

實功率及虛功率可遠程調度之併網型光伏發電系統研發

李象

正修科技大學 電機工程系

摘要

本研究研發一實功率及虛功率可遠程調度之併網型光伏發電系統，此系統被賦予最大功率點、指定實功率及指定虛功率之遠程調度能力。透過智慧型手機 App 程式的設計以及變流器輸出電流的控制，調度人員可對併網型光伏發電系統進行遠端的電力調度，由此因應系統電力的供需平衡。電力調度員發送之指令是以智慧型手機採無線通訊網路方式來傳遞。研究過程中藉由感測電池短路電流的量測，以及運用太陽能板產生最大功率下之電流與其短路電流為線性關係來決定最大功率點電流，之後，透過變流器調控注入市電電流的振幅，促使太陽能板於增載與減載過程中逐漸地趨近於最大功率點下來工作。另外，透過變流器調控注入市電系統的有效電流與無效電流，藉此進行注入市電實功率與虛功率的調控作業。建立一實驗性的小型併網型光伏發電系統來進行驗證，經由實測，調度結果中顯示所欲指定實功率/指定虛功率與實際注入市電的實功率/虛功率之間的絕對誤差在 5% 內、PV 發電系統的最大功率點調度運作功能正常發揮，以及透過手機 App 程式設計進行無線通訊傳輸與控制，確實能完成最大功率點、指定實功率及指定虛功率的遠程調度工作。所研發的實功率與虛功率可遠程調度的併網型光伏發電系統，其控制方法簡單，易實現，具創新設計概念。

關鍵詞：遠程調度、光伏發電系統、實功率與虛功率、變流器、智慧型手機、無線通訊網路

Development of a Grid-Connected PV Generation System with the Capability to remotely dispatch Active Power and Reactive Power

Shun Lee

Department of Electrical Engineering
Cheng Shiu University

Abstract

This research develops a grid-connected photovoltaic (PV) generation system with active power and reactive power that can be remotely dispatched. The PV generation system will be dispatched and can operate at the maximum power point (MPP) or at a specified active power and operate at an assigned



reactive power. Through the design of smart phone Apps and the control of the output current of the inverter, the dispatcher remotely dispatches a grid-connected PV generation system that can be desired in response to the balance of power supply and demand in the system. The instructions sent by the power dispatcher are transmitted by the smart phone using the wireless communication network. In the research process, the maximum power point (MPP) current was determined by measuring the short-circuit current of the sensing cell and applying the linear relationship between the MPP current and the short-circuit current of the solar panel. After that, the amplitude of the injected current into power system is adjusted through the inverter, and then the operation of the solar panel will be gradually brought closer to the maximum power point during the load-increasing and load-shedding process. In addition, the effective current and the ineffective current injected into the power system will be also controlled through the inverter, so as to carry out the dispatching operation for injecting the active power and the reactive power into the utility power system. An experimental small-scale grid-connected PV generation system is established for verification. Through the actual measurement, the dispatching result shows that the absolute error between the desired specified active power/assigned reactive power and the active power/reactive power injected into the utility power system is within 5%, the MPP dispatching operation of the PV power generation system can also function normally, and taking the wireless communication network to transmit and to control through the smartphone Apps designs can indeed complete the remote dispatching work of the maximum power point, the specified active power and the assigned reactive power. The control of the developed grid-connected PV generation system with the capability to remotely dispatch active power and reactive power is simple and easy to implement, and possesses an innovative design concept.

Keywords: Remote dispatch, PV generation systems, Active power and reactive power, Inverters, Smartphone, Wireless communication networks.

一. 前言

為實現非核家園的早日到來以及管制我國排碳總量以符合京都議定書及巴黎氣候協定，現今政府大力推廣再生能源應用，其中尤其鼓勵民間投入太陽光電發電廠的設置。另一方面，台灣位於亞熱帶鄰近赤道，日照量豐富，擁有充分的陽光，適合發展太陽能發電。

我國電力系統未來隨著太陽光電裝置逐年加入，當裝置容量提升，將開始造成每日淨負載(淨負載=用電需求量-太陽光電發電量)曲線有兩段劇烈起伏，分別為上午太陽光電出力上升及傍晚太陽光電出力下降，這種現象稱為「鴨子曲線」[1-2]。為避免上、下午太陽光電出力急遽變化造成淨負載的突降及突升，預期電力調度中心須快速地調度快速反應機組補足負載缺口，以防止系統電力供需產生擾動太大，造成系統頻率漂移過大，引發系統穩定運轉危機。當系統供給能力(實功率)大於用電需求量(實功率)，電力系統會因快速反應的發電機機組不足或是其反應不及(太慢)，造成系統內的交流同步發電機超速，引發系統頻率高於額定頻率，反之系統供給實功率能力小於用電需求量，系統亦會因快速反應機組不足或是反應太慢，造成系統內的同步發電機減速，引發系統頻率低於額定頻率，這些頻率過度的擾動現象是會引發系統穩定運轉的危機。由上述觀之，我國電力系統若沒有未雨綢繆的加以因應，電力系統的短時間可快速電力調度能力未來將會逐漸



進入困窘之境，屆時將引發系統穩定運轉危機。

此外，電力系統的區域電壓亦會隨區域無效電力需求而變動。當區域系統無效電力不足時，區域電壓會下降，反之，無效電力過多則造成區域電壓上升。過去電力公司為穩定區域電壓，往往會加裝實體的虛功補償器來因應，這些補償器一般是由被動性電感及電容等組件建構而成，其體積大較佔空間，需額外的設置成本，且虛功補償量往往不是過大就是不足，無法做到較精確的補償。

為因應太陽光電發電系統快速建置下所引發系統頻率漂移問題及其所導致系統穩定運轉的危機，電力公司被預期可能會建置短時/快速反應的水、火力備轉機組，以及會安裝實體的電感性及電容性之虛功補償器以因應區域電壓的變動，然而在生態與環境保護前提下，在臺灣可供開發為水力電廠(備轉機組)地點已不多，而可快速反應之火力備轉機組的建置又有違反京都議定書及巴黎氣候協定對排碳量的管制，而安裝實體的電感及電容性之虛功補償器，其體積大又較佔空間，且需額外的設置成本，因此，考慮研發具最大功率點及實功率與虛功率調度操作能力之光伏發電系統是有其必要性及重要性。最大功率點調度操作功能可使光伏發電系統裝置用戶產生最大的發電效益，實功率調度操作功能可因應系統實功率需求的變動以穩定系統頻率及維持運轉安全，而虛功率調度操作功能可因應系統虛功率需求的變動以穩定系統的運轉電壓。

在太陽光電能應用技術中，須追蹤太陽能電池模組的最大功率點[3-6]，提升太陽能發電的整體效率。太陽能電池的輸出電流和輸出電壓關係呈現非線性特性，因此利用不同的控制法則，在多變的大氣環境下來對太陽能電池作最大功率追蹤，並將太陽能電池所得到的能量透過併網型變流器(Inverter)將電能轉換為相對日照量之注入正弦電流至電網，來達到與市電併網的太陽光電發電系統已被廣泛研究。Mohammad A.S. Masoum 等人[7] 曾運用太陽能板產生最大功率下之電流與其短路電流為線性關係來執行最大功率點追蹤，該文獻利用升壓及/或降壓轉換器(Boost/Buck Converter)調節太陽能板輸出功率至電阻負載或直流馬達負載，直至 PV 板產生最大功率，雖然此法證實有效，但為取得 PV 板的短路電流，有一並聯開關(shunt switch)被置於太陽能板與升壓及/或降壓轉換器之間以便進行太陽能板短路電流的取樣，當開關動作則太陽能板短路且進行取樣短路電流，但同一時間太陽能板與負載之間會發生短暫中斷供電，致使太陽能光電系統有不連續運轉疑慮。其他太陽能最大功率點追蹤法，目前被採用較多者為擾動與觀察法 [8-10]、增量電導法 [11-12]，而三點權位法[13]亦有被採用。

過去發展太陽光電發電系統，大多數研究者僅著重於最大功率點追蹤的議題，其他搭配的相關議題則較少著墨。近年來，於併網型太陽光電發電系統導入虛功補償及電力品質等議題亦陸續被提出。文獻[14]藉由修正式的增量電導法及虛功補償方式同時完成最大功率點追蹤、相位同步化及諧波降低之功能。A. Cagnano 等作者[15-16]亦以虛功補償方式，藉由最佳化過程最小化系統損失。透過變流器進行虛功控制以降低電流諧波及電磁干擾也出現於文獻[17]中。R. A. Mastromauro 等作者[18]透過反覆式的控制器促使 PV 系統得以支撐併網系統電壓及補償諧波失真，以及藉由修正式的增量電導法控制變流器輸出電壓之相位，調控 PV 系統輸出功率達最大功率點。文獻[19]作者提出控制注入系統虛功方式以減輕系統故障時的電壓驟降。藉由虛功率的最佳化控制用以改善系統操作的穩定度與可靠度亦於文獻[20]中提出。文獻[21]作者也透過分散式最佳調度的控制概念，調節 PV Inverter 輸出的實功率與虛功率來獲取好的系統特性。另外，透過 PV 系統變流器的虛功率調節亦可獲致最小化系統損失亦於文獻[22]中出現。綜合前述文獻觀察得



知，於併網型太陽光電發電系統中導入虛功補償功能，可在不用太增加系統硬體設施下卻可獲得支撐併網系統電壓、改善電力品質及系統特性等額外的正面效益。

目前國內在太陽光電發電的實用系統中大多數仍僅著重於控制最大功率的產出且 PV 發電廠彼此間各自運作，對於可能出現的系統頻率漂移問題及其所導致系統穩定運轉危機並未賦予應有的因應機制；除此之外，PV 實用系統甚少對可產出的無效功率進行調控運用，因此存在改善空間。作者曾於 2018 年發表”透過無線通訊網路實現併網型光伏發電系統之實功率調度”之文 [23]，該文所述及之實功率調度可因應系統電力供需遽然大幅擾動，進而有穩定系統頻率能力。現今，作者將於本次研究中研發一套可由調度人員進行實功率及虛功率可遠程調度之光伏發電系統，此種可於行動過程中遠程調度之光伏發電系統具最大功率點(MPP)及實功率(P)與虛功率(Q)調控能力。文中將藉助無線通訊網路的技術，提供電力調度人員與 PV 發電系統間溝通的橋樑，讓太陽光電發電系統裝置用戶選擇最大功率點調度操作獲得最大的發電效益，或選擇於系統電力(實功率)供需劇烈變動時進行 PV Inverter 的調控，適時調節 PV Inverter 輸出的實功率，儘速再平衡系統電力供需，進而抑制系統頻率漂移及穩定系統運轉安全，亦或選擇虛功率調度功能進行 PV Inverter 虛功率的調控，由此穩定系統電壓、改善電力品質及系統特性等。

二. 併網型光伏發電系統架構

所研發的實功率及虛功率可遠程調度之併網型光伏發電系統示意圖如圖 1，它包括用戶自設的太陽能板(PV)、感測電池(SC)、直流-交流轉換器(變流器 Inverter)及其控制系統(Control system)、濾波電感 L 與併網的市電電源 v_s 。所持之研究方法是於光伏(PV)發電系統(亦稱太陽光電發電系統)設置可最大功率點(Maximum Power Point 簡稱 MPP)及可指定實功率(Active Power Assigned 簡稱 Pa)及可指定虛功率(Reactive Power Assigned 簡稱 Qa)運作功能於控制系統中，讓電力調度人員(Dispatcher)進行現場或遠程的電力調度作業。這些電力調度功能是透過光伏發電系統的電力調度員之 MPP/Pa&Qa 指令的下達且以無線的通訊網路方式傳遞至太陽光電發電系統裝置用戶端來對 Inverter 進行控制予以實現。採無線的通訊網路方式進行實功率及虛功率的遠程調度，可避免 PV 發電系統在設置地點與空間上之限制，以及有利於 PV 發電系統現場朝向無人化作業來發展，這些是可降低整體 PV 發電系統往後的營運成本。所研發之併網型光伏發電系統可依據系統的實際需求由電力調度員隨時、隨地、機動又便利地對 PV 發電系統於廠內(現場)或外(遠端)進行實功率及虛功率之行動調度。

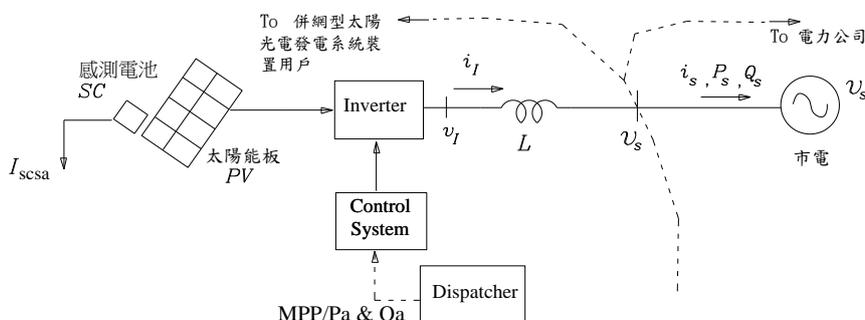
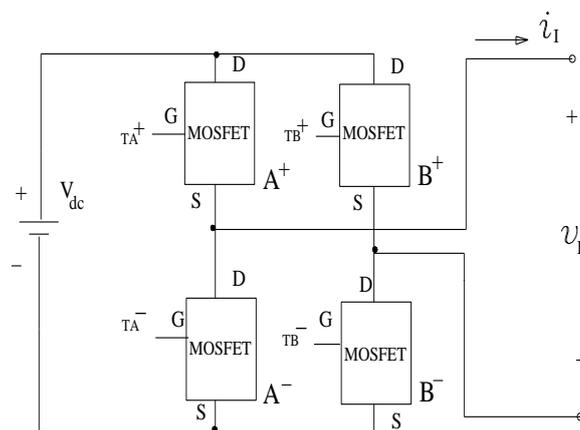


圖 1 實功率及虛功率可遠程調度之光伏發電系統示意圖

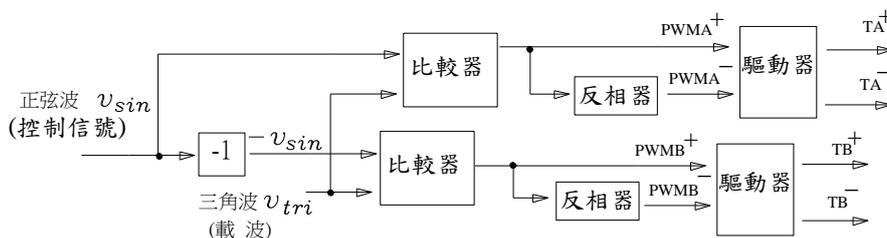


三. 變流器及其控制

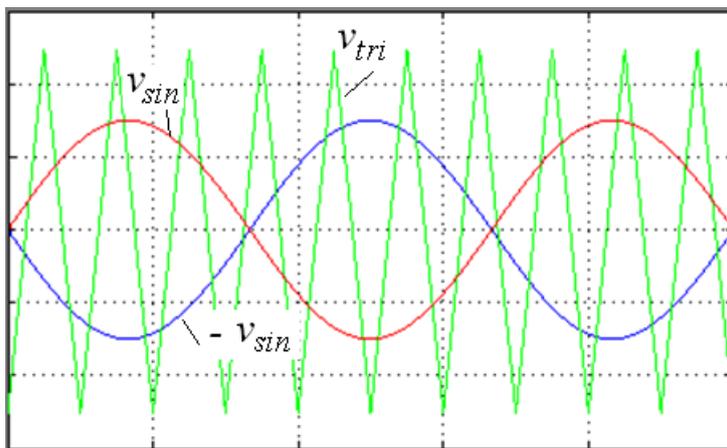
變流器及其控制方式如圖 2，其中變流器採單極式 PWM 切換(Unipolar PWM Switching)方式，正弦波之控制信號 v_{con} (為 v_{sin} 及 $-v_{sin}$)與三角波之載波(v_{tri})信號經比較器及反相器後產生互補式脈寬調變(PWM)信號 $PWMA^+$ 、 $PWMA^-$ 、 $PWMB^+$ 、 $PWMB^-$ ，這些信號經驅動器放大後用以驅動電子式功率開關 A^+ 、 A^- 、 B^+ 、 B^- ，控制變流器的輸出。變流器實際的輸入電壓 V_{dc} 將由太陽能(光電)板提供，其輸出電壓 v_l 則會透過濾波電感 L 與市電電源 v_s 併網。



變流器主電路



變流器控制方塊圖



正弦波控制信號 v_{con} (為 v_{sin} 及 $-v_{sin}$)與三角波之載波 v_{tri} 信號

圖 2 變流器及其控制方式



變流器模型

$$L \frac{di_1}{dt} = \frac{v_{con}}{v_{tm}} V_{dc} - v_s = K_{PWM} v_{con} - v_s$$

變流器電壓增益

$$K_{PWM} = \frac{V_{dc}}{v_{tm}}$$

其中 v_{tm} 為載波信號之最大值。

四. 最大功率點(MPP)工作模式

太陽能光電版(簡稱太陽能板)之 P-I 曲線如圖 3，圖中產生最大功率 P_{mp} 的電流為 I_{mp} ，而短路電流為 I_{sc} 。一般要控制太陽能板在最大功率點工作，可經由偵測太陽能板工作電流是處於 I_{mp} 左右兩側的那一邊來下達決策。當太陽能板工作於 I_{mp} 左側方，代表它仍有餘力，故應作增載反應；反之，工作於 I_{mp} 右側方，代表太陽能板已過度承擔負載，故應作減載反應；而當工作於 I_{mp} ，則代表太陽能板產生最大的功率輸出。

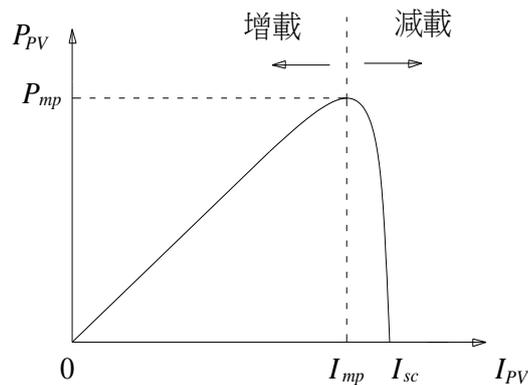


圖3 太陽能板之P-I曲線

本研究依據太陽能板產生最大功率下之電流與其短路電流具線性關係[7]，但以另一種感測太陽能板短路電流的方式來獲取太陽能板產生最大功率下之電流[24]，其方法是利用一感測電池 (Sensing cell 簡稱 SC) 安裝於太陽能板 PV 的同一平面，如此能讓太陽能板 PV 與感測電池 SC 處於相同的週遭環境(相同日照與大氣溫度)；此外感測電池是選用構成太陽能板(模組)的基本單元(即太陽電池晶片)，因此具有同太陽能板的各項電氣參數，使得藉由感測電池短路電流 (I_{scs}) 的量測，可換算為太陽能板 PV 的短路電流 (I_{sc})，進而可取得太陽能板 PV 產生最大功率下之電流 I_{mp} 。有關取得太陽能板在任意工作條件下之最大功率點電流 I_{mpa} 方式，其流程如圖 4 [24]，其中， M_1 為太陽能板或感測電池的電流因數， I_{mpt} 、 I_{sct} 為太陽能板在標準工作條件下 (AM 1.5, 1000W/m², 25 °C) 之最大功率點電流與短路電流，而 I_{scst} 則為感測電池在標準工作條件下之短路電流，它們都是已知參數(出廠時廠商會提供)，另外，感測電池在任意工作條件下之短路電流 I_{scsa} 可由現場量測感測電池來取得，至於任意工作條件下太陽能板的短路電流 I_{sca} 是可藉由量測感測電池的短路電流 I_{scsa} 及已知的參數 I_{sct} 、 I_{scst} 來換算取得。



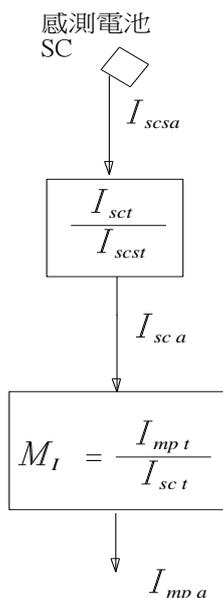


圖 4 取得太陽能板 PV 最大功率點電流 I_{mpa} 之流程圖

既然 I_{mpa} 可透過圖 4 取得，那麼只要將太陽能板 PV 控制於此電流值下工作，即可取得此一工作條件下的太陽能板最大功率輸出。

最大功率點(MPP)工作模式的下達，本研究是透過 PV 發電系統的電力調度員之 MPP/Pa&Qa 指令以無線的通訊網路傳遞方式來進行，因此太陽光電發電系統裝置用戶就可經由變流器 Inverter 的調控，獲得最大功率的輸出，取得最大的發電效益。

五. 指定實功率與指定虛功率工作模式

假若市電電壓源 $v_s(t)$ 及注入市電電流 $i_s(t)$ 分別為

$$v_s(t) = V_s \sin \omega t$$

$$i_s(t) = I_s \sin(\omega t + \theta_s)$$

在不考慮變流器輸出電流 i_l 的諧波前提下，由圖 1 知悉變流器的輸出電流 $i_l(t)$ 等於注入市電電流 $i_s(t)$ ，即 $i_l(t) = I_l \sin(\omega t + \theta_l) = i_s(t)$ ，

若將 $i_l(t)$ 乘以 $2 \sin \omega t$ 得

$$i_l * (2 \sin \omega t) = I_l \sin(\omega t + \theta_l) * 2 \sin \omega t$$

$$= I_l [\cos(\omega t + \theta_l - \omega t) - \cos(\omega t + \theta_l + \omega t)]$$

$$= I_l \cos \theta_l - I_l \cos(2\omega t + \theta_l)$$

此式的平均值即為變流器輸出電流 i_l 的有效電流量，即

$$\text{Re}(i_l) = \text{Avg}[i_l * (2 \sin \omega t)] = I_l \cos \theta_l \quad \text{----- (1)}$$



若將 $i_l(t)$ 乘以 $2 \cos \omega t$ 得

$$\begin{aligned} i_l * (2 \cos \omega t) &= I_l \sin(\omega t + \theta_l) * 2 \cos \omega t \\ &= I_l [\sin(\omega t + \theta_l + \omega t) + \sin(\omega t + \theta_l - \omega t)] \\ &= I_l \sin \theta_l + I_l \sin(2\omega t + \theta_l) \end{aligned}$$

此式的平均值即為變流器輸出電流 i_l 的無效電流量，即

$$\text{Im}(i_l) = \text{Avg}[i_l * (2 \cos \omega t)] = I_l \sin \theta_l \quad \text{----- (2)}$$

注入市電的實功率 P_s 與虛功率 Q_s 分別為

$$P_s = (1/2) * V_s * \text{Re}(i_s) = (1/2) * V_s * \text{Re}(i_l) \quad \text{----- (3)}$$

$$Q_s = (1/2) * V_s * \text{Im}(i_s) = (1/2) * V_s * \text{Im}(i_l) \quad \text{----- (4)}$$

由於併網的市電電壓 V_s 為已知，故所要指定(調度)注入市電的實功率與虛功率值，由式(3)及(4)知悉，可分別透過變流器輸出電流 i_l 的有效電流量 $\text{Re}(i_l)$ 與無效電流量 $\text{Im}(i_l)$ 的調控方式來達成。實功率的電力指定(調度)量(Pa)由式(1)及式(3)知悉可由變流器輸出電流 i_l 的大小 I_l 或與相角 θ_l 的調控予以達成，本研究採大小 I_l 控制方式來進行實功率調控。虛功率的電力指定(調度)量(Qa)由式(2)及式(4)知悉亦可由變流器輸出電流 i_l 的大小 I_l 或與相角 θ_l 的調控予以達成，本研究採相角 θ_l 控制方式來進行虛功率調控。

由式(2)可知相角 θ_l 為正($0^\circ \leq \theta_l \leq 90^\circ$)時，則對應的無效電流量為正值，反之($-90^\circ \leq \theta_l \leq 0^\circ$)則為負值。圖 5 提供變流器輸出電流 $i_l(t) = I_l \sin(\omega t + \theta_l)$ 與其有效成份 $\text{Re}(i_l)$ 、無效成份 $\text{Im}(i_l)$ 以及市電電壓 $v_s(t)$ 之間的相量關係圖，其中相角 θ_l 為正代表電流 i_l 超前電壓 v_s ，反之為負則代表電流 i_l 落後電壓 v_s 。

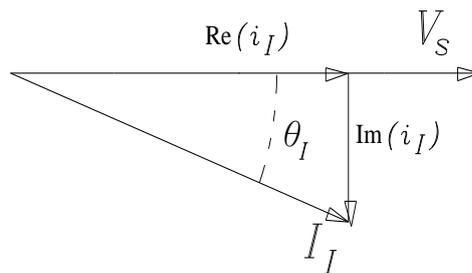


圖 5 變流器輸出電流 i_l 、 $\text{Re}(i_l)$ 、 $\text{Im}(i_l)$ 與市電電壓 $v_s(t)$ 之間的相量關係圖

指定實功率 Pa 與指定虛功率 Qa 工作模式的下達，本研究是透過 PV 發電系統的電力調度員之 MPP/Pa&Qa 指令以無線的通訊網路傳遞方式來進行，因此太陽光電發電系統裝置用戶就可經由變流器 Inverter 的調控，獲得所需的實(有效)功率與虛(無效)功率調度量，進而用以協助穩定系統頻率與運轉安全以及用以改善系統的電力品質與系統特性等。

六. 實功率與虛功率操作之控制架構

圖 6 為光伏(PV)發電系統之實功率與虛功率操作之控制架構。圖中，實功率控制方塊



P_Control 內包含最大功率點(MPP)及指定實功率 P_a 的兩種工作模式，它決定變流器輸出電流參考值 i_I^* 的大小 I_I^* 用以調控注入市電系統的實功率量，而虛功率控制方塊 Q_Control 則提供變流器輸出電流參考值 i_I^* 的相角 θ_I^* ，此相角 θ_I^* 控制相移器(Phase shifter)的移位角度用以調控注入市電系統的虛功率量。相移器的輸入信號為一 $\sin \omega t$ 波形，它是市電電壓 v_s 經正弦波產生器(sine wave generator)後所產生，它與市電電壓 v_s 同相位。相移器隨後輸出一已經相位(相角)移動的正弦波 $\sin(\omega t + \theta_I^*)$ 信號，此相移的正弦波與 I_I^* 相乘，獲得變流器輸出電流的參考信號 $i_I^* = I_I^* \sin(\omega t + \theta_I^*)$ 。電流參考值 i_I^* 與迴授的變流器輸出電流 i_I 比較，經電流控制器 $G(s)$ ，產生正弦脈寬調變(SPWM)電路所需控制信號 v_{con} 的迴授量 $v_{con,fb}$ 部分，另一順向量部份 $v_{con,ff}$ 則由 v_s 經 $1/K_{PWM}$ 方塊提供。 K_{PWM} 為變流器(Inverter)的電壓增益。控制電壓 v_{con} 與三角波 v_{tri} 經 SPWM 電路產生驅動變流器之觸發信號，此信號觸發變流器內部電子式功率開關，促使太陽能板輸出最大功率或變流器輸出指定的實功率與指定的虛功率量進入市電系統中以因應電力系統之電力需求，改善系統的電力品質或特性與穩定系統的運轉安全等。

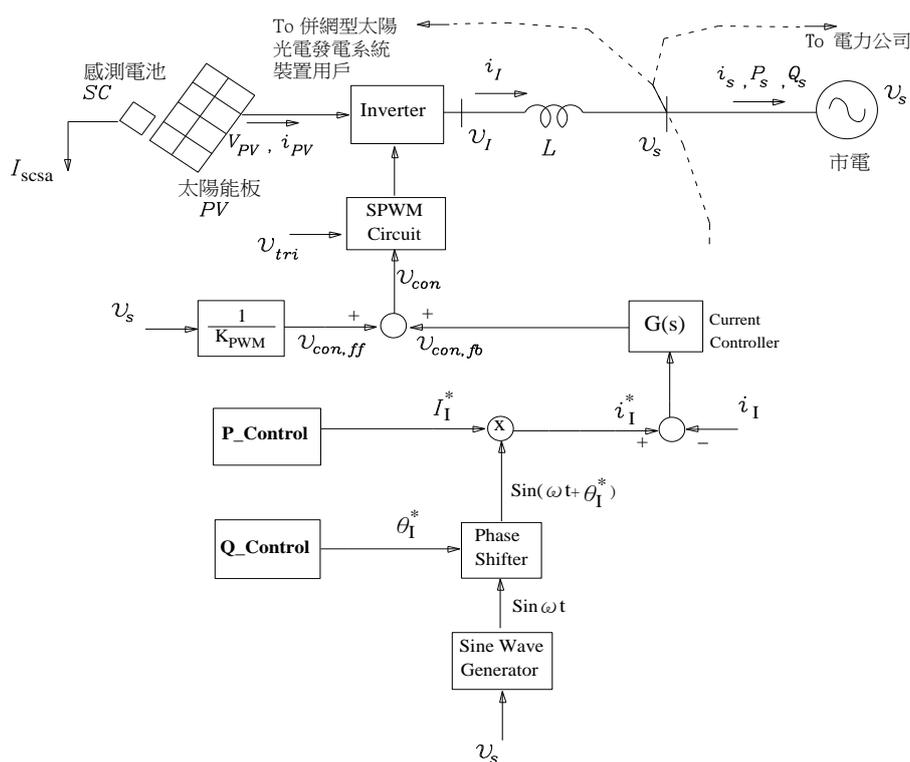


圖 6 實功率與虛功率操作之控制架構

圖 6 中之 P_Control 控制方塊內部的控制流程如圖 7。圖 7 中，透過 MPP_Control 控制方塊可進行最大功率點控制操作，或利用 P_Assigned Control 控制方塊來進行指定實功率控制操作。圖 7 中的 MPP_Control 控制方塊，它利用圖 4 所決定出任意工作條件下的太陽能板最大功率點電流 I_{mpa} 與實測工作中的太陽能板電流 I_{PV} 做比較，其產生的誤差電流為 I_e ，當 I_e 為正，代表太陽能板工作於 P-I 曲線圖最大功率點的左側方，這表示 PV 板仍有餘力可做增載



反應，因此變流器輸出電流參考信號 i_l^* 進行增幅(電流大小 I_l^* 增加)操作；反之 I_e 為負，代表太陽能板工作於 P-I 曲線圖最大功率點的右側方，這表示太陽能板已過度承擔負載，它應做減載反應，故 i_l^* 進行減幅(電流大小 I_l^* 減少)操作。 I_e 為零則代表到達最大功率點， I_l^* 維持原大小值。誤差電流 I_e 經增/減載(調幅)增益方塊 K_1 (為一正值量且控制太陽能板的增/減載幅度) 之後產生 i_l^* 對應的調幅量 ΔI_l ，之後與變流器輸出電流 i_l 的大小 I_l 相加後，產生變流器輸出電流參考信號 i_l^* 之大小 I_l^* 。圖 7 中的 P_Assigned Control 控制方塊，它將所欲注入市電電流 i_s 的有效電流 $\text{Re}(i_{sd})$ 與變流器輸出電流 i_l 的有效電流 $\text{Re}(i_l)$ 做比較，產生的誤差量經調幅增益方塊 K_2 之後產生 i_l^* 對應的調幅量 ΔI_l ，假若 ΔI_l 為正，代表當時變流器提供的有效電流 $\text{Re}(i_l)$ 不足以補償欲注入市電電流 i_s 的有效電流量 $\text{Re}(i_{sd})$ ，因此將此 ΔI_l 加上當時的變流器輸出電流 i_l 之大小 I_l ，變流器產生新的輸出電流 i_l 之參考大小 I_l^* ，之後由(1)式得知可獲得正增量的有效電流 $\text{Re}(i_l)$ 反應，反之 ΔI_l 為負則代表變流器提供負增量的有效電流 $\text{Re}(i_l)$ 反應，因此變流器所提供的正、負增量的有效電流 $\text{Re}(i_l)$ 反應，將可用以補償欲注入市電電流 i_s 的有效電流 $\text{Re}(i_{sd})$ ，滿足所欲注入市電的實功率調度量。所欲注入市電電流 i_s 的有效電流 $\text{Re}(i_{sd})$ 可由所欲調度的實(有效)功率之值來換算取得。圖 7 中，可藉由 MPP/Pa Selector 來選擇最大功率點(MPP)或指定實功率(Pa)其中之一者來進行實功率操作。

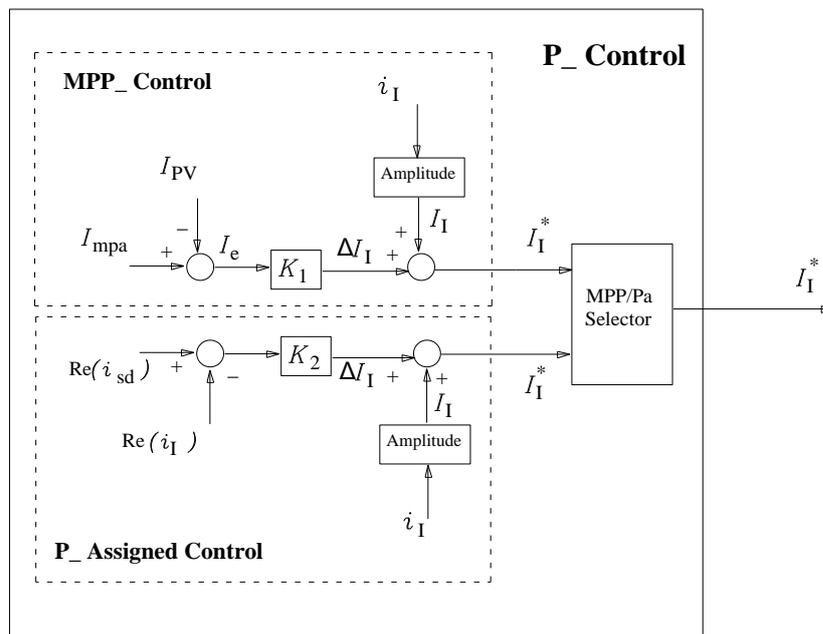


圖 7 P_Control 控制方塊內部之控制流程

圖 6 中之 Q_Control 控制方塊內部之控制流程如圖 8。圖 8 中將所欲注入市電電流 i_s 的無效電流 $\text{Im}(i_{sd})$ 與變流器輸出電流 i_l 的無效電流 $\text{Im}(i_l)$ 做比較，產生的誤差量經調相增益方塊 K_3 之後產生 i_l^* 對應的調相量 $\Delta \theta_l$ ，假若 $\Delta \theta_l$ 為正，代表當時變流器提供的無效電流不足以補償欲注入市電電流 i_s 的無效電流量 $\text{Im}(i_{sd})$ ，因此將此 $\Delta \theta_l$ 加上當時的 θ_l ，變流器產生新的輸出電流 i_l 之參考相位 θ_l^* ，之後由(2)式得知可獲得正增量的無效電流 $\text{Im}(i_l)$ 反應，



反之 $\Delta\theta_I$ 為負則代表變流器提供負增量的無效電流 $\text{Im}(i_I)$ 反應，因此變流器所提供的正、負增量的無效電流 $\text{Im}(i_I)$ 反應，將可用以補償欲注入市電電流 i_s 的無效電流 $\text{Im}(i_{sd})$ ，滿足所欲注入市電的虛功率調度量。變流器輸出電流 i_I 的相角(或相位) θ_I 與其調相量 $\Delta\theta_I$ 相加後，產生變流器輸出電流參考信號 i_I^* 的參考相角 θ_I^* ，此相角 θ_I^* 控制相移器(Phase shifter)的移位角度。所欲注入市電電流 i_s 的無效電流 $\text{Im}(i_{sd})$ 可由所欲調度的虛(無效)功率之值來換算取得。

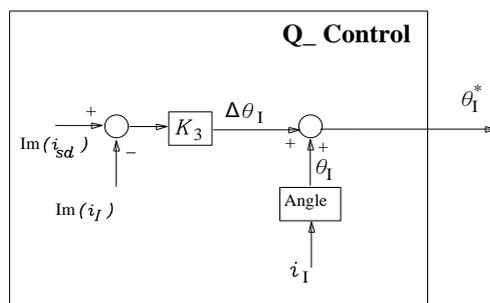


圖 8 Q_Control 控制方塊內部之控制流程

取得變流器輸出電流 i_I 的有效電流量 $\text{Re}(i_I)$ 及無效電流量 $\text{Im}(i_I)$ 的實現流程如圖 9 及圖 10。這些實現流程圖中所需要的弦波函數 $\sin\omega t$ 與 $\cos\omega t$ ，可利用市電電壓 v_s 分別經正弦波及餘弦波產生器給予提供。圖中的 i_I 是變流器輸出電流的回授信號，而 Avg. 方塊圖則進行平均值計算功能。

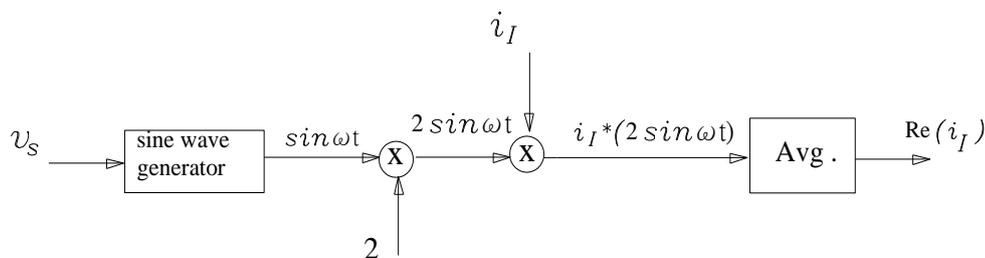


圖 9 變流器輸出電流 i_I 的有效電流量 $\text{Re}(i_I)$ 之實現流程

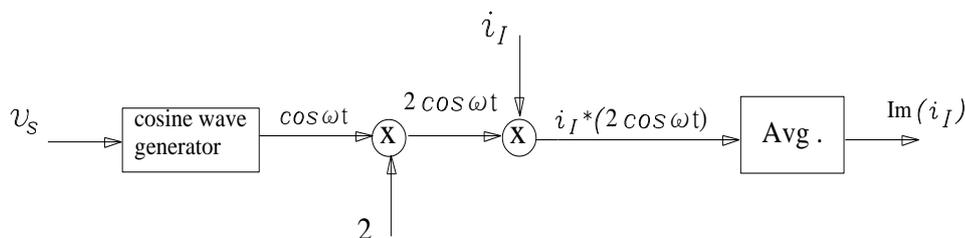


圖 10 變流器輸出電流 i_I 的無效電流量 $\text{Im}(i_I)$ 之實現流程

變流器的系統控制，本研究是採用 Matlab/Simulink 即時控制系統的方式(為一種



PC-Based control 方式)來進行，以簡化系統控制的複雜度。

七. 智慧型行動裝置執行無線通訊傳輸與控制

目前國內太陽光電發電系統裝置用戶使用網路進行資訊傳遞的利用，大部分僅侷限於系統運轉中各狀態的顯示與告警功能(如雲端監視系統)等，甚少透過網路對 PV 系統主功能(如有效功率與無效功率)來進行調控，且其資訊的傳遞路徑是採有線的實體路徑，因此常造成故障發生後線路查察的困難等缺失。有鑑於此，激發本創意構想的提出(即實功率及虛功率可遠程調度之併網型光伏發電系統開發)。

自從 Google 開放 Android 搭載於手機，許許多多 Android 應用程式的創作與開發相繼的出現，其中 App Inventor 2 為 Android 應用程式創新發明者提供了使用瀏覽器的整合開發環境，不僅所需之軟體完全免費，使用者只要具有網路連線功能，就能隨時隨地上網進行專案的開發。併網型太陽光電發電系統的建置，一般會設置在建築物上方及偏遠的荒廢空曠地上或魚塢及水庫等水面上等。這些地點要建置可由遠端指派電力之併網型太陽光電發電系統就必須架設實體的通訊網路線路，但要在既設建築物上重新鋪設管線路徑，就會有破壞原建築物之結構且施工較不易的困擾，以及在偏遠的荒廢空曠地上或魚塢及水庫等水面上的 PV 系統也未必有實體的通訊網路線路可到達，因此增添可由遠端指派電力之併網型太陽光電發電系統設置實現的難度。為解決此一難題，本研究將藉助 App Inventor 2 來開發 Android 應用程式於併網型太陽光電發電系統之實功率及虛功率可遠程調度上，其所需之通訊信號連結，將運用智慧型手機為 PV 發電系統進行無線通訊傳輸與控制，它可不受系統設置位置與空間上之限制，可適用於任何地點之併網型太陽光電發電系統。

以智慧型手機(Smartphone)作為併網型太陽光電發電系統(簡稱 GCPVGS)裝置用戶與電力調度人員之間進行無線通訊傳輸與控制的示意圖如圖 11。圖中併網型太陽光電發電系統裝置用戶內部之微控制器(micro-controller)透過藍芽(Bluetooth)裝置接受 GCPVGS 裝置用戶現場調度人員手機(Site Smartphone)下達的調度指令(工作模式 mode、實功率調度量 P_d 、虛功率調度量 Q_d 、超前或落後虛功率符號 Q_{sign})後，將命令 GCPVGS 進行相對應的電力調度作業，同一時間，現場(廠內)調度人員手機亦會將這些調度指令伴隨感測電池所提供之短路電流量 I_{cell} 透過行動上網方式及事先撰寫好的 App Inventor 2 程式[25]，自動地以無線通訊網路傳遞至網路雲端資料庫。而遠離 GCPVGS 裝置用戶地區的電力調度人員則可透過身邊的智慧型手機(Remote Smartphone)，同樣以行動上網方式及事先撰寫好的 App Inventor 2 程式自動地進入雲端系統的資料庫抓取這些電力資訊(I_{cell} 、mode、 P_d 、 Q_d 、超前或落後虛功率符號 Q_{sign})顯示於手機螢幕，據此提供遠程調度人員下達電力調度時的參考。同樣地，遠程(廠外)調度人員透過身邊手機(Remote Smartphone)亦可以無線通訊網路方式下達遠程電力調度資訊(工作模式 mode、實功率調度量 P_d 、虛功率調度量 Q_d 、超前落後性虛功符號 Q_{sign})且置放於網路雲端資料庫，之後透過現場調度人員手機(Site Smartphone)自動地進入雲端系統的資料庫抓取電力調度資訊(mode、 P_d 、 Q_d 、超前落後性虛功符號 Q_{sign})，經手機內建藍芽、GCPVGS 裝置用戶內建藍芽裝置及微控制器後，命令 GCPVGS 進行相對應的電力調度作業。網路雲端資料庫可接受及保存現場及遠程調度人員傳遞過來的調度資訊，同時允許現場及遠程調度人員身邊的智慧型手機以無線通訊網路方式前來檢索及探知目前系統調度資訊及日照強度概況，以便各自下



達適當的電力調度指令。電力調度人員依據市電系統需求及感測電池所提供之短路電流量 I_{cell} 資訊，決定電力調度的工作模式(即 MPP/Pa&Qa 模式)以及調度命令的下達。假若指令資訊為 MPP，則 GCPVGS 裝置用戶進行最大功率點工作模式的操作；反之為 Pa 及/或 Qa 指令資訊，則 GCPVGS 裝置用戶進行指定實功率(Pa)及/或指定虛功率(Qa)工作模式。

本研究主要工作在於建置一可供 PV 系統進行 MPP/ Pa&Qa 工作模式的實功率及虛功率可遠程調度環境，由此用以維持電力系統的電力品質、系統特性與運轉安全等，至於調度人員依據市電系統需求所形成之調度決策過程的工作並不合在內。

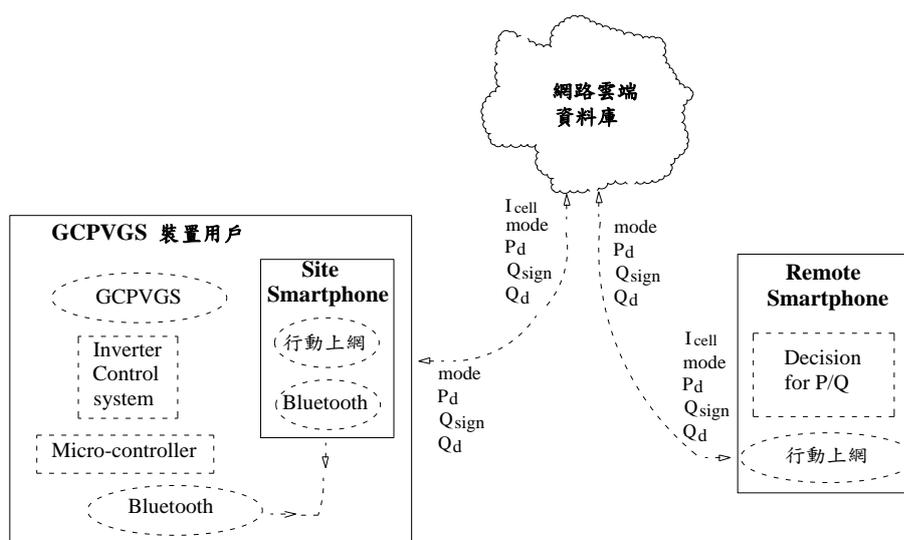


圖 11 GCPVGS 裝置用戶之無線通訊傳輸與控制示意圖

八. 實測結果與討論

本研究系統總計使用了 7 片 10 W 的太陽光電板，其中 6 片串接而成發電用的太陽能板 PV，另外一片則當作感測電池 SC。7 片太陽光電板以同一平面向南傾斜 23.5°來架設，每片太陽光電板之標示規格：開路電壓 $V_{oc}=21.6\text{ V}$ ，短路電流 $I_{sc}=0.63\text{ A}$ ，最大功率點電壓 $V_{mp}=17.2\text{ V}$ ，最大功率點電流 $I_{mp}=0.58\text{ A}$ ，最大功率點功率 $P_{mp}=10\text{ W}$ 。研究系統中的變流器(Inverter)是利用 JUBILEE PE-8A 電力電子訓練系統設備中的單相電力轉換模組來改裝，它的切換頻率=10 KHZ，三角波 v_{tri} 之最大值 $v_{tm}=5\text{ V}$ ；濾波電感器 $L=3\text{ mH}$ ；電流感測模組的增益 $k_s=0.2\text{ V/A}$ ；電壓感測模組的增益 $k_v=0.02\text{ V/V}$ ；太陽能板 PV 的電流因數由前述標示規格的 I_{mp} 及 I_{sc} 值換算得知為 $M_I=0.92$ ；變流器(Inverter)的電壓增益 $K_{PWM}=V_{PV}/v_{tm}$ ；比例型電流控制器之增益值設定為 $k_p=12$ ；電網電壓 v_s 是經由 110V/36V 降壓變壓器取得。

本研究的實測工作於 2020 年 11~12 月份進行。首先來決定實功率與虛功率操作控制系統中的 K_1 、 K_2 及 K_3 增益值，其決定之說明如後所述。先決定 MPP_Control 控制方塊中的調幅增益 K_1 ，該增益值可參考文獻[24]在單純的 MPP 工作模式下，針對不同 K_1 值於某實際日照條件下執行最大功率追蹤後，所獲致最大的最大功率輸出時所對應的 K_1 將被採用，據此，該文獻所決定之值 $K_1=1.65$ 將在本研究中被採用。其次決定 Q_Control 控制方塊內的調相增益 K_3 ，在搭配 PV 板能獲致最大功率輸出的控制條件下(即最大功率點追蹤控制下其 $K_1=1.65$)，針對不同 K_3 增益值



及所欲調度的不同虛功率量(Q_d)下進行虛功率調度，其注入市電的虛功率調度結果如表一，表中顯示 $K_3 = 100$ 以上時可使所欲調度的不同虛功率量(-20、-10、0、+10、+20 Var)正確的注入市電系統，但為避免變流器輸出電流 i_l 相角 θ_l 調整過度反應，採用 $K_3 = 100$ 。表一中的虛功率符號為正者表示注入市電系統的虛功率為超前性，反之注入虛功率則為落後性。最後決定 P_Assigned Control 控制方塊中的調幅增益 K_2 ，在搭配所欲調度的虛功率量 $Q_d = 0$ Var 的控制條件下，針對不同 K_2 增益值及所欲調度的不同實功率量(P_d)下進行實功率調度，其注入市電的實功率調度結果如表二，表中顯示 $K_2 = 15$ 以上時所欲調度的實功率量 10W 及 20 W 能正確地注入市電系統，而所欲調度的實功率量為 5 W 時，其注入市電系統的實功率調度誤差(為 0.09 W)較小，但為避免變流器輸出電流 i_l 的大小 I_l 調整過度反應，採用 $K_2 = 15$ 。

表一 不同的 K_3 及 Q_d 下，注入市電系統的虛功率調度結果

K_3	Q_d (Var)				
	-20	-10	0	+10	+20
5	-26.88	-18.75	-3.13	+12.81	+23.75
20	-21.88	-12.5	-0.5	+9.38	+19.38
40	-20.63	-10.63	-0.3	+9.50	+19.50
60	-20.31	-10.31	-0.2	+9.69	+19.6
80	-20.19	-10.19	-0.1	+9.88	+19.9
100	-20.0	-10.0	0.0	+10.0	+20.0
120	-20.0	-10.0	0.0	+10.0	+20.0

表二 不同的 K_2 及 P_d 下，注入市電系統的實功率調度結果

K_2	P_d (W)		
	5	10	20
2	1.32	6.04	15.09
5	3.58	7.55	18.11
8	4.15	8.68	19.25
10	4.34	9.24	19.43
12	4.72	9.90	20.0
15	4.91	10.0	20.0
20	4.91	10.0	20.0

完成實功率與虛功率操作控制系統中的調幅增益 K_1 與 K_2 以及 K_3 調相增益的設定後，進行實功率與虛功率調度工作的實際測試。當 PV 發電系統在 MPP 操作及虛功率 Q 調度情境下，針對幾種不同的虛功率調度工作點(Q_d)下，注入市電系統之實功率 P_s 與虛功率 Q_s 的調度結果陳列於表



三，表中顯示虛功率調度 Q 誤差百分比介於 $-1.74\% \sim +5.0\%$ (絕對誤差百分比 $\leq 5\%$)，這算是一種可接受的結果。另外，當 PV 發電系統在實功率 P 調度及虛功率 Q 調度情境下，針對幾種不同的實功率/虛功率調度工作點 P_d/Q_d 下，其注入市電系統之實功率 P_s 與虛功率 Q_s 的調度結果陳列於表四，表中顯示實功率 P 調度誤差百分比介於 $-5.00\% \sim 0\%$ (絕對誤差百分比 $\leq 5\%$)，而虛功率 Q 調度誤差百分比則介於 $-3.33\% \sim +4.29\%$ (絕對誤差百分比 $\leq 5\%$)，這亦是一種可接受的結果。

表三 MPPT 操作及 Q 調度

Qd (Var) 工作點	調度結果	
	Ps(W) / Qs (Var)	Q 調度誤差%
+23	19.3/+22.6	-1.74
+18	18.2/+17.7	-1.67
+7	18.2/+7.0	0.0
0	20.0/0.0	0.0
-6	15.3/-6.3	+5.0
-13	20.7/-13.2	+1.54
-22	20.5/-22.0	0.0

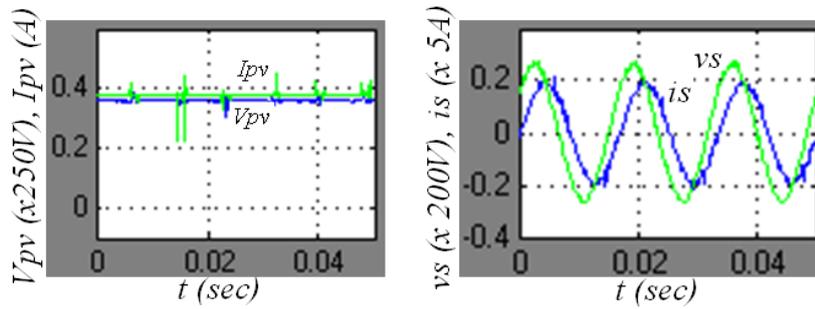
表四 P 及 Q 調度

Pd (W) / Qd (Var) 工作點	調度結果	
	Ps(W) / Qs (Var)	P/Q 調度誤差%
22/+17	21.8/+16.8	-0.9/-1.17
22/-13	21.8/-13.2	-0.9/+1.54
18/+12	18.0/+11.6	0.0/-3.33
16/-10	16.0/-9.8	0.0/-2.0
12/-12	11.8/-12.2	-1.67/+1.67
10/+7	9.7/+7.3	-3.0/+4.29
10/-7	9.8/-7.3	-2.0/+4.29
8/0	7.6/0.0	-5.0/0.0
6/+7	5.8/+7.0	-3.33/0.0
6/-7	5.9/-7.3	-1.67/+4.28

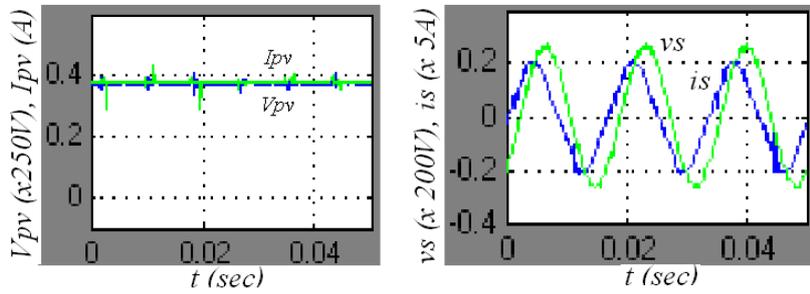
在某日照條件下，執行 MPP 操作及虛功率調度分別為 -18Var 及 $+18\text{Var}$ 時之系統響應波形如圖 12，圖中顯示注入市電系統之實功率在兩種不同虛功率調度下大致上是相等，約為 19.2W 左右，而 PV 板的輸出功率($P_{pv}=V_{pv}I_{pv}$)亦幾乎相等。在另外一次的不同日照條件下，執行實功率調度 P_d /虛功率調度 Q_d 分別為 $15\text{W}/0\text{Var}$ 及 $15\text{W}/+14\text{Var}$ 時之系統響應波形如圖 13，圖中顯示注入市電系統之實功率在不同虛功率調度下大致上亦是相等，約為 14.9W 左右，而 PV 板的輸出功率($P_{pv}=V_{pv}I_{pv}$)亦幾乎一致。圖 12 及 13 反應在相同日照條件，不同的虛功率調度量下並不影響注入市電系統之實功率量，而圖 13 另外反應虛功率調度量者，其注入市電系統的電流將會較大，



因此為獲得注入市電虛功率對系統特性所帶來的好處時，應注意變流器輸出電流額定值是否足夠。

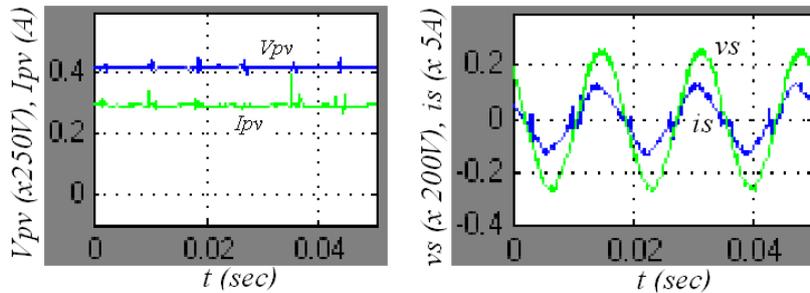


(a) $Q_d = -18\text{Var}$

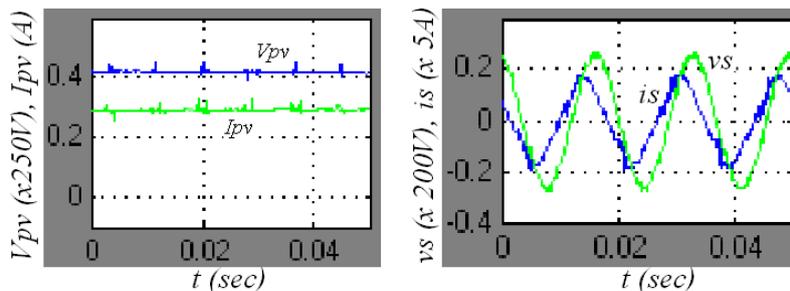


(b) $Q_d = +18\text{Var}$

圖 12 MPP 操作及虛功率調度 Q_d 為 -18Var 及 $+18\text{Var}$ 時之系統響應波形



(a) $P_d / Q_d = 15\text{W} / 0\text{Var}$

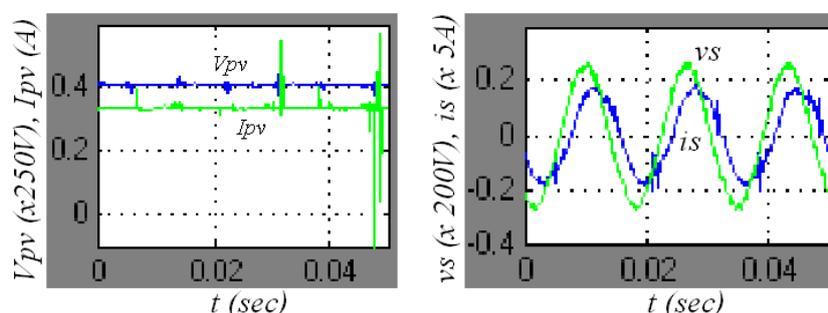
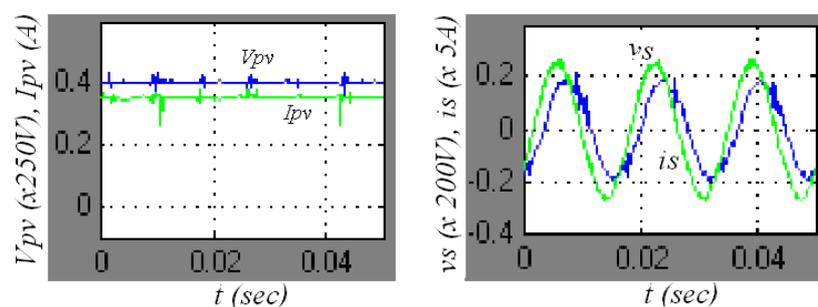
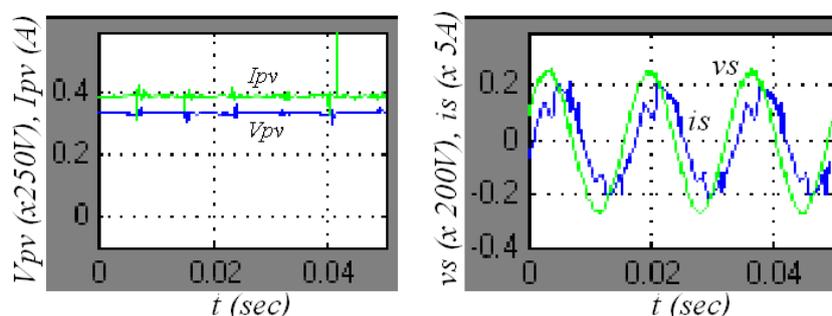


(b) $P_d / Q_d = 15\text{W} / +14\text{Var}$

圖 13 P_d / Q_d 分別為 $15\text{W} / 0\text{Var}$ 及 $15\text{W} / +14\text{Var}$ 時之系統響應波形



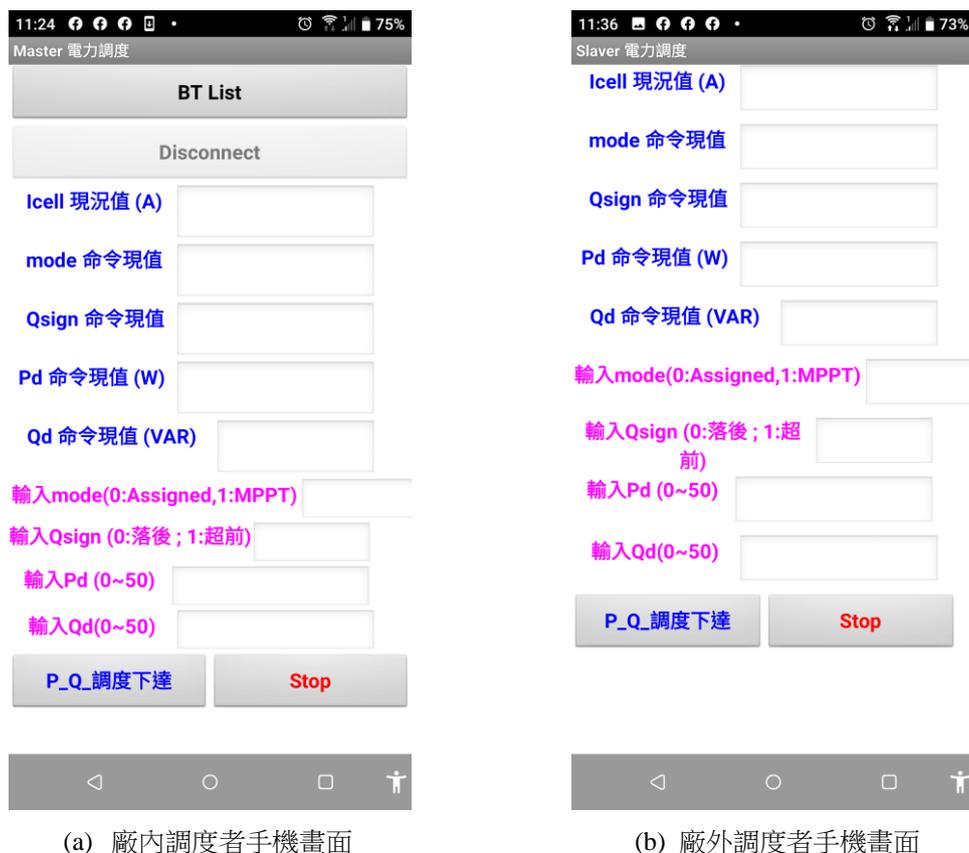
圖 12(a)為 PV 板執行 MPP 操作及虛功率調度為-18Var 時下之系統響應波形，其注入市電系統之最大實功率約為 19.2W，為確認 PV 板有完成最大功率點追蹤效果，圖 14 顯示在不同實功率調度/相同虛功率調度(分別為 18W/-16Var、19W/-16Var 及 20W/-16Var)下的三個工作點時之系統響應波形，圖中顯示實功率調度量從 19W 調度到 20W 時，注入市電系統的電流會因為實功率調度量的增加，造成 PV 板為拉升其輸出電流 I_{pv} 因應致使其輸出電壓 V_{pv} 有較大的降幅，使得變流器輸入電壓不足而造成注入市電系統之電流發生畸變(Distortion)現象，這表示 PV 板負載已超過其最大輸出功率能力，由此觀察得知，PV 板此時注入市電系統之最大實功率應是介於 19W ~ 20W，它與最大功率點追蹤結果的 19.2W 是互相吻合的，這驗證了本研究方法在 PV 板最大功率點追蹤結果上的可接受度。

(a) $P_d/Q_d=18W/-16Var$ (b) $P_d/Q_d=19W/-16Var$ (c) $P_d/Q_d=20W/-16Var$ 圖 14 P_d/Q_d 分別為 18W/-16Var、19W/-16Var 及 20W/-16Var 時之系統響應波形

為以智慧型手機透過無線通訊網路方式進行信號傳輸與控制，採用 App Inventor 2 進行手機 App 程式設計，設計呈現於智慧型手機畫面如圖 15，其中圖 15(a)為 PV 發電系統廠內(現場)電力



調度者的手機畫面，而圖 15(b)則為廠外(遠程)電力調度者的手機畫面。廠內、外電力調度者的手機畫面會同時呈現感測電池的短路電流 I_{cell} 現況值、控制方塊 P_Control 的工作模式(mode)、超前性與落後性虛功率符號 Q_{sign} 、注入市電的實功率調度值 P_d 及虛功率調度值 Q_d 的命令現況值，以便提供雙方調度者進行調度時的參考。當 mode 輸入值為 0 代表是採用指定實功率工作模式注入市電系統實功率，而輸入值若為 1 時則代表採用最大功率點(MPP)追蹤工作模式注入市電系統實功率，但此時輸入的實功率調度值 P_d 將不會被執行。當 $Q_{sign}=0$ 代表調度注入市電系統的虛功率調度值 Q_d 是為落後性，而 $Q_{sign}=1$ 代表調度注入市電系統的虛功率調度值 Q_d 是為超前性。



(a) 廠內調度者手機畫面

(b) 廠外調度者手機畫面

圖 15 手機 APP 畫面

圖 16(a)為 PV 發電系統廠內(現場)電力調度者以 MPP 操作及指定虛功率 $Q_d=-18\text{Var}$ 的工作模式進行調度後現場電力調度者的手機畫面，稍後，廠外電力調度者接手進行遠程的電力調度任務，且以指定實功率 $P_d=13\text{W}$ 及指定虛功率 $Q_d=+12\text{Var}$ 的工作模式進行電力調度，調度後遠程電力調度者的手機畫面如圖 16(b)。圖 17(a)顯示圖 16(a)電力調度後的系統響應波形，它經換算得知注入市電實功率約為 14.5W ，而注入市電之虛功率約為 -18.1Var 與指定調度虛功率 -18Var 接近。圖 17(b)顯示圖 16(b)電力調度後的系統響應波形，它經換算得知注入市電實功率約為 12.7W 與指定調度實功率 13W 接近，而注入市電之虛功率約為 $+12.2\text{Var}$ 與指定調度虛功率 $+12\text{Var}$ 亦相當。圖 18(a)為 PV 發電系統廠外(遠程)電力調度者以指定實功率 $P_d=13\text{W}$ 及指定虛功率 $Q_d=-13\text{Var}$ 的工作模式進行遠程電力調度後遠程電力調度者的手機畫面，稍後，廠內電力調度者接手進行現場



的電力調度任務，且以 MPP 操作及指定虛功率 $Q_d=+16\text{Var}$ 的工作模式進行調度後現場電力調度者的手機畫面如圖 18(b)。圖 19(a)顯示圖 18(a)電力調度後的系統響應波形，它經換算得知注入市電實功率約為 12.7W 與指定調度實功率 13W 接近，而注入市電之虛功率約為-13.1Var 亦與指定調度虛功率-13Var 接近。圖 19(b)顯示圖 18(b)電力調度後的系統響應波形，它經換算得知注入市電實功率約為 14.5W，而注入市電之虛功率約為-16.3Var 亦與指定調度虛功率-16Var 接近。圖 16~19 結果反映了 PV 發電系統以智慧型手機透過無線通訊網路方式進行信號傳輸與控制方式是可以實現併網型光伏發電系統的實功率及虛功率可遠程調度的工作。



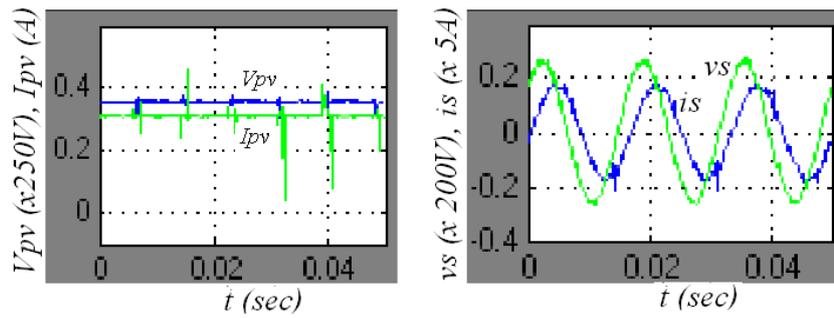
(a) 現場電力調度者調度後手機畫面



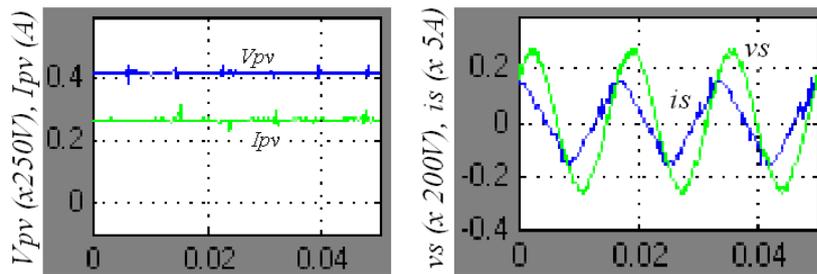
(b) 遠程電力調度者調度後手機畫面

圖 16 現場 MPP 操作及 $Q_d=-18\text{Var}$ 調度後，切換至遠程指定 $P_d=13\text{W}$ 及 $Q_d=+12\text{Var}$ 調度後手機 APP 畫面





(a) 電力調度後(圖 16(a))的系統響應波形

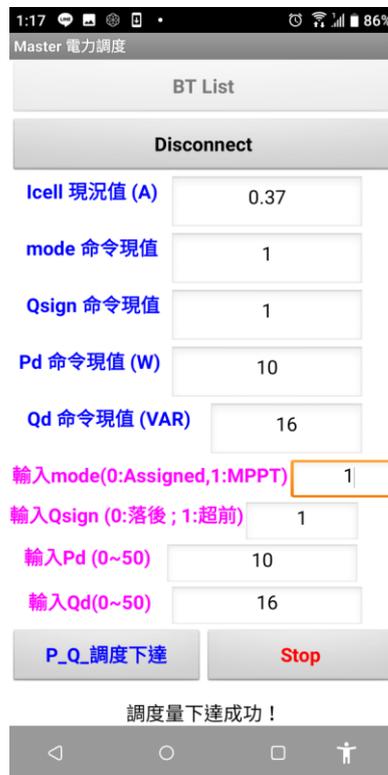


(b) 電力調度後(圖 16(b))的系統響應波形

圖 17 顯示圖 16 電力調度後的系統響應波形



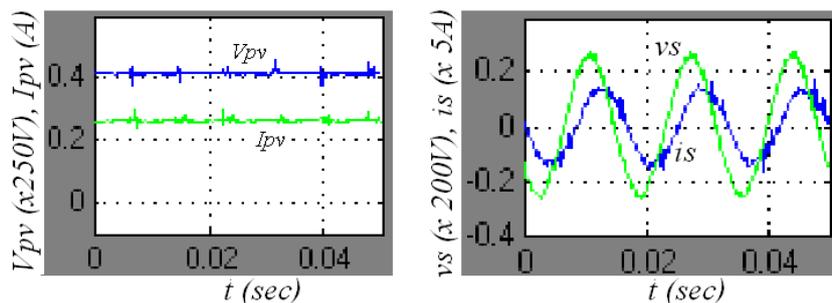
(a) 遠程指定 $P_d=13W$ 及 $Q_d=-13Var$ 調度後



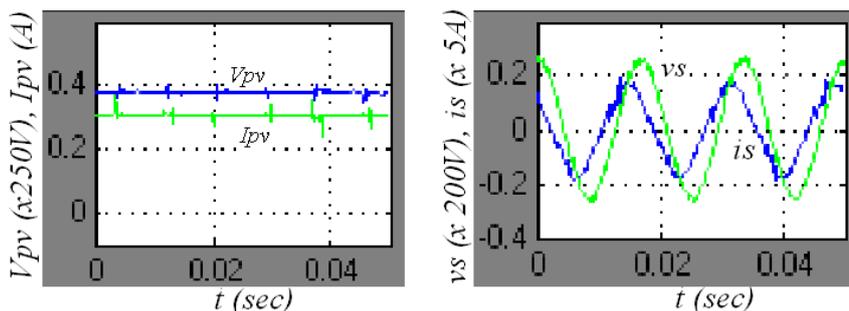
(b) 現場 MPP 操作及 $Q_d=+16Var$ 調度後

圖 18 遠程指定 $P_d=13W$ 及 $Q_d=-13Var$ 調度後，切換至現場 MPP 操作及 $Q_d=+16Var$ 調度後手機 APP 畫面





(a) 電力調度後(圖 18(a))的系統響應波形



(b) 電力調度後(圖 18(b))的系統響應波形

圖 19 顯示圖 18 電力調度後的系統響應波形

系統執行調度工作中的某時間點下，APP Inventor 網路資料庫(雲端資料庫)畫面如圖 20。圖

App Inventor (TinyWebDB) Web Database Service



This web service stores and retrieves values for an [App Inventor for Android](#) app. App Inventor apps can access this service using the TinyWebDB component and setting the ServiceURL to the URL of this site.

Search database for a tag

Tag:

Returned as value to TinyWebDB component:

Store a tag-value pair in the database

Tag:

Value:

Key	Value	Created (GMT)	
lcell	"0.35"	Dec. 2, 2020, 6:10 a.m.	Delete
Pd	"12"	Dec. 2, 2020, 6:08 a.m.	Delete
Qd	"14"	Dec. 2, 2020, 6:08 a.m.	Delete
mode	"1"	Dec. 2, 2020, 6:08 a.m.	Delete
Qsign	"0"	Dec. 2, 2020, 6:08 a.m.	Delete

圖 20 APP Inventor 網路資料庫畫面



中可看出 $mode=1$ ， $Q_{sign}=0$ 而 $Q_d=14$ ，這代表系統目前是在進行最大功率點追蹤且虛功率調度量設定為 -14Var 的工作，在此情況下，任一實功率調度量的設定都不會被執行，另外 $I_{cell}=0.35$ 表示感測電池的短路電流為 0.35A ，它反映出目前是為中等的日照實況，可供電力調度人員下達電力調度量的參考。

九. 結論

本研究透過感測電池短路電流的量測、手機App程式設計及變流器輸出電流之大小(幅度)及相位的調控，實現併網型光伏(PV)發電系統之最大功率點、指定實功率及指定虛功率的遠程調度工作。研究過程中建立一實驗性的小型併網型光伏發電系統來進行驗證，經由實測結果顯示，感測電池所提供的短路電流配合最大功率點(MPP)控制方塊所設定的調幅增益值 K_1 確實能完成併網型PV發電系統的最大功率輸出，以及指定實功率($P_{Assigned}$)控制方塊內所決定的調幅增益值 K_2 也能有效地調控注入市電的指定實功率，另一方面，指定虛功率($Q_{Assigned}$)控制方塊內所決定的調相增益值 K_3 亦能讓注入市電的指定虛功率有效地被指定。實測的調度結果中，顯示所欲指定實功率/指定虛功率與實際注入市電的實功率/虛功率之間的絕對誤差在 5% 內，PV發電系統的最大功率點調度運作亦能正常發揮，以及透過手機App程式設計進行無線通訊傳輸與控制，確實能完成最大功率點、指定實功率及指定虛功率的遠程調度工作。本研發成果可讓電力調度者可隨時、隨地、機動又便利地進行遠端下達電力調度命令，預期可用以抑制系統頻率漂移及穩定系統運轉安全，優化電力品質及系統特性等。文中所提之最大功率點、指定實功率及指定虛功率調控方式，其控制方法簡單，易實現。結合手機App程式設計進行無線通訊傳輸與控制，完成併網型光伏(PV)發電系統之最大功率點、指定實功率及指定虛功率的遠程調度工作，這是一種創新的設計方式。

參考文獻

- [1] *Wind and Solar Power and their Impact on Operating Reserves in the Taiwan Power System*, EPRI, USA, 2015.
- [2] 蔡文達、徐唯耀、胡竣翔、林永青,“大量太陽光電裝置併入電網對電力系統影響之探討,” 中華民國第三十七屆電力工程研討會論文集, POWER_241, 2016.
- [3] Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli, “An Analog Technique for Distributed MPPT PV Applications,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 12, pp. 4713-4722, December 2012.
- [4] Qiang Mei, Mingwei Shan, Liying Liu, and Josep M. Guerrero, “A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.58, No. 6, pp. 2427-2434, June 2011.
- [5] Tat Luat Nguyen and Kay-Soon Low, “A Global Maximum Power Point Tracking Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.57, No. 10, pp.3456-3467, October 2010.
- [6] Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli, “A Multivariable Perturb-and-Observe



- Maximum Power Point Tracking Technique Applied to a Single-Stage Photovoltaic Inverter," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 1, pp. 76-84, January 2011.
- [7] M. A. S. Masoum, H. Dehbonei, and E. F. Fuchs, "Theoretical and Experimental Analysis of Photovoltaic Systems with Voltage and Current-Based Maximum Power-Point Tracking," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 4, pp. 514-522, December 2002.
- [8] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, July 2005.
- [9] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions," in *Proc. IEEE ISIE*, pp. 1420-1425, 2006.
- [10] Hegazy Rezk, Ali M. Eltamaly, "A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems," *Solar Energy*, 112, pp. 1-11, 2015.
- [11] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Yong Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 7, pp. 2622-2628, July 2008.
- [12] G. J. Yu, Y. S. Jung, J. Y. Choi, and G. S. Kim, "A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms," *Solar Energy*, Vol. 76, No. 4, pp. 455-463, April 2004.
- [13] 吳有基 黃思皓, "太陽光電能系統最大功率追蹤之研究," 中華民國第三十一屆電力工程研討會論文集, 2272-2276頁, 2010。
- [14] L. Wu, Z. Zhao, and J. Liu, "A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 4, pp. 881-886, December 2007.
- [15] A. Cagnano, F. Torelli, F. Alfonzetti, E. De Tuglie, "Can PV plants provide a reactive power ancillary service? A treat offered by an on-line controller," *Renewable Energy* 36, pp. 1047-1052, 2011.
- [16] Alessia Cagnano, Enrico De Tuglie, Marco Liserre, and Rosa A. Mastromauro, "Online Optimal Reactive Power Control Strategy of PV Inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 10, pp. 4549-4558, October 2011.
- [17] Chia-Hsi Chang, Yu-Hui Lin, Yaow-Ming Chen, and Yung-Ruei Chang, "Simplified Reactive Power Control for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 5, pp. 2286-2296, May 2014.
- [18] Rosa A. Mastromauro, Marco Liserre, Tamas Kerekes, and Antonio Dell'Aquila, "A Single-Phase Voltage-Controlled Grid-Connected Photovoltaic System With Power Quality Conditioner Functionality," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, pp. 4436-4444, November 2009.
- [19] Antonio Camacho, Miguel Castilla, Jaime Miret, Ramon Guzman, and Angel Borrell, "Reactive Power Control for Distributed Generation Power Plants to Comply With Voltage Limits During



- Grid Faults,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 11, pp.6224-6234, November 2014.
- [20] Liming Liu, Hui Li, Yaosuo Xue, and Wenxin Liu, ”Reactive Power Compensation and Optimization Strategy for Grid-Interactive Cascaded Photovoltaic Systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 1, pp.188-202, January 2015.
- [21] Emiliano Dall’Anese, Sairaj V. Dhople, Brian B. Johnson, and Georgios B. Giannakis, ”Decentralized Optimal Dispatch of Photovoltaic Inverters in Residential Distribution Systems,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 4, pp.957-967, December 2014.
- [22] Petr Sulc, Scott Backhaus, and Michael Chertkov, ”Optimal Distributed Control of Reactive Power Via the Alternating Direction Method of Multipliers,” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 29, No. 4, pp.968-977, December 2014.
- [23] 李象、陳晏瑩，「透過無線通訊網路實現併網型光伏發電系統之實功率調度」，中華民國第三十九屆電力工程研討會論文集，power2018_paper_181 (2018)。
- [24] 李象，「短路電流感測法實現最大功率點追蹤之太陽光電發電系統」，正修學報，Vol. 33，pp. 71-84 (2020)。
- [25] App Inventor 2 初學特訓班，基峰資訊股份有限公司，2015年8月。

