

本月專題

關於 VPP 虛擬電廠二三事

謝智宸¹

摘要

『虛擬電廠(Virtual Power Plant, VPP)』一詞近來為國人耳熟能詳卻非能詳的概念，2050 年淨零排碳目標及全球能源轉型趨勢不容置疑與遲疑之形勢確立後，VPP 既是轉型的催化劑也將是轉型後能源供需的新常態(new normal)，值得大眾矚目。本文敘事 VPP 概念，說明 VPP 如何運用電力供需彈性資源、VPP 可創造在各方方面面的效益與應反映的成本，及為了補償所付出的成本並鼓勵創造價值所可能發展出的商業模式，回顧國際上先進電業在相關市場與制度建立上累積之經驗與理念足為我國借鏡之處，對文中所提各項議題並嘗試於相關段落提出應革應興制度與措施的建議。

一、前言

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「電力系統與儲能」項目，由於其中「增進系統供電彈性」具體策略擔負能源系統淨零轉型之橋接重任，尤其值得探討。

所謂虛擬電廠，顧名思義即為無傳統發電設備的電廠，無實體發電機、無須燃料也不產生溫室氣體及其他污染性排放物，但可以「提供」電力以滿足依賴電力的服務需求。重點即在於「提供」電力的方式並非傳統的發電機產生電力，而是將既有的電力另作使用時間上的調配，當下節省或暫時不使

¹財團法人台灣綜合研究院 研究員

用電力即等同於額外產生的電力，以提供平衡電力供需缺口的服務，其功能近似於傳統電廠。我國台電公司早期在民國 68 年起陸續推廣的時間電價、季節電價、可停電力電價方案².....等需求面管理措施，均可歸類為我國虛擬電廠的濫觴。

虛擬電廠為可以提供解決不同發電機組特性與成本，在不同負載情境下如何運行的複雜考量的可能路徑之一，為滿足電力供需的調度提供適當的彈性，也是晚近各國電業強調用戶參與³所能提供給用戶端的重要途徑。氣候暖化尚未成為全球關切議題之前，虛擬電廠的避免環境污染(主要為空污)效益，常被引伸為可以減少健康危害成本並且延緩或避免高成本、高污染發電機組與設施的投資；然在當前面臨氣候議題與能源轉型的雙重急迫下，除可以抑低碳排外，亦可以緩解電網壅塞及建設不及的窘境，適度減輕間歇性再生能源發展的壓力⁴，更能凸顯虛擬電廠的重要性。

二、虛擬電廠的重要性

能源轉型一說電力轉型，是傳統電力供給與需求結構因勢利導的改變，由於傳統能源供需結構龐大，轉型過程需要有創新的技術與觀念以緩解衝擊。

(一)電力供需結構的轉型

1.電力供給

傳統發電結構中分為基載、中載和尖載電力；基載電力包括燃煤火力、核能及慣常水力中的川流式水力等，係指可以全天候持續運轉以滿足電網服務用戶基本用電需求⁵的電力；中載電力包括燃氣、燃油⁶火力、慣常水力中的調整池式水力、抽蓄水力等，滿足上述基本用電需求額外之公眾日出而作日落而息的活動所需；尖載電力包括可以快速升載發電的氣渦輪及全黑啟動

² 現已分為計畫性減少用電措施、臨時性減少用電措施、需量競價措施、空調暫停用電措施及緊急應變措施等五類，詳見 <https://www.taipower.com.tw/upload/135/2022021615570940851.pdf>

³ customer engagement，電業提供用戶參與電業經營活動的途徑與機會以提升用戶滿意度

⁴ 緩解太陽光電及風力發電因電網併接容量不足而造成棄光棄風的浪費

⁵ 例如家電中的冰箱、24 小時輪班的製造業及服務業等

⁶ 油價相對便宜時

氣渦輪發電機、抽蓄發電、內燃機(柴油)發電機等，以便在用電尖峰時段⁷可以調度投入以補足用電缺口的電力來源。

由於進 10 年來再生能源技術發展的持續進步及成本的逐步下降，並因應日益頻仍與強度益增的氣候異常事件，及全球承諾 2050 年達成溫室氣體淨零排放的前景下，世界各國無不積極推廣再生能源及分散型電源的設置，不僅當今，未來將有更大規模的再生能源電力被開發併網或自用，同時間亦加速汰役化石能源發電廠。然由於當前已發展成熟之再生能源技術包括太陽光電及風力發電，均呈間歇性的特性，在現有前述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」⁸等不合常規的電網影響電業經營事件，均為鮮明的例證。

未來地熱發電、海洋能發電、小型模組化核能電力(SMR)及甚至已曙光乍現的核融合技術發展成熟後，此皆屬可作為基載電力的低碳排發電技術更將為電力供給面轉型注入新的活水。

2. 電力需求

傳統的電力系統建設植基於供給滿足需求的原則，電力業者根據電網的負載需求特性⁹提供前述基、中、尖載電力，需求端電力消費者基本上有較大的市場主導性。在歐美開始進行電業自由化¹⁰以引進市場競爭機制後，發電業者基於不同特性發電機組運維及燃料成本的反映，開始實施諸如時間電價、季節電價等需求面管理措施，開啟了電力需求必須考量電力供給緊澀與否及其成本的時代。晚近由於 ICT 技術逐步應用於各項用電設備的自動控制，更能有效於配合電業需求面管理所推動之能源效率方案與需量反應措施，且在國外先進國家屋頂型 PV、EV 充電及家用儲能設備、智慧家電的漸次普及下，電力需求型態的轉型正方興未艾。

⁷ 例如我國夏季日間氣溫炎熱，冷氣耗電量激增，基載與中載機組全力發電均不足以應付系統供電需求時

⁸ 由於制度與市場相異，我國並無「負電價」發生之可能

⁹ 由時間橫軸與負載縱軸所構成的二維電力需求曲線

¹⁰ 或「電業解制(deregulation)」

(二) 虛擬電廠的角色

為了緩解前述能源轉型過程電網常見的挑戰，以利加速間歇性再生能源電力的布建，電力需求端的彈性資源(flexible resource)所扮演的角色顯得愈來愈重要，在負載尖峰、電網緊澀時期迅速移轉或減少負載，有助於維持電力品質的穩定；而在有多餘再生能源電力導致負載不足消化和傳統火力機組不及降載時，亦可啟動儲能設備及 EV 充電以儲存電能。在電網建設不及因應再生能源電力大量併網前，虛擬電廠可以扮演維持電網可靠度的積極角色。

國外先進國家電力需求端用戶日益成為產銷者(prosumer)¹¹，持續進化中的電業經驗顯示彈性資源既是造成電網問題的根源¹²，也是解決電網問題的良方¹³。而我國除了製造業與服務業大型用電設備、製程排班、服務模式之彈性由於抑低或轉移負載容量大，業已參與相關節能及需量反應方案外，住宅部門日常生活環境中還有很多電力資源具有彈性的潛力尚待開發，諸如建築物內的智慧家電、電動車充電設施、熱泵熱水器以及國外已開始布建的表後(behind the meter, BTM)儲能設備等。彈性資源在全球能源轉型過程中將扮演極重要的角色，在再生能源和脫碳技術尚未達到完全取代化石能源排碳的過渡時期，除了節約能源與提升能源使用效率至關重要外，應用彈性資源及時緩解電網短期的緊澀狀態亦日益受到重視。

依據當前能源技術發展現況，一般住商電力用戶需求端的彈性資源可以包括五類範疇，第一類即為室內為滿足日常生活所需之照明、空調、熱水器(瓶)、冰箱、爐具、洗衣機等之家電用品；第二類為用戶端的自用發電系統，常為屋頂太陽光電；第三類為用戶端的自備儲能系統¹⁴；第四類是以銷售電力服務為目的的分散性電源；第五類是以銷售電力服務為目的的分散型儲能系統。「淨零路徑」中零排碳的再生能源電力逐漸取代化石能源轉變產出之含碳電力，但建築物內仍有許多非使用電力的耗能器具例如瓦斯爐、瓦斯熱水

¹¹ 產消合一者(Prosumer)，亦稱生產性消費者，在電力領域係指是可以自行生產電力的電力用戶，結合了電力生產者(electricity producer)和電力消費者(Consumer)的角色

¹² 大量未經管理的自用 PV 設備及 EV 充電樁將增加電網供需的不穩定

¹³ 妥善應用需求端彈性資源可以協助電網緩解平衡問題

¹⁴ 做為防災用途或參與如加州 solar+storage 淨電表方案(Net Metering 2.0)等

器等，故將非使用電能的耗能器具電氣化是住宅部門淨零路徑最重要的策略。

此外，因彈性資源多皆屬於分散型態，散佈於不同地點與區域，擁有者與使用者使用習慣多樣，必須要有聚合者(agggregator)整合各項資源才能發揮綜效；由於彈性資源整合的最終目的為提供電網型的必要服務，所以與電網的併聯(grid-integrated)以及可以接受調度(dispatchable)是虛擬電廠技術的基本要求。

三、虛擬電廠的效益

都說虛擬電廠可以為轉型中的電網帶來效益，但經濟效益反映的價值落誰袋中必須釐清才能對利害關係人的參與與投入產生誘因。國際上推動 VPP 發展的主要策略為透過市場及/或制度將 VPP 對於電網及電業轉型可帶來的效益，補償或回饋給參與 VPP 之利害關係人，包括用戶和需量聚合商等。而根據國外相關研究及實際經驗顯示，VPP 可帶來的之效益層面很廣，可從利害關係者之電業、社會整體及用戶等不同面向觀之。

(一)對電力系統的效益

因應再生能源高占比的趨勢會造成電力系統的問題如電力供需失衡、電力品質不穩定等，VPP 結合儲能系統、需量反應、輔助服務市場等策略可使電力系統維持一定的供電穩定。其中電業的效益反映在可提供電力系統的服務，包括擴大抑低尖峰負載效果、維持系統供電可靠性、提供電網所需的輔助服務、減緩新建電廠與輸電線設施的急迫性。

1.擴大抑低尖峰負載效果

當電力系統達尖峰負載時，必須調度高發電成本機組上線¹⁵，但若供電端無法持續供電時，即可能造成限電或分區輪流停電的窘境，甚至發生系統崩潰的危機，造成電業、社會、經濟和產業的損失。此時若啟動 VPP 機制，透過彈性資源的調度以滿足迫切需要用電用戶之電力需求，並對彈性資源提供者予以補償，以完成降低尖峰負載及解除限電危機。

¹⁵ 因此亦將墊高供電成本

2.維持系統供電可靠性

電力系統可靠度通常是以停電事件發生次數及每次持續時間衡量，向來是政府在能源尤其是電力政策的關鍵議題¹⁶，若依電力系統之尖峰負載型態具備次數少、短暫及區域性等特性，則恰好是 VPP 功能之所長，可以提升系統的可靠度。

3.提供輔助服務

除了發電、輸、配電外，為了維持電力系統安全穩定運行，或遭遇事故後可使系統恢復正常狀態以確保電能供應穩定、滿足維持電壓與頻率的要求，電網需要額外的輔助服務(ancillary service)。以往我國此類輔助服務均由綜合電業提供，但由於電業轉型及分散型彈性資源日益普及，輔助服務適合由市場取得，也恰好是 VPP 功能之所長。

(二)對社會整體效益

1.減緩新建電廠與輸電線的壓力

VPP 在短期可維持電力系統可靠度，紓解尖峰供電不足之壓力，長期則可遞延發電計畫之投資；對於區域性過載貢獻上，VPP 可協助緩解因輸電網路系統故障或線路壅塞所造成局部性的電力短缺或停電，短期可紓解區域性供電不足，長期則可遞延輸電計畫之投資。

2.避免環境危害所造成的外部成本

VPP 聚合再生能源、儲能及需量反應等潔淨資源，可以降低 SO_x、NO_x、TPS 等有害環境且危害民眾健康的污染排放。上述減少發電及輸配電設備的建置，除可降低對於環境生態可能造成的影響外，亦可減少及避免土地、海岸等環境資源的浪費。

3.促進產業創新及發展並創造就業

反映 VPP 對於電網轉型可貢獻的價值並形成商業模式後，將可帶動各項致能技術(enabling technology)的創新與發展，除了自用 PV、EV 充電基礎設施、能耗設備電氣化及智慧家電外，更包括系統性的能源管理系統 EMS、電

¹⁶ 在電業解制的市場，則可作為電業監理及市場機制有效與否的指標之一

池儲能管理系統 BESS 等，上下游產業鏈、價值鏈的建立亦將創造高技能的就業機會。

(三)對用戶的效益

降低停電風險且節省電費支出

VPP 可以為電業節省電力設施擴建、增建的成本，雖用戶參與 VPP 亦將增加設備支出及衍生管理所需的成本，在用戶節省及聰明用電的情境下，或將節約電費帳單的支出，且 VPP 增進電力供給可靠度及韌性可以為用戶避免或減少停電損失可能帶來經濟效益的減損。

四、虛擬電廠價值的運作

能源轉型尤其大量間歇性(intermittent)的再生能源電力進入電網，在電網技術尚未獲得強化之際，例如輸電線路尚未擴充至足以容納和去化更多的太陽光電和風力發電、儲能技術及電力市場商業模式尚未發展至足以緩衝電網中間歇性電力和電力需求端日益普及的分散型電力資源(DERs)之供需平衡問題等，需求面管理工具如時間電價(TOU)、需量反應(DR)及能源效率(EE)等，遂成為維持電網穩定可靠尤其攸關電力調度效能之重要管理策略。亦即電網端尤其在配電等級，愈來愈需要開發更多的彈性資源來因應與日俱增的顛覆性技術(disruptive technology)¹⁷或前緣技術¹⁸對於電網穩定與可靠度所造成的影響。

如前所述，彈性資源多皆屬於分散型態，散佈於不同地點與區域，擁有者與使用者使用習慣多樣，需要有聚合者(aggregator)整合各項資源以供電網調度所需。根據國外先進電業發展的模式，聚合者可以透過不同的市場方案創造價值與獲利，並以簽約金(sing-up bonuses)、年度支付(annual payments)及直接回饋(direct rewards)等不同組合方式作為參與用戶誘因。

1.躉售市場(wholesale market)

¹⁷ 電動車充放電樁、自發自用發電設備及儲能裝置等顛覆傳統電力供需預測模式之技術稱之

¹⁸ 「Grid Edge Technology」之術語，中文應可譯作「電網邊緣(或前緣)技術」，意指引導或促成傳統電業環境及其運行轉型的電力技術及營運模式

VPP 可以參與躉售市場常見之容量、電能及輔助服務交易，市場經營者 (market operator) 依據不同的供需條件訂定交易規範作為以反映正確的市場價格訊號。例如近兩年在美國德州、加州等因極端氣候事件所造成電網危機，電力調度中心經由發布不同級數的警戒指令，集結 VPP 參與用戶啟動對應機制以降低不同程度的負載並維持約定的降載持續時間。由於國外電業解制市場常以邊際電價作為各項服務的結清價格，在某些特定情境下，VPP 集結者將因依約善盡義務而獲利豐厚，進而推動與行銷更多用戶的參與，而集結者也獲得創新技術及經營模式的鼓勵，同時解決電力系統經營者 (system operator) 維持電網穩定與可靠的問題。

此外，電力系統經營者也可以因供電區域不同的系統狀態(例如線路壅塞與否)及負載特性(工業為主或住商為主)，訂定因地制宜的採購合約。例如，加州首府沙加緬度市政府公用事業部(Sacramento Municipal Utility District, SMUD)將在今(2023)年啟動一項 VPP 的示範計畫¹⁹，將聚合部分 SMUD 轄區內近千戶住宅型太陽光電儲能系統(solar+storage)，以驗證分散型電力彈性資源對區域電網可靠度、韌性以及去碳化的可能貢獻和可行的商業模式。我國現行「電力交易平台」提供 VPP 以投標競價方式貢獻系統備用電力，依據電力調度中心的調度需求提供約定備用電力以維持電網的穩定。前述我國已經開辦之台電公司「電力交易平台」，由於為因應備轉電力及輔助服務所需而由電力調度處(電網經營者)主辦，可視為躉售市場 VPP 方案的雛型。

2. 零售市場(retail market)

與上述躉售市場方案不同的在於，VPP 參與者的作動來自於電力零售業者的指令，而非直接來自與系統經營者(電力調度業者)。電力零售商通常也是直接的 VPP 集結者，由於最貼近終端用戶，往往較清楚所轄用戶的彈性資源分布與使用狀況，例如自用 PV、EV 充電設備、儲能設備及智慧電表分布情況等，較有利於集結可調配的資源。而電力零售商在參與電力躉售市場電能採購時，可將 VPP 彈性資源所及之需量控制作為擬訂採購策略的優勢，例

¹⁹ <https://reurl.cc/x1bdG5>，SMUD Announces New Residential Virtual Power Plant Initiative

如可以在負載尖峰時段或系統突發緊澀狀況時，減少高價之電能採購需求創造電業與用戶雙贏²⁰。

電力零售商因為集結並調度 VPP 彈性資源，除可以滿足電網業對於資源充足性²¹(Resource adequacy, RA)的要求，也因此延緩甚至迴避電網業者為滿足擴充的負載需求而必須投資固定資產的成本，此將反映在輸配電費用的簡省，進而替用戶減少電費支出。我國台電公司業務處(可視為電力零售業)經年推動之各項時間電價及需量反應方案，應可利用 VPP 模式聚合更多的彈性資源，同時也可以拓展各營業區服務處或相關 ESCO 業者提供專業服務的潛力，結合當今資通訊科技(ICT)之發展及大數據與物聯網(IoT)之運用，使電力之供給與需求更具彈性與效率，並且也可以精進傳統電業的經營模式及開發新的第三方能源服務業的商機。

近年來由於電動車EV的快速發展伴隨電力需求成長與用電型態的變化，導致電網穩定性面臨挑戰，國外先進國家順勢推動載具電網整合策略(Vehicle-grid integration, VGI)，利用電動載具電池具有高度彈性的充放電特性，將電動車用電的需求與電網系統的運行特性整合以創造互利。在住商部門尤其商業大樓及住宅大樓推動能源效率的領域，近年來也因應能源轉型及減碳的趨勢，結合了建築物電能管理與電網整合概念(Building-Grid Intergration, BGI)，也是利用建築物內具多樣的彈性資源，可以集結並透過前述 VPP 的運行模式，希望能夠創造用戶、電業、電網及減排等多贏的效益。VGI 與 BGI 概念仍處於發展與試驗及示範階段，但對於淨零路徑之重的能源轉型而言，皆為必然且必要的趨勢，經濟效益與價值的開發與具誘因的商業模式建立正方興未艾。

五、虛擬電廠發展待克服的議題

虛擬電廠能否發展的關鍵，除了躉售市場及電力零售市場所能提供的誘因外，用戶、利害關係人以及政策制定者的認知。

20 <https://www.cleangroup.org/wp-content/uploads/ConnectedSolutions-An-Assessment-for-Massachusetts.pdf>

21 電力領域的資源充足性是電網在任何時候滿足最終用戶電力需求的能力。RA 是電力系統可靠性的一個組成部分。例如，電網應隨時有足夠的未使用發電容量，以適應設備故障和可變可再生能源的減少

1. 彰顯並量化 VPP 價值

電業解制先進的美國，雖因聯邦能源制規委員會(FERC) 第 2222 指令，責令 ISO、RTO 都必須制定無歧視性地分散型彈性資源可以集結參與電業躉售市場權力的市場規則，各供電區對於彈性資源集結者的限制包括最小集結容量與能量、指令傳達回報以及績效驗證的相關技術、集結的彈性資源之所在位置等要求，各利害關係人²²往往有不同認知而形成推動障礙；躉售市場的競爭者也對於“不勞而獲”的虛擬電廠，因還不信任 VPP 在關鍵時期可以提供承諾而對其之參與懷有敵意。而在電業尚未解制的管制電業環境中，由於缺乏市場價格訊號與競爭機制，更難將 VPP 對於穩定電網的價值以價格彰顯，導致 VPP 發展受到更多不確定性與風險，需要創新的觀念與制度以推動。

由於零售電價多依據服務成本法訂定，因此將資本支出越大的電業設施投資反映在電價結構上，將較並無實體投資的虛擬電廠對電業而言更具誘因。傳統的電源開發計畫以及資源規劃與採購計畫很少將需求面管理納入，亦如如前所述，需求面管理尤其虛擬電廠的實質價值較不易客觀評價。

2. 推動法規、制度與市場的建立

法規與制度的建立至關重要，推動 VPP 發展需要對用戶及政策制定者與立法者教育，使得除了產業之外的消費者與政治人物尤其是民選的民意代表，能夠切確了解虛擬電廠可能帶給消費者(製造業及大型住商用戶)以及整體電業和環境的效益。供電可靠度與電網韌性攸關經濟民生，電網去碳化又是淨零的關鍵，從政治上推動虛擬電廠是直接、有效且必須的方式。由於 VPP 亦將是未來能源轉型後的電力供銷(prosumer)模式與新常態，漸進及普及式的觀念溝通與教育勢必重要，應該超越傳統文宣廣告式的宣導，同時搭配實施先導及示範計畫以使利害關係人演習於實境中。

VPP 相關法規、制度與市場的建立屬於長期且須做中學(learning by doing)外，滾動式檢討精進並保持政策的一致性更攸關成敗。美國能源轉型歷經川

²² VPP 利害關係人包括公用售電業、致能技術開發與提供者、能源服務供應商 EaaS、電動車充電設施與服務提供者 EVSE、消費者權益促進者等

普總統及現任拜登總統，兩者(兩黨)對於氣候及能源政策的觀點大相逕庭²³，也反映在法規、制度及市場規則上的矛盾與扞格，甚至 FERC 主席的任命與權威都受到政治的干預，利害關係人在投資決策及財務規劃上面臨不確定性與風險，對於 VPP 的推動與布建不啻雪上加霜。任何投資都須經由風險評估，虛擬電廠無論供給端及需求端均須大規模軟硬體的投入，意即發展路徑與目標清晰與否、商業模式獲利與否與是否具體、市場機制及政策制度承諾是否足信等，都將是影響 VPP 發展的重要關鍵。

我國雖政治相對穩定，但長期電業管制下電業制度與市場運行尚處萌芽階段，前述能源實體建設方得以反映成本及回收的刻板印象根深蒂固，地方及產業政治生態及利益牽涉能源事務者盤根錯節，而虛擬電廠正是結合顛覆性技術¹⁷之大成，既是「顛覆」，則必然遭遇抗拒與抵禦，政治上更需具有堅定且一致性的信念。

3. 電業制度的深化改革

VPP 的核心為分散型彈性電力資源的集結運用，故電力用戶使用彈性資源²⁴的普及率及配電系統控制系統的建立與應用，是虛擬電廠發展進程中應同步推動的要件²⁵。如前文所述，VPP 在躉售及零售市場的運作模式需要公用電業經營模式進行變革，其績效不應僅是電費收益，電網減碳效益及 VPP 的參與和滲透率是值得設計與重視的績效指標；各項彈性資源經由 ICT 技術與 IoT 環境的跨界面連結，需要智慧電網縝密的規劃與建設及智慧電表的普及布建；普及之用戶端創能與儲能設備欲提供更具效能的電網整合服務，必須提升配電系統在區域性的電力調度能力與主導性；負載管理措施之電價設計，必須將時間電價作空間維度的延伸以提升效率與效能。

台電公司於去(111)年 9 月公布之「強化電網韌性建設計畫」，雖強韌分散型電網，但重點在於強調電網分散、提升設備穩定及阻止停電事故擴散等作為，以降低未來全國性停電事故發生機率及縮小停電影響範圍。建議應另透

²³ 尤其在降低化石能源使用的議題上

²⁴ 如電動車充電、智慧家電、自用太陽能發電、儲能電池、熱泵空調及熱水器等

²⁵ <https://reurl.cc/jRNGqM>

過此一強網計畫，構建符合「非有線替代方案」(Non-wires alternatives, NWAs) 制度或市場所需之電網設施與環境，則可以進一步達成增進電力供需效率，以及加速零碳電力布建和提高整體電網可靠度與韌性之目的。

六、後記

話說今年剛結束的春節連假 10 天，民眾驚悚於有別以往鮮見的警示，台電預測再生能源滲透率(發電量)可能首度超越 3 成²⁶，由於年假期間用電負載相對較低，必須因應和預防電網電壓升高可能造成電器設備的損壞。如果電力用戶有 EV 充電及熱泵熱水器等用電需求，或自備儲能設備等彈性資源，則可以透過本文所述 VPP 的運行機制，在再生能源發電豐沛期間增加用電及儲電，可以增加電網調度的彈性並有效維持電力品質及供電可靠度。

一如虛擬世界(一說「元宇宙」)中的虛擬實境(virtual reality)、虛擬貨幣(cryptocurrency)等概念，迄今尚未普遍為世人所認知並實踐於實體世界中，虛擬電廠的概念也正值萌芽發展階段，然其攸關淨零路徑中能源轉型的順遂及成本效益，必須由淺入深引進技術、制度及商業模式，逐步落實於轉型進程的各階段，成為氣候行動中行為改變的重要推手。

²⁶ 由於我國法令規定綠電先行，電網平衡供需負載多藉由火力發電容量的控制，故綠電占比在需電量較少的情境即相對較高

參考文獻

1. ConnectedSolutions: A Program Assessment for Massachusetts, Applied Economics Clinic on behalf of Clean Energy Group, 2021
2. “East Bay Customers Support California’s Grid During Extreme Heat Wave Through Innovative Program,”Sunrun, September 20, 2022
<https://investors.sunrun.com/news-events/press-releases/detail/271/east-bay-customers-support-californias-grid-during-extreme>
3. Miranda Willson, “Northeast Embraces a First-of-a-Kind Virtual Power Plant,” E&E News, October 12,2022,
<https://www.eenews.net/articles/northeast-embraces-first-of-a-kind-virtual-power-plant/>
4. “South Australia’s Virtual Power Plant,” Government of South Australia, accessed August 2022,
<https://www.energymining.sa.gov.au/consumers/solar-and-batteries/south-australias-virtual-powerplant>.
5. Ryan Hledik et al., The National Potential for Load Flexibility: Value and Market Potential through 2030,The Brattle Group, 2019,
https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2021/05/16639_national_potential_for_load_flexibility_-_final.pdf.
6. Jigar Shah, “Real Barriers to Virtual Power Plants,” PV Magazine, September 22, 2022,
<https://pvmagazine-usa.com/2022/09/22/real-barriers-to-virtual-power-plants/>.
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_BT_M_Batteries_2019.pdf.
9. 台電公司「10 年投 5645 億-台電公布強化電網韌性建設計畫,杜絕大規模停電事故再發生」新聞稿, 2022.9.15
10. 謝智宸,「智慧電網下我國電力負載管理制度」,中華民國能源經濟學會學術論文, 民 99。