

高速磁浮電機延伸應用之磁浮飛輪儲能於電網調控評析

一、電網產業現況

為因應氣候變遷，各國開始進行能源轉型，積極改變能源結構，提高新及再生能源電力占比，以降低對傳統化石能源(煤炭、石油、天然氣)的依賴，進而減少溫室氣體排放量。然而，台灣電力多仰賴進口能源，故政府訂定 2025 年之能源目標為實現再生能源佔比達 20%，太陽光電、風力發電、地熱與生質能等裝置量大幅增加。對於台灣新及再生能源的發展，需因地制宜，分析與開發適合台灣島國地狹人稠地型的對應技術。

目前我國能源轉型以減煤、增氣、展綠、非核之能源發展方向為規劃原則，確保電力供應穩定，兼顧降低空污及減碳。全球儲能系統以電化學儲能佔比最多，超過三分之一，其中以鋰離子電池為主。國內產業除了台達電等少數廠商擁有關鍵電芯之自主技術外，其他皆是引進國外技術、進口電芯與 SI 系統設備整合，電化學儲能之優勢在於可長時間儲能，供應能量市場，補足電力不足。然而，電化學儲能會衍生環保問題。。在多種儲能系統中，磁浮飛輪可捕獲間歇性再生能源，並提供電源至電網，具秒等級反應速度，達到快速調頻與穩定電力品質。更重要的是，台灣再生能源仍是以太陽光電與風力發電為設置主力，再搭配其他綠色電力的建置。然而太陽光電與風力發電屬間歇性發電，易受天候影響，勢必搭配火力發電進行調控，無法進一步降低空污與碳排放量有鑑於再生能源是我國達成能源轉型的關鍵，必須搭配可以具備瞬時、短時與長時的電力調節功能之儲能系統，使我國未來得以實現能源轉型目標。

台灣電網屬傳統集中式電網，只要發生事故即會造成大區域斷電，勢必影響國人生計與產業經濟發展。2021 年 5 月 13 日，台電高雄路竹路北超高壓變電所匯流排因人為疏失，造成興達電廠 4 部機組跳機，無法正常送出電力。這次事故，導致全台 62 個工業區中，其中 29 個工業區輪流停電，加工

出口區以楠梓加工出口區影響較大，區內有日月光半導體、華泰電子、國巨等大廠；三大科學園區中，竹科跟中科分別有 20 多家廠商受影響，南科則有 40 多家廠商受影響[2]。一般而言，國內各企業為確保產能不受影響，皆會設置不斷電系統，如柴油發電機，並設置獨立電網。且因應淨零碳排議題，各企業也開始思考建置再生能源，如太陽能發電。若要發揮再生能源發電之最大效益，儲能系統是不可獲缺的利器。再者，傳統集中型電網於供需不平衡時，會採用緊急分區輪流停電，造成極大的民生問題，且台灣地狹人稠，不易建置大型儲能電廠。因此分散式電網搭配獨立再生能源與儲能設備，可望成為未來淨零碳排之新電網模式。

磁浮飛輪作為儲能發電裝置，可具有超過 90% 能量轉換效率、體積小、重量輕、20 年以上壽命、低損耗，安全性高、寬廣的工作環境溫度與儲能速度快等優點，在其他發電裝置或電池設施中，很難同時擁有這麼多的優勢，再加上飛輪裝置本身沒有任何環境污染問題，所以被視為具無限潛力的綠色能源。且相較於台灣儲能設備主流之電化學儲能，更合適應用於用戶端儲能之分散式電網，包括住宅區、商業區與工業區。表一為磁磁浮飛輪與化學電池應用於儲能之比較。

表 1、磁磁浮飛輪與化學電池應用於儲能之比較

項目	磁浮飛輪	化學電池
儲能方式	機械	化學
Run time	1 分鐘內	數分鐘至數小時
操作環境	-40°C ~ 70°C	-20°C ~ 45°C
環境影響	僅需回收電路	需回收化學物質
充放電次數	無限制	約 3,000 次
功率範圍	MW 等級	MW 等級
安全性	機構外殼保護	燃燒爆炸疑慮
壽命	20 年以上	5~15 年

項目	磁浮飛輪	化學電池
效率	95%	75%~90%
操控性	操控簡單	操控複雜
適用性	(1)>50kW，飛輪體積與安裝優於電池 (2)<50kW，電池體積與安裝優於飛輪	
性能衰退	無	隨運轉時間衰退
發電總成本	\$300/kW	\$3,000/kW

綜觀國際儲能系統技術分布，如圖 1 所示。以抽蓄水力儲能與電化學之佔比超過 50%，其餘以熱儲存、電池、空氣壓縮、飛輪與機電儲存為主。雖然其顯示飛輪儲能佔比較小，但從圖 2 之全球飛輪儲能市場得知，市場產值以 CAGR 10.2%逐年增長，至 2030 年預估超過 4 億美金，顯示飛輪儲能市場具備市場潛力。

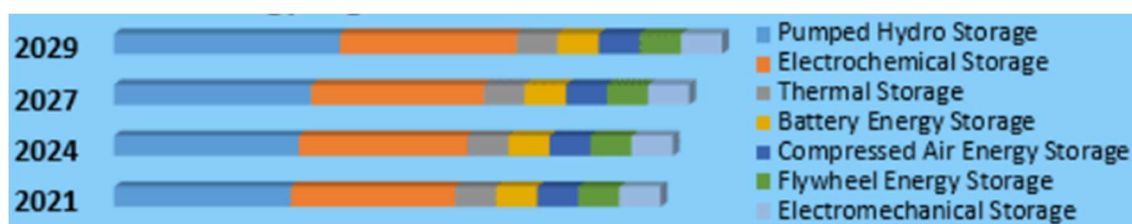


圖 1、國際儲能系統技術分布[3]



圖 2、全球飛輪儲能市場[3]

二、國內產業於之電網技術

磁浮飛輪可以作為能源管理與調節之輔助系統，這是因為能量可以很容易經由輸入和輸出進行轉換。因此在成本獲益考量，磁浮飛輪也可用於許多不同場域，可使整體系統得到良好性能，例如電網調節、再生能源整合、不斷電系統、混合動力車與電動車等。目前台灣儲能產業處於剛起步階段，國內廠商成熟技術包括電池、逆變器、能源管理控制、太陽能發電，如表二整理所示。國內尚未有國產磁浮飛輪儲能系統產品之原因，可分為三大面向：(1) 技術面—磁浮飛輪系統由於技術門檻高，面臨相關挑戰包括機組成本高、磁浮轉子動態控制複雜、飛輪材料、生產品質控管等問題。(2) 成本面—磁浮飛輪儲能系統技術目前仍是被國際大廠掌控，若要採取技術引進，勢必要非常高額的技術買斷金或授權金；且若無政府補助而採取直接購入磁浮飛輪零組件，作為系統整合商，並考量商業利潤，恐造成無市場競爭力。(3) 法規面—飛輪儲能系統在國內屬新儲能技術，在各領域的應用和推廣還受到原行業相關法規、標準和通用技術等限制，尤其是與電網整合，達成穩定供電與調節電網之目的，需要有相關法規之適法性，以免未來即使磁浮飛輪儲能系統產品化，但是卻有適法性問題，導致無法使用的狀況發生。

表 2、國內儲能產業廠商之技術與市場應用

公司	技術	市場應用
台達電	逆變器、電池系統、能源管理	分散式發電與微電網
台泥	能源管理與電池、再生能源發電整合商	再生能源發電、電動車充電站
台塑	磷酸鋰鐵電池	電機車、儲能
華立	太陽能系統、電池	太陽能發電、儲能、電動車
大同	太陽光電、智慧電表、儲能設備整合商	太陽能發電、儲能、節能監控
東元	發電與儲能系統整合商	微電網

公司	技術	市場應用
華城	發電與儲能設備整合商	再生能源發電系統工程
盛達	儲能設備組件代工組裝	儲能案場工程
宏碁	充電樁應用、引進儲能設備	電動車、不斷電儲能設備

有鑑於台灣於 2025 年再生能源目標佔比達 20%，且因應 2050 淨零碳排目標，再生能源佔比勢必將逐年升高，因此儲能市場經濟規模也將水漲船高，預估台灣儲能市場規模於 2030 年將累積 2,500 億元，如圖 3 所示。



圖 3、台灣儲能市場經濟規模

三、磁浮飛輪儲能系統於電網應用

在節能減碳的要求下，使用再生能源發電已成不可避免的趨勢。當再生能源發電佔比愈來愈高時，儲能系統將是能源供應鍊中不可或缺的一環。儲能系統除了可將再生能源所產生之電能加以儲存外，還包含: (1) 穩定電源—許多發電系統，尤其是再生能源（如太陽能、風能等），所產生之能源斷斷續續，且常有劇

烈變化，若直接供電，其電力品質必然不佳。儲能系統可先將不穩定的電力加以儲存，再轉為輸出穩定的電力，以確保電網供電品質。(2)持續供電—儲能系統可做為不斷電系統，確保即使發電系統暫時停止，供電不會中斷。這對於以再生能源為主能源的系統，特別重要。以太陽能為例，有陽光即能發電，無陽光時發電系統就停止運作。此時就能以先前儲存的能源，持續供電。(3)調節電源—這有兩個面向：頻率調節與負載調節。適當的調節交流電之頻率可有效節能，並保護敏感的電力設備。而所謂的負載調節是指離峰用電時儲存適當電能，當尖峰用電時由儲能系統中輸出電能以降低發電系統之供電功率。(4)管理能源—儲能系統進行有效的能源管理與最佳化分配。這對於包含多種發電來源的系統特別重要，因為有多少比例之用電來自於太陽能，多少來自於風能等，需進行適當分析才能使各種能源得到最有效率的應用。另一方面，藉由能源管理，我們也可以節省用電成本。

儲能系統種類繁多，各有優缺點。其主要性能指標包括：功率密度、能量密度、充電時間、能源回復效率、成本、與對環境衝擊等。依據文獻[4, 5]之分析結果，飛輪儲能系統是非常具有潛力的儲能系統，其優點包括功率密度高、能量密度也很好、充電時間快、能源回復效率接近百分之百、生命週期長也具高成本效益，且對環境衝擊低。然而，傳統飛輪系統之功率密度與能量密度等各項性能指標皆不佳，不如一般化學電池。近年來，由於幾項技術的突破，使飛輪儲能系統性能大幅提昇，成為潛力十足的儲能系統。這些關鍵技術包括：磁浮軸承、轉子材料及設計，與電力電子技術。且飛輪磁浮化之非接觸特性，避免摩擦所造成的能量損耗與振動，使飛輪可以突破傳統軸承速度限制。由於轉動動能正比於速度平方，這使得其能量密度、能源回復效率等性能大幅提高。

面對 2050 淨零碳排目標，許多國際磁浮飛輪儲能系統大廠已經產品化，例如：VYCON、Beacon Power、Active Power 與 Pentadyne Power 等，其應用層面也愈來愈廣，最普遍的為磁浮飛輪儲能電廠、不斷電系統，其他還包括電動車、

綠能建築、航太系統等。反觀，國內則尚無任何研發製造商，即使連學術界也僅有少數零星相關研究。對於國內綠能產業而言，在磁浮飛輪儲能系統之發展上有必要急起直追。

台灣電網屬於傳統集中式發電，如圖 4 所示[6]。由火力發電、核能發電或水力發電等發電廠產生電力，透過電力線路、變電所與控制設施、終端設備等，將電力輸送至用戶端，在整體運作方面，屬單向電力輸送。此種由上而下的電力輸送，若遇到事故，例如人為、電器機械故障與動物等因素，此相關事故問題容易透過電網擴散進一步造成電力系統癱瘓，進而發生大區域之斷電狀況。其次，由於發電廠與用戶端距離遙遠，都必須藉助輸變電系統提高電壓、透過電力線輸送、最終變壓供給用戶使用，此程序易造成大量的能量耗損。台灣地狹人稠，住商區與工業區過於集中，若要建造變電所或區域小型電廠，會衍生環保問題與民眾抗爭，集中式發電無法輸送穩定之電力至用戶端，造成區域性電力供需不平衡。再者，近年來兩岸局勢緊張，傳統集中式電網易遭受攻擊，導至全國電力系統癱瘓，影響國防、民生與經濟，可視為國安層級問題。

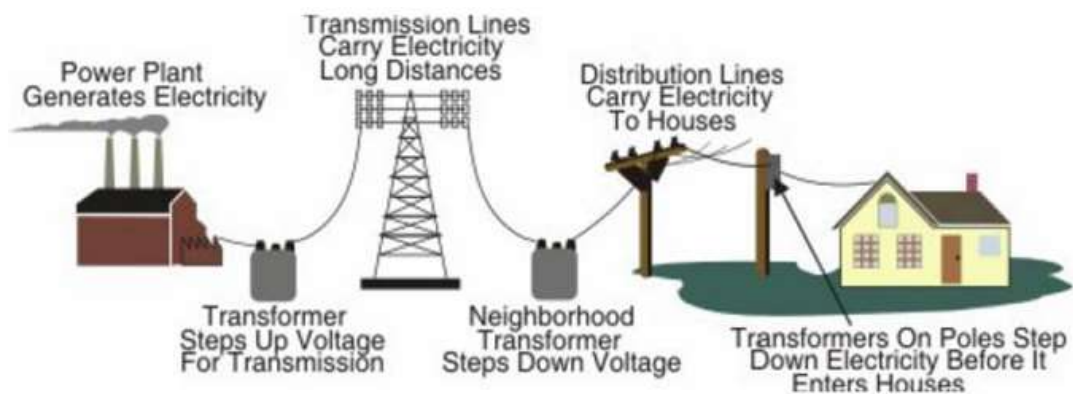


圖 4、傳統集中式電網[6]

分散式電網有別於集中式電網，可進行區域內的電力交換，若有剩餘或不足電力則在區域間進行交換，電力輸送方向不再固定，屬雙向電力轉輸。因此，分散式電網是由下而上的電力調度和控制。且為配合 2050 淨零碳排目標，分散式

電網之電力來源可由再生能源提供，同時搭配儲能系統，分散併聯在電網各處，用戶端即為獨立微型電廠，包括住商與工業。若發生事故，分散式電網的其他獨立微型之再生能源儲能設備仍可繼續供電，並在電網間相互調度電力，以達用電之供需平衡。分散式電網搭配再生能源與儲能系統之供電示意如圖 5 所示[6]。

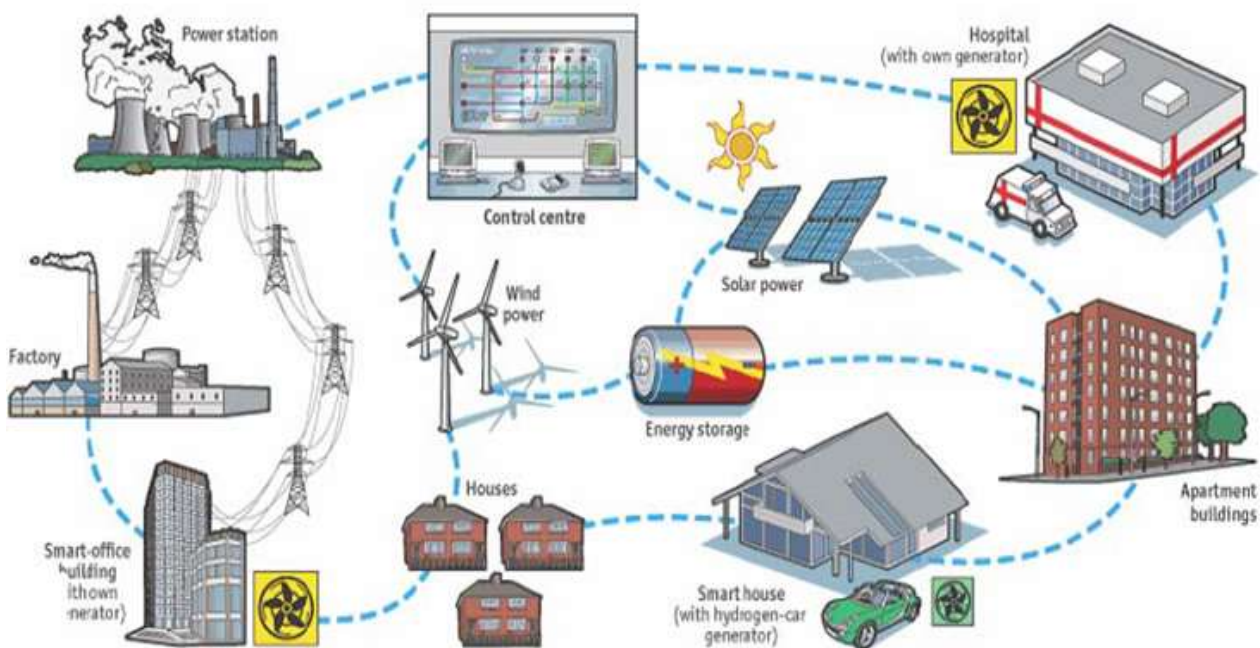


圖 5、分散式電網[6]

目前台灣儲能產業與儲能技術仍是以化學電池儲能為主，然而從表一之綜整分析可得知，磁浮飛輪可同時擁有化學電池所沒有之優點，特別是秒等級之充電速度、對環境友善、效率高、安全性高與總發電成本低，可取代化學電池作為分散發電網之再生能源整合儲能設備的最佳方案。其次，依電業法第 11 條規定，輸配電業(台灣電力股份有限公司)應設置電力交易平台，因此台電於「電力交易輔助服務市場」共有三項輔助服務交易項目，包括「調頻備轉」、「即時備轉」，以及「補充備轉」。依台電目前訂定的輔助價格上限，調頻備轉為 600 元/MW-hr，補充備轉與即時備轉均是 400 元/MW-hr。磁浮飛輪儲能系統之秒等級反應速度，在分散式電網中可鎖定調頻備轉與即時備轉，此二種電力需求對於終端之住商與工業區而言，正是我國當前集中式發電面臨之最為頻繁發生的問題。配合電業

法之電力交易輔助與磁浮飛輪相對低的總發電成本，可消除國內產學研對於磁浮飛輪儲能系統開發需投入大量成本之傳統思維，讓我國開始進行磁浮飛輪儲能系統於分散式電網之應用技術與產品開發，可避免像過去高科技產品技術被國際大廠攏斷，落入缺乏市場競爭力之困境。

四、參考文獻

1. 比爾蓋茲，“如何避免氣候災難”，2021年3月2日，天下雜誌。
2. <https://www.managertoday.com.tw/articles/view/63059?>
3. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/flywheel-energy-storage-system-market/122077/>
4. S. Choudhury, “Flywheel energy storage system: A critical review on technologies, applications and future prospects,” DOI: 10.1002/2050-7038.13024, John Wiley & Sons Ltd., July 2021.
5. A. G. Olabi, T. Wilberforce, M. A. Abdelkareem, and M. Ramadan, “Critical Review of Flywheel Energy Storage System,” Energies MDPI, 13 Apr. 2021.
6. <https://thoughtsprudencestrategy.blogspot.com/2020/03/smart-grid-vs-traditional-grid.html>