

太陽光電模組端的電力電子技術

劉漢章 博士 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 資深研究員

分散式太陽光電項目快速增多，在系統設計使用壽命長達25年要求下，太陽光電模組端的電子電力技術顯得格外重要，對太陽光電系統的安全、穩定運行提供了很高的保障。完備的安全保護機制可大幅減少太陽光電系統長期運行發生火災等重大風險，本文針對應用於太陽光電系統的模組端電力電子技術做介紹。

一、前言

近年來，隨著太陽光電的普及化，越來越多的建築物屋頂安裝了太陽光電系統。但綜觀無論是在國內還是國外，不時傳出有太陽光電發電站著火的事件。這到底是由於太陽光電系統的“先天缺陷”而導致的隱患，還是因為由於後天缺乏“運維巡檢”而亟待解決的問題呢？報導指出，由太陽光電系統造成的火災起火原因主要有以下幾點：系統零件品質、逆變器品質、電纜品質、匯流箱與變壓器的防雷接地問題、施工與安裝不依規範等，但是追根究柢，80%以上都是由於直流側發生故障，直流高壓引起“電弧火花”而導致系統著火^[1]。直流電弧是一種氣體放電現象，可以理解為絕緣情況下產生的高強度瞬時電流。圖1為直流電跟交流電電壓隨時間的變化，跟交流電弧不一樣的是直流電弧沒有過零點。意味著如果發生了直流電弧，產生的高溫會輕易地超過3,000°C，直接導致起火，且觸發部位會維持相當長一段時間穩定燃燒而不熄滅，因此太陽光電發電站中直流側存在的直流高壓是引發太陽光電系統火災的「罪魁禍首」。

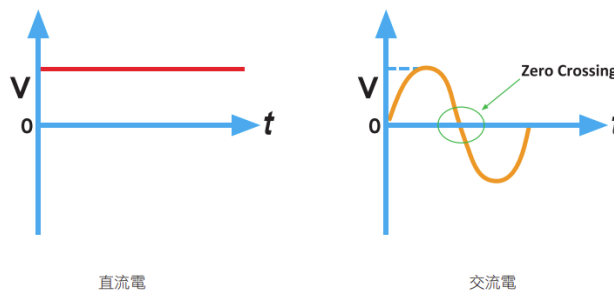


圖1. 直流電跟交流電的電壓波形變化

(資料來源：智環國際股份有限公司)

實際太陽光電系統設計中，太陽光電模組是以串列方式排成陣列，整串線路電壓累計一般可以達到600 V~1,000 V 的高壓，在歐美甚至有高達1,500 V 的案例。在長年累月的運行中，接線盒接頭若沒有依規定正確插拔，將導致接頭處接觸不良或接觸件品質不好等問題。此外運行時間長久帶來的絕緣部位老化等問題亦會直接強化造成直流電弧現象，擊穿空氣而引發火災。隨著電站的運行時間增加，出現直流電弧的概率也會增加。在不考慮其它接觸件以及絕緣部位，一個10 MW 的分散式電站中，僅接觸點數便超過80,000個，它們時刻存在發生直流電弧的可能性。即便在25年的電站運行時間中只有1/1,000的接觸點發生直流電弧，這個電站也會發生80次的直流電弧事件^[2]。

在美國、歐洲、日本、澳洲等發達國家的法規面上，對於太陽光電系統中的直流高壓問題已提出強制措施。例如美國國家電工規範(National Electrical Code, NEC) 690.12做出了嚴格的要求，如圖2所示^[3]，以距離太陽光電矩陣305 mm(即1英尺)為界限，在快速關斷裝置啟動後30秒內界限範圍外的電壓要降低到30 V 以下，而界線範圍內的電壓則要降低到80 V 以下，亦即是要求太陽光電系統需實現“模組端關斷”。義大利法規則有對應的救災安全規定，消防員在建築物帶有電壓的情況下是不可以進行滅火工作。德國率先執行 VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker)防火安全標準，明確規定在太陽光電系統中逆變器與模組之間需要增加一個直流電切斷裝置。至於澳大利亞則根據規範 OVE R11-1: 2013規定在模組附近必須有斷路裝置，來保障救災人員安全。

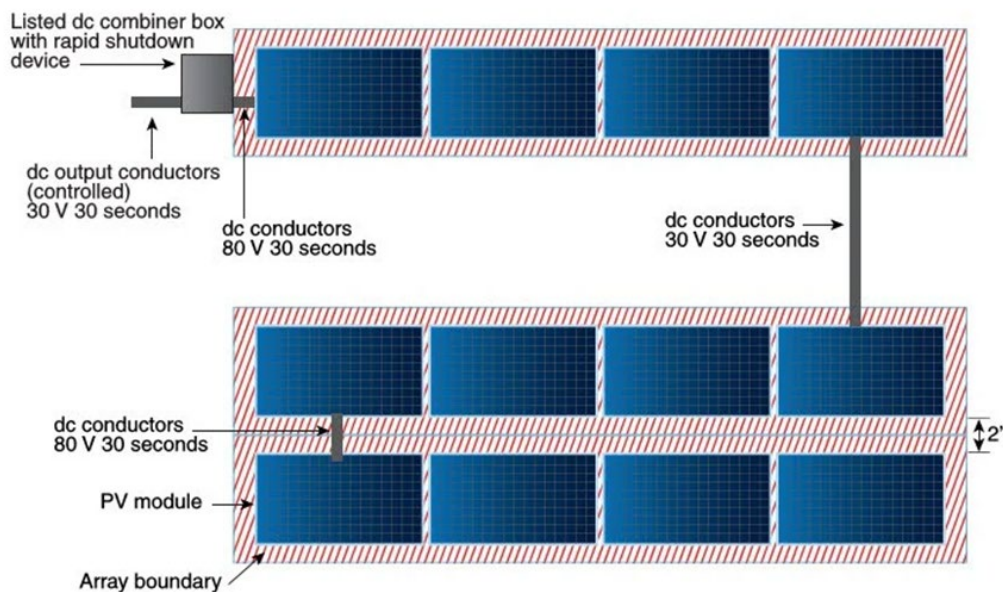


圖2. NEC 2017 690.12 (B)對於陣列邊界即受控導線之限制說明^[3]

二、模組端電力電子解決方案

模組端電力電子(Module Level Power Electronics, MLPE)技術可應用於太陽光電系統，解決直流高壓引起“電弧火花”導致系統著火的問題及提供預防性維護，包含下列三種方案：

1. 模組端關斷設備解決方案^[4]

模組端快速關斷設備(Photovoltaic Rapid Shutdown Equipment, PVRSE)搭配信號發生器(Transmitter)構成所謂的模組端快速關斷系統，運作原理如圖3所示。信號發生器做為信號主機，通過不斷的發送訊號維持關斷設備的正常工作。在系統遇到緊急情況時，可以通過交流拉閘或遠端控制停止信號發生器的工作，此時模組端關斷設備斷開每一塊模組的輸出，從而消除太陽光電系統陣列中存在的直流高壓，降低觸電風險、解決施救風險，為太陽光電系統的安全添一道保險。

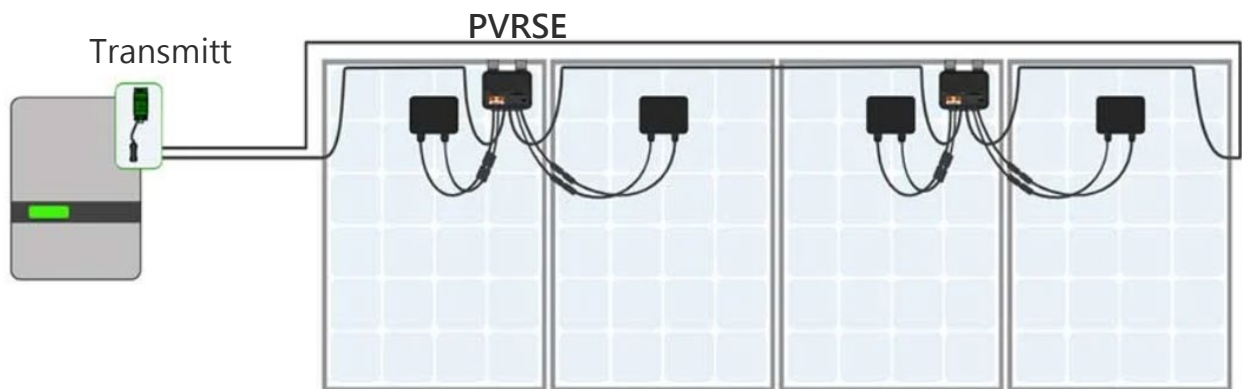


圖 3. 模組端快速關斷系統 (資料來源：Tigo Energy)

2. 微型逆變器解決方案

在模組端電力電子技術的應用中，另一項重要技術是微型逆變器。圖4為全並聯電路設計之微型逆變器系統，模組之間不再有電壓疊加，直流電壓小於60 V (不高於模組最高輸出直流電壓)，徹底解決由於高壓直流拉弧引起火災的風險。同時也解決當房屋起火時，因太陽光電發電站持續發電而阻礙施救的問題^[4]。

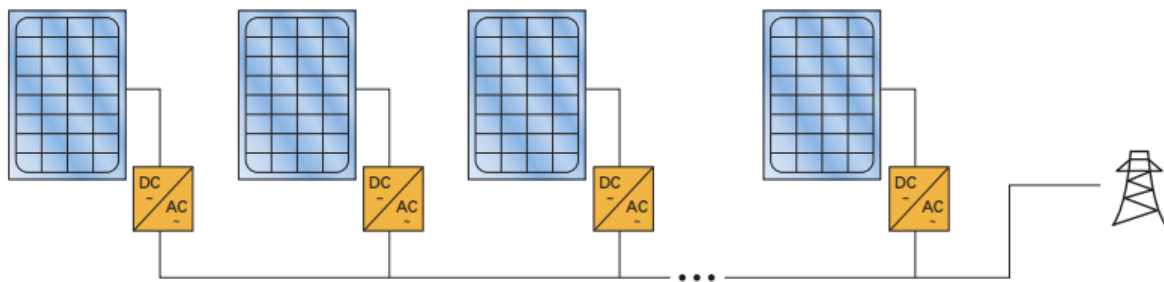


圖 4. 微型逆變器系統 (資料來源：日燭科技)

3. 功率優化器解決方案

功率優化器是一種監測直流輸入與控制直流輸出的模組級別電力電子設備，具有最大功率點跟蹤功能，一般可連接一片至兩片的太陽光電模組。根據串聯電路需要，優化器可將低電流轉化為高電流，最後如圖5將各功率優化器的輸出端串聯並接入匯流箱或逆變器，實現模組級別的控制。通過優化器和模組的串接，應用電流與電壓的預測技術可確保模組始終處於最優化的工作狀態。並按照降壓拓撲的工作原理，解決太陽光電系統因為陰影遮擋、方位朝向不一致或模組電氣規格差異等效應對發電量的影響，實現模組的最大功率輸出，提升系統發電量。配合使用能量通訊器(Energy Communication Unit, ECU)將信息接入網路，到達全球伺服器，功率優化器可實現模組等級的監控，對每一片太陽光電模組的發電量(電壓、電流及功率)、設備溫度等參數進行監測，使得用戶可以在任何有網絡的地方即時看到每一片太陽光電模組的發電情況。遠程監控技術可將過去需要花費大量人力及時間的運維程序透過雲端系統予以簡化，提升預防性維護，維持系統的最佳狀態，降低故障時間。模組等級監控可讓安裝商及運維廠商優化太陽光電系統發電效能，並降低維運成本^[5]。

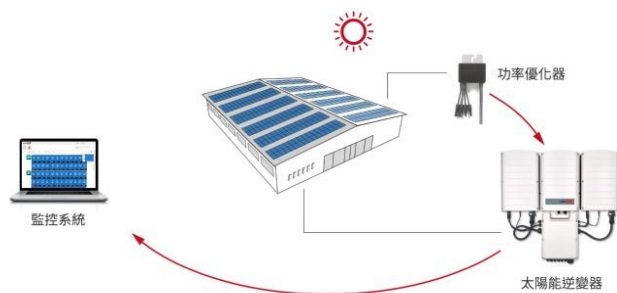


圖 5. 功率優化器系統架構圖 (資料來源：SolarEdge Technologies Inc)

三、模組端電力電子領域未來發展趨勢

基於 Maximize Market Research 統計數據與行業內相關企業公布數據參考，全球模組端電力電子的市場量能及趨勢顯示微型逆變器在全球分散式太陽光電發電系統中的應用比例不斷提升。如圖6所示，2019年全球微型逆變器市場規模已達29.58億美元，2021年將增長至42.75億美元，預計2027年則將達到129.09億美元，總計2019-2027年複合增長率預計將達20.22%^[6]。在下游應用對直流高壓風險重視以及政策支持鼓勵的背景下，微型逆變器做為能夠實現模組級控制的逆變器，具有廣闊的市場空間。北美市場是全球最大的微型逆變器產品市場，其次是歐洲、拉美等地區，其微型逆變器產品市場份額正在逐漸擴大。另外基於美國 NEC 2017及2020安規強制要求，直流的關斷器與優化器在美國的工商業領略出貨繼續攀升。至於其它陸續有安規強制的國家，模組端電力電子技術的相關產品也正逐步微幅提昇。

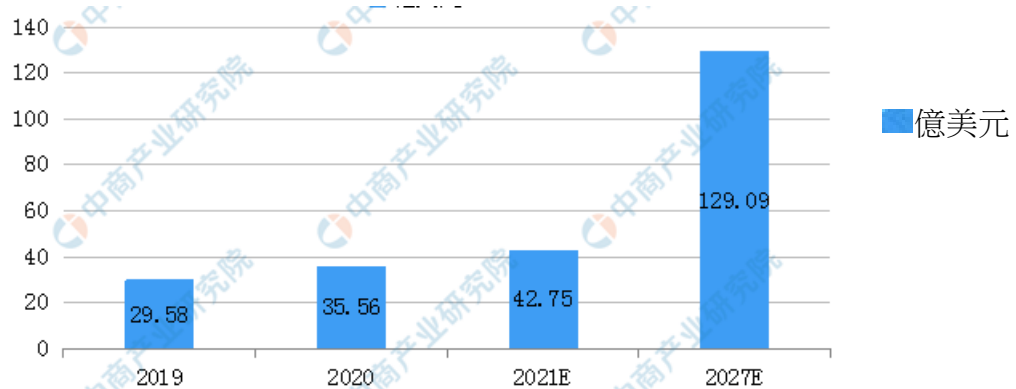


圖 6. 全球微型逆變器市場

(資料來源：Maximize Market Research、中商產業研究院整理)

四、結論及未來發展方向

台灣的大型地面型太陽光電市場不斷成長，我們也看見模組端電力電子(MLPE)技術在這個市場的潛力。這項技術可以提高系統發電安全並降低維運成本，滿足大型太陽光電系統的需求。模組端電力電子技術是分散式架構，在系統運行安全、系統效率優化、智能監控及創新技術方面的優勢顯著，是屋頂型太陽光電系統的最佳解決方案。



五、參考資料

1. 如何解决直流电弧引發的光伏火災，https://www.sohu.com/a/609245348_556003
2. 別讓屋頂光伏成為潛在的“火藥桶”，元件級電力電子技術或成直流高壓最佳解決方案，
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/144188877>
3. National Electrical Code , 2017, National Fire Protection Association, United States, Pp. 690.12(B)
4. 日燭科技，MLPE 組件級電力電子領域的發展。
5. SolarEdge：模組等級監控，降低太陽能系統維運成本。
6. 中商情報網，微型逆變器市場潛力大 2021 年全球微型逆變器市場規模超 40 億美元。