



淺談遮陰效應對太陽光電系統之影響

A Brief Discussion on the Impact of Shading Effect on Solar Photovoltaic Systems

謝建俊 C. C. Hsieh¹、莊瑞誠 R. C. Juang²、黃朝揚 C. Y. Huang³、
姜暉先 H. H. Chiang⁴、賴光傑 K. C. Lai⁵、李濟羣 C. C. Li⁶
工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹工程師、²經理、³副組長、⁴組長
茂迪股份有限公司(MOTECH) ⁵商務處行銷部副經理、⁶技術發展處處長

摘要/Abstract

太陽能光電系統憑藉其潔淨、高效、穩定的特性，迅速成為全球再生能源技術的核心之一。然而，系統設計不當或自然環境中的樹葉、鳥糞、電線桿、樹木等遮擋，將導致系統整體電流輸出下降，進而影響發電效率，嚴重時發電量損失會超過30%。早期文獻多為探討全電池模組被遮陰的影響，較少人探討半切模組被遮陰的影響。透過實驗模組的月性能比可以看出，模組在不同遮陰條件下的發電影響，其中鳥糞的持續遮陰是影響系統性能最多的。而鳥糞因為重力關係會造成長條狀的遮陰熱異常，建議太陽光電系統在候鳥棲息地區，應避免設計為橫向安裝，且須增加清洗與巡檢頻率，才能提升系統安全性。

Solar photovoltaic (PV) systems have rapidly emerged as a core technology in global renewable energy due to their clean, efficient, and stable characteristics. However, improper system design or natural environmental obstructions such as leaves, bird droppings, utility poles, and trees can lead to a decrease in the overall current output of the system, thereby reducing power generation efficiency. In severe cases, power loss may exceed 30%. Early studies primarily focused on the effects of shading on full-cell PV modules, with limited research addressing the impact on half-cut modules. The monthly performance ratio of experimental modules under various shading conditions reveals that continuous shading caused by bird droppings has the most significant effect on system performance. Due to gravitational influence, bird droppings tend to create elongated shading patterns resulting in thermal anomalies. It is recommended that solar PV systems in migratory bird habitats avoid horizontal installation and increase the frequency of cleaning and inspections to enhance system safety and efficiency.

關鍵字/Keywords

遮陰效應(Shading Effect)、半切模組(Half-cut Module)、鳥糞(Bird Droppings)



前言

隨著全球能源需求持續增長以及氣候變遷問題日益嚴峻，推動可再生能源已成為各國實現可持續發展(Sustainable Development)的重要策略之一。在此背景下，太陽能光電系統憑藉其潔淨、高效、穩定的特性，迅速成為全球再生能源技術的核心之一。然而，土地資源的有限性與氣候變遷的極端化給光電系統的應用帶來了諸多挑戰，尤其在實際應用中，由於設計不當或自然環境中的樹葉、鳥糞(Bird Droppings)等遮擋，以及電線桿、太子樓的陰影，甚至前排太陽光電模組的陰影，都會對太陽光電系統的性能產生很大的影響。特別是在候鳥棲息地與物件遮陰的系統，一般太陽光電系統會因為串列中部分模組局部遮陰，導致系統整體電流輸出下降，進而影響發電效率，嚴重時發電量損失會超過30%。文獻指出，光電模組熱斑的原因可歸結為局部遮光或光照強度分布不均⁽²⁻⁵⁾。熱斑是指太陽電池/太陽光電模組中的某個局部區域，其工作溫度明顯高於其周圍區域，這將導致電流減少，並成為串聯太陽電池/太陽光電模組其餘部分的反向偏壓。因此，熱斑會嚴重降低部分遮光的太陽電池和太陽光電模組的性能，甚至對太陽光電模組造成不可逆損壞，如太陽電池脫層和火災⁽⁶⁻⁷⁾。

自2019年起，太陽光電電池片改變驅動模組端的技術發展多樣化，包含半切(Half-cell)、雙面電池、雙面玻璃、多主柵及大尺寸等多樣化技術疊加，提升模組輸

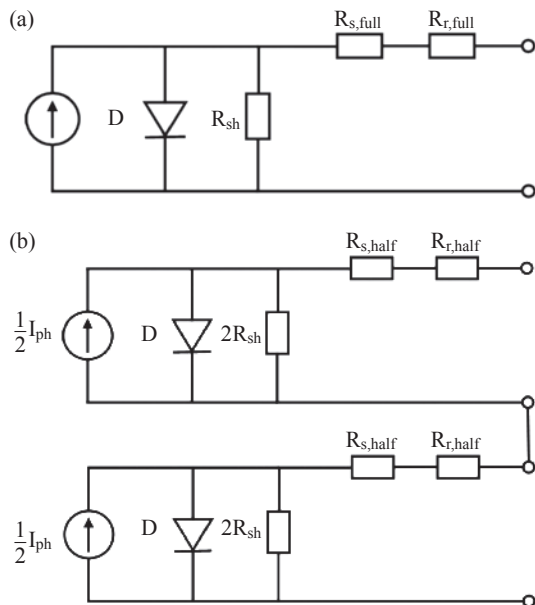
出功率。早期文獻多為探討全電池片的模組被遮陰影響，較少人探討半切模組(Half-cut Module)被遮陰的影響。本文將分析不同遮陰方式對太陽光電系統的影響，最後給予建議方向，提供產業建置系統時參考，期有助於太陽能產業之永續發展。

太陽光電模組電路分析

全電池模組設計通常由60/72片全電池串聯連接，其電流不變，而電壓相加，且每20/24片電池片會外接一顆旁路二極體(Bypass Diode)，用於部分遮蔽或故障情況下，以保護太陽電池並減少功率損失。

半切模組設計由於電流減半，電壓不變，所以一般會採用串聯-並聯結構設計，相當於兩塊小太陽光電模組並聯在一起，而旁路二極體分別管理上下各20/24片電池片。當常規模組安裝在太陽能電場上進行模組陣列排列時，通常有縱向排列與橫向排列兩種方式。縱向排列模組的優點是安裝方便、支架利用率高、占地面積較小；缺點是在早晚陰影、灰塵、水漬、積雪等造成遮擋時，縱向排列的模組發電量損失比橫向模組更多。半切模組憑藉其特殊的並串結構，可以使太陽光電換效率有所提升，比同版型120/144片模組功率提升5 W~10 W(+2%~4%)，甚至更高。

當部分太陽電池被遮蔽或發生故障時，旁路二極體會導通，使電流繞過受影響的電池，確保其他正常的電池可以繼續工作，並防止熱斑形成，從而提高整體系統的效率 and 可靠性。圖一為太陽光電模組之等效電路圖， $R_{r,full}$ 為整片電池電路的焊帶

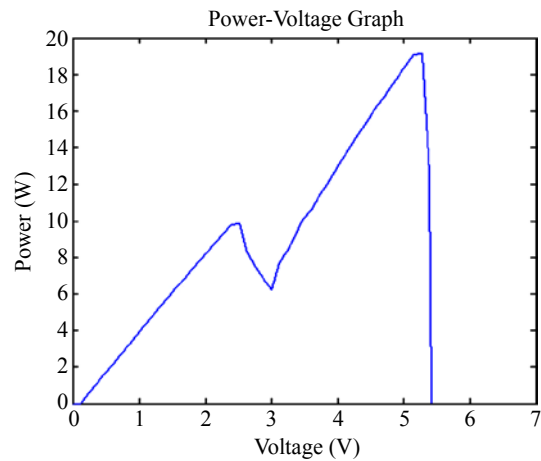


▲圖一 (a)全電池太陽能模組等效電路圖；(b)半切模組等效電路圖⁽⁸⁾

電阻； $R_{r,half}$ 為半切電池電路的焊帶電阻。

正二極管代表太陽電池的p-n介面，當電流通過二極管時產生電荷重組，二極管的反向飽和電流主要由電池溫度決定。模組短路電流(I_{sc})與光照表面積成正比^(9,11)，儘管串聯電阻(Series Resistance; R_s)可以降低太陽能組件的填充因數，但它在最大功率點(Maximum Power Point; MPP)與開路電壓之間能形成準確的I-V曲線形狀。並聯電阻或漏電阻(R_p)主要由製造缺陷造成，分流電阻值較低會導致太陽電池出現顯著的功率損耗，因為它會為光生電流產生一條替代路徑。分流電阻的影響在低光照條件下尤為嚴重，因為太陽電池的有效電阻會很高^(9,12)。兩個相連接的太陽能模組在不均勻光照表現的P-V曲線如圖二所示。

從圖二可以得出結論，在不均勻光照



▲圖二 不均勻光照下的兩個並聯太陽能模組的P-V曲線^(9,20)

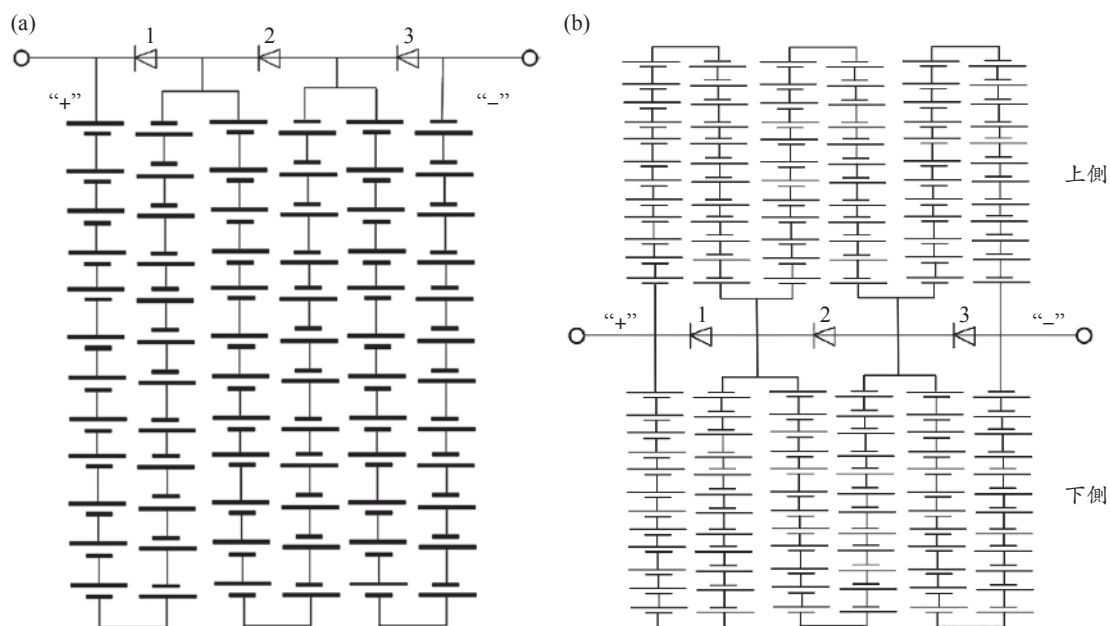
下，會產生局部最大功率點。因此，隨著輻照度的突然減少或增加，將導致模組短路電流的顯著變化，每當感測到的電流差高於指定的閾值時，可由MPP的增量電導和分數開路電壓技術，利用最大功率點電壓(V_m)和開路電壓(V_{oc})之間近似線性的關係，套用輻照度與模組溫度係數水準，計算模組最佳功率追蹤，進而降低擾動損失⁽²⁰⁾。

圖三為太陽能模組電路排列圖，全電池太陽光電模組由3個電池串和3個旁路二極體組成，共72個全片電池片串聯，其中每個電池串有24個整片電池片同時並聯1個旁路二極體；半切模組由6個電池串和3個旁路二極體組成，共144個半切電池片串聯-並聯，其中每個電池串有24個半切電池片，同時並聯1個旁路二極體。

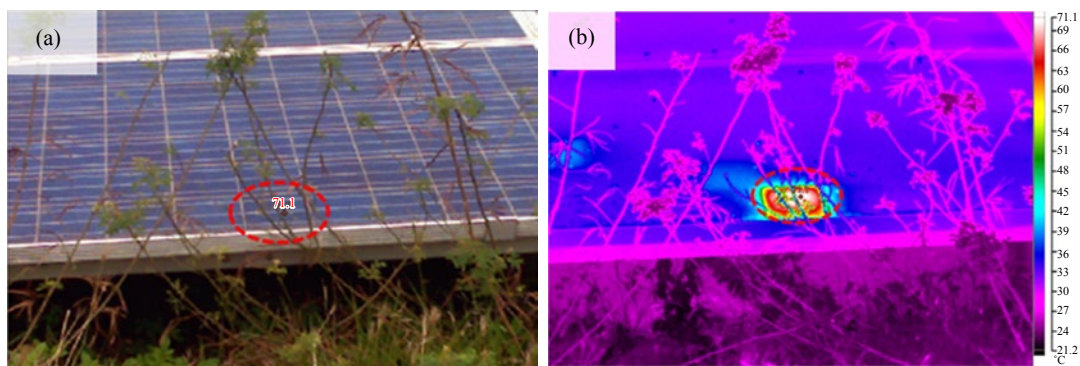
1. 全電池模組遮陰影響探討

(1) 太陽能模組小面積遮陰

圖四為太陽能模組小面積遮陰之熱影



▲圖三 (a)全電池模組電路排列圖；(b)半切模組電路排列圖⁽⁸⁾



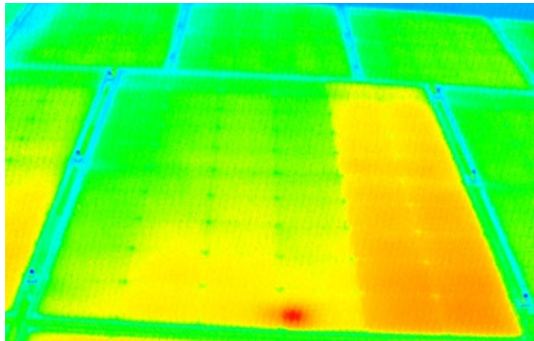
▲圖四 (a)全電池太陽能模組植物小面積遮陰，旁路二極體不會導通；(b)熱影像檢查結果（彩圖請見材料世界網）

像檢查結果。因為遮陰造成電阻較小，旁路二極體不會導通，局部區域會造成比模組平均溫度多 7°C 以上的高溫。太陽光電模組長期處於熱異常，將加速模組封裝材與背板的老化，如熱氧化劣化或黃化等現象，這將增加模組焊點與電氣連接點開路

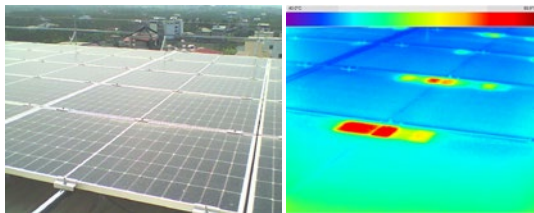
風險，嚴重可能發生電弧高溫失效。

(2) 太陽能模組大面積遮陰

圖五為太陽能模組大面積遮陰的熱影像檢查結果。原本開路狀態的旁路二極體變成導通狀態，犧牲了異常電池串的 $1/3$ 電壓，從而將過大的電流導向旁路，影響到



▲圖五 全電池太陽能模組大面積遮陰，旁路二極體會導通，其熱影像檢查結果（彩圖請見材料世界網）



▲圖六 半切模組小面積遮陰之熱影像檢查結果（彩圖請見材料世界網）



▲圖七 半切模組因大面積遮陰之熱影像檢查結果（彩圖請見材料世界網）

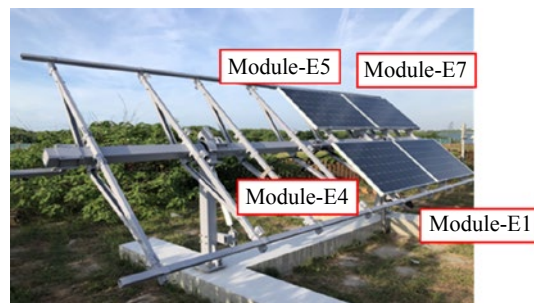
整個串列的電壓表現。而接線盒因為旁路二極體的長期短路，可能造成旁路二極體損壞與接線盒變形。

2. 半切模組遮陰影響探討

圖六與圖七為太陽能模組小面積與大



▲圖八 風車柱環境安裝

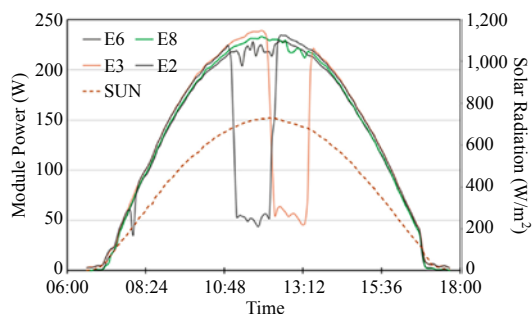


▲圖九 候鳥棲息地安裝

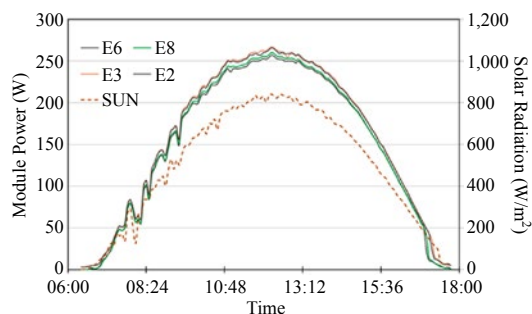
面積遮陰的熱影像檢查結果。太陽能模組遮陰不易造成旁路二極體導通，因為並聯兩個小光電模組，半邊遮陰都會讓電流走向另一邊電池串列。雖然功率損失較傳統全電池片少，但是大電流移動路徑會對不匹配（缺陷多）的電池片產生逆向電流，引起發熱，造成熱異常，如果再限制電流流動，將容易導致熱失控效應，嚴重將會出現燃燒現象。

(1) 全電池太陽光電模組遮陰實驗

將太陽光電系統分別安裝於澎湖有風車柱遮陰與靠近海邊候鳥棲息地的環境，如圖八與圖九所示，並使用AP System優化器進行每片模組的最大功率追蹤，進一步比較不同型態遮陰對太陽光電系統的影響。



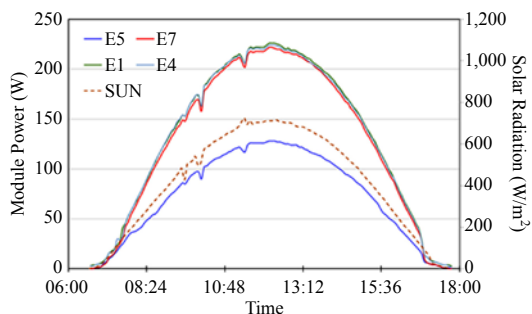
▲圖十 風車柱環境2021/1/13太陽光電模組發電情形 (彩圖請見材料世界網)



▲圖十三 風車柱環境2021/2/18太陽光電模組之發電表現 (彩圖請見材料世界網)

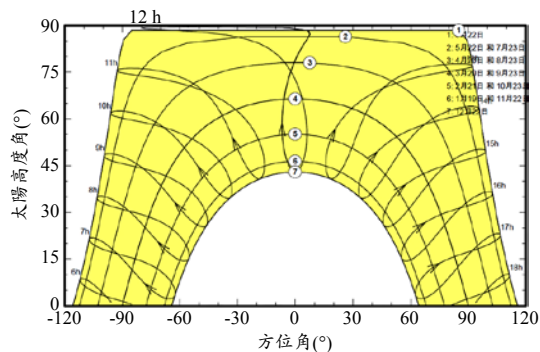


▲圖十一 風車柱遮陰下太陽光電模組之情形



▲圖十四 候鳥棲息地2021/1/15太陽光電模組發電情形 (彩圖請見材料世界網)

Xingya, (Lat. 23.5760° N, long. 119.5852° E, alt. 10 m) 的太陽路徑-法定時(LT)



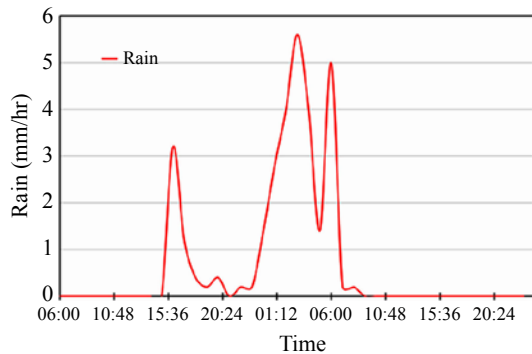
▲圖十二 以PVsyst模擬安裝地點太陽軌跡圖



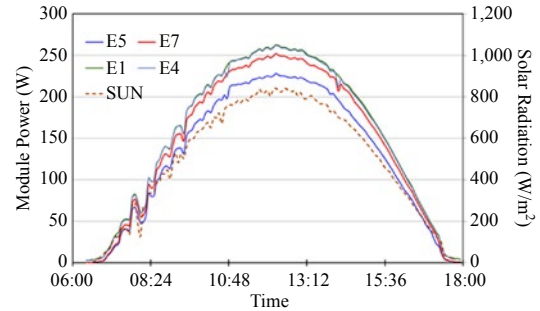
▲圖十五 候鳥棲息地太陽光電模組受到鳥糞侵害

比對風車柱環境發電數據，如圖十所示，其中E2與E3模組在2021年1月1日~2月7日區間，近中午約有1小時發電衰退50%~75%，觀察月平均發電衰退3%~4%，

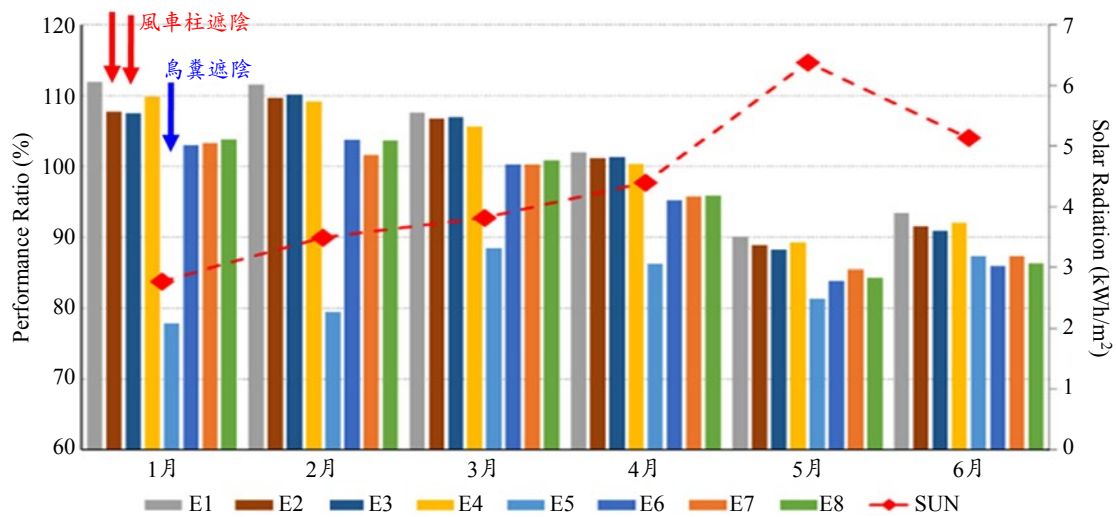
判定為現場風車柱遮陰所致，如圖十一所示。由圖十二可見，因為太陽軌跡每日持續移動下，從1月到2月太陽高度角上升，風車柱的陰影變短，已經不影響模組發



▲圖十六 2021/2/10~2/11氣象站降雨紀錄



▲圖十七 候鳥棲息地2021/2/18太陽光電模組發電情形 (彩圖請見材料世界網)



▲圖十八 2021年1月至6月太陽光電模組月性能比 (彩圖請見材料世界網)

電。如圖十三所示，太陽光電模組發電不受風車柱環境遮陰。

比對候鳥棲息地發電數據，如圖十四所示，其中E5模組在1月15日~2月9日區間整體發電衰退50%，比對現場環境，發現是鳥糞沉積，造成遮陰效應(Shading Effect)，如圖十五所示。從氣候監測平臺觀察在2月10日~2月11日持續降雨後，如圖十六所示，發電回復約90%，如圖十七所示。

一般太陽光電系統會因為串列中部分模組局部遮陰，導致系統整體電流輸出下降，進而影響發電效率。因為本實驗使用的是最大功率點追蹤(Maximum Power Point Tracking; MPPT)優化器，所以每片模組可以個別最大功率追蹤。從每片模組的月性能比可以看出模組在不同遮陰條件下的發電影響，其中鳥糞的持續遮陰是影響模組性能最多的，如圖十八所示，為2021年1月



▲圖十九 半切模組，下半部分遮陰試驗

至6月太陽光電模組月性能比。

(2) 半切模組遮陰實驗

將半切模組安裝於台南六甲追日系統，以人工遮陰不同條件方式，如圖十九至圖廿一所示，並使用SEAWARD PV200進行每片模組與串列的IV曲線量測，進一步比較不同型態遮陰對太陽光電系統的影響。

比對單片模組遮陰測試，如圖廿二與圖廿三，分成七種情境來討論：

①無任何遮陰：模組開路電壓為39 V，短路電流為11 A，發電功率達325.8 W。



▲圖廿 半切模組，大面積遮陰試驗

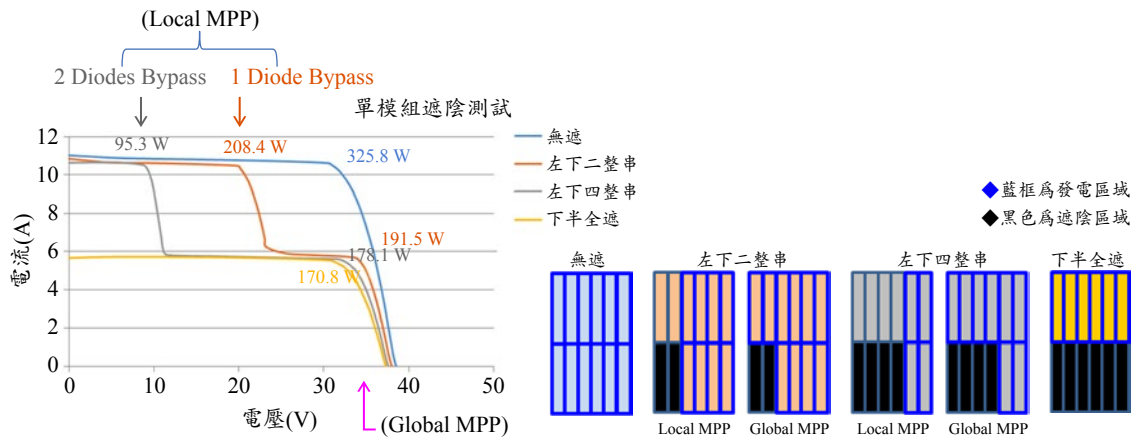


▲圖廿一 半切模組，下半部分遮陰試驗

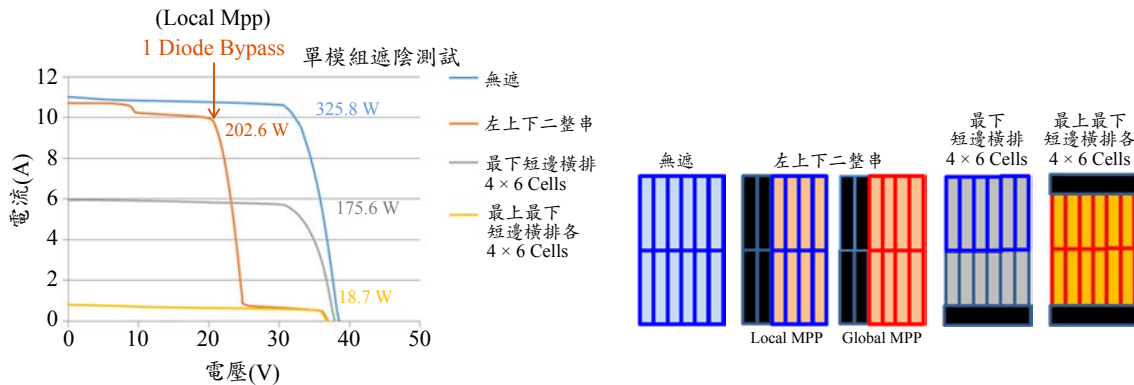
②遮陰左下兩個串列：P-V曲線出現兩個最大功率點，分別測得發電功率達到191.5 W與208.4 W，功率損失達36%~41%。

③遮陰左下四個串列：P-V曲線出現兩個最大功率點，分別測得發電功率達到95.3 W與178.1 W，功率損失達45%~71%。因兩個旁路二極體短路影響上半部正常的電池串無法正常輸出，造成局部最大功率點下降較多。

④遮陰下半部全部串列：全域的最大功率值達170.8 W，功率損失達48%，其開路電壓小幅下降，而短路電流幾乎減半為5.9 A。



▲圖廿二 半切模組，下半部分遮陰試驗（彩圖請見材料世界網）



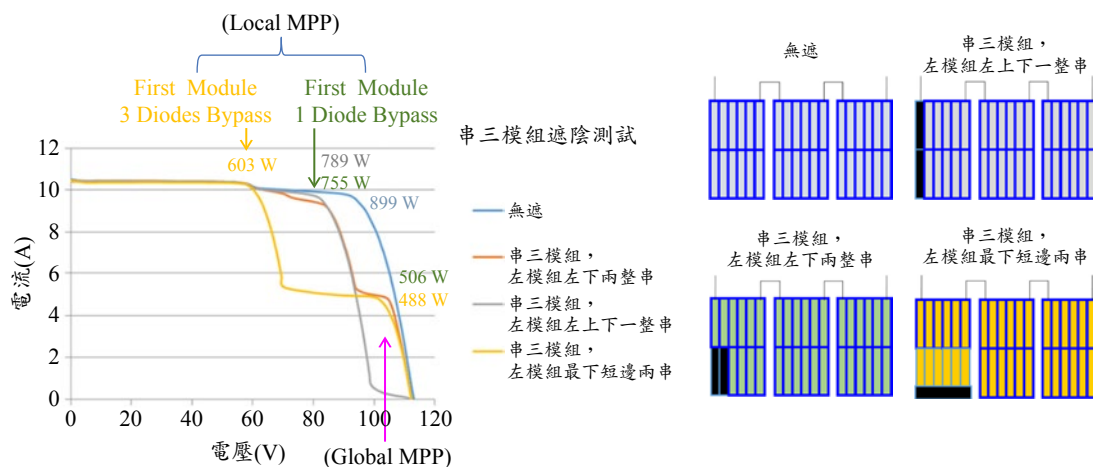
▲圖廿三 半切模組，大面積遮陰試驗（彩圖請見材料世界網）

- ⑤遮陰左上與左下各兩個串列：一個旁路二極體短路，全域的最大功率值達202.6 W，功率損失達38%。
- ⑥遮陰最下排短邊4×6個電池片：其結果與遮陰下半部全部串列接近，全域的最大功率值達175.6 W，功率損失達46%，其開路電壓小幅下降，而短路電流幾乎減半為6 A。
- ⑦遮陰最上與最下排短邊各4×6個電池片：此模組幾乎不發電，僅剩餘18.7 W，功率

損失達94%。

比對三個串列模組遮陰測試，如圖廿四，分成四種情境來討論：

- ①無任何遮陰：模組開路電壓為112 V，短路電流為10.5 A，發電功率達899 W。
- ②遮陰第一片模組的左下兩個串列：P-V曲線出現兩個最大功率點，分別測得發電功率達到506 W與755 W，功率損失達16%~44%。第一片模組的旁路二極體短路，局部的最大功率值較高。若旁路二



▲圖廿四 三片半切模組串列，第一片模組部分遮陰試驗（彩圖請見材料世界網）

極體維持開路的狀況，反而會直接影響到整個串列發電功率。

- ③遮陰第一片模組的左上與下一個串列：模組開路電壓下降為100 V，短路電流為10.5 A，發電功率達789 W，功率損失達12%。
- ④遮陰第一片模組的最下排短邊4 × 6個電池片：P-V曲線出現兩個最大功率點，分別測得發電功率達到488 W與603 W，功率損失達33%~46%。三個旁路二極體短路影響犧牲了電壓，但是有較佳的局部最大功率值。

總 結

一般情況下，當太陽光電模組中某個電池串被遮陰或出現故障而停止發電時，該電池串所並聯的旁路二極體兩端會形成正向偏壓，從原本開路狀態變成導通狀態，犧牲了異常電池串的能量貢獻，從而

將過大的電流導向旁路，因此模組輸出呈多峰值形狀的I-V和P-V電性曲線。現行的系統大都是多片模組串聯在一起，只要其中一片低效或遮陰，都會影響到整個串列的電性表現，而變流器可對應選擇最佳輸出局部最大串列功率值或全域最大串列功率值。

從實驗模組的月性能比可以看出，模組在不同遮陰條件下的發電影響，其中鳥糞的持續遮陰是影響系統性能最多的。而鳥糞因為重力關係會造成長條狀的遮陰熱異常，建議太陽光電系統在候鳥棲息地區避免設計為橫向安裝，且須增加清洗與巡檢頻率，才能提升系統安全性。☞

誌 謝

本研究工作承蒙經濟部能源署研究計畫（契約編號114-S0304）及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。



參考文獻

1. E. V. Paraskevadaki and S. A. Papathanassiou, Evaluation of MPP Voltage and Power of mc-Si PV Modules in Partial Shading Conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 923-932, 2011.
2. K. Morita et al., Correlation between the change of the appearance and reduction in the output power of crystalline Si solar cell modules by outdoor exposure, in *Proceedings of the JSES/JWEA Joint Conference*, pp. 287-290, 2000.
3. D. Uchida, K. Otani, and K. Kurokawa, Evaluation of effective shading factor by fitting a clear-day pattern obtained from hourly maximum irradiance data, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, no. 1-4, pp. 519-528, 2001.
4. J. Appelbaum and J. Bany, Shadow effect of adjacent solar collectors in large scale systems, *Solar Energy*, vol. 23, no. 6, pp. 497-507, 1979.
5. J. Muñoz, E. Lorenzo, F. Martínez-Moreno, L. Marroyo, M. García, An investigation into hot-spots in two large grid-connected PV plants, *Progress in Photovoltaics*, vol. 16, no. 8, pp. 693-701, 2008.
6. A. Woyte, J. Nijs, and R. Belmans, Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results, *Solar Energy*, vol. 74, no. 3, pp. 217-233, 2003.
7. J. C. Arnett and C. C. Gonzales, Photovoltaic module hot spot durability design and test methods, in *Proceedings of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1099-1105, 1981.
8. C. Yebin, B. Jianbo, T. Yunkun and H. Yueting, Performance simulation method of half-cell PV module under shadow shading, in *Renewable Energy Resources*, vol. 42, no. 3, pp. 331-339, 2024.
9. S. Kabir, R. Bansal, and M. Nadarajah, Effects of partial shading on Photovoltaic with advanced MPPT scheme, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Power and Energy, PECon 2012*, 02-05 December 2012, Kota Kinabalu, Malaysia.
10. R. Ramaprabha and B. L. Mathur, MATLAB Based Modeling to Study the Influence of Shading on Series Connected SPVA, in *Proceedings of the 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2009*, 16-18 Dec. 2009, Maharashtra, India.
11. S. Jain and V. Agarwal, A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems, *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2, no.1, pp. 16-19, 2004.
12. K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, and A. Shamsudin, Maximum Power Point Tracking for PV System Under Partial Shading Condition via Particle Swarm Optimization, in *Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Colloquium, IAPEC 2011*, 18-19 April 2011, Johor Bahru, Malaysia.
13. L. Gao, R. A. Dougal, S. Liu, and A. P. Iotova, Parallel-Connected Solar PV System to Address Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1548-1556, 2009.
14. Y. J. Wang and P. C. Hsu, Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules, *Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 3, pp. 272-282, 2010.
15. A. S. Masoum, F. Padovan, and M. A. S. Masoum, Impact of Partial Shading on Voltage- and Current-based Maximum Power Point Tracking of Solar Modules, in *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 25-29 July 2010, Minneapolis, USA.
16. H. Patel and V. Agarwal, MATLAB based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, 2008.
17. A. Pattanaphol, S. Khomfoi, and P. Paisuwanna, Z-Source Grid-Connected Inverter for Solving the Photovoltaic Cell Shading Problem, in *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2010*, 19-21 May 2010, Chiang Mai, Thailand.
18. A. Mäki and S. Valkealahti, Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 1, pp. 173-183, 2012.
19. S. Moballegh and J. Jiang, Partial shading modeling of photovoltaic system with experimental validations, in *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 24-28 July 2011, Detroit, USA.
20. T. Esram and P. L. Chapman, Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.