

FCEV용 100kW, 100kHz, 99% 소프트스위칭 부스트컨버터 성능 분석

김진영¹, 기에우 흐우 푹¹, 응웬 딩 바오 흥¹, 최세완¹, 이동한², 시단트 판데²
서울과학기술대학교¹, (주)솔루션엑스²

Performance Analysis of 100kW, 100kHz, 99% Soft-Switching Boost Converter for FCEV

Jinyoung Kim¹, Kieu Huu Phuc¹, Nguyen Dinh Bao Hung¹ and Sewan Choi¹,
Donghan Lee², Siddhant Bikram Pandey²
Seoul National University of Science and Technology¹, SoultionX Ltd, Co.²

ABSTRACT

본 논문에서는 FCEV 용 100kW급 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 2상 인터리브드 부스트 컨버터에 소프트 스위칭을 위하여 ZVT(Zero Voltage Transition) 셀을 적용하였다. 해당 컨버터는 ZVT 셀의 특별한 제어 없이 전 부하에서 소프트 스위칭이 가능하다는 장점을 갖는다. 100kW급 시작품을 제작하여 해당 컨버터의 타당성을 검증하였고, 최고 효율 99.09% 및 전력 밀도 27.2kW/L를 달성하였다.

1. 서 론

수소연료전지는 저전압 출력 특성을 가지고 있기 때문에 상용전원으로 변환하기 위해서는 고가의 연료전지 스택의 셀 수를 증가 시켜야한다. 그러나 이러한 방법은 연료전지 차량의 가격을 높여, 연료전지가 전체 차량 가격의 60%를 차지하는 원인이 된다.^[1] 따라서 연료전지 스택의 셀 수를 줄이기 위해 승압형 연료전지용 DC-DC 컨버터(Fuel cell DC-DC Converter, FDC)를 사용하는 방식이 선호되고 있다.^{[2],[3]} FDC를 사용하는 경우 연료전지 스택의 셀 수를 줄일 수 있다는 장점 뿐만 아니라, 연료전지의 느린 반응 속도와 부하 변동에 따라 가변되는 연료전지의 출력 전압을 안정적으로 제어하여 효율적인 전력전달이 가능해진다. 그러나 FDC의 출력 전압을 높게 되면, 높은 승압비와 스위칭 손실로 인해 효율이 저하되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 하드 스위칭 동작을 하는 FDC를 소프트 스위칭 시키는 기술이 필요하다.

ASC(Active Snubber Cell)는 일정한 스위칭 주파수로 동작하며, 컨버터의 전체 동작 구간 중 일부의 부분만 작동하는 소프트 스위칭을 달성하기 위한 방법의 하나이다. 그 중에서도 ZVT-PWM 컨버터는 메인 스위치는 ZVS(Zero Voltage Switching) 턴 온, 메인 다이오드는 ZCS(Zero Current Switching) 턴 오프를 달성시킬 수 있다. 이를 FDC에 적용할 경우 메인 스위치와 다이오드의 소프트 스위칭이 가능해져 스위칭 주파수를 증가시킬 수 있으며, 스위칭 손실을 저감시켜 효율을 증대시킬 수 있게 된다.

본 논문에서는 소프트 스위칭이 가능한 수소연료전지 차량용 100kW급 FDC를 제안한다. 해당 컨버터는 용이한 유지 관리 및 확장성을 위하여 모듈형 구조로 구성하였으며, 2개의 모듈이 100kW를 출력한다. 각 모듈은 2상 인터리브드 부스트 컨

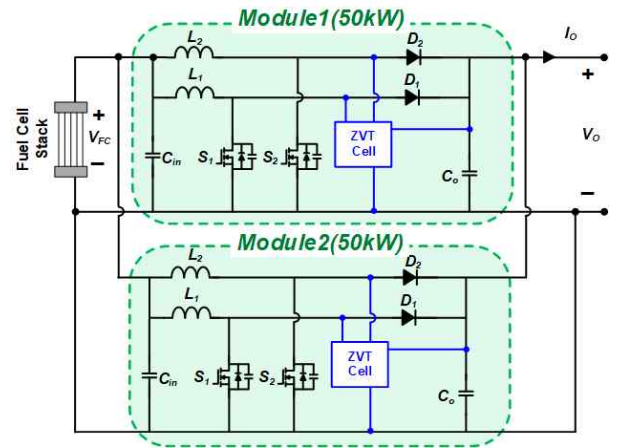


그림 1. 제안하는 FDC 구조
Fig 1. Proposed FDC Structure

버터의 소프트 스위칭을 위하여 ZVT 셀을 적용하였다. 100kW급 시작품을 제작하여 해당 컨버터의 타당성을 검증하였으며, 최대효율 99.09% 및 전력밀도 27.2kW/L를 달성하였다.

2. 제안하는 FCEV용 DC-DC 컨버터

2.1 제안하는 FDC 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 FDC 구조이다. 컨버터 양산 시 가격 저감 및 용이한 유지관리와 확장성을 위하여 모듈형 구조를 채택하였다. 해당 컨버터는 2개의 모듈이 100kW를 출력한다. 각 모듈은 고승압·대전력의 특성이 요구되는 연료전지 응용에서 전류를 분배하여 스위치의 전류부담을 줄이기 위하여 2상 인터리브드 부스트 컨버터를 적용하였다. 또한 해당 부스트 컨버터의 스위칭 손실을 저감시켜 효율을 증대하고 스위칭 주파수를 증가시켜 수동소자의 부피를 감소시키기 위하여 ZVT 셀을 적용하였다.

2.2 제안하는 ZVT 셀

부스트 컨버터에 적용한 제안하는 ZVT 셀과 기존 ZVT 셀들을 비교하여 표 1에 나타내었다. 제안하는 기존의 ZVT 셀들의 적용이 어려웠던 이유 중 하나는 부하에 따라 메인 스위치의 ZVS 조건이 달라져, ZVT 셀의 정확한 온·오프 타이밍 제어가 요구되는 것이다.^{[4],[5]} 이와 달리 제안하는 ZVT셀의 경우 온·오프 제어가 필요 없어 실제 산업에 적용하기 용이하다는 장점이 있다. 또한 [6]과 다른 Blocking 다이오드의 위치로 인

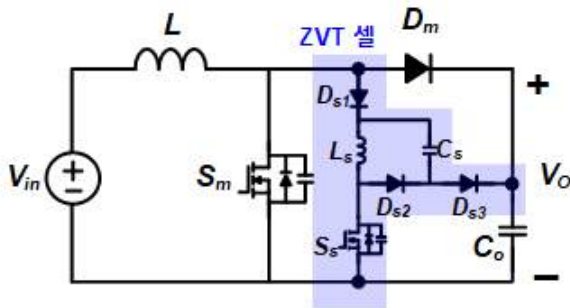


그림 2. 제안하는 ZVT 셀을 적용한 부스트 컨버터
Fig 2. Boost Converter with Proposed ZVT Cell

하여, 해당 다이오드의 전압 정격을 출력 전압의 2배로 만드는 링잉이 존재하지 않기 때문에, FDC와 같이 높은 출력 전압을 요구로 하는 응용에 적합하다. 또한 메인 스위치 대비 15% 낮은 전류 정격의 소자를 ZVT 셀 스위치로 활용할 수 있다. 따라서 제안하는 컨버터의 장점을 정리하면 다음과 같다. 1) 메인 스위치가 ZVS 턴 온 및 ZVS 턴 오프를 성취한다. 2) 메인 다이오드가 ZCS 턴 프 한다. 3) 스너버 스위치가 ZCS 턴 온 및 ZVS 턴 오프를 성취한다. 4) 부하 변동에도 메인 스위치가 ZVS를 달성하기 위한 별도의 제어를 필요로 하지 않는다. 5) 모든 반도체 소자에 인가되는 추가적인 전압 및 전류 스트레스가 없다.

2.3 스위칭 주파수 선정

제안하는 FDC 설계 시 해당 컨버터의 안정적인 동작을 위하여, 차량 내부의 Ambient 온도 65°C 기준으로 MOSFET의 총 전력 손실이 최대 부하 조건에서 $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ 를 만족할 수 있도록 스위칭 주파수를 선정하였다. 그림 3은 MOSFET 및 냉각 시스템의 열 저항 등가 회로이다. $R_{\text{J-C}}$ 는 Junction-Case, $R_{\text{C-P}}$ 는 Case-Pad로 각각 사용하는 MOSFET과 썬들 패드의 데이터 시트에 나와 있는 값을 사용하였다. $R_{\text{P-C}}$ 는 Pad-Coolant로 차량에서는 수냉을 사용하기 때문에, 0.2°C/W

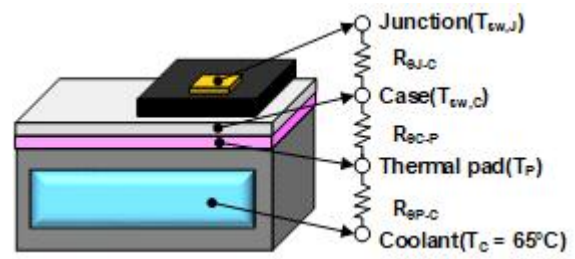


그림 3. 스위칭주파수 선정을 위한 열 저항 등가 회로
Fig 3. Equivalent Thermal Circuit for Switching frequency selection

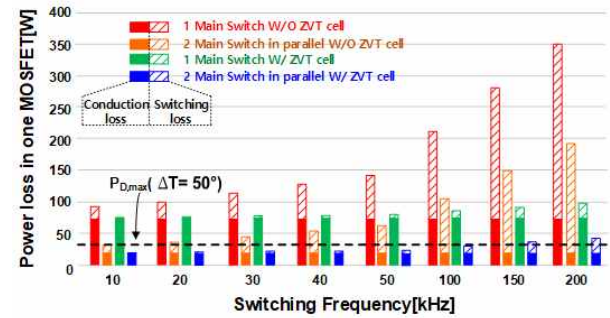


그림 4. MOSFET의 전력손실
Fig 4. Power loss in the MOSFET

의 값을 이용하였다. 그림 4는 MOSFET에서의 전력손실을 나타낸다. 빨간색 막대그래프는 ZVT Cell을 사용하지 않고 메인 스위치를 1개만 사용한 경우이고, 주황색은 메인 스위치를 2개 사용한 경우이다. 초록색 그래프는 ZVT Cell을 사용하고 메인 스위치를 1개만 사용한 경우이고, 파란색은 메인 스위치를 2개 사용한 경우이다. $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ 를 만족 시키기 위하여 메인 스위치는 2개를 병렬로 사용하였으며, 스위칭 주파수는 100kHz를 선정 하였다.

표 1 제안하는 ZVT 셀과 기존의 ZVT셀의 특징 비교

Table 1 Comparison of Conventional ZVT Cell and Proposed ZVT Cell

	[4]	[5]	[6]	Proposed
Topology				
Switching characteristic of Main Switch	ZVS turn-on Hard switching off	ZVS turn-on ZVS turn-off	ZVS turn-on ZVS turn-off	ZVS turn-on near ZVS turn-off
Switching characteristic of Main Diode	ZCS turn-off	ZCS turn-off	ZVS turn-off	ZCS turn-off
Switching characteristic of Snubber Switch	ZCS turn-on ZVS turn-off	ZCS turn-on ZVS turn-off	ZCS turn-on ZVS turn-off	ZCS turn-on ZVS turn-off
Voltage rating of Snubber Switch	V_o	$V_o + V_{C_s}$	V_o	V_o
Voltage rating of blocking diode Ds1	V_o	V_o	$2V_o$	V_o
Online Calculation	Yes	Yes	No	No

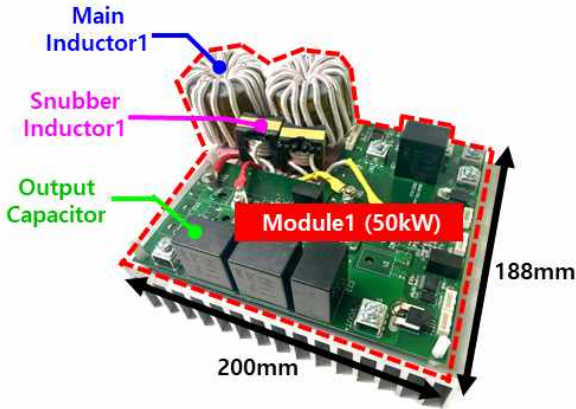


그림 5. 제안하는 FDC의 시작품(Module1, 50kW)
Fig 5. Prototype of Proposed FDC (Module1, 50kW)

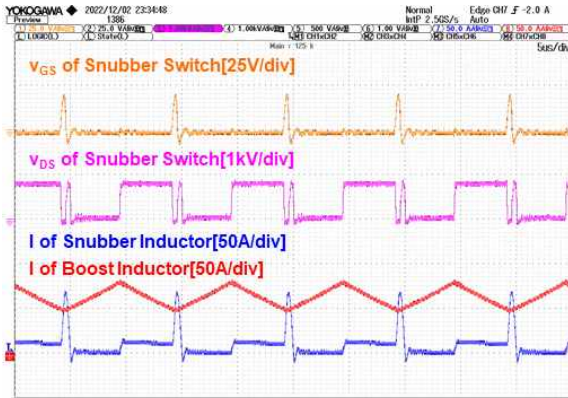


그림6. 제안하는 FDC의 ZVT Cell 동작 파형 (@Po=85kW)
Fig 6. Waveform of Proposed ZVT Cell Operation (Po=85kW)

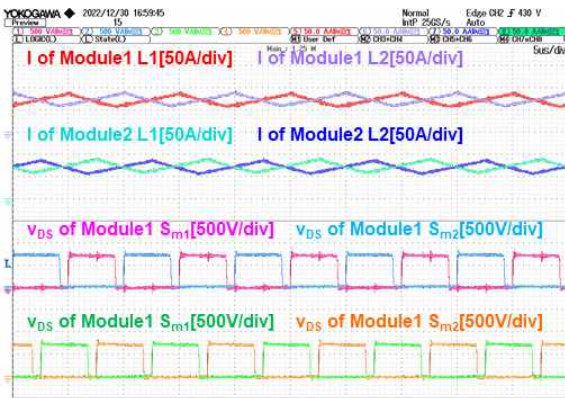


그림 7. 제안하는 FDC의 부스트 컨버터 동작파형(Po=85kW)
Fig 7. Waveform of Proposed Boost Converter (Po=85kW)

실험 결과

제안하는 FDC의 동작 및 타당성을 검증하기 위해 아래 설계사양에 따라 실험을 진행 하였다.

- $P_{O(max)}$ = 100kW • V_{FC} = 300V~400V • V_O = 700V~800V
- f_{sw} = 100kHz

그림 5는 제안하는 FDC의 Moule 1(50kW)의 시작품이다. 그림 6,7은 제안하는 FDC의 85kW 동작 시 정상상태 동작파형

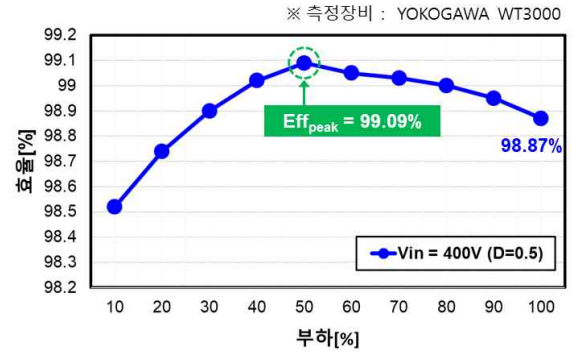


그림 8. 제안하는 FDC의 측정 효율
Fig 8. Measured Efficiency of proposed FDC

이다. 그림 8은 제안하는 FDC의 측정 효율이며, 최고 효율 99.09%를 달성하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 수소연료전지 차량용 100kW급 소프트 스위칭 부스트 컨버터에 대해서 다룬다. 100kW급 시작품을 제작하여 제안하는 FDC의 타당성을 검증하였으며, 최고효율 99.09% 및 전력밀도 27.2kW/L를 달성하였다. 추후 더 높은 전력밀도 달성을 위하여, 부스트 컨버터의 필터 인덕터에 Inverse Coupling 및 Planar core를 적용할 예정이다.

이 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단 LINC 3.0 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] O. Kreutzer, B. Eckardt, and M. März, "Unidirectional fast switching non-isolated 100 kW fuel cell boost converter," in 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, Lappeenranta, pp.1 - 10, 2014.
- [2] Hasuka, Y., Sekine, H., Katano, K., and Nonobe, Y., "Development of Boost Converter for MIRAI," SAE Technical Paper 2015-01-1170
- [3] Kitamoto, R., Sato, S., Nakamura, H., and Amano, A., "Development of Fuel Cell Boost Converter Using Coupled-Inductor for New FCV," SAE Technical Paper 2017-01-1224
- [4] Jang, M. M. Jovanovic, K.-H. Fang, and Y.-M. Chang, "High-powerfactor soft-switched boost converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 1, pp. 98 - 104, Jan. 2006.
- [5] R. T. Li and C. N. Ho, "An active snubber cell for n-phase interleaved DC - DC converters," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 4, no. 2, pp. 344 - 351, Jun. 2016
- [6] H. Bodur and A. F. Bakan, "A new ZVT-PWM DC-DC converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 1, pp. 40 - 47, Jan. 2002.