

太陽能發電系統之發展

文・圖／陳耀銘

太陽能（Solar Energy）以光伏（Photovoltaic; PV）轉換的方式，最容易轉換成可供人類使用的能源。傳統上，太陽能發電系統（PV Power Generation System; PV System）依其電能使用方式的不同，可以分為3類：獨立型，市電併聯型（市併型），混合型。獨立型太陽能發電系統通常用蓄電池儲存白天太陽能發電所產生的電能，多用於市電無法到達的偏遠地區，供夜晚照明。市併型則將太陽能轉為電能之後，直接輸入市電電網中使用，由於不需儲存，不需經過多次轉換，所以利用率最高，也是最被廣泛採用的系統。混合型顧名思義即前二者之綜合體，先利用太陽能將蓄電池充飽，然後饋入市電直接使用。其最主要的用途在於防災與救難，一旦市電斷電，可釋放蓄電池的電能供緊急使用，保持重要設備用電無虞。臺灣近年天然災害頻傳，偏遠山區市電斷線之後，通常在短期內無法恢復正常供電，因為有太陽能發電系統的設置，才能維持被孤立的受災區域通訊正常，讓救難工作順利進行，將災害減到最低。

著眼於能源的使用效率，目前以市併型系統占大多數。傳統的市併型系統包含兩大部分：太陽能光電板陣列（PV Array）與直流/交流電能轉換器。以下進一步簡單說明。

太陽能電池（Solar Cell）係根據光伏效應（PV Effect）所製作出來的裝置。當太陽能電池受光線照射時，會形成電位差，進一步產生電流，提供電能給負載。當光線不足或消失時，電位差便消失，也就無法再輸出電能。所以，太陽能電池並不具有儲存的功能。隨著半導體技術的發展，太陽能電池有不同的種類，如：晶矽型、薄膜型等，其發電特性、成本均有不同。由於單片太陽能電池的結構脆弱且發電量有限，因此必須將數片太陽能電池加以串並聯，封裝成一個太陽能模組（PV module）。通常會將多片PV module進行串並聯，形成一組陣列（Array），以達到發電量的需求。

由PV Array所產生的電能是直流（Direct Current; DC）的型式，而市電則是交流（Alternating Current; AC）型式。此時就需要一個能夠將DC轉成AC的電能轉換器。此種電能轉換器被稱為換流器（Inverter）或逆變器，因換流器一端與市電併聯，因此又被稱為市電併聯型換流器（Grid-Tied Inverter）。也有人以其應用在太陽能發電的緣故，稱之為太陽能換流器（PV Inverter）。

評斷PV Inverter好壞的重要指標為：電能轉換效率（Efficiency），輸出之電力品質（Power Quality），可靠度（Reliability），以及成本（Cost）。臺大電機系的電能處理研究室（Electric Energy Processing Research Laboratory; EEPro）對於PV Inverter的研究已進行多年，並且在輸出電力品質改善與輸出電流控制方法有良好的研究成果。

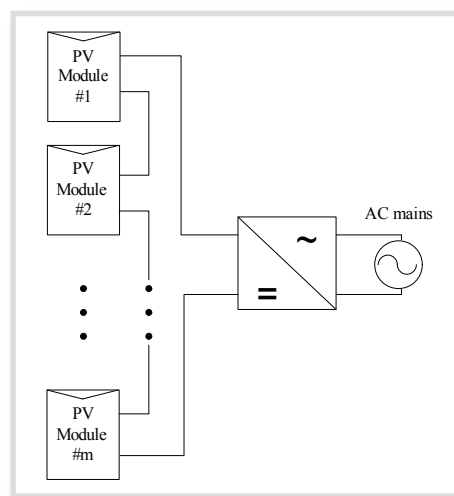
由於太陽光照射在PV Array上的強度不斷在變動，因此，透過PV Inverter饋入市電的電流大小也不斷地在變動。此變動的電流將影響電力系統的區域電壓大小，進一步影響供電品質。早期太陽能發電量小，對於市電的電力品質影響較小，隨著太陽能發電容量持續增加，

其對市電的電力品質影響已不容忽略。在對於整個太陽能發電系統之電力潮流仔細分析與數學公式推導之後，電能處理實驗室成功地找到PV Inverter輸出電流大小變動最佳化的控制公式。根據此公式所計算出來的輸出電流命令，可以達到最小的電流變動，提供最好的電力品質。依據實作的量測數據顯示，額定功率為1 kW的PV Inverter，在滿載時的電流總諧波失真（Total Harmonic Distortion ; THD）可以降低到1.5%（數字越低越好）。即使在半載情況下，也約在2%左右。目前法規的標準是滿載時要低於5%，而市面上領導品牌所標示的規格最低為3%。另外，此研究也同時推導出另一個參數，可作為PV Inverter內部直流匯流排電解電容值的設計準則。由於電解電容是目前PV Inverter內部各式元件中壽命最短的零件，因此，減少電解電容的使用，也相對地提高PV Inverter的可靠度，同時可降低整體的體積。實測數據顯示，依據此參數可在不改變輸出表現的情況下，將電容值的大小降至一半。

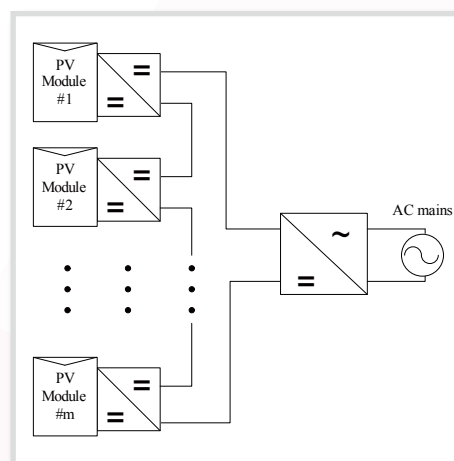
另一方面，本實驗室亦成功使用非同步和差調變（Asynchronous Sigma Delta Modulation ; ASDM）的控制方法，來產生脈寬調變（Pulse Width Modulation ; PWM）訊號，藉以控制PV Inverter的輸出電流為與市電同步的60Hz正弦波。ASDM原本被用在通訊領域作為快速類比/數位轉換之用，由於其響應快速而受到各方矚目，電力電子領域學者將它應用在電源轉換器的輸出電壓控制。本實驗室成功地應用ASDM的基本理論在PV Inverter的輸出電流控制上，並從原本的變頻控制發展出新的定頻控制，減輕數位信號處理器的計算負擔。實驗結果顯示，採用ASDM電流控制的PV Inverter可得到較快的電流響應速度，讓單週期的電流更趨近於理想的弦波電流。

此外，太陽能發電系統前端之PV Array，因為串並聯，會彼此限制輸出電壓或電流的大小，進一步影響功率的輸出。若有其中一片PV Module損壞或被遮蔽而無法產生電流，也會影響其他所有PV Module。為了解決這個問題，近年來出現了新的太陽能發電系統架構：分散式MPPT與微換流器。

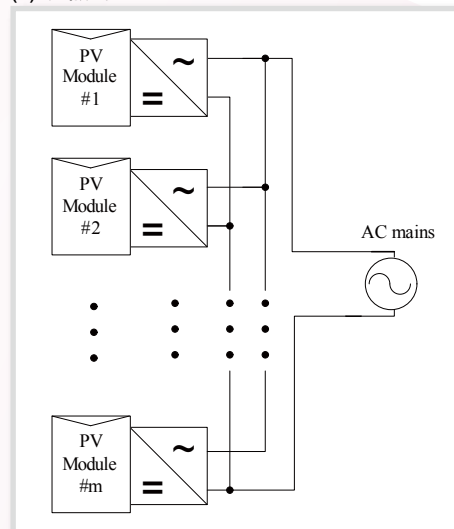
圖1(a)為傳統常見的集中式太陽能發電系統。PV Module經過串並聯後，形成一個集中式的陣列，再經由PV Inverter轉換成交流電流饋入市電。隨著日照強度不同，必須操作在



(a) 傳統集中式



(b) 分散式MPPT



(c) 微換流器

圖1：各式不同的太陽能發電系統架構圖。

不同的電壓與電流輸出點，才能獲得最大的電能輸出，因此，PV Inverter必需具備最大功率點追蹤（Maximum Power Point Tracking；MPPT）的功能。為達此功能並獲得穩定的交流電流輸出，PV Inverter通常採用DC/DC與DC/AC兩級電能轉換的電路架構，前者負責PV Array的MPPT功能，後者則負責市電併聯。

圖1(b)顯示的是分散式MPPT系統架構圖。與傳統集中式的主要差別在於將原本PV Inverter中的DC/DC轉換器移到每一片PV Module上，以確保每一片PV Module皆能輸出其最大功率。如此一來，整體太陽能發電系統便可得到最大的輸出電能，而不會因為某一片PV Module不正常而降低效率。本研究室已成功開發出不需通訊介面，便能穩定操作最大功率輸出，瞬間關閉其中一組DC/DC轉換器也不受影響。

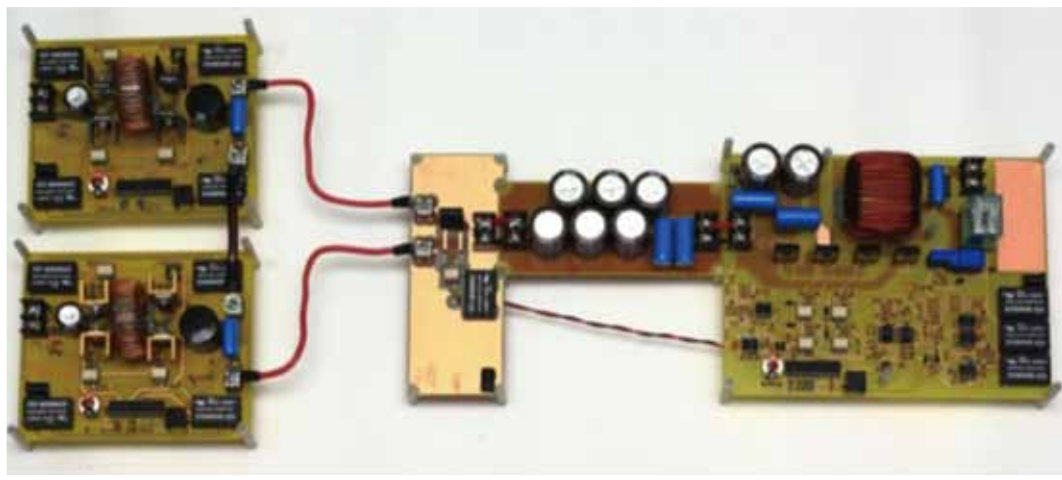
另外，也可將集中型的系統拆開成個別PV Module微系統，並直接與市電併聯。若個別微系統都獲得各自最大輸出功率，則太陽能發電系統的輸出便可以達到最大，這種系統架構被稱為微換流器（Micro-Inverter），如圖1(c)所示。微換流器需與PV Module結合，維護或更



(a) 5 kW PV Inverter



(b) 採用ASDM電流控制之PV Inverter



(c) 分散式MPPT之太陽能發電系統

圖2：電能處理研究室所開發之各式原型電路。

換不易，因此可靠度的要求很高。又因需求數量多，成本也是重要考量。本實驗室已開發出新型的微換流器電路架構，經過電腦模擬證實可行，目前進入原型電路的實作階段。此種新型微換流器架構可以達成MPPT與市電併聯之功能，並且降低電解電容的使用需求，可靠度大幅提升。圖2所示為上述提及各項電源轉換器的原型電路，分別為(a)5KW PV Inverter；(b)ASDM電流控制之PV Inverter；(c)分散式MPPT系統。

太陽能發電系統發展至今，在全球各地已有多座數十MW級的太陽能發電廠進入商業運轉，技術漸趨成熟。不過這只是開端，未來配合智慧電網（Smart-Grid）的建設，太陽能發電系統的功能將不再只是發電而已，而是具有穩定電力系統的功能。例如：從前為了安全因素，當市電失效時，PV Inverter便需立即跳脫，但未來太陽能發電將被賦予持續供電與提供區域微電網（Micro-Grid）獨立運轉的電能。另一方面，原本只提供實功（Real Power），不能有虛功（Reactive Power）饋入市電，將來會有適當的虛功來改善電力品質。而這些功能都必須仰賴電力電子技術來達成獨特的電能處理，臺大電機電能處理研究室將持續專注在太陽能發電之電力電子技術的研究，培育更多優秀人才，為臺灣的能源產業盡一份心力。■（本專題策畫／臺大綠色電能研究中心陳德玉主任）

參考文獻：

- [1] A.R. Jha, "Solar cell technology and applications," CRC Press, 2010.
- [2] 戴寶通, 鄭晃忠, "太陽能電池技術手冊", 臺灣電子材料與元件協會, 2008.
- [3] 楊翔如, 王孟傑, "2010年全球太陽光電系統安裝量回顧與2011年市場展望", 工研院IEK, 2011.
- [4] <http://www.motechsolar.com/>
- [5] <http://www.sma.de/en/home.html>



陳耀銘小檔案

出生於高雄市，1989年畢業於成功大學電機系。1997年取得美國密蘇里大學哥倫比亞校區電機博士學位，旋即返國以助理教授資格任教於高雄義守大學電機系。2000年轉至中正大學電機系任職，並於2004升等為副教授。2008年進入臺大電機系任教至今。

學術專長為電力電子，主持臺大電機系電能處理研究室。主要研究領域為各式電能轉換器的開發與設計，並著重於太陽能之應用，包含太陽能市電併聯換流器、雙向直流/直流轉換器、電池平衡充電電路、四開關升降壓型轉換器等等。也開發出多種控制方法應用在不同的電能轉換器上，如：最佳化市電併聯電流控制、預測式電流控制、和差調變控制、平滑轉態控制等等。目前擔任*IEEE Transitions on Power Electronics*的副編輯。