

不同儲能元件在 UPS 的應用

林鴻杰 謝奕平
台達電子工業股份有限公司

摘要

近年來由於電子科技及半導體產業的進步發展，精密儀器設備以及資料中心對電源品質的要求日益提高，也帶動了對不斷電系統(UPS)的需求，而在不同使用環境下設計 UPS 時需考慮效率、待機時間及體積等要求，初始設計時第一個遇見的課題即為空間限制，如何達到散熱效果好、高功率密度等都是需納入考量的範圍，其中尤以儲能系統的選擇是影響空間的重要關鍵之一，如何選擇儲能系統變成一個重要的議題，本文將介紹目前常見的四種儲能系統元件，包括鉛酸電池、鋰離子電池、超電容和飛輪系統，此外亦將介紹不同儲能元件在不同場合的應用考量。

一、前言

電源供電異常或電力品質不良時會造成負載設備的損害，其中影響電力品質的因素包括電壓過高或過低、突波雜訊、電壓閃爍、三相不平衡、諧波失真、頻率異常及市電中斷。UPS 主要的功能為提供高品質電源，能夠於市電異常或斷電時提供能量給負載，而提供能量的大小以及等待復電的時間長短則取決於儲能系統。而 UPS 的工作模式可再細分為四種，分別是在線式(on-line)、在線互動式(line-interactive)、及離線式(off-line)及電壓驟降補償器(sag compensate)。

而依照儲能系統不同，大致上可分為兩種，分別為機械能和化學能儲能，機械能系統早期發展為飛輪式不斷電系統，噪音及體積較大，直到電池技術提升後，開始使用化學能儲能，主要以蓄電池為儲能系統元件，但其對於環境條件的要求較為嚴苛，壽命也較差。工作原理解釋如下：於市電正常時，飛輪式 UPS 使用部分市電能量讓電動機透過轉子帶動飛輪維持旋轉動能，市電異常時，飛輪會釋放旋轉動能使轉子帶動電動機，此時電動機將轉變為發電機，並將旋轉動能轉

換成電能提供給負載；蓄電池式 UPS 則當市電正常時，部分市電能量透過轉換器轉變為化學能儲存於電池中，於市電異常，蓄電池釋放能量透過轉換器提供給負載，電池儲能系統元件目前常見為鉛酸或鋰電池，此外近年來超電容元件的快速發展，因其具有大容量、體積小以及快速動態響應等優點，超電容也逐漸被採用於 UPS 儲能系統中。

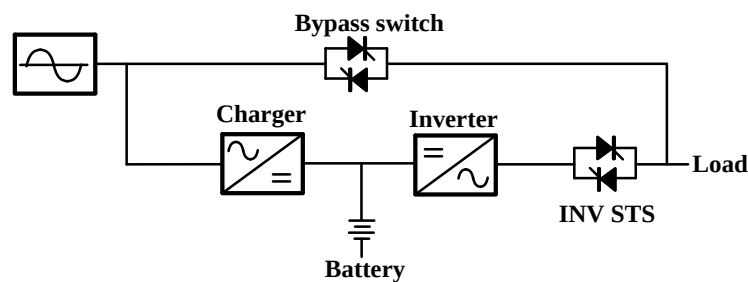
於本文中，第二節將介紹 UPS 功能，包含 UPS 的組成及各種不同工作模式，第三節將介紹目前 UPS 中常見的儲能系統元件，包含鉛酸電池、鋰電池、超電容、飛輪(Flywheel)等，第四節介紹不同的儲能系統於 UPS 的設計考量，第五節為結論。

二、 UPS 之基本架構

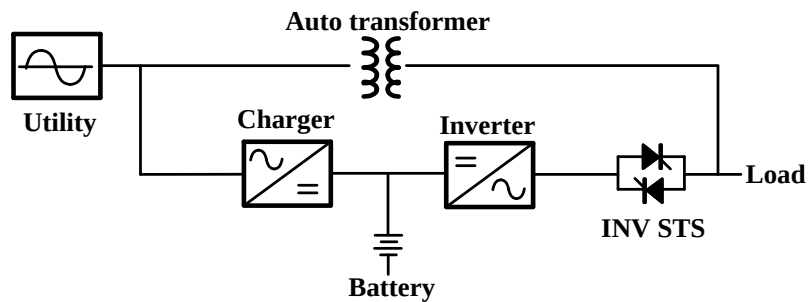
UPS 依工作型態分類，可分成離線式、在線互動式、在線式及電壓驟降補償器，此外電壓驟降補償器為當電壓驟降(voltage sag)發生時，具有修正電壓震幅的能力，此種 UPS 稱為 sag compensate UPS，此儲能系統一般不需大體積，因待機時間非常短；離線式 UPS 普遍應用於個人電腦與周邊設備，在市電正常下，負載能量由市電提供，而部分市電能量儲存於電池，市電中斷時，負載則由電池透過逆變器提供能量，市電切換成 UPS 供電時，負載需承受 4-12 ms 的轉換時間，此系統架構如圖一所示。

在線互動式 UPS 是以逆變器之市電併聯運轉技術為基礎進行設計，具有雙向功能的逆變器會同時負責電池充電及放電之電能轉換工作，此類系統由於逆變器平常即和市電併聯運作，因此可減少系統從斷電到電池釋能所需之轉換時間，在市電正常供電情況下，負載能量由市電提供，在輸入電壓變動時，能透過變壓器調整電壓大小，提供負載一穩定之輸出，此電壓頻率無法獨立控制，當市電中斷或頻率異常，則是由電池儲能系統透過換流器提供負載能量，圖二所示為具有充電器的在線互動式 UPS，逆變器為單方向輸出。

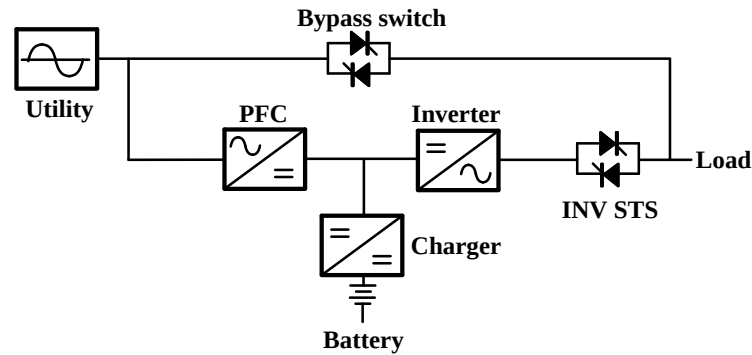
在線式不斷電系統先將市電電壓整流成直流型式，並將直流電壓與備用電池儲能系統連結，再由逆變器轉換為穩定可靠之交流電源輸出給負載使用，亦稱為雙級轉換(Double Conversion)，使用在線式不斷電系統，負載將完全不會受到市電電源之影響，輸出電壓與輸入電壓的振幅以及頻率為獨立控制，故可提供負載設備最佳之電力防護方案，常用於保護對電源品質要求較高之儀器設備上如圖三所示。



圖一 離線式 UPS

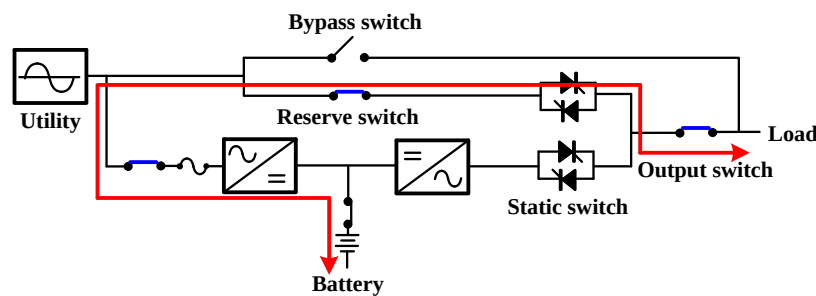


圖二 在線互動式 UPS

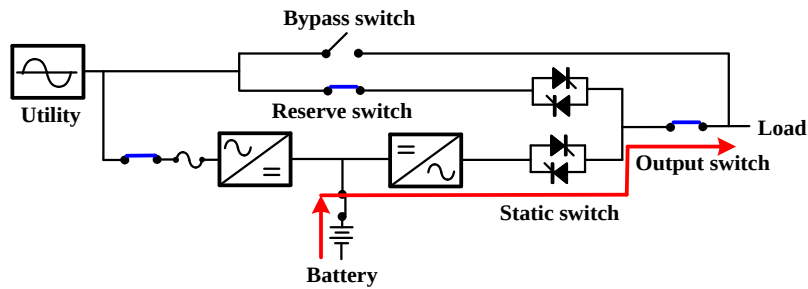


圖三 在線式 UPS

此外近年來能源危機及溫室效應的議題，UPS 效率也要求提高，於是在線式 UPS 發展出經濟模式(ECO mode)，此工作模式當市電正常時，負載由市電直接供給能量，逆變器為空載狀態；市電異常時，負載則由電池透過逆變器供電，如圖四、圖五所示。經濟模式主要優點為高效率節能，一般 Double Conversion 效率約為 92%~94%，因此搭配經濟模式時，效率可提高至 98%以上，此模式缺點為市電異常時，旁路轉換至逆變器供電的轉換時間較長，特別是電感性負載時，若轉換時市電與逆變器電壓震幅以及相位不同，則有轉換失敗及斷電等風險。台達電子專利的經濟模式轉換控制方法，具有快速鎖相控制及偵測機制，大幅降低轉換時間。這三種工作型態的 UPS，若以供應負載的電源品質區分，則在線式 UPS > 在線互動式 UPS > 離線式 UPS，以切換時間長短比較則是離線式 UPS > 在線互動式 UPS > 在線式 UPS。



圖四 市電正常時的經濟模式



圖五 市電異常時的經濟模式

三、 儲能系統之基本架構

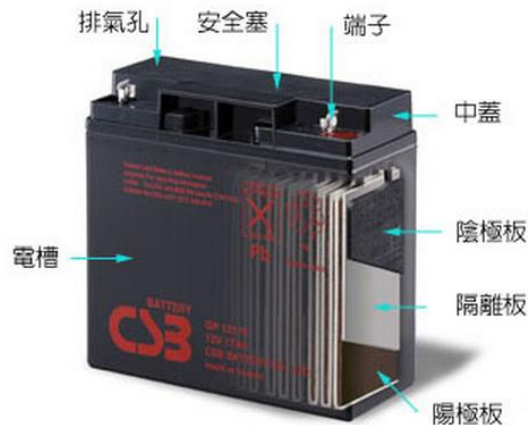
在 UPS 中，儲能系統是一個重要的角色，影響到 UPS 體積、壽命及成本，常見為鉛酸電池模組，具有便宜、穩定性高等優點，但廢棄時需回收否則會造成環境汙染，近年在環保議題重視下，逐漸被鋰電池取代，但於某些場合中，鉛酸電池依舊有其便利性以及價格低等優勢，此外在蓄電池儲能系統尚未成熟前，飛輪儲能系統為 UPS 常使用的架構，具有無汙染等優點，但效率低、體積大、以及高噪音為其最大缺點，近年來材料改善及電力電子技術進步，飛輪 UPS 也克服了效率和體積等缺點，重新開始被重視，以下將對目前市面上 UPS 使用之鉛酸電池、鋰電池、超電容及飛輪等儲能元件做一介紹。

鉛酸蓄電池(Lead-Acid Battery)最早於 1859 年由法國物理學家 Gaston Planté 發明，鉛酸蓄電池是目前發展最成熟的電池，具有諸多優點，包含結構簡單、瞬間放電率高、可循環充電使用、安全性高、高溫特性良好、價格低，鉛酸電池一單位(cell)標稱電位約為 2.04 V，而商品化的鉛酸電池通常為 3 單位串聯，標稱電位 6 V，或是 6 單位串聯，標稱電位 12 V。目前商品化的鉛酸電池主要分別是密封型與非密封型，密封型鉛酸電池(Valve Regulated Lead Acid, VRLA)，特點是不需額外補充電解液，因為其電解液在正常工作情況下不會蒸發成氣體而逸散至電池外部。

鉛酸電池整體可分為四大部分電極(陽極板與陰極板)、電解液、隔離板與外部電槽。目前極板常用鉛鈣(Pb - Ca)或鉛錫(Pb - Sb)合金，在鉛錫合金方面錫的優點是改善正極與活性物質間的接和，增加抗蝕性、延長壽命，但是缺點為錫溶於電解液中氧化成為 SbO_3^- 離子而還原在負極板上生成 Sb 將會產生氫氣造成自放電，而鉛鈣合金優點為因為鈣的添加使得鉛結晶細小而提升硬度，此外鉛鈣合金不會產生自放電，普遍使用於小型密封型鉛酸電池，陰極板常用海綿狀鉛因為其結合力較強，而陽極板為多孔狀的二氧化鉛(PbSO_2)。

鉛酸電池電解液為硫酸，除了導電外也參與電極反應，經放電而消耗(濃度變低、電阻值升高以及導電度變差)，而需充電再次生成，通常充飽的鉛酸電池中硫酸濃度通常介於 4.2-5mol/L。隔離板放置於兩電極間防止正、負極間短路，隔離板為絕緣的多孔性隔離板，須具備良好的離子交換性、耐酸性、抗氧化性及防止活性物質從電極表面脫落，且不得溶出雜質妨礙反應進行。

電槽則包括外部的電解槽和槽蓋，採用熱可塑性塑膠以加壓射出成型，須具備耐電壓、耐衝擊性、耐熱性、耐氣壓性及耐酸性等特性，然而電解槽並非完全密封，其仍然有安全閥以便於在電池內壓高於正常壓力時釋放氣體，保持內部壓力正常並阻絕外界氣體進入。其簡易結構如圖六所示，此為台灣神戶電池股份有限公司的電池圖(CSB battery)。此外，電池容量(AH)=放電電流(A)x 放電時間(H)，會隨著電池老化而電池容量變少，鉛酸蓄電池老化乃是隨著充放電次數變多，造成極板變型，逐漸喪失儲電能力，對於溫度的關係一般來說高溫時放電容量會較多，低溫時放電容量較小，當電容量下降到 50~80%時，定為壽命終結。



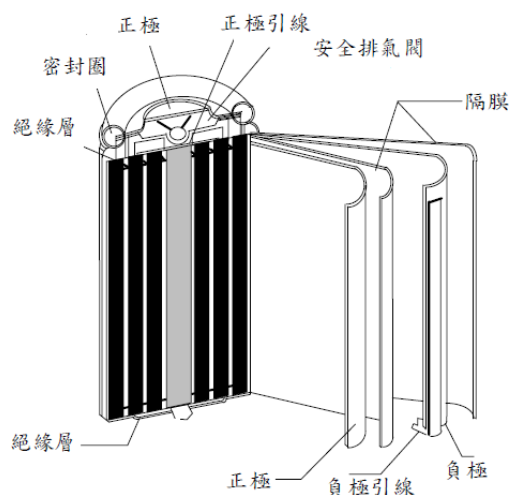
圖六 鉛酸蓄電池

鋰離子蓄電池為 UPS 使用的二次電池中的一種，鋰離子是金屬中最輕的元素，活性高密度小，標準電位為 -3.045 V ，為電位最負的元素，因鋰離子蓄電池的高能量密度，自我放電率低，使用壽命長，低汙染以及無記憶效應等優點，逐漸受到重視，單一鋰離子蓄電池電壓公訂為 3.6 V ，於充飽電池約為 4.2 V ，高於鉛酸蓄電池，此外鋰電池功率密度(130 Wh/kg)，遠大於鉛酸電池功率密度(30 Wh/kg)，且鉛酸電池能源轉換效率差(60%)，而鋰電池則可到達 95% ，因此鋰電池具有更小更輕等優點以取代鉛酸電池，於大功率使用有其體積優勢，目前研究改善方面則著重於充電次數以及正極材料的選擇。

鋰電池發展發展於 1985 年，加拿大公司 Moli 研發出以金屬鋰為負極、二氧化鉬(MoS_2)為正極的鋰蓄電池，初期量產的電池由於鋰金屬反覆電沉積與電溶解，累積成樹枝狀，刺穿隔離膜而導致內部短路燒毀而停產。1992 年，日本索尼公司(SONY)研究出鋰離子和凝膠聚合物的混合物做為電解質，改善了電池的充放電次數及安全問題，鋰離子二次電池才正式商業化，但於 1995 年 9 月發生鋰電池召回事件，當時 SONY 公司所製造的鋰離子電池發生過熱而爆炸的意外，只好回收所有該型號的鋰電池，而陸續也有其它鋰電池發生過熱，主要為環境差時電池化學反應產生的熱，因為散熱不佳造成熱累積，一旦電池內部熱累積遠大於熱散失時，導致電池昇溫，使電池內部產生一連串反應，引發火災爆炸。

常見鋰電池的負極是炭粉，正極為鋰鈷氧化物 (LiCoO_2)、錳酸鋰 (LiMn_2O_4) 或磷酸鋰鐵 (LiFePO_4)，電解液則是鋰鹽如 LiPF_6 、 LiAsF_6 、 LiClO_4 、 LiBF_4 或 LiCF_3SO_3 ，溶於碳酸乙烯酯或碳酸乙酯等有機溶劑。鋰電池產業中商業化程度最高為 LiCoO_2 結構，鋰離子蓄電池正極採用 LiCoO_2 ，負極採用石墨或焦炭，電解液採用溶解鋰鹽的有機溶液，在充電時，鋰離子從正極脫落，通過電解液和隔膜，附著在負極板上，放電時鋰離子由負極脫落，回到正極，在充放電過程中正負極材料不會改變結構，而是藉由鋰離子的脫落跟附著來產生電化學反應。與鉛酸蓄電池最大的不同為電解液，鋰電池使用有機溶劑作為電解液，因電解液不會產生電解反應，自我放電率低，但其具可燃的有機溶液，可能因過度充放電或者內部電池短路造成溫度過高，而快速釋放能量造成電池燃燒或者爆炸等危險，隨著爆炸事件發生，正極材料也轉向更高安全性的材料開發，另外該材料構成元素鈷金屬元素價格昂貴且具毒性。

圓柱型鋰離子蓄電池為目前常見的結構，內部為捲繞式，外殼使用塑料密封，電池蓋子採用刻痕防爆結構，如同電解電容，當內部產生化學反應氣體膨脹時，電池內壓大到一定程度時則刻痕破裂並放氣，如圖七所示。市售 18650 圓柱型 LiCoO_2 鋰電池為鋰電池代表，依照容量大小不同製造成不同的 18650 電池，內部需加裝電壓及溫度監控裝置，然而該正極材料電池在過度充電時，易有自放電損失現象產生，由研究結果知大約在溫度 117 度 C 時開始產生變化，導致電容量普遍不超過 140 mAh/g。



圖七 18650 鋰離子蓄電池

超級電容器 (Supercapacitor 或 Ultracapacitor) 是近年來發展快速的儲能元件，目前已有超電容模組所建立的儲能模組並且已於實際產品使用，與鉛酸和鋰電池相比，它具有電池無法超越的高功率密度以及暫態時的瞬間大電流輸出，此外使用壽命更長，因此其能被大量使用於儲能系統中符合容量、壽命及體積等要求。一般電容儲電量最大為 mF(Millifarad)數量級，而超級電容器的儲電能力為 F(Farad)數量級，超級電容器的運作原理同電解電容，因此與電池是完全不同的操作原理，在某些能量需求低的應用可取代電池做為電力來源，依照 2013 年 IDTechEx 公司的研究報告中，超級電容器的運作原理分為 Symmetric Supercapacitor 及 Asymmetric Intermediate Devices 兩大類；Symmetric Supercapacitor 為利用電雙層作用(Electric Double Layer)進行物理性儲電(Non-Faradaic)，簡稱 EDLC (Electric Double Layer Capacitor)，最大的製造商為美國 Maxwell Technologies；另一類為 Asymmetric Intermediate Devices 藉由電化學反應發生電荷轉移作用(Faradaic)，簡稱 EC (Electrochemical Capacitor)，其又可細分為 Supercabattery 及 Pseudocapacitor 兩類，最大製造商為日本 JM Energy (JSR Micro)。

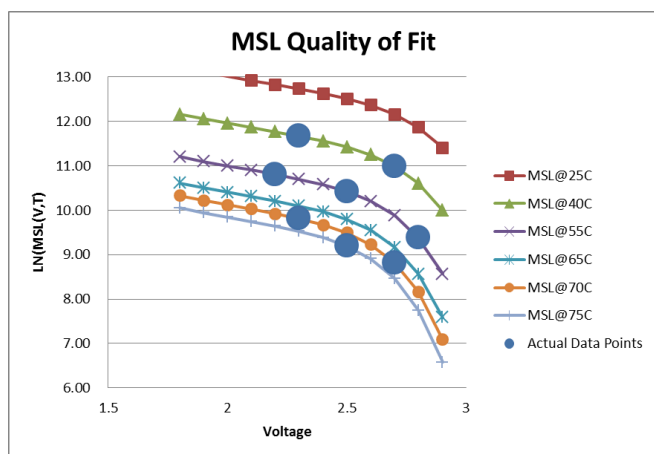
Maxwell 及 JM Energy 對自家超級電容的應用場合有詳細介紹，由公司網站得到資訊整理於表一及表二，兩家高能量型或高功率型超級電容在適當的功率輸出範圍內，EC 可做為 EDLC 小型化及輕量化的取代品。一般根據使用的電力需求，在高功率出力及短運作時間（數秒鐘）下，適合採用 EDLC，例如電動車瞬間加速時的高功率需求或者剎車時能量回灌吸收；而高能量及長續航力時，則適合選用 EC 做為儲能元件。超電容為大容量低電壓元件 2.2V~2.7V，使用時為模組方式，需加上電壓平衡電路，Maxwell 公司製單顆超電容壽命曲線如圖八所示，部分模組如圖九所示，以能成熟應用於 UPS 中，其壽命及功率密度皆有不錯表現。

表一 Maxwell 高功率型超級電容器之應用

Applications	Products
Back up Power	UPS, Emergency Lighting
Regenerative Power	Regenerative Braking, Wind Turbine, Grid, Solar Panel
Burst Power	Consumer Electronics
Quick Charge	Power Tools, Industrial Scanning, Retail Transaction, Road Signs, Emergency Communication
Cold Starting	Starting Internal Combustion Engine (Car, Buses Truck, Boats)

表二 JM Energy 高能量型超級電容器之應用

Applications	Products
Back up Power	Voltage Sag Compensator, Large-sized Manufacture Equipment
Storage	PV/Led Lighting, Medical appliance
Leveling	PV, Wind Power Generator



圖八 Maxwell 超電容壽命曲線



Specifications

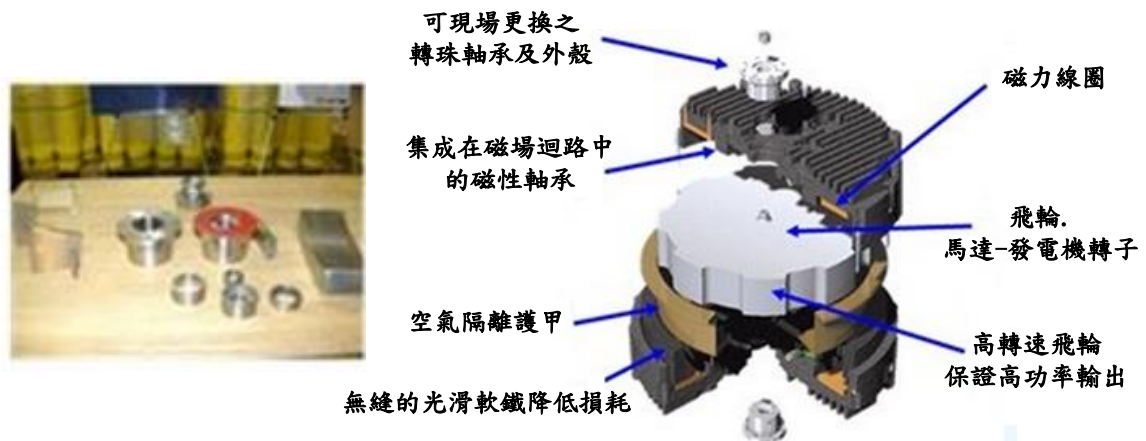
	K2 Series	48 V Modules	125 V Modules
Capacitance	650 - 3,000 F	83 - 165 F	63 F
Voltage	2.70 V	48 V	125 V
ESR, DC	0.29 - 0.8 mohm	6.3 - 10 mohm	18 mohm
Leakage Current	1.5 - 5.2 mA	3.0 - 5.2 mA	10 mA
E_{max}	4.1 - 6.0 Wh/kg	2.6 - 3.9 Wh/kg	2.3 Wh/kg
P_{max}	12,000 - 14,000 W/kg	5,600 - 6,800 W/kg	3,600 W/kg

圖九 Maxwell 超電容模組

飛輪儲能技術最早始於 60 年代，當時已被應用於 UPS，礙於體積以及噪音等缺點，一直沒有突破性的發展，使得飛輪式儲能逐漸被成熟的蓄電池儲能系統（鉛酸電池）取代，但廢棄鉛酸電池會造成環境汙染，到 90 年代，世界對於能源汙染等問題的重視，此種儲能元件重新被研究，加上三方面的突破，使飛輪重新被重視，一是高強度碳纖維以及玻璃纖維的出現，此材料能提高飛輪轉速，使其能儲存更多的能量，增加了單位質量的動能，二是電力電子技術發展，讓飛輪與發電機系統能量交換提供了技術基礎，三是電磁懸浮技術以及超導體懸浮技術的發展，配合真空技術，降低了機械摩擦與風力損失，飛輪 UPS 其特性為高可靠性、高安全性，工作壽命長達 20 年，佔地面積與同功率傳統鉛酸蓄電池儲能式 UPS 電源系統比較下約四分之一，維護也較為方便無汙染，圖十為飛輪基本架構示意圖，但目前尚有整體 UPS 功率密度不足的現況，相較於超電容以及鋰電池的比較下，其綠能及高效率優勢於未來發展是可被期待的。

目前此種儲能元件應用於 UPS 中的代表性公司為美國 ActivePower，其採用為新的 UPS 應用設計，市電正常時，由市電提供能量給負載，並且使電動機帶動兩百公斤重的飛輪在真空中旋轉，市電異常時，由飛輪利用慣性能量帶動發電機，此轉換時間極短，但是與蓄電池比較下，飛輪大約只能維持 15 秒~1 分鐘的時間，必須搭配柴油發電機，於此時間內柴油機將會發動提供備用電源，由於相較於鉛酸電池提供較好的轉換效率以及減低環境汙染，受到應用端客戶採

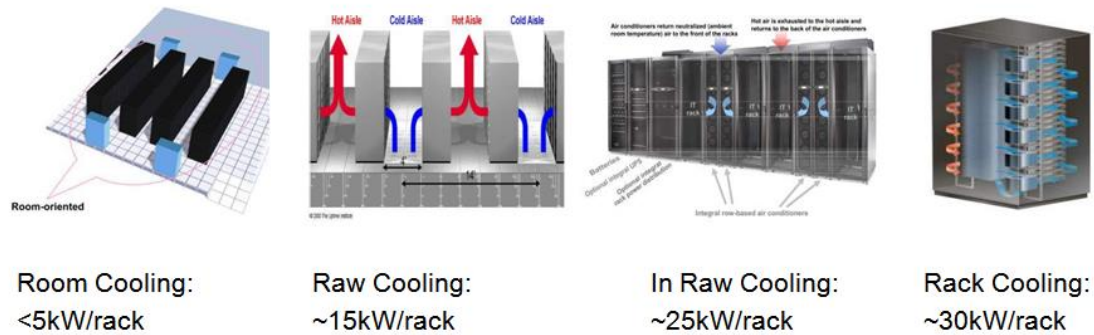
用，於最新 2013 年資料顯示美國 ActivePower 公司此種 UPS 產品銷售成長約 30%，飛輪的另一個優點為對環境溫度要求不高，從而節約了大量的空調製冷設備和電力消耗。



圖十 飛輪架構

四、 UPS 採用儲能系統考量

UPS 於設計考量中主要注重於空間限制、功能性及待機時間，UPS 設計高度有 1U、2U、3U (1U=1.75 英吋=4.45 公分)以及塔型，待機時間則是有 1 秒~1 分鐘，10 分鐘~1 小時之分別，功能性則是有 Off-line、On-line、Line-Interactive、Sag Compensate 之分。空間大小和散熱方式會影響到電池選用，依照空間不同分為架式 UPS(Rack)和獨立式 UPS(Stand alone)，圖十一為架式 UPS(Rack)在不同散熱方式下，建議搭配使用的 UPS 功率範圍，此儲能系統由於電池和 UPS 在同一個機架內，體積小和功率密度高，通常使用鋰電池為儲能元件，而另一種獨立 UPS(Stand alone)則是電池跟 UPS 機台分開，空間規劃時具有單獨一間房間儲存電池堆，通常使用鉛酸電池，並搭配空調系統調整環境溫度。



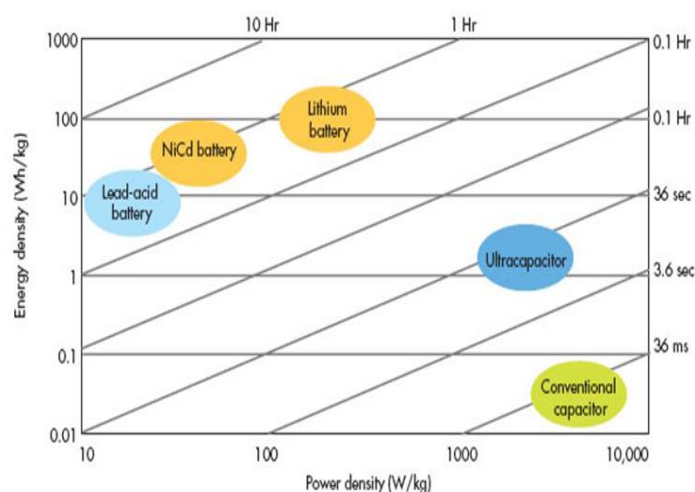
圖十一 UPS 使用環境

圖十二為不同儲能系統元件的功率密度以及待機時間，包括鉛酸蓄電池、鋰離子蓄電池、超電容等，功率密度以鋰電池最高，瞬間動態電流則是超電容較大。圖十二可以看出鉛酸蓄電池與鋰離子電池較為相近，都常應用於大功率，長待機時間的最佳選擇，但如果空間限制，鋰離子電池較有較佳功率密度，此外考慮瞬間動態變化，鋰離子於此方面遠勝於鉛酸電池，然而造價比鉛酸電池昂貴為其缺點，目前最常使用的儲能系統還是以此兩種電池為主，使用時需注意溫度，避免儲能模組過熱而損毀。

超電容元件特性不同於電池模組，其特性比較接近電解電容，超電容可以多次充放電，瞬間動態電流優於電池模組，但超電容的待機時間短為其缺點，因此超電容系統很適合應用於 Sag compensate UPS，因瞬間動態響應好可以提供補償電壓，且其待機時間一分鐘內，可以做到 UPS 有體積小的優勢，超電容儲能系統具有下列特性：

1. 寬範圍溫度適應-40~85C
2. 充放電次數 500,000 以上
3. 好維護維修
4. 不會有電流過放的困擾

表三為各種不同儲能元件整理比較表，在高功率密度以及快速動態響應和體積考量中，超電容為介於兩者之間的優良選擇。

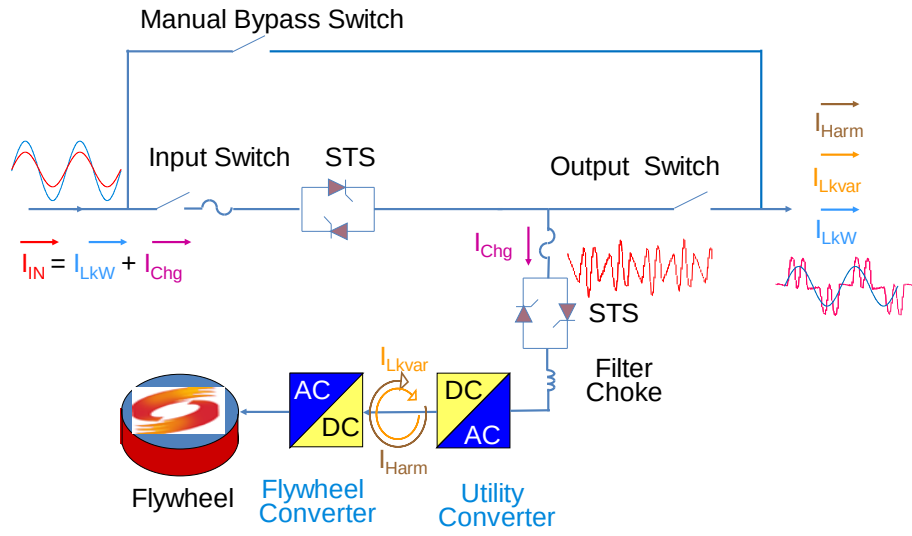


圖十二 各種電池儲能系統應用範圍圖

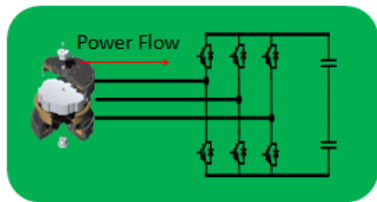
表三

	Electrolytic Capacitor	Supercapacitor	Battery
Voltage (V)	6.3~600	<3.3	<5
Energy Density (Wh/kg)	<0.1	1~10	10~100
Power Density (W/kg)	10,000~100,000	100~5,000	50~130
Discharge time	~0.1s	1s~1min	10min~10h

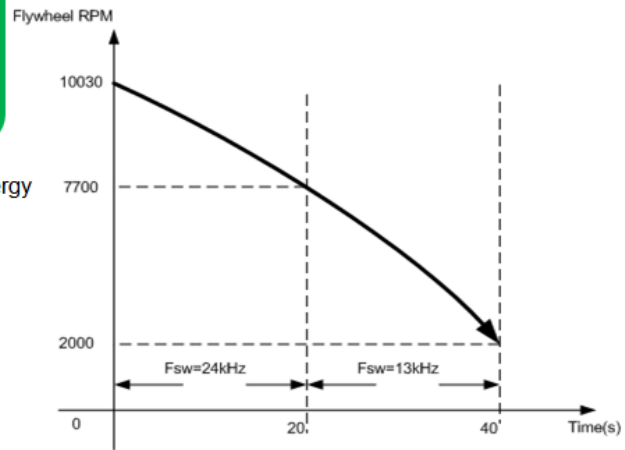
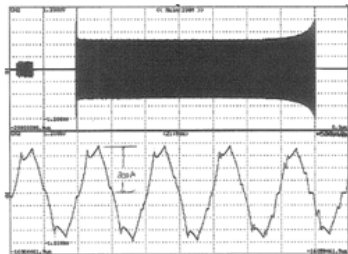
飛輪 UPS 系統為物理能儲能系統不同於化學能儲能系統，圖十二為飛輪 UPS 的架構圖，此為具有主動電力濾波技術功能(APF)的 UPS 系統，因其飛輪儲能系統轉換電路為雙向電力潮流(Bi-Directional Power Flow)，可以搭配主動電力濾波技術的優勢，將輸入端的電流諧波成分過濾，其優點為無環境汙染、相較鉛酸電池儲能的 UPS 有較小面積、較長使用壽命、可忍受環境溫度變化、系統散熱要求低且其切換時間為 0，但待機時間較短為其缺點，約 1 分鐘以下，圖十三(a),(b)為飛輪 UPS 的實測波形圖，可看出電力異常時幾乎沒有轉換時間，系統效率可以做到 98%，與台達 UPS 操作在經濟模式效率相差不遠，圖十四為台達三相機台效率，最高效率 96.43%，在經濟模式供電時，最高效率 99.17%。



圖十二 飛輪 UPS 系統

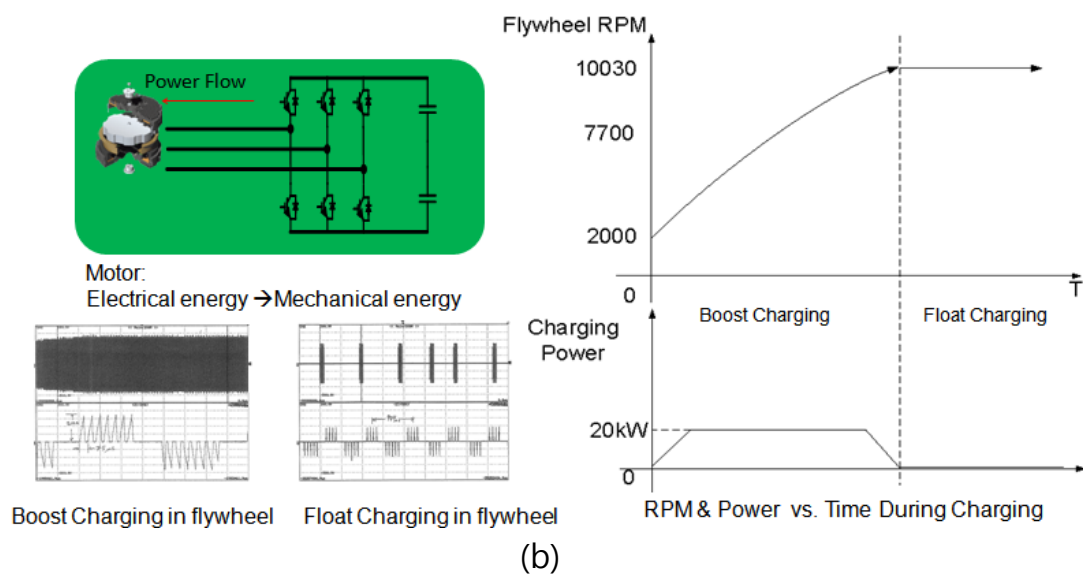


Generator:
Mechanical energy → Electrical energy

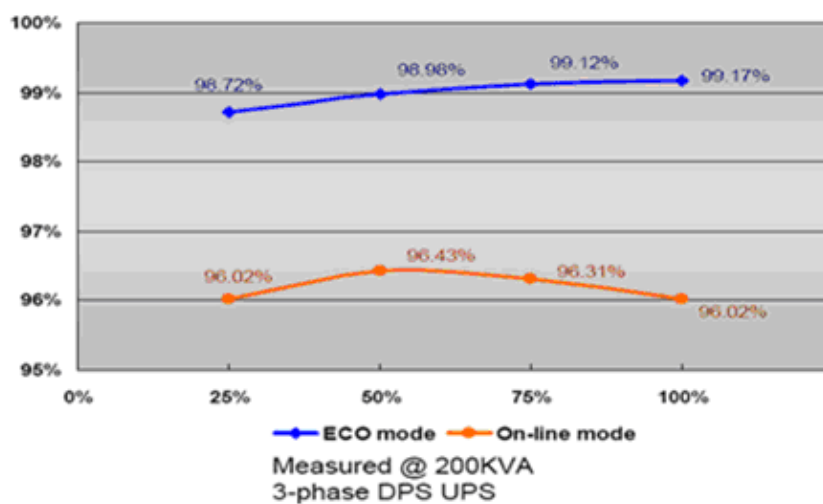


RPM. vs. Time During Discharging

(a)



圖十三 (a) 飛輪 UPS 釋能 (b) 飛輪 UPS 儲能



圖十四 台達電子 200kW UPS 效率曲線

五. 結論

本文主要介紹目前 UPS 常用的儲能系統元件，包含鉛酸電池、鋰離子電池、超電容、飛輪等的特性，並將其最近產業發展資訊一併介紹，其中各種不

同儲能元件應用於系統中的考量也一一描述，各種不同的 UPS 已於機台中量產，在諸多儲能系統發展的同時，電力電子技術方面的發展也朝向大功率、高功率密度以及高效率的方向前進。

六. 參考文獻

1. 工業材料雜誌 323 期，材料世界網 <http://edm.itri.org.tw>。
2. 吳品謙，"以電化學阻抗頻譜檢測密封型鉛酸電池的儲電狀態"，國立成功大學，民國 102 年 6 月。
3. 陳怡萍，"以電化學阻抗頻譜檢測密封型鉛酸電池的儲電狀態"，國立中山大學，民國 96 年 6 月。
4. 官弘毅，"18650 鋰離子電池之不同電壓與熱危害相關性研究"，雲科大實務專題，2012 年 3 月 1 號。
5. 林素琴，2009，"大好前景-鋰電池材料發展分析"，工研院電子報，第 9810 期，10 月。
6. 陳振崇、邱國峰、王復民、楊長榮，2010，"高功率耐過放電鋰錳氧化物陰極材料用於薄膜電池之研究"，工業材料雜誌，第 277 期，1 月。
7. 柯賢文，"鋰電池"，482 期，科學發展 2013 年 2 月
8. 飛輪 UPS 資料來源，<http://www.activepower.com/>
9. 超電容產品資料來源，<http://www.maxwell.com/>