

出國報告（出國類別：開會）

PLEXOS 電能模擬軟體研討會

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：曾家彥(主管分析)

黃懷宗(規劃專員)

派赴國家/地區：泰國

出國期間：114年2月24日至114年3月1日

報告日期：114年4月28日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：PLEXOS 電能模擬軟體研討會

頁數_34_ 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：

曾家彥/台灣電力公司/電源開發處/主管分析/(02)2366-6874

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：114 年 2 月 24 日至 114 年 3 月 1 日

派赴國家/地區：泰國

報告日期：114 年 4 月 28 日

關鍵詞：電力市場(Electricity Market)、最佳化(Optimization)、蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)

內容摘要：

PLEXOS 為澳洲軟體開發商 Energy Exemplar 的旗艦軟體，該公司固定每年舉辦國際軟體使用者大會(Xcelerate APAC)，目的是讓 PLEXOS 現有及潛在用戶分享使用經驗、相互交流，並學習最新的建模技術及軟體支援服務。今年 PLEXOS 電能軟體研討會在泰國曼谷舉行，與會者主要來自亞太區各國的獨立發電業者、國營電力公司、系統營運商、再生能源開發商、顧問公司、監管機構和輸電公司。

由於本公司已長期運用 PLEXOS 軟體於各項電力系統分析業務，展現出優異的應用成果，Energy Exemplar 特別邀請本公司參加此次研討會，並於會中分享我們的階段性成果與實務經驗。在研討會的專題演講中，本公司展示了如何運用人工智慧技術來模擬再生能源發電的間歇性特性(光電及風力發電)，以及如何透過蒙地卡羅方法，評估各種規模儲能系統的容量價值，這些研究成果獲得與會者的高度關注與肯定。

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、 研討會簡介.....	6
一、 概述.....	6
二、 PLEXOS 軟體介紹.....	7
三、 客戶分享.....	9
四、 小組討論.....	11
肆、 訓練課程.....	12
一、 最佳化短中長期的運算結果一致性及效能調教.....	12
二、 氫能產業價值鏈的分析應用.....	14
三、 系統各項限制條件建模方法及運算結果異常排除技巧.....	15
四、 PLEXOS Lab	17
五、 演講主題.....	20
一、 目的.....	20
二、 作法.....	20
三、 簡報介紹.....	22
四、 回饋心得及後續工作.....	30
伍、 心得及建議.....	32
陸、 參考資料.....	34

壹、出國目的

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。

在過去數年間，本公司一直致力於深入且全面運用 PLEXOS 軟體於各項複雜的電力系統分析業務，並且持續在這個專業領域中投入大量資源進行技術革新與運算流程最佳化，並展現出令人印象深刻且極具實用價值的應用成果。這些實務應用結果，引起了軟體開發商 Energy Exemplar 的高度關注與重視。基於對我們研究成果的肯定與認可，該公司特別向本公司發出誠摯的邀請，希望能參與該公司舉辦之國際性研討會(Xcelerate APAC)，向與會的各國專家學者分享我們多年來在實務應用上累積的階段性成果與寶貴經驗，以期能促進國際間相關技術的交流與發展。

在研討會的專題演講環節中，本公司詳細展示了兩項重要的研究成果：首先是如何創新性地運用人工智慧技術來模擬再生能源發電的間歇性特性，特別是在光電及風力發電這兩個主要再生能源；其次是如何結合上述結果運用蒙地卡羅方法，系統性評估考量再生能源間歇性下不同規模儲能的容量價值。這些具有前瞻性的研究成果不僅展現了本公司的技術實力，更獲得與會專家學者的高度關注與一致肯定。

此外，該研討會提供了一個獨特且寶貴的交流平台，讓來自不同國家的 PLEXOS 軟體使用者能夠齊聚一堂，透過這樣的互動機會，與會者不僅可以深入了解其他使用者如何運用該軟體，更能學習各種創新的應用方式和解決方案，這種跨國交流的經驗，有助於擴展參與者對軟體應用的視野，並促進不同地區使用者之間的經驗分享。

除了能夠與來自世界各地不同國家的使用者進行深度交流和經驗分享外，研討會特別規劃了完整的學習課程，包含適合初學者的基礎課程、針對進階使用者的中高階軟體培訓，以及 PLEXOS Lab 一對一諮詢服務。透過這些多元化的學習管道，

使用者不僅能夠系統性地掌握軟體的核心功能，更能針對實務應用遇到的具體問題獲得專業指導，從而全面提升軟體操作技能。

因此，通過參與此次國際研討會，不僅能接受專業培訓課程以提升軟體建模能力與技術水平，更能藉由與來自世界各地的專家學者進行深度交流與互動，分享彼此的實務經驗和創新見解，從而大幅拓展我們的國際視野，並建立起寶貴的专业人脈網絡。

貳、出國行程

本次出國計畫共 6 天(含交通時間)，地點為泰國曼谷，研討會主要內容如下：

日期	機構	主題
2/24		去程
2/25	Energy Exemplar	1.Powering India's Green Future: Renew's Role in Energy Transformation and Technology Innovation 2.ASEAN's Path to a Resilient & Sustainable Energy Future: Bridging Policy, Innovation, & Regional Collaboration 3.Strategic Energy Planning for Scalable Data Centers 4.Guest Keynote
2/26	Energy Exemplar	1.PLEXOS Lab 2.The Future of Energy: PLEXOS Product Roadmap and Vision 3.PLEXOS Best Practices Workshop: Birds of a Feather 4.PLEXOS Advanced: Infeasibility Boot Camp 5.PLEXOS Advanced: Constraining the System
2/27	Energy Exemplar	1.PLEXOS Lab 2.PLEXOS Advanced: Hydrogen Value Chain Modeling 3.PLEXOS Advanced: Consistency Investigation between LT/PASA/ST 4.PLEXOS Advanced: Chronology & LT/MT Run Time Optimization 5.PLEXOS Advanced: New Features In PLEXOS Cloud
2/28	Energy Exemplar	1.PLEXOS Lab 2.PLEXOS Advanced: Energy and Ancillary Service Markets: Co-optimization and Pricing 3.PLEXOS Advanced: Renewable Energy Integration and System Stability Analysis
3/1		回程

參、研討會簡介

一、概述

研討會主要分為三大重要部分:(一)使用者經驗分享及交流環節,讓與會者能夠互相學習並交換寶貴意見、(二)訓練課程,包含基礎及中高階訓練,參與者可依據不同程度參與不同的課程、(三)PLEXOS Lab 一對一諮詢服務,由專業人員提供個別化指導及問題解決。

在第一部分將介紹本次研討會的核心主軸與重點議題,首先會簡單介紹 PLEXOS 軟體概況,接著介紹會中較受關注及比較熱門的資料中心主題,最後則是介紹小組討論。

第二部分會再另一獨立章節介紹訓練課程,課程涵蓋四大核心領域:(一)最佳化短中長期的運算結果一致性及效能調教、(二)氫能產業價值鏈的分析應用、(三)系統各項限制條件建模方法及運算結果異常排除技巧及(四)PLEXOS Lab 所提供的專業諮詢服務內容。

接著,我們會在另一章節中,簡單介紹本次我們在研討會上所分享的主題,包含具體實施方法及分析結果等成果展示。



Xcelerate 研討會會場

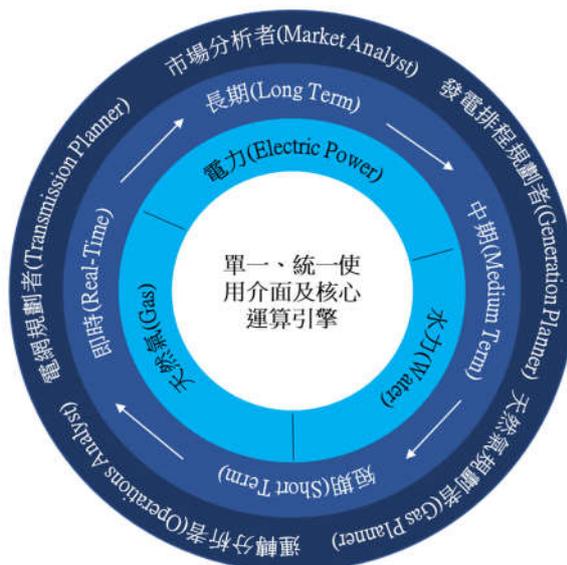
二、PLEXOS 軟體介紹

PLEXOS 是由澳洲 Energy Exemplar 公司開發的模擬軟體，該公司成立於 1999 年主要專注於電力市場模型建置及分析。國際上廣泛用於分析電力市場、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。



資料來源: Energy Exemplar

PLEXOS 軟體在眾多模擬軟體中脫穎而出的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。

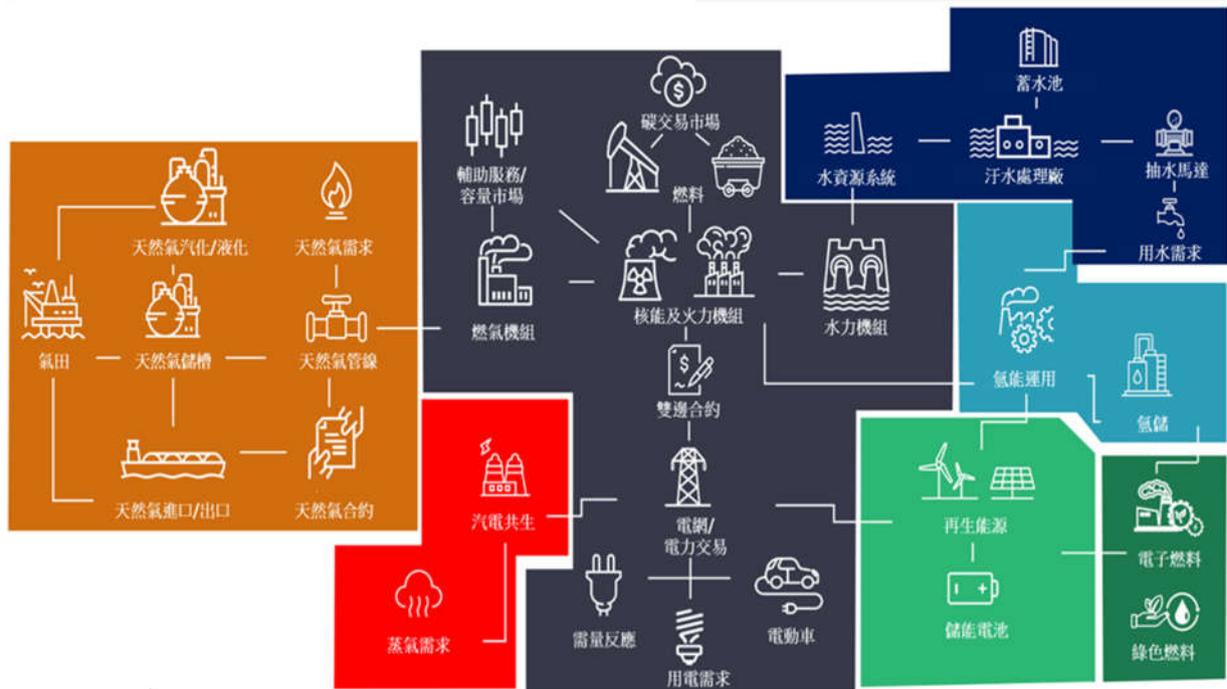


資料來源: Energy Exemplar

PLEXOS 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(如電力市場交易機制等)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 能模擬的設備物理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

三、客戶分享

本次研討會匯集亞洲各國的 PLEXOS 客戶，共同探討多項重要的能源議題。會中主要主題包括印度再生能源快速發展、東南亞地區跨國電網整合，以及資料中心選址策略。

(一) 東南亞跨國電網

隨著全球氣候變遷的壓力加劇，東南亞各國正討論跨國電網議題，此議題是一項重大的區域性能源基礎設施計畫，旨在連接東南亞國家的電力系統，不只提高區域能源安全亦可促進再生能源發展及降低整體發電成本。

新加坡目前已從寮國進口再生能源，但跨國電網的推動仍面臨諸多挑戰，除了技術標準、跨境監管協調、基礎設施投資等問題外，地緣政治的影響更是重大，這些都需要長期的溝通與協調才能發展。



東南亞各國用戶就跨國電力議題進行討論

(二)資料中心開發策略

過去 PLEXOS 軟體主要應用於電業領域相關，如電力市場交易分析或者長期投資決策規劃，近年來隨著數位發展、雲端運算及 AI 以前所未見的速度快速擴張，全球數據中心建設需求大幅增加，然而數據中心的快速發展帶來一個關鍵挑戰就是能源供應問題，因此，會中特別介紹資料中心開發商 AirTrunk 如何運用 PLEXOS 協助資料中心選址規劃與分析。

AirTrunk 為頂尖的超大規模數據中心專家，主要為亞太及日本地區的雲端服務商、內容提供商和大型企業客戶打造專業平台，並以業界領先的可靠性、技術創新，以及卓越的能源和用水效率著稱。憑藉獨特的專業技術、設計和建造方法，AirTrunk 為客戶提供具成本效益的可擴展和永續數據中心解決方案，使其建造和營運成本大幅低於市場水平。

長期以來，數據中心開發商一直依賴公用事業的人工審核流程來評估電網可用性，整體過程通常需要三到六個月的時間，若場址被否決，整個開發專案就必須重新開始，導致投資成本高昂。

此外，傳統規劃方法往往著重於當前的電網狀況，而非預測未來的能源供應情況，這種被動的開發方法使企業容易受到未預見的基礎設施限制和電力價格波動的影響，開發商若缺乏明確的能源策略，則將面臨專案延遲、成本增加以及錯失市場機會的風險。

因此，在企業發展策略上，AirTrunk 經歷了明顯的轉變，過去主要著重於三大關鍵要素：土地資源的取得與規劃、技術基礎設施的建置及相關法規的遵循。然而，隨著市場環境的改變，重點轉移至能源供應這個關鍵議題上，為了更有效地因應這個轉變，AirTrunk 開始採用 PLEXOS 軟體評估投資可行性及未來市場趨勢的預測，以系統性最佳化整體投資策略。

四、小組討論

本次研討會的參與者來自世界各地的不同用戶，每位使用者都有其獨特的應用需求及使用經驗，因此研討會特別規劃了分組討論環節，讓與會者能參與感興趣的主題並進行小組討論和經驗交流。

我們參加整合資源規劃小組並進行進行小組討論，小組成員有來自澳洲 Powerlink、印度 Tata Power、菲律賓的 National Transmission 等，在小組討論過程中，總結使用者最為關注的問題為(一)再生能源發電的不確定性帶來的挑戰、(二)整合 PLEXOS 規劃軟體及 PSS/E 電網分析軟體。再生能源不確定性議題主要解決方法有使用情境方式或隨機性分析探討可能面臨風險，之後會在 PLEXOS Lab 章節中介紹。



整合資源規劃小組討論

肆、訓練課程

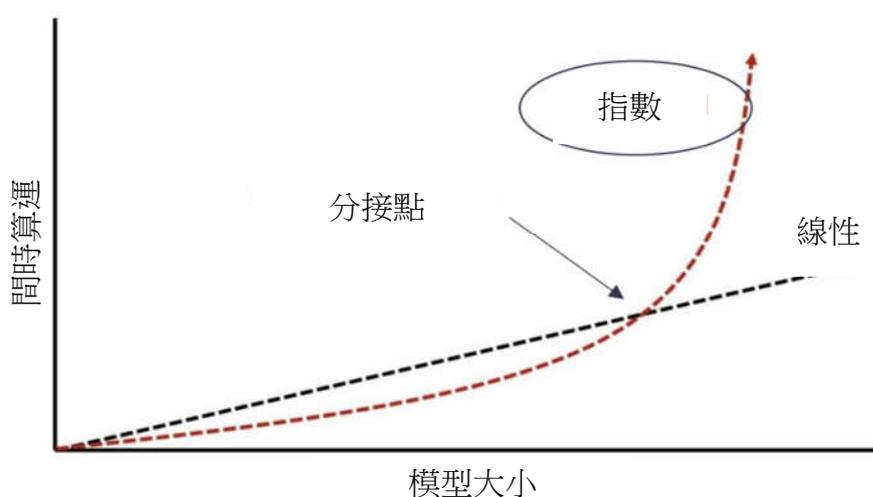
進階專業課程涵蓋四大核心領域：(一)最佳化短中長期的運算結果一致性及效能調教、(二)氫能產業價值鏈的分析應用、(三)系統各項限制條件建模方法及運算結果異常排除技巧、(四)PLEXOS Lab 提供專業諮詢服務。

一、最佳化短中長期的運算結果一致性及效能調教

PLEXOS 能夠處理長期、中期及短期等不同時間尺度的複雜問題，但在實際使用中，長期與短期問題的考量面向和建模細緻程度有顯著的差異，短期模型由於其數學模型規模相對較小且時間跨度有限(一天或一週)，因此能夠完整考慮各種物理特性，包括機組調度限制、輸電網路限制以及市場機制等，從而達到較高的仿真效果。

然而，若試圖將長期模型(10年~20年以上)的精細度提升至短期模型的水準時，會面臨巨大的運算挑戰，即使採用現今最先進的電腦運算技術，仍然無法處理如此龐大的數學模型。

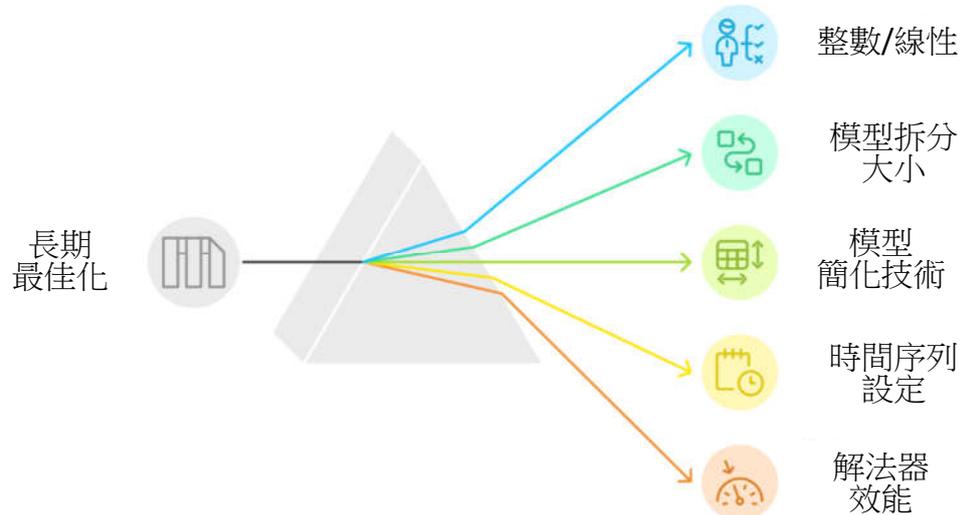
以目前 PLEXOS 使用經驗，當需要全面考量機組物理特性(如：啟動成本、啟動時間、升降載率等)，目前模型的大小與運算時間大致呈線性成長，然而，若進行每月或每年的最佳化運算，模型大小與運算時間則會呈指數性成長，此時所需的電腦運算資源將難以評估。



資料來源:Energy Exemplar

在實務運用上，許多電力系統的運轉限制是以年度、月份或跨多年度為單位進行規劃，這些限制包括政策目標、機組大修規劃、環保限制等。然而，若將日前模型中較為細緻的參數直接應用於長期模型，不僅會大幅增加計算複雜度，更可能導致最佳化運算效率低落或無法收斂。因此，在建構長期模型時，必須審慎在模型精確度和運算效率之間尋求最適平衡點。

因此需要採取適度的簡化措施以降低計算負擔，例如合併相似的運轉條件、簡化時間尺度、或使用代表性的負載特性等。但同時，必須確保這些簡化措施不會導致模型結果與實際運轉情況產生顯著偏差，以維持模型的可用性。這種在精確度和效率之間的權衡取捨，是當前電力系統建模面臨的重要挑戰之一。

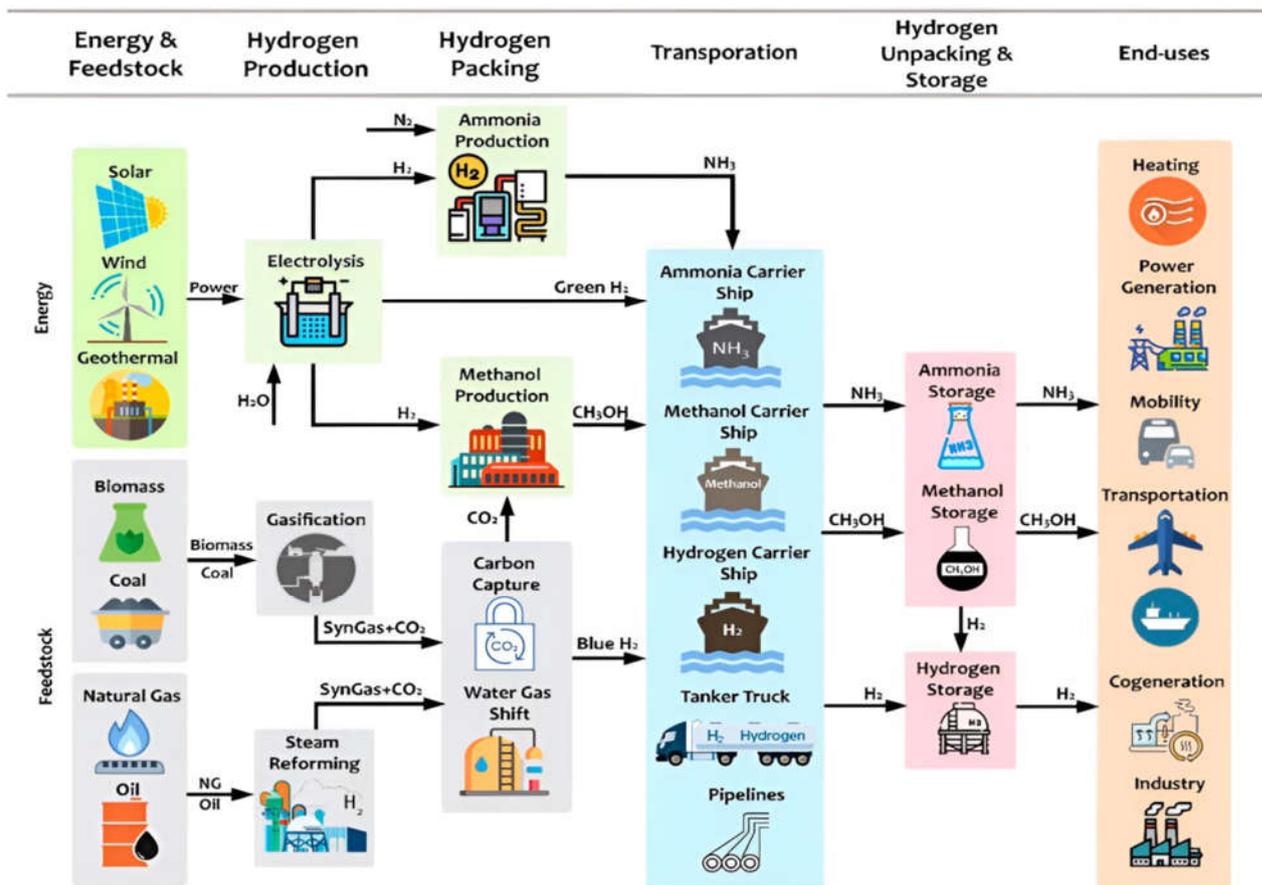


資料來源:Energy Exemplar

以上僅是非常簡單的介紹 PLEXOS 的短中長期運算結果一致性及效能調教方法，實際上操作時相當複雜，每個模型因為其特性和目標不同，都有其獨特的調教要點和注意事項，有些甚至需要特別的優化技巧。此外，模型的規模大小、時間尺度和運算複雜度都會影響調教的方式，要能夠靈活運用這些調教技巧，需要累積相當豐富的實務經驗，並且透過不斷的實踐和驗證來提升操作的熟練度。

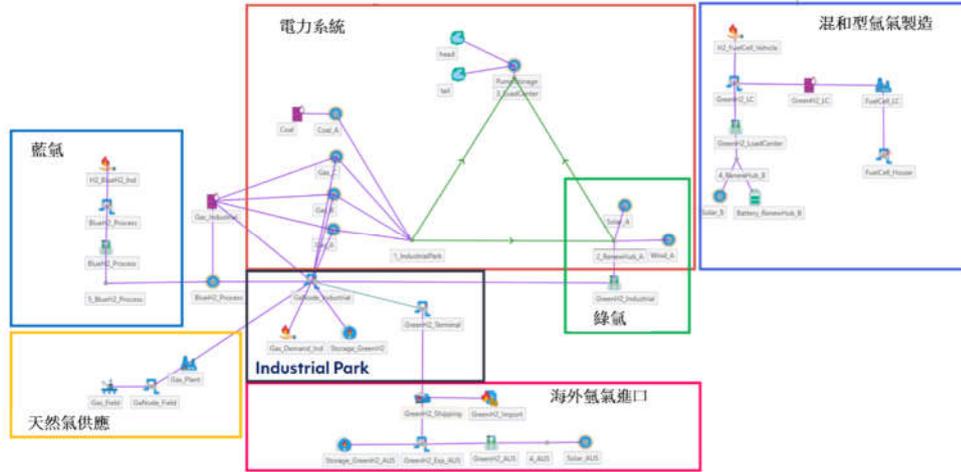
二、氫能產業價值鏈的分析應用

氫能作為未來能源轉型的重要解決方案之一，已成為全球清潔能源發展的關鍵選項，隨著各國政府和企業持續加大對氫能產業的投資和布局，相關技術和應用正快速發展，PLEXOS 也順應市場需求，逐步開發並完善了多項氫能相關議題的模擬分析模型，供使用者分析氫能價值鏈，分析範圍涵蓋了生產、儲存、運輸和應用等多個環節。



資料來源:Energy Exemplar

在 PLEXOS 軟體中，不僅可以透過電力模組來分析能源供需情況，還能結合天然氣模組的功能，模擬燃料的生產、運輸到使用，進而實現更全面的氫能價值鏈模擬。



資料來源:Energy Exemplar

三、系統各項限制條件建模方法及運算結果異常排除技巧

PLEXOS 軟體最顯著的特色之一就是其強大的限制條件建置功能，這使得使用者能夠精確地模擬並對應各種實際運轉情境，透過這項功能，軟體可以完整反映出真實世界中的各種運作限制和條件要求，PLEXOS 軟體內建限制條件參數除了常用基本設定之外(如:機組升降載率、容量因數等)，亦提供自定義限制條件供使用者自行建置。

自定義限制式由五個重要的基本屬性所組成，這些屬性各自扮演著不同關鍵角色，透過這些屬性的參數設定，使用者能夠全面模擬電力系統中各種設備的物理特性和行為模式。

屬性	說明
目標方程式係數	在最小化目標函數中賦予決策變數的值。
上限值	最大值。
下限值	最小值。
特性	連續或整數變數
時間延遲	回顧期數

課程中以海淡廠為案例來進行建模說明，在 PLEXOS 軟體中未提供海淡廠的模組供使用者直接使用，然而，這並不影響模擬的可行性，因為使用者可以透過自定義限制式的彈性方式，建立並模擬海淡廠的各項物理特性與運轉條件。

雖然 PLEXOS 提供功能強大的限制式功能供使用者使用，但是在實際應用中，隨著限制式的複雜度增加，數學模型很容易出現無解的情況，這種無解的情形不僅會影響計算的結果，更可能會連帶影響到後續相關運算，使得整體運算結果與預期有所差異，嚴重情況下甚至無法完成運算。

依據過去使用 PLEXOS 經驗，解決數學模型無解的問題往往會占用整體分析時間的一半以上，這凸顯處理無解問題的重要性。因此，如何在運算前有效預防無解情況的發生，以及在遇到無解問題時能夠快速準確判斷其發生原因，都是使用 PLEXOS 軟體過程中必須面對和掌握的關鍵技能。



PLEXOS 進階課程

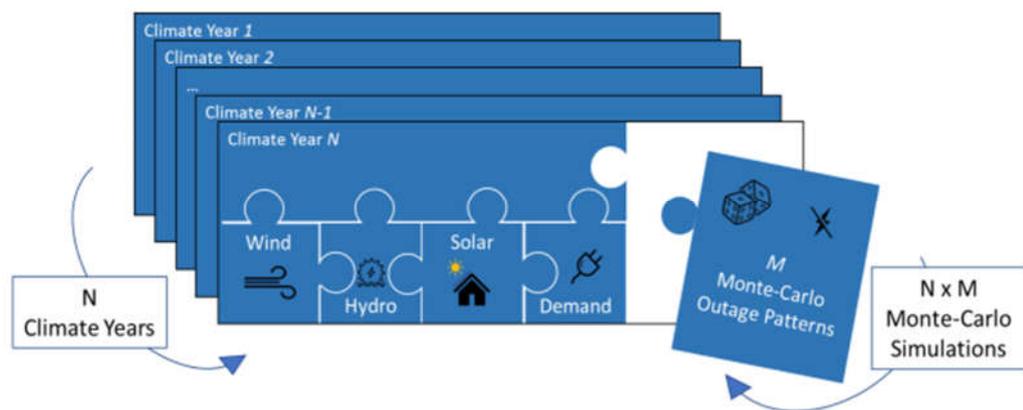
四、PLEXOS Lab

PLEXOS Lab 是一個提供個人化一對一諮詢服務的專業場地，用戶可依據使用軟體時遇到的技術難題、操作疑問，以及進階功能的探索需求，預約資深分析師進行深入討論，確保每位用戶都能獲得符合需求的專業指導與解決方案。在 PLEXOS Lab 中，我們主要詢問兩個問題（一）再生能源隨機性問題及（二）自定義限制式，詳細說明如下：

（一）如何在可靠度分析中，如何處理再生能源間歇性問題

近年來因全球氣候變遷及環保意識提升，加上再生能源發電技術進步使得發電成本大幅降低，促使電力系統中間歇性再生能源的發電占比持續攀升。然而，再生能源如太陽能 and 風力發電受到天氣條件的影響，使其發電量具有較大的不確定性且難以準確預測，這種不穩定性為運轉安全性帶來新的挑戰，因此如何在追求環境永續的減碳目標與維持穩定可靠供電之間取得最佳平衡，已成為現代能源政策中一項關鍵且迫切需要解決的重要課題。

以評估長期供電可靠度而言，主要有兩種分析方法。第一種方法為情境分析，這種方法採用不同氣候條件下對應之負載特性及再生能源發電特性進行探討，一般採用多年的氣候資料，每個氣候資料都有其相對應的負載及再生能源發電量後，進行可靠度評估。



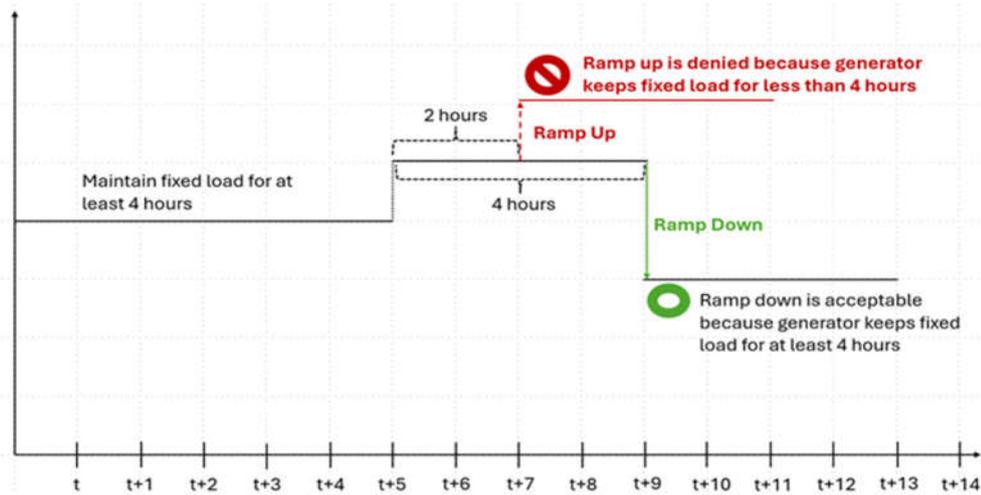
資料來源：entsoe

第二種方法則是隨機性分析，此種方法依據過去再生能源發電統計資料（如：每小時中位數、標準差等），再使用蒙地卡羅法推估未來再生能源發電的隨機性分布曲線後再進行後續可靠度分析。

情境分析方法相較於隨機性分析方法來說，具有操作步驟較為簡單、分析過程較為直觀的特點。此外，執行情境分析時所需的運算資源也較為節省，這使得它在某些應用場景中更具實用性，然而，選擇何種方法仍需依據具體評估目標及可用資源來決定。

(二)如何使用自定義限制式，模擬特殊燃煤機組運轉行為

燃煤機組因其運轉特性和技術限制，無法像燃氣機組靈活且快速地調整出力來因應即時的電力需求變化。假設一部燃煤機組需要遵守以下運轉規則：機組必須在相同出力水平持續運轉至少 4 小時，達到此最小運轉時間要求後，才能進行一次升載或降載調整，每次完成出力調整後，該機組必須維持新的固定出力至少 4 小時，才能進行下一次調整。



運轉限制說明

由於這種複雜的運轉限制條件在 PLEXOS 標準模組中並無現成的限制式可完整模擬其特性，因此需要透過自定義方式來建立相應的限制條件，以確保模擬結果能準確反映實際運轉情況。此限制可以使用以下列數學式表示：

```

If gen(t+4) != gen(t+3)
  Then gen(t) = gen(t+1) = gen(t+2) = gen(t+3)
If gen(t+4) = gen(t+3)
  Then gen(t+1) = gen(t+2) = gen(t+3)

```

通常最佳化數學運算中，會使用 Big M 或者 Small M 方式，以有效的將邏輯條件轉換為可被最佳化演算法求解的數學約束式，因此在 PLEXOS 軟體中，須建立兩個二元決策變數(BV1 及 BV2)，BV1 代表 gen(t+4)是否等於 gen(t+3)的

判斷式，當 $BV1=0$ 時，代表 $gen(t+4)$ 不等於 $gen(t+3)$ ，反之當 $BV1$ 等於 1，代表 $gen(t+4)$ 等於 $gen(t+3)$ 。鑒於接下來限制式設定過於複雜，因此詳細限制式建模在此不再贅述。



PLEXOS Lab 討論

五、演講主題

一、目的

台電公司於 2023 年起開始討論有關國發會規劃 2050 年台灣淨零路徑目標下，本公司如何配合政府目標進行電源開發，在公司召開多次會議討論下，未來 2050 年預估尖峰負載及需電量都將隨經濟成長或電氣化等需求大幅增加，可預見未來除了大量再生能源併網外，必須準備足夠擁有淨零技術火力機組才能提高供電穩定度。

因此嘗試在滿足 2050 年電力供應穩定下，預估未來所需要開發的裝置容量，但是開發火力電廠必須考量土地、環保及其屬於鄰避設施，因此在台灣有限土地及空間下，台電曾盤點 2050 年火力機組可能開發容量，但尚未能滿足所需開發容量；並且進一步模擬下 2050 年系統中發生再生能源發電在多時段有發電過剩情形，因此許多再生能源發電未能被有效利用。

因此嘗試利用 PLEXOS 進行模擬是否可以利用儲能取代部分火力電廠，並且解決再生能源發電無法有效利用情形。嘗試推估儲能在系統中不同滲透率下其容量價值，再評估儲能在不同滲透率下對再生能源源發電過剩影響。

這次主辦方邀請台電演講有關應用 PLEXOS 軟體處理案例，因此就撰寫上述主題摘要並向主辦方投稿，後來經主辦方經審查接受後，安排本公司案例於研討會議議程，隨後著手準備相關研究及簡報製作。

二、作法

(一)文獻回顧：

1. 首先進行文獻蒐集回顧，國外自由化電力市場營運者為滿足系統可靠度，必須針對容量市場中各類電力資源評估其在市場中容量價值，評估儲能容量價值方法幾乎主要分為等效承載法(ELCC, Effective Load Carrying Capability)及線性法。上述兩種方法有其優缺點，但其估值都不外乎都會受到電力結構、負載型態、電力資源發電不穩定性等影響。當評估方法不同，其推估方法複雜度相差甚大，儲能容量價值推估就受到上述影響，因此文獻回顧¹²³⁴中是主要包含推估儲能和單一再生能源合併下的容量價值，也有綜整不同再生能源下推估系統中儲能容量價值。

2.但在文獻回顧²上僅有根據幾個不同再生能源情境下各別推估儲能容量價值，並定性比較其差異，本報告嘗試利用等效承載法(ELCC)推估系統中儲能容量價值，但考量未來大量再生能源併入系統中，故再生能源的不確定性將大為影響儲能發電型態，因此儲能的容量價值也將受到影響，因此將再生能源不確定性納入等效承載法將會是相當關鍵，我們接下來嘗試將其不確定性整合定性及定量推估儲能容量價值。

(二)不確定性分析

未來台灣電力系統中將有大量太陽光電及離岸風力，但目前各類再生能源歷史發電出力資料有限，而且離岸風電出力更是無時無刻都在變化，是台灣所有再生能源中最為不確定性，因此嘗試用人工智慧方法產生大量各種離岸風力發電出力小時資料，也嘗試產生大量各種太陽光電發電小時資料，但是在人工智慧模型中這兩者之間並無任何相關性。

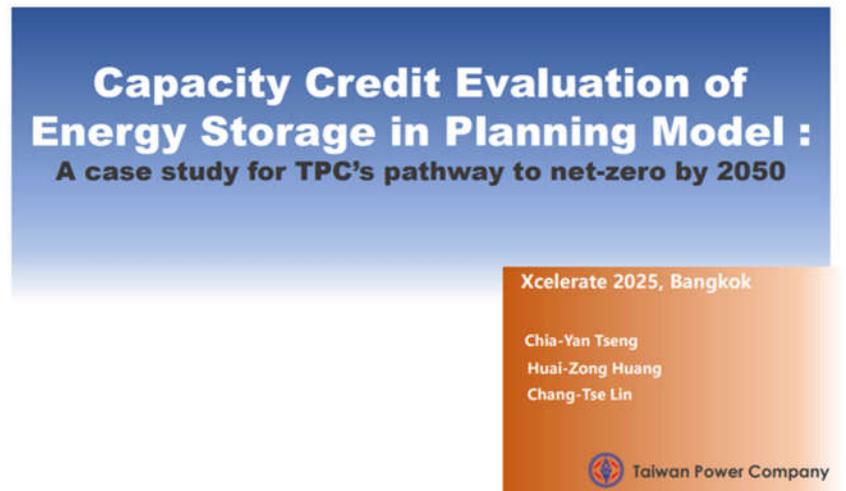
(三)系統可靠度分析

由於考量納入各種不確定性的再生能源發電出力資料，我們捨棄原有一直使用以機組故障率為基礎去評估系統可靠度方法⁵⁶，改用蒙地卡羅模擬方法⁷⁸評估系統可靠度，因此上述等效承載法(ELCC)必須建立在蒙地卡羅方法上，可預見需要處理大量資料及大量運算資源。

(四)等效承載法(ELCC)

- 1.首先簡化蒙地卡羅模擬中的設定，第一步假設固定系統 2050 年 8760 小時負載，第二步將儲能固定設定為可發電 6 小時的能量，模擬引入人工智慧方法產生的 1,000 種以上再生能源出力資料，定義滿足某個缺電機率為閾值，以上設定將為蒙地卡羅模擬方法基礎設定。
- 2.等效承載法(ELCC)則利用上述模擬方法，首先得出滿足缺電機率標準下的最小火力機組容量，在逐步利用某一個容量的儲能置換相同容量火力機組及負載削減概念下，嘗試仍可以滿足缺電機率標準，藉由評估系統中不同容量儲能下的容量價值。
- 3.最後討論其不同容量儲能下對系統容量價值、及減少再生能源發電過剩貢獻、容量因數及回過頭討論不同再生能源發電出力資料下，儲能的容量價值隨上述各量化指標是否有相關性及其統計上是否有其意義。

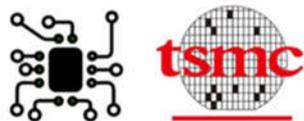
三、簡報介紹



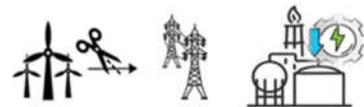
本簡報將報告主要分享在規劃模型下評估儲能系統的容量價值，並以台電公司邁向 2050 淨零路徑為例，並介紹如何利用 PLEXOS 軟體為解決方案來進行評估儲能系統的容量價值。

(一)背景介紹

Background



In Taiwan, the **semiconductor** and **electronics industries** are among the most globally competitive, accounting for over **20%** of the country's electricity consumption. Taipower's primary responsibility is to ensure **stable** and **zero-carbon** electricity supply to these critical industries

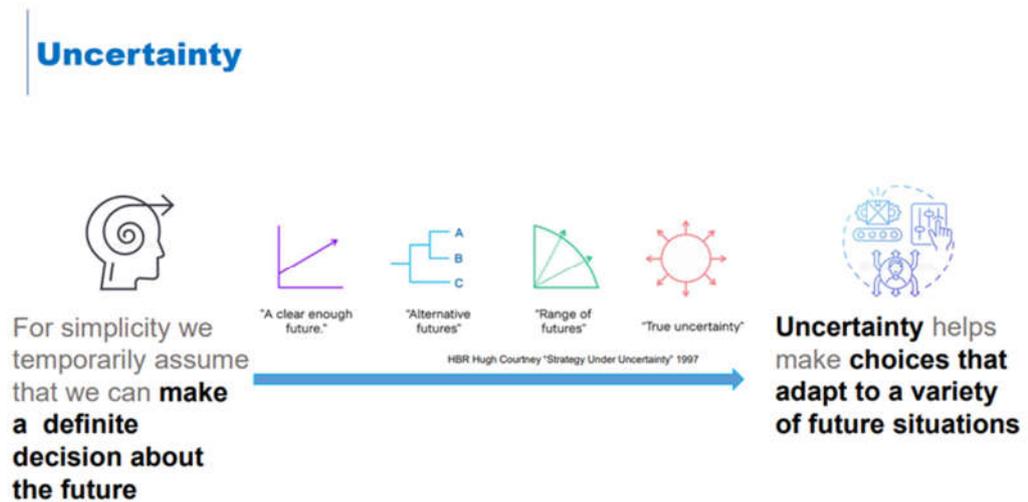


As demand grows and reaches net zero by 2050, Taipower is trying to discover possibility of **energy storage** in the future :

- Overcome **RES curtailment**
- Replace **conventional power plant development**
- Others...

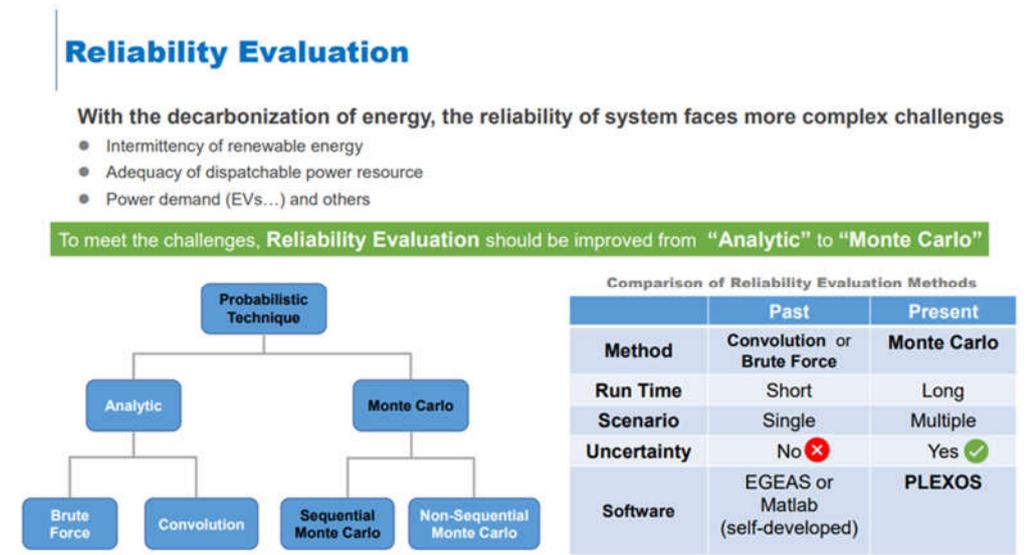
台灣半導體及資通訊產業在全球具有相當競爭力，但幾乎佔據全國百分之二十以上用電需求，而台電公司主要確保這些關鍵產業獲得穩定且無碳的電力供應，隨著 2050 淨零路徑規劃，台電嘗試探索儲能系統在未來系統中的各種角色，包含降低再生能源發電過剩、取代火力機組開發等。

(二)不確定性



不確定性對於規劃來說不再是種恐懼，反而可以幫助我們去作出更好的決定去應付未知的未來，過去簡化未來不確定性幫助我們作出單一明確的決定，例如僅有單一情境下的電源開發方案；我們嘗試模擬單一決定對各種情境影響，現在進一步嘗試加入更多不確定性進入模擬，幫助我們作出可以更能應付未來各種不確定性的方案。

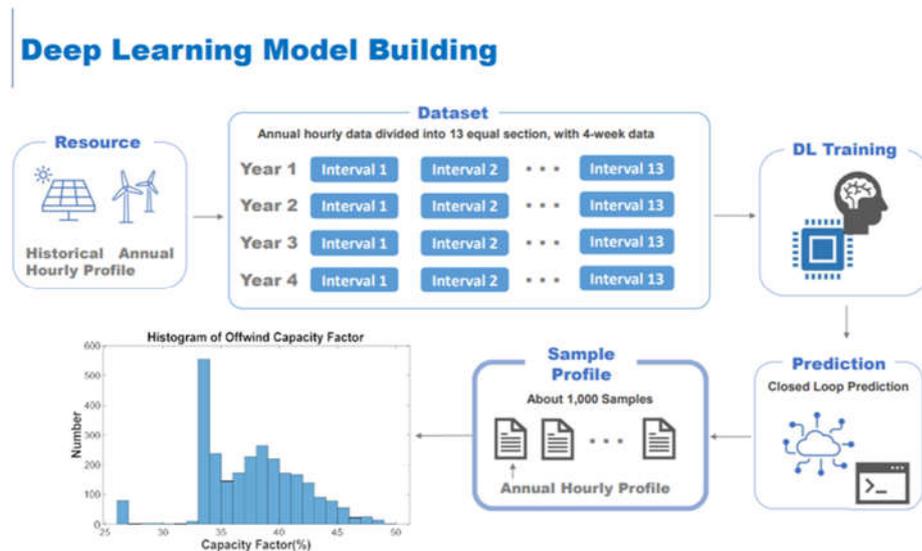
(三)系統可靠度評估



對於台電 2050 淨零路徑上，我們將面對各種挑戰，供需上必須考量再生能源間歇性、負載型態改變(電氣化)及可調度資源充足性等；因此系統可靠度評估

方法必須從過去解析解方法轉變為蒙地卡羅模擬方法，才能將更多不確定性的參數納入模型考量，但是必須需要更多資料及花費更多計算資源，並且需要更多時間確認及解釋模擬結果。目前我們藉由 PLEXOS 軟體執行蒙地卡羅模擬分析，但後續仍需要統計等方法解讀。

(四)深度學習模型



鑒於目前收集再生能源小時歷史發電資料僅有三至五年，為了後續蒙地卡羅分析，需要更大量再生能源小時發電資料，我們嘗試建立一個深度學習模組來進行預測更多資料，以離岸風電歷史資料為例，由於離岸風電資料中顯示主要不同季節發電特性不同，每個月的發電特性也有稍微不同，我們將不同年度的一整年發電資料拆分成 4 周為一個區間，每年度有 13 個區間，不同年度的第一個區間為一個訓練叢集，作為深度學習的訓練資料，訓練出第一個區間的預測模型，依次類推建立 13 個區間的預測模型，進一步預測未來大量可能離岸風電整年小時發電量；我們預測出 1000 個年度的小時發電資料，分析其容量因數製作成直方圖後，發現接近常態分布，並有極端異常值出現，但這些異常值保留下來可以測試及觀察電力系統將如何因應，這就是不確定性的價值。

(五)容量價值評估流程

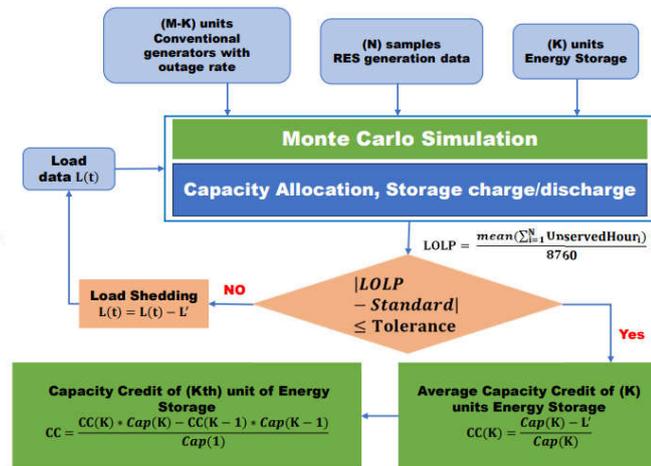
Capacity Credit Evaluation

■ ELCC(Effective Load Carrying Capability)

The method based on **probability** is used to evaluate capacity credit of resources.

■ What changes have we made...

- Uncertainty of wind power
- Uncertainty of PV
- Load Shedding



6

等效承載法主要建立於機率下去評估無法調度電力資源的容量價值或可靠容量，過去等效承載法主要利用解析法(摺積法或暴力法)，我們嘗試改變上述方法的缺點，利用蒙地卡羅模擬方法、加入離岸風力及光電發電的不確定性及負載削減等改變既有等效承載法，進一步評估儲能的容量價值。上述流程為基於蒙地卡羅模擬方法的等效承載法流程，上述方法的機率概念主要就來自再生能源的不確定性。

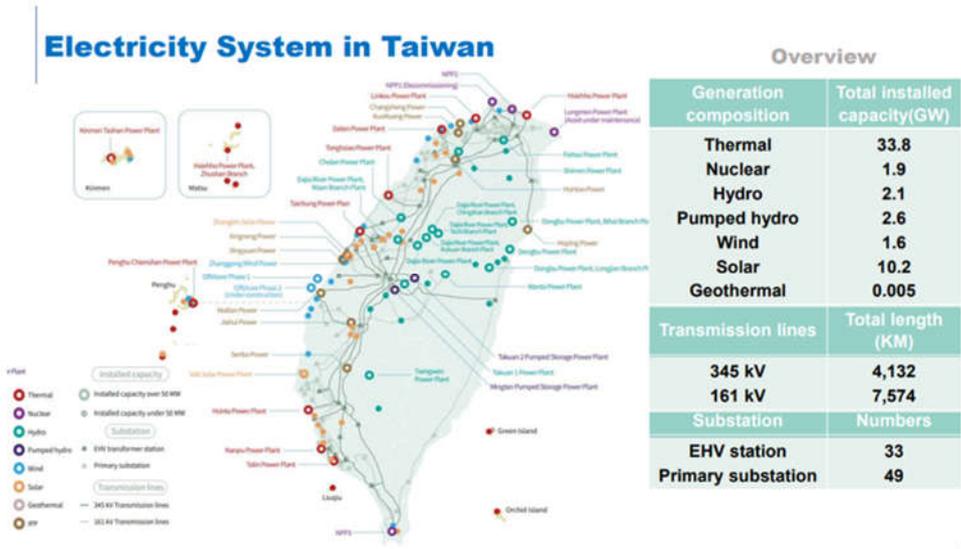
(六)台電公司及系統概況

Taipower Profile

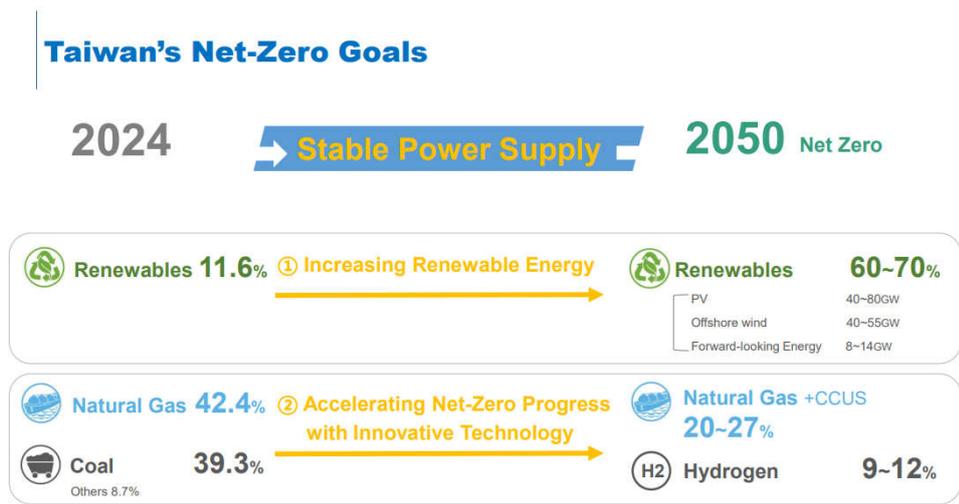
Taipower is a vertically integrated, state-owned enterprise engaged in the **generation, transmission, distribution and sale of electricity**



Founded	May 1, 1946
Capital	NT\$ 480 billion
Stock	96.92% government-owned 3.08% private-owned
Total Assets	NT\$ 2,518 billion
Employees	27,804
Customers	14.96 million



(七)台灣 2050 淨零路徑



從過去到未來，不論甚麼階段，台灣政府訂定任何能源政策，台電公司最重要的任務就是穩定供電下落實政策；台灣政府針對 2050 淨零路徑下，已定下 2050 年再生能源發電占比目標為 60-70%，淨零火力技術發電佔 30-40%。

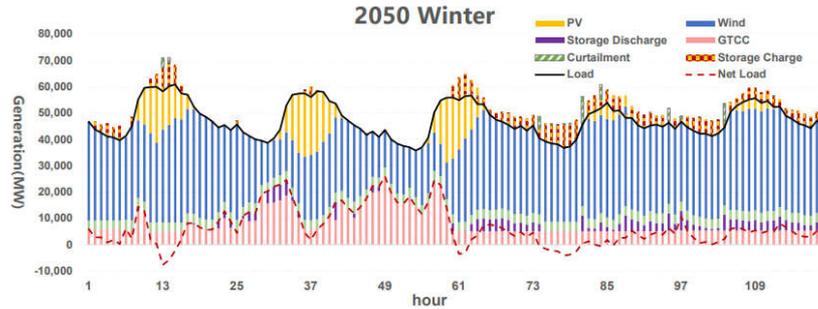
(八)2050 台灣電力供需模擬

2050 Power Supply Simulation

From 2023 to 2024, Taipower tried to explore how to operate power system while achieving the net-zero goal. The following are summarized:

- More conventional power plants but no lands to build them (≈ 60GW)
- Curtailment of RES increase with the share (existing energy storage ≈ 10GW)

Can energy storage solve the above problems....?



在過去 2023-2024 年間，台電嘗試模擬 2050 年電力供需情形，為滿足供電穩定性目標，除了政府規劃的大量再生能源之外，額外需要將近 60GW 傳統火力機組容量，並且規畫系統有 10GW 左右抽蓄及儲能系統，但模擬顯示再生能源有大量過剩情形，因此系統有太多發電過剩及需要大量火力機組，我們嘗試探討系統中增加更多儲能是否能同時解決上述問題？

(九)蒙地卡羅模擬(模擬設定)

Monte Carlo Simulation - PLEXOS Setting



我們嘗試利用蒙地卡羅模擬去評估儲能對系統供電可靠度貢獻，首先模擬設定主要根據在簡報顯示，舉例而言，情境假設年度為 2050 年，太陽光電容量

為 60GW，離岸風電容量為 47.5GW，並且有 1,000 個年度小時發電資料，最重要設定是可靠度目標，設定為缺電機率約為 0.1%，缺電小時數約為 6.4 小時，計算誤差容許為 0.1 小時。

(十)儲能容量價值

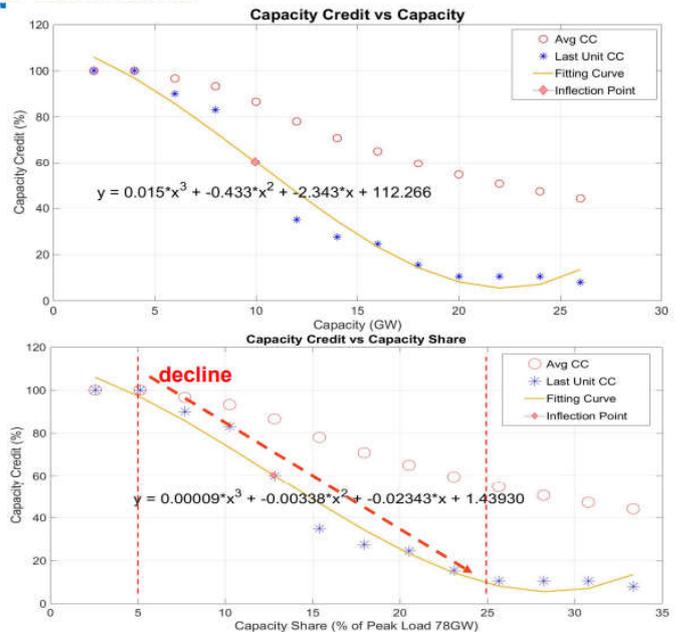
Capacity Credit of Energy Storage

■ CC decline with more penetration of energy storage

- CC quickly drops from 5% to 25% capacity share of peak load
- Why CC oscillates above 25% without converging...? Because the number of sample profile is not sufficient to improve the resolution

■ Curve of CC to Energy storage

The fitting curve will help weigh the investment between GTCC and energy storage in the future



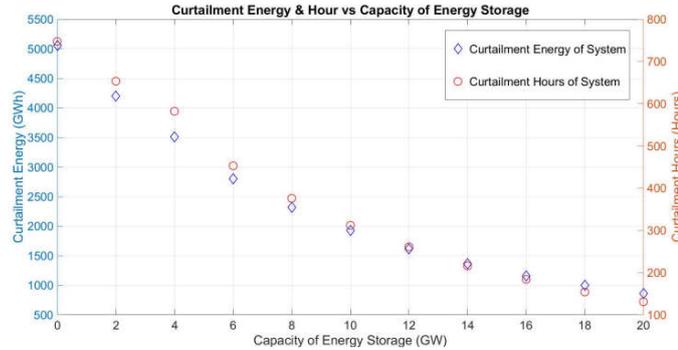
依照蒙地卡羅模擬結合等效承載法分析結果，嘗試將儲能容量價值與系統中儲能容量畫成圖，以及儲能容量價值與系統中儲能容量滲透率畫成圖，圖上紅色圓點為加入系統所有儲能平均容量價值，藍色星點為加入系統最後一個單位儲能的容量價值，由圖上顯示儲能容量價值隨儲能滲透率 5%到 25%增加而下降，當儲能容量滲透率超過 25%之後，其容量價值將會產生震盪，推估可能原因為 1,000 個樣本的再生能源資料仍然不足，最後我們利用一元三次多項式去描述兩者關係，未來這個多項式進一步可以幫助評估興建儲能與火力機組對系統可靠度及經濟比較。

(十一) 再生能源電過剩

Curtailment of RES

Installed capacity of energy storage influence curtailment of renewable energy resources

- Curtailment **drops** quickly with **installed capacity of energy storage increasing from 2GW to 16GW**
- As the **installed capacity of energy storage continues to increase**, the **contribution of energy storage to reducing the curtailment of RES and its capacity credit gradually decreases**



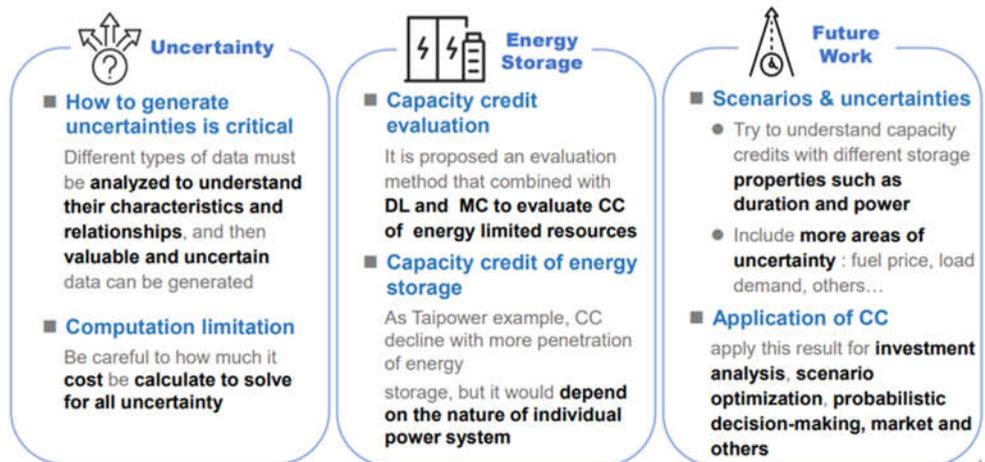
13

將再生能源發電過剩量及發生小時數與系統中儲能裝置容量畫成圖後，可以明顯看見隨著儲能容量在系統中由 2GW 增加 16GW，再生能源發電過剩量及發生小時數大幅度下降，但由此上面兩張圖表可知儲能對於容量價值及降低發電過剩的邊際效應會逐漸下降，推估儲能開發建置將有其控制再生能源過剩量的臨界值。

(十二) 總結

Conclusions

Uncertainty will help make decisions more inclusive



14

首先在總結之前，最重要的結論就是不確定性將有助於做出更具完整包容性

的決定，第一點談到不確定性，在資料有限下，若想要產生更多不確定性資料，必須先分析了解資料特性及關係，才能產生合理的不確定性資料，再來必須考量本身計算資源，在有限資源下做出合理的分析。第二點總結儲能的容量價值，我們提出新方法去評估其容量價值，以台電 2050 淨零為例，儲能容量價值隨儲能容量滲透率而下降，因此可替代火力容量也逐漸下降，但最重要是個獨立系統的特性將影響其容量價值，並非所有系統將有相同現象。第三點闡述未來我們將如何繼續延伸其結果，將持續討論不同持續時間的儲能或增加更多的不確定性，最後是如何去將上述研究延伸其應用，例如投資分析評估、情境優化及概率化決定等。

四、回饋心得及後續工作

(一)研討會第一天完成簡報後，研討會後續三天跟其他單位人員討論許多問題，主要分成不確性資料及儲能容量價值，例如何利用深度學習去產生虛擬資料，是否有跟實績資料比較?如何保證資料品質?儲能容量價值是否跟建置成本或市場稀缺性等有關係?從上述討論又可以延伸出未來可能不同面向觀察儲能價值。



簡報情形

(二)經過這次演講跟討論後，對於後續工作主要分成三部分：

- 1.第一部分包含是否可以改進深度學習預測模型或找尋其他預測模型，尤其改善太陽光電發電預測時間偏移，並檢視不同模型預測差異。
- 2.第二部分是嘗試探討不同持續時間儲能的容量價值、分析減少再生能源發電過剩及容量價值的關係，討論利用蒙地卡羅模擬方法的收斂條件及缺電時數統計分析。
- 3.最後部分探討在蒙地卡羅模擬方法下的缺電機率是否合適評估系統可靠度，在上述方法下是否可以額外找出合適量化系統韌性對抗外在不確定性等指標。

伍、心得及建議

本次出國演講充滿挑戰性，由於這次演講題目已經在規劃中很久，一直沒有實際去執行分析，但藉由這次演講的機會，將很多想法納入討論，透過團隊合作從規劃、預測結果、執行、驗證及解釋，這次寶貴經驗也培養團隊短時間完成專案基本能力。

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，另外也開始使用各種新的技術或方法(如蒙地卡羅)，以更好的因應現今的電力系統狀況及預估未來可能遭遇到之問題。

作為 PLEXOS 軟體的使用者，我們已累積七年的經驗，在此期間我們運用此軟體處理了諸多複雜性問題，同時也面臨並克服了建模過程中的各項挑戰。透過持續與原廠技術支援部門及國內外使用者的交流，我們不僅提升了技術問題的解決能力，更深化了對此分析工具的專業掌握度，確保能為各種專案提供更精準的解決方案。

在參與研討會期間，有幸能與來自亞洲各國（如：日本、新加坡、馬來西亞、菲律賓、泰國、印度等）的專業用戶進行深入交流和討論，通過這寶貴的互動機會，我們共同探討了各國在其獨特的電力系統環境下所遇到的各種挑戰。儘管每個國家的具體情況不盡相同，但都面臨著類似的系統穩定性、效率提升和永續發展等議題。這些挑戰雖然在短期內難以完全解決，但透過這樣的國際交流平台，我們能夠分享經驗、集思廣益，為未來的解決方案奠定重要基礎。

最後，總結本次研討會的重要收穫，特別是來自澳洲 UUC 大學的 Dr. Paul Deane 教授所做的精彩演講，結合他的專業見解以及我在實際工作中 PLEXOS 使用經驗，以下是對軟體應用的心得分享：

一、在思考未來之前，了解現在...和過去是至關重要的。(Before thinking about the future, it is critical to understand the present...and the past.)

我們無法完全準確預測未來，這是不爭的事實，但我們可以掌握塑造未來的關鍵因素，透過分析歷史軌跡和現況，深入了解過去事件的來龍去脈及現況

形成的根本原因，尤其在再生能源佔比持續增加的電力系統中更為重要，因為我們很難完全預測未來再生能源的發電情況，因此只能盡可能統計過去的歷史發電資料，作為未來電力規劃的參考，從而降低意外事件的發生。

二、數值優化技術往往反映的是「我們希望生活在此世界」，而不是「我們真實生活的世界」。(Numerical Optimization techniques will often reflect the world we wished we lived in rather than the world we do live in.)

最佳化結果雖然以成本最小化為基礎，但運算結果往往導致機組呈現極限運轉的現象，如某些機組會在特定時段滿載運轉，而在其他時段完全停止發電。然而，實務上發電機組運轉不能單純考慮成本最小化，還需要評估風險因素和實際操作需求，如大型火力機組無法隨時啟動或停機，模型中必須設定每日啟動次數的上限，以符合實際運轉情況。因此，如何讓最佳化結果更貼近實際電力系統的運轉狀況，是一項重要的挑戰。

陸、參考資料

1. Andrew D. M. , Pía Rodriguez, 2020, Energy 210, “A simple and fast algorithm for estimating the capacity credit of solar and storage”
2. Keith Parks, 2019, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 34, NO. 6, “Declining Capacity Credit for Energy Storage and Demand Response With Increased Penetration”
3. Tim Mertens, Kenneth Bruninx, Jan Duerinck, Erik Delarue, 2021, Electric Power Systems Research 194, “Capacity credit of storage in long-term planning models and capacity markets”
4. Lei Wen, Qianqian Song, 2023, Energy 263, “ELCC-based capacity value estimation of combined wind - storage system using IPSO algorithm”
5. Ali Asheibi, Salem Shuaib, 2015, 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference, “Generation system reliability evaluation based on convolution algorithm and data modeling
6. R.N. Allan, et al. 1981, IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL. R-30, NO. 5, “Generation system reliability evaluation based on convolution algorithm and data modeling”
7. A.M. Abd-el-Motaleb, S.K. Bekdach, 2016, Int J Elect Power Energy Syst, 82 (1), pp. 179-188 , “Optimal sizing of distributed generation considering uncertainties in a hybrid power system”
8. S. Wang, X. Zhang, L. Liu, 2016, Int J Elect Power Energy Syst, 76 (1), pp. 44-52, “Multiple stochastic correlations modeling for microgrid reliability and economic evaluation using pair-copula function”