

國家原子能科技研究院
委託研究案 (期末報告)

微電網支援配電饋線運轉之研究
Study on Supporting Operation of Distribution Feeders by
Microgrid

計畫編號：112A014

受委託機關(構)：國立中正大學

計畫主持人：劉祐任

聯絡電話：05-2720411 Ext. 33225

E-mail address：azenliu@ccu.edu.tw

核研所聯絡人員：林子淳

報告日期：112 年 12 月 10 日

目錄

中文摘要.....	2
英文摘要.....	3
計畫參與人員與所屬單位	4
壹、計畫緣起與研究動機	5
一、計畫背景	5
二、計畫目的	6
三、計畫重要性	6
貳、研究方法與過程	8
一、核研所微電網系統與分散式發電資源模型建構	8
二、核研所微電網負載用電分析與預測方法設計開發	14
三、具負載預測機制之補充被轉服務控制策略設計與模擬	20
四、考慮利用太陽能發電參與夜間鋒時段之補充備轉服務	24
五、調頻備轉服務運轉評估	26
參、主要發現與結論	32
一、具負載預測策略補充備轉模擬分析	32
(一)、負載預測模擬測試	32
(二)、正常夜尖峰負載與正常儲能電量(SOC:55%)之補充備轉模擬	45
(三)、正常夜尖峰負載與低儲能電量(SOC:30%)之補充備轉模擬	51
二、加入太陽發電參與補充備轉模擬分析	57
(一)、正常夜尖峰負載與正常儲能電量(SOC:55%)之太陽能參與補充備轉模擬	57
(二)、正常夜尖峰負載與正常儲能電量(SOC:30%)之太陽能參與補充備轉模擬	60
三、調頻備轉模擬分析與評估	64
(一)、sReg 靜態調頻備轉模擬	64
(二)、dReg 動態調頻備轉模擬	65
(三)、E-dReg 增強型動態調頻備轉模擬	67
(四)、各種調頻備轉價金比較	68
肆、結論	69

中文摘要

面對大量再生能源整合至電網的挑戰，再生能源的間歇性影響了電力供需平衡的穩定性。為確保電力系統的穩定和安全，電網需要依賴新興能源設施技術，如微電網和儲能系統，以提供電網輔助服務功能。目前，透過台電的電力交易平台，各界人士可以作為提供者參與輔助服務，而參與者如何透過市場交易機制確保自身的最大利益也成為一個重要的研究課題。本計畫以國原院微電網系統及其相關能源設備作為研究對象，將參考台電輔助服務規定，建置 MW 級微電網之輔助服務模擬系統。該系統將用於進行補充備轉與調頻輔助服務之相關的模擬研究。本年度計畫主要研究內容包含(i)負載預測方法開發與建立具負載預測機制之補充備轉控制策略，並進行模擬分析；(ii)進行太陽能發電參與補充備轉之控制策略設計與模擬分析(iii)執行各種調頻備轉輔助服務(dReg0.25、E-dReg 及 sReg 等)之模擬與效益評估。

英文摘要

Facing the challenge of integrating a large amount of renewable energy into the power grid, the intermittency of renewable energy sources has impacted the stability of the grid electricity supply. To ensure the stability and safety of the power grid, seeking advanced grid technologies, such as microgrids and energy storage systems, to provide more grid supporting services are paid more attentions. Currently, various stakeholders can participate as suppliers of ancillary services via Taipower's energy trading platform; meanwhile, how these participants can ensure their maximum benefits on energy market trading mechanisms has become an important research topic. This project focuses on the study of using NARI microgrid system to participate ancillary services. A megawatt-scale microgrid simulation system is developed and can applied to implement the simulation analysis of supplementary reserve and spring reserve. The main research goal of the project in this year include (i) to develop load forecasting method, and applied to implement supplementary reserve simulation with this load forecasting strategy. (ii) to design a control strategy that considers the participation of PV power in supplementary reserve simulation under night peak load period. (iii) to do simulation analysis of the operation of various spring reserves (sReg, dReg, and e-dReg) under NARI microgrid system and then makes the assessments on their performance.

計畫參與人員與所屬單位

劉祐任 中正大學電機系 副教授 (主持人)

郭育偉 中正大學電機系 碩士生

郭宗翰 中正大學電機系 碩士生

壹、計畫緣起與研究動機

一、計畫背景

台灣正面臨著全球能源需求增加、環境問題嚴重的挑戰。目前，台灣主要依賴燃煤和燃氣等化石燃料發電，佔台電年總發電量的80%。然而，這些傳統能源在穩定性方面表現優越，但由於石油和煤等化石燃料有限，價格上升且對環境造成重大影響，包括地球暖化和空氣汙染等問題。為因應全球的能源危機和環保趨勢，台灣積極推動能源轉型，逐漸淘汰使用化石燃料，朝向零碳目標發展。能源轉型的目標是降低二氧化碳排放，減緩能源使用對環境的衝擊。由於台灣是海島型國家，能源供應體系獨立，但高度依賴進口能源，因此轉型尤為重要。近年來，台灣積極發展綠能，推動低碳能源轉型，大力發展對環境友善、溫室氣體排放較低的再生能源，以降低對化石燃料的依賴，同時提升環境的永續性。

再生能源，如太陽能 and 風能，存在著間歇性和受環境影響的特性，使得其發電產能具有高度變動性。當這些再生能源整合到電力配電系統中時，由於其不穩定的發電特性和難以預測的變化，可能對電力系統的穩定性和發電機組的排程和調度帶來挑戰。例如，環境變化可能導致再生能源的發電量急劇下降，甚至觸發電力系統的低頻驅動保護機制。如果保護和協調機制不足夠完善，可能導致整個系統風險。為了保持電力系統的穩定性和可靠性，需要引入輔助服務來維持電力系統的運行，並在緊急情況下快速恢復正常運轉。這些輔助服務包括頻率調節、備用容量、電壓控制、系統復電等。台灣電力公司正在發展智慧調度和發電技術，以應對再生能源和分散式電源的加入。未來，隨著再生能源和分散式電源的大規模部署，電力系統將更具彈性，能夠實現不同的電網功能，並強化電力行業與其他能源系統業者的協同

操作，以實現智慧電網的發展目標。面對這些挑戰和變革，電力公司需要提前制定有效的運行策略，應對大規模再生能源的安裝計劃和電網結構與功能的變革。同時，也需要發展更先進的電力系統運營控制方式，以應對各種系統衝擊。

二、計畫目的

在國內電力市場自由化的初期階段，綠能發電成為先行的趨勢，導致再生能源在台灣的發電比例逐年增加。這使得傳統發電資源提供輔助服務的能力下降，可能對整體電力系統的穩定性產生影響，包括慣量下降和虛功電力不足等問題。特別是由於台灣主要以太陽能發電為主，太陽能發電在日落後無法產生電力，因此需要其他能夠快速啟停且反應迅速的發電資源來彌補能源缺口。為了解決輔助服務來源不足的問題，台電設立了電力交易平台，開放輔助服務市場，使得民間的電力設備資源可以參與提供輔助服務。在這種情況下，本計畫以核研所的微電網系統及其相關能源設備為研究對象，旨在探討微電網系統如何參與輔助服務並進行負載預測，以提供更有效的電力系統運營和管理。透過對微電網系統的研究，希望找到解決再生能源發電變動性帶來的挑戰的方法，同時提供穩定的輔助服務以支援整體電力系統的運作。透過對負載預測的研究，可以更準確地預測未來電力需求，並根據預測結果調整微電網系統的運作，以確保系統在高峰期和低谷期都能夠穩定運行。這將有助於提高微電網系統參與輔助服務的效能，確保整體電力系統的穩定性。同時，透過電力交易平台的參與，民間的電力設備資源也能更好地參與輔助服務市場，提供更多元化的能源選擇，以確保電力系統在未來能夠有效應對能源供應的挑戰。

三、計畫重要性

為了確保國家電力的長期穩定供應，必須建立健全的電網基礎建設並確保充足的發電資源。然而，電力系統可能因多種原因而出現異

常或中斷，如天然災害、網路攻擊、人為疏失或設備老舊等。近年來，國內發生過多起電力事件，例如 2017 年的八一五大停電和 2021 年的五一三、五一七停電事件。為應對潛在的停電風險，電力系統可以透過提升電網的韌性來應對。韌性指的是預測、準備和適應條件變化的能力，並能夠抵擋、回應和快速恢復。提升電網韌性可以透過三種途徑實現，分別是堅固性、資源豐富性和恢復性。例如，可以提升電網設備的堅固性，以預防在緊急事件中受到損害。另一方面，可以確保準備足夠且多樣的備援發電資源，以增加發電調度的彈性。同時，制定停電後快速恢復供電計畫，以提高電網的恢復性。這些措施有助於提升電力系統的穩定性，使其更能應對各種可能導致停電的挑戰。

此外，除了應對突發停電因素外，隨著再生能源裝置容量逐漸增加，電力系統營運還需處理穩定度和電力品質等問題。為了維持輸配電的完整性，國際上需要提供輔助服務，而輔助服務技術的發展仍然是一個相當新穎的議題。不同國家的技術發展通常與其電網結構和運營操作密切相關。在國內，對於輔助服務的應用也在尋求適當的進行方式。隨著國內電網業朝著先進電網技術的發展趨勢，本計畫的研究內容有助於推動以微電網方式提供輔助服務的技術發展，同時透過預測的方式降低再生能源不確定性所帶來的衝擊。這意味著將探討如何有效運用微電網技術提供輔助服務，以應對再生能源變動性的挑戰。這項研究有望在國內電網業的演進中扮演重要角色，推動更具韌性和效能的電網運營方式，以因應未來電力系統的要求。

貳、研究方法與過程

一、核研所微電網系統與分散式發電資源模型建構

本計畫延續核研所 111 年度委託計畫「混合能源協調分配及補償策略研究」進行微電網參與輔助服務之議題研究，相關計畫模型由 111 年度計畫所開發之建模技術繼續進行沿用與進一步設計。本計畫的執行將使用 Matlab/Simulink 軟體來建構 INER 微電網系統模型。原始 INER 微電網系統的架構包含市電網、負載、鋰離子電池儲能、搭配超級電容的混合式儲能、柴油發電機組、微型渦輪機組、太陽能發電系統、計算模組、監控模組、電能管理模組以及相關控制策略模型。相應的系統模型如圖 2.1.2 所示，該模型的建立將成為後續發展輔助服務模擬功能的基礎。在模型中，電能管理模組代表微電網控制中心（MGCC），根據內部資訊和輔助服務能源管理策略對各發電機、儲能設備和太陽能進行控制。計算模組通過微電網內部各設施的量測資訊來計算實/虛功率、功率因數等重要資料，並將這些資料傳送至微電網控制中心，作為能源管理策略的判斷依據。監測系統模組則作為模擬環境中的資料監控平台，用於呈現模擬期間微電網內各設備的資訊和輔助服務動作狀況。這個模型的開發將有助於後續計畫中的輔助服務模擬功能、緊急操作策略開發、系統功因問題探討以及模擬測試分析。透過這個模型，我們將能更好地理解並應對再生能源變動性所帶來的挑戰，提升電網的韌性和效能。

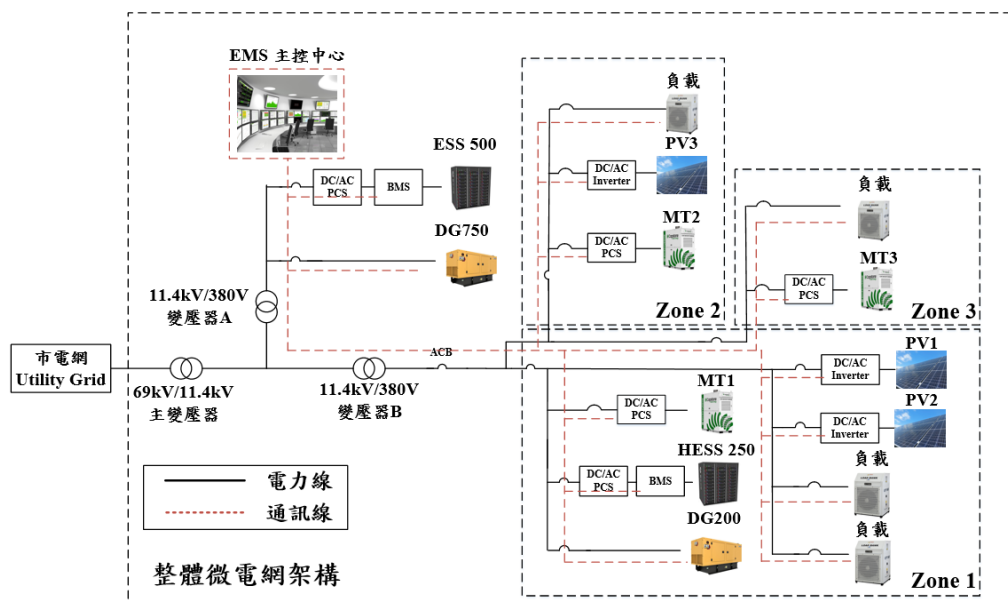


圖 2.1.1:INER 微電網系統架構

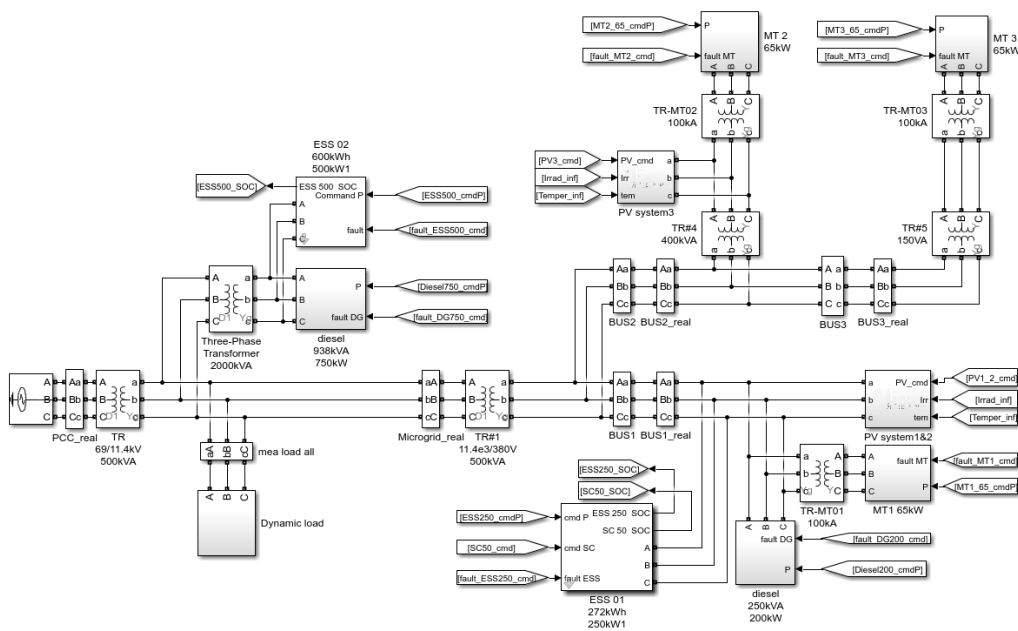


圖 2.1.2: INER 微電網系統模型

微電網系統中所使用之相關組件模型如下簡述：

► 太陽能發電系統

本計畫使用具有雙級式轉換結構的太陽能發電系統建模。前級轉換器是直流/直流昇壓轉換器 (DC/DC Boost Converter)，而後。級則是直流/交流變流器 (DC/AC Inverter)。昇壓轉換器直接連接太陽能陣

是雙級結構中的前級轉換器，其目的是提升並穩定後級轉換器輸入端的直流電壓。後級的直流/交流變流器搭配實/虛功控制，用於控制儲能系統的實/虛功率輸出和輸入，最終將輸出的交流電能經過濾波器濾波後併入市電網。混合儲能系統的模型結構如圖 2.1.5 所示，類似於鋰離子儲能系統，不同之處在於其變流器的直流側電壓端還連接有超級電容和雙向直流/直流轉換器。這個雙向直流/直流轉換器負責控制超級電容的輸出/入功率，以協助鋰離子儲能系統的運作。這兩種儲能系統模型將用於後續模擬分析，特別是在即時與補充備轉輔助服務方面。通過這些模型，可以深入了解儲能系統在輔助服務提供方面的性能，進而優化系統的運作策略。

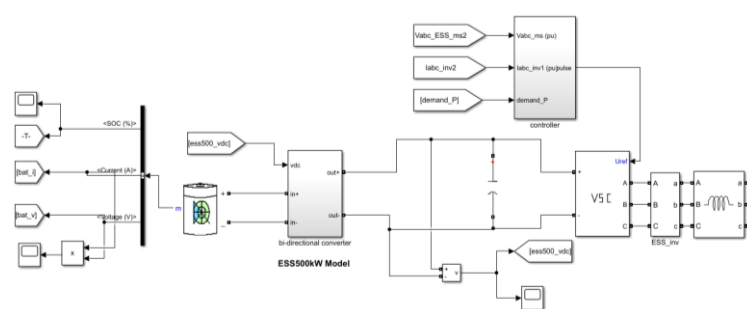


圖 2.1.4:鋰離子儲能系統

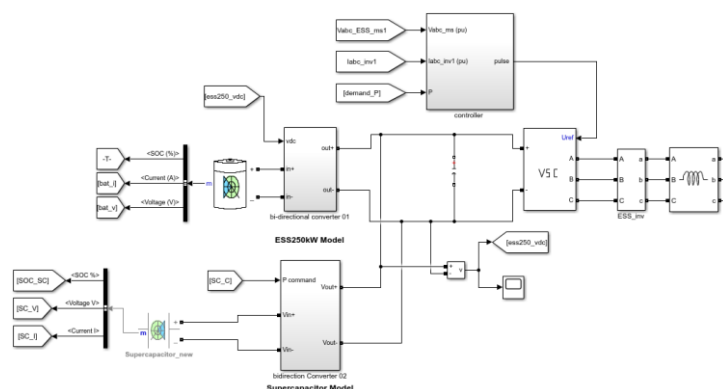


圖 2.1.5:混合儲能系統

➤ 柴油發電機

柴油發電機模型包含柴油引擎調速系統、激磁系統和同步發電機，整體模型如圖 2.1.6 所示。柴油引擎配有調速器，該引擎通過燃燒柴

油提供機械能給同步發電機，使其輸出電能。調速器通過檢測轉速差來調整柴油供應閥門，以實現同步發電機轉速的穩定。激磁系統主要負責調節同步發電機的激磁電流，以保護同步發電機免受超過限制的運作。在本計畫中，柴油機模型將以參與需量反應的方式執行即時/補充備轉的輔助服務。柴油機模型將成為主要的能源設施，負責執行這些輔助服務。通過柴油發電機的調速和激磁系統的調節，可以實現在需要時提供穩定的電力輸出，以應對電力系統的需求波動。

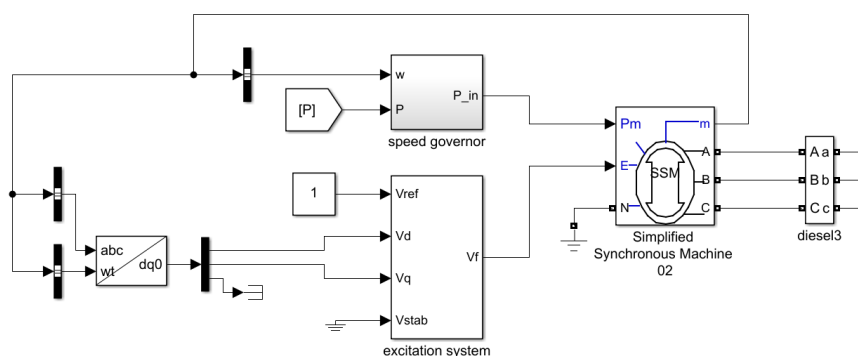


圖 2.1.6:柴油發電機

► 微型渦輪機

本計畫中的微型渦輪機模型由直流電壓源、電路等效模組和變流器組成，結構如圖 2.1.7 所示。微型渦輪機的功率輸出是通過實/虛功控制來實現的。實/虛功率控制的實功參考值是透過微型渦輪機的電路等效模組來決定的，該電路等效模組是參考美國的電力可靠性技術解決方案聯盟（CERTS）的顧問報告作為建模依據。微型渦輪機模型的主要功能是在系統發生緊急狀況時充當新增的調度資源，以提供緊急的輔助電力。通過實/虛功控制，微型渦輪機能夠迅速調整輸出功率，以應對電力系統的需求變化。這種模型的引入有助於提高系統在緊急情況下的韌性和可靠性，進而確保電力供應的穩定性。

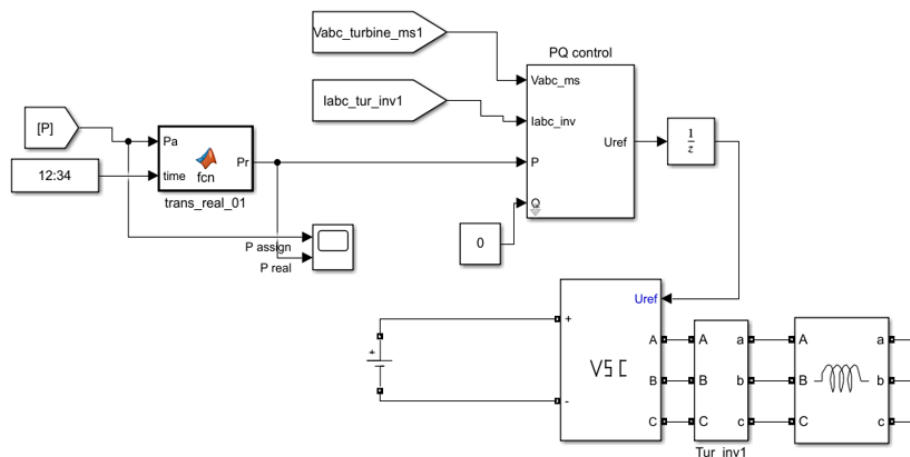


圖 2.1.7:微型渦輪機模型

➤ 風力發電機

在風力發電系統部分，可透過簡易(亦即等效)或詳細模型方式進行建模。前者，如依據圖 2.1.8 之功率對風速變化之特性曲線(其可透過量測或由產品規格中獲得)，可以查表法方式將圖 8 之發電功率輸入至風力機模型中，風力機模型係以圖 2.1.9 控制電流源方式呈現，其電流大小乃由前述發電功率除以風力機額定電壓後獲得。後者，詳細模型是以電磁暫態建模方式進行，其於建模時完整考量了風力機之電路拓樸，該模型如圖 2.1.10 所示包含空氣動力系統模組、機械傳動系統模組、雙饋式感應發電機模組、電能轉換器模組和控制系統模組。

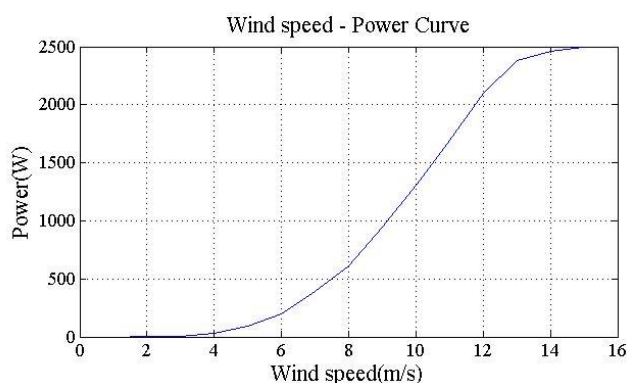


圖 2.1.8:風力機功率特性曲線

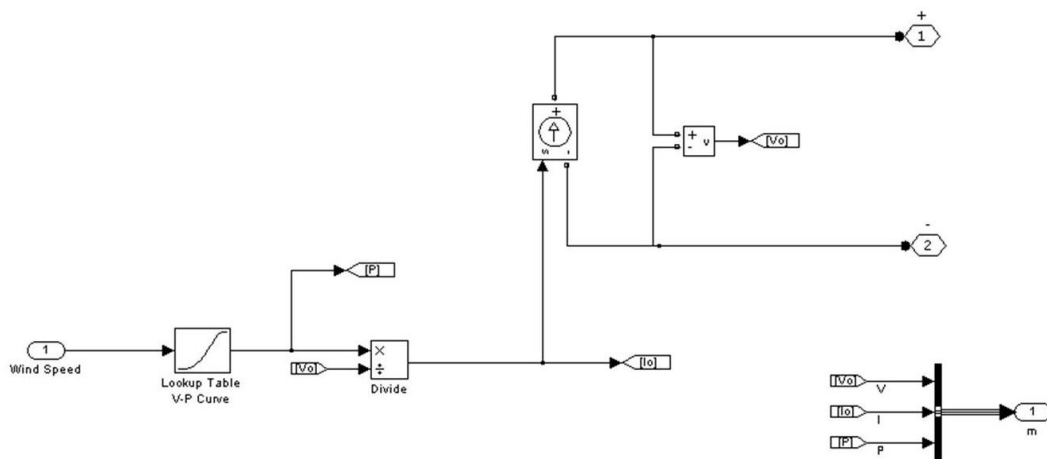


圖 2.1.9:簡易風力發電機模型

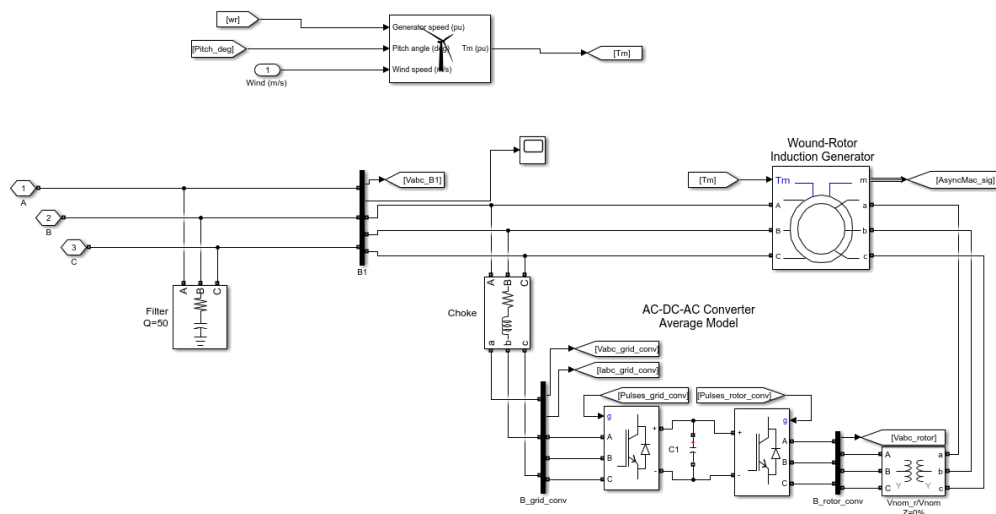


圖 2.1.10:風力發電機詳細模型

二、核研所微電網負載用電分析與預測方法設計開發

負載預測已是未來智慧電網中，不可或缺之部分，任何能源相關議題及決策，都須仰賴準確的負載預估，不準確之預測將導致能源損失、電力調度問題，甚至於發電設施危害，進而導致成本大幅提高。影響負載之因素有許多層面，包含時間，不同時間段、季節、節假日這些間歇性因素都將對負載預測造成影響，氣象因素包含氣溫、日照，經濟因素如經濟發展水平、人口變化或是社會活動，用電行為因素係指人們的用電習慣、用電行為、模式等，都將影響負載量，基於以上

各種不確性之外在因素，本計劃構想利用機器與深度學習來進行負載預測模型開發，將其應用在補充備轉服務。底下將對本計畫負載預測方法及策略之細部步驟進行探討。

➤ 數據描述

本計畫使用之數據集為 INER 微電網系統架構 2022 年 9 月至 2023 年 3 月用電實功(kW)資料，採樣點為每 10 秒鐘一筆資料，使用歷史實功資料預測未來實功數值，為單變量預測方式，底下將詳細描述預測方法及實現過程。

➤ 數據清洗及補值

檢查蒐集資料中是否存在缺失值、異常值或重複值。在實務過程中，可能因量測器具有損壞、不穩定，或設備老舊造成電腦延遲而導致資料有上述情形發生，缺失值係指資料中某些屬性的值為空欄位或未知，異常值則是與其他數據明顯不同的極端值，或依據對該資料的認知及判斷，不可能存在之數值等，在進行資料分析前，需對此些問題先進行處理，確保資料正確及完整性。本計劃之負載預測蒐集資料中，類型為時間序列資料，檢視後發現數點資料遺失，使用線性插值法將該數點資料進行補值，檢視及補值後資料如圖 2.2.1 所示。

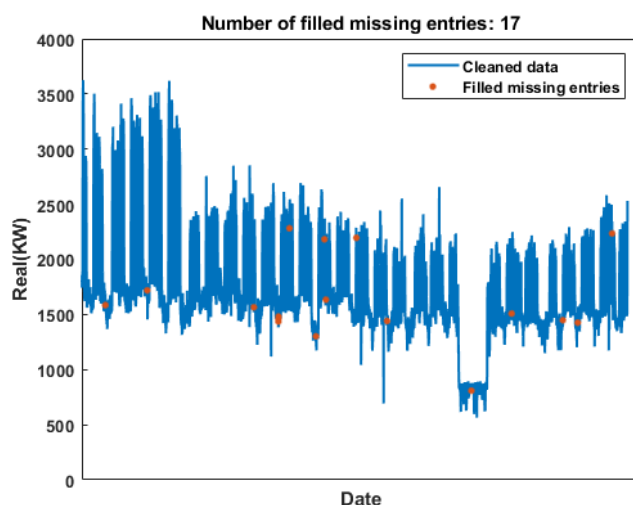


圖 2.2.1:清理後之 INER 數據集

➤ 資料重取樣

在時間序列分析中，資料重取樣(Data retime)是根據欲解決之問題，在不同任務下，會有不同時間刻度被應用，重採樣用於將原始時間序列資料調整為新的時間間隔或頻率，該方法依據原始資料的特點和目標分析的需求選擇合適之取樣方法，常見方法包括平均、總和、插值方法等。而因本計劃負載預測取得資料為 10 秒鐘一筆，模擬預測之時間間隔為 15 分鐘，故直接將其重新取樣至與模擬情境相同之時間刻度。

➤ 資料轉換

將原始資料進行處理及轉換，為進行深度學習模型訓練前必要之步驟，其目的為滿足模型假設及特定分析，能夠更有效讓模型實現權重計算。資料中不同變數常因不同單位、不同大小數值範圍，若將原始資料不經處理直接放入模型使其計算，導致權重偏向某特徵，勢必會影響分析結果。以下將描述本計畫負載預測資料轉換方法及步驟，標準化(Normalization)為將數據按照一定比例大小縮放，使其能符合特定範圍亦或是分布，本計劃使用最大最小值標準化(Min-Max Normalization)如式(1)，該方法將數據縮放至[0, 1]大小範圍之間，標準化後的輸入與輸出如圖 2.2 所示。

$$X_{norm}(i) = \frac{X(i) - X_{min}}{X_{Max} - X_{min}} \in (0, 1) \quad (1)$$

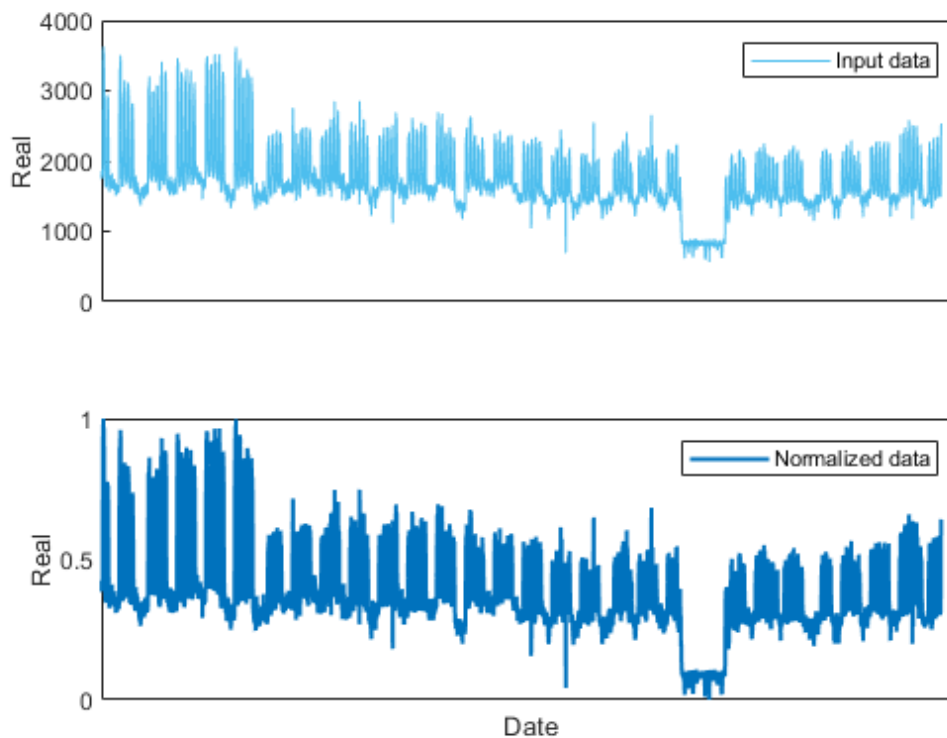


圖 2.2.2:實功標準化前與後對比圖

➤ 資料分割

本計畫將前述處理完成之數據集分為三部份，分別為訓練集、驗證集和測試集，以利後續進行模型的訓練、調參及評估。訓練集用於模型訓練時的數據子集。在時間序列相關問題中，常將訓練集作為最早時間段，使模型能夠學習數據集中時間序列模式。訓練集必須包含足夠多之樣本，方能使訓練時的誤差損失完整收斂，同時也使模型學習到更多參數量。驗證集之目的為訓練過程中調整模型相關超參數、選擇最佳模型的數據子集。驗證集的時間段通常介於訓練集和測試集之間，以確保對模型進行合理評估。測試集用於訓練後最終評估模型性能的數據子集。目的為評估模型在未見數據上的泛化能力及預測能力。

本計劃之負載預測將前述處理好之數據集分為前 70% 為訓練集，後 30% 分別為驗證集和測試集，同時為因應補充備轉策略，再使用完

整 3 月份 INER 用電資料測試預測結果。

➤ 深度學習模型

本計劃使用兩種深度模型架構作為訓練並進行預測，分別為長短期記憶(Long Short Term Memory)及門控循環單元(Gated Recurrent Unit)如圖 2.2.3 及圖 2.2.4 所示。LSTM 為常見深度學習模型，廣泛應用於自然語言處理、語音識別、以及本計劃負載預測之時間序列問題等領域，此模型於解決長期依賴性和梯度消失等問題上具有更好之適應能力，以下講解該模型細部關鍵，此模型核心為三個閥門(Gate)分別為輸入閥、遺忘閥、輸出閥及候選記憶(Memory)組成，輸入閥決定將哪些信號添加到記憶中。使用計算輸入數據和前一時間步之隱藏狀態線性組合，再通過 sigmoid 函數如式(2)生成一個 0 到 1 之間的輸入門向量，同時使用 tanh 函數如式(3)生成一個-1 到 1 間的候選記憶向量，輸入門向量與候選記憶向量相乘，決定需被添加到記憶中之新信號。遺忘閥決定記憶中該刪除哪些信號，計算方式為輸入數據及前一時間步隱藏狀態線性組合，再通過 sigmoid 函數產生一個 0 到 1 之間的遺忘門向量。該向量決定記憶單元中保留程度。輸出閥決定將哪些記憶信號傳遞到下一時間步之隱藏狀態。使用輸入數據和前一時間步隱藏狀態之線性組合，通過 sigmoid 函數生成一個 0 到 1 之間的輸出向量。同時使用 tanh 函數對記憶單元的輸出進行正規化，生成一個-1 到 1 之間的輸出向量，兩者相乘則得到最終之隱藏狀態。

GRU 為 LSTM 模型改進，具有更簡單之結構，參數量也相對較少，再計算時間上能夠更快速執行收斂。以下講解該模型細部關鍵，GRU 使用兩個閥門，分別為重置閥及更新閥。重置閥目的用於篩選欲重設的上一時間步階之隱藏層狀態信號，更新閥則用於分配上一時間步階隱藏層狀態與臨時隱藏層狀態之間比例，用於更新欲輸出至下一隱藏層與下一時間步階循環的隱藏層狀態信號。

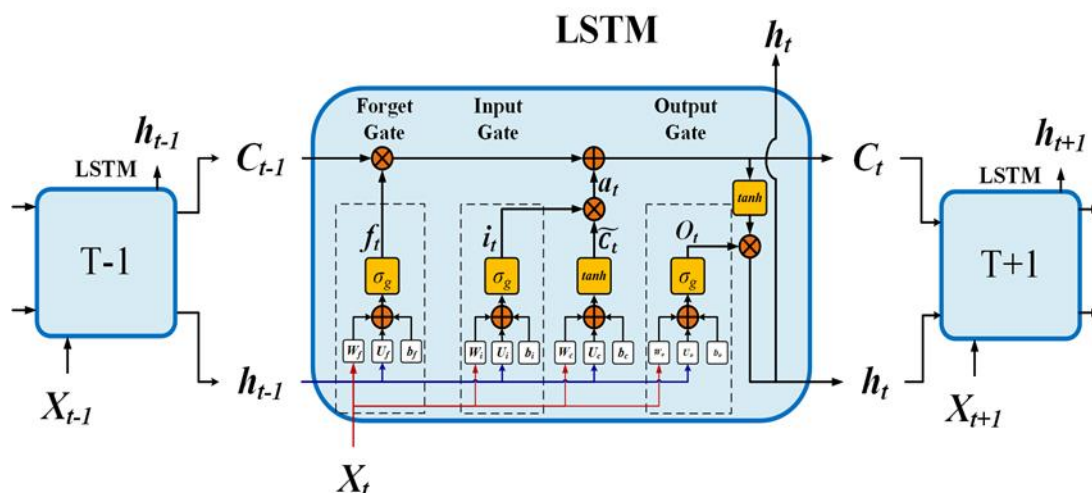


圖 2.2.3:LSTM 模型結構示意圖

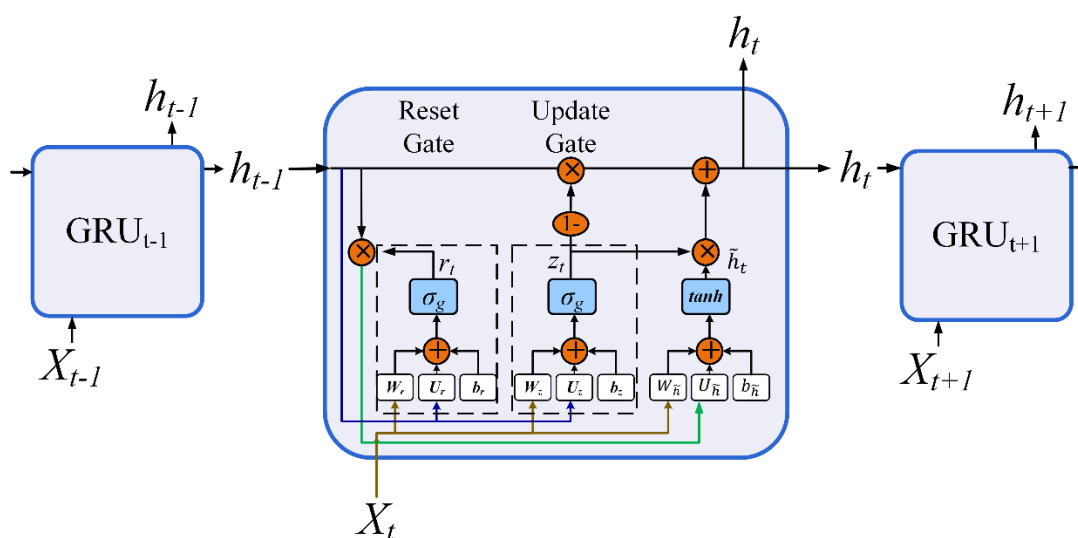


圖 2.2.4:GRU 模型結構示意圖

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \in (0, 1) \quad (2)$$

$$\tanh(x) = \frac{1-e^{-2x}}{1+e^{-2x}} \in (-1, 1) \quad (3)$$

➤ 判斷模型效能指標

欲了解預測後之結果，須使用模型常用相關指標來判斷，本案例中時間序列負載預測任務為數值型回歸任務，常使用誤差損失(Loss)來判斷模型優劣，以下說明本計劃中使用的三種判斷性能指標。

平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)為常見用於回類型之性能指標，用於衡量預測值與實際量測值之間的平均絕對誤差，如(4)所式， MAE 值越小，代表模型效能越高，它以與原始數據相同的單位表示誤差，而不是平方轉換，使模型更加容易解釋。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\hat{y}_t - y_t| \quad (4)$$

其中 n 代表樣本數， $\hat{y}_t$ 代表預測值， y_t 代表量測值。

均方根誤差(Root Mean Square Error, $RMSE$)是預測值和實際觀測值之間誤差的均方根值，如(5)所示，它表示預測值和實際觀測值之間的平均誤差大小。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}{n}} \quad (5)$$

其中 n 代表樣本數， $\hat{y}_t$ 代表預測值， y_t 代表量測值。

正規化均方根誤差(Normalized Root Mean Square Error, $nRMSE$)係指經正規化後 $RMSE$ ，如(6)所示， $nRMSE$ 值越小，代表模型效能越高。

$$nRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \quad (6)$$

其中 y_{max} 代表預測最大值， y_{min} 代表預測最小值。

三、具負載預測機制之補充被轉服務控制策略設計與模擬

➤ 參與補充備轉服務之發電資源

在補充備轉輔助服務的模擬設計中，使用了儲能、柴油和數台微型渦輪機，這些資源根據圖 2.3.1 所示的需量反應方式來參與。負載模型採用動態負載模型，並使用預測後的負載資料進行模擬。其他參與資源的相關參數如表 2.3.1 所列。

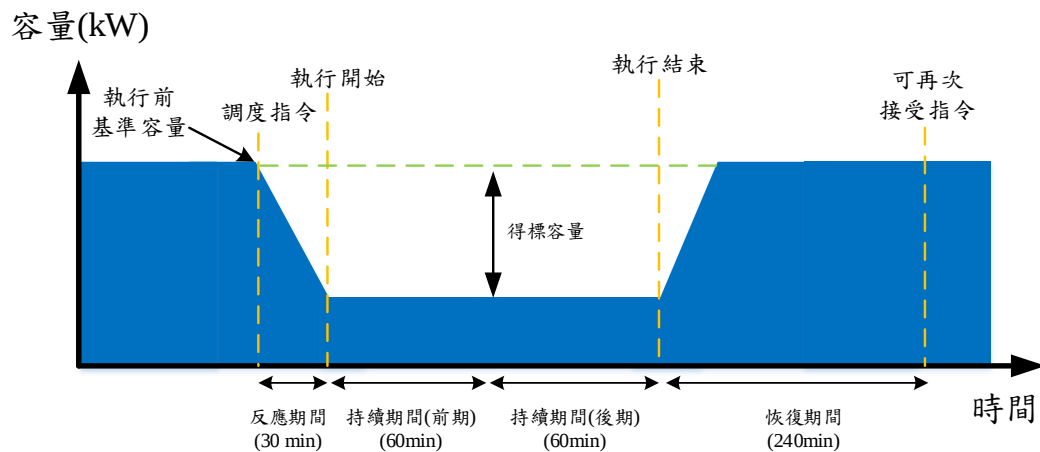


圖 2.3.1:以需量反應方式參與補充備轉

表 2.3.1:補充備轉模擬所使用之設備參數

分散式電源	所處區域	最大輸出功率	儲能容量
儲能#2	PCC	500 kW	600 kWh
儲能#1	Zone 1	250 kW	272 kWh
發電機	所處區域	最大輸出功率	
柴油發電機#1	Zone 1	200 kW	
柴油發電機#2	PCC	750 kW	
微型渦輪機#1	Zone 1	65 kW	
微型渦輪機#2	Zone 2	65 kW	
微型渦輪機#3	Zone 3	65 kW	
負載模型	所處區域	消耗功率	
動態負載	PCC	匯入預測負載資料	

➤ 控制策略設計

本計畫所設計之具負載預測機制之補充備轉策略操作流程如圖 2.3.2 所示。在未收到調度命令時，會依圖 2.3.3 進行負載預測，接著，系統會根據預測的負載情況操作儲能系統，如圖 2.3.4 判斷預測負載的策略圖，圖中 P_{mea} 為執行命令前的平均負載，若預測到執行命令期間達到設定的閾值將為變更建議電量，以確保儲能電量在需要時足夠應對高負載情境。換言之，如果預測顯示儲能電量偏低或無法滿足

補充備轉期間的高負載，則儲能系統會使用市電進行充電。

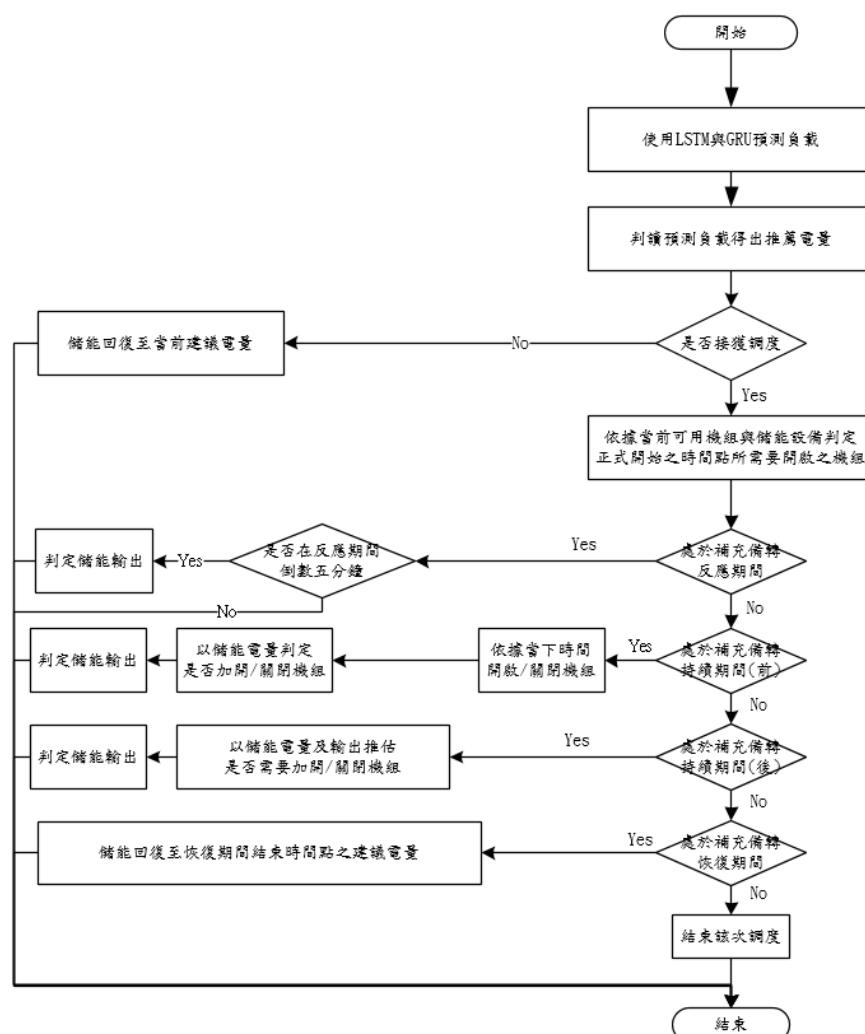


圖 2.3.2:加入負載預測機制之補充備轉控制策略

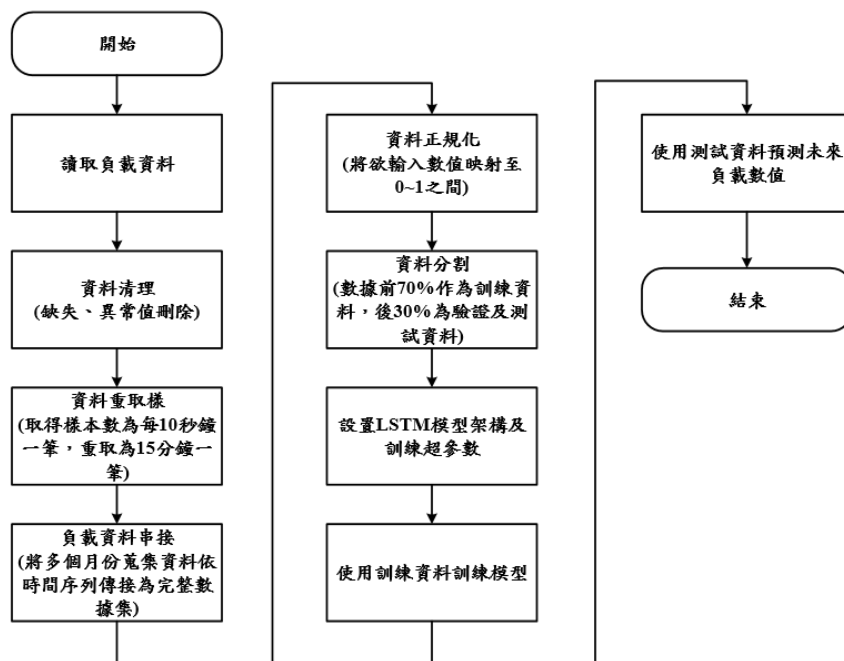


圖 2.3.3:預測負載的策略圖

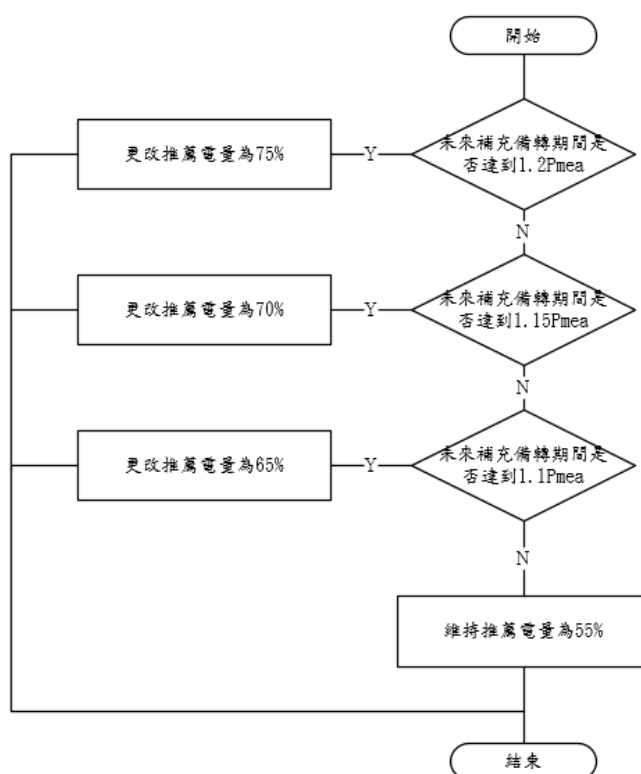


圖 2.3.4:判斷預測負載的策略圖

四、考慮利用太陽能發電參與夜間鋒時段之補充備轉服務

➤ 控制策略設計

在上個章節提到，在圖 2.3.4 判斷預測負載的策略圖，若預測到執行命令期間達到設定的閾值將為變更建議電量，以確保儲能電量在需要時足夠應對高負載情境。換言之，如果預測顯示儲能電量偏低或無法滿足補充備轉期間的高負載，我們可以將太陽能當做充電資源，可在 2.4.1 看到加入更新後以太陽能充電補充備轉策略圖以及圖 2.4.2 太陽能充電規則。

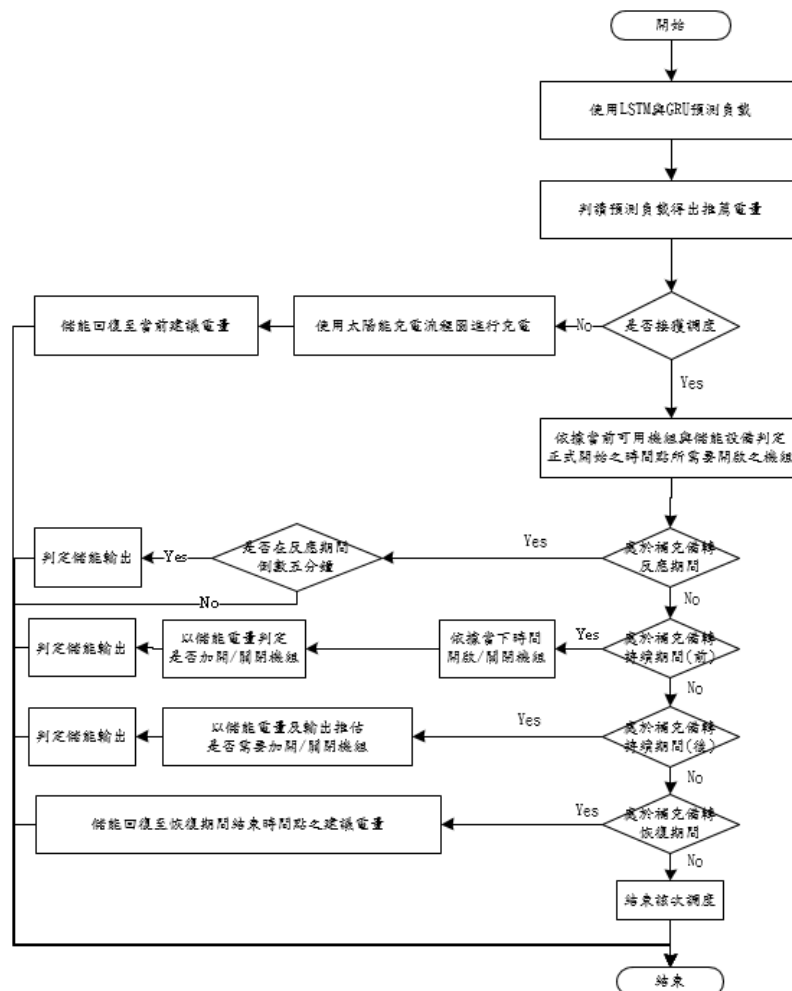


圖 2.4.1:加入太陽能參與後補充備轉之控制策略圖

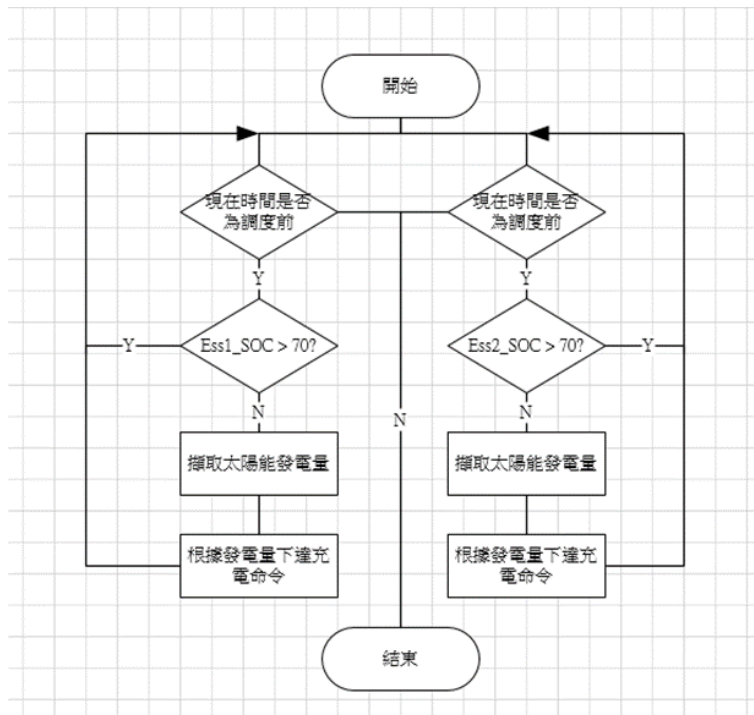


圖 2.4.2:太陽能充電規則

這邊做個說明，在圖 2.4.3 可以看到一般晴天日照在於 7 點太陽升起，若我們得知我們在於下午 4 點到 6 點要做補充備轉，也就是太陽下山的時段，可以先依照圖 2.3.3 和圖 2.3.4 做負載預測及判斷預測後的負載，若發現預測到即將上升的負載即可最早於 7 點利用太陽能進行充電，即可不使用到市電也可以替未來的上升負載做準備。

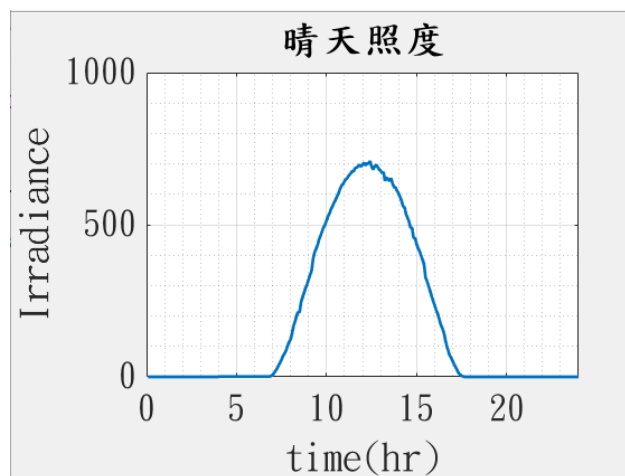


圖 2.4.3:晴天日照示意圖

五、調頻備轉服務運轉評估

➤ 參與調頻備轉服務之發電資源

在調頻備轉輔助服務的模擬設計中，調頻備轉模擬中的微電網系統模組如圖 2.5.1 所示。由於是直接以儲能參與服務，故負載不影響儲能設備調頻備轉的執行能力。分散式能源和負載規格如表 2.5.1 所示。

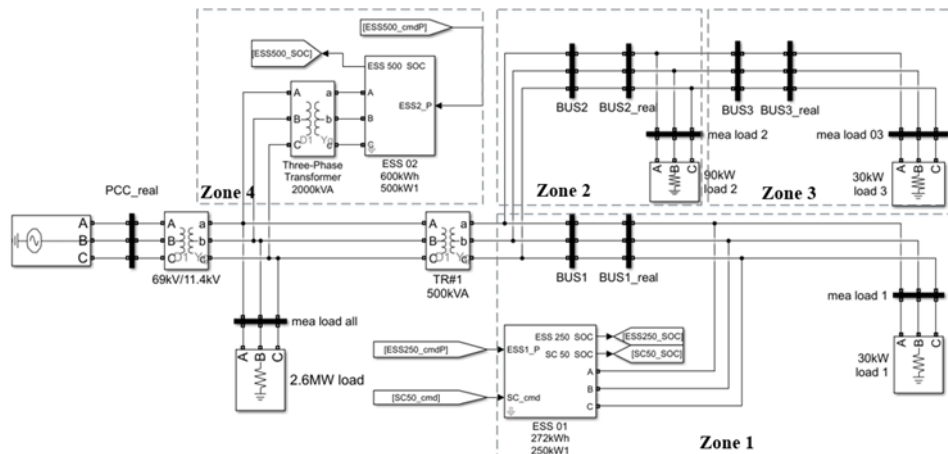


圖 2.5.1:用於模擬調頻備轉之微電網系統模組

表 2.5.1:分散式能源和負載規格

分散式能源	輸出功率/(容量)	所處區域
電池儲能系統	500 kW/600 kWh	Zone 4
混合儲能系統	250 kW/272 kWh	Zone 1
負載模型	消耗功率	所處區域
靜態負載	2,600 kW	TR#1 變壓器後
靜態負載 1	30 kW	Zone 1
靜態負載 2	90 kW	Zone 2
靜態負載 3	30 kW	Zone 3

➤ 靜態調頻備轉服務之執行要求

靜態調頻備轉系統 (sReg) 具有主動偵測電力系統頻率的功能。當系統頻率低於 59.88 Hz 時，sReg 需要在 1 秒內做出反應，並在 10 秒內達到 100%輸出功率。圖中顯示了 sReg 曲線的設置。當系統頻率降

至 59.88 Hz 以下時，sReg 必須迅速達到最大功率輸出；而當系統頻率恢復到 59.98 Hz 時，則需將輸出功率調整為 0%。在系統頻率超過 60 Hz 時，存在彈性調整區間，允許在限制區間內對儲能系統進行充電。圖 2.5.2 展示了靜態調頻備轉輔助服務曲線的設置。

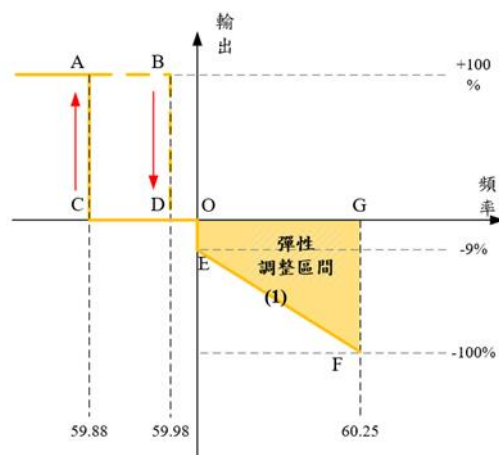


圖 2.5.2: 靜態調頻備轉輔助服務曲線

➤ 動態調頻備轉服務之執行要求

動態調頻備轉是一種擁有主動頻率偵測功能的電力系統調控方法。這種方法根據電力系統頻率的變化和動態調頻的頻率/功率對照曲線，調整輸出/輸入功率。然而，當系統頻率超出彈性調整區間時，需要在 1 秒內根據預先設定的曲線快速調整資源的輸出/輸入功率，以確保系統穩定運行。目前，動態調頻僅具有 dReg0.25 功能，而圖 2.5.3 則顯示了動態調頻備轉曲線的設置。

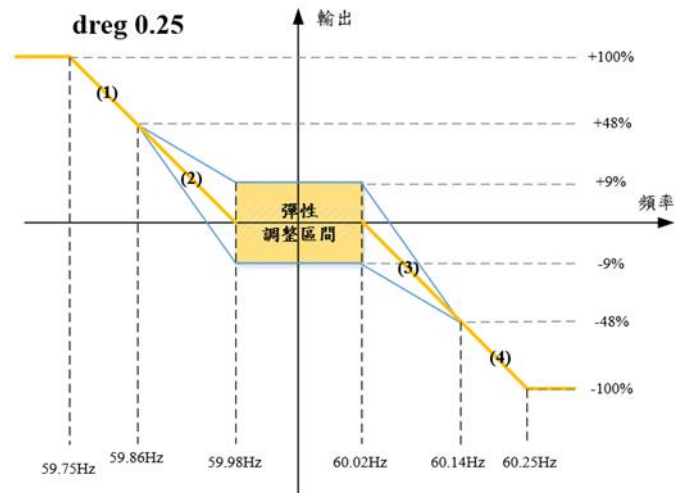


圖 2.5.3:動態調頻備轉曲線

➤ 增強型動態調頻備轉服務之執行要求

在圖 2.5.4 中，顯示了增強型動態調頻備轉的操作示意圖。其中，藍色部分表示 dReg0.25 的操作容量區域，灰色部分表示 E-dReg 的操作容量區域，包括充放電。從這張圖可以清楚地看到，增強型動態調頻備轉不僅包含動態調頻備轉的操作，還增加了電能移轉的功能。

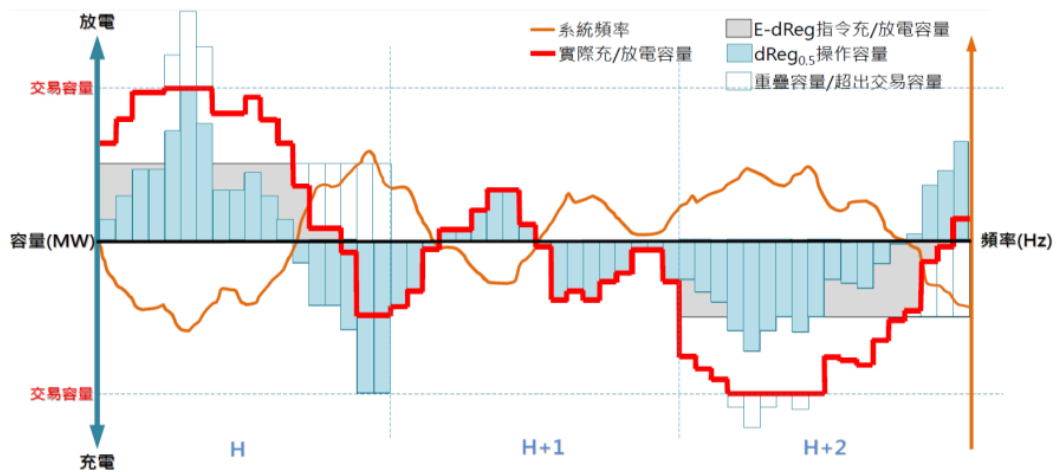


圖 2.5.4:增強型動態調頻備轉的操作示意圖

➤ 調頻備轉評估方式

本計畫中會使用相同條件測試每種調頻備轉，主要以價金的方式來評估各種調頻備轉的表現。以下將會介紹各種調頻備轉的執行率計

算以及價金計算方式。

➤ sReg 執行率計算方式

靜態調頻備轉的執行表現能力是透過每秒執行率 (SBSPM) 和該小時滾動執行率進行評估。該小時滾動執行率是指每小時內每四秒的 SBSPM 最大值，然後根據這些值選擇該小時的執行表現能力，取該小時滾動執行率的最小值。第 t 秒的 SBSPM 是以第 t 秒的執行容量和得標容量之百分比計算，對於靜態調頻備轉的線上測試，其合格判定是每小時執行率不得低於 95%。相應的服務品質指標如表 2.5.2 所示。

表 2.5.2:服務品質指標

每小時執行率	服務品質指標
小時滾動執行率 $\geq 95\%$	1
小時滾動執行率 = 94%	0.8
小時滾動執行率 = 93%	0.6
小時滾動執行率 = 92%	0.4
小時滾動執行率 = 91%	0.2
$70\% \leq$ 小時滾動執行率 $\leq 90\%$	0
小時滾動執行率 $< 70\%$	-1

➤ dReg 執行率計算方式

動態調頻備轉的執行表現能力是透過每秒執行率 (SBSPM) 與該小時的滾動執行率來評估。該小時滾動執行率為該小時內每四秒 SBSPM 之最大值，接著依該小時滾動執行率最小值作為該小時的執行表現能力。SBSPM 則透過第 t 秒和 $t+1$ 秒的頻率和輸出功率之間的比較來衡量。當實際輸出功率和額定功率比值 (P_{out}) 在操作曲線範圍內時，

SBSPM 為 100 %。若實際輸出功率與額定功率比值位於操作曲線範圍外，則 SBSPM 為 100 %減去實際輸出/入功率與額定功率比值與該相應頻率下最近操作曲線輸出/入功率比值之差的絕對值。計算方式如式(7)所示。服務品質指標詳見表 2.5.3。

$$SBSPM = \begin{cases} \text{功率於操作範圍內: } SBSPM = 100 \% \\ \text{功率於操作範圍外: } SBSPN = 100\% - |P_{out} - P_{oper}| \end{cases} \quad (7)$$

表 2.5.3:服務品質指標

每小時執行率	服務品質指標
小時滾動執行率 $\geq 95 \%$	1
小時滾動執行率=94%	0.8
小時滾動執行率=93%	0.6
小時滾動執行率=92%	0.4
小時滾動執行率=91%	0.2
$70\% \leq \text{小時滾動執行率} \leq 90\%$	0
小時滾動執行率 $< 70 \%$	-1

➤ e-dReg 執行率計算方式

增強型動態調頻備轉的執行表現能力是透過每秒執行率 (SBSPM) 與該小時的滾動執行率來評估。該小時滾動執行率為該小時內每四秒 SBSPM 之最大值，接著依該小時滾動執行率最小值作為該小時的執行表現能力。SBSPM 則透過以第 t 秒動態調節功能應執行容量，與電能移轉排程應執行容量之總和為計算基礎。其中第 t 秒動態調節功能應執行容量，為依第 t-1 秒系統頻率對應操作曲線圖所換算之容量。當實際輸出功率和額定功率比值 (P_{out}) 在操作曲線範圍內時，SBSPM 為 100 %。若實際輸出功率與額定功率比值位於操作曲線範

圍外，則 SBSPM 為 100 %減去實際輸出/入功率與額定功率比值與該相應頻率下最近操作曲線輸出/入功率比值之差的絕對值。計算方式如式(8)所示。服務品質指標詳見表 2.5.4。

$$SBSPM = \left| \frac{P_{measured} - (P_{Target\ regulation} + P_{target\ load\ shift})}{P_{E-dreg}} \right| * 100\% \quad (8)$$

P Measured：該秒鐘交易表計實際量測值；PE-dReg 為該得標小時之得標容量；P RegulationTarget：該秒鐘應提供之頻率調節功能執行容量；P LoadShiftTarget：電能移轉排程或調度指令所指定於該秒鐘應提供之充電或放電量。

表 2.5.4:服務品質指標

每小時執行率	服務品質指標
小時滾動執行率 $\geq 95\%$	1
小時滾動執行率=94%	0.8
小時滾動執行率=93%	0.6
小時滾動執行率=92%	0.4
小時滾動執行率=91%	0.2
70% $\leq$ 小時滾動執行率 $\leq 90\%$	0
小時滾動執行率 $< 70\%$	-1

➤ 價金計算方式

本次研究調頻備轉價金計算方法都由式(9)所計算，差別在於效能費及電能服務費，本次模擬計算皆以下列金額計算:sReg 的效能費為 275 元/MWh，dReg 和 E-dReg 為 375 元/MWh，而這三種只有 E-dReg 有電能服務費是由該時段應該充/放電做計算，由每秒平均功率做計算，充電電能服務費為 500 元/MWh，放電電能服務費為 2000 元/MWh。容量費依照近期結標金額做計算調頻備轉價金為 369 元/MWh，E-

dReg 價金為 600 元/MWh，值得探討的是 E-dReg 結標價金達到上限 600 元並已經持續一段時間了。

$$\text{價金} = \sum_{d=1}^{\text{當月天數}} \sum_1^{24} (\text{容量費} + \text{效能費}) * \text{服務品質指標} + \text{電能服務費} \quad (9)$$

參、主要發現與結論

一、具負載預測策略補充備轉模擬分析

(一) 負載預測模擬測試

本計畫以 111 年 9 月至 112 年 3 月由核研所微電網中所量測記錄之資料進行分析與預測利用。原始量測記錄之負載功率如圖 3.1.1 至圖 3.1.7。由所蒐集資料可發現，約莫於 10 月中前的夏季時間，每日負載用電尖峰經常可超過 3 MW；10 月中至 11 月底前，每日負載用電尖峰約在 2.5 MW 至 3 MW 間；12 月起至隔年 3 月底前的冬季時間，每日負載用電尖峰約在 2.5 MW 以下，中間出現低於 1 MW 之用電乃逢農曆春節假期。由此可見，季節變化對於核研所之用電亦有所異。考量近年來機學習方法在預測應用議題中有著顯著之表現，因此本計畫擬以深度學習方法之開發設計進行負載預測。在資料蒐集完畢且在進行數據分析及建置模型訓練前，還有一些重要步驟需要進行，統稱為資料前處理(Data Pre-processing)，因蒐集到的資料可能包含文字、數值等特徵，這並不一定是適合數學模型存取之形式，此階段的過程也被稱為 ETL(Extract-Transform-Load)，其主要目的為將蒐集到之資料調整為適合模型訓練的輸入。

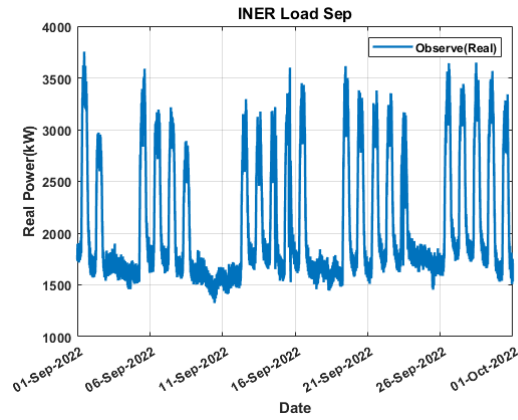


圖 3.1.1:2022/09/01 至 2022/09/30 負載量

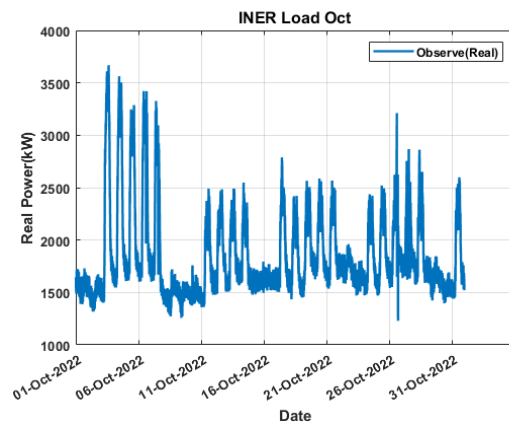


圖 3.1.2:2022/10/01 至 2022/10/31 負載量

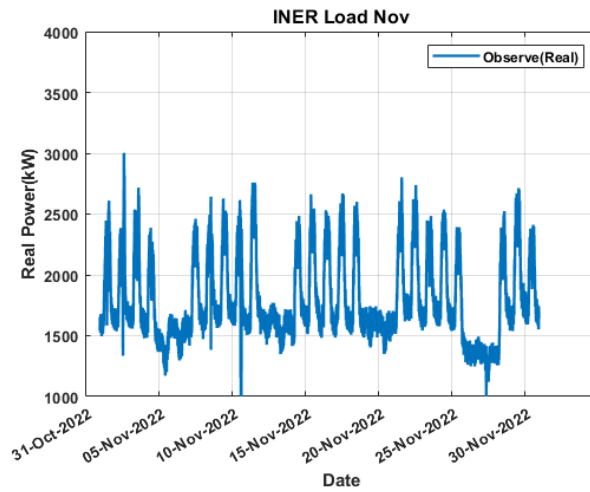


圖 3.1.3:2022/11/01 至 2022/11/30 負載量

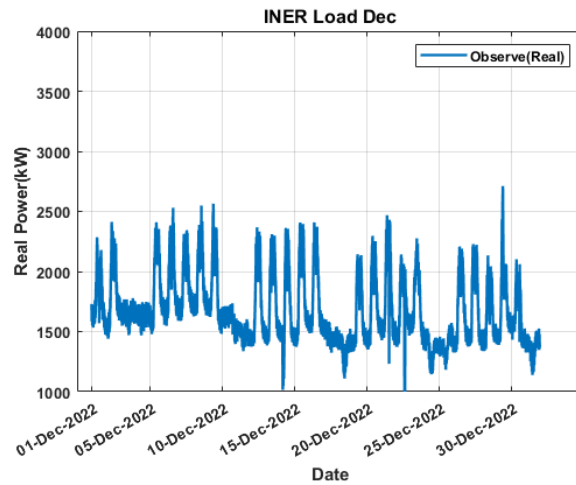


圖 3.1.4:2022/12/01 至 2022/12/31 負載量

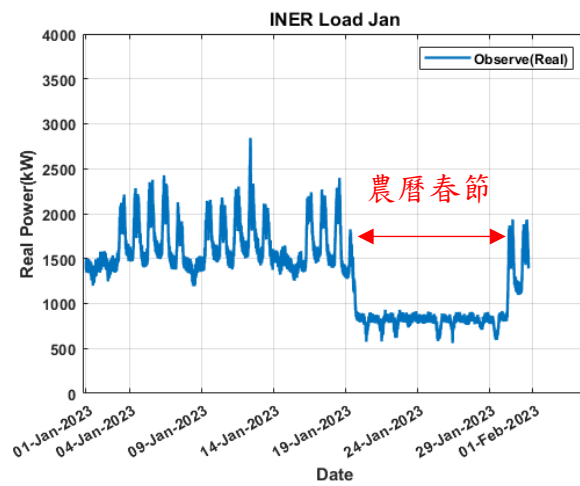


圖 3.1.5:2023/01/01 至 2023/01/30 負載量

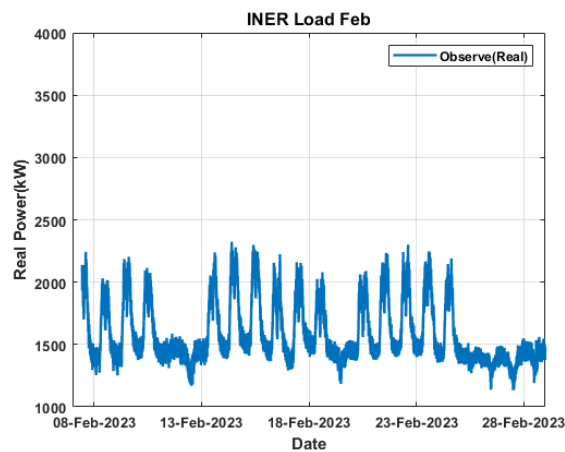


圖 3.1.6:2023/02/08 至 2023/02/28 負載量

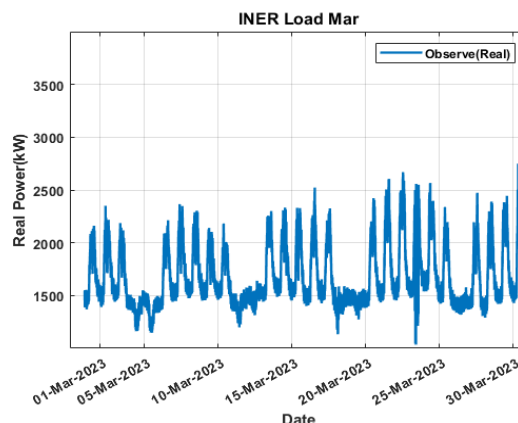


圖 3.1.7:2023/03/01 至 2022/03/30 負載量

➤ 資料清洗

檢查蒐集到的資料中是否存在缺失值、異常值或重複值。在實務過程中，可能因量測器具有損壞、不穩定，或設備老舊造成電腦延遲而導致資料有上述情形發生，這些情況是常見發生的，缺失值係指資料中某些屬性的值為空欄位或未知，異常值則是與其他數據明顯不同的極端值，或依據對該資料的認知及判斷，不可能存在的數值等。在進行資料分析前，需對這些問題先進行處理，如填補缺失值、修正或移除異常值，確保資料的正確及完整性。本計劃之負載預測蒐集資料中，類型為時間序列資料，為確認該負載數據尖離峰時段、以及是否有不符實際資料的異常值或資料缺失等問題，原始資料時間刻度為 10 秒鐘一筆，使用負載實功做為特徵。檢視後發現 2023/01/31 至 2023/02/07 期間資料及數點資料遺失，使用線性插值法將該數點資料進行補值，如圖 3.1.8 所示，而因負載有尖離峰特性，故不使用插值法對上述遺失資料時間段進行補值，直接將其剔除。

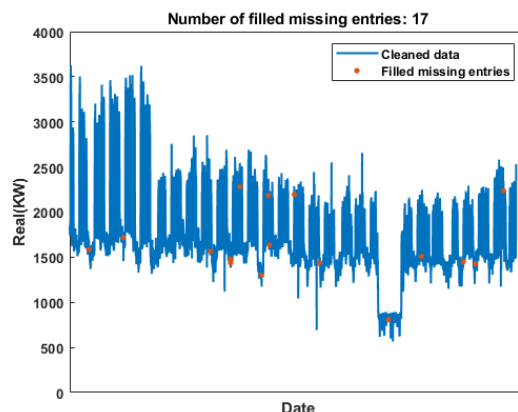


圖 3.1.8:檢視資料缺失並補值

➤ 資料串接

資料串接係指將多份資料合併成一數據集，這裡以時間序列資料舉例說明，蒐集相關時間序列資料可以由各種來源取得，如感測器、交易紀錄、文本等。將蒐集到之時間序列資料按照時間順序進行排序，確保資料正確時間排序。本次計劃所取得資料為一個月一份檔案，需先將其合併後得到一數據集，示意如圖 3.1.9 所示，以確保資料量足夠大用於訓練模型。

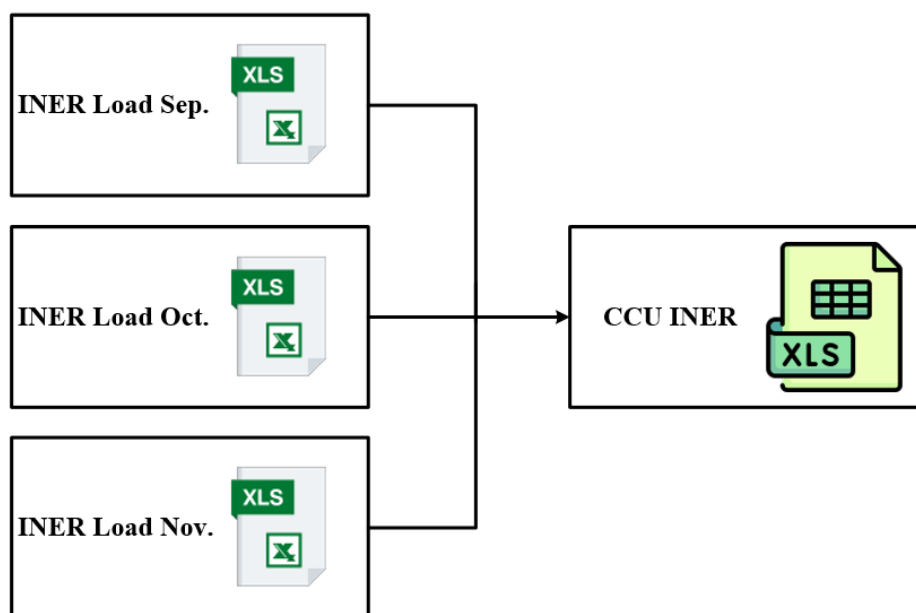


圖 3.1.9:時間序列資料串接

➤ 資料重取樣

在時間序列分析中，資料重取樣(Data retine)是根據欲解決之問

題，在不同的任務下，會有不同時間刻度被應用，重取樣用於將原始時間序列資料調整為新的時間間隔或頻率。重取樣方法也依據原始資料的特點和目標分析的需求選擇合適的取樣方法，常見方法包括平均、總和、插值方法等。本計劃負載預測取得資料為 10 秒鐘一筆，但因模擬預測的時間間隔為 15 分鐘，故必須將其重新調整與模擬情境相同之時間刻度，將其結果繪製出如圖 3.1.10，在前述初步對資料進行檢視時發現有小部份資料遺失，故使用線性插值法對其進行補值呈現在時間軸繪圖上如圖中紅框內所示，因負載量有尖離峰時段，使用此方法作為一段時間遺失之輸入特徵的數值可能會導致預測值有所失真，故這些補值的資料不會交由模型訓練。

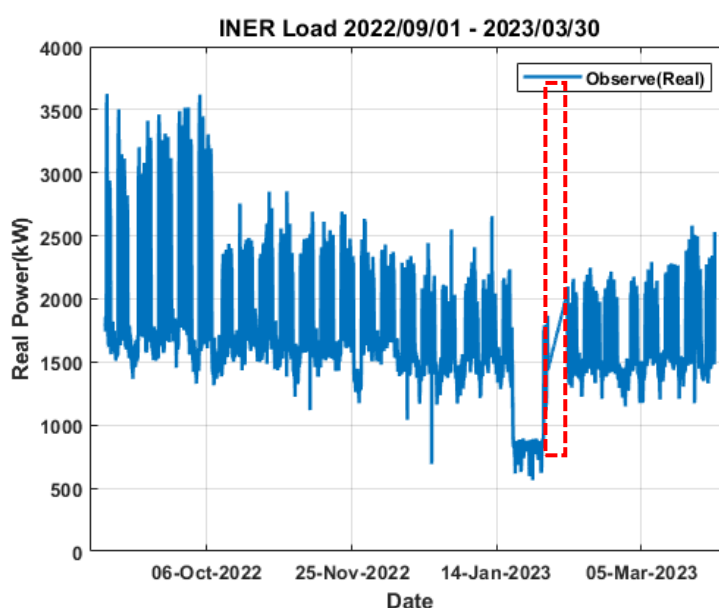


圖 3.1.10: 2022/09/01 至 2023/03/30 重取樣後之 INER 用電資料

➤ 資料轉換

將原始資料進行處理及轉換，為進行深度學習模型訓練前必要之步驟，其目的為滿足模型假設及特定分析，能夠更好的讓模型實現計算。資料中不同變數因常有不同的單位、不同大小數值範圍，若將原始資料不經處理直接放入模型使其計算，導致權重偏向某特徵，勢必會影響分析結果。以下將描述本計畫負載預測資料轉換方法及步驟，

標準化(Normalization)為將數據按照一定比例大小縮放，使其能符合特定範圍亦或是分布，常見方法像是 Z-Score 標準化，以及本計劃使用之最大最小值標準化(Min-Max Normalization)如式(10)，該方法將數據縮放至[0,1]大小範圍之間，標準化後的輸入與輸出如圖 3.1.11 所示

$$X_{norm}(i) = \frac{X(i)-X_{min}}{X_{Max}-X_{min}} \in (0,1) \quad (10)$$

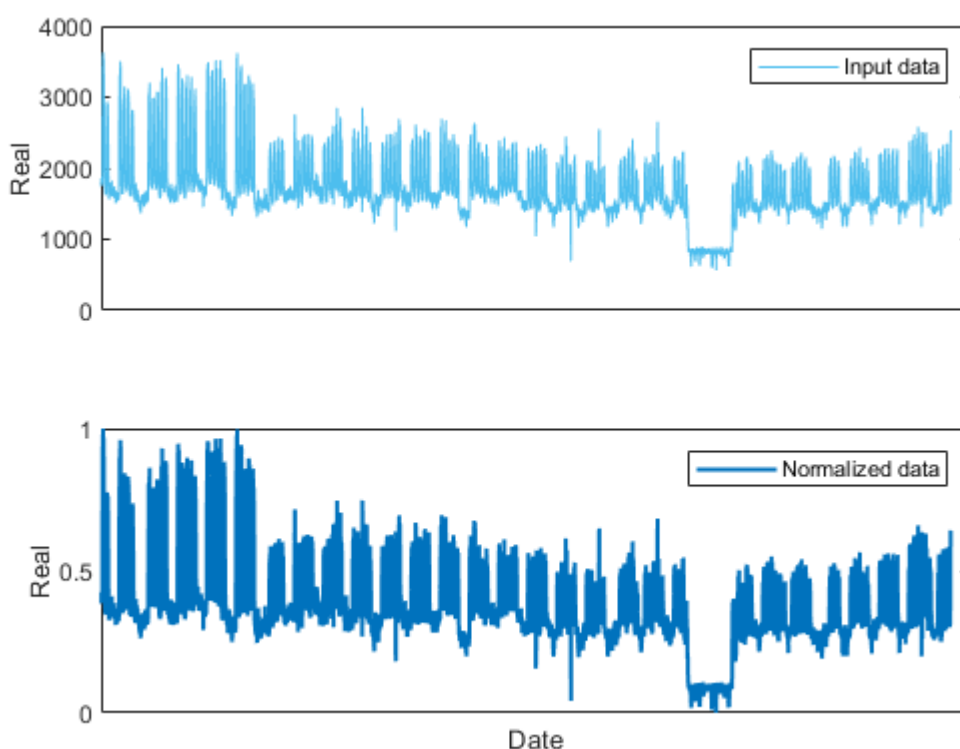


圖 3.1.11:實功標準化前與後對比圖

因本計劃之負載預測為時間序列資料，將時間當作輸入資料作為深度學習方法之特徵，時間資料為明確資料特徵，時間標記(Time stamp)以 One-Hot Vector Encoding 方式進行編碼，該方式將時間特徵轉換為 $1 \times N$ 維度之向量，在序列資料中第 n 個點位置編碼為 1，剩餘序列資料則標示為 0。本計劃所輸入時間資訊為每日 0:00 至 23:45，每 15 分鐘為一時間步階，故一天共有 96 個時間點，如圖 3.1.12 所示。

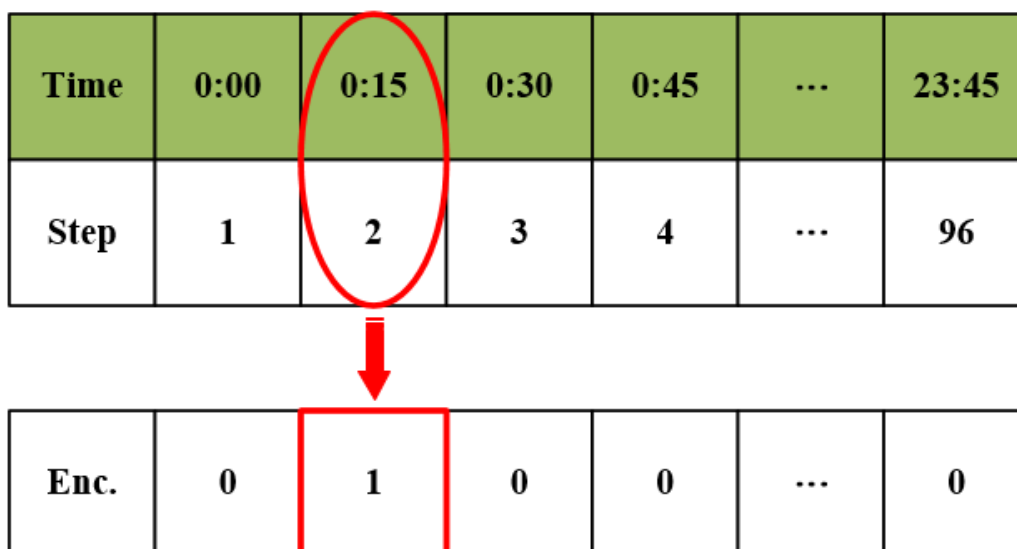


圖 3.1.12:One-Hot Encoding 示意圖

➤ 資料分割

資料分割是在進行深度學習模型訓練前必須要進行之步驟，以本案例描述，目的為將處理完成的數據集分為三部份，分別為訓練集、驗證集和測試集，以利後續進行模型的訓練、調參及評估。訓練集用於模型訓練時的數據子集。在時間序列相關問題中，常將訓練集作為最早時間段，使之模型能夠學習數據集中時間序列的模式。訓練集必須包含足夠多的樣本，方能使訓練時的誤差損失完整收斂，也能使模型學習到更多參數量。驗證集目的為訓練過程中調整模型相關超參數、選擇最佳模型的數據子集。驗證集的時間段通常介於訓練集和測試集之間，以確保對模型進行合理的評估。測試集用於訓練後最終評估模型性能的數據子集。目的為評估模型在未見數據上的泛化能力及預測能力。本計劃之負載預測將前述完成好之數據集分為前 70%為訓練集，為 2022/09/01/00:00 至 2023/01/21/14:15 時間段，後 30%分別為驗證集和測試集，即剩餘時間段至 2023/03/30/09:30。

➤ 深度學習模型架構

本計畫使用兩種深度模型架構作為訓練並進行預測，分別為長短期記憶(Long Short Term Memory, LSTM)及門控循環單元(Gated Recurrent Unit, GRU)。LSTM 為常見深度學習中的循環神經網路改進

之模型，廣泛應用於自然語言處理、語音識別、以及本計劃負載預測之時間序列問題等領域，此模型於解決長期依賴性和梯度消失等問題上具有更好之適應能力，以下講解該模型細部關鍵，此模型核心為三個閥門(Gate)分別為輸入閥、遺忘閥、輸出閥及候選記憶(Memory)組成，可以將此四個單元視為類神經網路中神經元(Neuron)的部分，輸入閥確定將哪些信號添加到記憶中。使用計算輸入數據和前一個時間步的隱藏狀態的線性組合，再通過 *Sigmoid* 函數如式(11)及圖 3.1.13 生成一個 0 到 1 之間的輸入門向量，同時還使用 *tanh* 函數如式(12)及圖 3.1.14 生成一個-1 到 1 間的候選記憶向量，輸入門向量與候選記憶向量相乘，決定要添加到記憶中的新信號。遺忘閥決定記憶中該刪除哪些信號，計算方式為輸入數據及前一個時間步隱藏狀態的線性組合，再通過 *sigmoid* 函數產生一個 0 到 1 之間的遺忘門向量。該向量決定了記憶單元中的保留程度。輸出閥決定要將哪些記憶信號傳遞到下一個時間步的隱藏狀態。使用輸入數據和前一個時間步的隱藏狀態的線性組合，通過 *sigmoid* 函數生成一個 0 到 1 之間的輸出向量。同時使用 *tanh* 函數對記憶單元的輸出進行正規化，生成一個-1 到 1 之間的輸出向量，兩者相乘則得到最終的隱藏狀態。

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \in (0,1) \quad (11)$$

$$\tanh(x) = \frac{1-e^{-2x}}{1+e^{-2x}} \in (-1,1) \quad (12)$$

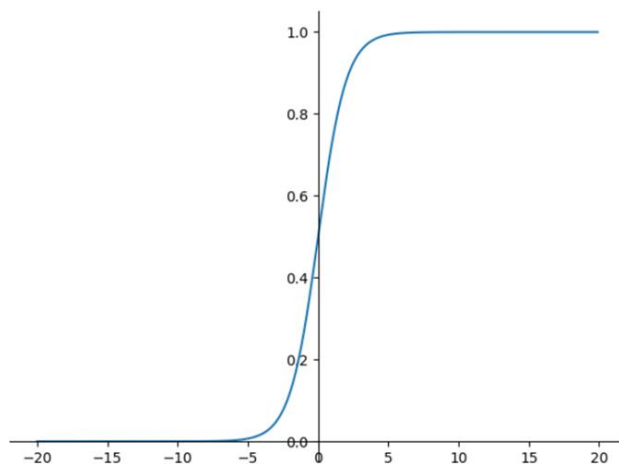


圖 3.1.13: *Sigmoid* 非線性函數

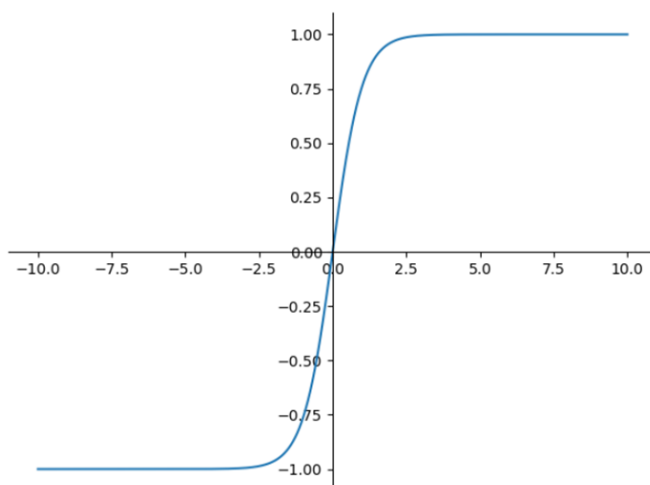


圖 3.1.14: *tanh* 非線性函數

GRU 為 LSTM 模型改進，具有更簡單之結構，參數量也相對較少，使得再計算時間上能夠更快速執行收斂。以下講解該模型細部關鍵，GRU 使用兩個閥門，分別為重置閥及更新閥。重置閥目的用於篩選欲重設的上一時間步階之隱藏層狀態信號，更新閥則用於分配上一時間步階隱藏層狀態與臨時隱藏層狀態之間比例，用於更新欲輸出至下一隱藏層與下一時間步階循環的隱藏層狀態信號。

➤ 性能指標

欲了解預測後之結果，須使用模型常用相關指標來判斷，本案例中時間序列負載預測任務為數值型回歸任務，常使用誤差損失(Loss)

來判斷模型優劣，以下說明本計劃中使用的三種判斷性能指標。平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)為常見用於回類型之性能指標，用於衡量預測值與實際量測值之間的平均絕對誤差，如(13)所式，MAE 值越小，代表模型效能越高，它以與原始數據相同的單位表示誤差，而不是平方轉換，使模型更加容易解釋。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\hat{y}_t - y_t| \quad (13)$$

其中 n 代表樣本數， $\hat{y}_t$ 代表預測值， y_t 代表量測值。均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)是預測值和實際觀測值之間誤差的均方根值，如(14)所示，它表示預測值和實際觀測值之間的平均誤差大小。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}{n}} \quad (14)$$

其中 n 代表樣本數， $\hat{y}_t$ 代表預測值， y_t 代表量測值。正規化均方根誤差(Normalized Root Mean Square Error, nRMSE)係指經正規化後 RMSE，如(15)所示，nRMSE 值越小，代表模型效能越高。

$$nRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \quad (15)$$

其中 y_{max} 代表預測最大值， y_{min} 代表預測最小值。

測試情境及結果

前述提及，將數據集前 70% 分割為訓練資料，後 30% 分為驗證集及測試集，將 LSTM 及 GRU 預測結果繪製出如圖 3.1.15 至圖 3.1.18 及表 3.1.1 所示。

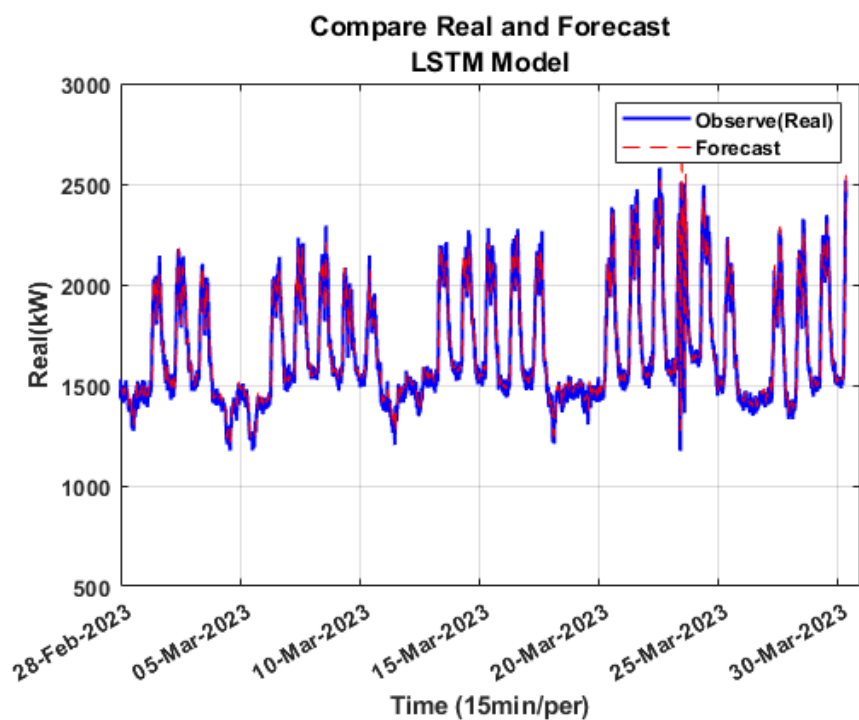


圖 3.1.15:LSTM 預測結果與測量結果比較(測試集)

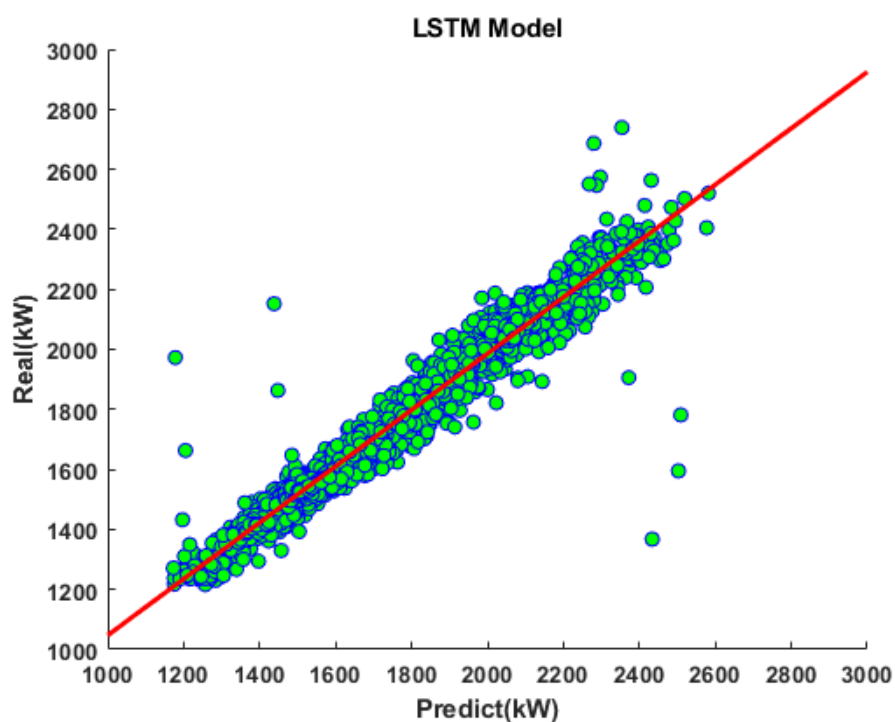


圖 3.1.16:LSTM 預測結果與測量結果之回歸程度(測試集)

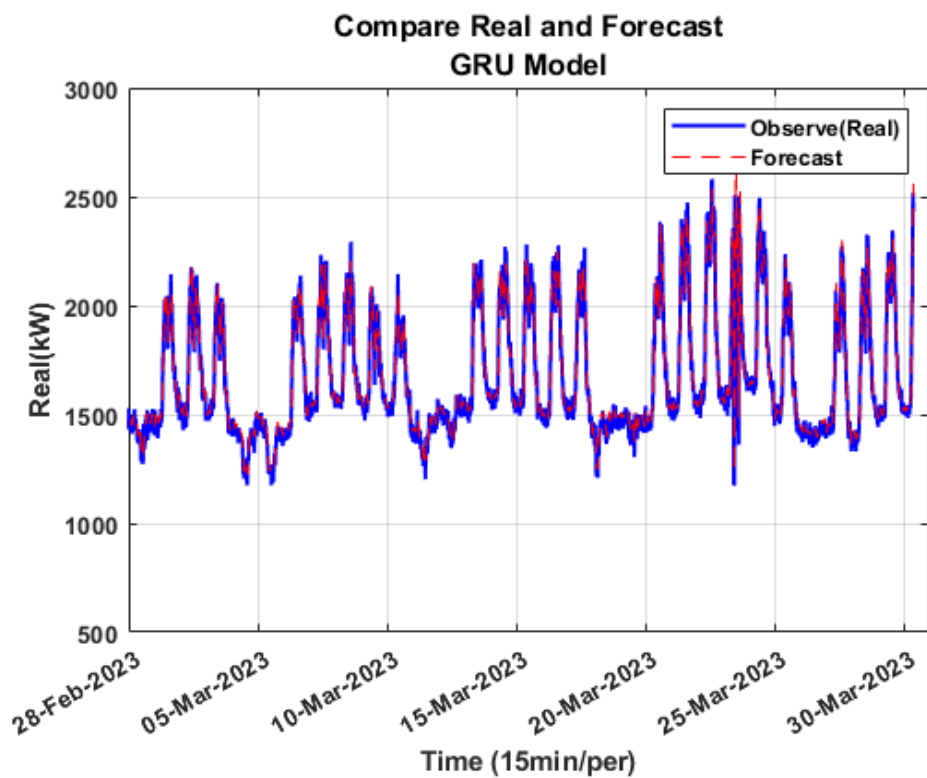


圖 3.1.17: GRU 預測結果與測量結果比較(測試集)

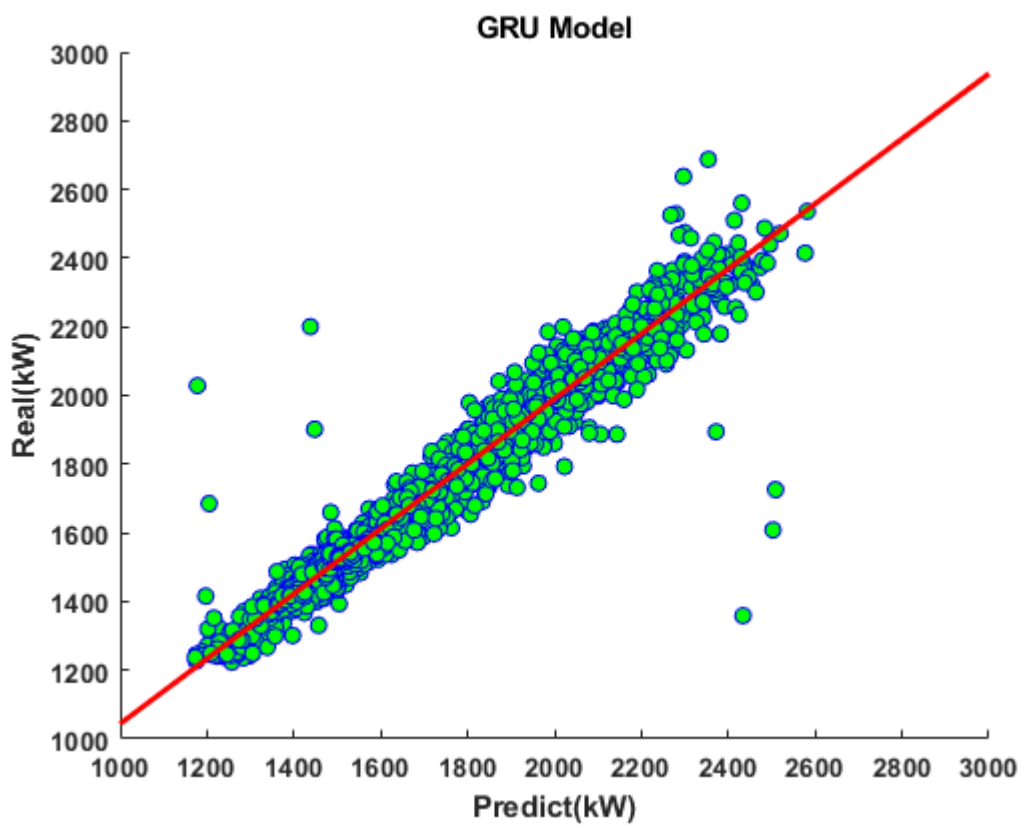


圖 3.1.18:GRU 預測結果與測量結果之回歸程度(測試集)

表 3.1.1:預測結果性能指標(測試集)

模型	MAE	$RMSE$	$nRMSE$
LSTM	35.3367	60.0023	3.94%
GRU	36.9268	62.2000	4.25%

(二)正常夜尖峰負載與正常儲能電量(SOC:55%)之補充備轉模擬

該案例使用預測後的負載來進行初步分析，沒有使用負載預測策略與使用過負載預測策略的對比，假設初始電量設為 55，預測後之負載與原始負載對比圖、散佈圖及照度資料如圖 3.1.19 至圖 3.1.21 所示。

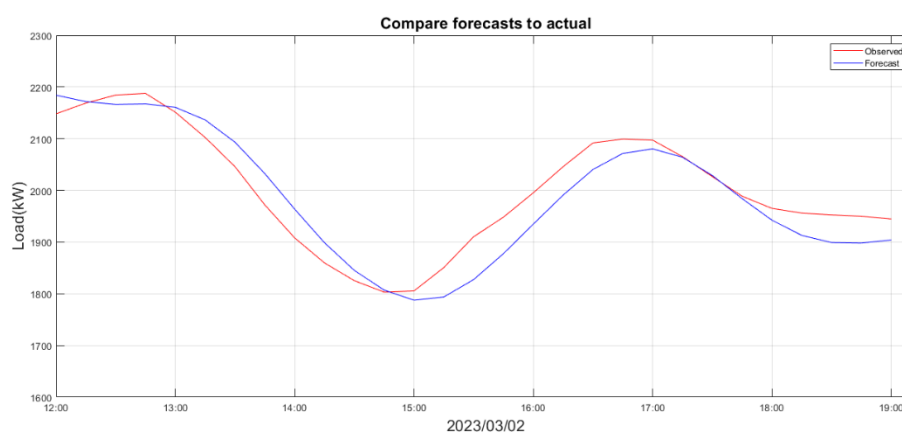


圖 3.1.19:2023/03/02 原始負載與預測後負載對比圖

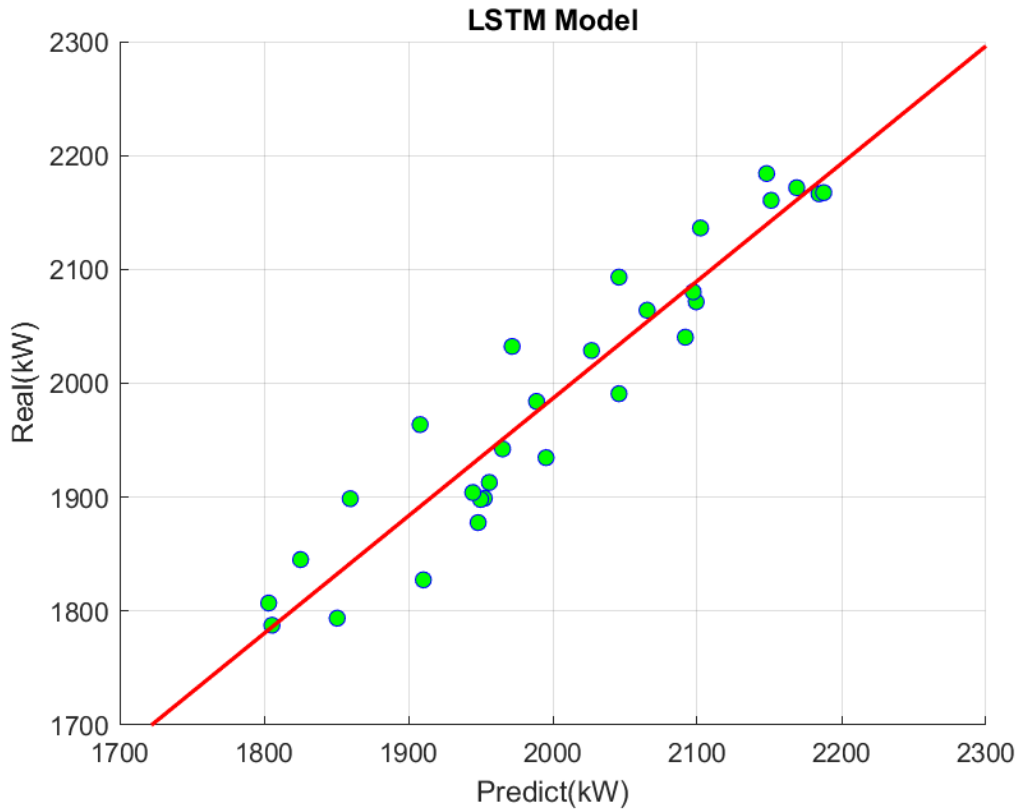


圖 3.1.20:2023/03/02 原始負載與預測後負載散佈圖

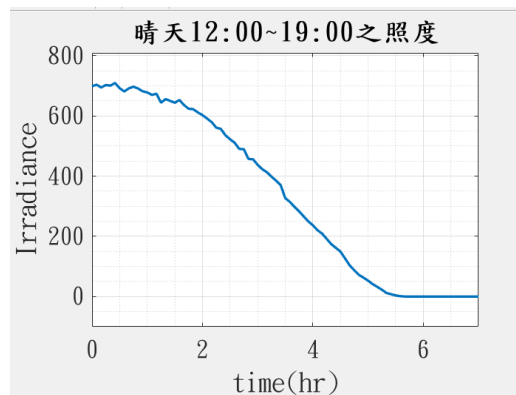


圖 3.1.21:照度資料

負載與照度將利用圖 3.1.19 的預測結果與圖 3.1.21，先進行沒有使用預測策略的案例 12 點 00 分到 19 點 00 分之資料進行模擬並假設控制中心於下午 3 點 30 分時接收到調度指令後開始執行 1 MW 需量反應，先啟動 750W 柴油發電機並於反應期間倒數 5 分鐘時才啟用儲能設備協助服務，目的是減少儲能電量不必要之消耗，各資源輸出功率如圖 3.1.22 所示，由於負載逐漸上升，所以大約於下午

4 點 30 分開啟第二台柴油發電機與加開三台微型渦輪機以減輕儲能的壓力，接著於下午 6 點 00 分時因執行服務結束而關閉所有發電機並令兩儲能進行充電從而準備下次調度，儲能電量的變化如圖 3.1.24 所示。使用預測策略在進行補充備轉服務前先利用市電將儲能系統充電到建議電量以準備應付接下預測到的上升負載，這邊計算過建議電量為 65，可以看到電量因策略在執行前進行充電而上升，接著在補充備轉期間下降，接著因補充備轉結束對兩儲能進行充電而上升，兩者差別在於在沒有使用預測策略的案例中電量一度快掉到 20，本系統設定電量到 20 會緊急切掉以保護儲能系統，有使用預測策略的案例則離 20 有一段距離，其各資源輸出功率及儲能電量的變化如圖 3.1.23 及圖 3.1.25 所示。

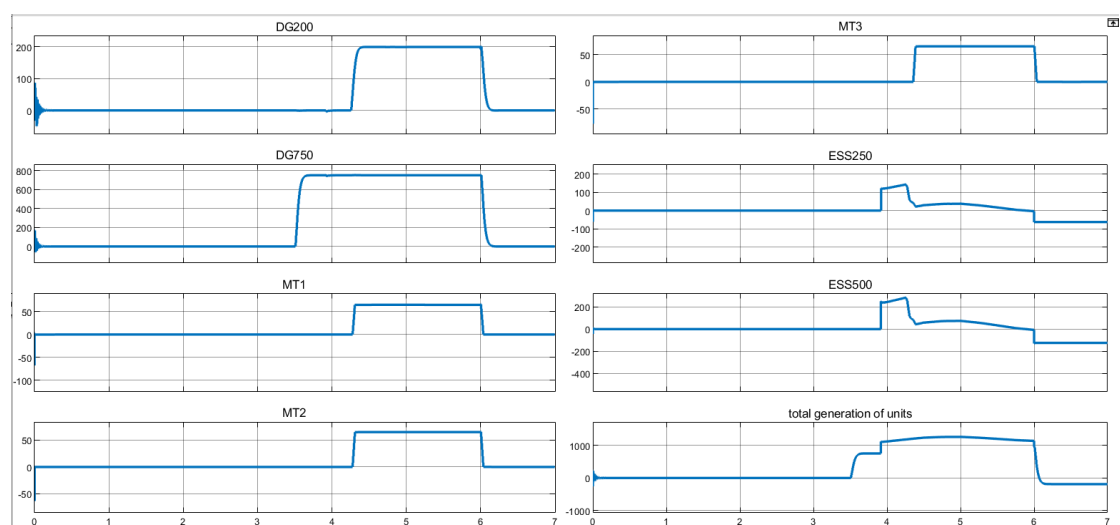


圖 3.1.22:發電機與儲能輸出功率

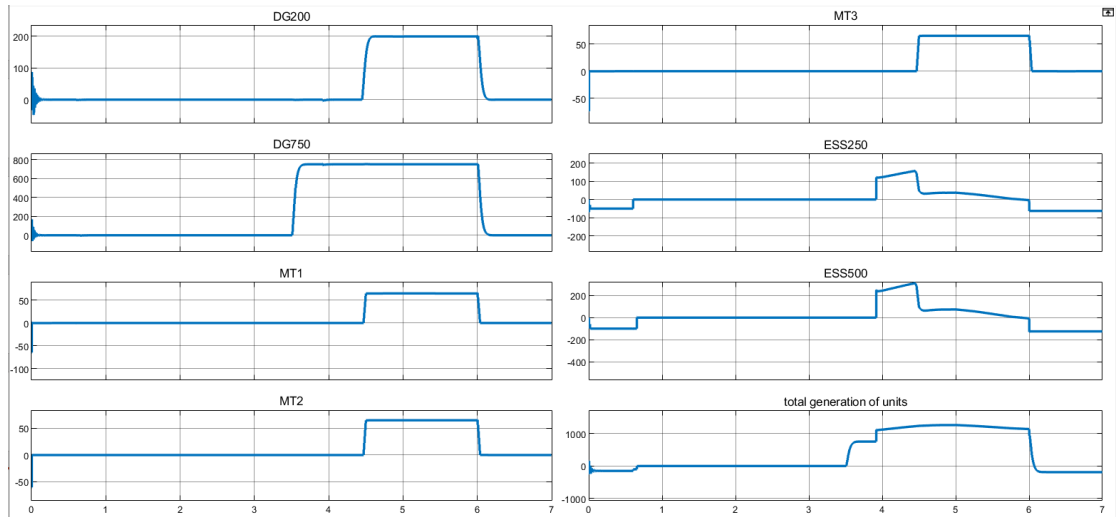


圖 3.1.23:發電機與儲能輸出功率

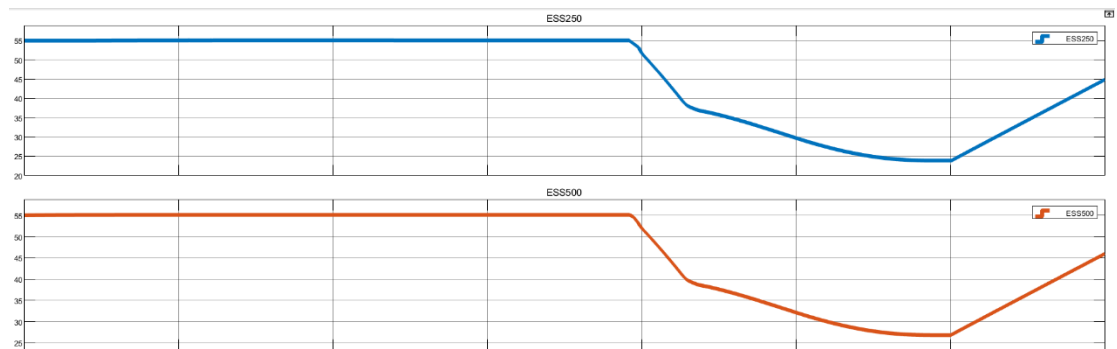


圖 3.1.24:儲能電量變化圖

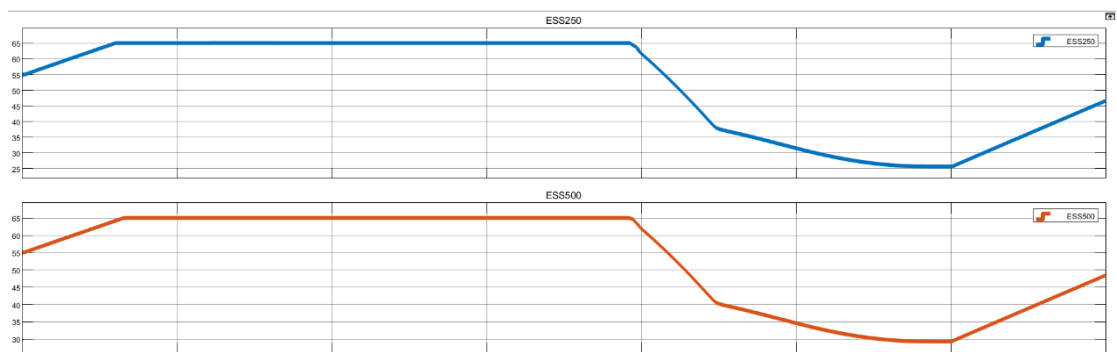


圖 3.1.25 :儲能電量變化圖

兩種案例補充備轉的整體功率表現如圖 3.1.26 及圖 3.1.27 所示，從圖 3.1.27 可知在執行前使用市電來對儲能充電，可以看到儲能發電(黃線)呈負數直到充到建議電量，執行期間微電網內部負載(紅線)逐漸上升接著在執行後期下降，補充備轉執行主要以發電機與儲能設備

發電(黃線)來抑低市電流入微電網功率(藍線)，由於儲能在反應期間結束前五分鐘才協助執行務，故在接獲調度後 25 分鐘時市電功率才良好抑低至用戶基準容量以下 1 MW，用戶基準容量(紫線)為接獲調度前 5 分鐘之市電功率平均值，持續間各類總輸出功率數值如表 3.1.2 及 3.1.3 所示，持續期間每分鐘執行率如圖 3.1.28 及圖 3.1.29 所示。

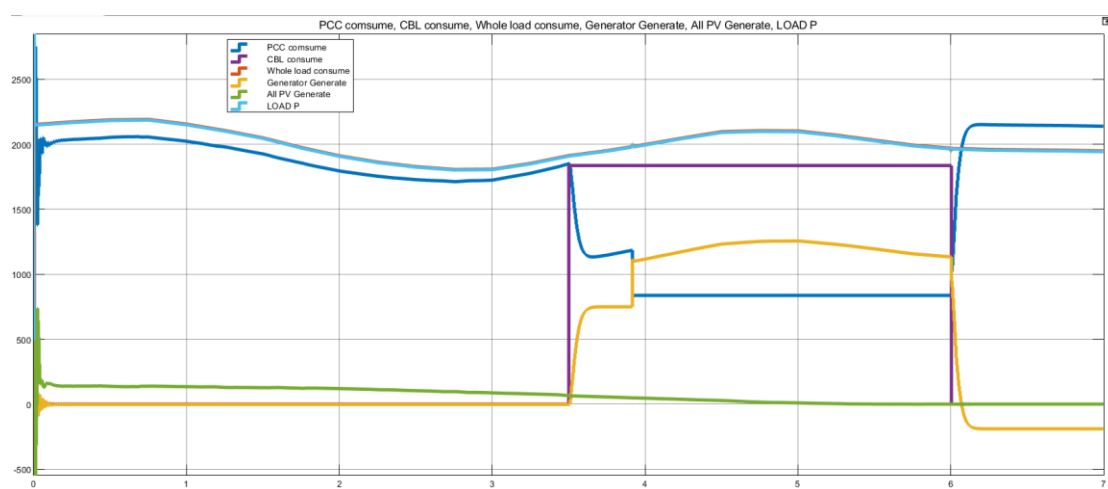


圖 3.1.26: 微電網總輸出功率圖

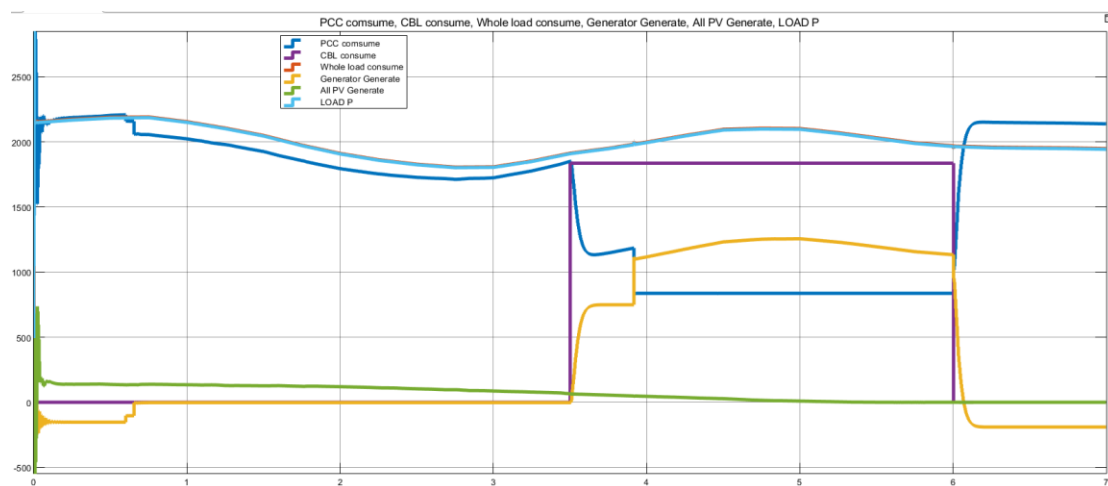


圖 3.1.27: 微電網總輸出功率圖

表 3.1.2:補充備轉持續期間之功率輸出

模擬時間	市電功率(kW)	總發電量(kW)	太陽能(kW)	整體負載(kW)	基準容量(kW)
16:00	836.8	1117	45.64	1999	1837
16:10	836.8	1156	39.96	2033	
16:20	836.8	1196	33.04	2066	
16:30	836.8	1232	27.81	2097	
16:40	836.8	1246	18.73	2102	
16:50	836.8	1254	12.03	2103	
17:00	836.8	1256	9.46	2102	
17:10	836.8	1239	5.52	2081	
17:20	836.8	1219	1.7	2057	
17:30	836.8	1194	0.3	2031	
17:40	836.8	1170	0	2006	
17:50	836.8	1144	0	1981	
18:00	836.8	1133	0	1970	

表 3.1.3:補充備轉持續期間之功率輸出

模擬時間	市電功率(kW)	總發電量(kW)	太陽能(kW)	整體負載(kW)	基準容量(kW)
16:00	836.8	1117	45.64	1999	1837
16:10	836.8	1156	39.96	2033	
16:20	836.8	1196	33.04	2066	
16:30	836.8	1232	27.81	2097	
16:40	836.8	1246	18.73	2102	
16:50	836.8	1254	12.03	2103	
17:00	836.8	1256	9.46	2102	
17:10	836.8	1239	5.52	2081	
17:20	836.8	1219	1.7	2057	
17:30	836.8	1194	0.3	2031	
17:40	836.8	1170	0	2006	
17:50	836.8	1144	0	1981	
18:00	836.8	1133	0	1970	

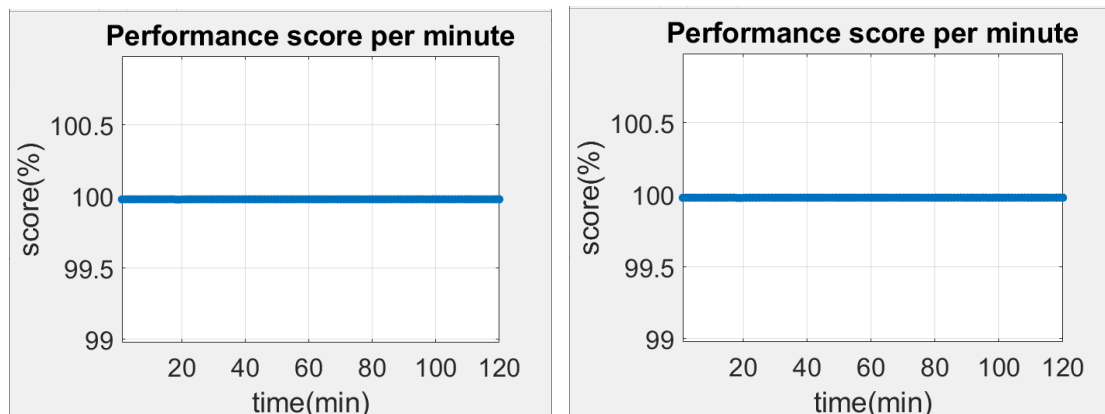


圖 3.1.28 及圖 3.1.29:補充備轉持續期間之每分鐘執行率

(三)正常夜尖峰負載與低儲能電量(SOC:30%)之補充備轉模擬

該案例使用預測後的負載來進行初步分析，沒有使用負載預測策略與使用過負載預測策略的對比，假設初始電量設為 30，預測後之負載與原始負載對比圖、散佈圖及照度資料如圖 3.1.30 至圖 3.1.32 所示。

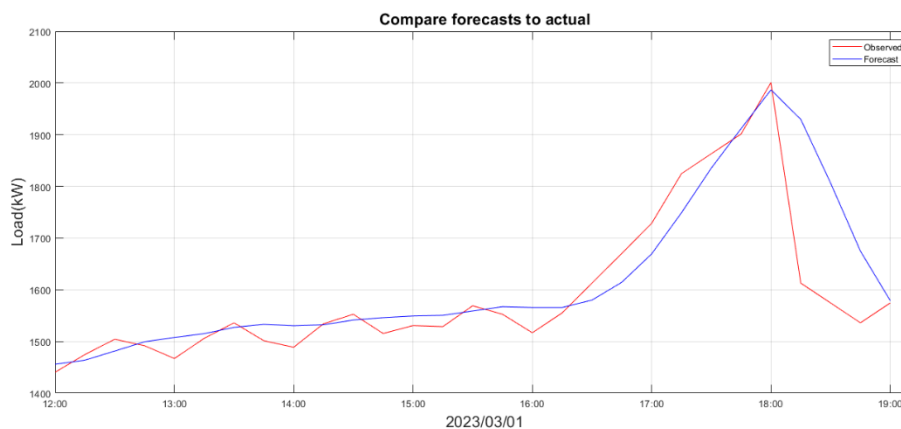


圖 3.1.30:2023/03/01 原始負載與預測後負載對比圖

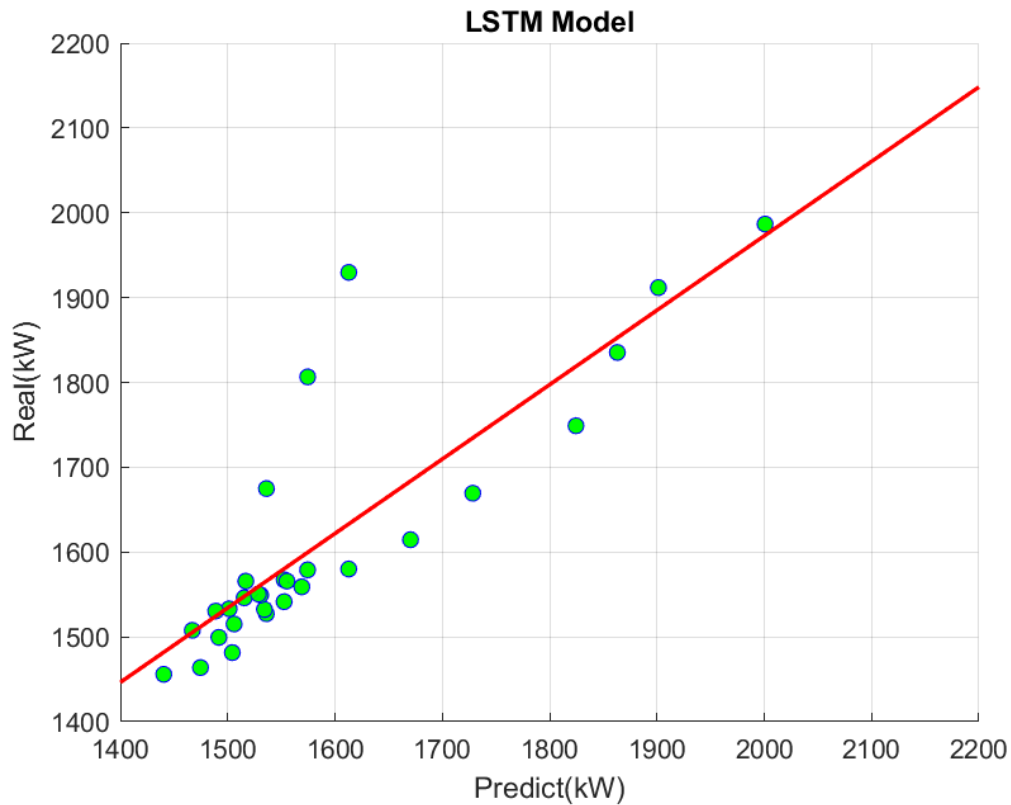


圖 3.1.31:2023/03/01 原始負載與預測後負載散佈圖

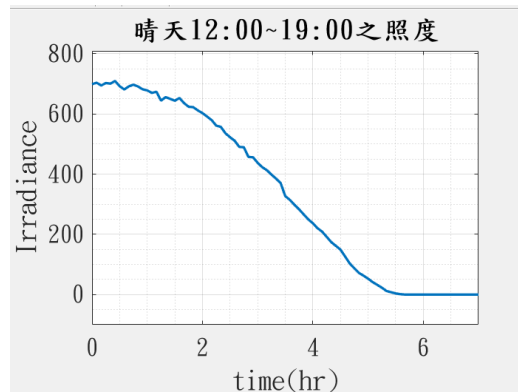


圖 3.1.32:照度資料

負載與照度將利用圖 3.1.19 的預測結果與圖 3.1.21，先進行沒有使用預測策略的案例 12 點 00 分 19 點 00 分之資料進行模擬並假設控制中心於下午 3 點 30 分時接收到調度指令後開始執行 1 MW 需量反應，由於電量過低，依先前的模型策略會將電量充到 55，接到命令

後，先啟動 750W 柴油發電機並於反應期間倒數 5 分鐘時才啟用儲能設備協助服務，目的是減少儲能電量不必要之消耗，各資源輸出功率如圖 3.1.31 所示，由於負載逐漸上升，所以大約於下午 4 點 30 分開啟第二台柴油發電機與加開三台微型渦輪機以減輕儲能的壓力，接著於下午 6 點 00 分時因執行服務結束而關閉所有發電機並令兩儲能進行充電從而準備下次調度，儲能電量的變化如圖 3.1.33 所示。使用預測策略在進行補充備轉服務前先利用市電將儲能系統充電到建議電量以準備應付接下預測到的上升負載，這邊計算過建議電量為 65，可以看到電量因策略在執行前進行充電而上升，接著在補充備轉期間下降，接著因補充備轉結束對兩儲能進行充電而上升，兩者差別在於在沒有使用預測策略的案例中電量一度快掉到 20，本系統設定電量到 20 會緊急切掉以保護儲能系統，有使用預測策略的案例則離 20 有一段距離，其各資源輸出功率及儲能電量的變化如圖 3.1.32 及圖 3.1.34 所示。

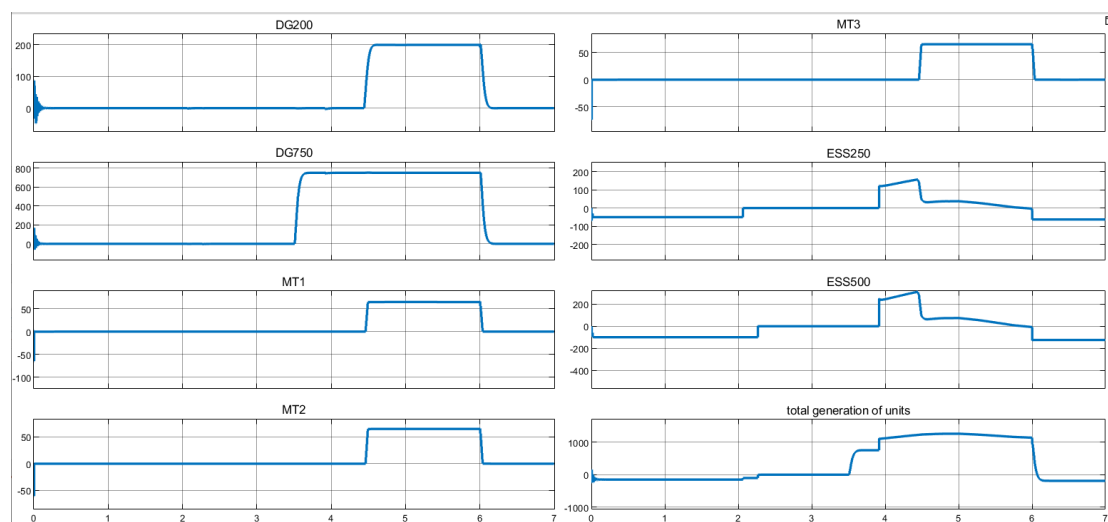


圖 3.1.31: 發電機與儲能輸出功率

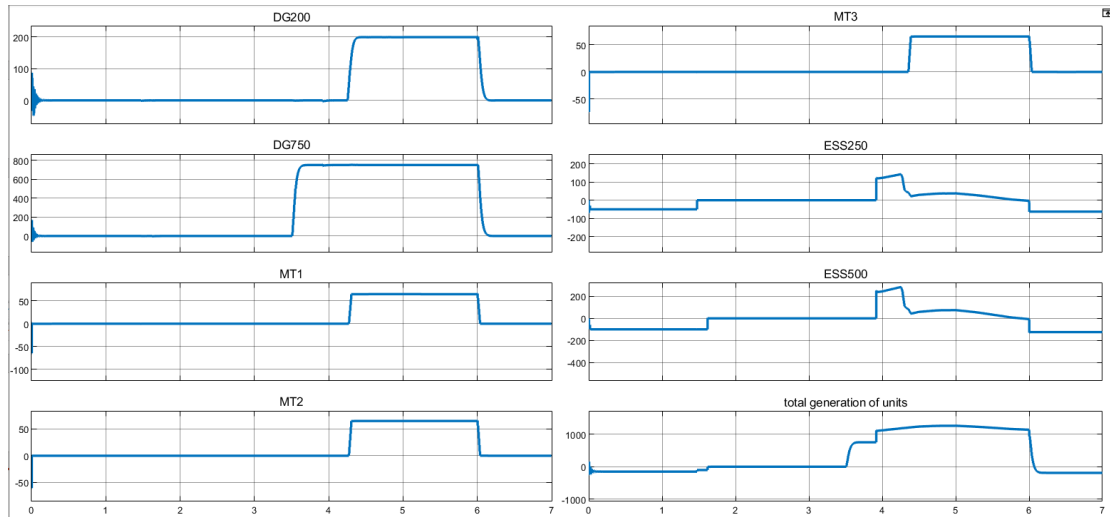


圖 3.1.32: 發電機與儲能輸出功率

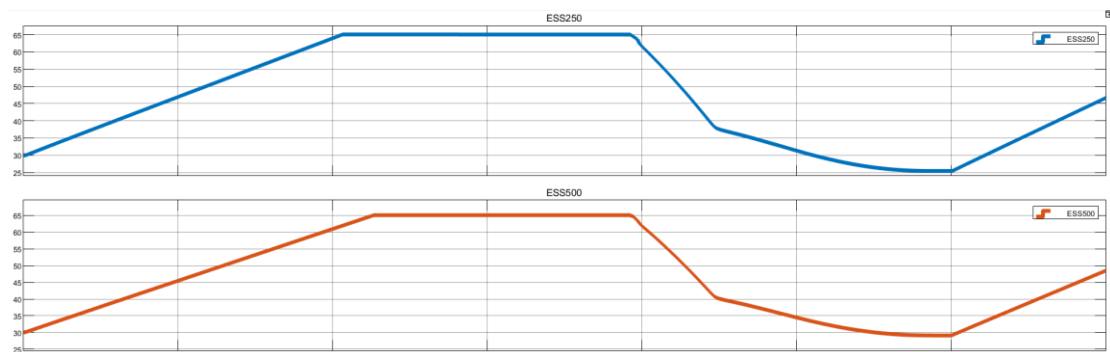


圖 3.1.33: 儲能電量變化圖

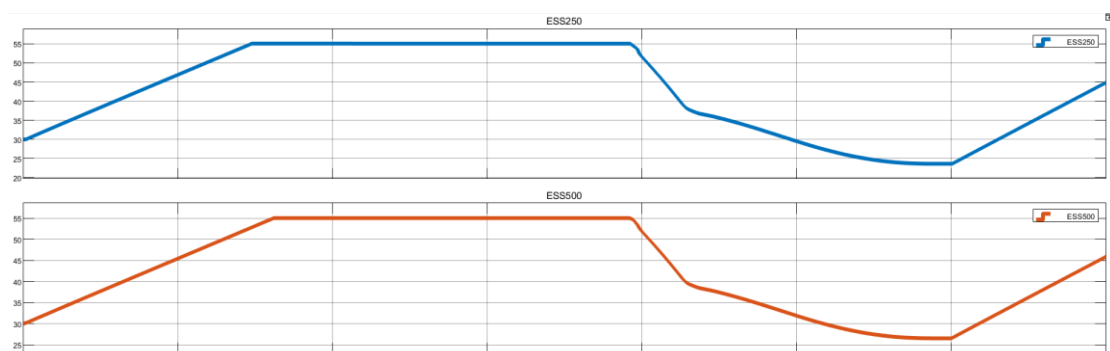


圖 3.1.34 : 儲能電量變化圖

兩種案例補充備轉的整體功率表現如圖 3.1.35 及圖 3.1.36 所示，從圖 3.1.41 可知在執行前使用市電來對儲能充電，可以看到儲能發電(黃線)呈負數直到充到建議電量，執行期間微電網內部負載(紅線)逐漸上升接著在執行後期下降，補充備轉執行主要以發電機與儲能設備

發電(黃線)來抑低市電流入微電網功率(藍線)，由於儲能在反應期間結束前五分鐘才協助執行務，故在接獲調度後 25 分鐘時市電功率才良好抑低至用戶基準容量以下 1 MW，用戶基準容量(紫線)為接獲調度前 5 分鐘之市電功率平均值，持續間各類總輸出功率數值如表 3.1.4 及 3.1.5 所示，持續期間每分鐘執行率如圖 3.1.37 及圖 3.1.38 所示。

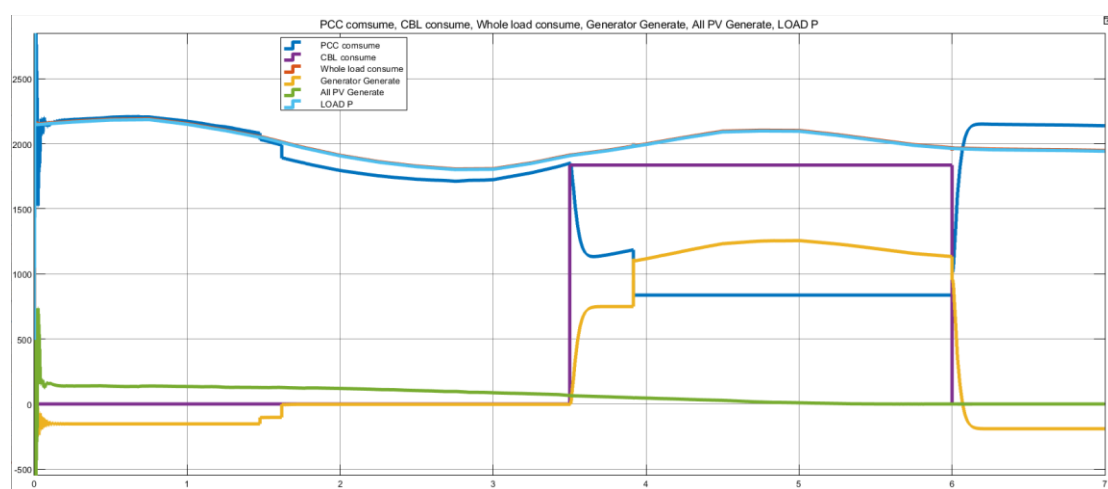


圖 3.1.35: 微電網總輸出功率圖

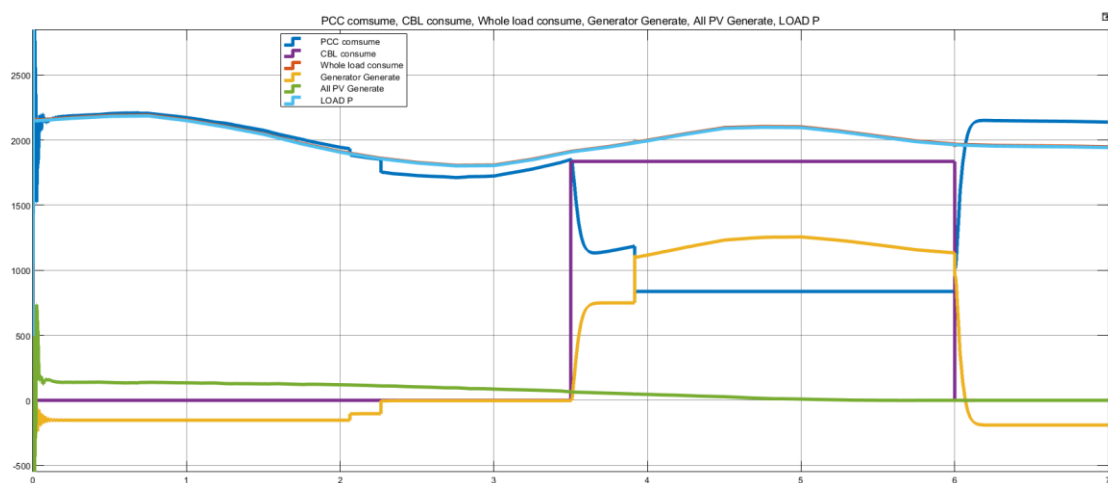


圖 3.1.36: 微電網總輸出功率圖

表 3.1.4: 補充備轉持續期間之功率輸出

模擬時間	市電功率(kW)	總發電量(kW)	太陽能(kW)	整體負載(kW)	基準容量(kW)
16:00	836.8	1117	45.64	1999	1837
16:10	836.8	1156	39.96	2033	
16:20	836.8	1196	33.04	2066	
16:30	836.8	1232	27.81	2097	
16:40	836.8	1246	18.73	2102	
16:50	836.8	1254	12.03	2103	
17:00	836.8	1256	9.46	2102	
17:10	836.8	1239	5.52	2081	
17:20	836.8	1219	1.7	2057	
17:30	836.8	1194	0.3	2031	
17:40	836.8	1170	0	2006	
17:50	836.8	1144	0	1981	
18:00	836.8	1133	0	1970	

表 3.1.5: 補充備轉持續期間之功率輸出

模擬時間	市電功率(kW)	總發電量(kW)	太陽能(kW)	整體負載(kW)	基準容量(kW)
16:00	836.8	1117	45.64	1999	1837
16:10	836.8	1156	39.96	2033	
16:20	836.8	1196	33.04	2066	
16:30	836.8	1232	27.81	2097	
16:40	836.8	1246	18.73	2102	
16:50	836.8	1254	12.03	2103	
17:00	836.8	1256	9.46	2102	
17:10	836.8	1239	5.52	2081	
17:20	836.8	1219	1.7	2057	
17:30	836.8	1194	0.3	2031	
17:40	836.8	1170	0	2006	
17:50	836.8	1144	0	1981	
18:00	836.8	1133	0	1970	

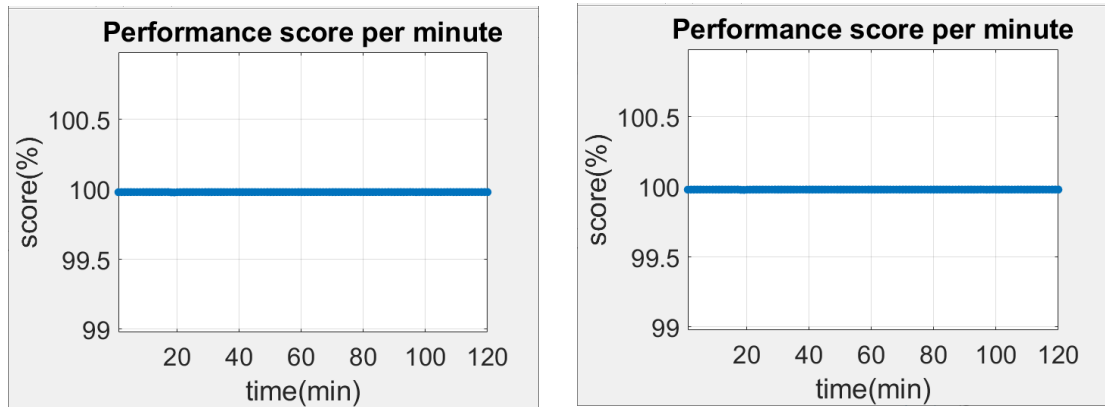


圖 3.1.37 及圖 3.1.38: 補充備轉持續期間之每分鐘執行率

二、具太陽能參與策略之補充備轉模擬分析

(一) 正常夜尖峰負載與正常儲能電量(SOC:55%)之太陽能參與補充備轉模擬

該案例使用預測後的負載來進行初步分析，假設初始電量設為 55，預測後之負載、與原始負載對比圖、散佈圖及照度資料如圖 3.2.1 至圖 3.2.3 所示。

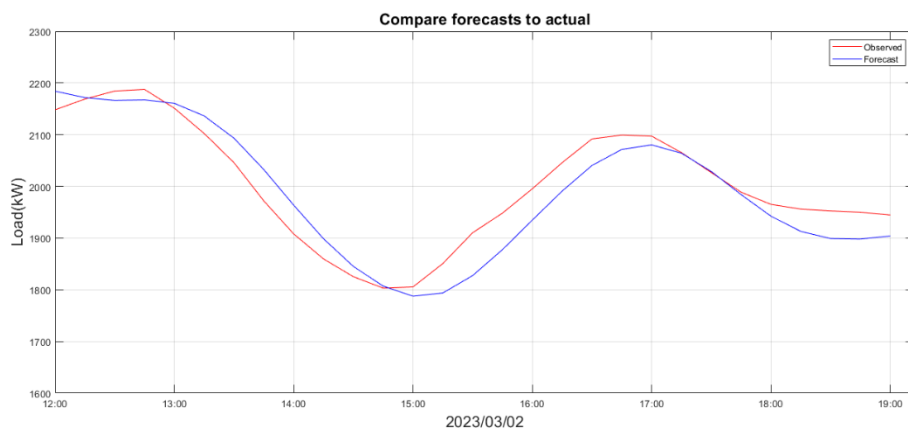


圖 3.2.1:2023/03/02 原始負載與預測後負載對比圖

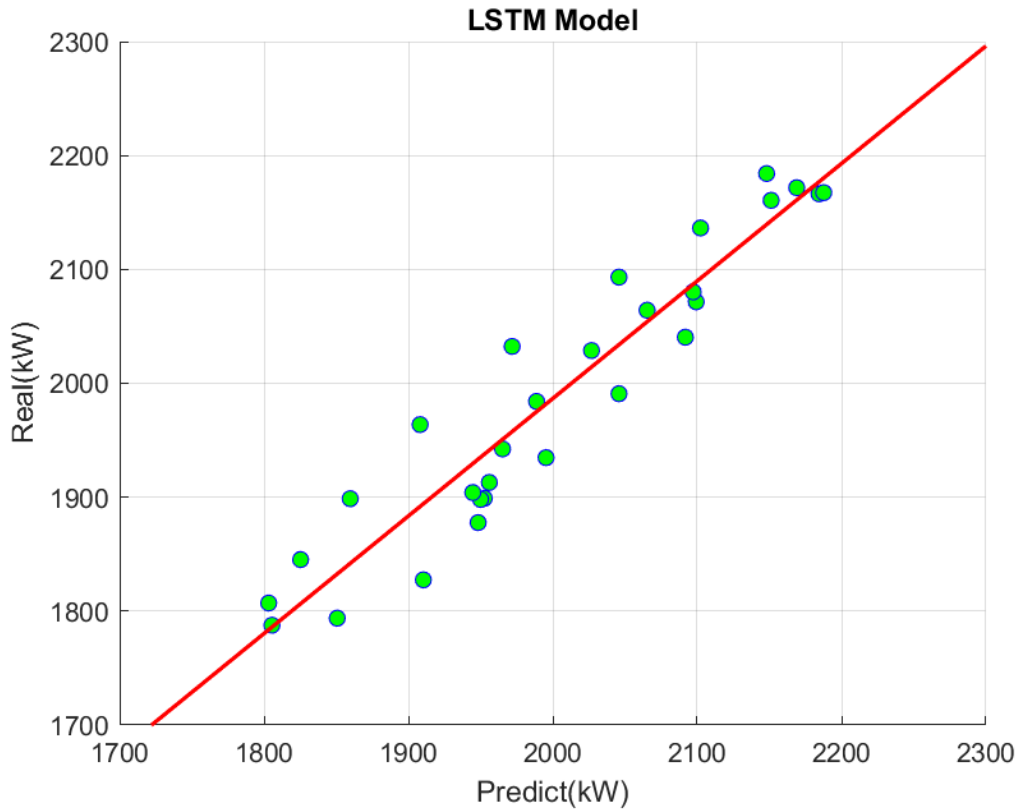


圖 3.2.2:2023/03/02 原始負載與預測後負載散佈圖

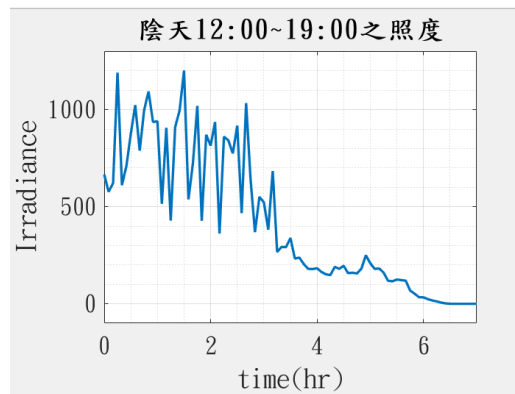


圖 3.2.3: 照度資料

該情境負載與照度將利用圖 3.2.1 與圖 3.2.3 12 點 00 分 19 點 00 分之資料進行模擬並假設控制中心於下午 3 點 30 分時接收到調度指令後開始執行 1 MW 需量反應，由於得知在補充備轉期間有個上升負載，根據計算建議電量為 65，儲能電量變化如圖 3.2.4 所示，整體微電網總輸出功率如圖 3.2.5 所示，在補充備轉前使用太陽能的能

量(綠線)進行充電，儲能功率(黃線)與太陽能(綠線)對 0 呈鏡像，以及看到市電(藍線)與負載(淺藍)重疊，說明儲能 100%是使用太陽能充電並無額外消耗市電，補充備轉期間功率表如表 3.2.1 所示，可以看到在執行 1MW 時是由太陽能出力然後再由其他發電系統發力，執行率如圖 3.2.6 所示。

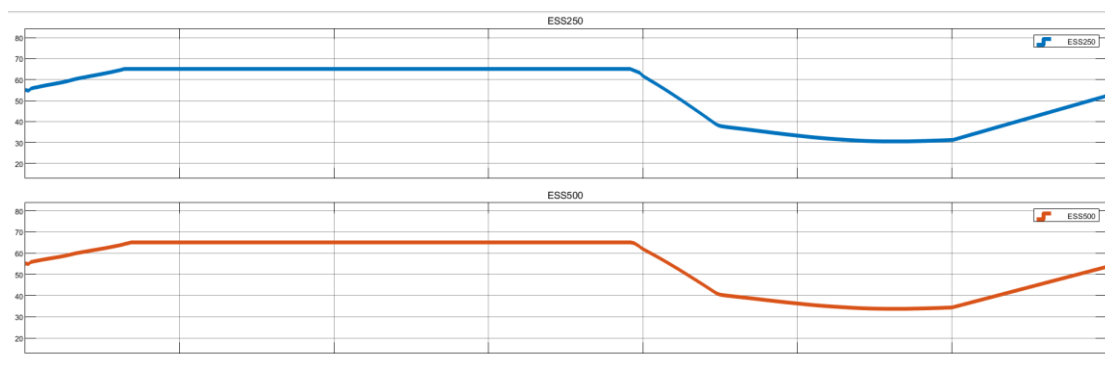


圖 3.2.4:儲能電量變化圖

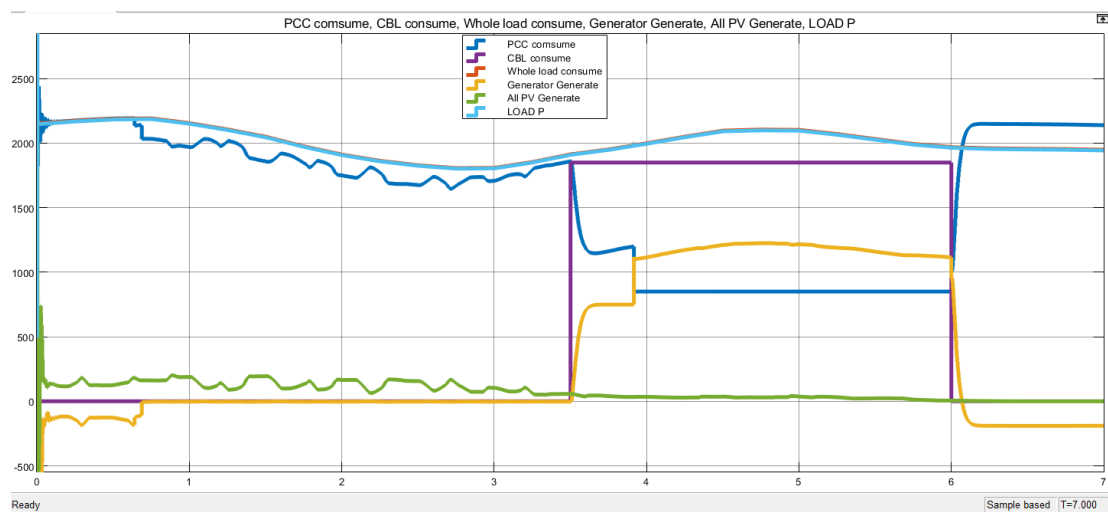


圖 3.2.5: 微電網總輸出功率圖

表 3.2.1:補充備轉持續期間之功率輸出

模擬時間	市電功率(kW)	總發電量(kW)	太陽能(kW)	整體負載(kW)	基準容量(kW)
16:00	849.6	1115	34.66	1999	1849
16:10	849.6	1154	29.01	2033	
16:20	849.6	1186	29.17	2066	
16:30	849.6	1211	35.79	2097	
16:40	849.6	1222	30.3	2102	
16:50	849.6	1224	30.53	2103	
17:00	849.6	1216	36.4	2102	
17:10	849.6	1197	34.76	2081	
17:20	849.6	1185	23.21	2057	
17:30	849.6	1159	23	2031	
17:40	849.6	1134	22.41	2006	
17:50	849.6	1127	9	1981	
18:00	849.6	1115	9	1970	

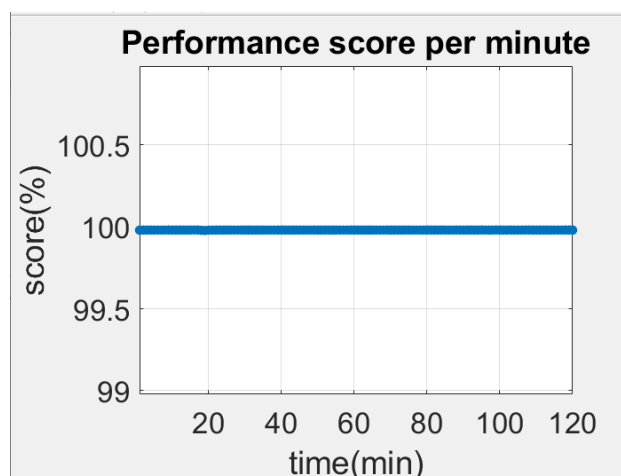


圖 3.2.6: 補充備轉持續期間之每分鐘執行率

(二) 正常夜尖峰負載與低儲能電量(SOC:30%)之太陽能參與補充備轉模擬

該案例使用預測後的負載來進行初步分析，假設初始電量設為 30，預測後之負載、與原始負載對比圖、散佈圖及照度資料如圖 3.2.7 至圖 3.2.9 所示。

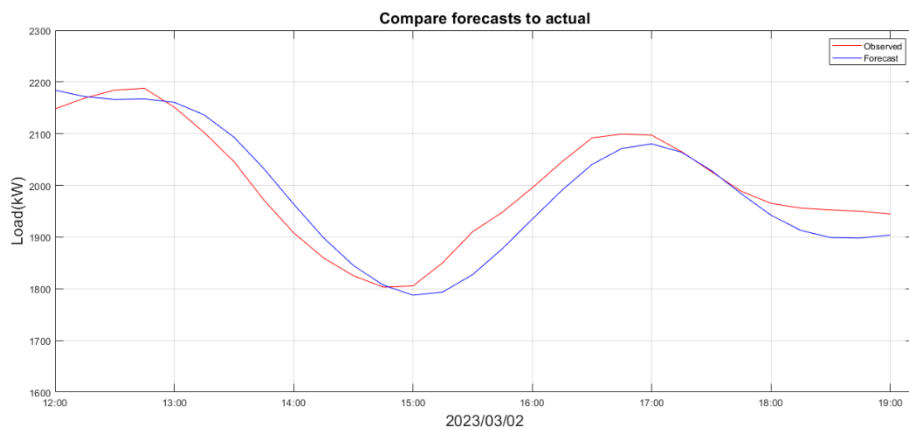


圖 3.2.7:2023/03/02 原始負載與預測後負載對比圖

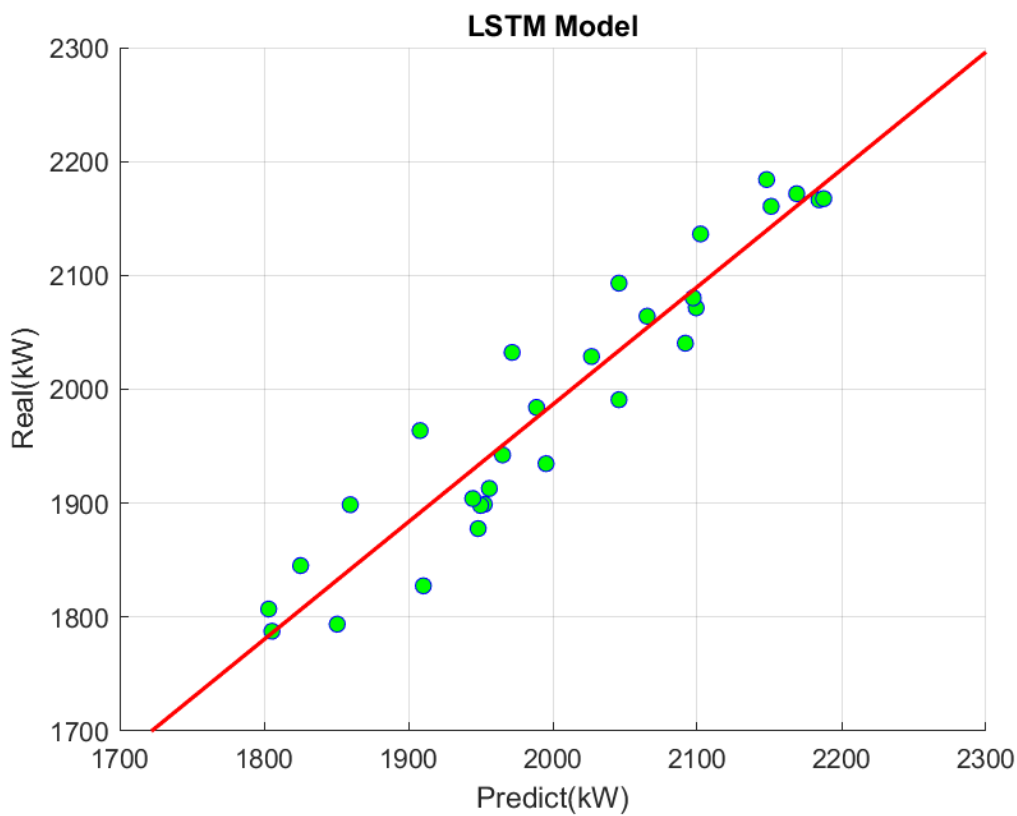


圖 3.2.8:2023/03/02 原始負載與預測後負載散佈圖

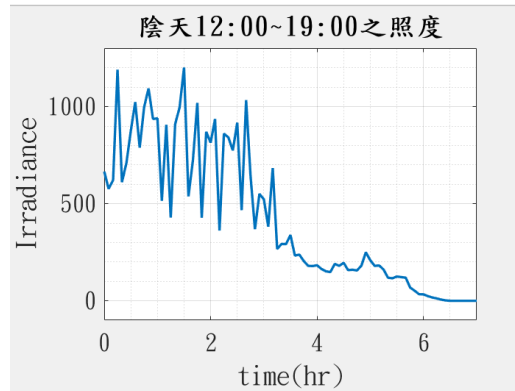


圖 3.2.9: 照度資料

該情境負載與照度將利用圖 3.2.7 與圖 3.2.9 12 點 00 分 19 點 00 分之資料進行模擬並假設控制中心於下午 3 點 30 分時接收到調度指令後開始執行 1 MW 需量反應，由於得知在補充備轉期間有個上升負載，根據計算建議電量為 65，整體微電網總輸出功率如圖 3.2.10 所示，在補充備轉前使用太陽能的能量(綠線)進行充電，儲能功率(黃線)與太陽能(綠線)對 0 呈鏡像，以及看到市電(藍線)與負載(淺藍)重疊，說明儲能 100%是使用太陽能充電並無額外消耗市電，由於由低電量開始可以看到充電時間明顯拉長，儲能電量變化如圖 3.2.11 所示，補充備轉期間功率表如表 3.2.2 所示，可以從功率表看到在執行 1MW 時是由太陽能出力然後再由其他發電系統發力，執行率如圖 3.2.12 所示。

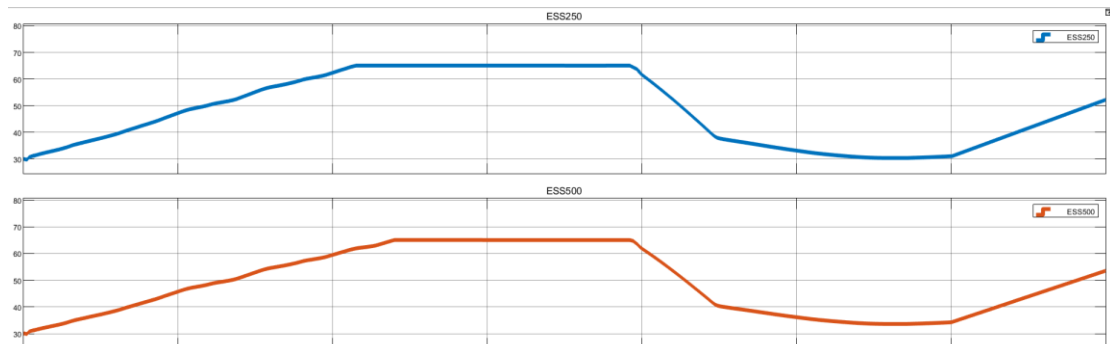


圖 3.2.10:儲能電量變化圖

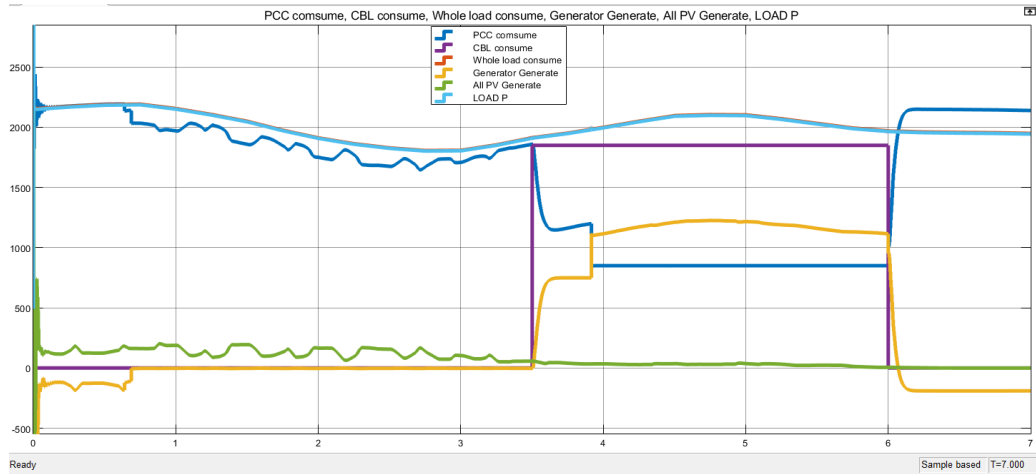


圖 3.2.11: 微電網總輸出功率圖

表 3.2.2: 補充備轉持續期間之功率輸出

模擬時間	市電功率(kW)	總發電量(kW)	太陽能(kW)	整體負載(kW)	基準容量(kW)
16:00	849.6	1115	34.66	1999	1498
16:10	849.6	1154	29.01	2033	
16:20	849.6	1186	29.17	2066	
16:30	849.6	1211	35.79	2097	
16:40	849.6	1222	30.3	2102	
16:50	849.6	1224	30.53	2103	
17:00	849.6	1216	36.4	2102	
17:10	849.6	1197	34.76	2081	
17:20	849.6	1185	23.21	2057	
17:30	849.6	1159	23	2031	
17:40	849.6	1134	22.41	2006	
17:50	849.6	1127	9	1981	
18:00	849.6	1115	9	1970	

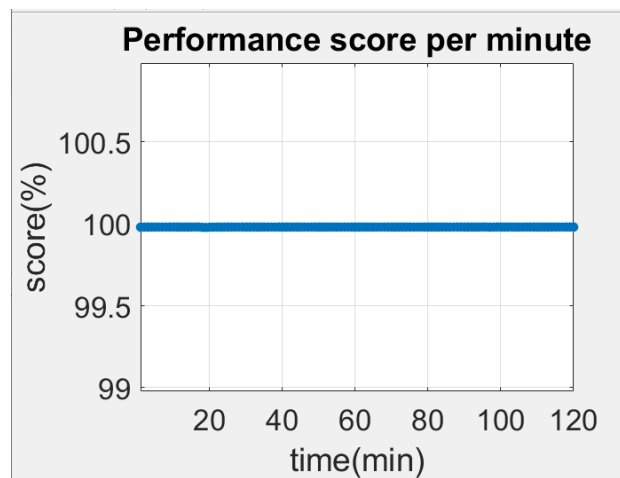


圖 3.2.12: 補充備轉持續期間之每分鐘執行率

三、調頻備轉模擬分析與評估

➤ 調頻備轉模擬情境

為了可以比較每種不同調頻備轉的表現，本次模擬將使用同一個頻率資料，如圖 3.3.1 所示，此頻率資料前半段有發生停電事件所以導致頻率有大幅度的下降，經過一段時間後恢復到正常頻率，以測試每種調頻備轉在每個時段的表現，並比較最後的價金。

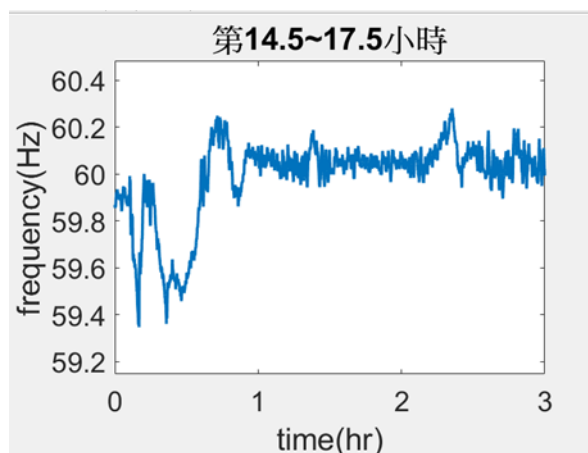


圖 3.3.1:模擬用頻率資料

(一)sReg 靜態調頻備轉模擬

在這個案例中，使用微電網內的兩座儲能系統來執行靜態調頻備轉。整體模擬的時間設定為 180 分鐘，頻率的模擬將根據系統的實際頻率資料進行。由於靜態調頻備轉幾乎是單方面的放電所以初始電量設定為 90%。從圖 3.3.2 中可以觀察到，隨著頻率的變化，兩套儲能系統於頻率觸發時進行放電，以滿足靜態調頻備轉的要求。根據計算可得此次模擬執行率如圖 3.3.3 所示。

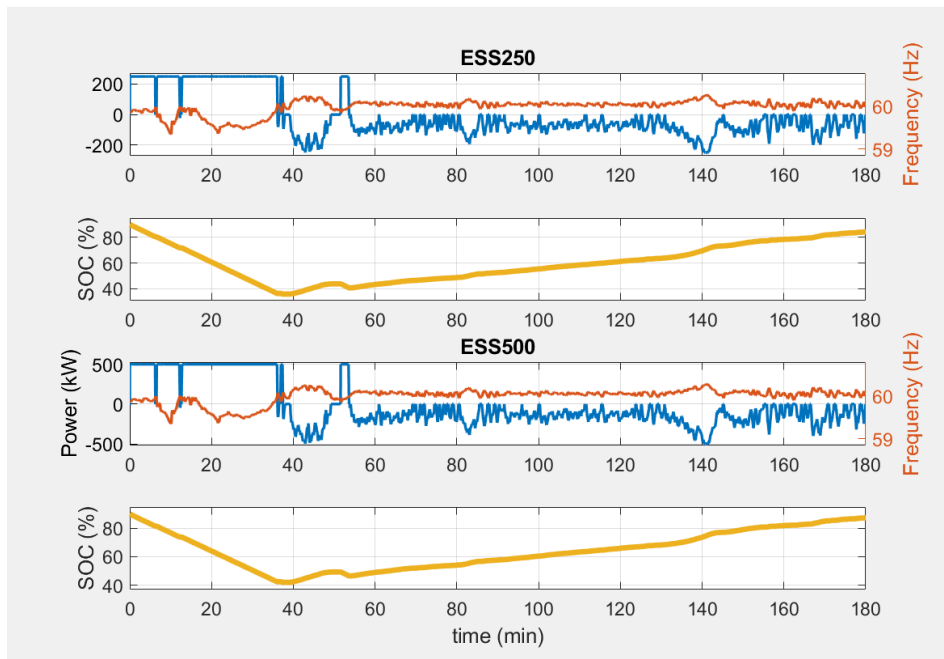


圖 3.3.2: 儲能系統輸出功率、電量與頻率表現圖

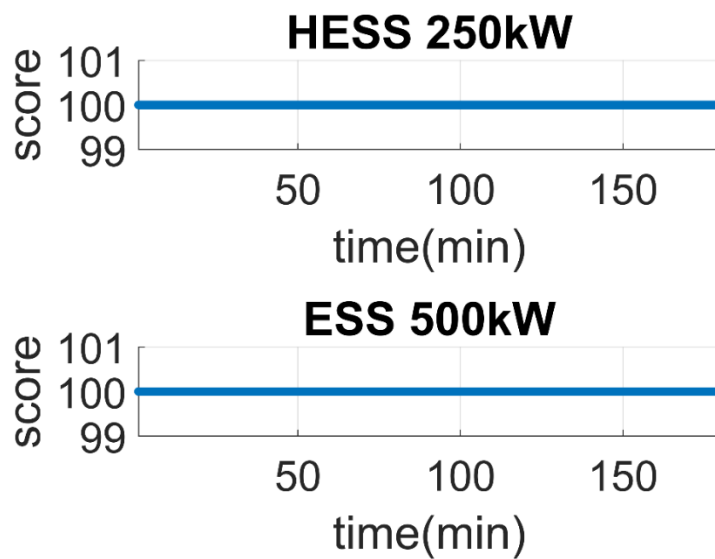


圖 3.3.3:靜態調頻備轉執行率

(二)dReg 動態調頻備轉模擬

在這個案例中，利用微電網內的兩座儲能系統執行動態調頻備轉。模擬 dReg0.25 的動態調頻備轉，總體模擬時間為 180 分鐘動態調頻備

轉將根據頻率執行雙向的充電和放電服務，而儲能系統的初始電量被設置為 65%。從圖 3.3.4 可以觀察到，隨著頻率的變化，兩座儲能系統持續進行充電和放電，以滿足動態調頻備轉的需求。根據計算此次動態調頻備轉執行率如圖 3.3.5 所示。

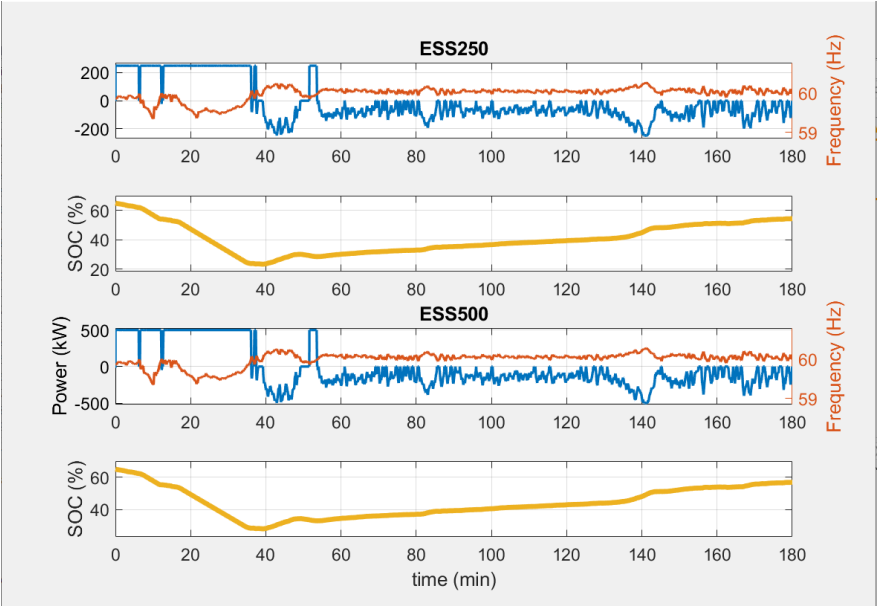


圖 3.3.4: 儲能系統輸出功率、電量與頻率表現圖

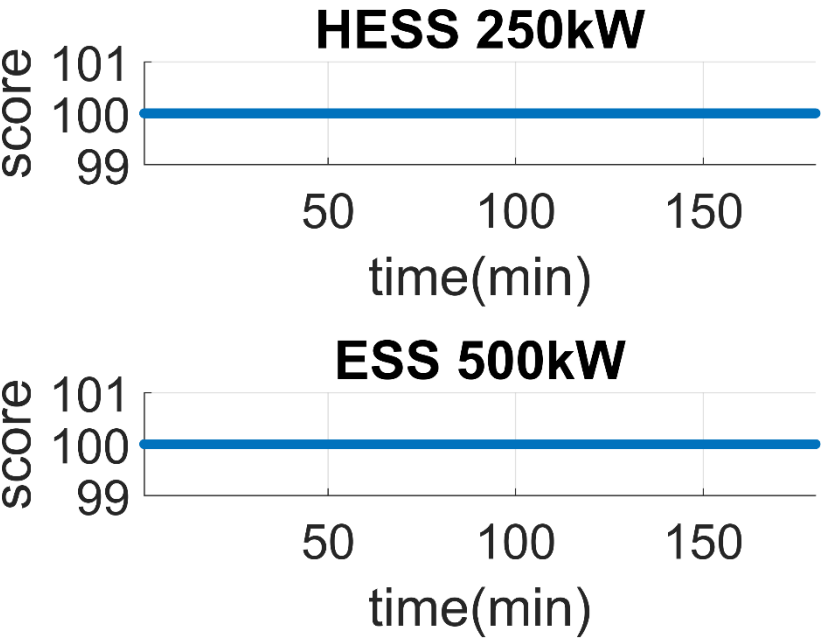


圖 3.3.5:動態調頻負載執行率

(三)E-dReg 增強型動態調頻備轉模擬

在這個案例中，利用微電網內的兩座儲能系統執行動態調頻備轉。模擬 dReg0.25 的增強型動態調頻備轉，並假設第一和三小時為規定充電階段，第二小時為規定放電階段，總體模擬時間為 180 分鐘動態調頻備轉將根據頻率執行雙向的充電和放電服務並根據充放電階段進行充/放電，而儲能系統的初始電量被設置為 65%。從圖 3.3.6 可以觀察到，隨著頻率的變化，兩座儲能系統持續進行充電和放電，以滿足動態調頻備轉的需求。根據計算此次增強型動態調頻備轉執行率如圖 3.3.7 所示。

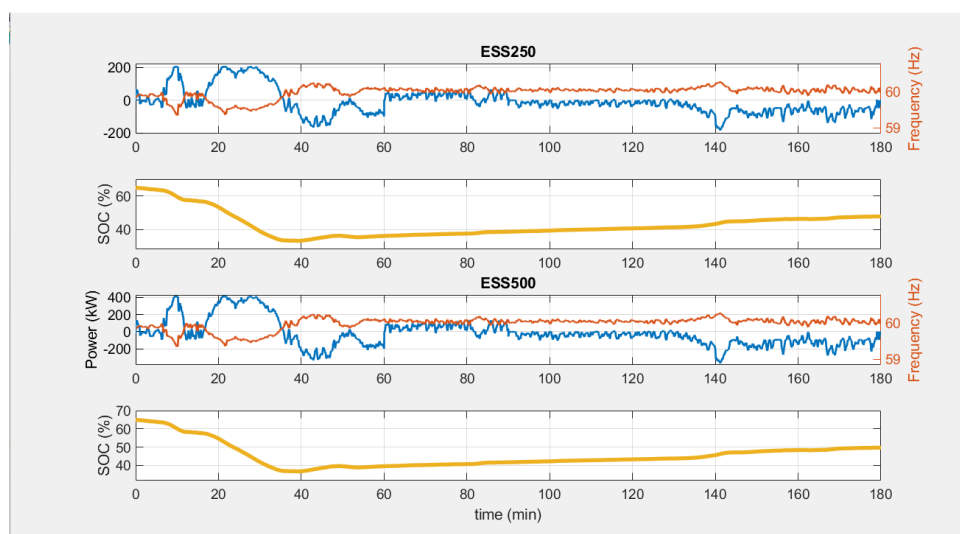


圖 3.3.6: 儲能系統輸出功率、電量與頻率表現圖

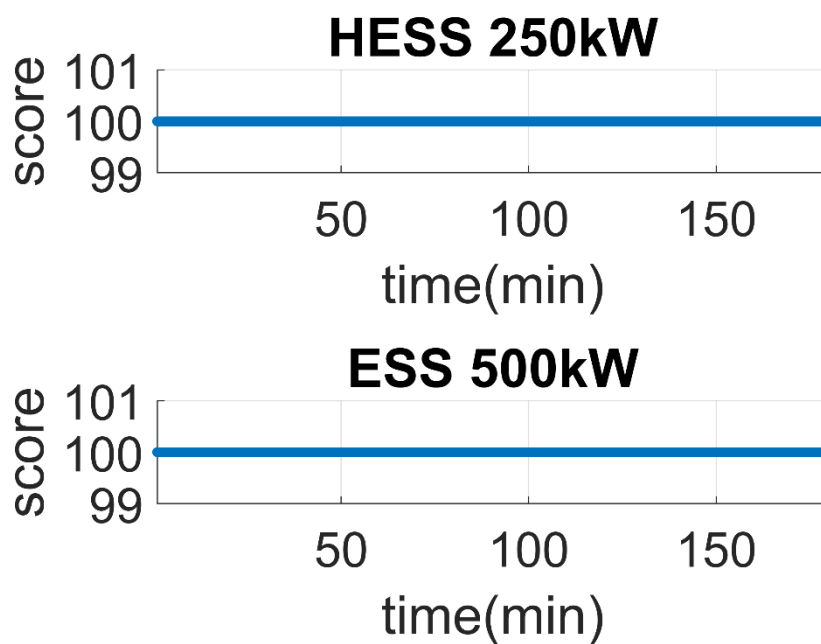


圖 3.3.7:增強型動態調頻執行率

(四)各種調頻備轉價金比較

根據前面章節的說明，每種調頻備轉價金計算方法都是由式 9 所計算，將以下列數值做計算 sReg 的效能費為 275 元/MWh，dReg 和 E-dReg 為 375 元/MWh，充電電能服務費為 500 元/MWh，放電電能服務費為 2000 元/MWh。容量費依照近期結標金額做計算調頻備轉價金為 369 元/MWh，E-dReg 價金為 600 元/MWh。表 x 為每種調頻備轉價金計算結果。

表 3.3.1:調頻備轉價金

調頻備轉種類	價金(NTD)
sReg	1655.25
dReg	1880.25
E-dReg	2525

肆、結論

本年度計畫旨在進行國原院微電網系統參與電力輔助服務之模擬研究，主要工作係在(1)開發負載預測方法，使幫助提升過往開發之補充備轉控制策略操作能力，讓負載預測機制加入執行補充備轉之模擬中；(2)研究太陽能發電參與補充備轉之議題，並完成具有太陽能發電之補充備轉控制策略；(3)執行三種調頻備轉(sReg、dReg 與 e-dReg)之模擬分析，透過價金計算評估其執行調頻服務之效益；同時，亦進行儲能容量升級之模擬，使看出容量提升後三種調頻備轉服務執行之效。最終，透過各式情境設計與模擬分析之執行，驗證了本年度計畫所提出之輔助服務控制策略之有效性。期望研究成果未來得以作為實體微電網系統真正參與台電電力交易服務之運轉參考。