

本月專題

電業淨零轉型說事

謝智宸¹

摘要

我國於 2022 年 3 月正式公布「2050 淨零排放政策路徑藍圖」，明確訂定至 2050 年淨零之軌跡與行動路徑，並進一步於去(2022)年 12 月 28 日公布 2050 淨零轉型之階段目標及關鍵戰略，除提出 2030 年國家自定貢獻 (NDC) 減排目標為 24%±1% 外，12 項關鍵策略之前 7 項均與電業淨零轉型息息相關，第 12 項之「公正轉型」也包含了電業轉型的供給端與用戶端利害關係人。

電業淨零轉型的實踐主體除了政府等主權組織外，傳統的發、輸、配、售等各類電力業或垂直型的綜合電業，均為不可或缺的利害關係者。此外，由於分散型電力彈性資源的漸次普及，各類科技服務業也應用先進電力技術併同創新的商業模式參與能源轉型相關領域。能源轉型所涉及的議題與範圍極廣，上述傳統電業與現代能源服務業應如何規劃轉型策略至關重要。

一、前言

都說能源轉型是項大工程，原先說好是為了多多利用老天賜給大地無盡的資源以延緩化石能源遲早油盡氣枯的末日。後來，漸漸有科學家發現地球氣候正逐漸暖化，究其原因原來是工業革命以來人類大量燃燒化石能源的結果，當然為了餵飽日益增多的人口，農牧業產生的暖化氣體(GHG)也是因素之一，反正全是因為人類文明需要進化的結果，也是主要的藉口。

於是乎，減少甚至終結化石能源使用逐漸成為全球不得不接受的共識。

減少甚至終結化石能源使用談何容易，明明人類已經習慣了現代生活模式，衣食住行無不依賴化石能源也全都有碳足跡，原來低度發展的國家廣大

¹財團法人台灣綜合研究院 研究員

人口拜全球化(或區域化)及科技發展之賜正準備享受遲來的富裕靜好歲月呢。不容易，甚至是巨大的挑戰，人類原來依賴化石燃料提供的能源服務需求依舊還是文明持續演進之所需，但必須持續減少直至終結化石能源的使用，而取而代之以能源服務的投入，應是不排碳的再生能源及零碳電力。取代的過程就是所謂「能源轉型」，由於再生能源及無碳電力均以電力型式為所用，所以又以「電力轉型」為一說。

「電力轉型」的實踐主體除了政府等主權組織外，傳統的發、輸、配、售等各類電力業或垂直型的綜合電業，均為不可或缺的利害關係者。此外，由於分散型電力彈性資源的漸次普及，各類科技服務業也應用先進電力技術併同創新的商業模式參與能源轉型相關領域。能源轉型所涉及的議題與範圍極廣，上述傳統電業與現代能源服務業應如何規劃轉型策略至關重要。

二、電力轉型之規劃程序

由於電業尤其傳統的發輸配電業屬於資本密集產業且存在遞延性，因此投資規劃必須審慎且具有彈性，淨零轉型目標正值全球政經情勢的動盪，全球化式微導致供應鏈結構的重組，電業轉型規劃也必須滾動式檢討。美國的電業在進行電力系統相關投資前，必須依據未來電力供需的預測結果，評估達到系統供需平衡並滿足可靠度要求的情況下，應該盡其可能採用包括 NWA²方案在內之替代電網實體基礎設施建設，在長期電源開發的「整合資源規劃」(Integrated Resource Planning, IRP)及較短期的「資源妥適性評估規畫」(Resource Adequacy, RA)的利害關係人公聽與監管機構審議過程中，對於上述 NWA 有能力可以參與電力市場的要求愈來愈顯著。2008 年美國聯邦能源管制委員會(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)公布的第 719 號指令開啟了 DR 參與電力市場的濫觴，2011 年第 745 號指令(FERC Order No. 2222)更確立了 DR 等價於實體發電機組的地位；2020 年九月公告的第 2222

² 「非有線替代方案」(Non-wires alternatives)，包括需量反應(DR)、分散型電源 (distributed generation, DG)、能源效率(energy efficiency)、儲能(熱)設備(electricity and thermal storage)、負載管理(load management)以及電價制度的設計(rate design)、電動載具充放電(Electrical vehicle charging and discharging)設施與商業模式等，以上資源皆與節能以及再生能源的應用相關，可謂低碳及零碳電力資源。

號指令(FERC Order No. 2222)，進一步完備包含 DR 之 DER 參與電力市場的必要性及權利。上述觀念與規則、法令之演進，均隨美國各區域電業環境之變化與時俱進甚至超前部署，值得我國參考與借鏡。

1. 清潔能源規劃

傳統發電的燃煤、燃氣、燃油等均屬排碳能源，淨零規劃應包含未來年度再生能源、慣常水力及/或核能發電等潔淨能源的開發，以及轉型中既有火力發電減排技術，如碳捕存、氫氨煤天然氣混燒、及鍋爐和渦輪機之能源效率提升技術等。此外，併網型儲能設備在大量間歇性再生能源電力併網後，對於維持電力可靠度將扮演關鍵的角色。

2. 電力需求端系統規劃

相對於傳統的發輸電系統之大架構規劃，需求端系統包括用戶端的分散型彈性資源(包括表後儲能設備)及配電級的電力傳輸系統將更即時和細緻。透過用戶群參與方案如能源效率、需量反應(虛擬電廠)的開發，積極推動分散型彈性資源的應用，與同時鼓勵及法令推動之運具電氣化及建築物能耗設備電氣化相輔相成。

3. 整合資源規劃(IRP)

即電力資源供需規劃，透過以上中、短期的潔淨發電能源規劃及電力需求端系統規劃，整合電廠、母公司、外部資源之引進與整合，以及政府部門制定的法令制度之配合，編制長期、合理、符合科學基礎的檢視並通過認證的整合資源規劃。

由於再生能源技術的持續進步及成本的逐步下降，又因應日益頻仍與強度益增的極端氣候事件及空氣汙染，世界各國無不積極推廣再生能源及分散型電源的設置。未來將在全球主要國家承諾 2050 年達成溫室氣體淨零排放的前景下，更大規模的再生能源電力將被開發而併網或自用，然由於再生能源尤其太陽光電及風力發電均呈間歇性的特性，在現有各式發電設備追隨大規模負載陡升陡降的因應能力不足、各式儲能技術尚未大規模布建及應用的過渡時期，電網的穩定性與安全遭遇極大的挑戰，眾所周知的「鴨子曲線(duck

curve) 效應及「棄光棄風」、「負電價」等不合常規的電網影響電業經營事件，均為鮮明的例證。為了緩解上述能源轉型過程電網常見的窘境，需求端的彈性資源(flexible resource)所扮演的角色顯得越來越重要，尤其需求端用戶日益成為產消者(prosumer)，彈性資源既是造成電網問題的根源，也是解決電網問題的良方，而電力需求端確有很多電力資源具有彈性的潛力尚待開發。

三、電氣化

能源轉型從減碳以至零排的淨零路徑中，再生能源電力及其他無碳電力逐漸取代化石能源轉變產出之含碳電力，但當前在產業、運輸、住商等部門仍有許多非使用電力的耗能器具例如建築物內的瓦斯爐、瓦斯熱水器及道路行駛中的內燃機引擎燃油車等，故能源轉型即「電氣化」非電能使用器具為淨零路徑最重要的策略，令零排碳的電力可以提供更多樣的能源服務需求，電業在此領域可結合先進能源技術產業加速電氣化，並開拓電力管理的商機。

1. 建築物能源使用電氣化

建築物耗能設備電氣化包括住宅的家電器具電氣化、服務業商用爐具及熱水鍋爐的電氣化等；目前世界先進國家刻正積極發展「電網互動效能建築(GEBs)」概念，在我國都市化且住宅與商辦大樓已成趨勢，在未來分散型能源資源 DERs 漸次普及³，且用電行為改變應為氣候行動之必要責任的認知下，正在轉型中之電業可以將住商部門可以將建築物耗能設備電氣化作為減碳及淨零的推動策略，同時也是值得開拓的商機。

另值得關切的是，建築物內烹煮與熱水用具目前多以天然氣或液化石油氣為主要能源，直接燃燒排放產生二氧化碳等 GHG，故淨零規劃中上述器具電氣化為必然的策略。淨零路徑有否規劃天然氣到戶將於何時開始退場程序？當前新建社區和建築物仍然將天然氣管線列為必要的基礎建設，其折舊成本是否能如常規劃完成攤提？抑或年限未滿即列作擱淺資產(Stranded Asset)而

³ 5月29日立法院通過再生能源發展條例部分條文修正案，未來新建、增建或改建建築物，除了有受光條件不足或其他可免除情形外，應在屋頂設置一定容量的太陽能板

為損失？作為利害關係者之油氣企業及管線業者應需要明確的轉型路徑與時程規劃作為投資與轉型的決策依據。

2. 交通運具電氣化

交通運具的電氣化已是全球主要國家淨零的首要政策，紛紛訂立全電動車市場銷售目標年，由於 EV 充電需求的大幅增加，電業得以提升售電營收，此外，電動車的電池被喻為裝上輪子的儲能設備，而在能源轉型的過程中由於大量間歇性再生能源電力併入電網，除造成電力可靠度(reliability)問題外也成為各國推動再生能源常遭遇的瓶頸，強化電網建設與電力需求面管理遂成為關鍵的解決與過渡方案，而儲能技術/設備不僅在電網端可以提供維持電力品質的輔助服務(Ancillary service)，也可以在電網端和需求端提供蓄用電彈性(flexibility)以調節電網電力的供需平衡及提升系統容量的充裕性，故電業在運具的電氣化政策上可扮演重要角色。

EV 的推廣亦與充電基礎設施完備與否息息相關，由於建築物內充電樁設置需考量用電安全、消防安全等因素，用電安全由台電訂定指引，須評估用電情形並依 SOP 裝設，消防安全則要求備足防火毯，營建署目前正研擬修正《公寓大廈管理條例》⁴，兼顧安全與住戶充電需求而完備充電樁設置之安全法規，以減少管委會及住戶疑慮，進而排除建築物內充電樁的設置障礙。

3. 電氣化對轉型規劃的影響

由於建築物能耗設備電氣化及交通運具的電氣化，是未來電業從事電力短、中長期負載預測中唯二用電成長的重要因子，其電氣化的進程與電力需求成長息息相關，並將反饋於電力轉型路徑、策略、技術、市場與法規制度的設計，甚至電業內部的組織與分工亦將受影響。

例如運具電氣化的進程除了將受到充電設備的布建與普及、電網設施的現代化進程影響外，社經層面生活型態的演進，逐漸朝向城市化(Urbanisation)、數位化(Digitalisation)、製造業服務化(Servitisation)、去碳化(Decarbonization)、共享經濟(Sharing economy)發展，交通工程與商業領域持續地顛覆性創新

⁴ https://money.udn.com/money/story/7307/7228459?from=edn_search_result

(disruptive innovation)，整合各種公共載具與共享載具，結合資通訊技術、智慧型運輸系統服務以及客製化交通旅遊物聯網 APP 的設計，城市及城際的交通行動服務(Mobility as a Service, MaaS)已然成為全球旅運服務發展重要商業趨勢與公共政策推動方向，則未來主要國家的個人載具擁有數，及旅運總里程數或許都將相對萎縮，對於未來運具需電量預測或將有顯著的影響。

四、氫經濟

電業在國能源轉型可以扮演的角色也包括氫能的提供者，無論是現行化石能源產生的灰電亦或再生能源業產生的綠電，都可以作為電解槽電力的來源以電解產生氫。從國外發展及應用氫能最積極的國家如德國及南韓等，無論是工業熱能或發電及燃料電池汽車所需的氫氣，基於成本效益的考量其來源依然絕大多數來自於灰氫，在符合當前成本效益的前提下超前部署，先精進及擴大氫能在各領域的應用技術及普及性，以縮短未來綠氫所需規模經濟的預計時程；中、長期循序透過大量資源的投入與其他利害關係人的極積參與，漸次發展綠氫產、運、儲技術及標準，以完成氫經濟的實現。

氫經濟將是未來淨零排碳願景達成時的實踐情境，而綠氫是終極實踐者。然而在實踐的過程，成本與技術因素將使得藍氫成為過渡時期不可或缺的替代技術，而現今已存在的灰氫製程與技術，可以做為過渡至藍氫階段前重要的技術精進試驗場域，讓氫能在綠氫技術尚未臻成熟前，逐步擴大其應用領域諸如氫燃料電池和其他減排不易的工業製程等，促使各項氫能技術研發學習曲線陡升和經濟規模早日達成，以順利銜接綠氫時代的來臨。

「氫能」可視作一項可以引發一連串新經濟活動並創造價值的經濟生態系統，包括氫的生產與運輸和儲存之上、下游垂直產業鏈技術、各項氫基產品橫向應用網(發電、石化、煉鋼、運輸載具、其他商業及住宅能源服務需求等)、安全標準與法規制度，甚至增進其經濟效益的商業模式(business module)等，均係此一生態系統不可或缺的元素，並且有其相互間的關聯性，必須結合政府與民間產、官、學、研、立法者以及各預期利害關係人(stakeholder)集思擘劃發展路徑，鼓勵創新並勇於推動試行或示範計畫，從做中學(learning

by doing)過程中累積經驗，才能逐步達成氫經濟的實現，這也是綠氫對於未來零碳社會的許諾。

五、電業轉型策略規劃程序與實踐

電業在低碳及淨零資源的規劃必須具有一致性，例如儲能設備的引進必須與電網強化同步實施，併網型及表後儲能電池雖各自擔負不同功能使命，然所提供的制度或市場誘因應考量其可轉換的適用性，則類似我國目前因應儲能市場正處快速發展階段，導致 E-dReg 儲能申請量已遠大於目標量而暫停受理的事件⁵應可避免。

此外，電業在規劃減排及淨零策略時，應兼顧策略方案參與者及利害關係人的需求與意見，例如所謂「強韌電網」之技術可行性與可能影響用戶用電行為與習慣而需要調整觀念及相關配合作為等，都需要電業耐心與預期參與之電力服務業及消費者組織、社區意見領袖與關心民眾等，利用面對面說明會及建立網路專屬平台等途徑，充分溝通並蒐集回饋意見，具體回應並持續焦點議題的討論以建立共識與建立互信，而非淪於教條與儀式般單向廣告與宣傳。

電業減排與淨零策略應兼顧轉型公平與正義，轉型過程將產生成本分擔不均的重大議題⁶必須防範與補救。例如電價上漲將造成弱勢社區與群體更加能源貧窮(energy poverty)，能源先進技術與設備的缺乏(例如 EV、RE 及 BESS 等)亦將導致其能源韌性更加弱化，且防範與補救方案的設計與建立也是杜絕減碳與淨零不作為的藉口⁷。此外，如前述建築物供熱器具電氣化之利害關係者，油氣企業及管線業者應需要明確的轉型路徑與時程規劃作為投資與轉型的決策依據，也應屬於轉型正義議題，不僅影響用戶也影響相關產業廠商從業人員的就業內容與經濟收入，必須審慎規劃與因應。

⁵ <https://money.udn.com/money/story/5612/7168815>

⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22001857>

⁷ 不能以電價上漲將影響低收入戶及小商家的生計為藉口，延緩及怠惰能源結構與價格合理化的進程

根據美國知名電業聯合會 SEPA 的研究顯示，綜合現有美國各電業、PUC、ISO/RTO 等企業與組織，對於淨零規劃與實踐相關之先導專案執行檢討，提出初步檢討與建議。

(一)對電力系統的效益

1. 可達成進零排碳目標並兼顧電力可靠度及成本可負擔性。
2. 所有淨零路徑均須包含燃煤發電的退場時程，其他化石能源發電亦必須有顯著的減量路徑與時程。
3. 減碳或淨零路徑的發電容量規劃必須滿足資源充足性 (Resource adequacy, RA) 的要求。例如規劃氫能(綠氫或灰氫)混燒發電，必須確保氫能的來源為可及(成本及來源)；規劃碳補存技術的應用必須確保最終封存處置設施的可及(技術及區位)。
4. 零排碳情境的路徑除必須承擔高昂成本外，亦必須仰賴目前尚未成熟的能源技術未來發展。
5. 電力資源結構的變化可能形成電力韌性的掣肘，例如缺乏需求端的彈性用電資源將限制間歇性再生能源快速的發展。
6. 美國電業可依賴目前現有的技術(主要為各類再生能源及核能)減少 80~90% 碳排，剩餘最後一哩路 10~20% 的減排則必須仰賴儲能技術及需求端需量反應(虛擬電廠)。

(二)減碳成本內部化

能源成本需要「合理化」以反應「真實」及「外部」成本。人類經濟活動所排放之過量溫室氣體造成氣候災難，導致人類全體及其他物種生命與生活的危害，龐大的經濟損失(機會成本)應該計算在所有的碳排上，碳定價的理論及實踐即植基於此。

然而絕大多數國家仍在乎其將影響現行的經濟成長與生活舒適，在政治考量下怠惰於碳定價的實踐或藉故拖延其時程。富裕國家長久享受工業革命

及科技發展的果實，多以碳排為代價並影響全球氣候，更應該積極擔負其所責無旁貸應承擔的責任(fair share)⁸。

六、後記

氣候變遷問題若失控，其結果將造成人類文明浩劫已為普世共識，近年來各國逐漸在減緩行動上摒棄過往的成見，而趨同於一致的減排策略，即大量引用逐年成本陡降的再生能源電力尤其是風力發電(特別是離岸風電)與太陽光電，以及電網現代化(grid modernization)等。以往在以傳統大型火力電廠為主要電源的時代，大電網(bulk grid)的經營與運作在累積百餘年的經驗後顯得相對單純，再生能源電力與傳統電力最大相異之處在於其電力的生產具間歇性及難以預測性，尤其在較小的時間粒度(granularity)上，增加電力供給的不確定性；另一方面，也由於傳統的電力消費者(consumer)藉由上文所提的顛覆性技術力如屋頂型 PV、儲能電池及智慧恆溫器等之導入，由純粹消費者的角色進化成兼具電力供給能力的「產消者」(producer+consumer, prosumer)，也使得電力需求端增加了不確定性，導致電力供給與消費在電網的部分範疇(配電系統)中界線變得模糊，增加電力調度規劃及作業之困難和任務之艱鉅不言可喻。

化石能源產生的電力必須逐步自電網中淘汰，零碳排的再生能源電力須儘快進入電網，科技所造成電力供需型態的多樣性與不確定性，使得電網的可靠度面臨挑戰。然而透過適當的制度調整及提供足夠的市場誘因機制，也可以管理及應用這些彈性資源緩解其所造成的電網不可靠，進一步增加再生能源的發電容量及減碳效果。

如前所述，電力部門的零排碳並非零碳社會的最終結果，而僅是最起碼的要求，也是路徑中最重要的首站。電力轉型道路的崎嶇不僅需依賴科技因應，法規、制度、市場，甚至決策者與消費者的思維與觀念都應隨之調整與改變，方纔可能面對與緩解更多或許更頻繁之如連年夏天全球酷熱所導致野火、乾旱所造成的電力系統癱瘓，並進而往淨零排碳之路邁進。

⁸ <https://www.reuters.com/sustainability/eu-told-slash-greenhouse-gas-emissions-90-95-by-2040-2023-06-14/>

參考文獻

1. Utility_Carbon_Reduction_Strategies_Report_Final, SEPA, Jun 2023
2. Omaha Public Power District. (2022). Energy Portfolio: Pathways to Decarbonization final report.
3. SMUD. (2021). 2030 Zero Carbon Plan.
4. 「WoodMac on Green Hydrogen: It's Going To Happen Faster Than Anyone Expects」, 2021/2/5,
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/woodmac-on-green-hydrogen-its-going-to-happen-faster-than-anyone-expects>
5. The Hydrogen Economy South Korea Market Intelligence Report, January 2021, DIT Seoul, British Embassy Seoul,
<https://www.intralinkgroup.com/Syndication/media/Syndication/Reports/Korean-hydrogen-economy-market-intelligence-report-January-2021.pdf>
6. Duke Energy. (2022). A Proposal for a Cleaner Energy Future and State of North Carolina Utilities Commission. (2022). North Carolina Utilities. Commission Issues Order on Carbon Plan (press release).
7. FERC Order 2222 Implementation: Preparing the Distribution System for DER Participation in Wholesale Markets, Advanced Energy Economy and Grid Lab, 2022,
<https://gridlab.org/wp-content/uploads/2022/01/AEE-GridLab-FERC-O.2222-Campaign-Final-Report.pdf>.
8. Behind-the-Meter Batteries: Innovation Landscape Brief, International Renewable Energy Agency,2019,
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_BTMM_Batteries_2019.pdf.