

整合VRB儲能系統和再生能源微電網之能源管理策略

許鈴金¹ 許上鎰² 陳斌豪^{2*}

摘要

為了解決全球日益增長的能源需求和氣候變遷問題，結合再生能源和儲能設備的微電網調度應用於電力負載管理，為具前瞻發展且可實現性的解決方案。本研究建立一套應用於分散式能源及電力負載的微電網模擬模型，分散式能源分別為柴油發電機、太陽能發電、風力發電及全釩液流電池，模擬不同環境下分散式電源的發電特性和能源調度策略，將減少碳排放作為能源調度的首要目標，以全釩液流電池(Vanadium Redox Battery, VRB)於微電網系統中作為儲能設備，依據負載需求與能源調度最佳化策略，建構分散式能源調度決策模擬模型。完成建模後，利用台灣電力公司的實際資料匯入微電網模擬系統，使分散式能源追蹤此資料進行發電，同時採用人工蜂群演算法進行能源調度最佳化演算，研析電網系統能源管理之最佳調度策略。最後，利用軟體Matlab設計能源管理策略，以Matlab/Simulink建立微電網系統模型進行模擬。研究結果顯示，運用本研究設計之能源調度策略，夏季可有效減少約48%額外碳排放，冬季約減少56%的額外碳排放。

關鍵詞：能源管理策略，再生能源微電網，儲能系統，全釩液流電池，人工蜂群演算法

1. 導 論

因應國際政經與能源情勢快速變化，以石化能源為主的傳統能源供應結構無法實現人類永續經營的願景，各國積極尋找能源供應的替代方案，全球處於能源轉型的關鍵世代。臺灣政府訂定能源轉型目標，積極以節能、創能、儲能與智慧整合四大策略，提高綠色再生能源發電占比(Lin and Cheng, 2022)。再生能源是對環境負擔與溫室氣體排放量較低的優質能源，包括風能(Chen and Lin, 2022；Qian, 2019；Roth

and Schill, 2023)、太陽能(Voss *et al.*, 2021；Fasoli *et al.*, 2021；Michiorri *et al.*, 2012)、海洋能(Magagna and Uihlein, 2015；Gourvenec *et al.*, 2022)、地熱(Joshi and Khandelwal, 2023；Benti *et al.*, 2023)及生質能等(Kirkels, 2012；Szarka *et al.*, 2021))。然而再生能源大多為間歇性能源，發電功率的瞬時變動率較大，無法人為控制，且發電功率會隨著時間、氣候與季節產生變化。臺灣是一個天然災害多的國家，每年夏季有颱風，處於地震帶，並且有許多離島，發展微電網可大幅提升能源韌性，且成為一種

¹ 國立雲林科技大學創業管理碩士學位學程

² 國立台北科技大學車輛工程系

*通訊作者，電話：02-27712171#3604，電郵：binhao17@ntut.edu.tw

收到日期: 2024年05月10日

修正日期: 2024年07月29日

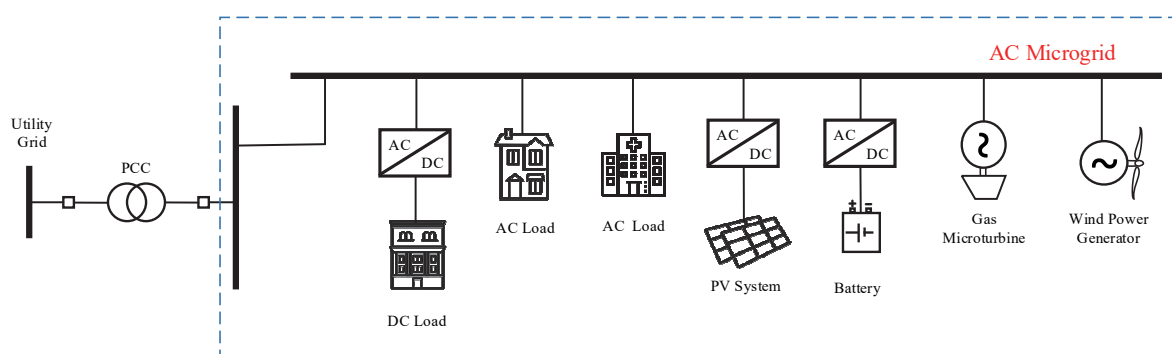
接受日期: 2024年08月07日

自給自足之能源。微電網可獨立供應負載，亦能存入儲能系統，併入電網，在高負載及再生能源供電不足時，由儲能系統調度電力，削峰填谷，協助改善電網壅塞，強化電網穩定度。透過儲能設備及時儲存再生能源產生的電力(Zyryanov *et al.*, 2020；Sadeghi *et al.*, 2023)，作為備用能源存放，或於用電尖峰時段提供額外功率，實現功率曲線削峰填谷(Al-Bahrani *et al.*, 2020；Tan *et al.*, 2021)，減輕發電廠的負擔，同時解決再生能源間歇性發電的特性。電網是電力互相連接的基礎設施，實現將電力由發電廠輸送至消費者的目標。然而，隨著電網規模擴大，每當發電廠發生事故，影響的範圍亦擴大，例如2022年臺灣發生303停電事故(興達發電廠停機事故)，由於電氣設備出現問題，使電力系統電力輸出下降，造成全臺灣550萬戶受影響，影響時間超過12小時。2018~2023年臺灣共發生五次重大跳電事故，造成數十萬至百萬住戶受影響，讓更多人注意到分散式電網之重要性。

傳統電網明顯不適用於當今的能源結構，因此學者推動一種對新型能源系統和電力網絡的研究和創新，即微電網(Wang *et al.*, 2024；Zhou *et al.*, 2022；Zhang *et al.*, 2016；Huang and Mu, 2021)。微電網整合多個分散式電源、負載、儲能裝置及控制系統，形成獨立可控的

自給自足區域性能源系統。微電網是一種區域性低壓電力網路，為分散式能源應用及社區電力自給自足的關鍵技術之一，目前常用於微電網中的再生能源如太陽能及風能等，可直接將輻射能及風能轉換為電能供給電網電力。分散式能源系統發電方式彈性，對環境影響較低，可提供優於傳統集中式發電的電力品質，同時減少電力傳輸的電能消耗，提升能源的使用效率。微電網有兩種運轉模式，分別為併網模式與孤島模式(Wang *et al.*, 2022；Li *et al.*, 2024；Choudhury and Sahoo, 2024)，孤島模式時，主電網與微電網完全隔離，主電網電力無法輸送至微電網，需透過為內部的再生能源系統與儲能系統進行供電，支撐微電網的所有功率需求；在併網模式下，微電網透過靜態轉換開關耦合至主電網，此時微電網持續監控分散式能源發電功率及負載功率需求，並根據當前狀態輸出多餘的功率至主電網，亦或是由主電網輸入不足的功率。

微電網可分為交流微電網、直流微電網及交、直流混合微電網等架構(Lede *et al.*, 2017；Kumar *et al.*, 2017；Patrao *et al.*, 2015)。交流微電網架構如圖1所示，為傳統的電網架構，使用電力電子轉換器集成分散式能源與電網負載，無須連接轉換器變換電流形式，從而提高電網穩定性。當電力品質較差時，可啟用斷路器斷



資料來源：Kumar *et al.*, 2017.

圖1 交流微電網系統架構圖

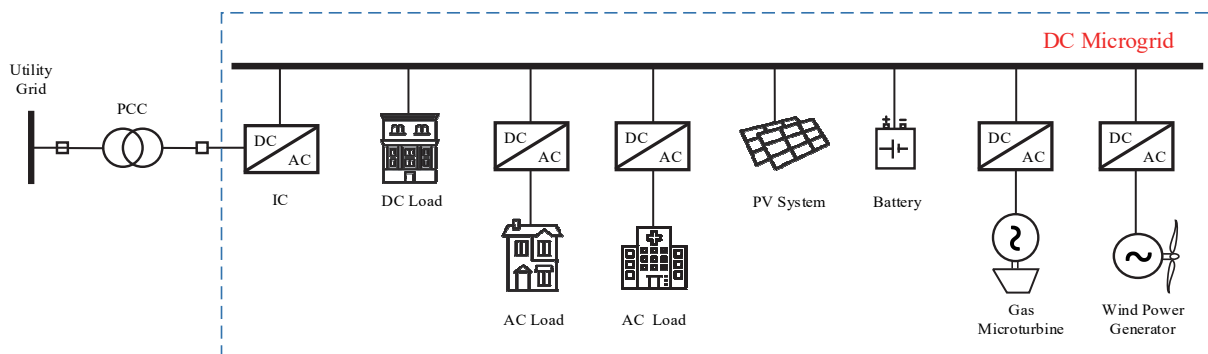
開主電網連接，使其進入孤島模式運行。併網模式運行時，交流微電網饋線具有與主電網相同的電壓和頻率條件，電力直接由微電網流出/流入主電網。交流微電網受惠於傳統電力系統，沿用現有的網路基礎設施如配電器、變壓器及保護機制，使交流微電網更容易設計與實踐。

直流微電網架構如圖2所示，使用直流總線系統連接分散式能源及負載，沒有無效功率的消耗，與交流總線相比其電路損耗較低。直流微電網更適用於儲能設備和直流設備，提供更高的效能和能源轉換效率(Kumar *et al.*, 2019; Pires *et al.*, 2023)，然而直流微電網與主電網併網前，須透過雙向互連轉換器進行電壓轉換及電流隔離，且與當今臺灣的家用電力架

構不符，相關規範及保護措施仍不完整。

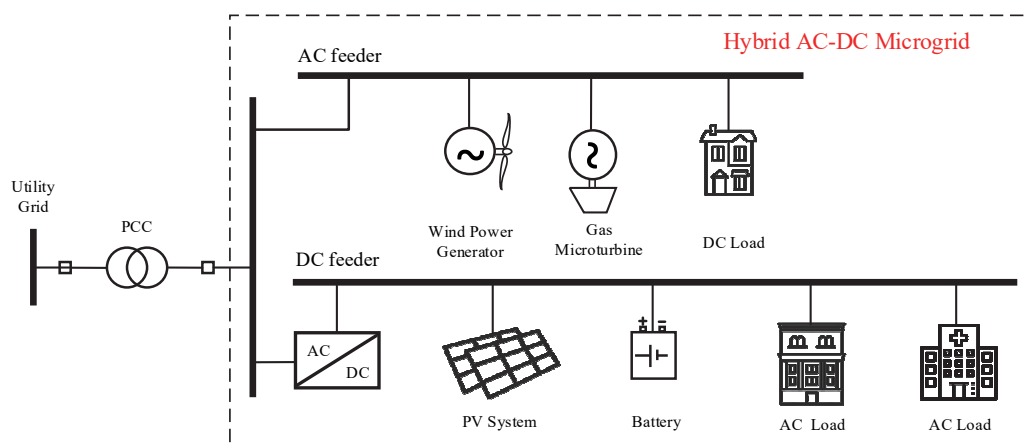
交、直流混合微電網架構如圖3所示，結合交流和直流架構的優點，將兩種電力系統集成在於微電網中，將交流發電系統及負載與直流發電系統及負載分類，大幅減少能源轉換時造成的損耗。此架構亦與臺灣傳統電力架構不同，系統控制、功率平衡、基礎建設及其他相關規範仍在研究中。

能源管理策略(Energy Management Strategy, EMS)的主要目標為提高系統的能源效率和性能，基於規則(Rule-Based)的策略，其設計可透過專業知識、微電網特性或是過去經驗；最佳化(Optimization)的策略(Farhadi Gharibeh and Farrokhifar, 2021)為使用數學分析演算使得目標函數達到最佳值。此二種類的控制可分



資料來源：Kumar *et al.*, 2019.

圖2 直流微電網系統架構圖



資料來源：本研究彙整。

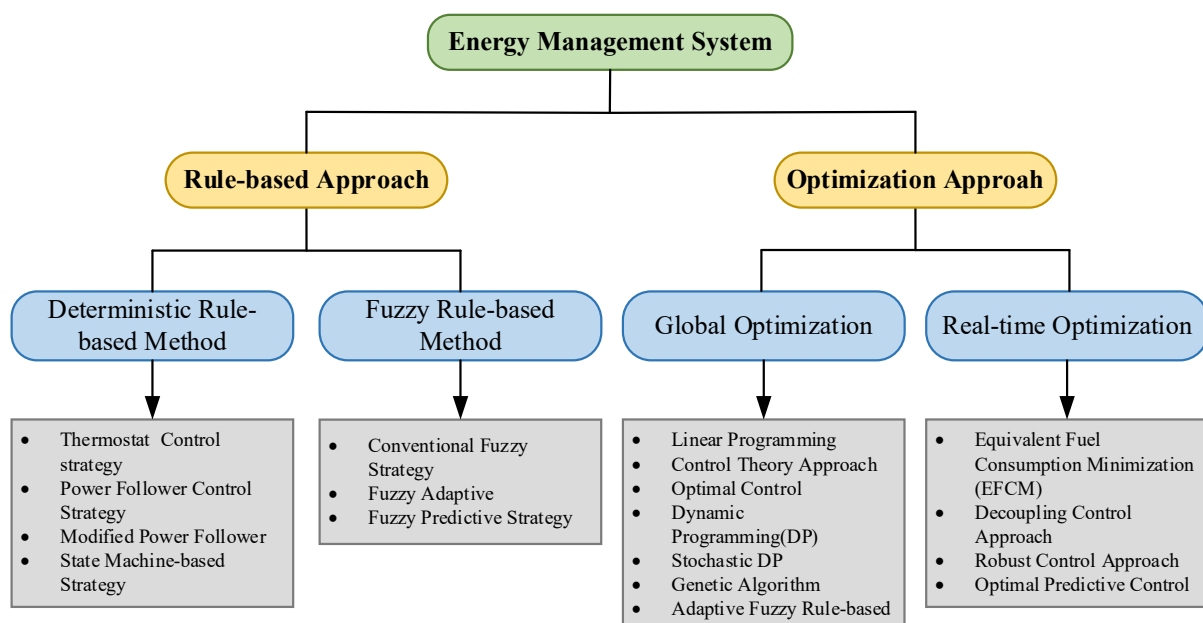
圖3 交、直流混合微電網系統架構圖

為兩個子類別，基於規則的控制可以分為明確規則(Deterministic Rule-based)策略與模糊規則(Fuzzy Rule-based)策略；最佳化策略可以分為全域最佳化(Global Optimization)策略與即時最佳化(Real-Time Optimization)策略，如圖4所示。

基於規則(Rule-based)的能源管理策略，由於其複雜度相對低，易於實現、計算效率高、實驗驗證快。明確規則(Deterministic Rule-based)的策略方法，根據不同的負載功率需求、分散式能源發電量與儲能系統荷電狀態，對功率輸出進行組合與劃分，建立規則並進行切換控制；模糊規則(Fuzzy Rule-based)的策略方法(Balachandran *et al.*, 2018)，針對微電網系的多自由度與非線性之特性，結合模糊控制的優勢進行模糊隸屬函數建立後，進行能量分配管理。基於規則的策略易於執行，計算量相對較低，但於微電網實際運行情況之適應性較低。最佳化(Optimization)的能源管理策略，使用分析或數值運算定義不同功率需求成本函數(Cost Function)，同時結合不同系統

的限制條件進行誤差最小化之設計，實現控制目標的優化(Bianchi *et al.*, 2011)，最佳化方法之策略可分為兩類，分別為全域最佳化的(Global Optimization)與即時最佳化(Real-time Optimization)的策略方法。全域最佳化利用穩態數據於特定運行狀況下進行能源調度最佳化的控制；即時最佳化則基於微電網當前狀態進行即時的運算控制。

微電網能源調度是實現能源供需平衡且確保微電網電力品質的關鍵因素之一。隨著能源架構轉型，許多學者和研究人員提出不同的能源調度演算法，以滿足不同場域之微電網之特性及需求。Saif *et al.* (2013)提出了一種基於仿真的粒子群優化(Particle Swarm Optimization, PSO)結合最佳動態功率流，為微電網系統提供最佳容量配置，並增加PSO演算法的目標函數，降低微電網運營成本；Askarzadeh (2017)使用遺傳(基因)演算法(Genetic Algorithm, GA)提升能源管理系統的演算法精確度，提供微電網最佳排程；Luo *et al.* (2020)改良蝙蝠演算法(Bat Algorithm, Bat)，考慮太陽能發電系統於



資料來源：本研究彙整。

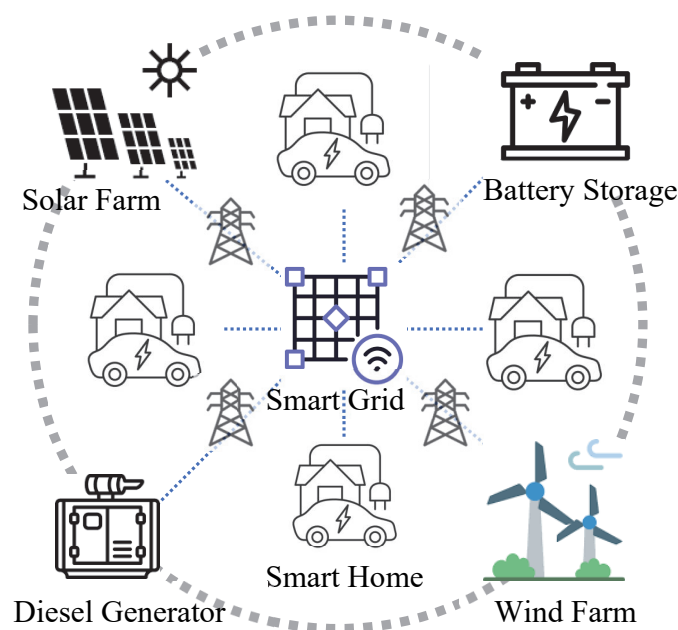
圖4 能源管理系統演算法分類圖

不同季節日照程度不同，於演算法系統中進行修正以獲得更精確之能源調度，相比PSO與GA演算法，Bat運算時間較為快速；Aghdam *et al.* (2020)使用機會約束編程(Chance Constraints Programming)針對複數微電網系統進行提前排程，並考慮電池劣化的因素。目前微電網系統研究致力於模型優化及能源調度策略的改進上，本研究將建構有效的能源調度模型，運用全域最佳化之人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)演算法將再生能源、儲能設備、備援電力等分散式能源整合，模擬最佳的能源調度與排程策略。人工蜂群演算法的排程系統具備快速收斂，即時和全域搜索、開採能力強，能快速適應負載需求響應變化，即時動態調整能源調度，適合變異性高的再生能源和電網負載。其次，其具有較強的穩定性，在面對突發事件或環境變化時，能快速調整能源調度，維持排程系統的連續性和穩定性。

臺灣在科技進步和綠能崛起下，傳統的集中式發電，也逐步轉向分散式發電、儲能、微電網整合模式。然而，儲能場域及微電網並非

輕易發展之項目，其中涉及不同的技術例如儲能元件、電子電力、智慧電網、系統控制及能源調度等，除此之外，還須對微電網涵蓋之範圍進行評估例如電網的穩定性、效能及能源效率等。微電網結合眾多分散式能源，其發電功率多寡及發電時段皆不相同，且無法及時供應電網負載，需搭配儲能元件進行功率調節，因此，如何有效調節分散式能源與負載之間的供需均衡成為重要課題。

本研究建立一套虛擬微電網能源管理模型包含全鈦液流電池之儲能元件、柴油發電機、太陽能發電廠、風力發電廠及社區負載功能模組化並組織架構，建立各模組之功能，例如全鈦液流電池模組可吸收再生能源產生的瞬時功率，且於用電尖峰時段提供電網額外功率；再生能源模組須能響應不同的環境下再生能源的發電功率；社區負載根據時間劃分不同的能源需求，使微電網系統模擬更趨近於實際，如圖5。完成模擬模型後，利用台灣電力公司提供的電網負載、風力及太陽能發電等資料匯入微電網系統，使分散式能源追蹤此資料進行發電，



資料來源：本研究彙整。

圖5 微電網架構示意圖

探索電網系統能量分配之最佳化，提出一套電網能源調度策略。接著，應用人工蜂群演算法進行能源調度，以減少碳排放作為能源調度的首要目標，透過預測負載的功率及分散式再生能源的功率，求得不同時段之電網需求，並制訂完整的儲能、釋能最佳化調度策略。最後，利用軟體Matlab設計能源管理策略，建立微電網模型進行模擬實驗，研究中模擬不同環境下分散式電源的發電特性，聚焦探索直流微電網結合分散式能源及負載功率調度，以微電網在各種負載情境下實現供需平衡，同時極最大化能源效率並將能源調度損失和二氧化碳排放量降至最低。

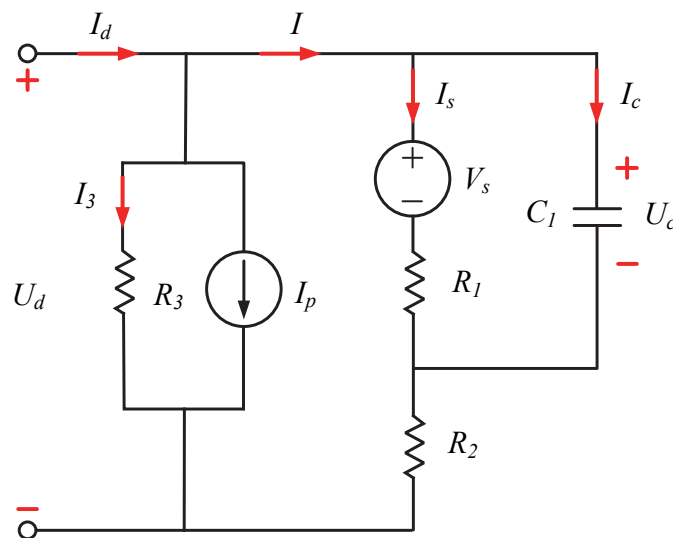
2. 微電網能源管理系統

2.1 全釩液流電池等效電路模型

全釩液流電池(Vanadium Redox Battery, VRB)的電解槽可根據應用規模彈性設計，亦可透過串並聯的方式調整，範圍可從數千瓦至數百萬瓦，分別為不同的使用環境提供新選擇。

全釩液流電池反應方式透過金屬離子的價數變換釋放電子，反應過程不會消耗金屬元素，因此使用壽命長，維護成本低，且作為能量儲存載具之電解液可重複使用，減少儲能設備運作產生的廢棄物。電池模型為電池動態特性與靜態特性的表徵(Zhang *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2022)，由於電池的充放電為複雜的化學反應，過程中存在濃差極化與電化學極化，此兩種極化反應導致電池充放電時電池參數的變動。本研究全釩液流電池等效電路模型採用電阻、電容、電壓源及電流源等元件表徵電池的動態與靜態反應(Chahwan *et al.*, 2007)，如圖6所示。其中 U_d 為液流電池的端電壓； I_d 為液流電池的充放電電流， V_s 為液流電池的開路電壓，其電壓會受電池荷電狀態(State of Charge, SOC)影響，故採電壓源的方式呈現； I_p 為泵損，採恆流電流源表示； R_3 為循環泵的寄生損耗； R_1, R_2 為液流電池反應時的所有電池內部等效阻抗，包含傳質阻抗、隔膜阻抗、電解液阻抗、電極阻抗和雙極板阻抗等， C_1 為電極電容，用來模擬電池的動態特性。

根據柯西荷夫電路定律(Kirchhoff Circuit



資料來源：Zhang *et al.*, 2009.

圖6 全釩液流電池等效電路模型

Laws)，可得知太陽能輸出電流 I ，表示為式(1)。

$$\begin{cases} U_d = U_c + I \times R_2 \\ I_d = I_3 + I_p + I \\ I_f = \frac{U_d}{R_3} \\ I = I_s + I_c \\ I_c = C_1 \frac{dU_c}{dt} \\ U_c = V_s + I_s \times R_1 \end{cases} \quad (1)$$

電池SOC可根據式(2)計算得出。

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_N} \int_0^t \eta I_d dt \quad (2)$$

SOC_0 為電池初始電容量； C_N 為電池額定容量， η 為庫倫效率(η 趨近於1)，由能斯特方程式(Nernst Equation)得知式(3)。

$$E = E_0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{SOC}{1-SOC} \quad (3)$$

式(3)中， E 為電池電壓； E_0 為標準電極電壓，為不同電解液濃度下電壓變化， R 為氣體常數； T 為環境溫度； F 為法拉第常數，且液流電池由 N 個單電芯組成如式(4)。

$$V_s = E \times N \quad (4)$$

由式(1)、(2)、(3)可得出液流電池狀態空間方程式為式(5)。

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = -\frac{R_1+R_2+R_3}{R_1(R_2+R_3)C_1} \times U_c + \frac{R}{(R_2+R_3)C_1} \times (I_d - I_p) + \frac{N}{R_1C_1} \times \left(E_0 + \frac{2RT}{F} \ln \frac{SOC}{1-SOC} \right) \\ \frac{dSOC}{dt} = \frac{1}{C_N} \times I_d \end{cases} \quad (5)$$

由式(1)推導模型的最終輸出方程如式(6)。

$$U_d = \frac{R_3}{R_2+R_3} \times U_c + \frac{R_2R_3}{R_2+R_3} \times (I_d - I_p) \quad (6)$$

電池模型參數 R_1 、 R_2 、 R_3 及 C_1 無法透過感測器量測，且其值會隨著SOC變化而改變，因此本研究採用遞歸最小平方方法(Recursive Least Square, RLS)的方式估電池模型參數。

遞歸最小平方方法透過前一時刻的估計值加上修正項求得，令

$$\lambda = \frac{R_1+R_2+R_3}{R_1(R_2+R_3)C_1} \quad (7)$$

式(5)、(6)進行推導轉換，可得式(8)、

(9)。

$$\begin{cases} U_c(s) = -\frac{1}{s+\lambda} \times \left\{ \frac{R}{(R_2+R_3)C_1} \times [I_d(s) - I_p(s)] + \frac{1}{R_1C_1} V_s(s) \right\} \\ SOC(s) = \frac{1}{C_N} \times I_d(s) \end{cases} \quad (8)$$

$$U_d(s) = \frac{R_3}{R_2+R_3} \times U_c(s) + \frac{R_2R_3}{R_2+R_3} \times [I_d(s) - I_p(s)] \quad (9)$$

將式(8)代入式(9)中，可得液流電池模型如式(10)。

$$U_d(s) = \frac{R_3}{R_1+R_3} \times \left(\frac{R}{(R_1+R_3)C_1} \times \frac{1}{s+\lambda} + R_2 \right) [I_d(s) - I_p(s)] + \frac{R_3}{(R_1+R_3)R_1C_1} \times \frac{1}{s+\lambda} V_s(s) \quad (10)$$

2.2 太陽光電系統建模

太陽能電池為一種將輻射能轉換成電能的光電元件(Al-Ezzi and Ansari, 2022)，理想太陽能電池等效電路模型使用電流源、二極體、串聯電阻、並聯電阻表徵太陽能電池的特性，並可透過串聯數(N_s)及並聯數(N_p)提高系統電壓與輸出電流(Kumar and Singh, 2018)如圖7所示。此模型可以用於分析和設計太陽能電池系統，透過模型中的電壓和電流參數，可計算太陽能電池於不同操作條件下的功率輸出，並求得最大功率點處的效率。

太陽能電池輸出電流如式(11)所示：

$$I_{Array} = N_p I_L - N_p I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V_{Array} + \left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_s I_{Array}}{A \cdot N_s V_T} \right] - 1 \right\} - \left[\left(\frac{N_p}{N_s} \right) \frac{V_{Array}}{R_{sh}} + \frac{R_s}{R_{sh}} \cdot I_{Array} \right] \quad (11)$$

其中 V_T 可由式(12)表示。

$$V_T = \frac{N_s k T}{q} \quad (12)$$

究假設已取得微電網未來一天的負載及分散式能源發電量等資料，其關係如式(17)所示。

$$P_{Load}(t) = P_{Pv}(t) + P_{Wind}(t) + P_{Diesel}(t) \quad (17)$$

其中 $P_{Load}(t)$ 為電網功率需求； $P_{Pv}(t)$ 為太陽能發電功率； $P_{Wind}(t)$ 為風能的發電功率； $P_{Diesel}(t)$ 柴油發電機的發電量。在微電網系統中加入儲能系統，利用已知的電網資料，透過人工蜂群演算法進行儲能設備能源調度排程，不同時段的儲能系統功率負載可由式(18)表示。

$$P_{VRB}(t) = P_{load}(t) - [P_{Pv}(t) + P_{Wind}(t) + P_{Diesel}(t)] \quad (18)$$

其中 $P_{VRB}(t)$ 為儲能系統的功率調度，若功率為負值，表示儲能系統此時於充電狀態，若為正值，表示儲能系統此時於放電狀態。本文資料來源使用台灣電力調度中心公布的用電總負載及再生能源發電量作為微電網一日運轉的特性曲線，電網負載通常可分為尖峰時段、離峰時段及半尖峰時段。

2.5 功率搬運方法

能源調度的主要目標為確保電力系統的穩定運行，滿足用戶對電力的需求，透過負載預測及儲能系統管理用電需求，提高能源供應的靈活性並降低尖峰時段的負載壓力，平穩發電廠的輸出功率。本研究使用面積法將尖峰時段的峰值功率面積 A_p ，離峰時段的谷值功率面積 A_v ，若要透過儲能系統將尖載發電功率轉移至低載處，需同時考慮儲能系統的效率，如式(19)所示。 $P_{peak,ave}$ 為尖峰時段的平均功率， $P_{valley,ave}$ 為離峰時段的平均功率。

$$\eta = \frac{A_p}{A_v} \quad (19)$$

其中 η 為儲能系統效率。

電網負載為上下震盪的曲線，無法透過時間的方式準確分割尖峰負載及離峰負載，因此

將電網資料透過程式依小到大重新排序，獲得一條較為平緩上升的負載曲線，將求和公式帶入式後可得式(20)。當 $t=t_x$ ，此時 $P_{ave} = P_{rearrange}$ ，可得式(21)，經移項整理後可得式(22)，求得此負載曲線(t_x, P_{ave})。

$$\eta = \frac{\sum_{t=t_x}^{t_{end}} P_{rearrange} - P_{ave}}{\sum_{t=0}^{t_x} (P_{ave} - P_{rearrange})} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{\sum_{t=t_x}^{t_{end}} P_{rearrange} - (t_{end} - t_x)P_{ave}}{t_x P_{ave} - \sum_{t=0}^{t_x} P_{rearrange}} \quad (21)$$

$$P_{ave} = \frac{\sum_{t=t_x}^{t_{end}} P_{rearrange} + \eta \sum_{t=0}^{t_x} P_{rearrange}}{t_{end} + (\eta - 1)t_x} \quad (22)$$

2.6 儲能系統限制

微電網功率調度過程中，需考慮儲能系統荷電狀態(State of Charge, SOC)上下限，確保儲能系統操作於安全區間，避免超出系統的最大荷電容量或過放電導致電池永久性的損害。SOC為電池評估當下電量的指標，可廣泛定義為剩餘容量相對於額定容量之比率，凡是以電池作為提供或儲存能量者，都需要仰賴SOC參數作為總電量指標(Andrea, 2010)。本研究使用的全鈦液流電池電壓特性約莫於SOC20%~SOC80%時，電壓曲線呈現近似於線性，此範圍是電池電壓相對穩定的區間。

$$SOC_{max} \geq SOC_{VRB} \geq SOC_{min} \quad (23)$$

3. 最佳化演算法

3.1 人工蜂群演算法

本研究使用人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)演算法計算再生能源、儲能設備及電網負載的能源排程策略(Karaboga and Akay, 2009;

Ullah *et al.*, 2022), 為一種全域最佳化之演算法, 啟發於蜜蜂採集蜂蜜時的智能分工行為如圖8所示。演算法的每個搜索週期包含三個步驟, 首先將雇傭蜂送到食物源並評估它們的花蜜量, 並記錄食物源的花蜜資料, 接著由觀察蜂評估食物源的花蜜量並選擇要前往的食物源, 最後將觀察蜂送至隨機的新食物來源。演算法初始階段, 雇傭蜂隨機選擇食物來源並記錄花蜜量, 並傳遞食物源的花蜜信息給觀察蜂後, 雇傭蜂再次前往上一周期自己訪問過的食物源, 並於附近選擇新的食物源記錄花蜜量, 重複上一周期之步驟, 若新的食物源花蜜量優於舊有的食物源, 蜜蜂則會更新的食物源位置; 若新的食物源花蜜量劣於舊有的食物源, 蜜蜂則保留舊有食物源位置。接著, 觀察蜂根據雇傭蜂的花蜜信息選擇食物源, 花蜜量越高, 觀察蜂選擇該食物源的機率越高。最後, 當一個舊有的食物源被新食物源取代後, 偵察蜂會隨機確定一個新的食物源取代被遺棄的食物源。

- (1) 食物源(Food Sources): 每個食物源代表該問題的潛在解決方案, 同時存在一組相關之目標函數。
- (2) 花蜜量(Fitness): 判斷此食物源的優劣指

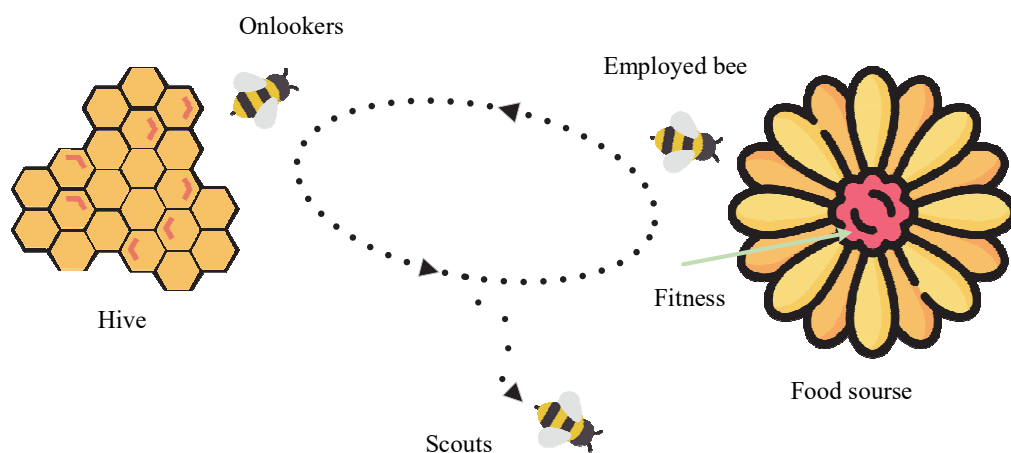
標, 為目標函數乘上不同權重值求得。

- (3) 雇傭蜂(Employed bees): 負責探索食物源, 紀錄食物源之距離及方向, 並依照目前所在的食物源位置周圍進行搜索。
- (4) 觀察蜂(Onlooker bee): 等待雇傭蜂之花蜜量資訊, 並決定前往哪個食物源進行探索, 被選過的食物源有更高的機率被其他觀察蜂選中。
- (5) 偵查蜂(Scouts): 負責搜索新的食物源, 避免演算法僅求得局部最佳解。

程式初始化後隨機分布所有可能的解, 並由偵查蜂隨機選取解前往如圖9所示, 其中 R 為隨機分布解的邊界值。接著於此處變雇傭蜂, 計算解的優劣及選取機率的高低, 如圖10所示。

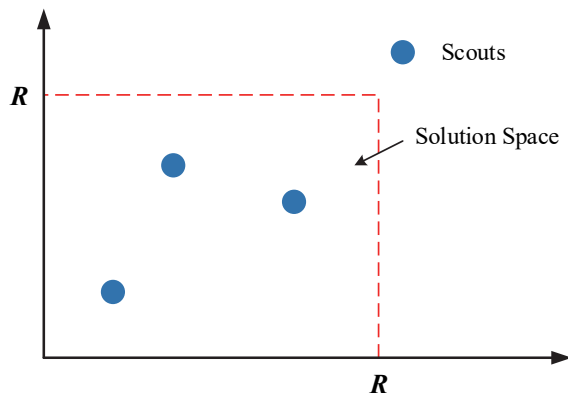
3.2 訂定目標函數

ABC演算法將食物源的位置作為最佳化問題的潛在解決方案, 食物源的花蜜量則為此解的優劣程度, 因此需要定義一套評估方式, 透過演算法將所有因素納入考量, 並乘上不同的權重值, 判斷儲能設備的排程的優劣及是否符合此微電網之需求。首先須定義目標參數, 若目標參數的數量為 D , 解決方案則為 D 維向量,



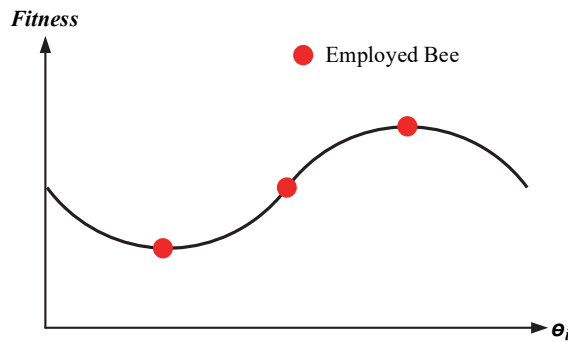
資料來源: 本研究彙整。

圖8 ABC演算法示意圖



資料來源：Ullah *et al.*, 2022.

圖9 偵查蜂隨機選取可能解



資料來源：Ullah *et al.*, 2022.

圖10 計算解的優劣及機率

本研究定義以下數個評估指標。

- (1) 能源調度損失：電能於儲存或轉換過程中受到阻抗、電池自放電及能量轉換效率等影響，造成能量的損失，故設立此目標函數以評估能源調度的經濟考量。

$$Loss = \sum P_{Dispatch}(t) - \sum P_{Load}(t) \quad (24)$$

- (2) 功率曲線震盪範圍：計算調度後功率曲線波峰及波谷之間的差異。

$$P_{oscillation} = \max(P_{Dispatch}(t)) - \min(P_{Dispatch}(t)) \quad (25)$$

- (3) 能源調度導致柴油發電機提高的發電量：再生能源為不可控的分散式能源，因此進行能源調度時，於離峰時段提高柴油發電機的發電量對儲能系統充電。

$$P_{additional} = \sum P_{Deisel, dispatch}(t) - \sum P_{Deisel}(t) \quad (26)$$

- (4) 額外碳排放量計算：採政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次評估報告公布的柴油發電機的溫室氣體排放當量及柴油發電機碳排放係數如表1及表2所示。

$$CO_2e = L \times (\rho_{CO_2} \times GWP_{CO_2} + \rho_{CH_4} \times GWP_{CH_4} + \rho_{N_2O} \times GWP_{N_2O}) \quad (27)$$

- (5) 儲能系統平均電量：微電網系統由不同分散式能源組成，當分散式能源故障時，電池是否有能力補償電力供應缺口。

$$SOC_{ave} = \frac{\sum SOC(t)}{T} \quad (28)$$

表1 碳排放當量係數

| Greenhouse Gases | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| GWP | 1 | 28 | 265 |

資料來源：IPPC.

表2 柴油發電機碳排放當量

| Fuel | Emission Factor | | | Unit | Emission Equivalent (CO ₂ e) |
|--------|-----------------|-----------------|------------------|------|---|
| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | | |
| Diesel | 2.606 | 0.000106 | 0.000021 | kg/L | 0.0261 |

資料來源：IPPC.

3.3 人工蜂群演算法能源調度模型

將上述定義的目標函數嵌入人工蜂群演算法，作為微電網能源調度的評估指標，乘上設定的權重值並除以基底值，計算該解的優劣。

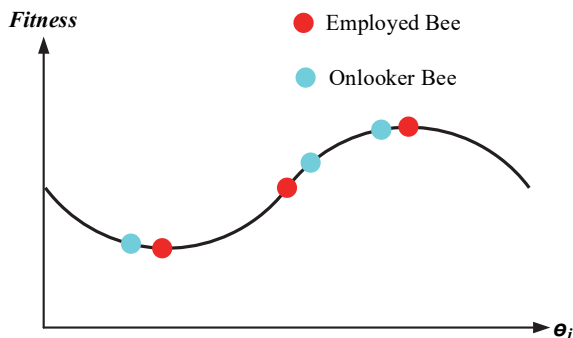
$$Fitness(\theta_j) = \sum_i^6 W_i \frac{E_{i,j}}{B_{i,j}} \quad (29)$$

$$P_j = \frac{Fitness(\theta_j)}{\sum_{k=1}^{N_b} Fitness(\theta_k)} \quad (30)$$

式中 θ_j 為第 j 個雇傭蜂的位置； W_i 為第 i 個權重值設定； $E_{i,j}$ 為第 j 個雇傭蜂位置中第 i 個評估指標； $B_{i,j}$ 為第 j 個雇傭蜂位置中第 i 個基底值， P_j 為第 j 個雇傭蜂被選取的機率； N_b 為雇傭蜂的數量。

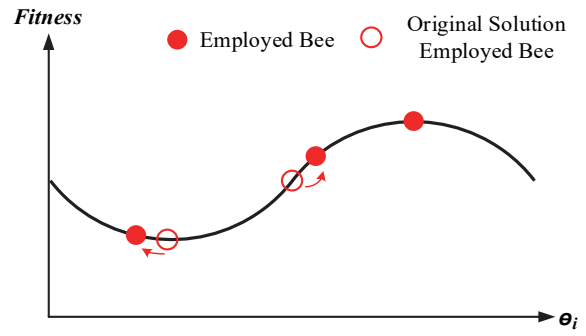
雇傭蜂計算解的優劣和被選取的機率後，觀察蜂根據機率大小決定前往哪個雇傭蜂的位置，並隨機搜索該解鄰近區域附近的新解如圖 11 所示。假設此處蜂群演算法目標為搜索最大值，若觀察蜂新搜索的新解優於舊有的解，雇傭蜂的位置便會更新至新解，且並將舊有解的位置紀錄至資料庫，使下次成搜索時忽略淘汰的解，避免重複搜索，如圖 12 所示。

人工蜂群演算法流程如圖 13 所示，首先讀取能源調度的資料並於邊界範圍內隨機分布可能解，由不同種類的蜜蜂搜索、計算及評估解的優劣，較佳的解會取代舊有的解，被取代的解則會被記錄至資料庫，並於下次搜索時避開



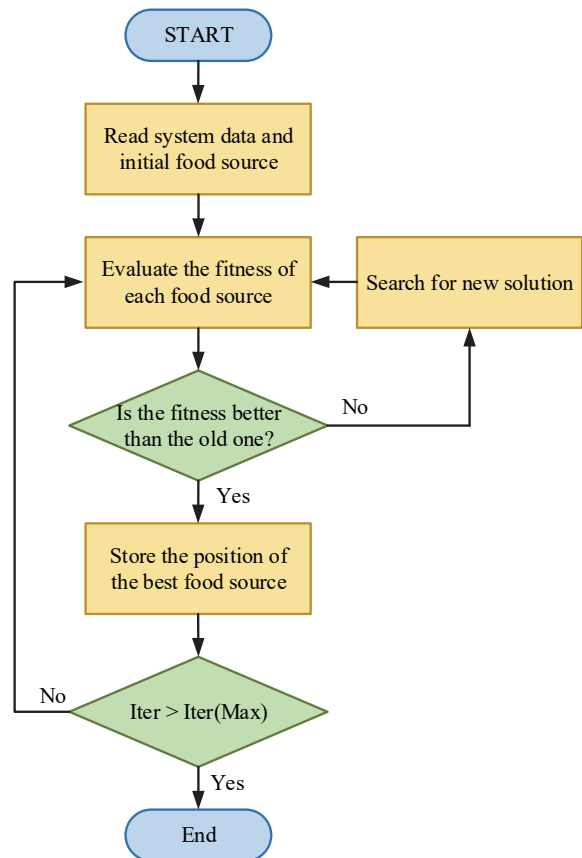
資料來源：本研究彙整。

圖 11 觀察蜂搜索雇傭蜂鄰近區域的解



資料來源：本研究彙整。

圖 12 雇傭蜂更新解的位置



資料來源：本研究彙整。

圖 13 人工蜂群演算法流程圖

此位置，並重複以上的流程直到滿足搜索次數或符合誤差條件。

4. 微電網系統規格及模擬說明

本研究微電網系統規格參考日本京丹後市之示範場域，此場域之分散式能源為熔融碳酸鹽燃料電池 (Molten carbonate fuel cell,

MCFC)、太陽能發電系統、風力發電系統及柴油發電機，為符合本研究建模項目，將分散式能源MCFC移除，替換為VRB。並提高風力發電及太陽能發電系統的規格，以補償不足的發電功率，本文微電網系統規格如表3所示。

表3 微電網系統規格

| Entity | Rating |
|-------------------|---------|
| Gas Engine | 2MW |
| PV | 750 kW |
| Wind | 1 MW |
| Battery | 500 kW |
| Load Demand (Max) | 2.25 MW |

資料來源：本研究彙整。

本文資料擷取時間範圍自2022年6月1日0時0分起至2023年5月31日0時0分止，資料每隔5秒擷取一次，每次最佳化模擬運算需耗時10分鐘求得最佳解，微電網每15分鐘進行一次能源調度模擬。模擬由外在微電網負載曲線及環境變化開始，風速變化、日照條件及負載曲線變化參考台灣電力公司公布的電力資訊如圖14所示。當分散式能源模型接收外在環境變化後，輸出當前狀態的發電功率至電網，與此同時，負載模型亦根據負載需求曲線輸出對應功率需求。能源調度系統模型接收儲能系統、負載，再生能源等資訊後進行系統控制及供需均

衡管理，柴油發電機發電量為負載扣除再生能源發電後不足之功率，若無儲能系統進行能源調度，柴油發電機功率輸出變動率相對高，此現象不利於柴油發電機之控制，間接導致微電網系統電力品質下降，且劇烈變速運轉造成柴油發電機受損，影響系統的使用年限。利用儲能系統進行能源調度後，柴油發電機將於低負載時提高發電量，此時微電網盈餘的功率將由儲能系統吸收，作為備用電力存放；當負載需求較高時，柴油發電機輸出功率不隨著負載變動，當功率輸出達到最大值後，系統輸出將穩定於此極值，不足的功率將由儲能系統補償。進行能源調度時，優先由再生能源對儲能系統充電，由於太陽能的發電時段位於電網負載尖峰，可直接供給電網電力以減少柴油發電機的負擔，調度需求相對較低，因此本研究將風力發電作為電力調度的首選，若風力發電不足以負擔調度能量，則由太陽能發電系統進行補償，如若此二種再生能源皆不足以負擔調度之功率，再由柴油發電機對儲能系統充電。

微電網能源調度過程中，調度功率限制及SOC上下限皆為保護儲能系統的機制，當功率吸收或釋放大小超過此範圍，可能造成系統溫度上升，周邊輔助設備損壞，直接影響儲能場域的安全及使用壽命，除此之外，過高的充電功率會導致能量效率下降，使能源調度的損失增加，發電機需要再提高發電量補償，進而提

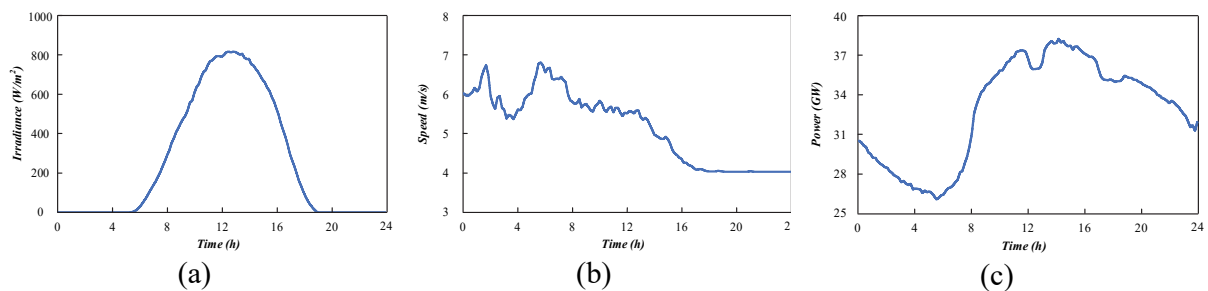


圖14 環境變化及電力資訊(a)日照曲線變化(b)風速曲線變化(c)負載曲線變化(資料來源：台灣電力調度中心)

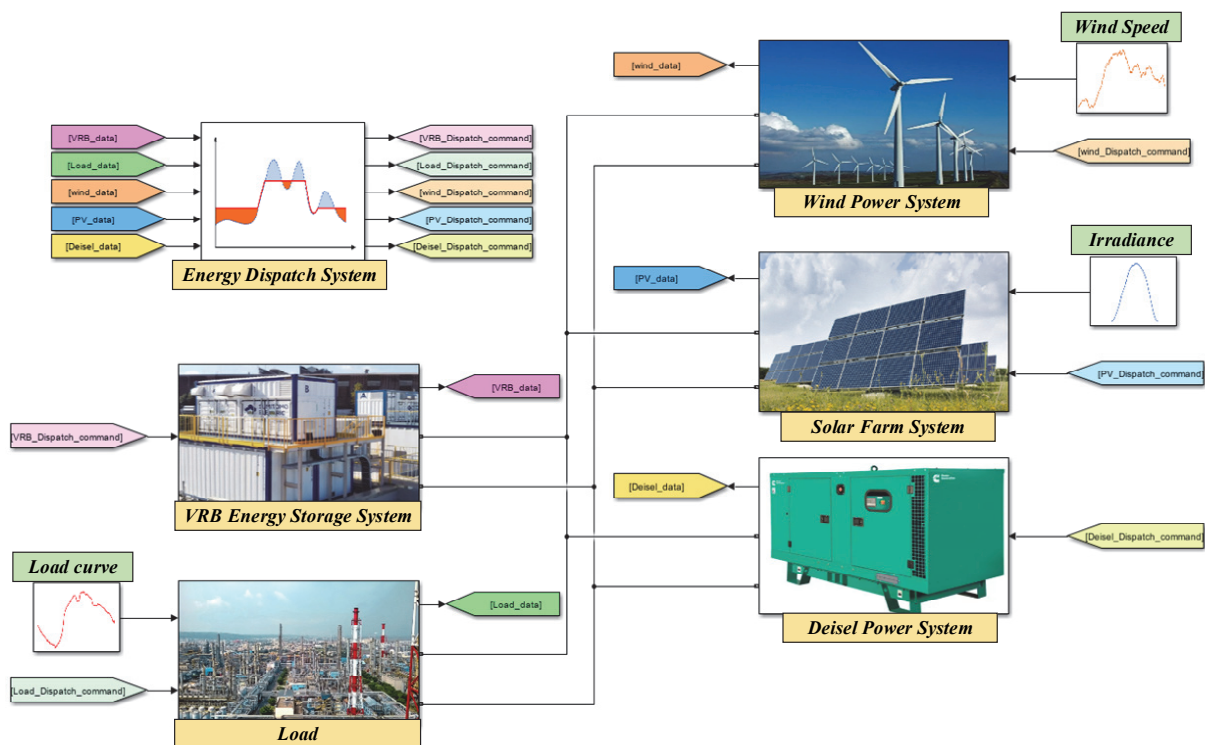
高系統整體的碳排放。根據VRB的電壓特性曲線，可得知電壓與SOC狀態呈現線性關係的區間，於此區間內，儲能系統狀態相對穩定，能源備載及調度餘裕皆為較好的狀態，使儲能系統充放電功率與微電網之需求間取得平衡。本研究建立之微電網系統如圖15所示。

5. 模擬結果與探討

依據人工蜂群演算法優化之目標函數，本文將定義的兩組權重值進行微電網調度模擬。第一組權重參數設定皆相同，所有目標函數對電網的能源調度影響程度相同，但仍需操作於儲能系統的安全工作區間，例如儲能系統的SOC上限、最大功率輸出、輸入等條件。*Weight1*模擬儲能系統最大充放電功率限制，且SOC需控制於20%~80%，可觀察系統功率曲線震盪與削峰填谷的效果；第二組權重目標為減

少柴油發電機的碳排放，因此提高與碳排放相關之目標函數，例如能量損失，額外發電功率及碳排放當量。*Weight2*是根據額外碳排目標函數所設定，故該權重值與減排目標函數進行敏感度分析，而功率曲線震盪在本權重計算下，亦符合台電再生能源發電平滑化震盪範圍規範。模擬微電網調度目標函數之權重值，如表4和表5所示。

由於臺灣夏季氣溫較高，陽光曝曬時間較長，需要大量製冷機調節室內溫度，導致電網負載曲線普遍高於冬季，然而，此現象利於太陽能發電，由圖中可觀察得太陽能發電系統發電時段及發電量皆優於冬季；冬季負載曲線通常低於夏季，且因地理位置使冬季受到強烈的東北季風吹拂，此現象利於風力發電，其總發電量約莫夏季的2~5倍。使用夏季與冬季的負載及再生能源發電功率曲線進行微電網能源調度之模擬，如圖16及圖17所示。



資料來源：本研究彙整。

圖15 Matlab/Simulink介面之微電網能源管理系統模型

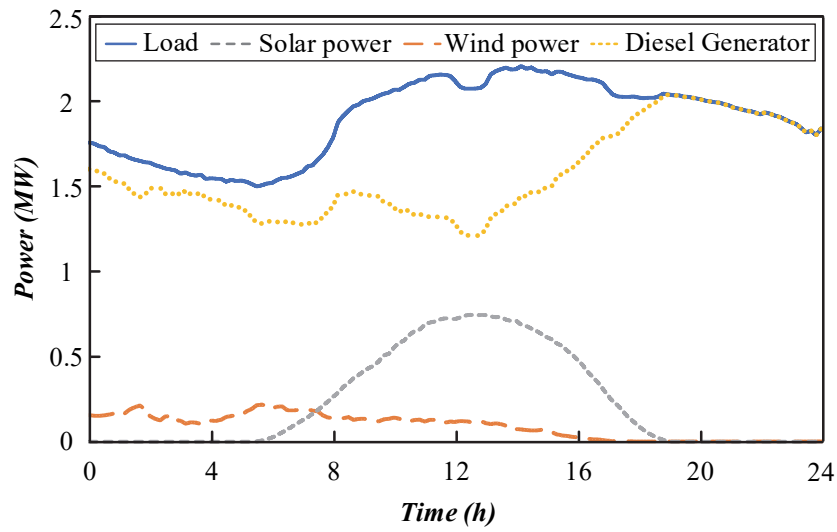


圖16 微電網再生能源與負載曲線(夏季)

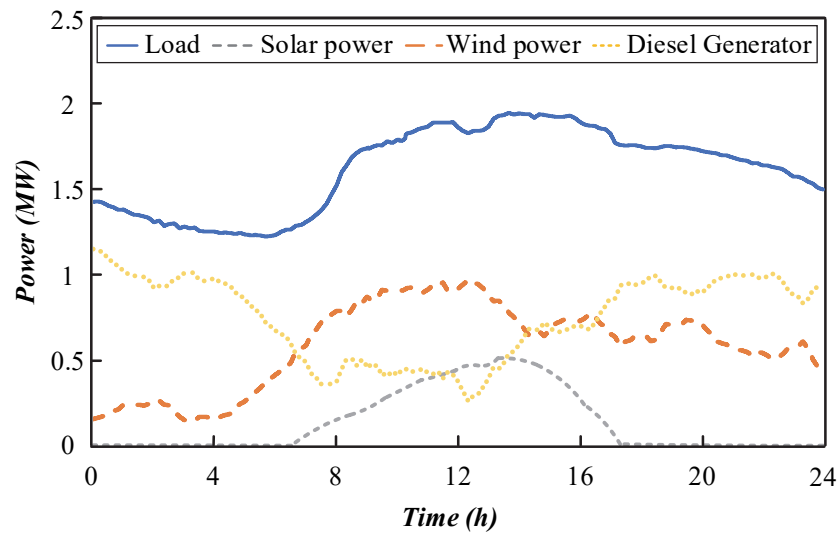


圖17 微電網再生能源與負載曲線(冬季)

表4 夏季不同權重值設定之模擬結果與評估結果百分比

| Index | Non dispatch | Weight1 | Summer Weight1 | Weight2 | Summer Weight2 |
|-------------------|--------------------------|---------|-----------------------------|---------|-----------------------------|
| Loss | 0 (-) | 1 | 567.2 MJ+08 J (-) | 2 | 295.0 MJ+08 J (-) |
| $P_{oscillation}$ | 82.91 KW+05 W (100%) | 1 | 44.18 KW+05 W (53.3%) | 1 | 55.18 KW+05 W (66.6%) |
| $P_{additional}$ | 0 (-) | 1 | 28.36 KW+09 W (-) | 2 | 14.75 KW+09 W (47.99%) |
| CO_2e | 24.389 T+04 kg (100%) | 1 | 24.490 T+04 kg (100.41%) | 5 | 24.441 T+04 kg (100.21%) |
| SO_{Cave} | 0 | 1 | 55.58% | 1 | 42.85% |

表5 冬季不同權重值設定之模擬結果與評估結果百分比

| <i>Index</i> | <i>Non dispatch</i> | <i>Weight1</i> | <i>Summer Weight1</i> | <i>Weight2</i> | <i>Summer Weight2</i> |
|--------------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|
| <i>Loss</i> | 0 (-) | 1 | 526.9 MJ+08 J (-) | 2 | 209.8 MJ+08 J (-) |
| <i>P_{oscillation}</i> | 81.48 KW+05 W (100%) | 1 | 34.87 KW+05 W (42.79%) | 1 | 46.54 KW+05 W (57.11%) |
| <i>P_{additional}</i> | 0 (-) | 1 | 26.35 KW+09 W (-) | 2 | 11.49 KW+09 W (56.39%) |
| <i>CO_{2e}</i> | 12.290 T+04 kg (100%) | 1 | 12.390 T+04 kg (100.81%) | 5 | 12.330 T+04 kg (100.35%) |
| <i>SO_{Cave}</i> | 0 | 1 | 53.45% | 1 | 49.266% |

5.1 夏季微電網模擬結果

表4總結夏季的微電網原始資料與能源調度模擬結果，當微電網不使用儲能系統進行能源調度時，分散式能源發電功率直接供給電網，不受到儲能系統效率之影響，故無調度損失產生，無須提高柴油發電機發電量進行補償，且因微電網系統尚未進行能源調度，柴油發電機需追蹤負載曲線變化，導致功率輸出震盪幅度較高。根據碳排放當量計算公式，此微電網運行一天產生的溫室氣體約莫為24.389公噸。*Weight1*模擬須符合儲能系統最大充放電功率限制，且SOC需控制於20%~80%，模擬結果可觀察得系統功率曲線震盪較低，削峰填谷的效果更顯著，但是，功率轉移過程需經過儲能系統，因此調度的功率越多，系統損耗越高，碳排放也相應提高。*Weight2*將減少能源調度產生的額外碳排放作為主要目標，因此提高相關目標函數之權重值，模擬結果顯示，此權重值設定可有效減少碳排放，約莫減少48%的額外碳排放，卻也減少微電網功率振幅抑制效果，與*Weight1*相比上升13.3個百分比。

5.1.1 *Weight 1*

圖18-21為夏季微電網能源調度*Weight 1*之模擬結果。

5.1.2 *Weight 2*

圖22-25為夏季微電網能源調度*Weight 2*之模擬結果。

5.2 冬季微電網模擬

表5總結冬季的微電網原始資料與能源調度模擬結果，當微電網不進行能源調度，柴油發電機功率曲線震幅明顯高於*Weight1*及*Weight2*之模擬結果，發電機需經常變換功率運行以補償電網額外功率，使發電機控制不易並影響使用壽命。根據碳排放當量計算公式，此微電網運行一天產生的溫室氣體約莫為12.29公噸，相對低於夏季電網之碳排放。*Weight1*模擬符合儲能系統最大充放電功率限制，可觀察得系統功率曲線震盪為原始資料的42.79%，削峰填谷的效果顯著，但也相對提高系統損耗及碳排放。*Weight2*同樣將減少能源調度產生的額外碳排放作為主要目標，模擬結果顯示此權重值設定與 *Weight1*相比約莫減少56%的額外碳排放，卻也減少微電網功率振幅抑制效果，與*Weight1*相比上升14.32個百分比。

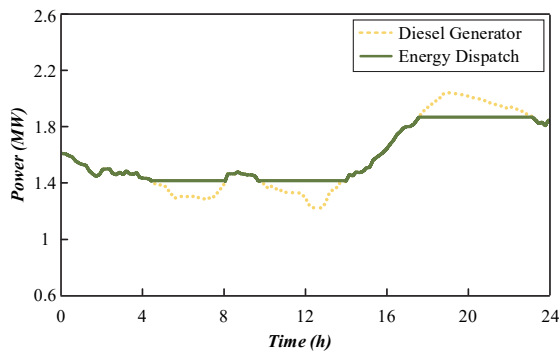


圖18 能源調度後的負載曲線與原功率曲線比較圖(夏季, *Weight 1*)

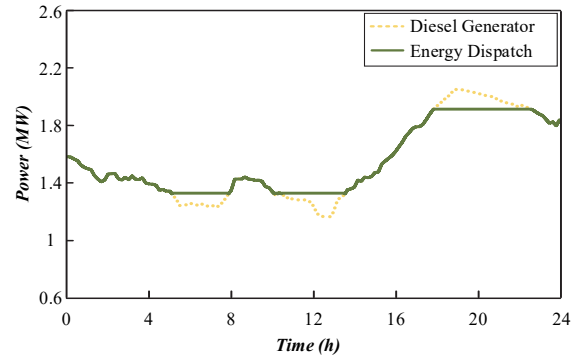


圖22 能源調度後的負載曲線與原功率曲線比較圖(*Weight 2*)

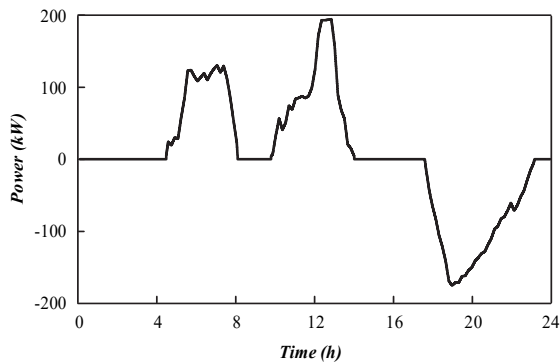


圖19 儲能系統功率吸收與釋放變化曲線(夏季, *Weight 1*)

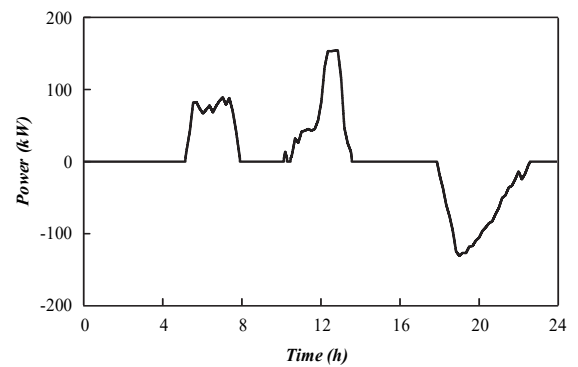


圖23 儲能系統功率吸收與釋放變化曲線(*Weight 2*)

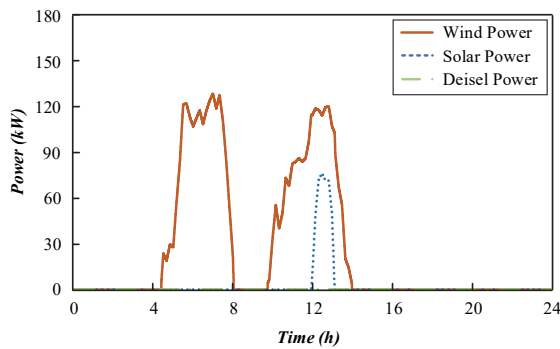


圖20 分散式能源為儲能系統充電之功率曲線(夏季, *Weight 1*)

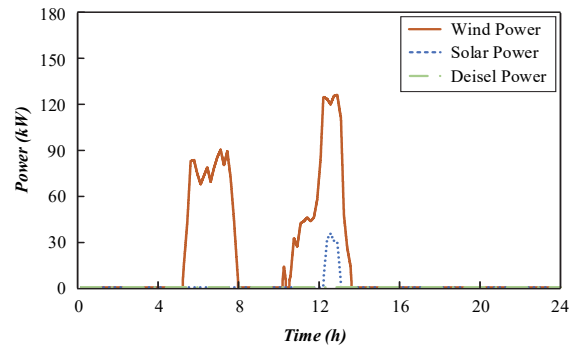


圖24 分散式能源為儲能系統充電之功率曲線(*Weight 2*)

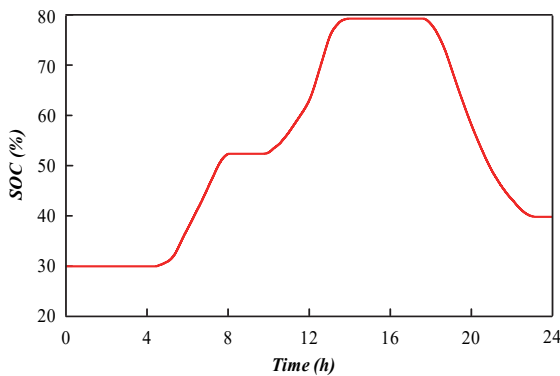


圖21 儲能系統SOC變化曲線(夏季, *Weight 1*)

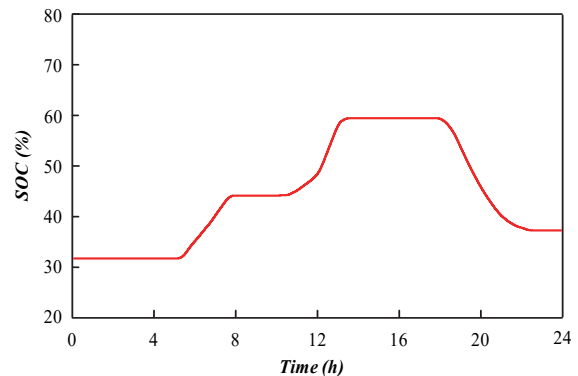


圖25 儲能系統SOC變化曲線(*Weight 2*)

5.2.1 Weight 1

圖26-29為冬季微電網能源調度Weight 1之模擬結果。

5.2.2 Weight 2

圖30-33為冬季微電網能源調度Weight 2之模擬結果。

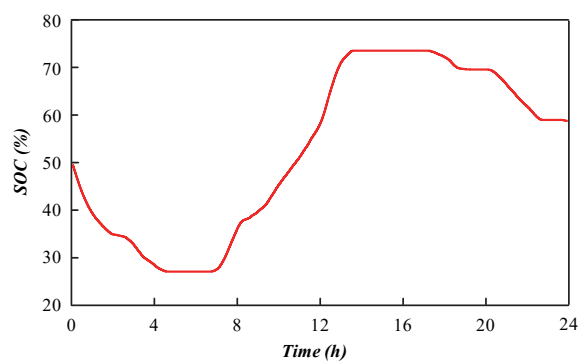


圖29 儲能系統SOC變化曲線(Weight 1)

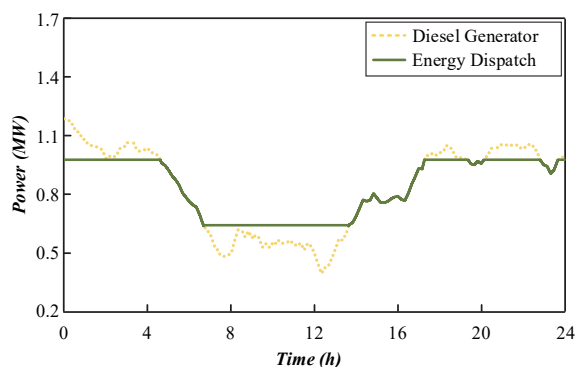


圖26 能源調度後的負載曲線與原功率曲線比較圖(Weight 1)

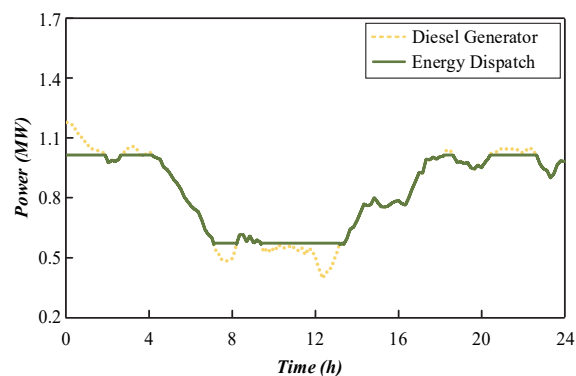


圖30 能源調度後的負載曲線與原功率曲線比較圖(Weight 2)

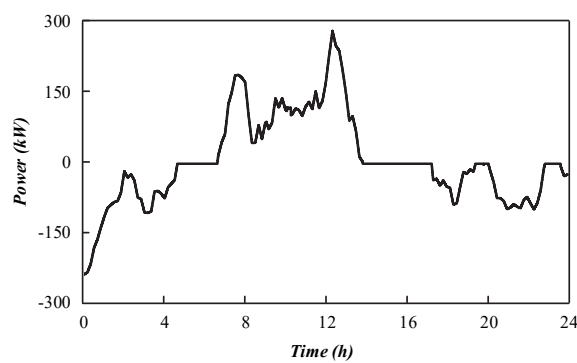


圖27 儲能系統功率吸收與釋放變化曲線(Weight 1)

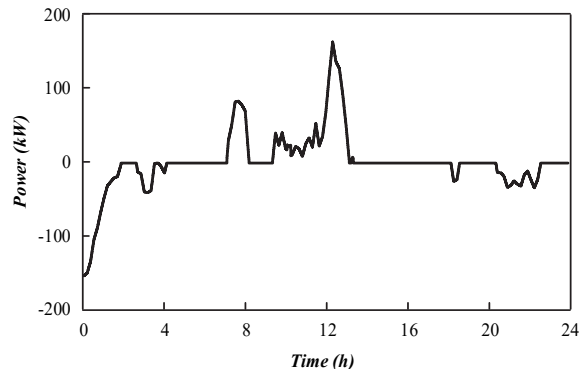


圖31 儲能系統功率吸收與釋放變化曲線(Weight 2)

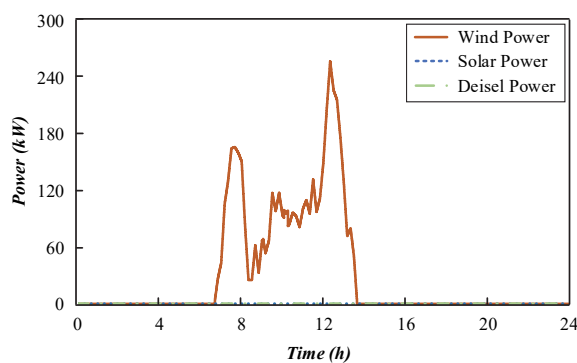


圖28 分散式能源為儲能系統充電之功率曲線(Weight 1)

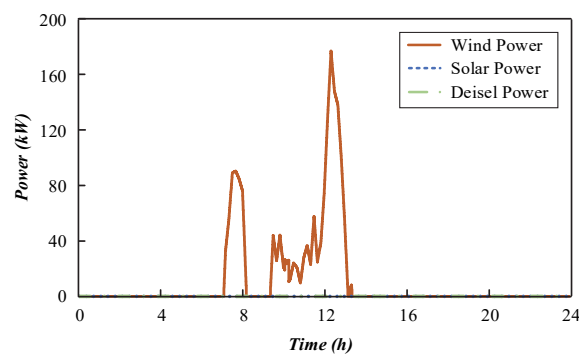


圖32 分散式能源為儲能系統充電之功率曲線(Weight 2)

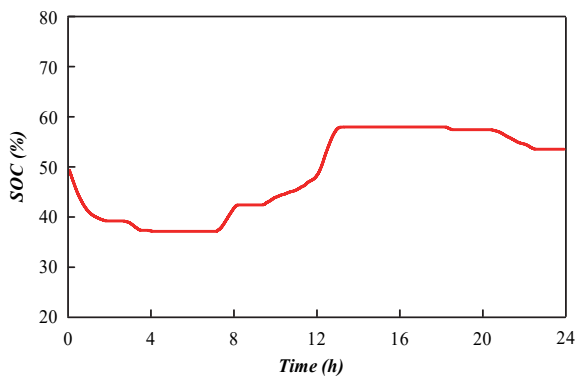


圖33 儲能系統SOC變化曲線(Weight 2)

6. 結論與討論

本研究建立一結合分散式能源及負載的微電網系統，選用全鈦液流電池作為儲能裝置，並針對此系統設計一套完整的能源調度策略。利用台灣電力公司提供的電網負載、風力及太陽能發電等資料匯入微電網系統，使分散式能源追蹤此資料進行發電，應用人工蜂群演算法進行能源調度，並於文中定義能源調度結果之評估指標，判斷此調度結果是否合理，使系統削峰填谷及能量損失中找出最佳化之結果，同時須滿足儲能系統充放電功率限制及SOC上下限之約束，確保功率調度於安全的操作區間。能源調度過程需考慮多項因素，包括分散式能源的發電情況、負載需求的變化、儲能系統的狀態、能源調度的損失及能源市場的價格等，本文將減少碳排放作為能源調度的首要目標，因此提高碳排放相關之目標函數的權重值，根據模擬結果顯示，此方式能讓能源調度過程中有效限制碳排放及能量損失，驗證本論文能源調度的合理性及正確性。能源調度系統為實現微電網高效運行和提高能源利用率的方式之一，透過符合此微電網系統的能源配置和智能化的調度策略，達成能源供應及負載需求之間的平衡，穩定電網電力品質並提高能源利用率，為電網電力發展的關鍵技術之一。

本論文已完成VRB與複合式再生能源場域建模及微電網能源調度演算法之研究，未來可改進及擴充的方向。(1)新增主電網進行併網模擬：本文使用微電網系統進行孤島運行模擬，並於此微電網涵蓋範圍的分散式能源及負載進行能源調度，然而於未來發展趨勢及實務應用上，微電網系統將會廣泛增設，並且與主電網進行併網連接。因此未來可於現有模型基礎上加入主電網及複數微電網系統，以整合更詳盡的模型並模擬不同電網狀態。(2)精進負載模型：本文將微電網的功率消耗視為一個大型負載，於實務上負載是由不同地區、場所及設備共同消耗的總量，未來可依照用電區域如住宅區、工業區及商業區等進行建模，使模型更精確詮釋微電網系統。(3)經濟參數納入調度目標：本研究已建立微電網模擬分析模型，待分析模組擴充後，可加入電力市場相關議題，進一步考量發電燃油價格、負載用電的電價、再生能源的躉購費率或轉直供費用、儲能系統之輔助服務價格等多種經濟參數，觀察電力現貨市場與長期合約市場的互動，以及價格波動對調度策略的影響等。(4)智慧型控制策略開發：本文已成功導入人工蜂群演算法進行最佳化能源調度，並將非再生能源產生的碳排放當量權重值提高，模擬結果著實改善整能源調度造成的損失及減少碳排放。但仍面臨運算負荷及須事先取得微電網系統參數，因此未來可發展更新穎之演算法，結合不同控制策略之優劣，給予輸入變數可即時性輸出對應結果，同時解決運算即時性與準確性的目標。

參考文獻

- Aghdam, F. H., N. T. Kalantari and B. Mohammadi-Ivatloo, 2020. A chance-constrained energy management in multi-

- microgrid systems considering degradation cost of energy storage elements. *Journal of Energy Storage*, 29, 101416. doi: 10.1016/j.est.2020.101416.
- Al-Bahrani, L. T., B. Horan, M. Seyedmahmoudian and A. Stojcevski, 2020. Dynamic economic emission dispatch with load demand management for the load demand of electric vehicles during crest shaving and valley filling in smart cities environment. *Energy*, 195, 116946. doi: 10.1016/j.energy.2020.116946.
- Al-Ezzi, A. S. and M. N. M. Ansari, 2022. Photovoltaic solar cells: a review. *Applied System Innovation*, 5(4), 67. doi: 10.3390/asi5040067.
- Andrea, D., 2010. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Artech house.
- Askarzadeh, A., 2017. A memory-based genetic algorithm for optimization of power generation in a microgrid. *IEEE transactions on sustainable energy*, 9(3), 1081-1089. doi: 10.1109/TSTE.2017.2765483.
- Balachandran, G., K. Nafeesa and K. V. Shihabudheen, 2018. Fuzzy Controller based Energy Management of Hybrid System. In 2018 4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT) (pp. 1-5). IEEE.
- Benti, N. E., T. A. Woldegiyorgis, C. A. Geffe, G. S. Gurmesa, M. D. Chaka and Y. S. Mekonnen, 2023. Overview of geothermal resources utilization in Ethiopia: Potentials, opportunities, and challenges. *Scientific African*, 19, e01562. doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01562.
- Bianchi, D., L. Rolando, L. Serrao, S. Onori, G. Rizzoni, N. Al-Khayat, T. M. Hsieh and P. Kang, 2011. Layered control strategies for hybrid electric vehicles based on optimal control. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 3(2), 191-217. doi: 10.1504/IJEHV.2011.042147.
- Chahwan, J., C. Abbey and G. Joos, 2007. VRB modelling for the study of output terminal voltages, internal losses and performance. In 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference (pp. 387-392). IEEE.
- Chen, Y. and H. Lin, 2022. Overview of the development of offshore wind power generation in China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102766. doi: 10.1016/j.seta.2022.102766.
- Choudhury, S. and G. K. Sahoo, 2024. A Critical Analysis of Different Power Quality Improvement Techniques in Microgrid. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 100520.
- Farhadi Gharibeh, H. and M. Farrokhifar, 2021. Online multi-level energy management strategy based on rule-based and optimization-based approaches for fuel cell hybrid electric vehicles. *Applied Sciences*, 11(9), 3849. doi: 10.1504/IJEHV.2011.042147.
- Fasoli, S., P. Cormio, R. Lauricella and M. Marchesini, 2021. First Oil & Gas Application of a Hybrid Power Plant Integrating: Solar PV-Energy Storage-Conventional Power Generation (GTG). In 2021 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe) (pp. 1-7). IEEE.
- Gourvenec, S., F. Sturt, E. Reid and F. Trigos, 2022. Global assessment of historical, current

- and forecast ocean energy infrastructure: Implications for marine space planning, sustainable design and end-of-engineered-life management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111794. doi: 10.1016/j.rser.2021.111794.
- Huang, Z. and A. Mu, 2021. Research and analysis of performance improvement of vanadium redox flow battery in microgrid: A technology review. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 14170-14193. doi: 10.1002/er.6716.
- Joshi, N. and A. Khandelwal, 2023. An Overview on Development & Prospects of Geothermal Power Plant in India. In *2023 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)* (pp. 1-4). IEEE.
- Karaboga, D. and B. Akay, 2009. A comparative study of artificial bee colony algorithm. *Applied mathematics and computation*, 214(1), 108-132. doi: 10.1016/j.amc.2009.03.090.
- Kirkels, A. F., 2012. Discursive shifts in energy from biomass: A 30 year European overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4105-4115. doi: 10.1016/j.rser.2012.03.037.
- Kumar, D., F. Zare and A. Ghosh, 2017. DC microgrid technology: system architectures, AC grid interfaces, grounding schemes, power quality, communication networks, applications, and standardizations aspects. *Ieee Access*, 5, 12230-12256. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2705914
- Kumar, J., Agarwal, A., & Agarwal, V. (2019). A review on overall control of DC microgrids. *Journal of energy storage*, 21, 113-138. doi: 10.1016/j.est.2018.11.013.
- Kumar, R. and S. K. Singh, 2018. Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution. *Energy Reports*, 4, 701-712. doi: 10.1016/j.egyr.2018.09.008.
- Lede, A. M. R., M. G. Molina, M. Martinez and P. E. Mercado, 2017. Microgrid architectures for distributed generation: A brief review. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)* (pp. 1-6). IEEE.
- Li, J., G. W. Foden, S. K. Chow and L. S. To, 2024. Integrating sustainable and energy-resilient strategies into emergency shelter design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 113968.
- Lin, T. L. and F. T. Cheng, 2022. Energy democracy and energy transition in Taiwan. *Energy Transition and Energy Democracy in East Asia*, 67.
- Luo, L., S. S. Abdulkareem, A. Rezvani, M. R. Miveh, S., Samad, N. Aljojo and M. Pazhoohesh, 2020. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty. *Journal of Energy Storage*, 28, 101306. doi: 10.1016/j.est.2020.101306.
- Magagna, D. and A. Uihlein, 2015. Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. *International Journal of Marine Energy*, 11, 84-104. doi: 10.1016/j.ijome.2015.05.001.
- Michiorri, A., R. Girard, G. Kariniotakis, C. Lebossé and S. Albou, 2012. A local energy management system for solar integration and

- improved security of supply: The Nice Grid project. In *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)* (pp. 1-6). IEEE.
- Patrao, I., E. Figueres, G. Garcerá and R. González-Medina, 2015. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 415-424. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.054.
- Pires, V. F., A. Pires and A. Cordeiro, 2023. DC Microgrids: Benefits, Architectures, Perspectives and Challenges. *Energies*, 16(3), 1217. doi: 10.3390/en16031217.
- Qian, G., 2019. Overview of hydro-wind-solar power complementation development in China. *Global Energy Interconnection*, 2(4), 285-289. doi: 10.1016/j.gloi.2019.11.011.
- Roth, A. and W. P. Schill, 2023. Geographical balancing of wind power decreases storage needs in a 100% renewable European power sector. *Iscience*, 26(7).
- Sadeghi, E., M. M. Gholami, M. Hamzeh, S. M. M. Alavi and M. Saif, 2023. A systematic overview of power electronics interfaced electrochemical impedance spectroscopy for energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 62, 106850. doi: 10.1016/j.est.2023.106850.
- Saif, A., V. R. Pandi, H. H. Zeineldin and S. Kennedy, 2013. Optimal allocation of distributed energy resources through simulation-based optimization. *Electric Power Systems Research*, 104, 1-8.
- Szarka, N., H. Haufe, N. Lange, F. Schier, H. Weimar, M. Banse and D. Thrän, 2021. Biomass flow in bioeconomy: Overview for Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111449. doi: 10.1016/j.rser.2021.111449.
- Tan, Y., M. Wen, J. Liao, C. Wang, Y. Liu and T. Ouyang, 2021. Scheduling strategy of energy storage peak-shaving and valley-filling considering the improvement target of peak-valley difference. In *2021 11th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)* (pp. 196-200). IEEE.
- Ullah, K., Q. Jiang, G. Geng, S. Rahim and R. A. Khan, 2022. Optimal power sharing in microgrids using the artificial bee colony algorithm. *Energies*, 15(3), 1067. doi: 10.3390/en15031067.
- Voss, K., S. Hendel and M. Stark, 2021. Solar Decathlon Europe—A review on the energy engineering of experimental solar powered houses. *Energy and Buildings*, 251, 111336. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111336.
- Wang, H., M. Wang, Q. Cheng, S. Lv and X. Ji, 2022. Modeling simulation and inverter control strategy research of microgrid in grid-connected and island mode. *Energy Reports*, 8, 206-218. doi: 10.1016/j.egyr.2022.09.117.
- Wang, Y., J. Shi, N. Ma, G. Liu, L. Xin, Z. Liu, Z. Xu and C. Chen, 2024. An Improved Secondary Control Strategy for Dynamic Boundary Microgrids toward Resilient Distribution Systems. *Energies*, 17(7), 1731.
- Zhang, L., X. He, H. Xin, Z. Wang and D. Gan, 2016. Hierarchical control design and verification of a multi-mode microgrid on the Zhairuoshan Island. In *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)* (pp. 1-5). IEEE.

- Zhang, L. B. Zhou, F. Cheng and Y. Zhang, 2009. Modeling and dynamic simulation of a novel doubly salient electro-magnetic wind power generator system. In *2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- Zhou, Q., J. Jin and R. Yang, 2022. Static state power smoothing and transient power quality enhancement of a DC microgrid based on multi-function SMES/battery distributed hybrid energy storage system. *Energy Reports*, 8, 44-51. doi: 10.1016/j.egy.2022.08.051.
- Zheng, Y., Q. Chen, D. Yan and H. Zhang, 2022. Equivalent circuit modelling of large hydropower plants with complex tailrace system for ultra-low frequency oscillation analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 103, 176-194. doi: 10.1016/j.apm.2021.10.017.
- Zyryanov, V., N. Kiryanova, I. Korotkov, G. Nesterenko, G. Prankevich and I. Rudiuk, 2020. Analysis of energy storage systems application in the Russian and world electric power industry. In *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)* (pp. 106-109). IEEE.

An Energy Management Strategy for Renewable Energy Microgrid Combined with VRB Energy Storage System

Lin-Ching Hsu¹ Shung-Yi Hsu² Bin-Hao Chen^{2*}

ABSTRACT

In this study, we build a simulation model for a microgrid maneuvering integrating renewable energy and energy-storage equipment for application in load management. The study designed a microgrid accommodating diesel generators, PV and Wind power, associated with a vanadium redox battery (VRB) for energy storage. To optimize the energy management strategy tailored to communal load needs, thereby creating a distributed energy-maneuvering decision-making model under different environmental conditions, with the primary aim of reducing carbon emissions as the goal of energy-maneuvering. We completed the modeling by integrated actual data from Taiwanese Power Company into the microgrid simulation system, enabling the distributed energy-maneuvering system to track this data for power generation. Additionally, we employ the artificial bee colony algorithm for energy dispatch optimization, analyzing the optimal energy management strategies for the microgrid system. Finally, we apply Matlab software design energy management strategies and simulate the microgrid system by Matlab/Simulink. The results of this study show that our energy-maneuvering strategies can achieve an effective additional reduction of 48% in carbon emissions during the summer and 56% reduction during the winter.

Keywords: Vanadium Redox Battery, Energy Storage System, Renewable Energy Microgrid, Energy Management Strategy, Artificial Bee Colony Algorithm.

¹ Assistant Professor, Master Program in Entrepreneurial Management, National Yunlin University of Science and Technology.

² Professor, Department of Vehicle Engineering, National Taipei University of Technology.

*Corresponding Author, Phone: +886-02-27712171#3604, E-mail: binhao17@ntut.edu.tw

Received Date: May 10, 2024

Revised Date: July 29, 2024

Accepted Date: August 07, 2024