

臺灣風力發電與液流電池系統儲電情境模擬

謝錦隆¹ 薛康琳^{2*} 鍾岳霖³ 戴志揚²

摘要

大量使用化石能源造成能源供給過度集中，且價格波動性大，影響經濟發展，並惡化溫室效應。因此穩定能源供應、永續能源發展與安全分散風險，必須推動能源多元化，其中發展替代化石燃料之新及再生能源即是選項之一。隨著大型再生能源供電比例的提升，電網必須有相對應的電力儲存技術與之結合，有效改善功率浮動問題與調配電力輸出。釩氧化還原液流電池儲電系統具有：維護成本與環境影響低、安全性與擴充性高、容量大與壽命長等特性，獨立與彈性的功率及電量更適合於各種規模的應用。目前這種電池儲電效率與能量密度偏低，發展作為大型儲電的適用性已逐漸在改進成熟中。本文研究基載與風力發電整合供電、複合式電力儲存系統應用。以臺灣「日最大用電需求量」進行電力儲存系統運行性評估。假設全臺灣風力發電量佔6%的總電力供應量下，降低總基載供應量，而以風力發電搭配儲電以調節發電與實際需求之差異，進行臺灣所需的電力儲存量情境分析。其中風力發電量是以參考現有大型風力發電機特性及新竹濱海風場為例進行估算。分析結果為扣除臺灣現有抽蓄水力儲電量後仍需建置11.2 GWh的電力儲存系統，此系統是選用釩氧化還原液流電池儲電系統，則場域佔地面積約需12.43公頃之規模。

關鍵詞：液流電池、電腦模擬、風力發電、電網儲能

1. 前言

我國能源系統屬於獨立型態，對化石能源的依存度高，能源供應的自給率偏低，98%以上需要仰賴進口(經濟部能源局，2011)。能源影響層面廣泛，需要大量的使用煤、石油與天然氣等能源的進口不但使得臺灣經濟隨著國際能源價格與供應波動，也使得工業產品成本隨著能源價格起伏，進而削弱臺灣產品的競爭力與消費能力。電力是最好運用的能源形式，若電力供應不足，則影響到國計民生，更危害到經濟發展。各國在推動再生能源的技術發展

及應用歷程的經驗上顯示出風力發電及太陽光電發電是較具有短期實現經濟規模的可能性。臺灣地理四面環海，位於亞熱帶與熱帶地區，風力與陽光潛能充足。若能逐年發展風與光發電，可以強化臺灣能源的自主性，落實安全、穩定與多元的能源供應，讓臺灣的能源能夠永續營運。然而現有風與光再生能源的建置成本偏高，因此提高效率，以降低發電成本，將有利於再生能源長期的穩定發展。目前各國使用再生能源的裝置比率在歐盟諸國為全球之冠(IEA, 2014)，包括德國(12.7%)、義大利(14.3%)、西班牙(20.8%)與丹麥(34%)等等；美

¹行政院原子能委員會核能研究所副研究員

²國立聯合大學能源工程學系副教授

³創國精密股份有限公司工程師

*通訊作者, 電話: 037-382387, E-mail: KanLinHsueh@nuu.edu.tw

收到日期: 2015年03月05日

修正日期: 2015年09月10日

接受日期: 2015年10月20日

國、加拿大次之；在亞洲諸國中，則以澳洲為較多。

臺灣電力供應系統架構主要是以火力、核能、水力與再生能源發電所構成(台灣電力公司, 2015)。電力系統發電量結構以102年為例，是以火力發電為主(~76%)，核能次之(~19%)，其餘是為水力及其他發電(~5%)。臺灣各地區供電能力與尖峰負載可分為北中南三個地區區塊。北中南部供電能力相當(103年各為35%、33%與32%)，但在尖峰負載需求量卻有著相當差異(103年各為39%、30%與31%)，因此為了因應北中南尖峰負載差異之需求而形成必須仰賴「南電北送、中送北或南送中等」予以支援不足部分之現象。因抽蓄水力儲能僅佔總發電量的1.5%，尚無法單獨直接提供同一日的尖峰與離峰負載變化量之調控需求，例如夏日(103年07月15日)尖峰與離峰負載各為35 GW與26 GW，相差達9 GW之量，因此當日之尖峰與離峰電力的變化是以中載機組與尖載機組發電量調配之。目前風力發電與太陽光電發電總量佔臺灣發電量約1%。風力發電每月最高發電量約1.2億度(102年12月)，太陽光電發電約1.8百萬度(102年9月)。未來這些再生能源將逐步擴建，設置與推廣目標在2030年時風力發電與太陽光電年發電量將達到佔全臺灣發電量的4.8%。

風力發電與太陽光電發電在應用上一方面需要選擇適當的地點及適合的地理與環境條件配合，另一方面在本質上有日夜發電的時間限制及供電穩定性不佳的潛在問題，易受季節與氣候等的影響，輸出功率變化很大，小規模再

生能源的應用及併聯電網，對於現有電網系統而言仍能適度調節應變，但當再生能源裝置容量逐漸擴充超過電網電力供應一定比例後，若無適當調節機制就直接併入電網，將嚴重影響電力系統的穩定性及安全性。為了穩定電網並達到電能安全供需的平衡，此時電力儲能系統便成為電網中必備的設施元件。尤其是對於能源的需求更必須要倚賴進口，卻具有其獨特的潛在能源—再生能源(風與光發電等)的島嶼，例如：澎湖、金門、綠島、夏威夷與關島等，電力儲存對於島嶼型獨立電網環境更形重要，它不但能改善間歇性能源供應問題而且能夠更有效率地調配電能的供需。

在大型的電力儲存系統上，一般以定置型儲能系統做為電能儲存的方式，例如：抽蓄水力儲能系統(Pumped Hydro)是將電能透過抽蓄機組以位能的型式貯存起來。而壓縮空氣儲能系統(Compressor Air Energy Storage, CAES)則是藉由加壓空氣將能量貯存於密閉空間中。抽蓄水力與壓縮空氣儲能系統都需在適當的地理條件下建設，而且需考量安全性與環境影響問題。目前臺灣的電網的電力儲存系統是以抽蓄水力儲能為主，以在南投的日月潭做為上池，明德與明潭兩個水庫作為下池。上下兩池高低位能差在300-400公尺之間。電力儲存(儲電)系統依據其供電時間及供電功率，可分為發電、輔助供電與輸配電系統三個主要的應用領域(如表1)。電力儲存在發電領域，主要的應用是電能管理、負載調節與尖峰供電。例如在尖峰時間以電力儲存設備輔助供電可以減少對系統總裝機容量的要求。圖1為各種儲能技術與儲能

表1 電力儲存在電力系統中各領域的應用與效益

領域	發電	輔助供電	輸配電系統
應用	電能管理 負載調節 尖峰供電	頻率調節響應 暫態備用電源 長期備用電源 虛功率之控制	提高系統的可靠度 與新(再生)能源結合
效益	提高發電設備利用率，減少對系統總裝機容量的要求	降低輔助設備成本	提高系統設備利用率，延緩新增投資之需求

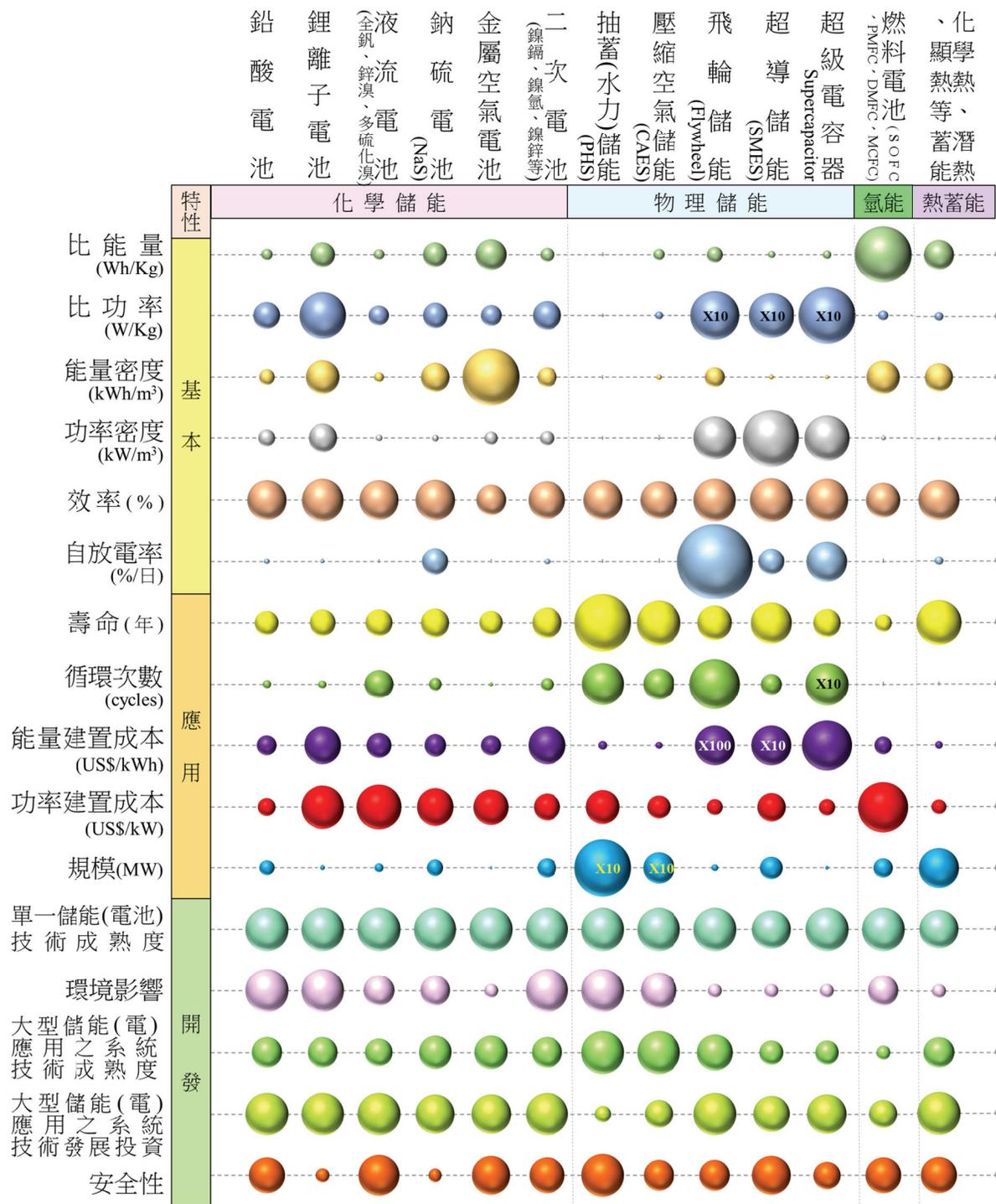


圖1 儲能系統之特性關聯程度(Sabihuddin *et al.*, 2015；謝錦隆，2005)

系統關鍵特性的相對關係圖(Sabihuddin *et al.*, 2015；謝錦隆，2005)。儲能技術分成化學儲能、物理儲能、氫能與熱蓄能等等。儲能系統的關鍵特性包括技術發展時之基本、應用與開發等特性之指標項目。圖中之圓形面積代表該關鍵特性對於各個儲能技術關聯程度的大小。

例如，以比能量(Wh/kg)而言，氫能有很高的比能量(~ 33 kWh/kg)，抽水蓄能比能量(<< 0.1 kWh/kg)很低。以操作壽命而言，抽水蓄能遠較其他儲能技術為長，而且其技術成熟度與規模也是最高與最大。表2說明各種儲能系統依技術的特性有各自適合的應用場域。儲

表2 儲能系統的種類與特性應用

分類	種類	特性說明	應用場域(註)
化學儲能	鉛酸電池	低成本、壽命短、污染環境、需要回收	a、b、c、d
	鋰離子電池	功率密度與效率高、污染環境、存在安全問題	a、b、c、d
	液流電池(全鈦、鋅溴、多硫化溴等)	容量大、功率和能量獨立設計、能量密度低	b、c、d
	鈉硫電池(NaS)	能量密度、功率密度高、成本高、安全性差	b、c、d
	金屬空氣電池	能量密度非常高、充電性能不佳	b、c、d
	二次電池(鎳鎘、鎳氫、鎳鋅等)	能量密度與功率密度高、成本低、存在安全問題、污染環境	a、b、c、d
物理儲能	抽蓄(水力)儲能(PHS)	容量大、技術成熟、儲能成本低、受地理環境限制	e
	壓縮空氣儲能(CAES)	容量大、成本低、受地點限制、需氣體燃料	d、e
	飛輪儲能(Flywheel)	功率高、能量密度低、成本高、技術需要完善	b、c、d
	超導儲能(SMES)	功率高、能量密度低、成本高、需經常維護	b、c、d
	超級電容器	能量密度低、放電時間短、壽命長、效率高	a、b
氫能	燃料電池(SOFC、PMFC、DMFC、MCFC)	功率高、能量密度高、功率密度低、成本高、壽命受限、需燃料供給、僅發電功能	b、c、d
熱蓄能	化學熱、潛熱、顯熱等蓄能	壽命長、效率高、能量密度高、成本低、需要結合發電機與熱交換器使用	b、c、d

註：應用情境(a)可攜式電力、(b)村莊與島嶼、(c)社區、(d)再生能源場址、(e)區域性

能系統在穩定電網與提高再生能源滲透率的應用上扮演相當重要的角色，有效的電力儲存可以提高整個電力系統的使用效率及發電的經濟效益。亦可以補足傳統電力系統中之「原料-發電-輸電-配電-用電」供電鏈成為完整產業所需的六大產業供應鏈，並且可以應用在「發-輸-配-用電」等不同層面，配合供電鏈之特性需求差異而選用其適用之電力儲存技術，如此即可以協助穩定供電、提高利用率與電力品質外，更有助於發展整體電力儲存經濟產業。

電力儲存技術的應用範圍很廣。它可由 0.2 kW 小型瞬時充放電作為電力品質提升之應用，到 500MW 以上之大型長時充放電作為電能儲存、管理與電力調控之應用。目前電力儲存在各種場合的應用(日本富士經濟，2014)包括：(a)電力電能應用：家用電腦到無線基地台與中繼站等不斷電系統、住宅、大廈與建築物等的備用電源系統、太陽光電發電系統、工商業電力儲存裝置、風力發電的系統穩壓與變頻

控制；(b)電機動力應用：電動堆高機、土木工程車、輕軌電動車、電動船、電動機踏車與電動車；(c)家電與攜帶電子產品電池應用：手機、筆電與平板電腦、手電筒、相機、可穿戴裝置(wearable computer)與行動電源。電力儲存在電網的應用(Eyer and Corey, 2010；Denholm *et al.*, 2013)可以分為上中下游。在上游是電廠發電(power generation)，在中游是輸供電與配電(transmission and distribution)，在下游是電力消費端(customer service)。依據使用對象大致可以歸納出數十種電網電力儲存的應用，其中包括：大量電能儲存應用(Bulk Energy Services)、電能調節應用(Ancillary Services)、輸電建設的應用(Transmission Infrastructure Services)、配電建設的應用(Distribution Infrastructure Services)與消費端能源管理應用(Customer Energy Management Services)等等。圖2說明各種儲能系統之適用範圍、技術成熟度與發展投資關係(Sabihuddin *et al.*, 2015；SBC Energy Institute,

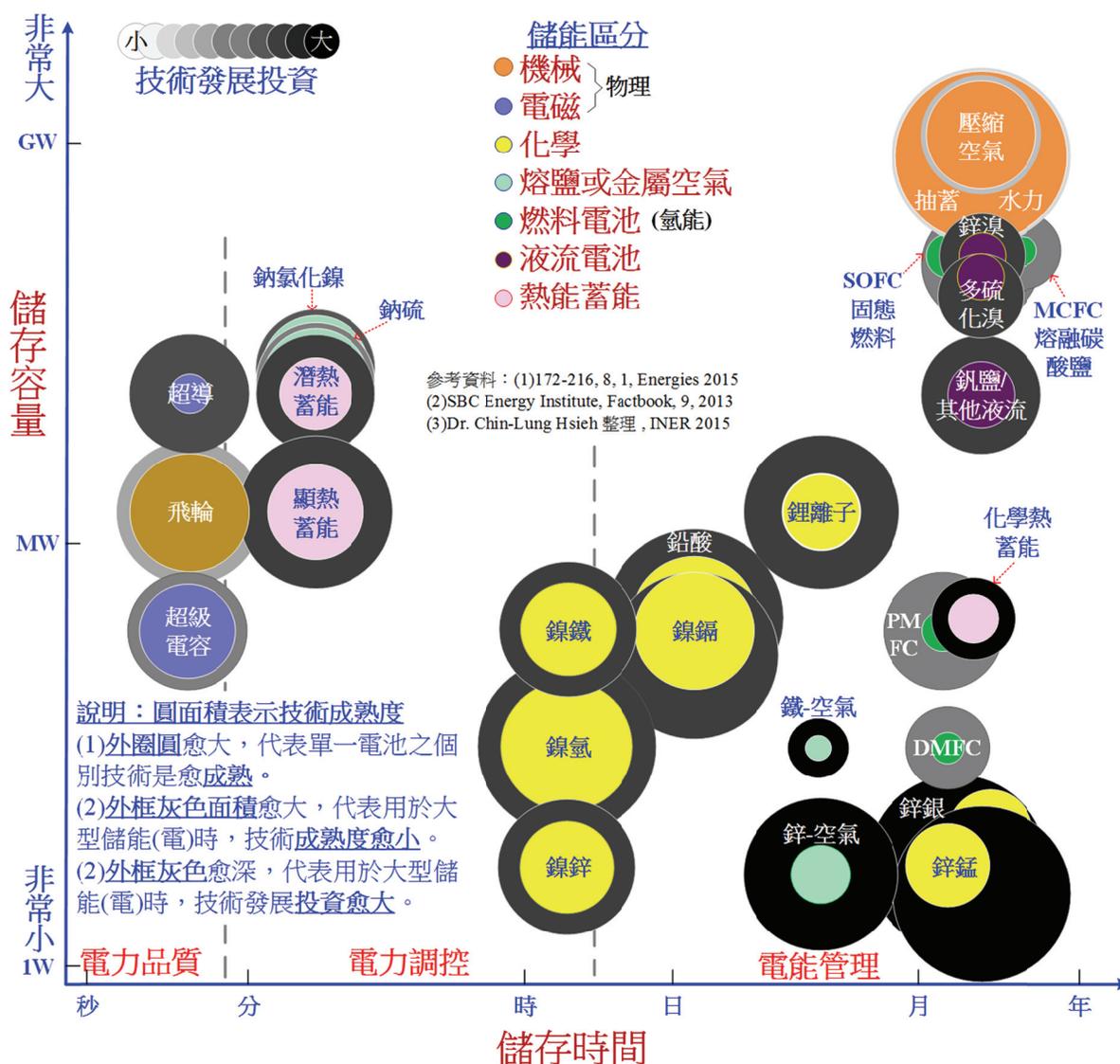


圖2 儲能系統之適用範圍、技術成熟度與發展投資關係圖(Sabihuddin *et al.*, 2015；SBC Energy Institute, 2013；謝錦隆，2005)

2013；謝錦隆，2005)。電池或儲能系統技術在小規模使用時大部分已屬於接近成熟階段，但是當進行大規模應用時，因其本質特性及串並聯機制等所衍生之平衡技術、電能管理(Battery Management System, BMS)與周邊運轉等問題，須再投資更多技術發展才能達到實用性與成熟度，這些系統之應用情境隨著國家與法規而有所不同，目前臺灣不見得適合所有電力儲存系統的應用。

可充放電的二次電池或電容比較不受地理環境的限制，可以做為行動式或可攜式電力儲存應用，包括鉛酸電池、鎳鎘電池、鎳

氫電池、鋰離子電池與超級電容。其中高能量密度，且技術成熟的鋰離子電池在各種電力儲存的應用上最為廣泛。而其他正在發展的液流電池、鈉硫電池、金屬空氣電池與鋅溴電池等等，若考量電池儲電系統的安全性、環境要求、儲電成本與技術成熟度(Banham-Hall *et al.*, 2011；Viswanathan *et al.*, 2012；Sabihuddin *et al.*, 2015)，則鈦氧化還原液流電池儲電系統(Vanadium Redox Flow Battery, VRFB)將會是未來頗具潛力的電網級儲電系統之一。鈦氧化還原液流電池儲電系統有著相對較低的儲電與維護成本。由安全性的觀點，鈦氧化還原液流

電池儲電系統並不會發生爆炸與自燃之危害。由環境的觀點，鈮氧化還原液流電池儲電系統是藉由電解液的氧化還原反應來進行能量的儲存與釋放，電解液可憑藉妥善的防護措施使其對於環境的傷害影響降至最低，能夠達到最適化性的電力儲存系統應用之必備條件。隨著建置量的增加將會使電池系統儲電之成本大幅的下降(日本富士經濟，2014)，電解液若以 V_2O_5 回收原料配製則成本也將大幅降至現有成本的10%。

本研究中以複合式電力儲存系統做為再生能源電力儲存的應用。評估條件是假設在未來臺灣有6%的總電力供應量是來自再生能源以及現有電力供應裝置均能以基載穩定供電，電力供給量是在能夠滿足臺灣民生與工業用電所需的假設前提下，評估複合式電力儲存系統包括現有的抽蓄水力外，若是以鈮氧化還原液流電池儲電系統技術進行新增設置使用時，在臺灣的可行性以及其所需的儲電量與場域面積。由於現階段臺灣風力發電機的建置規模遠高於其它類型的再生能源，因此，本研究選用以風力發電做為未來主要的再生能源供應方式進行分析探討之案例。

2. 鈮氧化還原液流電池儲電系統

2.1 運轉原理

鈮氧化還原液流電池儲電系統是一個電化學反應儲能電池，藉由不同價態鈮離子間的氧化還原反應進行電能的儲存與釋放。鈮氧化還原液流電池儲電系統主要是以電池堆、電解液槽與泵浦(Pump)及監控模組等所構建而成。藉由泵浦的運轉帶動鈮離子電解液在電池堆中循環，使不同價態的鈮離子電解液進行電荷的轉移，如圖3所示。電池組是由數個單電池串聯堆疊而成(如圖4)，藉由增減單電池串聯個數可以調整鈮氧化還原液流電池儲電系統的輸出電壓(功率)高低。電解液槽中是由不同價態的鈮離子化合物溶於硫酸水溶液中所構成，價態分別有：二價鈮離子(V^{2+})、三價鈮離子(V^{3+})、四價鈮離子(VO^{2+})與五價鈮離子(VO_2^+)。正極端電解液槽是以四價與五價鈮離子成分所組成(顏色個別為藍色與黃色)，而負極端電解液槽則是以二價與三價鈮離子成分所組成(顏色個別為紫色與綠色)。藉由泵浦的運轉帶動正、負極端電解

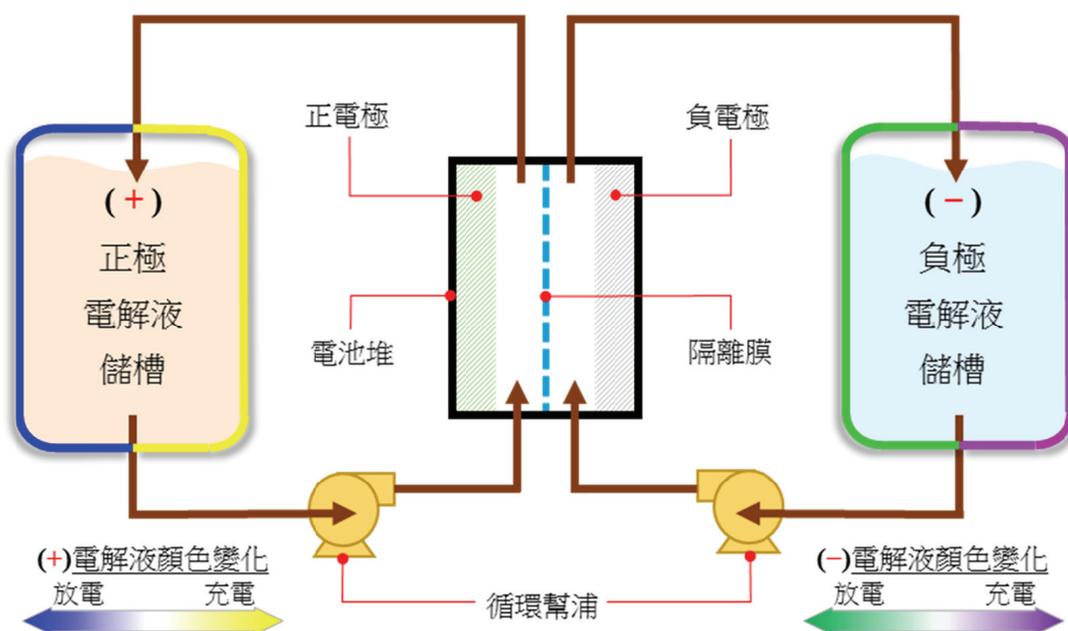


圖3 鈮氧化還原液流電池儲電系統運轉示意圖

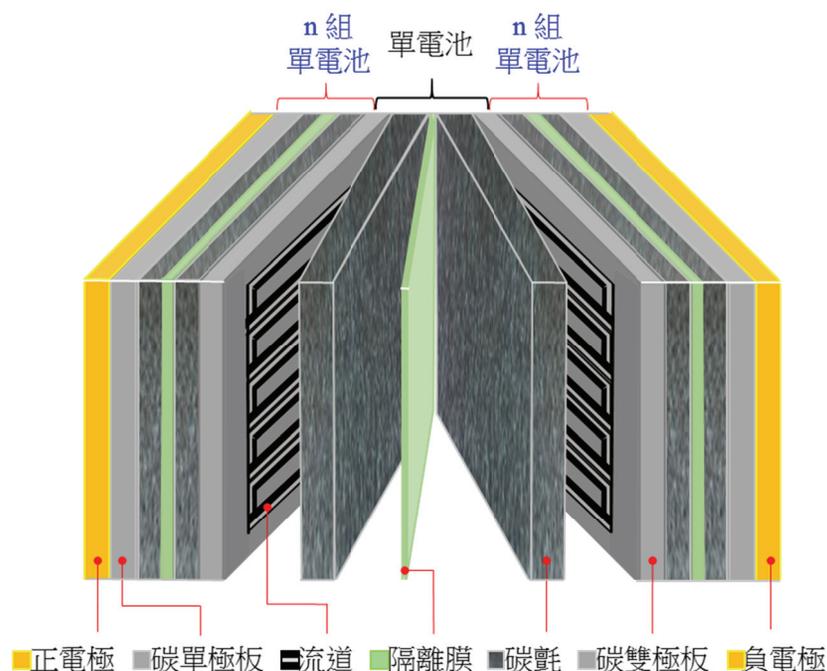


圖4 鈳氧化還原液流電池儲電系統之電池堆結構組件展開示意圖

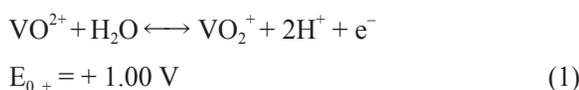
液在電池堆中進行充放電循環，使電能得以藉由此機制進行能量的儲存與釋放。

圖4電池組是由數個單電池串聯堆疊而成，電池中的正、負電極是由多孔的碳氈所組成。碳氈具有導電功能並且在酸液中相當安定。鈳離子在碳材表面反應速率不高，多孔的碳氈提供較大的反應表面積並且有適度大小的孔道讓電解液可以低壓降快速通過。電解液的主要組成是硫酸與不同價的鈳離子。目前隔離膜使用美國杜邦的Nafion 117。該隔離膜具有質子交換功能。鈳氧化還原液流電池使用它，可以降低正、負極鈳離子交互滲透的程度。

當鈳氧化還原液流電池儲電系統進行充放電反應時，電解液中不同價態的鈳離子將進行氧化還原反應。正極與負極的化學反應分別如式(1)與式(2)所示。鈳氧化還原液流電池儲電系統全反應的理論電壓為1.26 V。在充電過程時正、負極電解液中的四、三價鈳離子漸漸分別轉變為五、二價鈳離子，而在放電過程時正、負極電解液中的五、二價鈳離子漸漸分別轉變為四、三價鈳離子。因此可藉由鈳離子價數的濃度高低來判別鈳氧化還原液流電池儲電系統

充放電狀態。

正極半反應式：



負極半反應式：



在上述鈳氧化還原液流電池儲電系統化學反應式中也可由Nernst方程式來表示充放電反應，如式(3)所示。隨著電池充放電反應的進行，不同價態鈳離子間將會產生氧化還原反應而造成電解液組成分的改變，進而影響到電池電壓電量狀態的變化。

$$E = (E_{0,+} - E_{0,-}) + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{VO}_2^+][\text{H}^+]^2[\text{V}^{2+}]}{[\text{VO}^{2+}][\text{V}^{3+}]} \quad (3)$$

2.2 鈳氧化還原液流電池儲電系統優缺點分析

鈳氧化還原液流電池儲電系統為一個電化學反應儲能電池，相較於其他二次電池(鉛酸電池、鎳鎘電池、鎳氫電池與鋰離子電池等等…)

具有以下優點：

- (1) 可彈性設計電池輸出功率。釩氧化還原液流電池儲電系統輸出電壓的高低，可藉由調整電池堆中串聯的單電池個數來改變釩氧化還原液流電池儲電系統輸出電壓的大小，而雙(單)極板的反應面積也與釩氧化還原液流電池儲電系統輸出電流成正比，因此也可藉由增減雙(單)極板反應面積來改變釩氧化還原液流電池儲電系統輸出電流的多寡。釩氧化還原液流電池儲電系統的輸出功率可以藉由單電池串聯數與雙(單)極板面積來調整設計與擴充。
- (2) 可彈性設計電池儲電容量。釩氧化還原液流電池儲電系統儲電容量的高低，可由電解液內含釩鹽量的多寡所決定，例如增加電解液儲槽的體積或者提高電解液的濃度，使電解液含釩鹽量越多，則系統的儲電容量越高，反之，則越低。具有可調式的儲電容量設計與擴充，非常適合大容量分散式儲電的應用。
- (3) 無爆炸與自燃的危險。釩氧化還原液流電池儲電系統之電解液使用含釩離子的水性溶液，沒有揮發性或易燃性的化學物質。即便將正、負極兩端的電解液相混合也無危險，只是會略為使混合的電解液溫度升高。
- (4) 低電池自放電率。由於分離的正、負極電解液槽設計可長期保存，避免正、負極電解液相混合產生自放電反應，使得釩氧化還原液流電池儲電系統具有極低的自放電率。具深度充放電特性，電解液活性物質均為液相，不涉及固相反應，有利於長期運轉使用。
- (5) 高電池充放電循環壽命。充放電循環壽命可超過10,000次，電極(碳單、雙極板)本身僅做觸媒與導電功能，並不參與反應。電化學反應發生在流經電池堆之水性電解液中。在妥善的操作條件下運轉，釩氧化還原液流電池儲電系統具有相當高的循環壽命。
- (6) 充放電功率與儲電量可以依需求分別調整。以定置型儲電系統的應用觀點來看，可調式

的輸出功率與儲電容量設計，使釩氧化還原液流電池儲電系統具有高自由度的儲電應用。

- (7) 容易偵測電池充電電量。電力的儲存量可以精確地測量出來，電池的電量可以由電池開路電壓(OCV, open cell voltage)或者由電解液之溶液色澤換算出。式(3)顯示電池電壓隨著電解液組成而變，電池的充放電狀態(State of Charge, SOC)即可由電壓換算出。釩離子二、三、四、五價的顏色分別為紫、綠、藍、黃，隨著電池充放電，電解液組成改變使得電解液色澤也隨之變化。因此也可藉由UV-VIS光譜儀等技術觀察電解液色澤變化，來做為簡單精確地判別電池SOC的方法。
- (8) 環保與安全性高。電池堆關鍵組件主要為碳氈、石墨複材電極板(碳單、雙極板)與隔離膜等，均為可以資源回收處理之，電解液揮發性極低在正確運轉操作與安全防護下之安全性可以確保，沒有污染排放問題，維護簡單，運營成本低。不易受到過充與低放的影響，便利操作運轉。
- (9) 電量變動均化性高。正負極之電解液於充放電後均各自循環進入電解液桶槽中迅速混合均勻，無一般二次電池因固體電解質反應不均、或氧化還原逆向產物結構差異性、以及電池串並聯所引起的嚴重不均勻性問題。流動性的電解液，使電池堆中各個單電池基本狀態一致，可靠性高。
- (10) 環境穩定性高。具主動的熱管理機制，水性電解液的大體積及水的大比熱值特性，使得系統散熱或保溫容易控制，電池的性能穩定及組件的壽命更長。
- (11) 維護成本低。除隔離膜與電解液外，其他材料價格便宜，來源豐富，不需要貴金屬作電極(碳單、雙極板)催化劑，成本低。結構簡單，更換和維修容易，維護工作量需求小。正負極使用同一種釩離子的電解液，避免了電解液交叉污染處理問題，提

高了電池的效率和壽命。

- (12) 可以同時對系統充電和放電。充放電方式可以根據不同的應用需求進行調整。可以同時有一種或多種電源輸入，也可以輸出多種電壓。例如可以用串聯電池堆的電壓放電，而在電池堆的另一部分用不同的電壓進行充電。
- (13) 雙極性電極設計避免漏電流的產生。在碳雙極板設計中，一個單電池的正極同時作為下一個串聯單電池的負極使用，建立接觸電阻最小化的高電壓電池堆。正負電極(碳單、雙極板)共用電解液不會產生漏電流的現象，同時在放電時，相對較小容量的單電池會具有反充電作用。

鈳氧化還原液流電池儲電系統具有眾多優點的同時，仍受限於材料與系統的因素產生了以下幾項缺點尚需改進：

- (1) 狹窄操作溫度範圍。電解液中五價鈳離子(VO_2^+)對熱的穩定性較差，當電解液操作溫度高於 45°C 時會產生五氧化二鈳(V_2O_5)的析出沉澱。於零下冰點(0°C)時電解液也沒辦法運作，因此一般鈳氧化還原液流電池儲電系統運轉溫度都維持在 $10\text{-}40^\circ\text{C}$ 之間，避免以上的問題產生。
- (2) 低能量密度。相較於鋰離子電池的高能量密度($0.2\text{-}0.5\text{ kWh/L}$)，鈳氧化還原液流電池儲電系統由於鈳離子在電解液中最高濃度僅能達 4 M 左右，鈳氧化還原液流電池儲電系統之能量密度相對地較低($\sim 0.02\text{ kWh/L}$)。尚不適用於移動式或攜帶式儲電的應用。
- (3) 強酸腐蝕環境。電解液含有強酸，當鈳氧化還原液流電池儲電系統運轉不當時，在正極端的石墨碳板(電極)容易受電解液所侵蝕，造成電池堆的損壞。
- (4) 儲電成本偏高。目前鈳氧化還原液流電池儲電系統產量少，各示範運轉多為個別客製化建置。此外電解液價格昂貴，這些因素造成整體儲電成本過高。
- (5) 監控模組需求。液流電池儲電系統需泵浦驅

動與流量控制器及管路系統才能進行電解液之循環作用，此部分若失效或耗能將失去儲電功能。維持液體流動所消耗的功率將降低系統的能量效率及影響可靠性。

- (6) 商用運轉應用之技術與投資待再發展。能量密度低造成充放電速度慢、電解液體積龐大，供電端特性與負載端需求之差異會影響整體系統之效率，在實現商用運轉應用時須投入待開發的技術必須包括分析組件、系統在長期穩定運轉的原理、特性與整合，以確認實驗室樣品和實際產品、技術開發和商業產品間的差異性與相關性，才能解決實際應用時所面臨的問題。
- (7) 電池堆結構裝封影響。由於電解液通過並聯管路進入在電路上形成串聯的各單電池流道，因此各單電池之間形成的漏電流可能會導致效率的降低。
- (8) 感電、氫爆與洩漏問題。畢竟這是一個電力與化學的集合體，存在感電與化學雙重危害的問題，到目前為止所有的鈳氧化還原液流電池儲電系統都還沒有經過由政府與任何獨立測試機構進行任何安全檢測認證作業過，因此發展與應用時均須特別注意安全防護機制。氫氣和二氧化碳是充放電時的副產物，須注意通風與嚴禁煙火以防氫爆。其附屬設備與傳統電池相比略顯複雜，易發生洩漏，且增加建置及維護更換成本。

2.3 鈳氧化還原液流電池儲電系統現有示範運轉

過去國內針對具有充放電功能的電力儲存系統研究主要偏重於小型的鉛酸電池與鋰離子電池而較少著墨於液流電池儲電系統的研發，核能研究所於2005年起開始探討儲能系統與再生能源整合應用之需求(謝錦隆，2005)，並於2010年起與國立聯合大學合作儲電系統(包括鈳氧化還原液流與二次電池)之特性評估與發展技術之研究，為實測儲電系統特性與應用發展，便開始規劃國內首座儲電系統聯合運轉實測展



圖5 核能研究所儲電系統聯合運轉實測展示區

示區(如圖5)，於2014年起獲得經濟部能源局研究機構能源科技專案經費補助建置電網級儲能系統，陸續已建置完成總量為60 kW充放電容量壽命測試機組與5 kW/20 kWh鈳氧化還原液流電池儲電系統(VRFB)，並整合2 kW太陽光電發電系統(PV)建置完成行動式供電儲電示範應用技術(圖5左方)，以及5 kW/10 kWh鈳氧化還原液流電池儲電系統家用型微電網示範運轉系統，並進行建立儲電系統運轉實測及情境動態應用研發場區，發展內容與規模均持續在規劃擴充中，以奠立國內基礎應用與整合技術並建立產業化利基為目標。除此之外，於2013年，工研院綠能所接受台電委託，設計並建置一座1 kW/2 kWh的示範運轉測試平台。工研院將於2015年完成7 kW/31.5 kWh或7 kW/52.5 kWh的鈳氧化還原液流儲電系統。台電電力綜合研究所於2012年，由日本住友電工引進一座2 kW/10 kWh的鈳氧化還原液流儲電系統。該座儲電系統儲存屋頂裝置太陽光電的電能，供應屋內冷氣及其他電器用品使用。

國外VRFB儲能系統的示範驗證案例有許多件。在歐洲於2004年建置1.1 kW太陽光電發電/1 kW風力發電/1 kW電池的發電/儲電系統。加拿大VRB Power公司已在全球12個地點以鈳氧化還原液流電池儲電系統作為風力發電、太陽光電發電的能源管理或作為商業大樓的備用電力。美國猶他州設立250 kW，可儲存電量2,000 kWh的電池作為尖峰/離峰負載平衡。日本住友電工公司(Sumitomo Electric Industries)在

2000年開始先後設立6座儲電量不同的液流電池儲電系統在商業大樓(Tokuda *et al.*, 2000)，這6座的功率/儲電度數分別是450 kW/900 kWh、100 kW/800 kWh、200 kW/1,600 kWh、170 kW/1,020 kWh、3 MW/1.25 kWh - 1.5 MW/1,500 kWh與30 kW/240 kWh，其他在日本所推動的鈳氧化還原液流電池儲電系統應用實例則陸續建置中。此外日本與加拿大VRB Power合作在2007年完成32 MW風力發電廠與4 MW/1.5 h(尖峰功率6 MW)的液流電池儲電設施。中國大陸於2009年成立普能科技公司(Prudent Energy)，該公司後來合併加拿大VRB Power Inc.，成為一家國際性全鈳氧化還原液流電池儲電系統公司。鈳氧化還原液流電池儲電系統也可有效率地在風力發電系統上應用(Clean Energy, 2005)，在日本北海道(Hokkaido)所在地的島嶼上建置了30.6 MW的風力發電廠(Clean Energy)，由於風力發電機輸出功率的間歇性波動，為了使風力發電廠輸出功率平穩因而搭配鈳氧化還原液流電池儲電系統，並有規劃地將電能有效率地使用。Tomamae Wind Villa Power Plant搭配4 MW/1.5 h之鈳氧化還原液流電池儲電系統，已於2005年正式運轉。

日本的住友電工於橫濱(Yokohama)建置百萬瓦級的儲電系統(Shibata *et al.*, 2013；Sumitomo Electric, 2012 & 2014)，該電廠結合了聚焦型太陽光電發電系統(CPV, concentrated photovoltaic solar cell)、天然氣渦輪發電機、以及鈳氧化還原液流電池儲電系統(VRFB)，該廠



圖6 橫濱百萬瓦級的發電/儲電系統。系統包含1MW/5h的釩氧化還原液流電池儲電系統(Shibata 2013；Sumitomo Electric 2012 & 2014)

主要電力來源是由66 kV的市電供應，天然氣發電機供應廠房尖峰用電，該系統已於2012年7月正式運轉，如圖6所示。該橫濱太陽光電發電廠為了有效率地結合釩氧化還原液流電池儲電系統，搭配能源管理系統(Energy Management System, EMS)妥善地規劃電能使用供給住友電工於橫濱的工廠。每座液流電池儲電系統配備正極與負極電解液槽兩座，在每座釩氧化還原液流電池儲電系統與儲槽下均有漏液槽，確保電池或電解液儲槽洩漏時，電解液不會外洩到儲電系統外部。釩氧化還原液流電池儲電系統最大功率為1 MW，儲電量為5 MWh。這套CPV發電/VRFB儲電示範運轉是整個橫濱智慧城市計畫(YSCP, Yokohama Smart City Project)的一部分，住友電工建置這套系統用以展示驗證所謂的工廠能源管理系統(FEMS, factory energy management system)的開發技術。

除了日本住友電工以及中國大陸北京普能、大連融科等之外，近年Primus Power (Primus Power網頁)、EnerVault (EnerVault網

頁, Fe-Cr液流電池)、Imergy (Deeya Energy, Imergy網頁)以及德國Schmid Group (SCHMID Energy Systems網頁)、CellCube結合美國鈮業(American Vanadium網頁)、Schmitz等公司陸續投入發展液流電池儲電系統在大型儲電方面的應用。

美國、中國大陸、日本、澳洲與歐洲諸國之產學研機構對於液流電池儲電系統均投入相當多的資源進行研究及持續發展電網級儲電技術與應用。而在國內的行政院原子能委員會核能研究所、國立聯合大學、台灣電力公司電力綜合研究所、工業技術研院綠能與環境研究所、科技部與經濟部能源局等在此領域也陸續有相關的研究發展與計畫之執行。其中釩氧化還原液流電池儲電系統在全球雖然有許多大型儲電示範運轉成功的案例，但是它的充放電效率、功率密度、價格、操作溫度範圍、運轉與應用技術發展，甚至能量密度與關鍵組件材料及結構設計等仍然有許多需要而且有機會再改進的空間。

由於鈳氧化還原液流電池儲電系統是為一個電化學反應儲能電池，在充放電循環過程中若有不當的充放電運作則將直接影響到鈳氧化還原液流電池儲電系統效率的好壞。Skyllas-Kazacos & Goh (2012c)、Skyllas-Kazacos等(2011b)與Zhang等(2011)提出鈳離子經由擴散作用產生自放電現象的發生，以及Hu等(2011)提出五價鈳離子熱穩定性差的原因。由此可發現穩定的系統運轉技術，可有效地提升鈳氧化還原液流電池儲電系統的效率與壽命，因此搭配完善的監控與自動化系統可有效地改善鈳氧化還原液流電池儲電系統自放電現象與熱穩定性低等問題發生。

Skyllas-Kazacos等對液流電池儲電系統做了很完整的文獻回顧(Skyllas-Kazacos *et al.*, 2011a)，包括各種液流電池儲電系統，尤其是鈳氧化還原液流電池儲電系統。鈳氧化還原液流電池儲電系統是藉由鈳離子的氧化還原反應進行能量的儲存與釋放，電池的操作條件會影響著鈳氧化還原液流電池儲電系統特性的效率與壽命，為了瞭解鈳氧化還原液流電池儲電系統的運作過程，而有相關的鈳電池模型被提出。Zhang等(2009)提出一個簡單的鈳氧化還原液流電池儲電系統模型，以二維靜態的條件下模擬電池的運作，Vynnycky (2011)也是以二維靜態的條件下建構出鈳氧化還原液流電池單電池模型。在非等溫模型建構下，Shah等(2009)以二維動態條件下建構鈳氧化還原液流電池儲電系統模型，計算鈳電池中電流與電位分布。Skyllas-Kazacos等(2012a & b)建構鈳氧化還原液流電池儲電系統的熱模型，觀察溫度的變動對鈳氧化還原液流電池儲電系統的特性變化。但這些模型並未由整體系統的運轉狀態來分析鈳氧化還原液流電池儲電系統，除此之外，Shah等(2008)、You等(2009)、Al-Fetlawi等(2009)、Ma等(2011)與Qiu等(2012)僅著重在模擬鈳氧化還原液流電池儲電系統內部熱傳、電流分布與質傳等現象，而尚未在鈳氧化還原液流電池儲電系統應用模擬與計算上搜尋到相關領域之

研究文獻。

3. 運行性評估流程與情境假設

本研究將以(a)簡化的基載電力與風力發電、(b)儲電系統與(c)臺灣「日用電需求量」這三個關聯層面進行評估儲電系統在臺灣之可行性。儲電系統以鈳氧化還原液流電池為例，以風力發電代表再生能源的變化。類似方法可以應用到其他電池，例如鋰離子電池、鉛酸電池，以及正在發展的金屬空氣電池等等。太陽光電的產電變化也可以利用類似方式分析。分析步驟如下(如圖7之流程)。

3.1 評估方法與流程

- (1) 新竹氣象觀測站資訊：每日風力發電的變化量相當大。風力發電為未來臺灣再生能源發展的主力之一。它的輸出電能需經過儲電系統加以調節平順化。本研究假設以鈳氧化還原液流電池儲電系統為例，評估儲電系統在臺灣運用的可行性。為了評估風力發電機每日發電量，可藉由風速強弱推算出風力發電機輸出功率。臺灣各地風場風速隨著時間、季節有很大的起伏。由於臺灣風力發電機主要架設在西部沿岸，為了簡化模擬情境，選取新竹氣象觀測站所觀測的風場風速資訊，藉由風速大小來評估出風力發電機每日發電量的變化量。
- (2) Enercon E-70/2,300 kW風力發電機：臺灣現有風力發電機裝置的款式種類眾多，因此本研究以臺灣現有較具規模的風力發電廠之風力發電機型號為進行評估的目標，其中以鹿威與中威風力發電廠的風力發電機裝置容量較具規模，分別為現今臺灣風力發電廠裝置容量的冠亞軍，其風力發電機的型號為Enercon E-70/2,300 kW。藉由新竹氣象觀測站所觀測到的風速，對照的Enercon E-70/2,300 kW風力發電機輸出功率曲線圖，即可計算出風力發電機每日的發電量數值。

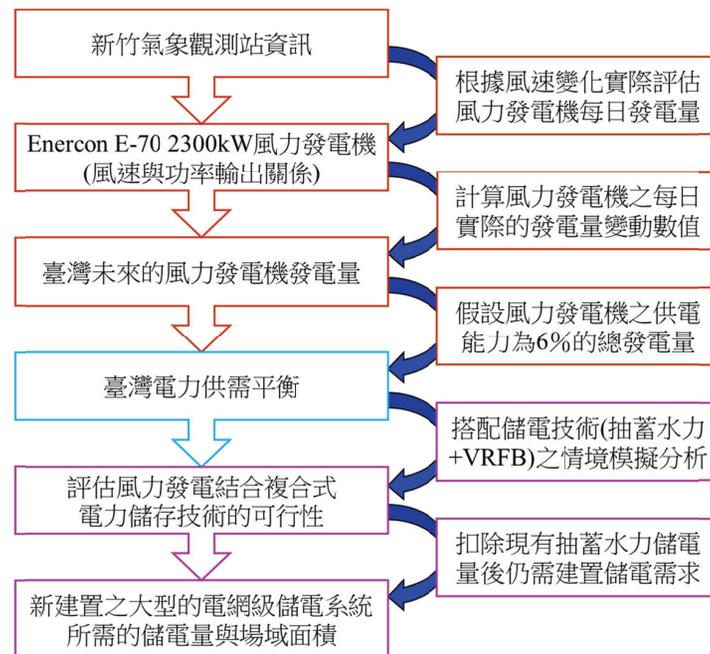


圖7 臺灣運行鈳氧化還原液流電池儲電系統評估流程

- (3) 臺灣未來的風力發電機發電量：臺灣現有再生能源發電量遠低於火力發電與核能發電此類基載能源供應，因此為了追求能源自主性的目標，將未來臺灣風力發電機提供的電量增加到現今總發電量6%的供電能力，藉此朝向能源自主性的發展目標邁進。
- (4) 臺灣電力供需平衡：依據基載能源供應與再生能源供應所產生的電量，並搭配抽蓄水力與鈳氧化還原液流電池儲電系統(VRFB)聯合之電力儲存系統進行電量分配與調節，對臺灣每日用電需求進行電力供需平衡評估，使基載與再生能源供應、電力儲存系統與臺灣每日用電需求這三個關聯層面能夠結合在一起，達到臺灣電力的供需平衡。
- (5) 評估風力發電結合複合式電力儲存技術的可行性：藉由複合式電力儲存(抽蓄水力+VRFB)的運用，有效地改善再生能源潛在不穩定電能供應問題。以臺灣為應用對象進行估算出複合式電力儲存系統總儲電容量，並以該儲電容量推算所需新建置之鈳氧化還原液流電池儲電系統規模的大小與場域面積之需求。

3.2 臺灣每日用電所需

臺灣電力消耗主要可以分成民生與工業兩區塊，而工業用電佔了主要的用電需求。臺灣用電需求依用電區塊化可分為：北部、中部、南部與東部用電。以台電2013.12.02資料而言，北、中、南與東部的用電分別是783、602、720與35萬瓩。北部經濟活動較為頻繁導致用電需求高，而東部地區大都以民生用電為主，因此用電量則相對較低的許多。當日尖峰與離峰供電分別為2,600與1,700萬瓩。每日約有900萬瓩的變動。

3.3 再生能源電力供應情境來源

現今臺灣再生能源的電力供應主要以風力發電與太陽光電發電為主。太陽光電每日做周期性的變化，日間最高發電期間與最高電力負載期間相符。但是風力發電量隨時而變，有時夜間發電量較高，比較需要儲電技術來維護電網的供電品質。因此本研究針對未來風力發電搭配儲電為研究主題。由於風力發電輸出功率的高低受限於風速大小以及風場的穩定性，因此風力發電機架設的地點將影響到發電效率的

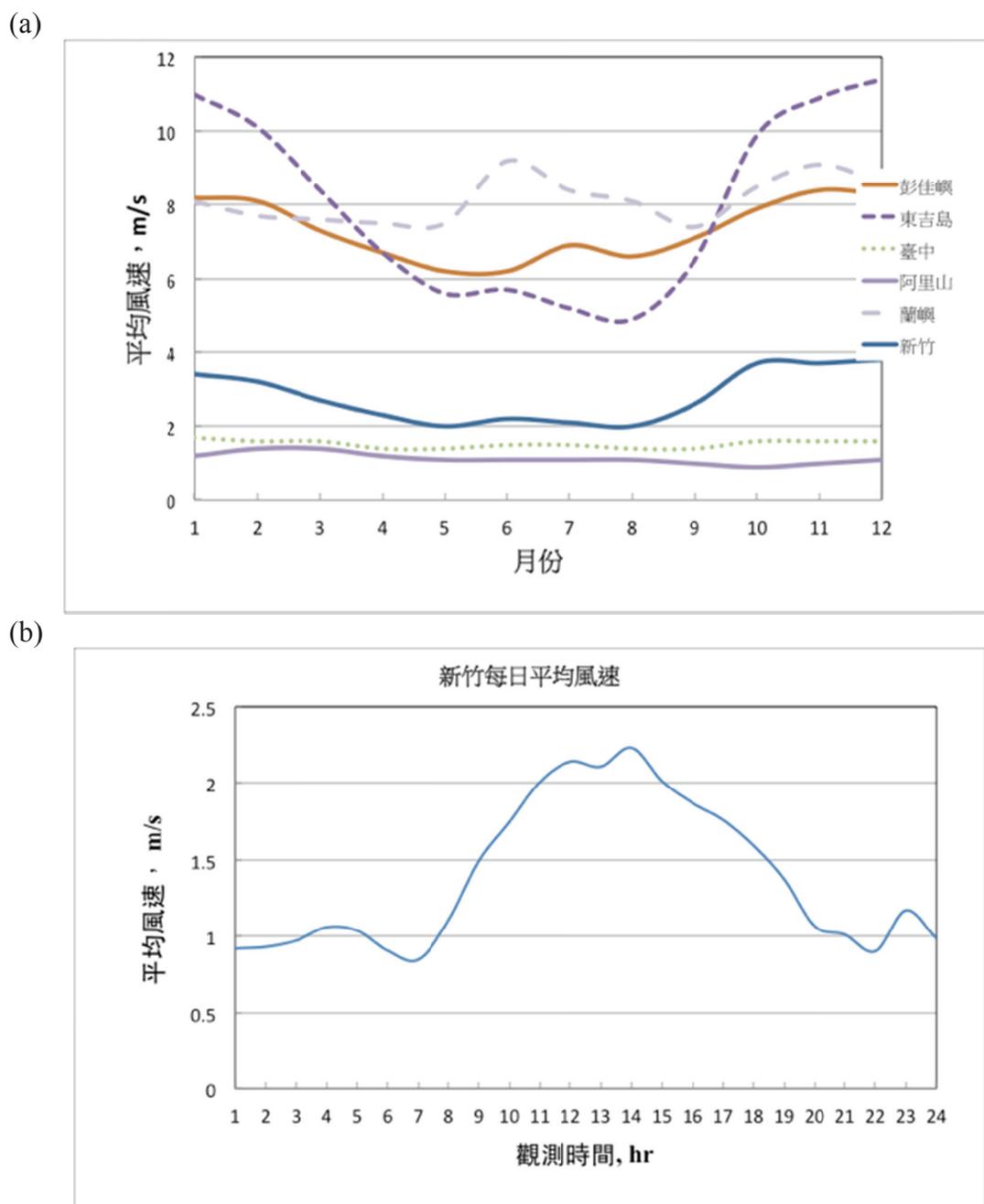


圖8 氣象觀測站風速變化(中央氣象局網頁) (a)臺灣各地於1981-2010年間月平均風速，(b)新竹2015.05.04-2015.06.03期間每小時平均風速。

高低。圖8a是臺灣各地於1981-2010年間月平均風速(中央氣象局網頁)。圖中僅呈現平均風速最高與較低的資料。彭佳嶼、東吉島與蘭嶼等離島的平均風速較高。本島各地風速較低。目前臺灣風力發電機的架設主要以西半部(桃園到彰化沿海地區)為主，形成此現象的主要因素是由於有較佳且穩定的風場潛能以及鄰近輸電線路電網便於電力輸送以及較低的輸電消耗損

失。本研究為簡化分析以西部沿岸中的新竹氣象觀測站所量測到的風速大小為依據，來做為評估風力發電機發電量多寡的參考依據，以新竹2015.05.04-2015.06.03期間每小時平均風速進行風力發電機發電量實際估算。新竹氣象觀測站所量測到的風速以圖8b表示(中央氣象局網頁)。由於選擇的日期以冬季月份為主，因此觀測站所量測的風向受到季風的影響主要以東北

風向為主，而且圖8a與8b中可以觀察出風速的起伏變化有相當顯著的不確定性，此一特性因素深深影響到風力發電併入電網應用時的功率浮動問題。

臺灣現今風力發電廠以鹿威與中威規模較為龐大，其風場所架設的風力發電機以Enercon所製造的E-70/2,300 kW機型為主，此款式的風力發電機在不同風速下風力發電機輸出功率變化如圖9所示(Enercon網頁)。由該圖可觀察出此款風力發電機需在一定的風速下才可啟動進行發電，然而在過高的風速下受限於機組的承受能力與安全性考量，會以定功率輸出做為保護，因此在功率係數最高的條件下，風力發電機將會有最佳的輸出效率。本研究以Enercon所製造的E-70/2,300 kW風力發電機特性做為模擬計算基礎。風力發電機輸出功率(P)是風速(V)、風力發電機迎風截面積(A)、空氣密度(ρ)等等的函數。它可以由式(4)計算出來。

$$P = (1/2)\rho AC_p V^3, P = 2,310 \text{ kW} \quad (\text{if } V > 16 \text{ m s}^{-1}) \quad (4)$$

該款風機保護裝置使得風速在16 m s⁻¹以上，

即保持固定風力發電機輸出功率在2,310 kW。其中C_p是風力發電機功率係數，它是風速的函數。本研究以式(5)回歸分析方法計算。

$$C_p = \sum_{n=0}^5 C_n \times V^n \quad (5)$$

計算所用C₀-C₅的C_p值迴歸係數分別是-0.1539、0.156、-5.8 × 10⁻³、-7.8 × 10⁻⁴、5.42 × 10⁻⁵、-9.27 × 10⁻⁷。氣象所觀測到的是在地面(H₀ = 1 m)的風速(V₀)。風力發電機設置在離地面50 m (H = 50 m)的位置，在風力發電機高度所感測到的風速(V)可以下式(Wind profile power law)， $\alpha \sim 1/7$ ，做粗略的估算。

$$V = V_0 \times \left[\frac{H}{H_0} \right]^\alpha \quad (6)$$

圖9中風力發電機輸出功率(P)曲線與功率係數(C_p)曲線便是分別由式4與式5計算出來。

4. 結果與討論

4.1 臺灣風力發電評估

從風速的大小對風力發電機輸出功率的影響

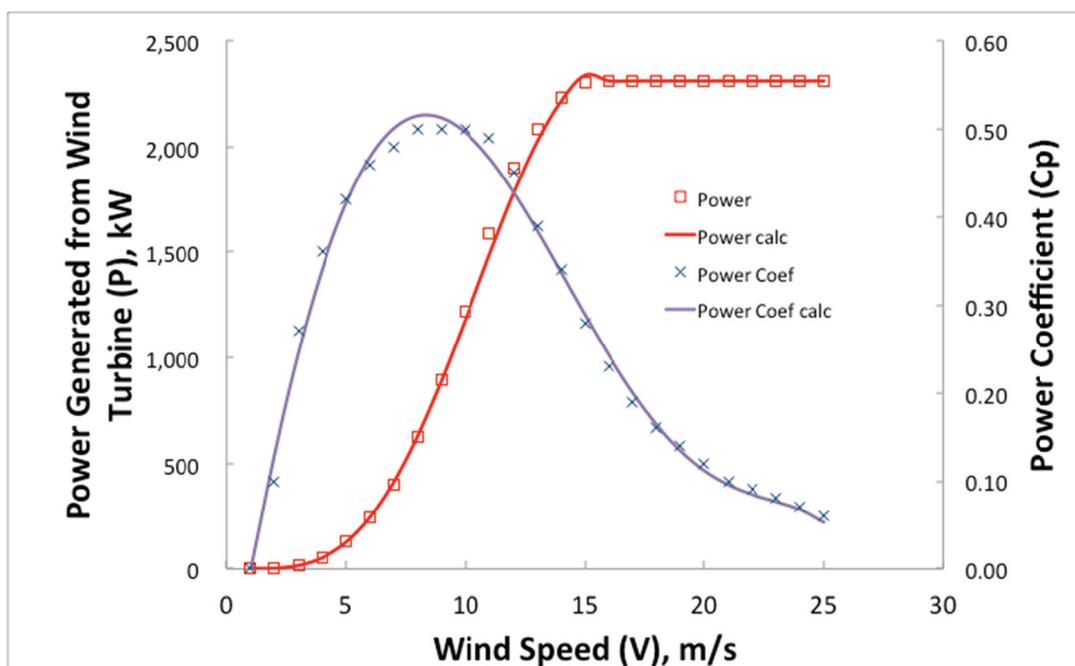


圖9 德國Enercon E-70/2,300 kW風力發電機對應風速下之功率輸出(Enercon網頁)

響上觀察，由於不同機型款式的風力發電機有著不同啟動風速與過大風速限制保護，在過低的風速下將無法進行啟動發電，而在過高的風速下也會有功率限制與風力發電機保護措施。由新竹氣象觀測站所量測的風速下(圖8b)，對應Enercon所製造的E-70/2,300 kW風力發電機對應風速下之功率輸出(圖10)計算出該風力發電機單機輸出功率如圖10所示。這代表每日風機的發電量會有數百kW的起伏變化量。在不同的地域或月份，彭佳嶼、臺中、新竹會有顯著的不同變化。本研究僅以新竹為例，簡化分析。將圖10風力發電機單機輸出功率計算值進行統計分析，可以得到每日E-70/2,300 kW風力發電機的累積發電量。

4.2 臺灣電力供需評估

為了有效改善風力發電輸出功率不穩定的影響，與電力儲存系統的結合將能有效地達到平穩輸出功率的成效，使之能夠直接併入電網使用。臺灣每日的用電功率消耗($P_{consume}$)隨時間而變動，如圖11所示(包含工作日與假日)。上

午5時開始，用電量隨著時間持續攀升，到中午達到高峰。12:00-13:00午休時間，用電量略減。13:00以後維持用電高峰，到17:00-19:00下班與晚餐時段用電達全日最高峰，以後用電量持續遞減。00:00-05:00深夜凌晨時段用電量最低。平常的工作日基本上用電量差異不大，然而假日的用電功率與工作日相比則明顯銳減了許多，此現象的形成與人民生活作息行為有所關聯，而產生相異的功率消耗量。用電量隨著每一工作日與假日而有所不同之外，夏日時冷氣機使用量是造成年度用電尖峰量的來源，在冬日時則用電量便較為低。

本研究中以臺灣「每日最大用電需求量」為參考之基準，假設以圖11中之2013年12月13日訂定為臺灣「日最大用電需求量」之參考基準，其當天的總用電消耗量(E_{total})約為546 GWh ($E_{total} = \int_0^{24} P_{consume} dt$)。這只是為了計算分析方便，真正計算需要分析一年365天，為期10年以上的數據較具代表性。本研究假設電力供應的主要來源可分成基載能源供應與再生能源供應。基載能源供應包含了火力發電與核能

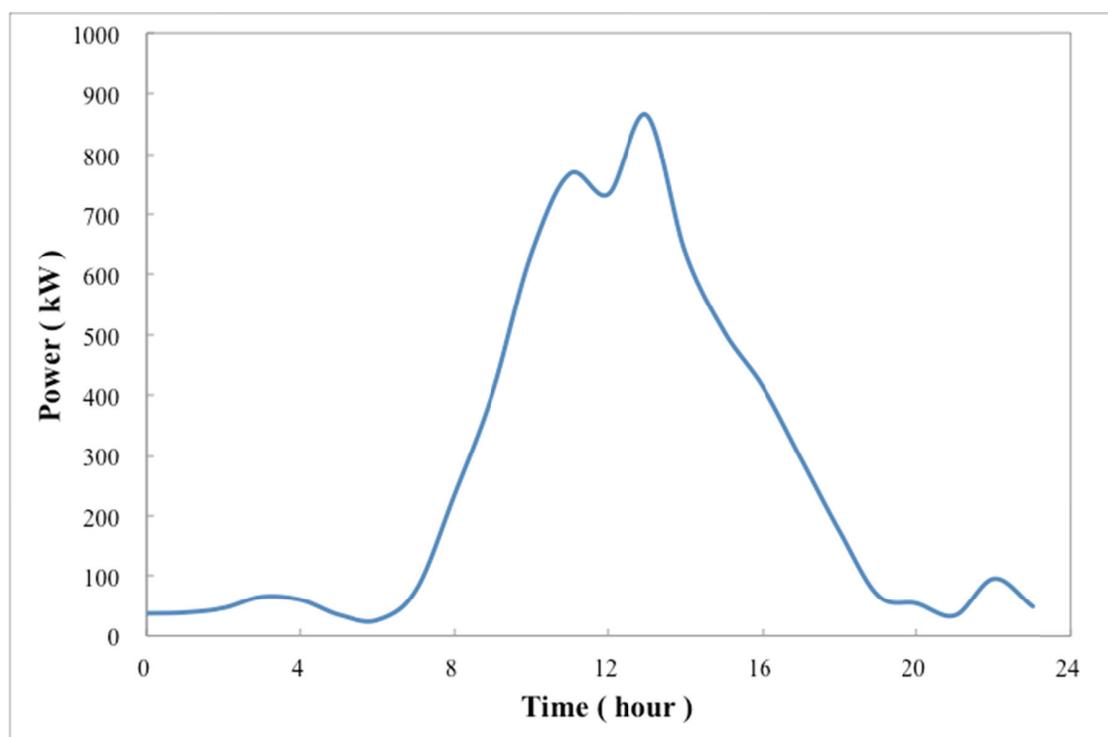


圖10 E-70/2,300 kW風力發電機單機輸出功率計算值

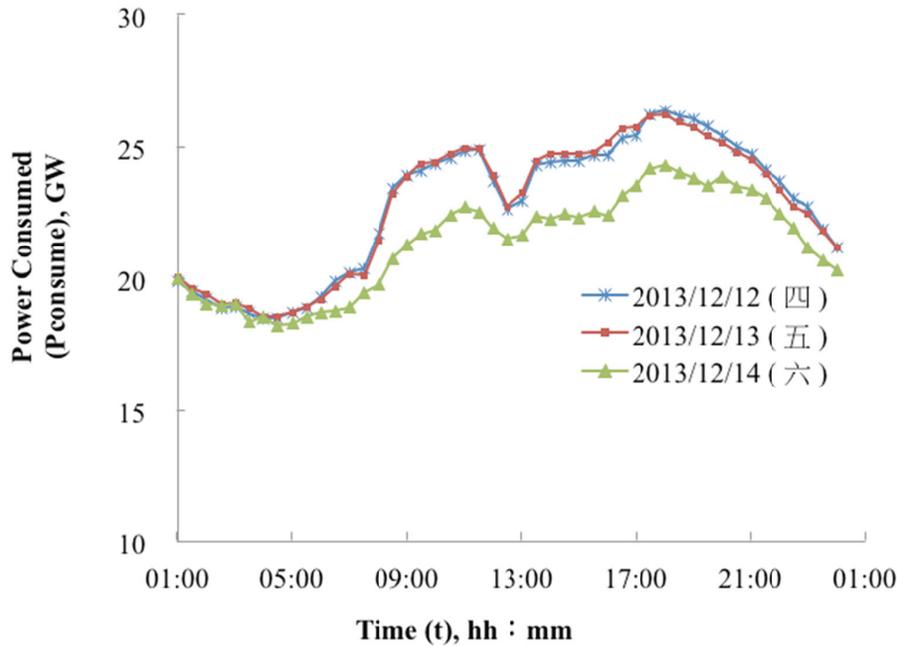


圖11 臺灣每日用電需求

發電，此類型式的發電設施能夠穩定地供應電力，不受環境氣候等因素而有所限制。假設降低此基載能源供應量，而以風力發電替補其與「日最大用電需求量」實際需求消耗所不足之量，進行情境分析。

假設整個電力系統的基載電源供應是呈現穩定持平的功率輸出。風力發電機總發電量以臺灣「日總用電消耗量」(「日最大用電需求量」)(E_{total})的6%作為未來「日風力發電機總發電量」(E_{wind})，並以圖10之西元2013年11月17日風力發電機當天發電變化量曲線做為參考之基準，計算風力發電機每日發電功率。

日總用電消耗量(日最大用電需求量)， E_{total}

$$E_{total} = 2013年12月13日當天用電量總和$$

$$E_{total} = \int_0^{24} P_{consume} dt = 546 \text{ GWh} \quad (7)$$

日風力發電機總發電量， E_{wind}

$$E_{wind} = E_{total} \times 6\% = 32.7 \text{ GWh} \quad (8)$$

日基載電力供應量， E_{base}

$$E_{base} = E_{total} - E_{wind} = 513 \text{ GWh} \quad (9)$$

每時段基載功率輸出， P_{base}

$$P_{base} = E_{base} \div 24 \text{ h} = 21.4 \text{ GW} \quad (10)$$

圖12為在無電力儲存設施下，每日電力供需情形。該圖中包括臺灣「日用電消耗功率」($P_{consume}$, Power Consumed)，「日基載供電功率」(P_{base} , Power Plant Generated)與風力發電機輸出功率(P_{wind} , Wind Turbine Generated)隨時間的變化。臺灣「日用電消耗功率」($P_{consume}$, Power Consumed)是直接選取圖11中之2013/12/13工作日的曲線。每時段基載功率輸出， P_{base} 由式9計算出。「日風力發電機輸出功率」， P_{wind} 則是以圖8中之2013/11/17風速與圖9之Enercon E-70/2,300 kW風力發電機特性曲線計算出，但是「日風力發電機總發電量」(E_{wind})須符合式(11)設定的上限要求。

$$E_{wind} = \int_0^{24} P_{wind} dt = 32.7 \text{ GWh} \quad (11)$$

由圖12顯示即使「日基載電力供應量」(E_{base})與「日風力發電機總發電量」(E_{wind})符合「日總用電消耗量」(E_{total})，但是在每時段供電功率無法與耗電功率相匹配(如圖12上方)。例如，午夜到凌晨時段即使風力發電機停機不

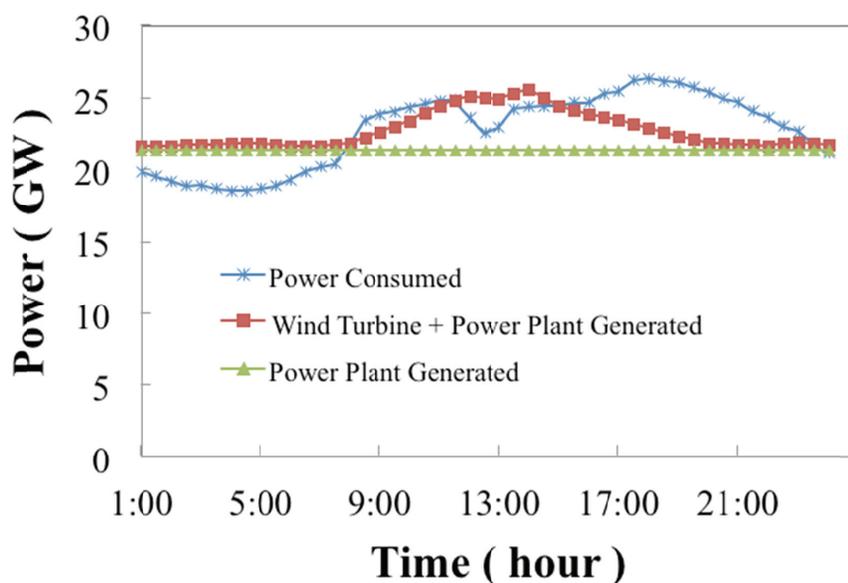


圖12 假設風力發電機供應6%的電能，基載機組穩定供應94%的電能情境下，臺灣每日電力供需情況。

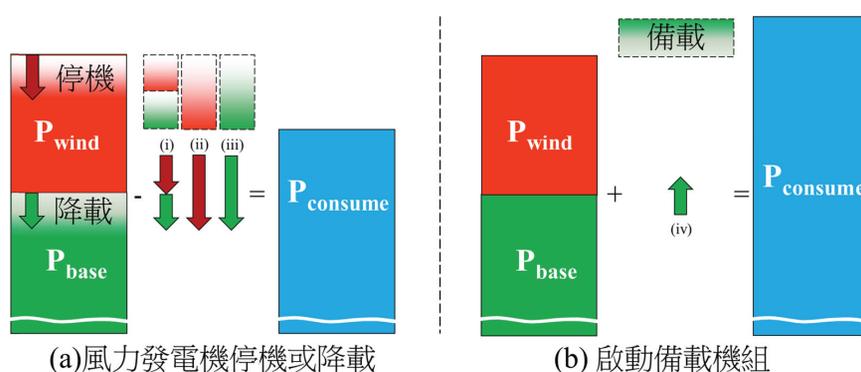


圖13 未加入適量電力儲存系統時擬欲維持電網供電平衡之策略

運轉，「日基載功率」(Power Plant Generated)之輸出量已超過「日消耗功率(Power Consumed)」之需求量。早上09:00-10:00或17:00-22:00晚間時段則用電消耗功率降低，如圖13在未加入適量電力儲存系統時擬欲維持電網供電平衡之二大策略為(a)當風力發電機加上基載輸出之功率量高於用電消耗功率量時，風力發電機必須進行停機或基載機組必須降載，包括(i)風力發電機停機加上降載、(ii)僅風力發電機停機或(iii)僅降載；(b)當風力發電機加上基載輸出之功率量低於用電消耗功率量時，則需(iv)啟動備載機組。

4.3 臺灣電力系統結合鈳氧化還原液流電池儲電系統評估

若圖12的臺灣每日電力供需情況不以發電備載機組進行昇載、降載予以平衡電網，而是以電力儲存系統作為電網電能供需的緩衝機制之設施時，則所需要之合理的儲電量應將是為何？本節將臺灣每日用電供應需求劃分成三部分：基載功率輸出、風力發電機輸出功率以及為達電網供需平衡所需的電力儲存系統之充放電功率量，如圖14所示。藍色的曲線為臺灣每日用電消耗功率($P_{consume}$, Power Consumed)，其包含了民生用電與工業用電所需。綠色的線

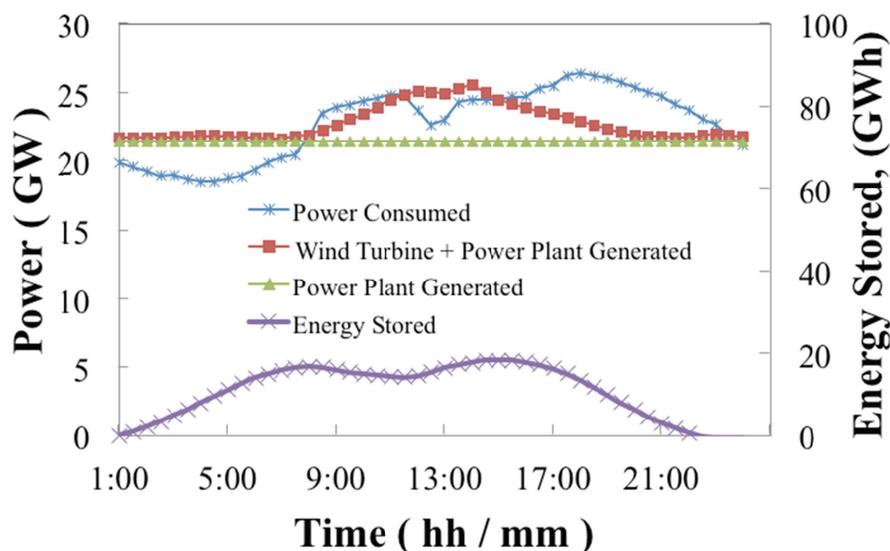


圖14 臺灣電力系統結合複合式電力儲存技術之供需平衡

條為基載功率輸出(P , Power Plant Generated)，為臺灣主要的能源供應端包含了火力發電與核能發電。紅色的曲線為基載功率輸出加上風力發電機輸出功率(Wind Turbine & Power Plant Generated)。圖14顯示紅色曲線與藍色曲線無法吻合，代表即使基載電力供應量(E_{base})與風力發電機總發電量(E_{wind})符合總用電消耗量(E_{total})，每時段供電功率量無法與耗電功率量相匹配。其間的差值即代表可以藉由電力儲存系統的儲(供)電(能)或充放電方式來平衡的需求量。計算結果如圖14下方紫色曲線部分(Energy Stored System)即為所需之電力儲存系統的電量($E_{battery}$)。午夜到清晨時段(01:00-08:00)與中午時段(10:00-14:00)，基載與風力發電機總輸出功率量($P_{base} + P_{wind}$)大於用電消耗功率量($P_{consume}$)。因此多餘的電力儲存到電力儲存系統中($P_{battery}$)，電力儲存系統儲電量($E_{battery}$, GWh)隨著時間上升。早晨時段(09:00-10:00)或晚間時段(17:00-22:00)，基載與風力發電機總輸出功率量($P_{base} + P_{wind}$)小於用電消耗功率量($P_{consume}$)，電力儲存系統釋放電能到電網中，電力儲存系統儲電量($E_{battery}$, GWh)隨著時間下降。因此電力儲存系統之充放電功率($P_{battery}$)隨時維持電網供需電的平衡，如式(12)所示。

$$P_{battery} = (P_{base} + P_{wind}) - P_{consume} \quad (12)$$

上述電力儲存系統充放電功率($P_{battery}$)隨時而變， $P_{battery} > 0$ 時為充電， $P_{battery} < 0$ 時為放電(如圖15)。電力儲存系統儲電能量($E_{battery}$, GWh)與電力儲存系統充放電功率($P_{battery}$)如式(12)所示， $E_{battery}$ 隨時間的變化亦繪於圖14下方紫色曲線部分。

$$E_{battery} = \int_0^t P_{battery} dt \quad (13)$$

在圖14中由抽蓄水力與釩氧化還原液流電池聯合之複合式電力儲存系統來平衡電網電能的供應與消耗，於離峰期間($P_{battery} > 0$)將生產過剩的電能藉由抽蓄水力與釩氧化還原液流電池聯合儲電系統進行能量的儲存，並於尖峰期間($P_{battery} < 0$)提取出所儲存的電能進行輔助的電力供應。此種機制不僅能有規劃地將能源分配使用，而且能夠有效地降低發電備載機組所需額定功率，減輕必要之輸配電等調度作業，進而減少發電備載系統的建置成本。由圖14中可判斷出電力儲存系統所需的最大儲電容量約為20 GWh。臺灣現有的電力儲電系統以抽蓄水力儲電為主。依據台灣電力公司102年發電資訊統計(台電網頁)，抽蓄水力的年發電量佔102年總發電量的1.5%，藉此估算出抽蓄水力的每日發電多寡如式(13-15)所示。將前述電力儲存系統所需的儲電容量扣除抽蓄水力每日發電量可得

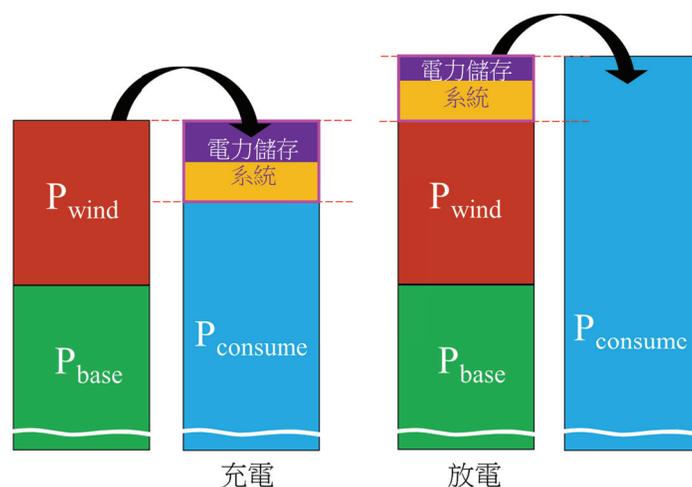


圖15 電網電能供需與電池充放電相關圖

鈳氧化還原液流電池儲電系統(VRFB)系統每日所需儲電容量如式(16-17)所示，並藉由此結果估算出鈳氧化還原液流電池儲電系統(VRFB)規模。

$$102\text{年抽蓄水力年發電量} = 102\text{年總發電量} \times \text{抽蓄水力發電量百分比} \quad (14)$$

$$\text{抽蓄水力年發電量} = 213.4 \text{ TWh} \times 1.5\% = 3.201 \text{ TWh} \quad (15)$$

$$102\text{年抽蓄水力每日發電量} = \text{抽蓄水力年發電量} \div 365 = 8.8 \text{ GWh} \quad (16)$$

$$\text{VRFB每日儲電容量} = \text{每日所需儲電容量} - \text{抽蓄水力每日發電量} \quad (17)$$

$$\text{VRFB每日儲電容量} = 20 \text{ GWh} - 8.8 \text{ GWh} = 11.2 \text{ GWh} \quad (18)$$

從上述鈳氧化還原液流電池儲電系統(VRFB)每日所需儲電容量來估算出該儲電系統的規模大小，藉由研究中所得鈳氧化還原液流電池儲電系統(VRFB)能量密度約為30 Wh/L為評估標準，估算出VRFB儲電系統所需體積多寡如式(19)所示。假定盛裝鈳氧化還原液流電池儲電系統之電解液儲槽所佔高度為3公尺，

而建置11.2 GWh VRFB電池系統所需面積如式(20)所示，需要0.124 km² (12.43公頃)。現有日月潭面積約8 km²，明潭水庫滿水位面積為827公頃(經濟部水利署，2015)，鈳氧化還原液流電池儲電系統所需面積是日月潭抽蓄水力儲電所需面積的1.5% 或是12.5公頃相當於滿水位面積之仁義潭水庫。由結果中鈳氧化還原液流電池儲電系統所佔有面積與臺灣主要水庫滿水位面積相對比例來分析，11.2 GWh鈳氧化還原液流電池儲電系統的建置規模並不會嚴重佔據臺灣現有土地面積，而且該儲電系統可劃分成數個區塊個別建置使得土地運用能有效地分配，與開發抽蓄水力儲電所需之發電機組裝置量與水庫所需面積及環境影響相比較，所需面積規模已相對更小、實現之機會更大。

$$\begin{aligned} \text{VRFB儲電系統所需體積} &= \text{VRFB每日儲電容量} \div \text{VRFB能量密度} \\ &= 11.2 \text{ GWh} \div 30 \text{ Wh/L} \\ &= 3.73 \times 10^8 \text{ L} = 3.73 \times 10^5 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{VRFB儲電系統所需面積} &= \text{VRFB儲電系統所需體積} \div \text{儲電系統高度} \\ &= 3.73 \times 10^5 \text{ m}^3 \div 3 \text{ m} \\ &= 1.243 \times 10^5 \text{ m}^2 = 0.1243 \text{ km}^2 \text{ (12.43公頃)} \end{aligned} \quad (20)$$

儲電功率與容量3.7 GW/11.2 GWh釩氧化還原液流電池儲電系統為一個大型的電力儲存系統，如果以抽蓄水力作為儲電系統，則需要額外等同其提供每日發電量(8.8 GWh)來源之日月潭、明德、明潭水庫等的發電機組裝置量與土地資源合計高達997公頃之水庫滿水位面積等1.3倍需求量。這將面臨到環境、地點選擇與儲電系統佔有面積問題。因此在電力儲存系統以定置型釩氧化還原液流電池儲電系統或其他長效儲電(能)系統(壽命在10年以上)對臺灣土地資源的衝擊不會很大。此外這些電池可以裝置在地下廢棄坑洞中，對於地面資源與生態影響將可以降到最小程度。

5. 結 論

在臺灣運行電力儲存系統的評估中，面對逐年成長設置的再生能源，電力儲存系統的建置將必須面臨考量與大量的使用。於本研究評估中，若風力發電達6%的總電力供應量，必須加入電力儲存系統做為調節機制，才能穩定電網並平衡供需，在扣除臺灣現有抽蓄水力儲電系統所能供應的儲電量後，仍需建置3.7 GW/11.2 GWh的儲電容量。假設以類似移動式水庫之電力儲存系統的釩氧化還原液流電池儲電系統作為臺灣擬新增建置之大型的電網級儲電系統的應用時，則該儲電系統所需的面積約為12.43公頃。面對土地面積狹窄的臺灣，釩氧化還原液流電池儲電系統能夠擁有更多的場域使用空間，可劃分成數個區塊個別建置使得土地運用能有效地分配，與開發抽蓄水力儲電所需之水庫面積相比較，此面積規模已相對更小。而且富有特色的輸出功率與儲電容量設計，使其適合於不同規模的電力儲存應用。除了釩氧化還原液流電池儲電系統之外，其他各種儲能系統依其特性可以應用在不同的電力儲存場合，本研究以聯合現有的抽蓄水力與擬新建置之釩氧化還原液流電池二種電力儲存系統，整合成未來臺灣之電網級儲能之複合式應

用，即結合機械(物理)儲能之快速與大量儲供電，以及化學儲能之穩定與長效儲供電的個別具有的儲電特性，除了提供有效地改善再生能源功率浮動輸出的問題外，也能發揮與各種用電時段需求差異之供電能力，具備可調峰(提供電量平衡)又可調頻(提供功率平衡)的雙重優勢。太陽光電與其他儲電系統的評估也可以使用類似方法進行。

目前釩氧化還原液流電池儲電系統成本偏高，依據日本富士經濟(2014)評估在2012年裝置成本約為78,000 NTD/kWh，到2025年時成本將會降至10,400 NTD/kWh。Kear等(2011)、Ha and Gallagher (2015)與Crawford等(2015)也開始針對這儲能系統進行成本分析。若以該電力儲存系統至少可以長達10年到15年之運轉使用壽命來估算平均每度之儲電成本時則將會降到2.8~1.9 NTD/kWh cycle。此外因液流電池所需空間遠較抽蓄水力發電為小，它的土地成本與環評成本應遠較抽蓄水力發電為低。臺灣目前住宅與工業電價(經濟部能源局，2011)分別為2.9 NTD/kWh與2.3 NTD/kWh。因此以每度成本相對比較，釩氧化還原液流電池儲電系統在未來的應用潛力機會將會很大。而在近期內，釩氧化還原液流電池儲電系統在高電價國家如德國(10.3/4.3 NTD/kWh，住宅/工業)、丹麥(11.3/4.6)與日本(7.3/4.9)的裝置誘因會高很多，將有利於產業化並對於技術與應用經驗的累積將愈趨成熟。

參考文獻

- 日本富士經濟(2014)，“エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2014 動力・電力貯蔵・家電分野編”日本富士經濟東京市場調查報導。
- 中央氣象局, <http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyData/mD.htm>; http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyMean/Taiwan_ws.htm
- 台灣電力公司(2013)，“資訊揭露”，<http://www>

- taipower.com.tw/index.aspx
 台灣電力公司(2015), “資訊揭露”, <http://www.taipower.com.tw/index.aspx>
- 經濟部水利署(2015), <http://www.wra.gov.tw/>
- 經濟部能源局(2011) 能源統計手冊。
- 謝錦隆(2005), “島嶼再生能源系統與場址評估”, 核能研究所報告, INER-A0754H
- Al-Fetlawi, H.; Shah, A.A.; Walsh, F.C. (2009). “Non-isothermal modelling of the all-vanadium redox flow battery”, *Electrochimica Acta* (55); pp. 78-89.
- American Vanadium, Cell Cube, <http://www.americanvanadium.com/cellcube.php>
- Banham-Hall, D.D.; Taylor, G.A.; Smith, C.A.; Irving, M.R. (2011). “Frequency Control Using Vanadium Redox Flow Batteries on Wind Farms”, IEEE Power and Energy Society General Meeting July; pp.1-8.
- Clean Energy, “Tomamae Wind Villa Power Plant” (2005), <http://www.cleanenergyactionproject.com/CleanEnergyActionProject/Home.html>; Case Studies, Energy Storage Case Studies, Tomamae Wind Villa Power Plant.
- Crawford, A.; Viswanathan, V.; Stephenson, D.; Wang, W.; Thomsen, E.; Reed, D.; Li, B.; Balducci, P.; Kintner-Meyer, M.; Sprenkle, V.; (2015). “Comparative analysis for various redox flow batteries chemistries using a cost performance model”, *Journal of Power Sources* 293, pp.388-399.
- Denholm, P.; Jorgenson, J.; Hummon, M.; Jenkin, T.; Palchak, D.; Kirby, B.; Ma, O.; O’Malley, M. (2013) “The Value of Energy Storage for Grid Applications”, National Renewable Energy Laboratory (NREL) Technical Report NREL/TP-6A20-58465.
- Enercon, “Wind Power E-70/2,300 kW”, <http://www.enercon.de/en-en/61.htm>
- EnerVault 網頁, <http://enervault.com>
- Eyer, J.; Corey, G. (2010). “Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide”, Sandia National Laboratory Report, SAND2010-0815.
- Ha, S.; Gallagher, K.G. (2015). “Estimating the system price of redox flow batteries for grid storage”, *Journal of Power Sources* 296; pp. 122-132.
- Hu, J.Z.; Vijayakumar, M.; Li, L.; Graff, G.; Liu, J.; Zhang, H.; Yang, Z. (2011). “Towards understanding the poor thermal stability of V5+ electrolyte solution in Vanadium Redox Flow Batteries”, *Journal of Power Sources* 196; pp. 3669-3672.
- IEA (2014), “Technology Roadmap Energy Storage”. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technologyroadmapenergystorage.pdf>
- Imergy 網頁, <http://www.imergy.com/technology>
- Kear, G.; Shah, A.A.; Walsh, F.C. (2011). “Development of the all-vanadium redox flow battery forenergy storage: a review of technological, financial and policy aspects”, *Int. J. Energy Res.* 36:11; pp. 1105-1120.
- Ma, X.; Zhang, H.; Xing, F. (2011). “A three-dimensional model for negative half cell of the vanadium redox flow battery”, *Electrochimica Acta* (58); pp. 238-246.
- Primus Power 網頁, <http://www.primuspower.com>
- Qiua, G.; Joshia, A.S.; Dennisonb, C.R.; Knehrb, K.W.; Kumburb, E.C.; Sun, Y. (2012). “3-D pore-scale resolved model for coupled species/charge/fluid transport in a vanadium redox flow battery”, *Electrochimica Acta* (64); pp. 46-64.
- Sabihuddin, S.; Kiprakis, A. E.; Mueller, M. (2015) “A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies”, *Energies* 8-1,

- pp.172-216.
- SBC Energy Institute (2013), "Electricity Storage factbook", 2013 September.
- SCHMID Energy System, <http://schmid-energy-systems.com/en/schmid-energy-systems.html>
- Shah, A.A.; Watt-Smith, M.J.; Walsh, F.C. (2008) "A dynamic performance model for redox-flow batteries involving soluble species" *Electrochimica Acta* (53); pp. 8087-8100
- Shah, A.A.; Al-Fetlawi, H.; Walsh, F.C. (2009). "Non-isothermal modelling of the all-vanadium redox flow battery" *Electrochimica Acta* 55; pp. 78-89.
- Shibata, T.; Kumamoto, T.; Nagaoka, Y.; Kawase, K.; and Yano, K. (2013). "Redox Flow Batteries for the Stable Supply of Renewable Energy" *SEI Technical Review* (76); pp. 14-22.
- Skyllas-Kazacos, M.; Chakrabarti, M.H.; Hajimolana, S.A.; Mjalli, F.S.; and Saleem M. (2011a). "Progress in Flow Battery Research and Development" *Journal of The Electrochemical Society*, 158 (8); pp. R55-R79.
- Skyllas-Kazacos, M.; Tang, A.; Bao, J. (2011b) "Dynamic modelling of the effects of ion diffusion and side reactions on the capacity loss for vanadium redox flow battery" *Journal of Power Sources* 196; pp.10737-10747.
- Skyllas-Kazacos, M.; Tang, A.; Bao, J. (2012a). "Thermal modelling of battery configuration and self-discharge reactions in vanadium redox flow battery", *Journal of Power Sources* 216; pp. 489-501.
- Skyllas-Kazacos, M.; Tang, A.; Ting, S.; Bao, J. (2012b). "Thermal modelling and simulation of the all-vanadium redox flow battery" *Journal of Power Sources* 203; pp. 165-176.
- Skyllas-Kazacos, M.; Goh, L. (2012c) "Modeling of vanadium ion diffusion across the ion exchange membrane in the vanadium redox battery" *Journal of Membrane Science* 399-400; pp. 43-48.
- Sumitomo Electric Press Release (2012), http://global-sei.com/news/press/12/prs069_s.html; http://global-sei.com/news/press/12/prs046_s.html
- Sumitomo Electric Newsletter "SEI World", (2014), <http://global-sei.com/sn/2014/443/8a.html>;
- Tokuda, N.; Kanno, T.; Hara, T.; Shigematsu, T.; Tsutsui, Y.; Ikeuchi, A.; Itou, T.; Kumamoto, T. (2000). "Development of a Redox Flow Battery System", *SEI Technical Review* (50) June; pp.88-94.
- You, D.; Zhanga, H.; Chen, J. (2009). "A simple model for the vanadium redox battery", *Electrochimica Acta* (54); pp. 6827-6836.
- Viswanathan, V.; Crawford, A.; Stephenson, D.; Kim, S.; Wang, W.; Li, B.; Coffey, G.; Thomsen, E.; Graff, G.; Balducci, P.; Kintner-Meyer, M.; Sprenkle, V. (2012). "Cost and performance model for redox flow batteries", *Journal of Power Sources*; pp. 1-12.
- Vynnycky, M. (2011). "Analysis of a model for the operation of a vanadium redox battery", *Energy* 36; pp. 2242-2256.
- Zhang, H.; You, D.; Chen, J. (2009), "A simple model for the vanadium redox battery" *Electrochimica Acta* 54; pp. 6827-6836.
- Zhang, H.; You, D.; Sun, C.; Ma, X. (2011) "Simulation of the self-discharge process in vanadium redox flow battery", *Journal of Power Sources* 196; pp. 1578-1585.

Scenario Modeling of Wind Power with Flow Battery System for Energy Storage Application in Taiwan

Chin-Lung Hsieh¹ Kan-Lin Hsueh^{2*} Yue-Lin Jhong³ Chih-Yang Dai²

ABSTRACT

Extensive consumption of fossil fuels cause excessive congestion of energy supplies and price volatility that usually affects economic growth, worsening the greenhouse effect, and even threatening to human life. Therefore, to have a stable energy supply, sustainable energy development, minimizing risk, one must promote energy diversification. The development of shifting a portion fossils fuels to new and renewable energy (photovoltaic and wind power) will be one of the options. When largely increasing the renewable energy, the renewable energy connected to the power grid must be coupled with corresponding energy storage technologies. This is not only effectively improving the power float problem but also can be more efficient management of power output capacity. Vanadium redox flow battery (VRFB) has many unique characteristics as compared to the other energy storage systems, for example, low maintenance costs, low environmental impact, high safety, scalability, high capacity, and long life cycles. The power and capacity of VRFB is de-coupled. This makes the VRFB system design more flexible and suitable for various electricity storage applications. At present, this battery storage has low efficiency and low energy density. With continuous development for large-scale electricity storage. VRFB technology has been gradually improved. In this study, we appraise the requirement and solution of energy storage systems by considering base load power supplies, wind power, VRFB, and Taiwan daily electricity demand. The required storage capacity was estimated under the scenario that wind power were accounted for 6% of the total electricity supply in Taiwan. Wind power reduces the total amount of base load supply. Maximum daily demanded electricity was partially substituted with wind power. The power generated from wind turbines was calculated from the characteristics of existing large-scale wind power plants and from weather data in Hsinchu coastal area. Calculated results suggested that additional 11.2 GWh was needed from the battery besides existing pumped hydro storage capacity. If the VRFB was selected as the electric power storage systems, it requires 12.43 hectares of storage areas. The battery storage system has less environmental impact and land requirements than pumped hydro storage.

Keywords: Redox flow battery, Computer modeling, Wind power, Grid energy storage

¹ Associate Researcher, Institute of Nuclear Energy Research (INER), Atomic Energy Council, Executive Yuan

² Associate Professor, Dept. of Energy Engineering, National United University

³ Engineer, Carbide International Co. Ltd.

* Corresponding Author, Phone: +886-37-382387, E-mail: KanLinHsueh@nuu.edu.tw

Received Date: March 5, 2015

Revised Date: September 10, 2015

Accepted Date: October 20, 2015