

수소 연료 전기차의 커패시터 뱅크 부피 저감을 위한 연료전지-슈퍼 커패시터 직렬연결형 전력 변환 회로 및 운용 방안

박건우, 권동우, 우강현, 정희성, 노정욱

국민대학교 전자공학과

Fuel Cell - Super Capacitor Series Connected Power Conversion Circuit and its operation method for Reducing Capacitor bank volume used in Fuel-Cell Electric Vehicles

Geon Woo Park, Dong Woo Kwon, Kang Hyun Woo, Hee Seong Jeong, Chung Wook Roh
Dept. of Electronics Engineering, Kookmin Univ.

ABSTRACT

국내외 친환경 자동차로 수소-전기자동차가 성장할 것으로 예상 되고 있다. 하지만 연료전지만 단독으로 사용 시 낮은 반응 속도로 인해 급격 최대 전력 변동 시 대응이 어렵다. 이에 따라 빠른 응답 속도와 고출력 전류 처리가 가능한 슈퍼 커패시터를 연료전지와 병렬 사용하는 추세이다. 그러나 현재 사용 중인 DC/DC Converter는 병렬 연결 방식으로 큰 내압을 요구로 하여 많은 양의 슈퍼 커패시터가 필요하고 이는 커패시터 뱅크의 부피 증가와 원가 증가를 야기한다. 이에 본 논문에서는 직렬 연결형 DC-DC Converter 회로 방안 및 운용 방안을 제안하고, Traction Load Profile 에 따른 제어 전략을 수립하였다. 모의 실험과 500W급 proto type 구현을 통해 제안 방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

전세계적으로 친환경 자동차에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 그 중에서 리튬 이온 배터리를 활용한 전기자동차와 수소에너지를 사용한 수소-전기자동차에 대한 필요성이 증가하고 있다. 한국, 미국, 일본, 유럽 등이 수소연료전지차에 관련하여 활발한 움직임을 보이고 있다. 일본의 경우, 국가 에너지 기본 계획을 통해 수소 사회 추진을 명문화하였고, 한국도 민관협의체를 발족하며 적극적으로 수소 개발에 힘쓰고 있다. 특히 현대자동차는 2013년 세계 최초로 수소차 양산에 성공하였으며, 2021년 'Hydrogen Wave'를 발표하며 수소 사회를 위한 비전을 발표하였다.

하지만 수소-전기자동차의 경우 연료전지 스택과 수소연료탱크의 가격이 굉장히 비싸고, 연료전지만 단독으로 사용할 시 전류 제한이 필요하여 제한 사항이 많다. 배터리나 슈퍼 커패시터를 병렬로 연결하여 사용하고 있지만 이마저도 많은 단점이 존재하는 실정이다. 그림 1은 병렬 연결형 전력 변환 회로이다. 연료전지와 슈퍼 커패시터가 병렬로 연결되어 있어 슈퍼 커패시터에 걸리는 전압이 높게 형성되고, 이에 따라 많은 셀이 연결되어야 한다. 또한 부스트 컨버터 특성상 슈퍼 커패시터의 에너지를 Full로 사용하지 못한다는 치명적인 단점이 존재한다.

본 논문에서는 상기에서 언급했던 단점을 보완한 직렬 연결형 양방향 DC-DC Converter를 제안하고, 시뮬레이션 및 실험

검증을 통해 제안 Converter의 타당성을 검증할 것이다. 상기 직렬 연결형 전력 변환 회로를 통해, 슈퍼 커패시터 뱅크의 부피 저감이 가능하다는 장점을 갖는다.

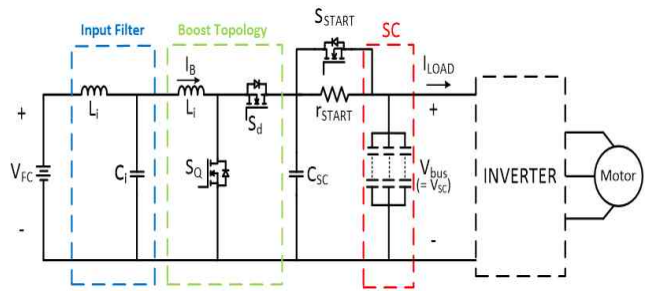


그림 1 병렬 연결형 전력 변환 회로

Fig. 1 Parallel Connected Power Conversion Circuit

2. 제안 수소 연료 전기차의 커패시터 뱅크 부피 저감을 위한 연료전지-슈퍼 커패시터 직렬 연결형 전력 변환 회로

2.1 제안 회로의 구성

그림 2는 직렬 연결형 전력 변환 회로이다. 연료전지와 슈퍼 커패시터가 직렬로 연결된 구성으로, 병렬로 연결되어 있는 기존의 구성과 차이를 가진다. 연료전지 전압과 슈퍼 커패시터 전압의 합으로 V_{bus} 전압이 형성된다. S_d 스위치를 이용하여 부스트 컨버터 동작 및 회생 제동 시 벅 컨버터 동작을 수행하고, S_u 스위치를 이용하여 Peak Load 시 벅 컨버터 동작을 수행한다.

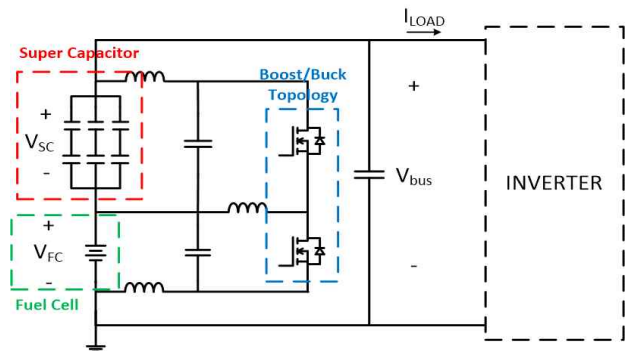


그림 2 직렬 연결형 전력 변환 회로

Fig. 2 Series Connected Power Conversion Circuit

2.2 제안 회로의 동작 원리

그림 3과 그림 4는 각각 직렬 연결형 양방향 DC-DC Converter의 연속적인 동작에 따른 모드별 등가회로와 동작 파형을 나타낸다. 그림 4의 경우, 부하 전류 상태 변화에 따른 슈퍼 커패시터 전압 및 Vbus 전압을 표시한 것이다. 부하 전류 상태에 따라 모드는 총 5가지로 구분할 수 있다.

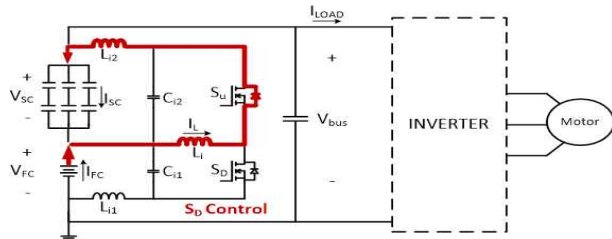
모드 1은 $t_0 \sim t_1$ 구간으로 Pre-Charge Mode 구간이다. 시동을 건 직후, 부하 전력이 없을 때 발생하며, Sd 스위치 제어로 부스트 컨버터 동작을 한다. CCCV제어를 통해 슈퍼 커패시터를 $V_{sc,max}$ 까지 충전시킨다.

모드 2는 $t_1 \sim t_2$ 구간으로 Light-Peak Load Mode 구간이다. 중간 부하 조건 동안 발생하며, Sd 스위치 제어로 부스트 컨버터 동작을 한다. CC제어를 통해 연료전지의 최대 전류를 제한하고, 부족 전류는 슈퍼 커패시터의 방전으로 보충한다.

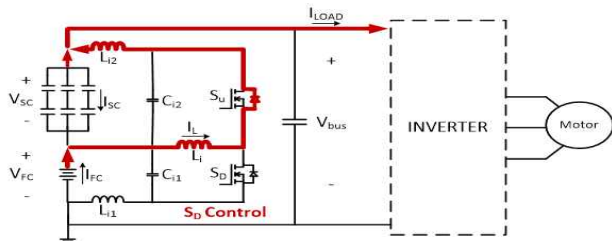
모드 3은 $t_2 \sim t_3$ 구간으로 Heavy-Peak Load Mode 구간이다. 부하 전류가 입력 전류의 max를 초과하는 경우 발생하며, Su 스위치 제어로 벅 컨버터 동작을 한다. Li에 흐르는 전류를 제어하여 연료전지의 최대 전류를 제한하고, 부족 전류는 슈퍼 커패시터를 통해 보충한다.

모드 4는 $t_3 \sim t_4$ 구간으로 Steady-State Mode 구간이다. 경부하 및 정속 주행 시 발생하며, Sd 스위치 제어로 부스트 컨버터 동작을 한다. CC제어를 통해 연료전지의 최대 전류는 제한하고 부하 전류와 슈퍼 커패시터 충전 전류를 동시에 공급한다. 슈퍼 커패시터의 충전이 완료되면 CV제어로 전압을 일정하게 유지시킨다.

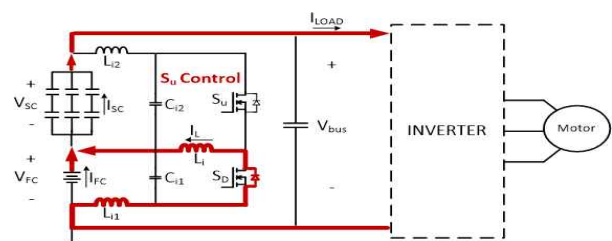
모드 5는 $t_4 \sim t_5$ 구간으로 Regeneration Mode 구간이다. 속도가 0km/h 이하로 감소할 때 발생하며, Sd 스위치 제어로 벅 컨버터 동작을 한다. Li에 흐르는 전류는 제어하여, 연료 전지 쪽으로는 전류가 흐르지 않게 하고 슈퍼 커패시터 쪽으로 흐르게 해서 슈퍼 커패시터의 전압을 충전시킨다.



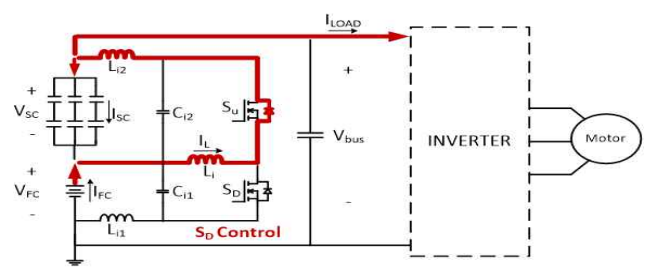
모드 1 ($t_0 \sim t_1$)



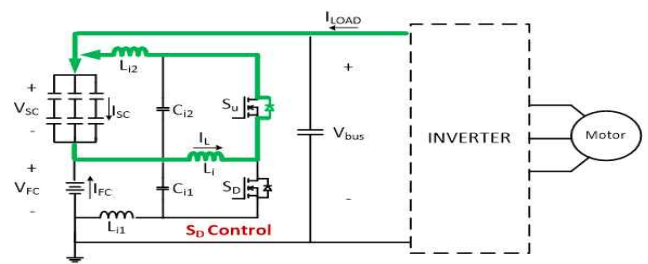
모드 2 ($t_1 \sim t_2$)



모드 3 ($t_2 \sim t_3$)



모드 4 ($t_3 \sim t_4$)



모드 5 ($t_4 \sim t_5$)

그림 3 제안 회로 모드별 등가회로

Fig. 3 Equivalent circuit by proposed circuit mode

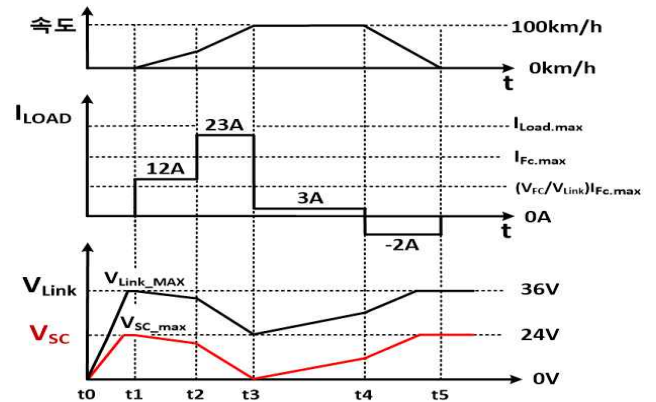


그림 4 모드별 동작 파형

Fig. 4 Mode-specific motion waveforms

2.3 제안 회로 시뮬레이션

본 논문에서 제안된 회로의 타당성을 검증하기 위해 PSIM Tool을 이용하여 모의실험을 진행하였다. Simulation을 위한 입출력 사양과 주요 파라미터의 값은 표 1과 같고, 그림 5는 시뮬레이션 회로도이다. 그림 6은 시뮬레이션 결과 파형이며, 동작 원리에서 설명한 바와 같이 모든 동작에서 연료전지의 최대 전류($I_{fc,max}$)는 제한하고, 모드에 따라 슈퍼 커패시터의 충/방전이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과 값은 표 2와 같다.

표 1 제안 회로의 시뮬레이션 사양

Table 1 Simulation Specifications for Proposed Circuits

Simulation Specification	
Input Voltage	14V
Switching Frequency	50kHz
Vbus Voltage	36V
Super Cap Voltage	0 ~ 22V
Super Capacitor	2F
Output Power	350W

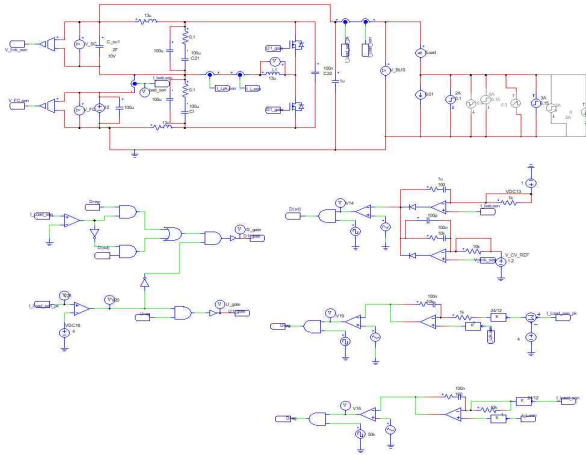


그림 5 PSIM Simulation 회로도
Fig. 5 PSIM Simulation Schematic

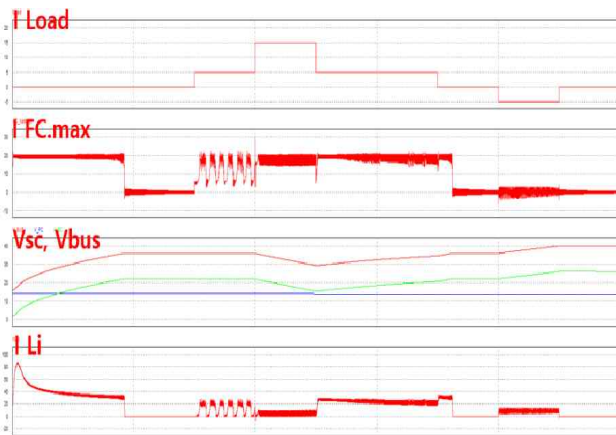


그림 6 PSIM Simulation 결과 파형
Fig. 6 PSIM Simulation Resulting waveform

표 2 제안 회로 시뮬레이션 결과 값

Table 2 Simulation Result Value for Proposed Circuits

Simulation Result	
Fuel Cell Voltage	14V
Vbus Voltage	14 ~ 36V
Super Cap Voltage	0 ~ 22V
I _{FC,max}	20A
Output Power	Max 540W

2.4 제안 회로의 실험 파형

본 논문에서 제안된 직렬 연결형 전력 변환 회로의 동작을 검증하기 위해 프로토타입을 제작하여 실험을 진행하였다. 표 3은 실험 사양, 그림 7은 제안된 회로의 실험 결과 파형이다.

표 3 제안 회로의 실험 사양

Table 3 Experimental Specifications for Proposed Circuits

Test Condition	
Analog IC	TL494
Input Voltage	12V
Switching Frequency	50kHz
Vlink Voltage	24V
Super Cap Voltage	0 ~ 12V
Super Capacitor	10F
Output Power	350W

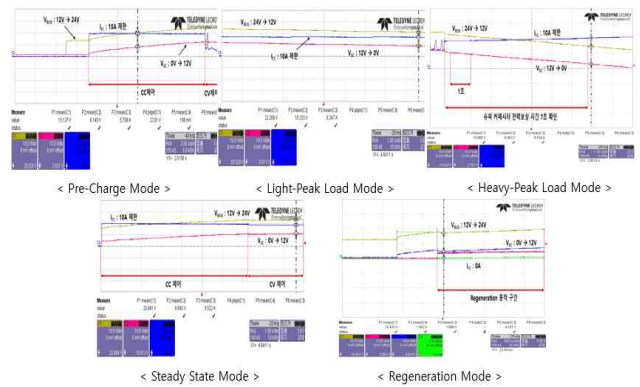


그림 7 제안 회로의 실험 결과 파형
Fig. 7 Experimental result waveform of the proposed circuit

실험을 통해 동작 원리 및 시뮬레이션 결과로 얻은 타당성을 검증할 수 있었다. 연료전지 최대 방전 전류가 설정한 값으로 항상 제한되고, 슈퍼 커패시터의 전압도 정해진 범위 안에서 유지되는 것을 확인할 수 있다.

표 4는 50F/2.7V 슈퍼 커패시터 단위 셀을 사용했을 경우 사용되는 슈퍼 커패시터의 수를 비교한 것으로, 슈퍼 커패시터의 수가 기존 회로 대비 50% 저감되는 결과를 확인할 수 있다.

표 4 사용 되는 슈퍼 커패시터 수 비교

Table 4 Comparison of the number of super capacitors

	기존 회로	제안 회로
필요 용량/내압	5F / 27V	10F / 13.5V
직렬 연결 개수	10 Series	5 Series
직렬 등가 Cap	$50F / 10 = 5F$	$50F / 5 = 10F$
병렬 연결 개수	$5F / 5F = 1$ Parallel	$10F / 10F = 1$ Parallel
Total 개수	10S1P = 10개	5S1P = 5개

3. 결 론

연료전지를 사용하는 수소-전기자동차는 빠른 응답 속도와 고효율 전류 처리를 위해 배터리, 슈퍼 커패시터의 사용이 필수적이다. 이에 본 논문에서는 연료전지-슈퍼 커패시터 직렬 연결형 전력 변환 회로를 제안하였고 시뮬레이션 및 실험 검증을 통해 타당성을 검증하였다. 타당성 검증을 통해 제안 회로는 기존 회로에 비해 더 적은 슈퍼 커패시터의 수를 요구한다는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 슈퍼 커패시터의 배크 부피 저감이 이루어질 것으로 예상된다.

이 논문은 (주)현대 엔지니어링의 연구비 지원과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학CT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2022-2018-0-01396)

참 고 문 헌

- [1] Jian Cao and Ali Emadi, "A new Battery/Ultra-Capacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles", 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 7-10 September 2009
- [2] Rahul Karangia and Mehulsinh Jadeja, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system used in Electric Vehicle", 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, 10-12 April 2013