

從英國大停(限)電看台灣電力輔助服務的重要性

鄭智文 任職於 Enel X 義電智慧能源

2019 年 11 月

西元 1879 年愛迪生順利將白熾燈泡商業化後，接著在紐約曼哈頓珍珠街站，興建了全美第一座發電廠，並鋪設電網輸配系統。總共使用 6 台（共 670kW）直流發電機，成功提供 1 千多盞照明系統所需要的電力，自此帶動全球電力系統（電網）的發展，將電力普及到成千上萬的家庭和企業。9 年後，西元 1888 年，劉銘傳也引進全台灣第 1 台小型蒸氣燃煤發電機，於台北城內裝設電燈照明系統，在丹麥電氣技師的協助下，點亮台灣第 1 盞電燈，開啟台灣邁入現代化電力的便利生活。一百三十多年後的今天，雖然石化燃料仍是全球最主要且超過一半的能源來源，但因為資通訊等科技應用蓬勃發展，以及因應全球暖化的低碳技術崛起，國際能源總署（International Energy Agency, IEA）在 2017 年〈全球能源展望〉（World Energy Outlook, WE02017）報告中提到，「電氣化」成為全球能源系統的四大轉變趨勢之一。各國電氣化的政策支持不斷加強，包括法國和英國政府最近提出 2040 年將開始禁售新的傳統汽油和柴油車輛，這項政策促使全球電動汽車的需求預測從 200 萬輛，爆增到 2040 年時的 2.8 億輛。就算不考量電動車的情境，預估到 2040 年全球電力需求成長為 60%，其中電機、空調、冷凍冰箱和資通訊（ICT）設備幾乎占全球電力需求增長的 75%。電力的需求已滲透到每個人和每個角落，因此一旦發生停(限)電事件，所產生的整體衝擊、及經濟和非經濟損失，往往難以計算和補償。然而目前電力無法有效益的大量儲存，絕大部分仍必須即發並即用，以及保持電網系統的動態平衡；系統上發電量過多或過少均有可能會導致停電，也就是電力系統必須隨時保持在發電量與用電量幾乎相同的平衡狀態。當電網上發電側發電量少於需求端負載需求時，系統頻率會下降；反之電網上發電側發電量多於需求端負載需求時，系統頻率會上升。且依據克希荷夫電流定律（Kirchhoff's Laws），電力系統上任一節點對電力的用電或供電，和電網傳輸量的限制，均會影響到電力系統上所有的節點，也因此維持電力網路的運作平衡原本就是十分複雜的工程。再加上近年氣候災害層出不窮，相對應解決全球暖化對策之一的再生能源的迅速發展，在風能和太陽能（屬於變動再生能源 Variable Renewable Energy, VRE）高佔比（滲透率）的電力系統中，因為其發電間歇性、不易預測性的特性，對電力系統和電力調度更是極大的挑戰，電力系統的靈活性和彈性變得空前重要，如此才能保證電力系統的穩定運轉。也因為如此如何強化電力系統的可靠度與韌性，成為目前各國政府和電力公司所要面對的巨大挑戰。本文從英國的案例來看看如何透過多元彈性的輔助服務，來幫助提升電力系統的可靠度與韌性。

英國是全球最早使用燃煤發電的國家，1882 年倫敦即興建了第一座燃煤發電廠。自 1989 電業法修訂後，逐步完成發、輸、配與售電的分割；並成立輸電調度中心，以及新的電業管制機構，以統籌管理新的電力市場。近年英國透過大力推廣可再生能源來努力降低燃煤比例，不到八年的時間，英國燃煤發電佔比從 42% 降到 5%。英國在北海擁有全球規模最大的離岸風電場，太陽能發電也每年持續增加。今年 5 月有超過一周國內用電均非來自於英國境內的燃煤火力發電廠，將「無煤時間」再次推向新高。英國政府預計在 2025 年要讓燃煤發電歸零；並在今年通過氣候變遷法修正，將計劃在 2050 年底之前達到零碳排目標，並將其目標納入法律要求，成為第一個將零碳目標入法的國家。目前英國電力供電來源的結構為：風力 10.7%，天然氣 46%，核能 21.2%，生質能 6%，太陽能 5%，水力發電 1.1%，剩下 9.9% 則由跨國電網提供。英國無論在能源轉型和電力市場均走在世界的前沿，亦能維持不錯地電力系統可靠度，可靠度指標（SAIDI/SAIFI）和台電相近，因此，英國大停電的相近經驗也可以供給台灣學習和參考。

2019 年 8 月 9 日接近英國當地時間傍晚五點前，當時適逢週五交通最繁忙的時段，英格蘭（England）和威爾斯（Wales）兩地區發生十年罕見的大範圍停（限）電事件。大約有 60 多班車次的地鐵和鐵路被迫停駛，機場、車站和交通運輸因此癱瘓。倫敦最繁忙的尤斯頓（Euston）和國王十字（Kings Cross）車站也不得不被迫緊急關閉，造成大量旅客滯留，影響近百萬人。15 分鐘後電力才開始陸續恢復，45 分鐘後大部分的供電才恢復正常；但停電所引起的混亂狀況一直持續到深夜才得以舒緩，而且還有部分電力一直到一周過後才徹底修復。這是自 2003 年「倫敦大停電」後，英國所發生規模最大的非常規停電事故，造成巨大的經濟損失。根據國家電網營運中心（NationalgridESO, NGE SO）於事故後提供給主管機關瓦斯與電力市場辦公室（Office of Gas and Electricity Markets, Ofgem）的調查報告中指出，此次大停電的起因是由於三個（多重）非常規偶發事故，幾乎同時在同一分鐘內發生，造成數台機組跳機解聯，多重事故累積的出力損失，導致系統頻率快速下降，已超過英國供電可靠度標準（SQSS）所能抵禦的最嚴重事故狀況（超過 N-1）。倘若這次沒有靈活彈性可供調度的調頻資源，例如：快速型需量反應或大型儲能系統，來支撐短期電力系統所需的輔助服務（Ancillary Services, A/S），此次恢復供電所需要的時間一定會更久，停（限）電範圍也有可能更大。

英國電力系統可分為三大系統，英格蘭和威爾斯、蘇格蘭和北愛爾蘭系統。事故當天英國氣象局（Met Office）有發布氣象最低警戒的「黃色警示」，當時電力系統約有 30%供電來自於風能，30%來自天然氣，22%來自於核能，9%來自歐洲跨國電網，其他來自生質能、水力和燃煤所提供，發電狀況和每年同一時期沒有不同，符合原來的發電量預測。其中太陽能於當日中午約 12:30 達到當日發電量尖峰的 6GW，低於當時英格蘭和威爾斯系統的負載需求約 25,351MW。下午 4 點 52 分 33 秒的其中一個雷擊（lightning strike）擊中某個 400KV 超高壓輸電電塔；雖然電塔保護系統迅速自我排除事故，但影響到配電系統嵌入式電源主饋線喪失（Loss of Main, LoM）的電壓向量位移保護（vector shift protection）電驛動作跳脫約 150MW 發電出力。根據調查報告指出國家輸電系統（NETS）超高壓遭雷擊事故後，半秒間引發沃旭能源（Ørsted）位於北海全球最大的離岸風場號角海一號（Hornsea One）風機控制器發生不正確反應，造成風機過流電驛動作跳機約 737MW，此跳機造成系統頻率瞬間從標準 50Hz 陡峭急速下降。同樣約莫半秒後，德國萊茵集團（RWE）的小巴福特（Little Barford）發電廠的天然氣聯合循環燃氣輪機（ST）跟著立即跳脫減少共約 244MW 發電出力。因系統慣量大為降低，電力系統頻率持續瘋狂下降，系統頻率跌幅值超過預期；導致嵌入式電源 LoM 之頻率變化率（RoCoF）保護電驛動作跳脫 350MW 發電量。電網累計失去共約 1,481MW 發電出力，電力損失超過平時 N-1 的準備量，電網頻率於下午 4 點 52 分 58 秒驟降至 49.1Hz。英國電網系統中，目前最大的發電機組是 Sizewell B 核電機組，裝置容量約為 1.2GW，系統頻率需控制在 50Hz±1%，也就是不能低於 49.5Hz。英國電力調度中心（Electricity System Operator, ESO）啟用 1,000MW 的頻率反應型輔助服務，其中包含快速型需量反應（約 350MW 左右）、大型儲能系統（約 472MW 左右）和水力機組等其他備用資源（約 178MW 左右），電網頻率於下午 4 點 53 分 18 秒再度回穩至 49.2Hz。但下午 4 點 53 分 31 秒小巴福特氣渦輪又因蒸氣壓力過高而關閉了兩台機組，損失了 388MW。此時系統的備轉容量資源已被用盡。為了避免發生骨牌效應：克希荷夫電流定律（Kirchhoff's Laws），造成整體電力系統崩潰，造成更大的災難，ESO 調度中心啟動了二次保護防線，執行約 1,000MW 的低頻卸載（Low Frequency Demand Disconnection, LFDD），減少了 5%電力需求，包含醫院、機場和鐵路，共約 110 萬戶用戶以保障其他用戶的用電，來保護其他 95%的用電需求。45 分鐘後電網頻率恢復正常，配電網路營運中心（Distribution Network Operator, DNO）開始陸續開始恢復正常供電。2017 年 815 台灣因大潭發電廠天然氣供電中斷，造成 6 部機組跳機。台灣電力調度原則為「發生最大機組 N-1 跳機事故不能導致低頻卸載，即頻率不得低於 59.50Hz 連續超過 50 秒」。2017 年台灣服役中最大機組為核二廠，容量 985MW，815

瞬間跳脫 4,384MW，遠高於台電之事前規劃，為避免電力系統全面崩潰，進而啟動分區輪流停電的保護措施，最終能於同日 23 時恢復正常供電，也是類似的道理。

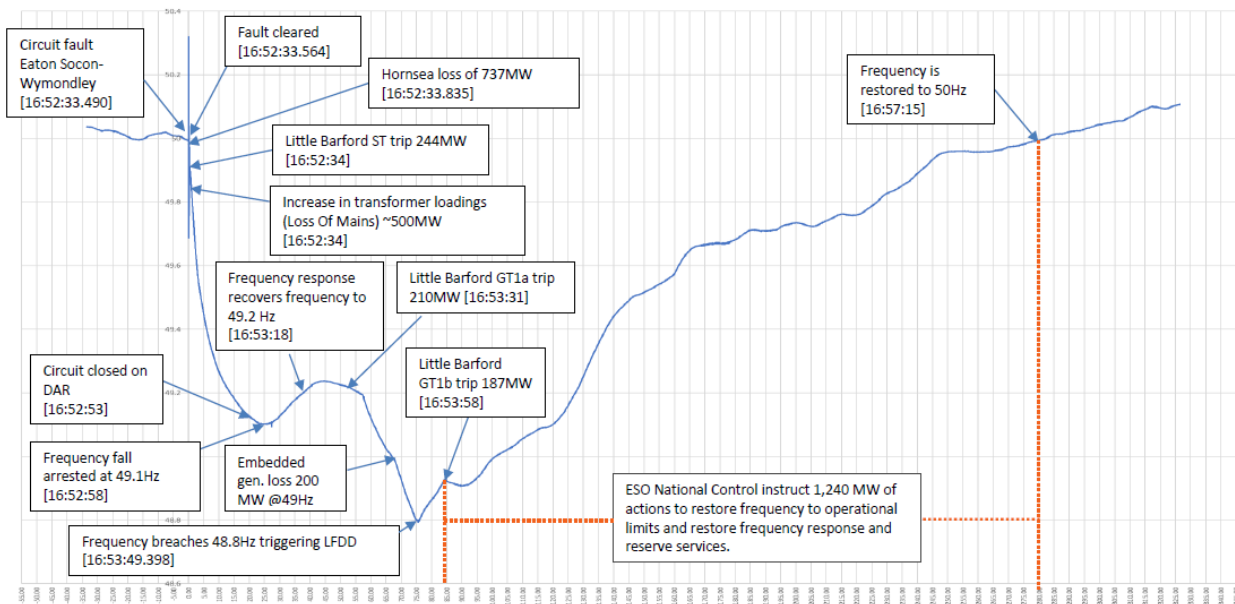


圖:英國停電事故頻率變化圖 source:ESO 技術報告

此次大停電要解決的問題是電力系統頻率驟降，第一時間各發電廠間，靠頻率產生同步相位達到並聯輸出，透過調整發電機組的轉速控制頻率，當負載變動時，發電機負荷產生變化，控制電路會調整發電機動力來源(例如燃氣渦輪/蒸氣渦輪的節流閥)來避免發電機轉速變動，但如果負荷變動幅度過大，調整速度跟不上時，低頻率保護電驛會啟動，將該機組解聯脫離電網，若造成連鎖反應，其他正常運轉機組也會一部接著一部跳機，因而擴大事故的影響範圍。除了傳統的自動發電控制機組(AGC)外，近年有效解決這種問題的需量反應(Demand Response)應用從美國開始發展至全球，傳統單向由供給面解決電力問題的方法越來越不容易，透過資通光電新科技技術成熟推升了各種雙向智慧電網的應用，擴大了需求面管理的應用和效益，越來越多的電力需求是透過需求面管理或市場誘因而有效抑低，一樣能強化電網彈性和韌性，並減少尖峰用電時間的電網的緊澀度，並間接增加可靠度。當電力系統異常時，透過獎勵、法規或電價誘因而改變用戶用電習性的策略，並達到降低整體尖載(彈性)發電機組的投資成本和減少閒置成本、提升電業經營績效與供電可靠度等效果。另一個近期快速發展的解決方案為大型儲能系統，因電池儲能系統不會受頻率限制，在系統異常狀態下仍能放電調頻，透過儲能設備儲存電能，在系統需要時進行釋放，以調節系統供需。在此次大停電事故中，快速型需量反應和儲能系統花 3 分 47 秒就讓電網頻率恢復正常，遠比十年前的 11 分鐘還要快。在應對這種系統緊急狀況時，要關注的除了

頻率下降的幅度外，更重要的是頻率變動的速度，和電網上的控制器及發電設備是否夠快速作出相對應的反應，必須要能夠以穩健可靠的方式來因應較高的頻率變化。

同樣類似的故事於 2017 年也於南澳洲發生過。特斯拉 (Tesla) 僅花了二個多月的時間，在南澳州建置全球最大電網級 100MW/129MWh 的儲能電站 (Battery Farm)。其平日功能是負責平衡/平滑和調節南澳最大風力發電廠，但它其實有更重要的任務是提供調頻輔助服務 (Frequency Control and Ancillary Services, FCAS) 給澳洲能源市場調度營運機關 (Australian Energy Market Operator, AEMO)，電站建置完成後就馬上成功地避免兩次可能的大規模停電。在未建置儲能電站之前，南澳就因為天然氣和電力供應不足，非常仰賴向澳洲其他區域購買電力，一旦遇到像這兩次發電機組臨時跳機，或惡劣氣候意外損毀傳輸電網，就會飽受大停電問題之苦。特斯拉這次快速救援，再次強化輔助服務對電網彈性和韌性的重要性、並規模化巨型儲能電站，反而有助於儲能系統成本的下降。澳洲東岸擁有全球最長單一跨州互聯電力輸電網系統，為了因應再生能源快速成長，目前已經是全球儲能系統建置量最大的地方，同時亦為輔助服務重要來源之一的快速需量反應也蓬勃發展。義大利國家電力 (Enel X，台灣為義電智慧能源) 在澳洲國家能源電力市場 (National Electricity Market, NEM) 提供約 180MW 的需量反應來平衡電網頻率。AEMO 在去年的報告中發現，經由快速需量反應和電網級儲能讓 2017 年 Q4 到 2018 年 Q1 的 FCAS 成本大幅降低 57%。任何系統不可能保證不會遇到事故或故障，重點是如何降低故障機率，以及如何在故障後快速及有效地恢復正常，也就是提高電力系統的韌性 (resiliency)。

近期台電亦參考國外經驗，配合能源轉型和因應未來大量再生能源併網對系統的衝擊，在今年已開始規劃非傳統機組即時備轉輔助服務，以及計畫於後年 2021 啟用快速反應負載資源 (Fast Responsive Reserve) 和儲能自動頻率控制 (Automatic Frequency Control) 輔助服務。另外考量太陽光電「鴨子曲線」的發電特性，未來也會計畫再增加彈性升降載輔助服務 (Ramp Capability Product)。台灣電業法第 9 條定義的『輔助服務』內容為：輸配電業為維持電力供應安全與可靠、確保電力系統穩定、維持電力品質及因應偶發事故，提供調頻備轉容量、即時備轉容量、補充備轉容量、全黑啟動及其他（如調整電壓）等服務。並依電業法及相關子法規定，輔助服務來源由發電業、再生能源發電業、自用發電設備、需量反應提供，其中需量反應提供者可為公用售電業和用戶群代表 (Aggregator)。另外配合電業法第 11 條規定，輸配電業為電力市場發展之需要，經電業管制機關許可，應於廠網分工後設立公開透明之

電力交易平台；循序漸進建立新的電力批發市場交易模式，電力調度中心可透過電力市場取得必要的電力輔助服務，以促進電力市場之公平競爭。依此規劃未來的調度模式將由綜合電業統一調度模式，逐漸轉型為電業自由化機制下電力市場日前交易及即時交易的電力調度模式。兩者調度營運方式雖然有所不同，但核心目標仍然是以確保電力系統供電安全與穩定。依國外電力市場發展經驗，電力市場模式若市場設計、充分揭露市場交易資訊，並營運得宜，以達調節電力供需及電業間公平競爭、合理經營之目標；是能取得最經濟、最有效率的多元資源，來確保電力系統供電安全與穩定。在逐步開放市場的同時，台電已開始推動廠網分離與利潤中心制，藉由引進國外電力市場觀念，建立電能與輔助服務的競價平台，並依競價結果與實際調度結果進行結算，以確實反映輔助服務的成本，並提升不同機組的市場定位與價值、提高發電廠營運績效，台灣亦快速走向能源轉型正確的路徑上。

參考文獻

1.IEA，2017，World Energy Outlook 2017。

<https://www.iea.org/weo2017/>

2.Nationalgrideso，Information about the 9 August power cut and the ESO，ESO final technical report。

<https://www.nationalgrideso.com/information-about-great-britains-energy-system-and-electricity-system-operator-eso>

3.AEMO，Quarterly Energy Dynamics Q1 2018

https://www.aemo.com.au/-/media/Files/Media_Centre/2018/QED-Q1-2018.pdf