



屋頂型太陽能板之監測與數據呈現： 使用 Arduino 與建築資訊模型

張智雄、吳佰餘、王如觀、莊皓翔／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生
梁凱倫、王蘇杰、蘇于翔／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 研究生
周建成／國立中央大學土木工程學系防災與資訊應用組 教授

我國政府於 2016 年提出發展低碳、潔淨的能源轉型路線。台灣位處亞熱帶，具豐富太陽能資源。政府規劃 2025 年將完成累積 20GW 太陽能發電裝置，其中 14GW 為地面型、6GW 為屋頂型。因大多數太陽能發電場使用集中式或串列式逆變器，現行監測系統僅可顯示整場運作情形，無個別監督、更無法因地制宜判斷異常與進行分析。本研究對象為屋頂型太陽能發電裝置，搭載 Arduino 單晶片並發展資料收集與傳送模組，整合建築物屋頂之建築資訊模型，期望電場維護管理人員可因此進行即時個別診斷，提高整場發電效益。

研究背景

隨著全球暖化、國際間永續發展趨勢，我國政府於 2016 年提出能源轉型政策，提出發展低碳、潔淨能源的轉型路線。台灣再生能源主要來自太陽與風力，因具備豐富太陽能資源，故現行太陽能發電裝置容量占全部再生能源比例為 57.8%，可用於減緩夏季尖峰負載、改善空氣品質，並具降低碳排等效益^[1,2]。

當今我國太陽能發電場大致分為地面型與屋頂型兩場域，地面型太陽能發電場裝置容量大且技術成熟，預計 2025 年累積 14GW 裝置容量^[1,2]。然因台灣地狹人稠，現行易於佈署地面型太陽能發電場的地方逐漸減少，因此，政府積極推動屋頂型太陽能裝置的佈署，截至 2020 年 9 月底，此部分累積裝置容量為 3.88GW，離 2025 年原定屋頂型目標 6GW 尚有一段距離^[1,2]。此外，我國太陽能發電場實際總發電量，在 2020 年僅占全年台電總發電量的 2.5%^[1,2]。若以鄰近香港為例，2012 年全香港本地發電 139,506TJ，從大陸購置 42,508TJ 電量，學者利用衛星遙測影像等技術，評估所有香港地面型與屋頂型的太陽能發電場域，其屋

頂型全部發電 2.66TWh，地面型為 2.88TWh，各自佔香港本地發電量的 6.9% 與 7.4%（以 1KWh = 3.6MJ 計算）^[3]。由此可知，台灣太陽能裝置成長空間大，特別是屋頂型，值得深入研究。

除了天氣等自然環境因素，事實上太陽能發電效率也受裝置本身影響。由於太陽能發電裝置輸出為直流電，若欲與市電的主電網（Electrical Grid）或智慧電網（Smart Grid）併網，必須透過逆變器將直流電轉成交流電。現今大部分太陽能發電場使用集中式或串列式逆變器（Central Inverter / String Inverter），前者將整場太陽能板線路集中一處逆變後，統一併入電網；後者則將數組太陽能板串聯至電壓約 200V ~ 800V（視逆變器規格，例如 3 串 8 並），再轉換成交流電^[1]。無論使用何種逆變器，在一串列太陽能板中只要有一塊異常，如落葉、遮蔭、鳥屎（bird droppings）等，整體發電量瞬間將下降甚多，是故，地面型太陽能發電場因週遭環境單純，較適合使用集中式逆變器；中小地面型或屋頂型太陽能發電場域，較常使用串列式逆變器，以期該系統並聯之其他未受影響太陽能板可

正常供電。即便如此，若太陽能發電場有數組串列式逆變器，可能有高諧波 (Harmonic) 較難抑制等問題 (因理想交流電源應為純正弦波形)；現今另一趨勢為使用微逆變器 (Micro Inverter)，亦即太陽能板 / 模組與逆變器為一對一關係，但因成本顯著差異 (集中式逆變器每瓦僅 0.13 美元，而微逆變器每瓦 0.34 美元以上)，實務上鮮少見此配置 [1,2]。最後，太陽能板因陰影遮擋與品管等因素，實際上每塊板發電量不一致，逆變器必須動態調整 (學理上稱作 Maximum Power Point Tracking, MPPT)，方能持續獲得最大功率，如圖 1 所示在不同太陽能照射度 (Irradiance) 下，某塊太陽能面板的電流電壓曲線 (IV Curve) [4]，有學者據此實驗，統計出相同場域下，整場使用集中式逆變器，相較於每塊太陽能板均配置逆變器 (可動態調整) 並加總發電量，後者發電量比前者多 20%；若有陰影，則後者比前者多發電 27% [5,6]。

綜合上述與相關文獻，近年許多研究將太陽能板監測與逆變器分開處理，換言之，太陽能板與所處自然環境變化可謂太陽能發電裝置之資訊上游，此輸入類資訊必須即時且完整地收集；在資訊下游端如逆變器、儲電設備等，應依此動態調整組態，最後供給主電網或自用，以期發揮最大功效。又因 Arduino 等開放式物聯網平台具價格低廉，易於改造特殊用途，本研究將以屋頂型太陽能板為研究主軸，建築屋頂不一定為平面，且可能有屋突、鄰棟遮擋等現象，如圖 2 所示為台北市某屋頂不同座向區域以 Revit 模擬出的太陽能照射量 (Insolation)，差異頗大。本研究雖不涉及逆變器，但希望開發一成本低廉監測設備，可大量佈設於屋頂型太陽能發電場，蒐集各板發電相關資訊，以利後續逆變器調整組態，並能讓維護管理人員即時診斷，例如尋找異常太陽能板位置，提升整場發電效益。

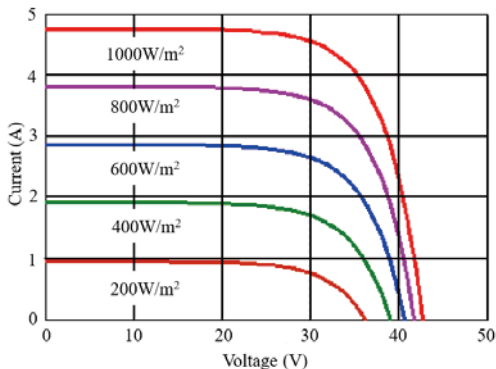


圖 1 不同太陽能照射度下之太陽能板 IV 曲線示意圖 [4]

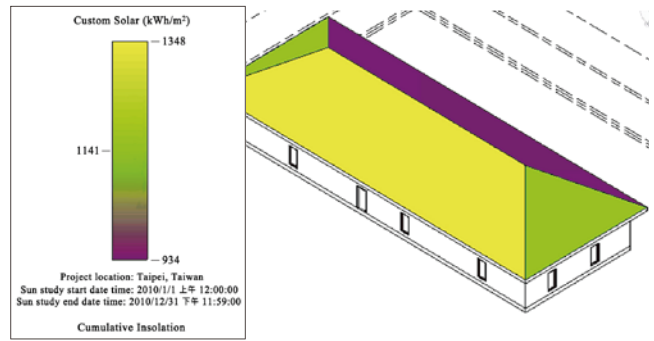


圖 2 台北某處建築屋頂區域之太陽能照射量分佈

太陽能發電裝置之相關文獻

簡言之，太陽能發電裝置包含太陽能板、支架、逆變器，與相關配線。其原理為將太陽光能轉成直流電，視太陽能板規格，依當時環境參數 (如溫度)、太陽能照射量等，產生對應直流電壓與電流，以串聯及並聯方式匯整數塊太陽能板，再交由逆變器轉成交流電供後續使用。市面上太陽能發電裝置，感測器常裝設於逆變器中，可量得彙整各板後的電壓、電流等資訊，供管理人員監控。

先前文獻探討感測器直接裝設在每塊太陽能板，以有線 [7] 或無線 [8] 方式將資料收集後回傳，但此類作法不一定適用實際場域 [9]，例如，若在每塊太陽能板附近，佈署感測器所需外部電源，將造成接線過多、維護不易。此外，在建築屋頂場域，可能有屋突、機房，鄰棟建築可能在特定時間造成陰影遮擋等，上述需求需要妥善規劃，方能建構良好的太陽能板監測，提供準確資訊讓後續逆變器可轉換出最多交流電能。

先前學者分別在 2014 年 [10] 和 2017 年 [11] 文章中提到，太陽能發電裝置之監測參數應符合英國國際電工委員會 (International Electrotechnical Commission, IEC) 標準，其定義如表 1 所示。

若單純監測太陽能板，由表 1 可知應量測 Meteorology 類型與 Photovoltaic array 類型之參數，共計有：總照射度、環境溫度、輸出電壓、電流、功率、板模組溫度。至於太陽能板的方位角與傾斜角，在成本考量下若不使用追日系統，一般均採固定值 (不需監測)。方位角如公式 (1)，傾斜角如公式 (2) 所示：

$$\text{方位角} = (\text{一天中照射度峰值時刻 (24 小時制)} - 12) \times 15 + (\text{經度} - 116) \quad (1)$$

傾斜角 = 緯度為 0° ~ 25°時，傾斜角等於緯度
 緯度為 26° ~ 40°時，傾斜角等於
 緯度加上 5° ~ 10°
 緯度為 41° ~ 55°時，傾斜角等於
 緯度加上 10° ~ 15°
 緯度為 55°以上時，傾斜角等於
 緯度加上 15° ~ 20°

(2)

表 1 太陽能發電裝置應監控的即時參數^[10]

General parameter	Specific parameter	Symbol
Meteorology	<ul style="list-style-type: none"> Total irradiance, in the plane of the array (Direct + Diffused) Ambient temperature in a radiation shield Air speed and direction (optional) 	G_I (DHI DNI)
		T_{am}
		S_W
Photovoltaic array	<ul style="list-style-type: none"> Output voltage Output current Output power Module temperature Tracker tilt angle (optional) Tracker azimuth angle (optional) 	V_A
		I_A
		P_A
		T_m
		Φ_T
		Φ_A
Energy storage	<ul style="list-style-type: none"> Operating voltage Current to storage* Current from storage* Power to storage* Power from storage* 	V_S
		I_{TS}
		I_{FS}
		P_{TS}
		P_{FS}
Load	<ul style="list-style-type: none"> Load voltage Load current Load power 	V_L
		I_L
		P_L
Utility grid	<ul style="list-style-type: none"> Utility voltage Current to utility grid* Current from utility grid* Power to utility grid* Power from utility grid* 	V_u
		I_{TU}
		I_{FU}
		P_{TU}
		P_{FU}
Back-up sources	<ul style="list-style-type: none"> Output voltage Output current Output power 	V_{BU}
		I_{BU}
		P_{BU}

* A single current or power sensor can be used for the measurement of current or power for directions of both input and output.



圖 3 本研究設計之監測盒（為拍照置於板上方，實際黏著板下方）

存取點 (Wireless Access Point, WAP)，並於監測盒內設 Web Server 可供客戶端下載監測數據，在整場控制中心的電腦掃描指定無線網路服務設定識別碼 (Service Set Identifier, SSID)，用以擷取監測資料。

如此設計，在感測器供電部分，撰寫程式讓監測盒於太陽照射度較差時（如清晨或黃昏），主動替鋰電池充電，既較不影響整體發電量，也減少電池到感測器的供電線路長度。在監測數據傳輸部分，考量現場太陽能板眾多，若每個監測盒扮演客戶端，主動上傳給控制中心電腦，則勢必面臨同時間上傳資料、網路頻寬有限，伺服器端電腦能力可能不足等現象。本研究採取讓監測盒扮演服務端，由控制中心電腦逐一唱名，透過 SSID 連結，要求各監測盒回傳資料，即便有傳輸問題，監測盒內可安裝便宜 SD 卡儲存暫時資料，等待網路通暢再行傳輸。目前單一監測盒（含各感測器）成本可控制在 2,000 元台幣以下，已連續監測數月之久，具一定可靠性。

監測參數部分，大氣相關資訊可在控制中心電腦，由爬蟲程式從交通部中央氣象局網站得知。在太陽照射度部分為因應模組普遍性及成本，改以一般光照度感測器取代並記錄參數值。

Arduino 式的監測作法

監測盒設計

當今太陽能發電場域較無廣泛使用個別板之監測，緣由其一為各個感測器均需供電，雖然感測器耗電量不大，但太陽能發電實際場域配線已眾多，由外部電源拉線替各板感測器供電非明智之舉。第二，各板監測數據，若透過實體網路線回傳整場控制中心電腦，非可行解，原因亦為實際場域配線眾多。若監測數據以無線網路傳輸，則必須指定究竟各板應主動傳送數據，或應被動等待控制中心要求傳回。本研究提出一搭載 Arduino 單晶片之監測盒，如圖 3 所示，為顧及安裝及維護的方便性及監測設備的擴展性，提出透過鋰電池儲存感測器所需電能，利用 Wi-Fi 模組建立無線

Arduino 與感測器硬體規劃

本研究以 Arduino 系統架構為基礎，搭配市售及客製化感測器，以提高收集資料的品質，在資料傳輸與備份方面分別以 Wi-Fi 模組及 Micro SD 卡達成，其規格及設計考量，如下：

硬體規格

硬體規格如表 2 所示，其中在電壓感測模組部份透過客製化方式，將原先模組量測上限 25 伏特之表面貼焊零件 (Surface Mount Device, SMD) 電阻，改以分壓比例 16 倍，雖電壓解析度因此從 0.0024 伏特變大為 0.0078 伏特，但此解析度變化對監測電壓範圍過小，可謂無影響。

表 2 硬體規格表

裝置	詳細資料
電子防水盒	所有裝置會用電子防水盒裝，電線至盒內的鑽孔處以使用迫緊接頭方式，達到裝置防水
Arduino 開發板	Arduino MEGA 2560
Wi-Fi 模組	ESP-07S 晶片，此模組可利用 IPX 轉 SMA 方式外接天線，以達到更好的傳輸距離（考量實際場域無線傳輸量大，必須將天線外接延長）
Micro SD 卡模組	74ABT125PW 晶片，此模組可支援 Micro SD 及 Micro SDHC，最大容量分別為 2GB 及 32GB，建議用市面上購置最便宜卡即可，因暫存 Log 僅文數字、通常不大
時鐘模組	DS3231 晶片，此模組可提供即時時鐘產生秒、分、時、星期、日期、月和年計時，並提供有效期至 2100 年的閏年補償
照度感測模組	BH1750FVI 晶片，此模組經改寫，其感測範圍為 1~121556 勒克斯 (Lux)
溫度感測模組	DS18B20 晶片，感測範圍為 -55~125°C，可防水
電流感測模組	ACS712 晶片，此模組檢測範圍寬 DC $\pm 0 \sim 20A$ 、檢測解析度為 100 mV/A
電壓感測模組	此模組利用串聯分壓後，利用 Arduino MEGA 2560 的 10 bits 類比數位轉換器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 解析，此模組檢測範圍 DC 0~80V
鋰電池	採用 2 顆 21700 鋰電池以串聯方式相接，每顆電池容量為 4,000 mAh
降壓模組	XL7015 晶片，此模組支援 DC 20~80V 電壓降壓
電池過充 / 過放模組	HY2120-CB 晶片，此模組支援兩串聯電池過充、過放及短路機制

硬體設計

因應鋰電池供電與充電功能，分別以三部份說明：

(1) 監測模組：此部分主要控制各感測器與電池充 / 放電時機，監測模組包含表 2 中的電壓、電流、Micro SD 卡、時鐘、照度與溫度，而充 / 放電時機為繼電器模組所控制；(2) 電池充 / 放電模組：此部分主要控制太陽能

板至鋰電池，及 Arduino 開發板之降壓及充 / 放電，其中電池充 / 放電部分需經過充 / 放電板控制，以此延長鋰電池壽命；(3) 輸入 / 出控制模組：此部分主要控制太陽能板板端輸入至電池、電壓感測模組、電流感測模組與輸出。

軟體設計

本研究需要撰寫軟體部分，分別位於 Arduino 內、Wi-Fi 模組內，及控制中心的電腦內，說明如下：

Arduino 程式

Arduino 程式主要為控制時鐘模組、日照感測模組、溫度感測模組、電流感測模組、電壓感測模組及 Micro SD 卡模組，包含資料讀寫，並控制繼電器，其程式流程圖如圖 4 所示。

其中繼電器主要控制電路中電池充 / 放電時機，監測盒以電流大小為基準，當電流小於 2 安培為充電（此參數可調整），相反則為放電狀態。此設計為因應台灣夏季尖峰產電時段，鋰電池在不充電情況下最少工作時長應為 6 小時。此外，因市售集中型或串列型逆變器工作電流大多為 4 安培，而市售太陽能板大多至少兩並聯後，再連接於逆變器，因此本研究假設 2 安培以下，所發的電完全供應鋰電池充電，應不致於損失電場利益。

此外，監測盒所使用照度感測模組，其原始預設最大值為 65535 勒克斯，而在台灣中午時刻，光照度最大值可能約 12 萬勒克斯。經參考 BH1750FVI 感測器規格表^[12,13]，利用積體匯流排電路 (Inter-Integrated Circuit, I2C) 設定其測量精度 (Measurement accuracy) 為 1.2、測量時間暫存器 (Measurement time register, Mtime) 為 31，及測量模式為單次高精度測量，其解算公式如公式

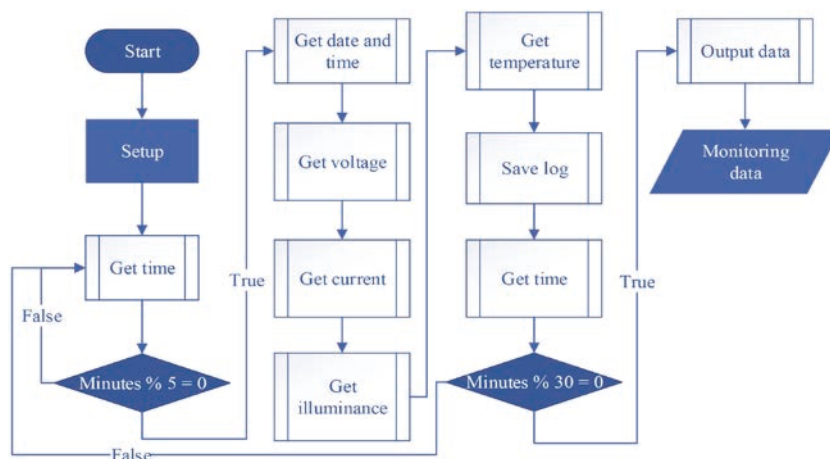


圖 4 Arduino 程式流程圖

(3) 所示，經調整後，測量最大值約為 121,556 勒克斯，達到本研究日常照度合理範圍。

$$\begin{aligned} \text{Illuminance per 1 count (勒克斯 / 次數)} \\ = 1 / 1.2 \times (69 / \text{Mtreg}) \end{aligned} \quad (3)$$

Wi-Fi 模組程式

資料傳輸方面採用 Wi-Fi 傳輸，利用 Wi-Fi 模組建立無線存取點，內建網頁伺服器，供外界擷取資料，其程式流程圖如圖 5 所示。

監測資料蒐集程式

本程式以 Python 撰寫，利用 pywifi 程式庫控制 IPC Wi-Fi 連線，並擷取該 Wi-Fi 網域中的指定網站資料，以達到資料收集功能，其程式流程圖如圖 6 所示。

測試與量測資料分析

受測環境

本研究所用之太陽能板為聯合再生能源所生產之 D7M320H7A，是 310 W ~ 335 W 的單晶太陽能模組，尺寸為 1.67 m × 0.99 m，開路電壓 40.20V、短路電流

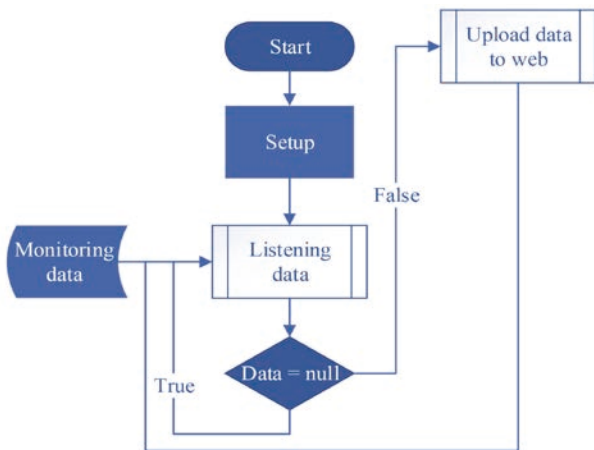


圖 5 Wi-Fi 模組程式流程圖

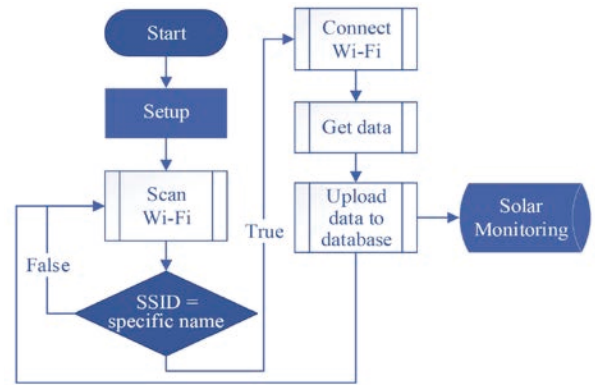


圖 6 監測資料蒐集程式流程圖

10.14A，此兩參數分別形成 IV 曲線的 x 及 y 截距。此模組最大輸出功率 (Pmax) 為 320 W，具 19.3% 的模組效率。

將多組太陽能板置於桃園區某大樓屋頂，以傾角朝向南方並且傾斜 10° 擺放，因該區域之太陽照射位置停留在南方時間較長，且太陽能板以傾角擺放可吸收更長時間之太陽能。

結果分析

本研究設計之監測盒可從個別太陽能板蒐集數據，在 2020 年 12 月 1 日至 12 月 7 日之電壓電流如圖 7 所示。此段時間最大發電量在上午 10 點到下午 2 點之間，若以此時段計算，單一板平均 4 小時產生 1 度電，且夏季時段應更優。

從圖 7 之 2020 年 12 月 6 日的電壓電流圖得知，電壓在早上 7 點至下午 5 點達到工作電壓，期間電流有劇烈變化，因電流會隨太陽照射度影響，如雲層厚度、空氣品質等環境因素，如圖 8 所示，太陽能板工作電壓相對穩定，因此其發電功率隨電流變化，如圖 9 所示。

本研究另以 BIM 將屋頂 3D 模型，搭配太陽能板幾何與擺放位置座標，於 Unity 遊戲引擎呈現，如圖 10 所

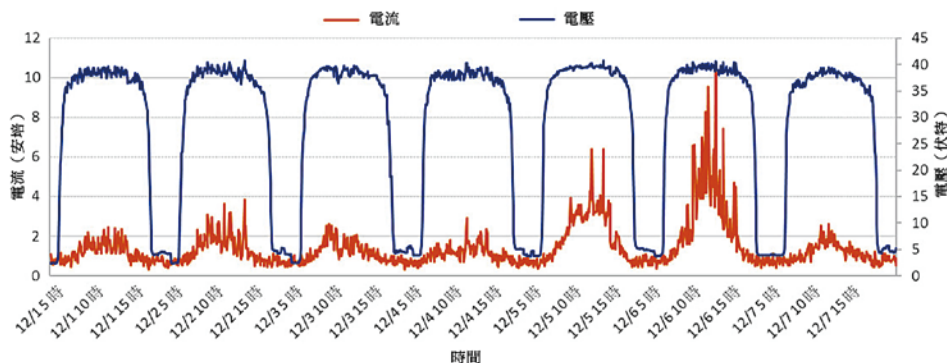


圖 7 單一太陽能板電壓、電流圖

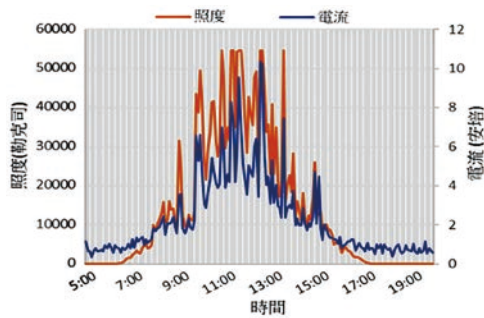


圖 8 12月6日照強度與電流關係圖

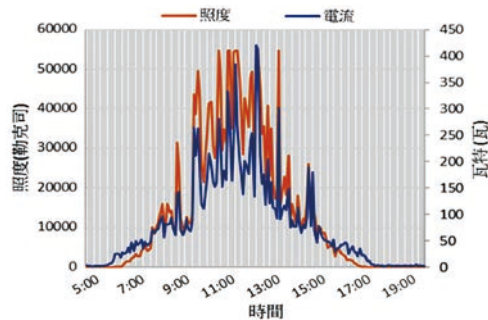


圖 9 12月6日照強度與功率關係圖

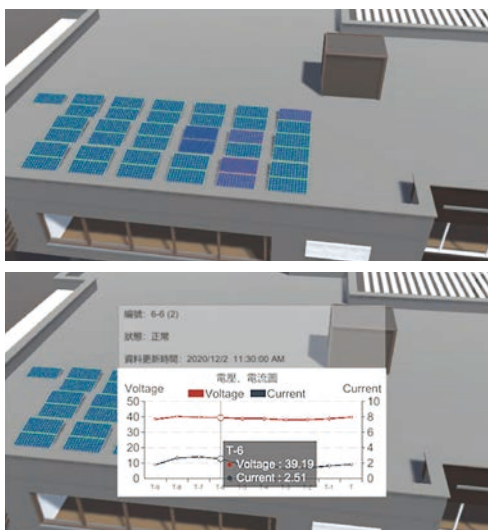


圖 10 以 BIM 呈現屋頂與太陽能板運作

示。因監測盒將源源不絕產生發電數據，除了儲存到資料庫供後續分析，本研究另以 Unity 動態呈現各板發電概況，讓維運人員更加便利，第一時間瞭解各板發電參數。

結論與建議

本研究所提出之監測盒與作法可克服當今太陽能發電裝置之監測難處，且價格低廉，提出下列三點建議：

1. 透過更快速尋找與調整到 MPPT 點，以期提升發電量：因各板當下狀況不盡相同，若各板各自有監測盒，透過文獻上許多 MPPT 追蹤演算法^[14]，應能更快速調整電壓與電流，達到最大發電量。

2. 以 Jetson Nano 取代控制中心的電腦：若以 Jetson Nano 此低廉之人工智慧電腦，取代一般電腦來匯整與分析監測資訊，應能利用深度學習法，即時預測太陽能板未來狀況，及早因應。
3. 電壓及電流感測模組可以利用運算放大器 (Operational Amplifier, OPA) 及分流電阻 (Shunt resistor) 取代，以此增加檢測範圍及精度。

誌謝

感謝財團法人資訊工業策進會合作研究計畫：(109) 資轉約字第 0591 號、科技部計畫 MOST108-2221-E-008-009-MY3，與教育部計畫 PEE1090723 的經費支持。另感謝桃園市政府消防局在研究測試部分協助。

參考文獻

1. 經濟部能源局 (2020)。能源統計月報與手冊。https://is.gd/yqX2Nt and https://is.gd/qfifisM (2021/1/1)
2. 經濟部 (2020)。能源轉型白皮書。https://is.gd/fu07gV (2021/1/1)
3. Sing, WM., Nichol, JE., Liu, ZZ., and Lu, L. (2015). *A remote sensing study of solar energy supply in cloud-prone areas of Hong Kong*. Project No. 2013.A6.024.13A, Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China.
4. Target Solar (2020). *High efficiency solar panels*. https://www.target-solar.com/zh-tw/productDetails.asp?mid=127 (2021/1/1)
5. IEA (2020). *Solar PV power generation in the sustainable development scenario*. https://reurl.cc/ld3mzE (2021/1/1)
6. Taipower (2020). *Overview of the development of renewable energy*. https://www.taipower.com.tw/en/page.aspx?mid=4495 (2021/1/1)
7. Krishna, M.S.R., Dinesh, K., and Shanbog, N.S. (2019). Low cost remote monitoring of solar plant through RS485 communication. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(9), pp. 3034-3037.
8. Parikh, A., Pathan, F., Rathod, B., and Shah, S. (2015). Solar panel condition monitoring system based on wireless sensor network. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 4(12), pp. 4320-4324.
9. Papageorgas, P., Piromalis, D., Antonakoglou, K., Vokas, G., Tseles, D., and Arvanitis, K.G. (2013). Smart solar panels: In-situ monitoring of photovoltaic panels based on wired and wireless sensor networks. *Energy Procedia*, 36, pp. 535-545.
10. Fuentes, M., Vivar, M., Burgos, J.M., Aguilera, J., and Vacas, J.A. (2014). Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino that complies with IEC standards. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, pp. 529-543.
11. Madeti, S.R. and Singh, S.N. (2017). Monitoring system for photovoltaic plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp. 1180-1207.
12. ROHM Semiconductor (2011). *Digital 16bit serial output type ambient light sensor IC*. https://reurl.cc/GrM8Yv (2021/1/1)
13. Amajama, J. (2016). Effect of solar illuminance (or intensity) on solar (photovoltaic) cell's output and the use of converging lenses and X or Gamma rays to enhance output performance. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 4(4), pp. 284-289.
14. Elgendy, M.A., Zahawi, B., and Atkinson, D.J. (2011). Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(1), pp. 21-33.