

燃料電池混合能源系統暫態特性之研究

江木勝¹、張英彬²

¹南開科技大學 機械工程系

²南開科技大學 電機與資訊技術系

通訊作者：張英彬

聯絡地址：南投縣草屯鎮中正路 568 號

電子郵件：cyp@nkut.edu.tw

投稿日期：2015 年 1 月

接受日期：2015 年 4 月

摘 要

本研究探討一混合能源系統之暫態特性，包括主要電力能源燃料電池與二次電池，並搭配電源轉換器進行輸出電壓調變。燃料電池具有運轉安靜、起動快速、效率高等優點，唯因電池運轉時內部極化現象與電雙層物質電容效應及傳輸過程使電池無法快速反應負載變化。透過混合電力源配置二次電池，可提供系統暫態轉變過程所需能量。經由測試結果顯示在外部負載變動較大時，輔助二次電池對系統提供電能快速反應，在急速降載時輔助電池可以回收瞬間電能，達到緩衝效果。燃料電池在瞬間負載增加時電壓先行快速下降，隨後因電池內部反應進行動態調整，分電池之極化現象依據負載變化進行重新分配至新的平衡位置，使電池電壓出現逐漸上升現象。於變動負載時，各分電池之反應程度並不相同，在靠近電極兩端之分電池所受負載衝擊較大，而位處中央之分電池所受衝擊較小。

關鍵詞：外部負載、二次電池、極化

壹、前言

隨著汽車工業的發展與運輸需求的提高，全世界的汽車數目正大幅增加，由其在開發中國家之成長幅度更大。然而由於能源需求量增大以及局部產油國家地區的政局動蕩，如石化燃料與天然氣等傳統非再生能源的產量已逐漸不敷使用，致使許多國家高度依賴外國進口原油並飽受高油價之苦。再者關於空氣污染以及溫室氣體排放等環境問題已日益嚴重，並且已經變成一全球性問題。最近的案例為在 2009 年底於丹麥哥本哈根所舉行的聯合國環境變遷會議，來自 200 國家的代表、專家與行動者聚會討論包括溫室氣體排放減量，環境友善之新科技發展與轉移以及資金等共同議題。因此對政府與汽車製造者而言，發展新一代基於環境友善技

術之能源使用方式的迫切性正與日俱增。

電動車以電動馬達機械帶動，可使用化學電瓶、燃料電池與超電容做為其相應能量源。相較於內燃機，具有無污染、高效率、無需汽油、安靜與操作穩定等優點。電動車之峰值驅動效率約 70%，且其無局部污染、安靜且較無保養問題，若配置合理電瓶重量時行駛距離約 100 公里，但需至少 5 小時之充電時間。事實上，一些基礎研究顯示即使使用最佳電瓶容量電動車亦無法與液態燃料車相抗衡，因此近年來之先進車輛技術研究轉往混合動力車輛與燃料電池電動車方面。相對於內燃機技術，由電瓶所驅動之電動車輛具有某些優點，例如高能源效率與零污染，然而電動車輛每次充電後所行駛里程遠低於內燃機而使其無法普遍為市場接受。

目前最有可能取代內燃引擎之動力源為燃料電池，相較



於電動車輛其具有長行駛距離與短充填時間之優點。當與內燃引擎比較，燃料電池車輛因直接轉換燃料化學能為電能，免除燃燒過程而具有較高能量效率。在應用其於電動車輛之時，不受到卡諾循環的限制而使其效率可達內燃機之兩倍。因其無具有動件，故運轉效能可靠且安靜。在各種燃料電池中，質子交換膜燃料電池因其高功率密度、低操作溫度、快速啟動與良好動態特性而最適於車輛應用。

一、國內文獻

汪志豪 (2005) 提出有關電動車輛動力系統研究，使用模擬軟體輸入車輛相關設計參數，如車型、馬達種類、電瓶形式、傳動方式等，經由電腦計算以獲得燃料電池電動車在不同動力混合度下之性能與成本分析。

莊璫旭 (2003) 提出軸向磁通永磁式直流無刷馬達具備了高扭力、高力矩密度及高效率等優點，適合應用在直驅式電動汽車車輪馬達上。首先針對電動汽車馬達的設計與要求做評估，將評估的結果做為馬達設計的限制條件。

學者詹勳豪(2008) 也提出則根據電動車輛的動力需求，訂出馬達在不同轉速下所需規格，依此規格挑選適合的馬達形式、繞線方式以及齒極比。

羅浚彬 (2003) 則以電機專業觀點提出雙馬達應用於直驅式電動汽車驅動時之電流分佈控制，當車輪受到干擾負載或參數變動時，驅動車輪仍可維持同步等速，使汽車直線前進；電流分佈控制系統包括負載估測器和速度控制器，分析結果顯示系統具有穩定性與強健性，且能具體以數位控制晶片實現之。

吳廷祥 (2011) 以 DSP TMS320F2812 為基礎設計與實現一個高功率交流馬達驅動器，並以感應馬達測試平臺驗證其功能，以做為新一代電動車中電力驅動子系統。文中首先以先進車輛模擬軟體 ADVISOR(Advanced Vehicle Simulator)模擬感應馬達在電動車中運轉之特性，其次說明感應馬達之系統架構及驅動策略，並以 Matlab/Simulink 架構本文之感應馬達驅動系統，接著以 TMS320F2812 為基礎，架構此感應馬達之數位式 V/f 控制及轉差速度補償之閉迴路速度控制器，最後實現一個高功率感應馬達驅動系統，並以實測結果驗證其功能。

陽毅平 (2011) 設計一混合燃料電池電力鏈結構，並搭配相對應的電力管理策略，考慮手輪馬達電動輪椅的行駛工況與平均功率，選擇適當的燃料電池與二次電池組，將此電力系統以 Matlab SimPower Systems 模組來模擬，並與典型串聯式及並聯式燃料電池電力鏈作比較，討論改善效果。由模擬結果顯示，文中所設計的燃料電池電力鏈對燃料電池電力鏈的性能要求較小，燃料電池的操作功率亦較為固定，並且

在二次電池組的充電次數上減少了 96 %~98 %，延長二次電池組的壽命。

最近，黃鈺玲 (2013) 有鑑於現今市售電動機車於使用及開發時之最大問題為電池續航力不足，為提升其續航力，本研究試以 54V/24Ah 鋰錳電池為主動力源，並加裝一 200W 質子交換膜式氫氧燃料電池作為輔助動力源，驅動 1.5kW 輪轂馬達，延續於實驗平台之雙電力增程系統研究，改裝一電動機車成為氫燃料電池複合電力增程機車，並搭配無線網路基地台，使平板電腦可以 WiFi 傳輸作為無線監控面板及儀表板。

二、國外文獻

在國外相關參考文獻，Fahimi et al. (2004) 應用電動汽車之切換式磁阻機器具有啟動及發電機雙重功能，系統之強健控制特性使車更具有安全與高續航力性能。為了縮小車體積且更具外形彈性，移動載具之動力系統需具高扭力及高效率特點。

Profumo et al. (1997) 則提出軸向磁通驅動控制於電動汽車上，使得馬達直接耦合驅動四輪，主要技術是以軸向磁通感應機與同步機同時安裝於電動汽車，最後實驗證實所提架構之可性與實用性。

Dixon et al. (2009) 論及氯化鈉鎳材質俗稱斑馬電池與超級電容作為電動汽車電力來源，此電池較鋰便宜且壽命長，能有效增強電動車瞬間加速、煞車再生功能，此系統經由 Buck-Boost 直流轉換器成高壓 371 V 提供高壓電瓶充電，並採用 DSP 晶片控制轉換器能量傳送。

Dai et al. (2007) 描述以永磁式同步馬達作為混合式油電電動車驅動馬達控制，文中採用轉子形狀最佳化法則有效降低轉子電流漣波與電磁干擾問題。

Zhou et al. (2011) 探討使用內燃引擎發電、鉛酸電池與超級電容並聯之多電源混合電動車，經由省略直流電壓轉換器以降低成本同時探討被動式混合電源之自然流動情形，在以發電機開與關為唯一可控制情況下，使用動態程式方法找尋各電源最佳效率點，結果發現其具有降低引擎燃油消耗率的效果。由於電動車輛之高效率與低污染，使其具有極高的環保與永續特性。為解決電動車量使用電瓶儲存電能之體積大，笨重與行駛距離受限問題。

Trovão et al. (2010) 考慮短程電動車輛不同加速需求下，針對不同能量源混合方式進行系統化探討，經由分析其操作模式以定義直流電壓轉換器之控制策略。在電源方面使用 96 V 公稱電壓與 13.5 Ah 額定容量之鎳氫電池搭配 5×16 V 超級電容設計，在系統分析軟體上與雙輸入直流變壓器進行性能模擬研究。



Bernarda et al. (2011) 提出將燃料電池與二次電池不經由直流轉換器而直接並連之被動式混合能源研究，由於不使用直流轉換器之故其在成本與構造上具有競爭優勢，且能量損失亦較小。在此種混成情況下兩者具有相同電壓，但無法進行主動式能量分配，其唯一改變參數為透過 PI 控制器依據目標電壓值進行電池之供氣壓力調整。由實驗與模擬結果顯示雖然透過此法使燃料電池必須要工作於較低壓力之下而可能使效率降低，但其可因為沒有使用直流轉換器而獲得彌補，在實際行駛情況下因動力需求提高而使效率獲得改善，然而因其被動式設計使兩者之大小與電壓工作範圍必須謹慎選擇。

最後，Amin (2014) 則採用三種能源：燃料電池、電池以及超級電容器之混合動力的回饋控制系統。文中所提之混合動力能源主要透過三個直流-直流轉換器調整輸出的電壓，包括兩個雙向轉換器和一個升壓轉換器，燃料電池的電流/電壓輸出由升壓轉換器來控制，而雙向轉換器則由電池和超級電容器來調整。

由以上探討可知，電動車輛驅動系統之研究已成為近年來在國內外相關領域重要的議題，同時有關燃料電池在固定式、汽車與攜帶式電力如士兵個人電力與電話及電腦等方面的研究已相當多，然而較少研究涉及混合能源的電動機與車輛領域。本研究將探討一混合能源動力系統之操作特性，將燃料電池與二次電池特性進行整合操作，同時以測試平台及電子負載裝置量測系統在各種不同負載模式下的動態性能表現與子系統的暫態變化情形，以應用於未來電動車輛與載具開發。

貳、研究方法

一、系統原理

混合動力系統應用於現代車輛已有一段時間，其技術已日漸成熟，例如油電混合車是搭配內燃機與電動馬達，經由串、併聯方式提供車輛動力來源，由於車輛在低速行駛時使用電動機可獲得很好效率輸出，同時可做為煞車時動力回收之發電機，使整體效能大幅提高，圖 1 為一串併聯式油電混合車輛之動力系統架構。

在應用燃料電池與二次電池之混合能源系統電力提供方式有串聯與並聯兩種方式，前者以二次電池為馬達電力主要供應來源，燃料電池所產出電力供應至二次電池。並聯式系統中，燃料電池與二次電池同時對系統提供電能，唯因負載情況與直流電源轉換器之輸出電壓設定，二次電池依據充電狀態不同而進行放電或充電。

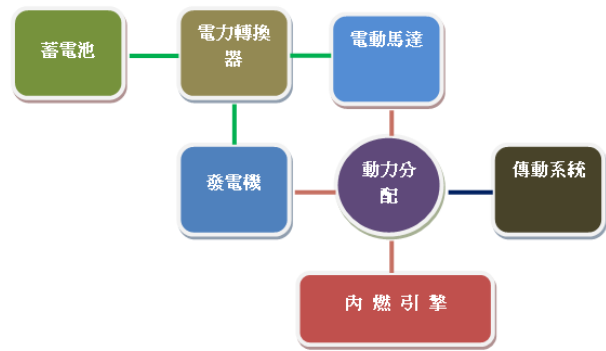
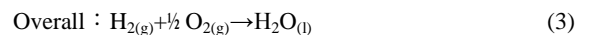
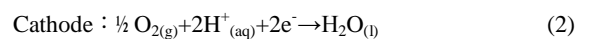


圖 1 串併聯式油電混合動力系統

燃料電池的運作方式，是因電池含有陰陽兩個電極，分別充滿電解液與觸媒物質，在兩電極間為具有滲透性的薄膜所構成。氫氣由燃料電池的陽極進入，氧氣（或空氣）則由陰極進入燃料電池。經由催化劑的作用，使得陽極的氫原子分解成兩個氫質子（Proton）與兩個電子（Electron），其中質子由內電路運行到薄膜的另一邊，電子則經由外電路形成電流後，到達陰極。在陰極催化劑之作用下，氫質子、氧及電子，發生反應形成水分子，因此水可說是燃料電池唯一的排放物。燃料電池所使用的「氫」燃料可以來自於任何的碳氫化合物，例如天然氣、甲醇、乙醇（酒精）、水的電解、沼氣...等等。酸性電解質燃料電池反應式如下：



經過一個多世紀的發展，燃料電池技術已漸趨成熟，依電解質類型可分為質子交換膜燃料電池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC）、鹼性燃料電池（Alkaline Fuel Cell, AFC）、磷酸燃料電池（Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC）、熔融碳酸鹽燃料電池（Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC）、直接甲醇燃料電池（Direct Methanol Fuel Cell, DMFC）與固態氧化物燃料電池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）。其中質子交換膜燃料電池是一種固態高分子聚合物，其轉換效率高達 70%，比起其他種類的燃料電池高上許多，其具有潔淨無汙染、能量轉化率高、常溫常壓下操作、起動迅速，加上對人體無化學危險、對環境無害，適合應用在日常生活，是目前國外積極開發的運輸工具用燃料電池。

以氫氧燃料電池為例，單電池的操作電壓大約為 0.6 V~0.9 V 間。為滿足高電壓之需求，將多個單電池串連起來以提高電池堆的輸出電壓，構成一個燃料電池堆。質子交換膜燃料電池的組成元件有：雙極板（Bipolar Plates, BP）、膜電極組（Membrane Electrode Assembly, MEA）、氣體擴散層



(Gas Diffusion Layer, GDL)、集電板 (Collector)、端板 (End Plate)。雙極板又稱流道板，通常使用石墨板、金屬板或複合石墨、碳纖維板為材料，其中為複合碳板為最主要之材料，其質輕、抗腐蝕、高導電度和高強度，亦是熱的良好導體，可確保電子傳導性以及散熱溫度均勻分佈；再經加工形成各類氣體導流槽，作為反應氣體通道，因此可緊密支撐膜電極組使反應氣體在整個電極各處均勻分佈，並且有收集電流之功用。

從電化學反應的角度，雙極板上中空溝槽部份為反應氣體進入與產物排出之通道，理論上面積愈大反應效果愈佳，但雙極板中實體肋部提供電子傳輸通道，其路徑短則過電位低，使反應效率可以提高，然而在該區域的氣體濃度因擴散距離較長而變小，對反應將造成不利影響。以上所談現象之主導因素與電池操作條件有關，當輸出電壓高時，反應速率較慢，此時影響電池性能的主要因素在歐姆極化，因此較寬的流道並無提供太多效益。

以電動車輛設計者之觀點，電瓶可視為一具有性能條件的黑盒子，其條件包括比能量、能量密度、比功率、電壓、安培小時效率、能量效率、商業可用性、成本、操作溫度、自放電率、壽命周期與再充率。設計者並需要知道的是電池所能使用之能量隨外界溫度、充放率、電池形狀、最佳溫度與充電方式及冷卻需求。然而對於電池基本之電化學原理之了解亦相當重要，否則對於不同形式間之性能與保養以在使用時及最為失望之情況，如其有限壽命、自放電、高電流下之效率降低等現象無法了解。這些知識同時與事故之危險性及電池化學品對環境影響以及其回收有關。

單電池在釋放電能時具有一公稱電壓，經由串聯方式形成電池組以獲得所需之大電壓。在電動車輛中之電池組電壓通常為 6V 或 12V，其可再經由串聯而獲得更大電壓。在實際電池工作過程中隨著電流之釋放，其電壓將會下降；而在充電過程中電壓會上升。

電池電壓與電流之關係可以如圖 2 之等效電路與電阻模型表示。此電池之電壓以 E 表示但是在端點處因為內電阻之故，所具有之電壓為 V ，若電路中之電流為 I ，則：

$$V = E - IR \quad (4)$$

上式若電流 I 為零，其內電壓等於 E ，故 E 通常稱為開路電壓，當電瓶充電時顯然此電壓將會增加 IR 。在電動車輛之內電阻應愈小愈好。一般情況下上式用在使用中之電池之預測準確度尚佳，然而電池之開路電壓事實上非為常數，其會受到充電狀態或溫度之影響。

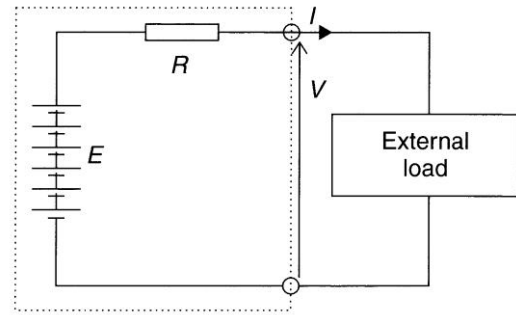


圖 2 電池等效電路模型

二、系統建置

建置混合能源動力系統目的為使系統能夠依據不同負載需求條件，發揮各子系統之性能優點，以達到互補與提升效能的目的，例如油電混合動力系統可以應用電動馬達的高效率與發電功能，彌補內燃引擎在低速起步的不足。本研究所考慮的燃料電池具備大功率密度、續航力高之優點，已被各大車廠視為未來取代內燃引擎之最可能動力產生裝置，而成為電動車輛主要能量源。由於其電化學反應之遲滯現象，無法提供車輛快速之電力瞬間需求，如在加速與起步爬坡階段。以下擬以一二次電池與燃料電池之並聯電路規劃混合能源系統，提供馬達在各種不同功率變動需求下能夠快速反應，獲得所需電能，並使用電子負載器模擬各種不同功率需求操作情況。

圖 3 為本研究之主要系統架構與控制量測裝置，主電力源部份使用 800 W 自增濕式燃料電池，其輸出電壓 12-16 V，額定電流 50 A，供應氫氣壓力為 0.5kg/cm^2 。在電池出口設置電流分流器與電壓檢知儀器，以獲得燃料電池輸出之電壓電流數據。為使燃料電池輸出電壓與輔助電能裝置與系統負載規格搭配，使用直流電源轉換器將電壓調整至 24 V，同時供應內置輔助裝置如冷卻風扇與控制系統電能所需。系統並搭配一可程式控制器，依據溫度感知信號提供脈波調控裝置以控制冷卻風扇運轉，並由供氣壓力訊號控制氣流閥門之啟閉，以確保系統運作可靠度。

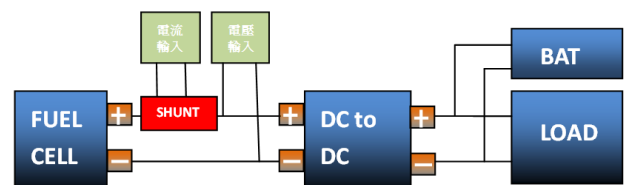


圖 3a 系統架構設計



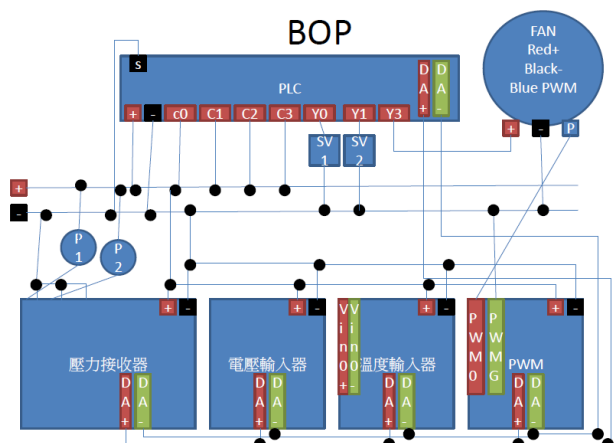


圖 3b 系統控制量測裝置

燃料電池操作時因各種極化現象使電壓隨輸出電流改變而呈現互相消長之不穩定情況，採用直流電源轉換器適時將燃料電池電壓做上升或下降至設定值，同時並聯二次電池輔助。當外界負載小時，燃料電池之反應可以供應足夠電力，在負載變動劇烈如車輛爬坡與加速時，二次電池可快速提供峰值負載所需。系統設計規格如表 1 所示：

表 1 系統規格

項目	規格
電池特性	Self-humidifying PEM fuel cell
額定功率	800W
額定電壓	16V
額電電流	50A
尺寸	155×351×103mm
二次電池	12VX10AhX2

為了解系統運轉特性，包括負載瞬變下各子系統之供電情況，使用 PRODIGIT 3311F 電子負載器進行暫態測試，並應用資料收集處理系統，記錄兩者電壓電流輸出歷程與燃料電池內部分電池電壓分佈情況。

三、實驗規劃

在實驗參數設定方面，為深入了解電動機械混合能源系統特性，本研究以電子負載模擬實際設備功率消耗，並以數種負載變動模式為依據，探討系統主要能量源之作用情形，以及主要電力源燃料電池內部分電池的反應暫態變化。負載變動方式主要以設定電流輸出定義負載大小，而各系統電壓如燃料電池與鉛酸電池則依負載變動與自身電化學反應特定而調整，達到供電或是電力回充等目的，各負載變動模式如表 2 所示。

表 2 系統負載模式

負載模式	負載電流與持續時間
一	(0A100S), (3A100S), (6A100S), (9A100S), (12A100S), (9A100S), (6A100S), (3A100S), (0A100S).
二	(0A100S), (6A200S), (12A100S), (6A100S), (12A100S), (6A200S), (0A100S).
三	(0A100S), (8A100S), (0A100S), (8A100S), (0A100S), (8A100S), (0A100S).

參、結果與討論

經由各操作模式設定情況下，系統截取暫態資料包括燃料電池輸出電壓電流、鉛酸電池電壓電流、電子負載器電壓電流與燃料電池內部分電池電壓值。以下分別針對各操作模式進行探討。

一、操作模式-性能探討

圖 4 為本混合能源系統進行操作模式一之步階式負載輸出情況下，燃料電池堆、鉛酸電池與電子負載電流變化情形。負載部分以控制軟體設定每 100 秒步階提升 3 A 電流計 4 次，在 500 秒到達 12 A 後再以每 100 秒步階下降 3 A 至 0 A。由於燃料電池供應電壓在 15-18 V 左右，其輸出電流較負載電流為大，最高到達約 25 A 左右。在鉛酸輔助電池之電流輸出部分，於初期無負載階段呈現負值，顯示此時因鉛酸電池電壓較低且無外部負載，故燃料電池為對鉛酸電池充電狀態，此情況持續至 100 秒後外部負載增至 3 A，燃料電池不再對鉛酸電池充電。

當外部負載瞬間增加至 6 A 時，鉛酸電池提供短暫之電能脈衝電流 0.2 A 並短暫持續約數秒鐘後因燃料電池電能輸出已足以供應外部所需而停止。在隨後之步階負載增加過程中，鉛酸電池持續提供瞬間電能，其大小與間隔隨負載之增加而加大，在 400 秒外部負載達 12 A 時持續較長時間，顯示鉛酸電池之輔助功能隨負載增加而更為明顯。

其次，圖 5 為在此步階負載變化下燃料電池堆電壓與電流變化過程。圖中顯示燃料電池輸出電壓與電流呈現反向變化趨勢，當電池堆輸出電流增加時其電壓隨之降低，其主要原因為燃料電池於輸出電流過程之電化學反應，電池堆內部發生極化現象，在反應速率尚小時電池之損失主要表現在活化極化部分。當電池堆電流密度提高時，因電池堆阻抗之故使歐姆極化逐漸增加，使電池堆輸出電壓再度下降。由圖中亦可發現雖然燃料電池堆輸出電壓在電流突增時做相對應的下降，但其值有逐漸回復的趨勢，例如在第 200 秒當負載電流由 3 A 提升至 6 A 時，燃料電池電壓由 14.7 V 降至 13.8 V，



而後逐漸上升至 14.28 V，顯示此時電池堆內部反應過程正進行動態調整，亦即各分電池之極化現象正依據負載變化進行重新分配至新的平衡位置，由此可知燃料電池堆之動態響應時間常數與一般二次電池或電容裝置有很大的不同，其主要影響原因為當負載急遽增加時，燃料電池堆消耗反應氣體速率提高，因電極鄰近氣體供應不及，使觸媒層中電雙層電荷量改變，造成濃度過電位快速上升。此一情況隨反應氣體透過擴散方式逐漸補充，電極電荷量再度累積，使過電位情況獲得改善而提高輸出電壓。圖中顯示在步階輸出電流由 9 A 提高至 12 A 時電池電壓由 13.82 V 初降至 13.07 V，而後又逐漸回復至 13.48 V，回升率約為 54.7%，相較於 3 A 至 6 A 時電壓之回升率為 53.3% 有明顯的變化。

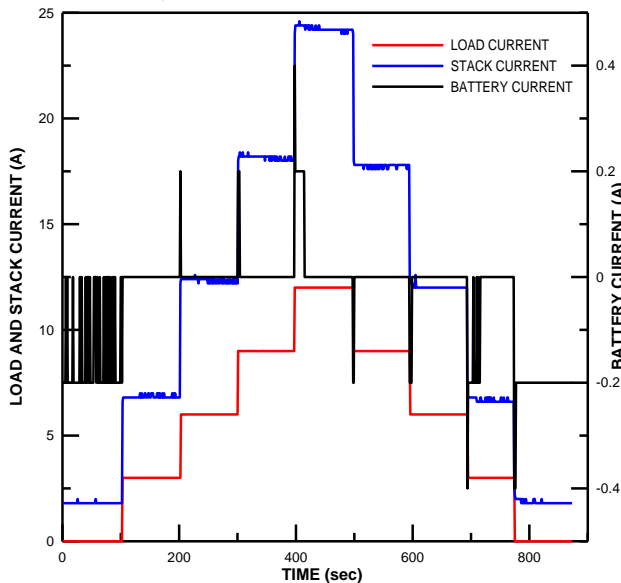


圖 4 模式一燃料電池與鉛酸電池之輸出電流

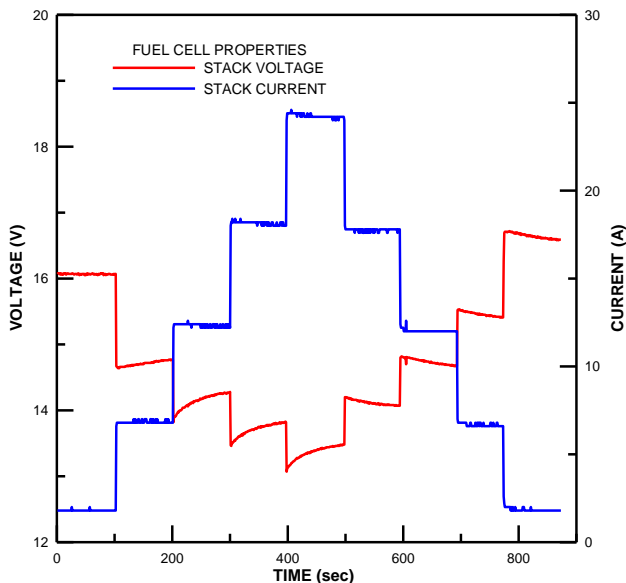


圖 5 模式一燃料電池電壓與電流變化

而圖 6 為在此步階負載下鉛酸電池之電壓電流動態變化

歷程。相較於燃料電池，鉛酸電池之電壓電流消長情況並不明顯，雖然電壓因為負載改變而自 24.01 V 遞減至 23.7 V，其輸出電流並未同步調整，僅在最大電流輸出後約 20 秒時間供應少量電流予負載，其主要原因為本實驗之燃料電池額定功率在 800 W 左右，而所設定負載值最大並不超過 300 W，故此時鉛酸電池之緩衝作用並未完全發揮，致所支援電能比例不大。同時在降載過程中，燃料電池亦對鉛酸電池進行短暫且小幅度之電力回充動作。

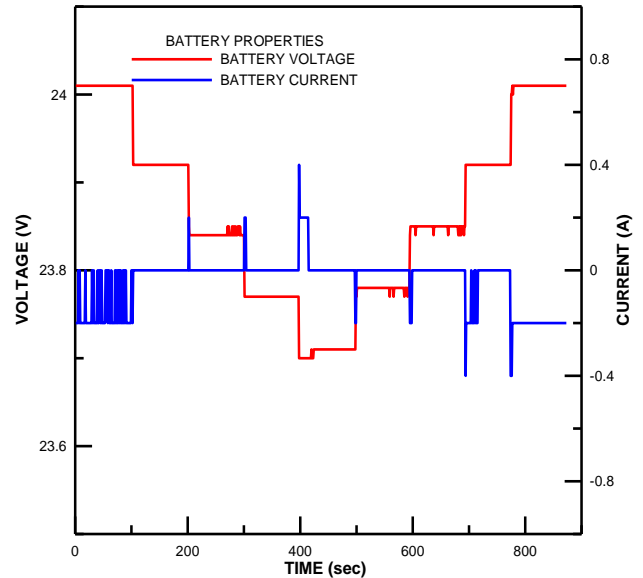


圖 6 模式一鉛酸電池之電壓與電流變化

圖 7 為步階負載變化下燃料分電池編號 1,10 與 20 之電壓變化情形。結果顯示分電池之電壓在每一次負載提高時均使電壓快速下降再緩慢恢復，而在降載時先大幅度提高再回復穩定狀態，表示每一分電池均進行動態調整過程。圖中較大差異之處為各分電池之變化幅度，電壓變化最為顯著的是第 1 個分電池與最後第 20 之分電池，而位於中間第 10 號分電池因風扇供氣效果最佳使電壓變化程度較小。分電池 1 與分電池 20 分別位於電池堆之陰陽極，在陽極端分電池之陰極所處與陰極端分電池之陽極所受之整體電位差較大，而產生較大過電位。位於中央之 10 號分電池則因供氣效果佳反應過電位損失小使電壓降幅減小。當負載瞬間降低時，三個分電池電壓回復程度大致相同但仍保持原有電壓大小順序，顯示電池內部同步進行濃度過電位的調整效應。

圖中顯示在負載尚未施加時，三個分電池電壓分別為 0.8V、0.805V 與 0.803V，於 100 秒加載時，電壓下降至 0.727V、0.735V 與 0.733V，而隨後 100 秒固定負載期間，三個分電池電壓又回復到 0.732V、0.741V 與 0.739V，其回復率分別為 6.85%、8.57% 與 8.75%。在後續三次加載過程中，分電池電壓變化加大，顯示當燃料電池在高負載情況下電池內部極化現象與調整過程更為快速變動。



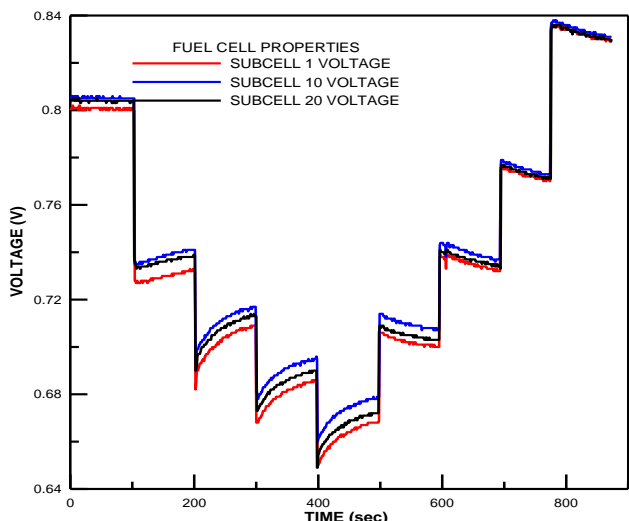


圖 7 模式一燃料電池分電池 1,10 與 20 之電壓變化

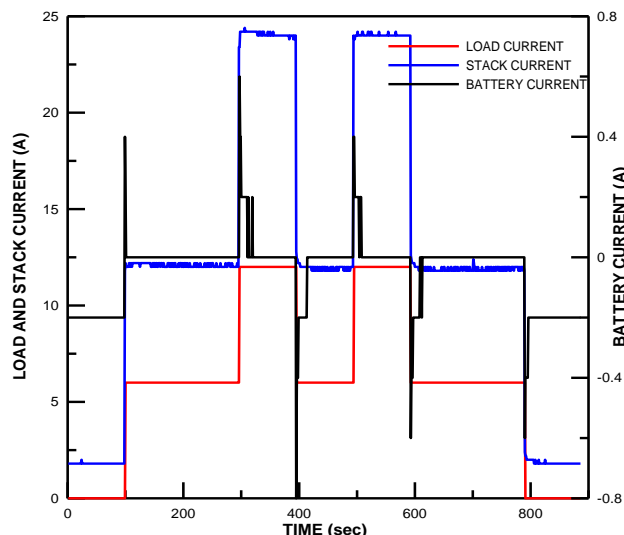


圖 8 模式二燃料電池堆與鉛酸電池輸出電流變化

二、操作模式二性能探討

圖 8 為操作模式二燃料電池堆與鉛酸電池輸出電流變化情形。在實驗初期 100 秒間雖然外部負載為零但燃料電池約有 2 A 大小電流輸出，此電力主要供應系統寄生設備如冷卻風扇與控制裝置所需能量。當外部負載在 100 秒時瞬間增至 6 A，鉛酸電池提供短暫之電能脈衝 0.4 A 持續數秒鐘後燃料電池電能輸出足以供應外部所需而停止。在隨後之步階負載增加過程中，鉛酸電池持續提供瞬間電能，其大小與間隔隨負載之增加而加大，例如在 300 秒處外部負載由 6 A 提高至 12 A，鉛酸電池提供最大電流為 0.6 A，顯示鉛酸電池之輔助功能隨負載增加而更為明顯。在第 500 秒負載再增至 12 A 處，鉛酸電池輔助供電的大小與時間均較 300 秒時為小，於 600 秒降載時其回充量亦減少，顯示燃料電池之反應速率已因各項極化現象獲得改善而有提升，而稍緩和鉛酸電池的輔助放電功能。

其次，圖 9 表示負載模式二燃料電池堆輸出電流與電壓變化，圖中顯示燃料電池產生電能電壓與電流為反向關係，當施負載突增至 6 A 時燃料電池電壓從 16.2 V 突降至 14 V 而後緩慢上升趨於穩定 14.5 V，於第 300 秒時加負載至 12 A 電流後，燃料電池電壓從 14.5 V 突降至 12.9 V 再緩慢上升趨於 13.2 V。第 400 秒時負載降至 10 A 到第 500 秒時加負載於 20 A 電流於燃料電池上到第 600 秒又解除負載至 10 A 電流至第 800 秒無施負載。從施加負載過程中可以發現電壓變化從第 100 秒的突降緩慢上升過程，第 300 秒與第 500 秒兩點電壓值不同，第 400 秒與第 600 秒兩點電壓值相同，第 800 秒比第 0 秒的電壓還高。主要是因為電極表面剛要啟動電化學反應時所呈現速率遲鈍的現象。活化極化直接與電化學反應速率有關，因此又稱電化學極化，此階段電壓降主要原因是來自觸媒吸負與脫離反應。

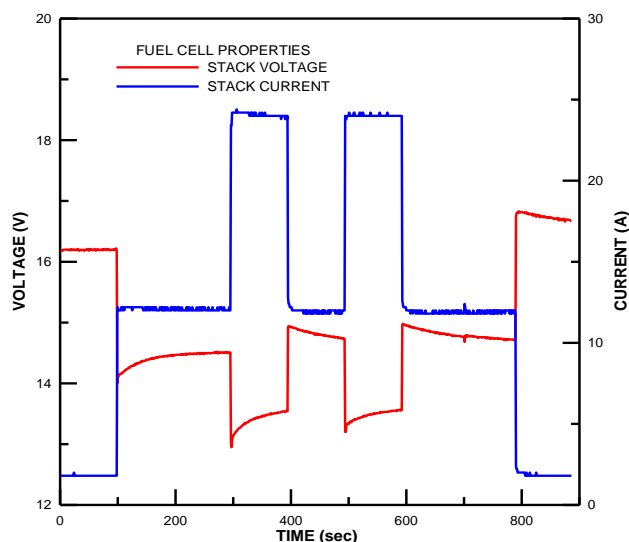


圖 9 模式二燃料電池堆輸出電流與電壓變化

而圖 10 為在此負載模式下鉛酸電池之電壓電流動態變化歷程，由於鉛酸電池與燃料電池成並聯，前者提供動力系統負載需要大電流時電源，當負載減少由燃料電池提供電力。圖中第 0 秒至 100 秒電池電流是呈顯負值這是電力回充現象，在第 100 秒、第 300 秒與第 500 秒時波型突然上升是負載瞬間需要大電流時因輸出電壓較鉛酸電池電壓為低，先行由鉛酸電池短暫供電，直到主電力源燃料電池之反應跟上為止，這時電壓值也隨之下降。第 400 秒、600 秒與 800 秒時，因外部負載急速減少，燃料電池對鉛酸電池進行回充現象，電壓值回復到之前電壓數值。由圖中亦可觀察出在 300 秒與 500 秒瞬間，外部負載均由 6 A 瞬間提高至 12 A，但此時輔助電源提供電流有遞減情況，顯示燃料電池經過期間的脈動負載後具有活化效果而提高反應速率。

然後，圖 11 為負載模式二燃料電池分電池 1，10 與 20 之電壓變化，圖中顯示各燃料電池各單電池施予負載時電壓



快速下降快速之後又趨於緩和平穩上升，當降載時先大幅度上揚後又趨於緩和平穩狀態，表示每一分電池均進行動態調整過程，在第一次脈衝負載增至 6A 時，第一分電池電壓從約 0.811V 降至 0.702，但在第二脈衝由 6A 升至 12A 時電壓只從 0.723V 降至 0.651V，顯示在加載初期之主要過電位為活化過電位，但在第二階段增加的過電位部分已漸轉往歐姆過電位。圖中顯示各分電池之變化幅度不同，過電位反應最為顯著的是第 1 個分電池與最後第 20 之分電池，而位於中間第 10 號分電池之過電位較不大，使電壓變化程度小。由此圖可以發現燃料電池於變動負載時，在靠近電極兩端之分電池所受負載衝擊大，而位處中央之分電池所受衝擊較小，主要是陽極供氣與陰極供氣濃度差異之合併效果，同時電池組兩端單電池之單側整體過電位較高亦會影響電壓輸出。在經歷一連串變動負載後，分電池電壓由 0.815 V 提高至 0.838 V，顯示整體電池性能經過此一變動負載後有提升的趨勢。

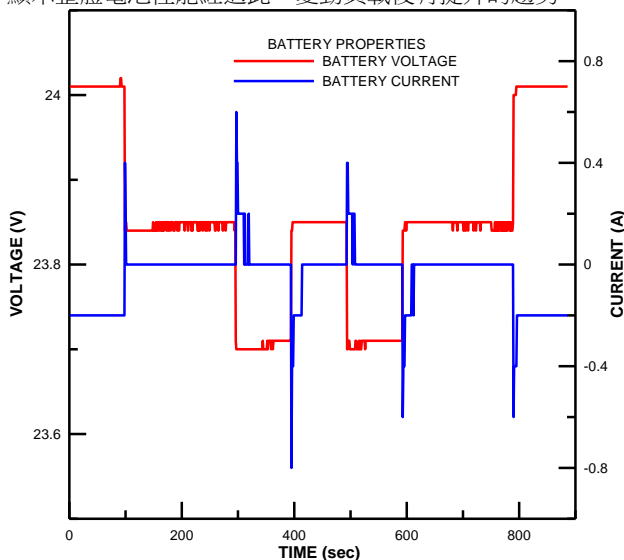


圖 10 模式二鉛酸電池電壓與電流動態變化

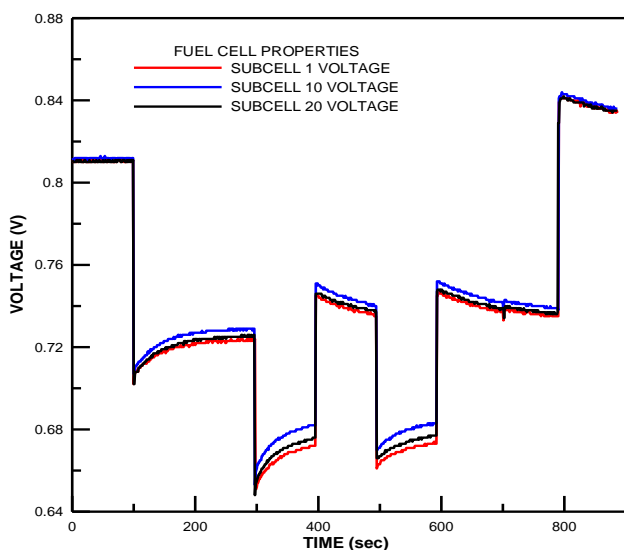


圖 11 模式二燃料電池分電池 1,10 與 20 之電壓變化

三、操作模式三性能探討

如圖 12 為負載模式三燃料電池與鉛酸電池之輸出電流變化，在實驗初期 100 秒間雖然外部輸出電流設定為零，但燃料電池約有 2 A 大小電流輸出，此電力主要供應系統寄生設備如冷卻風扇與控制裝置所需能量。當外部負載在 100 秒時瞬間增至 8 A，鉛酸電池提供短暫之電能脈衝 1 A 持續數秒鐘後燃料電池電能輸出足以供應外部所需而停止，此一現象可以從圖中藍色第一脈衝電流波形看出，在左上部的缺角部分因燃料電池未能及時反應供應充足電力，而暫由鉛酸輔助電力供應。在隨後之脈衝負載變動過程中，鉛酸電池持續提供瞬間電能，其大小與間隔隨負載時間之增加而加大有所變化，例如在 300 秒處之脈衝負載外部負載由 0 A 提高至 8 A，鉛酸電池亦提供最大電流為 1 A，但在 500 秒處之脈衝其輸出最大電流僅為 0.5 A，原因為在此之前輔助鉛酸電池因電壓較低故處於充電狀態。在第 400 秒外部負載由 8A 降為 0 A 瞬間，燃料電池所產生額外能量對鉛酸電池進行逆向充電，最高電流達 0.75 A。在第 500 秒負載再增至 8 A 處，鉛酸電池輔助供電的大小與時間均較 300 秒時為小這是燃料電池提供電能，於 600 秒降載時其回充量亦增加至 0.8 A，此二現象可從燃料電池脈衝電流右緣之圓角看出其並未在負載解除後立即恢復基礎電流，顯示燃料電池內部發生之極化現象進行緩慢調整。

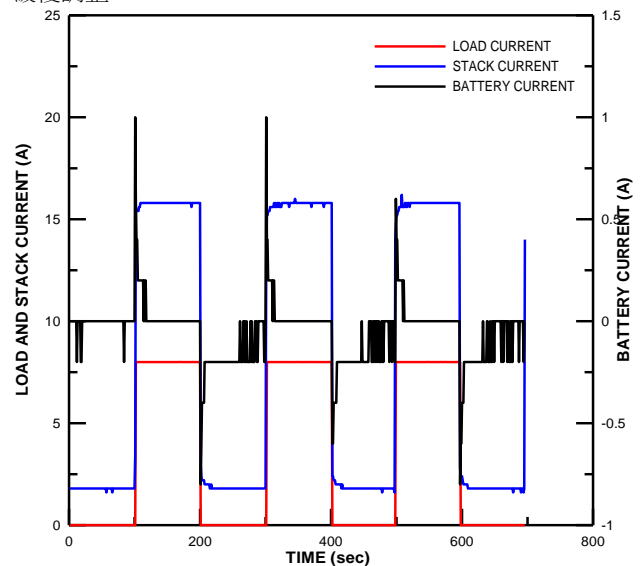


圖 12 模式三燃料電池與鉛酸電池之輸出電流變化

檢視如圖 13 為負載模式三步階負載變化下之燃料電池堆之電壓與電流變化過程。圖中顯示燃料電池輸出電壓與電流呈現反向變化趨勢，在反應速率尚小時，電池堆之損失主要表現於活化極化部分，而造成使其輸出電壓隨之稍降。當從燃料電池突然給予一外負載固定電流量時，電壓會瞬間陡降，經過一個轉折點然後再緩緩上升，陡降部分可以視為歐



姆極化、與活化極的合併量，而緩緩上升為濃度極化效應之改變。

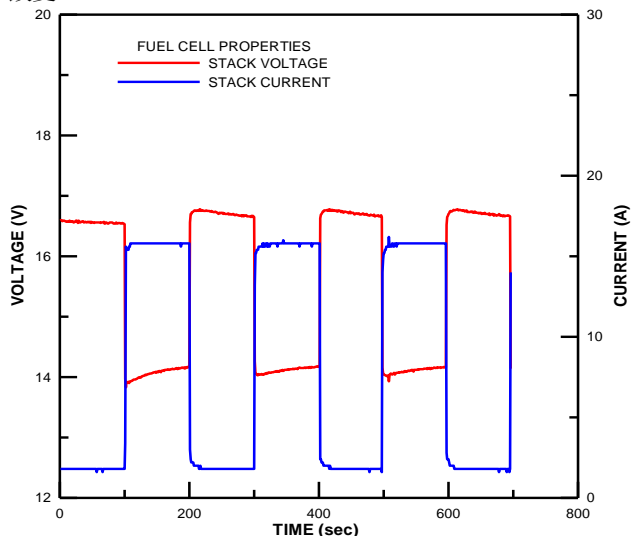


圖 13 模式三燃料電池堆電壓與電流變化

圖 14 為負載模式三步階負載變化情況下鉛酸電池之電壓電流變化，當外負載提高到 8 A 電流時鉛酸電池負載流提升供至 1 A 脈衝電流，當降載時燃料電池堆對鉛酸電池回充脈衝增強約 0.5 A，比無負載時更高，且回充頻率次數有逐漸增多現象。鉛酸電池與燃料電池成並聯，鉛酸電池提供補充動力系統負載變動瞬間需要大電流時電源，當負載減少隨後由燃料電池提供主要電力。圖中第 0 秒至 100 秒電池電流是呈顯負值這是電力回充現象，在第 100 秒、第 300 秒、第 500 秒時波型的突然上升波型是負載需要大電流，這時電壓值也隨之下降至 23.8 V。第 200 秒、第 400 秒、第 600 秒、燃料電池對鉛酸電池回充現象電壓值回復到之前初始電壓數值。在第 400 秒時燃料電池堆對鉛酸電池回充電流值 0.6 A，第 500 秒時鉛酸電池提供電流比前兩次脈衝時為小，此現象是燃料電池堆之性能已獲提升而能供應大部分電能。

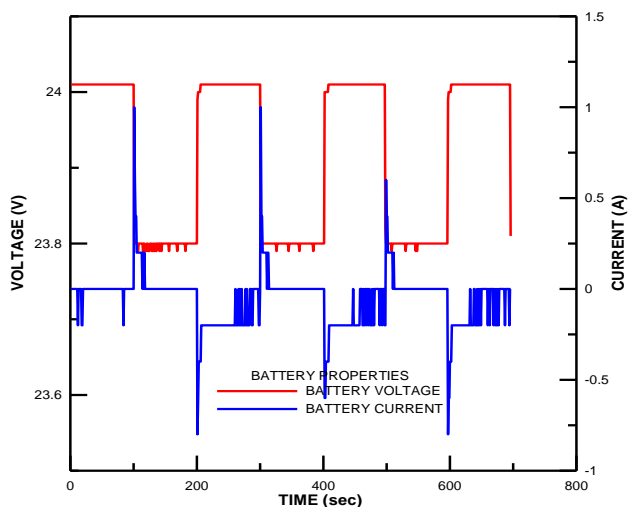


圖 14 模式三鉛酸電池之電壓與電流變化

最後，圖 15 所示為此操作模式下燃料電池內部單電池於負載變動時之電壓變化情形，雖然此負載模式有別於前二種，圖中亦顯示在負載作動初期，電壓快速下降，隨後趨於緩和上升，當降載時先大幅度上揚再趨於緩和下降。在第一次負載施加時分電池 1 由 0.833V 降至 0.672V 再回復到 0.684V，在第二次負載過程由 0.836V 降至 0.676V 再回復至 0.685V，顯示第一次負載時燃料電池活化程度稍為不足，使初期過電位增加，在第二次脈衝之後，整體性能趨於穩定。圖中亦可看出各分電池電壓變化差異，電壓改變最為明顯的是 1 號分電池與最 20 號之分電池，20 號分電池位於氫氣供應入口，濃度高於其他二者，但位於中間第 10 號分電池因供給空氣量較充足，除能提供較多氧氣外冷卻效果亦佳，使電壓變化程度較小。

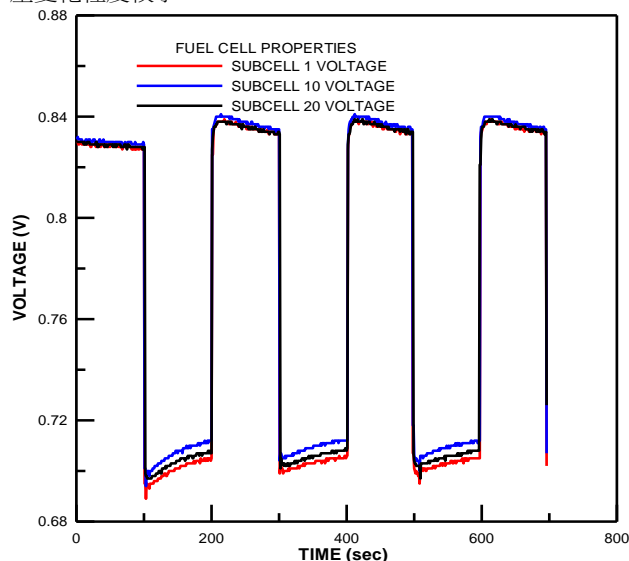


圖 15 模式三燃料電池分電池 1, 10 與 20 之電壓變化

肆、結論

本研究針對混合動力系統進行系統設計建置與性能測試。經由暫態步階負載變動與脈衝負載實驗，獲取各動力源動態性能變化以及燃料電池堆內部分電池電壓變化情形，由實驗結果可以獲得以下結論：

- 一、使用混合能源系統在外部負載變化較小情況下，輔助二次電池並不對系統提供電能。當外部負載變動量加大時，輔助電力源適時提供瞬間電流，以彌補燃料電池反應速率之遲緩現象，使外部負載的響應較為靈敏。
- 二、在系統快速降載過程中，二次電池可以發揮緩衝保護效果，在充電狀態低的情況下適時回收多餘電力，以緩和主要電力源的脈衝現象。
- 三、燃料電池在瞬間負載變動下電壓先行快速下降，隨後因電池內部反應進行動態調整，分電池之極化現象依據負載變化進行重新分配至新的平衡位置，使電池電壓出現



逐漸上升現象。在連續脈衝負載變動過程中，各分電池的過電位逐漸趨緩，顯示燃料電池之性能趨於穩定狀態。

四、燃料電池在變動負載時，各分電池之反應程度並不相同，在靠近電極兩端之分電池所受負載衝擊較大，而位處中央之分電池所受衝擊較小，主要因素為陰陽極供氣條件的不同與各分電池單向過電位差異。

參考文獻

- 汪志豪 (2005)。燃料電池電動車之性能分析與動力匹配。未出版之碩士論文，彰化縣，大葉大學機械工程系碩士班。
- 吳廷祥 (2011)。電動車用交流驅動器之研製。未出版之碩士論文，桃園市，長庚大學電機工程學系碩士班。
- 莊璦旭 (2003)。電動汽車直驅式軸向磁通永磁直流無刷馬達最佳化設計。未出版之碩士論文，台北市，臺灣大學機械工程學系碩士班。
- 陽毅平 (2011)。手輪馬達電動輪椅之混合質子交換膜燃料電池電力管理系統設計。未出版之碩士論文，台北市，臺灣大學機械工程學系碩士班。
- 黃鈺玲 (2013)。氫燃料電池複合電力增程機車能量管理系統研究。未出版之碩士論文，台北市，國立臺北科技大學車輛工程學系碩士班。
- 詹勛豪 (2008)。電動汽車50 kW內藏永磁式同步馬達之設計與開發。未出版之碩士論文，台北市，臺灣大學機械工程學系碩士班。
- 羅浚彬 (2003)。直驅式電動汽車雙馬達之電流分佈控制。未出版之碩士論文，台北市，臺灣大學機械工程學系碩士班。
- Amin Bambang, R.T., Rohman, A.S., Dronkers, C.J., Ortega, R., & Sasongko, A. (2014). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power sources using model predictive control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 1992-2002.
- Bernarda Jerome, Hofera Marcel, Hannesenb Uwe, Tothe Antoine, Tsukadaa Akinori, & Buchia Felix N. et al. (2011) Fuel cell/battery passive hybrid power source for electric powertrains. *Journal of Power Sources*, 196, 5867-5872.
- Dixon Juan, Ian N., and Eduardo A., & Micah Ort ar. (2009). Electric vehicle using a combination of ultracapacitors and ZEBRA battery. *IEEE Trans. on Industrial Electronic*, 57(3), 1-7.
- Dai Ying, Song Liwei, & Shumi Cui. (2007). Development of PMSM Drive for Hybrid Car Application. *IEEE Trans. on Magnetics*. 43(1), 434-437.
- Fahimi B., Emadi Ali, Raymond B., & Sepe, Jr. (2004). A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars. *IEEE Trans. on Energy Conversion*. 19(1), 116-124.
- Profumo Francesco, Zhang Zheng, and Tenconi Alberto. (1997). Axial flux machine drives: A new viable solution for electric car. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 44(1), 39-45.
- Trovão João P., Paulo G. Pereirinha, & Humberto M. Jorge. (2010). Analysis of operation modes for a neighborhood electric vehicle with power sources hybridization. *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 1-6.
- Zhou Zhiguang, Mi Chris, Chen Zheng, Masrur Abul, & Murphey Yi Lu. (2011). Power management of passive multi-source hybrid electric vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 1-4.



Investigation on the Characteristics of Hybrid Energy System for Fuel Cells

Mu-Sheng Chiang¹, Ying-Pin Chang²

¹Department of Mechanical Engineering, Nan Kai University of Technology

²Department of Electrical & Information Engineering, Nan Kai University of Technology

Abstract

This research focus on a hybrid energy system. The major power sources include a fuel cell and a secondary battery, also a transformer is used to regulate the output voltage. The fuel cell has the merits of low noise, fast starting, and high efficiency. However, the cell reaction is not able to match the fast load variation due to the phenomenon of internal polarization and the formation of electric double layers. By using the hybrid system with a secondary battery, the system is capable of providing sufficient power for the transient process. The experimental results show that when the external load is in severe fluctuation condition, the auxiliary battery offers fast response to the load. The output voltages of the fuel cell decrease dramatically first at instantaneous load change and subsequently undergo dynamic adjustment due to internal reaction of the cell. The polarization phenomenon redistribute to a new equilibrium state according to the load variation, leading to a gradual increase of the cell voltage. The reaction rate of each subcell is different from each other at load variation condition. The subcells near the both ends of the stack suffer severe load impulse while those at middle region have a smaller load impact.

Keywords: secondary battery, polarization, external load

