

邁向模組等級 功率最佳化

主旨

如同人們需要個別關注才能發揮最佳工作能力，模組也是如此。模組只有在接收最佳的特定電壓及電流組合時，才能達到最大效能。透過技術討論及實際資料分析，本白皮書將說明在模組層級應用功率最佳化時，如何從太陽能光電系統獲得額外能源。本白皮書之目的係證實額外獲得的能源對太陽能光電世界中的每種可能情況是相當重要且息息相關。

失配及傳統變流器

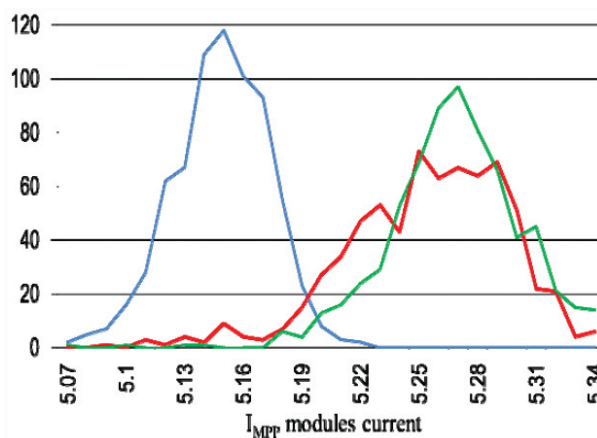
陣列中的模組未呈現完全相同的電性或處於不同環境條件時，就會發生失配的情況。實際上，失配是太陽能光電模組間一開始就存在的自然狀態（圖1）。眾所皆知，每個模組在不同電流（ I_{mpp} ）及電壓（ V_{mpp} ）組合下皆可提供最大功率（ P_{mpp} ）（圖2）。

相同模組之三種不同生產批次的 I_{mpp} 高斯分布

圖1：

義大利摩德納建造815 kWp太陽能光電站期間，Paolo Perotti在其研究中，減少了2,800片以上模組間失配的情形。接著依輻射照度掃描測試報告，於現場從頭開始進行模組分類。圖片顯示相同模組之三種不同生產批次的 I_{mpp} 高斯分布。

資料來源：P. Perotti et. al., “Monitoring and evaluation of economic impact in the reduction of mismatching in a PV plant located in Northern Italy”, 26th EUPVSEC, 5-9/9/11, Germany

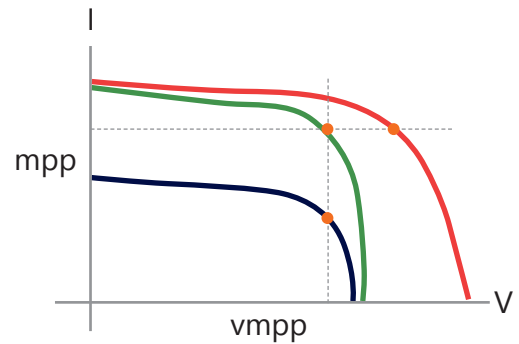


相同模組，不同IV曲線

圖2：

三個類似模組在不同條件下呈現出不同的性質：

- 綠線—標準條件下的模組IV曲線
- 藍線—模組電流在較低照度下下降
- 紅線—模組電壓在較低溫度下增加



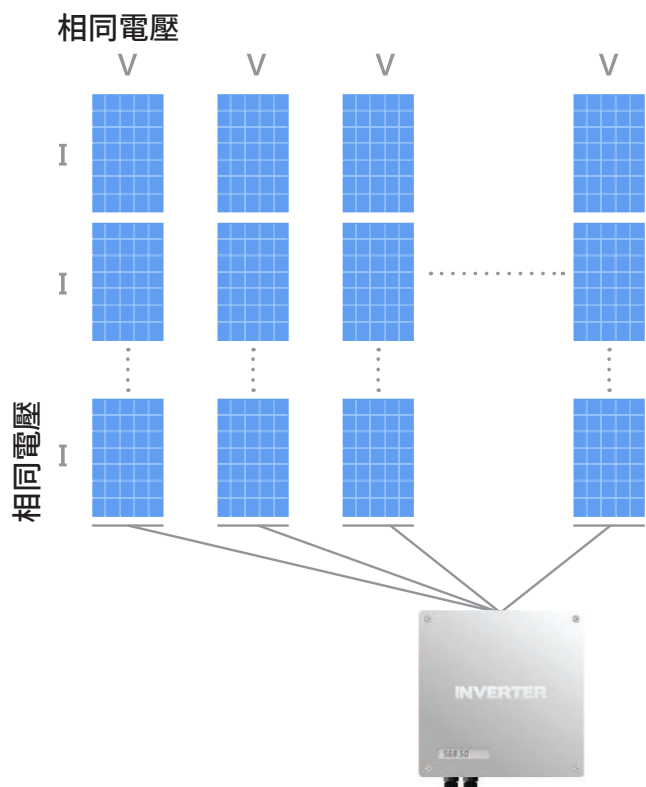
但傳統變流器作為中樞裝置，根據定義並無法選出模組的個別IV曲線，更遑論調整每個模組的電流及電壓。反之，傳統變流器可共同追蹤模組陣列的最大功率點（圖3）。透過「一體適用」的方式，傳統變流器在接收平均系統輸出時會做出折衷，在此情況下，較弱模組會阻礙陣列中較強模組的輸出。這會導致發電損失，通常可稱為模組失配損失。

建立並維持整個系統生命週期模組間的絕對一致性，即可避免發生失配的假設似乎相當不實際，實際上，即使在進行輻射照度掃描測試並依據相似的IV曲線（功率曲線）分類後，模組的額定容量仍維持在標準差±3%。由此觀點來看，可引起陣列中部分模組間差異的任何原因皆會使失配情況加劇。

傳統太陽能裝置：一體適用

圖3：

圖片顯示太陽能模組串聯為串列，數個串列並聯連接至變流器。相同串列中的所有模組接收相同電流，所有並聯串列接收相同電壓。

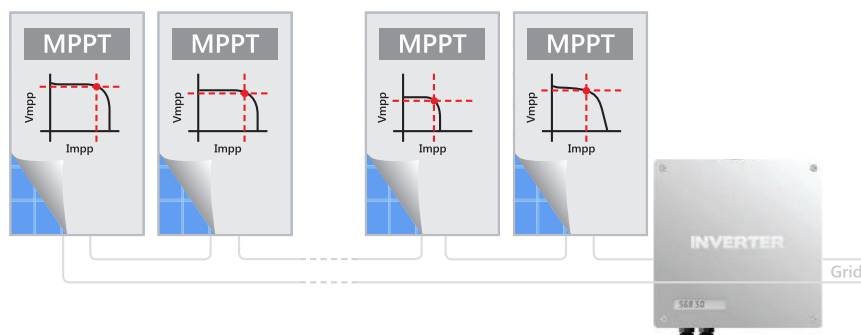


功率優化器如何獲得能源

模組層級MPPT可根據個別模組的特定需求調整電流及電壓，無論串列中其他模組為何，皆可確保模組以其最大能力運作(圖4)。相對於平均值，模組層級MPPT代表依據簡單數學原理獲得模組所有峰值操作點的總和，此能源產量將永遠高於獲得平均值的產量。

圖4:

功率優化器可根據模組調整電流及電壓，從個別模組獲得最大功率，消除陣列中模組的任何相依關係。



六大範例

以下章節將檢視六個範例情境，藉此針對功率優化器可能獲得的不同能源量舉例說明。由此觀點來看，可引起陣列中部分模組間差異的任何原因皆會使失配情況加劇。

1. 部分遮蔭－不同曝光程度造成的失配

只要稍作想像，部分遮蔽來源便有無限種可能：煙囪、碟形衛星天線、裝置上繞置的纜線，皆可在模組上投射些許陰影。模組之間亦可能互相遮蔽。只要改變幾個模組的光照強度，部分遮蔽就會產生多種模組輸出，並使陣列發生失配的情況。以下範例說明部分遮蔽的六千瓦裝置可恢復多少能源(德國)：SolarEdge監控入口網站顯示9及12號兩個模組，每天08:00到10:00皆會受到煙囪遮蔭(圖5)。為了量化9及12號受遮蔽模組在發電量上的影響，採用日內瓦大學所研發軟體PVsyst設計並模擬能源輸出：使用傳統「一體適用」變流器，並將SolarEdge變流器及功率優化器搭配每個模組的個別MPP追蹤使用。報告顯示使用SolarEdge時，遮蔽損失與遮蔽面積(1.5%)成正比，傳統變流器在兩個受遮蔽模組上，損失潛在系統輸出的13.4%(圖6)。SolarEdge系統在第一年單獨運作下所獲得能源增加12.4%。

圖5:

SolarEdge監控系統顯示兩個模組在每天早上08:00到10:00皆會受到煙囪遮蔭。有趣的是，9及12號模組的較低輸出不會影響串列中的其他模組。

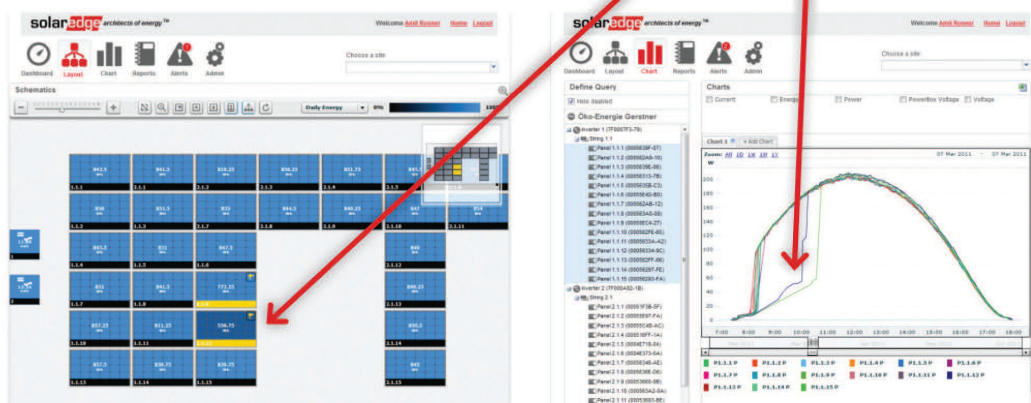
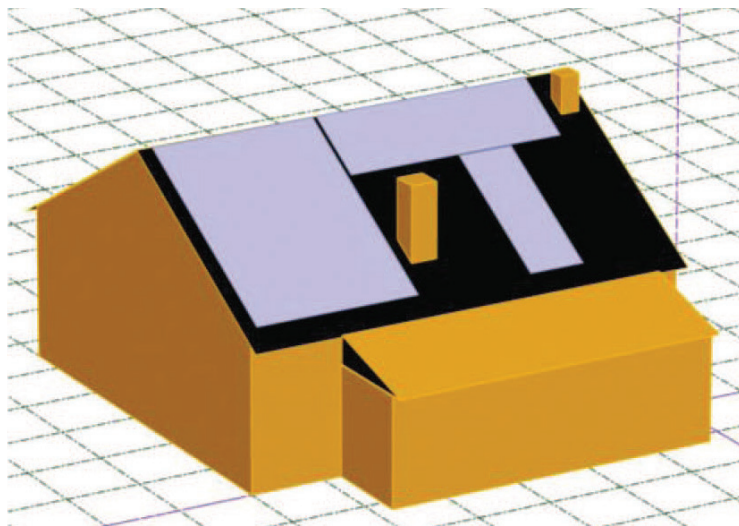


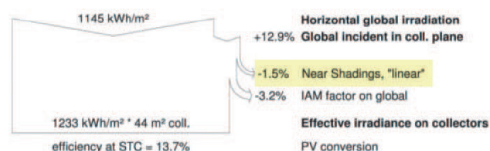
圖6:

圖片顯示6kW住宅系統的PVsyst模擬結果，此系統經常受到煙囪遮蔭。圖6顯示模型，圖7則顯示兩個報告：SolarEdge及傳統變流器系統。



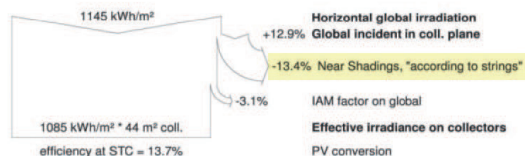
SolarEdge

Produced Energy 6262 kWh/year
Performance Ratio PR 80.7 %



Traditional

Produced Energy 5574 kWh/year
Performance Ratio PR 71.8 %



2. 髒汙－不同曝光程度造成的失配

另一個常見的太陽能光電站失配損失來源為模組髒汙。如同部分遮蔽，髒汙也會減少模組的照射面積。髒汙的成因可能為落葉、沙塵及鳥糞(影像a及b)。由於這類因素對所有模組的影響不盡相同，因此會造成失配現象。在部分容易堆積沙塵的地方，此影響會更嚴重。圖7顯示從SolarEdge監控入口網站擷取的螢幕畫面，此圖說明加利福尼亞州700kW光電站中的髒汙模組在清潔前的不同輸出(以不同藍色表示)。



影像a及b：
兩種常見的髒汙來源：
鳥及沙子

圖7：

由不同髒汙程度造成的串列及模組能源失配。藍色深度與串列每日能源成正比。



3. 動態變化－快速氣候變遷、快速光線變化

即使是遠在天邊的雲層往前飄移也可能形成間歇性陰影。傳統變流器對功率波動的偵測速度不夠快速且可能受限於局部，表示非最高陣列峰值。如圖8及9的說明，我們認為光線變化速度所產生的能源損失可能相當大。此情況下需要追蹤拓撲，以便在間歇現象發生時快速做出反應，即時調整電流及電壓。這正是功率優化器的用途。每台功率優化器負責一個模組，因此可迅速且適當地因應快速變化的照度。

圖8:

MPPT效率為照度變化速度的函數。

資料來源: R. Brulindlinger Austrian Institute of Technology, 4/2010

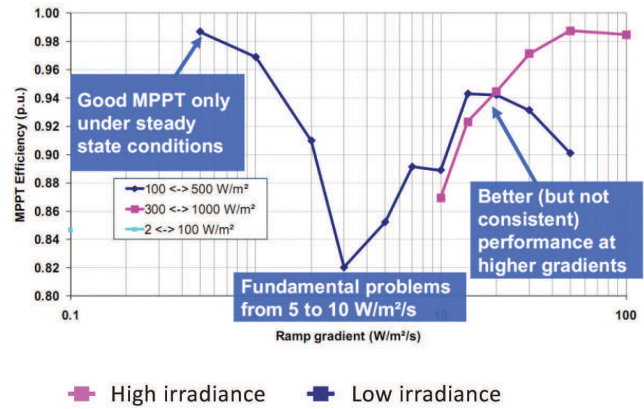
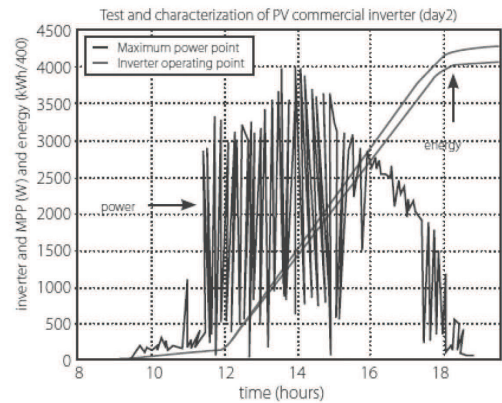


圖9:

混合天候下的能量損失。變流器層級MPP追蹤器在間歇光照與陰影的情況下，難以追蹤系統輸出的波動。

資料來源: On the Testing, Characterization, and Evaluation of PV Inverters and Dynamic MPPT Performance Under Real Varying Operating Conditions, Pablo Sanchis et al.(2007)



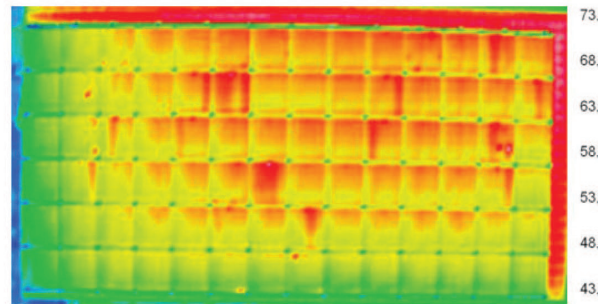
4. 不同溫度，不同Mpp

陣列中的溫度可能會有劇烈變化。研究員Claudia Buerhop使用安裝於模型直升機上的紅外線攝影機測量德國太陽能陣列所呈現的不同溫度。影像顯示光電站內的溫度梯度。在模組頂部及底部排間測得的溫度差異為13°C，排與排之間的距離只有7.8m。攝影機也顯示特定模組內甚至存在3-5°C的溫度梯度。由於環境溫度及模組輸出功率間的關聯性，暴露於不同溫度的模組將會呈現不同的功率曲線。此類情境可能發生於系統安裝於斜面或刮風的天氣下，風會吸收於陣列一端運作模組的熱能，並將熱能傳遞至陣列中。

圖10:

圖片為太陽能系統的IR圖。不同模組呈現出因暴露於陣列中顯著不同之溫度所產生的不同Vmpp需求。此外，圖10為表示安裝模組中缺失的熱點，這代表另一種失配來源。

資料來源: C. Buerhop et al., ZAE Bayern, "The role of infrared emissivity of glass on IR-imaging of PVplants", 26th EUPVSEC, 5-9/9/11, Germany

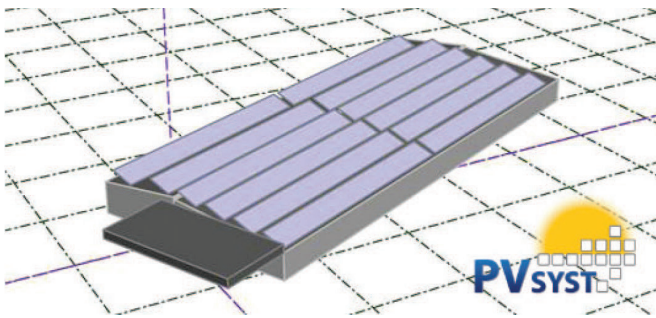


5. 完美條件下

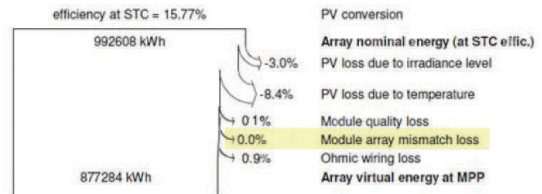
假如氣候穩定且太陽能陣列中無遮蔽、髒汙元件、任何性能低下的模組或溫度差異，PVsyst仍會假設模組額定容量±3%的標準差足以產生約2%的能量損失(圖11)。例如：從加利福尼亞州商用屋頂裝置回收的能源，用於每月平均耗電量3650MWh，0.11 \$US kWh一級能源成本的工廠，在第一年單獨運作下可轉換為\$7,500以上的收益。

圖11：

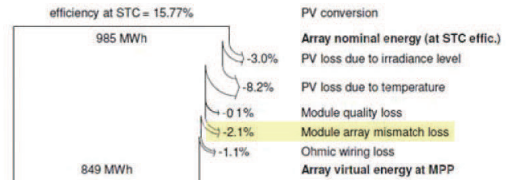
已部署PVsyst，以使用SolarEdge變流器及功率優化器，以及傳統變流器模擬475kW的屋頂設計與能源輸出。無遮蔽元件。



SolarEdge



Traditional



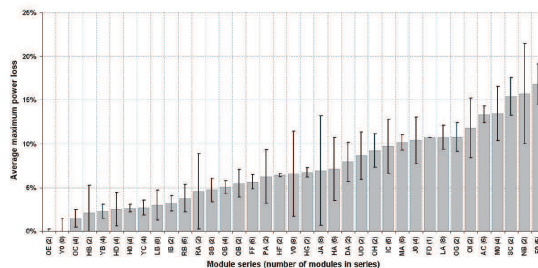
6. 老化—時間影響造成的失配

儘管多數模組到20年時僅會老化至其額定輸出80%的可接受程度，但模組的不同老化速度會產生老化失配現象。老化失配在未來可能會進一步加劇，但研究顯示，此現象已可視為現今疑慮的來源。舉例來說，研究員Jorge Coello已證實西班牙兩家太陽能發電廠內安裝之晶矽模組(容量分別為19 MW及13 MW)的劣化過程。2008年，在其安裝前，Coello在經過IEC 17025認證的實驗室中，對來自五家不同製造商的785個模組樣本進行閃光測試，然後在2009及2010年重複測試，檢查潛在的變化。正如預期，結果顯示第一年內峰值功率僅降低1.0 - 3.5%，第二年則額外降低0.4 - 1.3%。但更重要的是，針對此目的，模組在此範圍中的老化速度完全不同。過去兩年中，在2008到2010年間，其中一家製造商的模組間甚至表現出高達6%的差異。在2009年發表的另一項研究中，Artur Skoczek展示了來自20家不同供應商的53個模型之劣化結果。總共204個模組，在義大利伊斯普拉的歐洲太陽能測試機構(ESTI)經過19-23年的戶外曝曬。四分之一的模組功率降低標準差高於5%，在部分情況下，甚至可高達15%。

20年後，相同模組的功率差異

圖12：

黑線：20年後，相同模組的功率差異（上圖僅總結性能較優異之模組系列的結果）



資料來源：A. Skoczek et. al., “The results of performance measurements of field-aged c-Si photovoltaic modules”, Prog.Photovolt:Res. Appl.2009; 17:227–240

結論

本白皮書中的結果顯示失配是太陽能陣列中的固有狀態，且會因環境條件改變而進一步加劇。結果同時也顯示，任何以下列基本假設為基礎的拓撲，皆會犧牲太陽能光電能源輸出：太陽能模組最終可作為均質群組，或能夠在整個系統生命週期中維持模組間一致性。

透過應用模組層級技術，幾乎任何裝置都能夠產出額外能源。額外的能源產出量視特定情況而定，PHOTON雜誌2011年10月號對此進行總結：即使在完全受控的條件下，在PHOTON實驗室執行測試期間，SolarEdge功率優化器的額外能源產出範圍為1.6%至34%（圖13）。此結果尚未將本白皮書中的其他失配來源列入考量，如溫度差異、動態照度變化及老化失配。模組老化速率不均的情況會使失配現象持續增加，並逐年降低太陽能系統的投資報酬率。

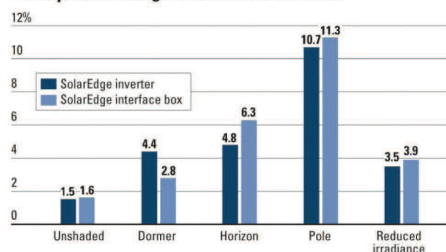
總結來說，提高太陽能輸出效率是共同追求目標，而非將模組分類及閃光測試視為失配現象的持續修正方式，業界應習慣接受模組多樣性的太陽能本質，並將模組層級功率最佳化視為出路。

PHOTON實驗室對SolarEdge功率優化器額外能源產出的測試結果

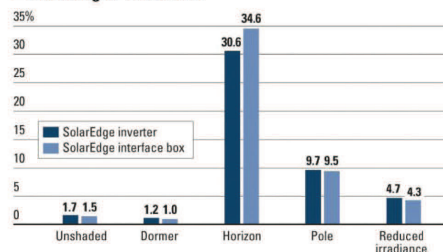
圖13：

與具有組串MPPT的傳統變流器系統相比，圖表說明在五個不同情況下，於每個模組新增MPPT獲得的額外能源產出。長條圖比較使用SolarEdge變流器及使用第三方變流器的SolarEdge功率優化器。

Additional yield produced by SolarEdge PowerBoxes – two parallel strings of seven modules each



Additional yield produced by SolarEdge PowerBoxes – one string of 14 modules



資料來源：PHOTON雜誌2011年10月號