

出國報告（出國類別：開會）

## PLEXOS 軟體訓練研討會議

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：曾家彥(一般工程監)

派赴國家/地區：希臘/雅典

出國期間：113 年 5 月 19 日至 113 年 5 月 30 日

報告日期：113 年 8 月 30 日

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：PLEXOS 軟體訓練研討會議

頁數 42 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)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

曾家彥/台灣電力公司/電源開發處/一般工程監/(02)23666874

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：113 年 5 月 19 日至 113 年 5 月 30 日

派赴國家/地區：新加坡

報告日期：113 年 8 月 30 日

關鍵詞：淨零排放(Net-Zero)、電力市場(Electricity Market)、隨機方法(Stochastic Method)、島嶼電力系統(Island Electricity System)

內容摘要：

因應國際淨零目標潮流，國外知名電業機構大多採用 PLEXOS 軟體進行整合資源規劃，探討未來可能面臨之風險及挑戰，我國亦已公布 2050 年達成淨零排放目標，本公司規劃「2050 年淨零路徑」，之前已應用 PLEXOS 軟體處理電力端淨零相關分析，得到許多成果及發現許多延伸課題。Energy Exemplar 於希臘舉辦 PLEXOS 軟體訓練研討會議，針對軟體操作、天然氣及氫氣供應、電力可靠度、資源規劃及各國經驗分享等議題進行交流。

本次前往希臘學習 PLEXOS 軟體進階功能及了解其他公司軟體用戶使用 PLEXOS 相關經驗，另外也與希臘電網傳輸營運商(IPTO)就希臘電力市場模擬、獨立島嶼電源規劃及 PLEXOS 軟體使用經驗等進行交流。

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

# 目錄

壹、 出訪目的及行程紀要.....	4
一、 出訪目的.....	4
二、 行程紀要.....	4
貳、 研討會與參訪內容.....	6
一、 Xcelerate 研討會(Energy Exemplar).....	6
(一) Energy Exemplar 公司簡介.....	6
(二) PLEXOS 軟體介紹.....	6
(三) PLEXOS 關鍵模型參數.....	9
(四) PLEXOS 運算原理.....	20
(五) PLEXOS Cloud.....	25
(六) Xcelerate 研討會介紹.....	26
二、 Independent Power Transmission Operator(IPTO).....	33
(一) IPTO 介紹.....	33
(二) IPTO 相關討論.....	36
參、 心得與建議.....	39
(一) PLEXOS 軟體通用模組.....	39
(二) 歐洲目前關注電力趨勢.....	40
1. 供應鏈安全：.....	40
2. 能源淨零：.....	40
3. 電力市場價格：.....	40
(三) IPTO 拜訪心得.....	41
肆、 參考資料.....	41

## 壹、 出訪目的及行程紀要

### 一、 出訪目的

鑒於我國積極推動邁向 2050 年淨零路徑，未來電源勢必包含大量再生能源併網，則需要考量電網穩定、再生能源不穩定性，必須探討與各類可調度資源及需求端如何配合，本次出訪將分成三個目的包含電源規劃軟體整合訓練、蒐集交流國外針對再生能源下電力規劃的相關經驗，最後與希臘電力規劃人員進行各項議題討論。綜整出訪前後的目的歸納如下列幾點：

- (一) 軟體在處理系統對於大量再生能源併網，處理再生能源對系統之衝擊以及發電過剩模擬，可以後續發展如何處理再生能源對系統產生問題。
- (二) 了解 PLEXOS 軟體對於各類淨零技術如何設定模擬，對於未來淨零路徑上氫能、CCS 及再生能源如何整合。
- (三) 歐洲許多電力規劃單位採用隨機方法(Stochastic Method)處理有關再生能源及氣候變遷等問題，試圖與相關人員討論。
- (四) 希臘國內有許多小島，有些島嶼可以跟內陸建立相連電網，有些島嶼屬於獨立系統，跟我國離島條件類似，試圖了解如何規劃島嶼上電力系統。

本公司目前已經使用 PLEXOS 處理上述相關課題，遭遇相關困難及不確定性，但除網路上蒐集各國相關資訊外，有必要了解國外相軟體使用者對於相關課題如何模擬及因應，本次研討會議除希臘本地相關電業如：IPTO、希臘公共電力公司(PPC)，另亦與會包含歐洲其他國家相關電力如義大利電力電網公司(Terna)、愛爾蘭電網公司(EirGrid)及其他歐洲電力公司，將與其針對再生能源、能源轉型及上開等議題進行交流。

因此本次參加研討會訪目的為針對推行上述課題進行資料蒐集與經驗諮詢。順道參訪希臘相關電力傳輸調度單位，希臘雖屬於歐洲電網聯盟(ENTSO-E)，與台灣電力環境並不相同，但希臘在再生能源使用及天然氣發電上仍有相似之處，拜訪相關單位參訪及交流經驗對本公司未來推動淨零路徑上仍具有參考價值。

### 二、 行程紀要

本次出國計畫共 13 天(含交通時間)，出國地點為希臘雅典，主要時間

為前往 PLEXOS 軟體開發商 Energy Exemplar 舉行研討會；另拜訪希臘獨立傳輸營運商(IPTO)，雙方主要針對電力系統供電可靠度分析、隨機方法、希臘各島嶼電力系統規劃、PLEXOS 軟體使用經驗進行交流。

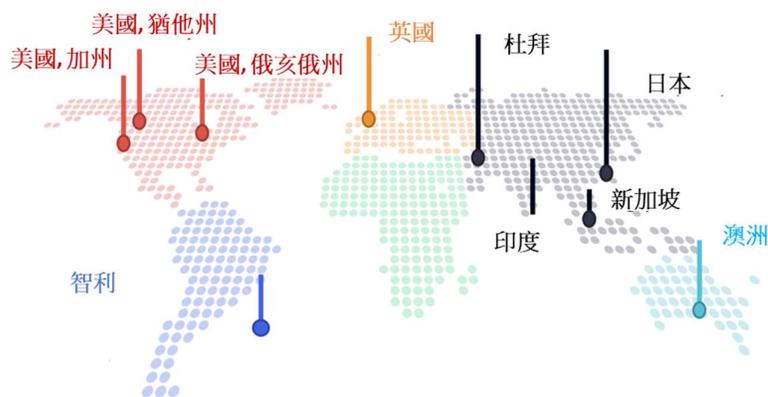
日期	地點	拜訪機構	主題
5/19、20	往程	—	—
5/21	Athens	Energy Exemplar	參加Xcelerate研討會，主要討論PLEXOS軟體相關原理及操作。
5/22	Athens	Energy Exemplar	參加Xcelerate研討會，主要討論PLEXOS教育訓練。
5/23	Athens	Energy Exemplar	參加Xcelerate研討會，由相關PLEXOS使用者介紹相關案例。
5/24	Athens	Energy Exemplar	參加Xcelerate研討會，由相關PLEXOS使用者介紹相關案例。
5/27	Athens	IPTO	參訪希臘獨立調度中心(IPTO)，針對組織、希臘電網及電源規劃等業務進行了解。
5/28	Athens	IPTO	與希臘獨立調度中心(IPTO)人員討論交流雙方電源規劃軟體使用經驗、並針對隨機方法應用於電源規劃進行討論。
5/31、6/1	返程	—	—

## 貳、 研討會與參訪內容

### 一、 Xcelerate 研討會(Energy Exemplar)

#### (一) Energy Exemplar 公司簡介

澳洲 Energy Exemplar 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。近幾年業務擴張迅速，國際上客戶迅速增加，主要廣泛用於電力市場、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，尤其歐洲各國電網相互連接，龐大的電力市場導致百花齊放的各類型電業，該公司的歐洲客戶類型更是多元廣泛。



資料來源: Energy Exemplar

#### (二) PLEXOS 軟體介紹

PLEXOS 軟體在目前可見電力模擬軟體市場中佔據極大的份額，其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 對於目前本公司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



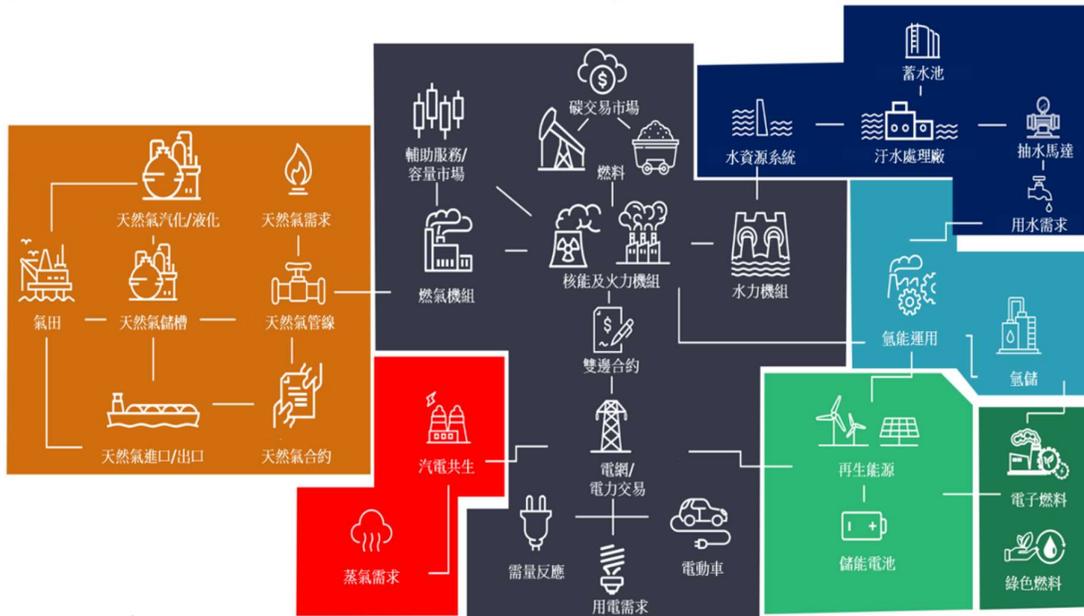
### (三) PLEXOS 關鍵模型參數

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。

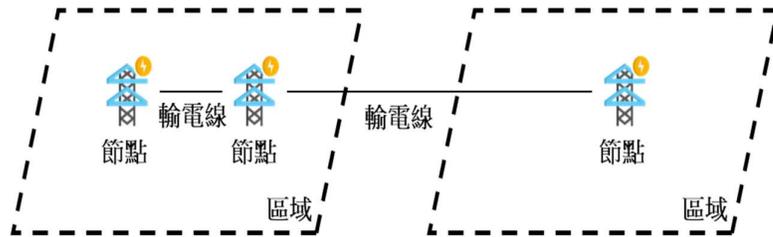


資料來源: Energy Exemplar

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

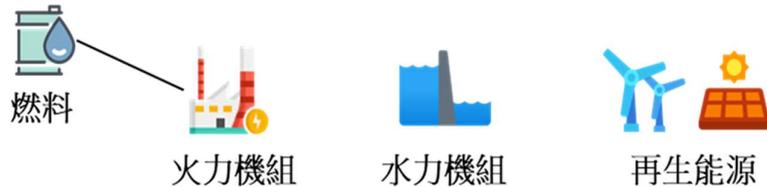
負載可使用節點(如:變電所或匯流排等)或區域(如:台灣本島地區、金門地區、馬祖地區等)反應用電需求，節點與節點之間可透過輸電線連接。



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。



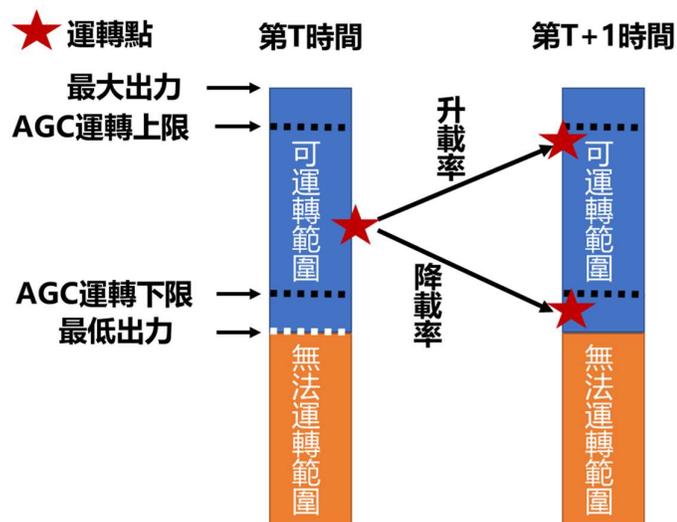
資料來源: Energy Exemplar

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

參數	意義及用途
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
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

參數	意義及用途
Units Out	機組檢修
Forced Outage Rate	機組故障率
Maintenance Rate	機組檢修率



資料來源: Energy Exemplar

### (三)儲能系統

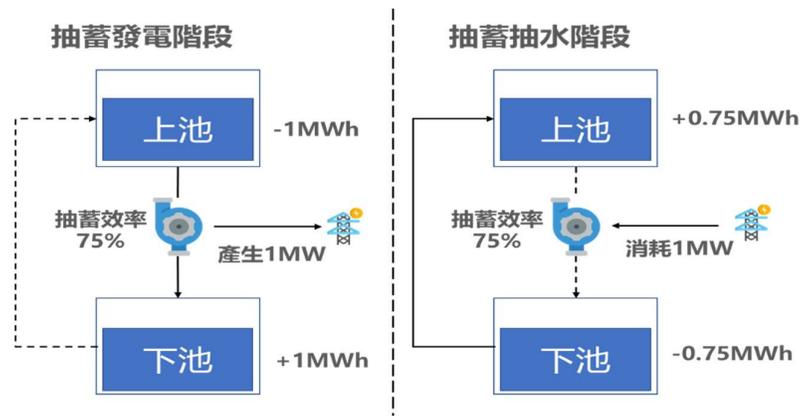
儲能系統是一種將電力轉換為可儲存的能量，在需要的時候再將能量轉換為電力的設備。此技術在電力系統中扮演越來越重要的角色，主要原因在於高彈性的運用方式，以應對需求端與供給端的變化。

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

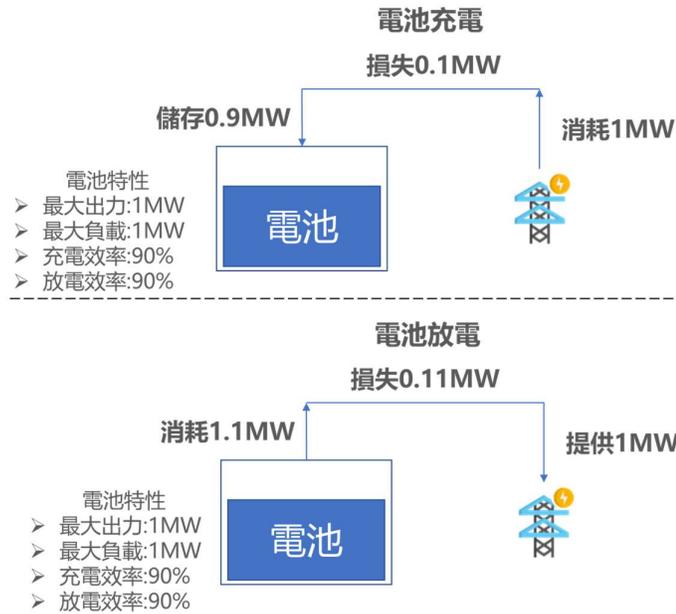


資料來源: Energy Exemplar

## 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

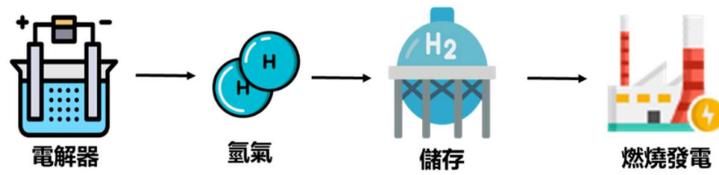


資料來源: Energy Exemplar

### 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

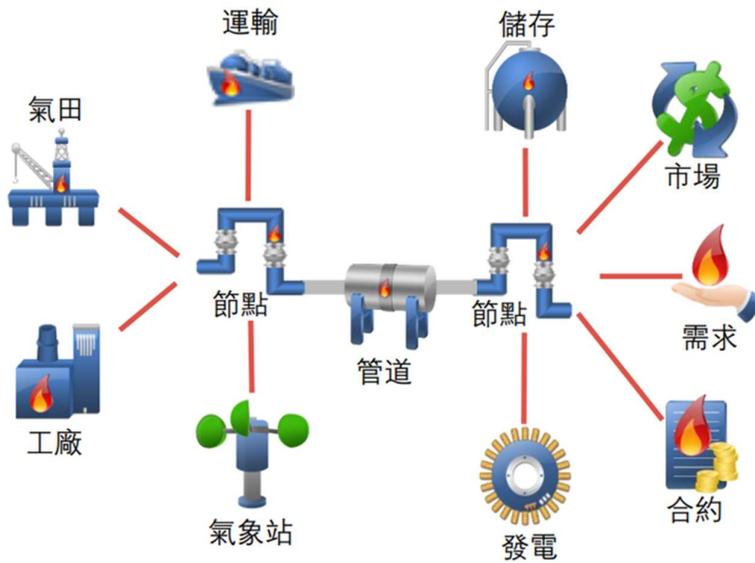


資料來源: Energy Exemplar

#### (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。

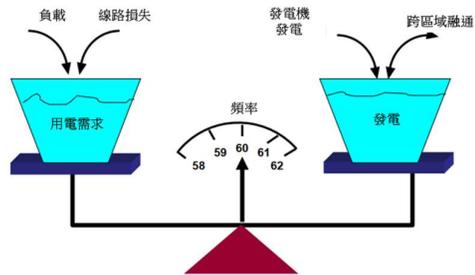
參數	意義及用途
Max/Min Volume	天然氣管線或儲槽最大/小容量
Loading/Discharge Time	船運裝載/卸收所需時間



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

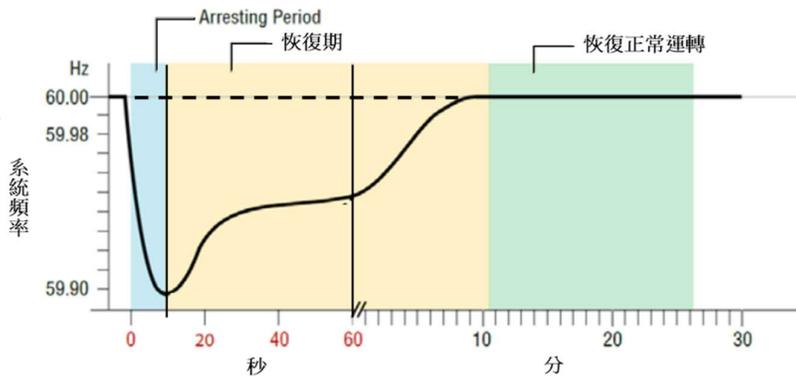
然而負載變化及發電機組故障等因素現實中無法避免，因此需準備適當輔助服務以確保電力系統安全穩定運行。輔助服務有許多種類型，其目的各有不同，大致類型如下列：

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。

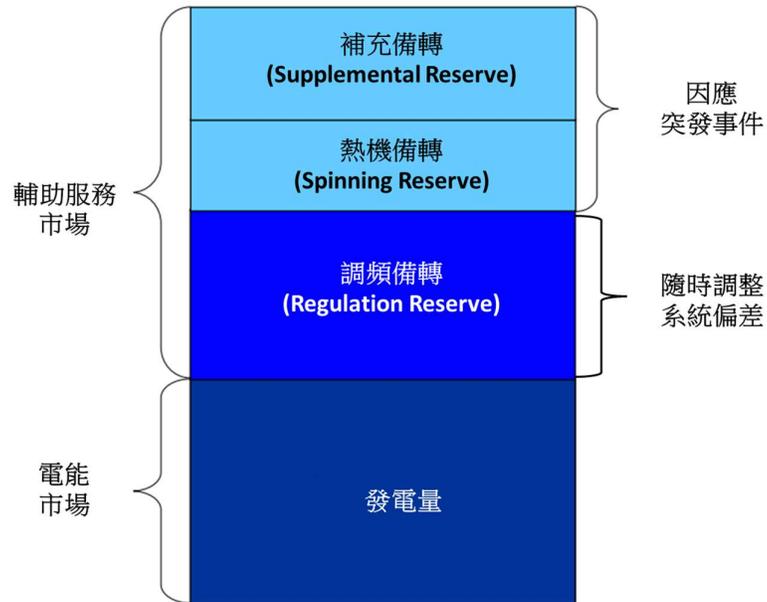


資料來源:NERC

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

#### (四) PLEXOS 運算原理

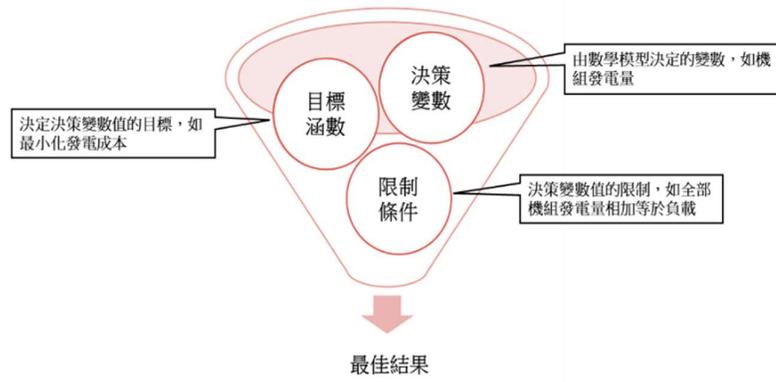
PLEXOS 是最佳化軟體，以電力市場而言，PLEXOS 針對不同的市場條件，提供不同的方法來進行最佳化模擬。面對受監管的電力市場中，採用以成本為基礎方式(Cost-base)，PLEXOS 主要功能為確定最好的運營計畫，以最低的成本滿足用戶的需求及合約約定義務(如購售電合約)，以確保電力系統成本的經濟性及可接受性。然而，在自由化的電力市場中，採用以競價為基礎方式(Bid-base)，PLEXOS 的目標變為更複雜，不僅僅只是考慮成本，還需預測市場價格、競爭對手未來各項資源配置及未來市場機制，在變動的市場中尋求機會，確保利潤最大化。



資料來源: Energy Exemplar

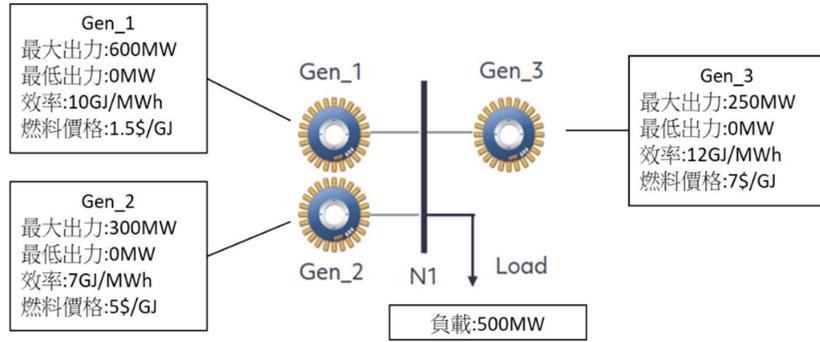
### (一)最佳化原理

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

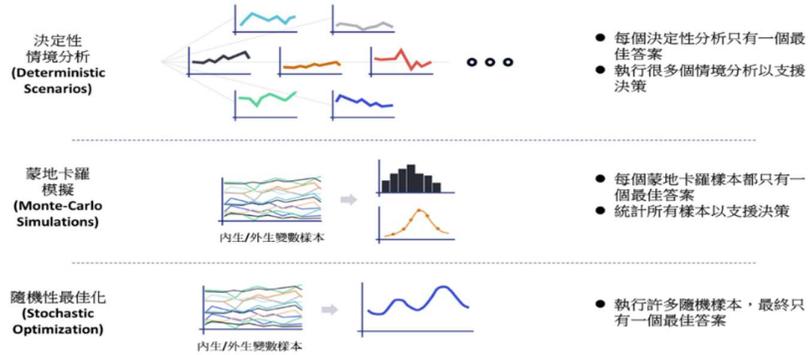
資料來源: Energy Exemplar

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內外限制條件等, 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

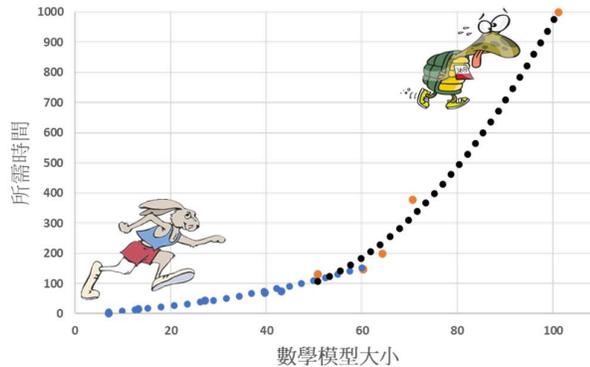
的挑戰，這三種方法各有其優劣及適合的應用場合，其簡單說明如下圖所示。



資料來源: Energy Exemplar

### (三)多層次最佳化

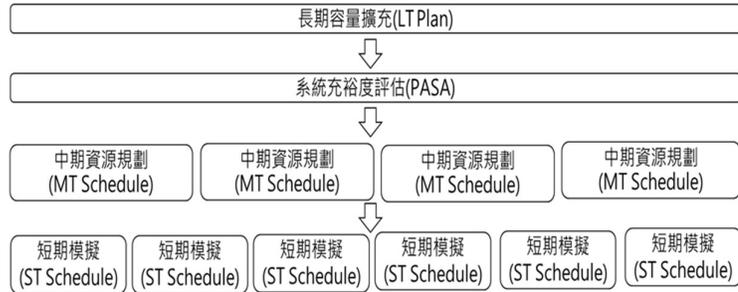
如前所述，PLEXOS 主要使用線性規劃(LP)、混合整數規劃(MIP)等先進數學模型，其中使用混和整數規劃方式最貼近實際系統運轉情形，然而，使用混和整數規劃所耗用電腦運算資源較線性規劃高出許多，以現今電腦運算能力而言，混和整數規劃(MIP)只能用於日到數週的時間區段做最佳化規劃，若一次性處理數月或數年等更久的問題，所需電腦運算資源及運算時間將難以估計。



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

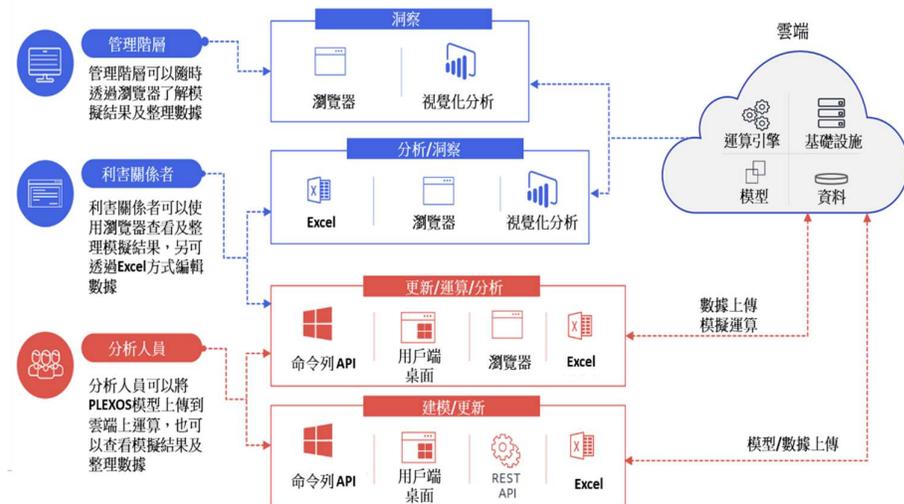
資料來源: Energy Exemplar

## (五) 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。

## (六) Xcelerate 研討會介紹

### 1、 Xcelerate 研討會議簡介

Xcelerate 研討會 是 Energy Exemplar 為 PLEXOS 使用者 舉辦之使用者研討會，也讓該公司業務了解使用者各種需求，會議主要於每年上半年度舉行，並且於美洲、歐洲及亞太區各一場，對於使用者來說提軟體教育訓練、互相交流機會、各種案例演講及圓桌討論會議，本次雅典會議參與者來自約 98 個公司或學術單位，38 個國家，其中主要來自歐洲，來自亞洲也有菲律賓、印尼及印度等國家。



資料來源：自行拍攝(Xcelerate 2024 Athens)

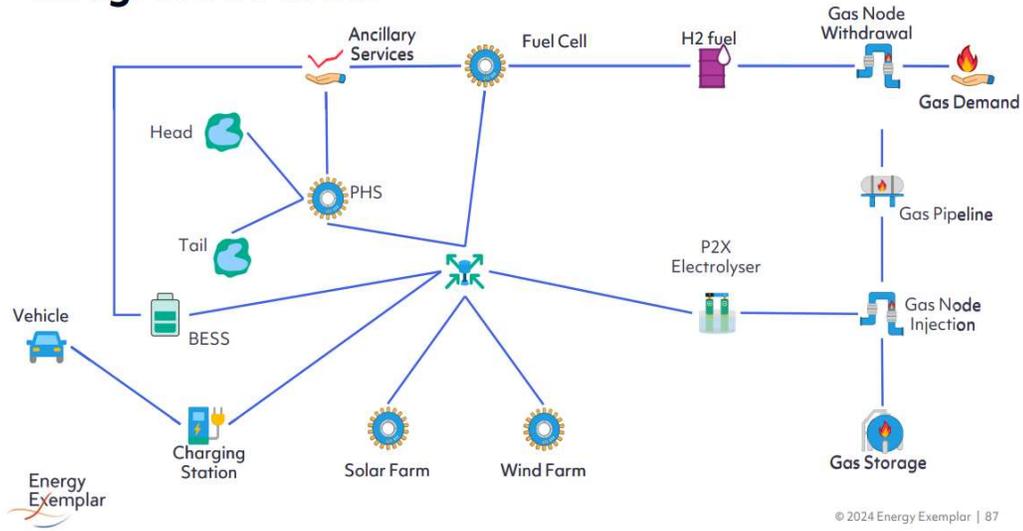
### 2、 研討會參與介紹

#### (1) 軟體教育訓練(再生能源發電過剩)

鑒於未來再生能源大量併網，公司目前有許多離岸風電併網與火力電廠之電源線互相共用，受限於電源線潮流等限制，未來能源整體規劃應用上需要更精準模擬，本次教育訓練中有實作結合一個系統包含再生能源發電、水力抽蓄、儲能、電動車充放電、製氫及氫氣儲存，最後可以連結至燃氣機組的用氣需求，下圖為

上述簡略示意圖；目前公司推估 Energy Hub 能源轉換等需求僅利用簡單數學轉換，將來導入其相關模型調整各種 Energy Hub 參數可以精準預估能源轉換。

## Integrated Model



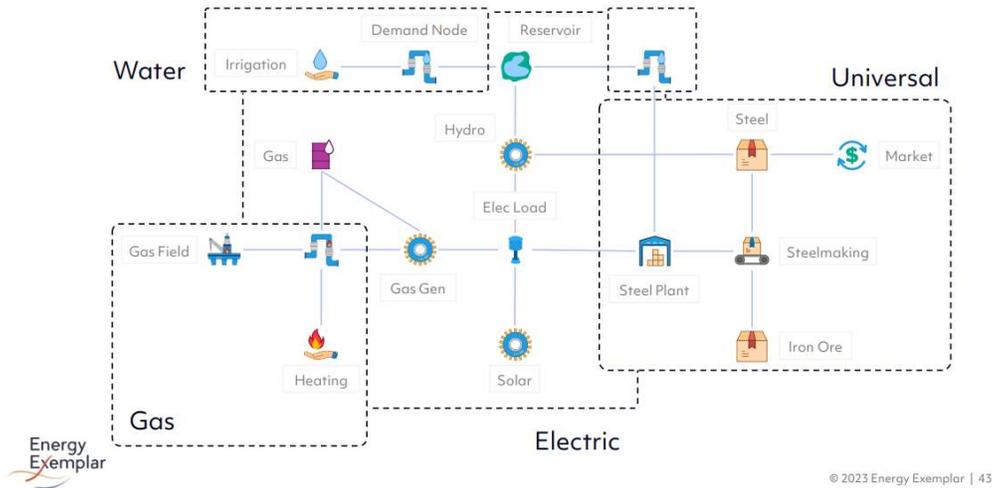
資料來源：Xcelerate 2024 Athens

### (2) 軟體教育訓練 (萬用模組 Universal Library)

考量商用軟體版本管控及開發同步，因此商用軟體無法提供原始程式碼讓使用者依據需求進行修改，PLEXOS 開放萬用模組 (Universal Library) 讓使用者可以依據需求滿足各種客製化需求，如下圖，水資源、天然氣供應及電力彼此之間相關聯，並且產生電能給於鋼鐵工廠，其中鋼鐵工廠採取萬用模組組合起來，變成需電能求端。未來此萬用模組對於本公司各種客製需求，列如各種大型用戶需求端，或者 CCS 中碳捕捉、管路傳送及碳封存等，

進一步模擬去碳燃氫的應用。

## Integrated Model: Example



資料來源：Xcelerate 2024 Athens

### (3) 軟體教育訓練(雲端運算)

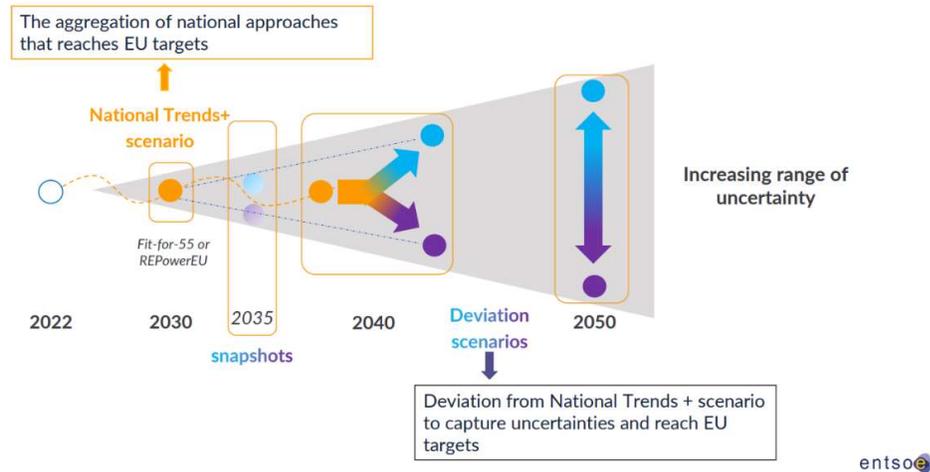
目前本公司 PLEXOS 軟體只能在本機端運算或者自行建置運算伺服器進行運算，因此，若需要更大量或複雜的運算時(如平行運算、蒙地卡羅運算、隨機性運算等)，需建置一定規模以上硬體才能因應運算需求，且需要耗費人力及時間維護硬體設備。因電腦逐漸老化導致效能逐漸落後及容易故障，需要適時更新硬體設備，屆時又耗費時間購置硬體設備及架設運算環境等。

面對此情況，Energy Exemplar 推出 PLEXOS Cloud 產品，如下圖所示，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，讓使用者可以專注本機端的 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，可以選擇足夠合適的運算資源。

對公司來說，操作軟體過程經過一段時間後，統計量化使用情況，未來可以進一步評估使用成本比較、資料安全及等其他考量，再

考慮是否需要進入雲端運算。

## TYNDP 2024 Scenarios - Strategy



資料來源：Xcelerate 2024 Athens

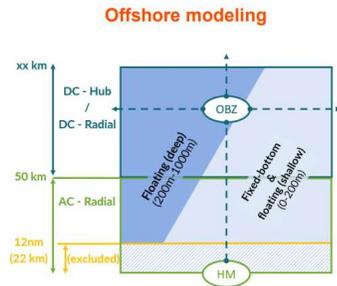
### (4) 實際範例演講(ENTSOG TYNDP)

歐洲輸電系統運營商聯盟主要負責歐洲電能供應、電網傳輸、天然氣傳輸及市場營運，目前每兩年間，ENTSO-E 發布十年電網規劃(Ten-Year Network Development Plans)，而上述使規劃用 PLEXOS 進行模擬，ENTSO-E 也將相關規畫推向 2050 年，如下圖所示，更重要的是模擬上隨時間軸越往未來向前走，必須將更多不確定性加入，減少政策目標，以利決策者擁有更多資訊進行評估。

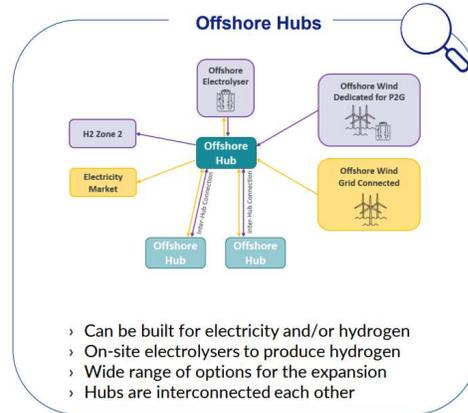
ENTSO-E 今年公布 TYNDP24 計畫中新納入 Offshore Hub 概念，如下圖所示，並且嘗試在模型中考量其成本及可行性，本公司未來也可以參考其作法，大量再生能源發電過剩之下，模擬不同組合型態的 Energy Hub，找出最高的效益之組合；會後與講者交流，歐洲各國電網公司也都會製作有關長期電網規劃，對於 ENTSO-E 彙整相關會員進行統整模擬，且其中也包含考慮各類電源及各

種燃料供應。

## TYNDP24 Scenarios – Offshore Hubs



- › 56 zones modelled (from PECD\* zones)
- › Offshore zones by distance to shore and water depth
- › **Offshore radial connected and Offshore Hubs**
- › The investment costs vary with the configuration



- › Can be built for electricity and/or hydrogen
- › On-site electrolysers to produce hydrogen
- › Wide range of options for the expansion
- › Hubs are interconnected each other

Optimization for the most cost-effective path to a European-wide offshore and onshore power infrastructure

entsoe

資料來源：Xcelerate 2024 Athens

### (5) 實際範例演講(東歐液化天然氣中心)

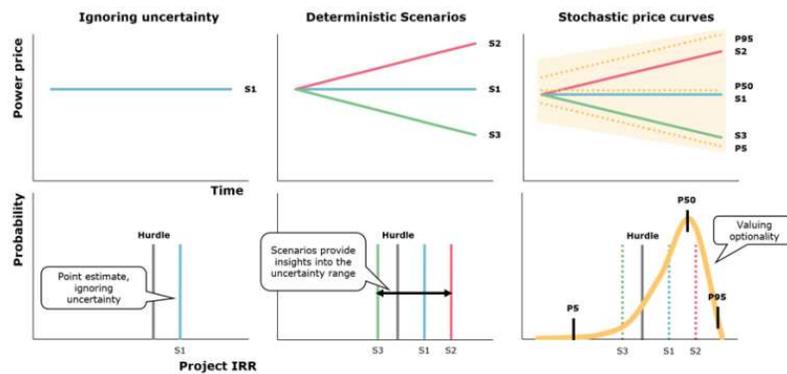
DESFA 是希臘最大液化天然氣傳輸營運商，目前希臘天然氣進口主要由靠近雅典 Revithoussa 接收站，主要進口國是美國為主（約 40%），目前正在希臘北部已完成改裝一艘 FSRU(Alexandroupolis)及計畫其他的 Thrace 及 Argo 等接收站，主要目的為維持巴爾幹半島能源供應安全，包含出口給羅馬尼亞、保加利亞等。最終計畫逐漸增加出口天然氣，讓希臘變成東歐液化天然氣供應中心，DESFA 目前也利用 PLEXOS 應用於天然氣市場及供需分配，未來甚至進一步規劃既有基礎設施升級後，可從其他國家，例如挪威等國家進口綠氫或藍氫，幫助東歐國家邁向零路徑。



資料來源： IPLOCA 2023

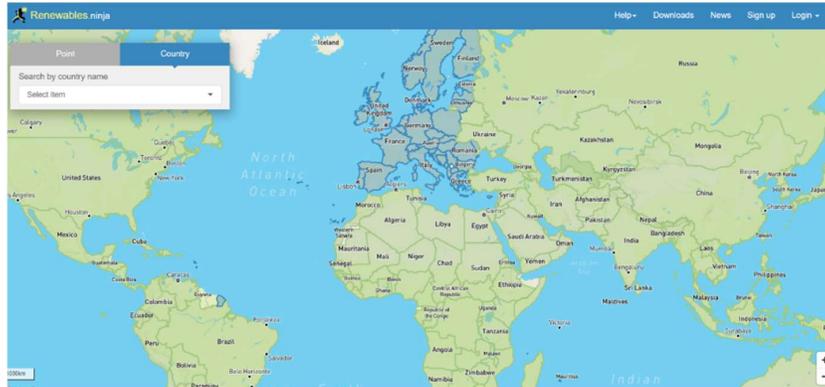
(6) 實際範例演講(隨機性模型)

本次會議中獲取最多就屬 Eneco 人員演講「隨機性應用於電力價格模型」，Eneco 目前是荷蘭的天然氣及電力供應商，而且是由日本三菱商社及中部電力擁有。理論上未來許多樣預測都有不確定性，因此對於未來規劃僅有一種情境，或者幾種情境模擬出來的結果將無法讓人做出決策，但是若能量化各種情境發生機率，便可以最做出最有利未來的決定，如下圖所示。



資料來源：Xcelerate 2024 Athens

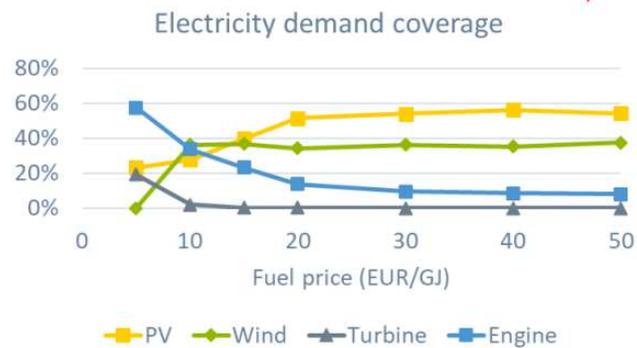
Eneco 利用過去 40 年天氣資料、100 種燃料價格預測及其他預測參數，組合成上萬種情境，再利用 PEXOS 產生各種電力價格，最後產生統計直方圖並可評估未來價格機率。會後與演講者討論，主要建議可以嘗試 Renewable.Ninja 氣候及再生能源資料庫搜尋台灣附近再生能源或天氣歷史資料，或採用有限歷史資料搭配亂數產生不同歷史資料；由於公司目前處理 2050 淨零路境的各種情境，都是基於過去某些歷史資料去設定參數，例如再生能源過去某一年發電時機值、某些單一模型預測值(燃料價格、負載預測等)；未來利用上述歷史或亂數加工後資料納入 PLEXOS 隨機性模型，找出任何路徑可能性。



資料來源：Renewable.Ninja Web

### (7) 實際範例演講(希臘離島規畫)

由於希臘在愛琴海中仍有許多小島，目前尚未與希臘本島或附近較大島嶼有電網相連，因此有些發電設備製造商也有使用 PLEXOS 為他們客戶進行獨立島嶼電力模擬分析，這個案例是針對希臘周邊島嶼，大部分電力來源為太陽光電及風力風電，在搭配傳統柴油引擎或天然氣機組，利用 PLEXOS 搭配島嶼供需設定模擬，如下圖，因為很多歐洲人會在夏季到地中海小島度假，所以尖峰負載也是在夏季跟周末，並且假設備用容量為 20%，備轉容量為 15%。



資料來源：Xcelerate 2024 Athens

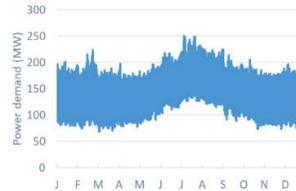
從報告中模擬結果顯示在極大化再生能源搭配儲能下，如下圖所示，不論燃料價格多高，仍需要柴油引擎提供約 10% 的島上電能需求，但是未若要將全島達成無碳島，對於柴油引擎可使用碳中

## Typical situation of a (Greek) island

Model assumptions

### Power demand

- Peak demand in summer during holiday season
- Total annual demand of 1.3 TWh/year



### Natural resources and grid stability

- Renewable resources based on Greek island
- Capacity margin of 20%
- Reserve requirements for reliability
  - Raise + regulation service
  - Total requirement of 15% of current load

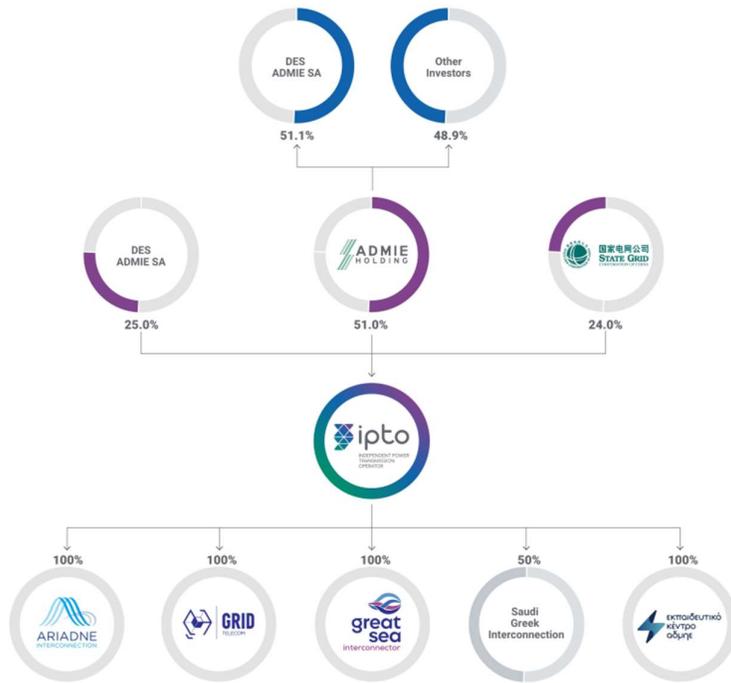
資料來源：Xcelerate 2024 Athens

台灣離島的假設情境或許並不相同，供電穩定性目標不同，但模擬工具及方法論應仍可適用，針對台灣離島而言，條件上再生能源開發量無法供應到全島，依據希臘島嶼評估結果可套用到任何外島，將再生能源開發極大值是不變圭臬，後續要模擬不同島嶼條件下，例如不同島嶼用途，所需要對應的供電可靠度，例如金門相較於綠島需要更高供電可靠度，因此進一步規劃出儲能以及火力機組的搭配容量組合。

## 二、 Independent Power Transmission Operator(IPTO)

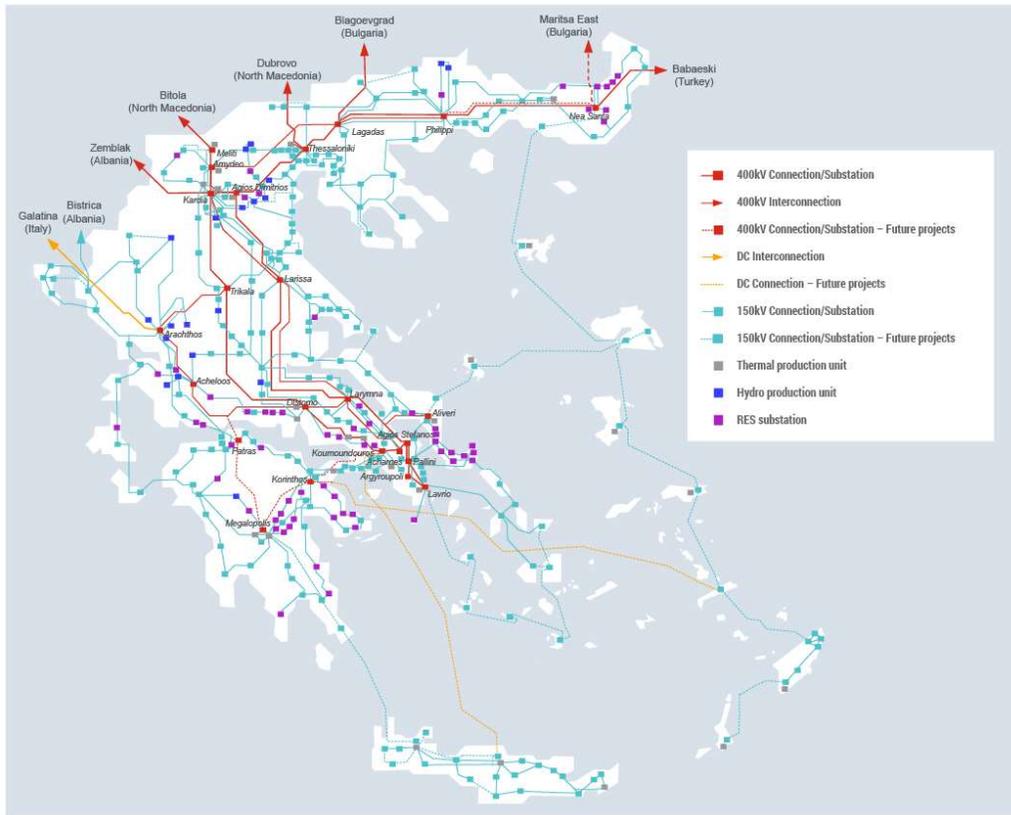
### (一) IPTO 介紹

2012 年 2 月根據 4001/2011 號法律成立 IPTO，並根據 2009/72/EC 規定作為獨立組織進行傳輸營運商運作。該公司主要任務是營運、控制、維護和開發希臘輸電系統，確保國家充足、安全、高效和可靠的電力供應，以及對外交易的電力市場的營運日前市場，遵循透明、平等、自由競爭的原則，由下圖所示，其中 IPTO 主要股東內包含中國國家電網公司，中國國家電網於 2016 年取得 24% 股份，在歐洲有幾個電網營運商的股份都有掌握在中國國家電網，在 IPTO 公司內部也有中國籍員工，其中高層中副執行長也是為中國籍。



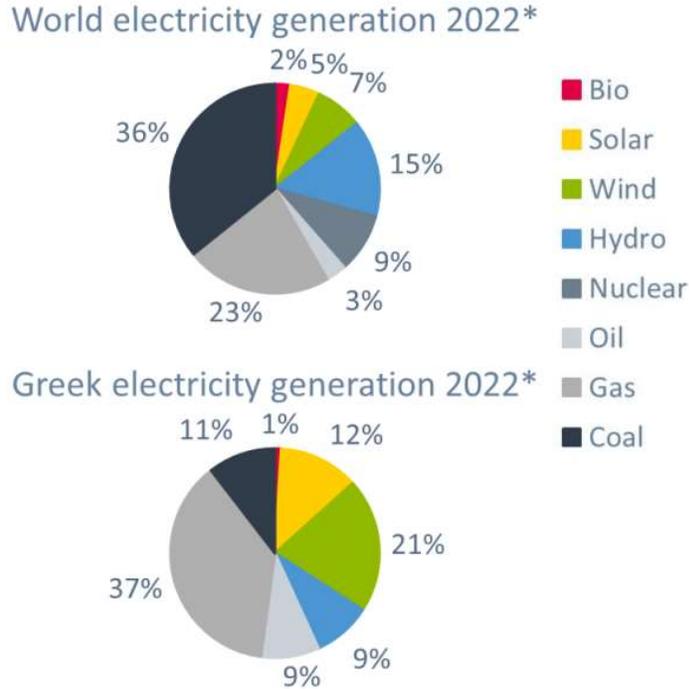
資料來源：IPTO presentation

由下圖所示，IPTO 目前服務整個希臘電網營運，目前有一條 DC 直流線路連網於義大利，但是主要與保加利亞跟北馬其頓電網營運商有交流，也有更大野心計畫興建 DC 直流用於連接賽普勒斯、埃及、以色列等國，利用地理位置，將希臘建立為地中海電網中心，並將該地區內多餘電力送往歐陸等地區。



資料來源：IPTO presentation

依據下圖希臘 2022 年風力發電佔比為再生能源最大宗，但目前主要為陸域風電，在愛琴海上各島嶼也是有許多風機，目前根據最新 2023 年統計資料，希臘再生能源發電已經佔全系統 45% 以上，也計畫未來在克里特島附近海域興建海上風機，預估可以達 5GW 以上，容量因數達 30% 以上，計畫在克里特島與雅典間興建 DC 直流電網，除了供應島上用電後，可以將多餘風力餘電送往歐陸。



資料來源：IPTO presentation

就大量再生能源發電產生的不穩定及過剩量，IPTO 認為不會影響希臘電網系統穩定性，因此希臘更有底氣開發大量發展各類再生能源，目前希臘已經擺脫兩年前俄烏戰爭造成批發電價持續上升，曾經高居歐盟國家前三名，反而今年因為再生能源占比增加，使其國內批發電價相較其他國家相比下降幅度較大。

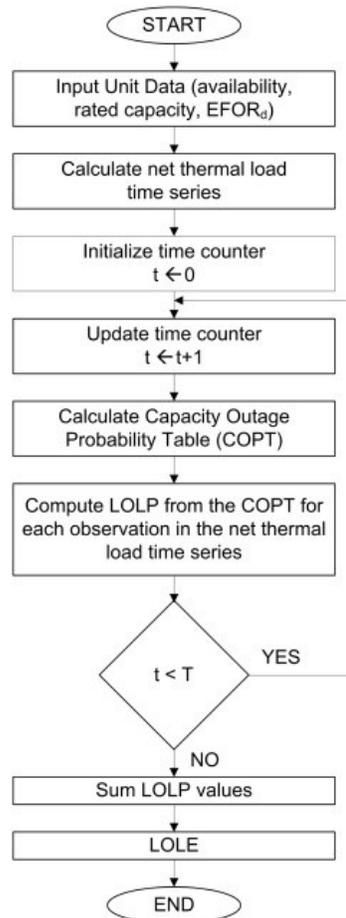
但 IPTO 較為擔心是再生能源價格問題，因為保加利亞太陽光電中午發電量較大，價格反而比希臘便宜，這時希臘反而成為能源進口國，萬一未來出口到其他國家不順利，會造成希臘國內再生能源供及過於需求，電力價格恐有發生負電價情形，反而導致再生能源業者財務出現問題，廠商不願持續投資，則可能無法達成 2030 年裝置容量滲透率為 80% 國家目標

## (二) IPTO 相關討論

這次特別跟 IPTO 的專家討論有關缺電機率(LOLP : Loss of Load Probability)、PLEXOS 軟體操作、天氣參數對模擬影響、還有介紹目前歐洲輸電系統運營商聯盟(ENTSO-E)現在成員也有使用的電力系統模擬軟體(Antares)。

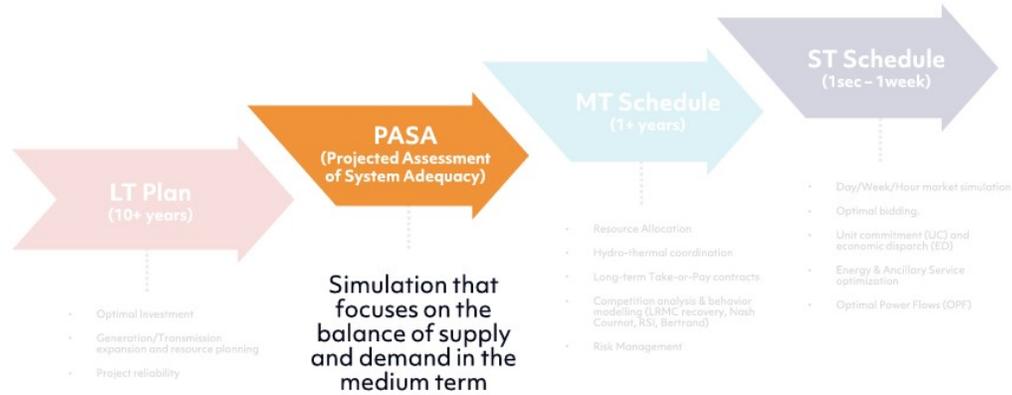
目前 IPTO 對於電力系統供電可靠度是利用計算一整年的缺電機率(LOLP)及缺電量(EUE : Expected Unserved Energy)，必須滿足國家能源管制機關訂定缺電機率低於一年 3 小時標準(0.034%)，大約比台灣的 999(0.10%)要更為嚴苛，但是在

2015 年之前，希臘電力來源相較現在有許多是進口，因此需要各種情境進行估算，當時是採取卷積法處估算缺電機率，如下圖所示，與公司目前處理流程相當，但 IPTO 認為當時各情境都是人為挑選極端，並無法考慮更細緻多元的可能性，才逐漸尋找新方法處理。



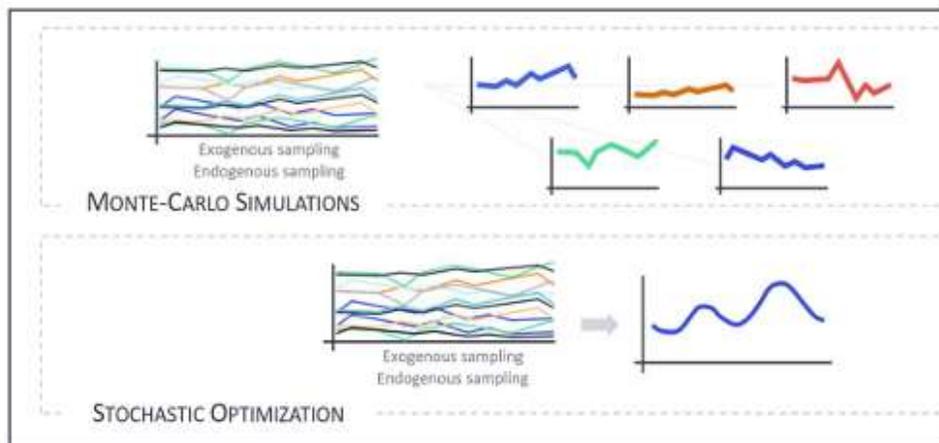
資料來源：IPTO presentation

IPTO 目前採 PLEXOS 軟體 PASA 模組處理機組檢修排程及處理故障率等參數，計算出電力系統缺電機率，如下圖所示流程。



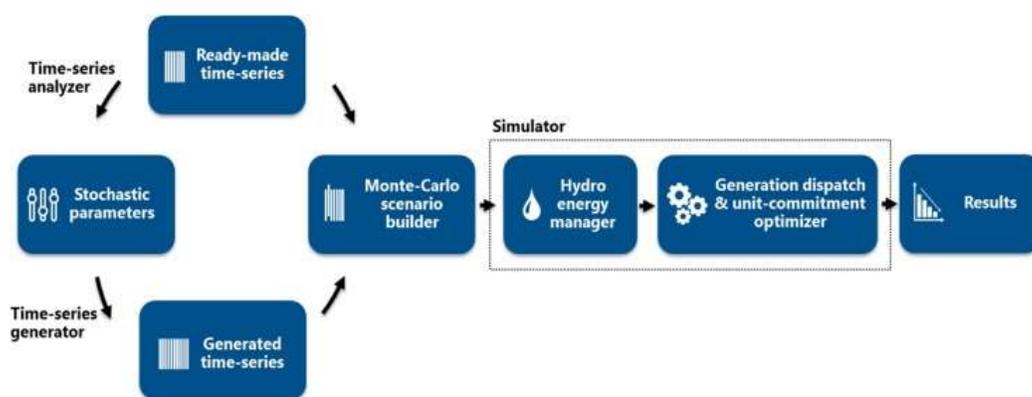
資料來源：Xcelerate 2024 Athens

對於現在希臘再生能源占比將近約 50%，未來也會大幅成長，因此再生能源的不穩定性是在短時間變化，也會大量出口至其他國家，此後電力系統可靠度不是只能考慮單一極端可能情境，因為電腦計算能力大增，IPTO 目前採 PLEXOS 軟體 Stochastics 方法處理各種情境，如下圖所示，將再生能源不穩定、電力進出口等模擬估算系統可靠度等。目前 IPTO 採 Stochastics 方法結合需求負載、天氣及機組可靠度，總共 600 多種情境去評估系統缺電機率；而在希臘電源開發方案 (Expansion Planning) 計畫約 10 種方案，而且都有模擬應對上述各種可能性，等同於 10 種方案，且一對多模擬。



資料來源：Xcelerate 2024 Athens

與 IPTO 專家交流中，有談到是否有第二或三模擬軟體選擇，有提及歐洲輸電系統運營商聯盟(ENTSO-E)成員中有使用 Antares 模擬軟體，IPTO 本身也有使用，RTE（法國電力傳輸系統營運商）在 2007 年開發 Antares-Simulator，開放給輸電系統營運商、電力和天然氣生產商、監管機構、學者、顧問、非政府組織和所有其他關注能源政策議題的使用者，最特別的點是這是免費開源(Open Source)系統模擬軟體，也是可處理細緻時間解析度，可對建立發電端和電網端模型，後針對一年在 8760 個小時時間範圍中對系統進行機率模擬，也可以處理短期或遠端時間不同互聯電網間系統的電力可靠度、經濟調度及是市場交易使用。最重要也可採 Stochastics 方法處理各種情境及模擬，對 IPTO 人員來說，等於利用 PLEXOS 及 Antares 處理相同情境，以作為備援。



資料來源：Antares Simulator Web

最後有 IPTO 專家有討論到兩者軟體差異，對 IPTO 業務而言，其實 Antares Simulator 幾乎可以做到 PLEXOS 軟體完成的項目，但相對 PLEXOS 起來 Antares Simulator 要維持是相對難度較高，但卻是可以輕易希臘電網或者交易市場特性進行客製化，相較 PLEXOS 卻是具有較佳彈性，所以 Antares 對 IPTO 不僅是第二線軟體，更可以當作自行研究開發的基礎。

## 參、心得與建議

### (一) PLEXOS 軟體通用模組

以目前 PLEXOS 軟體而言已經走到客戶需求大部分都已經滿足，但是對於客戶更多需求都需要客製化，都是屬於單一客戶需求，若滿足這些單一需求需要耗費相當多公司資源，工程師跟客戶對談，了解需求，撰寫程式，測試功能，客戶回饋，這樣來來回回對雙方都是相當折磨。因此可以理解為何開發通用模組，未來淨零路徑上面，各個國家或公司對於客觀環境下有各種適合的作法，發展出甚麼地域性淨零技術，利用此模組可以快速建立起原型進行模擬；以本公司目前可能開發去碳燃氫技術，未來模擬

上可分析天然氣與氫氣轉換，天然氣用量、機組雙燒以及對電力系統影響，這些都可以暫時採通用模組，台灣離岸風電併接上網常利用火力電廠附近電源線，因此常有線路擁塞及故障電流等問題，因此目前公司規劃採用 CCS 及製氫組合 Energy Hub 來消耗多餘電力進行碳捕捉或製氫儲能。

## (二) 歐洲目前關注電力趨勢

研討會中不論是教育訓練或者後續研討會，演講者的內容以及休息時間討論內容都圍繞者三個話題，包含供應鏈安全、能源淨零及電力市場價格。

### 1. 供應鏈安全：

由於俄烏戰爭後，天然氣供應成為歐洲電力重要議題，在減碳跟能源間，除了再生能源外，天然氣還是暫時最佳選擇，但是為了分散風險，提高天然氣供應鏈安全，歐洲各國企圖減少管路天然氣供應，增加液化天然氣供應，勢必要增加天然氣儲槽等基礎設施，也為後續強化擺脫天然氣供應，改轉為氫氣供應，以減少對俄羅斯能源依賴性；電力供應安全則強調持續建置大型直流輸電網路，大量開發再生能源，這兩項也都是增強供應安全不僅是分散風險，也是歐洲邁向能源自產的規劃，可以產生多餘再生能源透長程電網送至可製氫國家，再將氫氣送至有儲槽國家，氫電互相支援，提高供應鏈安全。

### 2. 能源淨零：

歐洲對於能源淨零目標一直是全世界先驅，不論是電動車、氫能及生質能等淨零技術、相關法規及政策目標都是全世界國家中的領頭羊，這次研討會議中報告重點就是氫能，其中離岸風場搭配製氫場成為討論重點，並且軟體上有許多講者簡報中的案例都有包含上述組合。其中一部分也開始談到離岸浮動式風機，但討論上主要為設置地點坐落於地中海，由於海象不會過於洶湧，環境上更適合浮動式風機開發，將風機透過電網輸送義大利、西班牙及希臘等國家。

### 3. 電力市場價格：

目前歐洲各國家家庭終端電價在 2023 年達到歷史相對高點，在 2024 年有將近一半國家電價下降，歐洲能源價格及電價取決於一系列不同的供需條件，包括地緣政治局勢、國家能源結構、進口多樣化、電網成本、環境保護成本、惡劣天氣條件或消費稅和稅

收水準等，在歐洲有 30 幾個電力市場，80 幾個電網節點，電力市場中包含生產者、消費者及貿易商，因此在研討會中相當多使用者積極討論電力市場價格如何模擬及預測，有很多電力公司必須建立電力市場價格模型，預測負載高峰時間和其他時間價格，並且可以捕捉到間歇性再生能源發電過程中的波動性對電力價格的影響；電力價格也受天然氣格影響，並基於 EGMM (歐洲天然氣市場建模) 建立模型；最後天氣氣候對電力市場價格影響，主要在利用 Stochastics 方法處理各種氣候情境對價格影響情形。

### (三) IPTO 拜訪心得

本次參訪 IPTO 電力電網模擬團隊，有兩點主要心得，首先模擬團隊中包含電力及電網兩大類，整個團隊人力上將近 20 幾個人，有專人針對資料蒐集、資料庫建立等；專人負責開發特定需求應用程式，但幾乎大部分人都是有獨立程式開發能力；第二點是不論電力或電網各種模擬，都不只使用單一種軟體，盡量有多種軟體模擬作為互相驗證，每個模擬軟體都有不同優缺點，彼此間也可以互相輔助，幫助更多元面向去發掘問題。

對於台電而言，電力模擬相關業務並沒有如 IPTO 這樣受到重視，主要可能在系統模擬結果對於決策或實務操作上沒有直接影響，但對於歐洲電力市場，市場參與者眾多，因此各業者都積極投入市場模擬，而且有龐大電力市場歷史資料可驅動市場模擬的精進，台電系統模擬主要投入於可靠度分析，IPTO 相關人員討論後也是建議往方法多面向，增加更多不確定性。

### 肆、 參考資料

(一)<https://www.energyexemplar.com/>

(二)<https://www.dei.gr/en/>

(三)<https://www.admie.gr/en>

(四)<https://www.eneco.nl/en/about-us/>

(五)<https://antares-simulator.org/>

(六)<https://www.entsoe.eu/>

(七)<https://www.edf.fr/>

(八)<https://www.terna.gr/en/activities/energy/project-power-plant-in-rhodes->

island

(九)Hans-Kristian Ringkjøb\* , Peter M. Haugan, Ida Marie Solbrekke “A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96 (2018) 440 – 459

(十)Welsch M, Deane P, Howells M, O Gallachóir B, Rogan F, Bazilian M, et al. “Incorporating flexibility requirements into long-term energy system models – a case study on high levels of renewable electricity penetration in Ireland.” *Appl Energy* 2014;135:600 – 15. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.072>.