

太陽光電發電系統之研製及其電能監控

趙貴祥 陳碧雲 張隆益 張金源 李漢誠

國立勤益技術學院電機工程系

摘要

本文旨在研製一可與台電並聯供電之太陽光電發電系統，並應用LabVIEW圖控軟體程式透過資料擷取介面作其發電情形之即時監控。其系統電路之組態由一直流/直流升壓型轉換器與單相全橋式變流器所組成。昇壓型轉換器之設計，使得系統在不同輸入電壓下，均可利用全橋式變流器將太陽電池所產生之電能轉換成交流電併入台電系統對負載供電。同時為了充分了解本系統之發電狀況，利用LabVIEW圖控軟體發展一套發電即時監控系統，以便作發電資料之分析與建檔，供日後系統擴增及維護之參考依據。

關鍵詞：太陽光電發電系統、LabVIEW圖控軟體、升壓型轉換器、監控系統。

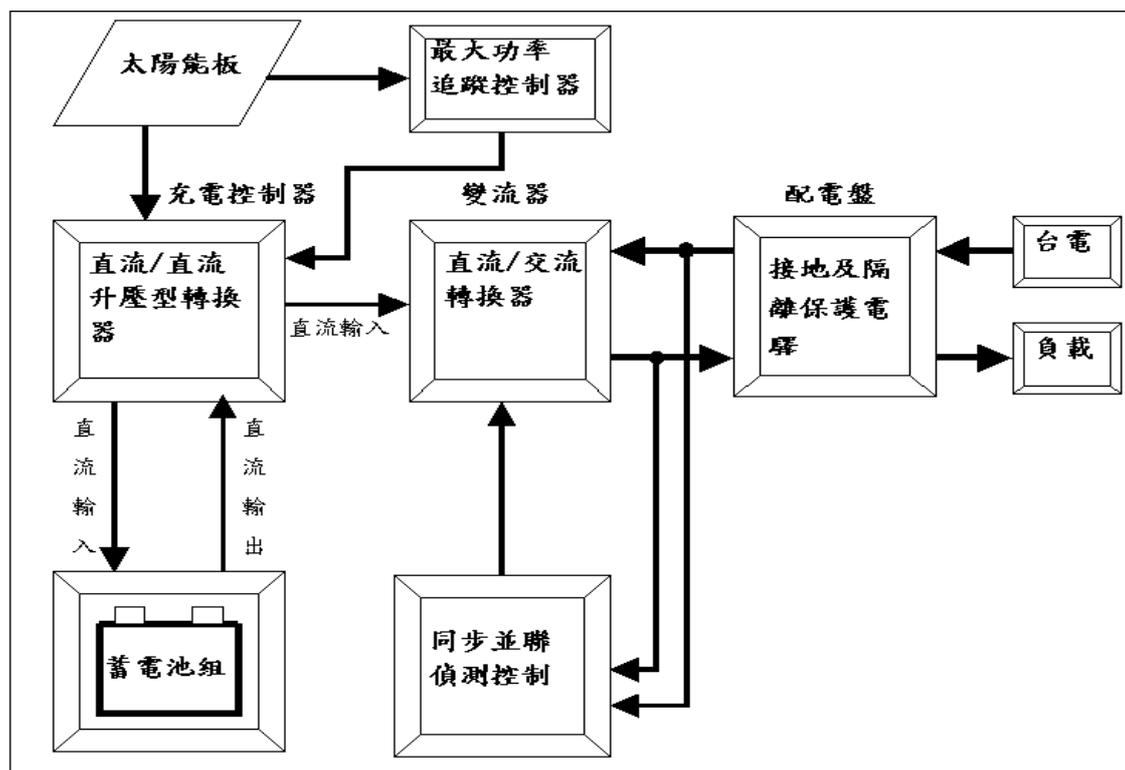
一、簡介

近年來環保意識的抬頭及由於溫室效應所帶來的二氧化碳排放問題，使得再生能源的應用再度成為一項引人注意的課題，而永續發展的理念更是清潔能源推動的主要動力。由於太陽光取之不盡、用之不竭，此外又無污染，加上近年來太陽電池之積極研究發展，已可達相當高的效率，因此逐漸受到歐、美、日許多國家重視，並制定政策鼓勵推展應用。以德國來說，太陽光發電規劃在未來能逐漸提升到佔全國電力的20%[1]。美國也在能源部的支持下，82家美國電力公司合組太陽光電發電系統群(UPAG, Utility Photovoltaic Group)來推展太陽光發電系統，預計在2005年以前，每年裝置容量可達500MW[1]。日本通產省自1995年開始，鼓勵一般住宅屋頂設置太陽光電發電系統，並由政府補助一半的裝置費，目前已隨用戶之增多及變流器(inverter)價格之下降改為補助三分之一。我國經濟部能源委員會為推動台灣地區太陽光電發電示範利用，以及奠定未來推廣利用之基礎，亦開始辦理太陽光電發電示範系統設置之獎勵補助作業[2]，預定八十九年度設置容量為300kW以上。況且臺灣位居亞熱帶鄰近赤道，日照量充足，條件比德國、日本與美國大部份地區為佳，可以說是最具發展潛力的國家之一。但臺灣之太陽光發電技術研發與推展則尚在萌芽階段，整個太陽光發電之技術尚未成熟，亟待積極鼓勵有關太陽光發電技術之研究。

目前太陽光發電系統不是採獨立系統[3,4]，就是與其它電力系統並聯[5-7]。獨立系統一般被應用於偏遠地區、公用電力網不普及的區域，發電量多屬小規模，需包括能量儲存系統，增加發電成本，且通常須借助輔助電源，較不易經濟地配合負載需求。至於與其它電力系統並聯之併接式系統，則併接公用電力網路或有輔助電力源如柴油發電等，故無需儲能設備。且與市電併聯型(Grid-Connected System)太陽光電發電系統，宜採取分散式設計理念，直接將太陽光電發電系統(3-5kW)裝設在屋頂或隨地裝設(如公共場所、高速公路、閒置空地等)直接發電，除自給自足外，剩餘電力可回售電力公司，不足時則向電力公司購電或考慮增設。如此，可以舒緩籌建大型發電廠的壓力、避免土地徵收問題與環保抗爭、減輕輸配電負擔、又無公害污染之虞。這是「住家自備部分發電」觀念的雛型，也是未來人類的發展方向。但不管獨立運轉抑或並聯到系統運轉，一個太陽光發電系統基本上必須包括(1)太陽能板；(2)直流/直流轉換器；

(3)最大功率追蹤控制器及(4)變流器[8]。圖一所示即為本文所提太陽光電發電系統之組成方塊圖。當太陽光照在太陽電池模板上，即產生直流電，此直流電經過充電控制器與變流器轉換成一般商用的交流電，充電控制器並與蓄電池相接，蓄電池可將白晝產生的電力儲存下來，供晚上或陰天使用，充電控制器可調整太陽電池的輸出電壓，並控制蓄電池的充電與放電。

基於以上所述，本文就以下幾項問題進行研究：(1)太陽光電發電系統之整體系統研製及實測；(2)開發電力監控軟體程式，以記錄太陽光電發電系統每日之發電量。



圖一 所提太陽光電發電系統架構。

二、太陽光電發電系統架構

如圖一所示之所提太陽光電發電系統架構主要由(1)太陽能板；(2)直流/直流升壓型轉換器；(3)最大功率追蹤控制器；(4)單相全橋式變流器；(5)隔離保護裝置及(6)同步並聯控制等所構成，各組成部份敘述如下：

(一)、太陽能板

本系統採用SIMENS SP75單晶系太陽能板，其單一模板之規格如表一所示。本系統使用4片一串之太陽能板10組再並聯而成，其總共需40個單板模組，可提供最大輸出功率約3kW之功率。

(二)、直流/直流升壓型轉換器

由於太陽能系統成本高，為達最大功率的轉移，使其效率及能源利用最佳化，須使用直流/直流轉換器以調整其半導體開關導通時間，使得負載阻抗與太陽能阻抗能匹配，達到最大功率輸出。而所設計之升壓型轉換器，可提供寬廣範圍之電壓輸入，以適應不同之太陽能板組合方

式，提供穩定的直流電壓供後級變流器使用。

表一：太陽能板單模組輸出特性規格

開路電壓	21.7V
短路電流	4.8A
最大功率下之輸出電壓	17V
最大功率下之輸出電流	4.4A
最大輸出功率	75W

(三)、最大功率追蹤控制

由於太陽能電池之輸出功率受照度、溫度及負載等不同之外在環境影響，因此正確又快速地追蹤最大功率點，是設計上的重要考慮因素。最大功率追蹤的主要方法有擾動觀察法[9]及增量電導法[10]兩種，茲作簡單的說明如下：

- 1、擾動觀察法(Perturbation and observation method)是藉週期性地擾動太陽電池的端電壓（增加或減少），並比較太陽能板的輸出功率。其缺點為當大氣條件迅速改變時，會使追蹤的速度緩慢，導致功率損失。
- 2、增量電導法(Incremental conductance method)的優點是於太陽電池上之照度變化時，其輸出電壓能以平穩的方式追隨變化，其缺點為感測器裝置須較多且電路較複雜。

應用於太陽能電池之最大功率追蹤方式中，擾動觀察法是目前最常被採用的方法。乃因其所需硬體較少，故控制法則也較為簡單。本文採用擾動觀察法，藉由感測器檢出太陽電池輸出端電壓 V_p 及電流 I_p ，並計算得功率 $P_{pv} = V_p I_p$ 。由圖二所示之太陽電池功率-電壓特性得知，若其最大功率點發生在電壓 $V_p = V_{p,max}$ 時，此時特性曲線斜率 $dP_{pv}/dV_p = 0$ ，當 $V_p < V_{p,max}$ 時 dP_{pv}/dV_p 為正，而 $V_p > V_{p,max}$ 時 dP_{pv}/dV_p 為負，故若太陽電池之 V_p 可受控，則 dP_{pv}/dV_p 為正時， V_p 必須增加；反之 dP_{pv}/dV_p 為負時， V_p 必須減少以使得太陽電池之工作點往 $dP_{pv}/dV_p = 0$ 方向進行。基於以上之法則，為達成零斜率之調整，一比例-積分控制器(PI controller)可被設計成：

$$v_{control} = k_p e + k_i \int e \quad (1)$$

其中 k_p 及 k_i 分別為比例-積分控制器之比例及積分增益，而 e 為斜率 dP_{pv}/dV_p 。PI 控制器之輸出 $v_{control}$ 信號再與固定頻率之三角波比較後得責任週期可變之 PWM 控制信號，藉以調控直流/直流升壓型轉換器之責任週期，以控制太陽電池之端電壓 V_p ，俾使太陽電池能以最大功率輸出至負載。

(四)、單相全橋式變流器

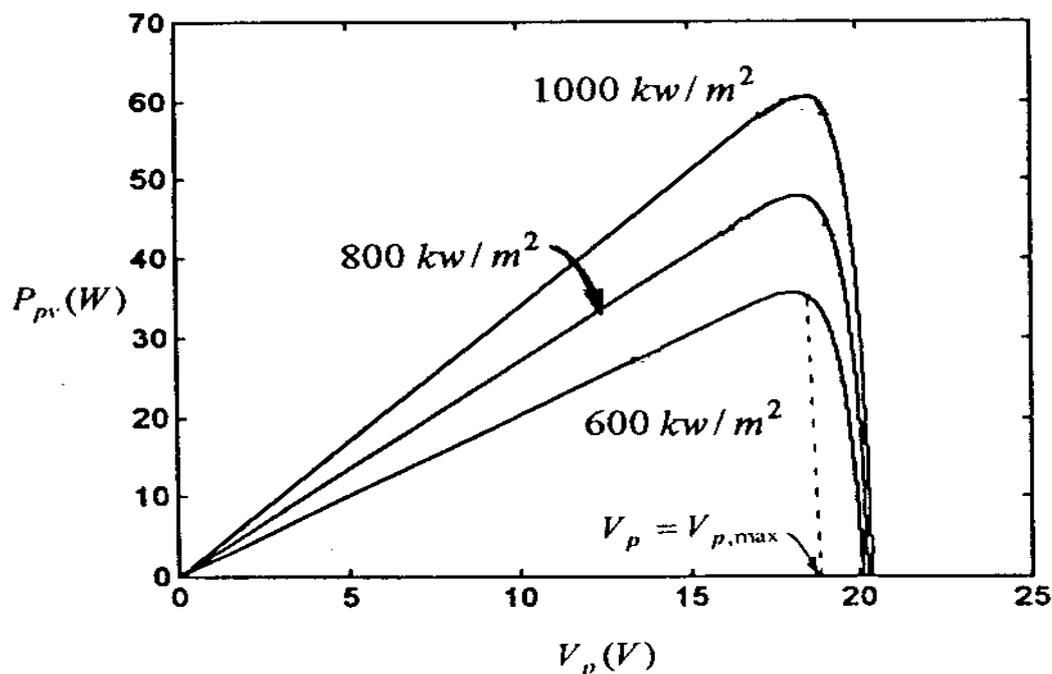
後級的供電系統，以圖三中所示之單相全橋式的 DC/AC 變流器為基本架構。輸出端之前所加之 LC 濾波電路，是為了將切換後之輸出電壓高頻成份濾除，以求得 60HZ 之正弦電壓輸出，供應負載穩定的交流電壓。

變流器切換方式係採用正弦脈波寬度調變 (SPWM) 技術，且操作於單極性電壓切換方式，

用以有效降低輸出電壓的諧波成份。由於變流器輸出的調變信號含有高次諧波成份，須使用對稱型LC濾波器來濾除。若變流器開關切換頻率為15KHZ，採用單極性切換的最低諧波頻率應以30KHZ為中心，考慮所要濾除之最低諧波頻率及需要保留的基本波頻率，其濾波電感及電容須滿足下式：

$$60\text{HZ} \ll \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \ll 30\text{KHZ} \quad (2)$$

若選擇 $L_{o1} = L_{o2} = 2\text{mH}$ ， $C_o = 3.3\mu\text{F}$ ，則使得 $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C_o}} = 1.385\text{KHZ}$ 滿足(2)式之要求。



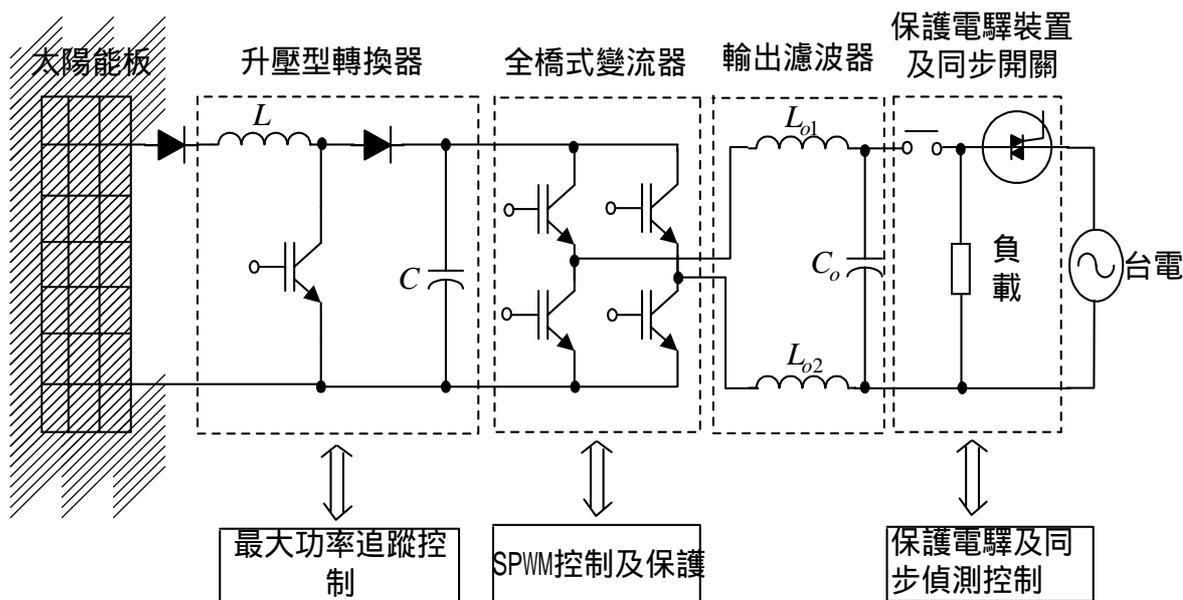
圖二 太陽電池功率-電壓特性曲線。

(五)、隔離保護裝置

一般而言，變流器的輸出端線路大多裝置於家用主開關負載側，串接保護電驛主要提供兩種功能，一是當太陽能轉換系統發生故障時，電驛能及時切離系統與市電端，不會影響電力公司之正常供電；另一方面，當市電系統發生故障或處於維修狀況下，保護電驛也可提供適當的安全隔離以保護人員安全。

另外本系統亦提供以下三項保護功能：

- 1、變流器輸出低電壓與過電壓保護：系統在供電期間，如遭遇市電斷電或線路異常所造成電壓變動現象，經判斷為異常狀況時則停止該系統操作。
- 2、變流器輸出過電流保護：當變流器遭負載急劇變動或發生短路事故時，經判斷係電流超過輸出額定，則停止該系統操作。
- 3、短路及過溫保護：當系統操作在短路或溫度過高情形下，即送出故障信號，用以切斷功率晶體的觸發信號，並停止該系統操作。



圖三 所提太陽光電發電系統電路組態。

(六)、同步並聯供電

當台電電源故障後再復電時，太陽光電發電系統首先經由同步程序與台電並聯，然後再依據當時日照量下之發電量決定台電與太陽光發電系統之供電分配。在系統發電量大時，令台電提供負載之功率降低，並對儲能系統之蓄電池充電；在系統發電量小時，大部份電力由台電提供並同時由台電對蓄電池充電。

三、所提太陽光電發電系統實測結果

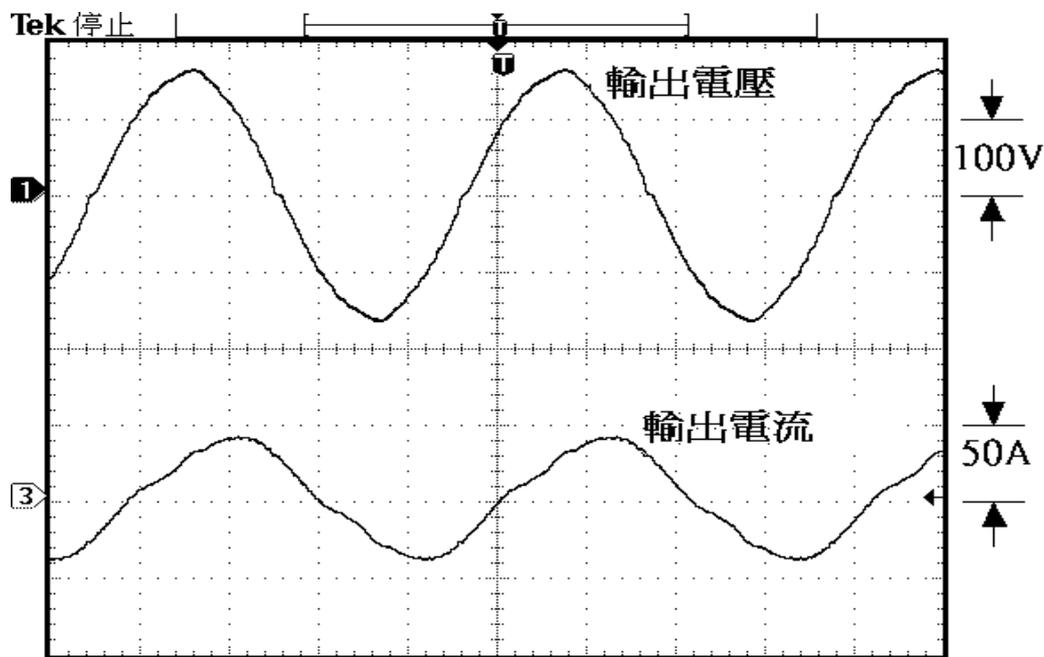
本文實際研製一台3kW之太陽光電發電系統，該系統之規格如表二所示。

表二：所提太陽光電發電系統之規格

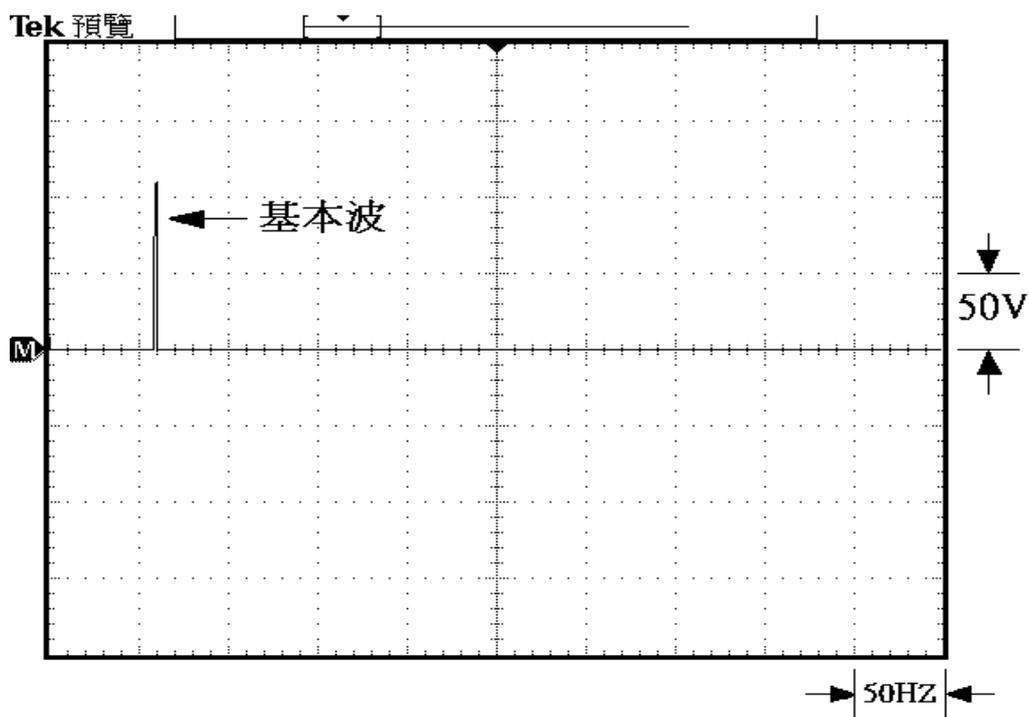
項 目	規 格
輸入直流電壓範圍	44-66V
輸出電壓範圍	110V
輸出頻率	60HZ
變流器切換方式	SPWM
最大輸出容量	4KVA
最大轉換效率	95%
輸出電壓基本波成份比	0.95
輸出電壓高次諧波失真率	總諧波5%以下，各次3%以下

本系統在夏季時實際最高發電功率可達2600W，穩定輸出平均功率約可達1200W左右。圖四

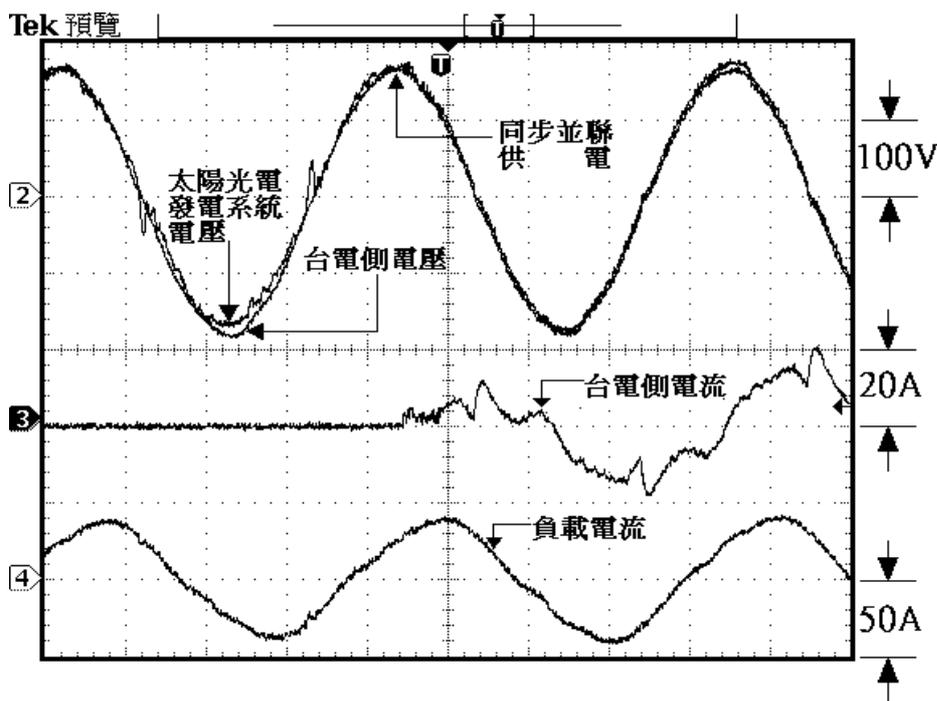
所示為此太陽光電發電系統在與台電並聯供電下，其變流器輸出電壓及電流波形。其輸出電壓之頻譜如圖五所示。由圖四及圖五可觀得此系統確實可提供一低諧波成份之穩定交流電源供應負載。圖六所示則為台電復電時本系統與台電同步並聯供電之情形，由圖中觀得當台電復電時，首先進行同步程序，待兩者電壓同步時再行並聯供電。



圖四 變流器交流輸出電壓及電流波形。



圖五 變流器交流輸出電壓之頻譜。



圖六 台電與太陽光電發電系統並聯供電尋找同步時之情形。

四、太陽光電發電監控系統

(一)、LabVIEW圖控軟體

本太陽光電發電系統採用LabVIEW圖控軟體來撰寫監控程式。使用LabVIEW圖控軟體具有以下之優點[11]：

- 1、LabVIEW是屬於圖控式程式語言，只要將所需的圖塊依照自己的需求以流程圖方式連接就可以達到所要之功能。
- 2、LabVIEW淺顯易懂，可以節省許多學習的時間。就算使用者不是程式設計師，只要經過短時間的訓練，就可輕易地學會。

(二)、監控系統架構

如圖七所示為本監控系統架構之流程圖，其架構流程說明如下：

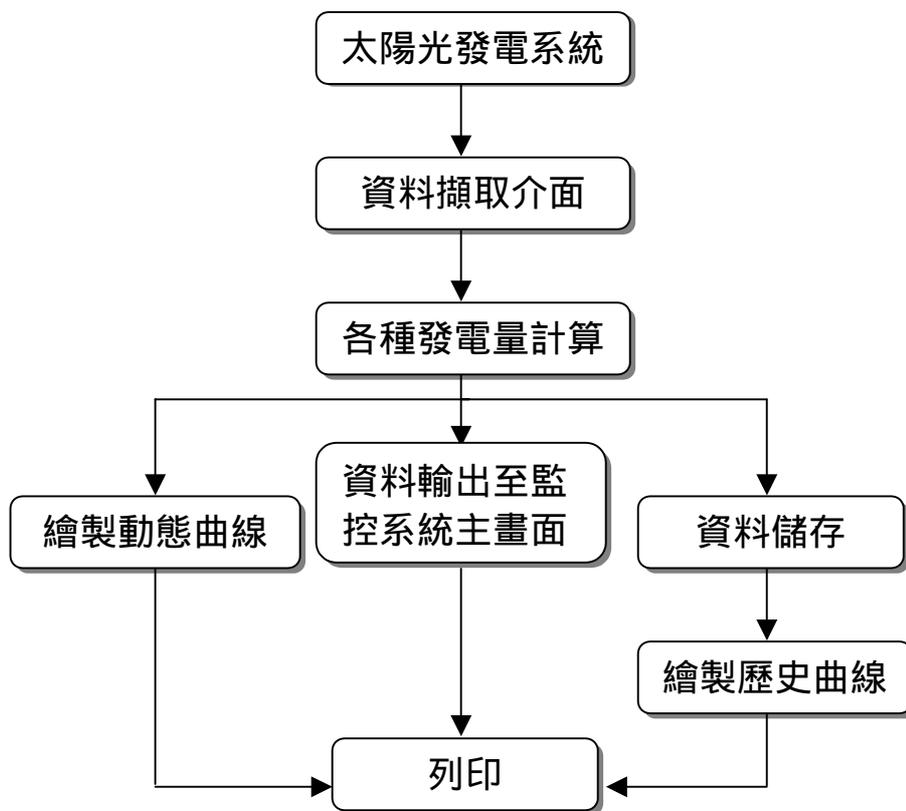
- 1、首先將太陽光發電系統上所有的物理量（包括電壓、電流、頻率、功率及功率因數等）透過感測器轉換為4mA~20mA的直流電流信號傳送。並使其流過250Ω的電阻轉換為1V~5V的直流電壓信號，最後透過資料擷取介面卡將所需的信號取至個人電腦。
- 2、使用LabVIEW中的圖形函式將所擷取進來的信號還原成實際的數值，並計算各項發電量。
- 3、本監控系統將資料取一分鐘的平均值來儲存成試算表格式的文字檔，以作為即時資料顯示、繪製動態曲線及歷史曲線。

(三)、LabVIEW圖控軟體程式

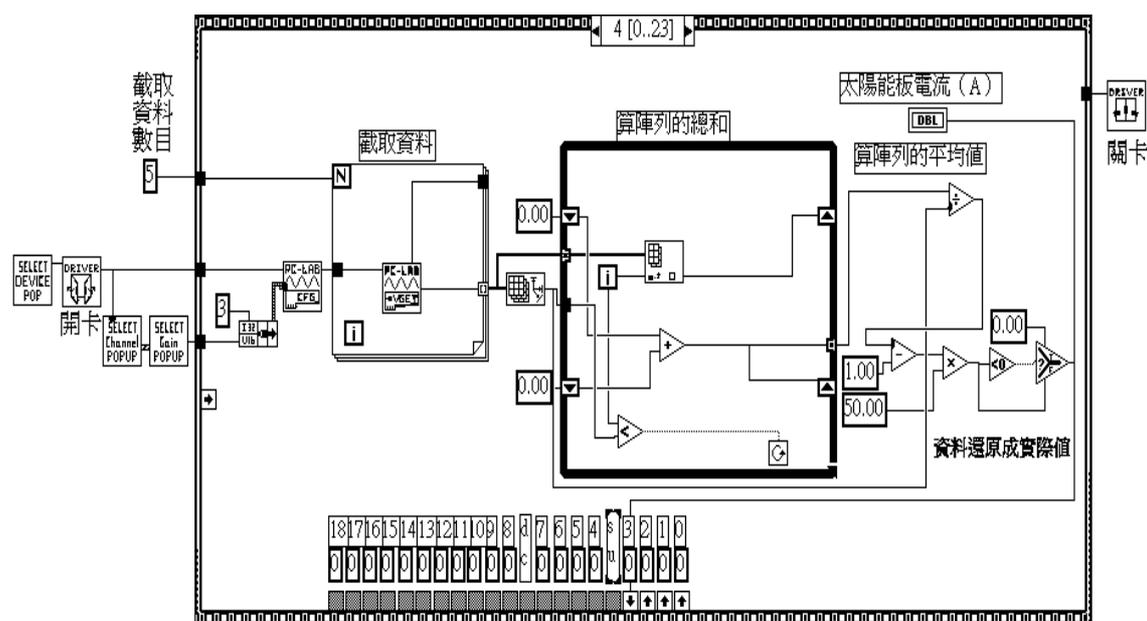
1、資料擷取

圖八所示為資料擷取程式之方塊流程（以擷取太陽能板電流為例），其中包含了資料擷取及相關數學運算式之整個流程。首先使用資料擷取的圖塊將所需的信號取至電腦中（本系統所

使用的資料擷取介面卡為研華PCL-813A/D卡，而非LabVIEW支援的資料擷取卡，故有些圖塊函數係由網站下載而來[12])。為了避免雜訊干擾，所以其資料係採連續擷取五筆再求其平均值。



圖七 太陽光電發電即時監控系統架構之流程圖。



圖八 資料擷取LabVIEW程式方塊。

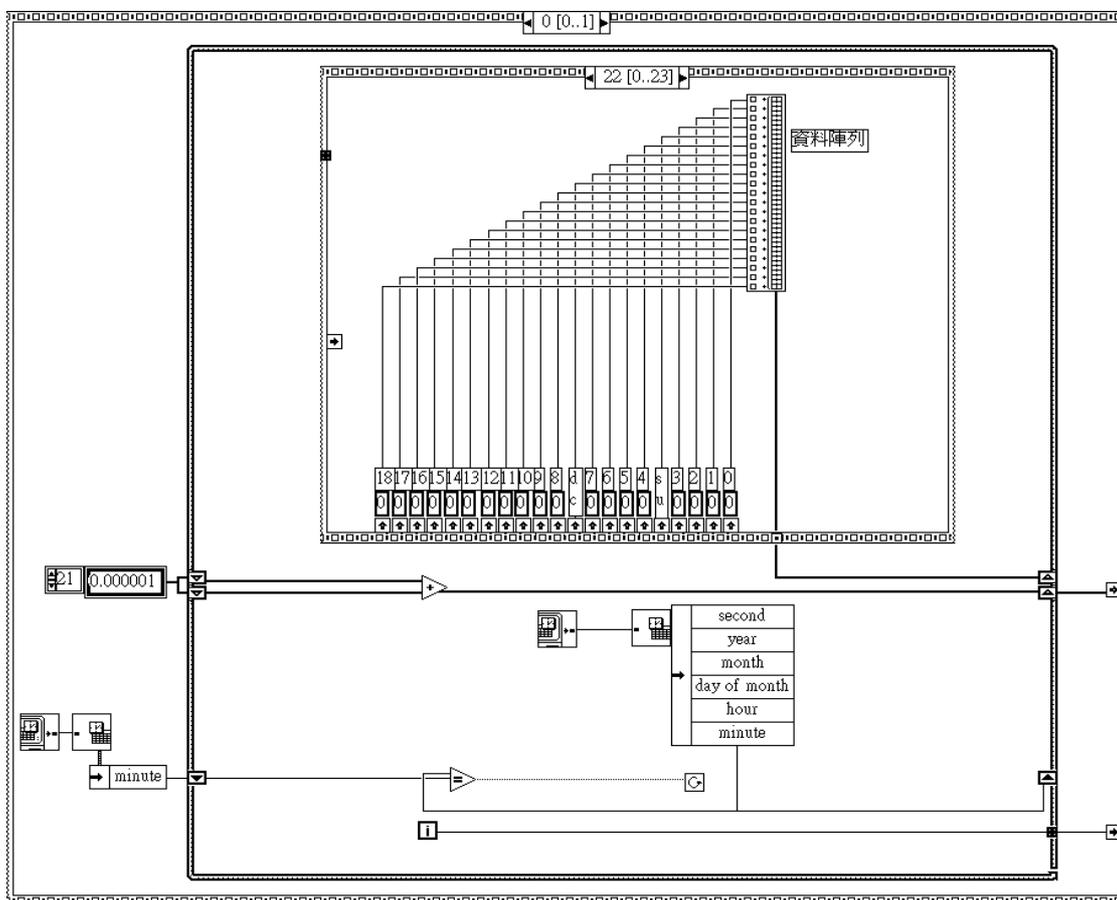
由前節所述可知擷取至電腦的信號為 1 V ~ 5 V 的直流電壓，因此必須透過數學式還原成實際值，以太陽能板電流為例，將電流 0 A ~ 2 0 0 A 的物理量轉換成 1 V ~ 5 V，其還原的運算式如下：

$$\text{太陽能板實際電流} = (\text{擷取信號值} - 1) \times 50 \text{ (A)} \quad (3)$$

最後將轉換後的值傳送至主畫面作即時監控，但因人之眼睛有視覺暫留現象，所以在資料擷取結束後，程式必須延遲一段時間，始可看清數值的變化情形。

2、檔案儲存時間控制

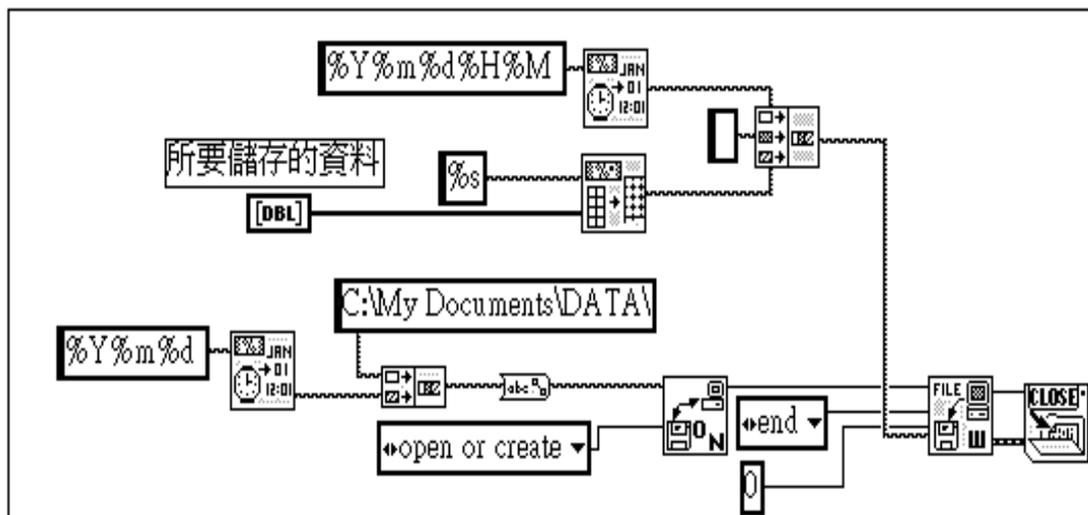
如圖九所示為檔案儲存時間控制之方塊流程。資料擷取結束後會產生一資料陣列暫時存放所有擷取的資料，再利用移位暫存器 (Shift Register) 和前一次資料陣列產生的時間作比較 (以分鐘為單位)，若時間相等就將此陣列和之前的陣列累加，且繼續作資料擷取的工作；反之則將之前所累加的陣列總和取平均值再傳到圖十的程式中存檔，如此就能達到儲存一分鐘之內所有資料平均值之功能。



圖九 檔案儲存時間控制LabVIEW程式方塊。

3、檔案儲存

如圖十所示為檔案儲存之方塊流程。本監控系統所擷取的資料是以試算表格式儲存，且一天一個檔案，檔案名稱則是以年月日方式來命名，如檔名為20010808即代表2001年8月8日當天的檔案。



圖十 檔案儲存LabVIEW程式方塊。

4、歷史曲線

如圖十一所示為繪製日曲線程式之方塊流程。利用選單選擇所要繪製的端點（如太陽能板功率、太陽能板電壓等）及日期（年月日），透過方塊 1 將整個檔案中的時間與所選的端點兩排資料取出，然後傳送到方塊 2，計算一天當中每小時的平均值，再將結果送至繪圖圖塊（Waveform Graph）即可完成。若是選擇功率端點則會透過方塊 3 自動計算發電量（kWh），同理月曲線則是取每日平均值來繪製。

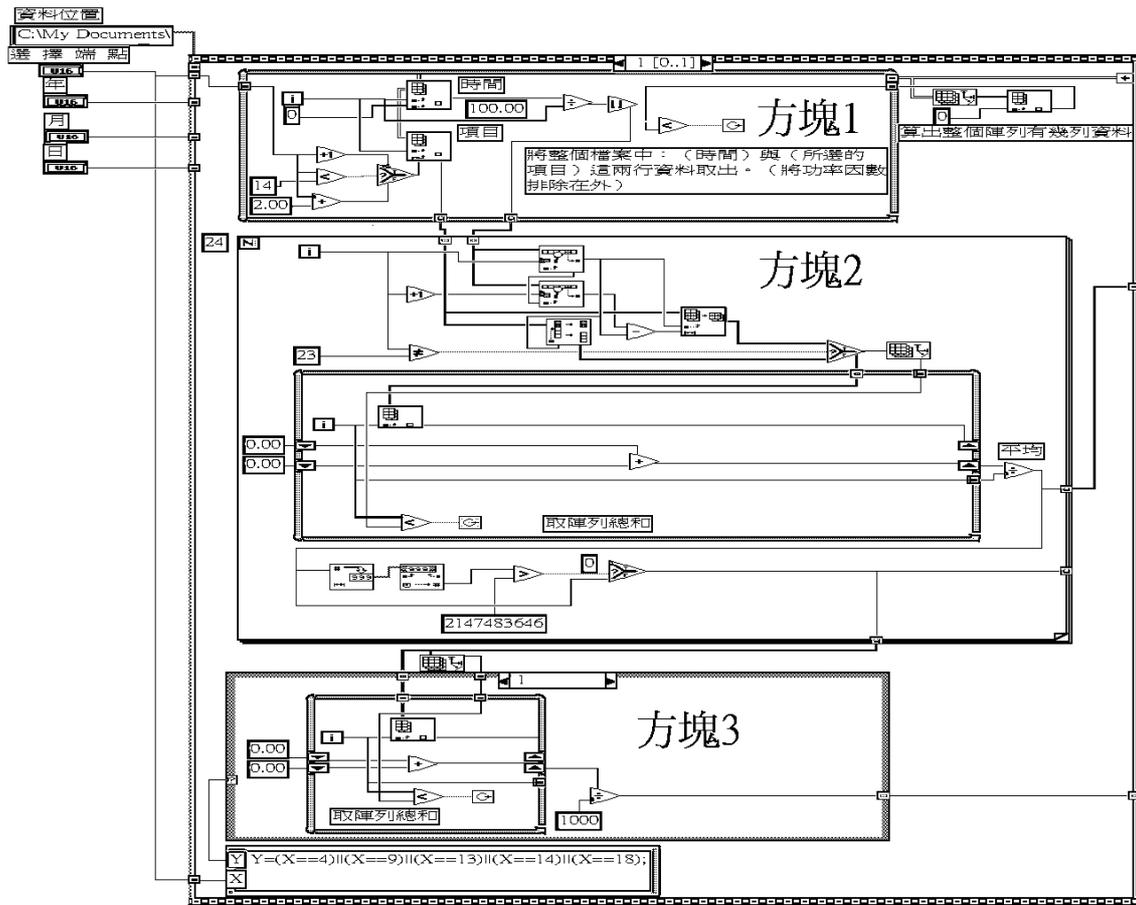
(四)、監控系統執行結果

本監控系統共分為主畫面、動態曲線及歷史曲線三個畫面。茲將各畫面說明如下：

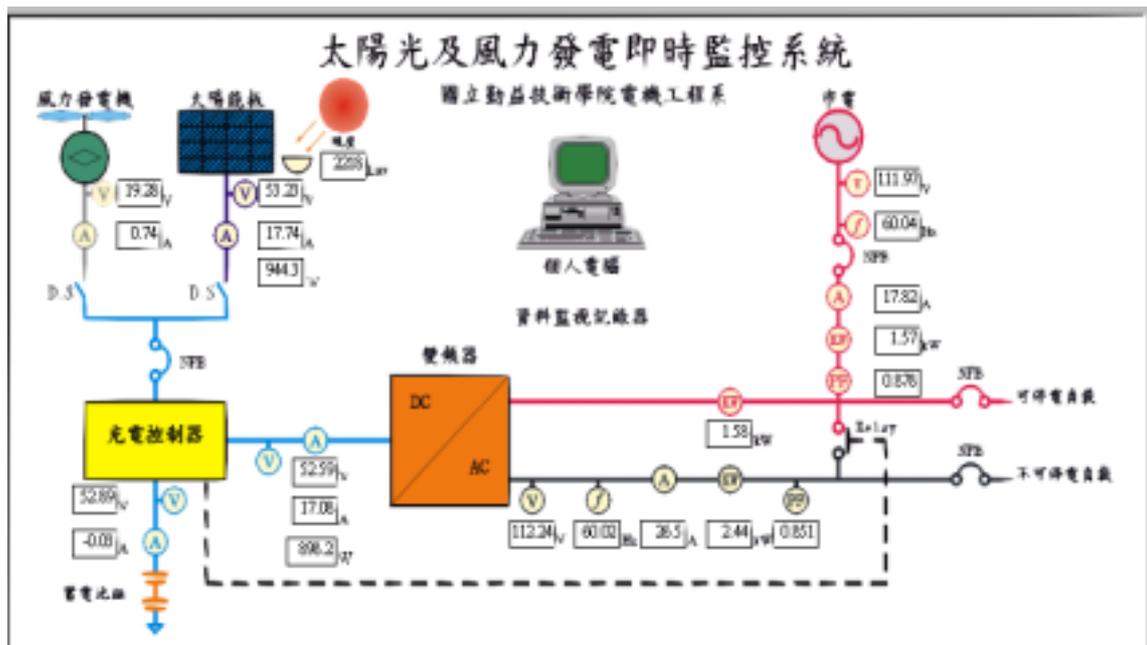
- 1、主畫面：圖十二為本系統之即時監控畫面，可讓使用者能夠了解目前太陽光電發電系統整體運作的即時情形，並每隔2秒更新一次畫面的數值，而每個數值都是取5筆資料的平均值，以避免雜訊之干擾而顯示錯誤的值。
- 2、動態曲線：將每一次所擷取的資料繪製成動態的曲線顯示出來，以便於當系統有問題時可以用來除錯，圖十三所示即為以太陽能板產生的功率為例之動態曲線圖。
- 3、歷史曲線：記錄系統於過去某段時間發電情形，以供系統維修及擴增之參考。如圖十四所示即為90年8月23日，以太陽光電發電系統發電量為例之歷史曲線圖。
- 4、列印：將主畫面、動態曲線及歷史曲線三個畫面以圖檔方式列印出來。

五、結論

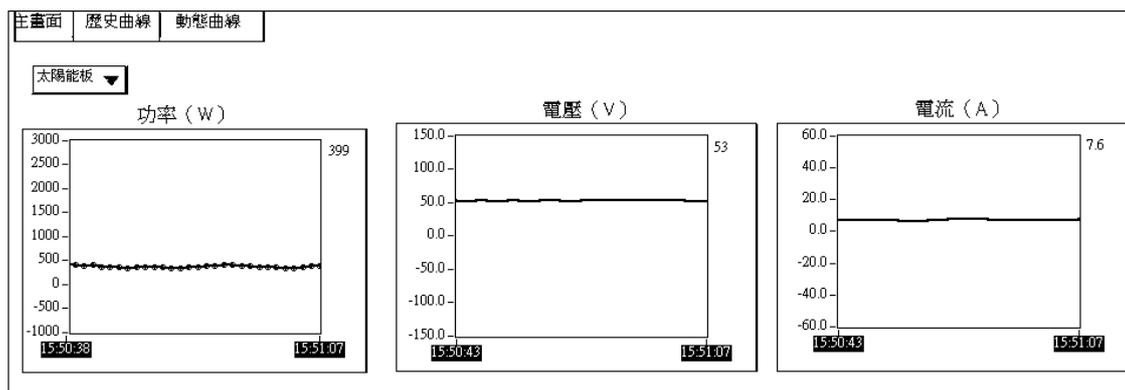
本文研製了一有完善保護功能且可與台電並聯供電之3kW太陽光電發電系統。由實測結果證實其符合一般民生用電需求。同時為瞭解本系統之發電情形，在該系統裝設了多組感測器，將其太陽能模板之直流電壓、電流、發電功率、負載功率、功率因數及日照量等轉換成類比電流信號或電壓信號，再透過資料擷取卡，使用LabVIEW圖控軟體及個人電腦組成監控系統，成功地將該系統各電量資料即時顯示並儲存，以供日後擴增及估算發電成本之用。有了單相太陽光電發電系統研製之經驗，未來將朝多模組並聯供電及發展三相太陽光電發電系統進行研究。



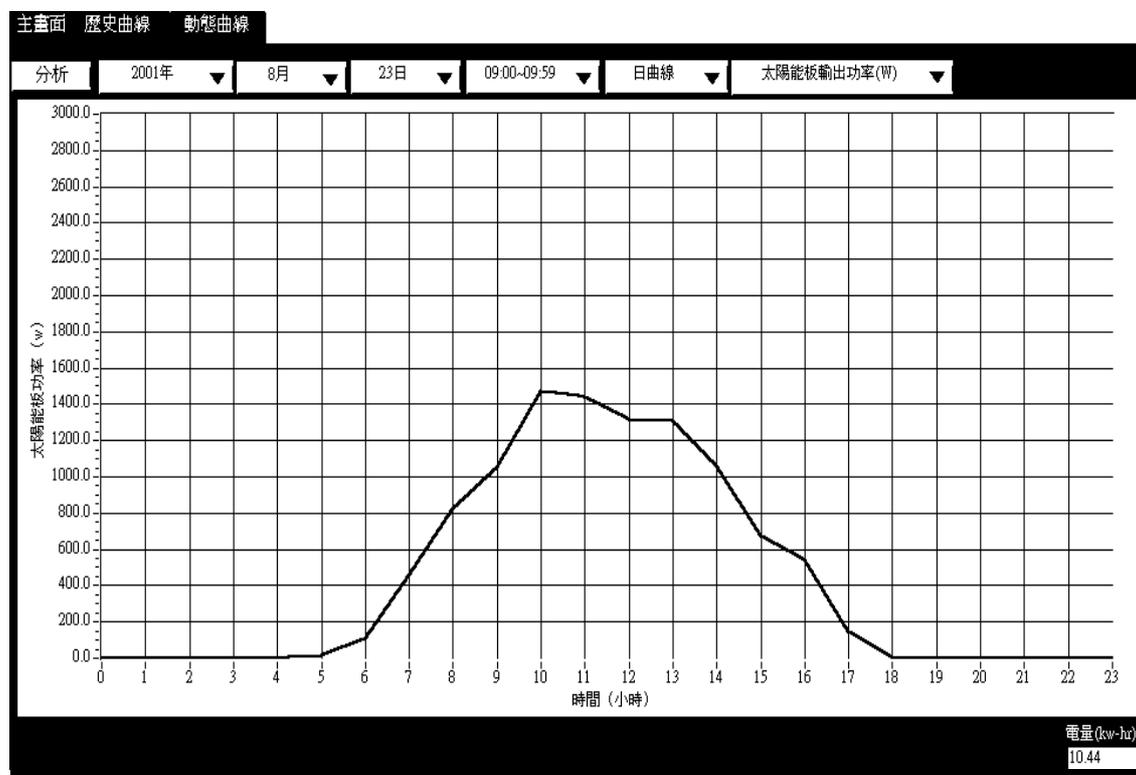
圖十一 歷史曲線繪製之LabVIEW程式方塊。



圖十二 太陽光電發電即時監控系統主面畫。



圖十三 太陽能板產生功率之動態曲線圖。



圖十四 太陽能板輸出功率日曲線圖。

六、誌謝

本文承蒙經濟部能源委員會提供研究經費補助，使本研究得以順利完成，謹此誌謝。

七、參考文獻

- [1] 黃秉鈞, "我國太陽光電發展前景", 太陽能學刊, 民國85年。
- [2] 郭禮青, "我國太陽光電推廣與應用", 八十九年經濟部節約能源技術成果發表會暨能源技術研發成果研討會, 第49-68頁, 民國89年12月。

- [3] M. Nagao, and H. Horikawa, "Photovoltaic System Using Buck-Boost PWM Power Inverter", Electrical Engineering in Japan, Vol.115, No.5, pp.128-139, 1995.
- [4] P. K. Hinga, T. Ohnishi, and F. Mezzetti, "A New PWM Inverter for Photovoltaic Generator System", IEEE PESC'94 Record, 1994.
- [5] K. Hirachi, and T. Mii. T. Nakashiba, "Utility-Interactive Multi-Functional Bidirectional Converter for Solar Photovoltaic Power Conditioner with Storage Batteries", IEEE PESC'96, Record, 1996.
- [6] I. Abouzahr, and R. Ramakumar, "An Approach to Assess the performance of Utility-Interactive Photovoltaic Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.8, No.2, pp.144-149, 1993.
- [7] Siri, T. F. Wu, and C. Q. Lee, "Maximum Power Tracking in Parallel Connected Converter Systems", IEEE PESC'93, Record, 1993.
- [8] S. Robert, "Solar Electricity", Prentice Hall, Inc., 1991.
- [9] Z. Salameh and D.Taylor, "Step-up Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays", Solar Energy, Vol.44, No.1, 1990, PP.57-60.
- [10] I. H. Altas, and A. M. Sharaf, "A Novel On-Line MPP Search Algorithm for PV Arrays", IEEE Trans.on Energy Conversion, Vol.11, No.4, 1996, PR748-754.
- [11] 蕭子健、儲昭偉、王智昱著, "LabVIEW進階篇", 高立圖書, 第12-1頁~14~37頁。
- [12] <http://www.advantech.com.tw/products/LabVIEW%20Driver.asp>.