

## 考量熱動力學的太陽光電模組完整模型設計與實驗量測驗證

陳沛潔 蔡煥良

大葉大學電機工程學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

### 摘 要

本研究首先推導一種完整的太陽光電模型，可以適用於不同太陽能電池類型，同時這個太陽光電模型包含了電力子模組及熱動力學子模組，完整地描述太陽光電模組的電力輸出特性和熱動力學特性。本文所提出的太陽光電完整模型是用 Matlab/Simulink 套裝軟體實現及分析，考量日照強度和週遭環境條件對太陽能電池的影響，太陽能電池溫度可由日照輻射、週遭環境溫度和風速計算得到，有了電池溫度及日照強度，太陽光電模組的電力輸出特性如工作電壓、輸出電流及功率即可計算得到。最後我們以一組商品化太陽光電模組的電池溫度和輸出功率在真實的工作條件下經由實驗量測，把實驗結果和本文所建立的太陽光電完整模型的模擬結果做比對，比較結果可以證明所提出的模型非常接近實際太陽光電模組的輸出結果，驗證了太陽光電完整模型的仿真性。

**關鍵詞：**太陽光電完整模型，熱動力模型，電池溫度，Matlab/Simulink

## The Design and Experimental Verification of a Complete Photovoltaic Module Model Considering its Thermodynamics

PEI-JIE CHEN and HUAN-LIANG TSAI

*Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University*

*No. 168, University Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 51591, R.O.C.*

### ABSTRACT

This paper presents a novel complete model for a photovoltaic (PV) module of different cell types, which describes both electricity characteristics and thermal dynamics of PV completely. This study implements and analyzes the proposed model in the Matlab/Simulink environment. Considering the effects of sunlight irradiation and ambience conditions, the cell temperature is explicitly derived regarding sunlight irradiance, ambience temperature, and local wind speed. The cell temperatures and output powers of a commercial PV module are evaluated through a series of experiments in real working conditions. Comparing the experimental results with those simulated by the proposed model, the proposed model is validated and proven to be extremely close to a practical module.

**Key Words:** complete PV model, thermal model, cell temperature, Matlab/Simulink



## 一、前言

太陽能電池 (solar cell) 是太陽光電 (photovoltaic, PV) 發電系統裡的基本能源轉換裝置, 它的輸出電流和功率等電力特性取決於日照強度、電池工作溫度和工作電壓。設計和評估一個太陽光電電力系統的運作, 太陽光電模型應該有適度的複雜性, 才能在真實的操作條件下有效地用來預測  $I-V$  和  $P-V$  的輸出特性。許多研究太陽光電模型主要是以單一二極體型 (single-diode) 為主 [1-3, 18], 其中包含一個光電流源、一個二極體、一個並聯電阻和一個串聯電阻; 另外一些研究提出較複雜的太陽光電模型, 如兩個二極體 (two-diode) 模型 [5, 11, 13] 和三個二極體 (three-diode) 模型 [14] 的等效電路, 針對多晶矽太陽能電池特別考量載子的重組和漏電流的影響, 對於多晶矽太陽能電池可以提供更好的準確性。在一般太陽光電發電系統的設計和操作評估, 首先選擇適度的複雜性和有足夠的精準度, 一個實際單一二極體模型具備上述兩個條件, 然而這種模型並未考量日照強度、週遭環境溫度和風速對太陽能電池溫度的影響, 所以在實際操作條件下太陽光電電力輸出特性量測值與預測值之間的誤差仍需要改善。事實上, 紅外線區的太陽光譜約有 42% 的太陽能產生的廢熱, 有助於提高太陽能電池的工作溫度, 電池溫度主要是受到日照強度、電池額定操作溫度 [12]、週遭溫度 [4, 10, 17] 影響, 日照強度增加雖然提高了光電流, 卻導致整體輸出電流和輸出功率降低 [16]。特別是, Skoplaki 和 Palyvos [17] 回顧了相關文獻, 適當地分類為顯性和隱性兩種相互關係, 連接太陽能電池工作溫度與週遭天氣條件的關係。另一方面, 太陽能電池溫度本身是動態的, 因為陽光照射強度和周圍環境條件相互作用的變化是動態的, Jones 和 Underwoods [7] 指出, 太陽能電池溫度的穩態模型在面對日照強度急劇波動時, 無法準確適時地描述電池溫度的劇烈變化。太陽能電池因為光電材料的熱質量和周圍的天氣條件, 電池溫度對時間的暫態響應變得顯著。然而 Jones 和 Underwoods 所提出太陽光電系統的熱模型研究, 主要集中在熱能交換和熱平衡, 並未考慮太陽能電池電能轉換的特點。由上述文獻回顧可知, 到目前為止, 並沒有相關太陽光電模型研究把電池溫度的光熱效應納入考量。本研究提出一種新的太陽光電完整模型, 整合通用型太陽光電電力模型和熱模型, 完整考量太陽光電發電和熱力學的特性, 其中通用型太陽光電電力模型描述  $I-V$  和  $P-V$  的輸出特性, 熱模型考量真實天氣條件在電池溫度的影響, 進而影響太陽光

電模型的電能交換。

本文最主要的貢獻是提出新的太陽光電完整模型, 它可用於太陽光電模組, 整合分析電力的輸出特性和熱交換的兩種模型, 此外, 這被提出的模型是經過實際操作的驗證。

## 二、完整的太陽光電模型

基本上, 太陽光電 (PV) 轉換是一個直接將太陽的輻射能轉換電能。太陽能電池的 p-n 接面組成是由半導體製程製造而成的。太陽能電池受到太陽光照射, 被吸收的光子能量大於半導體的能帶能量, 可以成比例產生一些電子-電洞對。由於受 p-n 接面內部電場的影響, 這些載體被清楚分開且形成光電流。太陽光電模組的  $I-V$  和  $P-V$  輸出特性取決於太陽日照強度和電池工作溫度, 呈現非線性的輸出特性曲線。太陽能電池溫度的動態模型受到許多變數影響, 例如: 電池材料、包裝因素和光電模組的熱質量大小和週遭天氣情況。

### (一) 廣義的電力模型

一般來說, 一個典型的太陽能電池的輸出電壓在 0.5V、輸出功率少於 2W。因此, 商品化的太陽光電模組或陣列都會以串聯或並聯配置, 以產生所需的輸出電壓和功率。一組  $N_p$  並聯、 $N_s$  串聯太陽光電模型等效電路如圖 1(a) 所示 [8-9]。本文推導廣義的太陽光電模型  $I-V$  輸出特性方程式, 表示如下:

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left\{ \exp \left[ \frac{q}{k T_{PV} A} \left( \frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) \right] - 1 \right\} - \frac{1}{R_{SH}} \left( \frac{N_p V}{N_s} + I R_s \right) \quad (1)$$

其中  $I_{PH}$  是光產生的電流或光電流,  $I_S$  是電池的飽和電流,  $q$  代表電荷量 ( $=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ),  $k$  為波耳茲曼常數 ( $=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ),  $T_{PV}$  是光電的操作溫度,  $A$  是理想因子,  $R_{SH}$  是並聯電阻,  $R_s$  是串聯電阻。光電流的大小主要取決於日照強度和太陽能電池的工作溫度, 表示如下:

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_I (T_{PV} - T_{Ref})] \lambda \quad (2)$$

其中時  $I_{SC}$  是太陽能電池在工作溫度  $25^\circ\text{C}$ 、日照強度  $1 \text{kW/m}^2$  的標準測試條件下的短路電流,  $K_I$  是太陽能電池的短路電流溫度係數,  $T_{Ref}$  是電池的參考溫度,  $\lambda$  是日照強度 (單位:



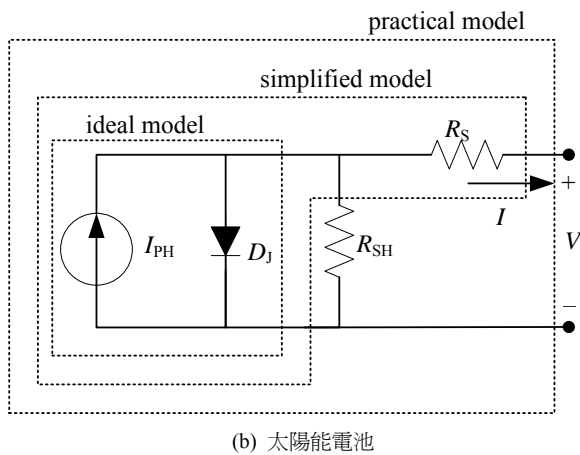
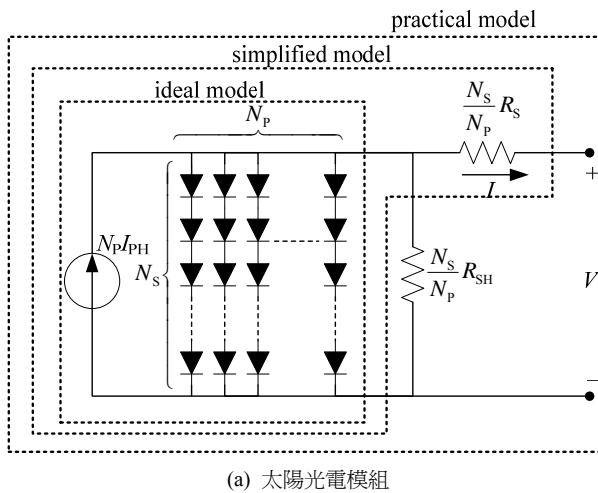


圖 1. 等效電路模型

$\text{kW/m}^2$ )。另一方面，太陽能電池的飽和電流會隨電池溫度而變化，可以表示為

$$I_S = I_{RS} \left( \frac{T_{PV}}{T_{Ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_G}{kA} \left( \frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T_{PV}} \right) \right] \quad (3)$$

其中  $I_{RS}$  在標準測試條件下的反向飽和電流， $E_G$  是在太陽能電池內半導體材料的能隙大小。當要表示一個太陽能電池模型，可以令  $N_P=N_S=1$ ，其等效電路圖如圖 1(b) 所示。

一般來說， $R_{SH}$  的大小變化對太陽能電池的光電轉換效率的影響並不明顯。而  $R_S$  有一點小變化時，將直接明顯地影響太陽光電輸出電流及功率等特性曲線。一般商品化太陽光電模組都是先串聯太陽能電池，因此串聯電阻成爲重要影響因素，並聯電阻可以假定爲無窮大，其簡化模型的輸出電流和電壓方程式可以表示

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \left\{ \exp \left[ \frac{q}{kT_{PV}A} \left( \frac{V}{N_S} + \frac{IR_S}{N_P} \right) \right] - 1 \right\} \quad (4)$$

## (二) 電池溫度的熱模型

太陽能電池到太陽光輻射，部分太陽光能源直接轉換爲電能。然而，未能轉換的能量會儲存在電池變成熱能，導致太陽能電池的溫度上升。太陽能電池在自然環境中工作溫度預期會受到週遭溫度及風速影響，因此太陽能電池溫度是一個主要以日照強度和周圍的天氣條件爲變數的函數。太陽能電池組裝成模組，這些模組通常以抗反射層覆蓋減少反射並鑲嵌於鋁材金屬，以特殊層壓板的機械保護。Messenger 和 Ventre [12] 描述電池工作溫度可以用週遭溫度及日照強度爲變數以線性函數趨近，表示如下

$$T_{PV} = T_{Amb} + \left( \frac{T_{NOCT} - 20}{0.8} \right) \lambda \quad (5)$$

其中  $T_{Amb}$  是環境溫度， $T_{NOCT}$  是額定操作條件下電池溫度，其操作條件爲：環境溫度  $20^\circ\text{C}$ ， $AM1.5$ ， $\lambda = 0.8 \text{ kW/m}^2$ ，和風速少於  $1 \text{ m/s}$ 。事實上，電池溫度變化是一階時間延遲的時域響應；因此，穩態的電池溫度模型不能有效迅速地反應日照強度恆速的波動變化。因此，太陽能電池工作溫度的動態行爲需要考量太陽光電模組的熱質量，同時需要整合電力模型以完整描述太陽光電能量的轉換。本文太陽光電熱模型係以 Jones 和 Underwoods 的熱模型爲基礎，惟太陽光電發電能量直接由我們所建立的廣義太陽光電模型的輸出功率求得。對於一個典型的平板式太陽光電模組，由玻璃、乙稀醋酸乙稀酯共聚物 (EVA) 和 Tedlar (聚偏氟乙稀，聚氟乙稀) 薄層以三明治方式覆蓋，並密封包裝在鋁框內。爲分析方便，假設太陽光電模組在不同層的溫度是均勻一致的，整個太陽光電模組以一個簡單的平面板來分析。熱動力模型包含了熱的傳導、對流和輻射等能量交換，電力能量交換是由太陽光電模型所產生的電力形式。太陽能電池工作溫度的動態方程式可以表示成

$$mC\dot{T}_{PV} = Q_{Rad} + Q_{Env} - Q_{Conv} - P_{PV} \quad (6)$$

其中  $mC$  是太陽光電模組的熱質量，爲產品每一層的質量和熱容量乘積的總和， $Q_{Rad}$  是輻射達到太陽光電模組表面的淨值， $Q_{Env}$  是在等效環境 (考量天空、地面和周圍環境) 的長



波輻射熱交換能量， $Q_{Conv}$  是太陽光電模組正面和背面整體表面的熱對流， $Q_{PV}=IV$  為太陽光電模組的輸出功率，其大小值是由廣義模型的  $I-V$  輸出特性直接計算得到。對太陽光電模組而言，有效輻射能量與太陽日照強度、太陽光電模組電池面積  $A_{PV}$  和吸收率有關，可以表示成

$$Q_{Rad}=\alpha\lambda A_{PV} \quad (7)$$

其中  $\alpha$  是太陽光電模組吸收率，矽基的太陽光電模組約 77%。長波輻射熱能交換與背景環境溫度有關，可表示如下：

$$Q_{Env} = A_{PV}\sigma\epsilon_{PV}(T_{Amb}^4 - T_{PV}^4) \quad (8)$$

其中  $\sigma[=5.67\times 10^{-8}W/m^2K^4]$  是斯蒂芬-波爾茲曼常數， $\epsilon_{PV}(=0.9)$  是太陽光電模組的發射率。整體熱對流轉換考量前面板的強制對流和背板的自由對流，可表示為

$$Q_{Conv} = (h_{Force} + h_{Free})A_{PV}(T_{PV} - T_{Amb}) \quad (9)$$

其中  $h_{Force}$  和  $h_{Free}$  分別是強迫對流和自由對流係數。強制對流係數可以風速為變數，近似為線性函數

$$h_{Force}=3v_{Wind}+2.8 \quad (10)$$

其中  $v_{Wind}$  是風速。自由對流係數與垂直面的空氣溫度有關，可以近似為

$$h_{Free} = 1.31\sqrt{T_{PV} - T_{Amb}} \quad (11)$$

### 三、模型的建立與驗證

#### (一) 太陽光電模型的參數決定

在廣義的太陽光電模型中，有些參數是太陽光電模組製造商的技術資料是找不到的，如能隙能量和理想因子，這兩個參數取決於半導體材料及太陽電池製程技術；另外還有二極體的反向飽和電流、串聯和並聯電阻大小。大多數研究將能隙和理想因子視為可調參數來調整改善模型的精準度。然而能隙大小和理想因子的選擇是可以根據不同的電池類型來決定，如表 1 [6, 15]。大部份太陽光電模組製造商僅提供在標準測試條件下的數據資料，以西門子 SM46 太陽光電模組為例，原廠所提供的重要參數如表 2。最廣泛使用的重要參數是描述電池的電氣特性如開路電壓 ( $V_{OC}$ )、短路電流

表 1. 太陽能電池的理想因子和能隙

Cell type	A	Eg(eV)
Mono-Si	1.026	1.12
Poly-Si	1.025	1.14
a-Si:H	1.800	1.65
a-Si:H tandem	3.300	2.90
a-Si:H triple	3.090	1.60
CdTe	1.500	1.48
CIS	1.500	1.00
AsGa	1.300	1.43

表 2. Siemens SM 46 規格 (1 kW/m<sup>2</sup>, 25°C)

Characteristics	Spec.
Typical peak power ( $P_p$ )	46W
Voltage at peak power ( $V_{pp}$ )	14.6V
Current at peak power ( $I_{pp}$ )	3.15A
Short-circuit current ( $I_{SC}$ )	3.35A
Open-circuit voltage ( $V_{OC}$ )	18.0V
Temperature coefficient of open-circuit voltage	-77mV/°C
Temperature coefficient of short-circuit current ( $K_i$ )	1.2mA/°C
Approximate effect of temperature on power	-0.38W/°C
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45°C

( $I_{SC}$ )、在最大功率點 (maximum power point, MPP) 的額定電流 ( $I_{MPP}$ ) 和電壓 ( $V_{MPP}$ )，及開路電壓溫度係數 ( $K_V$ ) 和短路電流溫度係數。

以太陽光電模組製造商的產品規格為基礎，我們可以推導太陽光電模型的其他未知參數。首先已知開路電壓 ( $V_{OC}$ ) 時和短路電流 ( $I_{SC}$ )，在不考量分流漏電流條件下，反向飽和電流 ( $I_{RS}$ ) 可近似得到如下

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{\exp\left(\frac{qV_{OC}}{kAT_{Ref}}\right) - 1} \quad (12)$$

其次，串聯電阻控制  $I-V$  輸出特性曲線在開路條件時的斜率及影響最大功率點 (MPP) 附近的形狀。在標準測試條件下，串聯電阻的大小可以經由最大額定功率  $P_{MPP}$  計算得到，最大輸出功率  $P_{MPP}$  對電壓的微分在最大功率點為零，串聯電阻可由下列方程式直接計算得到

$$R_S = \frac{V_{MPP}}{N_S I_{MPP}} - \frac{kT_{Ref} A}{q I_{RS}} \exp\left[-\frac{q}{kAT_{Ref}} \left(\frac{V_{MPP}}{N_S} + \frac{R_S I_{MPP}}{N_P}\right)\right] \quad (13)$$



方程式 (13) 解是一個疊代過程， $R_S$  慢慢地從  $R_S=0$  遞增，直到符合廠商所提供標準測試條件下在最大功率點 (MPP) 時的工作電壓、輸出電流及功率等數據。另一方面，為了比較廣義和簡化模型準確性的差異，並聯電阻必須加以確定。已知  $R_S$ ，在最大功率點 ( $V_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ ) 可以由方程式 (1) 推導得到  $R_{SH}$

$$R_{SH} = \frac{\frac{N_p V_{MPP}}{N_s} + I_{MPP} R_S}{N_p I_{SC} - N_p I_{RS} \left\{ \exp \left[ \frac{q}{k T_{Ref} A} \left( \frac{V_{MPP}}{N_s} + \frac{I_{MPP} R_S}{N_p} \right) - 1 \right] \right\} - I_{MPP}} \quad (14)$$

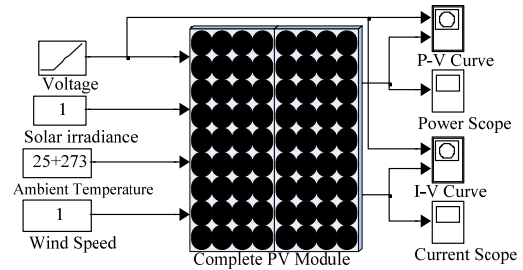
最後，Duffie 和 Beckman [4] 指出並聯電阻在。現實工作環境與日照強度下成反比，表示如下

$$R_{SH}(\lambda) = \frac{R_{SH}}{\lambda} \quad (15)$$

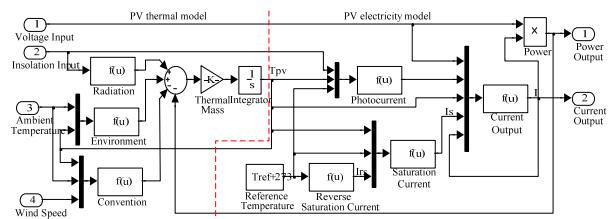
一般來說，太陽光電模組廠商僅提供在標準測試條件下的熱參數，如開路電壓和短路電流的溫度係數 ( $K_V$ ,  $K_I$ )。然而，熱模型中有一個熱質量需要確定。假設太陽光電模組的熱動力響應是一階系統，其時間常數為  $\tau = (mC)^{-1}$ ，表示電池溫度接近到穩態值所需的時間。有了時間常數，即可估計其熱質量。

(二) 建立模型

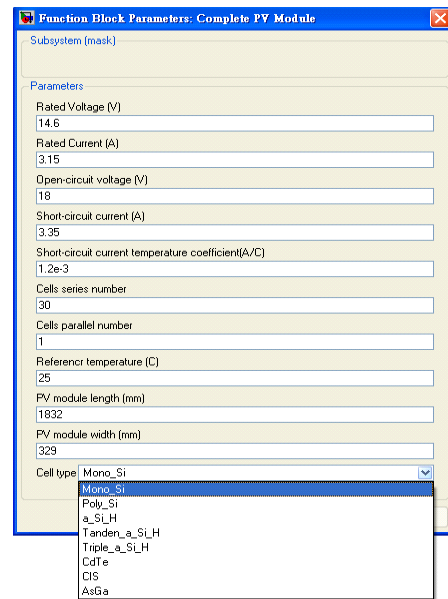
本文在 Simulink 環境平台建立一個完整的太陽光電模型，這個 Simulink 軟體的特色為圖形使用者界面 (graphic user interface, GUI) 和使用者友善。該模型包括太陽光電電力模型和熱模型，直接以日照強度和周圍的天氣條件對電池溫度的影響。具有圖形遮罩的太陽光電模型及其子系統如圖 2(a) 和 (b) 所示，為了使完整太陽光電模型更易於使用和理解，我們運用了太陽光電模組圖作為圖型遮罩。此外，如圖 2(c) 所示，對話框的設計可以輸入不同太陽光電模組的參數，如同 Simulink 現有的模組程式庫。為了使開發的模型可廣泛適用於不同的太陽能電池，在對話框編輯器內置彈出控制，用來設定電池型式輸出信號，彈出式窗口列表如圖 2(d) 所示。對話框的電池變數是彈出項目，表單如圖 2(c) 所示，該電池變數是用來選擇相關的理想因子  $A$  和能隙  $E_G$ 。



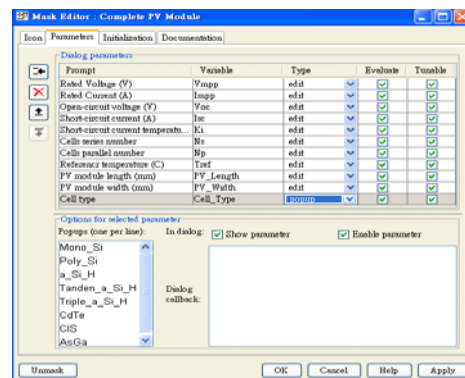
(a) 具圖型遮罩完整的太陽光電模型



(b) 太陽光電子系統模型



(c) 對話框



(d) 遮罩參數編輯器

圖 2. 建立模型



### (三) 太陽光電電力模型驗證

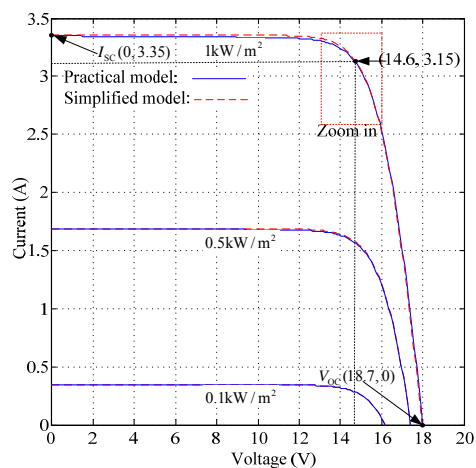
首先，根據太陽光電模組廠商所提供數據資料進行了驗證電力模型的準確性。以西門子 SM46 太陽光電模組為例，廠商一般僅提供在標準測試條件下的實驗數據。為了驗證 SM46 模組在標準測試條件下  $I-V$  和  $P-V$  輸出特性，電池溫度固定在  $25^{\circ}\text{C}$ ，日照強度為  $1\text{ kW/m}^2$ ，工作電壓從  $0\text{V}$  至  $20\text{V}$  以每次  $0.1\text{V}$  遞增。該串聯電阻使用反覆計算程序，滿足最大功率點  $P_{\text{MPP}}$  的  $(V_{\text{MPP}}, I_{\text{MPP}})$  條件。其結果是  $R_{\text{S}}=1.15\times 10^{-2}\Omega$ 。有了串聯電阻，直接計算得到並聯電阻為  $R_{\text{SH}}=24.814\Omega$ 。圖 3 和圖 4 顯示所提出的模型  $I-V$  和  $P-V$  輸出曲線非線性的特性。為了比較該模型的準確性和實際之間的簡化模型，結果是沒有  $R_{\text{SH}}$  的簡化模型也顯示在圖 3、4。很明顯，標準測試條件下，簡化和實際模型大致都能吻合原廠所提供實驗數據。為了清楚表達在最大功率點的值，放大最大功率點附近的曲線圖如圖 3(b) 及 4(b) 所示，實際模型比簡化模型更具有較好的精準度。為了評估實際模型和簡化模型在不考慮環境條件陽光低照射下的差異性，兩個模型的串聯電阻固定在  $R_{\text{S}}=1.15\times 10^{-2}\Omega$ ，實際模型的並聯電阻與日照強度成反比。日照強度分別為  $0.5\text{ kW/m}^2$  和  $0.1\text{ kW/m}^2$  時  $I-V$  和  $P-V$  輸出特性如圖 3(a) 和 4(a) 所示。很明顯，實用模型在較低的日照強度下更接近簡化模型，分析原因是在低日照時，並聯電阻增大，降低並聯電阻對輸出電流和功率的影響。

### 四、實驗驗證

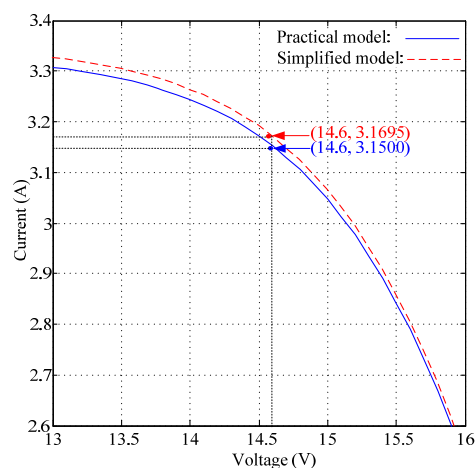
這個實驗的設計是評估商品化太陽光電模組在真實工作條件下，如日照強度、環境溫度和風速，比較實際量測的電池溫度和輸出功率與我們所提出的太陽光電完整模型的模擬結果之間的準確性，其目的是驗證文中所提出的太陽光電模型和真實的太陽光電模組之間的吻合程度。假設條件為最大功率追蹤器具有良好的最大功率點追蹤能力。

#### (一) 實驗配置

如圖 5 所示，實驗設備包含西門子 SM46 太陽光電模型、最大功率追蹤控制器 (SUNSAVER-10)、蓄電池、電風扇做負載、及一些電壓、電流、溫度量測儀器。此實驗設備架設在大葉大學的能源研究發展中心 (ERDC)。太陽光電模型是安裝在一個朝南的開放式機架上，傾斜角  $23.5^{\circ}$ 。一個日照計 Lutron LX-1102 以相同的傾斜角固定在太陽光電模組來量測的太陽日照強度。一個 TES-1314 溫度計具有雙



(a) 全尺寸圖



(b) 局部放大圖

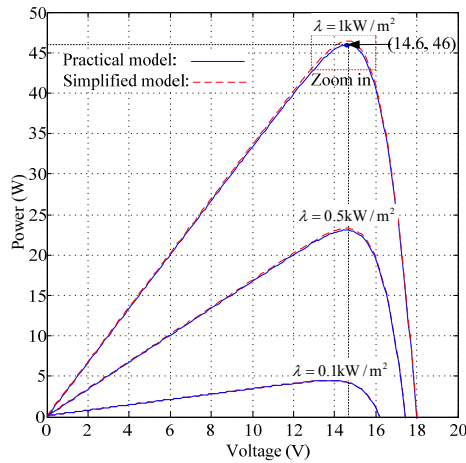
圖 3. Siemens SM46 在標準測試條件下的  $I-V$  輸出特性

輸入通道分別量測環境溫度和太陽光電模型背板的表面溫度。電池溫度是以背板溫度增加溫差  $2.5\lambda$  [10] 來修正。兩個 CIE 8050 萬用電表分別來測量工作電壓及輸出電流。太陽光電模組的輸出功率由量測的電流及電壓相乘得到。風速的數據是由風速儀 (Young model 05013V) 量測得到。

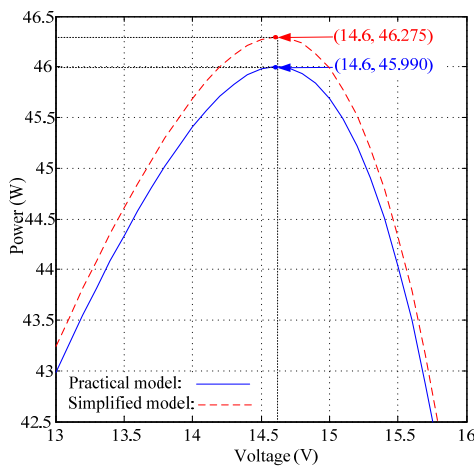
#### (二) 量測結果和模型驗證

實驗自 99 年 7 月 1 日起至 8 月 31 日止，每天從 8:00 至 17:00 進行了 9 小時的量測記錄，每隔一小時記錄日照強度、週遭溫度與電池溫度、及太陽光電模組的工作電壓、輸出電流等數據。圖 6 為單一日期每小時日照強度和週遭溫度的變化情形。風速從 8:00 至 14:00 止平均為  $2\text{ m/sec}$ ，從 15:00 至 16:00 止平均風速為  $4\text{ m/s}$ 。太陽光電模組電池溫度和輸出功率的實驗量測和模擬結果如圖 7(a) 和 (b) 所示。由圖 7(a) 可以看出，太陽光電模組的實際量測溫度是非常接





(a) 全尺寸圖



(b) 局部放大圖

圖 4. Siemens SM46 在標準測試條件下的 I-P 輸出特性

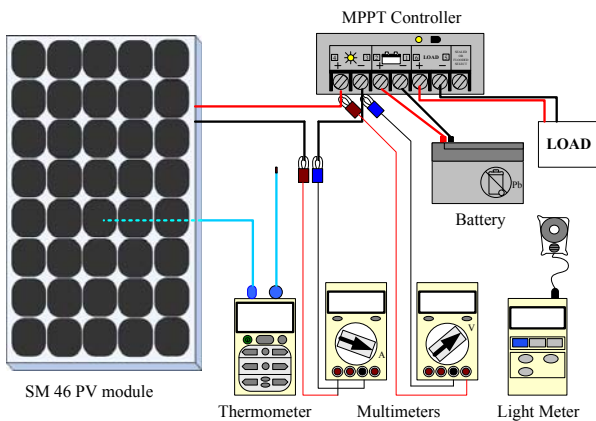


圖 5. 實驗裝置示意圖

近本文所提出的太陽光電完整模型的模擬結果，誤差小於 3°C、平均標準差為 1.55°C。對照方程式 (5) 電池溫度和

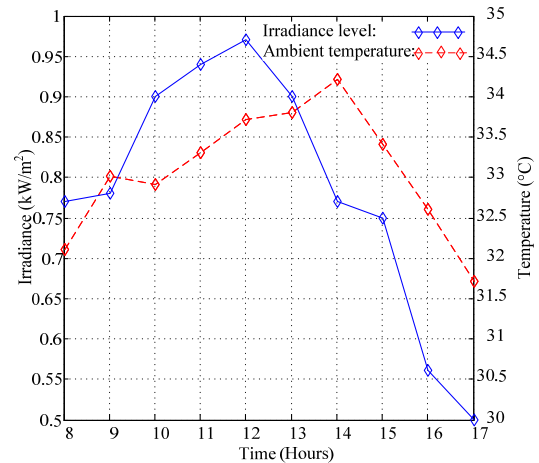


圖 6. 一天日照強度和環境溫度每小時變化情形

日照強度的線性近似模型，它的模擬結果也描繪在圖 7(a)。由圖中可以明顯看出，太陽光電模組的電池溫度曲線形狀接近量測值和模擬模型，但誤差明顯變大，分析其差異原因是由於在額定工作電池溫度限制為：環境溫度 20°C、AM1.5、 $\lambda=0.8 \text{ kW/m}^2$ 、風速小於 1 m/s。另一方面，實驗量測的輸出功率和實際的完整模型及線性近似模型的模擬結果如圖 7(b)；為了比較方便，以實際量測值為參考基準，實際模型與線性近似模型模擬的輸出功率分別與實際量測值的差異如圖 7(c)，雖然兩者誤差都小於 2.6 W，但兩者的標準差分別為  $3.1340 \times 10^{-2} \text{ W}$ 、 $5.2806 \times 10^{-1} \text{ W}$ 。實驗證明太陽光電完整模型和實際量測結果比較具有更好的精確度，本文所提出完整的太陽光電模型的電池溫度和輸出功率精準度兩者更接近量測值。

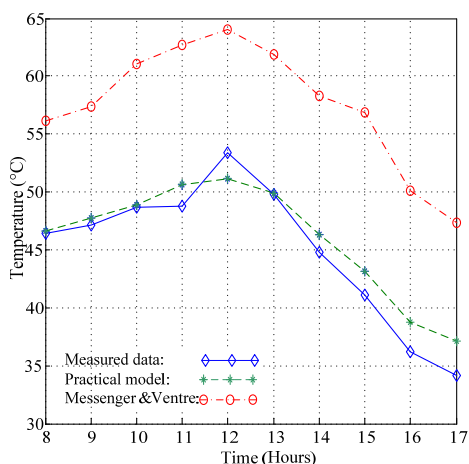
### (三) 討論

由圖 7(b) 可以明顯看出，本文所提出完整光電模型所模擬預測輸出功率都低於實際量測值，探究其可能原因係本實驗量測所採用的西門子 SM46 太陽光電模型已經出廠超過 10 年，並未考量模組轉換效率的可能性。若考量其轉換效率衰減率為 0.1%/年，實驗量測的輸出功率和修正後的完整模型、線性近似模型的模擬結果如圖 8 所示；由圖中可以看出，完整的太陽光電模型更接近於實際量測結果，其中完整模型的模擬結果與實驗量測的輸出功率低於 1.5 W。

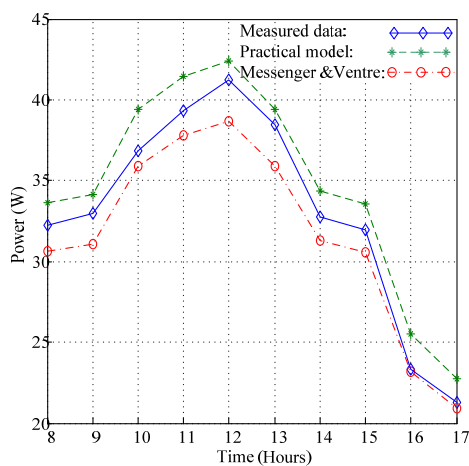
## 五、結論

傳統的太陽光電模型都是以日照強度和電池溫度做為輸入參數。電池溫度自然受到陽光照射和環境溫度所影響。

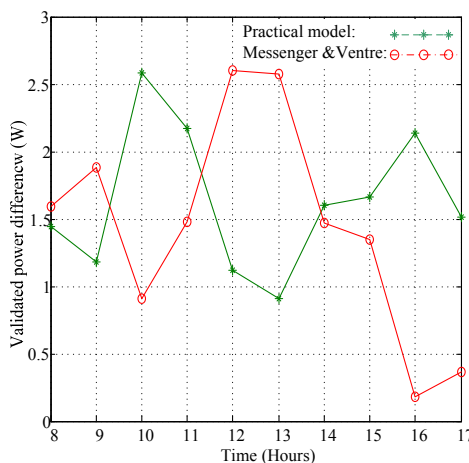




(a) 電池溫度



(b) 輸出功率



(c) 輸出功率差異分析

圖 7. 太陽光電模組 SM46 的時間響應分析

我們所提出的完整模型整合太陽光電發電模型和熱模型，可以明確地表示輸出功率和電池溫度間互動關係的特色，考量太陽光電發電的輸出特性和光電的能量交換與週邊環境的

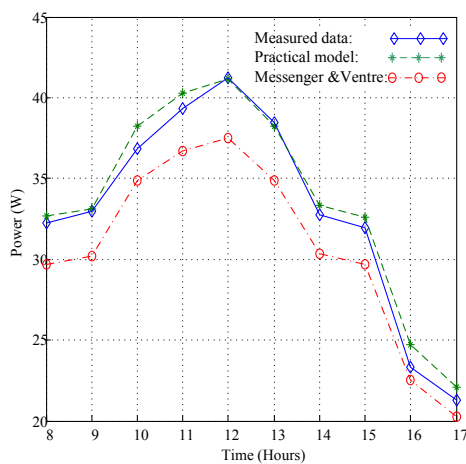


圖 8. 考量太陽光電模組 SM46 轉換效率下降的輸出功率分析

熱能交換。經由實際工作環境的實驗量測驗證，本文所提出太陽光電完整模型的輸出特性，更接近實際量測結果。

### 誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會補助大專學生參與專題研究計畫（計畫編號：NSC99-2815-C-212-005-E），得以順利完成，特表謝意！

### 參考文獻

1. Carrero, C., J. Amador and S. Amaltes (2007) A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances. *Renewable Energy*, 32(15), 2579-2589.
2. Celik, A. N. and N. Acikgoz (2007) Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. *Applied Energy*, 84, 1-15.
3. De Blas, M. A., J. L. Torres, E. Prieto and A. Garcia (2002) Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable Energy*, 25(3), 317-180.
4. Duffie J. A. and W. A. Beckman (2006) *Solar Engineering of Thermal Process*, 3rd Ed., 749-761. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
5. Gow, J. A. and C. D. Manning (1999) Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 146(2), 193-199.
6. Hua, C. C. and C. M. Shen (1998) Study of maximum





- power tracking techniques and control of dc-dc converters for photovoltaic power system. Proceedings of 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Fukuoka, Japan.
7. Jones, A. D. and C. P. Underwoods (2001) A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 70(4), 349-359.
  8. Kim, I. S. and M. J. Youn (2005) Variable-structure observer for solar array current estimation in a photovoltaic power-generation system. *IEE Proceedings- Electric Power Applications*, 152(4), 953-959.
  9. Kim, I. S., M. B. Kim and M. J. Youn (2006) New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53, 1027-1035.
  10. King, D. L., W. E. Boyson and J. A. Kratochvil (2004) *Photovoltaic Array Performance Model*. Sandia Report No. SAND2004-3535, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
  11. Kurobe, K. I. and H. Matsunami (2005) New two-diode model for detailed analysis of multicrystalline silicon solar cells. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(12), 8314-8321.
  12. Messenger, R. and J. Ventre (2000) *Photovoltaic Systems Engineering*, 41-51. CRC Press, Boca Raton.
  13. Nishioka, K., N. Sakitani, K. I. Kurobe, Y. Yamamoto, Y. Ishikawa, Y. Uraoka and T. Fuyuki (2003) Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cells using modified equivalent circuit model. *Japanese Journal of Applied Physics*, 42(12), 7175-7179.
  14. Nishioka, K., N. Sakitani, Y. Uraoka and T. Fuyuki (2007) Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 91(13), 1222-1227.
  15. Partain, L. D. (1995) *Solar Cells and Their Applications*, John Wiley & Sons, New York, NY.
  16. Patel, M. R. (1999) *Wind and Solar Power Systems*, 127-132. CRC Press, Boca Raton.
  17. Skoplakia, E. and J. A. Palyvos (2009) Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34(1), 23-29.
  18. Villalva, M. G, J. R. Gazoli and E. R. Filho (2009) Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198-1208.
- 收件：100.03.28 修正：100.05.02 接受：100.06.02

