



太陽光電系統性能比簡介

Introduction of PV System Performance Ration

宋洪義 H. Y. Sung¹、黃朝揚 C. Y. Huang²、林福銘 F. M. Lin³
工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹工程師、²經理、³正研究員/組長

摘要/Abstract

太陽光電系統於竣工驗收中，一般採用直流發電比(RA)。本文將針對太陽光電系統性能分析，說明RA與性能比(PR)之差異。2016年國際標準組織頒布IEC 61724系列規範，包含IEC 61724-1為監測元件規格、數據讀取與程式紀錄、公式定義；IEC TS 61724-2為短期性能比分析，至少需有兩天以上穩定數據進行計算與分析，此技術規範適合於竣工驗收使用；IEC TS 61724-3為長期性能比分析，數據取樣至少以一年為一個週期，適合系統維運或電廠評鑑使用。

An acceptance test for PV system usually uses RA test. This article focuses on comparing the difference of RA and PR. The test method is based on IEC 61724 series standards promulgated by International Standards Organization in 2016. IEC 61724-1 outlines equipment, methods and terminology for performance monitoring and analysis of PV systems. IEC TS 61724-2 defines a procedure for measuring and analyzing the PV system performance (relatively short time period). IEC TS 61724-3 should be used for long-term performance testing of PV systems (preferably one year).

關鍵字/Keywords

性能比(Performance Ratio; PR)、太陽光電系統(PV System)、監測(Monitoring)



前言

政府規劃2025年再生能源發電占比為20%，其中太陽光電(PV) 2025年規劃設置目標量為20 GW。近年尤以大型地面PV系統電廠日益增多，諸如：奇美善化15 MW_p、艾貴義竹70.2 MW_p、台電彰濱100 MW_p以及2021年中興電工七股198 MW_p。為因應大型PV電廠竣工需求，同時也能符合國際標準規範依據進行性能分析與評估，有關適用於大型PV電廠竣工驗收、系統維運以及電廠評鑑使用的技術規範，同步受到重視。

至今PV系統竣工驗收方式，大多沿用早期五個項目，分別為開路電壓、運轉電流、接地連續性、絕緣測試、直流發電比(RA)。國際標準組織於2016年針對電性與安規頒布了IEC 62446-1，竣工驗收項目應增加為測試範疇一的七個測試項目(表一)；RA部分因無對應標準規範，應依據IEC 61724系列規範，改為性能比(Performance Ratio; PR)驗收較為適宜。

直流發電比(RA)介紹

①公式定義：

$$RA = \frac{\frac{\text{量測串列功率}(W)}{\text{串列設置容量}(W)}}{\frac{\text{共平面日照}(W/m^2)}{1,000 W/m^2}} \quad (1)$$

②由式(1)可以將公式演變為式(2)，將RA看成量測串列功率修正至照度1,000 W/m²與串列設置容量的比值，因此對於量測時太陽能模組溫度，並無將此因素列入考量。而風速與設置方式會影響串列運轉時的工作溫度，例如：平貼(圖一)串列溫度一般約70~80°C，開放式(圖二)串列溫度一般約50~60°C，如果採用一樣廠牌型號太陽能模組，則不同配置方式串列溫度就會不同，也導致RA值的驗收會在不同發包設計規範有所不同。

$$RA = \frac{\frac{\text{量測串列功率}(W)}{\text{共平面日照}(W/m^2)} \times 1,000 W/m^2}{\text{串列設置容量}(W)} \quad (2)$$

▼表一 IEC 62446-1測試範疇一之檢驗項目

測試範疇一(Test Procedures – Category 1)
• 接地連續性(Continuity of Protective Earthing and Equipotential Bonding Conductors)
• 極性測試(Polarity Test)
• 太陽光電系統串列直流匯線箱測試(PV String Combiner Box Test)
• 太陽光電系統串列—開路電壓量測(PV String – Open Circuit Voltage Measurement)
• 太陽光電系統串列—電流量測(PV String – Current Measurement)
• 功能測試(Functional Tests)
• 太陽光電系統陣列絕緣測試(PV Array Insulation Resistance Test)



圖片來源：<https://www.freeroof.com.tw/uncategorized/illegallybuilt/>
(2019/11)

▲圖一 平貼式PV系統



圖片來源：<https://e-info.org.tw/node/215880> (2019/01)

▲圖二 開放式PV系統

③RA無對應國內規範或國際標準規範，且式(1)中量測串列功率無定義量測環境條件、異常數據篩選方式，因此天氣條件會導致RA量測重現性與再現性較差，主要原因為量測時環境風速，因為瞬間風速會導致串列溫度變化有5~10°C甚至更大，無法有效取得穩定的串列溫度，就會讓量測串列功率變異大，導致RA量測的不確定大又難有效呈現數據正確性與參考性。

④以往的竣工驗收已經不敷所求，且近期已經有對應規範可以依循，於設計發包規範之驗收條件中，如有針對系統性能

要求檢測驗收，將依據IEC 62446-1:2016測試範疇一(表一)，以及IEC TS 61724-2採用短期性性能比方式進行較為適宜。

性能比(PR)介紹

依據IEC 61724-1性能比公式共有四種，定義分別說明如下。

①性能比(Performance Ratio)：

$$PR = \left(\frac{\sum_k \frac{P_{out,k} \times \tau_k}{P_0}}{\sum_k \frac{G_{i,k} \times \tau_k}{G_{i,ref}}} \right) \quad (3)$$

其中： τ_k 為取樣區間時間； $P_{out,k}$ 為交流輸出功率； P_0 為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1,000 W/m²。

②全年性能比(Annual Performance Ratio)：為式(3)數據紀錄，週期為一年。

③對全年模組平均溫度修正性能比(Annual-temperature-equivalent Performance Ratio)：

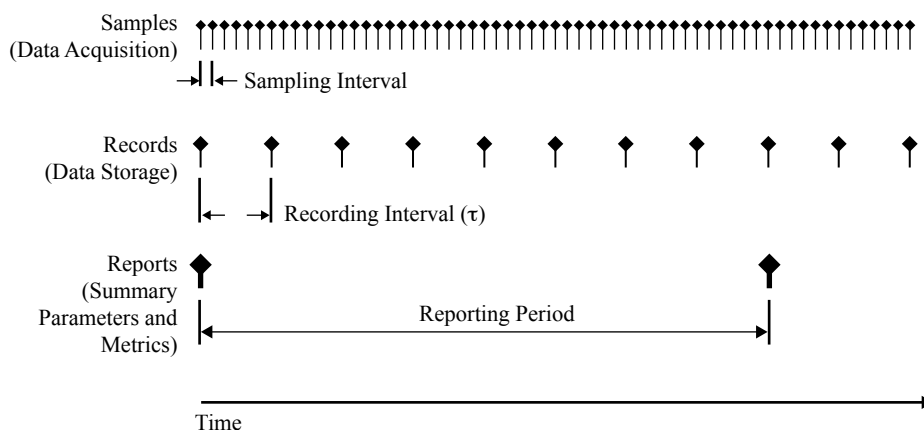
$$PR'_{annual-eq} = \left(\frac{\sum_k \frac{P_{out,k} \times \tau_k}{C_k \times P_0}}{\sum_k \frac{G_{i,k} \times \tau_k}{G_{i,ref}}} \right) \quad (4)$$

其中： $C_k = 1 + \gamma \times (T_{mod,k} - T_{mod,avg})$ (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)。

④對標準狀態溫度修正性能比(STC-Temperature Performance Ratio)：

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



資料來源：<https://www.freeroof.com.tw/uncategorized/illegallybuilt/> (2019/11)

▲圖三 取樣(Samples)、紀錄(Records)、報告(Reports)

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

γ 為最大功率的溫度係數($1/^{\circ}\text{C}$)； $T_{\text{mod},k}$ 為取樣區間太陽能模組溫度($^{\circ}\text{C}$)。

監測系統分類

依據PV系統設置容量，將監測(Monitoring)系統分類為Class A、Class B、Class C三種等級，分別為高精度(High Accuracy)、中等精度(Medium Accuracy)、基本精度(Basic Accuracy)，每個監測系統等級對於數據讀取與紀錄、監測元件規格與數量，都有不同規格要求。

規範中建議大型電廠採用Class A或Class B，對於中小型電廠則採用Class B或Class C等級監測系統。而依據作者經驗則建議以經濟效益來做等級選擇，因為電廠越大且選擇監測等級越高，相對監測元件數量、費用則相對較高，必須視效益考量取決監測等級。如果大型電廠規劃於未來

販售，則建議採用Class A等級進行電廠效能分析；若電廠為了系統運維降低人力費用，則建議採用Class A或Class B等級；若只是小型電廠針對年發電量分析，則建議採用Class C等級。相對等級越低評估的有效性就越低，其分析的數據僅提供參考為主。

因此PV系統要分析性能比則選擇Class A或Class B為主，如採用變流器直/交流資料進行性能比分析，遇到困難處為設備無法校正與數據確認，其分析PR只能參考使用。要對電廠一整年性能發電評估數據做為評分依據，仍建議採用規範要求監測元件或委託第三方單位進行資料擷取與數據分析，因其評估或檢測報告具有較高公信力，對於PV電廠未來買賣也是一份不可或缺的報告。

數據取樣、紀錄、報告要求

於IEC 61724-1中定義了數據取樣(Sam-



▼表二 不同監測等級對應取樣、紀錄、報告要求

		Class A High Accuracy	Class B Medium Accuracy	Class C Basic Accuracy
Maximum Sampling Interval	For Irradiance, Temperature, Wind, and Electrical Output	3 s	1 min	1 min
	For Soiling, Rain, Snow, and Humidity	1 min	1 min	1 min
Maximum Recording Interval		1 min	15 min	60 min

資料來源：IEC 61724-1 (2017/03)

ples)、紀錄(Records)、報告(Reports)，如圖三所示，如此可以定義出一致性的數據取得規格，不會因各家數據讀取與紀錄頻率定義不同，導致數據產生不客觀的擷取，讓分析數據不確定度大，對於PV電廠性能分析就會失去可信度。規範為了統一數據來源，對於不能監測等級數據要求，則依據表二數據，如日照(Irradiance)、PV模組溫度(Module Temp.)、環境溫度(Environment Temp.)、風速(Wind)、電性(Electrical Output)，只有Class A要求取樣頻率為每三秒讀取一次，Class B與Class C則皆為一分鐘讀取一次數據；其他數據如髒污(Soiling)、雨量(Rain)、雪(Snow)、濕度(Humidity)，則取樣頻率皆為一分鐘讀取一次。

量測參數

依據不同監測等級其所需要的監測參數如表三所示。表三中「✓」符號的意思為現場量測，而符號「E」為可採用本地或附近區域氣象、衛星數據。例如Class C監測參數要求為共平面日照、環境溫度、交流輸出功率、交流輸出能量，對於共平面日照、環境溫度可不需現場量測，採用本

地或附近區域氣象、衛星數據；但是對於Class A則皆須現場量測，不得採用本地或附近區域氣象、衛星數據。

對於電廠大小則於表四定義監測元件數量，因此電廠越大監測等級越高，對應的監測成本就較高。例如100 MW_p的PV電廠，於日照計就須包含共平面與水平日照，依據表三得知就需要共八個日照計，且對應日照計規格的成本就大約接近新台幣50~60萬元。因此針對PV電廠要評估性能，則必須以目的來抉擇監測等級。

監測元件規格與安裝要求

1. 日照計

- (1) 日照計安裝有兩種方式，第一種為與PV系統共平面，第二種為水平日照。
- (2) 日照計種類分為熱電堆式日照計(Thermopile Pyranometers)、PV參考元件(Reference Devices)、光電二極管傳感器(Photodiode Sensors)，一般建議採用熱電堆式日照計，對應不同監測等級選用規格如表五所示。
- (3) 日照計量測日照的強度範圍在0~1,500



▼表三 不同監測等級對應的測量參數和要求

Parameter	Symbol	Units	Monitoring Purpose	Required?			Number of Sensors
				Class A High Accuracy	Class B Medium Accuracy	Class C Basic Accuracy	
Irradiance (see 7.3)							
In-plane Irradiance (POA)	G _i	W·m ⁻²	Solar Resource	✓	✓ or E	✓ or E	表四中Column 1
Global Horizontal Irradiance	GHI	W·m ⁻²	Solar Resource, Connection to Historical and Satellite Data	✓	✓ or E		表四中Column 1
Direct Normal Irradiance	DNI	W·m ⁻²	Solar Resource, Concentrator	✓ for CPV	✓ or E for CPV		表四中Column 1
Diffuse Irradiance	G _d	W·m ⁻²		✓ for CPV with <20x Concentration	✓ or E for CPV with <20x Concentration		表四中Column 1
Circumsolar Ratio	CSR						表四中Column 1
Environmental Factors (see 7.3)							
PV Module Temperature	T _{mod}	°C	Determining Temperature, Related Losses	✓	✓ or E		表四中Column 2
Ambient Air Temperature	T _{amb}	°C	Connection to Historical Data, Plus Estimation of PV Temperatures	✓	✓ or E	✓ or E	表四中Column 1
Wind Speed		m·s ⁻¹	Estimation of PV Temperatures	✓	✓ or E		表四中Column 1
Wind Direction		Degrees		✓			表四中Column 1
Soiling Ratio	SR		Determining Soiling-related Losses	✓ If Soiling Losses Expected to be >2%			表四中Column 1
Rainfall		cm	Estimation of Soiling Losses	✓	✓ or E		表四中Column 1
Snow			Estimation of Snow-related Losses				表四中Column 1
Humidity			Estimation of Spectral Variations				表四中Column 1
Electrical Output (see 7.5 and 7.6)							
Array Voltage (DC)	V _A	V	Energy Output, Diagnostics and Fault Localization	✓			At Each Inverter (Optionally at Each Combiner Box or Each String)
Array Current (DC)	I _A	A		✓			
Array Power (DC)	P _A	kW		✓			
Output Voltage (AC)	V _{out}	V	Energy Output	✓	✓		At Each Inverter and at System Level
Output Current (AC)	I _{out}	A		✓	✓		
Output Power (AC)	P _{out}	kW		✓	✓	✓	
Output Energy	E _{out}	kWh		✓	✓	✓	
Output Power Factor	λ		Utility Request Compliance	✓	✓		At Each Inverter and at System Level
Reduced Load Demand			Determine Utility or Load Request Compliance and Impact on PV System Performance	If Applicable	If Applicable		At System Level
System Output Power Factor Request	λ _{req}			If Applicable	If Applicable		At System Level

資料來源：IEC 61724-1 (2017/03)



W/m^2 ，且解析度小於等於 1 W/m^2 。

- (4) 日照計安裝須避免附近物體遮蔽與反射，選取放置位置需評估全年，每天日出至日落無遮蔭處，為最佳安裝日照計位置。

2. 太陽能模組溫度計

- (1) 採用類型為Thin-film Thermocouples of

▼表四 PV電廠設置容量對應監測元件之數量要求

System Size (AC)	Number of Sensors	
	Column 1	Column 2
<5 MW	1	6
≥5 MW to <40 MW	2	12
≥40 MW to <100 MW	3	18
≥100 MW to <200 MW	4	24
≥200 MW to <300 MW	5	30
≥300 MW to <500 MW	6	36
≥500 MW to <750 MW	7	42
≥750 MW	8	48

資料來源：IEC 61724-1 (2017/03)

Types T or E，本實驗室採用Type T。

- (2) 溫度計含表頭規格要求為量測不確定度小於等於 2°C 。
- (3) 貼覆方式依據IEC 61724-1之Annex B-Temporary (圖四) 要求進行安裝：
- ①於現場選定太陽能模組，每片模組後方正中間貼附。
 - ②貼附前須採用70%異丙醇清洗預計貼附溫度計區域。
 - ③溫度計的Thin-film裁切寬約3 mm。
 - ④於溫度計前方採用圓形膠帶貼附，貼附膠帶採用Polyester材質。
 - ⑤於溫度線處採用三個長條型膠帶 (Polyester材質)，膠帶面積要求長 × 寬($\leq 5 \text{ cm} \times \leq 3 \text{ cm}$)。

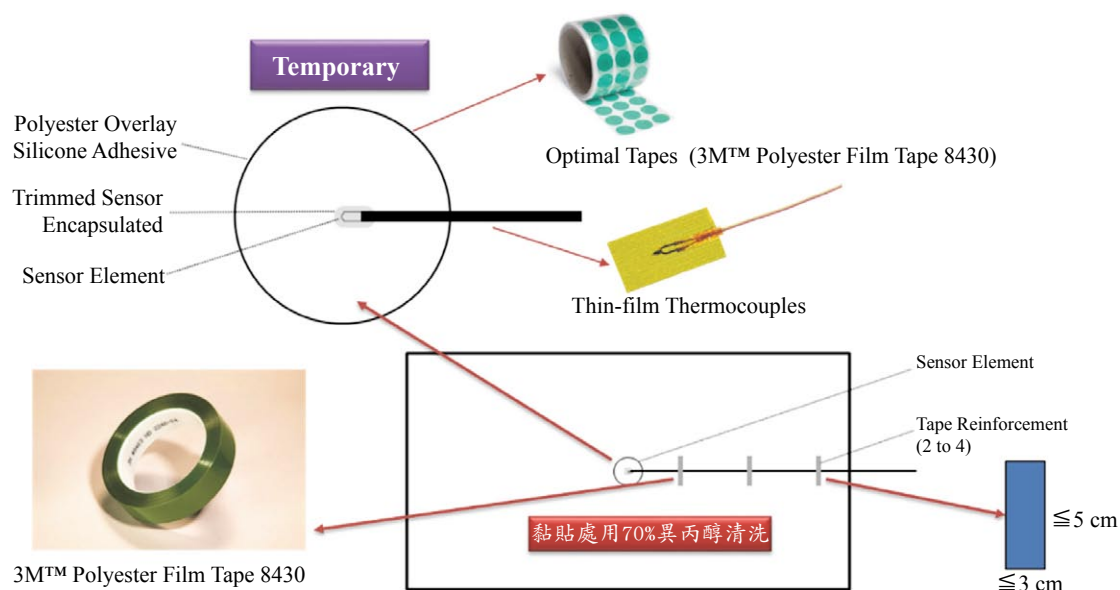
3. 環境溫度計

- (1) 規格要求為量測解析度至少小於等於 0.1°C ，且量測不確定度為 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。
- (2) 安裝時需有遮蔭、通風良好、不可直接曝曬太陽 (圖五)。

▼表五 不同監測等級對應的測量參數和要求

Sensor Type	Class A High Accuracy	Class B Medium Accuracy	Class C Basic Accuracy
Thermopile Pyranometer	Secondary Standard per ISO 9060 or High Quality per WMO Guide No. 8 (Uncertainty $\leq 3\%$ for Hourly Totals)	First Class per ISO 9060 or Good Quality per WMO Guide No. 8 (Uncertainty $\leq 8\%$ for Hourly Totals)	Any
PV Reference Device	Uncertainty $\leq 3\%$ from $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ to $1,500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	Uncertainty $\leq 8\%$ from $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ to $1,500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	Any
Photodiode Sensors	Not Applicable	Not Applicable	Any

資料來源：IEC 61724-1 (2017/03)



▲圖四 IEC 61724-1太陽能模組溫度計貼附安裝方式



資料來源：<http://www.poitek.com/thermometer.php>

▲圖五 環境溫度計安裝示意圖

4. 風速風向計

- (1) 風速計量測不確定度要求，為當風速小於等於5 m/s時，讀值誤差小於等於0.5

m/s；而當風速大於5 m/s時，讀值誤差小於等於10%。

- (2) 風向計規格要求為角度精確度5度內。
- (3) 安裝時需能調整風速風向計高低，原因為當地風速量測需比較附近氣象局資料，當發現風速度與附近氣象資料不一致時，須調整高度至與附近氣象資料風速一致。

5. 髒污率(Soiling Ratio)

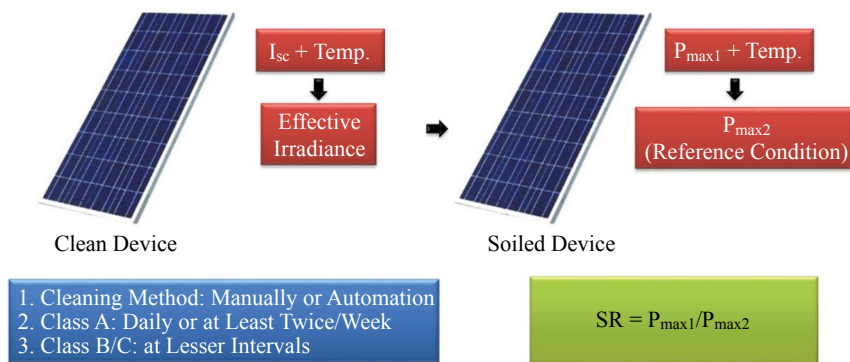
- (1) 將PV電廠表面髒污予以量化，採用監測方式評估清洗時機。
- (2) 量測方式採用髒污導致最大功率降低方式(圖六)，量測步驟為準備兩片太陽能模組，一片定期清洗(稱為乾淨元件)，另一片不清洗(稱為髒污元件)，量測乾淨元件短路電流，計算等效日照，量



▼表六 變流器電性量測要求

Parameter	Class A High Accuracy	Class B Medium Accuracy	Class C Basic Accuracy
Active Power and Energy	Class 0,2 S as per IEC 62053-22	Class 0,5 S as per IEC 62053-22	Class 2 per IEC 62053-21
Power Factor	Class 1 as per IEC 61557-12	Class 1 as per IEC 61557-12	n/a

資料來源：IEC 61724-1 (2017/03)



▲圖六 髒污率量測系統示意圖

測髒污元件最大功率(P_{max1})、溫度，將 P_{max1} 修正至等效日照與 25°C 得到 P_{max2} ，則 $SR = P_{max1}/P_{max2}$ 。

- (3) 依據數據紀錄要求，每分鐘量測SR值，於每日SR計算方式，應採用平均日照權重方式計算得到。

6. 電性量測要求

- (1) 直流電壓計量測範圍至少為系統電壓(STC)的1.2倍。
- (2) 直流電壓、電流、功率規格：
- ①Class A：精度要求 $\pm 2.0\%$
 - ②Class B：無要求
 - ③Class C：無要求

- (3) 交流電壓、電流規格：

- ①Class A：精度要求 $\pm 2.0\%$
- ②Class B：精度要求 $\pm 3.0\%$
- ③Class C：無要求

- (4) 交流功率、功率因數規格要求如表六。

短期性能比

因PV電廠於竣工驗收項目中，一般包含安規、電性、性能等檢測，早期性能檢測大多採用RA方式，而RA量測本身對應標準規範，且量測數據變異大，因此近期於2016年標準組織頒布了IEC TS 61724-2規範。此技術規範屬於短期評估PV電廠性能比的量測，依據數據擷取與篩選，至少要



▼表七 數據驗證與篩選判定

Flag Type	Description	Suggested Criteria for Flagging Rejected Data (15-min Data)			
		Irradiance (W/m ²)	Ambient Temperature (°C)	Wind Speed (m/s)	Power (AC Power Rating)
Range	Value outside of acceptable bounds	<0.5 TRC Irradiance or >1.2 TRC	>50 or <-10	>15 or <0.5	>1.02 Rating or <-0.01 Rating
Dead Value	Values stuck at a single value over time. Detected using derivative.	Derivative <0.0001 while value is >5	<0.0001 and >-0.0001	<Sensitivity of sensor	<0.1% Change in 3 Readings
Abrupt Change and Stability	Values change unacceptably between data points. Detected using derivative for temperature and wind speed.	Assuming 15 min data derived from at least 1 min data, standard deviation >5% of average	>4	>10	Assuming 15 min data derived from at least 1 min data, standard deviation >5% of average
Inverter Status	The states of the inverters are inconsistent (not all are constrained-see text)	Not Applicable	Not Applicable	Not Applicable	Not Applicable

資料來源：IEC 61724-2 (2016/10)

兩天以上穩定數據，才能進行計算與分析PR。本文除了說明監測等級、元件規格與數量、性能比定義，主要在說明短期性能比檢測的程序，讓業界於驗收項目中，可以改採用PR進行竣工驗收。

1. 設備與量測

監測的元件建議採用IEC 61724-1中的Class A要求規格，當然Class B或Class C也可以分析性能比，但是於報告中須註明選用元件的等級，而監測元件數量、校正資訊、安裝位置與清潔等資訊，亦須註明於報告中。

2. 量測程序

(1) 定義PV串列運轉「受限」(Constrained)或「不受限」(Unconstrained)

① 定義測試範圍以代表整個PV電廠

範圍：測試範圍選擇後，需於委託與被委託單位雙方之測試合約中定義與確認三種資訊，第一種為變流器規格，才能於測試前準備交流電表與勾表的對應規格；第二種為PV電廠安裝都有依照於當初發包設計規範中要求進行的施作與安裝，如果安裝與施工不一致，PR量測結果自然不如預期；第三種為定義髒污程度，也就是於測試中如髒污到達一定程度會影響量測，則雙方於合約中須明訂清洗時機。

② 定義於「不受限」運轉狀態下參考條件：於未受限制運轉狀態下定義目標參考條件(Target Reference Conditions; TRC)，選擇TRC方式為該串列包含變流器，於日照、溫度、風速等條件，在發電最佳狀態下，不會使變流器變成運轉受限狀態。

③ 定義選擇參考串列運轉受限與不受限方式：依據選擇串列與變流器，透過



▼表八 不同季節對應擷取有效數據要求

Season (Northern Hemisphere)	Dates	Minimum POA Irradiance (W/m ²)	Required Number of 15-min Average Data Points
Winter	22/11 to 21/1	450	20
Spring	22/1 to 23/3	550	30
Summer	24/3 to 21/9	650	60
Autumn	22/9 to 22/11	550	40

資料來源：IEC 61724-2 (2016/10)

當地日照、最低氣溫、風速等因素，評估選擇參考串列是否為運轉受限或非受限狀態，通常取決於變流器負載能力。如果數據擷取為一年，若量測期間有數個小時處於運轉受限狀態，但是先前於測試前估算式定義為運轉未受限狀態，則仍然定義此參考串列為運轉受限。

(2) 量測數據

每個數據流的數據檢查：依據IEC 61724-1要求擷取的數據流，每筆數據皆為每分鐘紀錄共15筆平均資料，再採用表七來進行異常、不合理數據排除。每日的有效點數，則是依據表八來要求，例如：春

天量測PR時，依據表七篩選完後，至少要有30個點，則當日列為一日可用數據，而短期性能比評估則至少要有兩天以上穩定數據計算PR。

參考文獻

1. IEC 62446-1:2016, Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance–Part 1: Grid connected systems–Documentation, commissioning tests and inspection.
2. IEC 61724-1:2017, Photovoltaic system performance–Part 1: Monitoring.
3. IEC 61724-2:2016, Photovoltaic system performance –Part 2: Capacity evaluation method.