

31. 風力與太陽光仰角追控複合型發電系統之研製

姚文隆 教授、龔裕隆
國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系

摘要

本研究旨在建構風力與太陽光仰角追控複合型發電系統。傳統固定式太陽光伏系統無法追蹤日跡使照度維持最大，其效率有限，所以追蹤太陽仰角有其必要性。另外，在單一再生能源的使用上無法穩定供電，而台灣屬海島型氣候，有很豐富的風量可以利用，與太陽能搭配使用，如此也能提升全年供電的穩定度。本研究利用光向感測器、照度感測器、步進馬達以及穩壓充電電路實現風力與太陽光仰角追控複合型發電系統。在追控系統中，加入灰預測控制模式排除干擾，以降低重複追蹤能耗；透過穩壓充電電路結合風能與太陽能，提升及穩定發電量。

關鍵字:風力、太陽光伏系統、灰預測

1. 前言

近年來能源隨著科技的進步，消失的速度也跟著加快。然而，傳統能源的短缺不僅使成本大漲，民生消費暴增之外，也為地球帶來大量的二氧化碳造成溫室效應及大自然的生態平衡失調[3]；2005年京都議定書中指出，各締約國需將溫室氣體排放標準於2008至2012年間，平均降至1990年排放水平的5.2%[6]。而目前世界各國提倡替代能源，以降低溫室氣體的排放與環保節能；替代能源基本上是指煤、石油、天然氣、核能以外的能源，包括風力、太陽能、水力、地熱等，其中尤以太陽能與風力發電的利用與研究最為推廣，其市場規模穩定上升。

目前太陽能光伏發電系統多為固定式基座接收日光(如圖1)，無法隨著太陽軌跡改變仰角；由黃文輝[7]研究中得知，太陽光伏發電效率與日照強度相關且為正比關係(如圖2)，所以要提升太陽光伏發電效率，必須取得最大照度以獲得最佳輸出功率。故發展仰角追控控制系統有其必要性。

蕭德仁[8]利用多角度選擇之太陽能光電教具在不同時間及季節變換仰角角度以追蹤最大照度，分析紀錄數據，其效率比固定式太陽光伏系統效率要高。此仰角控制系統為手動改變不同角度去量測數據，角度規定範圍有限，無法在有光照時間內自動追蹤光向，以取得更佳的轉換效率。劉昌慶[9]提出單軸式仰角追控系統，利用微小孔隙使入射光成一光點映射於感光元件上以判別太陽方位執行追蹤，有效提升發電效率。但此設計容易因遮蔽而造成誤判使追蹤產生誤差。

P.J. Verlinden 等人[1]提出一雙軸式仰角追控系統追蹤太陽方位，以全年的總發電量而言，雙軸式仰角追控系統比固定式太陽光伏系統每單位平方米發電多了37%以上。但是因為太陽軌跡南北向的變動極小，增加南北向追蹤，無疑是增加了能源的消耗，而卻沒有相對的提升轉換效率。

太陽能在夜間及天候不佳時無法發電，降低實用價值，而台灣屬海島地形，有充沛的風量可供使用。風力發電在風量充足下，與太陽能之效率相比，風力發電較高[5]。但由於風力與太陽能往往無法在任何時間內完成電力轉換，故藉由風力與太陽之互補性，發展風力與太陽能複合型發電系統彌補此缺點，以提昇效益及其價值。

陳守誠[12]建立交流-直流與直流-直流功率轉換器之模式，將風力發電結合一般型太陽能發電，整合兩種替代再生能源，一方面有助於全年供電的穩定性，另一方面也提高發電量，增加一般家庭使用的電器範圍。沈慶慧[13]整合風力發電機與吸熱式太陽能熱水器系統於游泳池的熱水淋浴系統部份，並分析風力發電輔助太陽能熱水器之整體效益，其結果有效提高熱水供應時程並提升蓄能，且系統不容易因季節或陰天而降低熱水器所需的電量，有效穩定供電。

由以上描述與文獻探討可以了解目前仰角追控系統及風力與太陽能複合型發電系統的發展趨勢與重要性。綜觀各方對仰角控制系統的研究，其所使用的方法不盡相同，但目的皆為追蹤太陽方位以尋得最大照度，提升光電轉換效率。因此，如何開發出能夠準確追蹤太陽方位且避開干擾之仰角追控系統，為當前研究提昇太陽能效率的重要主題之一。而風力與太陽能複合型發電系統的研究與分析中得知有利於改善單一再生能源的缺失，並提升供電之連續性及發電量，故未來發展複合型再生能源系統有其必要性。

2. 研究方法與原理

2.1 仰角追控系統原理

由蕭德仁[8]研究中可知在不同時間下將太陽能模板旋轉至不同仰角接收日光，所得的轉換效率也有所不同，在此利用光通量公式和照度公式：

$$d\Phi = \frac{IdS \cos \theta}{r^2} \quad (lm) \quad (1)$$

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cos \theta}{r^2} \quad (lm/r^2) \quad (2)$$

$$\because 0 \leq \cos \theta \leq 1 \quad \therefore \text{當} \theta = 0 \cdot E_{\max} = \frac{I}{r^2}$$

其中 $d\Phi$ =光通量， E =照度， I =發光強度， dS =照射面積， r =發光源與照射面積之距離， θ =發光源和照射面積連線與法線間的夾角。由此公式可推導出，當 $\theta=0$ 時，使模板正對日光時，所得照度最大。

太陽光仰角追蹤控制技術漸趨成熟，針對目前仰角追控系統之國內外相關研究，可分為多角度選擇仰角控制系統、單軸式自動追蹤仰角控制系統及雙軸式自動追蹤仰角控制系統，將各種仰角追控系統之優缺點整理歸納如表 1。

光向感測器設計主要經由東西向的輸出有所差異以判別太陽方位，Zogbit2]及黃文震[10]相繼提出太陽光向偵測器，利用四顆小太陽能電池分布於四方，藉由四顆太陽能電池之間的輸出電壓的差異訂定出目前太陽方位。對於感光而使輸出改變之電子元件眾多，如光電晶體、小太陽能電池等，但其成本較高，且容易因環境溫度使輸出產生誤差造成系統誤判。

2.2 灰色預測法

當干擾產生時，馬達持續動盪追蹤脫離軌跡，此時必有一仰角之照度最大，透過歷史仰角追蹤數據預測當干擾產生時的最佳方位，使系統快速復歸，無須重複追蹤定位而增加追蹤能耗。本研究利用灰預測模型法做為預測值運算之演算法。以下為灰預測模型建構流程。

灰色建模過程中所擷取到的行為數據，只包含系統部分的訊息，並不能完全代表此系統之行為特徵，因此稱這種模型為「灰色模型」。由於毫無明顯規律的原始序列經累加生成後，已具有明顯的指數規律，故可建立微分方程來擬合原始序列，以 GM(1,1)一階灰微分方程建模，其過程如下：

假設一個非負的原始序列 $X^{(0)}$ ，記為

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(r)\} \quad (3)$$

作一次累加生成得

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(r)\} \quad (4)$$

其 $X^{(1)}$ 可建立灰微分方程式

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (5)$$

根據 GM 模型的推導，可得：

$$X^{(0)}(k) = X^{(1)}(k+1) - X^{(1)}(k) \quad (6)$$

再將序列做均值生成 $Z^{(1)}(k)$ 並替代 $X^{(0)}(k)$ ，可得

GM(1,1)模型的灰差分方程式：

$$X^{(0)}(k) + aZ^{(1)}(k) = b \quad (7)$$

其中 a 為發展係數， b 為灰色作用量。在此本研究利用最小平方法 (Least-Squares Methods) 求解 a 、 b 兩值。由 (7)：

$$X^{(0)}(k) = -aZ^{(1)}(k) + b$$

建構白化響應式，由 (5) 可得：

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (8)$$

將 (8) 化簡

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(0)}(1))e^{-ak} + \frac{b}{a}(1 - e^{-ak}) \quad (9)$$

經由反累加生成運算 (Inverse Accumulated Generating Operation ; IAGO)

$$\hat{X}^{(0)}(k) = \hat{X}^{(1)}(k) - \hat{X}^{(1)}(k-1) \cdot k=2,3,\dots,n$$

即可求得 GM(1,1)的輸出預測值。

誤差 $e(k+1)$ 定義為：

$$e(k+1) = \frac{X_i^{(0)}(k+1) - \hat{X}_i^{(0)}(k+1)}{X_i^{(0)}(k+1)} \times 100\%, k+1 \leq n$$

此時稱 $e(k+1)$ 為 GM(1,1) 在 $k+1$ 處的預測檢驗誤差值。上述灰色預測方法，由圖 3 表示其建模程序。

2.3 風力與太陽能複合型發電系統

由於單一再生能源的使用亦受環境因素響而無法發揮其作用，若能利用夏季充足的陽光發展太陽能發電，並配合風力再生能源的開發，便可克服太陽能於天候不佳與夜間時，使太陽能無法發揮而須利用市電之缺點。若將風能與太陽能結合利用，將可提供互補之功效。

由於太陽能與風力發電的發電規格不同，所以在蓄電上須有轉換電路使規格相符。由於白天照度及天氣的變化是難以掌握的，且太陽能電池無法一直保持於額定電壓輸出，容易因環境因素而使輸出呈現波動的狀態，如此無法與蓄電池電壓保持匹配，造成蓄電效率降低。而風力發電的功率-轉速 (P- ω) 特性曲線受到風速大小的影響，對於小型風力機而言，風速變化比日照強度改變的速度更快且頻繁[14]，所以風力發電在輸出的變化性比太陽能更大。林榮輝[15]提出太陽能與風力發電功率轉換器並聯系統，透過所設計之直流-直流功率轉換器有效降低直流鏈之電壓鏈波，使系統在風速及日照改變下，維持穩定的電壓輸出。因此在系統整合上除了需要將發電規格轉換相符外，還須將輸入電壓穩定於額定電壓值附近，提升蓄電效率。

3. 太陽光仰角追控系統研製

3.1 系統機構設計與製作

本研究利用機械系統設計的概念，針對仰角追控系統機構進行設計。本仰角追控系統的總功能是「使入射光角度趨近於零度直射太陽能模板」，利用型態學矩陣法 (Morphology matrix) 選出最佳原理組合作為設計基礎[4]。為本系統的型態學矩陣，本研究為滿足設計要求及考量因素，以原理組合 A1-B1 及 A2-B2 作為設計基礎，使用可手動調整的方式，改變南北向的仰角，適應環境及季節，而東西向則透過步進馬達的控制直接驅動太陽能模板的轉置載具，達到自動追蹤之目的。圖 4 為本研究所設計之系統 3D 草圖。利用角鐵、鋁材、螺桿及伸縮支架等材料組立一可調整南北傾角之基座 (如圖 5)及太陽能板轉置載具 (如圖 6)。

3.2 感測器設計與製作

光向感測器的設計以低成本、高靈敏為主要訴求。由於屬可變電阻類別之光敏電阻 (Cadmium Sulphide, 簡寫為 Cds)價格低廉，使用方便且對於光的光譜特性約在 400 ~ 600nm 與太陽光之光波長範圍 380~760nm 的響應很接近[11]，透過光敏電阻對光強度可改變阻值使輸出電壓有所改變之特性，以判斷東西向日照差異。由於光從遠方入射，對置於東西向的光敏電阻無法明顯地判斷入射光的方向，所以本研究將光敏電阻斜放，並於後方加上 L 型擋板，使單向的光敏電阻只能接收水平至正上方的入射光 (如圖 7)，圖 8 為實體建構。其控制流程圖為圖 9。

照度感測器製作則是利用一小太陽能電池為感測器，由於本研究所使用之太陽能模板之基本發電標準與 SC-5030 小型太陽能電池相同，所以當小太陽能電池輸出電壓達工作電壓 1.8 伏特時，表示其環境條件已達發電標準，可啟動太陽光追控系統。故照度感測器可決定系統啟動或關閉，降低不必要的追蹤能耗。圖 10 為照度感測器實體建構。其控制流程圖為圖 11。

3.3 系統控制介面設計與製作

控制介面利用 VB6.0 軟體製作，透過 VB 物件式導向的操作介面與功能函數建構介面。所建構之操控介面如圖 12，其中包含顯示東西向之電壓資訊、目前仰角角度以及灰預測角度，另外加入手控部分，以因應各種狀況，如系統初始化分為四個時段，當日照感測器判斷可開啟系統的時段非早晨時，可透過此設計將系統轉置至適當角度，減少追蹤能耗。

灰控制器則是當干擾產生時，使系統脫離太陽軌跡，造成系統持續動盪輸出。為減少系統重複追蹤之能耗，透過歷史仰角數據的擷取，計算出當干擾產生時之最佳仰角方位，使系統快速復歸，減少能耗。

3.4 風力機與追控系統整合

風力發電係靠空氣的流動 (風) 來推動風力發電機的葉片而發電，為現代風力應用的主流。本研究使用美國 Southwest 公司所開發的水平軸風力機 -AIR BREEZELand (如圖 13) 作為複合型再生能源的風力發電裝置。另外太陽能板係使用型號 SP-1530 非晶矽太陽能電池，其規格如表 3。

本研究係使用風力與太陽能作為複合型發電系統之發電源，其發電電壓、電流不同，無法蓄能至同一個蓄電裝置。另外，太陽能與風力發電因環境及天候因素，使輸出產生波動，無法穩定充電而造成電池衰退。本研究為解決上述問題，利用穩壓 IC7805 將太陽能與風能之發電規格統一，並使用二極體防止蓄電池充飽後產生一逆電流損壞發電設備。本系統屬獨立型發電系統，為充份使用再生能源之蓄電能，後端負載設計高亮度 LED 檯燈 (如圖 15) 運用其電能，達到節能減碳之目的。

最後將硬體與軟體整合，建構出風力與太陽光仰角追控複合型發電系統，圖 14 為整體系統完成圖。

4. 實驗結果

4.1 灰預測控制模式測試

當干擾產生時，使系統動盪脫離軌跡，一般追蹤模式需重覆執行追蹤，增加不必要的能耗，故本系統設計一灰預測控制模式排除干擾，降低追蹤能耗。本實驗是於系統正常執行仰角追蹤近 90 度時 (定義最佳方位為 90 度)，給予相同干擾次數，比較灰預測模式與一般追蹤模式復歸最佳方位時間。此實驗共執行 10 次，實驗記錄如表 4，灰預測控制模式平均比一般追蹤模式快 24.68% 的時間復歸至最佳方位，由於耗能與使用時間成正比關係，若能減少使用時間，定能減少耗能，故本系統於干擾產生時，可減少約 24.68% 的追蹤能耗。

4.2 仰角追控系統效能比較測試

為驗證太陽光仰角追控系統的可行性，本實驗與固定式太陽光伏發電系統進行測試比較，並以一天為測試單位，測試時間為上午 9 點至下午 4 點，間隔每 5 分鐘量測一次。

表 5 為全天候仰角追控式與固定式的發電情形表，其實驗結果顯示，本仰角追控系統在扣除追蹤消耗的電量後，其淨發電效率比固定式有效提升 2.32%。

4.3 仰角追控系統效能比較測試

本研究將風力機與太陽光仰角追控系統整合為再生能源複合型發電系統，設立總系統於戶外 (高雄楠梓

地區) 進行測試，測試時間為一整天(上午九時至隔日上午九時)。圖 20 為全天累計發電情形圖，由圖中可知，太陽能發電在日照較弱的情況下，仍持續發電，而風力機在軟風情況以下為零發電，但風力發電的轉換效率較高，在有發電的情形比較上，風力皆高於太陽能的表現。風力發電在夜間有明顯的發電情形，有效彌補太陽能夜間無法發電的缺點，另外在日間午後也有些許的發電，有效提升整體發電量。

5. 結論

本研究研製之風力與太陽光仰角追控複合型發電系統之仰角追控系統在排除干擾的表現上，灰預測控制模式有效降低系統 24.68%的追蹤能耗；與固定式太陽能發電系統比較，整體發電效益提升 2.32%。風力發電可彌補太陽能夜間無法發電之缺點且日間也有零星發電，可提升再生能源蓄電量，故本複合型發電系統有效提升發電量。

6. 參考文獻

1. P.J. Verlinden, et al., One-Year Comparison of a Concentrator Module with Silicon Point-Contact Solar Cell to Fixed Flat Plate Module in Northern California, SunPower Cooperation, 430 Indio Way, Sunnyvale, CA 94085, USA, 2000.
2. R. Zogbit and K. Laplaze, Design and construction of a sun tracker, Solar Energy. vol. 33,no. 3-4, pp. 368-372, 1984.
3. 台斐賢 e 雙週刊 No.24，南非將成為非洲環保尖兵，pp.8-9，2006。
4. 符煒，機械創新設計構思方法，湖南科學技術出版社，大陸湖南，2006。
5. 苗栗縣大山國小網站，<http://www.ds.mlc.edu.tw/>，2008。
6. 林君暉，以微控制器製作之自主式太陽能追控系統，東華大學，碩士論文，2005。
7. 黃文輝，太陽光伏系統最大功率追蹤器與遠端監控系統之研製，高雄第一科技大學，碩士論文，2007。
8. 蕭德仁，提升太陽能電池發電效率參數與機構之研究，正修科技大學，碩士論文，2005。
9. 劉昌慶，太陽能電池之仰角控制研究，大葉大學，碩士論文，2006。
10. 黃文震，太陽光向偵測器之設計與應用，大葉大學，碩士論文，2006。
11. 葉益男，集光式太陽光發電追控系統研製，台灣大

學，碩士論文，2003。

12. 陳守誠，太陽能與風力發電複合系統之研製，台灣科技大學，碩士論文，2003。
13. 沈慶慧，風力機於太陽能熱水器輔助加熱設備之研究，崑山科技大學，2005。
14. 陳銘杰，結合風力發電機與太陽能電池模組之混合式充電系統之研製，東華大學，碩士論文，2006。
15. 林榮輝，太陽能與風力發電之直流-直流功率轉換器並聯系統之研製，台灣科技大學，碩士論文，2004。

7. 圖表彙整



圖 1 傳統太陽光伏發電系統之固定式基座

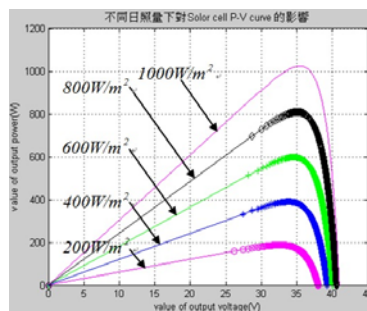


圖 2 照度公式數值模擬曲線

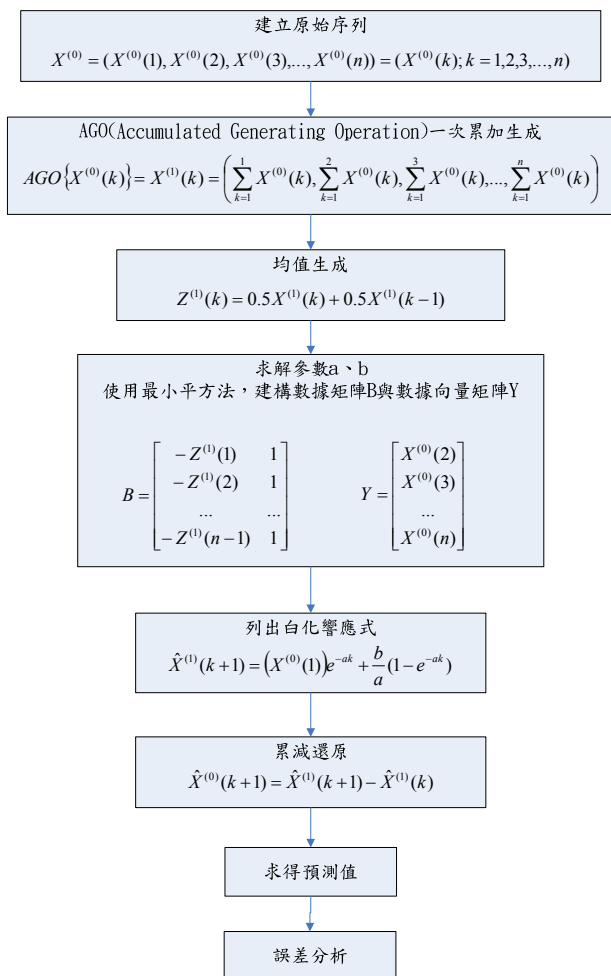


圖 3 GM(1,1)建模流程圖

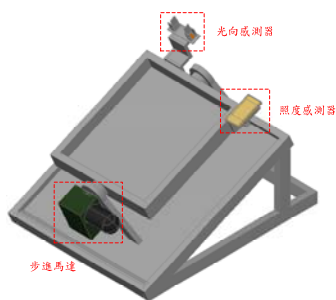


圖 4 仰角追控系統設計 3D 草圖

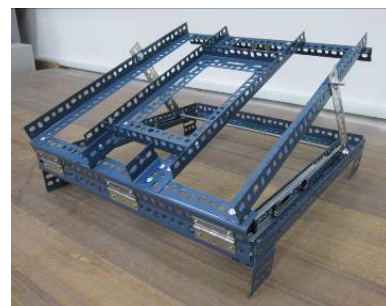


圖 5 南北向仰角可調式基座



圖 6 太陽能板轉置載具

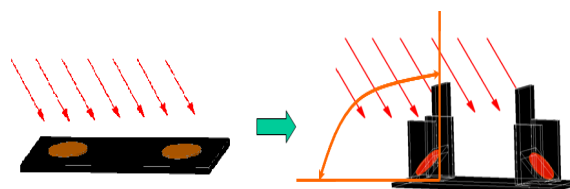


圖 7 光敏電阻擺放示意圖

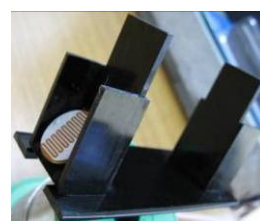


圖 8 光向感測器實體

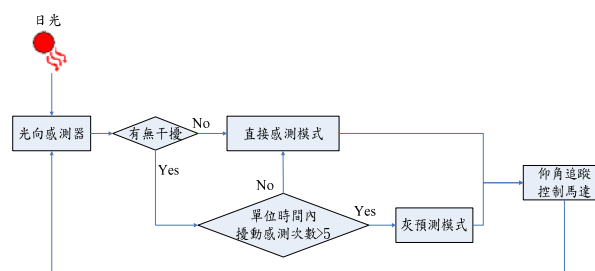


圖 9 光向感測器控制流程圖

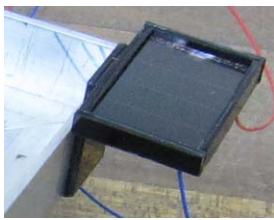


圖 10 照度感測器實體

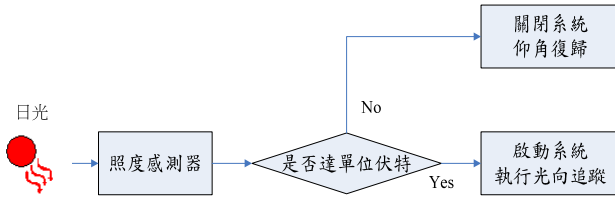


圖 11 照度感測器控制流程圖



圖 14 追控系統完成圖



圖 12 太陽光仰角追控系統控制介面

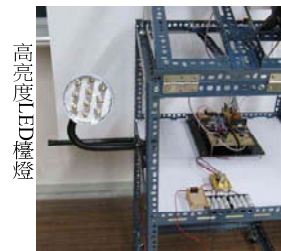


圖 15 高亮度 LED 檯燈



圖 13 AIRBREEZEland 風力機

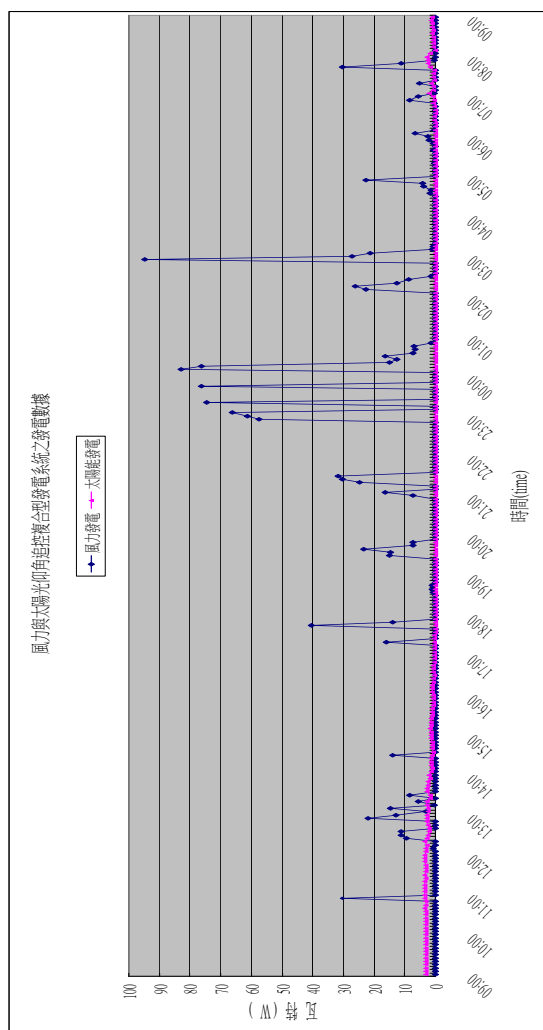


圖 20 風力與太陽光仰角追控複合型發電系統之發電數據

表 1 仰角控制系統優缺點比較表

	優點	缺點
多角度選擇仰角控制系統[8]	可適應環境與季節。	需靠長時間紀錄來取得該地區的環境特性。
單軸式自動追蹤仰角控制系統[9]	在東西向隨時取得最佳轉換效率。	會因為地區的差異，無法改變南北向的角度。
雙軸式自動追蹤仰角控制系統[1]	在任何時間及地點皆能取得最佳方位以獲取最好的轉換效率。	因南北向變化極小，多添加一軸控制，也造成額外的能源消耗。

表 2 仰角追控系統機構的型態學矩陣

分功能	分功能解法		
	1	2	3
A 追蹤方式	東西向	南北向	東西軸-南北軸
B 動力源	電動	手動	-

表 3 太陽能板規格表

	型號	SP-1530
	材質	非晶矽
	尺寸 (mm)	152*290*2.25
	工作電壓	7.5V
	工作電流	200mA
	開路電壓	9.5V
	短路電流	250mA

表 4 灰預測模式與一般追蹤模式復歸最佳方位

時間紀錄表

	灰預測控制模式(秒)	一般追蹤模式(秒)	增益(%)
1	4.14	5.32	22.18
2	4.31	5.78	25.43
3	3.98	5.94	33.00
4	4.77	6.29	24.17
5	4.48	5.37	16.57
6	3.88	5.41	28.28
7	4.29	5.59	23.26
8	4.36	6.11	28.64
9	3.91	5.12	23.63
10	5.07	6.47	21.64
平均增益			24.68

表 5 全天候仰角追控式與固定式的發電情形表

	仰角追控式	固定式
太陽能發電全天 累計發電量 $P_{pv}(J)$	62662.92	35122.41
步進馬達全天 累計耗電量 $P_{motor}(J)$	27360	0
淨發電量 $P_{net}(J)$	38038.92	35122.41
太陽能發電全天 累計最大發電量 $P_{all}(J)$	126000	126000
淨發電效率 $\eta\%$	30.19%	27.87%