

FCEV용 240kW, 51.5kW/L DC-DC 컨버터 개발

조범수¹, 기에우 호우 폭¹, 김덕호¹, 이동한², 최세완[†]
 서울과학기술대학교¹, (주)솔루션엑스²

Development of 240kW, 51.5kW/L fuel cell DC-DC converter

Bumsoo Cho¹, Kieu Huu Phuc¹, Deukho Kim¹, and Donghan Lee², Sewan Choi[†]
 Seoul National University of Science and Technology¹, Solution X Co., Ltd.²

ABSTRACT

본 논문은 수소 연료 전지 차량(FCEV)을 위한 240kW 인터리브드 부스트 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 100kHz 이상의 스위칭을 적용하여 보조회로를 통해 전부하 소프트 스위칭을 달성하였다. 컨버터는 160V에서 800V까지의 넓은 입력 전압 범위에서 동작할 수 있으며, 최대 입력 전류는 400A로 600V에서 240kW로 동작한다. 전력밀도는 하우징 포함 51.5kW/L를 달성하였다. 효율분석 및 측정효율(99.3% 예상)은 최종 발표 시 제시하도록 한다.

1. 서론

최근 에너지 환경 규제와 더불어 친환경 자동차로 주목받고 있는 연료전지 자동차에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 연료전지 자동차의 핵심 구성 요소 중 하나인 Fuel Cell DC-DC Converter(FDC)는 승용차의 경우 약 100kW, 상업용의 경우 수백 kW 급의 높은 파워가 요구된다. FDC에 대한 디자인은 이전부터 연구되어 왔다^{[1]-[3]} Toyota Mirai의 FDC는 114 kW의 고출력을 처리하기 위해 4상 인터리브드 부스트 컨버터를 사용하고 있다. 그러나 실리콘 IGBT 파워 모듈을 사용하고 하드 스위칭 방식으로 동작하기 때문에 스위칭 주파수는 20 kHz 이하이다^[4]. 때문에 낮은 스위칭 주파수로 각 상에 사용된 인덕터의 부피가 증가하게 되고 이는 전력밀도를 감소시키는 요인이 된다. Toyota Mirai의 FDC는 총 부피가 13L, 전력밀도는 8.8kW/L이다. 본 논문은 보다 높은 전력밀도를 갖는 4상 인터리브드 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 보조회로를 추가적으로 달아 소프트 스위칭이 가능하기 때문에 100kHz 이상의 스위칭 주파수에서 동작할 수 있다. 높은 스위칭 주파수로 인해 수동소자의 부피를 대폭 저감할 수 있어 높은 전력밀도를 달성 할 수 있다. 타당성을 검증하기 위해 240kW급으로 설계했으며 전력밀도는 51.5kW/L를 달성하였다.

2. 제안한 DC-DC 컨버터

제안하는 FDC에 적용한 토폴로지는 그림 1에 표현되어 있다. 컨버터 양산 시 가격 저감과 유지관리를 용이하게 하기 위해 모듈형 구조를 택하였다. 해당 컨버터는 2개의 모듈이

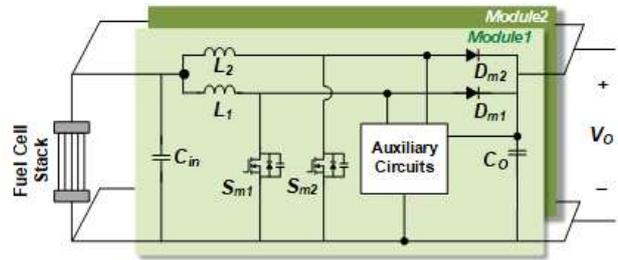


그림1. 제안하는 FDC 구조

240kW를 출력한다. FDC는 차량의 제한적인 공간에 배치되기 때문에 고효율 및 고전력밀도가 요구된다. 고효율, 고전력밀도를 달성하기 위해서는 기존의 하드스위칭 FDC를 소프트 스위칭 시키는 기술이 필요하다^{[1]-[3]}. 제안하는 컨버터는 보조 회로를 부착하여 부스트 컨버터의 메인 스위치와 메인 다이오드가 소프트 스위칭을 한다. 이로 인해 스위칭 주파수를 높게 사용할 수 있어 인덕터의 전류 리플과 손실을 낮춰 고효율 동작이 가능하다. 또한 수동소자의 부피를 저감할 수 있어 고전력밀도 달성이 가능하다. 제안하는 FDC의 사양은 표 1에 나타내었으며 수냉 냉각 방식을 위해 단층 PCB 구조로 제작했다. 이전 연구에서^[1] 차량 내부의 Ambient 온도 65°C 기준으로 ΔT=50°C를 만족하기 위한 스위칭 주파수를 선정 했으며 하드 스위칭의 경우 10kHz, 기존의 소프트 스위칭 방식은 100kHz로

표 1. FDC 사양

Parameters	Value
입력 전압 범위	160V - 800V
출력 전압 범위	400V - 850V
최대 입력 전류	400A
출력	80KW @200V _{FC}
	160KW @400V _{FC}
	240kW @600V _{FC}
입력 전류 리플(Δ <i>i</i>)	0.33%
출력 전압 리플(Δ <i>V</i>)	0.04%
무게	9.5 kg
크기	316 * 318 * 46.4 mm ³

표 2 제안하는 FDC 수동 소자 비교

Comparison(240kW)		Hard Switching (10kHz)	Previous Soft Switching (100kHz)	Proposed Soft Switching (140kHz)
Main Inductor	Inductance	570 μ H	65 μ H	30 μ H
	Volume	1.2L	0.34L	0.2L
	Type	Powder Core	Powder Core	Planar Core
Output Capacitor	Capacitance	69 μ F	15 μ F	11.8 μ F
	Volume	0.25L	0.1L	0.08L
	Type	Film Capacitor	Film Capacitor	Film Capacitor



그림 4. 제안하는 240kW FDC 시작품
그림 3은 제안하는 컨버터의 정상 상태에서의 동작 파형이다. 입력 전류와 게이트-소스, 드레인-소스 전압 파형이 포함되어 메인 스위치가 ZVS Turn-on을 성취하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 제안하는 240kW급 FDC의 시작품이다.

240kW Volume

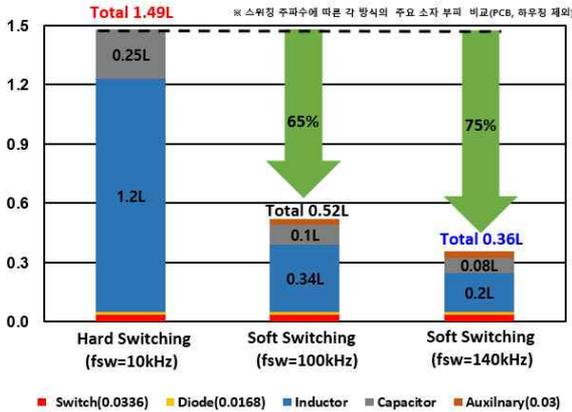


그림 2. 스위칭 주파수에 따른 각 방식의 주요 소자 부피 비교

선정하였다. 실제 실험 결과 스위치는 60°C로 측정되었으며 제안하는 컨버터는 기존 실험을 토대로 $\Delta T=50^{\circ}\text{C}$ 에서 설계를 진행 하였다. 보조회로를 개선하여 더 낮은 턴-오프 전압으로 인해 스위칭 주파수를 140kHz까지 높일 수 있다. 각각의 스위칭 주파수에서 수동소자를 설계 했고 이에 따른 값 들은 표 2에 정리하였다. 그림 2는 240kW에서의 각각의 스위칭 주파수에서 스위칭 방식에 따른 주요 소자들의 부피 비교이다. 제안하는 FDC 적용 시 높은 스위칭 주파수로 인해 수동소자의 부피를 하드 스위칭 대비 80%, 기존 소프트 스위칭 대비 28% 저감할 수 있다.

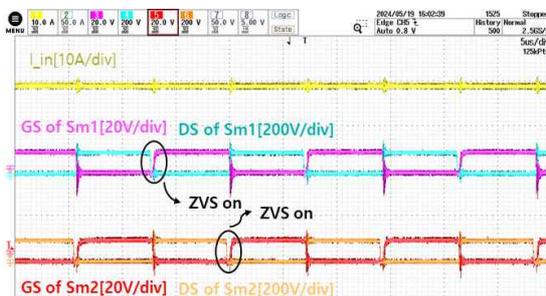


그림 3. 제안하는 FDC의 동작 파형

3. 결론

본 논문에서는 240kW급 FDC 개발에 대해서 다룬다. 제안하는 FDC는 4상 인터리브드 구조에 보조 회로를 적용하여 전부하 소프트 스위칭이 가능하다. 140kHz의 높은 스위칭 주파수로 인해 수동소자의 부피를 하드스위칭 대비 80%, 100kHz 소프트 스위칭 대비 28% 저감할 수 있다. 타당성을 검증하기 위해 240kW급으로 시작품을 제작하였으며 하우징 포함 전력밀도 51.5kW/L 달성하였다. 추후 추가 실험을 통해 정격 효율을 세부적으로 측정할 예정이다

이 논문은 Infineon의 전력반도체 지원을 받아 수행된 연구임. 본 과제(결과물)은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구 결과입니다.

참고 문헌

- [1] Jinyoung Kim, Kieu Huu Phuc, Nguyen Dinh Bao Hung, Sewan Choi, Donghan Lee, & Siddhant Bikram Pandey, "Development of 100kW, 27.2kW/L efficiency FDC for FCEV.", Power Electronics Conference, Korea. 2023.07 584 - 585
- [2] H. N. Tran, T. Le, H. Jeong, S. Kim and S. Choi, "A 300 kHz 64kW/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.
- [3] Sun-Ju Kim, Hyeonju Jeong, Yujong Jeon, Jun-Sung Park, Hye Sung Yoon and S. Choi "Development of DC/DC Converters and Actual Vehicle Simulation Experiment for 150 kW Class Fuel -Cell Electric Vehicle", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 27, No. 1, February 2022
- [4] Y. Hasuka, H. Sekine, K. Katano, and Y. Nonobe, "Development of boost converter for MIRAI," SAE Technical Paper 2015-01-1170, 2015.