

多片燃料電池單電池電壓量測系統之設計與實現

林正乾

國立勤益科技大學
電機工程系(所)

mutilin@ncut.edu.tw

林易佑

國立勤益科技大學
電機工程系(所)

j82024@yahoo.com.tw

王頌凱

國立勤益科技大學
電機工程系(所)

songkaiman@gmail.com

顏志安

國立勤益科技大學
電機工程系(所)

a0917125811@yahoo.com.tw

戴亞霖

國立勤益科技大學
電機工程系(所)

s39512042@gmail.com

摘要

為了確保燃料電池電壓能夠在正常的工作電壓下工作與各個單片電壓的平均性，因此必須隨時監控電池堆每一片的單片電壓，用來告知現今燃料電池堆的工作狀態與性能。本文開發燃料電池單電壓量測系統以即時量測、顯示、儲存燃料電池的單片電壓，當燃料電池單電壓顯示異常(單一片電壓波動幅度大或電壓過低)時，可讓操作人員即時採取保護的措施，以免損壞整個電池堆或降低電池的性能。本文提出植基於微控制器及運算放大器減法器電路之燃料電池單電壓量測系統方法，並將燃料電池單電池電壓量測系統以1個微控制器，對應至12片電池電壓方式模組化，並配合燃料電池量測上之限制，發展特殊的燃料電池多點單片電壓採集量測探頭裝置及固定方式，包括探頭、整合型端子台以及模組化排線等，最後本文章會呈現通訊及人機監控結果以及將長期運轉測試結果。

關鍵詞：燃料電池、單電池電壓量測、模組化、量測探頭

1. 前言

燃料電池是一種非常具有潛力的發電工具，它可以被看作一種具有環保效益的發電機。燃料電池將燃料氫氣透過電化學反應直接轉換成電能，它與一般二次性充電電池不同，燃料電池本身並不具有儲存電力的功用，而是以靠著轉換化學能得到電能的方式來產生電力，所以燃料電池可以省去二次性電池的重覆充電的時間，只要不斷的供應燃料，即可讓燃料電池持續的發電[1,2]。

1.1 量測燃料電池單電壓的重要性

燃料電池單片電壓的操作工作範圍約0.6~0.9V間，因此在實際運用中會將許多單片電壓串聯成而組成一個燃料電池堆。燃料電池在實際的運轉發電中，電池的輸出電壓會隨負載變換波動較大，例如外部負載的加載、減載都會導致燃料電池的電壓波動。燃料電池的單片電壓類似蓄電池，有所謂的最低的放電電壓，當蓄電池的放電電壓過低，會導致蓄電池停止工作，甚至造成永久損壞[3]。燃料電池也有此相同的限制，除了維持每一片燃料電池電壓在最低的工作電壓以上，亦需維持各個單片電壓的平均性，二者都是很重要的[4,5]。為了確保燃

料電池電壓能夠在正常的工作電壓下工作與各個單片電壓的平均性，因此必須隨時監控電池堆的每一片的單片電壓，用來告知現今燃料電池堆的工作狀態與性能。因此需要開發燃料電池單電壓監測系統以即時量測、顯示、儲存燃料電池的單片電壓，當燃料電池單電壓顯示異常(單一片電壓波動幅度大或電壓過低)時，可讓操作人員即時採取保護的措施，以免損壞整個電池堆或降低電池的性能。因此監測系統對於維護燃料電池於正常工作上是十分重要。

1.2 量測多點串聯電壓的困難與過去的做法

在量測燃料電池單電壓時會先遇見探頭很難固定之問題，以往在量測燃料電池單片電壓，都是使用傳統探針碰觸到燃料電池單片cell的小洞上，藉由探針的導電性來傳遞類比信號電壓。少量探針的量測不會有大問題，但因為施工方面的問題造成探針在平台上伸出的長度無法完全一致，因此大量的探針同時碰觸到同一平面的燃料電池會有一定程度的難度，某些部分的探針會無法完全碰觸到燃料電池本體，造成量測值會不準確，本文即針對此問題提出一可行的設計，並經實測證明其可用性。

假設解決完探頭或探針之裝置問題，事實上只解決一半的燃料電池多點單電池電壓量測問題，還必須解決電池串聯數目很多的問題。以往都是電池串聯多少數目，量測系統就對應多少電壓，但以前並不常見這麼多電池推疊或串聯而成的系統，也許一個量測電壓微控制系統可以對應十幾二十幾個電壓沒有問題，但假設電池是由上百個推疊或串聯而成的系統，將無法再照以往的方式去做，且微控制器在量測每片電壓的間隔縱使極為短暫，但串聯數量大時從第一片量到最後一片電壓的時間將會在不同基準點上，所以必須將多點單電池電壓量測系統模組化，一個微控制器只對應十幾個電池電壓，以本文使用的PIC18F4520晶片為例，最大頻率為40MHz，一個指令週期約為100ns，在量測少量數目的單片電壓上，輪詢時間差幾乎可忽略不計，最後再將幾乎在同時間點上的單片電壓經由通訊傳輸給中央管理單位或監控端。

多電池串聯在量測電池電壓時將又會發現共地問題，且串聯數目多時其頭尾電壓降會非常大，如圖1之接法時，AN1量到的電壓為V1，AN2量到的電壓將為V1+V2，AN3量到的電壓又為V1+V2+V3，以此類推，一般微控制器最高耐壓約為5V，不用多少電池，電壓就會超過微控制器的上限。

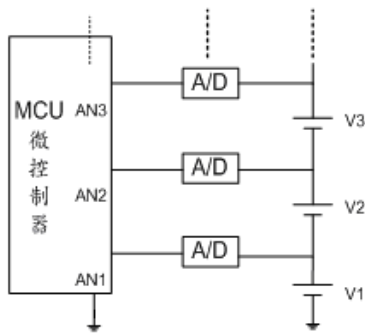


圖 1. 有共地問題之測量電壓電路

測量串聯的電池電壓還有其他方法，使用分壓電阻法是很常見的方法，簡單但有些問題，其中有幾個缺點，首先必須提供開關，以防止從分壓電阻消耗功率在電池沒有使用時。其次，分壓電阻需要非常精確的計算比例如下圖2，由圖2可知第一顆電池電壓通常不會超過微控制器耐壓，所以 $AN1=V1$ ，可直接經由類比數位轉換給微控制器，而 $AN2$ 的值是 $V1+V2$ 的電壓經由分壓電阻分壓，可得 $AN2=(V1+V2)/2$ 的電壓值，所以必須在軟體中將 $AN2$ 的值乘於2再減掉 $AN1$ 也就是 $V1$ 的值才是 $V2$ 的值，以此類推 $AN3=(V1+V2+V3)/3$ ，軟體中就必須將 $AN3$ 的值減掉 $V2$ 跟 $V1$ 的值，所以當串聯電池數量大時，不僅軟體上計算繁複，再來當電阻就算是精密電阻時也有1%的誤差，累加到尾端電壓的誤差可能非常可觀，並且在不同溫度時電阻值也會跟著變動，連帶影響最後的量測準確率。

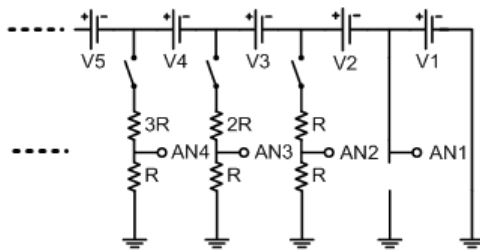


圖 2. 分壓電阻量測電壓法

基於以上敘述到的種種瓶頸及困難，本文提出植基於微控制器及運算放大器減法器電路之燃料電池單電池電壓量測系統研製方法，並將電池單電池電壓量測系統以1個微控制器對應至12片電池電壓方式模組化，並配合燃料電池量測上之限制，發展特殊的燃料電池多點單片電壓採集量測探頭裝置及固定方式，包括探頭、整合型端子台以及模組化排線等，最後會將通訊及人機監控結果以及將長期的運轉測試結果呈現。

2. 燃料電池單電池電壓量測系統設計

本文之燃料電池單電池電壓量測系統研究方

法將分成兩部份，第一部份為燃料電池單片電壓量測探頭及整合端子台，第二部份則是以微控制器及運算放大器減法器為基礎之單片電壓量測電路，兩者必須相輔相成，探頭如果沒有設計得當使得電壓採集不穩定，或是單片電壓測量電路失準，整個系統將會以失敗收場。本段將探討整個量測的設計及設計上必須注意的重點之研究方法。

2.1 電壓量測探頭設計

量測燃料電池單片電壓必須要有碰觸到燃料電池本體每一片 Cell 的裝置，才能確實量到各片電壓。為了讓每一片單片電壓都能確實地被量測，裝置上接觸到電池本體的探頭不能是堅硬的，因為只要有一組抵觸到電池後，其兩旁的探頭可能又會被頂開，因此想出一個辦法就是讓碰觸到電池的探頭是能夠被緩衝的，彈簧就是個很好的緩衝裝置。

本研究使用容易取得的五金材料手工打造一可靠的燃料電池電壓量測探頭平台，平台的示意圖如圖3。使用工業界常用的自攻螺絲釘為可調的探頭，將一根根的螺絲釘鑽入木片內，再將做為緩衝用的彈簧套入剛剛鑽出木片的螺絲頭，最後將木片固定在燃料電池的兩側端板上，且必須確定每一片接觸到燃料電池的量測彈簧是準確碰觸到每一個 Cell，否則可能會讓單片電壓短路或是因為接觸電阻太大而讓量測值不準確。使用彈簧碰觸到電池本體的好處是讓每一個量測的探頭都能有自己的緩衝長度，若太短未碰觸到則調整螺絲將其鎖入，鎖到量測電路能接收到電壓值則停止。

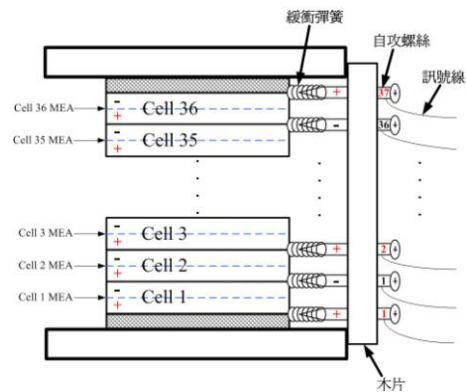


圖 3. 燃料電池單片電壓量測探頭示意圖

2.2 單電池電壓量測系統設計

本文提出之燃料電池單片電壓量測系統在設計上，是以結合微控制器及運算放大器的方式進行，流程上是先以運算放大器做成減法器電路測量兩片燃料電池間的壓降，燃料電池與減法器電路間必須以運算放大器之電壓隨耦器電路做阻抗隔離，避免電池內阻干擾減法器電路之電阻，影響輸出，最後再經由微控制器將類比訊號轉換成數位訊

號並經由通訊傳出，圖 4 為單電壓量測電路運作流程圖。電壓採集依照前段章節設計之探頭，並以 12 片單片電壓為單位，裝置排線及模組化接頭如圖 5 架構圖。燃料電池單片電壓經由排線及模組化接頭，接上單電壓量測系統，其單片電壓量測電路系統架構如圖 6。軟體撰寫上利用微控制器強大且快速的運算能力，以 PIC18F4520 來說頻率最高可達 40MHz，等於 1 個指令週期只需要 100n Sec，所以每個模組間的每片燃料電池之電壓量測，幾乎是位於同一個時間點上以及基準點上，最後在通訊上設計成使用 Modbus 協定中的 RTU 傳送模式以 RS-485 介面傳送系統採集到的數據給工業電腦做後處理，包括輸出至網路型線上即時人機監控平台，以及做長期運轉測試之數據資料建立等處理。

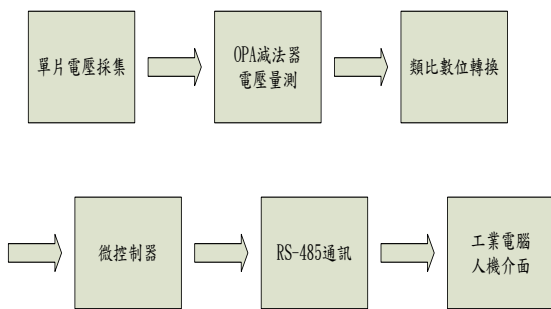


圖 4. 單電壓量測電路運作流程

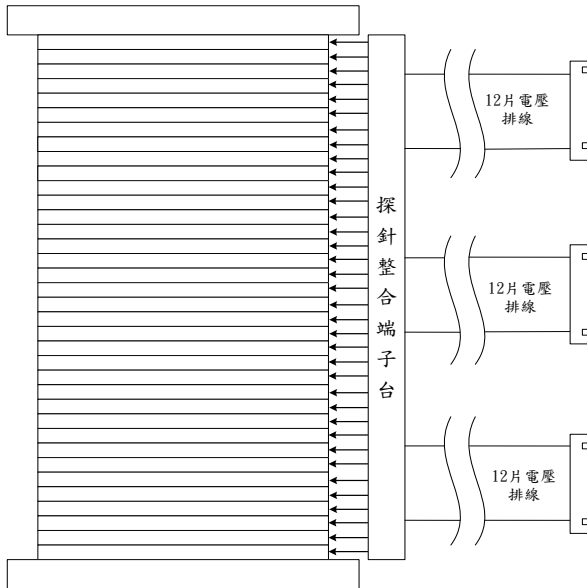


圖 5. 燃料電池單片電壓採集及排線架構

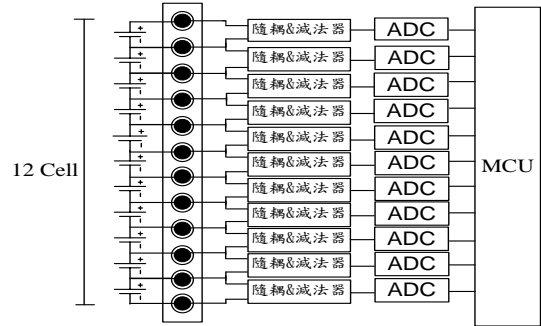


圖 6. 燃料電池單片電壓量測電路系統架構

2.3 模組化

本文將燃料電池單片電壓量測系統電路設計成一塊模組化電路能對應 12 片電壓，雖說本文所量測的燃料電池組是只由 36 片燃料電池堆疊而成，也許由一顆微控制器而成的電路就能勝任對應至 36 片電壓量測工作，但假設燃料電池組是由上百片堆疊而成，只由一微控制器是無法應付而來，並且考慮測量每片的間隔時間縱使非常短暫，也因燃料電池堆疊片數太多使得頭尾的電壓採集時間點間隔太大，使得在數據判讀上會有很大的誤差，所以在設計上由一顆微控制器對應至 12 片燃料電池單片電壓，再經由通訊傳輸給工業電腦數據。在燃料電池上的採集電壓裝置也設計成模組化模式，將以每 12 片燃料電池經由探針整合端子接成對應的排線，並在排線尾端接上模組化接頭，其優勢為架設非常容易，經由模組化接頭，可輕易架設好此系統，也可避免接線錯誤所造成不可挽回的情況發生。

2.4 通訊

通訊是為此系統相當重要的環節，使工業電腦能跟各模組間溝通，通訊介面將不考慮 RS-232，因其為全雙工串列式通訊，缺點為抗雜訊較弱，只適用於點對點短程通訊，而選用在業界的工業電子設備上較常見的通訊介面為 RS-485，為半雙工串列式通訊，可以應用於配置便宜的廣域網和採用單機發送，多機接受通訊鏈結，它提供高速的資料通訊速率，抗雜訊能力較高，可進行大面積長距離傳輸，其 Modbus 通訊協定是個有效率的串列通信協定，利用 Modbus 協定中的 RTU 傳送模式能有效率地傳輸各燃料電池單片電壓量測系統模組的數據，不論是要任一片燃料電池單片電壓或者是某個區間中的燃料電池各單片電壓都有辦法勝任，圖 7 為本系統通訊架構示意圖。

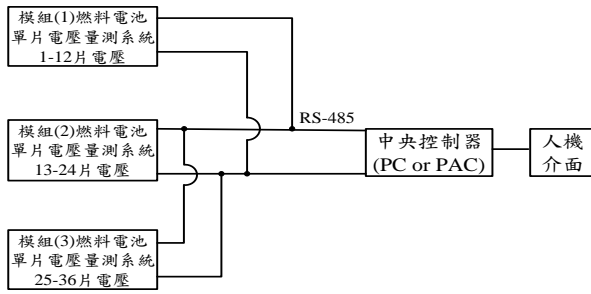


圖 7. 燃料電池單片電壓量測系統通訊架構

2.5 人機介面

人機介面是以圖形或文字介面的方式來表示監視或控制的狀況和資訊，具有高度的彈性、極高的效率與高度的親和力等特性，使人們能利用人機介面非常清楚地了解一個系統上的狀況，將所有的參數即時的顯示在面板上，設計上必須要每個值都準確地根據微控制器電壓量測電路量測結果而來，當電池上參數發生變化，人機介面也將會跟著改變，並且可直接在面板上直接對控制端做控制和提供一個完善的警報功能，並且系統長期運轉及測試其資料傳遞與顯示的過程中必須穩定，沒有信號中斷等錯誤發生。透過 RS-485 介面通訊與微控制器做雙向溝通，持續且穩定的接收數據於電腦上，以這些數據能建立趨勢圖及資料庫。

2.6 微控制器

採用 Microchip 公司的 8 位元 PIC18F4520 晶片來建立本文中的燃料電池單片電壓量測系統，此晶片擁有強大的功能但其價格卻非常的平易近人，其優勢為採用 RISC 架構的指令集，使不同系列的產品具有高度的相容性可在同樣的開發軟體 MPLAB IDE 下，利用最佳化的 C 語言編譯器架構和相容的指令集完成設計開發。其晶片並整合許多常見的標準通訊協定，除了本文中使用的 RS-485 通訊，還有包括 RS232、SPI、I2C、USB、CAN 等都有支援。並且其內建 13 組高達 10 位元精度的類比數位轉換器，使本系統能夠順利採集到高精度的參數，尤其是其寬廣的溫度操作範圍及其穩定的性能足以能應付在各種惡劣的環境。並且控制器的消耗功率表現也是非常的低[6]。

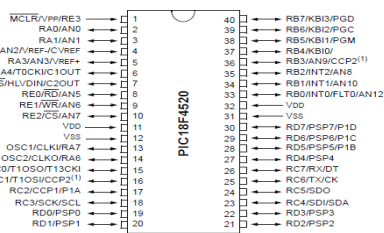


圖 8. 微控制器引腳圖

2.7 運算放大器之減法器電路

運算放大器 (Operational Amplifier)，為一常見的電子元件 IC，理想的運算放大器具有無限大的輸入阻抗、趨近於零的輸出阻抗，無限大的開迴路增益、無限大的共模拒斥比以及無限大的頻寬，當將運算放大器接成減法器時需注意抵補電壓的誤差，其誤差值越小越好，否則量測電壓時會有抵補電壓的誤差值[7]。減法器電路，其工作原理為正端電壓 V_+ 為 V_1 經過 R_1 及 R_3 的分壓，經過非反向放大後如式(1)，而負端電壓 V_- 為 V_2 經過反向放大後如式(2)， V_o 的值為 V_+ 減去 V_- 如式(3)，當 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 時， V_o 就等於 V_1 減去 V_2 也就是電池兩端壓差如式(4)。

$$V_+ = V_1 \times \frac{R_3}{R_1 + R_3} \times \frac{R_2 + R_4}{R_2} \quad (1)$$

$$V_- = V_2 \times \left(-\frac{R_4}{R_2}\right) \quad (2)$$

$$V_o = \left(V_1 \times \frac{R_3}{R_1 + R_3} \times \frac{R_2 + R_4}{R_2}\right) - \left(V_2 \times \frac{R_4}{R_2}\right) \quad (3)$$

$$V_o = (V_+) - (V_-) \quad (4)$$

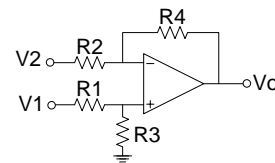


圖 9. 減法器電路

3. 燃料電池單電池電壓量測系統實現

本章節將介紹如何實現前面章節介紹之特殊設計探頭以及多點單電壓量測基於微控制器及運算放大器之減法器電路系統，在本章節將會詳細談及如何安裝本文特殊設計之探頭以及如何在 36 片燃料電池的電壓量測點探頭安置，接著將介紹單電壓量測基於微控制器及運算放大器之減法器電路系統實現，最後將敘述如何整合多塊模組及系統。

3.1 電壓量測探頭實現

本研究待量測之燃料電池單片電壓的點數共有 37 個量測點，如圖 10 所示為探頭佈置圖，燃料電池陰陽極中間夾著一片 MEA，共有 36 個 MEA (36 片 Cell)，所以量測單片電壓探頭的正端必須接在單一個 Cell 的陽極側，負端接在陰極側。以量測第一片電壓為例，若欲量測 Cell 1 的單片電壓，量測第一片電壓的正端的探頭就連接在最下端的第一個紅點，負端的探頭則連接在最下端的第一個黑點，以此類推便可量測到燃料電池的 36 片單片電壓，量測到 36 組電壓則拉排線到端子台上，再由端子台上再拉另一組排線到實體單片電壓量測

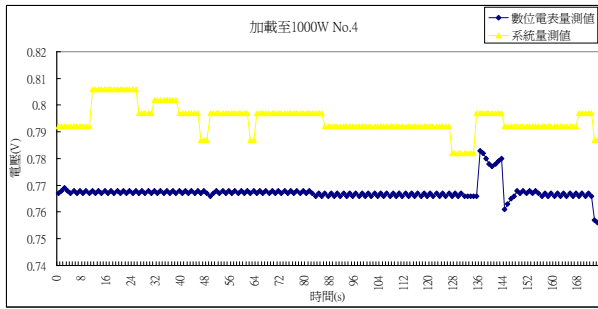


圖 19. 加載至約 1000W 時第 4 片單電壓比較

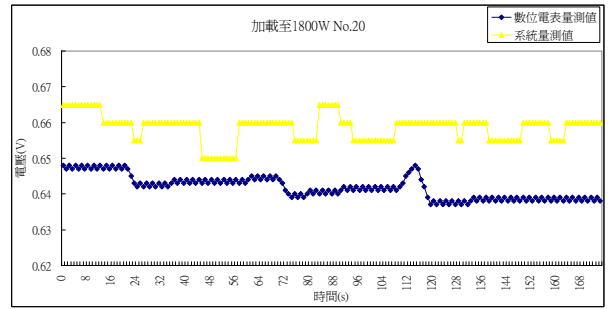


圖 23. 加載至約 1800W 時第 20 片單電壓比較

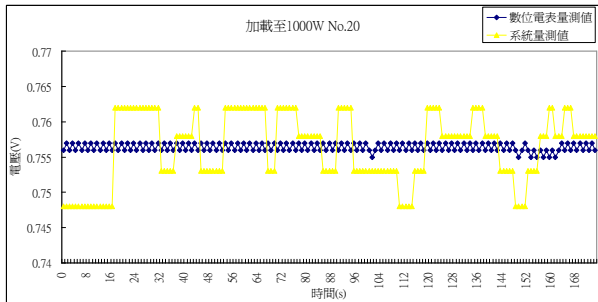


圖 20. 加載至約 1000W 時第 20 片單電壓比較

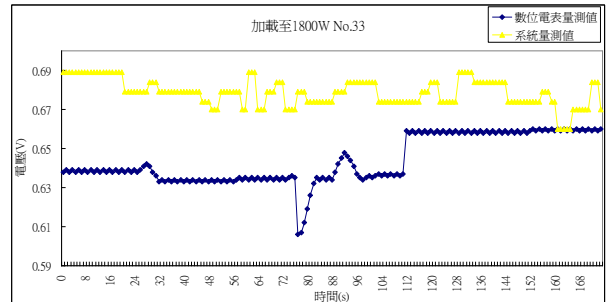


圖 24. 加載至約 1800W 時第 33 片單電壓比較

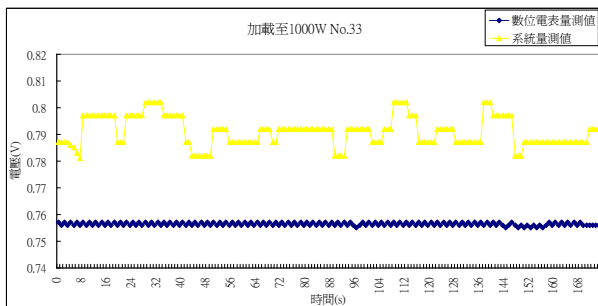


圖 21. 加載至約 1000W 時第 33 片單電壓比較

4.2 系統量測 36 片電壓

燃料電池在只有內部負載約 300W 時單片電壓會落在 0.8V 以上，圖 25 至 27 為各模組共 36 個 cell 所量測到的單片電壓趨勢圖。

圖 22 至 24 為總負載加載至約 1800W (內部負載加上部份外部負載) 單片電壓量測比較，實驗結果發現不論是第 4 或 20 或 33 片，其誤差值 ΔV 最大約為 0.023V，最小值約 0.002V。

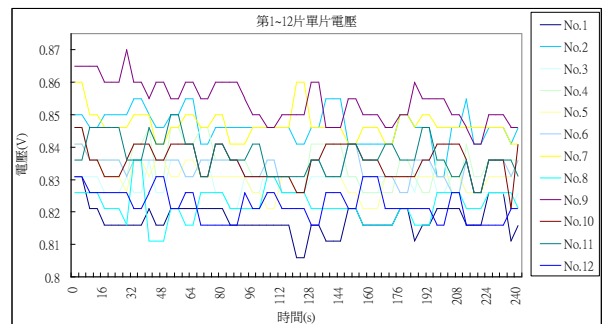


圖 25. 僅內部負載約 300W 時第 1~12 片單電壓

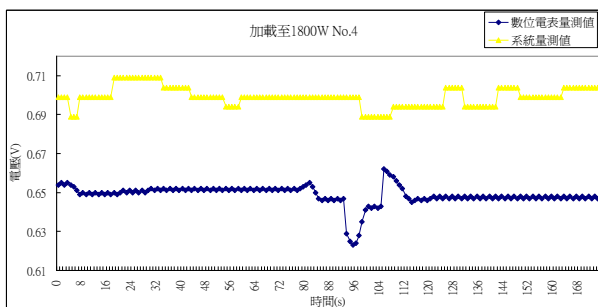


圖 22. 加載至約 1800W 時第 4 片單電壓比較

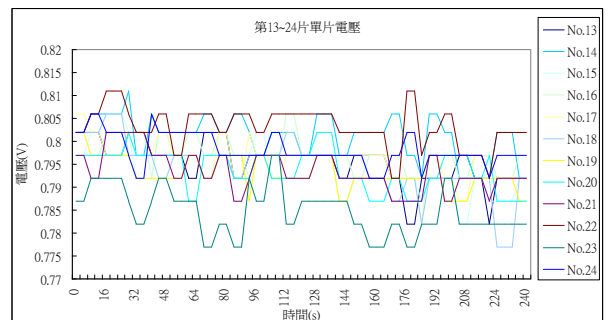


圖 26. 僅內部負載約 300W 時第 13~24 片單電壓

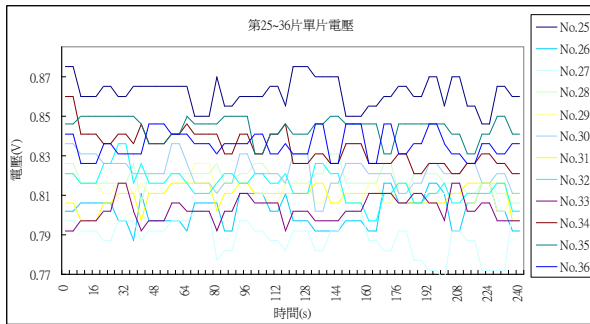


圖 27. 僅內部負載約 300W 時第 25~36 片單電壓

5. 結論

本文之全部硬體設備有 36 片燃料電池主體、電壓量測探頭及整合端子台、三個對應至 12 片電池之單片電壓量測模組以及主控端 PAC，而 PAC 上有後端人機介面以供使用者觀察監控電壓，具備以上軟體設備便能開始搭配燃料電池發電系統來量測電池單片電壓。本研究使用植基於微控制器及運算放大器減法器電路之燃料電池單電壓量測系統方法，並將燃料電池單電池電壓量測系統以 1 個微控制器，對應至 12 片電池電壓方式模組化，最後量測到的電壓資料透過 RS-485 通訊傳送至 PAC 主機，由 IWS 的專業圖控軟體撰寫並建置了網路型人機介面，從各模組接收來的電壓數據在網頁上或現場端螢幕以圖表量化的方式來呈現，並能即時監控目前系統的運作情況。

本研究完成了燃料電池單片電壓量測系統的研製，系統電壓量測誤差值 ΔV 約在 0~3.8% 左右，本系統開發出燃料電池單片電壓量測、即時顯示、歷史資料儲存，當燃料電池單電壓顯示異常，操作人員得以馬上作出適當的保護處理，避免燃料電池損壞整個電池堆或降低電池的性能。

致謝

本研究承蒙教育部「推動技專校院與產業園區產學合作計畫」計畫編號 99G-70-060 補助完成，謹此致謝。

參考文獻

- [1] 吳龍暉、鄭雅堂，“燃料電池發電實例”，化工技術，第 4 卷，第 2 期，1996 年。
- [2] 林建良、黃嘉祿、鍾國光、李柏青、呂文宏、鄭雅堂、曾明宗、張庚甲、游政信、王派毅，“再生能源與燃料電池混合型發電系統之整合設置與試運轉”
http://www.taipower.com.tw/TaipowerWeb/upload/files/13/disquisition_17.pdf
- [3] 王士豪，“質子交換膜燃料電池性能之實驗量測”，中華大學，碩士論文，2003 年。
- [4] EG&G TECHNICAL SERVICES, INC., “FUEL CELL HANDBOOK”, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, SEVENTH EDITION, 2004.
- [5] Wolfgang Schmittinger, Ardalan Vahidi* “A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells” J. Power Sources, vol.180, pp. 1–14, February 2008
- [6] MicroChip PIC18F4520 DATASHEET
- [7] X. Wang, T. Stuart*, “An Op Amp transfer circuit to measure voltages in battery strings” J. Power Sources, vol.109, pp. 253–261, January 2002.