

新型儲能電池－全鈦液流電池

馬振基*、謝曉峰**、蕭閔謙***

摘 要

現今全球發展中的儲能技術中，「(全鈦)氧化還原液流電池」((all vanadium) redox flow battery, VRB or RFB) 相較於其他儲能技術，具有許多的優點，如：輸出功率和容量相互獨立，系統設計非常靈活、能量效率高、電池使用壽命長，可深度放電而不損壞電池，自放電低；選擇自由度大，無污染、維護簡單，運營成本低，安全、環保等，可有效解決太陽能及風能發電之電能儲存問題，液流電池作為新型的蓄電儲能裝置，不僅可以作為太陽能、風能發電系統的配套儲能設備，還可以作為電網的調峰裝置，提高輸電品質，保障電網安全。液流儲能電池技術是一種高效、大規模電化學儲能技術，在風能、太陽能等再生能源發電、智慧電網建設等方面有著廣闊的應用前景，本文重點旨在介紹全鈦液流儲能電池(VRB)之技術及其發展現狀。

【關鍵字】儲能、再生能源、全鈦液流電池

*國立清華大學/化學工程系 講座教授

**北京清華大學/核能與新能源技術研究院 副教授

***國立清華大學/化學工程系 博士生

一、前言

由於科技快速發展，能源消耗亦隨之加速，但根據學者估計 2015 年地球上蘊藏之化石燃料（fossil fuel），也就是當今使用最廣泛的煤礦、石油和天然氣等將發生嚴重短缺，而英國 BP 公司亦估計化石燃料中的石油只剩 40~50 年左右便將耗竭殆盡。加上燃燒化石燃料造成的溫室氣體嚴重影響地球的氣候變遷，國際間亦有「氣候變化綱要公約」和「京都議定書」來限制溫室氣體的排放。由此可知，發展高效率、低污染的綠色替代能源以成爲能源議題中最主要的趨勢。新興的替代能源包括太陽能、風能、生質能、潮汐能、氫能、地熱能及核能等，而目前各國政府推展最積極的莫過於太陽能及風能發電。可以預測在未來的幾十年，再生能源對產電的貢獻將越來越高，然而，不管是太陽能或風能都具有不穩定且間歇式的輸出性質，因此爲滿足需求的配套供應上往往存在著許多問題^[1]，而儲能技術就是解決此問題的關鍵核心技術，是電力系統構建智慧型電網、開展使用者端平衡負載、提高可再生能源發電接入量、實現節能減排的重要核心技術之一^[2]。

在日本、加拿大、美國、澳大利亞、西歐等國家和地區已開始取代容量小、壽命短、污染大的鉛酸電池。2009 年起中國 VRB 公司也積極在世界各地，如：美國、土耳其、義大利、及中國境內設製 5kW/20kWh~500kW/1MWh 不等的儲能電池，由此可見利用化學電源進行蓄電儲能，可以不受地理條件限制，有望實現大規模儲能，具有重大環保及社會經濟價值^[3-10]。

二、電池儲能

電池儲能系統主要是利用電池正負極的氧化還原反應進行充放電，表 1 及表 2 所示^[11]，分別顯示各種電池的基本特性和由它們構成的儲能系統目前已達到的性能指標。鉛酸電池在高溫下壽命縮短，與鎳鎘電池類似，具有較低的比能量和比功率，但價格便宜，構造成本低，可靠性好，技術成熟，已廣泛應用於電力系統，目前儲能容量已可達 20 MW。鉛酸電池在電力系統正常運行時爲斷路器提供合閘電源，在

發電廠、變電所供電中斷時發揮獨立電源的作用，為移動電機、通信、事故照明提供動力。然而，其迴圈壽命較短，且在製造過程中存在一定的環境污染。鎳鎘等電池效率高、迴圈壽命長，但隨著充放電次數的增加容量將會減少，荷電保持能力仍有待提高，且因存在重金屬污染已被歐盟組織限用。鋰離子電池比能量/比功率高、自放電小、對環境友善，但由於製程和環境溫度差異等因素的影響，系統指標往往達不到單體水準，使用壽命較單體縮短數倍甚至十幾倍。鈉硫和液流電池則被視為新興的、高效的且具廣闊發展前景的大容量電力儲能電池。鈉硫電池儲能密度為 140 kWh/m³，體積減少為普通鉛酸蓄電池的 1/5，系統效率可達 80%，且迴圈壽命超過 6,000 次，便於模組化製造、運輸和安裝，建設週期短，可根據用途和建設規模分期安裝，很適用於城市變電站和特殊負荷。液流電池電化學極化小，能夠 100% 深度放電，儲存壽命長，額定功率和容量相互獨立，可以通過增加電解液的量或提高電解質的濃度達到增加電池容量的目的，並可根據設置場所的情況自由設計儲藏形式及隨意選擇形狀。

表 1 可應用於儲能的主要電池^[11]

電池種類	單電池電壓 (V)	反應式
鉛酸	2.0	負極： $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \longleftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$ 正極： $\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{e}^- \longleftrightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
鎳鎘	1.0~1.3	負極： $\text{Cd} + 2\text{OH}^- \longleftrightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$ 正極： $\text{NiO}(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \longleftrightarrow \text{NiO}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$
鎳氫	1.0~1.3	負極： $\text{LaNi}_5\text{H}_6 + 6\text{OH}^- \longleftrightarrow \text{LaNi}_5 + 6\text{H}_2\text{O} + 6\text{e}^-$ 正極： $\text{NiO}(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \longleftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$
鋰離子	3.7	負極： $\text{Li}_x\text{C}_6 \longleftrightarrow 6\text{C} + x\text{Li}^+ + x\text{e}^-$ 正極： $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + x\text{e}^- \longleftrightarrow \text{LiCoO}_2$
鈉硫	2.08	負極： $2\text{Na} \longleftrightarrow 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$ 正極： $x\text{S} + 2\text{e}^- \longleftrightarrow x\text{S}^{2-}$
全鈳液流	1.4	負極： $\text{V}^{2+} \longleftrightarrow \text{V}^{3+} + \text{e}^-$ 正極： $\text{V}^{5+} + \text{e}^- \longleftrightarrow \text{V}^{4+}$

表 2 儲能電池性能比較^[11]

電池種類	功率上限	比電容 (Wh/kg)	比功率 (W/kg)	循環壽命 (次)	充放電效率 (%)	自放電 (%/月)
鉛酸	數十 MW	35~50	75~300	500~1,500	0~80	2~5
鎳鎘	幾十 MW	75	150~300	2,500	0~70	5~20
鋰離子	幾十 kW	150~200	200~315	1,000~10,000	0~95	0~1
鈉硫	十幾 MW	150~240	90~230	2,500	0~90	—
全鈮液流	至數 MW	80~130	50~140	13,000	0~80	—

表 3 鉛酸電池和鈮液流電池的特色^[12]

鉛酸電池	鈮液流電池
儲存效率 70~80% (與使用年份有關)	在合適的低電流密度下儲存效率可達 90%
儲存容量及額定功率和儲存於電極的化學能有關	非參與性電極使得儲存容量和額定功率可獨立設計
充電和放電之間的電壓變化為 10%	充放電時電壓為定值
過度充放電易對電池造成傷害	完全放電不會傷害電池，但須避免過度充電
只能緩慢充電	藉由電流或改變電解液可在任何速率下充電
快速放電會造成損壞	可在任意速率下放電
微循環會降低使用壽命(如風力或太陽能應用上充電速率的快速變動)	不受微循環影響
需定期保養	只需低程度的保養
壽命極少超過 5 年(因相位轉換造成電極惡化)	壽命預期最少可達 20 年(無相位轉換且使用耐久性交換膜)
當儲能容量增加，每千瓦的電池成本及尺寸為定值	每千瓦的成本隨儲能容量增加而下降，且尺寸較鉛酸電池小

RFB 主要的優點之一為充放電時的靈活性，它可以完全放電且不傷害電池，這是現行使用的鉛酸電池技術所無法達到的決定性優勢。表 3 為商業化鉛酸電池和最具潛力的 RFB 全鈮液流電池-主要的優缺點比較。

雖然 RFB 依電解液不同而有鈮/溴、全鈮、多硫化鈉/溴等多個體系，如圖 1 所示^[12]。但其中其中以 1984 年澳洲南威爾斯大學 Skyllas-Kazacos 等人^[5-7]發展出的全鈮氧化還原對電池 (all-vanadium redox flow battery, VRB) 最具商業化發展潛力，圖 2 為 VRB 工作原理示意圖^[13]。VRB 以溶解於一定濃度硫酸溶液中的不同價態的鈮離子為正負極電極反應活性物質。電池正負極之間以離子交換膜分隔成彼此相互獨

立的兩半電池。通常情況下 VRB 正極氧化還原對為 $\text{VO}_2^+/\text{VO}^{2+}$ ，負極為 $\text{V}^{2+}/\text{V}^{3+}$ 。由於 VRB 之兩半電池中皆使用到鈦物質，因此克服了電解質相互跨越質子交換膜所造成的污染問題，因此近年來國際能源界越來越專注於開發 VRB。

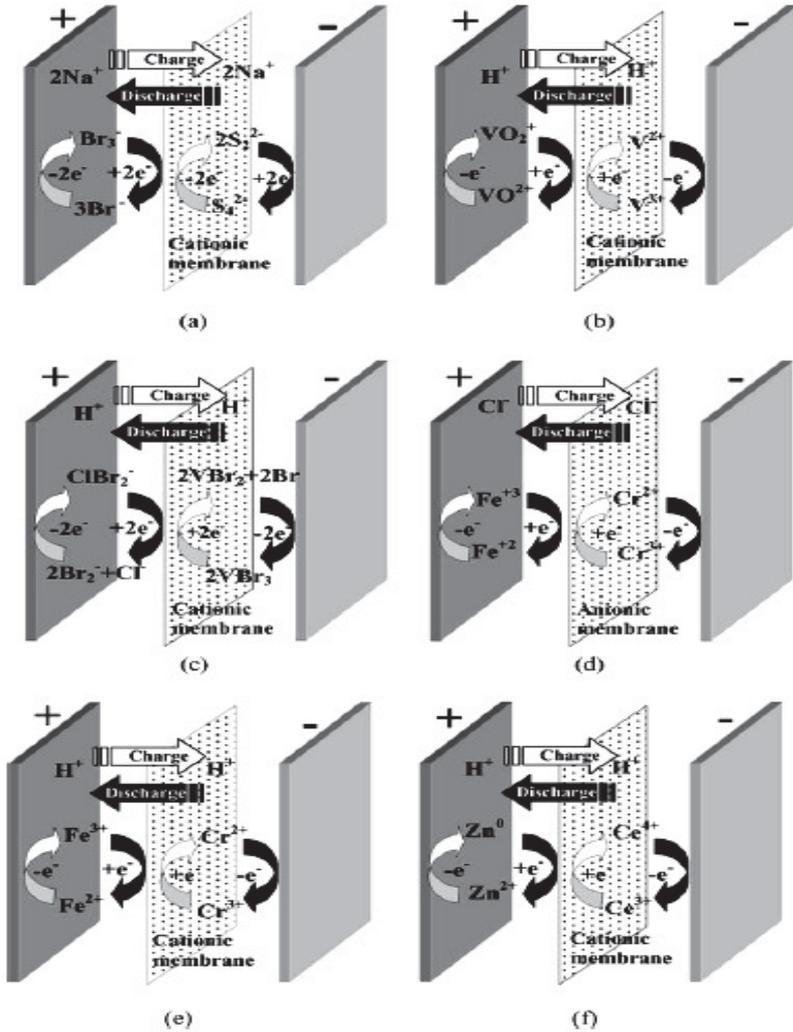


圖 1 redox flowsystems : (a) bromine/polysulphide, (b) vanadium/vanadium, (c) vanadium/bromide, (d) iron/chromium with anionic membrane, (e) iron/chromium with cationic membrane, and (f) zinc/bromide. [12]

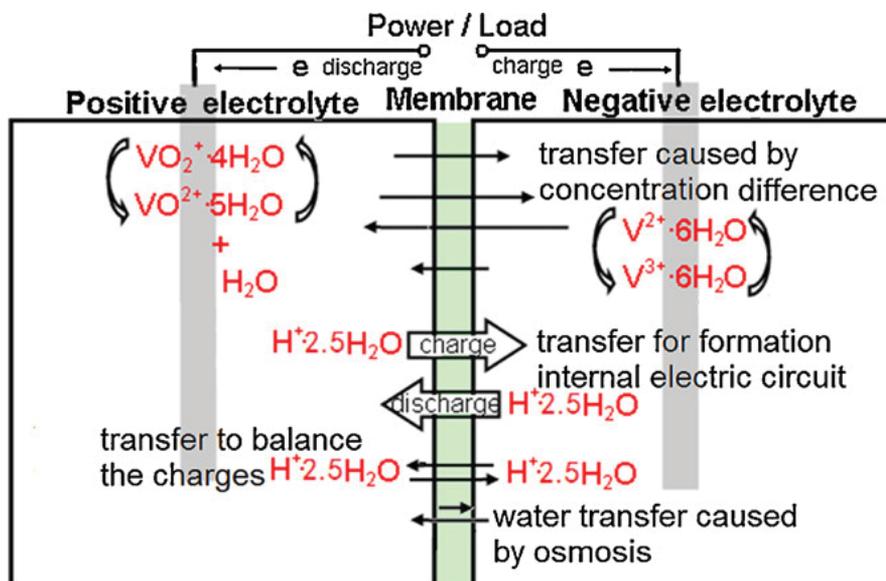


圖 2 全鈦液流電池電化學反應示意圖^[13]

三、鈦液流電池之優點

與其它化學電源相比(如表 2)，鈦液流電池具有明顯的優越性，主要優點如下 [14-25]：

1. 功率大：通過增加單片電池的數量和電極面積，即可增加鈦液流電池的功率，目前美國商業化示範運行的鈦液流電池的功率已達 6 MW。
2. 容量大：通過任意增加電解液的體積，即可任意增加鈦液流電池的電量，可達 GW 時以上；通過提高電解液的濃度，即可成倍增加鈦液流電池的電量。
3. 效率高：由於鈦液流電池的電極催化活性高，且正、負極活性物質分別存儲在正、負極電解液儲槽中，避免了正、負極活性物質的自放電消耗，鈦液流電池的充放電能量轉換效率高達 75% 以上，遠高於鉛酸電池的 45%。
4. 壽命長：由於鈦液流電池的正、負極活性物質只分別存在於正、負極電解液中，充放電時無其它電池常有的物相變化，可深度放電而不損傷電池，電池使用壽命長。目前加拿大 VRB power systems 商業化示範運行時間最長的鈦液流電池模塊已正常運行超過 9 年，充放循環壽命超過 18,000 次，遠高於固定型鉛酸電池

的 1,000 次。

- 5.響應速度快：鈳液流電池堆裡充滿電解液可在瞬間啓動，在運行過程中充放電狀態切換只需要 0.02 秒，響應速度 1 毫秒。
- 6.可瞬間充電：通過更換電解液可實現鈳液流電池瞬間充電。
- 7.安全性高：鈳液流電池無潛在的爆炸或著火危險，即使將正、負極電解液混合也無危險(鋰電池超過 10 kW · 2h 會爆炸)，只是電解液溫度略有升高。
- 8.成本低：除離子膜外，鈳液流電池部件多為廉價的碳材料、工程塑膠，材料來源豐富，易回收，不需要貴金屬作電極催化劑，成本低。
- 9.鈳液流電池選址自由度大，可全自動封閉運行，無污染，維護簡單，運營成本低。

四、鈳液流電池的基本元件

鈳液流電池的構造類似質子交換膜燃料電池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)，鈳液流電池主要是由質子交換膜、碳纖維氈及雙極板所組成，通過外接泵把溶液從儲液槽壓入電池堆體內完成電化學反應，反應後溶液又回到儲液槽，活性物質不斷迴圈流動，由此完成充放電。許多單鈳液流電池串聯便可組裝成一高電壓、高儲電量之鈳液流電池組，如圖 3 所示^[26]。

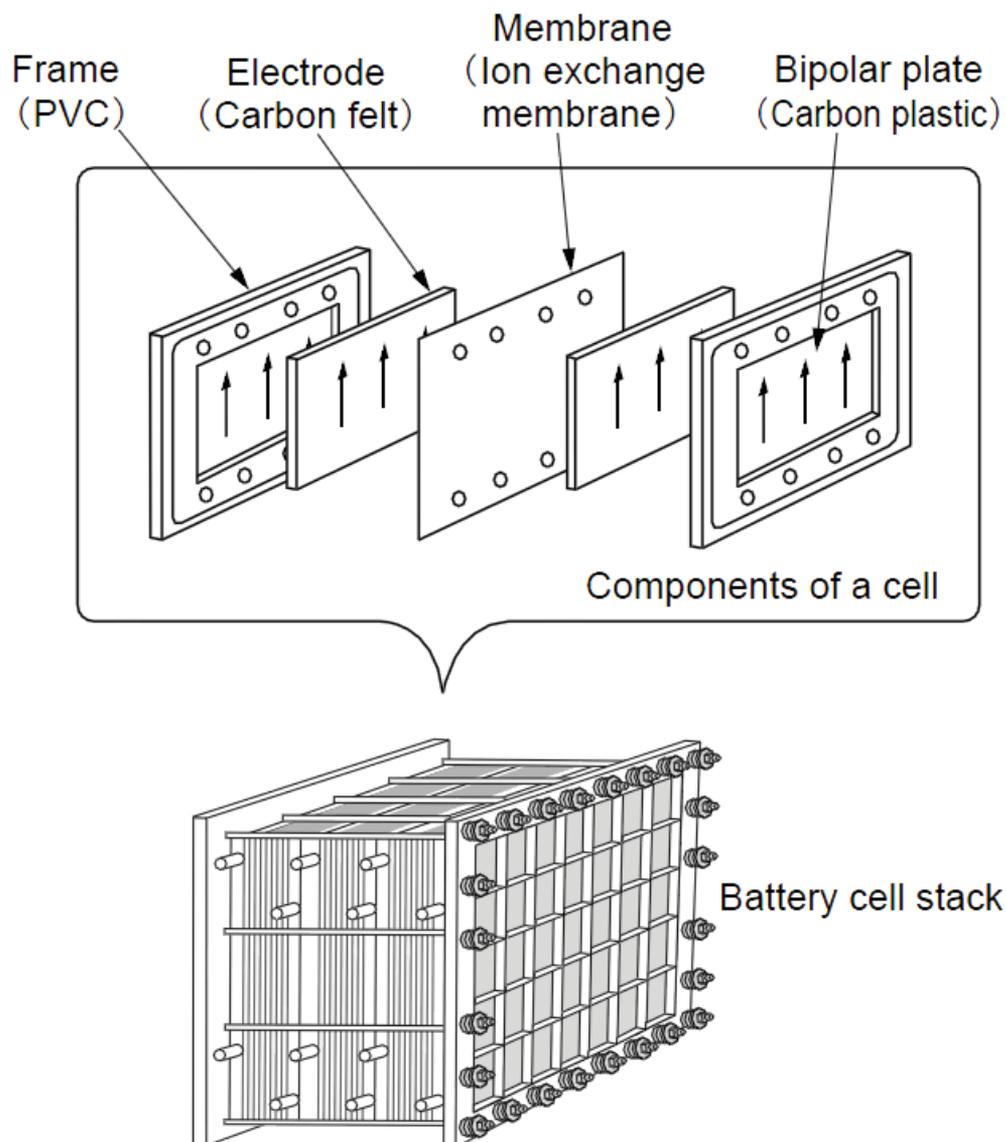


圖 3 鈳液流電池的構造^[26]

4.1 質子交換膜

質子交換膜介於正極及負極之間，功用在於電子絕緣及幫助離子傳導，在性質上質子交換膜必須符合以下幾種基本要求：

1. 具有良好離子傳導率。
2. 良好的耐化學性。
3. 良好的機械強度。

現今普遍使用的質子交換膜，主要以碳氟系高分子材料為主，如 1962 年美國杜邦公司成功設計出的離子交換膜 Nafion 便能符合質子交換膜上述之要求，具有良好的質子導電度、機械強度及耐久度。

4.2 碳纖維氈

碳纖維氈主要是以石墨纖維氈最常使用，在性質上需符合以下基本要求：

1. 具有低的體阻抗。
2. 良好的機械性質。
3. 良好的壓縮性質。
4. 低接觸阻抗。

4.3 雙極板

雙極板(bipolar plate)是一以可導電性材料製作而成之導電隔板，扮演收集電流、分隔正負兩極之電解液並引導電解液在電池內流動等功用。表面設計的流道用來輸送正負兩極的電解液。

由圖 3 中可知雙極板本身便占了釩液流電池大部分的體積，是影響電池功率密度和製作成本的重要因素。而其在燃料電池運作過程主要的功能為：

1. 具有優良的機械性質，方能在電池組裝施予壓力鎖緊或壓緊時，避免電池組組裝時發生破裂。
2. 良好的電傳導性，使電流收集更具效率、減少電池組中串接電池間的電壓損失。
3. 擁有化學安定性和防腐蝕性，不溶於水、不產生其他揮發物或溶出金屬物質等特性。
4. 原料價格低廉，加工製程簡單，才能以低成本價格，使商業化量產具優勢。
5. 低接觸阻抗，使得其與碳纖維氈接觸面能更有效的傳導電子。

五、鈦液流電池的應用

由於鈦液流電池可串並聯成電池堆使用，加上電解質液可連續補充使用，因此，鈦液流電池的應用相當廣泛，如圖 4 所示。

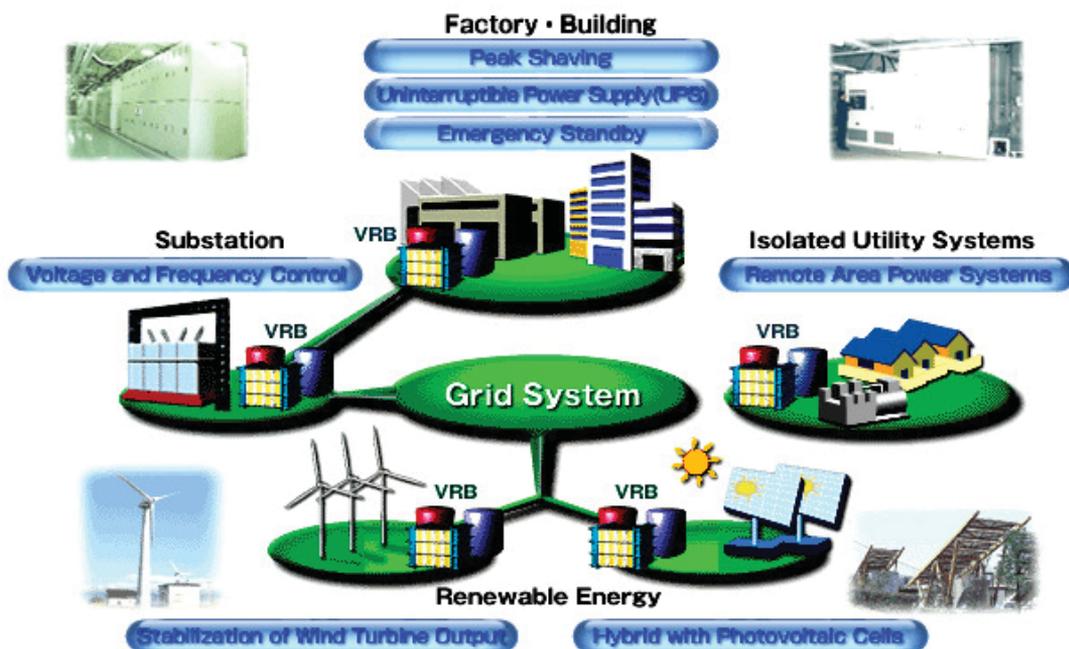


圖 4 液流儲能電池的應用領域

5.1 風力發電

根據 GWEC(globe wind energy council)數據顯示，2010 年全球風能累積容量已達到 194.4GW，較 2009 年增加了 22.5%。而目前風力發電機需要配備功率大約相當於其功率 1%的鉛酸電池用於緊急情況時風機保護收風葉用，另外每一台風機還需要配備功率大約相當於其功率 4%的後備蓄電池。由於電網已成為風電發展的瓶頸，隨著風電的急速發展，風電與電網的矛盾將越來越突出，為了減少對電網的衝擊，大幅度提高風電場電力的使用率同時賺取巨額的電網峰谷差價，風電場將需要配備功率相當於其功率 10~50%的動態儲能蓄電池。對於風機離網發電，則需要更大比例

的動態儲能蓄電池。

由於風機現在使用的鉛酸電池存在容量小、壽命短、穩定性差、維護費時費力、污染大等嚴重缺陷，風機製造廠家一直在尋找更好的可以替代鉛酸電池的產品，相信擁有眾多傑出優點的鈦液流電池完全可以取代現有的鉛酸電池，進而構建風電場的動態能源儲存系統，大幅度提高風電場的效率和效益，推動風電產業更好更快地發展。圖 5^[27]為日本 Tomamae 風電場 4MW×1.5h 的 VRB 系統，圖 6^[28]為北海道風力發電廠使用 RFB 進行調頻調壓。



圖 5 日本 Tomamae 風電場 4MW×1.5h ^[27]

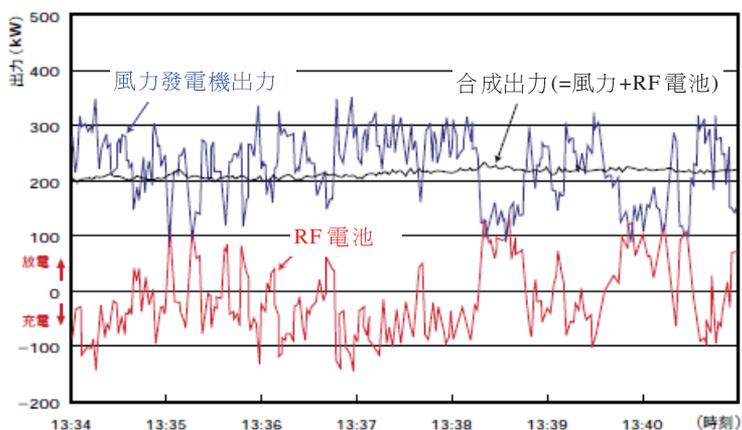


圖 6 北海道風力發電廠使用液流電池進行調頻調壓^[28]

5.2 太陽能發電

據統計，近幾年全球太陽能組件的年均增長率高達 30%，太陽能產業成爲全球發展最快的新興行業之一。特別是 2008 年，全球太陽能發電裝機總量達到 3 GW。顧名思義，太陽能發電需要太陽光，一旦到了晚上和陰雨天就發不了電，因而需要蓄電池爲其儲存電力，由於鉛酸電池功率、容量、壽命均非常有限，相信集眾多優點的鈦液流電池將作爲太陽能發電儲能電池的首選。日本住友電氣工業開發出了將太陽能和風力等再生能源與蓄電池直流連接的「微型智慧電網實證系統」，並於 2011

年 6 月 15 日向媒體公開了在該公司大阪製作所內已經開始實證試驗情況。在此次開發的系統中，聚光型太陽能電池和氧化還原液流電池等很多部件都是該公司自主開發的。圖 7^[27]為 Cellstrom 奧地利 10kW10h 太陽儲能 VRB 充電站。



圖 7 Cellstrom 奧地利 10kW10h 太陽儲能 VRB 充電站^[27]

5.3 智慧電網調峰

電網調峰的主要手段一直是抽水蓄能電站。近 2、30 年來，世界發達國家抽水蓄能電站發展越來越快。世界上抽水蓄能電站發展最快、裝機容量最多的是日本，其次是美國、意大利、德國、法國、西班牙等，日本和美國抽水蓄能電站裝機容量均已超過 2,000 萬千瓦。由於抽水蓄能電站需建上、下兩個水庫，受地理條件限制較大，在平原地區不容易建設，而且佔地面積大，維護成本高。鈦液流電池蓄能電站不受地理條件限制，選址自由，佔地少，維護成本低。可以預期，隨著鈦液流電池技術的發展，鈦液流電池蓄能電站將逐步取代抽水蓄能電站，在電網調峰中發揮重要的作用。圖 8 為住友電工 VRB 調峰電站。



圖 8 住友電+VRB 調峰電站

5.4 交通市政

隨著世界城市化進程的不斷加快和汽車保有量的持續增加，汽車尾氣污染已經成為城市空氣污染的頭號污染源。大力發展節能、環保的電動汽車替代傳統燃油汽車，已成為了人們的共識。隨著鈦液流電池技術的快速發展，可以預期，擁有眾多傑出優點的鈦液流電池將在電動汽車（特別是城市公交客車）、電動機車、電動自行車、電動船舶、交通信號、風光互補路燈等廣闊領域發揮重要作用。圖 9 為 VRB 在潛水艇、太陽能供電房及高爾夫球車的應用。

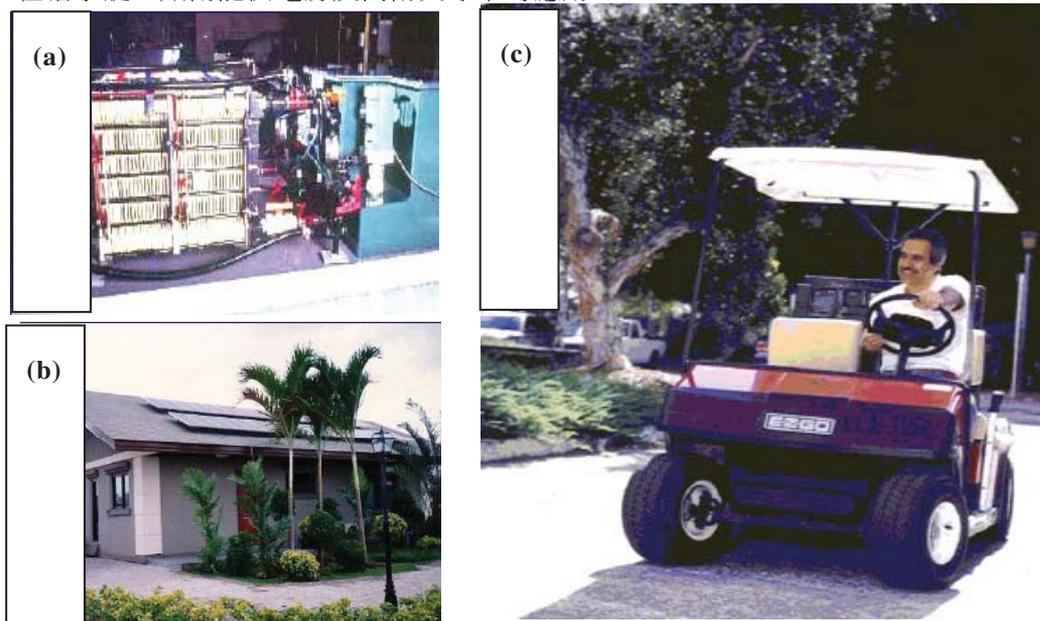


圖 9 VRB 在(a)潛水艇、(b)太陽能供電房及(c)高爾夫球車的應用

5.5 通訊基站

通信基站和通信機房需要蓄電池作為後備電源，且時間通常不能少於 10 小時。對通訊運營商來講，安全穩定可靠性和使用壽命是最重要的，在這一領域，鈦液流電池有著鉛酸電池無法比擬的先天優勢。圖 10 為美軍 VRB 軍用蓄電 (120MWh/12MW)。



圖 10 美軍 VRB 軍用蓄電(120MWh/12MW)

5.6 UPS 電源

賽迪顧問公司研究顯示，2007 年 UPS 市場出現了持續增長的態勢，主要原因是中國經濟的持續高速發展帶來的 UPS 用戶需求分散化，使得更多的行業和更多的企業對 UPS 產生了持續的需求。未來幾年，UPS 產品發展的方向是更高的可用性、安全性以及功能的集成化、智能化和人性化。目前中國的 UPS 市場強烈需求功率大、安全、穩定可靠的蓄電池，鈦液流電池在這一領域，相對於鉛酸電池無論在功率、安全穩定性、還是使用壽命上都有著絕對優勢。圖 11 為南卡羅來納州空軍基地 60kWh VRB-ESS 系統。



圖 11 南卡羅來納州空軍基地 60kWh VRB-ESS 系統

5.7 分佈電站

當今社會對能源與電力供應的質量、效率、環保以及安全可靠性的要求越來越高，大電網由於自身的缺陷已經不能滿足這種要求。隨著分佈電站的崛起，大型中心電站將逐步走向衰落。相信釩液流電池將首先在醫院、指揮控制中心、數據處理和通訊中心、商業大樓、娛樂中心、政府要害部門、製藥和化學材料工業、精密製造工業的分佈電站中發揮重要作用。圖 12^[26]為日本關西電力公司辦公大樓用 VRB 設計示意圖。

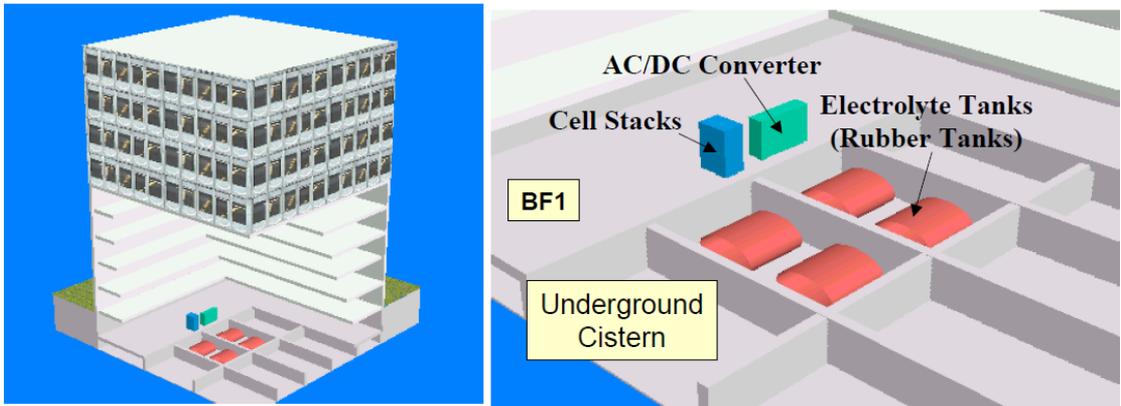


圖 12 日本關西電力公司辦公大樓用 VRB 設計示意圖^[26]

六、結 論

經濟的發展和人們生活水準的提高，世界各國對電能的需求越來越多，依賴程度也越來越高，由於化石能源資源的有限性及其過度使用所帶來的環境問題，促使各國對太陽能、風能等替代能源發電的開發及利用。然而風能、太陽能輸出的不穩定性難以滿足社會對持續、穩定、可控的電力能源需求，為保證再生能源發電系統的穩定供電，並充分、有效地利用其發電能力，必須以儲電的方式加以調節。全釩液流電池(VRB)因壽命長、規模設置靈活及對地形無特殊要求等優點，且隨著容量和規模的擴大、集成技術的日益成熟，儲能系統成本將進一步降低，經過安全性和可靠性的長期測試，有望在提高風能/太陽能再生能源系統的穩定性、終端電網、軍事基地等，其儲能領域具有極大的優勢和廣闊的前景。

參考文獻

- 1.R.M. Dell, D.A.J. Rand, *J. Power Sources* 100 (2001) 2.
- 2.張華民，華南師範大學學報，p. 110-111，2009 年。
- 3.L.H. Thaller, US Patent 3,996,064 (1976).
- 4.P. Zhao, H. Zhang, H. Zhou, B. Yi, *Electrochim. Acta* 51 (2005) 1091.
- 5.M. Skyllas-Kazacos, M. Rychcik, R.G. Robins, A.G. Fane, M.A. Green, J. *Electrochem. Soc.* 133 (1986) 1057.
- 6.M. Skyllas-Kazacos, D. Kasherman, D.R. Hong, M. Kazacos, *J. Power Sources* 35 (1991) 399.
- 7.H. Vafiadis, M. Skyllas-Kazacos, *J. Membr. Sci.* 279 (2006) 394.
- 8.A. Shibata, K. Sato, *Power Eng. J.* 13 (1999) 130.
- 9.L. Joerissen, J. Garche, Ch. Fabjan, G. Tomazic, *J. Power Sources* 127 (2004) 98.
- 10.朱順泉，孫妮榮，汪 錢，尹海濤，王保國，*化工進展*第 26 卷第 2 期，207-211，2007 年。
- 11.張文亮，丘明，來小康，*電網技術*，第 32 卷第 7 期，p.1-9，2008 年。
- 12.C. Ponce de León, A. Ffrias-Ferrer, J. González-García, *J. Power Sources* 160 (2006) 716.
- 13.C. Sun, J. Chen, H. Zhang, X. Han, Q. Luo, *J. Power Sources* 195 (2010) 890.
- 14.C. Ponce de Leon, A. Ffrias-Ferrer, J. Gonzalez-Garcia, D.A. Szanto, F.C. Walsh, J. *Power Sources* 160 (2006) 716.
- 15.C.J. Rydh, B.A. Sanden, *Energy Convers. Manage.* 46 (2005) 1957.
- 16.C.J. Rydh, B.A. Sanden, *Energy Convers. Manage.* 46 (2005) 1980.
- 17.L. Joerissen, J. Garche, Ch. Fabjan, G. Tomazic, *J. Power Sources* 127 (2004) 98.
- 18.Ch. Fabjan, J. Garche, B. Harrer, L. Jorissen, C. Kolbeck, F. Philipps, G. Tomazic, F. Wagner, *Electrochim. Acta* 47 (2001) 825.
- 19.C.J. Rydh, *J. Power Sources* 80 (1999) 21.
- 20.H. Vafiadis, M. Skyllas-Kazacos, *J. Membr. Sci.* 279 (2006) 394.

- 21.X. Luo, Z. Lu, J. Xi, Z. Wu, W. Zhu, L. Chen, X. Qiu, J. Phys. Chem. B 109 (2005) 20310.
- 22.G. Oriji, Y. Katayama, T. Miura, J. Power Sources 139 (2005) 321.
- 23.T. Sukkar, M. Skyllas-Kazacos, J. Appl. Electrochem. 34 (2004) 137.
- 24.B. Tian, C.W. Yan, F.H. Wang, J. Membr. Sci. 234 (2004) 51.
- 25.B. Fang, Y. Wei, T. Arai, S. Iwasa, M. Kumagai, J. Appl. Electrochem. 33 (2003) 197.
- 26.N. Tokuda, T. Kanno, T. Hara, T. Shigematsu, Y. Tsutsui, A. Ikeuchi, T. Itou, T. Kumamoto, SEI Tech Rev., 2000, 88-94.
- 27.[http : //www.nedaxy.org/index/content.asp?id=2187&lm1=77](http://www.nedaxy.org/index/content.asp?id=2187&lm1=77)
- 28.住友電氣工業株式會社，電力儲存系統事業部，技術報告，”電力儲存用 Redox-Folw 電池”。[http : //www.suzuden.co.jp/gijyutu/pdf/pdf38_04](http://www.suzuden.co.jp/gijyutu/pdf/pdf38_04).