



# 新加坡能源 2050 委員會報告

計畫名稱：「國家總體能源政策發展規劃及決策支援能量建構」(2/2)

計畫主持人：王穎達

計畫研究人員／作者：施沛宏

產出日期：中華民國 111 年 10 月 18 日



## 目 錄

一、前言.....	3
二、新加坡電力部門趨勢分析.....	4
三、新加坡 2050 能源情境分析.....	8
四、策略建議與總體規劃範例.....	10
五、結語.....	13



## 中文摘要

新加坡能源市場管理局(EMA)委託能源 2050 委員會研提新加坡未來能源系統規劃。該委員會由公部門與民間專家所組成，其於 3/22 發布一份報告，就新加坡電力部門如何去碳與能源轉型帶來的經濟機會提出調查結果與建議。調查報告結論為，新加坡電力部門欲在 2050 達成淨零排放是可行的，但受到地緣政治與技術進步等不確定因素，過程將充滿挑戰。

關鍵字：新加坡、電力部門、淨零排放

## 英文摘要(Abstract)

The Energy 2050 Committee was commissioned by the EMA to guide the planning of Singapore's future energy system. The Committee, comprising experts from the private and public sectors, released a report with its findings and recommendations on how Singapore can decarbonise the power sector and capture the economic opportunities arising from the energy transition. The report concluded that it is realistic for Singapore's power sector to aspire to achieve net-zero emissions by 2050. The Committee acknowledged that the energy transition will be challenging due to uncertainties such as geopolitical trends and technological advancements.



## 一、前言

新加坡受限於其國土與資源稟賦，再生能源發展潛力有限，在減少碳排放上相對其他國家更具挑戰性，儘管如此，新加坡於 2022 年預算案的報告中，提到新加坡正逐步達成 2030 年目標：2030 年排放密集度(Emission Intensity, EI)較 2005 年水準降低 36%，且於 2030 年達到 65 Mt CO<sub>2</sub>e 的排放峰值，並在本世紀中葉左右實現淨零排放。

新加坡電力部門目前約占其總排放量的 40%，預期經濟持續成長之趨勢，預期至 2050 年，電力需求將持續上升。此外，有鑑於各行各業積極追求數位化，以及交通與工業部門的電氣化趨勢，預計將進一步增加電力部門的排放量與占比，若新加坡要達成承諾的排放目標，電力部門的去碳化勢在必行。有鑑於電力部門去碳化的重要性，新加坡能源市場管理局(Energy Market Authority, EMA)委託能源 2050 委員會(Energy 2050 Committee)研提新加坡未來能源系統規劃，該委員會由公部門與民間的專家所組成，其於 3/22 發布一份報告，報告中對新加坡能源系統之願景如圖 1 所示。委員會也就新加坡電力部門如何去碳與能源轉型帶來的經濟機會提出調查結果與建議。

該報告結論為，新加坡電力部門欲在 2050 達成淨零排放是可行的，為實現此目標，在整個電力產業價值鏈須加強去碳力度。然委員會也提到，受到地緣政治與技術進步等不確定因素，過程將充滿挑戰。以下針對報告內容進行整理摘述。



圖 1、能源 2050 委員會對新加坡能源系統之願景[1]

## 二、新加坡電力部門趨勢分析

### (一)需求趨勢：預計 2022-2032 電力需求年均成長 2.8%-3.2%

新加坡電力需求自 2009 年的 420 億度增加至 2020 年的 530 億度，其年均複合成長率(Compound Annual Growth Rate, CAGR)為 2.2%；同一期間，電力系統尖峰需求也從 6,041 MW 增加到 7,376 MW。在未來十年 (2022-2032 年)內，預期電力需求與電力系統尖峰需求年均成長率落在 2.8% 到 3.2%間。

能源密集的工業活動，如先進製程、能源、化學，仍可能持續在新加坡經濟上扮演重要的角色，同時也顯著增加電力需求量。而一些新興的產業也將擴大推升電力需求成長，如物聯網(Internet of Things, IoT)和 5G 無線技術等數位化趨勢，將可能增加更先進的通訊基礎設施與設備部署。此外，陸路運輸和部分工業部門將電氣化做為其去碳策略，雖然電氣化可透過提升能源效率來降低整體碳排放量，但這仍會進一步的推升電力需求。

為了平衡電力需求之增長，未來可能透過採用新技術、設計改良及行為改變等做法，來進一步提升能源效率並降低能源密集度，例如在建築部門上，採用超低能耗建築(Super Low Energy Buildings)標準可有效降低建築整體能耗，而隨著時間的推進，預期未來將廣泛採用此標準。

## (二)供給趨勢

為實現 2050 年淨零排放，新加坡電力供應結構須在未來幾十年內朝向「天然氣」、「太陽能」、「區域電網與電力進口」、以及「新興低碳替代方案」的”4 個轉換(four switches)”方向發展。

### 1. 燃氣發電將發展 CCUS，開發新型高效與燃氫機組

當許多先進經濟體正將天然氣取代其他更具污染性的燃料當作其轉型的一環，然天然氣現今已經是新加坡發電主要燃料(占整體發電量 95%)，燃氣渦輪機廠商將持續開發更具效率的燃氣發電機型，並開發可使用氫氣的燃氣渦輪機。長期來說，碳捕獲、利用、封存(CCUS)技術有助於削減複雜循環燃氣機組的碳足跡，若技術持續成熟具可行性，將使得天然氣在淨零電力部門上扮演重要的角色。

### 2. 太陽能 2050 年潛力裝置容量達 8.6 GW

太陽能發電為目前新加坡最具發展可行性的再生能源，根據新加坡太陽能研究所(Solar Energy Research Institute of Singapore, SERIS)估計，在最大限度的利用土地和空間，以及考量各項權衡取捨，新加坡 2050 年太陽能技術潛力高達 8.6 GWp。然而，即使新加坡建置了 8.6GWp 的太陽能，預

計也僅占 2050 年電力需求的 10%左右。

### 3.發展跨國交易的區域電網與進口潔淨電力

區域電網與電力進口可使新加坡透過國外進口潔淨能源，以克服其土地限制，這也有助於確保在開發長期低碳替代方案的同時，滿足持續成長的電力需求。東南亞國家協會(Association of Southeast Asian Nations, ASEAN)國家近來對探索電力交易的議題漸感興趣，新加坡、馬來西亞與印尼亦在既有共同的支援協議基礎下，針對探討電力進口之可行性啟動了相關技術研究。區域電網的建立，需要市場、監管和技術規則的協調，以確保商業可行性，此外，海底傳輸電纜等基礎設施之成本，也需要長期協議來進行分攤。

### 4.新興低碳替代方案短期發展氫能，長期可能考慮地熱、生質甲烷、核能

長期而言，新加坡電力部門欲達成完全去碳，新興低碳替代方案之發展是相當重要的，其中氫能為具前景的選項，目前全球已有 17 個國家公布低碳氫能策略，超過 20 個國家宣布正在努力制定其氫能策略。然低碳氫進口的成本預測差異相當大，主要取決於為電解製程和電解槽提供電力的再生能源成本(綠氫)、天然氣與 CCUS 成本(藍氫)、以及運輸費用。有鑑於近年太陽能與風力發電技術成本之下降，未來 15-20 年氫能發展有望遵循相似的模式，使其具有成本競爭力。

從長遠來看，當有其他低碳解決方案在技術上更加成熟且具經濟可行性時，就應該考量放入燃料組合：

#### (1)地熱

由於地質條件限制，傳統熱液型地熱系統不適用於新加坡，然下一世代的水力壓裂法或封閉式迴路法未來有機會在新加坡進行部署，這些技術雖已在一些國家進行試點，但仍處於早期開發階段。



## (2)生質甲烷

若做為燃料使用，生質甲烷(Biomethane)與天然氣相似度極高，可以相同方式進行運輸與使用，可繼續使用新加坡既有的天然氣基礎設施。估計至 2040 年，全球生質甲烷生產潛力將超過 1 億噸油當量，平均生產成本將低於 15 美元/MBtu(對比目前新加坡液化天然氣再氣化成本約為 13 美元/MBtu)。

## (3)核能

目前國際上正在開發與測試的新型核能電廠，可能較目前全球既有運作的核能電廠來的安全，若該技術具可行性，將可提供新加坡可擴展且零碳的基載電力來源。

## (三)電網趨勢：結合數位科技與分散式控制，賦予電網彈性

未來能源系統的變化，伴隨著先進數位化工具與感測設備成本的下降，將可能改變電網的設計與管理方式。電網通常包含輸、配網路，而隨著太陽能發電系統、儲能系統與電動車的增加，將提升配電層面的不確定性，也驅使分散式控制的需求增加，也由於系統將變的日漸複雜，輸電系統營運商(Transmission System Operator, TSO)將難以追蹤與處理，若仍由單一輸電系統營運商集中式管理，可能導致高成本與對效率的妥協。

儲能系統做為一個快速反應與高靈活性的資源，在能源轉型上被賦予高度的期待，儲能系統可透過調節頻率，整合變動性再生能源到電網，或是在高系統需求期間，提供備用電力增加需求靈活性。其中鋰離子(Li-ion)儲能系統逐漸具經濟可行性，預計在 2030 年成本將近乎減半，將可能成為電網服務上相對具高效率的主導技術。而新加坡亦持續在探索其他形式的儲能技術，如液流電池(flow batteries)與液態空氣(liquid air)儲能，以做為新加坡具成本效益的長期儲能選項。

虛擬電廠(Virtual Power Plant, VPP)與微電網控制等數位解決方案，可整合分散式能源(如屋頂型太陽光電系統)並結合 AI (Artificial Intelligence)



與 ML (Machine Learning) 技術，以智慧與高效率方式進行管理協調。而其他數位解決方案，如數位孿生(digital twins)技術，可將現實世界的物體資產資訊近乎完整的反映在虛擬世界，以利於在實際實施或操作前，進行建模與模擬分析，提升電網規劃人員與營運商工作成效。長遠來看，智慧的結合分散式控制與電網可有助於改變目前電網架構，從而實現較現今系統更好的彈性與優化。

### 三、新加坡 2050 能源情境分析

有鑑於前述的趨勢分析，以及國際趨勢與技術發展的不確定性，委員會認為在 2050 年實現淨零排放的路徑不會只有一個。因此，委員會根據各種不確定性的趨勢發展，設計了一系列的情境來描述新加坡 2050 達成淨零排放的幾種可能性。委員會也依據不同情境結果與界定其關鍵節點，做為制定推薦策略的基礎，以因應各種不確定性，進而使新加坡能盡快實現淨零排放的預期成果。以下說明各項情境。

#### (一)潔淨能源復興(Clean Energy Renaissance)情境

至 2050 年，新加坡電力供給組合上具多樣性，其中電力進口與低碳氫為主要的兩個貢獻項目，占總電力需求的 40%。透過各式各樣的進口來源與本土的發電備用能力，電力進口為新加坡安全且可負擔的供給選項，而當低碳氫逐漸具成本競爭力，亦將擴大低碳氫的規模。地熱與太陽能將會是其國內再生能源的主力，約占供給組合的五分之一；碳權(Carbon Credit)可使用但未使用，因為在此情境下，新加坡首要任務為發展潔淨能源。

在分散式能源激增的情況下，新加坡有領先的智慧電網能力去維持系統穩定與可靠性。該電網使用由多個模型組成的分散能源管理系統，管理不同區域的分散式能源，這使得新加坡有可能藉由先進的感測器與通訊設備蒐集到細緻的資料，藉由智慧技術，如 AI 與 ML 技術，電網掌握分散式電源的靈活性，並最適化他們在不同區域的使用，以優化整體電網能量與成本。

電力需求成長被積極管理，且動態的需求趨勢也呈現平滑趨勢，使得電網規劃與營運更有效率。此外，大部分的終端使用者可自給自足，並藉由先進的能源與數位科技，如儲能系統、AI 與 V2G (Vehicle-to-Grid)，根據電力系統狀況，主動管理自身能源使用。

## **(二)氣候行動團體(Climate Action Bloc)情境**

在此情境下，2050 年新加坡將近 60% 的電力供給來自電力進口，藉由更廣泛的區域電網和交易平台，共同發展以滿足整個區域的電力需求，相較於單純雙邊進口，這為該地區提供了更佳的能源安全性，也創造了經濟效益。而基於成本考量，低碳氫占新加坡供給組合相較小的 10%，新加坡仍持續使用少量天然氣去滿足與維持需求，並使用碳權抵銷其產生的碳排放。

雖然需要去平衡與處理大量的分散式能源，然新加坡電網仍為最可靠與最具韌性的電網之一。透過數位孿生與其他模擬評估模型使電網規劃與電網資產最適化更為健全，這些最適化措施協助降低發展備用容量的成本，以因應供需的不確定性。

大型終端使用者普遍使用微型電網去提升系統韌性以節省成本或產生效益，隨著微型電網的優化，在一些案例中，微型電網可充分自給自足，不需要依靠電廠電網的支援，進而節省了整體電網系統的成本。

## **(三)新興技術先驅(Emergent Technology Trailblazer)情境**

到 2050 年，低碳氫占其電力供給組合的一半以上，取代了天然氣成為新加坡發電的主要燃料。由於全球部署增加與規模經濟效應，使得氫氣的成本持續下降。電力進口在電力組合上仍有所貢獻，但僅占約 25%，主要是因為區域電網以及再生能源鏈結進度緩慢。另受益於早期的投資基礎，新加坡已開始部署其他低碳替代方案，如核能，使得其供給組合多樣化。

透過 AI 技術的應用，使得電網變的高度智慧化，其針對電力供需可做有效預測，並做出資源配置優化的自主決策，借助 AI，電網端也能針對

分散式能源進行整合與管理，做為虛擬電廠來滿足系統需求。

藉由終端使用者採取有效的能源效率與節能措施，有效的管理與最適化電力需求，工業與商業的大型終端使用者將能源效率視為具商業效益也符合法規的措施，這驅使他們投入數位解決方案，以優化其商業製程；較小的終端使用者可獲得多種能源解決方案與差異化的能源價格，使他們可在永續發展中發揮更積極的作用。

#### 四、策略建議與總體規劃範例

為實現新加坡實現電力部門 2050 淨零排放，顯然其能源佈局需要進行轉型。從上述三個情境，顯然電力進口、氫能、太陽能與儲能系統對新加坡能源系統是相當重要的，而新的低碳替代方案與碳市場也可能扮演重要角色。而能源需求成長的管理以及形塑終端使用者的消費模式等努力，則是可為供給端措施的部署提供更充裕的時間，也可降低電力系統成本。此外，分散式能源的激增與其他難以預期的變化需要藉由數位技術所建構的多層電網，來實現系統的安全與優化，而在情境分析所列出的不同軌跡說明中，也突顯了系統建立靈活性是相當重要的。

在本報告中，委員會也已研提了一套與供給、電網和需求相關的策略建議，策略概述整理如圖 2 所示。這些策略將可大幅度的提高電力部門 2050 達到淨零排放的可能性。除了這些策略外，委員會也建議了能源轉型的兩種總體規劃範例，說明如下。

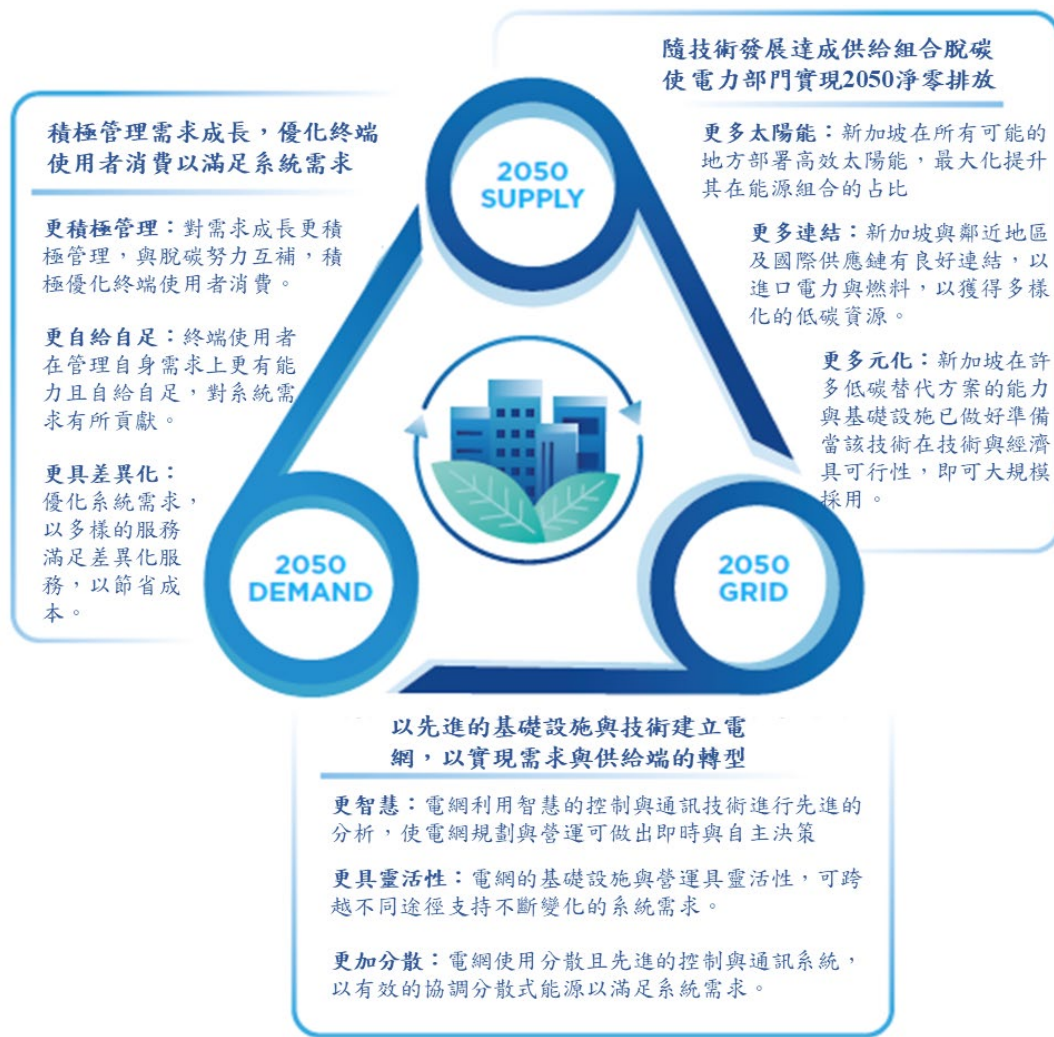


圖 2、委員會策略建議概述整理[1]

## (一)策略建議

### 1.追求採用進口電力，以取得更潔淨、更具成本效益的能源

在短期內，電力進口將成為新加坡電力部門脫碳的關鍵，為了達成長期永續發展，需優先考慮進口再生能源產生之電力，而為確保供應安全，也需要開發區域電網、交易平台以及具成本效益的備用供給選項，建立多元的進口夥伴關係。

### 2.發展低碳氫發電，實現電力部門脫碳化

由中長期來看，氫能(尤其是低碳氫)可能成為新加坡能源組合的重要來源之一，新加坡應制定國家氫能戰略，並與國內外利害關係人合作，建立氫供應鏈與依需求投資氫能基礎設施。





### 3. 最大化太陽光電部署，並搭配儲能系統管理太陽能間歇性問題

雖然太陽能受限於國土條件，難以在新加坡能源組合中提升占比，然而進行創新的設置選項與使用最新的太陽能技術，將有助於擴展新加坡的太陽能潛力。而為解決太陽能的間歇性問題，應擴大儲能系統的建置，除了因應間歇性問題外，也應該開發不同儲能技術，以滿足其他系統需求。

### 4. 提前部署新加坡的新低碳替代方案

有鑑於新加坡在電力部門的脫碳選項有限，應積極觀測新型供給技術的發展，如 CCUS、地熱、生質甲烷、SMR...等技術，並提前建構相關能力，以確保該技術具可行性時可快速導入。

### 5. 利用碳市場解決殘餘與難以減少的碳問題

雖然減量應該是實現電力部門脫碳的主要途徑，然若適合的技術方案無法及時發展，屆時消除殘餘排放的成本將可能太高，因此新加坡應促進談判並發展當地的能力與服務，以支持國際碳市場發展。

### 6. 創造多層電網管理分散式能源的成長，並改善電網可靠度

分散式能源的激增將對電力系統產生新的挑戰，因此電網資源與調控機制除了傳輸層級外，也應擴展到配電層級，故新加坡需開發不同層次的先進控制與通訊系統，並導入實體基礎設之功能強化，以達成對分散式能源的監督與控制目的。

### 7. 利用數位技術強化電網規劃與營運

新加坡應利用先進建模與模擬、AI 與 ML 等數位技術來改善電網的規劃與營運，以提高電網的可靠性和效率。

### 8. 積極管理需求成長，以有效管理低碳方案的推出並保持能源成本可負擔

有必要與主要部門以全面與慎重之方法，積極規劃與預估電力使用，新加坡應優化區域層級的能源需求，也應主動探討其他措施，如價格訊號、綠色標準等，驅動能源效率提升與節約能源。



## 9. 塑造終端用戶消費模式，以優化電力系統靈活性

以智慧管理系統等創新需求端技術，與發掘目前未開發的需量反應潛力，有助於優化供給與電網能量。

## (二) 總體規劃範例

### 1. 建立電力系統靈活性，為新加坡提供不同路徑的更多選項

新加坡在去碳規劃中面臨巨大的不確定性，為使電力系統針對變化能快速反應，各項技術應要可以在最短時間內發展部署，或是可快速轉換到其他燃料使用。

### 2. 利用機會將新加坡定位為永續能源解決方案的技術領先者與生活實驗室

新加坡應利用自身強力的研發系統與能力，投資與新加坡能源需求領域相關的初期技術，以搶佔前期優勢。也應利用自身獨特的密集都市電網型態，讓新加坡成為創新永續能源解決方案的生活實驗室。

## 五、結語

隨著全球因應氣候變遷採取相關措施，未來 30 年的能源格局變化預期是高度動態且難以預估的。而在技術和地緣經濟趨勢充滿不確性的情況下，新加坡將可能走上各種去碳路徑。儘管預期將面臨重重挑戰，委員會在這份報告得出的結論為，新加坡電力部門實現淨零排放在技術上是具可行性的，亦有機會達成 2050 目標。為此，新加坡將需要有效的駕馭不確定性並實施因應策略，以便在每個階段的關鍵節點做好充分準備。

## 參考文獻

- [1] Energy Market Authority (EMA), 2022. Energy 2050 Committee Report - Charting The Energy Transition to 2050.