

儲能於再生能源整合運用趨勢與機會

楊宛蓉^{1*}

摘 要

低碳能源轉型已成為全球能源發展方向，隨著再生能源裝置量與滲透率提升，間歇性的再生能源(如太陽光電、風力發電)對電網衝擊風險提高。為解決大量再生能源併網所造成的負面影響，儲能技術成為可能的解決方案之一。近年來，大型再生能源電廠配置儲能系統逐漸成為趨勢。因此，本研究欲透過個案研究方法與次級資料分析，觀察再生能源與儲能發展較快速之國家地區，以美國、日本、英國等地區共4個案例作為研究標的，解析上述個案之儲能運用模式。試圖解答儲能於再生能源整合運用之功能效益，同時歸納分析促使大型再生能源電廠配置儲能之要素。整體而言，驅動再生能源與儲能整合的因素，一是法規層面的要求，另一方面則為經濟層面誘因，使再生能源成為可調度資源、參與不同電力服務多元化、極大化收益。本研究認為伴隨我國電力市場改革與交易自由化，新的電力市場機制與能源交易環境可為儲能與再生能源整合創新商業模式帶來契機，進而衍生整體社會最具經濟效益，且安全可靠之電力供給模式。

關鍵詞：儲能，再生能源，電力系統

1. 前 言

根據國際再生能源總署(International Renewable Energy Agency, IRENA) (2020)的統計數據，截至2019年全球再生能源裝置容量達到約2,537 GW，2019年新增約176 GW再生能源發電設備，較2018年成長約7.4%。近年來新增發電設備裝置容量中再生能源之佔比逐漸攀升，越來越多國家與地區明顯意識到能源轉型所能夠帶來的積極成效。與此同時，電力系統則需要投入變革才能使全球能源走上永續發展和減緩氣候變遷，未來十年各國家地區勢必採取行動，推動再生能源投資並加速電力系統對再生能源的利用率，定置型儲能的市場機會因此應運而生。

當電力系統中再生能源滲透率提升，傳統機組併聯數量及發電容量均減少，致使系統慣量(Inertia)降低，影響電力系統的安全與穩定。為了提高電力供應品質與可靠度，準備多元而充裕的輔助服務機組格外關鍵，可以積極協助大量再生能源併網，有效抑低可能之衝擊與影響(吳進忠，2020)。儲能是電力系統輔助服務的技術來源之一，更可在能源轉型的過程中扮演至關重要的角色。儲能使無風與無陽光的時段，風光再生能源發電可持續穩定供應；快速充放的特性，能夠即時響應電力調度指令，發揮更好的調頻、輔助服務等效果，有助提升電力系統的彈性與韌性，更好地吸納、利用再生能源。

我國正值能源轉型之際，政府已明定2025

¹ 工業技術研究院產科國際所 副研究員

*通訊作者電話: 03-5916430, E-mail: pollyanna.yang@itri.org.tw

收到日期: 2020年08月31日

修正日期: 2020年11月17日

接受日期: 2020年11月18日

年再生能源發展目標，屆時再生能源發電占比將大幅成長達到20%。提升電網靈活性、韌性以更好地吸納間歇性再生能源，同時使再生能源發電匹配整體電力需求，儲能技術之採用有其必要性。本研究欲透過爬梳國際儲能發展趨勢歷程，以及大型再生能源與電網級儲能結合之運用案例研究，著重探討大型再生能源案場與儲能整合運用之模式、促成儲能整合運用之背景環境與驅動因素，諸如政府推動策略、電力市場結構與交易機制等，研析實務運用案例背後之考量與驅動力。其中案例之篩選以儲能應用發展較早、再生能源與儲能整合運用經驗相對豐富之歐美、日本等地區為主，選擇包含美國德州Duke Energy Notrees風電儲能、日本北海道新千歲太陽光電儲能、英國Vattenfall Pen y Cymoedd風電儲能案以及美國夏威夷電力公司光儲「可調度」電力招標案等作為研究標的，試圖從實際個案運用經驗發掘可供我國參考之發展方向，進而提供儲能推動策略之建議。

2. 文獻回顧

國際上已有不少探討電力系統中儲能應用的相關研究，討論儲能技術對於電力系統發、輸、配、用電側所能提供的功能、服務與價值。Oudalov等人在2006年IEEE PES電力系統大會提出，儲能技術可涵蓋電力系統相當廣泛的應用領域，從電能品質(Power Quality Application)方面的應用到能源管理(Energy Management Application)層面的應用。因應各種應用功能的需求，運行時間從短至「秒級」的應用如電壓校正，「分鐘」等級的即時備轉(Spinning Reserve)、全黑啟動(Black Start)等，到「小時」規模的應用如削峰填谷、尖峰用電調節(Peak Shaving)、大規模的電能移轉交易等，依據不同的場域、市場規範與監管結構要求提供相應的儲能功能。

由美國能源部(DOE)和電力研究所(EPRI)與美國全國農村電力合作協會(NRECA) (2013)

共同出版的《電能儲能手冊(DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA)》，更完整地歸納了五大類儲能可提供之服務與效益，包含大規模能源服務(Bulk Energy Services)、輔助服務(Ancillary Services)、輸電基礎建設服務(Transmission Infrastructure Services)、配電基礎建設服務(Distribution Infrastructure Services)以及用戶能源管理服務(Customer Energy Management Services)等，此外為了極大化經濟效益，單一儲能系統有時不只提供一種應用以達到收益與價值的疊加(Stacked Services)。

能源轉型與發展再生能源是現今全球主流的能源政策方向，為了實現更高的再生能源滲透率，電力系統的靈活性與韌性成為必要條件(Denholm & Hand, 2011)，而儲能即是提供電網靈活性的手段之一。Denholm與Hand M指出，間歇性再生能源發電與用電需求存在時間不匹配的問題，在風、光再生能源滲透率達80%的情境時，若導入4小時或更長時間儲能進行電能移轉，可使棄風棄光率降至20%以下。許多研究亦已說明儲能技術有助於提高電力系統靈活性，Castillo與Gayme (2014)提到，儲能具有十足的潛力幫助促進再生能源整合，對於實現再生能源目標至關重要，同時又不影響電網的高效、可靠和電力系統營運的經濟性。前提是在儲能友善的電力市場機制與監管制度下，儲能使得以完整發揮潛能。

綜上所述，短時間儲能(儲存時間少於1小時)可增加電網對間接性再生能源發電量的吸納，而更長時間的儲能(如長達一天)可以帶來更大的能源效益，但整體電廠的建置成本卻大幅提升(IEEE, 2004)。由於電網級儲能被廣泛認為具有提升靈活性的潛力，帶動了國際間對於儲能技術及其經濟性之評估研究。儲能可提供之應用功能已眾所周知，然而將再生能源發電系統導入儲能加重了開發商的投資成本。因此，本研究將著重探討既有再生能源與儲能整合案場的運用模式，從實務面探討在何種環境

條件、背景之下驅動開發商有意願將儲能與再生能源整合運用，最後分析我國現行能源政策與規範架構下，再生能源與儲能整合發展可能之路徑。

3. 研究方法

本研究採個案分析研究方法，透過文獻探討、次級資料的蒐集，根據研究主題對於個案加以分析與歸納，試圖解答本研究探討議題。本章將先闡明個案研究法的意義、內涵，其次說明研究標的案例選擇的方式與原則。

3.1 個案研究法

個案研究可用於探討個案在特定情境脈絡下的活動與動態狀態，Eisenhardt (1989)認為此研究方法特別適合於新的主題領域。個案導向的研究方法與透過瞭解事件或現象的過程、情境脈絡，掌握其中意義與分析因果關係。透過多重資料蒐集、比較、歸納，去瞭解其中的獨特性與複雜性。個案研究屬於一種實務性的調查方式(Yin, 1994)，是以經驗為主的調查方式，事件中可能有很多的「變數」，試圖利用多元資料的蒐集及比較分析，來探索發掘其中隱含的特質與規律。適合用於具有高度複雜性、理論形成的初期階段或問題仍在探索性階段的研究。

本研究之研究目的在於探討儲能於再生能源整合搭配之運用模式，以及驅動儲能與再生能源結合運用之原因，試圖找出運用型態成立之因素，以提供我國再生能源與儲能推動策略建議。由於全球儲能市場仍在快速成長與萌芽階段，尚未有運用模式已具有領導地位，故作為探索性質之研究，本研究採個案分析研究方法。

3.2 個案選擇方式與研究限制

本研究主要研究目的在於找出目前全球大型再生能源發電系統與儲能整合之運用模式，

以及探討各種運用模式生成之驅動因素。因此本研究限縮於討論表前(in-front of the meter, FTM)與電力系統發電側再生能源系統整合併用之儲能應用案例，表後(behind-the-meter, BTM)用戶側儲能系統，如搭配住宅、商辦屋頂太陽光電系統之儲能，則不在此限。

根據本研究對於國際儲能發展歷程之觀測、彭博新能源財經(BNEF)、IHS Markit資料庫以及相關研究文獻，又考量資料蒐集完整與豐富，篩選儲能應用與商業模式發展相對較早的美國、英國、日本等地區，找出四個大型再生能源與表前儲能整合案例作為研究標的進行研究。資料蒐集方式包含全球表前電網級儲能運用趨勢的相關報章、雜誌與網路資料探索，以及個案利害關係人、企業之官方公開資訊調查，以深入探討、解釋個案「如何」運用儲能以及「為何」採用儲能。雖然個案的篩選應具一定程度的客觀性，個案研究可能受限於個案代表性周延與否，研究內容若涉及商業機密無法完全掌握所有細節，又個案研究牽涉研究者的主觀判斷與資料解讀而影響研究進行。是以本研究在蒐集資料時盡量從不同管道，注意資料證據的可信與連貫性，確保分析的邏輯與脈絡契合研究主題。

4. 國際儲能運用趨勢與案例研析

本章節首先回顧國際定置型儲能發展歷程，使讀者快速掌握儲能應用興起之背景與發展趨勢概況。其後將透過標的案例研析，篩選儲能應用發展先進地區既有表前電網級儲能與再生能源整合併用之案例，探討再生能源與儲能結合運用型態與效益分析，解析儲能應用功能與整體電廠運用態樣。

4.1 國際儲能發展歷程

定置型儲能運用的議題，於2012~2013年討論即開始出現，初期以政府與研究機構主導

之電網應用示範專案為主，進行技術與功能驗證，較明確的市場型塑與成長，則在2015年顯現。美國為全球儲能應用發展相對較早且較快的國家，特別是在電力市場相對自由開放的美國加州以及PJM地區，電網級儲能之運用最為積極。加州早在2010年，就已立法AB2514要求電力公司儲能採購並訂定目標，以儲能幫助電網穩定以及再生能源整合。而加州政府也推出自主發電激勵政策(Self-Generation Incentive Program, SGIP)對用戶端電力自發自用進行補助，帶動表後住宅儲能應用興起。暨加州之後，包含奧勒岡州、紐約州、麻薩諸塞州、亞利桑那州、內華達州、維吉尼亞州等皆相繼設定儲能採購目標，至今加州仍為美國儲能應用相對成熟且裝置量較大的地區。

除了上述美國地區，日本、德國同為儲能系統早期採用區域。日本經產省最早在2012財政年度開始提供鋰離子電池儲能補助，資助表後的家庭與企業用戶裝置儲能設備，減輕消費這資本投資負擔，帶動市場應用。2015年起日本政府更加著重對儲能對於電網營運與再生能源整合之功能驗證，開啟風電或太陽光電共址儲能系統設備補助計畫，帶動再生能源整合運用發展。德國政府則於2013年透過國家開發銀行德國復興信貸銀行提供太陽光電儲能設備投資激勵方案，隨著太陽光電躉購費率不斷下降，又居高不下的零售電價，刺激家戶太陽光電自發自用誘因。縱使2018年補助方案終了，德國住宅儲能裝置量仍持續增長。

2016年，英國國家電網公司(National Grid)公告新的輔助服務商品—增強型頻率響應(Enhanced Frequency Response, EFR)，提供反應時間更短、更快速的頻率響應服務，同時減少需要用於輔助服務提供的化石燃料用量。EFR雖然僅為一次性的試驗產品，且為技術中性並不限於儲能技術投標，但對於儲能在電力系統輔助服務應用卻帶有指標性意義，EFR標案給予儲能驗證與收益機會，說明儲能技術可用來因應未來再生能源滲透率提升後的電網快速調

頻需求。2016年國家電網共簽約201 MW的儲能EFR容量，並依此次經驗對既有的輔助服務產品Firm frequency response (FFR)進行調整，設計更嚴格更快速的響應時間條件。儲能技術快速反應的特性與優勢，使輔助服務市場成為儲能重要的收益來源，儲能在全球各地電力系統提供頻率調節與其他輔助服務的案例逐漸增加，並且帶動主管機關重新檢視電力市場機制以因應儲能之參與。

2017年~2018年，韓國市場的快速崛起帶動了全球定置型儲能裝置量大幅躍升。韓國在政府產業刺激政策目的下，提供了優渥的建置獎勵條件，刺激大量的再生能源開發商投資風電、太陽光電再生能源配置儲能系統，以獲得高倍數的再生能源憑證。例如，2018年將太陽光電廠配置儲能系統可獲得5倍憑證。然而急於推動裝置量的發展容易疏忽根本的安全性問題，以及關於儲能消防與意外事故處理程序的建立，市場對於儲能技術之安全性疑慮攀升。截至2020年上半已發生近30起火災意外事故，造成韓國地區儲能設置計畫延宕、市場停滯，連帶全球市場規模受到影響。各國家政府已加強注意儲能安全問題，並加速相關安全標準與規範之制定(圖1)。

在低碳轉型與各國加速再生能源發展政策之下，未來再生能源裝置量與成長速度皆不斷提升，致使全球儲能的需求不減。美國地區已有許多大型公用事業將再生能源與儲能加入區域長期整合資源規劃(Integrated Resource Plan, IRP)，在美國西南地區、亞利桑那州、夏威夷州等更推出許多不同型態的再生能源購電合約型式。全球新能源與儲能裝置量持續成長的同時，配合各國家地區推動政策與電力市場法規的調整，儲能之運用與商業模式亦將推層出新。

4.2 儲能與再生能源整合案例分析

4.2.1 美國德州Duke Energy

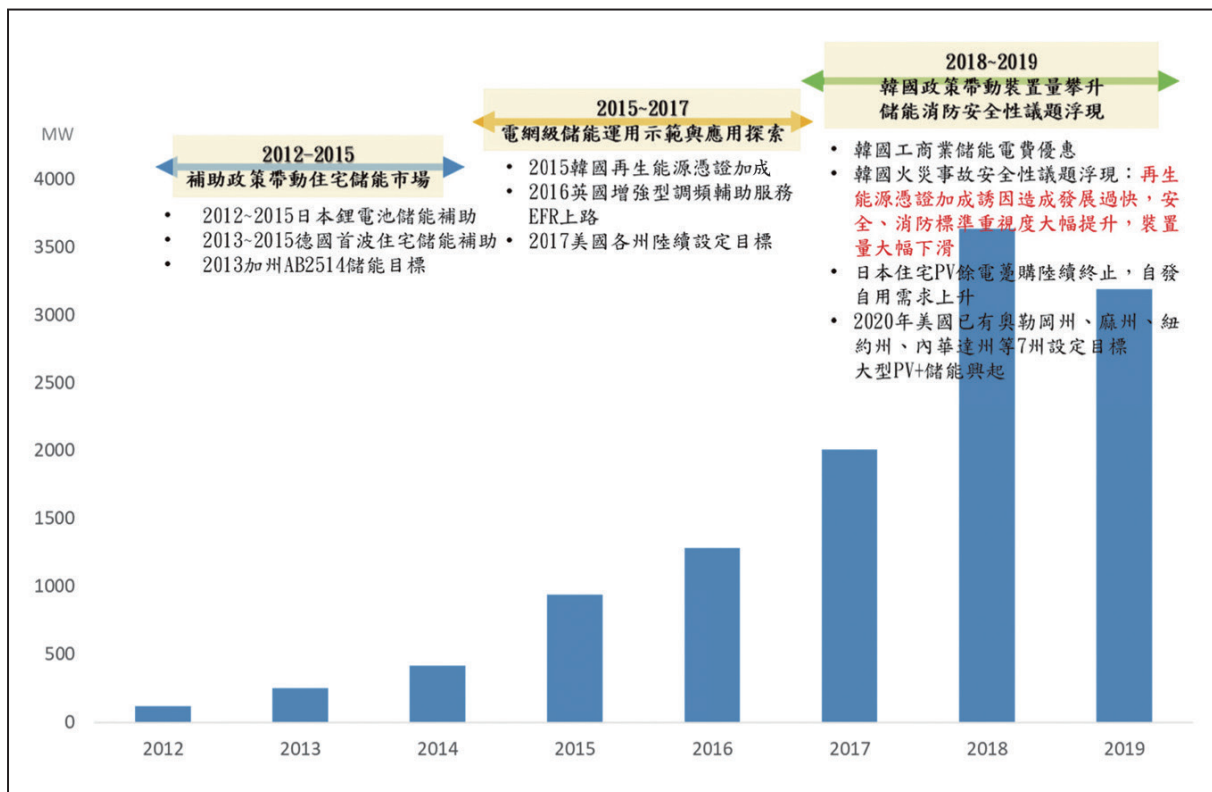


圖1 全球定置型儲能新增裝置量(MW)與發展歷程(IHS Markit, 2020)

Notrees風電儲能整合專案

- 地點：美國德州Goldsmith Notrees風場 (DukeEnergy, 2015)
- 完工日期：2017年12月
- 儲能規模：36MW/ 24MWh
- 搭配之再生能源：風力發電
- 技術：鋰離子電池
- 應用：再生能源輸出平滑化、頻率調節、能源管理服務

位於美國德州西部的杜克能源公司(Duke Energy) 153 MW的Notrees Windpower風場2017年底完成了系統升級工程，36 MW電池儲能系統已成功安裝和測試(圖2)。本次系統升級專案，採用韓國的三星SDI鋰離子電池取代了既有的鉛酸電池技術。

Notrees儲能專案鉛酸電池儲能系統自2012年開始運轉，儲能電廠占地面積約2萬平方英尺，用以緩解風力發電變動性。儲能協助避免棄風，使風力發電更有效地整合進入電力系

統，並積極參與德州電網運營商ERCOT的快速響應監管服務。由於鉛酸電池儲存容量下降，2015年宣布儲能改造計畫。最初以50%鋰電池儲能結合既有鉛酸電池之複合式儲能系統，在逐步替代為100%鋰電池系統。2017年完工新建的鋰電池系統將補充下降之儲存容量，並加強頻率調節功能。升級後的儲能能源管理系統可更快速依據ERCOT價格信號進行儲能充放電，提升在ERCOT電力市場快速響應服務(Fast Frequency Response Service, FRRS)提供能力，以及參與其他電力系統輔助服務。

Duke Energy Notrees風場儲能系統是以「倉庫型」儲能電廠呈現(如圖2中白色倉庫建築)，此類電廠設計常見於土地資源較不受限之區域。本案展示了鋰電池儲能系統在性能上的優勢，不僅效率提升、壽命延長，循環次數更高。過去由於鋰電池價格高昂，多採用鉛酸電池應用於儲能系統。在成本逐漸下降後，目前全球定置型儲能系統多以鋰電池為主流技術。此外，本次在系統技術轉換過程中，透過控制



圖2 Duke Energy Notrees風場儲能系統(Windpower Engineering & Development, 2017)

軟體將既有鉛酸技術的剩餘壽命最大化，同時讓新舊系統順利無縫接軌，展現了Younicos YQ能源管理軟體系統的靈活性和功能。

本案之儲能軟體與系統供應商Younicos新創事業，於2017年中被大型全球發電設備租賃企業與能源管理公司Aggreko併購(Aggreko, 2017)，併購方Aggreko便是希望能夠獲得Younicos在儲能領域的專業持續為其客戶帶來更新的技術、商品與減少電力成本，Younicos也能借助Aggreko累積之國際通路力量，開拓儲能產品更大的國際版圖。

4.2.2 日本北海道新千歲太陽光電儲能電廠

- 地點：日本北海道(新千歲柏台太陽光發電所)(北海道電力株式会社，2016)
- 完工日期：2017年5月
- 儲能規模：17 MW/ 13.7 MWh
- 搭配之再生能源：太陽光電
- 技術：鋰離子電池
- 應用：再生能源輸出平滑化

本案位於日本北海道千歲市新千歲機場附近，裝置規模28 MW的新千歲柏台太陽光電發電廠在2016年完工經測試運轉於2017年中正式

上線。該電廠搭配有17 MW/13.7 MWh的鋰電池儲能系統，用以進行再生能源發電平滑化，消弭間歇性與變動性，並且滿足北海道電力公司(HEPCO)的再生能源電廠併網技術條件。

自日本政府2012年頒布再生能源躉購FiT政策後，日本國內之再生能源成長快速，尤其本案所在的日本北海道地區再生能源資源豐富，在FiT政策實施後，裝置量迅速成長。當地已有許多太陽光電與風力發電系統併網，然而地廣人稀，電網容量與基礎建設成長速度不若再生能源裝置增加速率，致使電網出現壅塞，產生棄風棄光問題。又再生能源易受天氣變化影響電力輸出的穩定性，並對電網造成衝擊。因此，如何解決當地再生能源併網問題、緩解輸出變動與提升再生能源併網容量，是近年北海道相當重視的議題。

2013年日本經產省提出「北海道大型(500 kW以上)太陽能發電併網應對方案」，關於太陽光電併網，電廠須採取減緩電力輸出變動之應對措施，也要求新建之大型電廠應設置儲能系統。同年，北海道電力對也針對經產省發布要求提出回應，宣布大型再生能源電廠併網之技術要求。2016年4月，北海道電力公布「再生能源出力變動緩和對策技術要件」。HEPCO要

求2 MW以上輸出規模的太陽光電發電廠進行出力抑制、安裝儲能系統，並以減少輸出波動作為併網條件。在透過連接儲能系統，以再生能源對儲能充電/放電，輸出波動需控制在每分鐘的總額定輸出量的1%以下始符合併網技術要求(如圖3)。北海道電力將監測實際電廠合成出力，每3秒鐘採樣確認各電廠確實符合出力變動率控制之要求。

本案為韓國電力公司(Korea Electric Power Corporation, KEPCO)第一個在海外建設與儲能系統相結合的太陽光電發電廠，由韓國LSIS負責建造與20年之電廠維運。28 MW太陽光電發電系統，預計將產生35 GWh (35,000,000度)的電力，相當於該地區每年11,000戶家庭的用電量。13.7 MWh儲能設施，採用三星SDI

鋰電池，ABB提供電力電子與能源管理系統(EMS)，並進行系統整合。全案耗資約113億日圓(約9.949千萬美元)，占地面積約109萬平方公尺。儲能系統使該電廠符合北海道電力之「再生能源出力變動緩和對策技術要件」，電力輸出量變化率每分鐘1%以下。在售電合約下，將向北海道電力公司出售電力25年(40日元/度)。配置儲能雖加重本案電廠建置成本，為了確保併網資格與優渥的躉購費率合約，開發商願意承擔成本並讓利。

4.2.3 英國Vattenfall Pen y Cymoedd 風電儲能整合專案

- 地點：英國Neath
- 完工日期：2018年5月

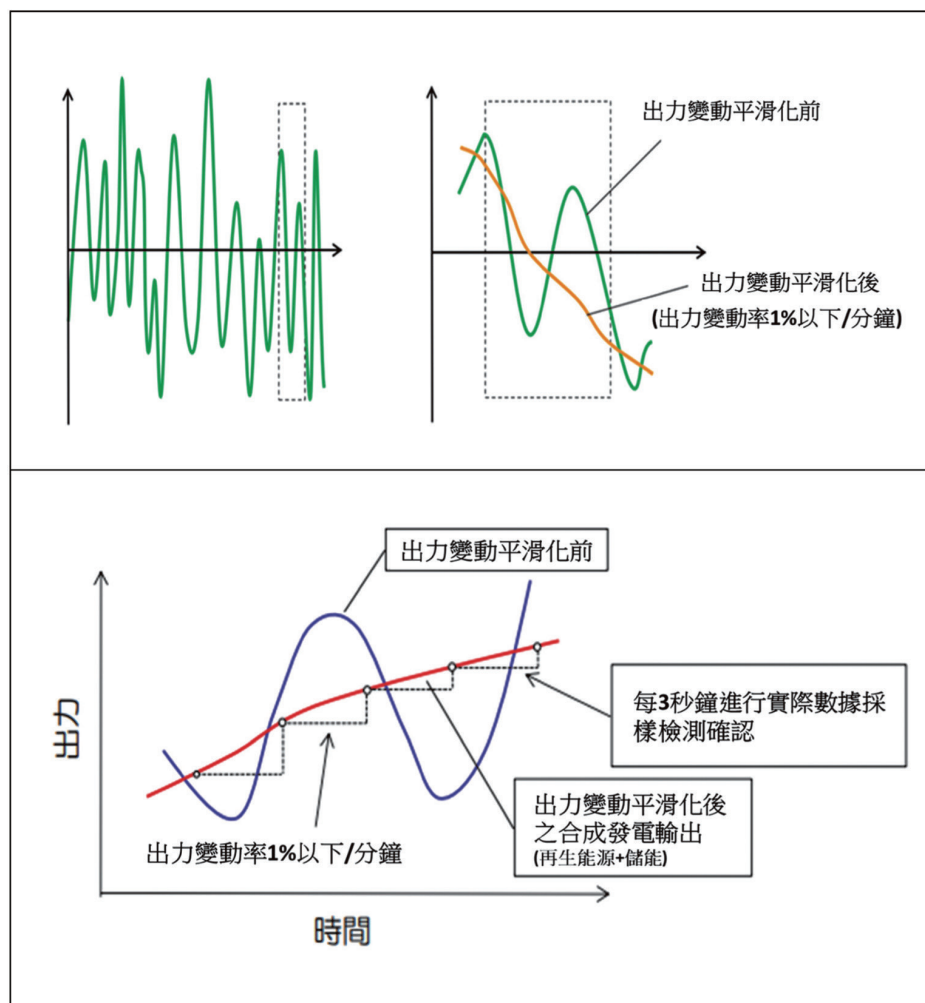


圖3 日本北海道電力併網技術要求--太陽光電發電設備出力變動緩和對策技術要件(北海道電力株式会社，2016)

- 儲能規模：22 MW / 33 MWh
- 搭配之再生能源：風力發電
- 技術：鋰離子電池
- 應用：頻率調節

瑞典電力公司Vattenfall與BMW集團簽定1000組鋰離子電池供貨合約。每組電池容量為33 kWh，且搭載BMW i3通用之電池管理系統。本次Vattenfall是從Dingolfing的BMW工廠購買新電池，並將其用於該公司所擁有的風場，建置與再生能源併用之儲能系統。Vattenfall希望能藉由該公司之再生能源發電廠域帶動能源系統之轉型，促進再生能源與儲能系統整合。

Vattenfall將運用BMW鋰離子電池在英國南威爾士230 MW的Pen y Cymoedd風場，設置22 MW之儲能系統，為該公司目前最大的儲能項目(圖4)。Pen y Cymoedd是該公司風場建設路上的一個里程碑，該風場於2015年秋季開始建設，2017年5月完工，是Vattenfall最大的陸地風電廠。風場的前身為煤礦區，位於南威爾士的Neath和Aberdare之間，由76 西門子SWT-3.0-101渦輪機預計每年將產生約700 GWh電力。Vattenfall去年從英國國家電網公司獲得四年增

強型頻率響應(Enhanced Frequency Response, EFR)合約，該公司將透過Pen y Cymoedd風場提供電網快速平衡服務。而本次儲能系統的設置除了整合風力發電，另一重點便是要作為EFR的一部分。該電廠已獲得價值5,700萬英鎊之EFR合約，電池儲能須在一秒鐘以內提供更靈活的電力與頻率調節服務，將有助於英國電網的穩定。

本案電池儲能主結構為6個BMW鋰離子電池儲能貨櫃(參見圖4)，由於貨櫃形式的儲能系統便於物流運輸，為現今常見的模組化儲能商品型式，2018年5月該儲能系統已正式商轉。共址型設計的風電儲能整合式電廠，不僅降低土地取得與併網成本。藉由整合鄰近的Pen y Cymoedd陸域風場風力發電，為國家電網公司提供EFR調頻輔助服務，穩定電網頻率且活用風電、開創風廠新收益來源。Vattenfall將此儲能項目稱為Battery @ pyc，以此作為在英國開端，希望在歐洲更多風場設置儲能系統。

Vattenfall在歐洲投資多項風場建設，已成為離岸與陸上風電的先鋒。2017年7月更成立新的事業部門Business Area Wind，其中內含三個事業部門，除了離岸風電、路上風電，也跨足



圖4 Vattenfall英國南威爾士Pen y Cymoedd陸域風電儲能系統(Vattenfall, 2017)

太陽能與儲能電池項目，拓展再生能源領域的布局與利潤空間。Vattenfall也計劃投資1.5億歐元進行大規模以及分散式儲能和電池項目，以迎合目前不斷變遷的能源市場結構。

4.2.4 美國夏威夷電力光儲「可調度」電力購電合約

- 地點：美國夏威夷州 歐胡島、毛伊島、夏威夷島
- 預計完工日期：2021~2022年
- 儲能規模：7案，總計262 MW/1,048 MWh
- 搭配之再生能源：太陽光電
- 應用：電能時間移轉、再生能源輸出平滑化

美國夏威夷州電力實業集團(Hawaiian Electric Companies)於2019年初提交7案新「太陽光電加儲能(Solar-plus-storage)」購電合約(或稱「購電協議」，power purchase agreement, PPA) (表1)，向公用事業委員會申請審查。此7案合約價格創夏威夷州再生能源低價新標竿。簽署25年購電合約，以固定價格收購「太陽光電+儲能」組合供電，合約價格落在\$78~117/MWh，遠低於夏威夷化石燃料發電成本約\$150/MWh，為夏威夷州規模最大和成本最低的新興再生能源資源組合。

上述7座光儲電廠預計於2021~2022年商轉。除了創新低的合約價格，新購電合約的特

別之處，還包含其計價方式。由於計算方法不同於美國其他地區既存之太陽光電加儲能購電合約，使本案受到全球關注。

該購電合約著重於電力的「可調度性」，為國際「光儲」購電合約型態之開端。強調在電力公司調度與電力系統負載所需時段之「設備可用性」，而非實際的總發電量。費率結構與計算概念上，不同於過去純太陽光電購電合約，更類似於對燃氣發電機組的「容量採購」合約。因此購電合約之履約內容係依據「太陽光電+儲能」組合整體系統在接受電力調度時的「有效、可用性(availability)與成效表現(performance)」，而非機組總發電量之多寡。夏威夷電力預期此類光儲電廠應可提供電力公司升降載(ramping)於負載需求尖峰時段(取代火力發電機組)，抵銷夜間用電尖峰時段之化石燃料發電需求，並且提供電網穩定性。

在夏威夷電力新型態「光儲」購電合約模式中，將太陽光電系統與儲能系統視為單一電廠機組，依據總發電量扣除成效無法履約之「罰金」。在購電合約中，定義了「有效、可用性(availability)與成效表現(performance)」，包含太陽光電系統發電效率及可接受調度情況、儲能容量是否如同合約容量、儲能之可調度性等。不同於單純之太陽光電躉購合約，將發電廠是否能依合約接受電力公司調度，並保證其效能加入計算，發電廠應確保整體太陽光

表1 2019年夏威夷電力可調度光儲購電合約(Hawaiian Electric Company, 2019)

項目	開發商	地點	規模(PV) (MW)	規模(儲能) (MWh)	預計商轉 日期	單價 (\$/MWh)
Waikoloa Solar	AES	Hawaii	30	120	2021/07	\$79.5
Hale Kuawehi	Innergex	Hawaii	30	120	2022/06	\$89.4
Waiawa	Clearway	O'ahu	36	144	2021/12	\$95.9
Ho'ohana	174 Power Global	O'ahu	52	208	2021/12	\$98.9
Mililan I Solar	Clearway	O'ahu	39	156	2022/12	\$88.2
Kuihelani Solar	AES	Maui	60	240	2021/07	\$77.8
Paeahu	Innergex	Maui	15	60	2022/06	\$116.8

電與儲能系統複合式機組能為電力公司所調度。

4.3 儲能與再生能源整合運用驅動因素分析

低碳能源轉型已成為全球能源發展勢在必行的方向，風力與太陽光電為現今兩大重點再生能源資源。由於「風、光」再生能源發電具有間歇性、不穩定性，且被視為「不可調度」的能源類型，隨著兩者滲透率的提升，對於電力系統的運作將帶來影響與困難。除了提升再生能源的預測技術、衝擊模擬分析、強化電力調度能力等，各地電網營運商也思考新增更具靈活性的發電機組及資源以增加電力系統彈性，而儲能技術即是其中之一。由儲能應用發展歷程探討與本研究標的案例研析，歸納出以下儲能與再生能源整合運用驅動因素。

4.3.1 符合區域併網規範，抑制再生能源輸出變動

再生能源易受天候因素影響，電力輸出相對傳統發電機組較不穩定。更大的出力變動，可能造成電力系統的可靠性下降。為了減少再生能源輸出變化對電網的衝擊，結合儲能系統的充放電控制，可以吸收調節電力輸出變動，達到平滑化功能。

目前在部分電網壅塞地區針對新增大規模再生能源裝置要求實施輸出變動緩和措施，或強制要求一定比例之儲能裝置，用以緩和間歇性能源的輸出波動，以避免再生能源發電升降載率的劇烈變化影響電力品質與電網可靠度。2016年，日本北海道地區電網營運商北海道電力株式會社公告「太陽光電發電設備出力變動緩和對策技術要件」與「風力發電設備出力變動緩和對策技術要件」，要求太陽光電發電設備裝置規模在2 MW以上，以及風力發電裝置規模20 kW以上者，應實施出力變動緩和對策，使每分鐘發電升降載率變動在1%以下。另外，2017年中國大陸《青海省2017年度風電開

發建設方案》(2017)，強制要求欲併網之風電廠需配套額定裝置容量10%的儲能設備，以緩解大量風能併網對當地電網的衝擊。

上述併網規範或升降載率變動之要求，為促使再生能源開發商將再生能源結合儲能設置的驅動因素之一，為使再生能源電廠得以順利併網、售電，需符合電網營運商與主管機關之規範，使得已進行商業運用。隨著再生能源裝置量持續成長，2020年更多的地方政府將配置儲能作為再生能源優先併網的先決要件，如山東、河南、湖南、內蒙、江西等(如下表)，鼓勵大型風、光電廠自主配置儲能減少棄風棄光風險。

當儲能成本仍然偏高時，強制性的儲能配置要求往往會增加再生能源開發商的負擔，降低了新增案場的投資意願，恐延緩再生能源發展。因此需要伴隨配套機制，如電力市場交易機制的完善，使儲能市場得以藉由電力市場的參與提升整體電廠收益，加速投資回收、降低投資風險。

4.3.2 電力系統輔助服務提供

輔助服務是屬於一種短時間的備轉容量，在電力系統的穩定上用於即時的電力調度。在不同的電力市場，由於電源結構、電網結構、負載分布和負載特性的不同，需要的輔助服務種類和數量也不同(賴靜仙，2018)。我國電業法第2條定義，輔助服務為「完成電力傳輸並確保電力系統安全及穩定所需採行之服務措施」(電業法，2019)。目前國際上主要之輔助服務產品種類有，頻率調節、頻率響應、即時備轉容量、補充備轉容量、無效功率與電壓調整、全黑啟動等，在不同電力市場之名稱與定義略有不同。

過去電力系統的輔助服務主要由傳統機組提供，隨著能源結構變化，傳統機組併網與發電容量減少，仍仰賴電力系統中既有的傳統機組，將使輔助服務較為不易。再生能源如太陽光電及風力發電，特性上屬於間歇性、不可

調度之電力來源，且再生能源的慣量(inertia)較傳統機組小，在出力變動時頻率容易偏離目標值。同時，整體電力系統的慣量下降，頻率響應變差而引起系統供電穩定疑慮(吳進忠，2020)。儲能具快速反應能力，得以「秒」級的速度快速反應，依據電力系統現況進行充放電調整。因此，將再生能源電廠與儲能系統整合，可以使再生能源電廠具備參與輔助服務市場，提供頻率調節功能之能力。

再生能源滲透率的增加，使電力系統對調頻輔助服務的需求量與反應速度要求日漸提升。國際間頻率調節運用為近年來儲能切入電力市場的首要項目，儲能快速反應特性有利與傳統機組競爭，快速調頻項目可說是「賺快錢」，讓儲能業者可以站穩腳步的基石。然而輔助服務之市場規模有限，未來需尋找新的商業機會才能擴大與穩定儲能收益。

4.3.3 電能時間移轉，提升經濟效益

大型太陽光電搭配電網級儲能系統而成的複合式光儲(Solar-plus-Storage)電廠，是近期的熱門應用話題。鋰離子電池技術發展快速，過去10年價格大幅下降接近85%，使光儲電廠的電力成本競爭力逐漸提升。

儲能設備的加入可使再生能源電廠得以進

行電能時間移轉(Time-shifting)，將再生能源電力延遲至指定時段運用或併網，能夠配合電力系統負載需求之高低提供電力。根據彭博新能源財經(BNEF)研究，光儲技術電力均化成本持續下降。與其他可調度發電技術相比，2020年以後預估將低於煤電之均化成本，至2030年將有望與複循環燃氣機組(Combined Cycle Gas Turbines, CCGT)之均化成本形成黃金交叉、低於CCGT發電成本。隨著科技發展，太陽光電加儲能成為繼清潔又經濟的可調度能源資源(參見圖5)。

相較於太陽光電，風力發電在日間的發電輸出相對更平穩，在特定區域如美國德州的陸域風電在傍晚尖峰用電期間的風電供給可與負載需求良好匹配。然而在某些地區如美國濱澤馬(PJM)市場風電發電與尖峰負載匹配的程度較低，則提供了儲能應用於風力電能延遲應用的機會。此外，部分地區因電力系統併網容量限制，電網營運商(Grid operator)得以無償要求發電業者降載(Curtailment)，例如日本的電網營運商每年在30天以內可無補償要求風電降載。儲能的搭配可幫助提高風電容量因數，更可以因應併網容量限制可能帶來的棄電損失風險。

在歐美電力市場自由化地區，電廠營運商可藉由電力批發市場或即時市場(Real-time

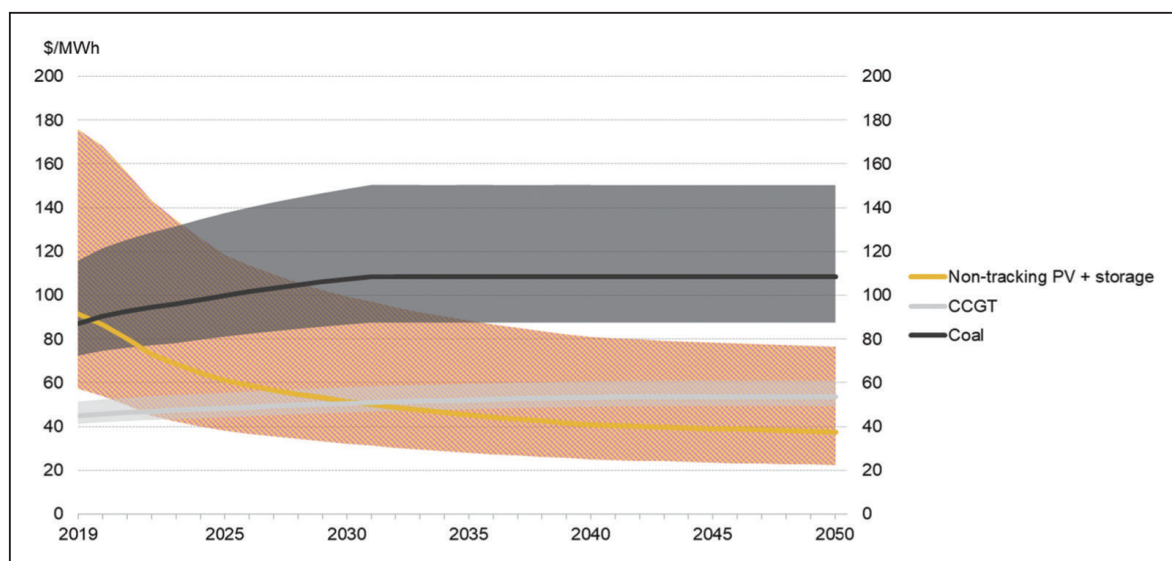


圖5 可調度發電技術電力均化成本(LCOE)預測(BNEF, 2019)

market)之電力價格訊號，結合天氣預報、發電量預測等控制儲能系統儲存與併網售電。透過計算發電成本與電力市場售電價格，營運商可進行能源與電價套利，獲得達到利益極大化。

5. 研究結果

5.1 再生能源與儲能整合運用趨勢

大型風電及光電發電廠搭配儲能系統應用型態的擴張，起因於清潔能源政策的驅動。歐美政府積極的再生能源目標，如加州及夏威夷政府設定2045年100%再生能源目標，若要達成目標，應加強再生能源電力的可調度性。儲能搭配太陽光電系統，將白天剩餘電力儲存，電力移轉至負載尖峰時段應用。除了減緩著名的「鴨子曲線」問題，更使太陽光電廠具有調度價值。此類運用在韓國市場也大規模增加，原因在於政策的利多。將太陽光電廠搭配儲能整合併網，每1 MWh太陽光電電力將可獲得5倍的再生能源憑證(Renewable Energy Certificate, REC)，對於再生能源開發商是相當大的誘因。

根據IHS Markit統計數據(如圖6)，2019年新增表前電網級儲能系統中，40%的新增儲能

場域為搭配大型太陽光電系統建置，9%與風電共址(Co-located)，預估2020年與太陽光電共址之儲能案場將佔表前儲能裝置量的45%，且將持續成長。

綜整本研究之標的個案(參見表2)，在不同的國家地區與背景條件情境下，儲能於再生能源搭配之應用功能各不相同，且未必僅執行單一應用。由於運用的模式不同，因應各種應用功能之操作需求，相對應之儲能規格要件亦有所差異。頻率調節及再生能源輸出波動的平滑化所需之儲存時間較短，為著重「功率」的儲能應用；若要使再生能源成為可調度資源，將電能時間移轉使得以滿足尖峰用電需求或作為調峰電廠(Peaker Plant)，則強調儲能的「能量」所需的儲存時間將長達4小時以上，同時儲能容量佔再生能源裝置規模比相對更高。特別是美國地區已有許多光儲共址型場域建置計畫，其儲能裝置容量與再生能源發電裝置規模比例(Energy Storage System to Generation Capacity Ratio，依出力功率)日益提升，如同夏威夷州案例中的光儲電廠規劃儲能與太陽光電裝置規模比達到100%，亦即太陽光電廠趨向搭配同等出力規模之儲能系統。儲存時間接近4小時的案場設計也逐漸增加，使光儲電廠成為可

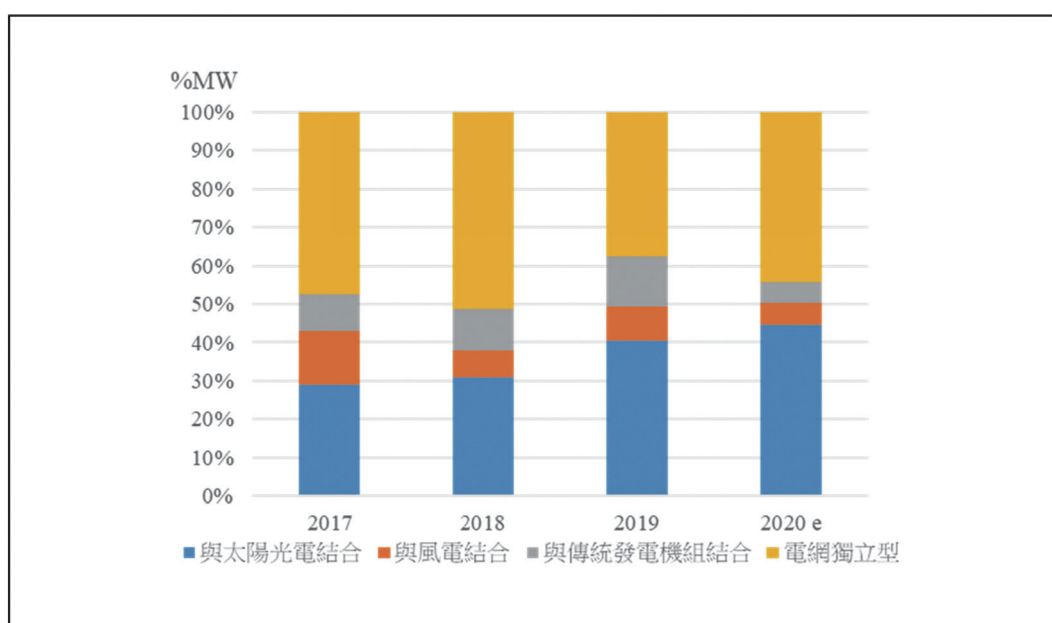


圖6 全球年度新增表前儲能系統裝置場域分析(IHS Markit, 2020)

表2 研究個案分析比較(本研究整理)

項目	美國德州Duke Energy Notrees 風電儲能	日本北海道新千歲 太陽光電儲能	英國Vattenfall Pen y Cymoedd風電儲能	美國夏威夷電力「可調度」光儲電廠
再生能源推動策略	再生能源配比目標(Renewables Portfolio Standard)	躉購制度(FiT) (2017年起2 MW 以上太陽光電 改採競標制)	再生能源配比目標(Renewables Portfolio Standard)	再生能源配比目標(Renewables Portfolio Standard)
電力市場制度	完全自由化	完全自由化過渡階段(發電自由化，2020年完成零售電業自由化)	完全自由化市場	管制市場
再生能源主要交易機制	公開市場 + 雙邊合約	躉購制度轉向競標制	公開市場 + 雙邊合約	競爭性招標
主要應用	再生能源平滑化(Smoothing) 頻率調節(Frequency Regulation)	再生能源平滑化(Smoothing)	頻率調節(Frequency Regulation)	電能時間移轉(Time-shifting)
開發考量	活用風電，擴大再生能源電廠收益來源	符合併網售電資格，適用FiT較好的費率	活用風電，擴大再生能源電廠收益來源	符合購電合約條件要求
儲存時間(連續放電時間)	<1小時	<1小時	1.5小時	4小時
儲能與再生能源發電裝置規模比	23.5%	60.7%	9.6%	100%

調度的資源，以期未來能取代火力電廠，幫助達成碳排放減少以及更積極的再生能源目標。

5.2 小結

由當前國際案例發展趨勢觀察，將再生能源配置儲能系統逐漸成為新建再生能源電廠之標準配備。本研究將個案儲能之應用歸納出三種主要功能：再生能源平滑化(Smoothing)、頻率調節(Frequency Regulation)、與電能時間移轉(Time-shifting)。考量經濟效益與收益機會，現階段儲能系統多運用於頻率調節或其他輔助服務等較具競爭優勢的「功率型」短時間儲能應用場域。未來伴隨著再生能源占比逐漸提升、電源結構改變與輔助市場飽和，預期儲能的需求與應用隨之變化，儲存時間4小時以上「能量型」儲能需求將成長。儲能與再生能源共構創造再生能源的「可調度性」，使之能配合電力

系統負載需求供給電力，取代燃氣電廠滿足尖峰負載需求，確保彈性與靈活性。然因儲存時間越長成本越高，是否能夠透過適合的商業模式回收投資成本成為關鍵。

綜上所述，儲能專案開發與系統規格容量的規劃，乃至於與所搭配之再生能源的規模比例，除了法規硬性要求，主要仍與儲能之應用與商業模式有關，故所在地區的電力市場環境與法規機制至關重要。案例中美國與英國皆屬於電力市場開放程度高、自由化較早的國家地區，電力市場中交易機制與途徑多樣，儲能運用模式的規劃上將盡可能地降低營運成本疊加多元收益來源，如美國德州與英國Pen y Cymoedd運用低成本風力來源活化電廠整體收益；又不以躉購制度作為再生能源推動策略的美國，在夏威夷州更衍生出新型態的購電合約模式，為滿足該合約招標供電條件的要求，

為整合式的光儲電廠開創前景。日本之電力市場自由化階段及再生能源推動模式則與我國較為相近，待新能源技術發展至一定程度無論躉購制度或示範補助等推動激勵政策將告一個段落。在此之前宜先建立清楚而無歧視的電力市場規範，將各種技術明確定義，使儲能與再生能源的整合能進入電力市場自由交易，提供市場更大的誘因驅動多元運用發展。

6. 結論與討論

儲能技術在電力系統中的應用多樣，由於各國家地區的電源結構及電力環境差異，對於儲能的需求及儲能發展之急迫性也不同。伴隨著低碳能源政策之背景與逐漸下降的儲能系統建置成本，再生能源結合儲能系統可在滿足系統負載需求之餘，兼顧減碳與供電穩定。再生能源與儲能整合併用的市場參與模式在大多數國家地區尚未完全開發，預期在電力市場機制的調整與改革後，未來將衍生多樣的商業運用模式，而此類複合式資源電廠更加體現其經濟潛力與減碳貢獻。

我國訂有2025年再生能源發展目標，同時《電業法》修正後，正執電力市場自由化改革發展之際，未來能源與電力交易商業模式存在許多發展空間。待電力市場機制完善，又躉購費率逐漸下修，風光等再生能源將不再僅限於由台電公司躉購之交易模式。可能衍生更多元之購電合約簽約模式，包含參與電力現貨市場交易、在輔助服務市場提供服務等，則大型太陽光電及風電系統勢必需要思考配置儲能系統，使再生能源成為可被調度之電源。為有效推動我國再生能源結合儲能之運用發展，除了新能源與儲能技術成本降低，電力交易市場機制與相關規範定義的完善，將是再生能源與儲能結合運用活化需面臨之課題。

台電公司於2019年10月起推動「非傳統機組參與即時備轉輔助服務暫行機制」，以暫行機制之型式引入非傳統之分散式資源，包括需

量反應、儲能設施以及自用發電設備等資源，為整體電力網有效增加備轉容量。2020年台電公司首度進行「儲能自動頻率控制(AFC)調頻備轉輔助服務」採購，並規劃輔助服務及備用容量交易試行平台，預計2021年第一季「日前(前一日)輔助服務市場」將上線，「備用容量市場」則於2021年底上線。上述電力市場機制的調整措施，皆有助於儲能技術進入電力市場。若要加速我國再生能源與儲能之整合應用，宜利用暫行機試與AFC累積之經驗，儘早釐清與明確儲能在電力市場的定義與各電力服務的參與資格。另一方面，持續於我國電力整合資源規劃中(Integrated Resource Planning, IRP)滾動式評估儲能之需求量，包含用於短時間週期的輔助服務應用與長時間再生能源電能時間移轉應用之儲能資源，以期找出契合能源轉型路徑最適合的電力組合。未來可考量規範電網饋線壅塞區域之大型再生能源系統併網電力輸出的變動率，再生能源電廠營運商若要併網交易售電，則將有必要思考配置儲能，同時也有機會刺激創新商業模式的展開，例如將多餘再生能源發電儲存用於輔助服務與容量市場交易。

長期而言再生能源搭配儲能時，可依據整體電力系統對儲能所提供的預期功效及需求，思考購電合約的費率計算、條件參數、新計價模式等調整方向，規劃出對整體社會最具經濟效益，且安全可靠之電力供給模式。

誌 謝

本文承蒙經濟部能源局109年度「區域性儲能設備技術示範驗證計畫」(109-D0310)之經費補助，特此致謝。

參考文獻

北海道電力株式会社，2016。太陽光発電設備の出力変動緩和対策に関する技術要件。

- 吳進忠，2020。綠電調度實務與經驗，《綠電交易機制系列研討會之一》綠電交易市場的現況與挑戰，臺灣臺北。
- 青海省發展和改革委員會，2017。青海省發展和改革委員會關於印發青海省2017年度風電開發建設方案的通知。引見於2020年8月31日。http://fgw.qinghai.gov.cn/xxgk/xxgkml/fgwwj/201812/t20181226_69361.html。
- 電業法-全國法規資料庫，2019。引見於2020年8月31日。<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=j0030011>
- 賴靜仙，2018。研析我國輔助服務運作模式，能源知識庫。引見於2020年8月31日。https://km.twenergy.org.tw/KnowledgeFree/knowledge_more?id=4539。
- Aggreko, 2017. Yunicos Recommissions Notrees 36 MW Battery Plant | Aggreko. Retrieved August 1, 2020, from <https://www.aggreko.com/en/news/2017/global-news/december/yunicos-recommissions-notrees-36-mw-battery-plant>.
- BNEF, 2019. 2019 Long-Term Energy Storage Outlook, July 31, 2019.
- Castillo, A., & Gayme, D. F., 2014. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. *Energy Conversion and Management*, 87, 885-894.
- Duke Energy, 2015. Duke Energy to Upgrade Its Notrees Energy Storage System, Retrieved September 30, 2020, from <https://news.duke-energy.com/releases/duke-energy-to-upgrade-its-notrees-energy-storage-system>.
- Denholm, P., & Hand, M., 2011. Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. *Energy Policy*, 39(3), 1817-1830.
- Eisenhardt, K. M., 1989. Building theories from case study research. *Academy of management review*, 14(4), 532-550.
- Hawaiian Electric Company, 2019. New Solar-plus-Storage Projects Set Low-Price Benchmark for Renewable Energy in Hawaii. Retrieved August 31, 2020, from <http://www.hawaiianelectric.com/new-solar-plus-storage-projects-set-low-price-benchmark-for-renewable-energy-in-hawaii>.
- IHS Markit, 2020. Grid-Connected Energy Storage Market Tracker - First half 2020, July 30, 2020.
- IRENA, 2020. Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- Oudalov, A., D. Chartouni, C. Ohler and G. Linhofer, 2006. Value Analysis of Battery Energy Storage Applications in Power Systems, 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, pp. 2206-2211, doi: 10.1109/PSCE.2006.296284.
- Vattenfall, 2017. Vattenfall and BMW Group Conclude Supply Contract for Batteries. Retrieved September 30, 2020, from <https://group.vattenfall.com/press-and-media/news-press-releases/pressreleases/2017/vattenfall-and-bmw-group-conclude-supply-contract-for-batteries>.
- Windpower Engineering & Development, 2017. Yunicos Upgrades Battery Storage at Duke Energy's Notrees Wind Farm in Texas. Retrieved September 30, 2020, from <https://www.windpowerengineering.com/yunicos-upgrades-battery-storage-duke-energy-notrees-wind-farm-texas/>.
- Yin, R. K., 1994. Discovering the future of the case study. *Method in evaluation research. Evaluation practice*, 15(3), 283-290.

Trends and Opportunities of Energy Storage in Renewable Energy Integration

Wan-Jung Yang^{1*}

ABSTRACT

Increased use of renewable energy (such as solar photovoltaic and wind power generation) raise the risk of grid stability. To solve the impact of renewable energy on power grid, energy storage system is one of the possible solutions. Growth of co-located energy storage, such as solar-plus-storage and wind-plus-storage, became a trend in the recent years. The study aimed to study and analyze the applications of those energy storage systems in combination with renewables, to find out the patterns of co-located energy storages and something we can learn from. Based on case study, the present research also attempted to explore the driving force behind co-located energy storage. This case-base study chose four cases in advanced countries, including United State, U. K. and Japan. The study found that, the driving force could mainly defined by two aspects. One is regulation, and the other one is economic incentive. Since Taiwan is on the way of electricity market reform, there will be more opportunity for innovative energy storage business models, and transform to a flexible and reliable power system.

Keywords: Energy Storage, Renewable Energy, Power System

¹Associate Researcher, Industry, Science and Technology International Strategy Center, Industrial Technology Research Institute.

* Corresponding Author, Phone: +886-3-5916430, E-mail: pollyanna.yang@itri.org.tw

Received Date: August 31, 2020

Revised Date: November 17, 2020

Accepted Date: November 18, 2020