고주파 스위칭을 적용한 차세대 연료전지 차량용 100kW 양방향 DC-DC 컨버터

배창규, 김주하, 박정욱, 황선민, 문형태
HL 만도

100kW Bi-Directional DC-DC Converter for Next-Generation Fuel Cell Vehicles Applying High-Frequency Switching

Changkyu Bai, Jooha Kim, Jeonguk Park, Sunmin Hwang, Hyungtae Moon
HL Mando

ABSTRACT

본 논문에서는 연료전지 차량을 위한 승/강압용 고 밀도/고 효율 150kHz 100kW급 비절연 양방향 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 6상 인터리브드 구조 및 고속 스위칭 동작을 통해 수동소자의 부피를 저감했다. 또한, SMD 패키지의 Discrete SiC MOSFET을 IMS(Insulated Metal Substrate) PCB에 실장하였고, 이를 통해 고밀도 패턴 설계가 가능하여 스위칭 루프의 기생 인덕턴스를 저감하고 높은 전력밀도를 달성할 수 있었다. 이러한 방식은 기존 Module 방식에 비해 제조 원가를 절감할 수 있다. 제안하는 컨버터는 자동차용 프로토타입으로 제작 및 검증 하였고, 14.1kW/L의 높은 전력밀도 및 최고 효율 99.03%를 달성했다.

1. 서론

연료전지 전기차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)는 수소를 연료로 사용하여 순수 전기차에 비해 충전 속도가 빠르며, 높은 전기 발전효율 대비 오염물질 배출이 없어 친환경 전기차로써 활발히 연구되고 있다. 연료전지는 부하 변동에 따라 불안정한 전압과 느린 반응속도를 가지기 때문에 효율적이고 안정적인 전력 전달을 위해 연료전지용 DC/DC 컨버터(FDC)와 함께 연동되어야 한다. 하지만, FDC는 연료전지 스택 및 보조 전력 시스템 공간과 함께 차량에 탑재 되어야 하기 때문에 높은 전력밀도를 갖도록 설계가 요구된다[1-2].

인터리브드 부스트 컨버터는 입출력 전압 및 전류 리플을 저감 시킬 수 있다. 또한, 6상 구조를 활용할 경우 연료전지의 입력 전압 범위 내에서 출력 전류 리플도 큰 폭으로 저감 시킬 수 있어 작은 커패시터 용량으로 DC-Link 구성이 가능하고 커패시터의 온도 안정성에 도움을 준다. 따라서, DC-Link 커패시터의 부피를 줄일 수 있다.

기존에는 고주파 스위칭 적용을 위해 Switching Loss를 줄이기 위한 Soft-switching Cell을 활용하는 방식이 많이 사용되었다[3]. 하지만 Soft-switching Cell의 경우 강제 Soft-switching을 하기 위해 회로 구조가 복잡해지며, 수동 및 능동 소자가 추가되어 오히려 전력밀도가 감소할 수 있다. 제안하는 토폴로지는 SiC 소자만을 적용하였고 SiC 소자 경우 최대 200V/ns까지 스위칭 속도를 올릴 수 있다[4]. 따라서, Hard-switching 턴오프 시 수백 kHz 주파수 대역까지의 손실이 미미하여 Soft-switching Cell의 단점을 보완할 수 있다. 하지만 Hard-switching 턴온의 경우, Coss 손실 및 Reverse Recovery 손실로 큰 스위칭 온 손실을 야기하므로 70% 부하 구간까지 ZVS 턴온 동작이 가능하도록 낮은 인덕턴스를 갖는 인덕터를 적용하였다.

본 논문에서는 고주파 스위칭을 하기 위해 IMS 기반의 전력부 회로를 제작하였으며, 해당 회로의 스위칭 루프에서 발생되는 dv/dt로 인한 전압 스파이크 저감을 위한 Decoupling 커패시터를 Integrated 시켰다. 또한, 150kHz 스위칭 주파수의 연료전지용 비절연 양방향 100kW DC-DC 컨버터의 차량용 프로토타입 제작 및 시험을 진행하였으며, 입력 350V, 출력 700V 환경에서 최대효율 99.03%, 정격 효율 98.25%를 달성했다.

2. 제안하는 FCEV 전력 SYSTEM

2.1 제안하는 전력 시스템 구성도

제안하는 FCEV 전력 시스템의 구성도는 그림1과 같다. 또한, 제안하는 FDC의 요구사항은 표1에 정리되어 있다.

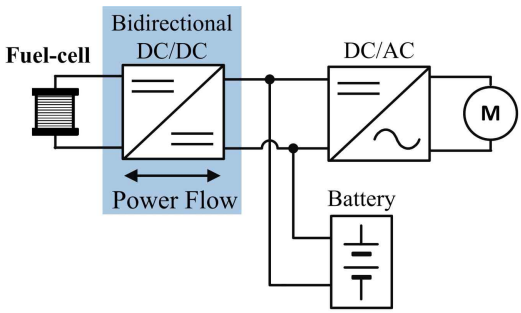

그림 1 제안하는 FCEV 전력 시스템 구성도
Fig. 1 Proposed FCEV system

표 1 제안하는 FDC의 요구사항
Table 1 Requirements of Fuel-cell boost converter

입력 전압	250-410 V
출력 전압	450-828 V
스위칭 주파수	150 kHz
Boost Mode(Powering)	100 kW
Buck Mode	15 kW
부피	7.14 L
전력밀도	14.1 kW/L

2.2 제안하는 FDC의 전력부 회로 설계

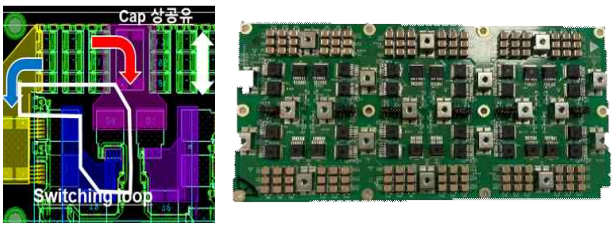

그림 2 IMS 기반의 전력부 회로와 스위칭 루프
Fig. 2 IMS based power circuit with switching loop

제안하는 컨버터는 대부분의 동작 범위에서 ZVS 턴온을 한다. 따라서 주된 손실인 턴오프 손실을 줄이기 위해 스위치 턴오프 Gate 저항을 줄였고, 스위칭 Loop 인덕턴스 L_{stray}를 최소화하도록 Decoupling 커패시터를 배치하여 스위치 턴오프 시의 전압 스파이크를 줄였다.

$$E_{off} = \frac{1}{2} V_o I_{off} t_r \quad (1)$$

$$L_{stray} = \frac{1}{(2\pi f_{res})^2 C_{oss}} \quad (2)$$

실제 스위칭 828V/100A 턴오프 시 전압의 Rising time은 15.9ns 였으며, 추가적으로 측정 주파수 f_{res} = 91Mhz로 부터 L_{stray} 성분을 알 수 있다. C_{oss} = 85pF 2병렬 적용시, 계산결과 L_{stray}는 18nH 였으며 이에 대한 스위칭 오프시 출력 전압 서지의 측정 결과는 931.2V였다.

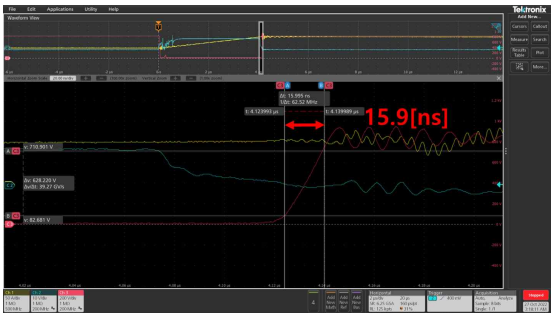

그림 3 Double pulse test를 통한 switch off t_r 측정
Fig. 3 Switch off t_r measurement through Double pulse test

2.3 제안하는 FDC의 수동 소자 설계

2.3.1 커패시터 설계

제안하는 컨버터의 경우 6상 인터리빙 동작을 통해 낮은 전류 정격의 커패시터를 사용해도 된다. 커패시터의 경우 상 공유 및 기생 인덕턴스 최소화를 위한 PCB Layout을 사용했다.

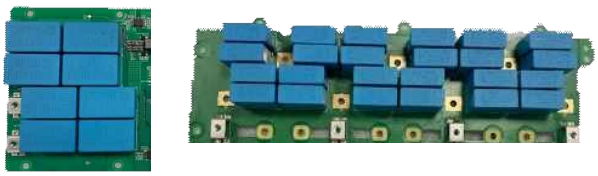

그림 4 제안하는 컨버터의 Capacitor (좌) 입력 (우) 출력
Fig. 4 Capacitor of the proposed converter (left) Input (Right) Output

표 2 커패시터 설계값
Table 2 Capacitor design parameters

입력	최대 전압	450 V
	개당 커패시터 용량	6.8 uF
	커패시터 개수	8 ea
	총 입력 커패시턴스	54.4 uF
출력	최대 전압	828 V
	개당 커패시터 용량	1.5 uF
	커패시터 개수	24 ea
	총 출력 커패시턴스	36 uF

2.3.2 인덕터 설계

인덕터 형상의 경우 Magnetic의 Filling Factor가 높은 PQ 형상의 코어를 채택하였으며, B_{pk}지점을 고려한 설계를 통해 최종적으로 PQ5050형상의 코어를 선정하였다. 큰 DC Bias 특성 및 높은 전력밀도 달성을 위해 Airgap을 적용하였다.

$$\Delta i_L = \frac{V_{in}}{L f_{sw}} D_{boost} \quad (3)$$

위의 식을 통해서 인덕터 전류 리플 값을 계산할 수 있으며 스위칭 온 손실 저감을 위해 최대 출력의 70% Load 기준 전류에서 L 값을 설계하였다.

$$L < \frac{3 V_{in}}{f_{sw} I_{in,70\%}} D_{boost} = 17.5uH \quad (4)$$

그림 5 인덕터 어셈블리
Fig. 5 Designed inductor assembly

표 3 인덕터 설계값
Table 3 Inductor design parameters

인덕턴스 (@100A)	14.6 uH
DC-저항	4.9 mOhm
포화 전류 (@100°C)	120 A
코어 재질	동양광 HE7A
인덕터 턴수	12
Airgap	8mm
Litz wire 구성	3200*0.05mm
Litz wire 단면적	6.28mm^2

2.4 FDC 제작 및 실험

그림6은 제안하는 DC-DC 컨버터의 전개도이다. 제안하는 컨버터는 16.7kW급의 Boost 컨버터가 6상 병렬로 구동된다. 적층 구조 방식을 활용해 냉각판 위의 IMS 기판에 출력커패시터 보드를 결합하였으며, 그 윗부분에는 게이트 드라이버 보드가 결합 된다. 입출력 커넥터에는 버스바가 결합 되어 각각 입력 커패시터, 입력 인덕터와 출력 커패시터로 연결된다. 그림7은 제안하는 FDC의 차량용 Prototype이다. 그림8은 제안하는 FDC의 시험 환경이며, 그림9는 Boost Mode 구동 시의 효율 그래프이다. 그림10은 입력전압 350V 출력전압 700V 환경에서 100kW 구동 시 파형이다.

3. 결론

본 논문에서는 차세대 연료전지 차량용 150kHz 스위칭 주파수의 연료전지용 비절연 양방향 100kW DC-DC 컨버터의 차량용 프로토타입 제작 및 시험을 진행하였으며, 입력전압 350V, 출력전압 700V 환경에서 최대효율 99.03% 정격 효율 98.25% 를 달성했다. 제안하는 프로토타입은 14.1kW/L의 높은 전력밀도를 가진다.

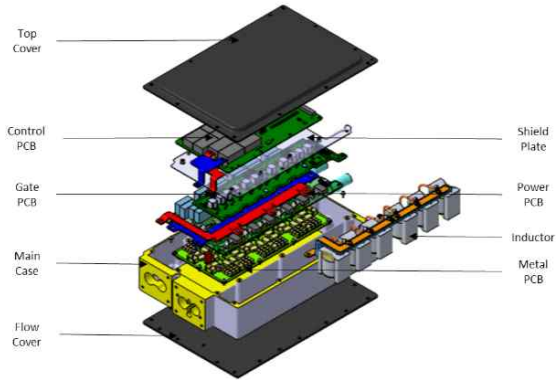

그림 6 제안하는 DC-DC 컨버터 전개도
Fig. 6 Exploded view of proposed DC-DC converter

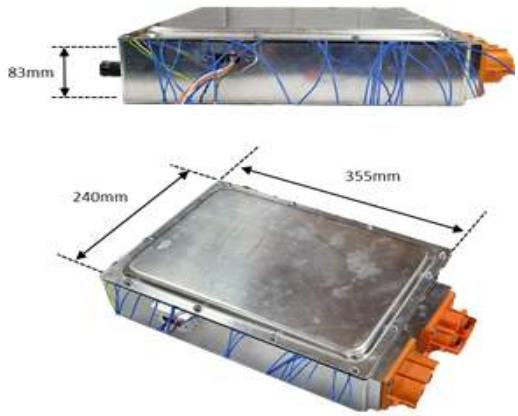

그림 7 제안하는 FDC의 차량용 Prototype
Fig. 7 Proposed automotive prototype of FDC

그림 8 FDC 시험 환경
Fig. 8 FDC test environment

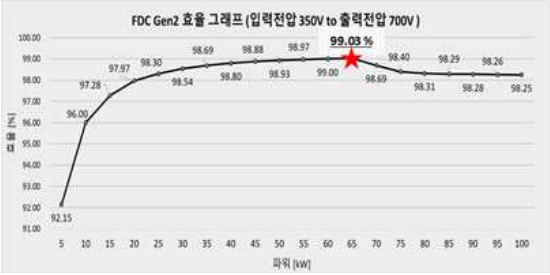

그림 9 Boost Mode 효율 그래프
Fig. 9 Boost Mode efficiency graph

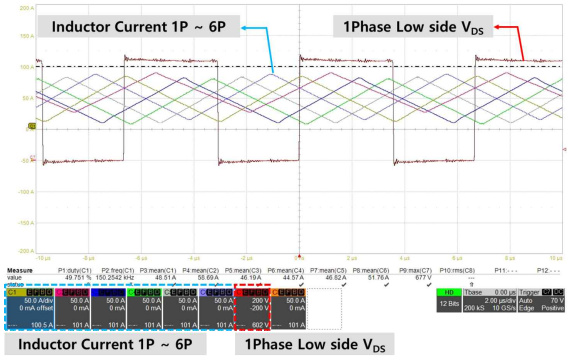

그림 10 Boost Mode 실험 파형
(입력전압 350V,출력전압 700V, 100kW 부하)
Fig. 10 Boost Mode experimental waveform
(Vin 350V, Vout 700V, 100kW load)

참 고 문 헌

[1] O. Kreutzer, B. Eckardt and M. März, "Unidirectional fast switching non-isolated 100 kW fuel cell boost converter", 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10, 2014.

[2] O. Kreutzer, et al. “Full SiC DCDC-Converter with a Power Density of More than 100kW/Dm3.” Materials Science Forum, vol. 821‐823, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 884‐888, 2015.

[3] H. N. Tran, T. Le, H. Jeong, S. Kim and S. Choi, "A 300 kHz 64 kW/L ZVT DC-DC converter for 800-V fuel cell electric vehicles", IEEE Trans. Power Electron., vol. 37, no. 3, pp. 2993-3006, Mar. 2022.

[4] D. Rothmund, D. Bortis and J. W. Kolar, "Highly compact isolated gate driver with ultrafast overcurrent protection for 10-kV SiC Mosfet", CPSS Trans. Power Electron. Appl., vol. 3, no. 4, pp. 278-291, 2018.

[5] J. L. Lu, D. Chen and L. Yushyna, "A high power-density and high efficiency insulated metal substrate based GaN HEMT power module", Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo., pp. 3654-3658, 2017.