

7. 自動化機具之鋰電池串並聯平衡技術應用

陳聖副教授、陳治臻副教授、胡建全資深講師
華夏技術學院 電機工程系、資訊管理系

摘要

本研究係針對使用鋰鐵電池為動力來源之自動化機具進行電能特性分析，並說明串聯鋰鐵電池在充放電過程中所造成之過充電及過放電的不平衡現象。另研製以四只鋰鐵電池串聯組成之平衡電路模組，再由前述之模組串接四組形成具有平衡電路功能之十六只串聯之鋰鐵電池。在韌體晶片係採用89C51做控制，同時製作電腦記錄系統，透過USB介面傳送multiplex信號，對每只串聯電池之電壓進行掃描與登錄，掃描擷取所得之電壓值並可直接輸入示波器做顯示，亦可以SD記憶卡做紀錄，以利後續之觀察與探討。本研究之結果與電阻並聯平衡法做比較，雖然電路控制架構較複雜、切換頻率及責務週期必須有所限制，但其確實可以有效的改善電壓平衡問題，同時對電池提供高功率之並聯輸出，以改良並聯切換法之缺失，更可達到串聯平衡之效益及延長電池使用壽命，提高自動化機具之續航力。

關鍵字：鋰鐵電池、串聯平衡電路、改良並聯切換法

一、前言

自動化機具過去多以鉛酸電池帶動變頻器驅動馬達，為了能夠達到輕薄短小的目標，目前在電池能源已大部份朝向鋰鐵電池方向去做汰換，以達成重量減輕、能量密度高的節能效果。

由於石油短缺日益嚴重，造成價格的高漲與不穩定，則對全球節能減碳的呼籲，近年來交通工具均逐漸捨棄以燃油為動力而朝向節能方向設計開發，利用磷酸鋰鐵電池(LiFePO₄)作為自動化機具動力之電源，取代燃油動力，是當今環保議題的最佳選擇；在台灣地區已有近百萬輛的以石油做為燃料源的機車，已造成大量的環境汙染及石油損耗，因此自動化機具以鋰鐵電池做為動力源將可有效的節能及減少環境汙染。

單只的鋰鐵電池具有電池電壓較高、80-120Wh/kg之高儲能重量比、200-300W/kg高功率重量比、500-900次充放循環壽命且充放電能源效率高達95%、每月2%~5%之低自放電率、無記憶效應、可以1.5C做快速充放電之諸多特點；基本上鋰電池組可以利用串聯模式增加輸出電壓，而並聯模式可以增加輸出的電流；單只的鋰電池的輸出電壓約在

2.8V-3.5V之間；若使用並聯方式，額定輸出電壓太低，電流必然太大，造成開關困難，因此一般在高功率應用上常使用串聯方式來增加電壓以達到降低電流之額定；在電池的串聯一般有4只、8只、16只等組合方式。以串聯方式使用之鋰電池組，由於在電池製程，材料、元件之不同，內部之等效電阻，電容各有不同；若使用時，某個鋰電池充電已達額定電壓，其餘串聯之電池仍處在未充滿之狀態，此時若切斷充電電路，進行加載使用無法發揮最大的電池儲量應用，反之若繼續充電至每個電池均達到額定電壓才切斷充電電源，必造成一些電池過度充電，而使極板氣泡現象加劇、溫度上升，產生安全上之風險並直接降低電池之使用壽命，降低市場接受之程度。同理，當鋰電池組在串聯放電使用下，由於不均勻的等效電路造成某個電池已達放電之下限電壓，而其餘的電池仍為有效的放電狀態下停止使用，造成未充分發揮電池蓄積電能之浪費；而欲將串聯內之所有電池放電至下限電壓，則大部份的電池，必處於過度放電之狀態，造成鋰電池電極板之化學侵蝕加劇，使電池加速老化，並降低有效充放電次數。由上所述，必需要解決的是鋰電池在串聯時，充放電電壓不平衡的問題，因此必需設計電池平衡電路，使得串聯使用中的電池能在平衡情況下充放電，達到電池之最大效能及壽命。

國內除了承德科技公司外，亦有多家廠商投入鋰電池之材料研發及應用技術發展，如表一所示[1][2]，其他的廠商包括有：動能科技及昇陽國際生產動力型鋰鐵電池，有量科技專業於高分子鋰電池的開發，必翔車業之電動輪椅是採用24V,10AH,8只鋰鐵電池串聯8組並聯，共計64顆的鋰鐵電池，又鋰鐵助動之自行車則採用24V, 5AH, 8只鋰鐵電池串聯4組並聯，共計32顆的鋰鐵電池。至於大於8組鋰鐵電池串聯模組之應用，尚缺乏實際成功之案例，其主要原因之一，即為串聯平衡電路之實用性尚有改進的空間。

表一、國內鋰電池產業結構(資料來源：工研院材料所)

鋰電池廠商	產業型態		國內廠商
	上游	電極板製作	中碳、宏全
	中游	電池芯封裝	台超、金山
	下游	充放電活化	承德、統振

至於串聯平衡電路的方法，主要可區分為電阻並聯法以達到高電壓電池釋放較大能量於放電電阻上之自然電壓平衡[3]，及高電壓電池以電感電流

儲蓄磁場能量，再依序傳遞至低電壓電池達到平衡的目標。此系列的多樣控制法則，在串聯平衡電路中，包括模糊控制器、類神經控制器等[4][5]。本文設計研製，即以電感切換的平衡方式對高串聯模組提供低耗能、經濟、實用的選擇，並使用16只串聯鋰鐵電池驗證平衡電路的正確性；雖然增加了電路複雜度而使實用性略微降低 [6]，但利用電感之零耗能來取代電阻，達到串聯平衡之目的，並有效提昇電池電能利用率。

二、鋰鐵電池的特性

鋰金屬電池包括有：鋰錳電池(LiMnO₂)、鋰鈷電池(LiCoO₂)、鋰鈷鎳電池(Li(NiCo)O₂)及磷酸鐵鋰電池(LiFePO₄)，而已知鋰鐵電池特性為鋰金屬電池中具有最佳之能量密度及充放電壽命，特別適合重載之移動性載具，如自動化機具等使用；其特性之比較如表二及表三所示。

表二、電池特性比較表

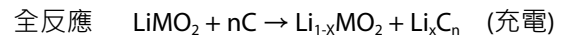
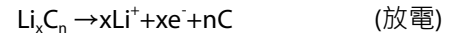
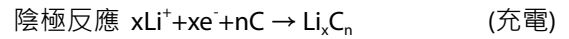
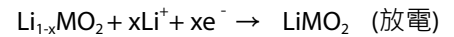
項目	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Poly	Li-Fe
工作電壓(V)	1.2	1.2	3.7	3.3
能量(WH/kg)	40-60	60-90	115	115
能量 (WH/L)	130-200	200	260	260
Life-Cycle(次)	300-500	300-500	500	2000
每月自放電(%)	10-30	30-50	5	5
價格	1.0	1.2	3.0	5.0

表三、鋰金屬電池之特性

材料	電壓	容量/重量
LiMnO ₂	4.0v	100mAh/g
LiCoO ₂	3.7v	140mAh/g
Li(NiCo)O ₂	3.6V	115mAh/g
LiFePO ₄	3.3v	170mAh/g

鋰鐵電池具有115(WH/Kg)的儲能/重量比，沒有記憶效應，以及相對於鎳鎘電池自放電10%/月、鎳氫電池30%/月，鋰鐵電池僅有5%/月的自放電率；在1 C 倍率充放電情況下，其循環壽命可以超過500次，因此鋰鐵電池具有優良的儲存性能及循環壽命；除了普遍使用在消費性產品上，更將使用在移動性高功率自動化機具之應用，但是欲將鋰電池應用由低功率轉移至高功率之應用，必須先了解鋰電池結構及充放電反應特性，以免在串並聯的組合應用時發生爆炸危害事件。

鋰電池結構包括陽極(anode)、陰極(cathode)及電解液(electrolyte)



其中M代表Fe、Co、Ni等，當過度充電將產生如下氧化鋰之不可逆反應，造成壽命之減損；圖1所示為鋰電池之典型充電電壓、電流及容量曲線

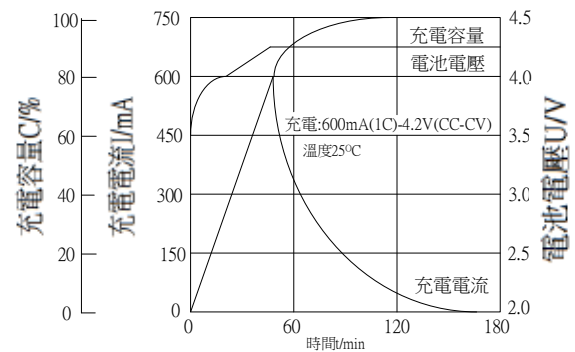
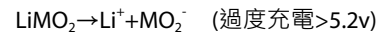
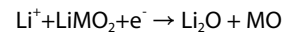


圖1 典型鋰電池充電電壓電流及容量

三、自動化機具電能分析

1. 自動化機具電力需求量 P_{k1} (慣性力加摩擦力 $m(ag) + mg$ 、機械效率 η 以及控制力 $u_{m1}(t)$ 有關) :

$$\begin{cases} P_{k1}(t) = \frac{ma_i(t) + \mu mg}{\eta_0} \\ P_{m1}(p_{k1}, u_1) = P_{k10} + \sum_{i=1}^k \int_0^{t_j} [p_{k1} + u_{m1}(t)] dv_i \end{cases} \quad (1)$$

承載電力需求量 P_{m2} (與慣性矩 $\alpha_{ij}(t)$ 、機械效率 h_j 有關) :

$$\begin{cases} p_{m2}(t) = \frac{1}{\eta_j} \sum_{j=1}^{N_2} I_j \alpha_{ij}(t) \\ P_{m2}(p_{m2}, u_{m2}) = P_{m20} + \sum_{i=1}^k \int_0^{t_j} [p_{m2} + u_{m2}(t)] d\omega_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

2. 自動化機具之總電力需求量 P_{m2} (總和) :

$$\begin{cases} P_s(f_i) = P_{s0} + \sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^{N_3} \zeta_j f_j \right) \\ P_c(f_e^j, f_\mu^j) = P_{c0} + \sum_{i=1}^k \left\{ \sum_{j=1}^{N_{A1}} \xi_{ej} f_e^j + \sum_{j=1}^{N_{A2}} \xi_{\mu j} f_\mu^j \right\} \end{cases} \quad (3)$$

3. 電子模組之總電力需求量 P_{m2} (含單晶片微處理器) :

$$P_i(t) = P_{m1}(p_{m1}, u_{m1}) + P_{m2}(p_{m2}, u_{m2}) + P_s(f_i) + P_c(f_e^j, f_\mu^j) \quad (4)$$

自動化機具總電力需求量 P_{m2} (含機械與電子模組) 、泛函數 $J(P_i)$:

$$\begin{cases} P_{M,i} = \int_0^t \pi_i(t) [P_{m1}(p_{m1}, u_{m1}) + P_{m2}(p_{m2}, u_{m2})] dt \\ J(P_i) = (P_0 + \sum_{i=1}^k P_{M,i}) / P_{max} \end{cases} \quad (5)$$

4. 鋰電池模組總電力供應量 $D_{cell}(t)$ (cell 電力供應量 $\bar{d}_c(t)$ 、cell 效率 η_c , SOD 狀態 $q_{cic}(t)$ 以及飽和充電 $q_{max,i}$ 有關) :

$$\begin{cases} D_{cell}(t) = \sum_{i=1}^n \eta_{ci} d_{ci}(t) = \sum_{i=1}^n \eta_{ci} \left[\frac{q_{max,i} - q_i(t)}{q_{max,i}} \right] \\ \bar{d}_c(t) = \sum_{i=1}^n \eta_{ci} d_{ci}(t) / n \end{cases} \quad (6)$$

四、鋰鐵電池串聯平衡電路

圖2所示為電池串聯平衡電路，其中V為電池之內生電壓，ri為電池之內阻，利用並聯電池放電電阻R之方法，以達到電池電壓較高者可釋放出較大的能量於其所屬之放電電阻上，此法即為並聯電阻自然電壓平衡電路。此法雖簡單，但在充放電過程中會不斷的耗費電能。在有限的電能使用情況下，頗不符合電能效益，尤其是使用在高電流負載之自動化機具情況時，其使用效率將隨著串聯電池個數m的增加而降低[7][8]。

$$\eta \% = \left(1 - \frac{I_L \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{R} \right)^{-1}}{\sum_{i=1}^m V_i \left(\frac{R}{R+r_i} \right)} \right) \times 100\% \quad (7)$$

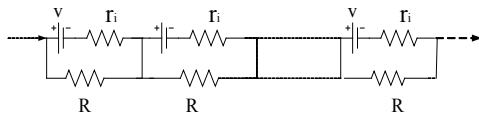


圖2 串聯平衡之並聯電阻R電路

上述之並聯電阻自然電壓平衡電路，即使在電壓已達平衡狀態下，仍無法停止電阻之並聯放電，因此效率低落，在圖3中的開關只有在某些需要平衡的時段才會被觸發導通，以達到當電壓平衡時，並聯電阻R會由電路中被切離，使得平衡效率略為提升，其中n為總電池數，k為已達上限電壓之電池數[9]。

$$\eta \% = \left(1 - \frac{I_L \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{R} \right)^{-1} + I_L \sum_{i=1}^k r_k}{\sum_{i=1}^m V_i \left(\frac{R}{R+r_i} \right) + \sum_{i=1}^k V_k} \right) \quad (8)$$

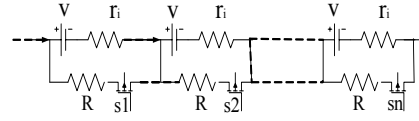


圖3 並聯開關電阻之串聯平衡電路

圖4所示為電感式平衡法，其可改良前述之並聯開關電阻平衡法之缺點；亦即電池之能量會在處理平衡的過程中被電阻消耗掉，而切換電感以磁能為媒介，達到依序平衡之結果，因此可以有效降低實功率消耗，提高電池能量之利用率；例如：當電池E之電壓低於串聯電路中之最高電壓電池A，則由S1觸發導通開始，迴路1導通電流將電池A電能儲存於電感L1中；當S1斷開瞬間，S2之並聯飛輪二極體，提供迴路2將電感L1磁能轉為電能，回送至電池B如此依序觸發導通S1→S3→S5→S7，可將電池E獲得最高電壓之電池A能量而平衡之；當觸發導通次序改為S8→S6→S4→S2，則電流之方向與圖4標示方向相反，能量可由電池E反向對電池A充電。另就過充電池A對電池E平衡放電為例，S1導通時，I1會隨時間線性上升，並於t1p達到峰值，同時為了防止過充電池A再度充電及放電，產生昇降壓；因此必須保持S1導通期間，電池A的總電流為零，即峰值電流為充放電流IS之半[10,12]，由

$$\begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} &= V_A \quad \text{得知} \\ I_{1p} &= \frac{V_A t_{1p}}{L} = \frac{DV}{f_s L} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 f_s 為切換頻率；D為工作責務週期。

又由於電路對稱性，S1導通時間與下一級飛輪二極體導通時間均為D；為保證電感完全釋出儲能切換週期 T_s 必須大於2D，因此切換頻率必須大於 $V_A/(LI_s)$ ；即

$$f_s \geq \frac{V_A}{LI_s} \quad (10)$$

電感式平衡法對減少電能損耗有貢獻，但相對的增加控制電路的複雜度與精密度的要求，基本上，必須加上(1)電池電壓取樣偵測；(2)單晶片判定電壓高低；(3)依序產生高頻精密觸發控制信號；使電感電流在不連續區間工作；而電路架構產生如下缺點：

1. 平衡能量必須依序由最高電壓至最低電壓間穿越及游走，會造成時間的延遲及電池內阻之壓降造成溫昇效應。

- 觸發電路誤動作或工作責務週期(Duty Cycle)不適當(責務週期必須小於0.5，否則電感累積電流造成磁飽和)，會產生電池短路的危險。
- 控制電路複雜在高功率之自動化機具經濟性及實用性尚待改善。

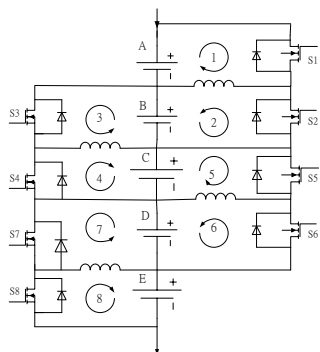


圖4 切換電感之串聯平衡電路

五、實驗製作

為驗證串聯平衡電路實用性，圖5所示為16串鋰鐵電池之實驗平台，係以4串電感平衡為一模組，由該模組4組串接組成之16串接之平衡電路。



圖5 16串鋰鐵電池工作平台

控制晶片係採用89C51燒錄控制程式之韌體，如圖6及圖7所示，以頻率1.8KHz掃描類比開關IC4052之4組電池(X₀,Y₀~X₃,Y₃)，經DAC0804轉換為晶片輸入P1.0~P1.7之數位信號，經程式判斷最高電壓及最低電壓後，開始由(S₀,T₀~S₃,T₃)輸出控制信號經光耦合器切換電感，依序達到平衡電池電壓。

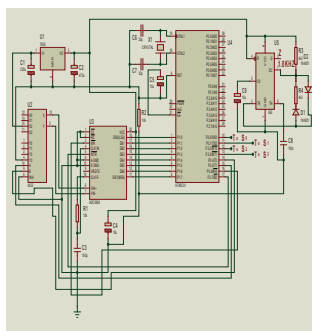


圖6 控制晶片電路

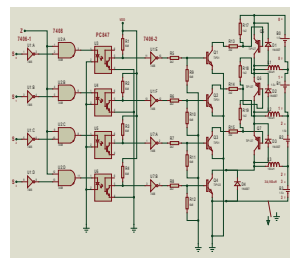


圖7 控制信號經光耦合器切換電感平衡電路

欲將電壓平衡過程做成記錄，圖8顯示透過USB介面傳送multiplex信號至74154，對每只串聯電池之電壓進行掃描，傳送至12 bits IC AD574，並經USB I/O PORT至電腦做記錄及觀察，亦可將AD574輸入信號直接輸入示波器(GDS-1022)以SD記憶卡紀錄波形。

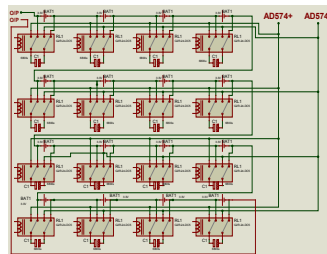


圖8 多工器電路

單晶片控制輸出信號，經High-Enable及光耦合器送至電感式平衡法之功率側，不僅隔離防護且可選擇適當時間再做平衡，降低對系統的干擾。

為使自動化機具之電池，能對負載供給高功率之輸出，一般均採用並聯方式如圖9所示，就左側圖為例；16S2P共使用32只鋰鐵電池輸出，若以圖9右側之改良切換方法做替換，當模組(4S)電壓放電至低臨限值即切入新的模組，並經串聯平衡電路平衡之；直至切入4次模組後充分使32只鋰鐵電池完成使用；又並聯方式及改良並聯切換法經由電腦模擬比較，顯示改良並聯切換法確實能較一般並聯方式提供更長的工作時間，因此更可提高自動化機具之續航力。

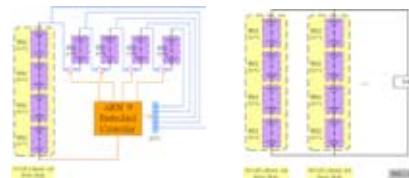


圖9 並聯供電(左)及改良並聯切換法供電(右)

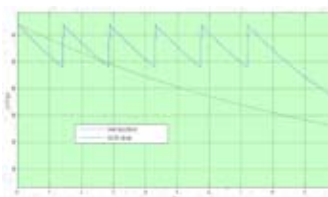


圖10 並聯法及改良並聯切換法放電時間曲線

六、實驗結果波形

圖11所示為圖7電感平衡電路負載週期46%之正常工作電感電流波形及飛輪二極體電流波形以示波器顯示之結果。為進行電流之量測已加入shunt 電阻 0.5Ω 。電子負載係使用Chroma 63103加載。電腦經USB介面。控制多工電路掃描串聯平衡後。鋰鐵電池電壓波形。證實平衡電路及多工記錄系統能提供有效之運作。

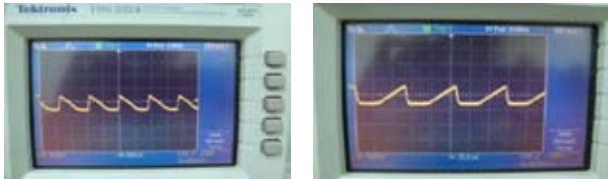


圖11 電感電流波形(左)及飛輪二極體電流波形(右)

七、結論

本文探討鋰鐵電池串並聯應用時。串聯所產生的不平衡充放電現象。並分析自動化機具使用電池之功率數學模式。再由鋰鐵電池有關之鋰離子電化學說明充放電微觀特性及串聯平衡的重要；而串聯平衡以並聯電阻方法。雖說方便但效率較低；電感切換式可以改善效率。但電路控制架構較複雜。切換頻率及負載週期必須有所限制；並聯應用時若以改良並聯切換法。能較一般並聯方式。提供更長的工作時間。本計畫研製出4只串聯平衡模組。接續4組達到16只串聯平衡鋰鐵電池的目標。欲使工作電壓48V以上鋰電池模組。推動自動化機具之變頻器馬達。還必須加上適當保護；因此將再研製可調上下限電壓及溫度之鋰電池保護板以達到實用性及安全性。

八、參考文獻

1. C. K. Wang, H. P. Huang, and S. Chen, "The PC-based Graphic-user Interface of the Power Management System on the Security Robot," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, June, 2007.(SCI)
2. Ching Kuo Wang, Sheng Chen, and Han Pang Huang., "Realistic Implementation of Inductance Recharging System with Intelligent Cell-balance Algorithm on the Humanoid Robot" , International Journal of Fuzzy System, Vol.10, No.1, March 2008. (EI)
3. C. K. Wang, S. Chen, and H.P. Huang, "Visualized Human-Machine Interface of the Power Management System on the Safeguard Robot," The Ninth International Conference on Automation Technology Automation 2007, June 13-14th, 2007.
4. S. Chen, C. K. Wang, and H.P. Huang, "Intelligent Cell-balance Algorithm with Pseudo-series Connected Battery on the Security Robot," The 6th Taiwan Power Electronics Conference & Exhibition (TPECE 2007) , Sep. 7th, 2007.
5. C. K. Wang, Sheng Chen, and H. P. Huang., "Intelligent Battery Management System with Parallel-connected Cell-balance Algorithm on the Humanoid Robot," IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO 2007), pp.37-42, Dec. 9-10, 2007.
6. 洪勝文, 陳聖, 陳永昇 "蓄電池之追蹤管制裝置"。國科會/環保署科技合作研究計畫 成果報告 (NSC89-EPA-Z-146-001), 2000.
7. N.H. Kutkut, " A Non Dissipative Current Diverter Using a Centralized Multi-Winding Transformer," IEEE PESC Conf. Rec., pp.648-654, 1997.
8. N.H. Kutkut, D.M.Divan, D.W. Novotny, H. L. N. Wiegman, " Battery Charging Using a Single Primary and Plural Secondary Windings," U.S. Patent No. 5,659,237, August 19, 1997.
9. C. C. Chan, W. S. Leung, K. C. Chu, " A Microprocessor Based Intelligent Charger for Electric Vehicle Lead Acid Batteries," Electric Vehicle Symp., EVS-10, PP.456-466, Hong Kong, 1990.
10. M. F. Elias, et al., " Lithium-ion Battery Charger for High Energy Application," Proceeding of Power Engineering Conference, 2003, pp283-288.
11. Lijun Gao, Sheng Liu, and A. Roger Dougal, " Dynamic Lithium -Ion Battery Model for System Simulation," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol 25, No. 3, September 2002.
12. Yuang-Shung Lee, Ming-Wang Chen, Ko-Lin Hsu, Jiun-Yi Du, and Ching-Fang Chuang, " Cell Equalization Scheme with Energy Transferring Capacitance for Series Connected Battery Strings," Proceedings of IEEE TENCON' 02.
13. J. Jia, Y. Wang, S. Li, G. Wang, " A Dynamic Discharge Structure for Ultracapacitor Application in the Fuel Cell UPS," 2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision Hanoi, Vietnam, 17-20 December 2008.