



太陽光電系統的檢查技術

宋洪義/ 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 工程師

本實驗室於111年完成20場次的太陽光電案場檢查，發現大部分的維運商僅採用監控程式確認系統是否正常運轉，或於現場目視檢查變流器是否正常運轉；大部分未進行電性量測，或無直流匯線箱可供檢查電性，即使能在現場量測電性但卻無法進行數據分析。綜合上述原因，制訂太陽光電系統維運技術參考手冊提供太陽光電系統相關業者用於系統維運檢查。手冊內容大致包含：電性量測分析計算、性能比分析、現場檢查步驟與注意事項，以下分別說明與介紹：

1. 電性量測分析計算

太陽光電系統於維運期間，進行現場電性量測，包含開路電壓、運轉電流測試，因為電壓(式1)與電流(式2)會隨天氣狀況而一直改變，如無採用IEC 60891中要求對電性溫度與日照修正，則量測數據無法有效分析系統的健康程度以及髒污程度。

A. IEC 62446-1開路電壓測試：

確認模組串列安裝的正確性，以開路電壓計算模組串接數量，以確認內部連接是否有失效疑慮。將正負極斷開，量測每一組正與負的電壓，並依據量測串列電壓依據當下對應串列太陽能模組背面溫度，並將量測開路電壓修正至標準狀態，在與期望值比對誤差，可用來分析串列電壓變化，如系統有光老化或衰退，則會反映在開路電壓上。目前業界有些維運商採用變流器電壓來做監測分析，本實驗室不建議原因為無法有效了解單串列的電性，且串列並聯後，異常的串列電壓無法有效立即判斷分析。

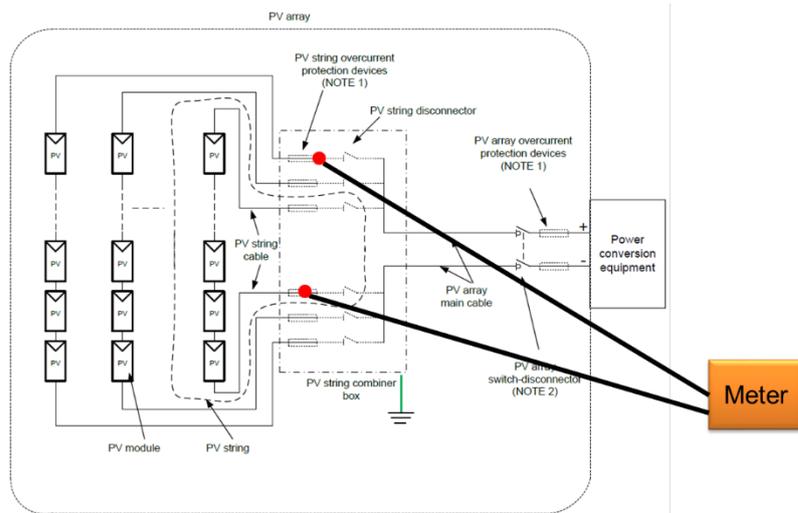


圖 1、開路電壓測試示意圖

B. IEC 62446-1 電流測試：

測試主要目的為確認串列中是否有重大失效、異常、遮陰。依據規範測試方式為短路電流與運轉電流兩種測試方式，本實驗室建議採用運轉電流量測方式，雖然此方式容易被變流器調變影響量測數值，但是短路電流量測需於現場做短路再進行量測，斷路期間引線與安裝，對於系統與人員都危險性較高，因此此項測試建議採用電流勾表方式進行運轉電流量測，如有兩個以上量測儀，需同時做多組量測方式，可以避免天氣條件狀況所產生誤差，且同步於量測期間要量測日照量，以便做標準狀態回推計算分析。於電流量測與熱影像檢查時，建議太陽光電系統需先做清洗，否則量測數據會因為髒污或遮蔽，影響量測結果與數據判定。

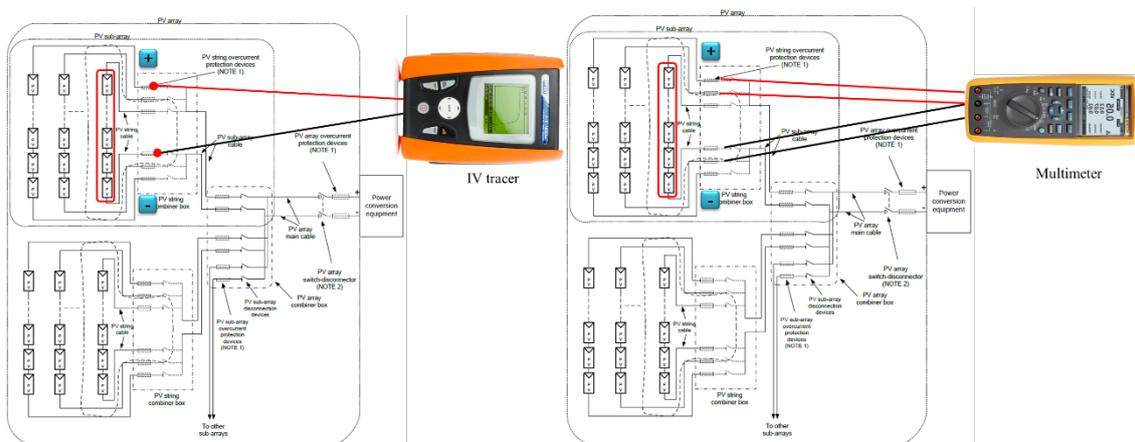


圖 2、運轉電流測試示意圖

C. IEC 60891 對於電壓、電流將量測值回推至標準狀態之計算方式：

量測前須有串列單線圖、太陽能模組規格書，依據單線圖對照量測



串列的太陽能模組片數，太陽能模組規格書中查詢開路電壓溫度系統，一般規格書中開路電壓溫度係數單位為%/°C，需將此單位除100乘上開路電壓後，可將單位%/°C轉為 $V_{oc}/^{\circ}C$ ；量測太陽模組背溫，需選擇對應串列具有代表性的模組，選擇到的模組在採用接近中間的太陽能電池中間，再貼附熱電偶溫度線。

(A) 電壓修正方式：

$$V_2 = V_1 + n * \beta * (25 - T_1) \quad \text{-----式1}$$

其中：

V_1 :現場量測開路電壓

T_1 :太陽能模組背板溫度

n :單串列太陽能模組數量

β :開路電壓溫度係數($V_{oc}/^{\circ}C$)

(B) 電流修正方式：採用直流勾表量測每個獨立串列的電流，如果現場在陣列中採用多轉一的方式(圖2)，則運轉電流無法有效量測單串運轉電流，建議直流電源線不採用此方式配置，並聯運轉中串列、變流器MPPT會有阻抗與電性不匹配，會導致串列之間順向偏壓，除了影響發電性能，也會影響系統安全，系統維運也無法有效檢查。

$$I_2 = I_1 * \frac{1000}{G_1} \quad \text{-----式2}$$

其中：

I_1 :現場量測電流值

G_1 :現場量測日照量(W/m^2)

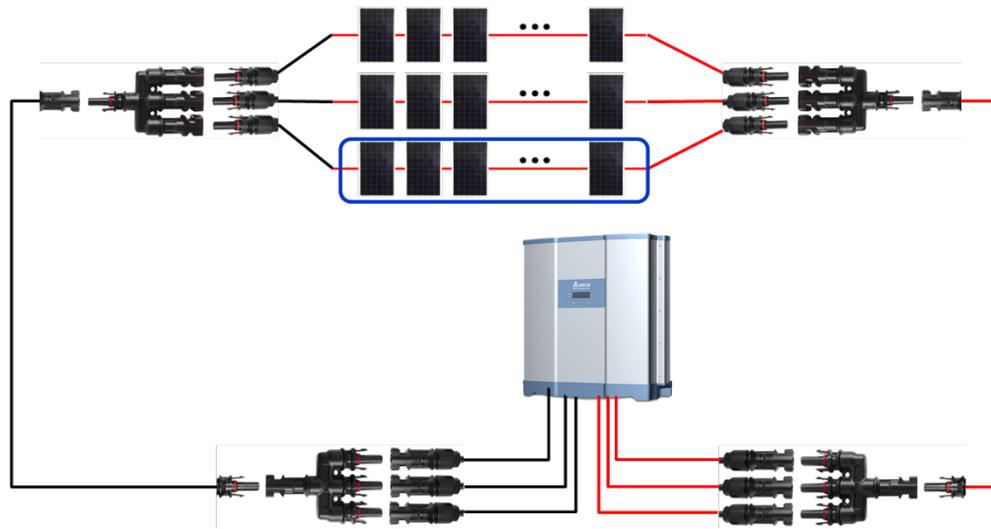


圖 3、多轉一線路串併配置方式

2. 性能比分析

截至2021年4月統計，PV系統案件數已達約37,986個，其裝置容量約有8 GWP左右，顯見於維運上如何判別案場健康程度，需有一套完整流程來進行，本實驗室特別針對國際標準規範IEC 61724-1:2017，說明其性能比分析，採用各案場監測資料進行計算與統計變化，可用來有效判斷案場健康程度以及髒汙狀態。於IEC 61724-1中第10.3章節，對於性能比定義與公式，共分為四個公式(表2)，因為針對維運需求，性能比計算無法依據規範中要求，至少一年為一個週期進行分析；但是在Performance ratio(以下簡稱性能比)中，可以自訂分析期間的長短。作者建議不要採用逐時、逐日方式計算，因為當日照偏低(例如氣候不佳)時，性能比計算會偏低，主要原因為日照累積量為分母，因此日照於量測上會產生些微誤差，導致整個性能比變化很大。以一年為一個週期計算為Annual PR，有些區域一年四季分明，如採用每一季計算PR，會與環境溫度有關。為了避免季節影響環境溫度，因此採用兩種溫度修正計算PR，第一種是每筆發電量對應PV背板溫度修正至標準狀態，此方式稱為STC-temp. PR；另一種為監測期間PV背板平均溫度，與每筆PV背板溫度修正Annual-temp.-equivalent PR。以表2逐一說明公式定義與計算要求。

表1、截至2021年4月太陽光電系統裝置容量

Parameter	Symbol	Units
Rating-based (10.3)		
Performance ratio	PR	None
Annual performance ratio	PR_{annual}	None
Annual-temperature-equivalent performance ratio	$PR_{\text{annual-eq}}$	None
STC-temperature performance ratio	PR_{STC}	None



A. Performance ratio(性能比)：此方式計算週期建議至少以一星期、一個月、一季、半年以及一年為單位，不建議以一天以內當一個週期計算，因為會導致經常性誤判，而無法正確判斷PV系統健康狀態/是否失效。

$$PR = \left(\frac{\sum_k \frac{P_{out,k} * \tau_k}{P_0}}{\sum_k \frac{G_{i,k} * \tau_k}{G_{i,ref}}} \right) \text{-----式3}$$

其中：

- τ_k 為取樣區間時間
- $P_{out,k}$ 為交流輸出功率
- P_0 太陽光電系統設置容量
- $G_{i,k}$ 為與太陽光電系統共平面日照強度
- $G_{i,ref}$ 為標準狀態下日照強度1000 W/m²

B. Annual performance ratio(全年性能比)：以式3計算數據，紀錄週期為一年，此方式建議於每年PR計算分析比對使用。

C. Annual-temperature-equivalent performance ratio(對全年模組平均溫度修正性能比)：此方式建議於監測期間，取得有效PV模組背溫平均(式5)，再用平均背溫修正每筆當時PV背溫，在此所謂有效指的是當日照大於20 W/m²時，此時視為白天的開始，當日照低於20 W/m²時視為晚上，之後監測數據視為無效。

$$PR'_{annual - eq} = \left(\frac{\sum_k \frac{P_{out,k} * \tau_k}{C_k * P_0}}{\sum_k \frac{G_{i,k} * \tau_k}{G_{i,ref}}} \right) \text{-----式4}$$

其中：

- $C_k = 1 + \gamma * (T_{mod,k} - T_{mod,avg})$ -----式5
- γ 為最大功率的溫度係數(1/°C)
- $T_{mod,k}$ 為取樣區間太陽能模組溫度(°C)
- $T_{mod,avg}$ 為全年太陽能模組平均溫度(°C)

D. STC-temperature performance ratio(對標準狀態溫度修正性能比)：此方式建議於監測期間，取得每筆有效PV模組背溫，再用背溫修正至25°C(式7)，在此所謂有效指的是當日照大於20 W/m²時，此時視為白天的開始，當日照低於20 W/m²時視為晚上，之後監測數據視為無效。

$$PR'_{STC} = \left(\frac{\sum_k \frac{P_{out,k} * \tau_k}{C_k * P_0}}{\sum_k \frac{G_{i,k} * \tau_k}{G_{i,ref}}} \right) \text{-----式6}$$

其中： $C_k = 1 + \gamma * (T_{mod,k} - 25)$ -----式7

- ┌ γ 為最大功率的溫度係數(1/°C)
- └ $T_{mod,k}$ 為取樣區間太陽能模組溫度(°C)

3. 現場檢查步驟

建議於現場檢查時，可以先透過性能比分析，初步分析電廠發電狀況，如遇到性能比下降很多狀況，除了應立即安排至現場電性量測、熱像儀檢查、巡檢檢查等，也可依據性能比與熱影像狀況，來核對電性量測結果，如此可有效分析案場可能對應失效模式，也能有效針對失效進行改善與維護，因此建議至案場現場檢查步驟，其順序為熱影像、電性量測、現場目視檢查巡檢。

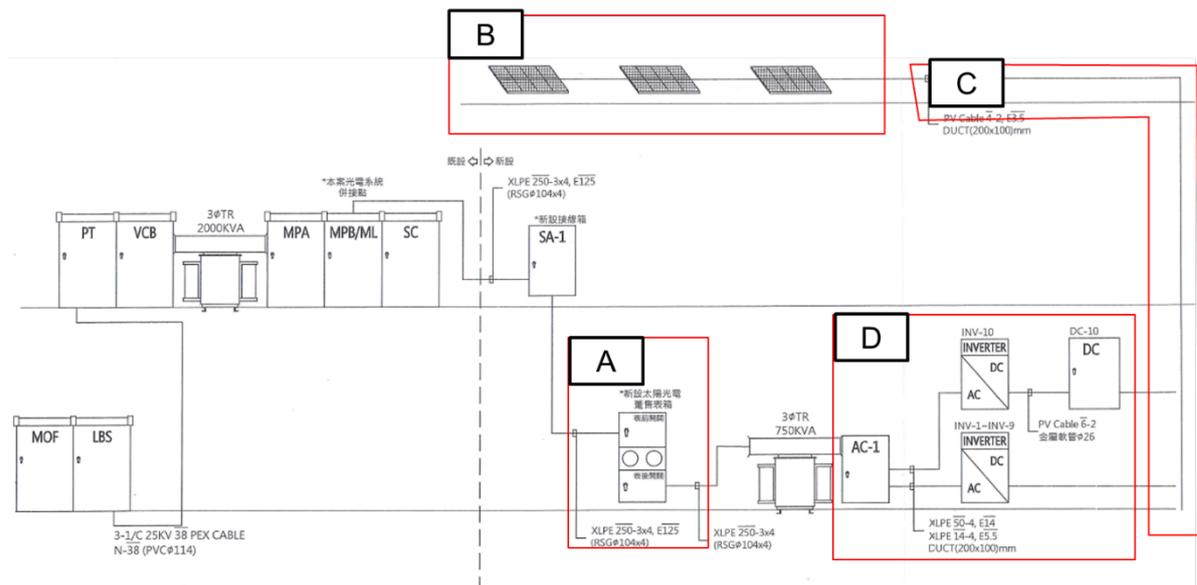


圖 4、多轉一線路串併配置方式

A. 熱影像檢查包含：先對表前與表後開關箱進行檢查，其原因為此箱體通常為於案場外面，且熱影像檢查是採用不斷電方式，因此建議至現場應先針對表前與表後開關箱檢查；然後再至案場太陽能模組、直/交流箱體檢查。而對表前與表後開關箱、太陽能模組、直/交流箱體，分別說明如下：

(A) 表前與表後開關箱(圖4中A區)：

採用紅外線檢查，目前市面上選用箱體為室外型，但是進線孔未有效密封，若鄰近海邊或畜禽舍，則空氣中存有腐蝕性氣體，長久存在箱

體內，加上大電流通過，金屬處於高溫下，會加速與空氣中腐蝕氣體、氧氣、水氣的化學變化而老化，又因表前開關箱維責任分界點，所以台電會於箱體外上封籤，如案場位於高腐蝕環境，目前國內於表前開關箱中鋸刀燒毀的案件非常多，因此建議定期須向各區處台電申請剪開封籤，並進行熱影像檢查，如果發現鋸刀開關有熱異常，則應向台電申請停電後進行維護保養與清潔，並加強箱體氣密性，如保養後依然有熱異常存在，則需更換新的鋸刀開關，避免日後因金屬老化斷開，而產生電弧發生火災。

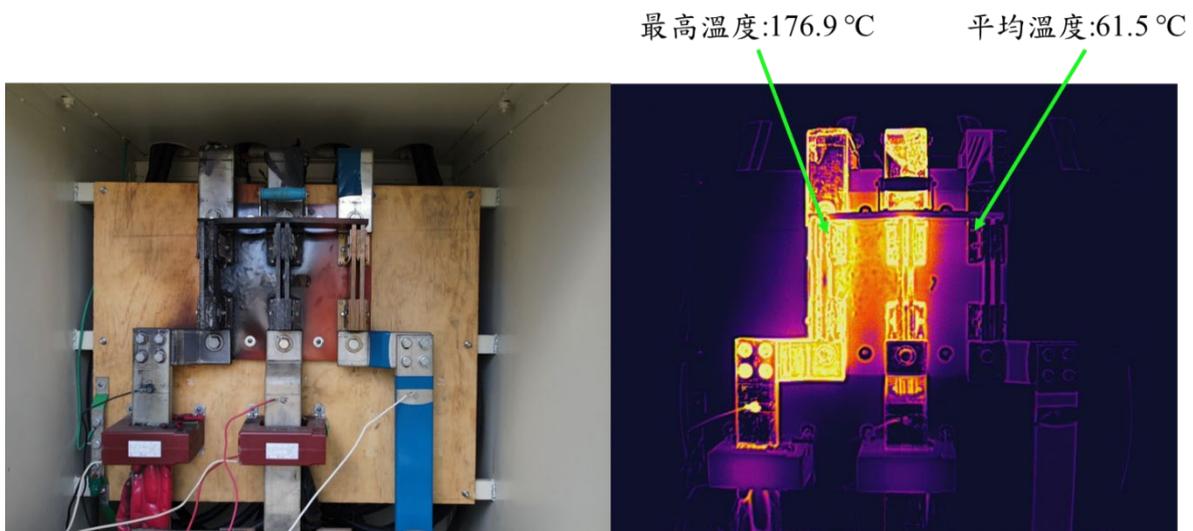


圖 5、鋸刀開關熱影像檢查

(B) 太陽能模組(圖4中B區)：

在電性檢查前，建議針對太陽能模組劑型熱影檢查，目前市上空拍機搭載熱影像的設備已經非常成熟，所以建議可以採用空拍熱影像方式檢查，檢查前建議須將太陽光電系統清洗，可有效排除髒汙遮蔽等因素，而熱影像檢查主要針對串列開路、短路、旁路二極體異常來找出熱異常區域，串列開路除了影響發電性能，也有可以現場直流連接器鬆脫導致，或者串列保險絲熔斷，如圖6中看到單片太陽能模組有旁路二極體啟動，則建議必須更換此片太陽能模組，因為旁路二極體無法長時間通過電壓電流，恐會高溫導致熔斷，而產生直流電弧(圖8)；如看到類似圖7熱異常，此類型為串列有線路短路，此安全性非常低，須立即停機並檢查短路線路；如看到類似圖8熱異常，此類型為旁路二極體燒毀，導致單片線路異常，此安全性非常低，須立即停機並更換對應失效太陽能模組。

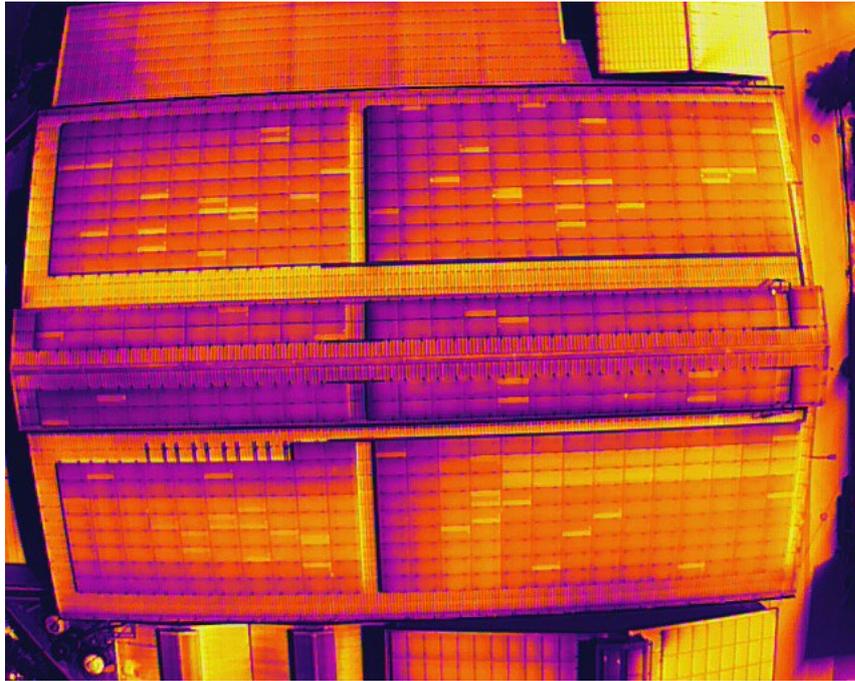


圖 6、串列開路、旁路二極體啟動

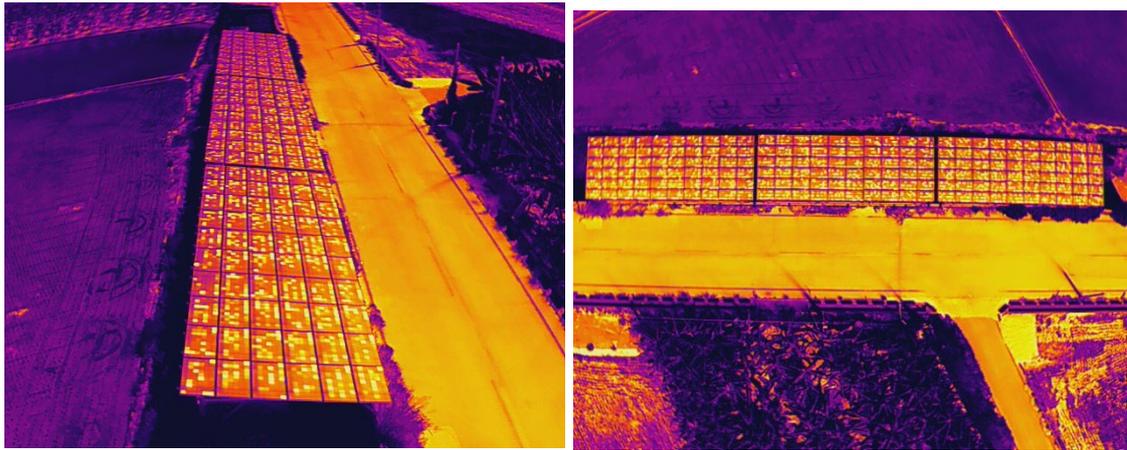


圖 7、串列短路

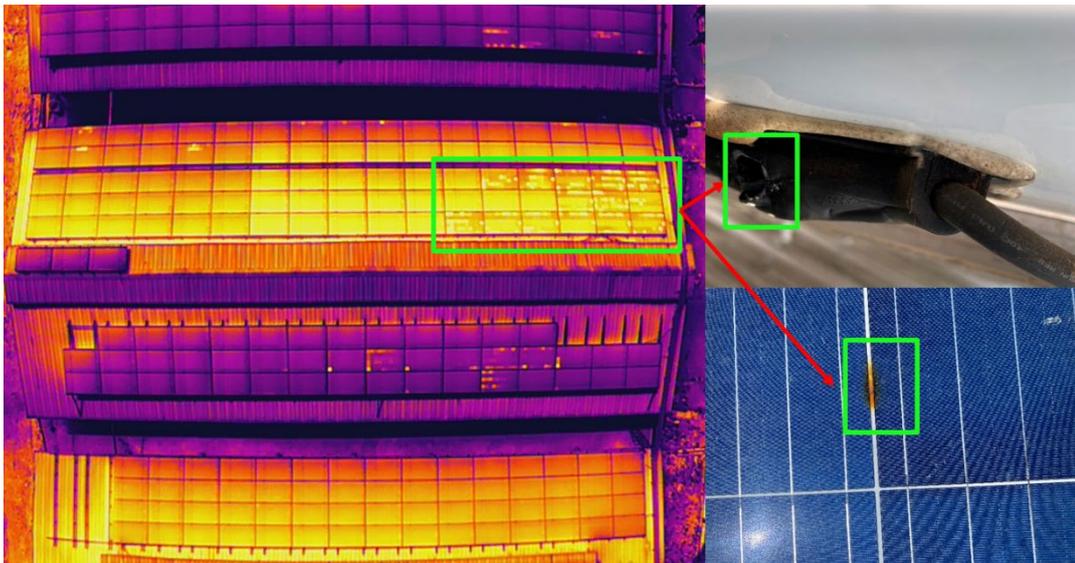


圖 8、旁路二極體電弧導致短路

(C) 直/交流箱體(圖4中D區)：

於每次維運時，需將直、交流箱體，採用熱影像檢查，避免有線路、端子、金屬腐蝕導致熱異常，發現如圖9熱異常，則須將線路重新配置，避免應力太大導致線路熱異常而熔毀；如圖10中熱異常，則為端子鬆脫產生高溫，如不處理則可能產生直流電弧燒毀，發現此熱異常，須立即將案場所有端子都須重新確認鎖固，以及採用熱像儀再次檢查。

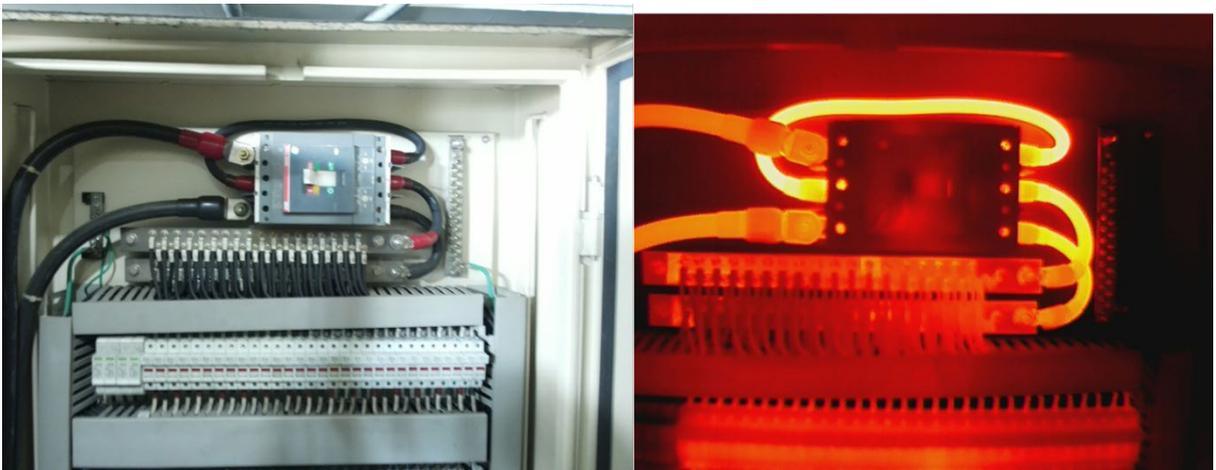


圖 9、線路存在應力而熱異常

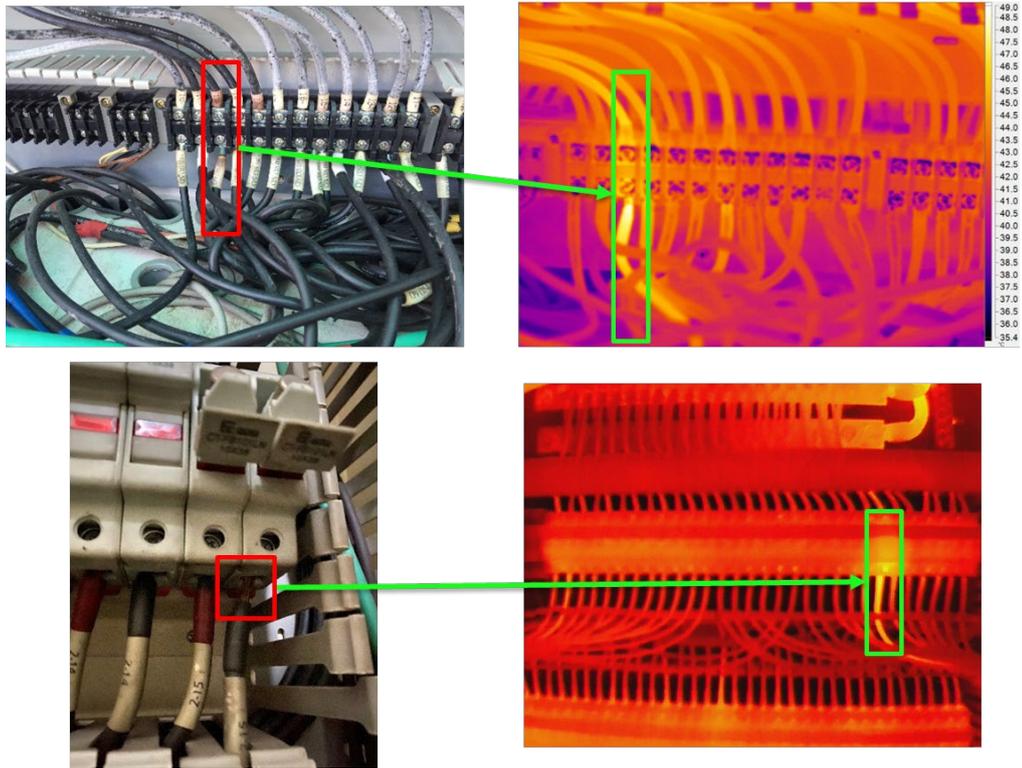


圖 10、端子台鎖固鬆脫



圖 11、無熔絲開關熱異常

- B. 電性量測：現場量測開路電壓、運轉電流(依據IEC 62446-1要求)，並配合熱影像檢查結果作對應，如熱異常如圖7與圖8，則對應運轉電流比正常運轉偏低，甚至為零，如運轉電流為零且量測不到開路電壓，則線路存在短路；如圖8中有旁路二極體啟動，則對應開路電壓量測，對應熱影像每一個旁路二極體啟動，則量測修正至標準狀態下，會少三分之一的開路電壓(太陽能模組標籤值)。
- C. 現場目視檢查：案場現場與最後採用目視檢查，針對箱體氣密性與動物是否入侵、線孔氣密性、電位差腐蝕、遮陰巡檢，如發現有動物入侵或

動物糞便(圖12)，則應加強箱體氣密性，以降低壁虎、蜘蛛等因素，導致三相電性導通不平衡；如發現圖13、圖14於運轉電流中會發現電流比正常運轉偏低，但是熱影像無明顯線路開路或短路，則可能為遮陰嚴重，尤以圖14將太陽能模組端邊朝下，加上傾斜角度不高，且環境沙塵嚴重，會導致運轉電流下降很明顯。

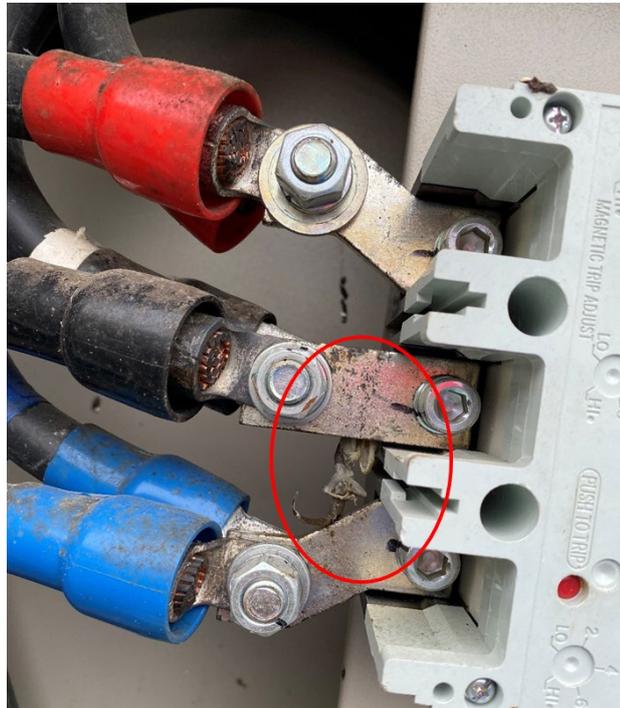


圖 12、動物入侵



圖 13、遮蔽與遮陰



圖 14、堆沙堡

4. 結論：

國內太陽光電系統的建置與維運，可說同等重要，要經營多處案場與長時間的安全運作，除了案場的良好系統規劃與設計、太陽光電元件的選用、施工品質必須要求外，更需有一套完善的太陽光電系統維運管理與維護，才能夠降低案場失效風險，以及有效提升系統可靠度與安全性。因此提出太陽光電系統維運技術參考手冊(草案)，希望以本實驗室的系統健檢經驗與國際標準，來提供國內未來太陽光電系統維運及檢查技術之參考。本實驗室以訪查過程，了解躉售案場設置之常見失效，與檢查過程中提供技術交流，後續並提供健檢檢查報告，以協助業者了解後續維運檢查方式，以及針對持有案場進行改善，並提供國內常見系統火災事故失效原因與對應解決方案，作為民眾與廠商未來設置太陽光電系統參考，提升國內太陽光電系統之品質。