

2kW燃料電池啟動電路設計與實作

林正乾
國立勤益科技大學
電機工程系(所)
mutilin@
ncut.edu.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

林易佑
國立勤益科技大學
電機工程系(所)
j82024@
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

本文探討燃料電池冷啟動時的啟動電路設計。啟動電路的設計首重電路的功能性，電路控制的複雜度與耗電量則也一併列入設計考量。燃料電池冷啟動需要一個輔助電力先啟動運轉輔助系統(BOP)，氫氣與空氣送到燃料電池的陽極與陰極分別進行電化學反應後才能開始供電。本研究主要使用電子接觸器及大功率二極體來切換電源，組合不同的控制元件產生不同的啟動電路，並深入探討其優缺點，最後所產生的較佳設計則在實際的燃料電池發電系統中獲得實現與驗證。

關鍵詞：冷啟動、燃料電池、電力電子電路。

1. 前言

燃料電池發電系統主要由燃料電池堆本體與包括燃料/氧化劑供給管路、水熱管理系統、電力轉換元件、自動控制器[1]等周邊輔助設備所組成。

一個典型的燃料電池發電平台之冷啟動程序為：

1. 啟動電源供應器的電力，藉此提供燃料電池內部 BOP 元件、錶頭及自動控制系統之電力。
2. 先將燃料電池預熱到適當的反應啟動溫度，若溫度過低則啟動加熱器與冷卻水幫浦，幫助燃料電池達到反應啟動溫度。
3. 自動控制系統打開氫氣電磁閥，讓氫氣進入燃料電池陽極。
4. 啟動空氣幫浦，送空氣到燃料電池陰極。

經過以上四個準備啟動程序，燃料電池才可以開始供電，在燃料電池開始供電前，需要有額外的輔助電力將燃料電池的周邊設備開啟，如此一來才能啟動燃料電池；當燃料電池啟動並穩定後，先將輔助電力切離後由燃料電池供應內部負載，之後外部負載才能陸續投入。

本研究為設法降低燃料電池啟動電路中電力電子元件功率損耗及提高系統運作的安全性。燃料電池發電平台運轉時，其在冷啟動時我們通常使用電源供應器做為推動其周邊元件的啟動電力，然而過去使用到的啟動電路中電力電子元件功率損耗過大，造成燃料電池的輸出功率被部分耗損[2~5]，降低了燃料電池電力輸出之效率。以及以往啟動電路的設計不良以及可控電力元件切入及斷開的時間沒有拿捏準確，造成電流回灌到設備的

問題，因此本研究設法找出使用上最安全、電路消耗功率最低、整體成本最少的燃料電池啟動電路，來因應燃料電池系統實際的使用狀況。

1.1 啟動電路設備元件

燃料電池啟動電路核心技術著重於啟動電路應用及控制策略中氣體的進氣控制[6~7]。啟動電路元件的組合必須合乎電力邏輯，必須考慮每個使用到電力元件是否能夠承受住其迴路上的電壓及流過的電流，搭配適當的控制切換，即可控電力元件的切入或斷開時機的拿捏必須恰到好處，才能應用於實際的啟動電路。

1.1.1 元件規格

電力來源主體為 2kW 燃料電池(Fuel Cell)及電源供應器(Power Supply)。2kW 燃料電池輸出電壓範圍在 24~36V，輸出電流 0~130A。電源供應器則使用能夠將市電交流 110 伏特電壓轉換為穩定的直流 24 伏特電壓。啟動電路使用到的電力電子元件為能夠耐大電流(150 安培以下)的電子接觸器、二極體及分流器。控制信號處理則用到能夠回傳類比訊號給控制器的電壓電流表。各元件規格如表 1

1.2 開關元件

1.2.1 半導體開關

電力供電來源的選擇為燃料電池與電源供應器，除了電子接觸器的切換，還必須考慮燃料電池與電源供應器並聯迴路上的二極體正負兩端的壓差，以決定其電力迴路上的二極體的導通。首先介紹二極體的導通原理如圖 1 所示，當二極體 P 端電壓大於 N 端電壓時，此時二極體會呈現導通狀態。如圖 2 所示，當二極體 P 端電壓小於 N 端電壓時，此時二極體會呈現截止狀態。

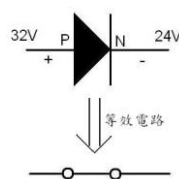


圖 1. 二極體導通

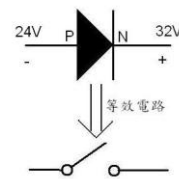


圖 2. 極體截止

表 1. 元件規格表

| | 廠牌 | 型號 | 備註 |
|---------------------|---------------------|-------------------|--|
| 2kW 燃料電池 | 工研院 | X | 2kW 36 片 |
| 電源 供應器 | MEAN WELL | PSP-1000- 24 | Input : 110Vac , 11.2A Output : 24Vdc , 37.6A |
| 電子 接觸器 (b 接點) | METEK | JBB4671B B0V=F | Normal closed 給訊號觸 發後變 Normal open |
| 電子 接觸器 (a 接點) | Tyco Electronics | EV200 | Normal open 給訊號觸 發後變 Normal closed |
| 二極體 | SanRex | DF150BA | 將兩組 DF150BA 並接，每 組可承受 150A |
| 分流器 | 廣華 | SH-0150A | 0~150A 轉成 0~50mV |
| 控制器 | 泓格 | I-8000 | 整體 控制器 |
| DO 模組 | | i-8041 | 送出 DO 訊號 |
| AI 模組 | | i-87017RC | 接收 AI 訊號 |
| 電壓表 | S-Bond | MD-4-N-3 -N-1 | 傳送 AI 訊 號給控制 器，內部判 斷後送 DO 訊號給電 子接觸器 動作 |

1.2.2 電子接觸器開關

如圖 3 所示，電子接觸器的功能類似工業界常用的 Relay，串接在電力迴路上當作是此迴路上的電力開關，當接收控制器 DO 訊號後內部線圈激磁改變目前的接點狀態(b 接點變 a 接點、a 接點變 b 接點)。METEK 公司的電子接觸器最大耐流為 200 安培，當燃料電池控制器送出 DO 訊號後，電子接觸器馬上改變目前接點狀態，因此電力迴路的閉合或斷開得以實現在啟動電路上[8~9]。

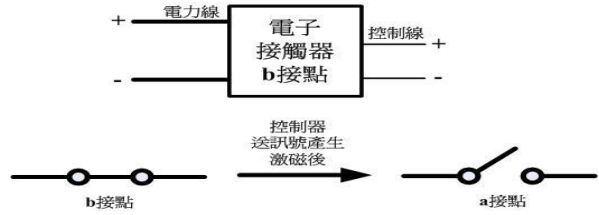


圖 3. 電子接觸器 b 接點

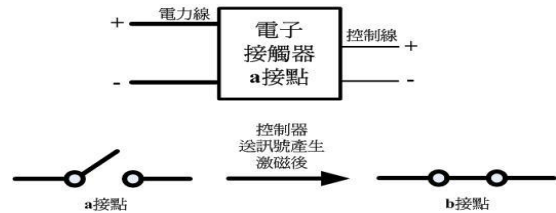


圖 4. 電子接觸器 a 接點

2. 燃料電池啟動電路的設計

2.1 設計電路一

設計電路一如圖 5 所示，燃料電池系統啟動初期，電源供應器的電源透過直流轉直流轉換器供應燃料電池內部用電，待燃料電池暖機完畢且能夠正常發電時，此時燃料電池控制系統會依據燃料電池端電壓大於設定準位時，控制器送出 DO 信號給電子接觸器，電子接觸器由原本的 b 接點變成 a 接點而產生斷路，藉此切斷整流器供電。此時內外部電力供給完全由燃料電池供應，包括系統各週邊電力及外部負載電力。

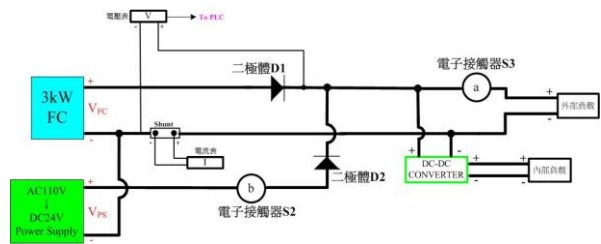


圖 5. 燃料電池設計電路一

電源供應器供電($V_{PS} > V_{FC}$)：

電源供應器電力供電示意如圖 6 所示，電源供應器输出的端電壓(V_{PS})大於燃料電池端電壓時(V_{FC})時，燃料電池迴路上的二極體 D1 被逆向偏壓而截止，形同開路；電源供應器迴路端的二極體 D2 順向偏壓而導通，形同短路，此時總電力需求完全由電源供應器電力供應，包括供應內部電力如空氣及氫氣幫浦的啟動運轉。因為流過二極體的電流非常大，所以 D1 及 D2 必須選擇耐流較大的二極體。

燃料電池供電($V_{PS} < V_{FC}$) :

燃料電池電力供電示意如圖 7 所示，燃料電池控制系統控制氣體燃料進料，包括氫氣幫浦、空氣幫浦的運轉及電磁閥的導通，使燃料電池反應氣體充滿電池本體，此時燃料電池端電壓迅速上升，當電壓(V_{FC})大於電源供應器輸出電壓(V_{PS})時，燃料電池迴路的二極體 D1 順向偏壓而導通，形同短路；電源供應器迴路端的二極體 D2 會被逆向偏壓而截止，形同開路，此時控制器送出 DO 訊號給電子接觸器 S3 後由原本的 a 接點變為 b 接點導通，同時時負載電力需求(包括內部 BOP 元件的電力及外部負載的消耗)完全由燃料電池本體運轉供應。

燃料電池供電($V_{PS} < V_{FC}$ ，電子接觸器 S2 觸發後) :

如圖 8 中在 FC 供電後，若燃料電池因加載而造成電化學反應不及，使 V_{FC} 再度小於 V_{PS} 時，造成 D1 截止及 D2 導通，此時由電源供應器供應電力，但電源供應器無法提供超過 37.6A 的電流，可能會造成電源供應器燒壞，因應的防護措施是電源供應器上的電子接觸器接收控制訊號後斷開，此後完全由燃料電池供電，燃料電池若低於 18V 則進入停機程序。

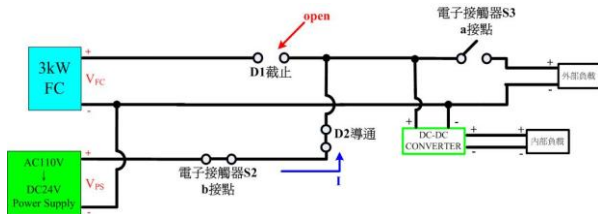


圖 6. 電源供應器電力供電

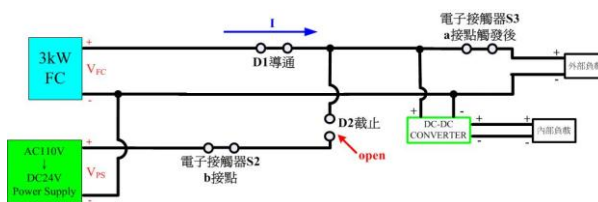


圖 7. FC 電力供電

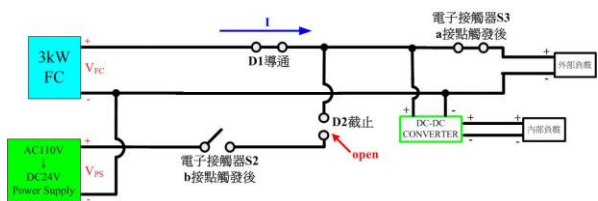


圖 8. FC 電力供電(電子接觸器 S2 觸發後)

2.2 設計電路二

燃料電池啟動電路二如圖 9 所示，藉由量測燃料電

池端電壓(V_{FC})及電源供應器端電壓(V_{PS})，並由控制器如 PLC 比較哪一個端電壓較大來做開關 S1 及 S2 的切換。

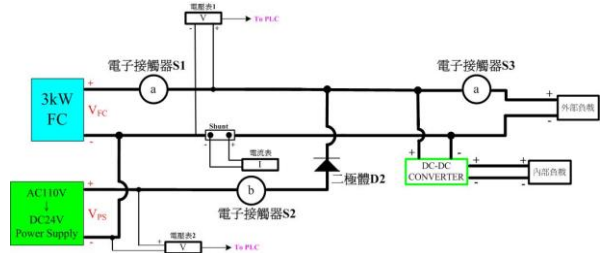


圖 9. 燃料電池設計電路二

電源供應器供電($V_{FC} < V_{PS}$) :

如圖 10，燃料電池系統啟動初期，程式判斷 V_{FC} 是否大於 V_{PS} ，若 $V_{FC} < V_{PS}$ 時，燃料電池控制系統會依據燃料電池端電壓來做判斷，此時 S1(a 接點)不動作，S2(b 接點)不動作，二極體 D2 導通，由電源供應器供給啟動電力。

燃料電池供電($V_{FC} > V_{PS}$) :

如圖 11，若 $V_{FC} > V_{PS}$ 時，控制器送出 DO 信號給電子接觸器 S1(a 接點)動作，S2(b 接點)動作，二極體 D2 截止，此時控制器送出 DO 訊號給電子接觸器 S3 後由原本的 a 接點變為 b 接點導通，同時時負載電力需求(包括內部 BOP 元件的電力及外部負載的消耗)完全由燃料電池本體運轉供應。

燃料電池供電($V_{PS} < V_{FC}$ ，電子接觸器 S2 觸發後) :

如圖 12 中在 FC 供電過程後，若燃料電池因加載而造成電化學反應不及時，使得 V_{FC} 再度小於 V_{PS} 時，造成 D1 截止及 D2 導通，此時由電源供應器供應電力，但電源供應器無法提供超過 37.6A 的電流，可能會造成電源供應器燒壞，因應的防護措施是電源供應器上的電子接觸器接收控制訊號後斷開，此後完全由燃料電池供電，燃料電池若低於 18V 則進入停機程序。

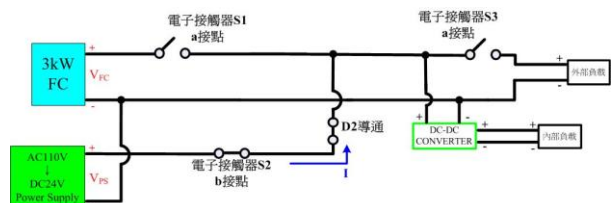


圖 10. 電源供應器電力供電

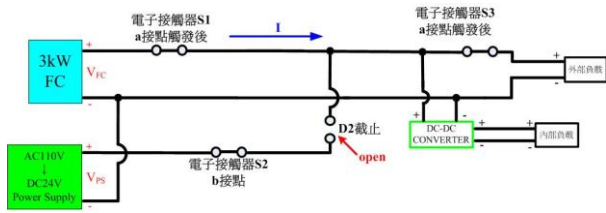


圖 11. FC 電力供電

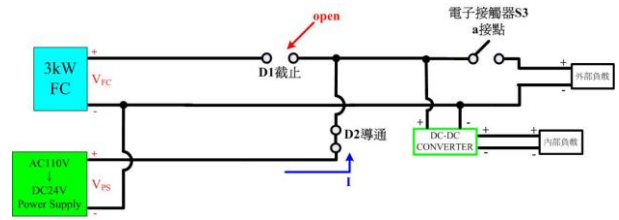


圖 14. 電源供應器電力供電

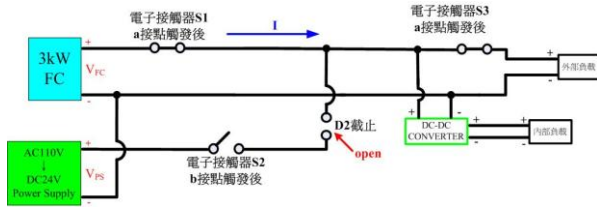


圖 12. FC 電力供電(電子接觸器 S2 觸發後)

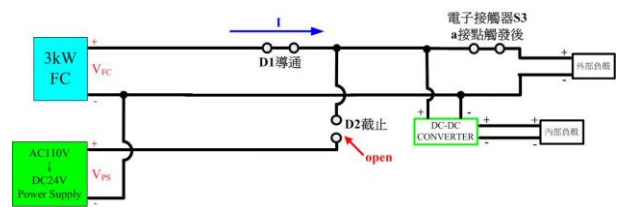


圖 15. FC 電力供電

2.3 設計電路三

如圖 13，燃料電池或電源供應器的供電，由迴路上的二極體的兩端比較電壓，兩者電壓取電壓較大者供給啟動電力。

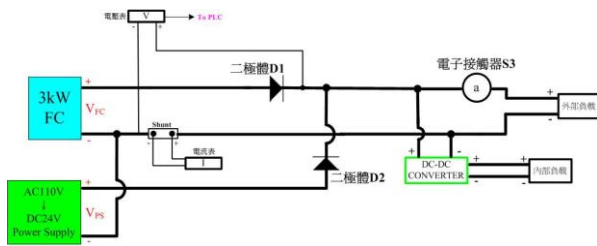


圖 13. 燃料電池設計電路三

電源供應器供電($V_{FC} < V_{PS}$)：

如圖 14，燃料電池系統啟動初期，燃料電池端電壓較電源供應器電壓低，此時電源供應器迴路上二極體導通，燃料電池迴路上二極體截止，由電源供應器供給電力。

燃料電池供電($V_{FC} > V_{PS}$)：

如圖 15，當輔助電力供給內部電力，幫助燃料電池供應氣體後，燃料電池端電壓迅速上升，當 $V_{FC} > V_{PS}$ 時，燃料電池迴路上二極體導通，電源供應器迴路上二極體截止，此時控制器送出 DO 訊號給電子接觸器 S3 後由原本的 a 接點變為 b 接點導通，同此時由燃料電池供應內外部電力。

2.4 設計電路四

如圖 16 所示，電源供應器迴路上有一個功率二極體 D2，燃料電池迴路上有個電子接觸器，用來切換燃料電池或電源供應器供電的主要控制開關。

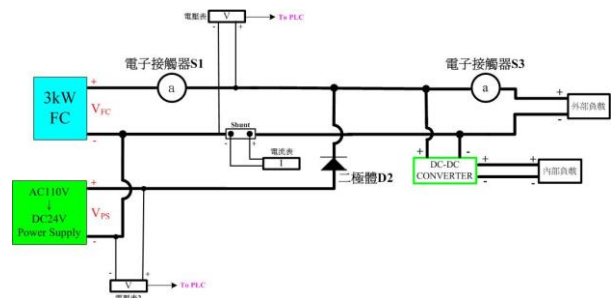


圖 16. 燃料電池設計電路四

電源供應器供電($V_{FC} < V_{PS}$)：

如圖 17，燃料電池系統啟動初期，因燃料電池系統還未暖機完成，使得 $V_{FC} < V_{PS}$ ，使得 D2 自動導通，此時電力由電源供應器提供。

燃料電池供電($V_{FC} > V_{PS}$)：

如圖 18，當輔助電力供給內部電力，幫助燃料電池供應氣體後，燃料電池端電壓迅速上升，當 $V_{FC} > V_{PS}$ 時，S1(a 接點) 動作，D2 自動截止，此時控制器送出 DO 訊號給電子接觸器 S3 後由原本的 a 接點變為 b 接點導通，同此時燃料電池正常發電供給內外部電力。

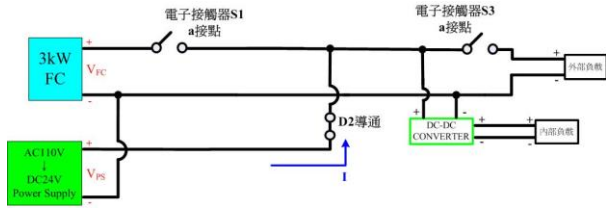


圖 17. 電源供應器電力供電

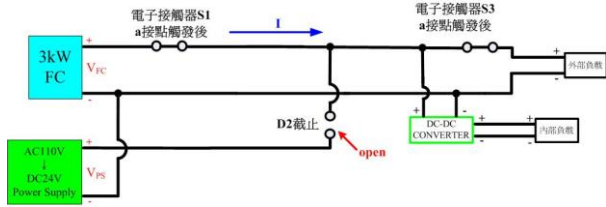


圖 18. FC 電力供電

3. 結果與分析

如圖 19 為一 2kW 燃料電池發電系統使用設計一電路之電壓電流曲線，左邊主要 y 軸為系統電流，右邊次要 y 軸為系統電壓；綠色方框範圍內的電壓電流曲線為電源供應器的電力參數，綠色方框外的電壓電流則為燃料電池的電力參數。

系統通電初期(0~5 秒)由電源供應器供應內部負載(控制器、顯示錶頭)電流 2.99A，此時燃料電池端電壓為 0V。第 5 秒時啟動燃料電池系統，5~10 秒之間控制器將氫氣入口電磁閥及排氣電磁閥同時開啟，讓氫氣充滿電池陽極端，系統電流達到 6.8 A；10~25 秒之間，空氣幫浦 70% 運轉 15 秒將空氣吹入陰極且將積水吹出燃料電池外，系統電流達到 15A；接著第 14 秒開始氫氣循環幫浦及水幫浦全載運轉，使系統電流達到 24A；第 25 秒以後，空氣幫浦由原本的 70% 運轉改為 45% 後持續運轉，此時系統電流下降約為 15A。

上述燃料電池 BOP 元件的電力皆由啟動電力供應，周邊元件適度的開啟及運轉，讓燃料氣體進入電池本體，使得電池端電壓迅速上升，約第 16 秒時燃料電池端電壓(V_{FC})大於電源供應器端電壓(V_{PS} ，約 24V)時，電路物理判斷讓燃料電池端迴路二極體導通，電源供應器端迴路二極體截止，此後系統電力(電壓電流)由原本的電源供應器改為由燃料電池提供。

燃料電池開始接手供應負載後(第 16 秒以後)，由於陽極不斷灌入氫氣，陰極不斷吹入空氣，電池端電壓迅速上升至 34.8V，在第 22 秒後空氣幫浦 45% 運轉，系統電流恢復到 15A，而系統電壓則逐漸降到運轉電壓(約 27V)。當控制系統偵測到電池端電壓大於 28V 時會觸發 S3 來接通外部負載，之後過 15 秒後才會觸發 S2 來切斷電源供應器，此後控制器會依負載大小來提高進氣量，增加輸出功率應付負載。

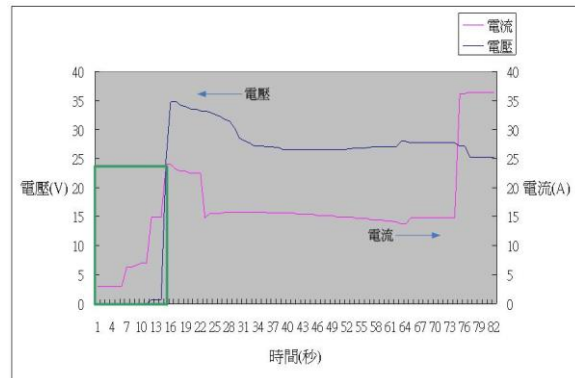


圖 19. 燃料電池發電系統電壓及電流曲線

4. 結論

第二章所介紹的四種啟動電路設計與電路動作說明，並提出下表來歸納優缺點，提供往後研究做比較，如表 3 到表 6 所示。

表 3. 設計電路一比較表

| | |
|-----|---|
| 電路一 | |
| 優點 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 此啟動電路使用上最安全，不會有電流回灌造成設備損壞的問題。 2. 在硬體間的實作最容易實現。 3. 電源供應器得以被保護 |
| 缺點 | <ol style="list-style-type: none"> 1. FC 迴路上二極體存在一個 0.7V 的壓降，與電流乘積為其電路元件的耗損。 |

表 4. 設計電路二比較表

| | |
|-----|---|
| 電路二 | |
| 優點 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 電路架構較簡單，且沒有使用到電子接觸器，來做程式送訊號控制。 2. 由電路自動比較兩端電壓來決定由 FC 或 PS 導通供電。 |
| 缺點 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 啟動電路使用元件較多。 2. FC 迴路上有電流回灌。 3. 啟動電路動作之程式較繁瑣。 |

表 5. 設計電路三比較表

| | |
|------------|--|
| <p>電路三</p> | |
| <p>優點</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. 電路架構較簡單，沒有使用到電子接觸器，來做程式送訊號控制。 2. 由電路自動比較兩端電壓來決定由 FC 或 PS 導通供電。 |
| <p>缺點</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. FC 迴路上二極體存在一個 0.7V 的壓降，有一定程度的耗損。 2. FC 供電時，PS 沒斷開，在重載時若 V_{FC} 小於 V_{PS}，造成 PS 上 D2 導通供電，恐有燒壞之餘。 |

表 6. 設計電路四比較表

| | |
|------------|---|
| <p>電路四</p> | |
| <p>優點</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. FC 迴路上沒有二極體的功率消耗。 2. 啟動電路所使用的電力電子元件相對較少。 |
| <p>缺點</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. FC 供電時，PS 沒斷開，在重載時若 V_{FC} 小於 V_{PS}，造成 PS 上 D2 導通供電，恐有燒壞之餘。 2. 啟動電路動作之程式較為繁瑣。 3. FC 迴路上有電流回竄。 |

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] 葉宏材、陳峙桐，Windows CE.NET 嵌入式程式設計：工業用控制器及自動控制系統設計，文魁資訊，2004。
- [2] 李忠華、杜傳進、侯獻軍，“質子交換膜燃料電池熱管理研究”，電池工業，第 12 卷，第 2 期，2007 年。
- [3] 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。
- [4] 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運轉測”
http://www.taipower.com.tw/TaipowerWeb//upload/files/13/disquisition_17.pdf
- [5] 黃鎮江，燃料電池，全華科技，2003 年。
- [6] 陳志信，“燃料電池系統發展趨勢”，電機月刊，第 17 卷，第 7 期，2007 年。
- [7] 陳泓翔，定置型燃料電池發電系統與網路遠端監控系統建構，國立勤益科技大學，碩士論文，2008 年。
- [8] Zhenhua Jiang, Lijun Gao, Mark J. Blackwelder, Roger A. Dougal, “Design and experimental tests of control strategies for active hybrid fuel cell/battery power sources” J. Power Sources,” vol. 153, no. 1/2, pp. 145–150, January 2005.
- [9] Roger A. Dougal, Zhenhua Jiang, Lijun Gao, “Analysis of an automatic energy recovery system for partially spent batteries” J. Power Sources,” vol. 140, no. 1/2, pp. 400–408, August 2004.