

風光互補候車亭性能配置評估

Performance Evaluation of Solar-Wind Hybrid Bus Shelter Configuration

吳彥威 Y. W. Wu¹、陳宏銘 H. M. Chen²、巫宗勳 T. S. Wu³、
陳祈彰 C. C. Chen⁴、陳紹泰 C. T. Chen⁵

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹副研究員、²工程師、³副工程師、⁴資深工程師
新高能源科技(Hi-VAWT) 股份有限公司 ⁵經理

摘要/Abstract

本文以桃園機場周邊候車亭為示範場域，評估導入風光互補路燈之綠能配置效益。研究蒐集機場氣象園區東、西站及鄰近測站之風速資料，分析場域風能特性，並選取兩款垂直軸小型風力機進行比較。結果顯示，東站資料具較長觀測期間，且年平均風速條件較佳，適合作為發電量評估依據；其中，以新高能源機型結合300 W太陽光電板後，年發電量約可達875 kWh，整體發電效益較佳。透過風力、光電與儲能整合，可供應候車亭照明、資訊顯示及監控等用電需求，提升能源自主性、供電穩定性與永續交通示範價值，並可作為未來公共交通場域導入綠能設施之參考。

This study evaluates the application of hybrid wind-solar street lighting at bus shelters around Taoyuan Airport. Wind speed data from the Airport Meteorological Park and nearby stations were analyzed to assess local wind energy potential and compare two vertical-axis small wind turbines. The results show that the East Station provides more suitable data for power generation assessment due to its longer observation period and better annual average wind speed. Among the evaluated options, the New High Energy turbine combined with a 300W solar panel can generate approximately 875 kWh per year. By integrating wind power, solar power, and energy storage, the system can support lighting, information displays, and surveillance equipment, improving energy autonomy, power stability, and the demonstration value of green public transportation facilities.

關鍵字/Keywords

風光互補(Solar-Wind Hybrid System)、綠能供電效益(Green Power Performance)、小型風機(Small-Scale Wind Turbine)

前言

近年在淨零排放與永續交通趨勢下，結合再生能源與公共運輸設施的風光互補(Solar-Wind Hybrid System)候車亭逐漸受到重視。系統透過太陽能與風能互補供電，提升能源自主性與韌性。研究指出，候車亭除交通功能外，亦為都市公共空間，需兼顧安全、舒適、可及性與景觀整合；近年更進一步結合綠電、儲能、照明、通訊與環境感測等功能，發展為智慧公共節點⁽¹⁻⁴⁾。

在國際案例方面，哈薩克阿斯塔納(Astana)「Cardiac Surgery Center」候車亭採用地源熱泵(Ground-Source Heat Pump; GSHP)結合市電之併網型能源系統，可有效降低用電並減少溫室氣體⁽⁵⁾；英國威靈頓(Wellington)示範案例則為離網型設計，整合太陽能、風力、儲能及智慧控制，並具能源自主供應能力，降低對電網之依賴⁽⁶⁾，如圖一所示。

此外，分散式能源應用亦延伸至風光混合路燈系統，透過太陽能板與垂直軸風力發電機(Vertical Axis Wind Turbine; VAWT)整合於單一結構中，並搭配儲能與控制，可實現獨立供電之照明設施⁽⁷⁾。相較於集中式能源系統，分散式能源因鄰近用電端，具有降低能源傳輸損失、提升使用效率及強化公共服務之潛力。

綠能候車亭發展主要可分為「併網型混合能源系統」與「離網型自主供電系統」兩大方向。前者重視供電穩定與經濟效益，後者強調能源自主與韌性。太陽能適合白天穩定發電，風能則可於夜間或低日照時



▲圖一 結合風光儲候車亭應用⁽⁴⁾

補充供電，因此風光互補系統可有效改善氣候影響能源效率，提高供電可靠度。然而，目前公車亭研究多聚焦於空間規劃、智慧候車及再生能源應用，針對「風光互補候車亭規劃與配置分析」之整合性研究仍相對有限。

台灣公車候車亭數量多、分布廣，具發展分散式能源節點之潛力。偏遠或郊區可發展離網型，透過綠能結合儲能供應用電，以降低配電與維運成本；都市區域則發展併網型，除供應自身用電外，亦可將剩餘電力回饋電網，提升都市分散式綠電滲透率。

因此，本研究以桃園機場周邊候車亭為示範場域，評估不同環境條件下之能源配置、供電效益與系統適應性，作為未來智慧綠能公共設施規劃參考。

桃園機場附近場址環境評估

桃園機場周邊候車亭因長期使用及風雨、曝曬、鹽霧與強風影響，部分已出現鏽蝕老化、照明不足、遮雨效果不佳及資訊揭示不足等問題，影響使用安全、候車

便利性與整體服務品質，如圖二所示。

本文規劃於候車亭導入太陽光電與小型垂直軸風力機，建構風光互補示範系統，供應照明與資訊設備用電，並作為綠能展示介面（圖三），以展現地方政府推動永續交通與低碳公共建設示範效益。

為評估桃園機場周邊地區設置小風力發電機之實用性，蒐集並分析大桃園區鄰



▲圖二 老舊損壞候車亭

近測站的風能與氣象環境資料，透過機場服務總台提供場域1年以上的風能參數，以及附近測站區域內10年以上的風速數據（3小時記錄一筆資料），來分析區域風能特性，作為建置規劃的依據。

氣象條件蒐集分析部分，以接近桃園機場附近之中央氣象署竹圍自動氣象站（測站代碼C0C720，以下簡稱竹圍站）及蘆竹（測站代碼C0C620，以下簡稱蘆竹站）自動氣象站2測站1年以上資料蒐集。交通部民用航空局飛航服務總臺，取得機場內氣象園區東側（以下簡稱東站）及西側（以下簡稱西站）2組測站數據。經團隊彙整後，共4組鄰近氣象站資料進行分析，蒐集的資料長度及可用率如圖四所示，其與桃園機場之相關地理位置如表一所示。

風速特徵分析係依據前述蒐集之4組氣象站數據進行。從月平均風速特性顯示（圖



▲圖三 綠能展示介面

▼表一 氣象站基本資訊

測站名稱	座標	測站高度	資料期間	資料長度	資料可用率
AWOS West 氣象園區西站	25.069757 E 121.237526 N	6.0 m	2019~2024年	5年	99%
AWOS East 氣象園區東站	25.077764 E 121.247855 N	6.0 m	2010~2019年	10年	97%
蘆竹氣象站	121.265767 E 25.084275 N	6.0 m	2023~2024年	2年	72%
竹圍氣象站	121.239825 E 25.112694 N	21.0 m	2023~2024年	2年	74%



▲圖四 桃園機場鄰近氣象測站分布概況

五)，場域明顯呈現冬季風速較高、夏季較低的季節變化。此外，在日夜變化的特性上顯示日間風速較高、夜間較低（圖六），兩者皆與典型台灣西部地區風速特徵相符。

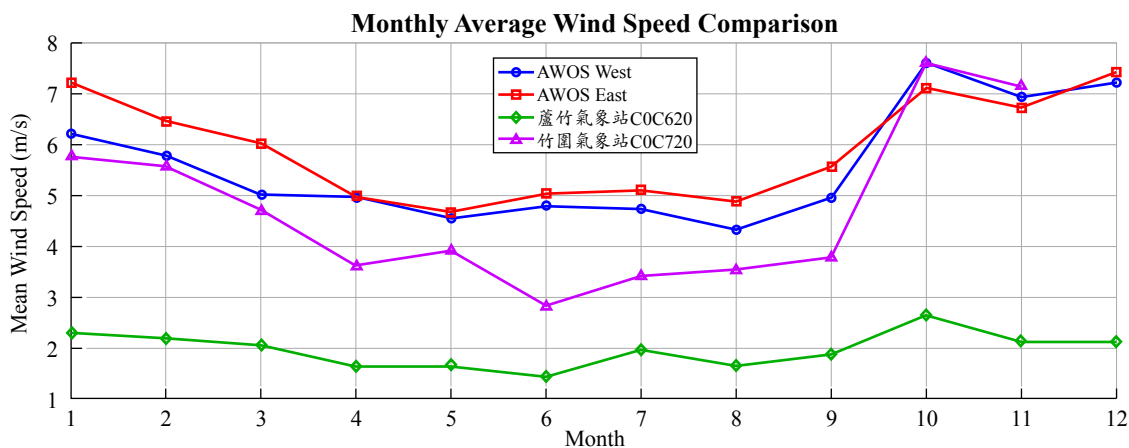
表二為各站平均風速比對，蘆竹氣象站風速觀測值偏低，僅2~3 m/s，經現場勘查，判斷是因設置於地面，且鄰近結構物對風況產生影響，不利於案場風能評估，

應予排除。其餘3站皆設置於屋頂或地表空曠處，受地表影響較輕微，各月平均風速介於3~8 m/s之間，其中冬季約7~8 m/s、夏季約3~5 m/s。

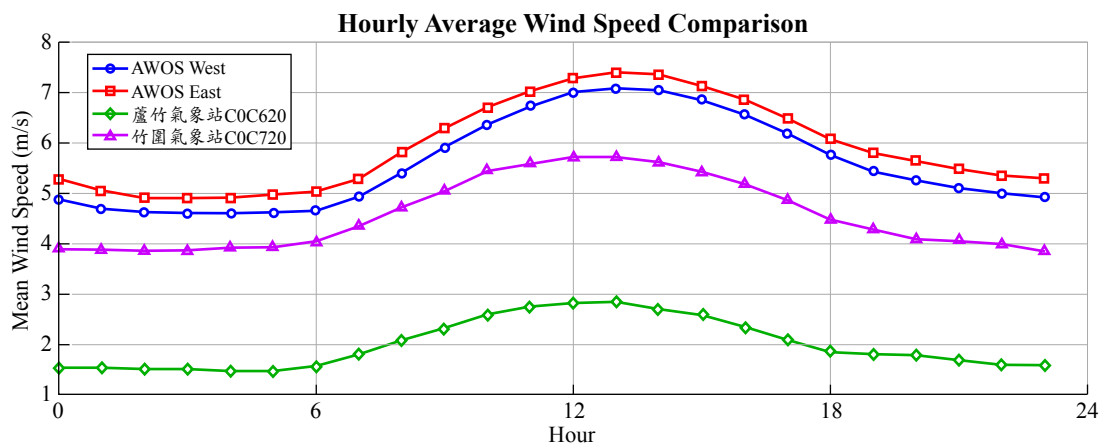
桃園機場航空局所提供的氣象園區2站與桃機鄰近中央氣象署竹圍氣象站風速特徵相近，而氣象園區測站所具資料長度較充足完整，且距離更接近未來擬設置小型

▼表二 各氣象測站分析期間月平均風速

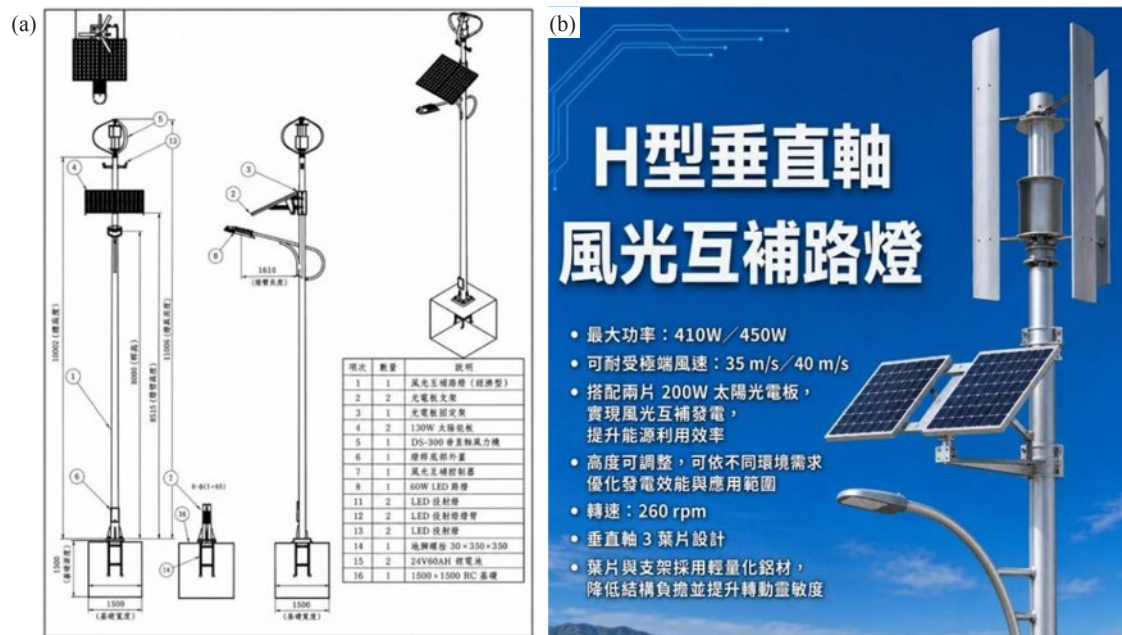
測站名稱	平均風速 (m/s)												
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
氣象園區西站 2019~2024年	6.2	5.8	5.0	5.0	4.6	4.8	4.7	4.3	4.9	7.6	6.9	7.2	5.6
氣象園區東站 2010~2019年	7.2	6.5	6.0	5.0	4.7	5.0	5.1	4.9	5.6	7.1	6.7	7.4	5.9
蘆竹氣象站 2023~2024年	2.3	2.2	2.1	1.6	1.7	1.4	2.0	1.7	1.9	2.6	2.1	2.1	2.0
竹園氣象站 2023~2024年	5.8	5.6	4.7	3.6	3.9	2.8	3.4	3.5	3.8	7.6	7.1	-	4.7



▲圖五 桃園機場鄰近4組氣象站月平均風速變化



▲圖六 桃園機場鄰近4組氣象站日風速變化



▲圖七 (a)新高能源DS300；(b)綠世界能源客製化Aero TH400W⁽⁸⁾

風力機組，本次以桃機氣象園區2站資料為主進行配置評估。

路燈型式及配置規劃

台製風光路燈市面款式選擇有限，本案評估兩款較具經濟性的方案：由新高能源DS300與綠世界能源客製化TH400W提供。兩者皆可滿足基本照明需求，兼具環境美化與周邊設施整合性。照明設計將符合機場周邊約45 Lux需求，兼顧行人安全與車輛導引，並採高效率LED光源，以降低能耗與維護成本，如圖七所示。

本研究比較離網型與併網型供電模式，從技術、應用及策略面進行分析。離網型系統由太陽光電、小型風力、儲能電池及負載組成，可獨立供電，適用於偏



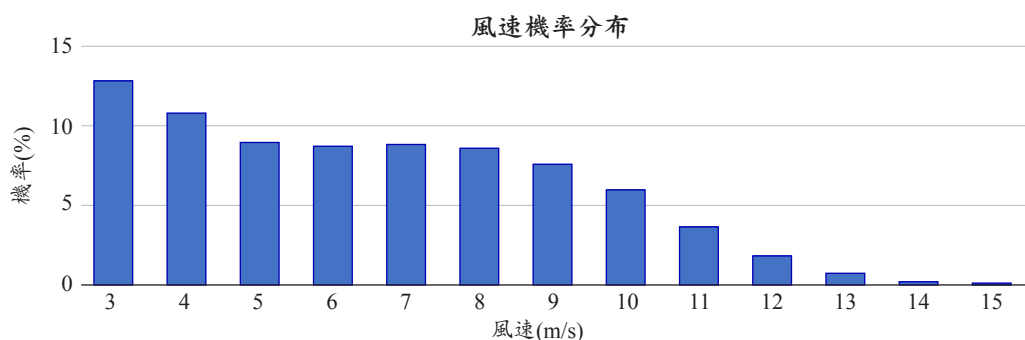
▲圖八 風光路燈與候車亭配置規劃

遠、無電或配電不易場域。其具備建置彈性與綠能自主優勢，但受天候與儲能容量影響較大，需考量電池配置、壽命及汰換成本，如表三所示。

機場周邊公共區域對供電可靠度要求高，候車亭、照明、監控及導引設備皆需穩定供電。離網型適合作為偏遠或無市

▼表三 供電模式比較

類型	供電結構	特性	適用場域
離網型	太陽光電板加風力機儲存到電池儲能應用	完全自給自足，不依賴市電，夜間由儲能系統供電	偏遠地區、無電區、道路延伸段、島嶼、漁港堤防
併網型	太陽光電板加風力機儲存到儲能系統應用，最終併入市電或並接既有照明回路	具穩定供電與能源回收能力，可支援市電短暫中斷	都市道路、停車場、園區道路、機場範圍內照明系統



▲圖九 氣象園區東側測站10年數據分析之機率分布

電場域之展示與特殊應用；因此本研究建議優先採用併網型系統，整合既有照明回路，以降低工程成本並提升供電與維運穩定性，另可搭配小型儲能作為短時備援，增加應用彈性。

圖八所示，劃於機場周邊候車亭旁黃框區域，設置2座風光互補路燈，並採與台電市電併網方式運行，以兼顧綠能展示效益與穩定供電需求。

設置效能評估

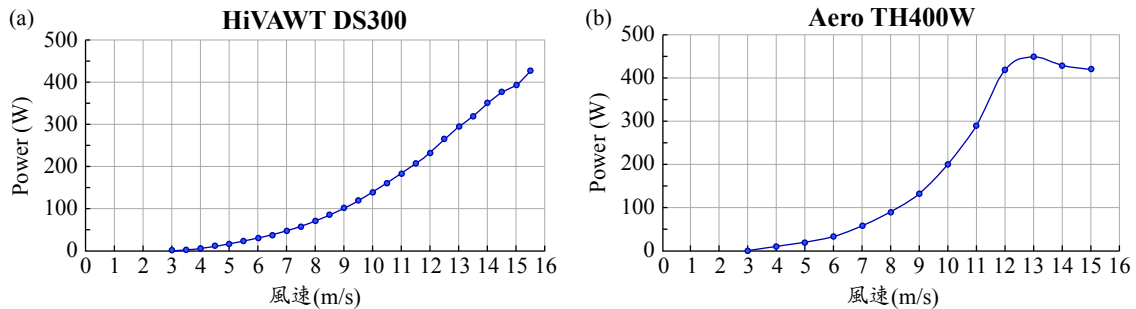
本案規劃於機場附近停車場之公車候車亭導入風光互補路燈，透過小型風力機結合固定300 W太陽光電板，提升公共設施之能源自主性與場域示範價值。

評估上，採用年平均風速較佳且觀測期間較完整之氣象園區東站資料，繪製小型風力機可運轉風速範圍之機率分布（圖九），並選取兩款垂直軸小型風力機進行比較，分別為新高能源HiVAWT DS300及綠世界能源客製化TH400W，並依其提供之功率曲線推估發電量，如圖十所示。

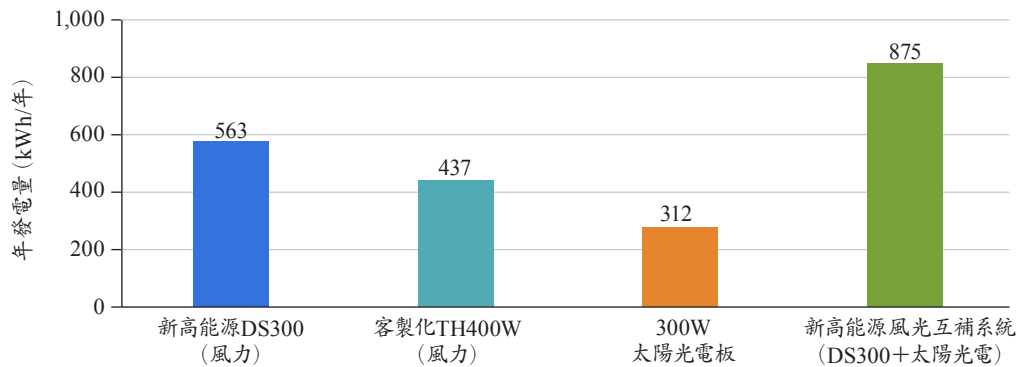
結合兩款垂直軸小型風力機之功率曲線與東側測站10年數據分析之機率分布，可進一步估算風光互補系統之年發電量。

利用風速年機率分布，結合風力機性能曲線，評估兩種機型之年發電量，如下：

$$\text{年發電量 (kWh/年)} = \sum [\text{各風速區間功率 (kW)} \times \text{該風速區間年出現小時數 (h/年)}]$$



▲圖十 (a)新高能源DS300；(b)客製化TH400W之功率曲線⁽⁸⁾



▲圖十一 有無風光互補系統之發電量比較

結果顯示，新高能源DS300年發電量約為563 kWh，客製化TH400W年發電量約為437 kWh；另參考附近地面型光電案例，單座太陽光電板每日有效日照時間約為2~3小時，估算300 W太陽光電板年發電量約為312 kWh。

因此，整合風力與太陽光電後，圖十一為新高能源風光互補路燈年發電量約可達773 kWh，具較佳發電效益，並可透過風光日夜互補提升供電穩定性，兼顧候車安全、服務品質與再生能源示範效益。後續應建立定期巡檢與維護機制，以提升設

備壽命並降低運轉風險。

結語與未來應用

本研究以桃園機場周邊候車亭為對象，評估導入風光互補路燈之可行性。透過小型垂直軸風力機結合太陽光電板，應用於候車亭照明、資訊顯示、監控及周邊公共設施用電，以降低市電依賴並提升能源自主性與示範價值。研究結果顯示，風光互補系統可利用風能與太陽能之互補特性，提供較穩定電力來源，提升公共設施能源韌性。評估結果以新高能源DS300小風

機搭配300W太陽光電板效益較佳，年發電量約可達875 kWh；若搭配適當容量儲能設備，可進一步提升夜間及低風低日照時段供電穩定性。整體而言，該系統兼具節能減碳、公共安全、能源韌性與示範推廣效益，具後續擴大應用潛力。■

致 謝

研究工作承蒙桃園國際機場設置綠電設施可行性綜整研究計畫及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。

參考文獻

1. G. Mutani, A. Vodano, and M. Pastorelli, Photovoltaic solar systems for smart bus shelters in the urban environment of Turin (Italy), in 2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2017.
2. S. Briant, D. Cushing, T. Washington, and M. Swart, Small but Significant: A Review of Research on the Potential of Bus Shelters as Resilient Infrastructure, Applied Sciences, vol. 15, no. 12, 6724, 2025.
3. Tirachini, A., The economics and engineering of bus stops: Spacing, design and congestion.
4. Transportation Research Part A, 59, 37–57, 2014.
5. Li, J., A Design Principle Analysis of Harmonious City Bus Station. Applied Mechanics and Materials, 253–255, 1880–1883, 2012.
6. A. Alikhanova, A. Kakimzhan, A. Mukhanov, and L. Rojas-Solórzano, “Design of a bus shelter based on green energy technologies for extreme weather conditions in Nur-Sultan, Kazakhstan”, Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 36, 2019.
7. Etesian Green, “Wellington Off-grid Bus Station: Solar and wind powered smart bus shelter system”, Telford & Wrekin Council / Journeo Plc Project Report, U.K., 2022.
8. D. Vitali, F. Garbuglia, V. D’Alessandro, and R. Ricci, “The renewable energy in a LED standalone streetlight”, International Journal of Energy Production and Management, vol. 2, no. 1, pp. 118–128, 2017.
9. 新高能源科技股份有限公司. (n.d.). 新高能源科技股份有限公司. https://www.hi-vawt.com.tw/tw/tw_welcome.html