。

在推估太陽發電潛勢時, 一般會先採用長時間的時間尺度(time scale), 如日、月或年時距的日射量估算其發電量, 以評選具有優良發電潛勢的地區。選出適宜發電的地區後, 再採逐時水平日射量轉換成太陽能電池裝設傾斜面的日射量。Hrayshat and Al-Soun (2004) 以日平均日射量轉換成電能, 在約旦進行利用太陽能抽取地下水的研究。You and Yang (1997) 以日平均日射量,

表 3 KC120-1 太陽能面板規格表

太陽能板模組型號	KC120-1
最大輸出功率	120 Watts
最大輸出電壓	16.9 Volts
最大輸出電流	7.10 Amps
面積	0.89 m ²
模組功率效率	14%
晶片填充率	0.9

估算整月的總日射量, 進行香港地區太陽能潛勢的研究。Batsukh 等(2003)分別以 10 分鐘與 3 小時時間長度, 在戈壁沙漠進行太陽能潛勢的分析比較。吳(1998)利用澎湖 1994 及 1995 年之逐日全天空日射量透過機率模型模擬, 將每日之日射量轉成逐時日射量, 結果接近真實情況。張(2002)改良吳之機率模型驗證將單日的總日射量轉成逐時日射量之總發電量誤差接近 3%。故在日射量的統計上, 本研究以單日累積得到之日射總量作為發電量之計算基礎, 求得當日發電量, 再將每日之發電量累加成為每月之發電量。

每小時由太陽能光電系統產生的能量(度, kWh)可由下式計算而得(El-Rafey and El-Sherbiny, 1988)

$$E_s = A \eta_m P_f \eta_{pc} I \dots\dots\dots(11)$$

其中 A 是太陽能板陣列的面積(m²), η_m 是模組的效率係數, 亦即太陽能晶片將日射量轉換成電能的效率, P_f 是晶片在模組上的填充率, 亦即太陽能晶片佔總模組面積的百分比, η_{pc} 是功率條件效率, I 是每小時日射量(kWh/m²)。太陽能陣列面積 A 、模組效率 η_m 和晶片填充率 P_f 皆可從廠商取得資料。以台灣地區最常被使用的 KC-120-1 型太陽能板為例, 其積 A 為 0.89 m², 模組效率 η_m 為 14%, 晶片填充率 P_f 為 0.9, 其詳細規格如表 3 所示。而在這些效率係數中, 以功率條件效率 η_{pc} 的值得較難確定, Marion 等(2005)在討論太陽

能光電系統的運轉參數表現時，建議參考之功率條件效率 η_{pc} 約為 0.731。

結合(9)式與(11)式，可得複合系統的總發電量如下所示

$$E_{S+W} = TP_R \int_{V_l}^{V_R} (a_1 V^5 + a_2 V^4 + a_3 V^3 + a_4 V^2 + a_5 V + a_6) \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV + TP_R \int_{V_l}^{V_o} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-(V/c)^k} dV + A \eta_m P_f \eta_{pc} \sum_{i=1}^n I_i \dots (12)$$

若計算時間為一個月，則 $T = 720$ 小時， $n=720$ 。

四、風力發電機與太陽能陣列的搭配

本研究採用常見的小型 Jacob10 風機以及 KC-120-1 型太陽能板，做為風能結合太陽能發電評估的機型。以強弱風期較為明顯的中央氣象局恆春測站為例，當只靠 Jacob10 風機獨立發電時，模擬結果得到風機發電量最低的 6 月與發電量最高的 11 月份，最高發電量約為最低發電量的 7 倍。當搭配率定功率與風機發電功率相同的太陽能陣列，此複合發電系統的總發電量最高月份仍為 11 月，最低月份則變成 9 月，表示太陽能發電確實改善了弱風期 6 月的整體發電，而此複合系統最高月份的總發電量為最低月份的 2.55 倍。當增加太陽能陣列的率定功率為風機發電功率 2 倍時，11 月份(系統總發電量最高月份)則約為 9 月份(系統總發電量最低月份)的 1.81 倍；太陽能陣列為風機發電功率 3 倍時，11 月份(總發電量最高月份)則減少為 9 月份(總發電量最低月份)總發電量的 1.58 倍。太陽能陣列率定功率相對風機發電功率的不同倍數與複合系統最高發電量月份與最低發電量月份的比值，整理於表 4，由該表可以看出增加太陽能陣列率定功率至風機發電功率的 4 倍、5 倍甚至 6 倍，其最高總發電量與最低發電量比值幾乎趨近於 1.5 左右，因此本研究考慮使用較少的太陽能面板與複合發電系統穩定度，而採風機發電率定功率 2 倍的太陽能陣列率定功率值。本研究的 Jacob10 型風機之率定功率為 10 kW，而 Kyocera-KC-120 太陽能面板的率定功率為 120W，因此搭配風機的太陽能陣列面板數目為 180 片。

表 4 太陽能陣列率定功率與風機率定功率發電量之比較表

太陽能陣列率定功率/ 風機率定功率	最高發電量/ 最低發電量
1 倍	2.55
2 倍	1.81
3 倍	1.58
4 倍	1.48
5 倍	1.47
6 倍	1.51

五、結果與討論

5.1 台灣地區太陽能潛勢分析

本研究依據中央氣象局地面測站氣象資料，將台灣地區北、中、南與東部各月份的日射量累計圖整理於圖 2，在圖 2 中北部地區是指中央氣象局基隆、台北、鞍部、竹子湖、淡水、蘇澳、宜蘭與新竹等八個測站，中部地區是指梧棲、台中、日月潭、阿里山與玉山等四個測站，南部地區是嘉義、台南、高雄與恆春等四個測站，東部地區是花蓮、成功、台東與大武等四個測站，其月日射量統計的資料是採中央氣象局 1996 年至 2004 年的日射量資料。圖 2 中可以看出無論北、中、南或東部在 7 月份皆有最強日射量，而東部在季節上表現日照量有明顯的高差(最高月份 7 月約為最低月份一月日照強度之 6 倍)，7 月開始至 10 月進，日射量充沛。北部地區在夏季期間，日射量同樣充沛。至於中南部地區因為位處熱帶地區，一年當中四季的季節性變化較不明顯，日射量豐沛，整體而言，全年的日射量大致分布均勻，日照皆屬充足，適合發展太陽能產業。比較台灣南北部的日射量，在 6 至 10 月其日射量的差異並不大，但在 11 月至隔年 5 月，

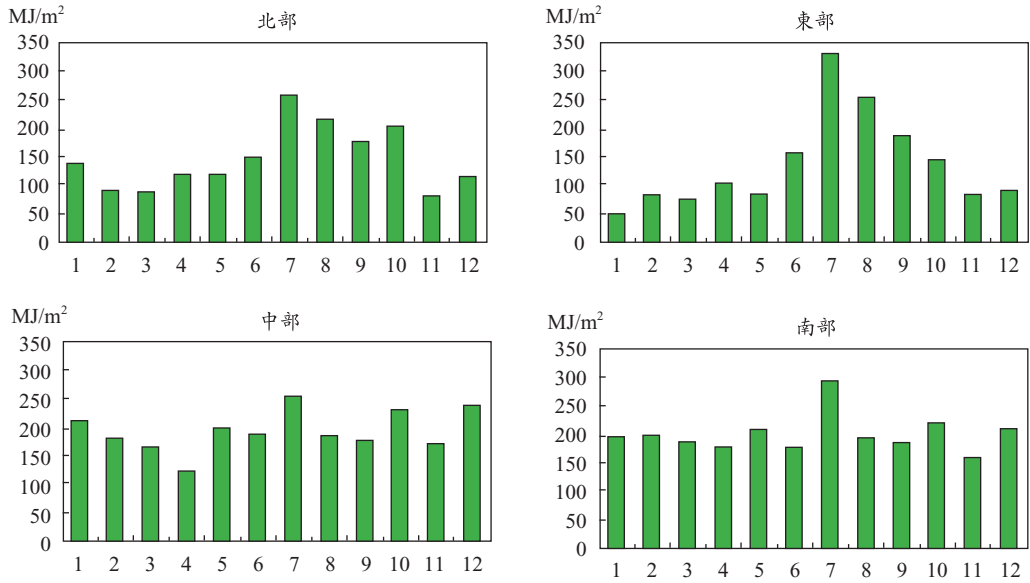


圖 2 台灣北、中、南、東部的各月份日射量累計圖

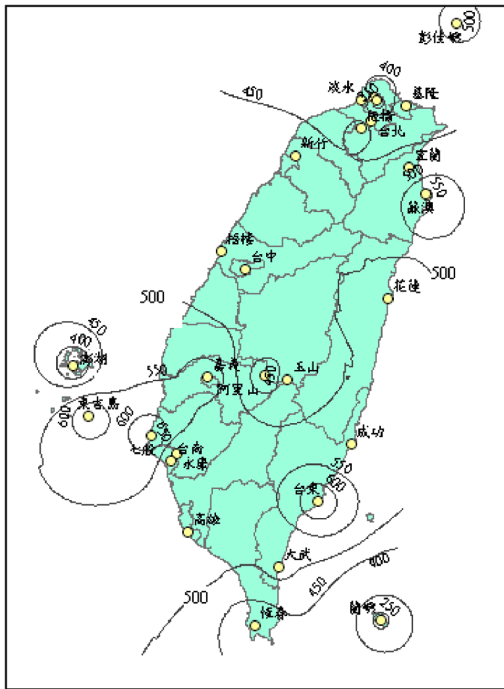


圖 3 弱風期台灣地區日射量等值線圖(單位 MJ/m^2)

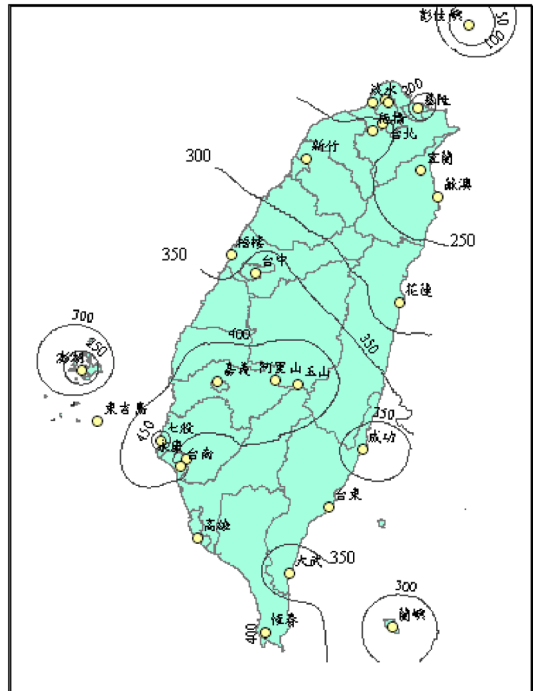


圖 4 強風期台灣地區日射量等值線圖(單位 MJ/m^2)

南部日射量比起北部平均每月份多出約 $80 MJ/m^2$ ，南部較北部有發展太陽能之優勢，但綜合評估台灣夏季無論各地皆具有充沛日射量可從事太陽

能發電。

本研究亦同時將中央氣象局地面測站氣象資料，繪製如圖 3 及圖 4 所示之弱風期與強風期

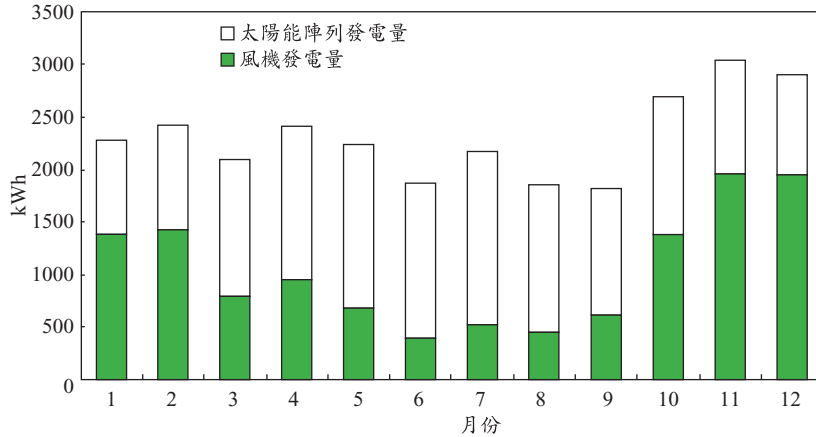


圖 5 複合式發電系統模擬新竹地區發電量

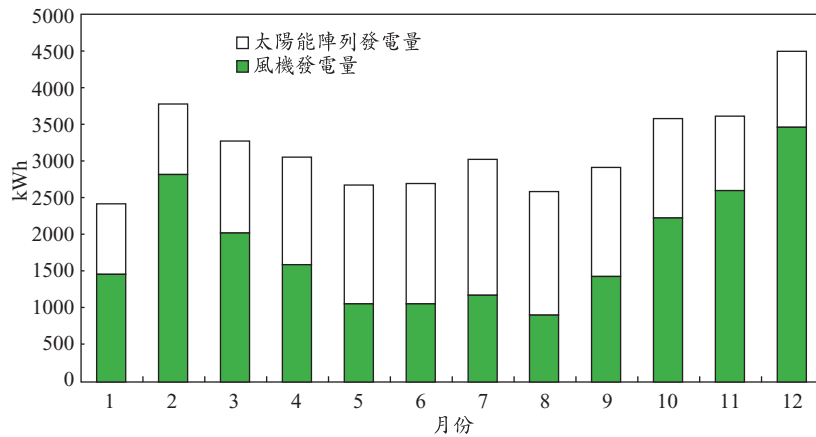


圖 6 複合式發電系統模擬梧棲地區發電量

日射量等值線圖，由圖 3 及圖 4 可看出強風期與弱風期正好反映了太陽日射量在季節上的弱強表現。在弱風期各地皆有 $350 MJ/m^2$ 的平均日射量，根據等值線分布，可知台灣西南及東吉島、澎湖離島在弱風期有高日射量，可看出台灣地區大致上日照時數隨緯度增加而減少。換句話說，越接近赤道，太陽照射角度越大，則有越長的日照時間。台灣西南部地區日照時數相對全台較長，同時亦有較強的日射量，為良好的太陽能資源發展區域。

5.2 風力發電機與太陽能陣列搭配之發電量

本研究為探討不同區域複合系統的發電情

形，分別選擇新竹、梧棲、恆春與成功四個測站，代表台灣地區北、中、南與東部區域，並利用各測站 1996-1999 年的逐時風速與 1996-2004 年平均月累積日射量估算此四個測站風能與太陽能複合發電系統的總發電量，其結果如圖 5 至圖 8 所示。由圖 5 至圖 8 可知，在弱風期風力發電機的月發電量(黑色長條圖部分)大都在 $500 kWh$ 附近，但是當加入太陽能發電量時所有的月份均提升至 $2000 kWh$ 以上，甚至有些弱風期月份的總發電量會大於強風期月份的總發電量，可見太陽能發電確能補助風力發電在弱風期發電量不足的現象。若進一步分析太陽能發電在弱風期佔整年度發電量的比例，如表 5 所示，太陽能發電在弱

表 5 太陽能發電在四個地區佔整年及弱風期之百分比比較圖

測站名稱	太陽能發電佔整年發電量百分比	太陽能發電佔弱風期發電量百分比
新竹	58%	74% (↑)
梧棲	39%	51% (↑)
恆春	45%	60% (↑)
成功	64%	74% (↑)

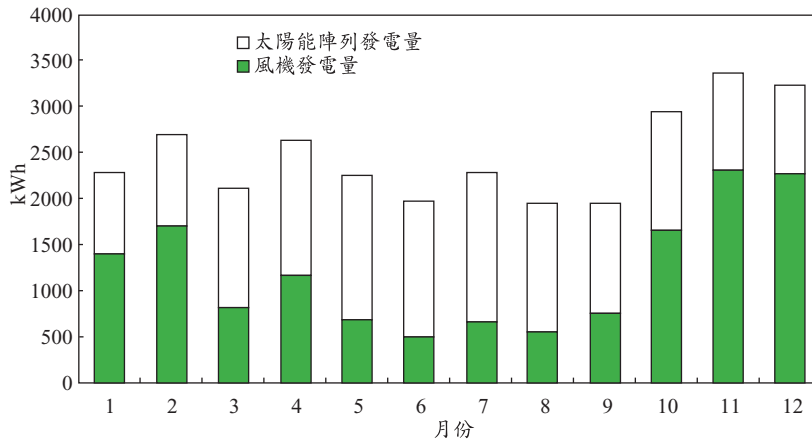


圖 7 複合式發電系統模擬恆春地區發電量

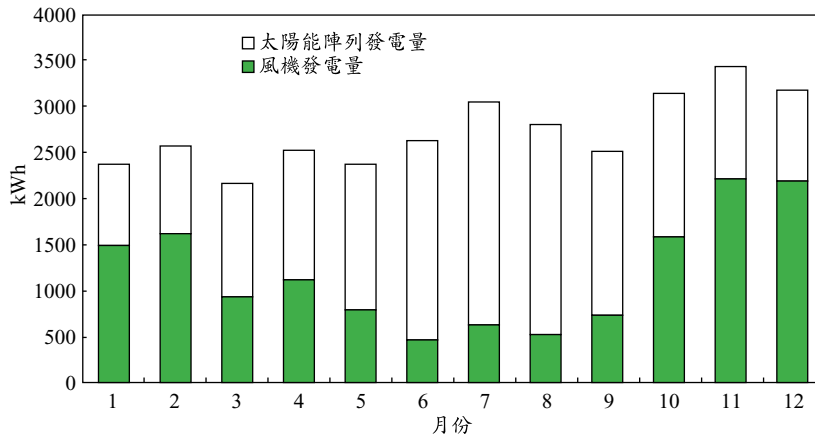


圖 8 複合式發電系統模擬成功地區發電量

風期所佔的發電量，較其於整年度所佔的發電量，在四個測站皆提升了 10% 以上，這表示太陽能發電在弱風期風能供電不穩的期間提供了重要的支援，使整體發電系統能維持程度以上的發電量，不致在夏季之供電需求高峰期無法負載。而且新竹與成功在弱風期太陽能的發電更佔了

弱風期總發電量的七成，新竹與成功在這四個測站中，相對地是屬於風場較弱的地區。以新竹地區而言，其位於台灣北部，雖不似台灣中南部地區艷陽炙烈，但因夏季期間少雨，日照時數長，夏天累積日射量強度較梧棲、恆春等地區強，故太陽能發電能有較佳的結果。成功地區位居台灣

表 6 四個地區供電穩定因子 γ 的變化表

測站名稱	單靠風機發電 整年供電穩定因子	風能結合太陽能發電後 總發電量整年供電穩定因子	搭配太陽能發電後 γ 變化量
新竹	$\gamma=0.55$	$\gamma=0.18(\downarrow)$	-0.37
梧棲	$\gamma=0.45$	$\gamma=0.23(\downarrow)$	-0.22
恆春	$\gamma=0.52$	$\gamma=0.23(\downarrow)$	-0.29
成功	$\gamma=0.41$	$\gamma=0.17(\downarrow)$	-0.24

東部，無論強弱風期發電量均較少，在四個測站中發電量最少，但由於當地累積日射量充足，使得太陽能發電為整年度的發電提供穩定的支援。

由圖 6 可發現，梧棲雖位處西部沿海強風地區，在風力發電上仍有強弱風期的區別。其日射量在冬夏差異不大(夏季表現略優於冬季)，太陽能發電在弱風期的表現不足以穩定支援全年度的發電量，故配置 2 倍於風機率定功率的太陽能陣列，對於平衡強弱風期的發電量助益有限，故可考慮增加太陽能陣列的率定功率，增加發電量，使整體發電量能維持變動幅度小，供電較為穩定。

由圖 7 可看出在恆春地區的強弱風期，風力發電量有明顯的差異，最低月份的發電量為最高月分的 13-14%。而在風機搭配太陽能陣列之後，整年的發電量差異量縮小，除了 10 月至 12 月累積較高的發電之外，大致平衡了強弱風期的供電差異。

5.3 風力發電機與太陽能陣列搭配發電之穩定性分析

本研究為清楚顯示整年度供電的穩定程度，定義無因次的供電穩定因子 γ 如下式

$$\gamma = \frac{P_{stdev}}{P_{ave}} \dots\dots\dots(13)$$

其中 P_{stdev} 為發電量之標準差 (kWh)， P_{ave} 為平均發電量(kWh)， γ 值越大表示其偏差越大，表示系統供電越不穩定。四個地區單靠風力發電的供電穩定因子 γ ，以及搭配太陽能發電的供電穩定因子 γ 及其變化量，整理在表 6。由該表可知在未搭配太陽能發電時，四個地區的 γ 值都在 0.4 以上，在搭配太陽能發電後 γ 值均降至 0.2 附近，

顯示風能與太陽能複合發電系統確實能在整年度提供穩定的發電，尤其是成功與新竹地區，其 γ 值僅為 0.17 與 0.18，在四個地區中是供電相對穩定的地區，而恆春地區雖然穩定因子不似成功與新竹低，但是其 γ 降低的量比成功地區還多，表示風能與太陽能複合發電系統能大幅改善恆春地區強弱風期風力發電不穩定的現象。

六、結 論

本研究探討以太陽能發電彌補風力發電在弱風期發電效果不佳的現象，並以太陽能面板 Kyocera-KC-120 搭配 Jacob10 風力發電機成為複合發電系統，選擇新竹、梧棲、恆春與成功四個測站，分別代表台灣地區北、中、南與東部區域，並利用各測站 1996-1999 年的逐時風速與 1996-2004 年平均月累積日射量估算此四個測站並聯風能與太陽能兩項再生能源的總發電量，可歸納出以下結論：

1. 在搭配風力發電機的太陽能面板數目方面，若只考慮發電穩定性而言，3 倍於風機率定功率的太陽能面板數目，即有穩定的供電結果；但若考慮使用較少數量的太陽能面板與複合發電系統穩定度，採風機發電率定功率 2 倍的太陽能面板數目即能使複合發電系統穩定發電。因此本研究以 180 片的 Kyocera-KC-120 太陽能面板搭配 Jacob10 型風機。
2. 四個地區在弱風期風力發電機的月發電量大都在 500 kWh 附近，但是當加入太陽能發電量時所有的月份均提升至 2000 kWh 以上，甚至有些弱風期月份的總發電量會大於強風期月份的總發電量，由此可見太陽能發電確能補助風力發電在弱風期發電量不足的現象。

3. 若以無因次的供電穩定因子 γ 觀之，供電穩定因子 γ 越小越穩定。在未搭配太陽能發電時，四個地區的 γ 值都在 0.4 以上，在搭配太陽能發電後 γ 值均降至 0.2 附近，顯示風能與太陽能複合發電系統確實能在整年度提供穩定的發電。成功與新竹地區，其 γ 值僅為 0.17 與 0.18，在四個地區中是供電相對穩定的地區，而恆春地區其 γ 降低的量是四個地區中次多的，表示風能與太陽能複合發電系統能大幅改善恆春地區強弱風期風力發電不穩定的現象。
4. 本研究在設計案例時，考慮大型風機需要搭配太陽能板片數更多，而使得複合式發電系統佔地規模更大，所需的太陽能面板成本與用地成本會過大。因此本研究先以小型發電系統作為研究方向引導，未來可考慮發展以大型風機為主的複合式發電系統。

誌 謝

本研究承蒙「財團法人中正農業科技社會公益基金會」在經費上的支持，才能使本文得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

1. 吳明璋，1998，「日射量機率模型之建立及太陽能電力系統之最佳化設計」，國立雲林科技大學電機工程研究所碩士論文。
2. 杜逸龍，張倉榮，2008，「農田水利會灌區風能潛勢之開發評估」，台灣水利。(in press)
3. 林和毅，2000，「利用 MM5 模式評估台灣地區風能蘊藏量之研究」，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文。
4. 張子文，2002，「太陽電池應用於建築上之研究」，國立成功大學建築研究所碩士論文。
5. 郭博堯，2003，「我國天然環境限制風力」。http://www.npf.org.tw/
6. 周一德，2005，「火紅的太陽能電池業」，產業雜誌 430 期。
7. 張倉榮，杜逸龍，蔡志威，劉珮珊，2006，「農田水利會灌區風力潛勢分析及其在枯水期進行地下水抽取以輔助水資源調配之評估(二)」，財團法人中正農業科技社會公益基金會九十五年農業科技研究計畫。
8. 楊慧瑾，2007，「新興可再生能源的成本分析與應用前景」，中國礦業調查報告。http://www.ah.xinhuanet.com/
9. Batsukh, G., Ochirbaani, D., Lkhagvajav, C., Enebish, N., Ganbat, B., Baatarchuluun, T., 2003. Evaluation of solar energy potentials in Gobi desert area of Mongolia. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. May 11-18.
10. Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., Liao, C.M., 2003. Assessment of Wind Characteristics and Wind Turbine Characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 28, 851-871.
11. Chang, T.J., Tu, Y.L., 2007. Evaluation of capacity factor of WECS using chronological and probabilistic wind speed data: a case study of Taiwan. *Renewable Energy*, 32, 1999-2010.
12. El-Rafey, E., El-Sherbiny, M., 1988. Load/weather/isolation database for estimating photovoltaic array and system performance in Egypt. *Solar Energy*, 41(6), 531-542.
13. Hrayshat, E.S., Al-Sound, M.S., 2004. Potentials of solar energy development for water pumping in Jordan. *Renewable Energy*, 29, 1393-1399.
14. Li, G., 2000. Feasibility of large scale offshore wind power for Hong Kong- a preliminary study. *Renewable Energy*, 21, 387-402.
15. Lu, L., Yang, H., Burnett, J., 2002. Investigation on wind power potential on Hong Kong- an analysis of wind power and wind turbine characteristics. *Renewable Energy*, 27, 1-12.
16. Lun, I.Y.F., Lam, J.C., 2000. A study of Weibull parameters using long-term wind observations. *Renewable Energy*, 20, 145-153.
17. Mathew, S., Pandey, K.P., Kumar, A., 2002. Analysis of wind regimes for energy estimation. *Renewable Energy*, 25, 381-399.
18. Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K., Hayden, H.,

- Hammond, B., Fletcher, T., Canada, B., Narang, D., Shugar, D., Wenger, H., Kimber, A., Mitchell, L., Rich, G., Townsend, T., 2005. Performance parameters for grid-connected PV systems. NREL/CP-520-37358.
19. Mehmet, Y., Ali, N.C., 2006. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. Energy Conversion and Management, 47, 2441-2450.
20. Tan, K., Islam, S., 2004. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors. Energy Conservation, 19-2, 392-399.
21. You, S., Yang, H., 1997. The potential electricity generating capacity of BIPV in Hong Kong, 26th PVSC, Anaheim, CA.

收稿日期：民國 97 年 10 月 7 日

修正日期：民國 97 年 10 月 17 日

接受日期：民國 97 年 10 月 27 日