

具輔助增壓電路之新型多埠轉換器於複合能源系統應用

賴慶明^{1,3}、鄭煜輝²、李昀修³、陳信佑¹

¹ 國立臺北科技大學車輛工程系

² 朝陽科技大學資訊與通訊系

³ 國立臺北科技大學機電科技研究所

摘要

本文實現一新型多埠轉換器，其採用輔助增壓技術，在兩組不同能源裝置(燃料電池、蓄電池)輸入情況下可以提供高電壓直流輸出。燃料電池可依據蓄電池之儲能狀態決定切換充電或放電兩種模式。在充電模式下，燃料電池可對蓄電池充電並同時對負載供電，於放電模式中，燃料電池與蓄電池可同時輸出能量給負載端。為驗證可行性，本文實作一轉換器原型機平台，以燃料電池 36V 與蓄電池 48V 作為雙輸入，輸出可升壓至 165V。而實驗與模擬結果可證明，在充電與放電模式下，所提轉換器分別可以達到 98.3% 與 97.8% 的最高效率。

關鍵字：燃料電池/蓄電池複合能源、多埠轉換器

Abstract

The object of this paper is to propose a novel multiport converter with an auxiliary voltage boosting technique for providing dual energy sources and high voltage output. Depending on charging and discharging states of the battery storage device, two different power operation modes are defined. In the battery discharging mode, two input power sources FC and battery supply energy to the loads. In the battery charging mode, FC not only supplies loads but also supplies power to battery. This condition occurs when the load power is low and the battery must be charged. Finally, the validity of the proposed power converter and its performance were verified by simulation and experimental results. The highest conversion efficiency achieved by the prototype was 98.3% and 97.8% in the battery charging and discharging modes, respectively, under the specifications with two input sources of 36V (FC), 48V (battery), and the output voltage of 165V.

Keywords: Fuel-cell/battery hybrid energy resources, multiport converter.

1. 前言

一直以來，全球人口攀升所造成能源快速消耗的問題受到各國重視，而發展綠能發電更是各國政策發展的主要方向。相較於其他綠色能源，燃料電池(Fuel-Cell, FC)具有安靜、穩定、高能量轉換效率等特點，也因此以燃料電池為動力來源的綠能發電系統特別受到矚目。燃料電池在穩定的氧和氫燃料來源輸入下，可以不間斷的提供穩定電力，直至燃料耗盡。然而燃料電池也有其特性上的限制，例如動態反應慢、單位功率成本較高等，特別不利於重載啟動或是加速、減速等暫態時的動力需求。為解決此問題，配裝蓄電池以彌補燃料電池響應特性是一種可行的做法。值得探討的是，燃料電池與蓄電池電壓操作範圍並不一致，在系統配置考量上，一般會在各自輸入能源設置獨立電力轉換器以控制各自的功率。但為了降低成本、重量及功率損失，可以考慮使用多埠轉換器於複合能源發電系統[1]-[9]。

如圖 1 所示為本文所研製之新型多埠轉換器，其能夠整合燃料電池、蓄電池等不同電壓特性的能源，並進一步應用於家用儲能裝置、電動車系統、不斷電系統與直流微電網等。

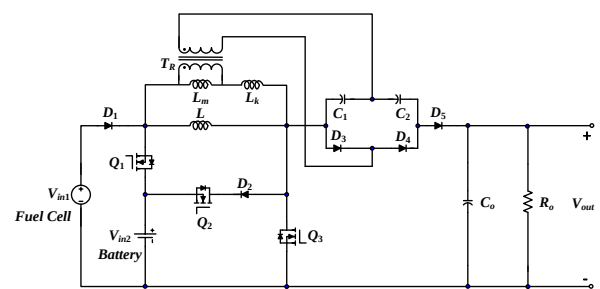


圖 1 具複合能源之新型多埠轉換器

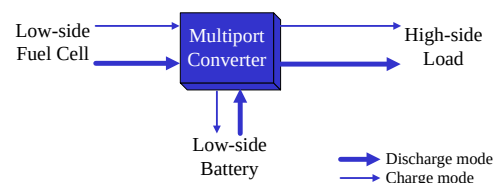
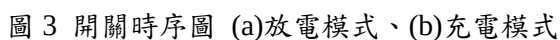


圖 2 新型多埠轉換器於充放電模式工作示意圖

為驗證可行性，本文提出一轉換器原型機平台，以燃料電池 36V 與蓄電池 48V 作為輸入，經過轉換器升壓至 165V。實驗與模擬結果證明本文所研製之多埠轉換器可應用於以複合能源為基礎之住商用直流電網。

本文所提轉換器之架構參見圖 1，其是以燃料電池(V_{in1})作為主要發電來源、蓄電池(V_{in2})作為儲能裝置；而 R_o 為高壓負載端電阻，用以模擬實際電器設備。轉換器電路包括三個主動開關(Q_1, Q_2, Q_3)，可用於控制電流與輸出電壓；此外，轉換器採用一輔助增壓技術，包括匝數比為 1 的高頻變壓器(T_R)結合一倍壓整流電路(C_1, C_2, D_3, D_4)，主要用以達到提升電壓轉換比之目的。

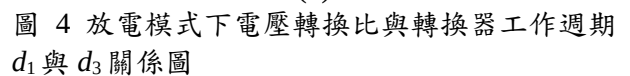


電池放電模式之開關時序，如圖 3(a)。 V_{in1} (燃料電池)、 V_{in2} (蓄電池)一同提供能量給負載。此模式下，開關 Q_2 截止， Q_1 與 Q_3 為主要切換開關。 Q_1 控制蓄電池供給電感的能量、 Q_3 控制輸出電壓 V_{out} 。

電池充電模式之開關時序，如圖 3(b)。當系統負載需求低，且蓄電池需要進行充電的時候， V_{in1} (燃料電池)可提供能量給高壓端負載，同時也對 V_{in2} (蓄電池)進行充電。此模式下， Q_2 與 Q_3 為主要切換開關， Q_1 截止。開關 Q_3 用於調節高壓端輸出 V_{out} ， Q_2 控制 V_{in1} (燃料電池)對 V_{in2} (蓄電池)之充電電流。

本文所提轉換器操作於放電模式時， V_{in1} 、 V_{in2} 皆視為輸入電源，對輸出 V_{out} 進行放電。依據轉換器電感 L 符合伏秒平衡原理(Voltage-Second Balance Principle)的情況下，電壓增益可推導為：

如圖 4 即分別表示放電模式下電壓轉換比與工作週期 d_1 與 d_3 之關係圖，其中 k 為 V_{in2} 與 V_{in1} 之比值。



轉換器操作於充電模式時， V_{in1} 仍視為輸入， V_{in2} 視為輸出(作為蓄電池)。因此，在這個模式下，轉換器輸出包括 V_{out} 與 V_{in2} 。依據伏秒平衡原理，電壓增益可推導如下式(2)：

圖 5 即分別表示充電模式下電壓轉換比與工作週期 d_2 與 d_3 的關係圖，其中 k 為 V_{in2} 與 V_{in1} 之比值。

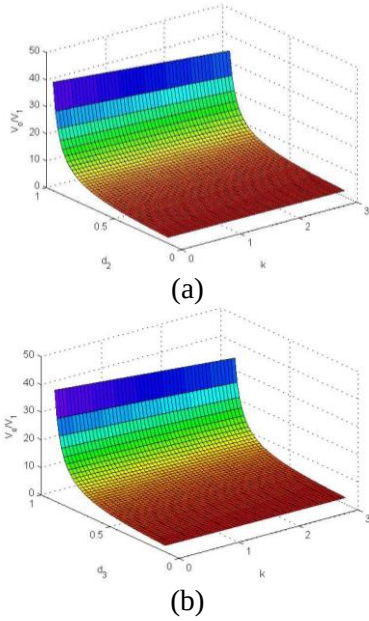


圖 5 充電模式下電壓轉換比與轉換器工作週期 d_2 與 d_3 關係圖

4. 模擬與實驗結果

為了驗證新型轉換器的效能，吾人實際製作一台 500W 轉換器電路原型機如圖 6，實作參數如表 1。

4.1 電池放電模式

電池放電模式下，兩個輸入 V_{in1} (燃料電池) 與 V_{in2} (蓄電池)皆會提供能量給負載。量測開關的閘極訊號與電感電流如圖 7。開關之工作週期為 $d_1=0.3$ 與 $d_3=0.5$ ，滿載情況下電感電流 $I_{Lavg}=9.5A$ 。圖 8 與圖 9 為二極體 D_1 、 D_3 、 D_4 與 D_5 之跨壓以及輸出電壓 $V_{out}=151.8V$ 。

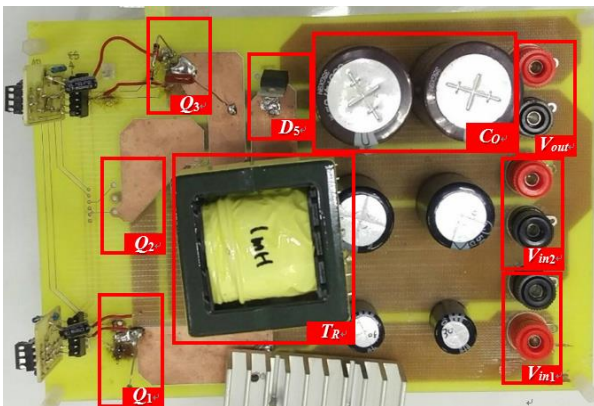


圖 6 本文所研製之新型多埠轉換器

表 1 轉換器實作電氣規格及參數

Specifications	
V_{in1} (FC)	36V
V_{in2} (Battery)	48V
Output power	P_o : 500W
Switching frequency	f_s : 20kHz
Parameters	
Capacitors	C_1 : 470uF/100V; C_2 : 470uF/100V
Coupled Inductor	L : 250uH $N_p:N_s=1:1$
Diodes	D_1 :1E22AB; D_2 :1E22AB; D_3 :1E22AB; D_4 :1E22AB; D_5 : G40L5VW
MOSFET	Q_1 : IXFH160N15T2; Q_2 : IXFH160N15T2; Q_3 : IXFH160N15T2

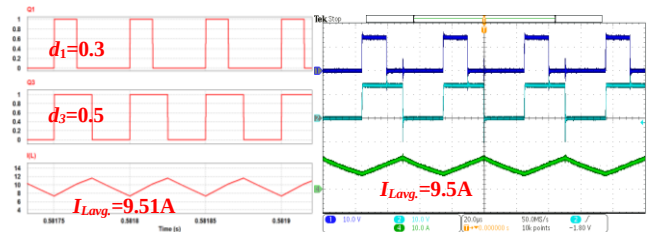


圖 7 放電模式下模擬及實際量測驅動信號與電感電流

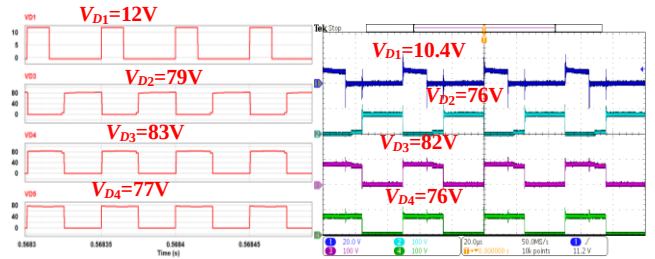


圖 8 放電模式下模擬及實際量測二極體跨壓

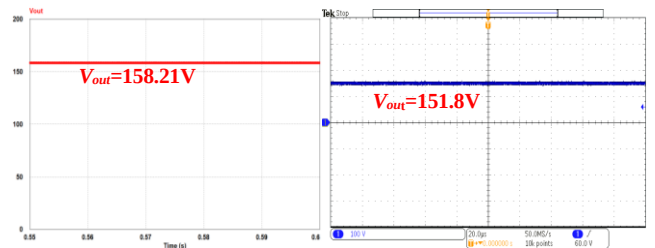


圖 9 放電模式下模擬及實際量測輸出電壓

4.2 電池充電模式

電池充電模式下，圖 10 為開關閘極訊號與電感電流波形圖，在工作週期 $d_2=0.7$ 與 $d_3=0.5$ ，實驗顯示滿載情況下電感電流 $I_{Lavg}=12.2A$ 。由圖 11 與圖 12 可知，電池處於充電狀態，電池電流 $I_{in2}=-3.89A$ ，輸出電壓為 $V_{out}=136V$ 。

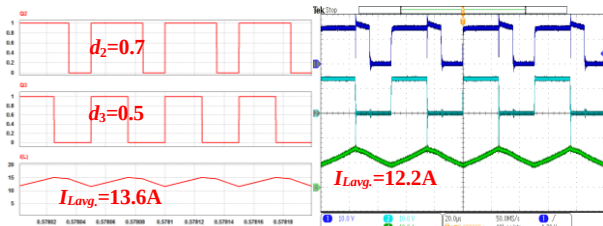


圖 10 充電模式模擬/實際量測驅動信號與電感電流

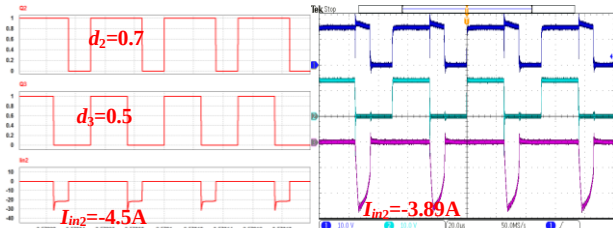


圖 11 充電模式模擬/實際量測驅動信號與電池電流

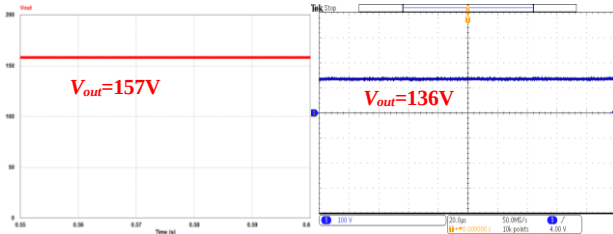


圖 12 充電模式下模擬/實際量測各輸出電壓

5. 效率量測

圖 13 為所研製電力轉換器於電池放電模式與充電模式在不同負載的情況下的效率變化曲線。由圖觀察可知，轉換器在輸出功率 97.1W 時為邊界導通模式(Boundary Conduction Mode)，放電模式操作下轉換器最高效率發生於 164.3W，效率可達到 97.8%，並且一直到滿載 500W 輸出時皆可維持在 89.8%以上。在充電模式下，除了高壓側輸出，電池之充電功率也計算在輸出功率之中，轉換器最高效率發生在 147W，其效率可達到 98.3%。

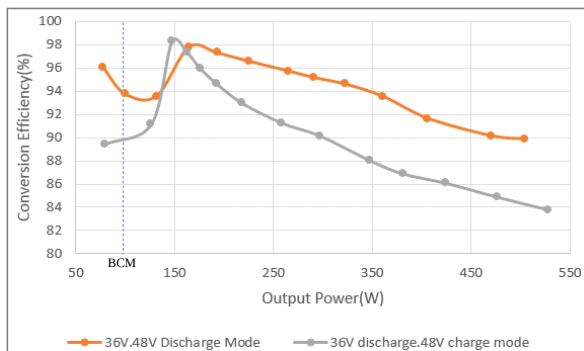


圖 13 所研製轉換器於不同模式下效率曲線圖

6. 結論

本文研製一新型多埠轉換器，該轉換器可依據電池的儲能狀態決定充電或放電兩種模式。實驗結果證明於電池充電模式與放電模式下，轉換器最高效率達到 98.3%與 97.8%。所提轉換器之性能可進一步整合於住商直流電網。

誌謝

科技部計畫編號 (106-2622-E-027-006-CC2; (106-3113-E-027-008; 105-2221-E-027-096) 支持本文相關研究經費，謹此致謝。

參考文獻

- [1] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, and M. Hinaje, "Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3892-3905, 2009.
- [2] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicle Fundamentals, Theory and Design*, 2nd ed., CRC Press, 2010.
- [3] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5673-5689, 2013.
- [4] C. M. Lai, Y. C. Lin, and D. S. Lee, "Study and implementation of a two-phase interleaved bidirectional DC/DC converter for vehicle and dc-microgrid systems," *Energies*, vol. 8, no. 9, pp. 9969-9991, 2015.
- [5] P. Thounthong, S. Pierfederici, and B. Davat, "Analysis of differential flatness-based control for fuel cell hybrid power source," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 909-920, 2010.
- [6] Amin, R. T. Bambang, A. S. Rohman, C. J. Dronkers, R. Ortega, and A. Sasongko, "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power sources using model predictive control," *IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 1992-2002, 2014.
- [7] A. Peyman, S. Pierfederici, F. Meybody-tabar, and B. Davat, "An adapted control strategy to minimize dc-bus capacitors of parallel fuel cell/ultracapacitor hybrid system," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 3843-3852, 2011.
- [8] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M. A. M. Hendrix, "Family of multiport bidirectional DC-DC converters," *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, vol. 153, no. 3, pp. 451-458, 2006.
- [9] C. M. Lai and M. J. Yang, "A high-gain three-port power converter with fuel cell, battery sources and stacked output for hybrid electric vehicles and DC-microgrids," *Energies*, vol. 9, no. 3, pp. 180:1-15, 2016.