

太陽光電 / 熱能輔助熱泵熱水器系統之設計

蔡煥良 許介彥

大葉大學電機工程學系

51591 彰化縣大村鄉學府路168號

摘要

本論文提出一套新型太陽光電 / 熱能輔助熱泵熱水器 (Photovoltaic / thermal assisted heat pump water heater, PVTA-HPWH) 系統的設計研究。首先，以商品化太陽光電模組背板製作冷媒散熱流道，形成一組 PVT 模組做為太陽能輔助熱泵熱水器 (Solar assisted HPWH, SA-HPWH) 的蒸發器 (Evaporator)；並以 MATLAB/Simulink 軟體開發一套 PVTA-HPWH 系統模擬平台，針對不同的氣候條件進行模擬分析；另一方面，以模型為基礎的方法論設計自給自足式控制系統，以太陽光電模組的發電量來供應熱泵熱水器運作所需電力。PVTA-HPWH 系統中的 PVT 蒸發器可以收集的太陽能轉換成熱能，提供熱泵熱水器的冷媒蒸發功能，同時冷媒可以降低太陽光電模組溫度，提昇 PV 發電效率，發揮相輔相成的效能。最後，運用 LabVIEW 自動化量測軟體與其資料擷取介面開發 PVTA-HPWH 監控系統，實際量測天候條件、PVTA-HPWH 的操作變數的實驗結果，最後與 MATLAB/Simulink 所建立模型的模擬結果相互比較，藉以驗證理論與實務。

關鍵詞：太陽光電 / 熱能輔助熱泵熱水器，自主式控制系統，LabVIEW 監控系統。

Design of Photovoltaic/Thermal-assisted Heat Pump Water Heater System

HUAN-LIANG TSAI and CHIEH-YEN HSU

Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University

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

ABSTRACT

This paper presents a photovoltaic/thermal-assisted heat pump water heater (PVTA-HPWH) with a novel PVT evaporator. A commercial PV module was augmented with a fluid flow channel of R134a refrigerant, which was used as the PVT evaporator of a solar-assisted HPWH system. The hardware of the PVTA-HPWH system was then realized. A simulation model of the PVT evaporator and HPWH was subsequently designed and implemented in the MATLAB/Simulink environment. An autonomous control system was designed for the PVTA-HPWH system with solar energy. The novel PVT evaporator provides the heat pump with both PV electricity and thermal energy for water heating. In addition, the refrigerant enhances PV efficiency by producing a cooling effect and thermal efficiency by extracting environmental heat directly from the ambient. Finally, a LabVIEW-based monitoring and control system with data acquisition interfaces was designed; the system

automatically collects and records critical data, such as irradiance, operating temperature, voltage and current data. The measured and predicted results were compared to validate the proposed system.

Key Words: photovoltaic/thermal-assisted heat pump water heater (PVTA-HPWH), autonomous control system, LabVIEW-based monitoring and control system.

一、前言

熱水及暖氣空調是人類生活的重要需求，一般的熱水或暖氣空調都是以傳統的化石燃料如天然氣或燃油直接燃燒來供應，從節能減碳議題及效能指標（Coefficient of performance, COP）的觀點來看，都是不符環保及能源效益的。近年來，具有較高 COP 值優點的熱泵（Heat pump, HP）在熱水或暖氣空調廣為大家所接受，雖然熱泵系統有使用冷媒、造成溫氣體的議題，2009 年 5 月歐盟將熱泵所獲得的能源視為再生能源[15]；英國 Energy and Climate Change Department 於 2011 年 3 月頒佈 Renewable Heat Incentive (RHI) [2]將熱泵結合太陽能、空氣熱源及地熱所產生的熱能歸屬於再生能源的一種補助項目。因此，未來結合再生能源的熱泵系統將成為再生能源的生力軍。由文獻[1,3-12, 16-18]中可以發現，PVT 整合系統的研究已經已超過三十年，運用水 / 空氣等流體擷取太陽能電模組受到日照所產生的熱能，不僅可以降低太陽能電池的工作溫度、增加發電效率，還可以將熱能加值應用在熱水、空間加熱空調，PVT 系統的整體效率約 60~70 %（PV:10~20%，熱能 \geq 50%）。空氣源及太陽能熱泵熱水器是傳統的熱泵熱水技術，惟太陽能熱泵熱水器研究還是以太陽能集熱器（Solar collector）為主，若能將太陽能集熱器改變成太陽光電與熱能（PVT）與熱泵熱水器（HPWH）結合起來，互取其優點，預期可以有加成的效果。

二、系統描述

（一）PVT 模組

PVT 模組設計是以國內愛能有限公司商品化的 200 Wp 太陽光電模組，將其背板製作冷媒散熱流道及聚苯乙烯（polystyrene, PS）發泡熱隔離層，形成一組太陽光電 / 熱能（PVT）模組，模組架構圖如圖 1，每一個模組的電氣額定功率為 200 Wp。參考廠商在標準測試條件（Standard test condition, STC）下的電氣與熱能數據資料，建立 PV 模組的模擬模型，並繪製 PV 模組的 $I-V$ 、 $P-V$ 輸出特性曲線如圖 2，電氣特性如表 1。

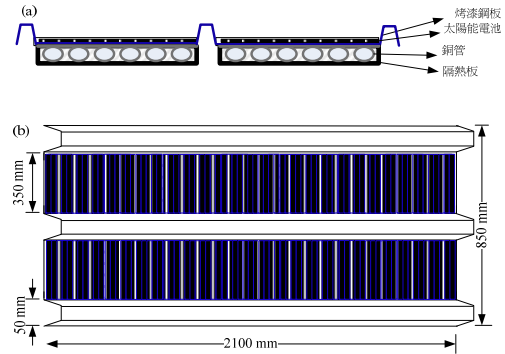


圖 1. PVT 模組架構圖：(a) 側視圖；(b) 上視圖。

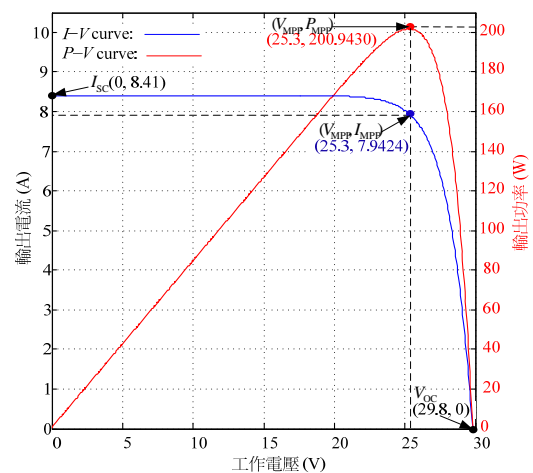


圖 2. $I-V$ 、 $P-V$ 輸出特性曲線

表 1. PVT 電氣特性諸元表 (@1 kW/m², 25°C)

Characteristics	Specs.
Maximum power rating (P_{MPP})	200.9 W
Rated voltage (V_{MPP})	25.3 V
Rated current (I_{MPP})	7.94 A
Short circuit current (I_{SC})	8.41 A
Open circuit voltage (V_{OC})	29.8 V
Temperature coefficient of open-circuit voltage (K_V)	-95 mV/ C
Temperature coefficient of short-circuit current (K_I)	6.7 mA/ C
Nominal operating cell temperature (NOCT)	46 C

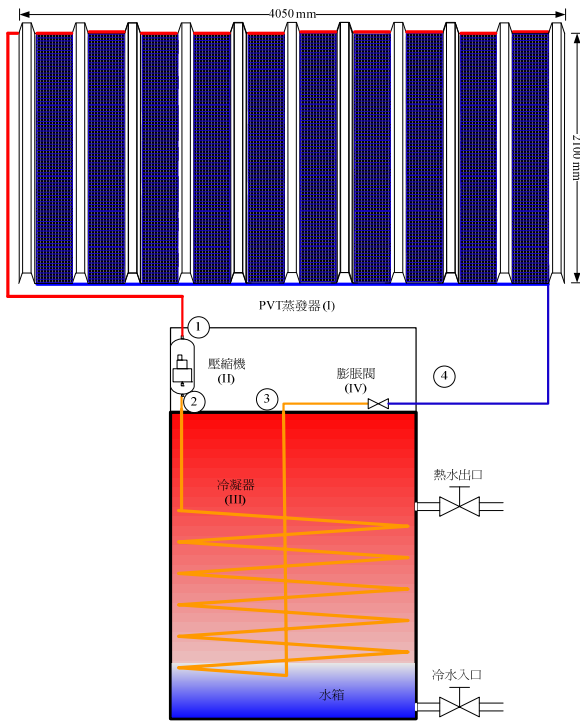


圖 3. PVTA-HPWH 系統架構圖

(二) PVTA-HPWH 系統及工作流程

太陽光電/熱能輔助熱泵熱水器 (PVTA-HPWH) 系統是由 PVT 蒸發器 (I)、壓縮機 (II)、冷凝器 (III) 及膨脹閥 (IV) 組成，系統架構圖如圖 3。首先，低溫的冷媒經由膨脹閥 (IV) 進入 PVT 模組 (I)，藉由太陽熱能蒸發冷媒 (4→1)，低溫的冷媒可以降低太陽能電池工作溫度，提昇 PV 發電效率；經由熱交換後較高溫的冷媒經由壓縮機 (II)，可以較低的消耗功率壓縮，提升溫度至少到 65°C (1→2)；高溫的冷媒直接進入水箱中的冷凝器 (III)，釋放熱能加熱水箱中的水 (2→3)；最後，低溫的冷媒再經由電力控制膨脹閥進入蒸發器 (3→4) 形成迴路。

三、理論基礎

(一) 數學模型

太陽光電/熱能輔助熱泵熱水器 (PVTA-HPWH) 系統包含 PVT 蒸發器 (I) 及壓縮機 (II)、冷凝器 (III)、溫度調節膨脹閥 (IV)、水箱等熱泵熱水器子系統。PVT 模組可以作為太陽能收集器 (Solar collector)，其 PVT 模組能源交換的動態方程式可以表示成

$$m_{PVT} C_{PVT} \dot{T}_{PVT} = Q_{Solar} - Q_{Rad} - Q_{Conv} - P_{PV} - Q_{RF} \quad (1)$$

其中 m_{PVT} 、 C_{PVT} 、 T_{PVT} 是 PVT 模組的熱質量及溫度， Q_{Solar} 是太陽輻射到達 PVT 模組表面的淨值， Q_{Rad} 是在等效環境 (考量天空、地面和周圍環境) 的長波熱輻射交換能量， Q_{Conv} 是 PVT 模組正面表面的熱對流， $P = IV$ 為太陽光電模組的輸出功率，其大小值是由 $I-V$ 輸出特性直接計算得到。對 PVT 模組而言，有效輻射能量與太陽日照強度、PVT 模組電池面積和吸收率有關，可以表示成

$$Q_{Solar} = \alpha G A_{PV/T} \quad (2)$$

其中 α 是太陽光電模組吸收率，本文中矽基的太陽光電模組約 77% [13]。長波熱輻射熱能交換與周遭環境溫度有關，可表示如下：

$$Q_{Rad} = \sigma \varepsilon_{PVT} (T_{PVT}^4 - T_{Amb}^4) A_{PVT} \quad (3)$$

其中 σ 是斯蒂芬-波爾茲曼常數， ε_{PVT} 是太陽光電模組的發射率， T_{Amb} 為周遭溫度。考量模組前面面板的強制對流，其大小可表示為

$$Q_{Conv} = h_{Conv} (T_{PVT} - T_{Amb}) A_{PVT} \quad (4)$$

其中 h_{Conv} 是強制對流係數，與風速 v_{Wind} 有關，大小如下 [14]：

$$h_{Conv} = \begin{cases} 5.6212 + 3.9252v_{Wind}, & v_{Wind} < 4.88 \text{ (m/s)} \\ (3.290v_{Wind})^{0.78}, & 4.88 \leq v_{Wind} < 30.48 \text{ (m/s)} \end{cases} \quad (5)$$

考量一個由 N_P 並聯及 N_S 串聯組成的太陽光電模組，其電流-電壓輸出特性方程式可以表示如下：

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \left[\exp \left(\frac{q}{k T_{PV} A} \left(\frac{V}{N_S} + I \frac{R_S}{N_P} \right) \right) - 1 \right] - \frac{N_P V + N_S I R_S}{N_S R_{SH}} \quad (6)$$

其中光電流 I_{PH} 表示太陽光電池經由光照射後所產生的電流， I_S 表示太陽能電池飽和電流， q 是電荷， k 是波茲曼常數， T_{PV} 是 PV 模組電池的工作溫度， A 是理想參數， R_{SH} 和 R_S 則分別表示電池的等效並聯及串聯電阻。PV 模組的電流大小主要取決於日照強度和電池本身的工作溫度，如下式：

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_1(T_{PV} - T_{Ref})]G \quad (7)$$

其中 I_{SC} 表示太陽能電池在 STC 條件下的短路電流， K_1 是電池短路電流下的溫度常數， T_{Ref} 是電池的參考溫度。另一方面，太陽能電池飽和電流和溫度的關係式如下：

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_{PV}}{T_{Ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_G}{kA} \left(\frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T_{PV}} \right) \right] \quad (8)$$

其中 I_{RS} 是電池的逆向飽和電流， E_G 是電池半導體元件本身的能隙。 Q_{RF} 是冷媒的能源交換量，其大小為

$$Q_{RF} = \dot{m}_{RF}(H_1 - H_4) \quad (9)$$

其中 \dot{m}_{RF} 為冷媒質量流速， H_i 為冷媒的焓值。在額定的冷媒質量流速條件下，壓縮機的消耗功率大小為

$$P_{CP} = \frac{\dot{m}_{RF} p_1 v_s}{\eta_{CP}} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (10)$$

其中 p_2 和 p_1 為壓縮機的排出和吸入壓力值， v_1 為吸入端冷媒特定體積大小， γ 為排出和吸入壓力比值。同時壓縮機的轉速 ω_{CP} 為

$$\omega_{CP} = \frac{60v_s \dot{m}_{RF}}{\eta_v V_d} \quad (11)$$

其中 η_v 為體積效率， V_d 為位移體積。冷凝器與水箱的熱交換方程式為

$$Q_{CD} = \dot{m}_{RF}(H_2 - H_3) = m_w C_{pW} \dot{T} \quad (12)$$

其中 m_w 、 C_{pW} 及 \dot{T} 為水箱內水的質量、比熱及溫度變化速率。熱膨脹閥的能源平衡方程式為

$$\dot{m}_{RF} H_4 = \dot{m}_{RF} H_3 \quad (13)$$

(二) 轉換效率及效能指標

從能源轉換的觀點來看，入射的太陽能可有效地轉換成電能 (PV electricity) 及熱能 (Solar thermal)，太陽光電效率、熱能及太陽光電/熱能效率可以定義如下：

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{Q_{Rad}} \quad (14)$$

$$\eta_{TH} = \frac{Q_{CD} - P_{CP}}{Q_{Rad}} \quad (15)$$

和

$$\eta_{PVT} = \eta_{PV} + \eta_{TH} \quad (16)$$

另一方面，熱泵熱水器的效能指標 (Coefficient of performance, COP) 可以定義如下：

$$COP = \frac{Q_{CD} + P_{PV}}{P_{CP}} \quad (17)$$

(三) 模擬模型

依據上述數學方程式的推導，我們可以在 MABLAB / Simulink 模擬平台發展的 RIPVTA-HPWH 系統模型，如圖 4，其中圖 4 (a) 是含有圖型遮罩的模型，圖 4 (b) 子系統可以由上而下細分分為太陽熱能模型、太陽電能及熱泵熱水器等三個子系統模型，預期可以準確地模擬預測系統的輸出特性。

四、實驗建構及實際量測結果分析

(一) 實驗平台

本實驗平台的設計如圖 5 所示，以 200 Wp 的 PVT 模組 5 組，以串聯形成太陽光電陣列，電氣額定輸出功率為 1 kWp，背板的冷媒散熱流道以平行散熱方式並聯後，連接到額定功率 1 kWp 熱泵熱水器系統的壓縮機及熱膨脹閥，形成一組太陽光電／熱能輔助熱泵熱水器系統 (PVTA-HPWH)，其中熱泵熱水器的儲水容量為 200 公升。

另一方面，日照計安裝於 PVT 模組旁，直接量測日照強度；同時在 PVT 模組的背板安裝一組溫度感測器，量測 PVT 模組的工作溫度；串聯的太陽光電陣列直接接到 PV 換

流器 (Inverter)，轉換成 AC 220 V 交流電經由配電箱併網到市電電網，PV 換流器的應用軟體 SolarPower 提供太陽光電的工作電壓、輸出電流及輸出功率。1 kWp 熱泵熱水器系統運轉所需的電力直接由市電提供，電子控制單元 (Electric control unit, ECU) 依預先設計自主式控制法則，利用預定工作電流及輸出功率控制壓縮機轉速及冷媒質量流速，同時控制膨脹閥的開關週期，使整體 PVTA-HPWH 系統的運轉壓力及溫度如表 2。所有的感測及量測訊號由 LabVIEW 自動量測系統資料收集器收集，每一分鐘取樣一次。

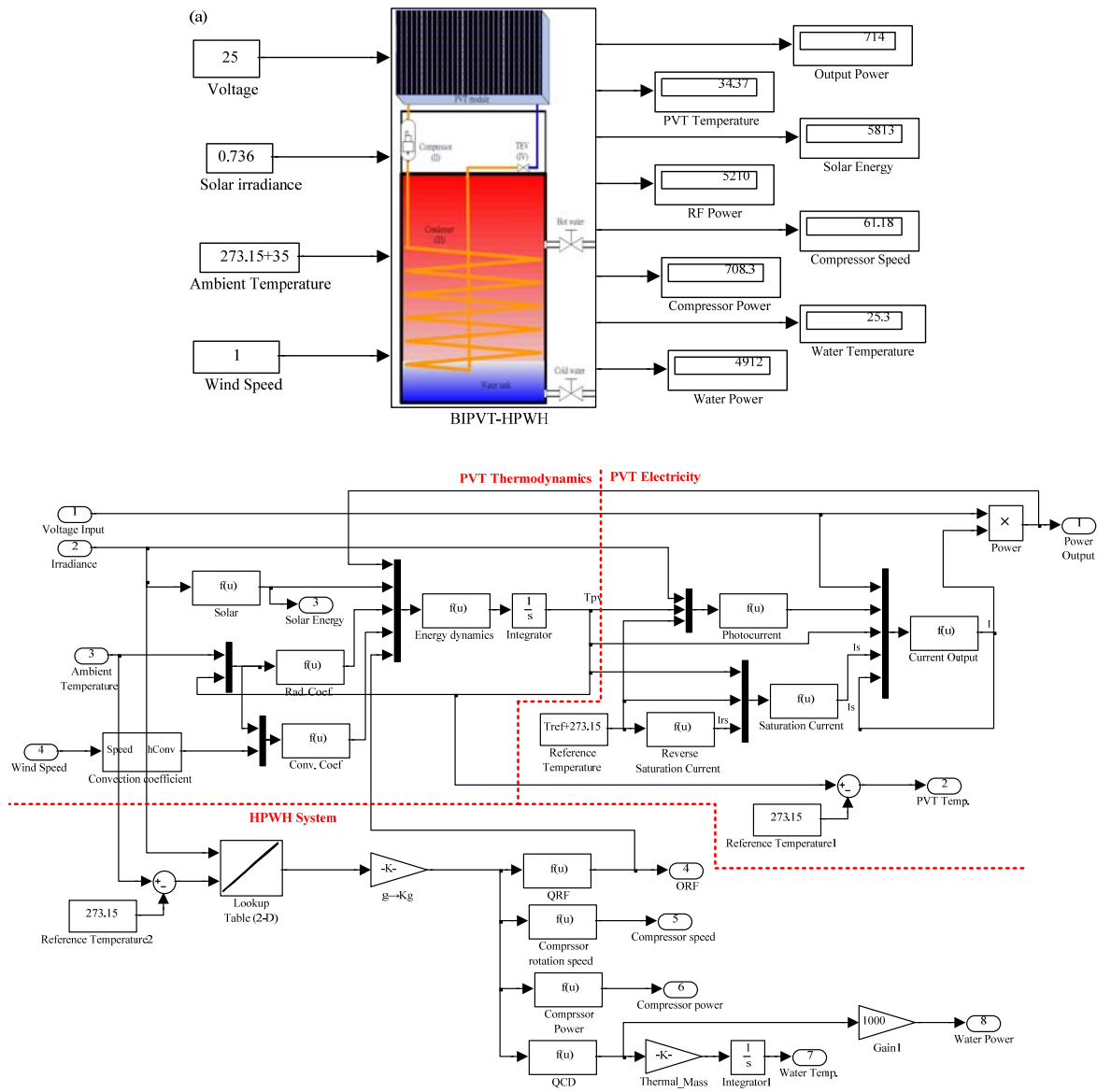


圖 4. 模擬模型

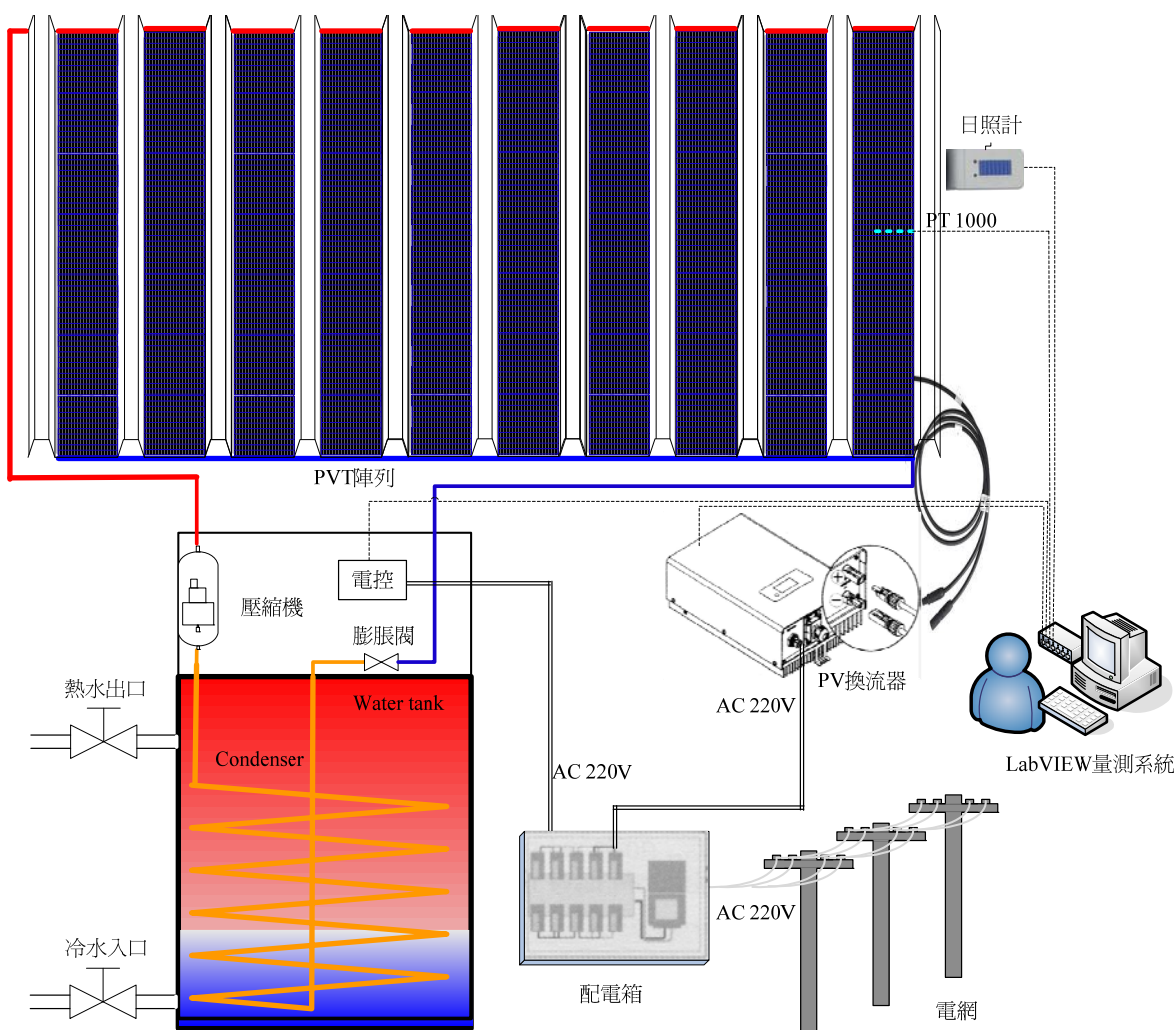


圖 5. 測試平台

表 2. 各工作點冷媒 R134a 的熱動力值

Point	Phase	Pressure (bar)	Temperature (°C)	Enthalpy (kJ/kg)
1	Vapor	4.146	25	418.1
2	Vapor	14.915	65	437.5
3	Liquid	16.822	60	287.4
4	Liquid/Vapor (x=0.3876)	4.146	10	287.5

(二) 量測結果分析

以 6 月 16 日晴空無雲的中午為例, 平均日照強度為 850 W/m², 周遭溫度平均 35 °C, 平均風速低於 1 m/s, 量測結果如圖 6 (a) - (b) 所示。由圖中可以發現 PVT 模組的工

作溫度在系統啟動運轉後, 立即低於周遭溫度, 同時遠低於 PV 模組的額定操作度 (Nominal operating cell temperature, NOCT); 因此, 低溫的冷媒流道不僅可以擷取周遭空氣的熱能, 同時可以降低太陽能電池的工作溫度, 提升太陽光電轉換效率。由圖 6 (b) 中可以發現, 量測的 PVT 模組工作溫度較低於模擬預測值約 0.1139°C, 因此, 在圖 6 (c) 中, PV 的輸出電流與輸出功率均較高於預測值分別約 0.1076 A 及 0.9277 W。由圖 6 (d) 中可以看出, 即使日照強度有快速變化情況下, 壓縮機的消耗功率均低於 PV 輸出功率約 19.2689 W, 表示 PVT 模組輸出電力足以供應熱泵熱水器壓縮機運轉所需電力, 全系統可以自給自足工作。水箱水的溫度變化及儲存熱能如圖 6 (e), 由於水箱保溫隔熱能力的自然限制, 一般實際量測的水溫會較低於模擬預測值。

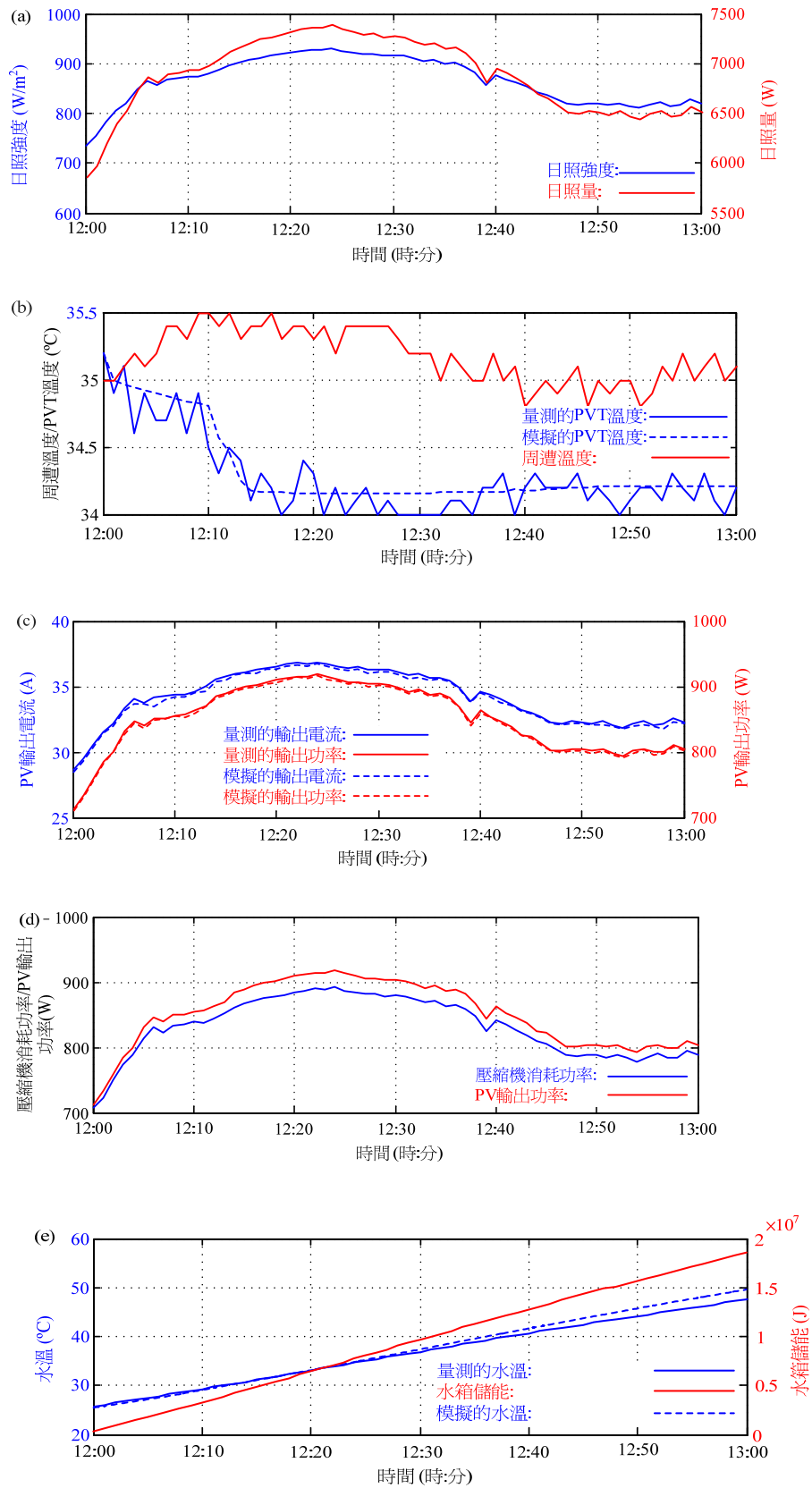


圖 6. 晴空無雲的量測結果：(a) 日照強度及日照量，(b) 周遭溫度及 PVT 模組溫度，(c) PV 輸出電流及輸出功率，(d) 壓縮機消耗功率與 PV 輸出功率，(e) 水箱水溫度及儲能熱量。

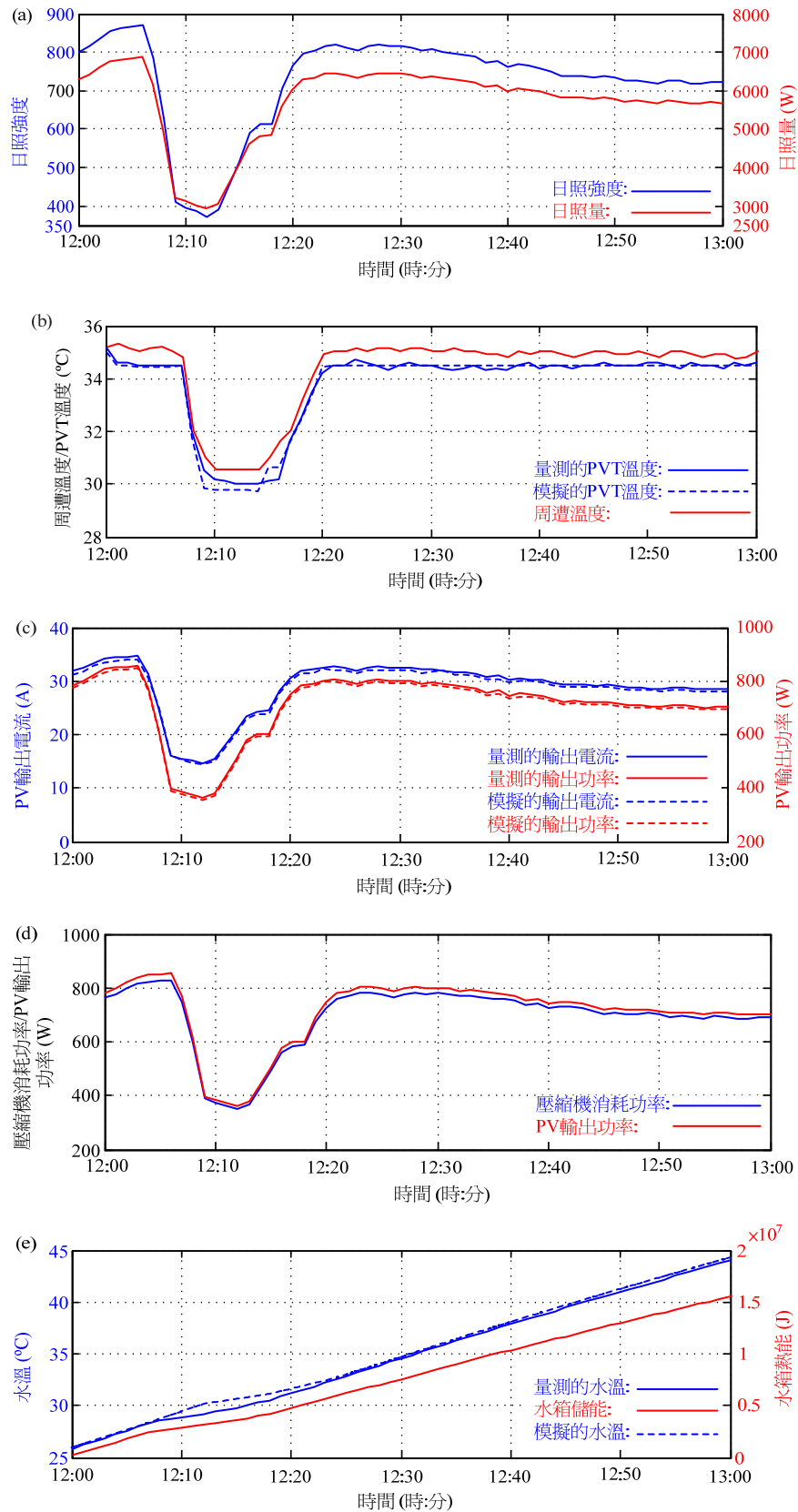


圖 7. 晴時多雲的量測結果：(a) 日照強度及日照量，(b) 周遭溫度及 PVT 模組溫度，(c) PV 輸出電流及輸出功率，(d) 壓縮機消耗功率與 PV 輸出功率，(e) 水箱水溫度及儲能熱量。

以 6 月 12 日晴時有雲的中午為例，平均日照強度為 700 W/m^2 ，周遭溫度平均 35°C ，平均風速為 3 m/s ；中午 12:08 至 12:20 時有雲層遮蔽日照，日照強度由 850 W/m^2 下降到 400 W/m^2 上下，周遭溫度變化降到 30.5°C ，如圖 7 (a) - (b) 所示。由圖中可以看出 PVT 模組的工作溫度在系統啟動運轉後，立即低於周遭溫度約 1°C ，同時遠低於 PV 模組的額定操作度 (NOCT)；因此，低溫的冷媒流道同時具有擷取周遭空氣的熱能與降低太陽能電池工作溫度、提升太陽光電轉換效率的功能。由圖 7 (b) 中可以發現，量測的 PVT 模組工作溫度與模擬預測的 PVT 模組工作溫度會有一個遲滯現象，探究其原因是我們在預估 PVT 模組的熱質量時並沒有估算冷媒的熱質量，因此在實際量測時，PVT 模組會有較高的熱質量，相對會有較大的遲滯反應現象；另一方面，量測的 PVT 模組工作溫度較低於模擬預測值，因此，在圖 7 (c) 中，PV 的輸出電流與輸出功率均較高於預測值分別約 0.1636 A 及 0.9305 W 。由圖 7 (d) 中可以看出，即使日照強度有快速變化情況下，壓縮機的消耗功率均低於 PV 輸出功率約 12.5788 W ，表示 PVT 模組輸出電力足以供應熱泵熱水器壓縮機運轉所需電力，全系統可以自給自足工作。水箱水的溫度及儲存如圖 7 (e)，由於水箱保溫隔熱能力的自然限制，一般實際量測的水溫會較低於模擬預測值。

五、結論

經由太陽光電/熱能輔助熱泵熱水器 (PVTA-HPWH) 系統實作、模擬模型建立與數值模擬，並經由實驗量測驗證我們所提出太陽光電/熱能輔助熱泵熱水器更具備實際的應用。特別是我們台灣政府積極推動「陽光屋頂百萬座計畫」，本文所提出的太陽光電/熱能輔助熱泵熱水器可在有限的屋頂空間，同時發電及熱水供應，整體效益比單純建置太陽光電或太陽能熱水器更高。

本論文研究共計完成下列 4 項成果：1. 以商品化的太陽光電模組製作 PVT 模組當成熱泵熱水器的蒸發器；2. 以 MATLAB/Simulink 軟體開發一個以太陽光電/熱能 (PVT) 模組為蒸發器的熱泵熱水器 (PVT-HPWH) 模擬平台，針對不同的氣候條件進行模擬分析；3. 設計自主式控制系統，以太陽光電模組的發電量來供應熱泵熱水器運作所需電力，同時運用太陽光電/熱能蒸發器所收集的太陽能轉換成熱能提供熱泵熱水器的冷媒蒸發功能，而冷媒可以降低太陽光電模組溫度，提昇發電效率，發揮相輔相成的效能；4. 運用

LabVIEW 自動化量測軟體與其資料擷取介面開發 PVTA-HPWH 監控系統，實際量測天候條件、太陽光電/熱能熱泵熱水器的操作變數的實驗結果，最後與 MATLAB/Simulink 所建立模型的模擬結果相互比較，藉以驗證理論與實務。

誌謝

本論文研究承蒙中華民國國家科學委員會提供專題研究計畫經費 (計畫編號：NSC 101-2221-E-212-016)，謹此致謝！

參考文獻

1. Badescu, V. (2002) Model of a space heating system integrating a heat pump, photothermal collector and solar cells. *Renewable Energy*, 27(4), 489-505.
2. Barker, G. (2011) *UK Department of Energy and Climate Change, Renewable Energy Incentive*.
3. Chow, T. T. (2010) A review on photovoltaic/ thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87(2), 365-379.
4. Chow, T. T., K. F. Fong, G. Pei, J. Ji, and M. He (2010) Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong. *Applied Thermal Engineering*, 30(8-9), 1066-1072.
5. Hasan M. A. and K. Sumathy (2010) Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1845-1859.
6. Ibrahim, A., M. Y. Othman, M. H. Ruslan, S. Mat, and K. Sopian (2011) Recent advances on flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 352-365.
7. Ito, S., N. Miura, and J. Q. Wang (1997) Heat pump using a solar collector with photovoltaic modules on the surface. *Journal of Solar Energy Engineering*, 119, 147-151.
8. Ito, S., N. Miura and Y. Takano (2005) Studies of heat pump using direct expansion type solar collectors. *Transactions of the ASME*, 127, 60-64.
9. Ji, J., G. Pei, T. T. Chow, K. Liu, and H. He (2008) Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. *Solar Energy*, 82(1), 43-52.
10. Ji, J., K. Liu, T. T. Chow, G. Pei, W. He, and H. He (2009) Performance analysis of a photovoltaic heat pump. *Applied Energy*, 83(11), 1967-1976.

-
11. Ji, J., H. He, T. T. Chow, G. Pei, W. He, and K. Liu (2009) Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(5-6), 1365-1373.
 12. Kern, E. C. Jr. and M. C. Russel (1978) Combined photovoltaic and thermal hybrid collector system. *Proceedings of 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington, D.C., June 5-8, 1153-1157.
 13. Messenger, R. and J. Ventre (2000) *Photovoltaic systems engineering*, 41-51, CRC Press LCC, Boca Raton, FL.
 14. Palyvos, J. A. (2008) A survey of wind convention coefficient correlations for building envelop energy system, modeling. *Applied Thermal Engineering*, 28(8-9), 801-808.
 15. The European Parliament and the Council of the European Union (2009) Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. *Official Journal of the European Union*, L140/62.
 16. Tyagi, V. V., S. C. Kaushik, and S. K. Tyagi (2012) Advancement in solar photovoltaic/ thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383-1398.
 17. Xu, G., S. Deng, X. Zhang, L. Yang, and Y. Zhang (2009) Simulation of a photovoltaic/ thermal heat pump having a modified collector/evaporator. *Solar Energy*, 83(11), 1967-1976.
 18. Zhao, X., X. Zhang, S. B. Riffat, and Y. Su (2011) Theory study of the performance of a novel PV/e roof module for heat pump operation. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 603-614.

收件：102.09.23 修正：102.10.28 接受：102.12.03