

# 建構智慧能源管理系統以加速低碳轉型：車輛到建築策略<sup>1</sup>

## Designing Smart Energy Management Systems for Low-Carbon Transitions: Vehicle-to-Building Strategy

羅凱芸 Kai-Yun Lo<sup>2</sup>

謝依芸 I-Yun Lisa Hsieh<sup>3</sup>

### 摘要

在全球淨零排放趨勢下，電動運具憑藉其行駛過程零尾氣排放、高能源轉換效率、以及減少對傳統化石燃料依賴等環境優勢引起廣泛關注，成為運輸部門低碳轉型的重要路徑之一。電動車的車聯網技術(Vehicle-to-Everything, V2X)被認為是促進能源跨部門耦合的重要關鍵，其中 X 可為任何東西，包含建築(Building, V2B)。本研究建構一結合新型車輛到建築(V2B)策略的智慧化能源管理系統(Smart Energy Management System, SEMS)，透過管理建築物整體能耗與電動車的充電需求，實現最大化建築再生能源的自我利用率，進而達到削峰填谷與降低對電網的依賴之目標，並促進近零耗能建築(NZEB)轉型。本研究所提出的系統整合再生能源技術(太陽能 and 儲能)，根據電動車的抵達/駛離時間、現時/需求電量、電池容量、充電樁充電/放電速率及效率決定電動車充放電的優先順序，並以每小時為一單位更新充放電排程。模擬結果顯示，本研究提出的 SEMS 是可行的，且具有巨大的節能與減碳潛力。僅考慮建築能源負載需求而忽略 EV 充電需求將導致在評估 V2B 技術的環境效益時出現相當大的偏差。

**關鍵詞：**車輛到建築策略、能源調度、電動車、碳排放

### Abstract

Governments have supported accelerating electric vehicle (EV) deployment in response to the global trend toward net-zero emissions. EVs are believed to play a crucial role in ensuring greater coupling between different energy sectors through Vehicle-to-Everything (V2X) technology, where X could be anything, including Building (V2B). This study designs a smart energy management system (SEMS) with a novel V2B strategy embedded—which manages the overall energy demand from buildings as well as EV charging—for peak shaving and grid dependence reduction. The proposed system integrates renewable energy resources and battery storage devices with optimal charging and discharging scheduling for EVs. The charging and discharging prioritization are determined every hour, based on arrival/departure time, current/required state of charge, EV battery capacity, charging/discharging rate, and efficiency. The simulation results reveal that the proposed SEMS is feasible and possesses great potential in reducing energy use and carbon emissions. Considering energy load demand only from buildings and ignoring EV charging demand would lead to considerable bias in evaluating the environmental benefits of V2B technology.

**Keywords:** Vehicle-to-Building Strategy, Energy Dispatch, Electric Vehicles, Carbon Emissions

<sup>1</sup> 本研究係教育部高等教育深耕計畫(111L895005)之部分成果，作者在此感謝教育部之經費補助。

<sup>2</sup> 國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組碩士。

<sup>3</sup> 國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組助理教授 (聯絡地址:106 台北市大安區辛亥路三段 188 號 6 樓，電話：02-33664259，E-mail: iyhsieh@ntu.edu.tw)。

## 一、簡介

### 1.1 能源轉型：運輸部門與建築部門

能源為現代文明生活的必需品，全球暖化導致近年極端氣候愈趨頻繁，傳統能源的使用加速了溫室效應，對全球環境產生了巨大衝擊，根據 Our World in Data(2022)，全球 2021 年的人均能源消耗量為 20,993 kWh，較 1965 年增加 62%，反觀我國的人均能源消耗量為 57,996 kWh，是世界平均水準的 2.76 倍，增長幅度更是達到了 956%；隨著永續思潮席捲全球，經濟成長與生活品質的提升導致日益增長的能源消費需求成為減緩氣候變遷環境危機的首要挑戰，迫使世界尋找低碳、低污染的能源使用方式。為此，聯合國於 1992 年通過《聯合國氣候變化綱要公約》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)，設立全球平均氣溫升幅控制在工業化前 1.5°C 以內的目標，並積極引領世界各國相繼簽署，協力推動氣候行動；目標為在 2030 年降低 45% 的碳排放量，並在 2050 年達成淨零排放。

然而，隨著人口成長與都市發展，人們對於機動性的需求急遽上升。運輸部門(海陸空與鐵道運輸)因極度仰賴化石燃料(以石油為主)，使日益增長的旅次需求導致總能源消耗與溫室氣體排放量顯著增加。根據國際能源署(International Energy Agency, IEA)(2020)統計，運輸部門對石油的消費需求從 1973 年的 1006.6 公噸油當量(Million tonnes of oil equivalent, Mtoe)上升至 2018 年的 2641.3 公噸油當量，增長了一倍以上；全球石油最終消費之各部門貢獻占比如圖 1 所示。為了降低交通運輸部門對環境產生的增溫效應，運輸部門不可避免的正在經歷低碳轉型。電動運具以其行駛過程零尾氣排放、高能源轉換效率、以及減少對傳統化石燃料依賴等環境優勢引起廣泛關注，受到各方擁戴。引導高能耗高排放的傳統燃油汽車逐步退出市場，並同步推動發展低能耗低排放的新能源汽車—包含純電動汽車(Battery Electric Vehicle, BEV)、插電式混和動力汽車(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)與氫燃料電池汽車(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)—已經成為當今世界各國政府的核心治理手段，且被認為是必須發展且能最大化能源與環境效益的一技術選項。自 2016 年開始，世界各國相繼宣布全面禁售燃油車的具體落實時程，如挪威宣布在 2025 年起禁售燃油車，腳步領先其他所有國家；荷蘭、丹麥、冰島與瑞典預計在 2030 年禁止銷售燃油車；而英國和法國則是將時程訂在 2040 年。中國政府更是積極推出多項激勵政策與法規，並搭配廣泛建置充電設施，使其新能源汽車市場急遽成長，累積銷量更是居於世界領先地位。截至 2020 年底，全球已售出超過 1000 萬輛新能源汽車(含 BEV 及 PHEV)，較 2019 年增長 43%(International Energy Agency, 2021)。

除了運輸部門之外，建築物在全球能源消耗中也貢獻了相當大的份額：建築部門分別占世界最終能源消耗的 29% (International Energy Agency, 2020)以及溫室氣體排放的 17.5%(Ritchie & Roser, 2020)；其中，全球 2019 年住宅及商業建築共消耗 10,921 TWh，占總用電量的 47.8%(International Energy Agency, 2021)。為維護全球環境永續發展，歐盟、美國、英國、日本等國積極投入建築減碳策略，相繼提出近零耗能建築(Nearly zero-energy buildings, NZEB)等相關政策與落實之時程：歐盟 2002 年率先制定《建築能源效率指令》(Energy Performance of Buildings Directive, EPBD)，並導入建築能源護照(Energy Performance Certificate, EPC)制度，引起世界各國重視建築節能相關規範的立法，並於 2010 年提出修正案，要求 2019 年所有新建公有建築與 2021 年所有新建建築皆需達到近零耗能的基準；美國能源部《淨零能源商業建築倡議》(Net-Zero Energy Commercial Building Initiative, CBI)，要求 2025 年商業類新建建築需達零耗能的標準；英國於 2006 年提出《永續住宅技術規則》(Code for Sustainable Homes)，要求 2019

年所有新建建築皆須符合碳平衡的零碳排標準；日本則是將時程分別訂在 2020 與 2030 年，要求新建透天獨棟住宅的 50% 在 2020 年達零耗能標準，所有獨立住宅於 2030 年均需依照零能耗住宅規範建造，以實現零碳建築的目標。

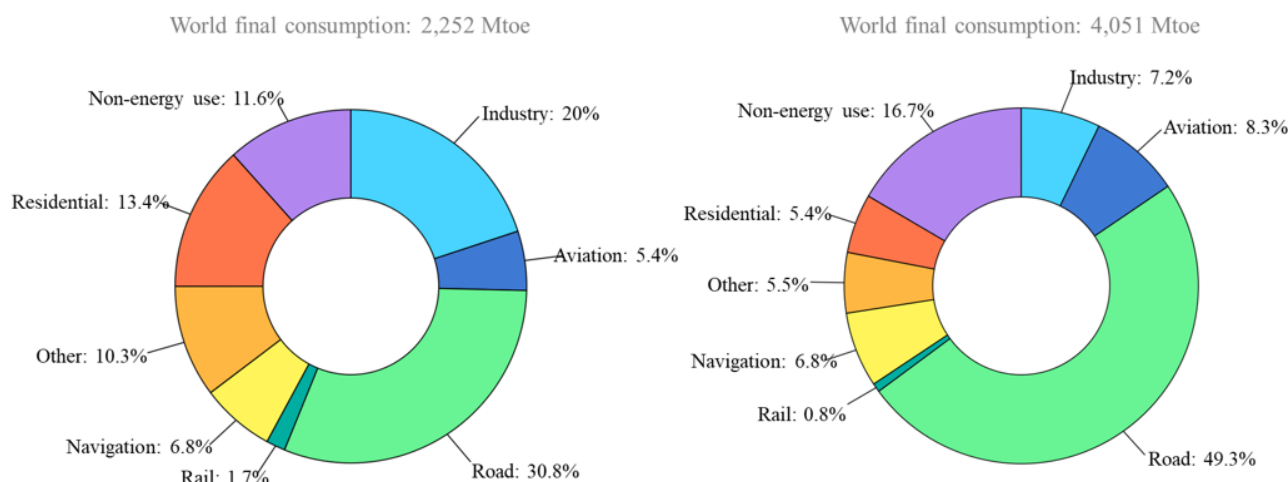


圖 1 1973 年與 2018 年全球石油最終消費部門占比圖(%) (International Energy Agency, 2020)

為應對日益增加的氣候變化與能源安全問題，臺灣政府除了在 2015 年頒布溫室氣體減量及管理法(GHG Act)承諾要根據國家自定預期貢獻(Intended Nationally Determined Contribution, INDC)將 2030 年的溫室氣體排放量相比現況發展趨勢(Business as usual, BAU)推估情境減少 50% (中華民國(臺灣)「國家自定預期貢獻」(INDC)(核定本), 2015)，更於 2022 年公布《臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明》，針對運輸部門與建築部門分別明確制定具體減碳的詳細策略與預計實施期程：交通運具方面，目標 2030 年營運的市區公車以及 2040 年機車與乘用車銷售須全面電動化；建築物方面，目標 2050 年 100% 的新建建築物及超過 85% 的既有建築物需為近零碳建築。透過引入新型能源車輛，我國政府希望能減少對化石燃料的依賴，進而降低溫室氣體及空氣汙染的排放量，減少負面外部效應。在政策及法規的推動下，我國電動車的滲透率預期將呈現指數級增長。然而，隨著電動運具的普及，車輛充電的需求將為傳統電力系統帶來壓力；逐漸提升的再生能源併網也將對電力系統造成衝擊，其發電的間歇性及不確定性將大幅增加穩定供電的難度。能源轉型的過程中將伴隨各部門之間的耦合，如沒有配合完善的系統性規劃，終將阻礙運具全面電動化的進程與淨零排放的目標。

## 1.2 部門耦合：車輛到建築策略(Vehicle-to-Building, V2B)

電動車無疑成為能源轉型中跨部門耦合的關鍵角色。研究發現峰值負載的提升也會增加電力系統故障的風險，從而導致電網不穩定(Vyakaranam et al., 2017)；車聯網的雙向(bi-directional)饋電技術將電動車視為具彈性儲能的能源載體，通過智慧電網與智慧充電樁調度尖峰用電，以降低因時間電價產生之成本差異，達到穩定電網的功效，並可作為建築再生能源發電的能源儲存設備，以及備用能源供應系統，提供建築在停電時的能源需求。目前已有許多針對電動車充電策略的相關研究文獻，V2B 技術已經在各個試驗項目中進行了測試，並已被證明在減少峰值負載方面是可以實現的。

在學術研究上，Odkhuu et al. (2018)提出一種優化能源管理算法(OEMA)對電動汽車進行充電或放電，並在考慮所有電動車充電、光伏系統與儲能系統的情況下，引入優先級確定算法以最小化總功耗。在集成微電網、能源儲存設備、再生能源、與電動車的幫助下，可以通過將電

力分配到指定的時間段來有效地削減峰值負荷。從經濟層面來看，由於建築物的整體能耗與尖峰時段能源使用減少，電力成本因而降低(Dagdougui, Ouammi, & Dessaint, 2019; Ouammi, 2021)。Borge-Diez et al. (2021)引入關於公司及員工間共享運具 V2G 與 V2B 策略的混合模型，這對企業營運方及和公司員工方均有利，根據積極的經濟平衡結果顯示，該策略將有助於減少車輛租賃成本並支付電池更換成本。還有一些案例研究了智慧建築校園中電動車的重要性。該系統經過優化，可實現電動車的完美充電狀態(Bracco, Delfino, & Piazza, 2020)。電動汽車電池與能源儲存設備的尺寸及效率也會顯著影響模型的性能(Moura et al., 2020)。畢竟，數學模型是整個智慧建築能源調度管理系統概念的關鍵。Achour, Ouammi, & Zejli (2021)還表明，特定目標函數中的不同權重可能會產生完全不同的結果，峰值負載減少高達 15%。

在實務應用上，各國也陸續展開相關應用試驗計畫，英國北倫敦針對電動巴士開展世界上最大的車輛到電網(Vehicle-to-Grid, V2G)場域驗證計畫；荷蘭阿姆斯特丹也啟動歐盟的 City-Zen 城市能源可持續發展計畫，將整座城市作為大型試驗場域，對 V2G 技術進行系統測試，並廣邀市民共同參與，使居民了解電動車與相關智慧技術對城市能源發展的影響力；考量臺灣現有建物多為既有之老舊建築，透過能源效率改善翻新之工程進行節能預期能改善的幅度較為有限，而再生能源發電與電動運具 V2B(Vehicle-to-Building)相關策略的推動將可於保留原始建築樣貌的前提下為建築能耗再降低一個數量級。

### 1.3 本研究之目的

本研究建構一將車輛到建築(Vehicle-to-Building, V2B)技術導入智慧電網的能源調度管理策略，利用電動車具可被視為一的儲能設備之優勢，藉由車載電池儲能來彈性調度能源；在無需額外投資成本的情況下為建築的能源消費需求進行削峰填谷，降低整體能耗，並促進運輸部門的低碳永續轉型。本文結構安排如下：第二章介紹智慧建築能源管理調度策略模型的建構與方法；第三章為案例分析之各情境模擬結果；第四章則提出結論與建議。

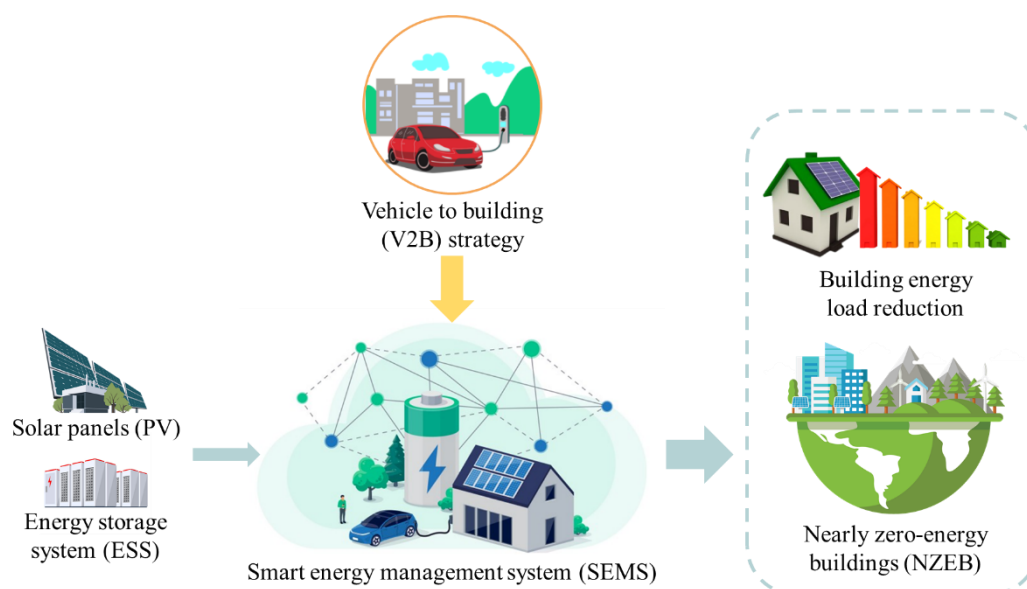


圖 2 本研究之圖文摘要

## 二、模型建構與方法

### 2.1 智慧能源管理系統(Smart Energy Management System, SEMS)

在本章節中，提出並開發了一種新的智慧能源管理系統模型，結合微電網、再生能源、電動車、儲能設備、與建築物進行能源調度，並透過多目標最佳化以最大程度的減少建築微電網的能源負載，提升能源的有效利用率，加速運輸部門低碳轉型，並促進近零耗能建築(Nearly Zero-Energy Buildings, NZEB)的總體目標。

#### 2.1.1 車輛到建築(Vehicle-to-Building, V2B)策略

隨著運具電動化的發展進程，車輛的充電需求逐漸提升，大量提升的能源需求雖然可以透過大量建置再生能源設備緩解，但其間歇性與不確定性的發電特徵將導致無謂的棄電損失；電動車的車載電池可以視作具有靈活性與移動性的能源存儲載體，以緩和再生能源發電及建築能源使用的變異性，且由於車輛多數時間皆為閒置，確保了充份的充放電時間。V2B 策略的目的是在非尖峰時期儲存再生能源多餘的發電量，並於尖峰時期釋放電力滿足建築的用電需求—即當產生太陽能發電剩餘時為建築充電，並在建築物用電需求達到峰值時進行放電，實現彈性需求側管理，使在無需額外投資成本的情況下提高建築物與整個電網系統的調度彈性，並且透過削峰填谷達到降低時間電價成本的優勢。

#### 2.1.2 多目標需求最佳化(Multi-Objective Optimization)

本研究將透過多目標需求尋找最佳化的能源調度管理決策。智慧能源管理系統在以下幾個目標需求函數中實現：主要目標函數包含(1)最小化建築對電網的總用電需求，以穩定微電網平衡，計算公式可由式(1)表示；(2)最小化建築尖峰與離峰負載的差值(式(2))：電網的負載平衡是衡量供電品質與用戶服務的重要指標，為避免最佳化後所有電力需求都向最大值移動，本研究選擇建築尖峰與離峰負載的差值作為目標函數，透過電動車及能源儲存設備(Energy Storage System, ESS)調度能源，以削峰填谷的方式達成建築負載轉移，並最大程度地提升能源自利用率，以減少再生能源的棄電損失；限制式包含(1)電動車電池狀態(State of Charge, SOC)的約束：為了防止充電不足或過度充電導致電池老化影響電池壽命，電動車車載電池與裝設的能源儲存設備均受到最大與最小能量儲存容量的限制(式(3)、(4))；(2)充電樁充電容量(Charging Capacity)的約束(式(5))；其中，電動車電池的理想儲存範圍為 20~90%，但本研究假設駕駛人例行從目標辦公建築開車回家的能源消耗約為 10%，為保障電動車在未依照設定時間駛離時仍保有足夠電量使用，因此將整個能源充放電調度期間的電量狀態設定修正為 30~90%之間以保持電池健康度。

$$\text{Min } P_{grid}(t) = P_{Building}(t) - P_{PV}(t) + \sum_{i=1}^{N(t)} (P_{EV}^i(t) \times \eta_{EV}) + P_{ESS}(t) \times \eta_{ESS} \quad (1)$$

$$\text{Min } P_{off-peak,grid} = P_{peak} - P_{valley} \quad (2)$$

$$30\% \leq SoC_{EV} \leq 90\% \quad (3)$$

$$20\% \leq SoC_{ESS} \leq 100\% \quad (4)$$

$$0 \leq C_{j,EV} \leq C_{jmax,EV} \quad (5)$$

其中，

$P_{grid}(t)$ ：建築物在 t 時對電網的用電需求。

$P_{off-peak,grid}$ ：建築物在一天當中尖峰與離峰負載的差值。



$P_{Building}(t)$  : 建築物在  $t$  時的能源消耗。  
 $P_{PV}(t)$  : 太陽能板在  $t$  時的發電量。  
 $N(t)$  :  $t$  時車輛的停放數量, 即充電樁連接的車輛總數。  
 $P_{EV}^i(t)$  : 第  $i$  台電動車在  $t$  時的充電容量, 若放電則為負數, 無參與為 0。  
 $P_{ESS}(t)$  : 能源儲存設備在  $t$  時的充電容量, 若放電則為負數, 無參與為 0。  
 $\eta_{EV}$  : 電動車的充放電效率, 包含能源轉換與傳輸過程之電力損失。  
 $\eta_{ESS}$  : 能源儲存設備的充放電效率, 包含能源轉換與傳輸過程之電力損失。  
 $P_{peak}$  : 建築物在一天當中的尖峰負載, 即  $t=0\sim23$  時的最大負載值。  
 $P_{valley}$  : 建築物在一天當中的離峰負載, 即  $t=0\sim23$  時的最小負載值。  
 $SoC_{EV}$  : 電動車電池電量狀態(State of Charge, SOC), 介於  $0\sim100\%$  之間。  
 $C_{j,EV}$  : 電動車充電樁  $j$  之充電容量(Charging Capacity)。  
 $C_{jmax,EV}$  : 電動車充電樁  $j$  之最大充電容量(Charging Capacity)。

## 2.2 案例分析

### 2.2.1 資料蒐集

本研究的個案分析選用國立臺灣大學土木工程學系系館, 為一棟位於台北市大安區的四層樓建築(包含地上三層與地下一層), 外面設有 23 格停車格, 全棟設有辦公室、教室、實驗室、研究室、會議室、與活動空間等綜合用途, 適合分析建築能源調度策略。為排除新冠肺炎(Covid-19)疫情影響正常建築用電作息, 採用 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日共 1 年的建築能源數據, 時間分辨率為 1 小時。

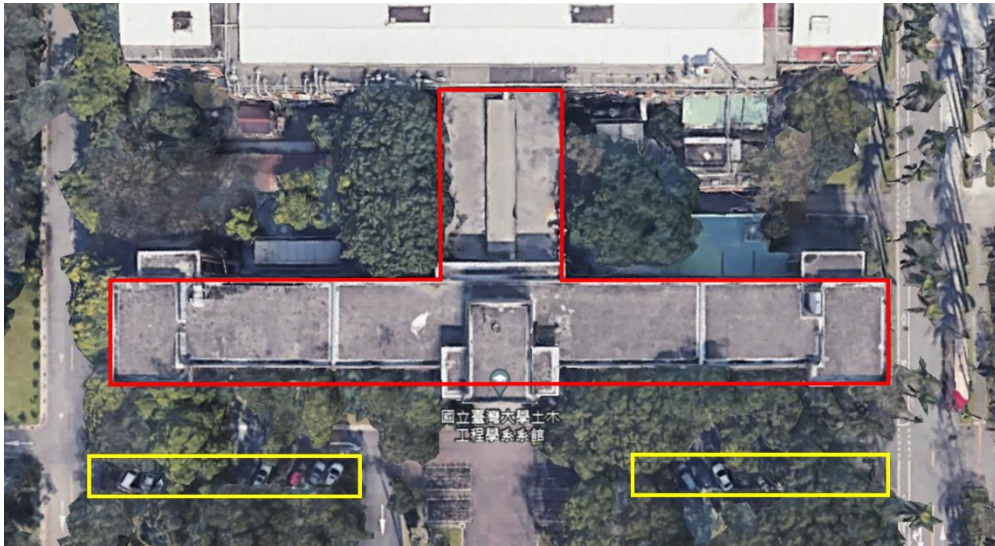


圖 3 本研究案例分析之研究主體(圖片取自 Google Earth)

### 2.2.2 系統邊界(System Boundary)與情境描述(Scenario Analysis)

根據電動車本身的充電需求有無加入能源調度的系統邊界為準則, 本研究將系統邊界分為兩階段(如圖 4 所示), 並分別設計四種情境(如表 1 所示)以作探討與比較:

#### 系統邊界一：建築與運輸部門電力需求分開計算

此系統邊界與既有 V2B 相關的研究文獻一致: 在建築能耗的計算上, 沒有將電動車的充

電需求納入初始建築能源消耗作為基準考量；也就是說電動車並無在建築物內充電的需求，單純以建築部門的角度做電力調度。為了維持系統邊界的一致性，系統邊界一由於並未考慮運輸部門帶給建築部門的充電需求，因此只將電動運具視作額外加入之可移動的能源載體，不會動用車載電池原有之電池容量而影響運輸部門本身之能源系統平衡，僅考慮利用建築周遭設備(太陽能板、電動車、電池能源儲存設備)帶給建築的節能與減碳效益，電動車離開時也只需要維持或大於原有電量，詳細充放電範圍限制的概念如圖 5 所示。

然而此系統邊界一的系統邊界，極有可能導致跨部門電力調度的混亂與系統間的能源平衡誤差，尤其是當電動汽車成為主流時，此偏差預期將會非常明顯。因此，本研究提出系統邊界二的定義。

### 系統邊界二：建築與運輸部門電力需求合併計算

隨著電動運具的滲透率提升，大量的電動車充電需求將增加建築微電網的不穩定性，因此有必要將充電需求納入整體建築的基礎用電需求做能源調度。在本系統邊界中，將運輸部門的充電需求以跨部門能源耦合的形式併入建築部門的電力需求做假設，由於車輛的充電需求有被納入考量，因此可針對電動車停放期間進行全面的充放電的調度策略，只需在電動車設定的駛離時間充足需求電量。若不幸電動車並沒有依照設定的時間而提前離開，本研究設定的最小儲存容量 30%亦可確保電動車有足夠電量能在避免電池老化(20%)的前提下回到家中，詳細充放電範圍限制的概念如圖 6 所示。

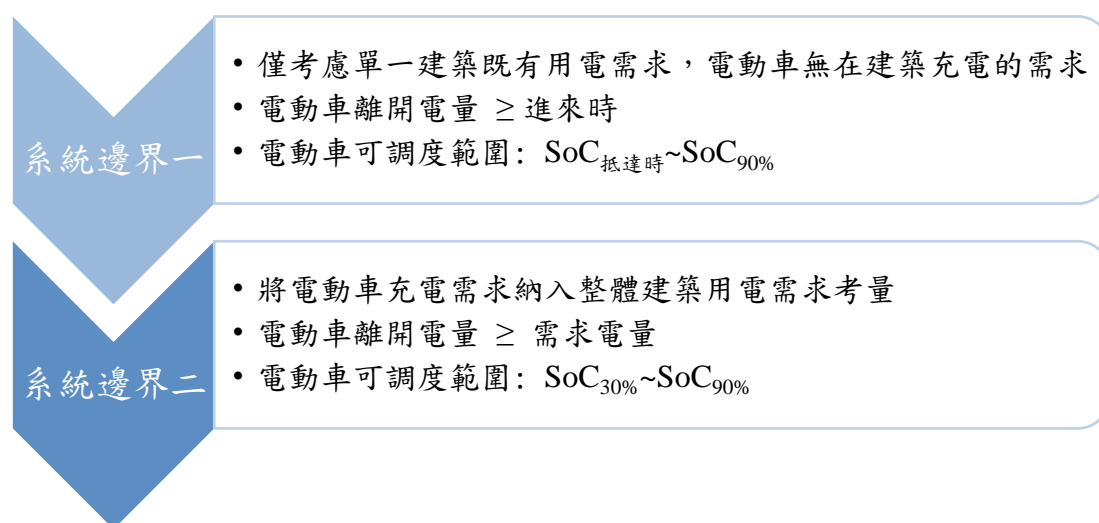


圖 4 智慧能源調度策略之進程

表 1 能源調度情境

情境 (Scenario)	既有建築 電力需求	屋頂裝設 太陽能板	車輛到建 築策略	電池能源 儲存設備
情境 1	✓			
情境 2	✓	✓		
情境 3	✓	✓	✓	
情境 4	✓	✓	✓	✓

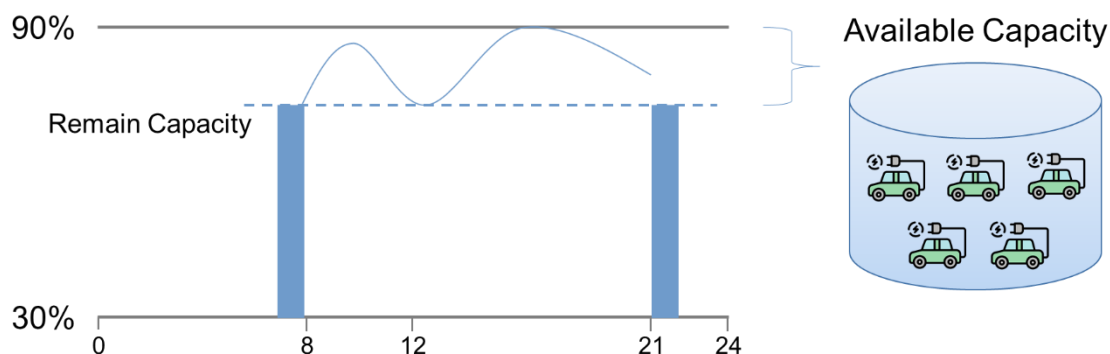


圖 5 系統邊界一之充放電調度範圍限制概念圖

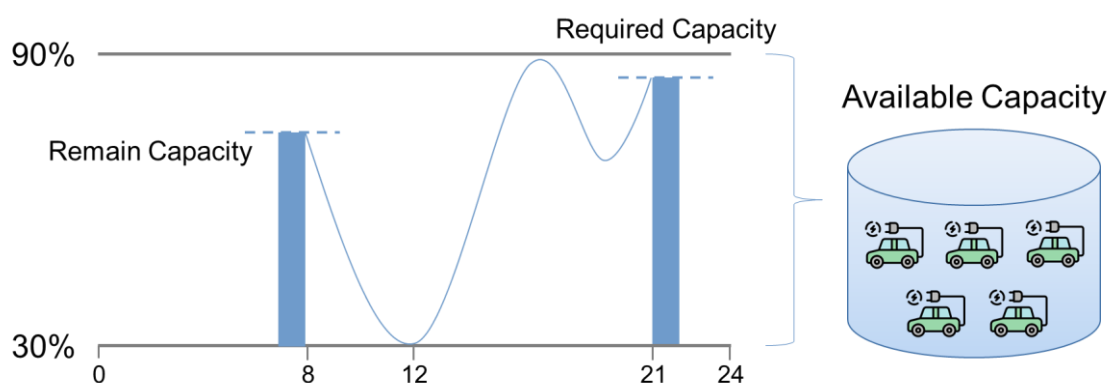


圖 6 系統邊界二之充放電調度範圍限制概念圖

太陽能發電可降低建築對電網的用電需求，但當太陽能發電大於即時建築用電量時，會導致餘電、棄電的損失。因此，情境 4 所設置的能源儲存設備可做為緩衝角色，存儲多餘的太陽能發電量，於高尖峰用電時期放電提供建築物使用。

### 2.2.3 太陽能發電量模型

為改善現今住商部門因發電來源高度依賴傳統火力發電，並降低尖峰時段因高用電需求對電網產生的衝擊，本研究將針對當前大多建築未使用的屋頂空地進行規劃，選擇我國政府大力推廣的綠電主力—太陽能發電系統，作為再生能源發電的模擬對象。太陽能板的發電量受到太陽輻射、溫度與天氣狀況所影響；光伏系統的輸出功率由以下公式推估(Wu, 2018)：

$$P_{PV} = \eta \times S \times I \times (1 - 0.005 \times (T_a - 25)) \quad (6)$$

其中，

- $P_{PV}$ ：太陽能板的輸出功率(W)。
- $\eta$ ：太陽能板的光電轉換效率(%)。
- $S$ ：太陽能板表面積(m<sup>2</sup>)。
- $I$ ：太陽輻射量(W/m<sup>2</sup>)。
- $T_a$ ：環境溫度(°C)。

透過扣除相關機組、線路及冷卻水塔空間後，目標建築頂樓可使用的面積評估約為 2,300 m<sup>2</sup>；並藉由蒐集裝設於國立臺灣大學的監測儀器之氣象資料，進行太陽能發電量之模擬。圖 7 表示目標建築太陽能板於 2020 年每日發電量的模擬結果。



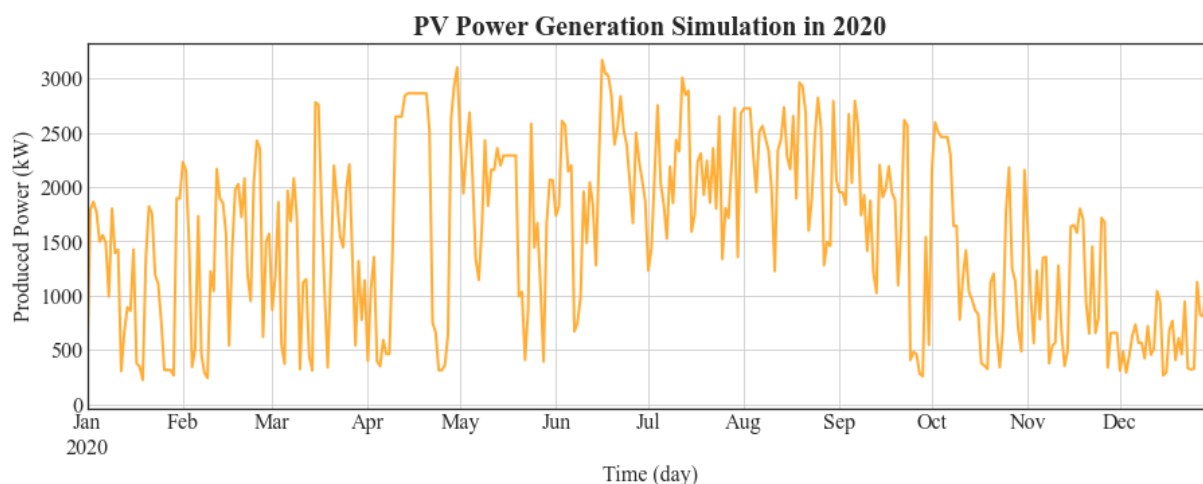


圖 7 目標建築 2020 年太陽能板的推估輸出功率(圖為方便展示用，實際用於能源調度策略的發電量資料時間分辨率為每 1 小時)

#### 2.2.4 車輛停放(抵達與駛離)型態

不同電動運具款式的技術經濟特徵皆不同。為了更準確模擬車輛停車型態，本研究利用臺灣 2020 年度電動車銷售排行(圖 8)前五名：Tesla Model3、Tesla Model X、Tesla Model S、Mercedes-Benz EQC、Nissan Leaf，整理出電動車市占率、平均續航里程、電池容量、購置成本及能源效率(Wh/km)，並依照市占率占比決定後續車輛停放模型車種模擬之參數(如圖 9 所示)。

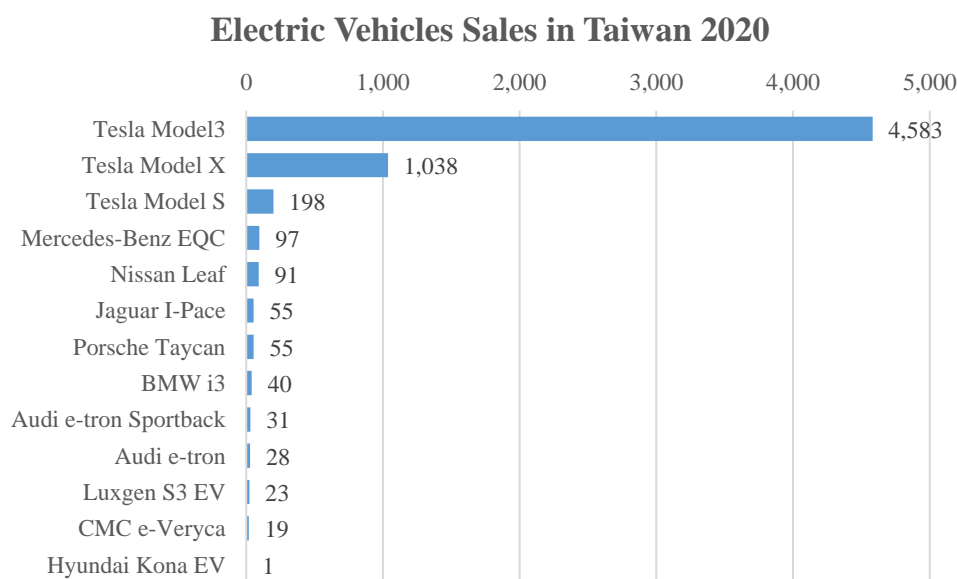


圖 8 臺灣 2020 年度電動車銷售排行






	Number	Model	Units	Market share(%)	Range(km)	Battery capacity(kWh)	Cost(NT\$)	Specific consume(Wh/km)	Percentage(%)
	1	Tesla Model3	4583	73.22%	614	75	\$ 1,972,900	160	76.29%
	2	Tesla Model X	1038	16.58%	560	100	\$ 3,888,900	226	17.28%
	3	Tesla Model S	198	3.16%	652	100	\$ 3,254,900	190	3.30%
	4	Mercedes-Benz EQC	97	1.55%	462	80	\$ 3,300,000	223	1.61%
	5	Nissan Leaf	91	1.45%	311	40	\$ 1,490,000	172	1.52%
Total for selected models			6007	96.0%	Average	Average		Average	100%
Total Evs			6259		598.88	79.69		173.59	

圖 9 電動車輛模型參數表

圖 10 顯示目標建築的 23 台電動車停放於停車格的抵達與駛離時間，抵達時間與駛離時間的特徵分別使用式(7)給出的  $\mu = 8:30 \text{ a.m.}$ ,  $\sigma = 1$  及  $\mu = 6:30 \text{ p.m.}$ ,  $\sigma = 2$  的高斯常態分佈來定義，以模擬車輛停放的不確定性。此外，電動車的初始電量狀態與需求電量皆從 30~90%隨機產生，並避免掉不合理的情況(如需求電量小於初始電量)。

$$G(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

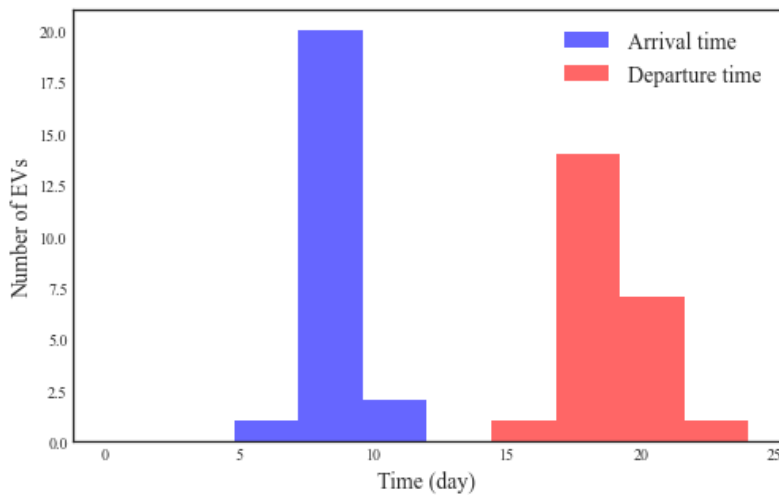


圖 10 23 台電動車抵達時間與駛離時間模擬結果；以其中一天為示例

### 2.2.5 智慧能源管理系統(Smart Energy Management System, SEMS)之調度策略

考量建築用電及太陽能發電之波動性，本研究以降低高峰負載及建築對電網用電需求為目標，設計一智慧能源調度策略。圖 11 表示調度策略算法的流程圖，主要包含四個部分：建築能源需求、太陽能板發電、電動車充/放電、ESS 充/放電。SEMS 通過建築的智慧電網接收來自不同子系統的監測數據，並將數據以每小時進行更新；針對電動車的即時資料重新計算優先順序，並重新安排最佳化充放電調度排程。建築用電需求在經過太陽能發電的供給後，將依次進行電池儲存設備放電、電動車放電、電動車充電、電池儲存設備充電，以最大化建築周遭現有資源的利用，並降低電池儲存設備的裝置容量以減少投資成本與設備全生命週期之碳排放。

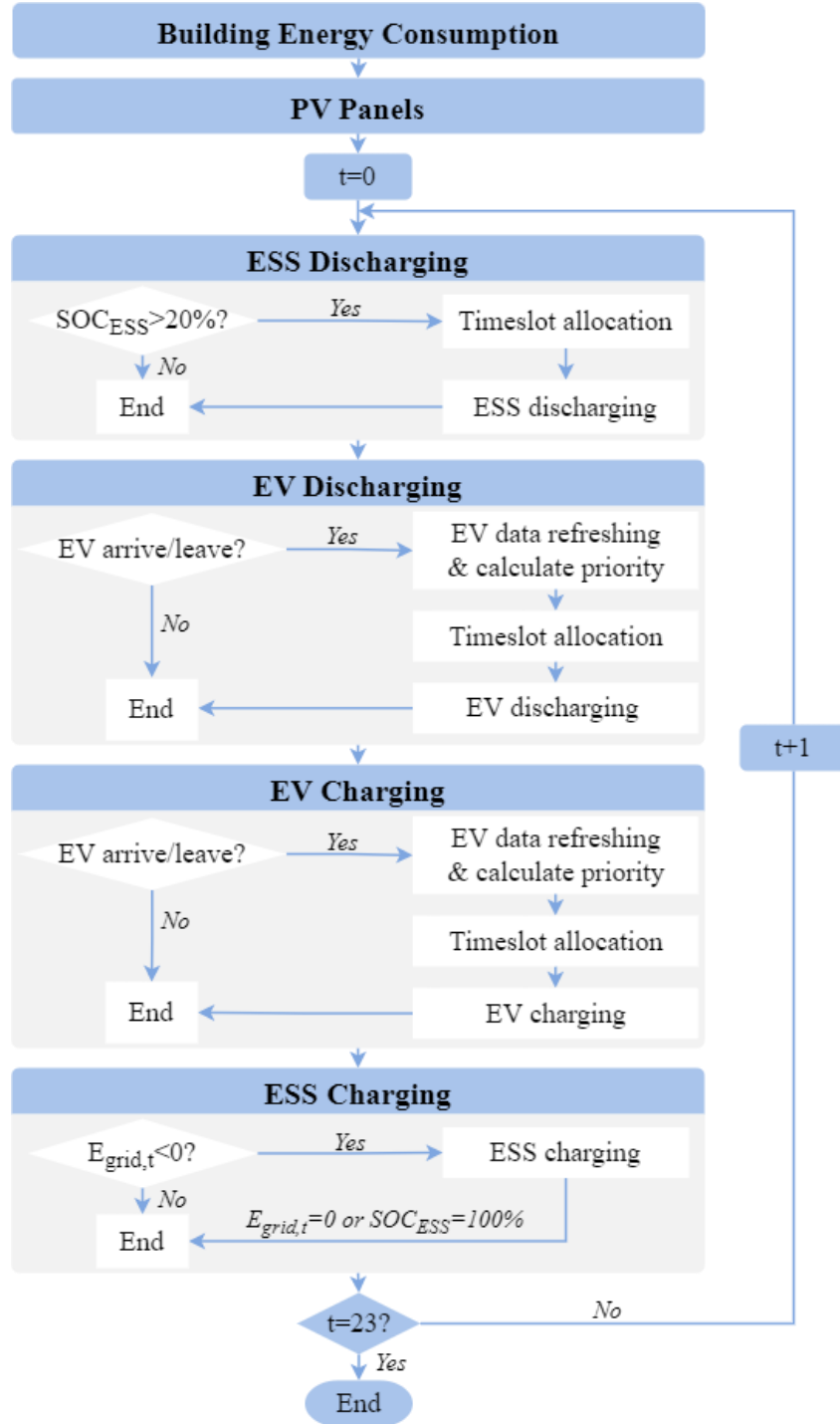


圖 11 SEEMS 智慧能源調度系統之充放電調度排程之流程圖

### 2.2.6 電動車充放電優先順序算法

SEMS 根據電動車的充放電需求、電池容量、充電樁充放電速率及效率來計算電動車所需之充放電時段數(式(8))，並加入了時間急迫性為一決定因子來判斷每台 EV 的優先級(式(9))，並依照優先級大小排列決定充放電順序。若該電動車需要充電，則為正數，若無充電需求或可以提供放電，則為負數。在此計算中，即使電動車已經達成目標之需求電量，但如果距離設定的駛離時間還很充足，則可以先提供放電使用，並確保在離開前充至需求電量。

$$t_{charging} = \frac{(SOC_{req} - SOC_{now})B_{EV}}{P_C \times \eta} \quad (8)$$

$$P(priority) = \frac{t_{charging}}{t_{leave} - t_{now}} \quad (9)$$

其中，

$t_{charging}$ ：電動車需要充電的時間段數量(小時)。

$SOC_{req}$ ：電動車的需求電量(%)。

$SOC_{now}$ ：電動車的現時電量(%)。

$B_{EV}$ ：電動車電池容量(kWh)。

$P_c$ ：充電樁充放電速率(kWh)。

$\eta$ ：充電樁充放電效率(%)。

$P(priority)$ ：電動車充放電優先級，若需充電為正、放電為負。

$t_{leave}$ ：電動車設定的駛離時間。

$t_{now}$ ：現在時間。

### 2.2.7 電網碳排放密度模型

為了達到淨零排放路徑，臺灣正在積極部署再生能源，改變電網的發電結構，太陽光電裝置容量提升將影響到一天當中不同時間點的電網碳密度。為了減少用電所造成的排碳量，本研究透過政府資料開放平台蒐集相關資料，並針對臺灣的電力結構進行高時間解析度的建模，計算出各發電機組之每小時發電量及排放量，以推算目標建築用電之碳排放量。

結果(圖 12)顯示 2020 年臺灣電網平均碳排放密度為: 0.508 (kg CO<sub>2</sub>e/kWh)(曾暉峻、謝依芸, 2022)。太陽能發電為每日的主要變量，但較無明顯季節性變化，而冬季風力發電量高，因此冬季平均電網碳排放密度低於夏季。

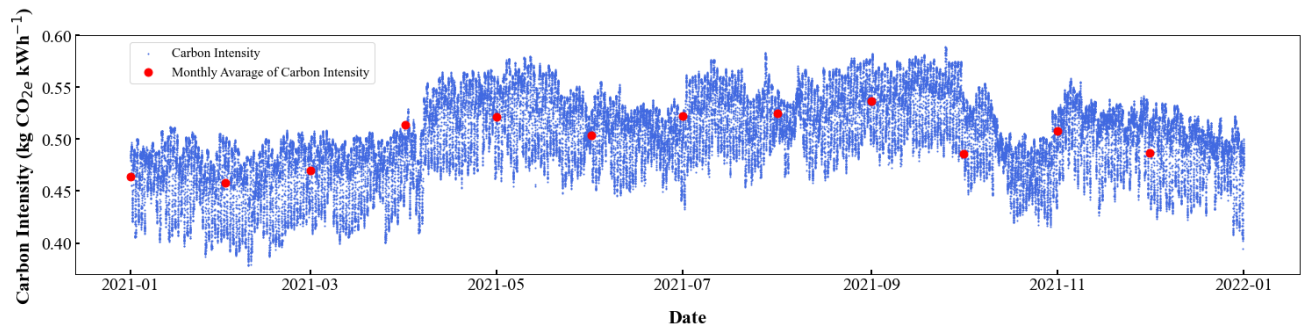


圖 12 2020 年臺灣電網碳排放密度計算結果(取自曾暉峻、謝依芸，2022)

## 三、結果與討論

### 3.1 情境模擬結果

透過所提出的智慧能源調度管理系統算法，本研究模擬系統邊界一與系統邊界二之各情境能源調度結果，並搭配章節 2.2.7 之電網碳排放密度模型，計算各情境之碳排放量以進行比較，並檢視建築在各策略施行的具體效益與影響。其中，為了使兩系統邊界的參數維持一致，本研究假設太陽能板的設置面積為 2300m<sup>2</sup>，光電轉換效率為 20.36%；電動車透過 Level 2 充電樁進行充放電，每小時充電速率為 7 kWh、能源轉換效率為 90%(含能源轉換與傳輸過程之電力



損失)，數量為 23 台，並在 30~90%間進行充放電，以減緩電池衰退，延長電池壽命；能源儲存設備的裝置容量統一為 3 MWh、能源轉換效率為 90%(含能源轉換與傳輸過程之電力損失)，並在 20~100%之間進行充放電。此外，由於本次研究模擬週期為一年(2020 年)，因此，能源儲存設備的初始電池容量將設定與結束模擬週期時相等，使後續週期的存儲量保持平衡以進行公平比較。

### 3.1.1 系統邊界一：建築與運輸部門電力需求分開計算

在本系統邊界中，運輸部門電動車的充電需求並未納入建築能耗需求做考量，因此情境 1 的既有電力需求僅考慮目標建築於 2020 年每小時的能耗數據。圖 13 展示了建築整合太陽能發電後的用電需求，其中的負值代表該小時具有太陽能的發電剩餘，全年共計有 384,197 kWh，若沒有經過完善的能源調度策略規劃，這些能源將會直接造成棄電損失。

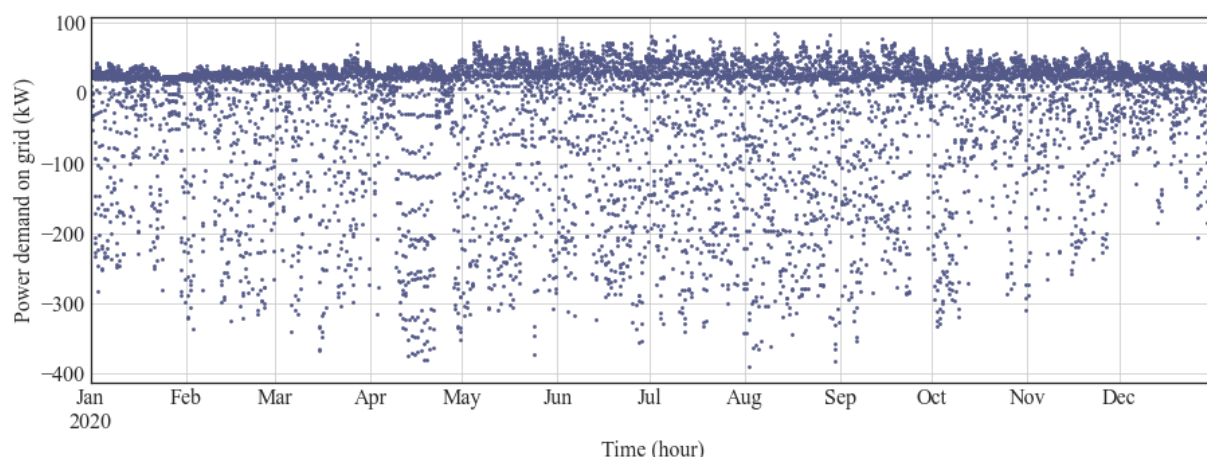


圖 13 2020 年系統邊界一建築整合太陽能發電的用電需求；負值表示太陽能發電剩餘

各情境建築物對電網的用電需求及碳排放量調度結果如圖 15、圖 16 所示，為方便呈現，本研究將時間分辨率為小時的能源調度結果整合成以日為單位，以方便比較不同情境之調度成果。模擬結果顯示：(1)裝設太陽能板(情境 2)能降低既有建築能源需求及碳排放量的 51.5%與 50%；(2)由於電動車被視作額外加入之可移動能源載體，因此不能動用電動車於系統邊界外之原有儲存能量，僅能於現時電量與最大容許容量(90%)之間進行電力調度；車輛到建築策略(情境 3)能減少初始能源消耗的 66.5%與 65.1%的碳排放量；(3)如再配合增設能源儲存設備(情境 4)，可提供智慧能源管理系統更靈活的能源調度空間，進一步提高整體系統的減碳效益，經過此策略後建築對電網的用電需求與整體碳排放將減少 91.6%與 91.5%，達成近零耗能建築(Nearly-Zero Energy Building, NZEB)的目標。

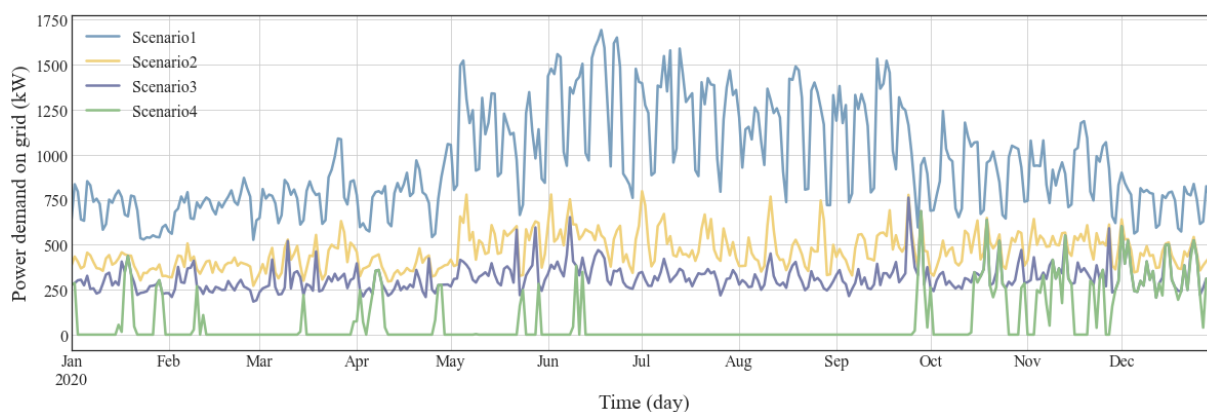


圖 14 2020 年系統邊界一各情境建築每日對電網用電需求

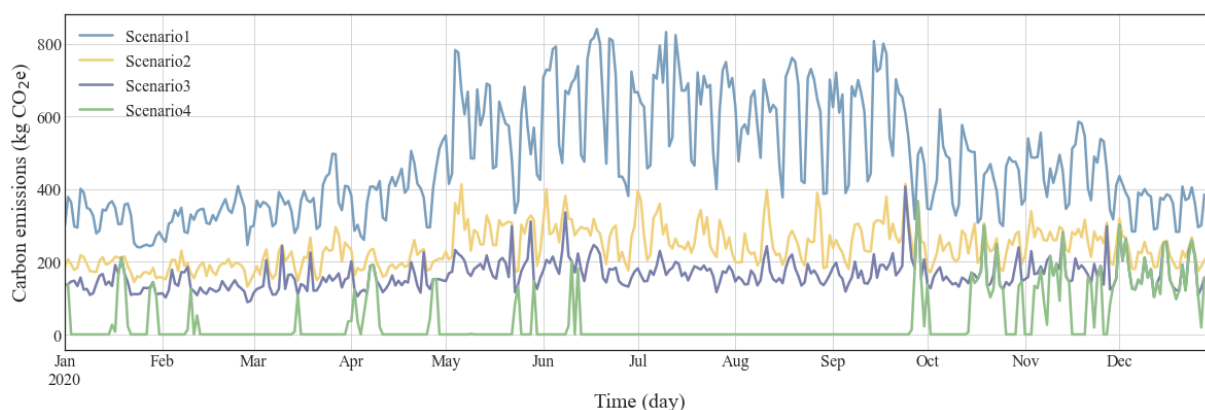


圖 15 2020 年系統邊界一各情境建築每日碳排放量

由於再生能源的發電過程為零排放，因此根據臺灣發電結構的不同，碳排放密度通常會在一天中呈現差異，而以日為單位的碳排放密度則較為相近，因此上圖之各情境之調度結果較難呈現其碳排放於一日內的差異。本研究取一年當中碳排放密度差距最大的一天(2月15日)來呈現建築一日內每小時對電網的需求以及碳排放量的變化，如圖 16 所示。建築物在經過情境 4 的能源調度後，可以將能源消耗及碳排放降至零，達成整日淨零耗能的目標。

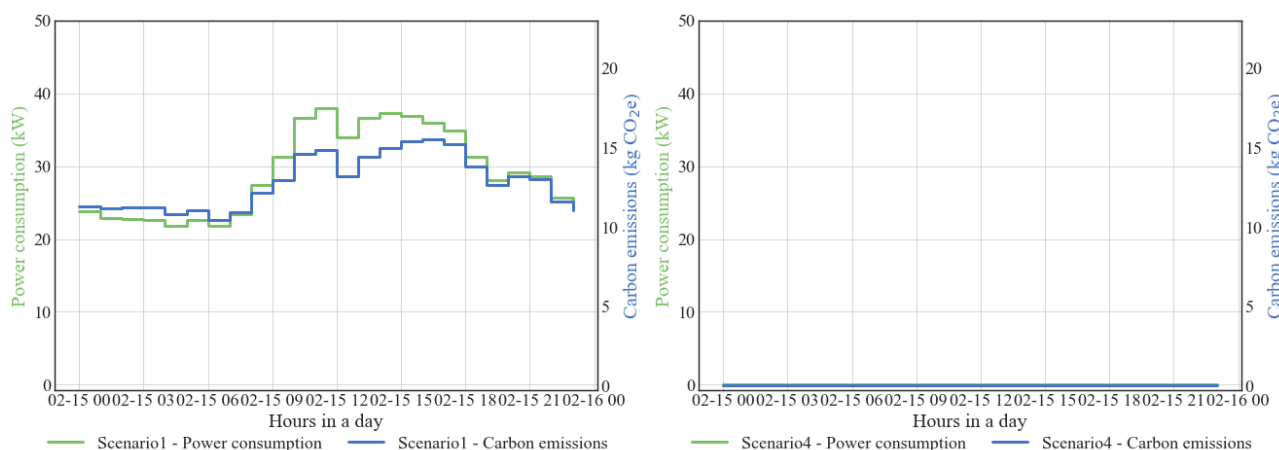


圖 16 系統邊界一當日能源消耗與碳排放量模擬情形(以 2020 年 12 月 3 日為例)

### 3.1.2 系統邊界二：建築與運輸部門電力需求合併計算

隨著電動車市場逐漸成熟，將運輸部門的電動車充電需求納入建築部門的能源消耗進行分析，被認為更為妥善。圖 17 指出系統邊界一與系統邊界二建築基礎能源需求的不同。圖 18 顯示建築整合太陽能發電後的用電需求，其中的負值代表該小時具有太陽能的發電剩餘，全年共計有 143,063 kWh，由於電動車充電需求的加入導致建築能源消耗大幅提升，因此在設置相同面積太陽能板的目標建築上，系統邊界二的太陽能剩餘較少。

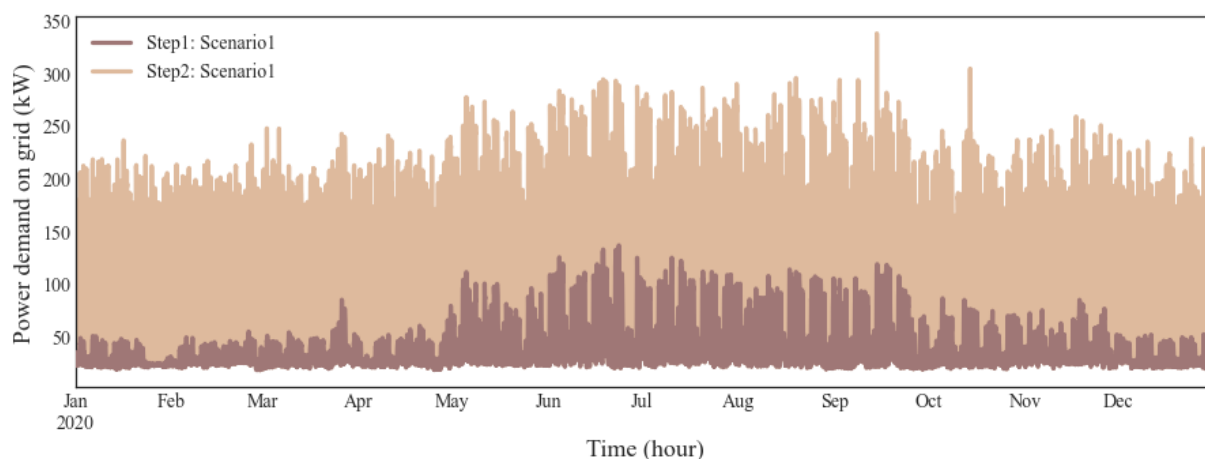


圖 17 系統邊界一與系統邊界二之情境 1 比較圖

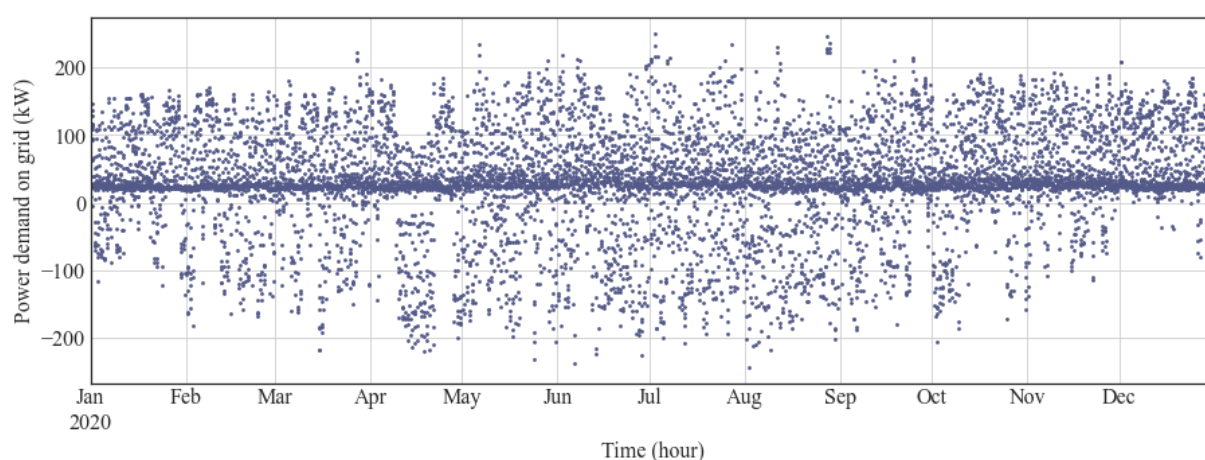


圖 18 系統邊界二建築整合太陽能發電的用電需求；負值表示太陽能發電剩餘

各情境建築物對電網的用電需求及碳排放量調度結果如圖 19、圖 20 所示，為方便呈現，本研究將時間分辨率為小時的能源調度結果整合成以日為單位，以方便比較不同情境之調度成果。模擬結果顯示：(1)裝設太陽能板(情境 2)能降低既有建築能源需求及碳排放量的 49.8%與 48.9%；(2)車輛到建築策略(情境 3)可在電動車電池容量 30~90%之間進行充放電，提供很大的調度彈性，可減少初始能源消耗的 60.6%與 59.5%的碳排放量；(3)如再配合增設能源儲存設備(情境 4)，可提供智慧能源管理系統更靈活的能源調度空間，進一步提高整體系統的減碳效益，經過此策略後建築對電網的用電需求與整體碳排放會減少 64.9%及 63.9%，並可將太陽能發電剩餘的棄電損失降至淨零。

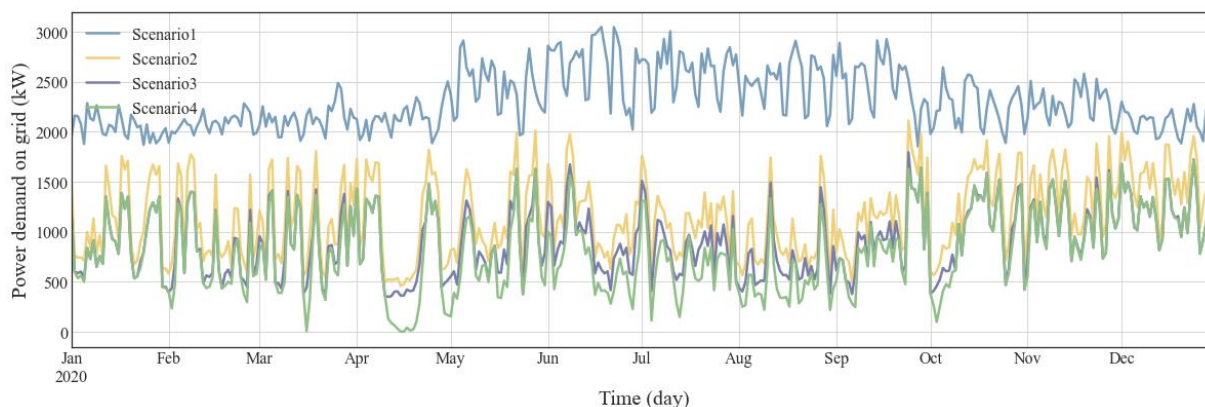


圖 19 2020 年系統邊界二各情境建築每日對電網用電需求

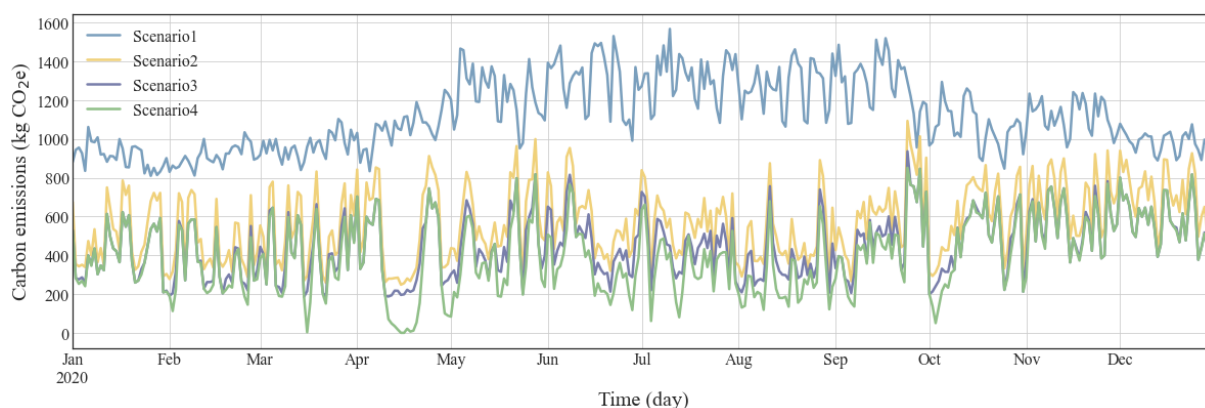


圖 20 2020 年系統邊界二各情境建築每日碳排放量

由於再生能源的發電過程為零排放，因此根據臺灣發電結構的不同，碳排放密度通常會在一天中呈現差異，而以日為單位的碳排放密度則較為相近，因此上圖之各情境之調度結果較難呈現其碳排放於一日內的差異。本研究取一年當中碳排放密度差距最大的一天(2月15日)來呈現建築一日內每小時對電網的需求以及碳排放量的變化，如圖 21 所示。可以看出即便是碳排放變化程度最明顯的一天，碳排放的差異仍很大程度受建築能耗的影響，因此針對建築進行節能將是對於減少碳排放的重要依據。

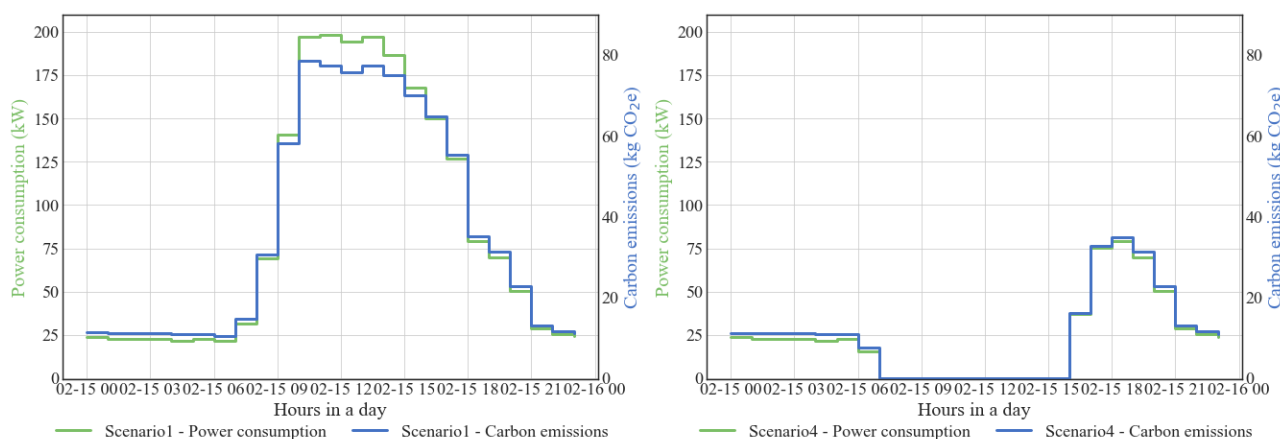


圖 21 系統邊界二當日能源消耗與碳排放量模擬情形(以 2020 年 12 月 3 日為例)

### 3.1.3 智慧能源調度系統之情境模擬結果

圖 22 呈現本研究在不同系統邊界定義下，各情境中建築物對電網用電需求及碳排放量的調度結果。其中，系統邊界二由於將電動車充電需求納入本研究之建築物系統邊界做分析，因此系統邊界二在能源消耗以及能源使用所排放之二氧化碳當量均較系統邊界一高，但仍可以看出無論是系統邊界一或是系統邊界二的假設情景下，建築物可以透過裝設太陽能板、電動車到建築策略、以及加裝能源儲存設備將能耗與碳排放量降低一個數量級，具有巨大的節能與減碳潛力。



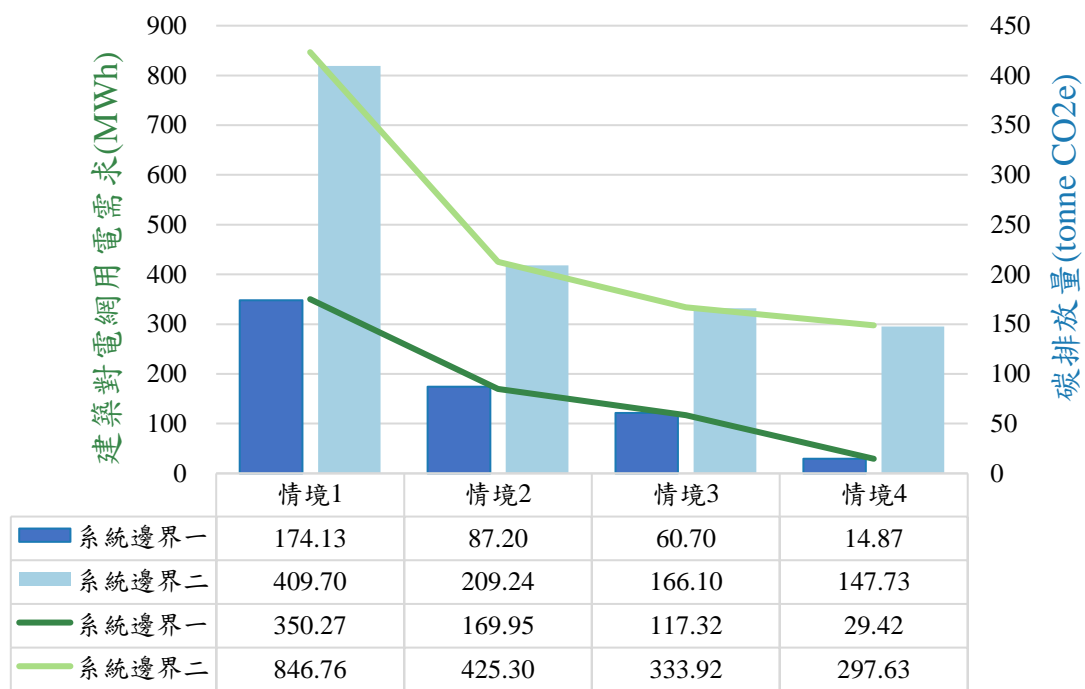


圖 22 智慧能源調度系統之各情境模擬結果

#### 四、總結

本文提出一種基於結合車輛到建築策略的智慧化能源調度管理策略，透過電動車充放電優先級演算法，進行再生能源、儲能系統、建築物與電動車之間的能源調度，以大幅提升建築節能減碳的效益。在本文中，電動車的車載電池被視作一可移動之彈性能源儲存設備，電動車的優先級將根據車輛抵達時間、駛離時間、現時電量、需求電量、電池容量、充電樁充放電速率及效率來決定，並將每小時進行更新。根據模擬結果顯示：系統邊界一(建築與運輸部門電力需求分開計算)在透過裝設太陽能板、車輛到建築策略、以及增設能源儲存設備後，可降低既有建築能源需求及碳排放量的 91.6%與 91.5%。系統邊界二將電動車充電需求納入建築能源需求的系統邊界，建築對電網的用電需求與整體碳排放則會分別減少 64.9%及 63.9%。透過系統邊界一與二的結果比較，可以發現如依既有相關文獻僅考慮建築能源負載需求，忽略電動車的充電需求，將樂觀高估車輛到建築策略(V2B)技術所帶來的環境效益潛力。

本文提出之智慧能源調度管理策略能夠最小化建築的能源消耗，並透過削峰填谷的方式降低峰值負載，並達到穩定電網的目標。本研究成果可用作智慧能源管理策略的參考依據，以促進車輛電動化與近零耗能建築轉型，並加速我國淨零排放轉型，兼具學術理論與社會實踐之重要性。然而，本研究仍存在一些面向值得未來進一步探討。現階段研究成果僅透過設定車載電池容量限制保護電池，但充放電次數仍會影響電池健康度；目前的碳足跡評估僅考慮建築營運階段使用電力之所產生之碳排放量，但設備本身從原物料取得、製造、回收或廢棄以及期間所消耗能源的碳排放量也應該納入建築的系統邊界考量。隨著儲能系統的規模擴大，建築節能與儲能系統規模間預期將存在減碳的權衡取捨關係。未來將納入增設設備(太陽能板與儲能)所產生之額外全生命週期碳排放量，並加入電池退化成本做經濟面考量，以敏感度分析尋找節能、減碳、成本之最佳化組合。

## 參考文獻

- Our World in Data (2022), Energy use per person, Retrieved August 13, 2022, website: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use>.
- International Energy Agency (2020), Key World Energy Statistics 2020, Retrieved August 13, 2022, website: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>.
- International Energy Agency (2021), Global EV Outlook 2021, Retrieved August 13, 2022, website: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- International Energy Agency (2020), World Energy Balances, Retrieved August 13, 2022, website: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f096ab-5872-4eb0-91c4-418625c2c9d7/World\\_Energy\\_Balances\\_Overview\\_2020\\_edition.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f096ab-5872-4eb0-91c4-418625c2c9d7/World_Energy_Balances_Overview_2020_edition.pdf).
- Ritchie H, Roser M. (2020), Emissions by sector, Retrieved August 13, 2022, website: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.
- International Energy Agency (2021), World electricity final consumption by sector, 1974-2019, Retrieved August 13, 2022, website: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-final-consumption-by-sector-1974-2019>.
- 行政院環境保護署 (2015), 中華民國(臺灣)「國家自定預期貢獻」(INDC)(核定本)。
- Vyakaranam, B. et al. (2017), “A Study of the Impact of Peak Demand on Increasing Vulnerability of Cascading Failures to Extreme Contingency Events,” *ResearchGate*.
- Odkhuu, N., Lee, K.-B., A. Ahmed, M. and Kim, Y.-C. (2018), “Optimal Energy Management of V2B with RES and ESS for Peak Load Minimization,” *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 11, p. 2125.
- Dagdougui, H., Ouammi, A. and Dessaint, L. A. (2019), “Peak Load Reduction in a Smart Building Integrating Microgrid and V2B-Based Demand Response Scheme,” *IEEE Systems Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 3274–82.
- Ouammi, A. (2021), “Peak load reduction with a solar PV-based smart microgrid and vehicle-to-building (V2B) concept,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 44, p. 101027.
- Borge-Diez, D., Icaza, D., Açikkalp, E. and Amaris, H. (2021), “Combined vehicle to building (V2B) and vehicle to home (V2H) strategy to increase electric vehicle market share,” *Energy*, Vol. 237,

p. 121608.

Bracco, S., Delfino, F. and Piazza, G. (2020), “E-Mobility & Microgrid Laboratory at the Savona Campus of Genova University,” *2020 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, IEEE, pp. 1–6.

Moura, P., Correia, A., Delgado, J., Fonseca, P. and Almeida, A. de. (2020), “University Campus Microgrid for Supporting Sustainable Energy Systems Operation,” *2020 IEEE/IAS 56th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, IEEE, pp. 1–7.

WU, Y., Ravey, A., Chrenko, D. and Miraoui, A. (2018), “A Real Time Energy Management for EV Charging Station Integrated with Local Generations and Energy Storage System,” *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1–6.

曾暉峻、謝依芸 (2022), 「電動運具充電策略以最小化碳足跡：電網結構與排放」, 中華民國運輸年會 2022 年年會暨學術論文國際研討會, 已投稿。