

強化臺灣的電力系統韌性

胡均立*

一、在不完美的世界中更需要韌性

現實世界是不完美的，需要因應，也有改善的可能，而因應與改善都需要付出各式各樣的成本。現實世界中有著各式各樣可能的內外干擾，一旦發生，將或多或少影響電力系統的正常運作。這些干擾可能是人為的、也可能是自然因素造成的。而人為的干擾來自於故意或非故意，故意的干擾包含動手破壞到戰爭等。自然因素包含材料、機械、氣候與自然災害等。所有的電力系統時時刻刻都免不了面對可能的內外部的各項干擾，並隨時準備啟動自我防衛與修正措施。由於現實世界是不完美的，電力系統必須具有韌性，以在不完美的現實世界中經常維持最大程度的正常營運能力。

參考過去的文獻，電力系統韌性的衡量，可以歸納為兩項常用的指標 (Molyneaux et al., 2012; Das et al., 2020; Jasiūnas et al., 2021; Hu & Chang, 2023)：

- (1) 在受到自然或人為的內外部衝擊時，維持運作的能力越高，則韌性越高。
- (2) 當維持正常運作的能力受到損害時，恢復正常運作的時間越短，則韌性越高。

經濟部能源署 (2024) 的統計資料顯示，2023 年臺灣有高達 96.7% 的能源供給來自於進口，亦即自產能源比例僅占 3.3%。臺灣屬於海島的地理環境，進口能源主要仰賴海運。一旦因極端氣候、自然災害或區域情勢導致海運受阻，將導致臺灣因缺乏能源而危及正常的民生及經濟運作 (Simorre, 2024)。

電力市場有供給面及需求面兩端。提升電力系統的韌性，除了供給面的管理，也需要需求面的管理。當電力系統遭遇內外衝擊時，透過各種策略來引導用戶改變用電行為，提升用電效率、降低尖峰負載，以達到提升電力系統韌性的目的 (國家發展委員會，2020; Zhang et al., 2024)。

* 國立陽明交通大學經營管理研究所教授

電力系統的運作受到自然面與社會面因素的影響（台灣電力公司，2019）。也因此，欲強化臺灣的電力系統韌性，除了考量的地理環境、氣候條件、基礎建設及技術等自然面因素，也必須考量電力供需、能源安全、能源偏好等社會面因素。

二、電力的生產階段

電力是一種常見的最終能源消費財貨。電力的特性是可由異質的能源來源產生（例如：石油、煤炭、天然氣、核反應、生質、水力、風力、地熱、陽光、洋流等），但電力卻為同質的產出（Landis & Rausch, 2017）。

電力的生產階段可區分為發電、輸電、配電三個階段。發電端產生了電力之後，必須透過輸電及配電系統，才能將電力輸送至用戶端（台灣電力公司，2022）。任何一個階段發生人為或自然因素造成的事故，都可能導致用戶端接收不到電（Salman et al., 2023）。然而，用戶端卻可能誤會停電是因為缺電、停電是因為某種能源來源不足或避免停電需多蓋電廠等（劉光滢，2022）。根據台灣電力公司（簡稱台電）對偶發性停電事故原因的統計，外力、天災及用戶因素引起的停電事故約占六成，供電設備老舊或異常等因素，約占四成（台灣電力公司，2022a）。

提升電力系統的韌性，無法僅藉由調整發電階段的能源來源種類配比而達成，必須藉由從發電到輸電至配電的整體優化，在垂直結構環環相扣下進行改善。尤其是在配電階段，許多社區的變電及配電設施已經老舊，造成跳電停電事故的發生，必須立即進行持續維護與改善（台灣電力公司桃園區營業處，2025）。

當然，發電端的事故也可能引發連鎖反應，或稱為骨牌效應（Yang et al., 2017）。監察院（2018）就 2017 年 8 月 15 日全臺無預警大停電一案（簡稱 815 事故），就須對該事故負責的台灣中油公司提出糾正，指出：「我國發電用天然氣全數進口，供應路徑長，輸儲風險高，潛存國安疑慮」「本次 815 事故短暫斷氣即造成 592 萬戶分區輪流停電」監察院的糾正報告中已注意到電力輸送的「長鏈」問題。

2022 年 3 月 3 日發生非常嚴重的停電事故，導致臺灣鐵路中部以南全線停駛，近四成（約 549 萬）家戶停電，半導體、光電、石化、鋼鐵等工業生產也受影響。台電公司指出，興達電廠事故導致南部地區電力供需失衡，產生連鎖反應造成南部地區大停電（劉光滢，2022）。

葉宗洸（2022）指出：能源取得是否順利、備用存量是否充足兩大問題，攸關能源安全及電力供給的穩定性。而發電階段的能源來源種類，會影響基載電力及供電穩定，以及中、長期的電力發展及減碳目標的達成。

台電表示已注意到提升電力韌性需要電源電網並進，且能源選擇應是複選題。該公司將配合政策持續推動多元分散的再生能源，並提升燃料儲備，加速執行「強化電網韌性建設計畫」，以確保供電穩定及淨零轉型（經濟部，2025）。

綜合以上所述，提升電力系統韌性，必須對發電、輸電、配電三個階段，皆進行持續維護與改善，並做整體電力系統營運品質之優化。

三、集中與分散式電力系統的相互支援

傳統的電力系統主要採集中式，亦即由大型發電廠發電後，經過輸電系統傳輸，再由配電系統傳輸到各個用戶端。分散式系統則是在用戶端鄰域設置小型發電設施，就近供電。用供應鏈的長短來比喻，集中式系統可視為「長鏈」，而分散式供電系統則為「短鏈」（Jia et al., 2024）。隨著因地因時制宜的再生能源發電的推廣，分散式的電力系統的需求增加。

再生能源發電受到時段、氣候與地理等因素的高度影響，例如：太陽能發電需要日照、風能發電需要風力。近年來臺灣基於永續發展及提高自主能源比例等理由推廣再生能源發電站，使得集中與分散式電力系統同樣被需求。為了能有效率地整合集中與分散式電力系統的運作與調度，智慧電網的廣布，實有其必要性。

若能將在特定時段大於需求的發電量予以儲存，則可於需求大於供給時段中將儲存的電力予以釋出。儲能裝置的導入有助於平衡電力市場的供給與需求，便利集中與分散式電力系統間的調度（International Organization for Standardization, 2025）。經濟部（2023）規劃在電網端於 2030 年達到 3,000 MW，在發電端於 2030 年達到 2,500 MW 的儲能量。臺灣地狹人稠，儲能設備的設置必須考量對鄰近民生設施之影響、保持安全距離、遵循安全標準及消防規範等（經濟部，2023）。

除了技術面的提升，新興商業模式的導入與落實亦有助於發揮集中與分散式電力系統的整合綜效，例如：臺灣已經出現虛擬電廠。個別參與者所擁有的小型發電設備，可透過虛擬電廠的軟體系統平臺，進行串聯、集中調度跟管理，如同一個真正的電廠一樣運作。虛擬電廠包含了發電、儲電、用電等，可發揮穩定電網的功能（許志義、楊瑪利，2025）。

臺灣虛擬電廠發揮及時調度功效的實際案例包含：2024 年 4 月 3 日上午 7 點 58 分發生花蓮大地震，使得台電發電機組跳機，產生電力短缺。台電利用包含儲能電池在內的虛擬電廠，快速補充供電缺口，防止後續的連鎖反應（許志義、楊瑪利，2025）。

在傳統的電力市場中，生產者是台電公司之類的電力廠商，消費者則是各式各樣的用戶。一位台電用戶向台電購買電力，是一位能源消費者。當此用戶裝置再生能源裝置以生產綠電，則無論是自用或銷售這些自行生產的綠電，他同時扮演生產者及消費者的角色，則可稱為能源生產消費者（energy prosumer）。隨著再生能源發電的推廣，世界上出現了許多能源生產消費者，使得能源市場的生產、交易與消費模式更具有彈性（李珮璇、魏揚，2019; Hu & Chuang, 2024）。若一位電力市場參與者同時進行消費、生產、儲能與彈性調度等行為，則可稱之為能源彈性生產消費者（energy flexumer）。換言之，電力市場的參與者可以同時扮演多個角色，隨之而來的商業模式也更加多樣化，有助於電力市場效率的改善及永續發展目標的達成（Hu & Bui, 2024）。

四、自我檢視電力系統的弱點

臺灣應經常自我檢視電力系統的韌性，並進行持續改善。弱點是降低系統韌性的因素，弱點越嚴重，系統韌性越低。行政院原子能委員會核能研究所（2023，現為國家原子能科技研究院）主張對臺灣電網進行廣泛的弱點分析。近年發生的大停電事故為例顯示當前電網中存在重大的弱點。弱點分析應逐一審視節點或連線失效時造成的影響，以作為電網大修排程參考。

法國國際關係研究所（IFRI）的研究員 Simorre（2024）發表「台灣能源供給：國家安全的阿基里腱」研究報告，指出了許多臺灣能源系統的弱點。該文引言中直接說：「藉由封鎖及能源供給中斷，以導致臺灣的經濟崩潰」是臺灣正面對的戰爭策略。臺灣電力系統為封閉式，且集中於臺灣本島西側。臺灣能源結構仍大量倚重天然氣與燃煤等化石燃料。96% 的能源透過進口，若面臨禁運或海運受阻，臺灣將極度脆弱。在區域緊張局勢下，能源供應成了國防安全致命傷。

脆弱程度通常被視為是韌性的反向指標，亦極脆弱度越高、韌性越低。梁啟源等人（2017）做過臺灣能源經濟脆弱度的追蹤分析。他們量化計算臺灣能源系統的脆弱程度，組成包括三大構面與十五項次指標，經過標準化以 0-100 分呈現。分數愈高，表示相關風險愈高，脆弱度亦愈高。該脆弱度指標系負向指

標，亦即分數越高，脆弱程度越高。其實證結果發現：1990 年第一季總能源脆弱度指標為 90.52 分，而 1990 至 2003 年，總能源脆弱度多半源自於基礎設施的不足。2004-2014 年間，高漲的國際能源價格造成臺灣能源經濟脆弱度的增加。之後因為電源設備和天然氣儲輸建設落後於需求的成長，基礎設施面再度成為臺灣能源脆弱度上升的主要原因，2017 年第二季時該指標進一步上升至 97.94 分。換言之，在將近三十年的資料期間內，就期初及期末比較，臺灣的總能源經濟脆弱度是上升的。

五、持續強化臺灣的電力系統韌性

台灣電力公司（2022b）的「強化電網韌性建設計畫」中提出了下列四項具體的可操作重點：（1）綠能加儲能，分散供電邁向淨零。（2）電廠直供園區，幹線留給民生。（3）增加配送節點，解決送電瓶頸。（4）變電所屋內化，阻絕外力破壞。

台灣電力公司持續強化電網韌性的努力，也取得了一些成效（經濟部，2024）：總事故停電件數已逐年減少。經過近年推動配電系統強韌計畫，配電事故停電次數從 2012 年的 21,019 次，持續降低至 2023 年的 6,115 次，即十年來降低約七成。台電持續推動配電系統強韌計畫，推廣全面饋線自動化系統，以力求「停電更少、復電更快」。

一個具有韌性的電力系統，需要收取合理的費用，以反映電力供給的機會成本並進行再投資。不合理的壓低電價，不利於提升電力系統的韌性。反之，合理反映各項成本的電價，可促進電力資源合理分配，進而提升電力系統的效率與韌性（吳中書，2024）。

一個國家的人民的能源偏好，受到能源教育的影響。民眾若缺乏能源常識，執著於無事實與科學依據的意識形態，將不利於能源市場的永續運作。沒有一種能源是絕對乾淨的，也沒有一種能源是零風險的。能源教育應讓民眾正確明瞭每一種能源所伴隨的風險、成本與效益，以有利於形成與運作永續能源市場（Hu & Yang, 2024）。

具有韌性的電力系統在經濟功能上支持工業、住宅、商業、運輸、農業、漁業和環境等各部門的運作及發展，在使命上協助人類生命與文明的綿延與傳承。電力系統有韌性，社會經濟有韌性，國家發展有韌性，世界和平有韌性。

參考文獻

- 台灣電力公司 (2019)。「台電環境白皮書」。<https://www.taipower.com.tw/media/on4lvctj/2020072311363049674.pdf?mediaDL=true>。
- 台灣電力公司 (2022a)。「偶發性停電的原因是什麼？」。<https://www.taipower.com.tw/2289/2512/2515/49900/2520/15192/normalPost>。
- 台灣電力公司 (2022b)。「強化電網韌性建設計畫是什麼？」。<https://www.taipower.com.tw/2289/2512/2515/49900/2520/57787/normalPost>。
- 台灣電力公司桃園區營業處 (2025)。「計畫性工作停電公告——這不是電源不足的停電」。<https://service.taipower.com.tw/branch/d103/xnotice?xsmsid=0M242581312675626779>。
- 行政院原子能委員會核能研究所 (2023)。「淨零排放——電網韌性分析計畫」(核定版)。https://www.nusc.gov.tw/share/file/information/Pom3y1KXtn6yVYpc56DIIQ_.pdf。
- 吳中書 (2024)。「臺灣能源政策建議報告」。<https://www.tier.org.tw/achievements/pec3010.aspx?GUID=7752af16-d3dd-4d59-a509-3f0b48aafb72>。
- 李珮璇、魏揚 (2019)。「生活就是發電廠，能源轉型大確幸」，主婦聯盟環境保護基金會。<https://www.huf.org.tw/essay/content/4618>。
- 許志義、楊瑪利 (2025)。「虛擬電廠，台灣能源發展的新解方」，《遠見雜誌》。<https://esg.gvm.com.tw/article/95445>。
- 國家發展委員會 (2020)。「智慧電網總體規劃方案核定本」。<https://ws.ndc.gov.tw/001/administrator/10/refile/5654/4171/f25cc275-a686-4c4f-a3ea-e8c3f8f756cb.pdf>。
- 梁啟源、劉致峻、鄭睿合、呂易恂、郭博堯 (2017)。「我國能源脆弱度分析與因應策略建議」，《臺灣能源期刊》4 卷 4 期，頁 361-400。
- 葉宗洸 (2022)。「為什麼會停電？臺灣電力供給的現況與挑戰」，《科學月刊》630 期。<https://www.scimonth.com.tw/archives/5734>。
- 經濟部 (2023)。「臺灣 2050 淨零轉型『電力系統與儲能』關鍵戰略行動計畫 (核定本)」。<https://www.ey.gov.tw/File/16D2A0935341E23?A=C>。
- 經濟部 (2024)。「十年停電減七成！台電持續強化電網韌性」。https://www.moea.gov.tw/Mns/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=40&news_id=113515。
- 經濟部 (2025)。「關心能源安全請支持補助台電 能源選擇沒有萬靈丹 電力韌性需要電源電網並進」。https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=40&news_id=118956。
- 監察院 (2018)。「815 停電事故，監察院糾正中油公司並促請檢討」。https://www.cy.gov.tw/News_Content.aspx?n=528&s=13003。
- 劉光滢 (2022)。「不缺電為何也會停電？33 大停電凸顯的三大脆弱」，《天下雜誌》。<https://www.cw.com.tw/article/5120283>。
- Das, L., Munikoti, S., Natarajan, B., & Srinivasan, B. (2020). Measuring smart grid resilience: Methods, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109918.
- Hu, J.L., & Bui, N.H.B. (2024). The future design of smart energy systems: A constructive literature review. *Energies*, 17, 2039.
- Hu, J.L., & Chang, T.Y. (2023). Energy resilience: A cross-Economy comparison. *Energies* 2023, 16, 2214.
- Hu, J.L., & Chuang, M.Y. (2023). The importance of energy prosumers for affordable and clean energy development: A review of the literature from the viewpoints of management and policy. *Energies*, 16, 6270.

- Hu, J.L., & Yang, P.S. (2024). Interactive cycles between energy education and energy preferences: A literature review on empirical evidence. *Energies* 2024, 17, 5092.
- International Organization for Standardization (ISO). (2025). Energy storage: Powering the future of renewable energy. <https://www.iso.org/renewable-energy/storage>
- Jasiūnas, J., Lund, P.D., & Mikkola, J. (2021). Energy system resilience – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111476.
- Jia, F., Shahzadi, G., Bourlakis, M., & John, A. (2024). Promoting resilient and sustainable food systems: A systematic literature review on short food supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140364.
- Landis, F., & Rausch, S. (2017). Deep transformations of the energy sector: A model of technology investment choice. *Energy Economics*, 68(S1), 136-147.
- Molyneaux, L., Wagner, L., Froome, C., & Foster, J. (2012). Resilience and electricity systems: A comparative analysis. *Energy Policy*, 47, 188-201.
- Salman, H.M., Pasupuleti, J., & Sabry, A.H. (2023). Review on causes of power outages and their occurrence: Mitigation strategies. *Sustainability*, 15, 15001.
- Simorre, A. (2024). Taiwan's Energy Supply: The Achilles Heel of National Security. ASIE.VISIONS, N° 142, l'Institut Français des Relations Internationales (IFRI). Downloaded from https://www.ifri.org/sites/default/files/2024-10/ifri_simorre_approvisionnement_energetique_taiwan_2024.pdf
- Wender, B.A., Morgan, M.G., & Holmes, K.J. (2017). Enhancing the resilience of electricity systems. *Engineering*, 3, 580-582.
- Yang, Y., Nishikawa, T., & Motter, A.E. (2017). Small vulnerable sets determine large network cascades in power grids. *Science*, 358(6365). <https://doi.org/10.1126/science.aan3184>
- Zhang, X., Xiao, F., Li, Y., Ran, Y., & Gao W. (2024). Energy flexibility and resilience analysis of demand-side energy efficiency measures within existing residential houses during cold wave event. *Building Simulation*, 17, 1043-1063.