

Z-소스 인버터와 울트라커패시터를 이용한 연료 전지 시스템

김윤호, 문현욱, 이욱영, 서강문, 원충연*
 중앙대학교 성균관대학교*

A Fuel Cell System with Z-Source Inverters and Ultracapacitors

Y. H. Kim, H. W. Moon, W. Y Lee, K. M. Seo
 ChungAng University Sungkyunkwan Univ.*

ABSTRACT

본 논문에서는 연료 전지 전압의 왜란 보상을 위해 Z-소스 인버터와 울트라커패시터를 포함하는 연료 전지 시스템을 제안하였다. Z-소스 인버터의 구조는 매우 간단하며 DC/DC 컨버터의 사용 없이 단순히 스위칭 패턴만을 제어하여 전압을 부스팅 할 수 있는 독특한 특징을 갖는다. 연료 전지 시스템은 부하 변동시 외부적인 영향에 의해서 과도 상태 전압 왜란이 발생할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 Z소스 인버터와 울트라커패시터를 포함한 제안된 연료 전지 시스템이 시스템 과도 상태와 전압 왜란에 대해 안정된 응답을 갖고 동작 가능하다는 것을 보여 주었다.

1. 서 론

분산 발전 시스템은 소규모의 지역 발전소 혹은 연료 전지, 광 발전 등과 같은 이차 에너지를 통하여 전력을 발생한다. 이차 에너지를 사용한 시스템은 보통 일반적인 인버터를 사용하여 원하는 전력을 만들어 낸다. 인버터에는 많은 종류가 있다. 그러나 Z-소스 인버터의 새로운 토폴로지는 연료 전지 시스템에 응용할 때 몇몇의 장점을 가진다. Z-소스 인버터는 일반적인 인버터 토폴로지의 단점들을 보완할 수 있고, 그것이 갖는 독특한 특징 때문에 다양한 장점들을 갖는다. 그러므로 Z-소스 인버터를 연료 전지 시스템에 적용하고 그것의 동작원리를 설명하였다. 연료 전지 시스템의 동작을 위해 우리는 과도상태와 전압 왜란이 발생할지라도 연료 전지의 출력 특성이 안정을 유지되도록 해야 한다. 과도 상태와 전압 왜란 문제를 보상하기 위해 연료 전지 시스템에 울트라커패시터의 추가 설치를 포함한 다양한 방법을 연구하였다.

2. Z-소스 인버터 토폴로지

일반적인 인버터는 전압형과 전류형 인버터, 두 가지 토폴로지 타입이 있다. 두 개의 인버터 토폴로지는 다음의 단점들을 갖는다. 1) ac 출력 전압은 dc 링크단의 전압에 제한을 갖는다. 2) 또 다른 문제는 shoot-through 문제이다. 이는 EMI를 발생시키고 전압형 인버터에서는 스위칭 소자를 파괴시킨다. 이러한 문제를 피하기 위해 데드 타임 회로가 필요하다. 그러나 이러한 보상은 출력 파형의 왜곡을 야기 시킨다. 3) 두 인버터 토폴로지는 시스템 매개변수 값들이 고정되어 있기 때문에 buck-boost 인버터가 될 수 없다.

이러한 문제를 극복하기 위해 Z-소스 인버터 토폴로지가 사용될 수 있다. Z-소스 인버터 구조는 일반적인 인버터의 단점들을 개선하였다. Z-소스 인버터의 독특한 특징 중에 하나는 인버터의 스위칭 패턴의 제어만으로 전압을 승압/강압 할 수 있다.

2.1 Z-소스 인버터 구성

그림 1은 Z-소스 인버터 토폴로지를 나타낸다. 자세한 설명은 논문 [1]에 있다.

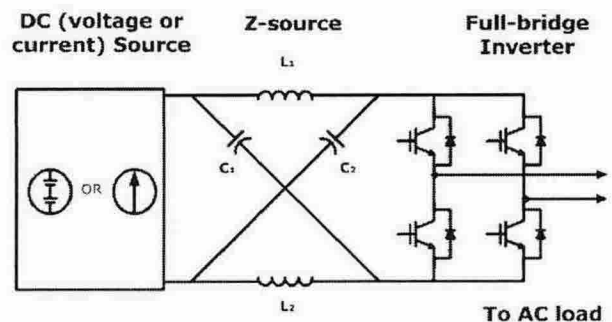


그림 1. Z-소스 인버터 토폴로지

3. 시스템 소자들

3.1 연료 전지

연료 전지는 두 개의 중요한 특성을 갖고 있다. 그 중 하나는 PEM(Proton Exchange Membrane) 연료 전지에서 출력 전압이 일반적으로는 48V이지만 부하 조건에 따라서 42V에서 60V로 출력 전압이 변한다는 것이다. 다른 것은 연료 전지 시스템이 $\tau \approx 20 \sim 40s$ 인 매우 느린 시동 응답 시간을 가진다는 것이다^[2].

문제를 해결하기 위해 다양한 접근 방법이 울트라커패시터를 사용하여 연구 되었다. 시뮬레이션을 위해 그림 2에서 나타난 것처럼 리포머와 스택을 포함한 연료 전지의 등가회로를 사용하였다. 매개변수는 표 1에 나타내었다^[3].

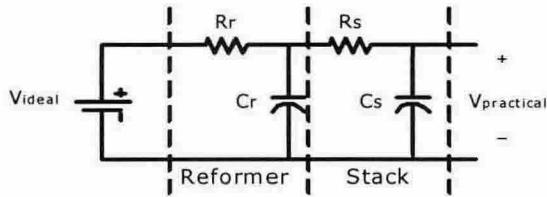


그림 2. 연료 전지의 등가회로

표 1 연료 전지 등가회로의 매개 변수

Reformer		Stack	
R_r	0.3Ω	R_s	0.1Ω
C_r	21.4mF	C_s	2.2mF

3.2 울트라커패시터

울트라커패시터는 높은 전력 밀도를 제공하고 매우 높은 충/방전 시간, 기계적인 강인성을 갖는 전기적 에너지 저장 장치이다^[4]. 그림 3은 울트라커패시터의 1차 등가 모델을 나타낸다.

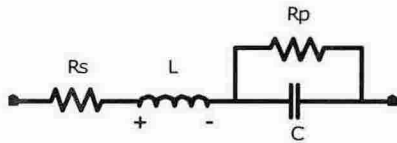


그림 3. 울트라커패시터의 1차 회로 모델

4. 시스템 회로 토폴로지와 시뮬레이션 결과

울트라커패시터를 포함하여 다양한 가능성 있는 회로 토폴로지를 연구 하였다. PSIM을 사용한 시뮬레이션을 연료 전지가 전압 새그를 가질 때 다음의 회로 토폴로지에 대해 실행하였다. 1) Z-소스 인버터 시스템, 2) Z-소스 인버터 시스템과 연료 전지와 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터, 3) Z-소스 인버터와 다이오드와 Z-소스 네트워크 사이에 연결된 울트라커패시터, 4) Z-소

스 인버터와 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터, 5) Z-소스 인버터와 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터 (울트라커패시터와 일반 커패시터의 병렬연결), 6) Z-소스 인버터와 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터(울트라커패시터와 일반 커패시터의 병렬연결, 한 개의 스위치 사용)

4.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션을 위한 시스템 매개변수는 $V_{Ideal} = 48V$ 이고 Z-소스 네트워크 매개변수는 $L_1 = L_2 = L = 160\mu H$ 이고 $C_1 = C_2 = C = 1000\mu F$ 이다. 변조 지수는 $M = 0.5$ 로 설정하고 shoot-through 듀티 사이클은 $T_0/T = 0.1014$, 스위칭 주파수는 30kHz로 설정 하였다.

4.2 시스템 회로 토폴로지들

4.2.1 Z-소스 인버터를 포함한 시스템

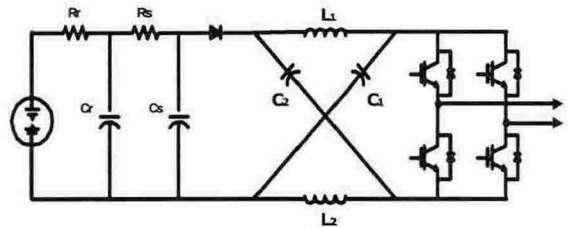


그림 4. Z-소스 인버터 시스템

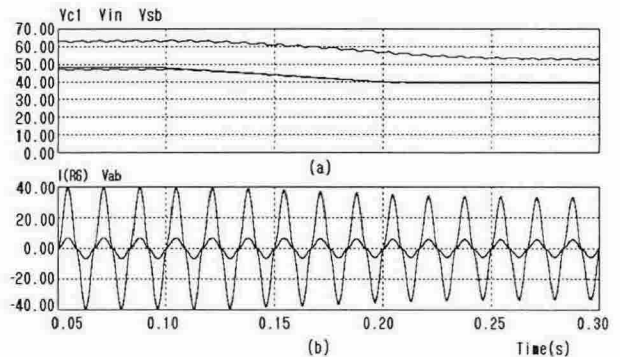


그림 5. 울트라커패시터 보상 없이 출력 전압 왜란을 포함한 파형들 (a) 연료 전지 스택의 이상적이고(V_{in}), 실제적인(V_{sb}) 출력 전압과 Z-소스 네트워크의 커패시터 전압(V_{c1}) (b) 시동 시를 포함하는 출력 전압과 전류 파형

그림 4는 일반적인 Z-소스 인버터의 토폴로지를 나타낸다. 그림 5는 주어진 시뮬레이션 매개변수를 가지고 연료 전지가 전압 왜란을 가질 때 시뮬레이션을 한 출력 파형이다. 그림 5(a)는 연료 전지의 이상적인(V_{in}), 실제적인 (V_{sb}) 출력 전압을 보여준다. 그리고 V_{c1} 은 Z-소스 구조에서 커패시터 전압이다. 연료 전지는 0.1s 이후로 전압 새그를 갖는다. 0.1s에서 0.2s 동안에 연료 전지는 48V에서 40V로 전압이 감소한다. 그림 5(b)는 출력 전

압과 상전류를 나타낸다. 전압 왜란은 인버터의 출력 전압에 영향을 미친다. 시동시 일정한 DC 전압을 얻기 위해서는 울트라커패시터가 설치되어야 한다.

4.2.4 두 개의 다이오드(D1, D2) 사이에 연결된 울트라커패시터를 포함한 Z-소스 인버터

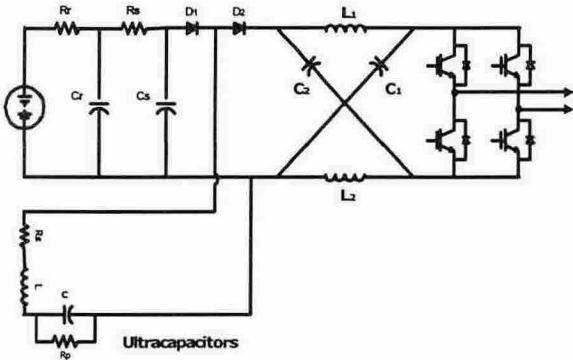


그림 5. 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터를 포함한 Z-소스 인버터

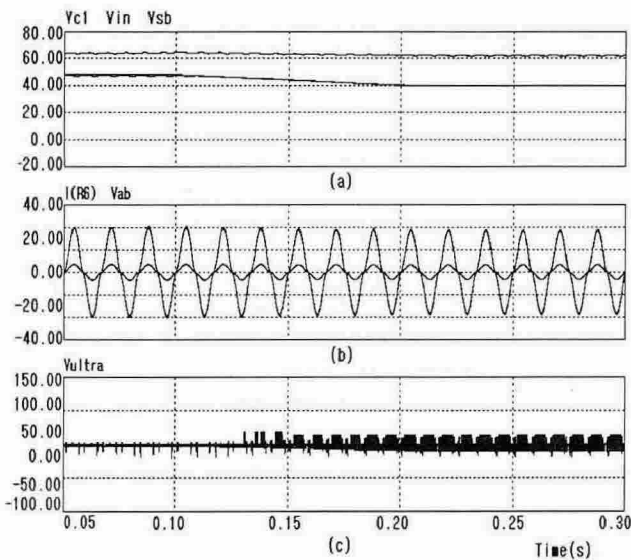


그림 6. 울트라커패시터가 두 개의 다이오드 사이에 연결되었을 때의 파형 (a) 연료 전지 스택의 이상적이고(V_{in}), 실제적인(V_{sb}) 출력 전압과 커패시터 전압(V_{c1}) (b) 울트라커패시터에 의해 보상된 출력 전압과 전류 (c) 울트라커패시터의 출력 전압

그림 5는 두 개의 다이오드(D1, D2) 사이에 연결된 울트라커패시터를 포함한 Z-소스 인버터를 나타낸다. 이러한 토폴로지는 울트라커패시터의 정격 전압이 감소하고 역 전류가 연료 전지로 흐르지 않는다는 장점을 갖는다. 이 토폴로지는 2)와 3)의 각각의 경우에 해당하는 단점들을 보완한 구조이다.

그림 6(a)는 연료 전지의 이상적인(V_{in}), 실제적인(V_{sb}) 출력 전압을 보여준다. 그림 6(b)는 울트라커패시

터에 의해 보상된 출력 전압과 전류를 나타낸다. 그림 6(c)는 울트라커패시터의 파형을 보여주고 이는 여전히 높은 충/방전 주기를 갖는다.

4.2.5 두 개의 다이오드(D1, D2) 사이에 연결된 울트라커패시터를 포함한 Z-소스 인버터

그림 7은 두 개의 다이오드(D1, D2) 사이에 연결된 울트라커패시터를 포함한 Z-소스 인버터를 나타낸다. 이 토폴로지는 4)의 경우와 유사한 장점들을 갖는다. 그림 8(a)는 연료 전지의 이상적인(V_{in}), 실제적인(V_{sb}) 출력 전압을 보여준다.

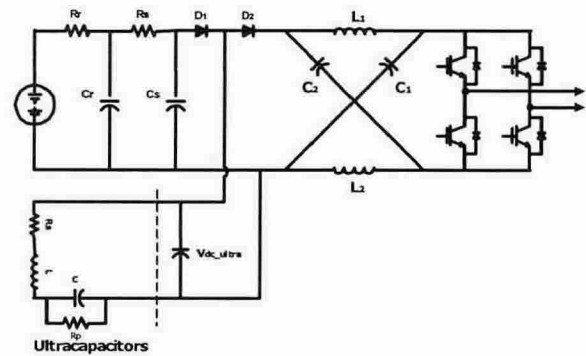


그림 7. 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터를 포함한 Z-소스 인버터

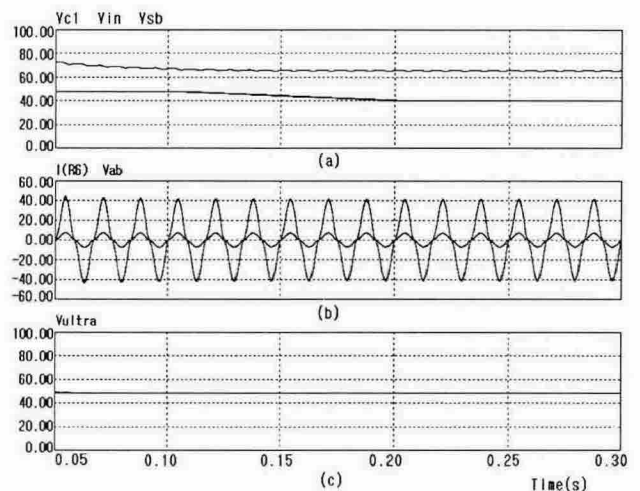


그림 8. 울트라커패시터가 두 개의 다이오드 사이에 연결되었을 때의 파형 (a) 연료 전지 스택의 이상적이고(V_{in}), 실제적인(V_{sb}) 출력 전압과 커패시터 전압(V_{c1}) (b) 울트라커패시터에 의해 보상된 출력 전압과 전류 (c) 울트라커패시터의 출력 전압

그림 8(b)는 울트라커패시터에 의해 보상된 출력 전압과 전류를 나타낸다. 그림 8(c)는 울트라커패시터의 전압을 나타낸다. 전반적인 시간에서 안정적인 동작을 하는 것을 볼 수 있다.

4.2.6 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터와 스위치를 포함한 Z-소스 인버터

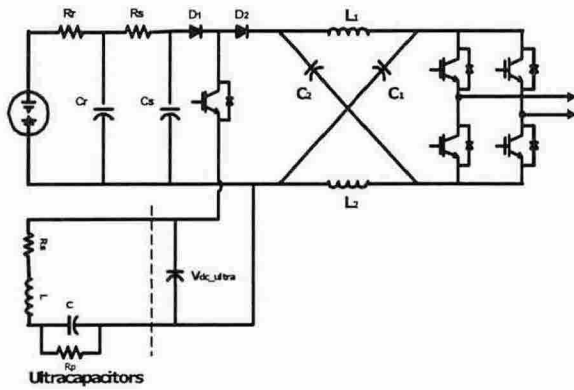


그림 9. 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터와 스위치를 포함한 Z-소스 인버터

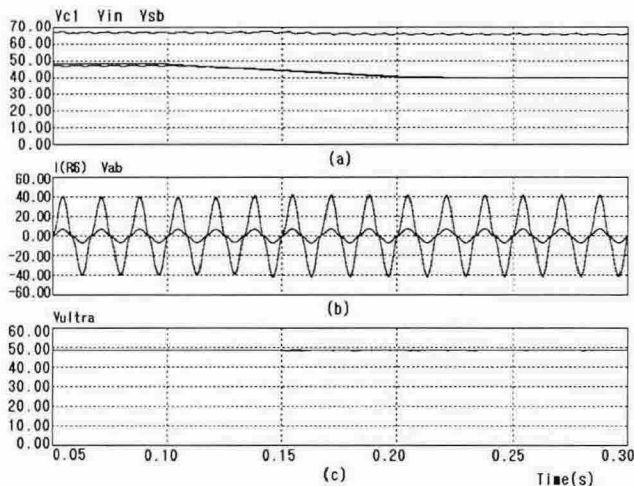


그림 9. 울트라커패시터가 두 개의 다이오드 사이에 연결되고 스위치가 연결되었을 때의 파형 (a) 연료 전지 스택의 이상적이고(V_{in}), 실제적인(V_{sb}) 출력 전압과 커패시터 전압(V_{ci}) (b) 울트라커패시터에 의해 보상된 출력 전압과 전류 (c) 울트라커패시터의 출력 전압

그림 8은 두 개의 다이오드 사이에 연결된 울트라커패시터와 스위치를 포함한 Z-소스 인버터를 나타낸다. 스위치의 역할은 울트라커패시터의 과충전을 제어하는 것이다. 만약 울트라커패시터의 전압이 기준 전압을 초과하게 되면 스위치는 턴-오프가 되어 울트라커패시터는 과충전을 막기 위해 시스템으로부터 떨어지게 된다. 그림 9(a)는 연료 전지의 이상적인(V_{in}), 실제적인(V_{sb}) 출력 전압을 보여준다. V_{ci} 은 Z-소스 구조에서 커패시터의 전압이고, 이는 시동시 오버슈트가 발생하지 않으며 전압 허용 범위 안에서 안정된 값을 갖는다. 그림 15(b)는 울트라커패시터에 의해 보상된 출력 전압과 전류를 나타낸다. 그림 9(c)는 울트라커패시터의 전압 파형을 보여준다. 이는 스위치에 의해 과충전이 발생하지 않고 기준 전압 허용 범위 안에서 전압을 유지하게 된다. 그러므로

울트라커패시터를 포함한 여러 회로 토폴로지 가운데, 이 토폴로지는 다른 회로 토폴로지보다 가장 좋은 성능을 갖는다.

5. 결론

본 논문에서는 Z-소스 인버터와 연료 전지의 전압 왜란을 보상하는 울트라커패시터를 포함한 연료 전지 시스템을 제안하였다. 만약 Z-소스 인버터를 사용한다면 원하고자 하는 출력 전압을 얻기 위해 능동/수동 스위치를 갖는 추가적인 DC/DC 컨버터가 필요 없다. 그러므로 부스트 컨버터 토폴로지를 사용한 일반적인 연료 전지 시스템과 비교했을 때 Z-소스인버터는 간단한 구조를 갖는 등 많은 장점을 갖는다. 게다가 시스템은 다양한 출력 전압을 얻을 수 있다.

연료 전지는 아주 유용한 전력 변환 에너지원 중의 하나이다. 그러나 연료 전지는 매우 느린 응답 시간과 부하 변동시 출력 전압의 새그 때문에 실제 응용에서는 이를 보상하는 것이 필요하다. 시뮬레이션 결과 Z-소스 인버터와 울트라커패시터를 포함한 제안된 연료 전지 시스템은 시스템 과도 응답시와 부하변동 시에도 안정되게 동작할 수 있음을 알 수 있었다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원사업으로 수행된 논문입니다

참고 문헌

- [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 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the], Volume: 2, 5-8 Nov. 2002, Pages: 1294 - 1299 vol.2.
- [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. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, Volume: 3, 12-16 Oct. 2003, Pages: 1589 - 1595 vol.3.