

摘要

本研究開發一套以 Node-RED 為核心並與 AI 輔助整合之智慧電網系統。研究重點聚焦於決策邏輯開發，納入包含六種發電機組、升降載速率限制及再生能源間歇性。利用 MQTT 通訊協定連結 Node-RED，整合地震、颱風、氣溫及水位觀測等變因，建構出具備供給端與需求端即時反應的雙向溝通。

核心技術採用衝擊路徑法（Impact Pathway Approach），依據台電數據將 PM_{10} 與 SO_x 之環境影響量化為「社會外部成本」，並轉化為貨幣基準，藉此建立一套以最大化再生能源利用為目標的能源優先級邏輯。實驗顯示，新燃氣機組之污染損害僅為燃煤的 4.3%；基於此數據優勢，系統於緊急情境下可自動執行低污染調度策略，並透過試算表記錄全程數據。本研究成功將抽象之減碳效益轉化為具體成本參數，替未來智慧電網在供電穩定與環境永續間達成動態平衡提供可行方案。

壹、前言

一、研究動機

隨著 AI 浪潮推動全球半導體製程的擴張，台灣憑藉台積電的領先技術，確立了不可或缺的科技領導地位。然而，在製程推升算力的同時，也帶來大量能源消耗的需求與對環境污染的負荷，使產業競爭的維度從技術效能延伸至能源永續發展的層面。這導致台灣在追求產能擴張時，面臨電力穩定性與極端氣候風險的雙重考驗，使能源管理陷入「系統調度彈性」與「環境永續效益」難以兼得的困境。

如何在維持高科技產業發展的同時，降低發電所衍生的社會代價，已成為能源轉型的重要關鍵課題。本研究主旨在建構一套具備「即時調度」與「低環境負擔」雙重特性的智慧電網模擬系統。參考衝擊路徑法（Impact Pathway Approach, IPA）的概念，將抽象的環境衝擊轉化為具體的貨幣參數，並於智慧電網中加入「量化環境損害」的評估邏輯。如此一來可以解決傳統調度在環境外部成本上考量不夠透明，也使電網在面對緊急需求時，提出對社會總成本最低的調度執行方法，替能源穩定與永續發展間尋求最佳的動態平衡。

二、研究目的

1. 研究包含真實數據（台電永續報告書）與衝擊路徑法，將環境代價轉化為貨幣基準，建構一套兼顧能源穩定與環境永續的智慧電網的調度決策系統。
2. 研發能模擬在地震、颱風及氣象等突發因素下，系統能根據「低污染優先」的調度策略，並實現全程數據自動記錄與追蹤。

三、資料蒐集整合探討

（一）污染量與溫室氣體計算公式

在電力部門的污染估算上，主要區分為「質量排放計算」與「外部成本貨幣化」兩大體系：溫室氣體（CO_{2e}）排放量計算：

根據相關研究，「溫室氣體排放推估」可依據數據分為兩種方法：

方法一：基於實際燃料耗用量（歷史排放量）

公式為 $E_{\text{Power}} = \sum (F_i \times H_i \times C_i)$

E_{Power} ：電力部門的二氧化碳年排放量（單位：kg CO_{2e}）

F_i ：發電廠各種燃料的耗用量（例：單位 kg、L、 m^3 ）。

H_i ：各燃料的單位熱值（例：單位 kcal）。

C_i ：各燃料的二氧化碳排放係數（單位：kgCO_{2e}/kcal）。

方法二：基於發電效率（未來排放推估）

公式為 $E_{power} = \sum \{P_i \times [(C_i \div 277.8) \div A_i]\}$

其中 P_i 為發電量； A_i 為發電效率。

註：277.8 是將焦耳（TJ）換算為百萬度（MWh）的轉換係數（1 TJ=0.2778 GWh=277.8 MWh）

【出處】：陳筆、王麗文（2018），《台灣電力部門的減碳技術潛力》，中央研究院環境變遷研究中心《深度減碳，邁向永續社會》研究計畫報告。

空氣污染物質質量與外部成本評估

1. 質量計算：

針對火力電廠的 PM₁₀、SO₂、NO_x 等污染物年排放量（ton/yr）等於發電量（kWh/yr）乘以電力排放係數（ton/kWh）。

2. 環境外部成本貨幣化：

採用「衝擊路徑法（ImpactPathway Approach）」，計算包括：排放盤查、大氣擴散模擬（如 AERMOD 模式）、劑量反應函數衝擊評估、最後貨幣化轉換。

【出處】：廖孟儀、馬鴻文、李孟穎、洪明龍、李沛濠（2016），〈臺灣火力發電健康衝擊外部成本分析〉。《臺灣能源期刊》，第三卷第三期。

（二）各類機組排放特性比較

A. 燃油 vs. 傳統燃煤：

燃油機組之 PM₁₀、SO₂ 與 NO_x 排放係數分別約為傳統燃煤機組的 1.3 倍、4.4 倍與 1.3 倍。

B. 新燃氣 vs. 傳統燃煤：

新燃氣機組展現極佳的減排效果，其 PM₁₀、SO₂ 與 NO_x 排放係數僅為傳統燃煤機組的 4.3%、2.2% 與 38.2%。

C. 超臨界燃煤機組：

儘管其排放係數低於傳統燃煤機組，但在 2025 年情境模擬下，因預期座落於高人口密度縣市，暴露人數增加導致其單位外部成本仍較傳統機組稍高。

【出處】：廖孟儀、馬鴻文等（2016）〈臺灣火力發電健康衝擊外部成本分析〉《臺灣能源期刊》。

（三）評估方法：衝擊路徑法（ImpactPathway Approach）

本研究採用國際（如歐盟 NEEDS 計畫、ExternE 計畫及 OECD）認可之衝擊路徑法進行由下而上的貨幣化評估。

1. 評估汙染程度與計算邏輯

（1）**排放計算**：根據各發電機組的特性，計算空氣污染值（PM₁₀、SO₂、NO_x）之年總

排放量：排放量（ton/yr）= 發電量（kWh/yr）× 電力排放係數（ton/kWh）

（2）**衝擊分析**：包含單位擴散濃度、鄉鎮人口密度及劑量反應函數。

註：此函數旨在精確闡述受體（人體健康）在不同污染物暴露濃度下之生理反應變化。

（3）**外部成本貨幣化**：將評估所得的實體衝擊量乘上單位貨幣化係數，計算出電力生

產之社會外部成本：社會外部成本=衝擊量 × 貨幣化係數

2. 衝擊路徑法（IPA）參數

根據研究設定，臺灣地區空氣污染物之單位社會成本衡量標準為：

PM₁₀：88,212 元／噸；NO_x：53,790 元／噸；SO_x：45,919 元／噸

【出處】：廖孟儀、馬鴻文等（2016），〈臺灣火力發電健康衝擊外部成本分析〉，《臺灣能源期刊》；經濟部（2023），〈淨零轉型各關鍵戰略行動計畫投入經費統計〉，引自國發會報告。

貳、研究設備與器材

一、硬體設備

設備名稱	型號／規格	數量	用途
筆記型電腦	一般筆電	1	運行 Node-RED
IoT 開發板	AMB82-mini (瑞昱 RTL8735B)	1	中央控制板，負責 LED 面板+GPIO 送電
微控制器	Arduino Uno R4 WiFi	3	模擬三類用電戶 (A/B/C)
麵包板	標準尺寸	6	連接 6 間電廠的 LED 電路
麵包板	標準尺寸	1	MQTT 與 WIFI 狀態指示燈
麵包板	標準尺寸	1	用戶 C 之算力機櫃
LED 指示燈	紅光／綠光／黃光／藍光	36	6 組機組升降載狀態燈+MQTT 狀態指示燈+用戶 C 的「算力機櫃啟動」用電模擬指示燈
按鈕開關	微動開關	1	用戶 C 的「算力機櫃啟動」 用電大增模擬開關

表 1 硬體設備表（研究者自行繪製）

二、軟體設備

使用順序	工具／模型	使用與說明
1	ChatGPT	可快速概念確認及整理
2	Claude Sonnet 4.5 Claude Haiku 4.5	可局部問題修正、協助撰寫提示詞
3	Claude Sonnet 4.6 Claude Opus 4.5 Gemini 3.1 Pro (low) Gemini 3 Pro(low)	可邏輯驗證、深度 Debug、邊界條件、附加功能初稿
4	Claude Opus 4.6 Gemini 3.1 Pro (high)	可系統架構、跨模組 Debug、複雜調度邏輯
5	Vertex AI Antigravity	可 AI 驅動整合式 IDE，Agent-first 代理平台

表 2 軟體設備表（研究者自行繪製）

參、研究過程與方法

一、研究架構

本研究架構在於「建構一套具備即時動態適應能力的智慧電網模擬系統」，並且透過模擬不同情境下去調整電力調度策略。首先，以不同種類發電方式（如再生能源與非再生

能源）去設計調度邏輯，利用與 AI 協作撰寫程式建立自動化決策與調度模擬控制平台，為使模擬更符合真實環境，附加多項環境影響包括：污染源數據、即時天氣 API、地震預警等（圖 1）。為了模擬電網更加視覺性的呈現，以串聯實體電路與控制台，形成具有完整架構的電網，最後利用多種事件去驗證模擬電網的運作是否成功。

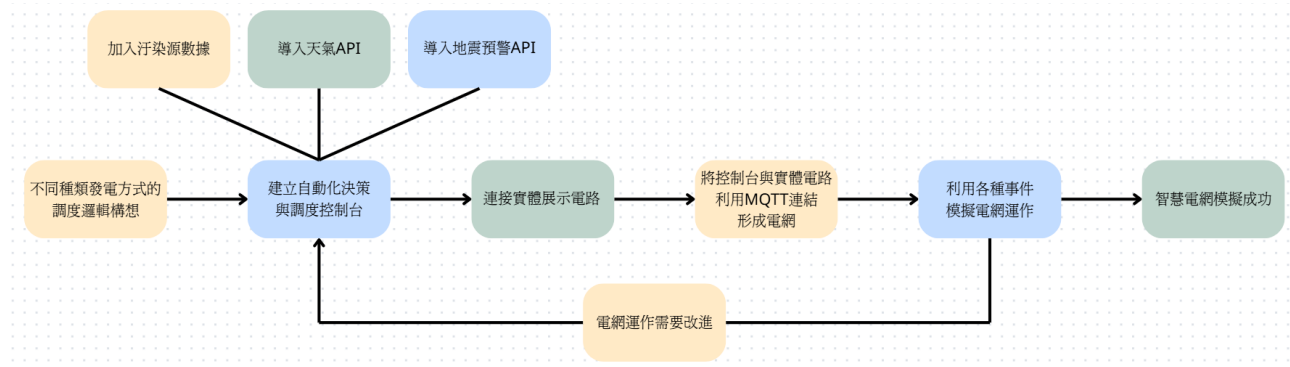


圖 1、研究架構流程圖（研究者自行繪製）

二、實作步驟

（一）能源優先（註：以下不為調度順序）

1. 燃油與燃煤發電

燃煤火力電廠的平均外部成本約為每度 0.537 元，其中溫室氣體排放的影響佔比高達 94%。在污染物的貢獻上，燃煤機組以氮氧化物（ NO_x ）所造成的外部成本貢獻最多；燃油機組則以硫氧化物（ SO_2 ）的外部成本貢獻最多。

2. 燃氣發電

燃氣發電在主要空氣污染物上的排放係數較低：

PM_{10} ：僅為傳統燃煤機組的 4.3%

SO_2 ：僅為傳統燃煤機組的 2.2%

NO_x ：約為傳統燃煤機組的 38.2%

並且，燃氣機組透過設備更新提升發電效率，能有效且顯著降低其外部成本。

3. 水力發電

水力發電擁有下列幾項特點：

(1) 極速的「反應時間」：從啟動到滿載，通常只需 2 至 5 分鐘。

(2) 優異的「升載速率」：水力機組升載速率可達每分鐘 20%~50%的額定容量。

在發電所產生的空氣污染上，氮氧化物（ NO_x ）與硫氧化物（ SO_2 ）排放量為 0。

4. 風力發電

風力發電需要依靠強力的離岸風發電，其發電效率能夠達到 35%~50%。污染方面，運轉期近零排放的特性，使其污染遠低於燃煤與燃油。

5. 太陽能發電

太陽能發電具有「分散」的特性，能夠在不同空間中進行架設，進而達到發電效率增加，其碳足跡雖高於另外兩種再生發電，但僅為燃煤發電的 5%。



圖 2、能源發電相關監測圖（研究者從自行架設之即時能源調度網站擷取）

（二）調度邏輯

1. 發電廠端的調度邏輯

發電廠端的決策主要分為「電力不足」與「電力充足」兩種情境，根據能源污染程度與特性進行排序。

核心目標：確保再生能源得到最大化的利用

(1) 能源特性

燃氣發電：相較於燃煤與燃油發電所產生的污染較少，並且具有效率高、升載速率快的優點，因此能夠快速支援電網。

燃煤與燃油：因為所產生污染值較高，所以屬於較不乾淨的能源。

水力發電：擁有擋水閘門隨開即用的快速反應，且快速支援的速度與燃氣發電相比之下較快，也能夠快速支援電網，並且所產生污染值低於燃氣發電。

(2) 調度順序

當電力不足時：優先調動水力與燃氣作為快速支援，以維持電力與電網的穩定，雖然各機組會同時升載，但以這兩者為優先考量。

當電力充足時：優先放棄（降載）所產生污染值最高的燃油與燃煤，其次是燃氣，最後才放棄污染較少的再生能源（水力、風力與太陽能發電）。

2. 用戶端的設計與實作

用戶端將用戶分為三類，並針對異常情況設計了應變機制：

總共分為用戶 A（工業用電）、B（住宅民生）和 C（算力機櫃）

分區限電：每一種用戶都可以設定用電量大增的可變性，但是根據觀察近年來可能造成用電量突增例如：算力機櫃，當特定類別的用戶用電量突然大增，導致系統負荷過重時，於模擬上執行分區限電的跳轉保護。

（三）排放強度汙染計算

發電類型	二氧化碳（CO ₂ e）	硫氧化物（SO _x ）	氮氧化物（NO _x ）	粒狀污染物（PM _x ）
單位	kg/kWh（度）	g/kWh（度）	g/kWh（度）	g/kWh（度）
燃煤發電	~0.850~0.950	~0.0650	~0.1450	~0.0055
燃油發電	~0.700~0.800	~0.1200	~0.2500	~0.0080
燃氣發電	~0.350~0.420	趨近於 0	~0.0450	~0.0012
水力發電	0	0	0	0
風力發電	0	0	0	0
太陽能發電	0	0	0	0

表 3 汙染計算表（台灣電力公司（2025）。2024 台灣電力公司永續報告書）



圖 3、汙染排放整合版面（研究者從自行架設之即時能源調度網站擷取）

（四）AI 協作-80/20 方法

1. 80%系統設計與工程規劃

項目	內容
工具學習	Node-RED 為本次使用的工具，包含 Dashboard 設計、MQTT 通訊設定、附加功能整合，以及如何在電腦上穩定執行；Google Sheets 的連接方式亦於此階段摸索完成。
硬體整合	原本熟悉的是 Arduino，本次改用 amb82-mini 開發板，需重新確認與 Node-RED 及 MQTT 的相容性。
偵錯方式	將程式碼同時丟給多個 AI 工具進行交叉偵錯並提出詳細偵錯報告，各 AI 所指出的問題不盡相同，再交由 coding 工具篩選哪些建議可行，哪些可能是 AI 誤判。
整合測試	確認主功能與各附加模組在前後操作順序下不產生衝突或矛盾決策。

表 4 80%內容（研究者自行繪製）

2. 20%、偵錯與整合

項目	內容
系統架構規劃	六間電廠如何分工、兩種調度情境如何設計、各模組如何溝通
邏輯正確性驗證	確認成果是否符合我們所設計的調度邏輯，非只驗證程式可否運行。
功能取舍判斷	太陽能發電：無特殊事件時維持固定輸出值，避免小幅持續波動干擾調度模擬的穩定性；事件觸發時才產生驟降。時鐘顯示：原計劃加入時鐘功能，但與系統內部的模擬計時器持續衝突，無法共存，最終捨棄。其他取舍：均依「是否影響核心展示功能」為判斷準則。
使用者體驗設計	儀表板版面規劃、模擬情境按鈕設計、進階參數設定介面、初始負載數值的合理預設。

表 5 20%內容（研究者自行繪製）

（五）控制台版面設計

我們與 AI 協作在版面上設計了 9 種分別代表各種不同功能的按鈕

按鈕名稱	程式碼觸發值	按下後的具體效果	對應模擬場景
需求飆升	demand_up	總負載+1,000MW	白天尖峰用電大增
需求下降	demand_down	總負載-1,000MW（最低 1,000）	深夜離峰用電下降
烏雲遮蔽	cloud	太陽能降至隨機 0~50 MW， 10 秒後自動恢復	突然烏雲密布
風力驟降	wind_drop	風力降至原來的 30%，10 秒後恢復	海上風力減弱
燃氣跳機	trip_gas	燃氣-1,100MW（瞬間）	大型燃氣電廠故障

燃煤跳機	trip_coal	燃煤-550 MW（瞬間）	燃煤機組故障跳機
燃油跳機	trip_oil	燃油-500 MW（瞬間）	燃油機組故障
用電突增	獨立節點	用戶 C 需求+2,000MW 按一次啟動	商戶私接高耗能設備
系統重置	reset	全部參數恢復初始值，歷史清空	重新開始演示

表 6 各種按鈕詳細功能（研究者自行繪製）



圖 4、9 種按鈕示意圖（研究者從自行架設之即時能源調度網站擷取）

各級備轉燈號對應的限電行為

備轉燈號	觸發條件	限電數量	被限電的用戶 （依 priority 降序）	用戶 B （民生）狀態
綠燈	備轉率 $\geq 10\%$	0	無	供電
黃燈	備轉率 $< 10\%$	0	無（儀表板警示）	供電
橘燈	備轉率 $< 6\%$	1	工業（A,P3）	供電
紅燈（輕微）	$< 900\text{MW}$ 或 $< 4\%$	1	工業（A,P3）	供電
紅燈（嚴重）	$< 900\text{MW}$ 或 $< 4\%$ 且備轉率 $< 2\%$	2	工業（A,P3） +商業（C,P2）	供電
黑燈	$< 500\text{MW}$	3	全部（A $\rightarrow$ C $\rightarrow$ B）	最後斷電

表 7 備轉燈號對應行為（研究者自行繪製）

（六）以實體電路呈現電網邏輯

在控制台架設完成後，開始思考如何利用實體的電路去呈現調度邏輯，先以 Tinkercad 軟體去繪製出理想的電路圖。（圖 5）六個麵包板作為不同電廠（供給端），並利

用紅色 LED 與綠色 LED 分別代表升載與降載，中央的 arduino 代表 AMB82-mini（繪圖軟體內無 amb82-mini）以此作為實體的決策中心，下方三塊 arduino 則作為用戶 A、B 與 C（需求端），還能透過與按鈕互動的方式調整不同的用電需求量。電路圖完成後，照著電路圖連接實體電路（圖 6），利用 AMB82-mini 中物聯網的功能，與電腦中的 Node-red 以 MQTT 進行連結。

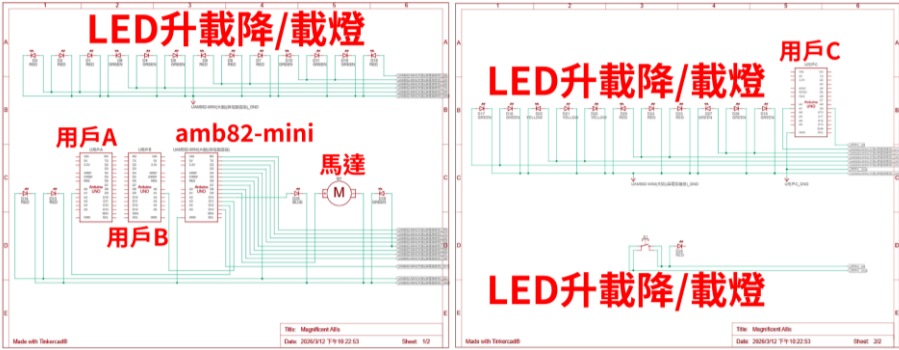


圖 5、實體電路圖（研究者利用 Tinkercad 自行繪製）

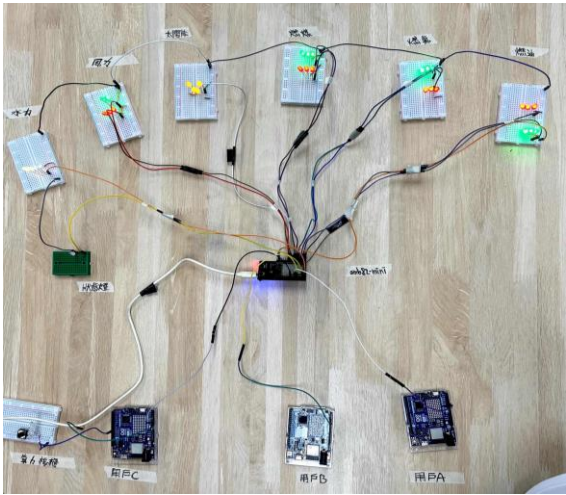


圖 6、實體電路展示（研究者自行拍攝）

肆、研究成果

情境壓力測試

每次測試前按下「系統重製按鈕」，回到以下初始狀態

燃煤	燃氣	燃油	太陽能	風力	水力	總負載
2,300MW	3,200MW	0 MW	1,200MW	800 MW	1,000MW	8,500MW

表 8 初始狀態（研究者自行繪製）

情境	電網衝擊	PM _{2.5} (kg/h)	CO ₂ (ton/h)	社會成本 (NTD/h)	成本變化
初始	無	193.60	3,625.0	169,762	Null
烏雲遮蔽	太陽能 1,200→ ≈25 MW	220.71	4,077.4	198,503	+16.9%
燃煤跳機	燃煤-550 MW	162.32	3,314.9	150,427	-11.4%
用電量大增 模擬	負載 +2,000MW	239.70	4,395.0	218,612	+28.8%

表 9 三大情境系統反應與汙染值數據（升載完成後穩態值）（研究者自行繪製）

重要說明：（表 8）中數值為系統升載完成後的「穩態預估值」。由於各機組的升載速率不同（水力 33MW/min、燃氣 15MW/min、燃煤 5.5MW/min、燃油 10MW/min），實際系統中 current 值會在數秒至數十秒內逐步追趕 target，期間的汙染數據為動態變化。

情境 A—烏雲遮蔽

觸發：按下「烏雲遮蔽」按鈕

程式碼動作：

1. 太陽能 current 從 1,200MW 降至 Math.floor () Math.random (*50) (0~49 MW 隨機值)
2. 設定計時器 weakenTimers.solar=10，10 秒後太陽能自動恢復至 baseValue (1,200MW)

控制台反應（下一個 Tick，即 1 秒內）：

1. 偵測到 deficit≈1,175MW（若太陽能降至約 25MW）
2. 升載分配：水力+470 MW（40%）、燃氣+411 MW（35%）、燃煤+176 MW（15%）、燃油+118 MW（10%）
3. 調度日誌：烏雲遮蔽（10 秒）→缺電 1175MW→水力+470，燃氣+411，燃煤+176，燃油+118

硬體連動：

AMB82-mini 上的水力 LED 與燃氣 LED 切換為 up（紅燈閃爍=升載中）

太陽能 LED 切換為 down（出力低於 $\text{baseValue} \times 0.8$ ）

10 秒後太陽能自動恢復→日誌：太陽能 恢復正常

大腦偵測到電力過剩→按高碳排先降順序降載（燃油→燃煤→燃氣→水力）

數據分析：社會成本增加 16.9%，而非暴增。因為電網將 75% 的升載需求分配給了低碳機組（水力 40% 為零排放+燃氣 35% 之 $\text{PM}_{2.5}$ 僅燃煤的 3.75%），有效減少對環境污染的增長。

升載時間估算：

類型	容量	爬坡速率	完成時間
水力	470 MW	33 MW/tick	≈15 秒（最快）
燃氣	411 MW	15 MW/tick	≈28 秒
燃煤	176 MW	5 MW/tick	≈35 秒（最慢）
燃油	118 MW	10 MW/tick	≈12 秒

表 10 升載時間估算（研究者自行繪製）

程式中的 rampRate 參數的物理意義：

水力的快速反應能力使其成為最適合應對突發事件的機組。

情境 B—燃煤跳機

觸發：按下「燃煤跳機」按鈕

```
plants.coal.current -= 550;    // 瞬間減少 550 MW
plants.coal.target = plants.coal.current; // target 也同步下調
```

圖 7、燃煤跳機程式碼（研究者自行擷取）

控制台反應：

1. 偵測到 $\text{deficit} \approx 550 \text{ MW}$
2. 升載分配：水力+220 MW（40%）、燃氣+193 MW（35%）、燃煤+83 MW（15%）、燃油+55 MW（10%）

跳機瞬間（T+0）的即時數據：

項目	跳機前（初始）	跳機瞬間（T+0）	變化
燃煤出力	2,300MW	1,750MW	-550 MW
PM _{2.5}	193.60 kg/h	149.60 kg/h	-22.7%
社會成本	169,762NTD/h	136,958NTD/h	-19.3%

表 11 跳機瞬間數據（研究者自行繪製）

關鍵發現：燃煤跳機的瞬間，PM_{2.5} 立即下降 22.7%。PM_{2.5} 有 95.0% 來自燃煤（ $2,300 \times 0.08 = 184.0$ kg/h 中的燃煤佔比）。燃煤少了 550MW，其 PM_{2.5} 污染直接減少 44.0kg/h。

補位完成後（穩態）：大腦調動其他機組補位後，PM_{2.5} 回升至 162.32kg/h（增加了補位機組的排放），但仍比初始值低 16.2%。原因是補位的主力為水力（零排放）與燃氣（PM_{2.5} 僅為燃煤的 3.75%）。

情境價值：證明在高度燃煤依賴時，減少燃煤可以有效防止空污惡化，是最直接的空汙改善手段。符合本研究主張「低污染優先調度」的願景。

情境 C—算力機櫃造成用電量大增

觸發：按下「算力機櫃啟動」按鈕

程式碼動作（簡化表示）：

```
settings.load += 2000;           // 總負載增加 2,000 MW
users.C.demand = baseDemand + 2000; // 用戶C需求暴增
users.C.surgeActive = true;      // 標記算力機櫃機狀態
```

圖 8、啟動算力機櫃程式碼（研究者自行擷取）

控制台反應：

1. 偵測到 deficit≈2,000MW

2. 升載分配：水力+800 MW（40%）、燃氣+700 MW（35%）、燃煤+300 MW（15%）、燃油+200 MW（10%）
3. 若備轉容量跌破門檻→觸發限電機制

數據分析：

PM_{2.5} 從 193.60 上升至 239.70kg/h（+23.8%）

社會成本暴增至 218,612NTD/h（每小時增加 48,849 元的社會健康損害）

硬體連動：

所有 6 組 LED 切換為 up（全部機組升載或維持出力）

若觸發紅燈，用戶 A 的 Arduino GPIO D14→LOW（斷電），儀表板顯示限電中

用戶 B（民生）的 Arduino GPIO D13→維持 HIGH（正常供電）

註：48,849 元／小時代表每當有一個商戶私接 2,000MW 的高耗能設備，社會每日需額外承擔約 117 萬元的隱性健康損害。

情境壓力測試驗證結果

三個情境中，從按下按鈕到大腦完成升載分配決策並寫入調度日誌，時間差均為 1 個 Tick（即 1 秒）。核心調度演算法在每一次 Tick 中完成了以下完整計算鏈：

供需差計算 → 升/降載分配 → 漸進式升載（依 rampRate 逐步追趕）
→ 備轉容量計算 → 燈號判定 → 限電決策
→ 五種汙染物即時排放 → 社會外部成本
→ LED 狀態指令（MQTT） → 調度日誌記錄

圖 9、每次 Tick 的計算鏈（研究者自行擷取）

情境壓力測試成立：系統在所有測試情境中均於 1 秒內完成從偵測到決策的完整流程。

限制說明：此處驗證的「1 秒」是指大腦的決策響應時間，不是硬體的端到端延遲。程式碼中未內建端到端延遲量測功能，因此 MQTT 從大腦發出到 AMB82-mini LED 實際亮起的時間未被精準測量。

分級限電機制驗證

透過連續疊加多種情境（例如烏雲遮蔽+燃氣跳機+需求飆升），將備轉容量提升至上限，並觀察限電行為。

程式碼中的限電邏輯節錄：

```
// 用戶依 priority 降序排列：A(P3) → C(P2) → B(P1)
users.sort(function(a, b) { return b.data.priority - a.data.priority; });

if (reserveLight === 'black') {
  shedCount = 3; // 全部限電
} else if (reserveLight === 'red') {
  shedCount = reserveRate < 2 ? 2 : 1; // 限1~2組
} else if (reserveLight === 'orange') {
  // 僅限最高 priority 用戶（用戶A）
}
// 其餘燈號：恢復所有限電
```

圖 10、限電邏輯程式碼（研究者自行擷取）

測試觀察

1. **排序驗證：**用戶按 priority（系統內設置之專有名詞，限電優先順序）值降序排列（P3→P2→P1），工業用戶 A（priority=3）永遠第一個被犧牲。這與程式碼中的 `users.sort(function(a,b) { return b.data.priority - a.data.priority; } )` 吻合。
2. **硬體驗證：**在紅燈期間，用戶 A 的 Arduino D14 輸出 LOW（斷電），用戶 B 的 D13 始終維持 HIGH（供電正常），用戶 C 的 D16 依備轉率是否低於 2% 決定。
3. **自動恢復驗證：**限電恢復時（備轉燈號改善至黃燈或綠燈），系統自動將所有用戶狀態從斷電設為 receiving，日誌記錄恢復：工業用電 恢復供電。
4. **橘燈行為的精確說明：**程式碼中，橘燈觸發時，日誌文字為「警戒限電：工業用電減供 5%」。需說明的是，此處的「減供 5%」為日誌的描述性文字，實際程式碼中是將用戶 A 的狀態設為斷電（即完整限電狀態），並非精確的 5% 減量。

分級限電機制驗證成立：

在所有測試中，民生住宅（用戶 B，priority=1）為最後一個被限電的對象。

五、系統即時連動流程驗證

以「算力機櫃偵測」為例，展示從按下按鈕到硬體末端反應的完整訊號鏈，驗證大腦到肢體的每一環節：

```

1. 操作員按下儀表板「⚡ 算力機櫃啟動」按鈕

2. [事件處理 v3.1]
  settings.load += 2000
  users.C.surgeActive = true
  日誌: ⚡ 算力機櫃啟動! 需求 +2000MW

3. [🔴 核心調度] (下一個 Tick + 1 秒後)
  | 偵測到 deficit = 2000MW
  | 升載分配: 水力 +800, 燃氣 +700, 燃煤 +300, 燃油 +200
  | 機轉容量重新計算 → 可能觸發紅燈
  | 紅燈 → 限電: 用戶 A (P3) status = 'shed'
  | 汙染計算: PM2.5 = 239.70 kg/h
  | 社會成本 = 218,612 NTD/h

4. [📡 MQTT LED 資料準備 v2.0]
  | hydro: target - current > 50 → "up" (紅燈閃爍)
  | gas: target - current > 50 → "up" (紅燈閃爍)
  | coal: target - current > 50 → "up" (紅燈閃爍)
  | oil: target - current > 50 → "up" (紅燈閃爍)

5. [AMB82-mini] 收到 MQTT → 4 組 LED 同時亮起紅燈

6. [Arduino R4 WiFi #1] 收到限電指令
  GPIO D14 → LOW → 用戶 A 斷電
  GPIO D13 → HIGH → 用戶 B 正常 (民生保護)

7. [📊 實驗記錄器]
  完整系統快開 → POST 至 Google Sheets
  欄位: Tick、六相機組出力/target/action、用戶狀態、
  機轉燃耗、五種汙染物、社會成本、LED燈態、RSSI...

8. 數 Tick 後各機組漸進升載完成
  → deficit 歸零 → 機轉恢復 → LED 回到 "stable"
  → 用戶 A 恢復供電

```

圖 11、算力機櫃偵測程式碼（研究者自行擷取）

此流程驗證了系統「大腦→MQTT→肢體→記錄」的完整訊號鏈在每一環節都正確運作。

六、輔助資訊面板驗證

除核心調度功能外，還整合三個即時資訊面板。特別強調：這些面板不控制電網，其設計目的是還原真實電力控制室中「情境意識（Situational Awareness）」的工作模式。

註：台電即時發電量來自陳邦綸網頁工程師製作網站



圖 12、關於地震、颱風與水情的 Node-Red 頁面呈現及架構

（研究者從自行架設之即時能源調度網站擷取）

本研究刻意不讓天災面板控制電網，原因是天災資訊的變化速度（分鐘至小時級）與電網調度的速度（秒級）差異極大。若讓天災面板直接觸發調度，可能在資訊不完整時做出過激反應。因此，系統選擇讓面板僅提供「決策支援」，由操作員判斷是否手動介入。此設計與真實電力控制室的運作原則一致。

七、黑盒子數據記錄器

系統內建的「實驗數據記錄器」在整個實驗過程中持續運行，每秒自動記錄一筆完整的系統快照至 Google Sheets。

類別	記錄內容
基本資訊	時間戳、實驗名稱、Tick 序號、模擬時間、運行時數
電力數據	總負載、總發電、供需差、系統狀態
機組詳情	六類機組各自的 current、target、action（升載／降載／穩定）
備轉容量	備轉 MW、備轉率%、燈號、淨尖峰供電能力
用戶狀態	A/B/C 各自的供電狀態、需求
汙染即時值	PM _{2.5} 、PM ₁₀ 、NO _x 、SO _x （kg/h）、CO ₂ （ton/h）
汙染累積值	各項汙染物累積排放量（kg）、累積社會成本（NTD）
硬體狀態	AMB82-mini 在線／離線、六通道 LED 燈態
調度紀錄	調度紀錄

表 12 各種數據紀錄（研究者自行繪製）

伍、討論

一、假設驗證總結

假設	結果	關鍵數據
情境壓力測試： 1 秒內完成調度決策	成立	Tick 週期=1 秒，每次完成完整計算鏈 (含 10 項子計算)
分級限電機制驗證： 限電優先保護民生	成立	用戶 B (P1) 在所有測試中均為最後限電對象

表 13 假設總結 (研究者自行繪製)

二、以真實電網事故驗證本系統調度邏輯

為進一步檢驗本系統之調度策略在真實情境下是否合理，我們選取台灣近年三起重大電網事故，按比例縮放至本系統的 8,500MW 規模，模擬大腦面對相同等級衝擊的反應。

情境比對一：大潭電廠事件 (2017 年 8 月 15 日)

時間	事件
16:45~16:51	中油承包商巨路公司在大潭電廠計量站更換電源供應器時，未切換為手動模式，系統偵測異常後自動關閉電動閥 (MOV-2229、MOV-2230)，天然氣供應中斷約 2~3 分鐘
16:51:02	大潭電廠 6 部燃氣機組陸續跳機，瞬間喪失約 4,200MW 供電 (約佔當時全台負載 12%)，系統頻率下降觸發低頻電驛保護 (代號 81)
16:54	中油恢復供氣，大潭電廠開始逐步檢查並聯
17:13	MOV-2230 全開，中油供氣恢復
18:00 起	台電實施 A/B 組緊急分區輪流停電，每輪 50~60 分鐘，共 4 輪
21:38	台中 5 號機及大潭 1~3 號機並聯，解除輪流停電
翌日 00:50	大潭 6 機組全數並聯，全台恢復正常供電

表 14 大潭電廠事件時間表-2017 (研究者自行繪製)

從事故到恢復：歷時約 8 小時，其中分區停電時段超過 3.5 小時，波及 668 萬戶。

真實供電數據

時間點	尖峰負載 (MW)	供電能力 (MW)	備轉容量 (MW)	備轉率 (%)	大潭發電 (MW)
13:58 (當日尖峰)	36,450	37,600	1,150	3.17%	Null
16:50 (事故前)	34,810	36,840	2,030	5.51%	4,157
16:51:02 (事故瞬間)	Null	Null	Null	Null	0 (全跳機)
事故後預估	34,150	~31,900	負值	Null	0

表 15 大潭電廠事件時間表-2017 (研究者自行繪製)

關鍵數據：事故前備轉率僅 5.51% (本系統中對應橘燈，因<6%)，瞬間喪失 12% 供電後，備轉立即轉為負值，導致全台 668 萬戶停電。

對應至本系統的模擬分析

將大潭事件按比例 (約 4,200MW /36,450MW≈12%) 縮放至本系統 8,500MW 規模：

項目	真實事件	本系統等效模擬
跳機規模	燃氣，約 4,200MW (佔 12%)	燃氣，1,020MW (佔 12%)
事故前機組	大潭燃氣：約 4,200MW	本系統燃氣：3,200MW
事故後燃氣出力	0 MW	3,200-1,020=2,180MW

表 16 現實數據比例縮放 (研究者自行繪製)

大腦即時反應：

1. T+0 (跳機瞬間)：燃氣出力從 3,200→2,180MW，產生 1,020MW 缺口
 $PM_{2.5}$ 瞬間從 193.60 降至 190.54kg/h (-1.6%)，因為跳掉的是低污染的燃氣
 社會成本從 169,762 降至 159,366NTD/h
 T+1 (大腦決策，1 秒後)：偵測到 deficit≈1,020MW，進入升載分配

水力+408 MW（40%）、燃氣+357 MW（35%）、燃煤+153 MW（15%）、燃油+102 MW（10%）

2. 升載完成後（穩態）：

燃煤 2,300→2,453MW、燃氣 2,180+357=2,537MW、燃油 0→102MW

PM_{2.5} 升至 214.05kg/h（比初始值+10.6%）

社會成本升至 184,280NTD/h（+8.6%）

本系統與真實事件的差異：

面向	真實台電的結果	本系統的模擬結果
電力供應	668 萬戶停電， A/B 組輪流限電 4 輪	大腦 1 秒內啟動升載分配， 若備轉足夠則無需限電
汙染衝擊	未公開即時排放數據	穩態 PM _{2.5} 僅增加 10.6% （因補位以水力+燃氣為主）
恢復時間	8 小時（16:51→翌日 00:50 全部恢復）	數十秒內各機組逐步升載完成 （仿真時間壓縮環境）
核心差異 原因	事故前備轉率僅 3.17%~5.51%，沒有餘裕	本系統初始備轉較充裕，且大腦 能即時調度所有可用機組

表 17 現實與系統的差異（研究者自行繪製）

討論：大潭事件的根本問題不在調度速度，而在事故前備轉容量已經極低（3.17%）。即使本系統的大腦能在 1 秒內做出決策，若備轉容量不足，照樣會觸發紅燈甚至黑燈限電。此事件驗證了「備轉容量是電網安全的最後防線」，這也是本系統為何設計了五階段備轉燈號預警機制的原因。

情境比對二：興達電廠事件（2022 年 3 月 3 日）

真實事件時間軸

時間	事件
09:07	興達電廠 345kV 北開關場進行隔離開關 3541 測試，值班及維護人員未確認相鄰斷路器 3540 內 SF ₆ 絕緣氣體壓力（前日抽離檢查後未回充），操作後發生短路接地故障

09:07~09:12	匯流排保護電驛因比流器訊號異常自動閉鎖（持續 5 秒低電流判定），故障未及時清除
09:16:20	龍崎超高壓變電所線路跳脫（龍崎北~南科二路），南部系統分裂

表 18 興達電廠事件時間表-2022（研究者自行繪製）

瞬間喪失約 10,500MW，約佔系統總負載 28,500MW 的 36.8%（三分之一以上）

此為台灣史上單一事件喪失供電量最大的電網事故。事故起因為人為疏失，SF₆ 氣體未回充，而非天然災害。

真實關鍵數據：

項目	數值
系統總負載	約 28,500MW
瞬間喪失供電	10,500MW（約 1/3）
當日備轉容量率	24.61%（7,015MW）
太陽能（正午）	3,618MW（佔 14.6%），此為事故當時太陽能正值高出力
太陽能（17:00）	744 MW（佔 2.8%）—傍晚快速下降
抽蓄發電（17:00）	1,587MW（佔 6%）

表 19 興達電廠關鍵數據-2022（研究者自行繪製）

對應到本研究，按比例縮放（10,500/28,500≈36.8%）至本系統：

項目	真實事件	本系統等效規模
喪失供電	10,500MW（36.8%）	3,132MW（36.8%）
太陽能貢獻（正午）	3,618MW（14.6%）	≈1,079MW（12.7%）
太陽能貢獻（17:00）	744 MW（2.6%）	≈222MW（2.6%）

表 20 現實數據比例縮放-2022（研究者自行繪製）

本系統與真實事件的差異：

面向	真實台電的結果	本系統的模擬結果
電力供應	南部全黑， 數小時恢復	盡力升載仍缺 720MW，觸發黑燈、三用戶全部限電
汙染衝擊	未公開即時排放數據	PM2.5 驟降 96.3% (T+0)，穩態仍低 84.9%—因 燃煤全消失
恢復時間	數小時	升載約需 73 秒完成（燃氣為最慢），但仍有 720MW 缺口無法填補
核心差異原因	36.8% 瞬間喪失， 南部系統分裂	同等比例衝擊已超出調度系統可獨立應對的範圍

表 21 系統與現實事件差異-2022（研究者自行繪製）

模擬：若本系統遭遇等比例衝擊（喪失 3,132MW）

假設事故導致所有燃煤（2,300MW）+部分燃氣（832 MW）跳脫：

1. T+0 瞬間：

即時發電=太陽能 1,200+風力 800+水力 1,000+燃氣 2,368=5,368MW

缺口=8,500-5,368=3,132MW

PM2.5 瞬降至 7.10kg/h（↓96.3%），因為最大汙染源燃煤完全消失

但供電嚴重不足，備轉為大幅負值

2. 大腦反應：

偵測到 deficit>3,000MW→嘗試升載所有機組至極限

但可用升載空間嚴重不足（水力最大僅 2,000、燃氣剩 2,368 僅能補至 4,500）

備轉燈號→黑燈（<500MW）

限電：shedCount=3→用戶 A、C、B 全部限電

結果：即使大腦在 1 秒內做出正確決策（盡力升載+全面限電），面對三分之一供電瞬間消失，系統仍無法避免大規模停電。

討論：興達事件的嚴重程度（瞬間喪失 1/3 供電）已超出任何調度系統可獨立應對的範圍。

此類事件的防禦重點不在調度速度，而在於：

1. 設備維護管理（事故起因是 SF₆ 氣體未回充的人為疏失）
2. 電網韌性（南部系統分裂代表輸電線路規劃的結構性弱點）

3. 再生能源的時段侷限：真實數據顯示太陽能正午佔 14.6%，但到 17:00 僅剩 2.6%，若同樣事件發生在傍晚，電網將面臨更嚴峻的考驗

本系統雖無法阻止此類災難性事故，但其五階段備轉燈號機制能提前發出預警（在備轉率降至 10% 以下時即亮黃燈），為調度員爭取預防性減載的時間窗口。

情境比對三：大潭電廠再次事故（2024 年 4 月 15 日）

真實事件概要：

項目	內容
日期	2024 年 4 月 15 日晚間
事故機組	大潭電廠 8 號機（燃氣）故障跳脫
備轉燈號	夜尖峰備轉容量轉為警戒橘燈
台電應變	運用抽蓄水力、時間電價、輔助服務及需量反應等措施因應
背景	因日間太陽能退場後，夜尖峰備轉容量本已偏低； 加上 2024 年 4 月 3 日花蓮地震損及部分機組尚未修復

表 22 大潭電廠事件概要-2024（研究者自行繪製）

此事件的意義：這不是一次「大規模停電」，而是一次「幾乎要限電」的警告。它印證了台灣電網在傍晚太陽能退場後的脆弱性，白天備轉充裕（太陽能正值高出力），傍晚卻可能因單一機組跳脫而亮起橘燈。

與本系統的對應：

本系統機制	對應真實事件
烏雲遮蔽 （太陽能驟降）	太陽能傍晚退場，效果等同烏雲遮蔽
橘燈自動限電	台電運用需量反應等措施因應；本系統會自動對工業用戶限電
燃氣跳機事件按鈕	大潭 8 號機跳機
備轉燈號即時顯示	台電在事後才公布橘燈；本系統即時顯示於儀表板

表 23 現實與系統之對應 -2024（研究者自行繪製）

本系統與真實事件的差異：

面向	真實台電的結果	本系統的模擬結果
電力供應	夜尖峰備轉轉為橘燈警戒，透過需量反應因應，未停電	大腦 1 秒內決策，5 秒內升載完成；若備轉率 < 6% 則自動對工業用戶限電
汙染衝擊	未公開即時排放數據	穩態 PM2.5 比初始增加 13.3%——主因是太陽能退場後由火力補位
恢復時間	偏短（單機修復）	5 秒內升載完成
核心差異原因	夜尖峰備轉本已偏低，單機跳脫即觸發橘燈	本系統初始備轉較充裕，但「太陽能退場＋跳機」疊加效應使 PM2.5 顯著上升

表 24 系統與現實事件差異-2024（研究者自行繪製）

討論：2024 年的大潭 8 號機事件證明，即使距離 2017 年 815 大停電已過 7 年，台灣電網在夜尖峰時段仍面臨相同的脆弱性。差異在於：2017 年事故發生在下午且規模巨大（6 部機組全跳），導致大規模停電；2024 年事故發生在晚間、僅 1 部機組跳機，但因太陽能已退場，備轉已偏低，單一機組跳脫就足以觸發橘燈警戒。

本系統的設計理念，在備轉率降至 6% 以下時自動對工業用戶限電，與台電在此事件中的應對策略（透過需量反應抑低尖峰）異曲同工，只是本系統選擇了更明確的「分級限電」機制。

三起事件的綜合比較

比較面向	大潭 2017（8/15）	興達 2022（3/03）	大潭 2024（4/15）
跳機規模	約 4,200M（12%）	10,500MW（37%）	110MW（2.5%）
事故原因	承包商操作疏失	SF ₆ 未回充	機組故障
事故前備轉率	3.17%～5.51%	24.61%	偏低（夜尖峰）
結果	668 萬戶停電	南部全黑	橘燈警戒
恢復時間	約 8 小時	數小時	偏短（單機修復）
本系統對應號	紅燈→黑燈	黑燈（直接）	橘燈
核心教訓	備轉容量不足	電網韌性脆弱	太陽能退場後的夜尖峰風險

表 25 三起事件之比較（研究者自行繪製）

本系統的設計解析：

「烏雲遮蔽」按鈕模擬太陽能驟降，模擬天候問題造成太陽能板發電效果不佳，瞬間失去一個重要電源，大腦須立即調度火力機組補位。

系統中太陽能從 1,200MW 降至≈25 MW 的缺口（1,175MW），與興達事件中太陽能從正午 3,618MW 降至 17:00 的 744 MW（落差 2,874MW，按比例≈857 MW）在規模上具有相似概念。

而真實世界中太陽能傍晚退場是可預測的（每天都會發生），而本系統目前不具備預測能力（研究限制第 2 項）。真實電力調度會在下午提前啟動火力機組暖機，此為本系統未來可強化的方向。

三、重要發現與延伸討論

發現一：燃煤跳脫後空污反而改善—三起真實事件的佐證

本系統在燃煤跳機情境中發現：PM_{2.5}瞬間下降 22.7%。在興達事件的模擬中，此效應被放大到極致，若全部燃煤跳脫，PM_{2.5}驟降 96.3%。

這個反直覺的結果有力地說明了：

在當前台灣電網中，燃煤是空氣污染的絕對主力。本系統初始狀態下，燃煤的 PM_{2.5} 佔系統總排放的 95.0%。減少燃煤，無論是計劃性的調度切換還是非計劃性的跳脫，都會直接改善空氣品質。然而，減煤的代價是供電穩定性風險。興達事件的模擬顯示，空污劇降的同時伴隨著災難性的供電缺口。而台灣本土研究亦指出，興達電廠燃煤機組除役每年可減少約 100 位死亡，但前提是必須有足夠的替代電源。

這正是本研究的核心：如何在「供電穩定」與「環境永續」之間找到最佳平衡。

發現二：備轉容量是決定成敗的關鍵—從 2017 到 2024 的反覆教訓

三起事件的備轉容量數據形成了一個清晰的故事線：

事件	事故前備轉率	結果	本系統燈號
大潭 2017	3.17%~5.51%	大規模停電	紅燈
興達 2022	24.61%	南部全黑 (但因事故規模太大)	黑燈
大潭 2024	偏低 (夜尖峰)	橘燈警戒	橘燈

表 26 三起事件之故事線（研究者自行繪製）

本系統的五階段燈號與真實台電的供電燈號系統高度類似：

本研究仿造台電實際使用綠燈（ $\geq 10\%$ ）、黃燈（ $6\% \sim 10\%$ ）、橘燈（ $< 6\%$ ）分級在此基礎上增加了紅燈（ $< 4\%$ ）與黑燈（ $< 500\text{MW}$ ），並附加了自動限電動作。若台電在 2017 年大潭事件前擁有類似本系統的自動預警與限電機制，在備轉率降至 6% 以下時即提前對工業大戶實施減供，或許能為後續的突發跳機保留更多緩衝空間。

發現三：SO_x 是低碳調度策略的「短板」

在對照實驗中，PM_{2.5} 減至 28.8%、NO_x 減至 41.4%，但 SO_x 僅減至 59.8%，降幅最小。原因是燃油 SO_x 排放係數（1.32 kg/MWh）高達燃煤（0.30）的 4.4 倍。實驗組中燃油僅佔 10%（100 MW），其 SO_x 排放卻佔實驗組 SO_x 總量的 73.6%。

此發現意味著：若追求更全面的汙染減量，未來系統可考慮進一步降低燃油機組的調度比例，或將 SO_x 權重納入升載分配的考量因子。

發現四：「情境意識」與「自動控制」應分離 地震、颱風、水庫面板刻意不自動控制電網，理由為：

1. 時間尺度不匹配：天災變化（分鐘～小時）遠慢於調度反應（秒級）
2. 資訊完整性：天災初期資訊常不完整，自動決策可能基於錯誤資訊
3. 人為判斷的必要性：「是否預防性降載」涉及風險權衡，需要人類專業判斷

興達事件正好印證了這一點，事故起因是人為疏失（SF₆ 未回充），而非天災。這類人因事故無法被天災預警面板偵測到，但本系統的備轉燈號機制仍能在供電異常時自動啟動防禦（限電保護）。

發現五：台灣能源轉型的進程印證本系統的設計方向

根據經濟部能源署最新數據，台灣 2024 年的發電結構為：燃氣約 42.4%、燃煤約 39.3%、再生能源約 11.6%。對比本系統的初始機組比例（燃氣 37.6%、燃煤 27.1%、再生能源 35.3%），本系統的再生能源佔比偏高，燃煤佔比則偏低。然而，台灣政府的目標是持續提升再生能源佔比（2024 年已首度突破一成），並逐步降低燃煤依賴。本系統的設定可視為對台灣未來電網結構的「前瞻性模擬」。

此外，台灣 2025 年已正式邁入「非核家園」階段（核三廠 2 號機於 2025 年 5 月除役），未來電網將更加仰賴燃氣與再生能源。此結構與本系統的調度策略「低碳優先、燃氣為主力、水力快速補位」有高度契合。

陸、結論

本研究成功建構以 Node-RED 為核心的智慧電網模擬調度系統，透過 MQTT 通訊協定連結 Node-Red 和開發版並且用決策邏輯驅動，並以 9 種情境模擬按鈕進行系統化的壓力測試。

實驗結果驗證了三項研究假設：

（1）低碳調度顯著降低空氣污染：燃氣發電之 $PM_{2.5}$ 排放僅為燃煤的 3.75%、 PM_{10} 為 4.30%。以 1,000MW 缺口計算，本系統之調度策略可將社會外部成本降至傳統全燃煤方案的 41.0%，每小時節省約 35,219 元的社會健康損害。台灣本土研究亦證實， $PM_{2.5}$ 相關死亡每年超過 6,000 人，IARC 已將 $PM_{2.5}$ 列為第一類致癌物。

（2）系統具備即時反應能力：面對機組跳脫、再生能源驟減、負載暴增等極端情境，系統均在 1 秒的 Tick 週期內完成從供需偵測到硬體指令下達的完整調度流程。將台灣三起真實電網事故（大潭 2017、興達 2022、大潭 2024）按比例映射至本系統後，大腦在所有情境中均能在 1 秒內做出正確的調度決策。

（3）分級限電有效保護民生：系統嚴格依照 priority 排序執行限電，並透過五階段備轉容量燈號（綠→黃→橘→紅→黑）界定限電強度。此燈號機制與台電實際使用的供電燈號系統高度類似，且本系統額外附加了自動限電動作，2024 年大潭 8 號機跳脫觸發橘燈警戒的事件，恰好驗證了本系統橘燈自動限電設計的實際價值。

本研究最核心的價值：將抽象的「環境代價」轉化為具體的「社會外部成本」數字。參考衝擊路徑法（IPA）文獻中的社會成本參數，我們讓「減碳」不再只是口號，而是每小時、每 MW 都可以精確計算的經濟指標，每少用 1MW 燃煤發電，每小時可節省 9.6 元的 $PM_{2.5}$ 健康損害成本（ $0.08 \text{ kg/MWh} \div 1,000 \times 120,000 \text{ NTD/噸}$ ）。以本系統的 2,300MW 燃煤規模推估，低碳調度理論上每年可避免超過 1.37 億元的社會健康損害。

此系統呈現了自身的 9 項研究限制：它是規則引擎而非 AI、排放係數為固定值、硬體為縮尺模型、未納入輸電韌性與儲能系統。然而，這些限制不影響核心結論的有效性，在調度策略的選擇上，優先使用低碳機組（水力、燃氣）補位，能在維持供電穩定的同時，大幅降低社會付出的隱性環境代價。台灣 2025 年邁入非核家園後，電網將更加仰賴燃氣與再生能源，此結構與本系統的「低碳優先、燃氣為主力、水力快速補位」策略高度契合。這為未來台灣電力調度在「供電穩定」與「環境永續」之間尋求最佳平衡，提供了數據基礎與邏輯思維。

附錄



模擬系統介紹



柒、參考文獻與資料

全漢企業（2022 年 12 月 20 日）。建立智慧電網：您應知道的 5 種智慧電網解決方

<https://www.fsp-group.com/tw/knowledge-prd-56.html>

中央氣象署（無日期）。Opendata API 線上說明文件。中央氣象署開放資料平臺。

<https://opendata.cwa.gov.tw/dist/opendata-swagger.html>

apan1121（無日期）。台灣電廠即時資訊。GitHub。 <https://apan1121.github.io/powerInfoV2/#/unit>

台灣電力公司（2024）。2024 健全供應商管理。 <https://reurl.cc/ovdbLD>

Green Impact. (2022, November11). *Carbon Sequestration: A Key to Net-Zero Emissions*。

<https://www.greenimpact.cc/en-US/Articles/detail?id=157>

廖禹婷（2017 年 8 月 7 日）。【2017 回顧】離岸風電 台灣再生能源的下一個藍海？環境資

訊中心。 <https://e-info.org.tw/node/206758>

中央研究院環境變遷研究中心（2018 年 10 月）。**臺灣邁向淨零排放的道路：重大部門減碳技術潛力與成本分析（附錄）** [PDF]。

<https://rcec.sinica.edu.tw/publications/roads2netzero/app1/appendix.pdf>

國家發展委員會（2023 年 12 月）。**推動淨零轉型之效益**（報告編號：（112）010.0201） [PDF]。 <https://ws.ndc.gov.tw/001/administrator/10/refile/5636/38536/a229ac63-cc76-41cf-9ec6-4bc468caebf7.pdf>

經濟部能源署（2024 年）。**2024 年燃料燃燒之二氧化碳排放量統計與分析**[PDF]。
https://www.esist.org.tw/attachments/co2/2024/ebook/assets/2024v10_2025-08-11_08-10-44.pdf

林士凱（2022）。**淨零排放下我國能源轉型之挑戰與因應**。能源知識庫。
https://km.twenergy.org.tw/Publication/thesis_down?id=126

鄭睿合、鄭翔勻（2022）。**氣候政策對臺灣產業產出及經濟影響分析**。中華經濟研究院。
<https://reurl.cc/M2dm1v>