

# 太陽光電發電系統 模組和變流器設計之最佳化

黃宏欣

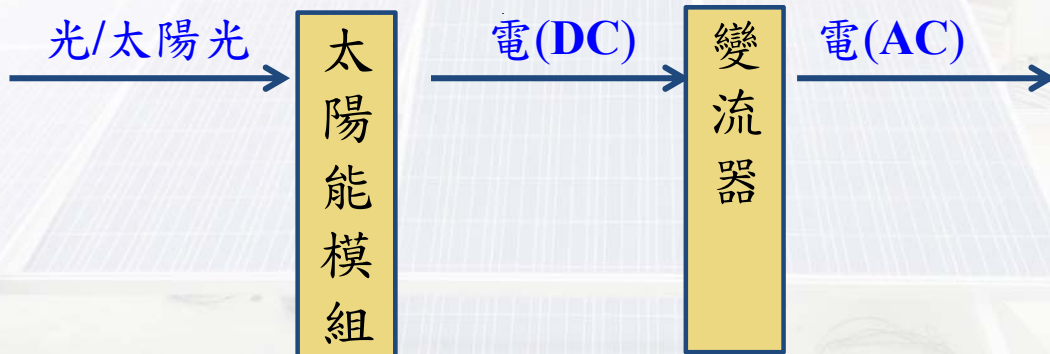
## 內容

- 一. 前言
- 二. 太陽能模組性質
- 三. 變流器性質
- 四. 實際案例設計
- 五. 發電效能驗證
- 六. 結論

# 一、前言

## 太陽光電發電系統的本質

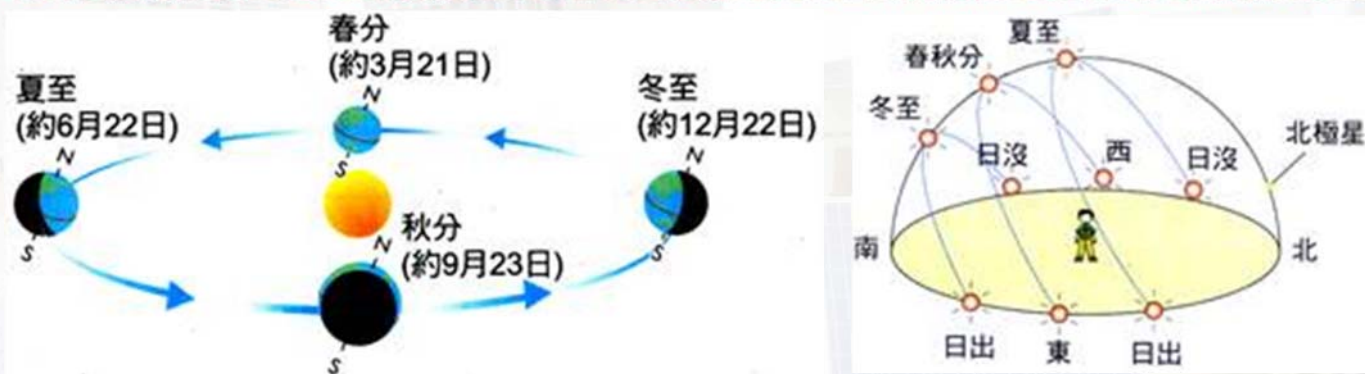
- 光能 → 電能 (DC) → 電能 (AC)



**PV 模組**：一種換能裝置(材料特性) ⇔ ⇔ ⇔  
基本上光 ↔ 電可互相轉換

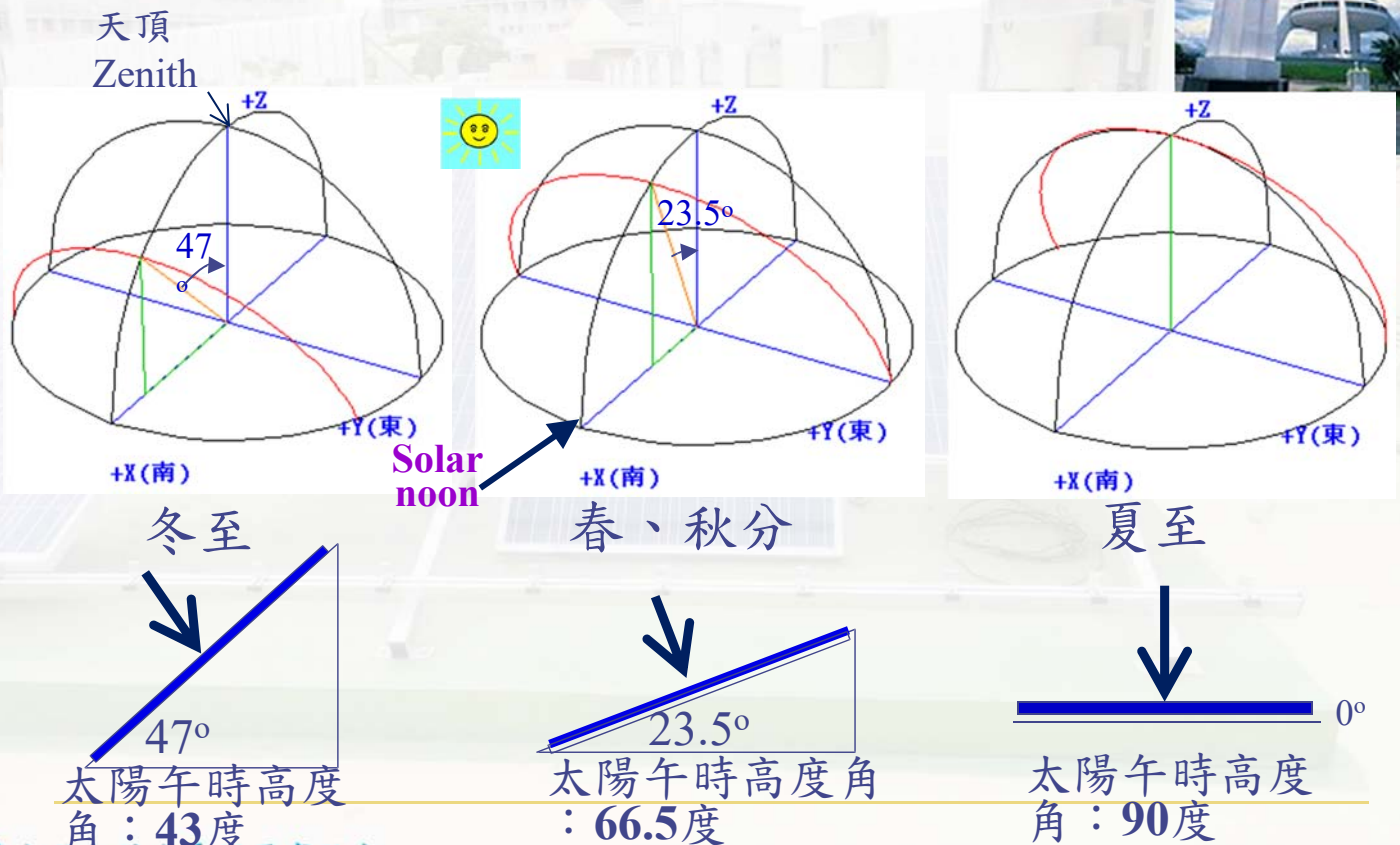
**Inverter**：一種換能裝置 ⇔ ⇔ ⇔ 直流電 → 交流電  
能量的換能必有損失，故有轉換效率的問題！

# 陽光直射



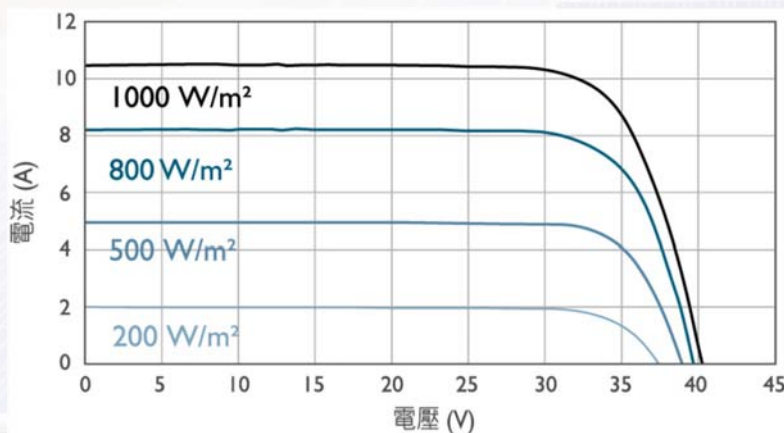
2016年  
 春分 03/20 12:30 → (93天) → 夏至 06/21 06:34 → (93天) →  
 秋分 09/22 22:21 → (90天) → 冬至 12/21 18:44 → (89天) → 春分

# 北迴歸線的太陽運行

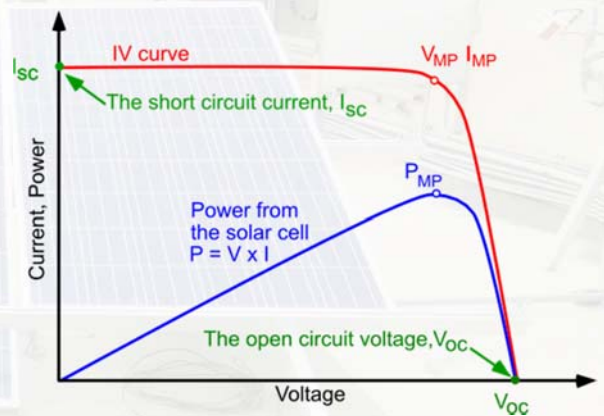


## 二、太陽能模組性質

### 模組電流-電壓曲線



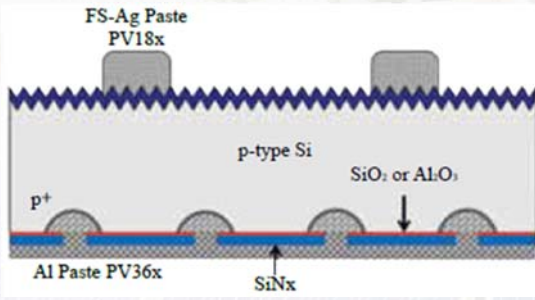
電流-電壓對於日照與模組溫度的相關性





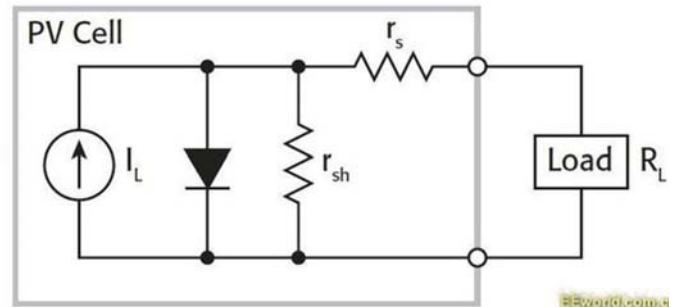
# 等效電路

太陽能電池結構示意圖

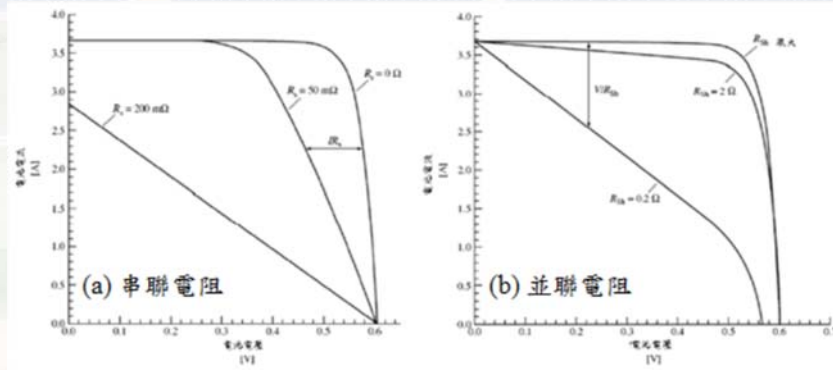


<https://www.materialsnet.com.tw/industry/NewProductView.aspx?pid=103>

太陽能電池等效電路圖

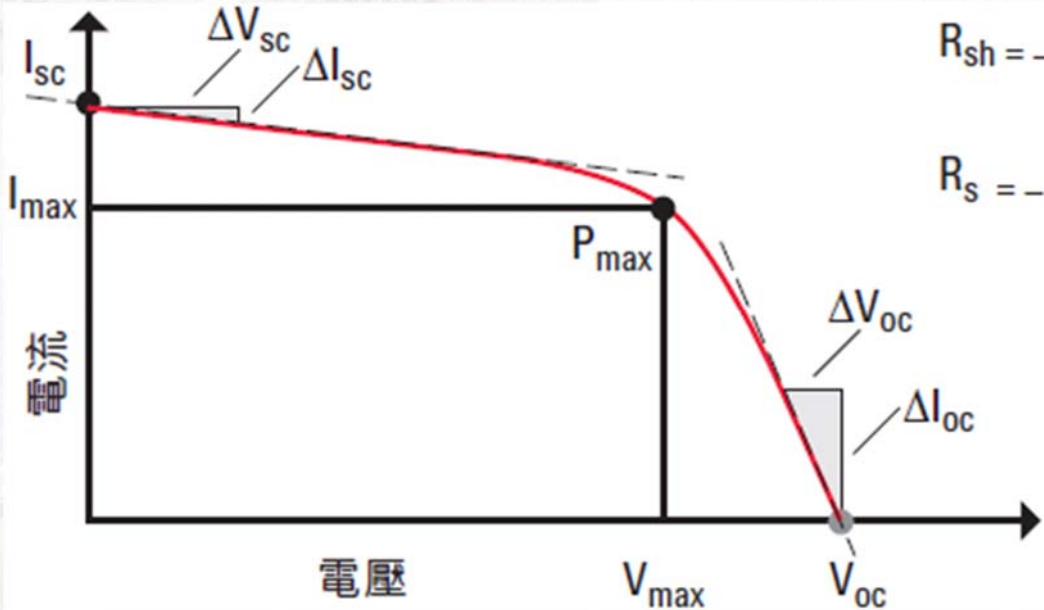


<https://j.17qq.com/article/mshmwskwy.html>



黃宏欣太陽光電設置實驗室

# 估算 $R_{sh}$ 及 $R_s$



$$R_{sh} = - \frac{\Delta V_{sc}}{\Delta I_{sc}}$$

$$R_s = - \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta I_{oc}}$$

填充因子 (Fill Factor)  $F.F. = (V_m \times I_m / V_{oc} \times I_{sc}) \times 100\%$

黃宏欣太陽光電設置實驗室

# 1. 模組衰減損失

- 光電模組效率10年不得降超過10%，20年降20%以內是國際認證標準，當然穩定度是非常重要的。

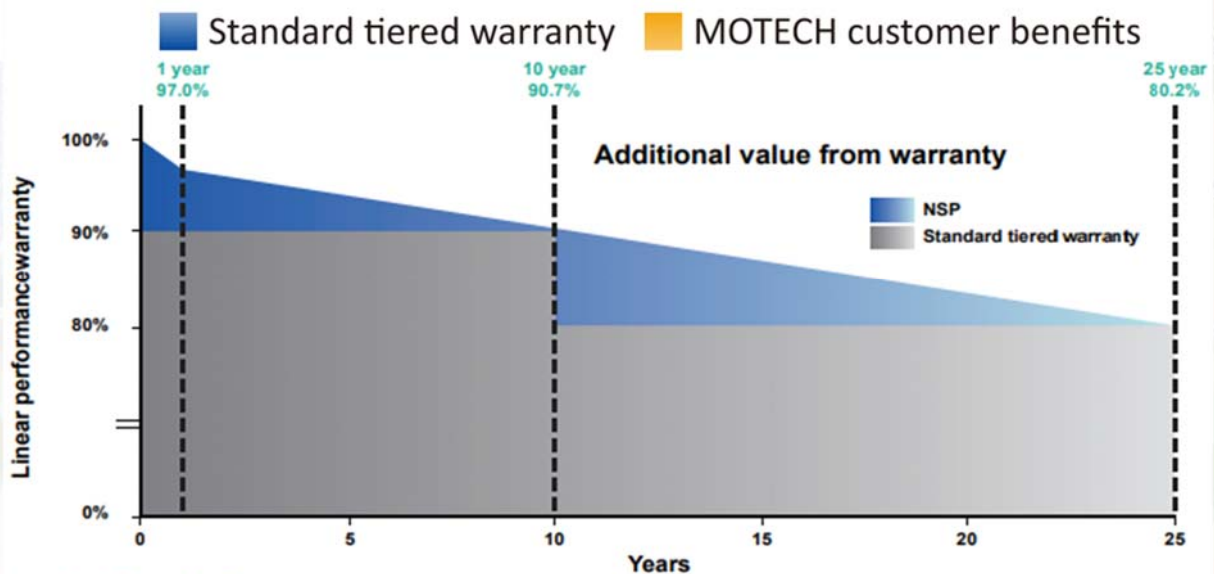
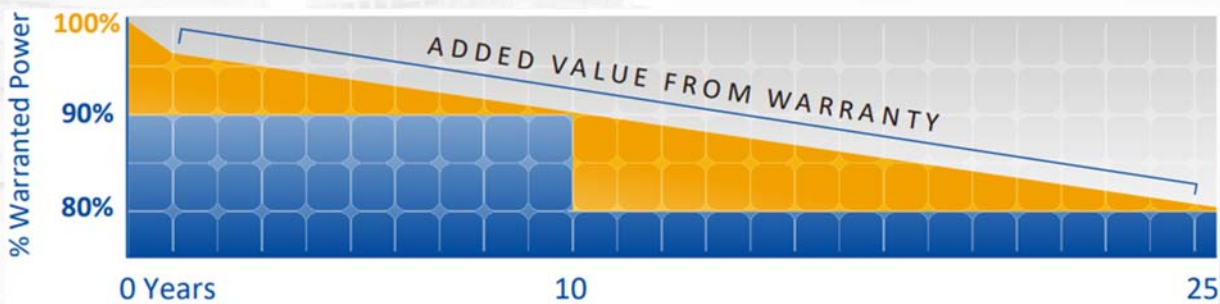
## 保固與認證

產品保固	15年的材料和維修保證
功率保證	25年線性功率保證達85% *1
認證	通過 IEC/EN 61215 與 IEC/EN 61730 認證 *2

\*1: 詳情請參閱太陽能模組保固書

\*2: 其他認證請向所屬經銷商詢問

資料來源:友達PM060MW4



## 2. 溫度損失

### SunPrimo PM060PWB (260 ~ 270 Wp)

#### 電性參數

輸出功率	260W	265W	270W
模組效率	16.0%	16.3%	16.6%
最大輸出功率電壓 $V_{mp}$ (V)	30.8	31.0	31.2
最大輸出功率電流 $I_{mp}$ (A)	8.45	8.55	8.64
開路電壓 $V_{oc}$ (V)	38.1	38.1	38.2
短路電流 $I_{sc}$ (A)	8.95	8.99	9.07
公差	0 / +3%		

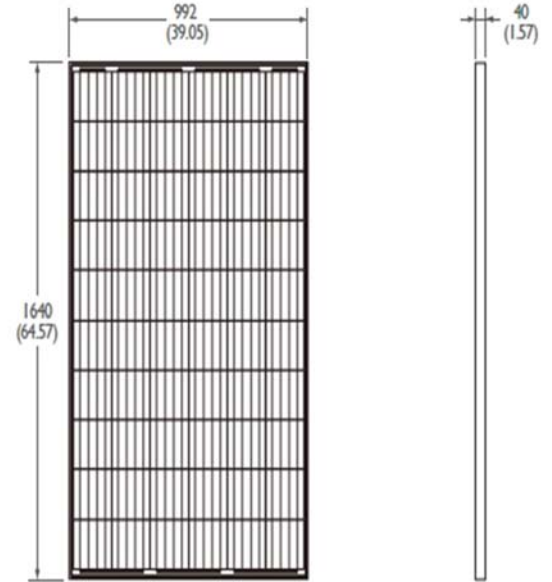
• 上述數據資料是在標準測試條件下(STC)測量  
 • STC: 日照度 1000W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, 溫度 25 ± 2° C; 依據EN 60904-3 的標準

#### 模組溫度係數

NOCT電池正常運作溫度	45 ± 2° C
$P_n$ 溫度係數	-0.42 % / K
$V_{oc}$ 溫度係數	-0.30 % / K
$I_{sc}$ 溫度係數	0.06 % / K

• NOCT: 測量條件在日照度 800 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, 空氣溫度 20° C, 風速 1 m/s 的條件下, 正常操作電池片的溫度

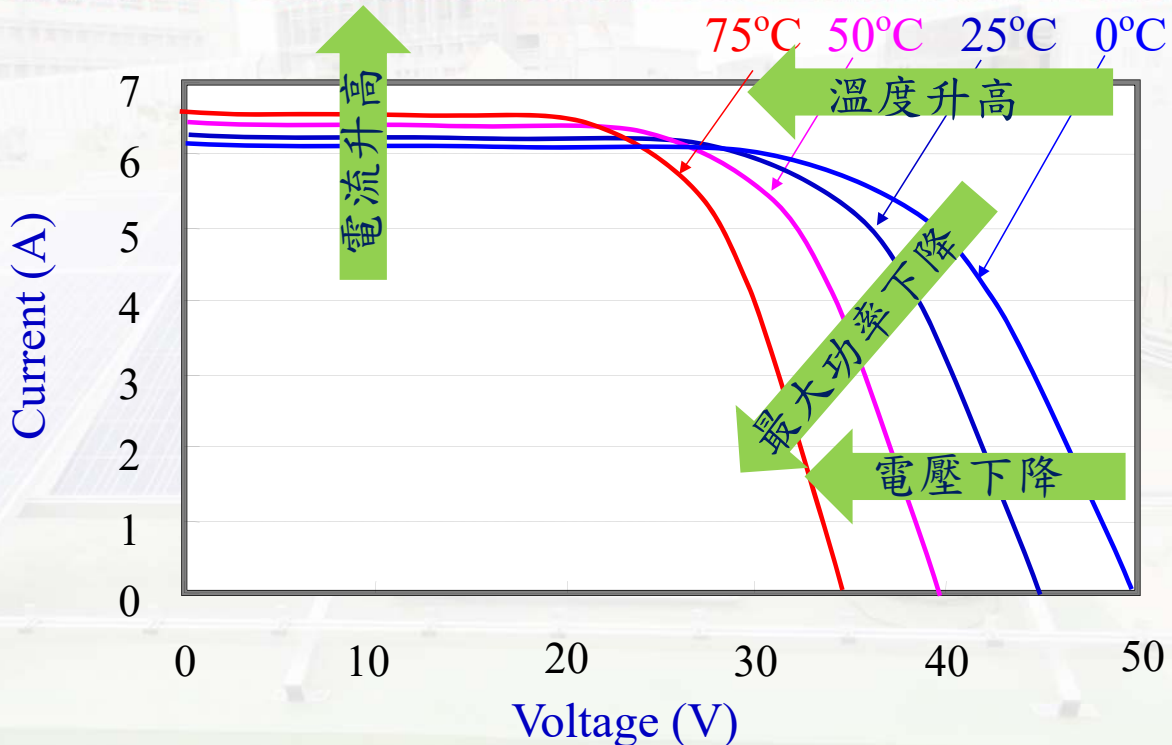
尺寸 單位: mm (inch)



黃宏欣太陽光電設置實驗室

11

### 不同溫度下太陽電池 I-V 特性曲線

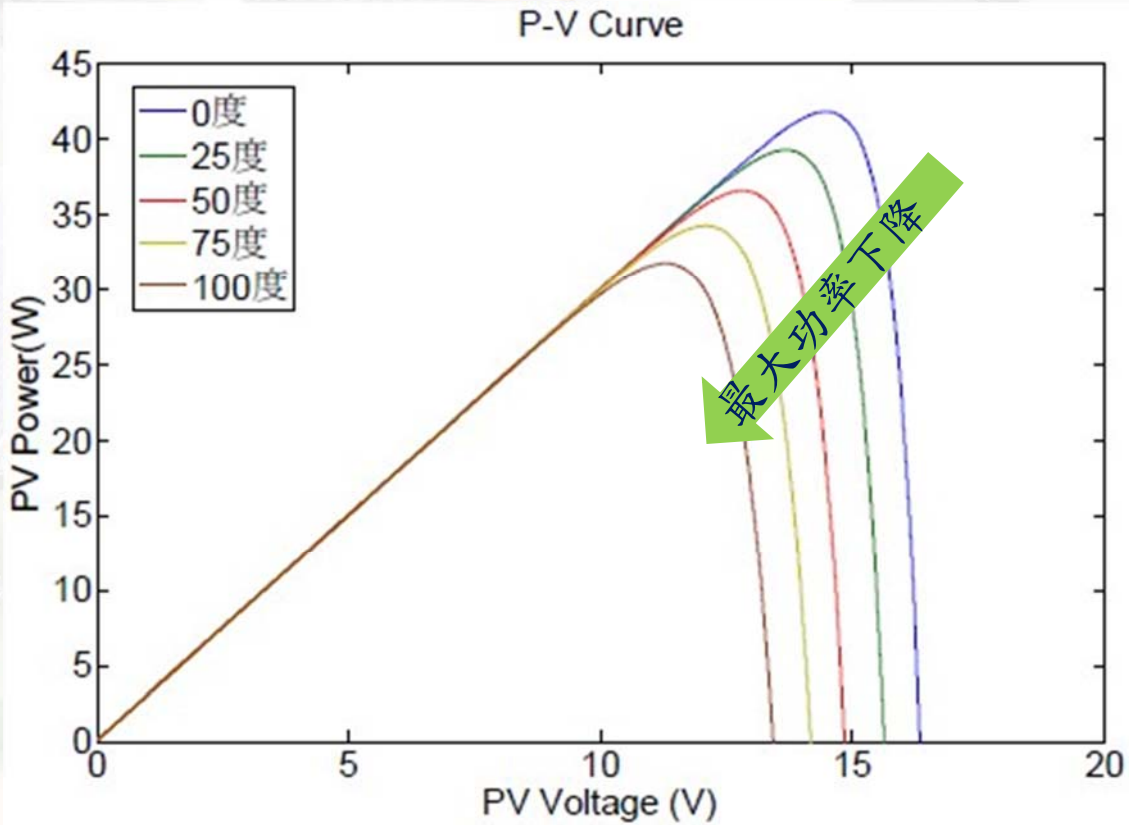


- 太陽電池溫度升高時輸出電壓與最大輸出功率將降低!
- 此特性與太陽電池材料特性有關，是太陽電池應用上最大問題!

黃宏欣太陽光電設置實驗室

12





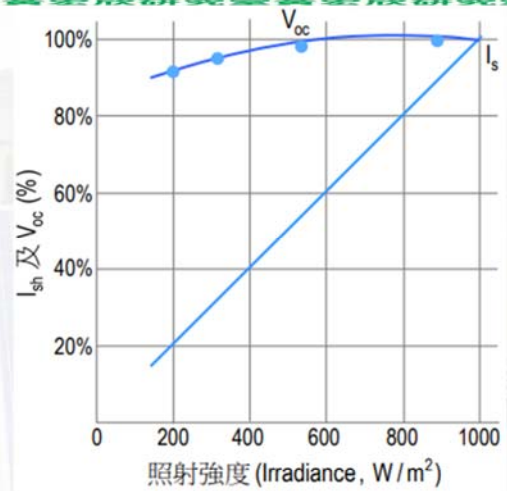
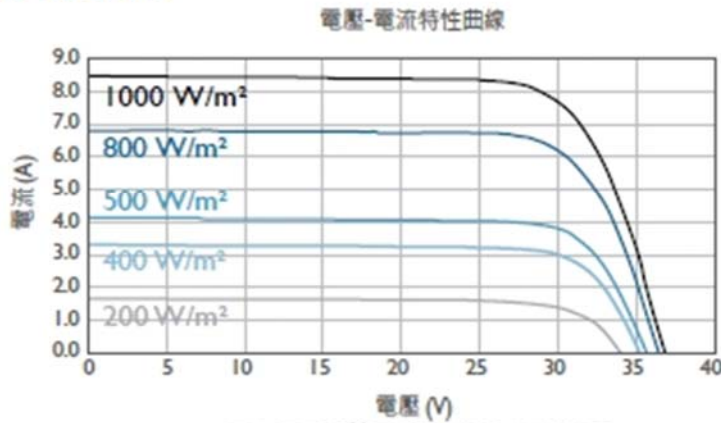
## Temperature Coefficients TSM65TN

Current Temperature Coefficient	$\alpha$ (ISC)	0.05%/K
Voltage Temperature Coefficient	$\beta$ (VOC)	-0.30%/K
Power Temperature Coefficient	$\gamma$ (Pmax)	-0.37%/K

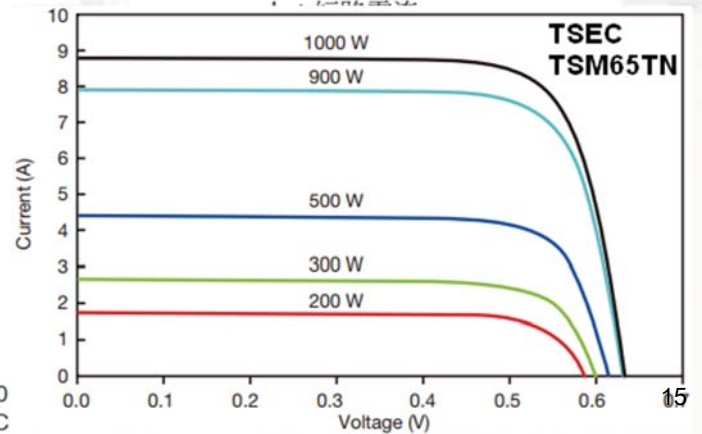
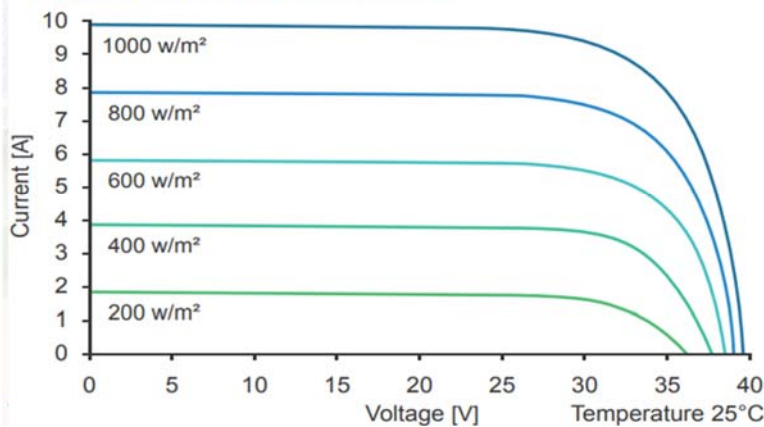
IsC Temperature Coefficient	<b>MOTECH IM60</b>	$\alpha$ (%/°C)	+0.06
Voc Temperature Coefficient		$\beta$ (%/°C)	-0.32
Pmax Temperature Coefficient		$\gamma$ (%/°C)	-0.42
Efficiency Reduction at 200W/m <sup>2</sup> , 25°C			<5%

### 3. 日照損失

電流-電壓曲線



Dependence on Irradiance



### 串列之組列電壓與電流

- 組列開路電壓 (@ Temp)

= 模組開路電壓 (@25°C) × [ 1 + (Temp - 25°C) × 開路電壓溫度係數 ] × 串列模組數

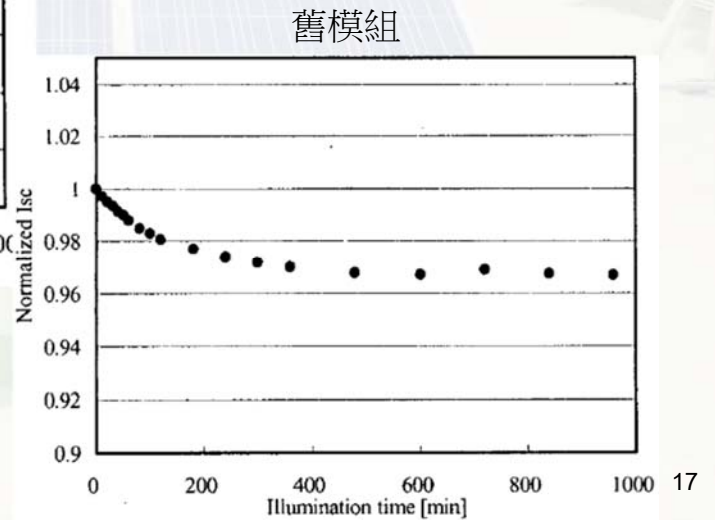
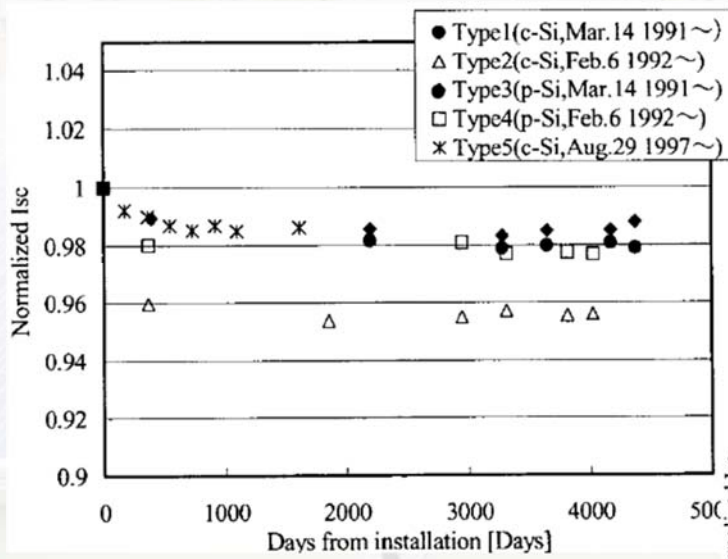
- 組列短路電流 (@Temp)

= 組列短路電流 (@25°C) × [ 1 + (Temp - 25°C) × 短路電流溫度係數 ] × 並聯串列數



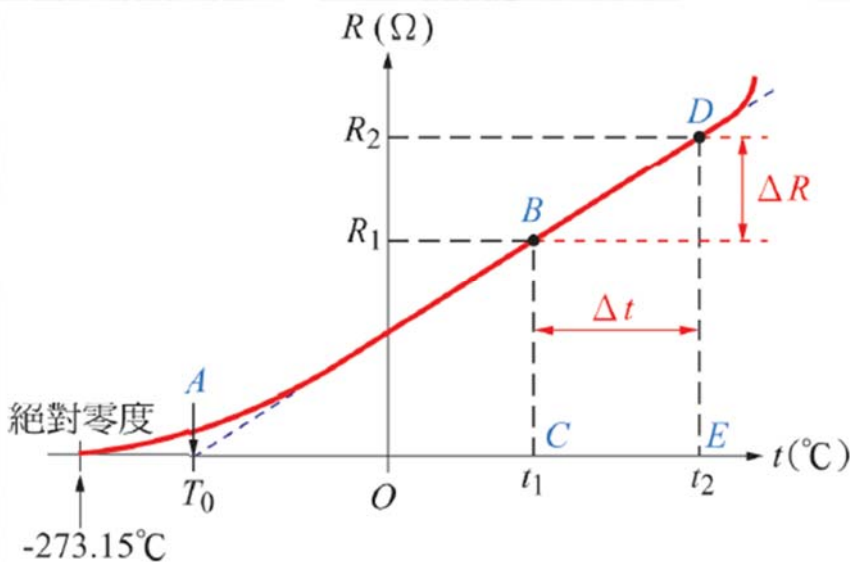
## 初始短路電流下降

- 初始短路電流下降大約是以一年 1% 至 5% 的速率，但在大約一年後便趨於穩定不再下降。



黃宏欣太陽光電設置實驗室

## 線損---銅



$$\frac{\overline{DE}}{\overline{BC}} = \frac{\overline{AE}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{AO} + \overline{OE}}{\overline{AO} + \overline{OC}}$$

正溫度係數的R-t關係曲線

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{234.5 + t_2}{234.5 + t_1}$$

黃宏欣太陽光電設置實驗室

# 常見的錯誤

M30A\_120:

- 主要是因為光伏匯流箱的輸出電流大於每一直流端子的最大電流限制值，16A。  
所以如下圖的應用是不恰當的。(圖4-7)  
每一組最大輸入電流為7.5A。

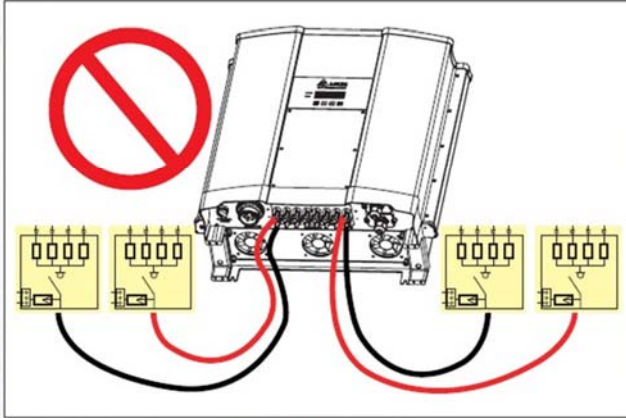


圖4-7：錯誤的連接方式 - 1

M30A\_120:

- 不建議一個或多個分流接頭的使用。(圖 4-8)  
因分流端子後的電流不能保證是平均分配的。  
不平衡分流下，局部的直流輸入端子仍有可能會超出16A。  
每一組最大輸入電流為7.5A。

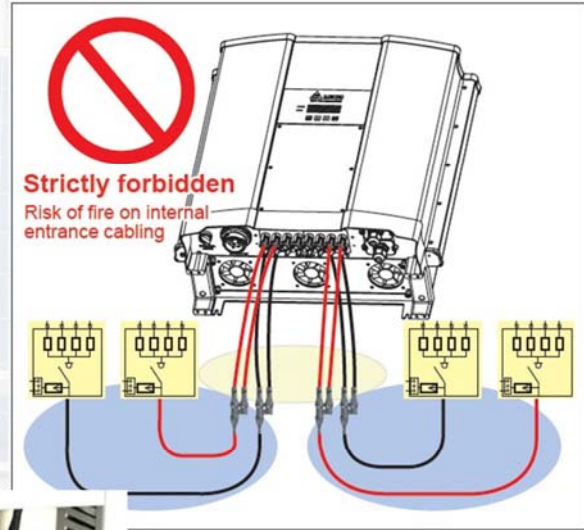


圖4-8：錯誤的連接方式 - 2

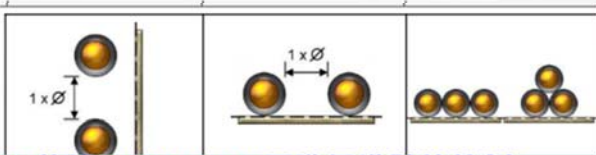


# 安全電流

• 現況載流容量  $I = I_n \times f_1 \times f_2 \times f_3$

$f_1$ ：標準載流容量

$f_2$ ：大氣溫度因子



≤60	70	80	90
1.00	0.91	0.82	0.71

■ TUV依據EN 60216-1國際標準計算範例：

公式：載流容量  $I = I_n \times f_1 \times f_2 \times f_3$  (A)

Table 1：以 4 mm<sup>2</sup>為例，電纜併排置放於表面上(Two cables adjacent on surface) 之  $I_n$ 值 = 44。

Table 2：環境溫度40℃以上，可以查Table 2 表溫度係數，去乘上溫度系數進行修正。

Ambient temperature(環境溫度)：60℃時溫度係數值  $f_1 = 1.00$

Table 3：導體溫度一般以90℃，可以查Table 3 表轉換係數值  $f_2 = 0.73$

Table 4：Adjustment factors 相鄰電纜調整係數，如一層佈設共8條，調整係數值  $f_3 = 0.52$

安全電流  $I = 44 \times 1.00 \times 0.73 \times 0.52 = 16.7$  (A)



# 三、變流器性質

以台達電RPI M30A為例

1. 最大輸入功率
2. 標稱電壓
3. MPP數目

直流側(Solar side)	
最大輸入功率	35kW
額定功率	31.5kW
建議PV功率	≤38kW
標稱電壓	600Vdc
操作電壓	200Vdc – 1000 Vdc
啟動電壓	> 250 Vdc
啟動功率	40W
MPP追蹤	Parallel inputs: 1 MPP tracker Separate inputs: 2 MPP trackers
絕對最大電壓	1100V*

## 串列電壓與變流器效率

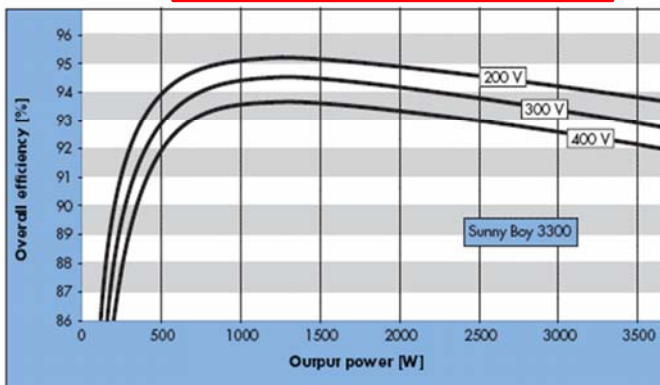


### SMA Sunny Boy 3300 Inverter

#### Efficiency of the Sunny Boy 3300

Max. efficiency  $\eta_{max}$  95.2 %  
European standard efficiency  $\eta_{euro}$  94.4 %

The efficiency of the Sunny Boy 3300 depends mainly on the input voltage of the connected PV strings. **The lower the input voltage, the higher the efficiency.**

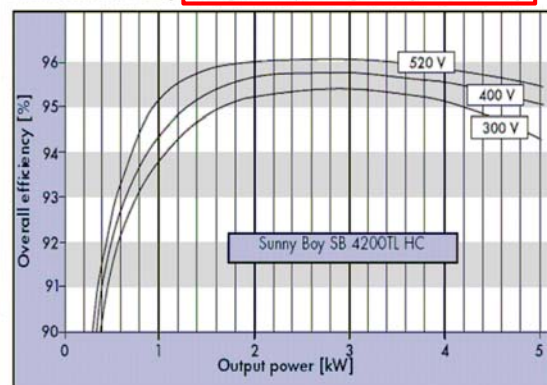


### SMA Sunny Boy 4200TL HC Multi-String

#### Efficiency Sunny Boy SB 4200TL HC Multi-String

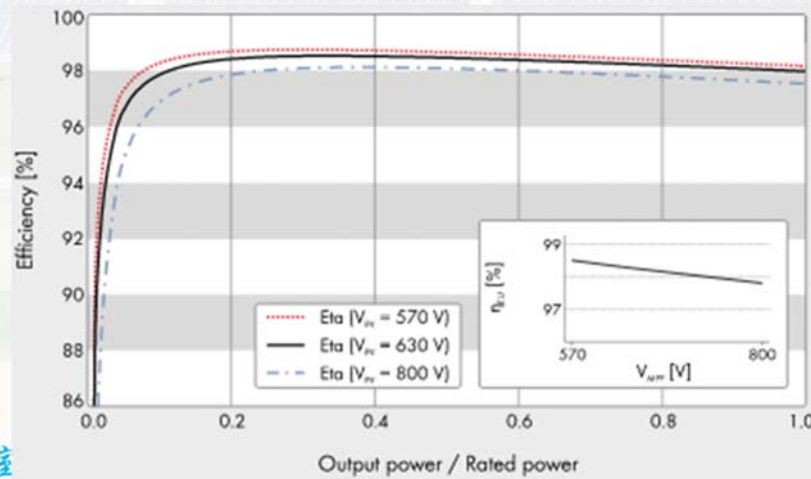
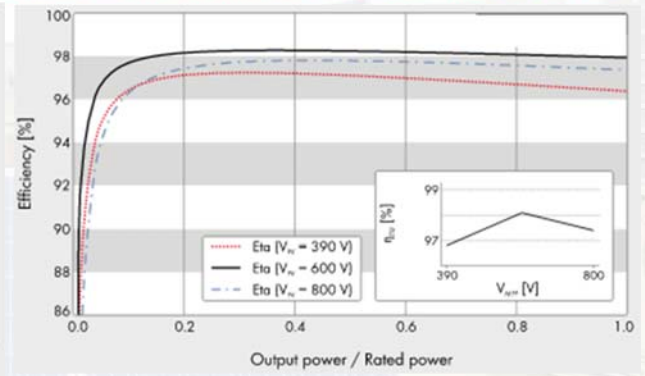
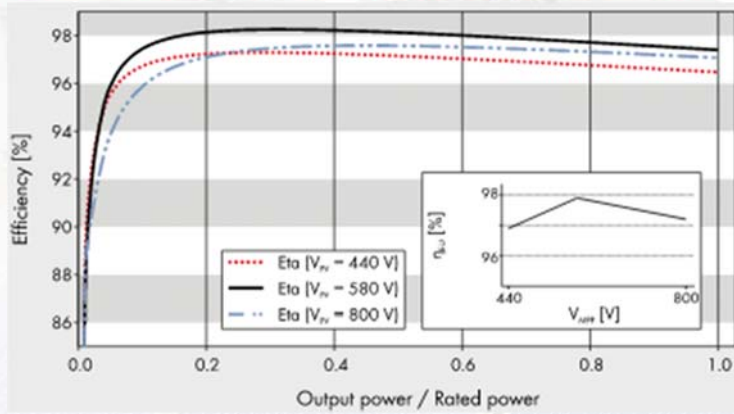
Efficiency		
Max. efficiency	$\eta_{max}$	96.1 %
European efficiency	$\eta_{euro}$	95.5 %

The efficiency of the Sunny Boy SB 4200TL HC depends greatly on the input voltage of the connected PV strings. **The higher the input voltage, the higher the efficiency.**





# 變流器效率與串列電壓



黃宏欣太陽光電設置實驗室

## 4. 是否需要平衡輸入

最大功率追蹤電壓範圍 (額定功率)		
平衡輸入(50/50)	520-800Vdc	
最大非平衡輸入	67%	700-800Vdc
	33%	350-800Vdc
輸入數目	8 pairs MC4	6 pairs MC4
額定電流	30A * 2 with max current per input of 7.5A	30A * 2 with max current per input of 10A
各MPPT最大短路電流(Isc)	36A for each MPPT(Total two MPPT) 9A for each string (Total 8 string)	36A for each MPPT(Total two MPPT) 12A for each string (Total 6 string)
保險絲	15A	No
Surge protection device	Type II, 可替換 EN 50539-11, IEC 61643-11	Type III, 不可替換

## 5. 輸入電流限制

# SMA 變流器

DC Input	STP 25000TL-30
Maximum DC power at $\cos \phi = 1$	25550 W
Maximum input voltage	1000 V
MPP voltage range	390 V to 800 V
<b>Rated input voltage</b>	<b>600 V</b>
Minimum input voltage	150 V
Initial input voltage	188 V
Maximum input current, input A	33 A
Maximum input current, input B	33 A
<b>Number of independent MPP inputs</b>	<b>2</b>
Strings per MPP input	3

## 6. 操作溫度

Model	RPI M30A_120	RPI M30A_121
一般規格		
外殼	Powder coated aluminum	
操作溫度	-25~60°C, full power up to 40°C (請參考圖9-1至圖9-3)	
操作高度	2000m	
相對濕度	0% – 100% non-condensing.	
環境類別	Outdoor, wet locations	
防護等級	IP65 (Electronics)	
污染等級	II	
過電壓類別	AC output :III, DC Input :II	
反饋至太陽能板電流最大值	0	
電氣隔離	NO	
安全性等級	Class I metal enclosure with protective earth	
重量	49.5kg	48kg
尺寸(W*H*D)	612 × 625 × 278mm	
連接器	Weather resistant connectors	

# 降載

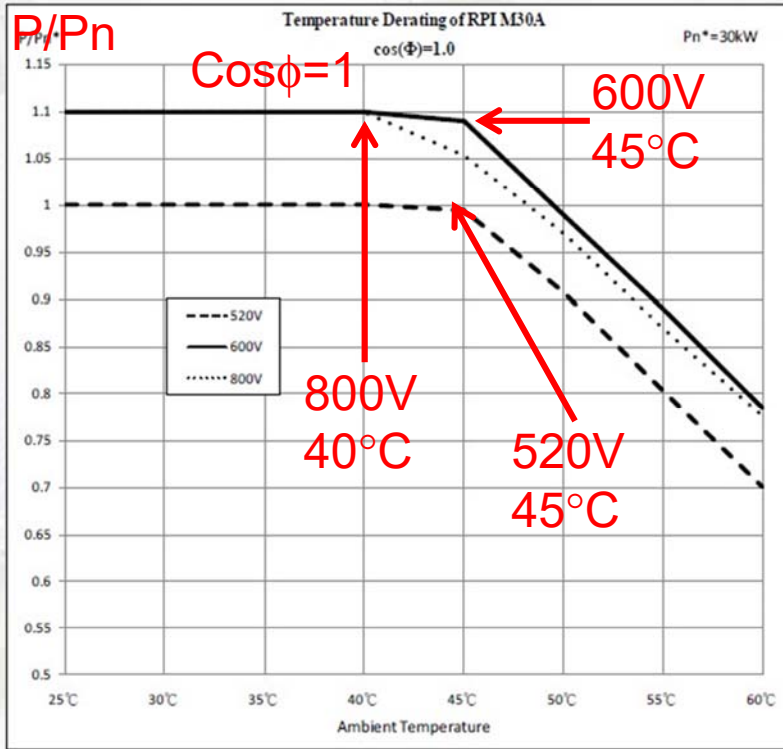


圖9-1: M30A溫度降載曲線 (cosφ=1.0)

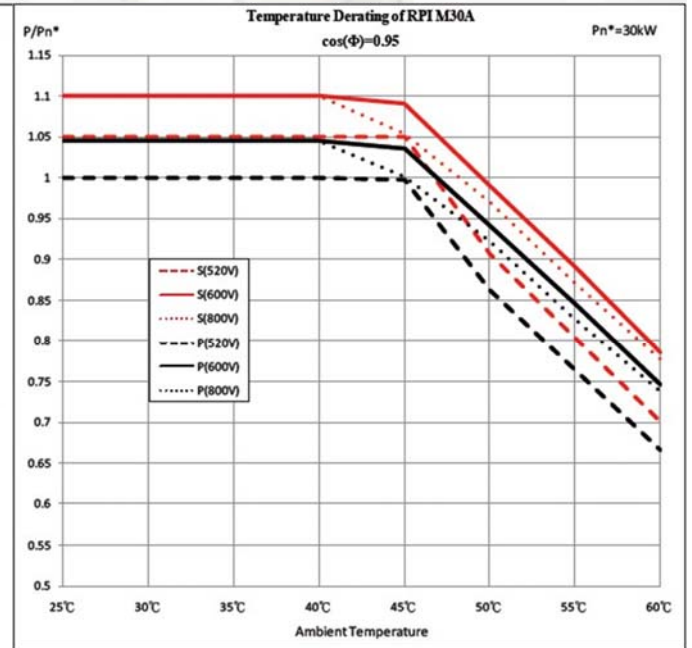
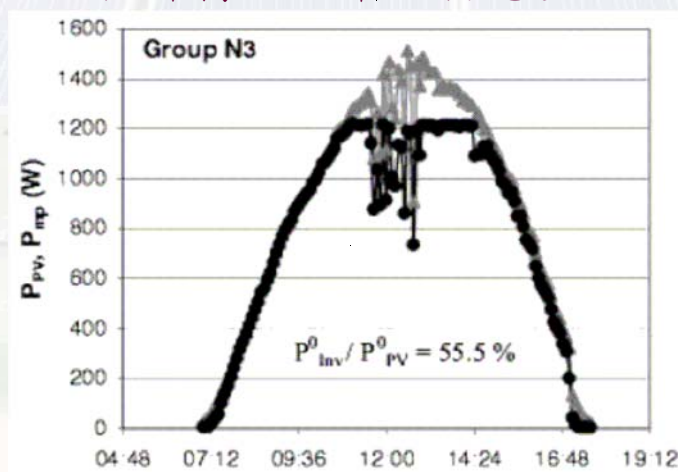


圖9-2: M30A溫度降載曲線 (cosφ=0.95)

## 組列與變流器之容量匹配

- 容量過小的變流器，增加PV DC Power Cut-off 損失!
- 容量過大的變流器，增加變流器轉換損失!(變流器於輕載時效率較低)。
- 地球公轉，造成日光與模組法線偏移，造成陽光發電損失。
- PV模組設置於非最適位置(高傾斜角、正東、...)，應適當調降變流器容量，以提升轉換效率及發電量。





## 實際案例設計

模組:

■ 新日光單玻310W D6M310H3A

1. 變流器最大輸入電壓

--→ 單串片數、環境最低溫

2. 變流器的工作電壓(最佳轉換效率)

--→ 單串片數、模組溫度

3. 變流器的輸入功率

--→ 單串片數、輸入串數、MPP數目

## 實際案例-變流器

變流器\_SMA

DC Input	
	<b>STP 25000TL-30</b>
Maximum DC power at $\cos \varphi = 1$	25550 W
Maximum input voltage	1000 V
MPP voltage range	390 V to 800 V
Rated input voltage	600 V
Minimum input voltage	150 V
Initial input voltage	188 V
Maximum input current, input A	33 A
Maximum input current, input B	33 A
Number of independent MPP inputs	2
Strings per MPP input	3

## 實際案例

■ 變流器: SMA 25KW STP\_25000TL-30

■ 2個MPP、每一MPP併2串21片模組

--> 每個MPPT的電流容量

		MPPT1	MPPT2
環境低溫(°C)	0 °C	▶ 最大開路電壓(V)	
		893.2 V	893.2 V
模組		變流器	
模組功率 P <sub>N</sub> :	310 W	最大輸入電壓(V):	1000 OK
開路電壓 Voc:	39.75 V	MPPT數:	2
短路電流 I <sub>sc</sub> :	9.91 A	MPPT1串數:	2
最大功率電壓 V <sub>mp</sub> :	32.78 V	MPPT1片數:	21
最大功率電壓 I <sub>mp</sub> :	9.52 A	MPP最大輸入電流(A):	30 OK

黃宏欣太陽光電設置實驗室

31

- 單一變流器下，設置容量為  
310 W×21片×2串×2MPP=26,040 W
- 變流器容量 25,550 W
- 設置變流器容量比：26040/25550=1.02

MPPT數:	2
MPPT1串數:	2
MPPT1片數:	21
MPP最大輸入電流(A):	30
MPPT2串數:	2
MPPT2片數:	21

單元設置容量=26.04 kWp

DC Input	STP 25000TL-30
Maximum DC power at cos φ = 1	25550 W

黃宏欣太陽光電設置實驗室

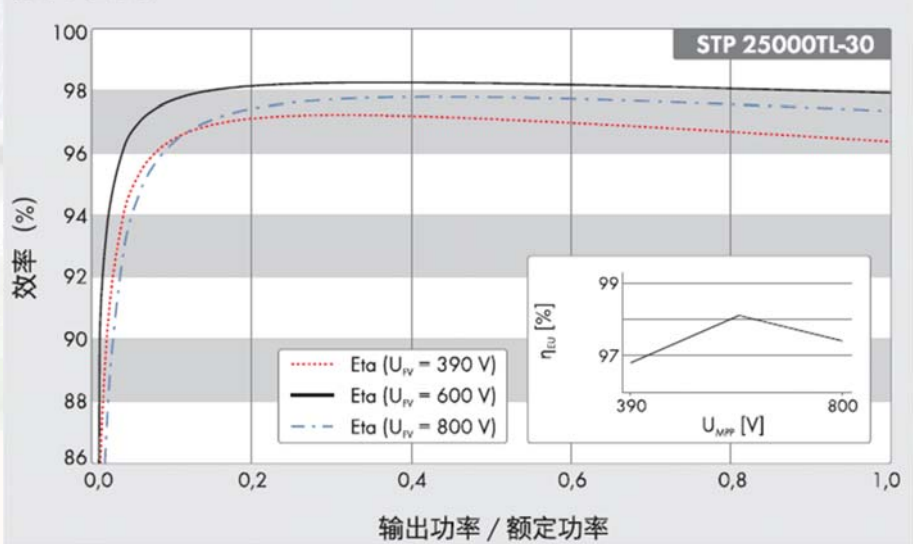
32



## 實際案例-變流器

- 變流器標稱電壓600 V
- 當地最高日照1300 W/m<sup>2</sup>。
- 當地模組溫度達到68°C

效率曲线 串列電壓VS變流器效率



黃宏欣太陽光電設置實驗室

33

## 實際案例-變流器

		MPPT1	MPPT2
環境低溫(°C)	0 °C	最大開路電壓(V)	893.2 V
模組背板溫度(°C)	68 °C	預測開路電壓(V)	734.2 V
		預測工作電壓(V)	605.5 V
		預測輸出功率(kW)	14.16 kW
日照值	1300 W/m <sup>2</sup>	總功率(kW)	28.32 kW
		總功率+5%(kW)	29.74 kW

### 預測

1. 串列電壓在最大日照時，滿載輸出串列電壓會在變流器效率最高的標稱電壓(600 V)附近。
2. 模組發電量在無損下達28.32 kW。  
發電容量比：28320/26040=1.09



# 發電效能驗證

dc_voltage01	dc_voltage02	dc_current01	dc_current02	dc_total_current
605.2	604.98	21.177	20.765	41.942
595.68	595.46	21.597	21.042	42.639

dc_power01	dc_power02	dc_total_power	日照量
12.816	12.561	25.377	1273
12.863	12.529	25.392	1276.13



日照 1276 W/mm<sup>2</sup> → 串列直流電壓：604、595 V

發電比：25385/27732=0.915

發電容量比：25385/26040=0.975

模組背板溫度(°C)	68 °C	預測開路電壓(V)	734.2 V	734.2 V
日照值	1273 W/m <sup>2</sup>	預測工作電壓(V)	605.5 V	605.5 V
		預測輸出功率(kW)	13.87 kW	13.87 kW
		總功率(kW)	27.732 kW	
			STP 25000TL-30	
			Maximum DC power at cos φ = 1	
			25550 W	

## • 線損

- 線長
- 電流值
- 線溫
- 端子及接點阻值


銅線電阻：	5.09 Ω/km @ 20 °C
線長：	100 公尺
線溫：	45 °C
線電阻：	5.59 Ω
電流：	21 A
線損：	23.48 V
工作電壓：	605.5 V
壓降：	3.9%
電壓(V)：	582.02 V

## 結論

- 變流器容量與太陽能模組設置容量之比值，影響發電效率甚巨，一般設在0.9~1.2。
- 最適的配比可透過太陽能模組參數及環境週查資料來計算。順序為設計最大發電量時之串列電壓，匹配變流器最大交直流轉換效率；計算串列數匹配MPP輸入電流，並計算容量以取得最大發電量。

## 結論(2)

- 太陽能設置容量和變流器的容量比，考慮以下因子：
  1. 最大日照強度
  2. 模組的背板溫度
  3. 串列的片數
  4. 每個MPP的串數
  5. 變流器的MPP數目
  6. 變流器的環境溫度
- 線損對發電量的影響甚鉅。因子有：線長、電流值、線溫、端子及接點阻值等。



~感謝您的聆聽~