

出國報告（出國類別：實習）

# 以 PLEXOS 軟體為基礎之整合資源規劃 評估分析方法之研習

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：黃懷宗(規劃專員)

派赴國家/地區：新加坡

出國期間：112 年 12 月 11 日至 112 年 12 月 16 日

報告日期：113 年 2 月 2 日

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：以 PLEXOS 軟體為基礎之整合資源規劃分析方法之研習

頁數\_54\_ 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

黃懷宗/台灣電力公司/電源開發處/規劃專員/(02)2366-6874

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：112 年 12 月 11 日至 112 年 12 月 16 日

派赴國家/地區：新加坡

報告日期：113 年 1 月 30 日

關鍵詞：整合資源規劃(Integrated Resource Planning, IRP)、淨零排放(Net-Zero)、電力市場(Electricity Market)、最佳化(Optimization)

## 內容摘要：

我國已宣布 2050 年達成淨零排放的目標，為了實現此目標，台電公司成立相對應的工作小組，針對關鍵性的議題進行分析及探討，並借助 PLEXOS 軟體協助探討電源端可能面臨的風險和挑戰。自工作小組運作至今，已有初步的成果，然而在評估過程中並非一帆風順的，我們遭遇各項挑戰，包含如何系統性整合各方資源及 PLEXOS 軟體運用等，都需逐一解決。

淨零排放是國際趨勢，世界各國有其方法來探討各項挑戰，因此通過與國外的交流及 PLEXOS 軟體培訓，了解國外的創新思維與經驗，作為我們持續前進的重要參考。因此，本次前往新加坡學習 PLEXOS 軟體進階功能及了解 PLEXOS 軟體用戶澳洲能源市場調度中心(AEMO)如何使用 PLEXOS 以整合資源規劃方法規劃至 2050 年的發展路徑，另外也與新加坡的能源市場公司(EMC)就新加坡電力市場發展及 PLEXOS 軟體使用經驗進行交流。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

# 目次

壹、 出國目的.....	3
貳、 出國行程.....	5
參、 實習過程.....	6
一、 概述.....	6
二、 PLEXOS 軟體實習.....	7
(一) PLEXOS 關鍵模型參數 .....	11
(二) PLEXOS 運算原理 .....	20
(三) PLEXOS Cloud .....	24
三、 澳洲國家電力市場(NEM)整合資源規劃 .....	25
(一) 澳洲電力系統概要 .....	26
(二) 規劃流程 .....	29
(三) 重要輸入參數 .....	30
(四) 方法論 .....	36
(五) 重點成果 .....	37
四、 新加坡電力市場交流.....	40
(一) 新加坡電力系統結構 .....	40
(二) 新加坡電力市場 .....	43
(三) 新加坡能源市場公司(EMC)PLEXOS 交流 .....	48
(四) 新加坡 2050 淨零排放 .....	49
肆、 心得及建議.....	50
伍、 致謝.....	53
陸、 參考資料.....	54

## 壹、出國目的

科學證實氣候變遷造成的影響越趨嚴重，爰世界各國陸續對外宣布淨零排放目標，我國亦已宣布 2050 年將達成淨零排放。因再生能源除屬無碳能源外，亦是一種可永續利用之自然能源，因此，在達成淨零排放為最終目標下，未來能源發展將以再生能源為主要開發能源(其中又以光電及風力為主要發展)、低碳或零碳火力發電及儲能系統為輔助。然而再生能源發電情形受地理位置及氣候條件等影響甚鉅，且不易受人為控制，因此，在積極推動再生能源同時，如何兼顧電力系統穩定安全運轉、發電成本可負擔及環境永續為長期電源規劃的一大挑戰。

為了實現政府淨零排放目標，台電公司成立工作小組就需求面管理、電網、電源、財務等議題進行討論，其目的為分析及探討未來將面對的風險及挑戰，以利提早準備相對應之措施。以電源端而言，一定規模以上之電力系統，由於發電機數量組眾多且內部(物理限制或操作限制等)及外部(如政策目標、環保限制等)運轉限制非常複雜，僅依賴簡單人工計算方式只能快速了解大致方向，且無法同時兼顧多項考量目標或限制(如考量發電容量是否充足時，無法同時考量電能是否足夠)，因此無法對電力系統可能運行情形及面臨挑戰進行深入的研究。為解決此問題，需要借助功能強大的模擬分析軟體，更好預測未來系統運轉情形，使我們更有充足資訊指出未來可能出現的挑戰，並給予適當的解決方案，同時亦能提供決策者足夠的資訊，使其能更精準決定未來投資各項建設優先順序。

因此，為因應日趨複雜的電力系統，本公司業已引進模擬分析軟體 PLEXOS 探討未來電源端可能面臨之風險及挑戰，引進主要原因為 PLEXOS 軟體功能強大、提供使用者足夠彈性建置模型及受國際上許多監管機構、調度中心、公用事業及顧問公司使用，因此具有足夠公信力，是目前最合適的電源規劃分析軟體。

現今已使用 PLEXOS 有一段時間，對其基礎功能有基本了解及實際使用經驗，且已經有初步成果，但在這過程中遭遇許多困難及挑戰，從分析方法論、如何系統性整合各方資源、如何考量未來新技術的不確性及參數、內部及外部的運轉限制到 PLEXOS 軟體使用技巧等等，每一個項目都是一大挑戰，需要耗用大量時間及精力去更好的處理問題。

面對 PLEXOS 軟體使用上的困境，若持續獨自鑽研，將需耗費巨大的時間及精力才能有所突破，因此希望藉由本次出國實習機會，藉由國際交流及軟體進階功能培訓，了解國外的創新思維與經驗及提升 PLEXOS 軟體運用技巧，藉由他山之石，作為我們持續前進的重要參考。

本次實習前往 PLEXOS 軟體開發商 Energy Exemplar 位於新加坡的辦公室，透過實體面對面培訓的方式，針對 PLEXOS 軟體進階功能進行教育訓練及討論目前 PLEXOS 模型遭遇問題及可行改善方式；另外，Energy Exemplar 亦介紹該公司客戶之一澳洲能源市場調度中心(Australian Energy Market Operator, AEMO)如何使用 PLEXOS 軟體針對澳洲國家電力市場((National Electricity Market, NEM))進行整合資源規劃以探討該地區 2050 年淨零排放路徑。

此外也拜訪新加坡能源市場公司(Energy Market Company, EMC)，雙方就電力市場發展、2050 年淨零目標及 PLEXOS 軟體使用經驗進行交流。

## 貳、出國行程

本次出國計畫共 6 天(含交通時間)，出國地點為新加坡，主要時間為前往 PLEXOS 軟體開發商 Energy Exemplar 實習；另 12/13(三)下午拜訪能源市場公司(EMC)，雙方主要針對電力市場發展、2050 年淨零目標、PLEXOS 軟體使用經驗進行交流。

日期	機構	主題
12/11		去程
12/12	Energy Exemplar	1.整合資源規劃(Integrated Resource Planning) 2.氫能及儲能運用(Power2X & BESS) 3.問題及討論
12/13 上午	Energy Exemplar	1.可靠度分析(Reliability Analysis) 2.不確定性分析(Uncertainty Analysis) 3.隨機性最佳化(Stochastic Optimization) 4.問題及討論
12/13 下午	Energy Market Company	1.電力市場發展 2.2050 年淨零目標 3.PLEXOS 軟體使用經驗交流
12/14~15	Energy Exemplar	1.最佳化原理(Optimization Principles) 2.多目標最佳化(Multi-Objective Optimization) 3.燃氣模擬(Gas Modelling) 4.競價模擬(Competition Modelling) 5.PLEXOS 雲端(PLEXOS Cloud) 6.問題及討論 7.綜合座談
12/16		回程

## 參、實習過程

### 一、概述

本次出國實習因時間較短且本身已對 PLEXOS 運用有基本了解，因此，實習方式採以終為始概念(逆向設計課程)進行規劃，實習期間隨時針對軟體運用上遭遇困難及進階功能進行討論，豐富實習內容及成效。

實習內容主要涵蓋三大項目(一)PLEXOS 軟體、(二)整合資源規劃、(三)新加坡電力市場交流，這三部分都是圍繞在 PLEXOS 軟體的運用上。由於 PLEXOS 軟體功能及應用的複雜性，學習曲線較長，因此，本次實習主要著重在於提升 PLEXOS 軟體進階功能應用及面對各項問題的模擬分析技巧。另考量 PLEXOS 軟體運算原理艱澀、模型參數眾多模型及建置過程繁瑣，因此報告盡可能以淺顯易懂方式介紹實習內容，並只針對較重要且經常使用功能及參數做說明及介紹。

在第一部分主要介紹 PLEXOS 軟體，內容主要為 PLEXOS 軟體各種功能、運算原理及短期、中期和長期不同時間解析度下對應的探討議題及應用方式；另外，也簡單介紹 PLEXOS 軟體可以模擬各項設施的物體特性，如火力機組、水力機組、再生能源機組、儲能系統等。

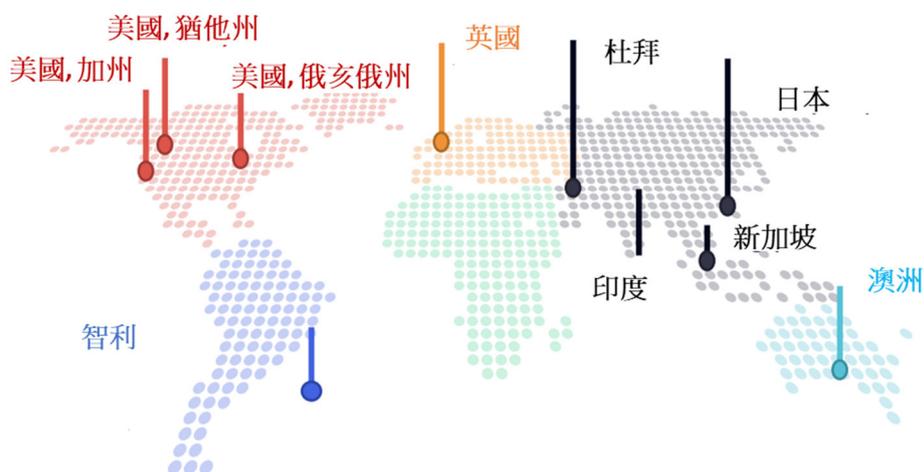
第二部分主要介紹整合資源規劃，一般而言，先進國家因電力系統複雜性或法律要求，通常會進行系統性規劃評估(如美國、澳洲、南非)，其主要目的為提供各利益關係者未來的發展方向及了解未來面臨的風險及挑戰。考量目前本公司已使用 PLEXOS 針對 2050 年淨零路徑等相關業務進行模擬評估，澳洲能源市場調度中心(AEMO)亦使用 PLEOXS 軟體進行系統性評估，其評估方法非常全面且透明度高，因此透過 PLEXOS 開發商 Energy Exemplar 介紹 AEMO 如何進行整合資源規劃及如何使用 PLEXOS 進行評估。

第三部分主要介紹新加坡電力市場發展、2050 年淨零目標，雖然新加坡電力系統規模較台灣小很多，惟與台灣同樣地小人稠，但其電業自由化程度遠超台灣(亞洲第一個電業自由化)；另其對 2050 年淨零排放有雄偉目標，值得學習及交流。

## 二、PLEXOS 軟體實習

隨著電力系統日趨複雜化(間歇性再生能源大量發展),僅依靠傳統人工方式來進行電源端相關議題分析及探討已經越來越困難。在此背景條件下,借助功能強大的模擬軟體來協助探討分析顯得尤為重要,除可以對未來的風險及挑戰更深入探討外,亦可提供決策者足夠資訊進行投資決策,因此,在國際上,眾多機構使用 PLEXOS 軟體於電源端或電力市場相關分析及研究。

PLEXOS 是由澳洲 Energy Exemplar 公司開發的模擬軟體,該公司成立於 1999 年主要專注於電源端或電力市場模型建置及分析。國際上廣泛用於電力市場、天然氣和水市場的發展策略規劃和最佳化運轉策略等議題進行探討。



資料來源: Energy Exemplar

PLEXOS 軟體在眾多模擬軟體脫穎而出的其中一個重要特點是提供使用者單一、人性化及易於使用的操作介面，並可將短、中、長期模擬結果進行整合，讓使用者可以更專注於模擬分析上。



資料來源: Energy Exemplar

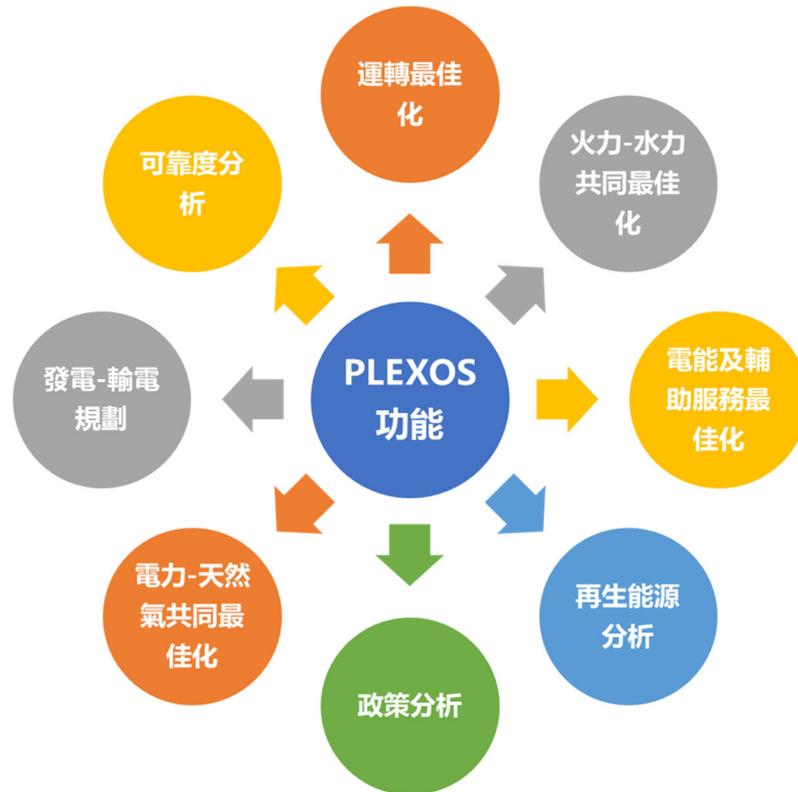
PLEXOS 另一主要優點是時間解析度可到次小時(最小解析度為秒)，因此可以更好反應再生能源間歇性影響，另針對間歇性議題提供蒙特卡羅(Monte Carlo)及隨機性最佳化(Stochastic Optimization)等分析方法，以達更好的分析模擬，因此國際上許多機構使用 PLEXOS 進行再生能源分析。PLEXOS 除了提供以成本(Cost-base)為基礎外，亦提供競價(Bid-base)為基礎運算方式，故國際上亦有許多機構使用 PLEXOS 於電力市場分析用途。各國使用 PLEXOS 用途如下圖所示:



資料來源: Energy Exemplar

PLEXOS 主要應用內容如下所示:

- 1.整合資源規劃(Integrated Resource Planning)
- 2.風險及可靠度分析(Risk & Reliability Assessment)
- 3.檢修排程規劃(Maintenance Planning)
- 4.水庫放水策略(Water Storage Optimization)
- 5.電力市場分析(Market Analysis)
- 6.電網壅塞分析及運轉彈性評估(Congestion Analysis & Flexibility evaluation)
- 7.價格、燃料使用、溫室氣體排放預測(Price, Fuel Offtake and Emission Forecast)

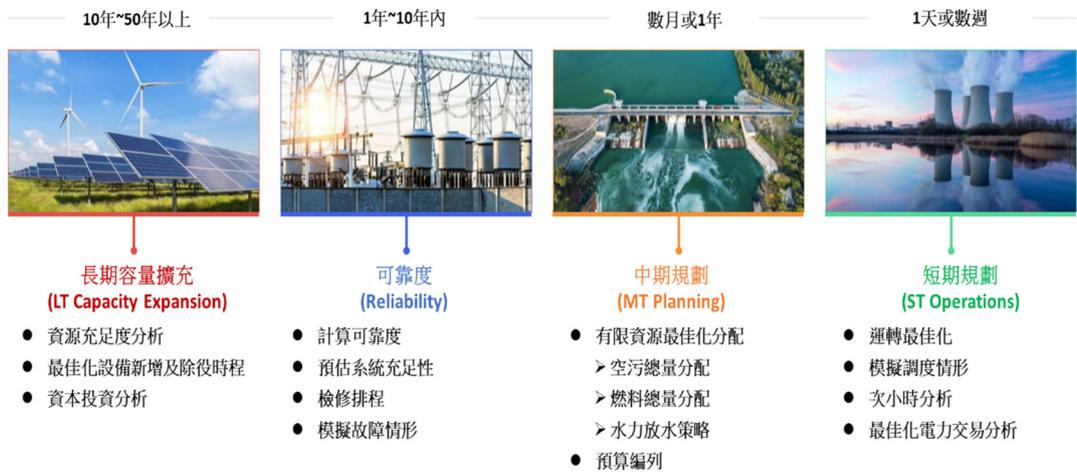


資料來源: Energy Exemplar

PLEXOS 的應用場景非常廣泛，為了更好的解釋其功能，採用質化思考引導量化模型的方式介紹 PLEXOS。首先介紹長期、中期、短期規劃的關注的重點，這些不同時期關注的重點在 PLEXOS 中亦有相對應的運算方式，並將其結果進行整合，接下來介紹量化模型所需之各項參數屬性及運算原理，這是影響 PLEXOS 模擬結果合理性及正確性的一項關鍵議題。

PLEXOS 長期、中期、短期及可靠度運算模型功能如下:

- 長期容量擴充:主要探討未來需要新增或除役多少裝置容量的發電機組、輸電線路,主要使用於投資決策分析,一般分析期間一般在 10~50 年範圍內。
- 可靠度:主要用於設備檢修預排、故障事件模擬及可靠度計算,一般分析期間為 1~10 年。
- 中期資源規劃:主要用於運轉策略及預算編列,如全年空污排放限制或燃料使用限制,每天或每月分配多少數額,一般分析期間為 1 年內。
- 短期規劃:主要用於模擬機組實際上調度情形及電力交易分析,一般分析期間為 1 天~1 週。



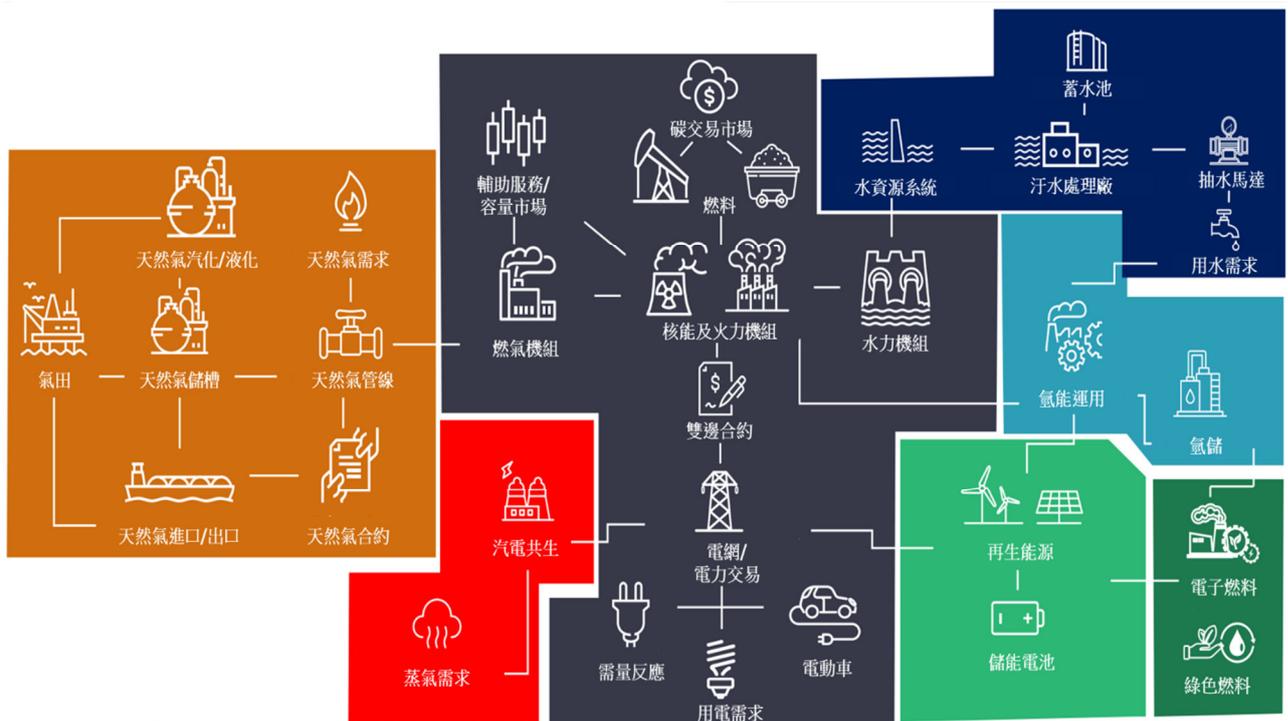
資料來源: Energy Exemplar

## (一) PLEXOS 關鍵模型參數

PLEXOS 提供用戶通用數學模型，這些數學模型可以精準的代表各項設備的運轉特性，這不僅降低使用者建置數學模型的技術門檻，而且還減少模型建置所需時間。如此一來，用戶能夠專注於分析及探討未來面臨的問題，避免耗費大量的時間及精力在模型建置上。

PLEXOS 針對電力系統、天然氣及水資源的特性，提供一系列的通用數學模型，這些數學模型可以用來描述和模擬不同資源的特性和行為，從最基礎的物理特性到更複雜的系統行為(如電力市場等)幾乎涵括其中，另 PLEXOS 亦提供用戶依據自身需求自定義模型。

目前 PLEXOS 能模擬的設備物體特性或行為模式如下圖所示，每個設備或行為模式內含多項參數供使用者設定，以更好的模擬實際的行為。

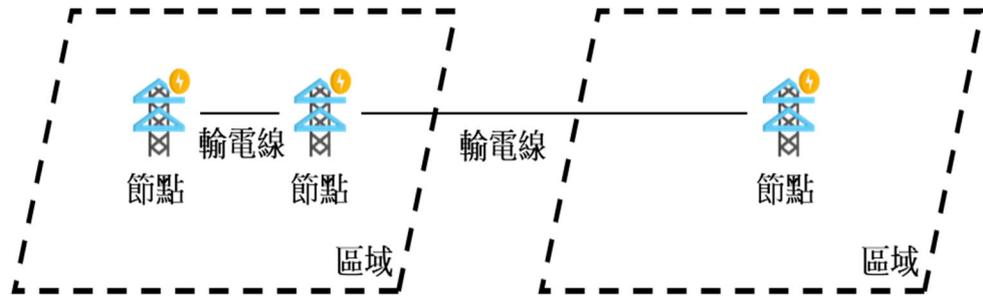


資料來源: Energy Exemplar

PLEXOS 提供參數繁多，因此僅針對重點參數進行簡要說明，介紹內容為負載地區、發電機組、儲能系統、天然氣供應系統及輔助服務。

### (一)負載地區

負載可使用節點(如:變電所或匯流排等)或區域(如:台灣本島地區、金門地區、馬祖地區等)反應用電需求，節點與節點之間可透過輸電線連接。



資料來源: Energy Exemplar

### (二)發電機組

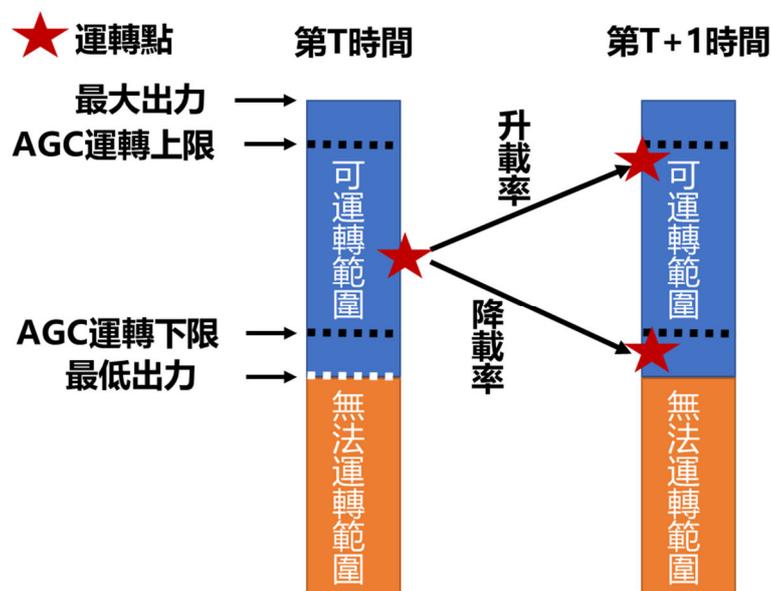
PLEXOS 可以模擬核能、火力、再生能源等發電機組，並藉由不同參數的設定反應各類型發電機運轉特性。



發電機參數眾多(數以百計)，較重要之參數及代表意義如下:

參數	意義及用途
Units	機組數量
Max Capacity	機組最大出力或裝置容量
Min Stable Level	機組最低出力
Heat Rate	機組效率
Fuel Price	燃料價格
VO&M、FO&M	機組變動運維費、固定運維費
Start Cost	機組啟動成本

參數	意義及用途
Run Up/Down Rate	機組啟動/停機速度
Rating	機組實際容量(因老化或核心零件升級而改變機組最大出力)
Rating Factor	發電出力百分比，一般用於再生能源
Min Up/Down Time	最少運轉/停機時間
Must-Run Units	因安全考量，必須運轉機組
Max Ramp Up/Down	機組最大升/降載能力
Regulation Point	機組自動發電控制(頻率調控)最低運轉點
Regulation Range	機組自動發電控制(頻率調控)運轉範圍
Inertia Constant	機組慣性常數值，代表機組旋轉動能在額定功率下可持續發電時間
Units Out	機組檢修
Forced Outage Rate	機組故障率
Maintenance Rate	機組檢修率



### (三)儲能系統

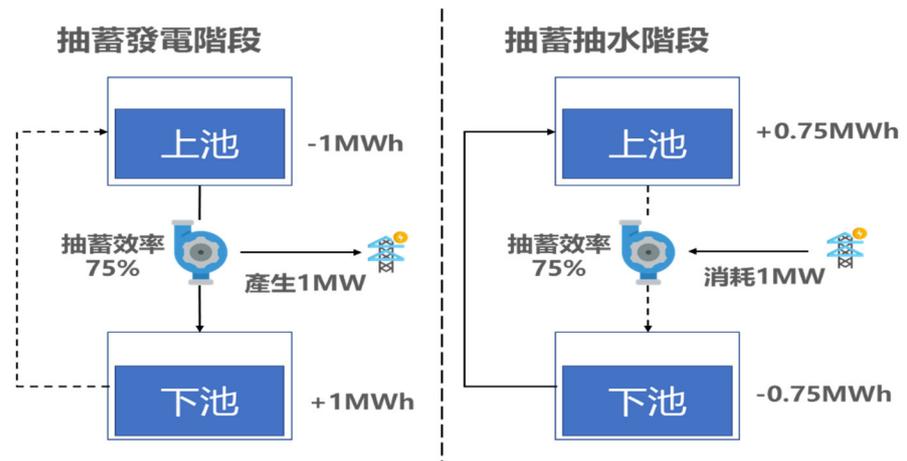
儲能系統是一種將電力轉換為可儲存的能量，在需要的時候再將能量轉換為電力的設備。此技術在電力系統中扮演越來越重要的角色，主要原因在於高彈性的運用方式，以應對需求端與供給端的變化。

儲能系統主要可以區分為三大類，分別為抽蓄水力、電池儲能及氫儲，主要使用參數說明如下。

#### 1.抽蓄水力

抽蓄水力主要通過兩個(或以上)的水庫(池)，一個位於高處，另一個位於低處，在用電負載低時，使用電力將水從低處水庫(池)抽到高處水庫(池)，當用電負載高時，儲存在高處水庫(池)的水被釋放，透過水的位能差產生動力來發電，所需基本參數如下：

參數	意義及用途
Units	機組數
Max Capacity	最大裝置容量
Pump Load	抽蓄水力負載容量
Pump Efficiency	抽蓄水力效率
Max Volume	高/低處水庫(池)庫容

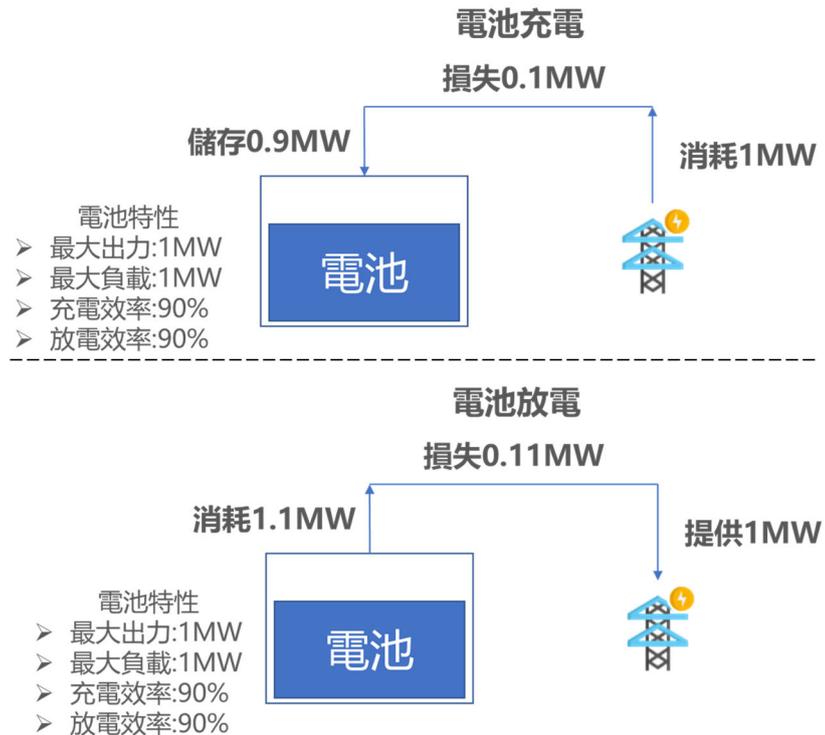


資料來源: Energy Exemplar

## 2. 儲能電池

儲能電池使用電化學原理來儲存及釋放電力，此種方式優點在於能夠快速提供電力系統可靠且穩定的電力，其功能與抽蓄水力相似，在再生能源發展越來越迅速及儲能電池成本越來越低條件下，扮演角色越來越重要。其主要參數如下：

參數	意義及用途
Units	機組數
Capacity	儲存電能
Max Power	最大放電能力
Max/Min SoC	最大/小充電狀態
Charge/Discharge Efficiency	充電/放電效率
Self-Discharge Rate	自放電率
Capacity Degradation	儲能電池因循環次數增加導致壽命降低

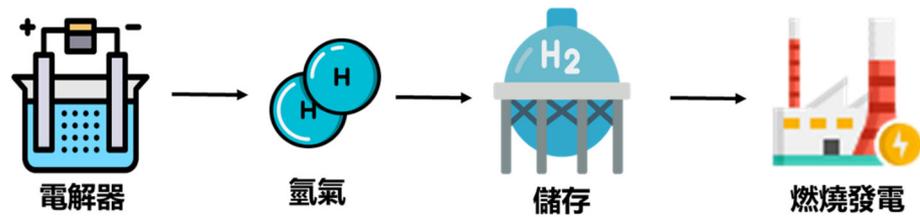


資料來源: Energy Exemplar

### 3. 氫儲

氫儲是將電轉換為燃料的方式進行大規模儲存，原理為透過電解器消耗電力將水轉換為氫氣，再將氫氣儲存至適當時機點燃燒發電。此技術在電業領域用於儲存大量過剩的再生能源以減少碳排放量，國際上視此技術在能源轉型中扮演關鍵角色，惟此技術目前正在發展中尚未成熟。主要參數如下：

參數	意義及用途
Units	機組數
Max Load	製氫最大負載
Efficiency	制氫效率
Water Consumption	耗水量

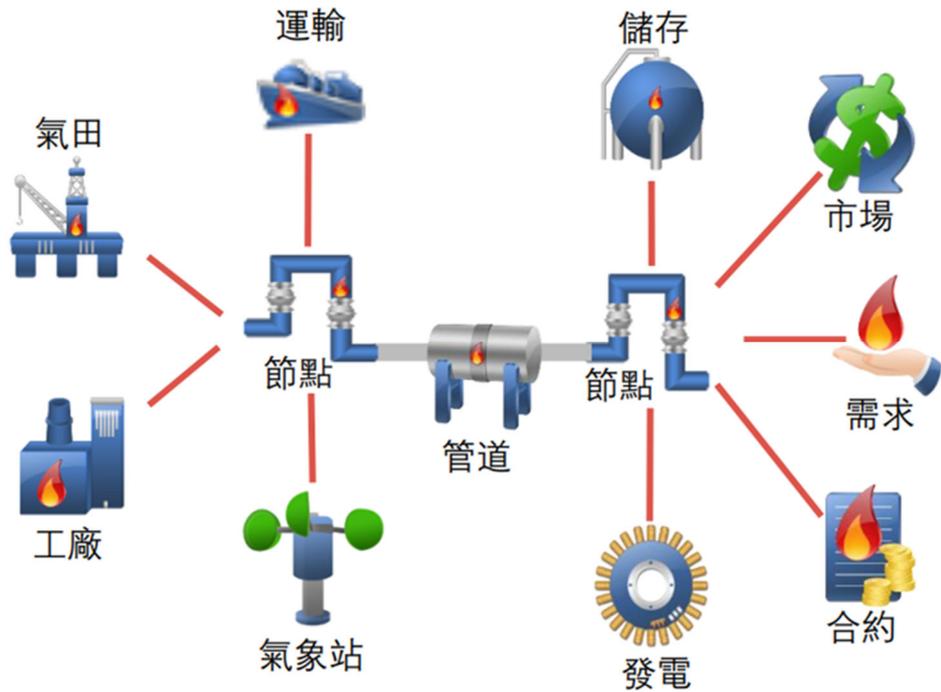


資料來源: Energy Exemplar

#### (四)天然氣供應系統

燃料供應在電力系統中扮演重要的角色，燃料供應的穩定性影響電力系統運轉安全性，而燃料價格的高低影響發電成本。在 PLEXOS 模型中提供簡易及複雜(需另外購買授權)兩種模型，簡易模型提供基本的燃料特性(如燃料價格、燃料熱值)，複雜的模型提供從生產端(如天然氣開採)、運輸端(船運、卸收、管路輸送、儲槽)及商業行為(天然氣 Take or Pay 合約)等更細緻參數使分析者能更深入探討。

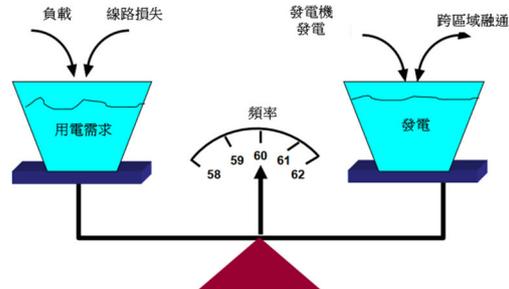
參數	意義及用途
Max/Min Volume	天然氣管線或儲槽最大/小容量
Loading/Discharge Time	船運裝載/卸收所需時間



資料來源: Energy Exemplar

## (五)輔助服務

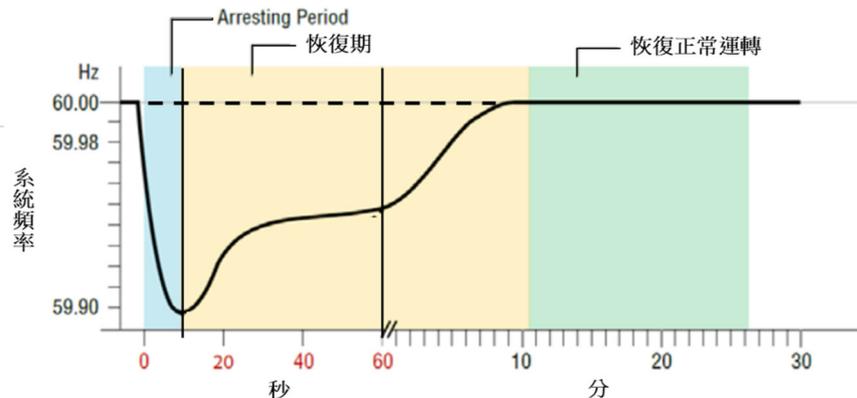
電力系統運轉頻率需保持一定值(台灣為 60Hz)運轉，若系統運轉上有任何擾動(負載增加或減少、發電機組故障、再生能源發電量變動)，將導致系統頻率變高或變低，嚴重時將導致電網崩潰。



資料來源: INDIANA UTILITY REGULATORY COMMISSION

然而負載變化及發電機組故障等因素現實中無法避免，因此需準備適當輔助服務以確保電力系統安全穩定運行。輔助服務有許多種類型，其目的各有不同，大致類型如下列:

1. 慣量(Inertia):當發電機組或其它設備突然故障，已併聯機組瞬間反應使系統頻率下降速度( Rate of Change of Frequency, RoCoF)降低，以避免頻率變化過快引發其它機組跳機連鎖反應。
2. 調頻備轉(Regulation Reserve):已併聯機組時時刻刻改變出力，以確保電力系統處於供需平衡狀態。
3. 熱機備轉(Spinning Reserve):當發電機或其它設備突然故障，已併聯機組提供電能滿足需求。
4. 補充備轉(Supplemental Reserve): 當發電機或其它設備突然故障，已併聯或未併聯機組提供電能滿足需求。

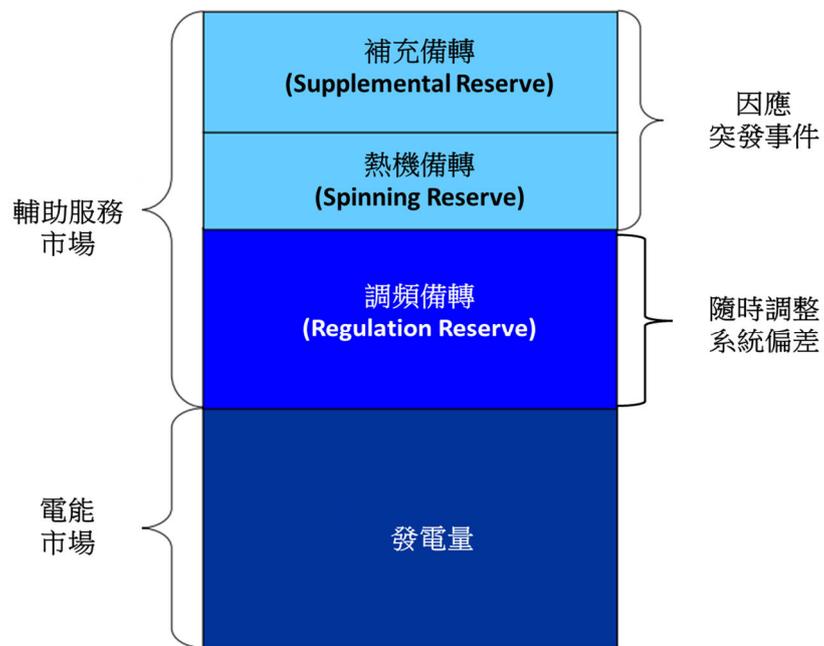


資料來源:NERC

各國輔助服務要求有所不一，因此 PLEXOS 提供輔助服務類型、反應時間及持續時間等參數供使用者設定，以更好反應各項輔助服務要求。

參數	意義及用途
Reserve Type	輔助服務類型:慣量、調頻備轉、熱機備轉、補充備轉
Min Provision	最小需求量
Timeframe	反應時間
Duration	持續時間

輔助服務在 PLEXOS 中一般與電能一同進行最佳化，因為大多數發電機組需要提供電能後才能提供輔助服務功能。



資料來源: INDIANA UTILITY REGULATORY COMMISSION

## (二) PLEXOS 運算原理

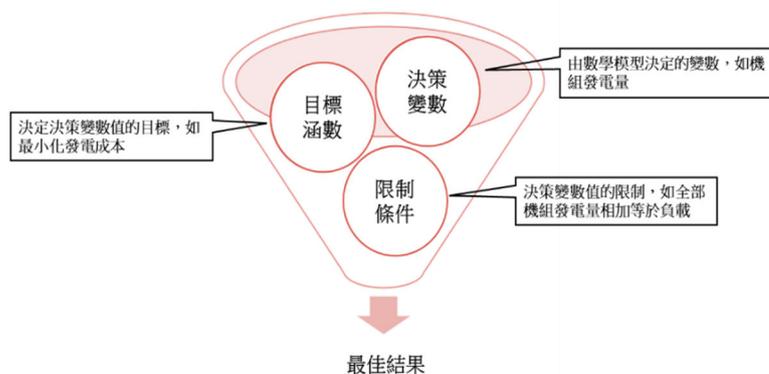
PLEXOS 是最佳化軟體，以電力市場而言，PLEXOS 針對不同的市場條件，提供不同的方法來進行最佳化模擬。面對受監管的電力市場中，採用以成本為基礎方式(Cost-base)，PLEXOS 主要功能為確定最好的運營計畫，以最低的成本滿足用戶的需求及合約約定義務(如購售電合約)，以確保電力系統成本的經濟性及可接受性。然而，在自由化的電力市場中，採用以競價為基礎方式(Bid-base)，PLEXOS 的目標變為更複雜，不僅僅只是考慮成本，還需預測市場價格、競爭對手未來各項資源配置及未來市場機制，在變動的市場中尋求機會，確保利潤最大化。



資料來源: Energy Exemplar

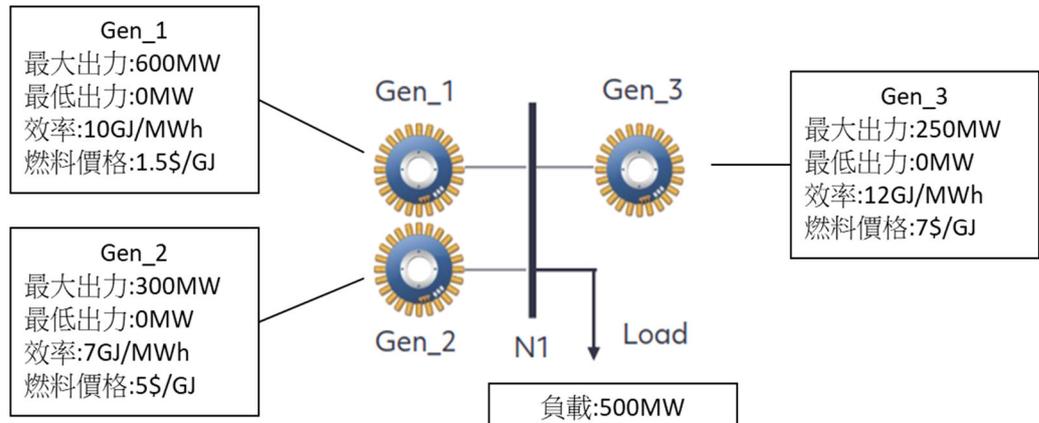
### (一) 最佳化原理

PLEXOS 主要使用線性規劃(Linear Programming, LP)及混合整數規劃(Mixed-Integer Programming, MIP)數學模型。一般而言，進行最佳化運算主要包含三大要素，分別為目標函數(Objective function)、決策變數(Decision variables)及限制條件(Constraints)。



資料來源: Energy Exemplar

以一個簡單例子而言，假設一個小系統用電需求 500MW，系統中有三個發電機，相關特性說明如下：



資料來源: Energy Exemplar

上述系統最佳化運算的數學式如下：

$$\text{Minimize: } 15 * \text{GenLoad\_Gen\_1} + 35 * \text{GenLoad\_Gen\_2} + 85 * \text{GenLoad\_Gen\_3}$$

➡ 目標函數

$$\text{Subject to: } \text{GenLoad\_Gen\_1} + \text{GenLoad\_Gen\_2} + \text{GenLoad\_Gen\_3} = 500$$

$$\text{GenLoad\_Gen\_1} \leq 600, \text{GenLoad\_Gen\_2} \leq 300, \text{GenLoad\_Gen\_3} \leq 250$$

➡ 限制條件

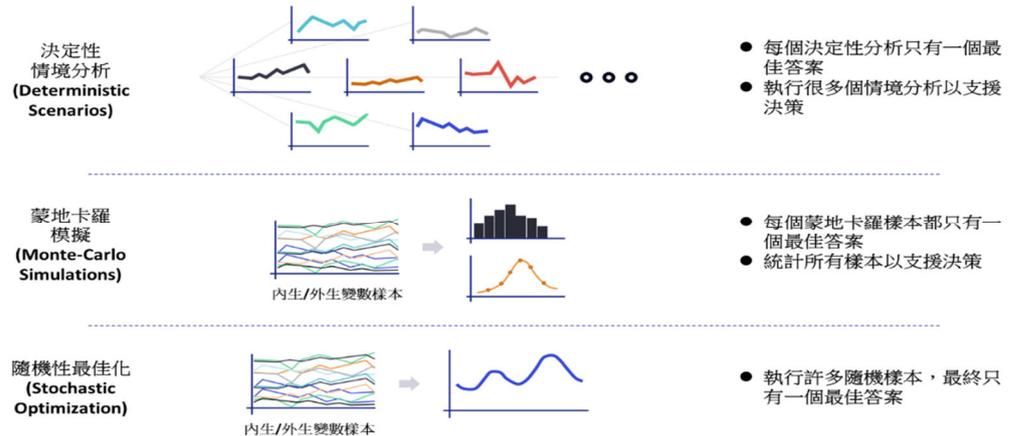
GenLoad代表決策變數，由模型決定最佳值

資料來源: Energy Exemplar

上述範例是一個簡單例子，實際上電力系統中每個設備的限制條件繁多，且限制條件不僅有設備操作上的物理限制，還有政策目標的限制，環境保護的限制、燃料供應限制等諸多外在限制條件等，因此實際上數學模型非常龐大，需要藉助各種手段(如多層次最佳化，後續會簡單說明)以簡化模型運算時間。

## (二)不確定性分析及隨機性最佳化

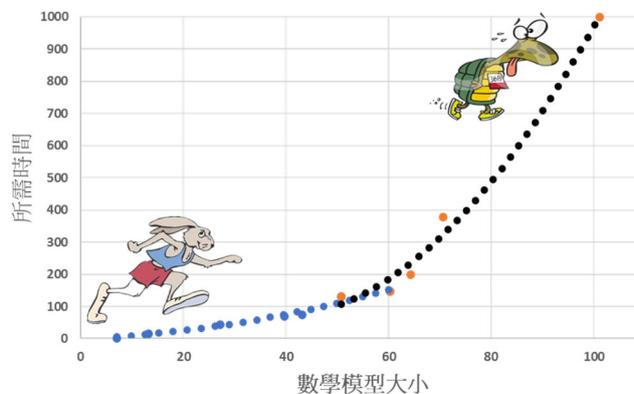
電力系統中許多現象是不確定性、不精確或隨機性(如負載變動、再生能源發電不確定性)，因此隨機性最佳化對於電力系統是非常重要的，因為所有的營運和決策都具有不確定性。面對未來的不確定性，PLEXOS 提供三種方式，分別為情境分析、蒙地卡羅、隨機性最佳化方式以更好的分析未來面臨的挑戰，這三種方法各有其優劣及適合的應用場合，其簡單說明如下圖所示。



資料來源: Energy Exemplar

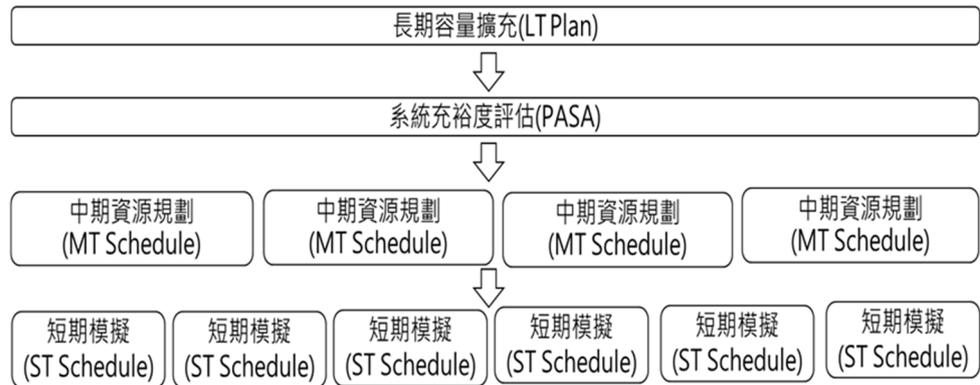
## (三)多層次最佳化

如前所述，PLEXOS 主要使用線性規劃(LP)、混合整數規劃(MIP)等先進數學模型，其中使用混和整數規劃方式最貼近實際系統運轉情形，然而，使用混和整數規劃所耗用電腦運算資源較線性規劃高出許多，以現今電腦運算能力而言，混和整數規劃(MIP)只能用於日到數週的時間區段做最佳化規劃，若一次性處理數月或數年等更久的問題，所需電腦運算資源及運算時間將難以估計。



資料來源: Energy Exemplar

針對此問題，PLEXOS 將實務上長期、中期及短期關注的焦點對應到 PLEXOS 不同運算階段，分別為長期(LT Plan)、系統充裕度評估(Projected Assessment of System Adequacy, PASA)、中期(MT Schedule)、短期(ST Schedule)，四個運算階段，將原本複雜的問題逐一拆解，並依其目的採用不同程度的簡化及運算方式，以期在可接受時間及精準度要求內，求得可靠的答案。



以簡單例子說明，長期(LT Plan)目的在評估需要新增多少容量的發電機或輸電線路，決定其新增容量後，因各設備需要維修，因此系統充裕度評估(PASA)會依據系統愈度安排檢修時間，確認剩餘可用容量後，因大部分機組有發電量上限(如火力有環保限制，水力有水資源條件限制)，因此中期(MT Schedule)目的將有限資源妥善分配到各月或各日等做為發電量目標，短期(ST Schedule)在依據其目標使用最複雜的混合整數規劃(MIP)以模擬更細緻的運轉行為。

運算階段	主要功能	主要輸出	分析區間
LT Plan	發電機/輸電線擴充、資源整合規劃、投資分析、再生能源整合	發電機/輸電線新增及除役規劃	10~50年
PASA	系統設備檢修規劃、設備故障模擬	檢修排程、可靠度	1~10年
MT Schedule	長期合約執行規劃、水力放水策略、預算規劃	運轉策略目標	1年
ST Schedule	機組實際運轉方式、電力交易分析、電能及輔助服務最佳化	細緻機組運轉情形	1天~1週

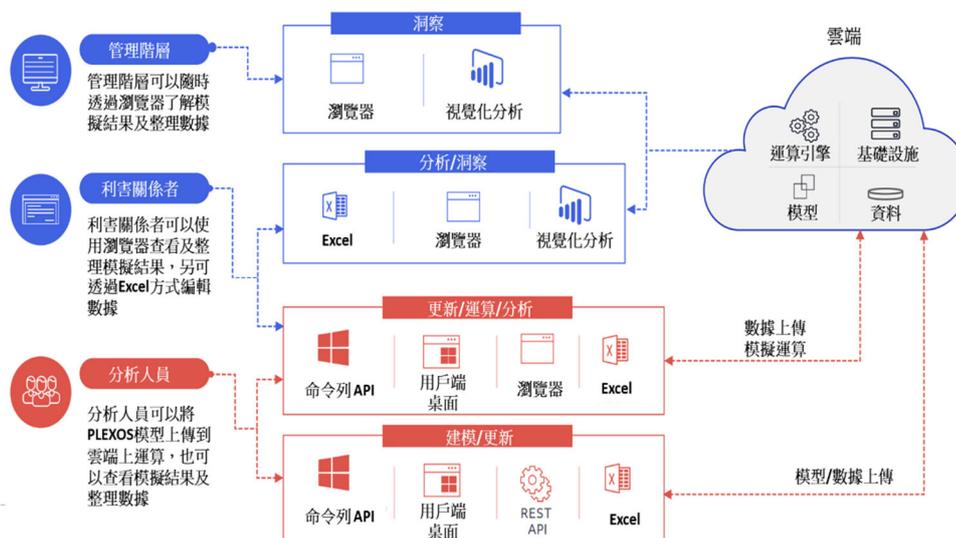
資料來源: Energy Exemplar

### (三) PLEXOS Cloud

過去 PLEXOS 軟體只能在本機端運算或者自行建置運算伺服器進行運算，因此，若需要更大量或複雜的運算時(如平行運算、蒙地卡羅運算、隨機性運算等)，需建置一定規模以上硬體才能因應運算需求，且需要耗費人力及時間維護硬體設備。此外，一定時間之後，因電腦逐漸老化導致效能逐漸落後及容易故障，需要適時更新硬體設備，屆時又耗費時間購置硬體設備及架設運算環境等。

面對此情況，Energy Exemplar 推出 PLEXOS Cloud 產品使 PLEXOS 使用者可以將原本只能在本機端運算的 PLEXOS 模型移轉到雲端上運算，讓使用者可以專注於 PLEXOS 模型建置及模擬結果分析上，減少購置及維護硬體所需時間。此外，亦提供使用者在使用運算資源上的彈性，如面對臨時性之大量運算需求，只需付出雲端服務使用費，就可以馬上調用足夠的運算資源。

PLEXOS Cloud 除提供分析人員雲端運算資源外，亦提供利害關係者或管理階層可以使用網頁方式登入系統檢視模擬結果及視覺化分析。PLEXOS Cloud 架構如下圖所示：



資料來源: Energy Exemplar

PLEXOS Cloud 提供多種分析方法(如視覺化分析)以快速理解 PLEXOS 模擬結果，使數據易於檢視發展趨勢、策略規劃及投資決策分析。透過此方式，原本複雜的模擬結果更易使用及理解，這在分析 PLEXOS 模擬結果中特別有用。

### 三、澳洲國家電力市場(NEM)整合資源規劃

整合資源規劃的目的是透過系統性評估方式，使各利害關係者可以更深入探討未來可能面臨的各項挑戰，以利提早針對各種情況進行必要的投資和研發，亦可適時調整和改進發展策略。其次，整合資源規劃也有助於最佳化現有資源的運轉方式及提高各種資源的使用效率，降低不必要的浪費，從而提高整體營運效能。

整合資源規劃考量項目非常多元且複雜，首先，我們必須考慮政策目標，例如淨零排放或能源配比等；其次，必須遵守相關法律的要求，如電力排放係數；第三，滿足未來用電需求；第四，考量發電機組預計商轉及除役時間；第五，考慮各類資源運轉特性及未來技術發展；第六，考量環境友善因素；最後，還需考量燃料供應或輸電線路容量限制等。



由此可見，整合資源規劃是一項複雜的工作，通常需要不同部門或利益關係者共同參與規劃，各利益關係者因其自身利益不同，因此關注焦點可能有所不同，因此，需要一種能夠整合各方意見及觀點的方式，找出一條各利害關係者皆能接受的發展路徑，如此才能制定出一個全面的規劃，既能有效利用現有和未來各項資源，又不違反政策目標或法規限制等各項外部或內部限制。

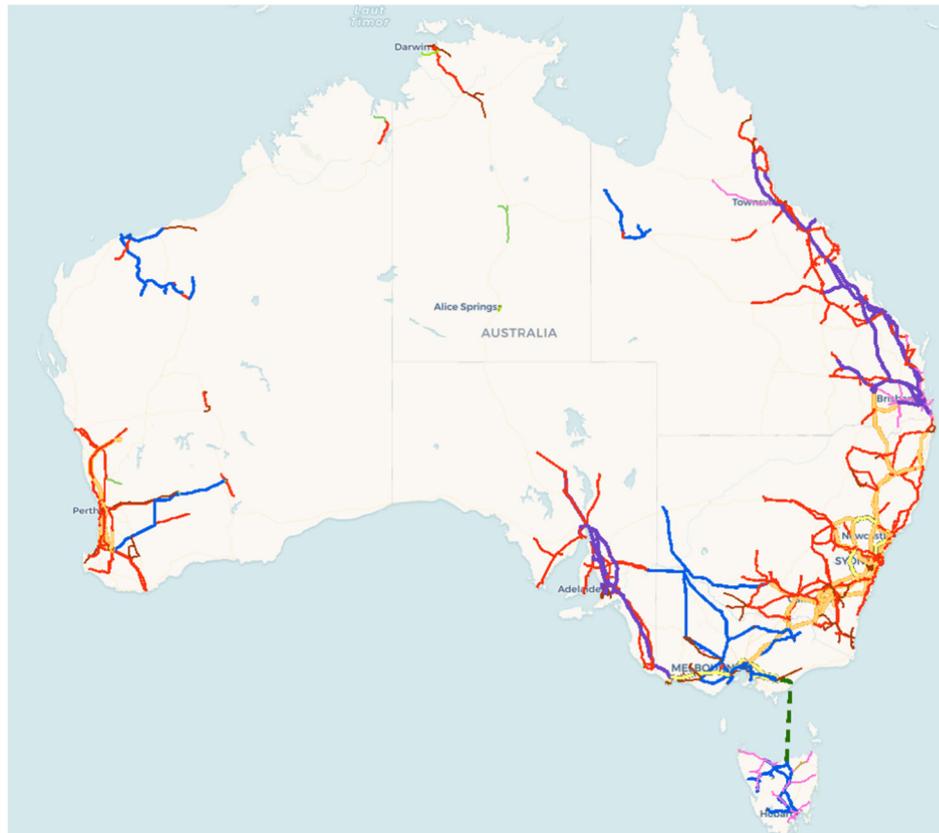
## (一)澳洲電力系統概要

在介紹澳洲能源市場調度中心(AEMO)的整合資源規劃報告(ISP)前，首先對澳洲電力系統進行簡要概述，如此可以容易了解整合資源規劃報告(ISP)內容所提及之重要訊息及結論。

澳洲屬於聯邦制國家，位於南半球，行政區域主要劃分為 7 個州，分別為昆士蘭(Queensland)、新南威爾斯(New South Wales)、維多利亞(Victoria)、塔斯馬尼亞(Tasmania)、南澳(South Australia)、西澳(Western Australia)、北領地(Northern Territory)，首都位於新南威爾斯的坎培拉。澳洲的氣候多樣，涵蓋從熱帶雨林到沙漠，澳洲內陸地區環境條件較為惡劣(高溫及乾旱)，相反，沿海地區氣候條件較宜人，因此，澳洲主要人口集中在東南沿海地區；依據澳洲統計局(Australian Bureau of Statistics)2023 年 6 月統計資料顯示，澳洲總人口數約 2 千 6 百萬，主要集中在新南威爾斯(8 百萬人)及維多利亞(7 百萬人)。



電力系統發展及規模大小與人口及經濟發展程度有著直接關係，越發達的地區，其電力系統規模通常也會越大，因此，澳洲主要電力系統集中在東澳及西南澳，因為這些地區人口多且經濟發展程度高，相反的，澳洲北部因人口稀少，經濟發展也相對較低，所以該地區只有一些小型獨立的電力系統。

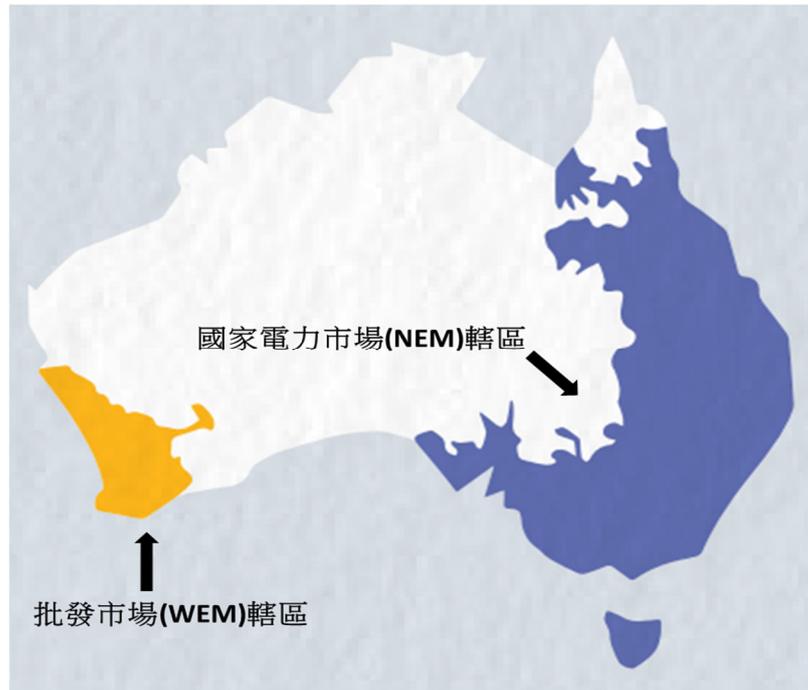


資料來源:Australian Government National Map

在多數情況下，大型電力系統的運作涉及許多複雜的技術問題，因此需要專業知識和經驗豐富的人員進行有效的監控和管理，以確保電力系統的安全和穩定運作。

澳洲約自 20 世紀起開始進行電力自由化，現今，澳洲電力市場分為兩個，分別為東澳的國家電力市場(National Electricity Market, NEM)及西澳的批發市場(Wholesale Electricity Market, WEM)，兩個電力市場皆由澳洲能源市場調度中心(Australian Energy Market Operator, AEMO)負責運轉。

澳洲國家電力市場(NEM)主要轄區為昆士蘭(Queensland)、新南威爾斯(New South Wales)、維多利亞(Victoria)、塔斯馬尼亞(Tasmania)、南澳(South Australia)。批發市場(WEM)主要轄區為西澳的西南互聯系統(South West Interconnect System, SWIS)。本次介紹內容為澳洲能源市場調度中心(AEMO)針對國家電力市場(NEM)進行之長期整合資源規劃報告(ISP)。



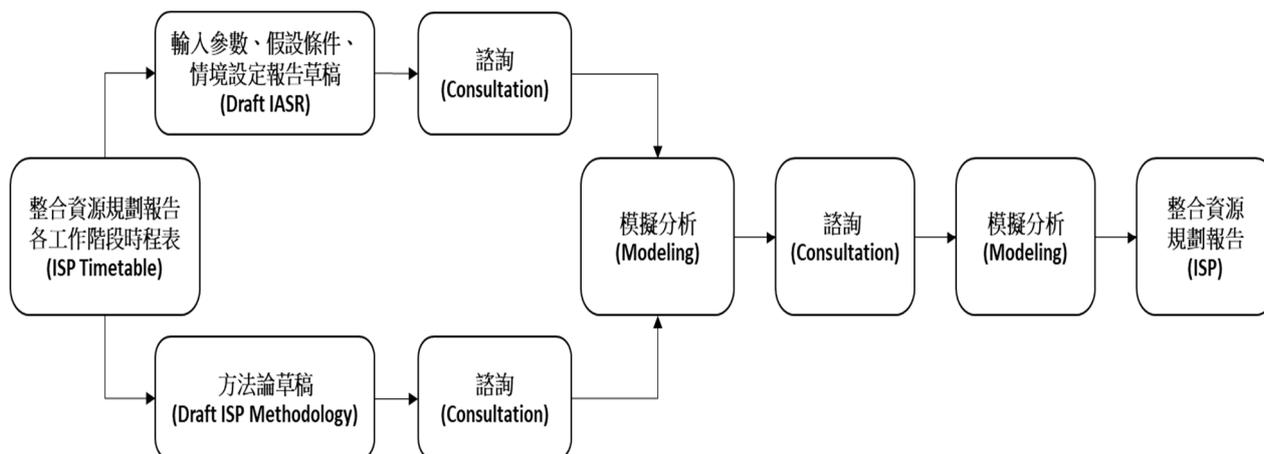
資料來源:AEMO

## (二) 規劃流程

一般而言，先進國家政府機關或電業管制機關，透過法令方式要求電業執行整合資源規劃供社會大眾或相關機關了解電業長期發展方向(通常 10 年至 30 年以上)，國際上以美國、澳洲及南非最為知名。其中澳洲能源市場調度中心(AEMO)與本公司同樣使用 PLEXOS 做為核心模擬軟體且其評估方式及對外資訊較公開透明，因此，本次實習以澳洲為主要借鏡對象。

澳洲能源市場調度中心(AEMO)依據國家電力法(National Electricity Law)第 49(2) 規定發布整合資源規劃(Integrated System Plan, ISP)報告，並自 2018 年起，澳洲能源市場調度中心(AEMO)固定每兩年滾動檢討規劃報告，規劃報告主要目的為提供電力市場一條清晰且透明規劃路徑(目前規劃到 2050 年)。澳洲能源市場調度中心(AEMO)執行整合資源規劃主要階段如下所示：

- (一) 公布整合資源規劃報告(ISP)各工作階段時程表。
- (二) 公布輸入參數、假設條件、情境設定報告草稿(Inputs, Assumptions and Scenarios Report, IASR)，並進行諮詢。
- (三) 公布使用之方法論草稿，並進行諮詢。
- (四) 建立模型進行模擬分析。
- (五) 公布整合資源規劃報告(ISP)初稿，並進行諮詢。
- (六) 依據諮詢結果修正相關事項及模型參數等設定，並重新模擬分析。
- (七) 公布最終版整合資源規劃報告(ISP)。



資料來源: AEMO 2022 Integrated System Plan

### (三)重要輸入參數

整合資源規劃考量參數眾多，從政策目標、用電需求、各類發電資源特性等等，其參數資料數以百計，因此以下就政策目標、可靠度目標、需求端及供給端較重要的參數進行概述。資料來源皆從 2022 年整合資源規劃報告(ISP)。

#### (一)政策目標:

澳洲屬於聯邦制國家，因此除了澳洲 2050 年達成淨零排放國家政策目標外，各州政府亦訂定各州政策目標，各州政策目標如下:

##### 1.昆士蘭再生能源目標(Queensland Renewable Energy Target):

2030 年用電需求的 50%由再生能源提供。

##### 2.新南威爾斯電力基礎設施路徑(New South Wales Electricity Infrastructure Roadmap):

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
新增長效型儲能(MW)	0	0	600	600	1,525	1,925	2,000
新增再生能源(GWh)	0	2,500	5,700	9,800	14,300	19,600	24,600

##### 3.維多利亞再生能源目標(Victorian Renewable Energy Target):

2025 年再生能源發電量配比 40%、2030 年達 50%。

##### 4.塔斯曼尼亞再生能源目標(Tasmania Renewable Energy Target):

2030 年再生能源發電量 15,750 百萬度，2040 年再生能源發電量 21,000 百萬度。

#### (二)可靠度目標:

澳洲可靠度標準為每年區域預期最大缺電量不超過用電需求的 0.002%，受限於可靠度運算過於複雜且繁瑣，各負載區域備用容量初始需求為該負載區域最大一部機組(下表為 2022 年 2 月各區域最大機組)，後續會再進行多次模擬運算確認最終需求。

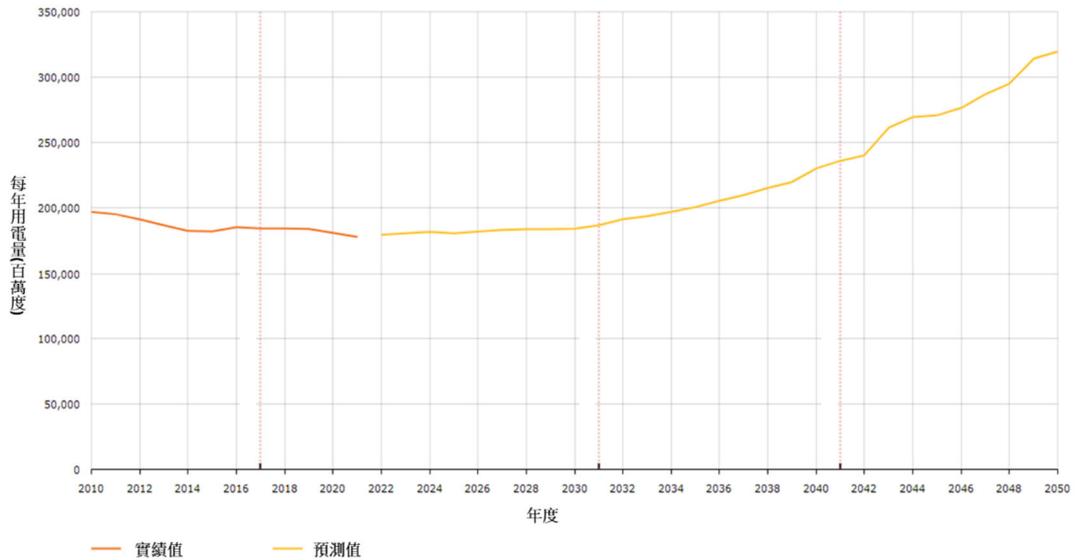
區域	初始備用容量	區域	初始備用容量
昆士蘭	720MW	南澳	227MW
新南斯威爾	705MW	塔斯曼尼亞	126MW
維多利亞	550MW		

### (三)需求端:

澳洲能源市場調度中心(AEMO)負載預測主要用於評估未來運轉面用電需求(即預測內容為住宅用電+商業用電+線路損失-屋頂型光電-不可調度光電(裝置容量 100KW~30MW)-其它不可調度資源(裝置容量小於 30MW))。負載預測內容包含全年用電需求、尖峰負載、最低負載，其中尖峰負載及最低負載以超越機率(Probability of exceedance, POE)方式呈現(類似於負載預測高、中、低案)，尖峰負載 10% POE 表示平均每 10 年會有一年尖峰負載超過評估需求，尖峰負載 90% POE 表示平均每 10 年會九年尖峰負載超過評估需求。整合資源規劃中會針對各個負載預測結果進行運算，以下資料僅呈現 POE10 預測結果。

#### 1.用電需求(運轉面)

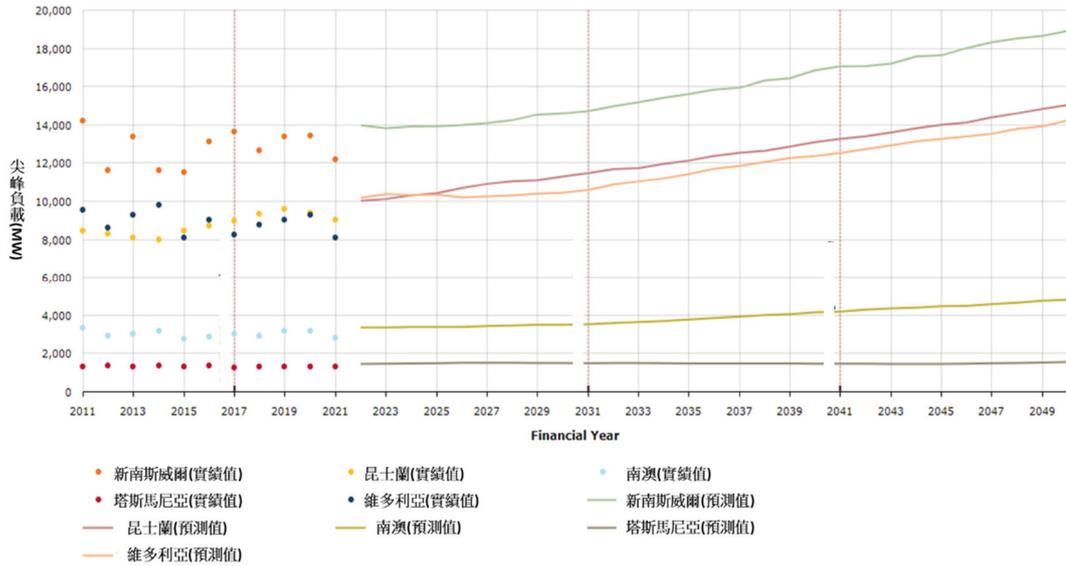
近年來澳洲國家電力市場(NEM)用電需求(運轉面)呈現負成長，惟因應 2050 年淨零排放，預估未來用電需求將持續成長。



資料來源: AEMO 2022 Integrated System Plan

## 2.尖峰負載(運轉面)

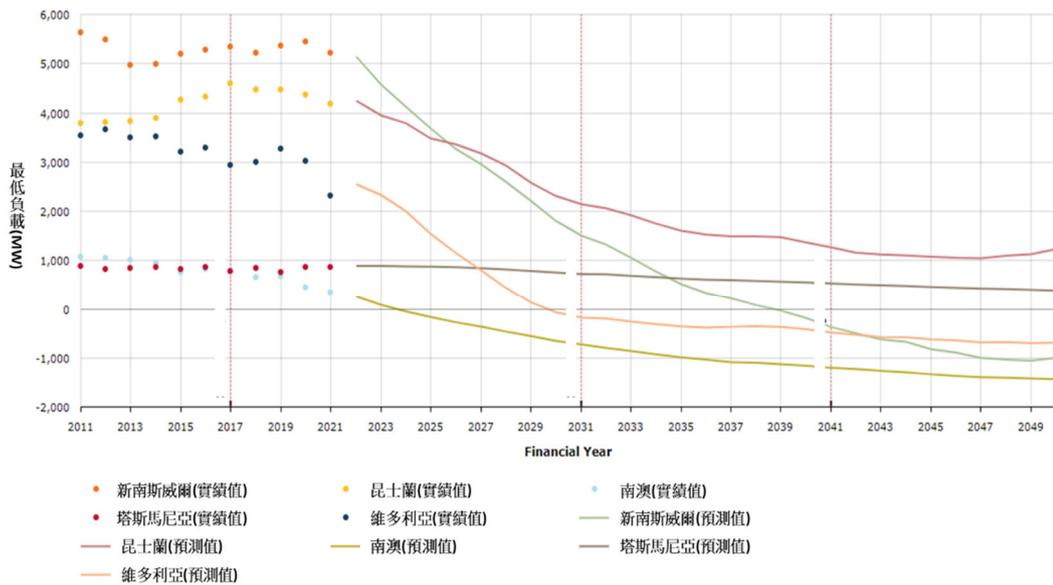
近年來尖峰負載(運轉面)呈現負成長或成長幅度很小，惟同樣因應 2050 年淨零排放，預估未來尖峰負載將持續成長。



資料來源: AEMO 2022 Integrated System Plan

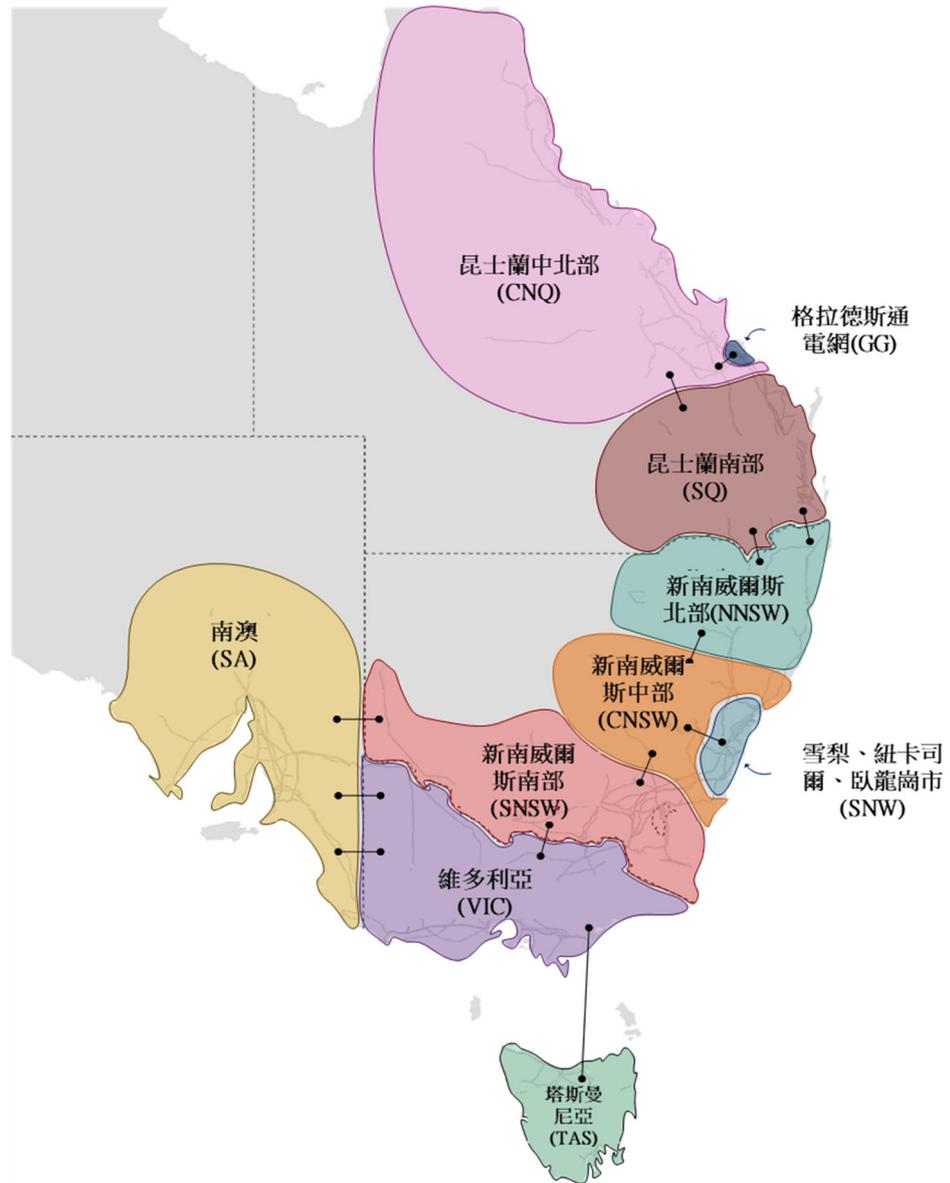
## 3.最低負載(運轉面)

最低負載因為不可調度再生能源及其它資源逐漸增加，因此近年來最低負載持續下降，未來大致維持下降趨勢。



資料來源: AEMO 2022 Integrated System Plan

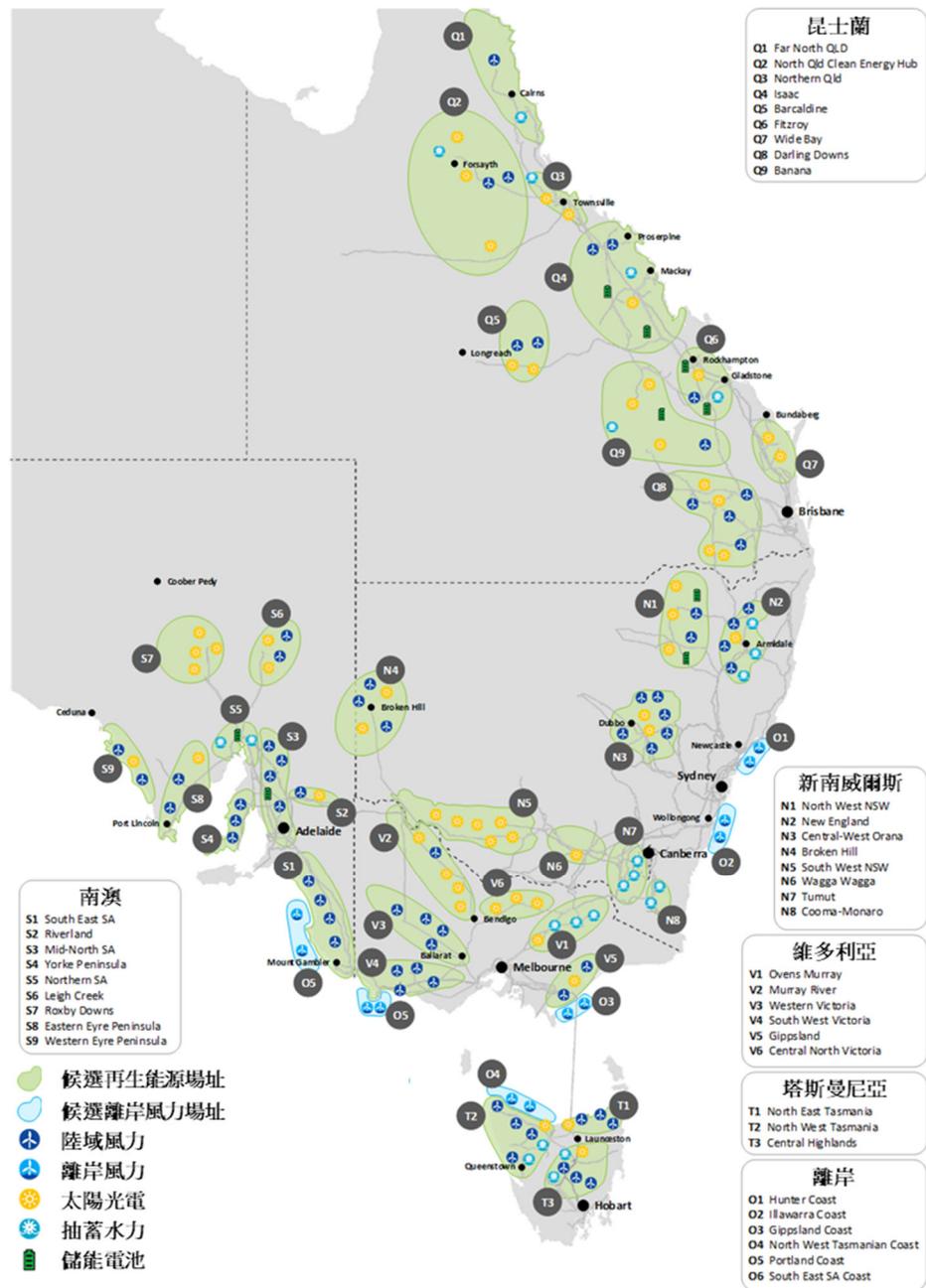
澳洲國家電力市場的電網非常複雜，為降低 PLEXOS 模型建置難度及縮短運算時間，澳洲能源市場調度中心(AEMO)依據實際電網情形，將需求端簡化為 10 個負載中心，各負載中心都有單獨對應的負載需求，另各負載中心可藉由 1 條或多條輸電線路模型相互融通且各輸電線數有融通能力上限。



資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

(四)供給端:

現行澳洲火力機組主要為燃煤，未來燃煤機組將逐漸除役，並以發展再生能源為主，儲能及尖載燃氣機組為輔。因再生能源需要較大的土地面積，因此 AEMO 依據澳洲地理條件等因素，盤點再生能源潛力廠址，作為後續模擬時再生能源候選機組開發量上限。

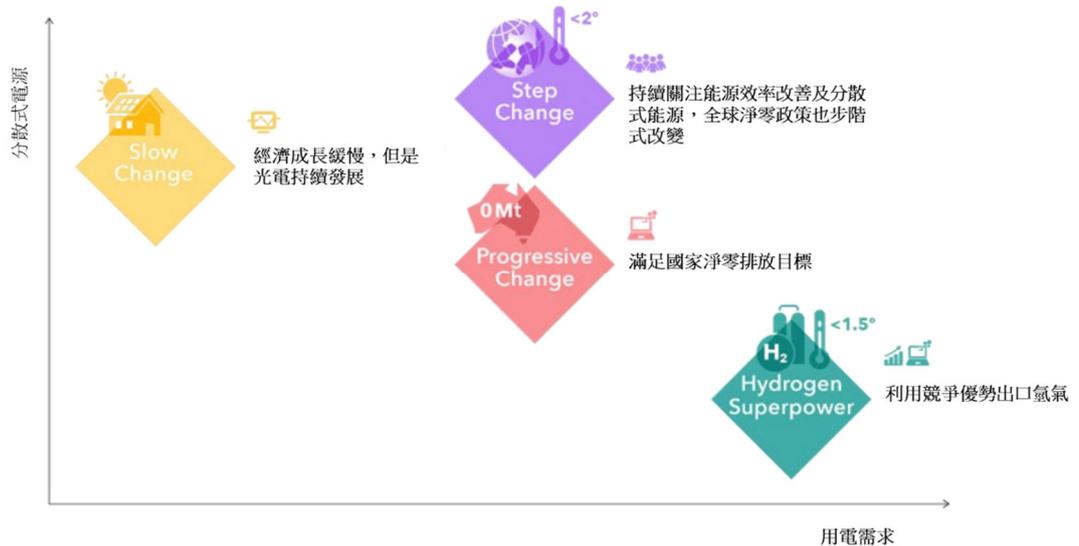


資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

### (五)情境設定

AEMO 制定四個情境來涵蓋未來可能的發展方向，其內容為不同幅度減碳程度、電力需求及電源分散化程度(用戶自行管理發電、儲能的程度)，此四情境主要內容如下：

1. 緩慢發展(Slow Change): 疫情後經濟發展緩慢，工業用電下降，淨零發展力度低，但是消費者持續建置光電降低自身向外購電需求，然而緩慢發展無法達成澳洲全面淨零排放目標。
2. 漸進式發展(Progressive Change): 用戶持續投資分散式資源，企業自身降低碳排放量，電動車逐漸普及，新技術成本持續降低，逐漸實現淨零排放目標。
3. 步階式發展(Step Change): 步階式發展較漸進式發展更快實現淨零排放，主要因為以消費者為導向的能源產業快速發展(如屋頂型光電、鋰後儲能電池)且成本快速下降，且全球淨零政策也發生步階式改變。
4. 氫能大國(Hydrogen Superpower): 強而有力的全球淨零行動且技術有重大突破，澳洲持續作為全球能源大國，再生能源成為其主要出口(再生能源製氫銷售國外)。

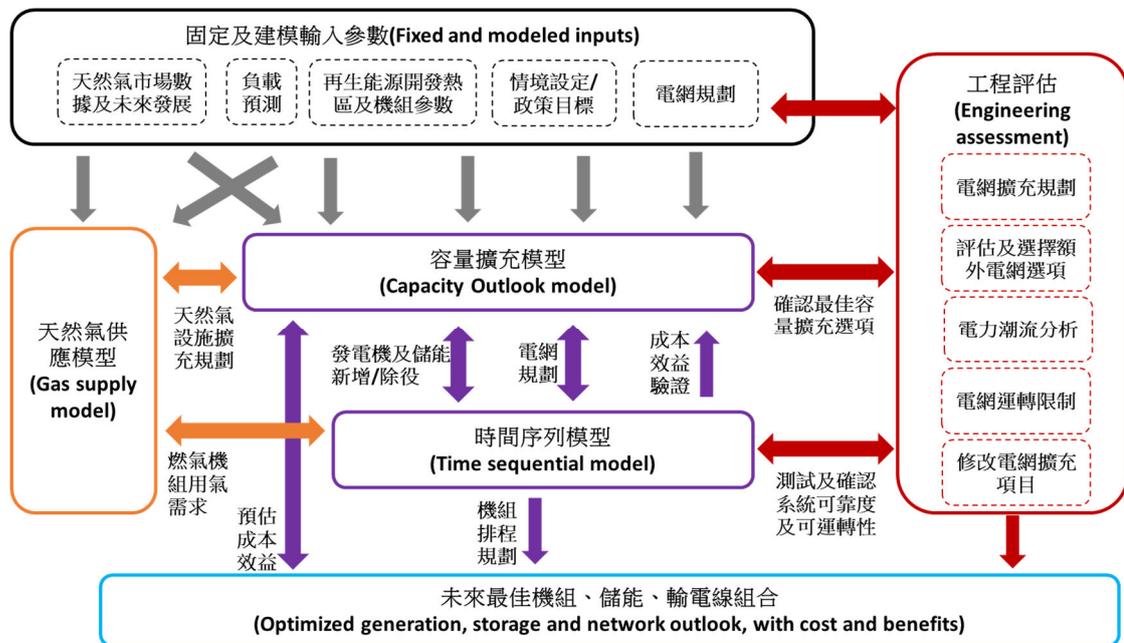


資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

#### (四)方法論

電力系統規劃考量面向眾多，從電源規劃、電網營運、運轉可行性、安全性、燃料供應狀況，每個環節皆至關重要，不容輕易疏忽，因此，澳洲能源市場電調中心(NEM)使用綜合性的規劃及評估方法，分析電力系統各種潛在可能，以確認最佳發展路徑。

AEMO 使用方法如下圖所示，此方法是一個複雜的迭帶方式，每一個分析過程的結果可能會影響其他分析過程的輸入參數，且運算流程相當複雜及耗費大量時間。以容量擴充模型而言，單次運算可能花費三天時間才完成，而在整個模擬過程中大約需要進行 1,000 次模擬，才能確定最終成果。在此方法論中，AEMO 使用 PLEXOS 軟體評估電源端，PSS®E 用於評估電網端，兩者評估結果會相互交換及影響。

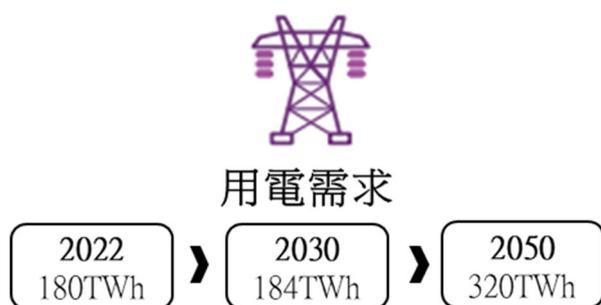


資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

## (五)重點成果

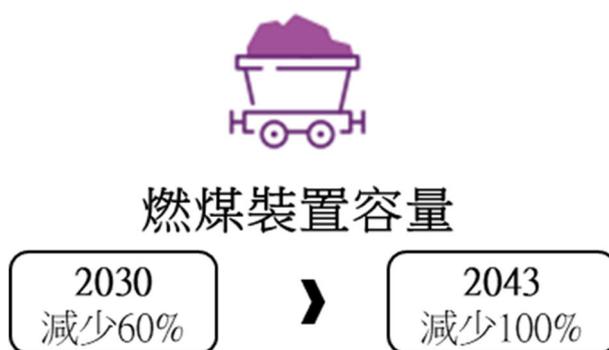
AEMO 的 2022 年度整合資源規劃報告(ISP)，旨在提供最佳發展路徑以支援澳洲國家電力市場(NEM)在能源轉型過程中面臨各項複雜且快速變化的挑戰。該報告不僅考量如何確保可提供消費者可靠、安全且經濟實惠的電力供應，亦尋求最有效的方式達成 2050 年淨零排放目標，雖然 AEMO 有針對四種情境進行模擬分析，但是最終諮詢結果以步階式發展(Step Change)為未來最有可能發生之情境。因此，以下針對步階式發展(Step Change)重點結果摘述：

(一)用電持續成長:未來用電需求持續成長(主要滿足交通、工業及家庭電氣化)，預估 2050 年用電量(約 3,200 億度)較 2022 年用電量(約 1,800 億度)約成長 2 倍。



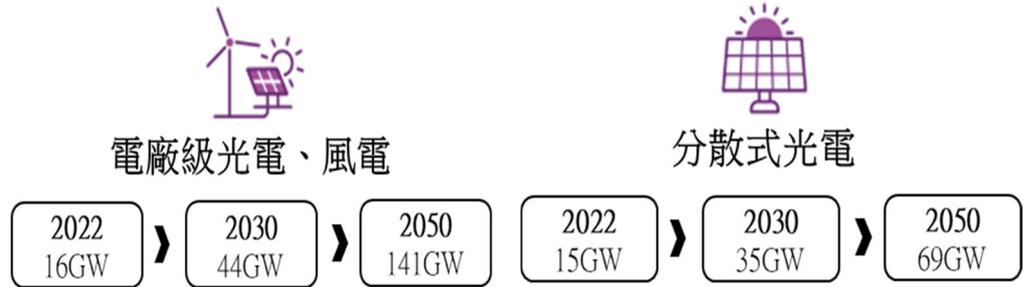
資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

(二)燃煤加速除役:預估 2030 年燃煤機組裝置容量將較 2022 年減少約 60%，2043 年燃煤機組全部除役。



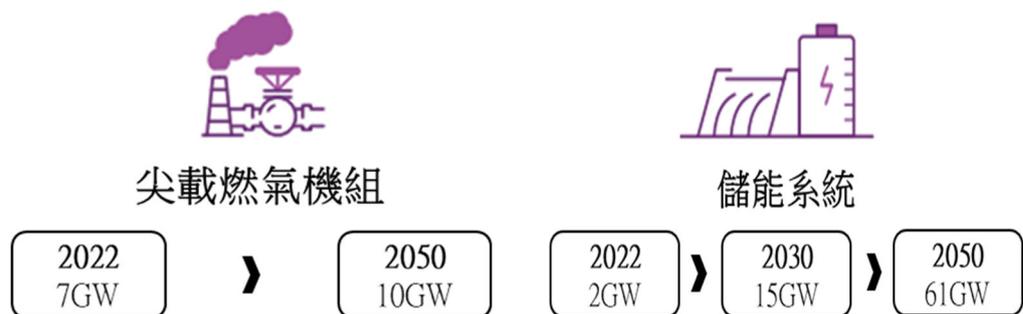
資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

(三)加速發展再生能源:2030 年電廠級(utility-scale)光電及風電裝置容量較 2022 年約成長三倍，2040 年再成長一倍，2050 年再增加一倍；2050 年分散式太陽光電(distributed PV)裝置容量較 2022 年成長五倍。



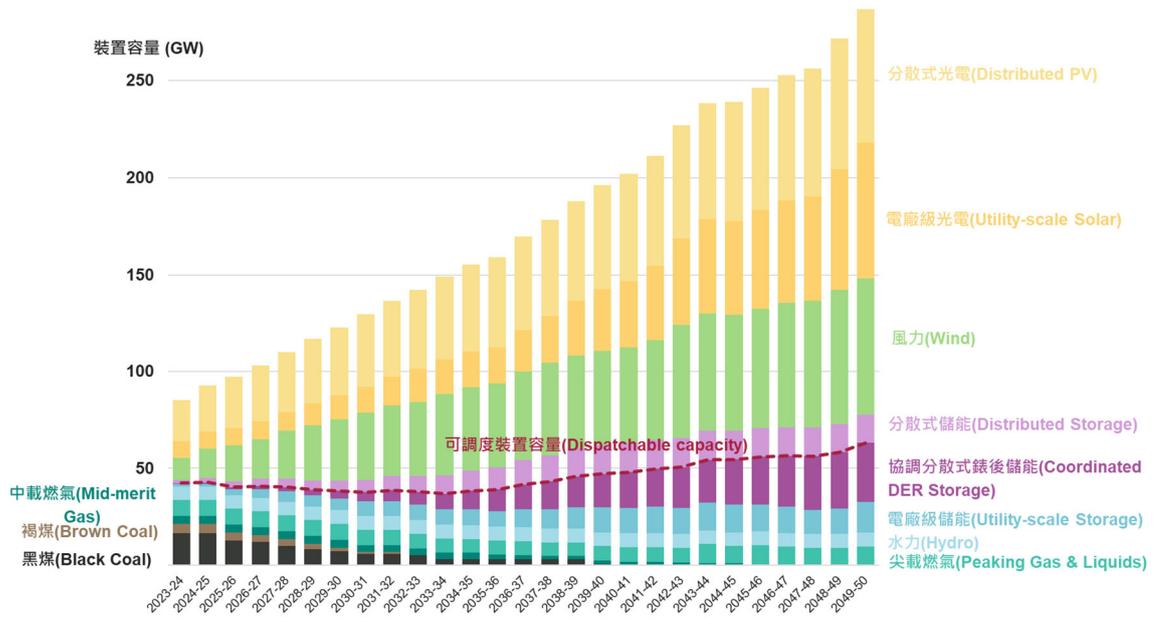
資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

(四)持續興建可靠低碳發電資源:因應燃煤機組加速除役及再生能源發電間歇性，為穩定電力系統運轉，到 2050 年仍需依賴可調度資源(如儲能、低碳燃氣機組)以確保穩定運轉，不同類型機組開發進度將視其不斷變化的投資成本有所差別。依據模擬結果，2050 年需要 46GW(640GWh)可調度儲能系統，其中大型儲能電池及抽蓄水力裝置容量約 16GW，虛擬電廠、電動車等儲能裝置容量約 31GW，另外預計 2050 年將有 15GW 與屋頂型太陽光電搭配的分散式儲能電池，用以滿足用戶自身用電需求後，回售剩餘電力至系統。另建議 2050 年需 10GW 尖載燃氣機組，這將在無風、無光氣候條件下，以及機組或輸電線路進行檢修時，將扮演至關重要的角色；此外，這些機組還將作為抽蓄或儲能電池的儲能來源。



資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

**(五)未來逐年裝置容量:**整體而言，未來用電持續成長(較 2022 年成長兩倍)，為了達成 2050 年淨零排放目標，燃煤機組將加速除役，預計 2043 年全部除役，中載燃氣機組需求亦逐漸降低，再生能源裝置容量則大幅成長；此外為維持系統穩定，需要持續投資儲能系統及尖載燃氣機組，以因應再生能源的間歇性。



資料來源:AEMO 2022 Integrated System Plan

#### 四、新加坡電力市場交流

新加坡位於東南亞的島國與馬來西亞及印尼相鄰，國土面積約 2.6 倍台北市大小，新加坡以高度的經濟發展、良好的公共秩序及完善的基礎設施而聞名，新加坡產業多元，主要以電子、石化、金融、貿易產業為主，此外，新加坡不僅是東南亞，更是全球金融及航運中心，對世界的經濟有重大的影響。

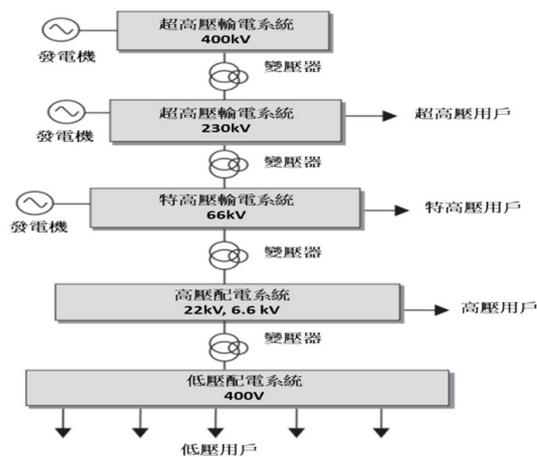


資料來源: 維基百科

依據新加坡統計處(Singapore Department of Statistic)統計資料，2023 年 6 月新加坡人口總數約 5.9 百萬人，新加坡人口組成多元，主要種族有華人、馬來人及印度人，因此，新加坡是多民族、語言及宗教組成的國家。在新加坡，幾乎每個人都會有兩種語言，分別是自己的母語及英文，在正式場合主要流通語言以英文為主。

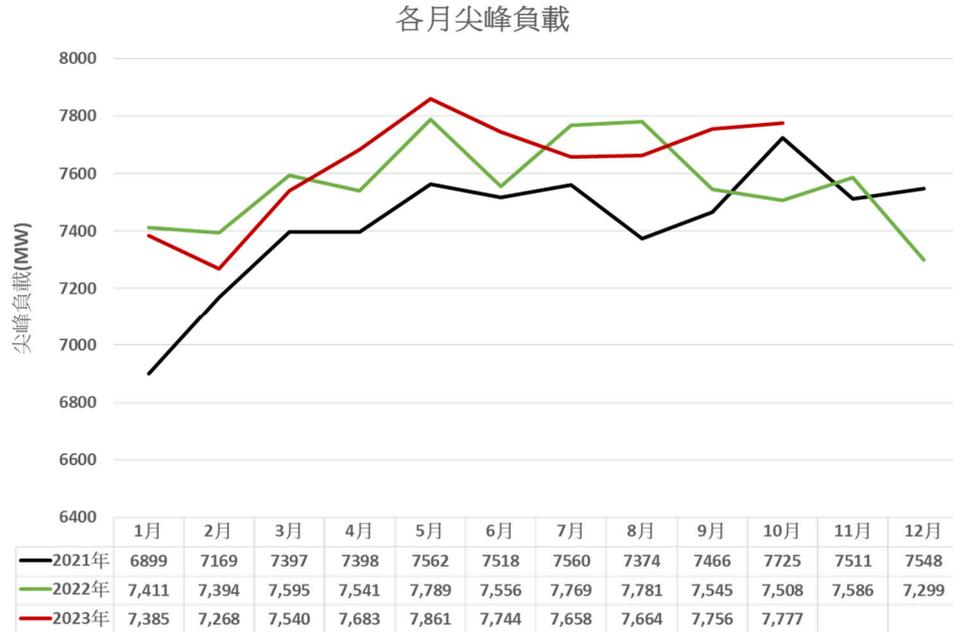
##### (一)新加坡電力系統結構

雖然新加坡國土面積不大(約 2.6 倍台北市大小)，但是其電力系統結構非常完整，電壓層級最高達 400kV，較台灣高(345kV)，其輸電系統(400kV、230kV、66kV)及配電系統(22kV、6.6kV)結構如圖所示:



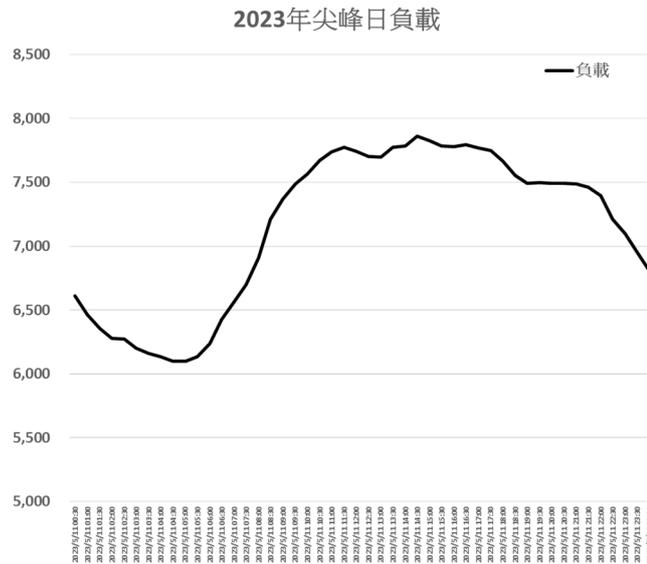
資料來源: Energy Market Company

新加坡尖峰負載將近 8GW，除了 1 月及 12 月尖峰負載稍低外，各月尖峰負載差異不大，主要原因在於新加坡靠近赤道，終年常熱氣溫變化不大。



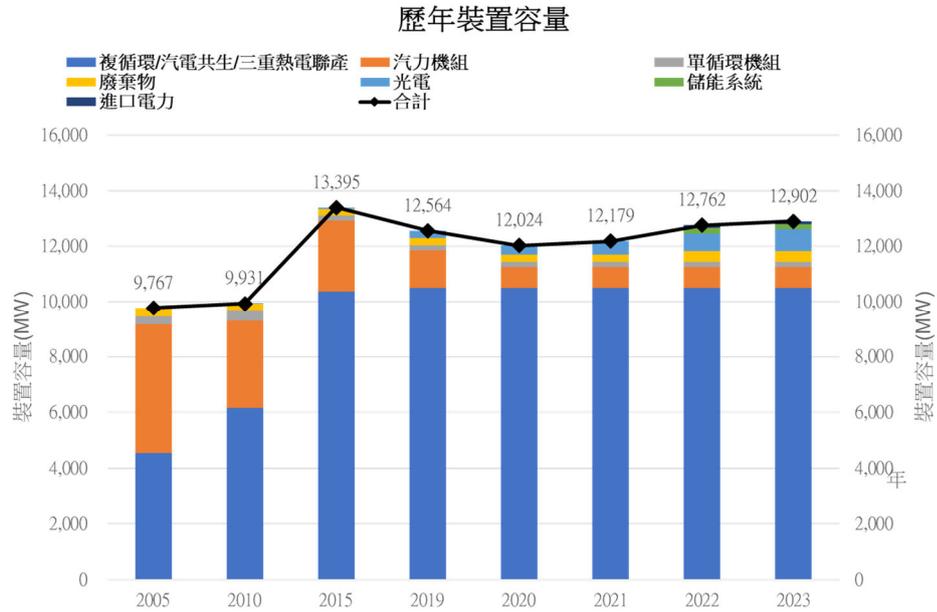
資料來源: Energy Market Authority

新加坡尖峰日負載曲線特性與台灣尖峰日負載特性類似，尖峰發生時間點為下午 1~2 點左右(2023/5/11)，中午 12 點時因午休負載會稍微下降，負載最低點則在清晨時段。



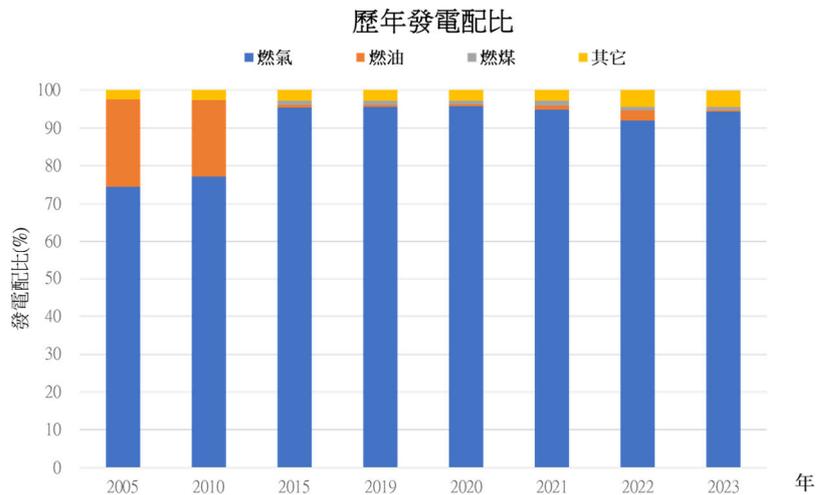
資料來源: Energy Market Authority

新加坡裝置容量約 12.9GW(2023 年 6 月 Energy Market Authority 統計資料)，其中主要都是火力機組，其裝置容量為 11.8GW、再生能源(光電)0.7GW、儲能系統(0.2GW)、國外進口容量 0.1GW。



資料來源: Energy Market Authority

此外，新加坡發電機組大多以天然氣為主，2022 年燃氣發電量佔比高達 92%。



資料來源: Energy Market Authority

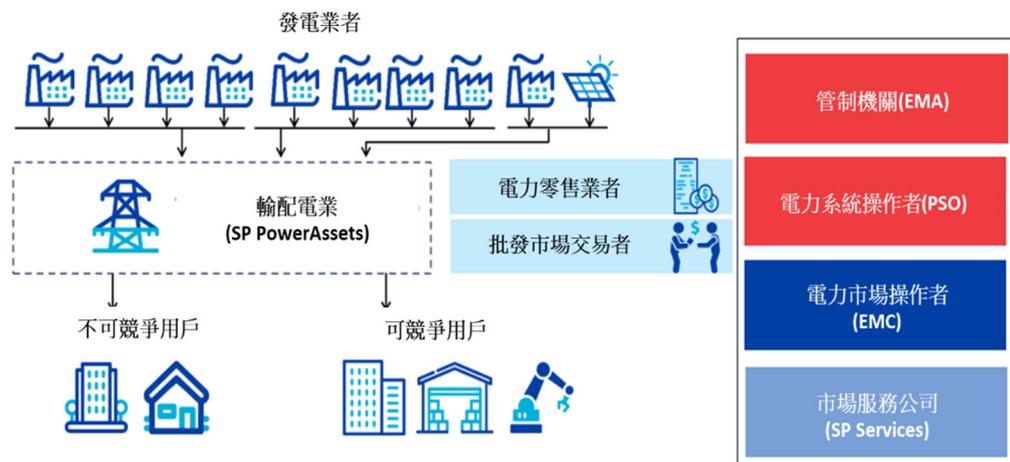
## (二)新加坡電力市場

新加坡是亞洲第一個自由化的電力市場，在 1963 年時，新加坡成立公用事務局(Public Utilities Board, PUB)，主要負責處理新加坡電力、水、瓦斯供應，1995 年起，新加坡電業開始進行自由化，原本屬於政府部門的電業開始進行公司化，並拆分發電業，為未來電業自由化打下基礎，1998 年新加坡開始營運日前市場，2003 年開始實施即時市場(National Electricity Market of Singapore, NEMS)，2019 年時完全開放售電業。

1963	集中式管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>成立公用事務局(Public Utilities Board, PUB)，主要負責處理新加坡電力、水、瓦斯供應</li> </ul>
1995~2003	改革第一步	<ul style="list-style-type: none"> <li>1998年營運日前市場(Day-ahead market)</li> <li>拆分發電業</li> <li>建立電力調度及交易營運單位及輸配電營運單位</li> </ul>
2003~2019	批發市場持續改進	<ul style="list-style-type: none"> <li>2003年開始實施即時市場(National Electricity Market of Singapore, NEMS)</li> <li>2019年時完全開放售電業</li> </ul>
2019~	能源轉型	<ul style="list-style-type: none"> <li>2021年第一座漂浮式光電</li> <li>2021年第一座儲能</li> <li>2022年從寮國進口電力</li> <li>2050年達成淨零排放</li> </ul>

資料來源: Energy Market Company

現今新加坡電力市場參與者主要有電業管制機關、電力系統操作者、電力交易操作者、市場服務公司、輸配電業、發電業者、電力零售業者、批發市場交易者、電力零售業者、批發市場交易者。



資料來源: Energy Market Company

- (一)電業管制機關:由能源市場管理局(Energy Market Authority, EMA)負責，主要負責監管電力可靠供應及確保電力市場自由競爭，此外 EMA 也負責監管天然氣及區域供冷業務。
- (二)電力系統操作者:由能源市場管理局(Energy Market Authority, EMA)下轄的電力系統操作事業部負責(Power System Operator, PSO)，主要負責電力系統的操作，確保系統運轉頻率及電壓能穩定運轉；另亦監督天然氣系統運轉情形，因天然氣系統與電力系統有很高的依賴性。
- (三)電力交易操作者:由能源市場公司(Energy Market Company, EMC)負責，主要負責運營及管理電力交易市場。
- (四)市場服務公司:由 SP Group 旗下的 SP Services 負責，主要負責電表管理及協助可競爭用戶與售電業者間合約移轉等。
- (五)輸配電業:由 SP Group 旗下的 SP PowerAssets 負責，主要負責營運電網，新加坡電網是受管制的，由 SP PowerAssets 獨佔。

能源市場管理局 (Energy Market Authority, EMA)

- 監管電力及天然氣產業

電力系統操作事業部 (Power System Operator, PSO)

- EMA轄下事業部，主要確保電力系統運轉可靠及安全



能源市場公司 (Energy Market Company, EMC)

- 電力市場的運營及管理



SP Services (SPS)

- 市場支援服務(抄錶、計費、收費)
- 客戶在零售商間移轉服務
- 擔任最後供應商角色



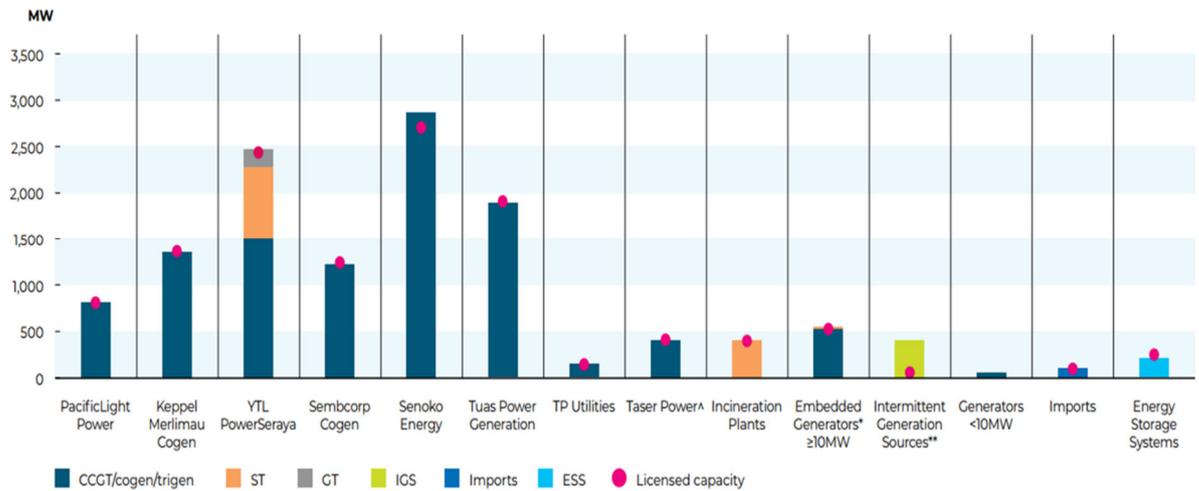
SP PowerAssets (SPPA)

- 獨佔新加坡電網
- 管理及維護電網

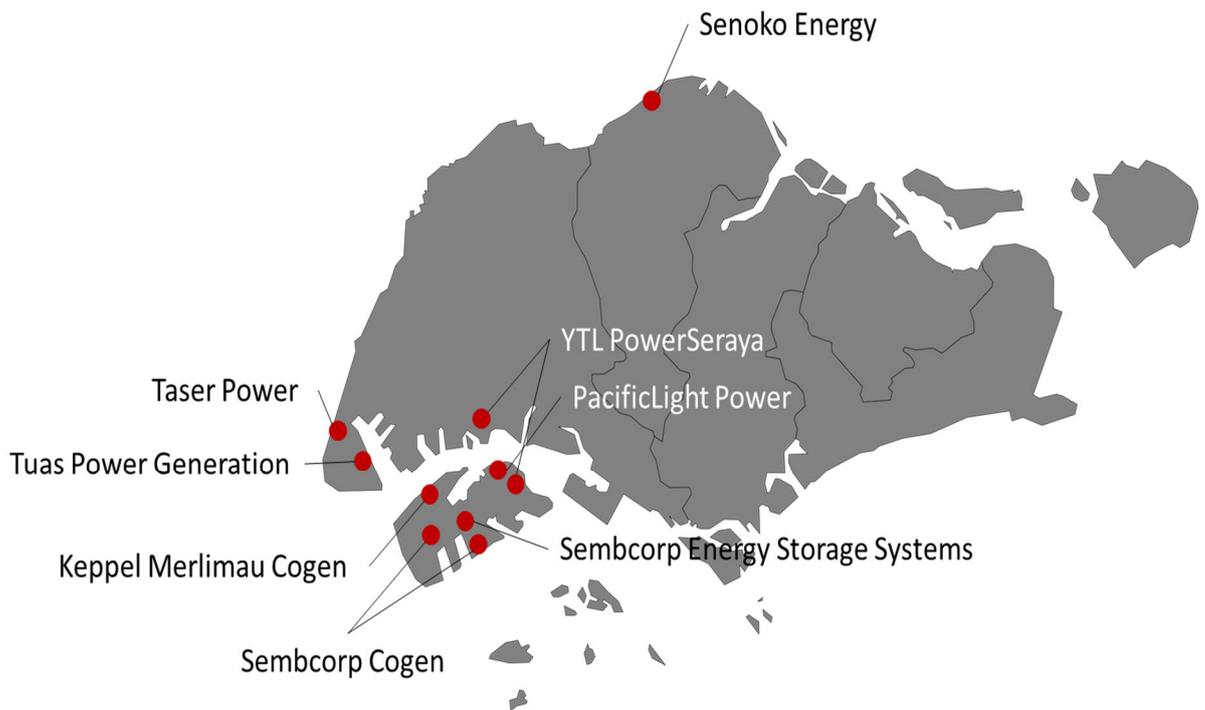


資料來源: Energy Market Company

(六)發電業:目前參與電力交易的發電裝置容量將近 12.6GW，其中主要類型為燃氣機組；此外，Sembcorp 於 2022 年新增東南亞最大的儲能電池 (200MW/285MWH)，前期儲能電池功能用於提供 200MW/200MWh 熱機備轉(Spinning Reserve)以因應發電機組故障，營運後期用於電網頻率調控，降低太陽發電間歇性對電網造成的衝擊影響。



資料來源: Energy Market Company(2022 年底統計資料)



(七)售電業:新加坡於 2019 年完成開放售電業，零售商大致分為三大類，分別為(一)售電業兼營發電業、(二)獨立零售業、(三)公用售電業。

<p>售電業兼營發電業:以商業費率銷售電力，本身有自己的發電廠</p>	
<p>獨立售電業:以商業費率銷售電力，本身無電廠，透過合約方式向發電業購買電力用於銷售</p>	
<p>公用售電業:以受管制費率銷售電力，有義務提供電力給使用者</p>	

資料來源: Energy Market Company

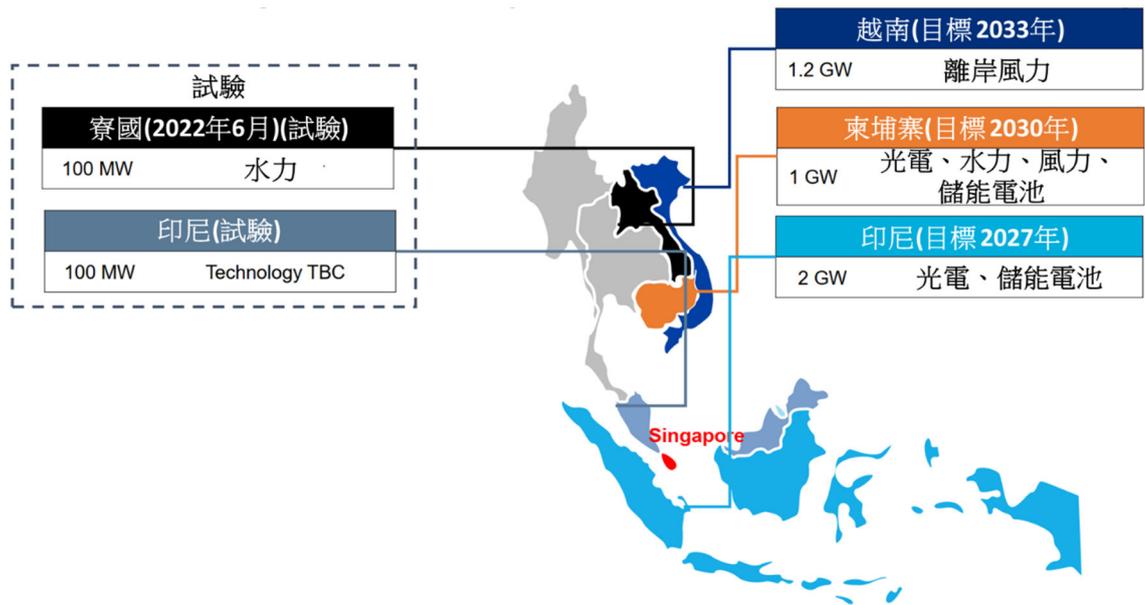
各售公司市場占比如下圖所示，其中售電業兼營發電業佔據主要售電市場，獨立售電業占市場份額僅 1.9%；此外，具有公用售電業性質的 SP Group 其市場份額從 2005 年起逐漸下降，但是在 2022 年時因俄烏戰爭使能源價格飆漲，導致電費暴漲。因此許多獨立售電業退出零售市場，而 SP Group 有提供用戶使用電力義務，許多用戶轉至 SP Group 導致 2022 年 SP Group 市場占有率較 2021 年高出約 10%。



資料來源: Energy Market Company

此外，新加坡受限於國土面積狹小，因此不利於發展再生能源，為解決能源困境及降低碳排放量，新加坡計畫透過跨國電力傳輸方式，引進國外電力資源，並期望自身電力市場未來能發展成歐洲集中式電力交易模式，各國電力可以互相流通，並以成為東南亞的電力交易中心為目標前進。

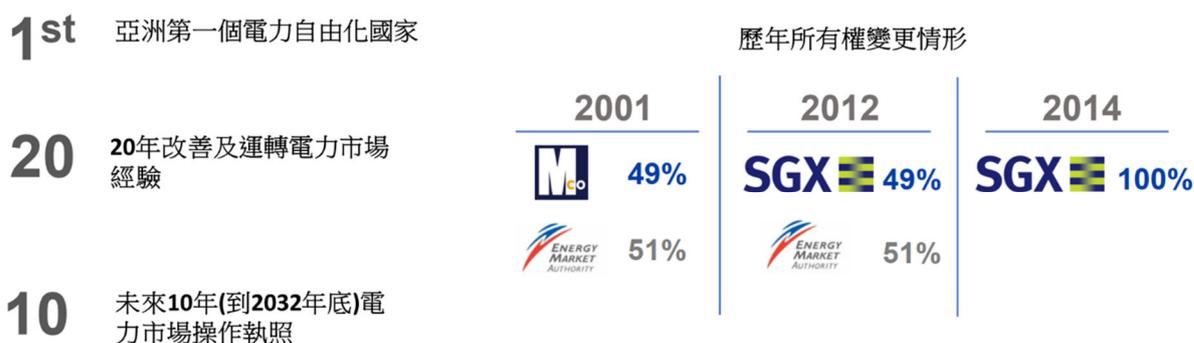
目前，新加坡已經從寮國及印尼分別進口 100MW 電力，未來擴大從越南、柬埔寨等國進口低碳電力，用於降低碳排放、降低再生能源間歇性影響及分散風險。



資料來源: Energy Market Company

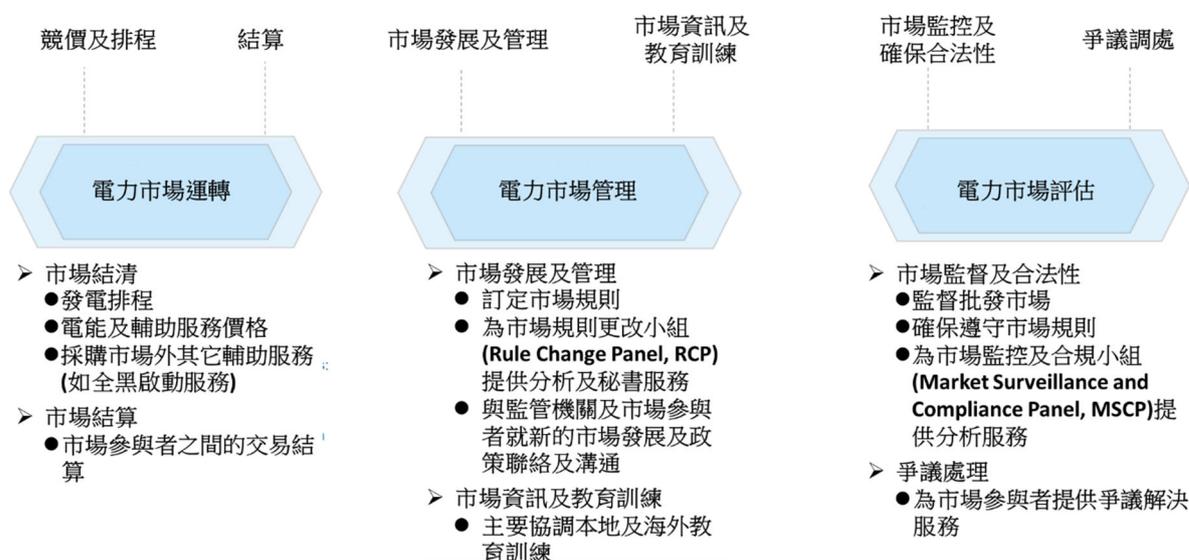
### (三)新加坡能源市場公司(EMC)PLEXOS 交流

新加坡是亞洲第一個電力自由化國家，其電力市場由新加坡能源市場公司(Energy Market Company, EMC)負責營運及管理，其最早是由能源市場管理局(EMA)及紐西蘭 M-Co 公司合資成立的公司，後來逐漸轉為私人公司，現今由新加坡交易所(Singapore Exchange, SGX)百分百持有。



資料來源: Energy Market Company

新加坡能源市場公司(EMC)主要職掌如下圖所示:



資料來源: Energy Market Company

#### (四)新加坡 2050 淨零排放

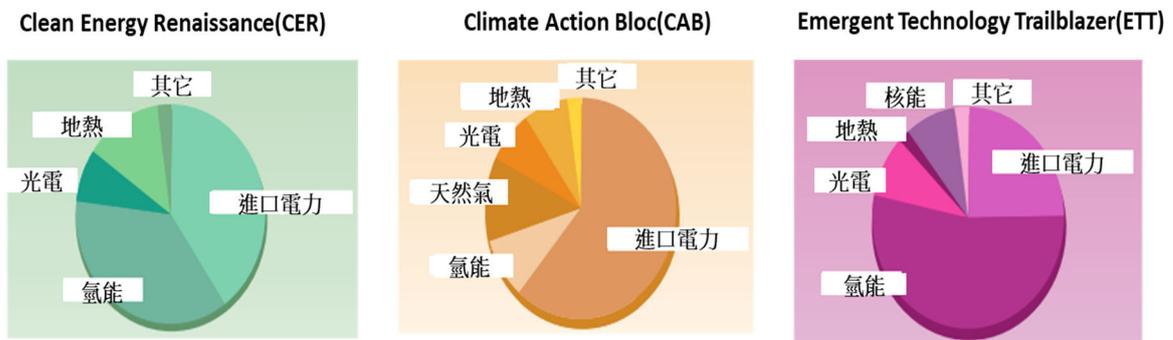
新加坡已對外宣布 2050 年要達成淨零排放目標，這是一個具有挑戰性的目標；目前政府主要以進口電力、發展氫能及燃氣加上碳捕捉技術等關鍵技術來達成此目標。

由於未來能源發展充滿不確定性，新加坡 2050 年能源委員會認為實現 2050 年淨零目標並非只有單一路徑，因此設計一系列情境描述未來可能發展路徑以探索不同的可能，情境分為下列三個選項：

(一)Clean Energy Renaissance (CER):全世界團結一致對抗氣候變遷並致力於發展新技術，且全球團結合作積極發展持續 30 年。在此情境下，新加坡實現 2050 年淨零排放目標，並有多元的能源供應。

(二)Climate Action Bloc (CAB):各地區國家共同合作，以因應氣候變遷，但是新技術發展緩慢。在此情境下，新加坡主要依賴進口電力，並持續等待新技術成熟。

(三)Emergent Technology Trailblazer (ETT):受地緣政治影響，世界各國仍未共同合作，但是新技術快速發展。在此情況下，新加坡積極投資新技術，並仰賴氫能作為主要供應來源。



資料來源:Energy 2050 Committee Report, Mar 2022

## 肆、心得及建議

現今電源評估規劃方式已經發生巨大的改變，導致這些轉變的主要原因大量再生能源併網及環保意識不斷升高；因此，在電源規劃需考慮的面向，以及使用的模擬分析方法，已經與過去有很大的轉變及改進。

過去的電力系統幾乎所有的發電機組皆可人為控制且環保限制較少，因此過去電源規劃主要考量夏天日尖峰供電情形，離峰時段主要考量機組檢修或故障情形是否過多導致供電能力不足以應付離峰用電需求，原則上當日尖峰供電無虞時，離峰時段供電不會有太大問題。

然而現今不可控再生能源(發電量受氣候影響，難以人為控制)逐漸增加及環保要求(如減碳及減煤等)日益加嚴，過去只看日尖峰供電能力漸不足以反應整體電源是否足以因應未來用電需求，此外，過去採用之電源規劃軟體功能已漸不敷使用，爰引進功能性更強且具有一定公信力之模擬軟體 PLEXOS 協助更細緻模擬分析未來面臨之挑戰，以提早準備因應措施。

由於 PLEXOS 軟體較過去使用軟體複雜度更高且輸入參數及產出模擬結果數據量龐大，因此我們進行許多工作以確保更流暢的使用 PLEXOS。首先購置專門的運算伺服器，以因應 PLEXOS 所需較高的電腦運算資源需求；此外，還需收集各項參數，並檢視參數合理性及進行正規化以確保 PLEXOS 運算結果的精確度；另外還需針對 PLEXOS 模型進行設定及調教，以確保其運算結果正確且合理。

且在 PLEXOS 運算過程中，還建立流程自動化，以提高效率及減少人為錯誤的可能性；另外，還導入 SQL Server 及 Tableau 軟體針對運算結果資料整理及視覺化分析，以更好的整理數據及檢視 PLEXOS 運算結果合理性。所有這些工作都需要逐一改進以完善整體 PLEXOS 使用經驗及確保模擬結果精確度，在這過程中也隨時需要處理各式技術問題，這無疑會耗費大量時間。

PLEXOS 除了運用於原本長期電源規劃模擬分析探討外，近期為因應國際淨零排放的趨勢及挑戰，公司亦成立工作小組，其目的為探討未來的發展趨勢及面臨之挑戰，在這過程中，PLEXOS 軟體亦運用於其中。然而在 PLEXOS 運用越來越廣及使用越進階功能的情形下，累積之待解決問題及挑戰越來越多，因此藉由本次出國實習機會，為目前遭遇難題及挑戰尋求改善及精進方向。

經過本次出國實習，未來 PLEXOS 模型及分析方法改善及精進方向如下：

- 一、建立簡易電網模型:現今因負載預測及未來電源位置不明確，因此採用全系統分析方式進行模擬分析，然而此方式在未來再生能源越來越多時(離岸風電主要在中部、太陽光電主要在南部)，其模擬結果可想而知將與實際情形落差越來越大(無法顯示北部電源重要性)。因此可以仿效 AEMO 的方法，將電網進行一定程度簡化，除可以縮短運算時間外，亦可以更好的反應真實運轉情況；惟未來各區域的負載分配方式、電源分布位置及電網簡化方式需再妥善思考。
- 二、燃氣複循環機組模型細緻化:現今為簡化建模複雜度及縮短運算時間，複循環機組採整部機組建模方式(如 2 配 1 機組係由 2 部氣渦輪機及 1 部汽力機組組成，然在 PLEXOS 模型採等效為 1 部機組方式建模)，然而當未來再生能源持續發展條件下，複循環機組可能面臨部分氣渦輪機需解聯(如 2 配 1 機組以 1 配 1 方式運轉)以降低發電出力並維持一定慣量以確保系統穩定運轉。惟現有模型無法反應此現象，後續需將複循環機組細緻拆分為氣渦輪機、熱回收鍋爐及汽輪機以更好的模擬運轉方式，此方法將需更多參數進行建模，模型運算時間亦會大幅增加。
- 三、使用隨機性最佳化運算方式:現今模擬採用決定性(Deterministic)方式模擬，如再生能源採用定值(參考過去發電特性)方式進行模擬，然而此方式導致最佳化結果機組運轉排程過於樂觀(任一時段，成本低機組滿載運轉，成本高機組幾乎不發電，原因為已知再生能源發電量，因此機組不會因應其變動性預留部分容量)。未來將隨機性現象納入評估中，以更好模擬隨機性行為(如火力機組因應再生能源發電量變動性或發電機組跳機不確定性，預留一定容量以因應)；惟此方式所需模擬時間可能較原本增加數以百倍以上，需再妥善評估其運算時間是否在可接受範圍內。
- 四、評估導入雲端運算資源:現有 PLEXOS 模型日趨複雜化，既有電腦硬體設備已漸漸無法滿足 PLEXOS 運算及 Tableau 資料整理需求，未來若持續提升 PLEXOS 模型(如建立簡易電網、複循環機組拆分、隨機性模擬等)，屆時將需要更多運算資源以因應更複雜的運算需求，或許可考慮導入雲端運算資源運以解決 PLEXOS 運算資源不足及加速視覺化報表(PLEXOS Cloud 提供視覺化報表服務)

處理速度；惟雲端服務涉及資安問題且未使用過 PLEXOS 雲端服務，需再重新調整現有自動化運算流程等相關設定。因此，建議短期以更新現有硬體設備為主，並在資安無虞條件下，試行 PLEXOS Cloud 服務，若符合業務需求在大量導入雲端運算服務。

前述各項工作都需花費許多時間處理，期望在未來 1~2 年內，現有 PLEXOS 模型能有所精進，以因應越來越複雜的電源結構。

## 伍、致謝

- 一、感謝公司各級主管給予本次前往新加坡實習的機會。
- 二、感謝 Energy Exemplar 的 CoAnn Teoh(Vice President, Asis Pacific)領導的客戶支援團隊 Kamaljit Gill(Lead Customer Success Manager) 、 Terry Lam(Sales Lead)及 Mei Ning Goh(Sales development representative)協助安排出國實習事宜。
- 三、感謝 Energy Exemplar 的 Dante Recalde(Vice President of Solutions, Asis Pacific)領導的技術團隊 Yuqi Shi (Energy Market Analyst)及 Kenny Yong(Senior Cloud solutions Architect)提供充實的 PLEXOS 教育訓練。



與 Energy Exemplar 合影

- 四、感謝 Energy Market Company 的 Zhenhui LI(Chief Economist) 樂意撥空與本公司進行交流。



與 Energy Market Company 合影

## 陸、参考資料

- 一、<https://www.energyexemplar.com/>
- 二、<https://www.home.emcsg.com/>
- 三、AEMO 2022 Integrated System Plan (ISP)。
- 四、<http://forecasting.aemo.com.au/>
- 五、<https://nationalmap.gov.au/#share=s-tBwsS8QnydgNUrosshjHMGFz3gg>
- 六、<https://www.aemo.com.au/aemo/apps/visualisations/map.html>
- 七、<https://opennem.org.au/energy/nem/?range=7d&interval=30m&view=discrete-time>
- 八、<https://www.abs.gov.au/statistics/people/population/national-state-and-territory-population/latest-release>
- 九、<https://pixelmap.amcharts.com/>
- 十、<https://www.ema.gov.sg/>
- 十一、<https://openinframap.org/#10.35/23.1567/120.2431>