

Z-소스 인버터와 울트라커패시터를 이용한 연료전지 시스템

金倫鎬[†], 李郁泳^{*}, 金洙弘^{**}

A Fuel Cell System with Z-Source Inverter and Ultracapacitors

Yoon-Ho Kim, Uk-Young Lee and Soo-Hong Kim

요 약

연료전지 시스템은 가스양 등 연료전지의 입력조건 변동 시, 또는 부하 변동 시와 같은 외부적인 영향에 의해서 과도상태 전압 왜란이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 연료전지 출력전압의 왜란 보상을 위해 Z-소스 인버터와 울트라커패시터를 포함한 다양한 연료전지 시스템 회로방식을 제안하였다. Z-소스 인버터의 구조는 매우 간단하며 DC/DC 컨버터의 사용 없이 스위칭 패턴만을 제어하여 전압을 승/강압 할 수 있는 특징을 갖고 있다. Z-소스 인버터와 울트라커패시터를 포함하여 제안된 여러 가지 회로방식을 시뮬레이션을 통하여 특성을 분석하고 실험을 통하여 확인하였으며, 제안된 시스템이 전압 왜란에 대해 안정된 응답을 갖는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

When input parameters like gas volume or load of the fuel cell system is changed, the fuel cell system can generate transient voltage disturbances. In this paper, a fuel cell system with Z-source inverter and ultracapacitors for voltage disturbance compensation is proposed. The structure of Z-source inverter is simple. It has unique features that can boost/buck input voltage with a DC/DC converter using only a modified switching pattern. The characteristics of the proposed topologies for the fuel cell system with Z-source inverter and ultracapacitors are analyzed using simulation, and verified by experiments. The simulation and experimental results show that the proposed system is capable of operating with stable response to the system transient and voltage disturbances.

Key Words : Z-source inverter, Fuel cell, Ultracapacitors

1. 서 론

분산 발전 시스템은 소규모의 지역 발전소 또는 연료전지, 광 발전과 같은 이차 에너지를 통하여 전력을 발생시킨다. 이차 에너지를 사용한 시스템은 인버터와 같은 전력변환 장치를 사용하여 원하는 전력을

만들게 된다. 이러한 전력변환장치들은 현재까지 다양한 종류들이 개발되어 사용되고 있으며, Z-소스 인버터와 같은 새로운 토폴로지들이 개발되고 있다^[1]. Z-소스 인버터는 일반적인 인버터에서 발생하는 전압형 인버터의 주회로를 전류형 인버터로의 교환 또는 승압형에서 강압 인버터로의 교환, shoot-through의 문제를 고려하지 않아도 되는 장점을 가지고 있다. 또한 Z-소스 네트워크는 에너지의 저장 및 필터링 특성을 가지며, 일반적인 인버터에서 단독으로 사용되는 필터 소자에 비해 전압과 전류 리플을 감소하는데 더 효과적이다. 이와 같은 특성을 가지고 있는 Z-소스 인버터를 연료전지 시스템에 적용하게 되면, 연료전지 시스

[†]교신저자 : 정회원, 중앙대 전기전자공학부 교수
E-mail : yhkim@cau.ac.kr

^{*}정회원, 중앙대 전자전기공학부 석사졸업

^{**}정회원, 중앙대 전자전기공학부 박사과정

접수일자 : 2007. 3. 16 1차 심사 : 2007. 4. 4
2차 심사 : 2007. 5. 11 심사완료 : 2007. 6. 20

템의 과도상태 및 전압왜란, 연료전지 출력개방 시 발생하는 전지수명 단축 등의 문제들에 대해 효과적으로 대처할 수 있다^[2]. 또한, 연료전지의 전류밀도 증가로 전압이 급격하게 변화될 경우에 대비하여 추가적인 보상방안이 요구된다.

본 논문에서는 연료전지 시스템이 가지고 있는 이러한 문제들을 해결하기 위해 Z-소스 인버터와 울트라커패시터를 사용한 다양한 회로들을 제안하였고, 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 확인하였다.

2. 시스템의 구성

2.1 연료전지

연료전지는 두 가지 중요한 특성을 가지고 있다. 첫째, 연료전지는 부하조건에 따라 출력전압이 변화된다. 둘째, 느린 초기동작 시간으로 인해 출력전압 응답에 영향을 미친다^[3]. 연료전지의 등가회로는 그림 1에서 보여준다. 여기서 $R_1 = 0.25\Omega$, $R_2 = 0.55\Omega$, $C_1 = 270mF$ 이다.

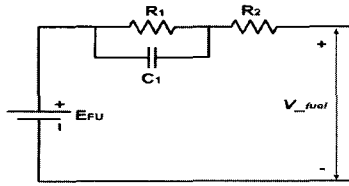


그림 1 PEM 연료전지 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of PEM fuel cell

2.2 울트라커패시터

울트라커패시터는 큰 에너지와 출력밀도를 가지고 있으며, 매우 짧은 충/방전 시간, 기계적인 강인성을 갖는 전기적 에너지 저장 장치이다. 그리고 낮은 내부 저항을 가지고 있다. 이로 인해 배터리를 대체하거나 보완할 수 있는 에너지 장치로 사용되고 있다. 울트라커패시터의 등가회로 모델은 그림 2에서 보여주고 있다^{[4][5]}. 여기서, $R_s = 0.1\Omega$, $L = 0.01m$, $R_p = 300\Omega$, $C = 5F$ 이다.

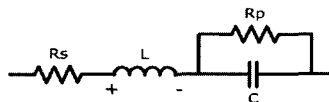


그림 2 울트라커패시터의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of ultracapacitor

2.3 Z-소스 인버터 회로 및 설계

그림 3은 Z-소스 인버터 회로를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 인덕터 L_1, L_2 와 커패시터 C_1, C_2 가 X모양의 회로 구조를 가진다. 그리고 Z-소스를 구성하는 인덕터와 커패시터는 인버터의 스위칭 주파수가 수 ~ 수십 kHz이기 때문에 매우 작은 값을 가진다. 또한 인버터의 상-하 스위치 S_1, S_3 가 동시에 턴-온 되면, shoot-through상태로 인해 에너지가 인덕터 L_1, L_2 에 축적되어 승압형 인버터로 동작한다^[1].

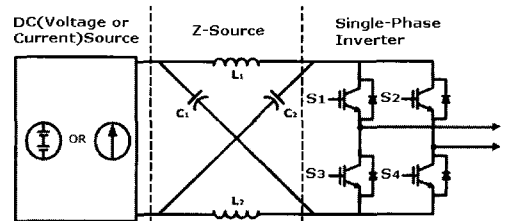


그림 3 Z-소스 인버터 회로
Fig. 3 The circuit of Z-source inverter

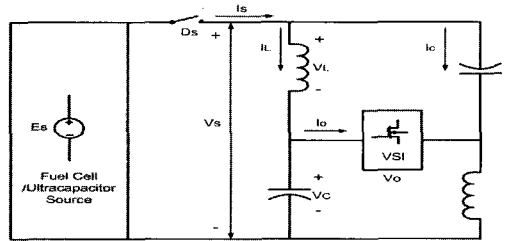


그림 4 Z-source inverter 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of ZSI

그림 4는 Z소스 인버터의 등가회로를 보여주며, L-C회로에서 인덕터 양단전압(V_L)과 커패시터 전류(I_C), L-C회로 입력전압(V_s), 입력전류(I_s), 인버터 출력전압(V_o), 인버터 출력전류(I_o)는 식(1)과 같은 조건을 갖게 된다.

$$\begin{aligned} V_L &= L(dI_L/dt), I_C = C(dV_C/dt) \\ V_s &= V_c + V_L, I_s = I_c + I_L \\ V_o &= V_c - V_L, I_o = I_L - I_c \end{aligned} \quad (1)$$

Shoot-through time을 고려하면 Z소스 인버터의 L, C는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C = (I_L d_s T_s) / (2\Delta V_c), L = (V_c d_s T_s) / (2\Delta I_L) \quad (2)$$

여기서, $\Delta V_c = (I_c \Delta t) / C$, $\Delta I_L = (V_L \Delta t) / L$ 을 나타

내고, d_s, T_s 는 각각 시비율과 주기를 의미한다.

시간에 따른 커패시터 전압 변화량과 인덕터 전류 변화량이 아주 작다면 식(3)과 같은 수식을 정의할 수 있다.

$$C = I_o d_s T_s / (2kE_s), L = E_s d_s T_s / (2kI_o) \quad (3)$$

여기서, k 는 변화량을 나타낸다.

따라서, 전원전압, 부하전류, 스위칭 주기 및 shoot-through상태의 시비율을 알고 있다면 Z소스 회로망의 커패시터와 인덕터값을 결정할 수 있다. 또한 VSI가 active상태인 경우를 가정하면 인버터 출력전압은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = 2V_c - E_s = 2V_m / (1 - d_s) \quad (4)$$

식(4)를 좀더 간략하게 표현하면 식(5)와 같은 수식을 도출할 수 있다.

$$V_c = 2V_m, I_L = 2V_m I_o / E_s \quad (5)$$

여기서, V_m 은 최대값을 의미한다.

결국 식(1)~(5)를 종합하여 정리하면 L-C회로망의 커패시터와 인덕터값을 식(6)과 같이 정의할 수 있다.

$$C = \frac{I_o T_s (2V_m - E_s)}{2kE_s (4V_m - E_s)} \quad (6)$$

$$L = \frac{E_s T_s (2V_m - E_s)}{2kI_o (4V_m - E_s)}$$

전원단에 연결된 다이오드(D_s)의 전압과 전류정격은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{D_s} = 2(1+k)V_c, I_{D_s} = 2(1+k)(I_L - I_o) \quad (7)$$

인버터 출력단 전압정격은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = 2(1+k)V_c - E_s \quad (8)$$

3. 제안된 시스템

본 논문에서는 다음과 같이 연료전지와 결합된 회로

형태들을 제안하였다.

제안된 회로의 실험을 위한 파라미터는 $L_1 = L_2 = 930\mu H$, $C_1 = C_2 = 1500\mu F$ 이며, 울트라커패시터는 $22V/5F$ 을 사용하였다. 스위칭 주파수는 $2.4kHz$ 로 설정하였고, 부하는 10Ω 인 저항부하와 $3mH$ 의 유도성 부하를 사용하였다.

3.1 Z-소스 인버터를 포함한 시스템(Type 1)

그림 5는 연료전지와 일반적인 Z-소스 인버터로 구성된 회로를 보여준다. 시뮬레이션 수행을 통해 10Ω 에서 1Ω 으로 부하가 변동된 경우 부하전압의 변동율은 약 34%정도($16V \rightarrow 10.5V$)임을 확인하였다. 또한 연료전지 입력 전압변동 또는 부하의 변동이 부하 출력과 연료전지의 출력에 각각 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 따라서 연료전지의 전압강하를 보상하기 위해 추가적인 시스템이 요구된다.

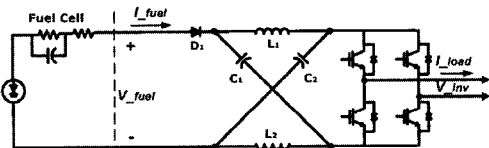


그림 5 Z-소스 인버터를 갖는 연료전지 시스템
Fig. 5 Fuel cell system with Z-source inverter

3.2 다이오드(D_1)와 연료전지사이에 울트라커패시터를 포함한 인버터 시스템(Type 2)

그림 6은 연료전지의 출력을 보상하기 위해 울트라커패시터를 연료전지와 다이오드(D_1)사이에 연결한 시스템을 보여준다. 그러나 울트라커패시터의 역전류로 인해 연료전지가 손상될 수 있다.

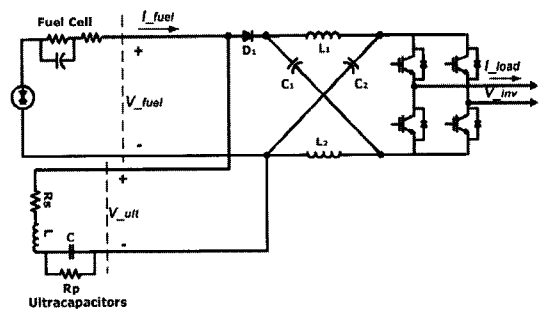


그림 6 울트라커패시터가 포함된 Z-소스 인버터 시스템
Fig. 6 Z-source inverter system with ultracapacitors

3.3 두 개의 다이오드(D_1, D_2)와 울트라커패시터를 포함하는 Z-소스 인버터 시스템(Type 3)

그림 7은 하나의 다이오드가 연결된 경우 발생하는 울트라커패시터의 역전류 차단을 위해 두 개의 다이오드(D_1, D_2)를 울트라커패시터 출력단에 연결한 시스템을 보여주고 있다. 시뮬레이션 수행결과 부하가 10Ω 에서 1Ω 으로 변화된 경우 연료전지의 출력전압 변화 폭이 Type 1의 경우에 비해 감소됨을 확인하였다.

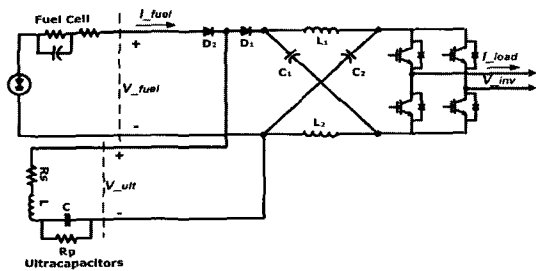


그림 7 두 개의 다이오드(D_1, D_2)와 울트라커패시터가 포함된 Z-소스 인버터 시스템
 Fig. 7 Z-source inverter system with ultracapacitors and two diodes(D_1, D_2)

3.4 두 개의 다이오드(D_1, D_2), 울트라커패시터가 일반커패시터(C_n)와 병렬 연결된 Z-소스 인버터 시스템(Type 4)

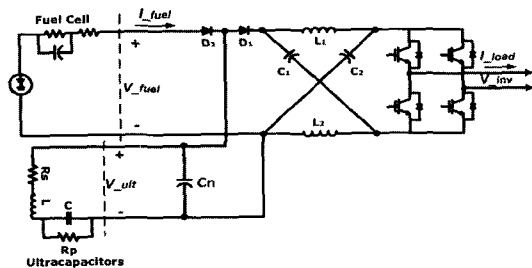


그림 8 울트라커패시터와 일반커패시터(C_n)가 병렬 연결된 Z-소스 인버터 시스템
 Fig. 8 Z-source inverter system parallel connected with ultracapacitors and capacitor(C_n)

그림 8은 연료전지와 Z-소스 네트워크 사이에 두 개의 다이오드를 가지며, 울트라커패시터와 일반커패시터가 병렬 연결된 시스템을 보여준다. 추가적으로 연결된 일반커패시터는 울트라커패시터의 충/방전 노이즈를 감소시키는 역할을 한다. Type 3의 경우(울트라커패시터만 사용된 경우)와 비교하였을 때 울트라커패시터의 충/방전 노이즈가 현저히 감소됨을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다. 또한 부하가 10Ω 에서

1Ω 으로 변화된 경우 울트라커패시터만 연결된 경우와 비교하여 부하 변동시에는 연료전지의 출력전압 변화와 울트라커패시터의 충/방전 노이즈 변화에는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

4. 실험 결과

본 장에서는 앞절에 제시된 회로 파라미터를 이용하여 수행된 실험 결과를 제시하였고, 본 연구실에서 보유한 울트라커패시터의 용량문제로 인해 축소모델(출력전압 30V)을 구성하여 실험을 수행하였다.

4.1 Z-소스 인버터를 포함한 시스템(Type 1)

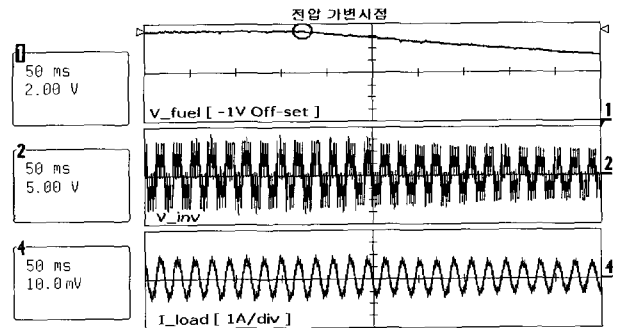


그림 9 연료전지 출력 전압변동 시 출력파형(Type 1)
 Fig. 9 Waveforms by varying the fuel cell output voltage(Type 1)

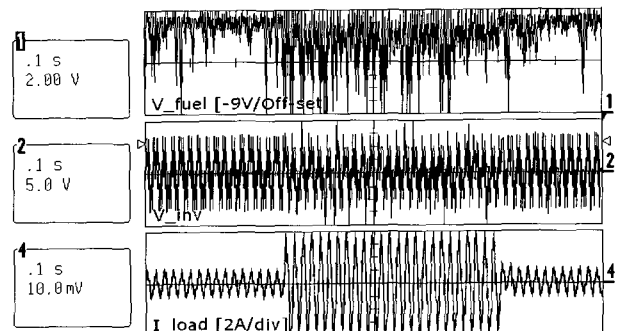


그림 10 부하변동 시 출력파형(Type 1)
 Fig. 10 Waveforms by varying the load(Type 1)

그림 9는 연료전지의 출력전압 변화시 출력파형을 보여주고 있다. 연료전지의 출력전압 변화가 인버터 출력전압과 전류에 직접적인 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그림 10은 부하가 10Ω 에서 1Ω 으로 변동시 출력파형을 보여준다. 부하가 변동함에 따라 연료전지

출력전압은 시뮬레이션과 유사하게 약 37%의 전압 강하가 발생한다.

4.2 두 개의 다이오드(D_1, D_2)와 울트라커패시터를 포함하는 Z-소스 인버터 시스템(Type 3)

그림 11은 연료전지 출력전압 변동시 출력파형을 보여주고 있다. 제안된 회로에서와 같이 울트라커패시터를 연결할 경우 연료전지의 출력전압이 변동될지라도 인버터 출력전압과 전류는 크게 변화없이 일정한 파형을 출력하고 있다.

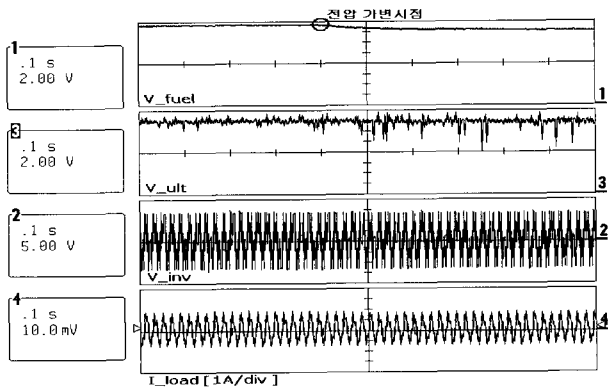


그림 11 연료전지 출력 전압변동 시 출력파형(Type 3)
Fig. 11 Waveforms by varying the fuel cell output voltage(Type 3)

그림 12는 부하가 10Ω 에서 1Ω 으로 변동시 출력파형을 보여준다. 그림 10(Type 1의 출력파형)과 비교하면 부하가 크게 변동하여도 연료전지의 출력전압 강하는 약 37%에서 12%로 감소됨을 알 수 있다.

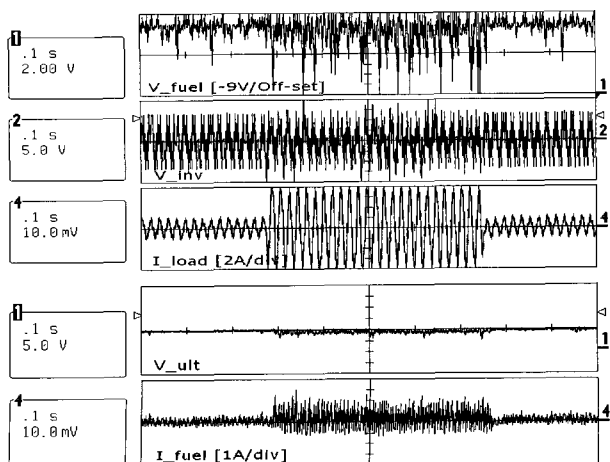


그림 12 부하변동 시 출력파형(Type 3)
Fig. 12 Waveforms by varying the load(Type 3)

4.3 두 개의 다이오드(D_1, D_2), 울트라커패시터가 일반커패시터(C_n)와 병렬 연결된 Z-소스 인버터 시스템(Type 4)

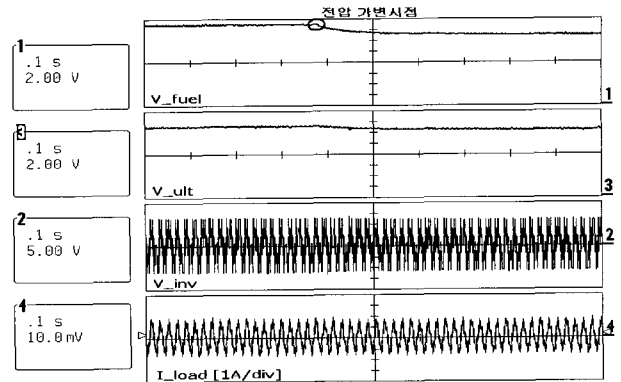


그림 13 연료전지 출력 전압변동 시 출력파형(Type 4)
Fig. 13 Waveforms by varying the fuel cell output voltage(Type 4)

그림 13은 연료전지 출력전압 변동시 출력파형을 보여준다. 연료전지의 출력전압이 변동되어도 울트라커패시터의 전압보상으로 인버터 출력전압은 안정됨을 알 수 있다. 또한 일반커패시터의 추가적인 구성으로 인해 울트라커패시터의 충/방전 노이즈도 감소되었음을 알 수 있다.

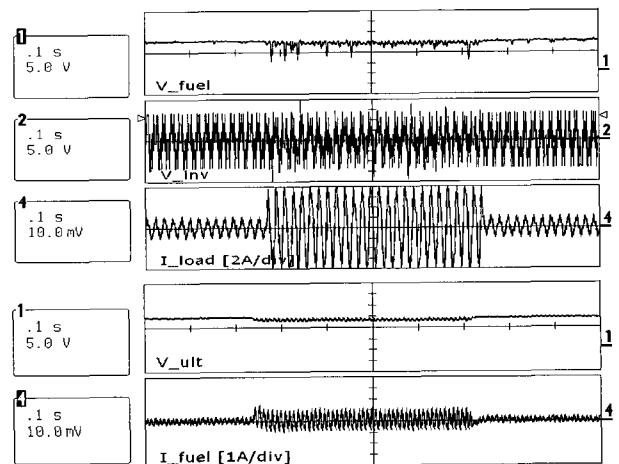


그림 14 부하변동 시 출력파형(Type 3)
Fig. 14 Waveforms by varying the load(Type 3)

그림 14는 부하변동 시 출력파형을 보여주고 있다. 울트라커패시터와 일반커패시터를 병렬연결 할 경우 연료전지의 출력전압(V_{fuel}), 인버터 출력전압(V_{inv}),

울트라커패시터의 출력전압(V_{ult}), 연료전지의 출력전류(I_{fuel})의 리플이 감소된다. 그리고 부하가 크게 변화되어도 연료전지의 전압 변동율이 5%로 안정되어짐을 알 수 있다.

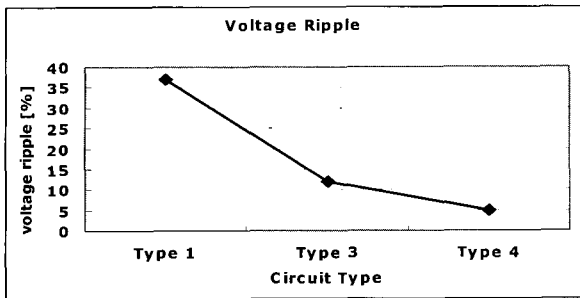


그림 15 부하변동에 따른 연료전지 출력전압 리플
Fig. 15 Output voltage ripple of the fuel cell by varying the load

그림 15는 인버터의 부하 변동에 따른 연료전지 출력전압 리플율을 보여주고 있다. 일반적인 Z-소스 인버터만을 연결한 Type 1의 회로에 비해 울트라커패시터와 일반커패시터를 병렬 연결한 Type 4의 회로가 급격한 부하 변화시에도 연료전지의 출력전압이 안정됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 연료전지 시스템의 출력전압 보상 및 부하 변동시 전압왜란 보상과 시스템의 노이즈 감소를 위해 Z-소스 인버터와 울트라커패시터, 일반 커패시터를 포함하는 다양한 회로방식을 제안하였다. 그리고 제안된 여러 가지의 회로방식을 시뮬레이션과 실험을 통해 그 특성을 분석하고, 타당성을 검증하였다.

제안된 회로의 특성분석을 통해 울트라커패시터와 일반커패시터를 병렬로 연결한 시스템(Type 4)이 다른 회로방식에 비해서 최대의 연료전지 출력전압 변동 및 부하 변동시에 연료전지 전압변동율과 시스템의 노이즈 감소면에서 가장 효과적인 시스템임을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Fang Zheng Peng; "Z-source inverter", Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume: 39, Issue: 2, March-April 2003, Pages: 504-510.
[2] Candusso. D., Valero. L., Walter. A., "Modelling,

control and simulation of a fuel cell based power supply system with energy management", IECON 02 Volume: 2, 5-8 Nov. 2002, Pages: 1294-1299.

[3] Yoon-Ho Kim, Sang-Sun Kim, "An electrical modeling and fuzzy logic control of a fuel cell generation system", Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume: 14, Issue: 2, June 1999, Pages: 239-244.
[4] Linzen. D., Buller. S., Karden. E., De Doncker, R.W., "Analysis and evaluation of charge balancing circuits on performance, reliability and lifetime of supercapacitor systems", Industry Applications Conference, 2003. Volume: 3, 12-16 Oct. 2003, Pages: 1589-1595.
[5] Do Yang Jung, "Shield ultracapacitor strings from over voltage yet maintain efficiency: although active cell voltage-equalization circuitry adds complexity, it has greater energy efficiency than passive techniques. (Design Application)", Electronic Design, May 27, 2002, Pages: 1-3.

저 자 소 개



김윤호(金倫鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(공학). 2003년 당 학회 회장 역임. 현재 중앙대 전자전기공학부 교수. 당 학회 고문.



이욱영(李郁泳)

1978년 3월 24일생. 2004년 경원대 전기공학과 졸업. 현재 중앙대 전자전기공학부 졸업(석사).



김수홍(金洙弘)

1976년 8월 11일생. 2002년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2004년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 2006년 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.