

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

김진영¹, 기에우 호우 폭¹, 응웬 딩 바오 흥¹, 이동한², 시단트 판데², 최세완[†]

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

Jin-Young Kim¹, Kieu Huu Phuc¹, Nguyen Dinh Bao Hung¹, Dong-Han Lee²,
Siddant Bikram Pandey² and Sewan Choi[†]

Abstract

This study proposes a 100 kW fuel cell direct-current (DC)-DC converter (FDC) for fuel cell electric vehicle. The modular design is adopted for easy maintenance and power expansion in mass production. The two modules produce an output of 100 kW, and each module is composed of a two-phase interleaved boost converter and a zero-voltage transition (ZVT) cell. By using the ZVT cell, the proposed FDC can achieve soft switching. The proposed structure of the FDC alleviates switching loss, significantly increasing switching frequency to reduce the volume of passive components. To determine the market competitiveness of the proposed FDC, its volume, price, efficiency, and loss are compared with those of conventional FDC. Finally, the experimental performance of the 100 kW prototype is verified to confirm the validity of the proposed FDC. The full load efficiency and maximum efficiency of the FDC are 98.87% and 99.09%, respectively. Moreover, a power density of 27.2 kW/L is achieved.

Key words: Boost Converter, FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle), FDC, Interleaved, Soft-Switching

1. 서 론

친환경 자동차로 주목 받고 있는 수소 연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)는 배터리 전기차 대비 짧은 충전시간과 장거리 주행이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 일반적인 FCEV^{[1]-[3]}의 전력 시스템은 그림 1에 나타내었다. FCEV에는 수소와 산소를 화학 반응시켜 전기를 생산하는 장치인 연료전지 스택(Fuel Cell Stack)과 회생에너지 흡수 및 보조 전원으로 사용

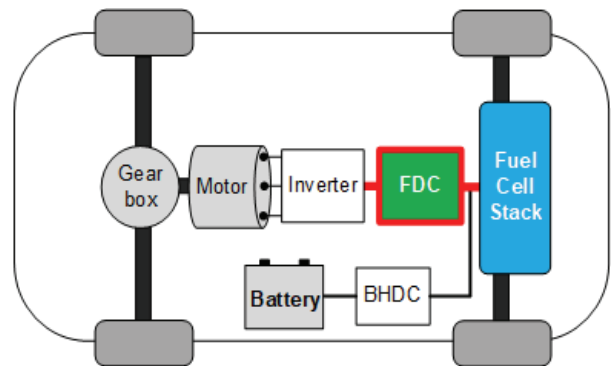


Fig. 1. Fuel cell electric vehicle system.

되는 고전압 배터리(Battery)가 사용된다. 연료전지는 0.5 V - 0.9 V^[4]의 출력전압을 가지고 있다. 이러한 연료전지의 출력전압으로 상용전원을 만들어 주기 위해서는 수많은 연료전지 셀을 사용해야하기 때문에 이는 FCEV의 가격 증가로 나타나게 된다. 따라서 연료전지 스택의 셀 수를 줄이기 위하여 승압형 연료전지용 DC-DC 컨버터(Fuel cell DC-DC Converter, FDC)를 사용하는 방

Paper number: TKPE-2023-28-6-7

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea
Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

¹ Dept. of Electrical & Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

² SoutionX Ltd, Co., Korea

Manuscript received Sep. 6, 2023; revised Sep. 14, 2023; accepted Sep. 14, 2023

- 본 논문은 2023년 전력전자학술대회 우수추천 논문임

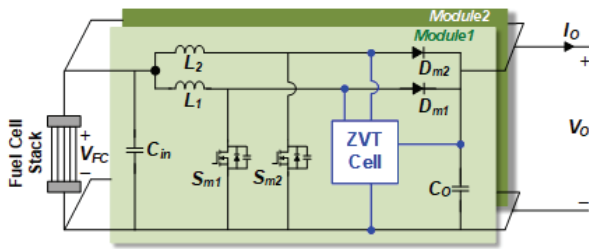


Fig. 2. Proposed power system for FDC.

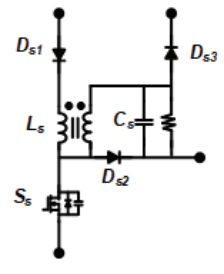
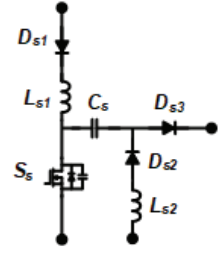
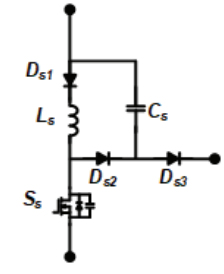
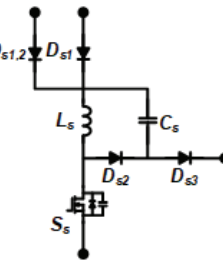
식이 선호되고 있다.^{[3],[5]} FDC를 사용하는 경우 연료전지 스택의 셀 수를 줄일 수 있다는 장점뿐만 아니라, 연료전지의 느린 반응 속도와 부하 변동에 따라 가변되는 연료전지의 출력 전압을 안정적으로 제어하여 효율적인 전력전달이 가능해진다. 이러한 역할을 하는 FDC는 차량 내부의 제한된 공간에 탑재되기 때문에 고효율 및 고전력밀도가 요구된다.

고효율 및 고전력밀도를 달성하기 위해서는 하드스위칭 동작을 하는 기존의 FDC^{[3],[5]}를 소프트스위칭 시키는 기술이 필요하게 된다. 비절연형 부스트 컨버터를 소프트 스위칭 시키는 기술은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 추가적인 소자를 사용하지 않는 것이다. 이 중 하나로 인덕터 전류가 불연속적인 구간이 나타나는 DCM(Discontinuous Conduction Mode)이 있다. 해당 방법은 메인스위치의 턴 온 시 소프트스위칭을 달성할 수 있지만, 턴 오프 시 큰 전류로 인하여 스위칭 손실이 크

기 때문에 효율측면에서 불리하다는 단점이 있다. 두 번째는 추가적인 소자를 사용하는 것이다. 이 중 하나가 ACS(Active Snubber Cell)이다. 해당 방법 적용 시 컨버터가 일정한 스위칭 주파수로 동작할 수 있으며, 컨버터의 전체 동작 구간 중 일부의 부분만 작동시켜 메인 스위치의 소프트스위칭을 성취시킬 수 있다. 그 중에서도 ZVT-PWM 컨버터는 메인 스위치는 ZVS(Zero Voltage Switching) 턴 온, 메인 다이오드는 ZCS(Zero Current Switching) 턴 오프를 달성시킬 수 있다.^[6] 이를 FDC에 적용할 경우 메인 스위치와 다이오드의 소프트스위칭이 가능해져 스위칭 주파수를 증가시킬 수 있으며, 스위칭 손실을 저감시켜 효율을 증대시킬 수 있게 된다.

본 논문에서는 소프트스위칭이 가능한 수소연료전지 차량용 100 kW급 FDC를 제안한다. FDC의 소프트스위칭을 달성하기 위하여 ZVT(Zero Voltage Transition) 셀을 사용하였으며, 컨버터의 용이한 유지 관리 및 전력 확장성을 위하여 모듈형 구조로 구성하였다. 해당 FDC는 2개의 모듈이 100 kW를 출력하며, 각 모듈은 2상 인터리브드 부스트 컨버터와 ZVT 셀로 구성된다. 제안하는 FDC의 시장 경쟁력 및 적용성을 판단하기 위하여 기존의 하드스위칭 FDC와의 부피, 가격, 효율 및 손실을 비교 분석하였다. 또한 제안하는 FDC의 타당성을 검증하기 위하여 100 kW급 시작품을 제작하여 실험을 진행하였으며, 최대효율 99.09% 및 전력밀도 27.2 kW/L를 달성하였다.

TABLE I
SWITCHING CHARACTERISTICS OF PROPOSED ZVT CELL

	[7]	[8]	[9]	Simplified ZVT cell ^[10]
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	$V_o + V_{Cs}$	V_o	V_o
Voltage rating of blocking diode D_{s1}	V_o	V_o	$2V_o$	V_o
Online Calculation	Yes	No	No	No

2. 제안하는 FDC 시스템

그림 2는 본 논문에서 제안하는 FDC 구조이다. 컨버터 양산 시 가격 저감 및 용이한 유지관리와 확장성을 위하여 모듈형 구조를 채택하였다. 해당 컨버터는 2개의 모듈이 100 kW를 출력한다. 각 모듈은 고출력·대전력의 특성이 요구되는 연료전지 응용에서 전류를 분배하여 스위치의 전류부담을 줄이기 위하여 2상 인터리브드 부스트 컨버터를 적용하였으며, 해당 컨버터의 소프트스위칭 성취를 위하여 ZVT셀을 추가적으로 구성하였다.

2.1 ZVT 셀

제안하는 FDC의 소프트 스위칭을 위하여 2상 인터리브드 부스트 컨버터에 ZVT 셀을 적용하였다. 기존에 다양한 방식의 ZVT 셀이 제시되어 왔으나 각각의 한계로 인하여 실제 산업에 적용이 어려웠다. [7]의 경우 부하에 따라 메인 스위치의 ZVS 조건이 달라진다. 이는 부하변동에 따라 ZVT 셀의 온·오프 타이밍을 달리해줘야 하는 것을 의미하며, 이에 따른 제어가 요구됨을 알 수 있다. [8]의 경우 스너버 스위치에 출력전압과 스너버 커패시터 전압이 더해져 보이게 된다. 그리고 [9]는 스너버 다이오드의 위치로 인하여, 해당 다이오드의 전압 정격이 출력 전압의 2배가 되기 때문에 고전압 응용에서는 적합하지 않다. 이와 달리 제안하는 ZVT 셀^[10]의 경우 정격부하에서 메인스위치가 ZVS 될 수 있도록 설계하기 때문에 부하에 상관없이 모든 스위치와 다이오드가 소프트스위칭을 성취한다. 따라서 ZVT 셀의 온·오프 타이밍 제어가 필요 없어 모든 부하에서 고정 듀티로 동작시킬 수 있다. 또한 메인 스위치 대비 15% 낮은 전류 정격의 소자를 ZVT 셀 스위치로 사용할 수 있다. 기존에 제시된 ZVT셀과 적용한 ZVT 셀을 간략화 하여 표 1에 나타내었다. 또한 해당 컨버터의 정상상태 주요 파형을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 파형은 회로의 정상 상태를 분석하기 위하여, 입력 인덕터와 출력 커패시터가 입력 전류와 출력 전압을 일정한 값으로 유지할 만큼 크다고 가정한 것이다. 메인 스위치의 소프트 스위칭을 보장하기 위해서는 메인 스위치가 켜지기 전에 ZVT 셀의 동작이 이루어져야 한다. 메인 스위치의 ZVS 턴 온을 보장해주기 위한 스너버 스위치의 최소 듀티를 $t_{Ss,min}$ 으로 표현하였다.

2.2 스위칭 주파수 선정

제안하는 FDC 설계 시 해당 컨버터의 안정적인 동작을 위하여, 차량 내부의 Ambient 온도 65°C 기준으로 MOSFET의 총 전력손실이 최대 부하 조건에서 $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ 를 만족할 수 있도록 스위칭 주파수를 선정하였다. 그림 4는 MOSFET 및 냉각시스템의 열 저항 증가회로이다.

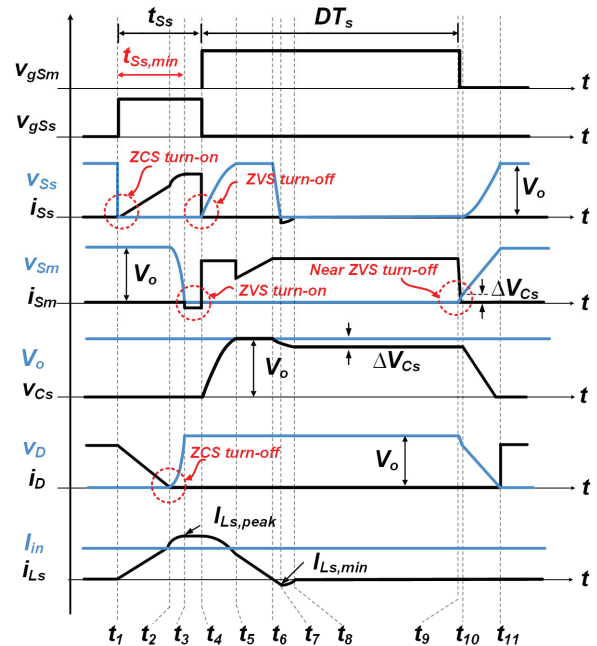


Fig. 3. Basic Operation Waveforms of Proposed FDC with Simplified ZVT Cell^[11].

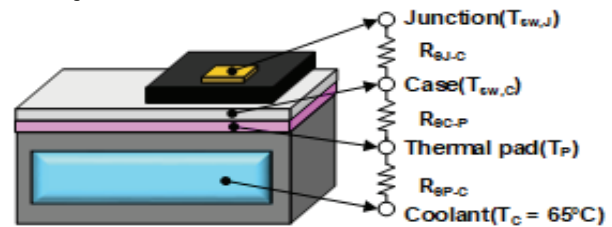


Fig. 4. Equivalent Thermal Circuit for Switching frequency selection.

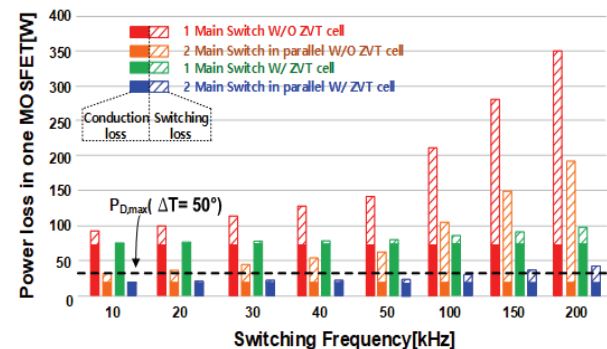


Fig. 5. Power loss in the MOSFET.

$R_{\theta J-C}$ 는 Junction-Case, $R_{\theta C-P}$ 는 Case-Pad로 각각 사용하는 MOSFET과 써멀 패드의 데이터 시트에 나와있는 값을 사용하였다. $R_{\theta P-C}$ 는 Pad-Coolant로 차량에서는 수냉을 사용하기 때문에, 0.2 °C/W의 값을 이용하였다. 그림 5는 MOSFET에서의 전력손실을 나타낸다. 빨간색 막대그래프는 ZVT 셀을 사용하지 않고 메인스

TABLE II
COMPARISON OF THE PROPOSED FDC ON MAIN
INDUCTOR AND CAPACITOR

Comparison		Hard Switching (10kHz)	Soft Switching (100kHz)
Main Inductor	Inductance	570 μ H	65 μ H
	Volume	1.18L	0.34L
	Type	Powder Core	Powder Core
Output Capacitor	Capacitance	69 μ F	15 μ F
	Volume	0.26L	0.1L
	Type	Film Capacitor	Film Capacitor

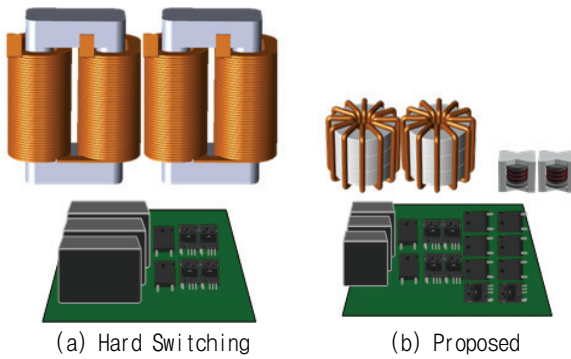


Fig. 6. Components Volume Comparison I.

위치를 1개만 사용한 경우이고, 주황색은 메인스위치를 2개 병렬로 사용한 경우이다. 초록색 그래프는 ZVT 셀을 사용하고 메인스위치를 1개만 사용한 경우이고, 파란색은 메인스위치를 2개 병렬로 사용한 경우이다. $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ 를 만족시키기 위하여 메인스위치는 2개를 병렬로 사용하였으며, 스위칭 주파수는 100 kHz를 선정하였다.

2.3 기존 FDC와 제안하는 FDC 부피 및 가격 비교

제안하는 FDC의 시장 경쟁력 및 적용 가능성을 판단하기 위하여, 기존 하드스위칭 FDC와 부피 및 가격 비교를 진행하였다. 기존 하드스위칭의 경우 $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ 를 만족할 수 있도록 스위칭 주파수는 10 kHz를 선정하였다. 각각의 주파수에서 메인 인덕터와 출력 커패시터를 설계하였고 이에 따른 값들을 표 2에 정리하여 나타내었으며, 총 부피는 그림 6과 그림 7에 도식화 하였다. 제안하는 FDC 적용 시 메인 인덕터의 경우 88% 출력 커패시터는 78% 감소가 가능하다. 부피는 메인 인덕터가 71.2%, 출력 커패시터는 61.5%를 감소시킬 수 있게 된다. 또한 스위칭 주파수를 증가시키는 것이 가능하므로 릿지 와이어를 사용할 수 있어 인덕터 가격 측면

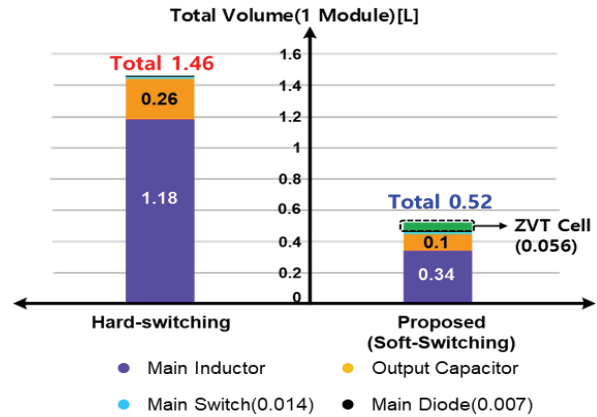


Fig. 7. Components Volume Comparison II.

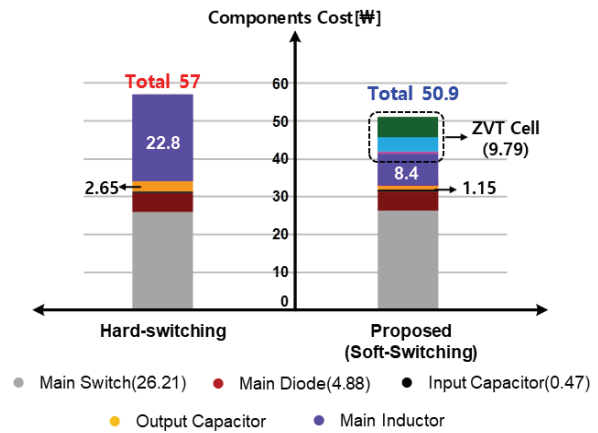


Fig. 8. Components Cost Comparison.

에서도 유리하다. 제안하는 FDC의 소프트스위칭을 위한 ZVT 셀의 경우 전체부피의 10.8%를 차지한다. 그림 8에는 가격을 비교하여 나타내었다. 제안하는 FDC 적용 시 10.7%의 가격 절감이 가능하며, 그 중 ZVT 셀이 차지하는 가격은 제안하는 FDC의 총 가격 중 19.2%를 차지한다. 본 논문에서 제시하는 FDC 적용 시, 스위칭 주파수를 대폭 증가시켜 메인 인덕터와 출력 커패시터의 부피와 용량을 감소시킴으로써 전력밀도 향상 및 가격 저감 효과를 얻을 수 있게 된다.

2.4 기존 FDC와 제안하는 FDC 효율 및 손실 비교

그림 9에 소프트 스위칭이 가능한 제안하는 FDC와 하드스위칭 FDC의 예상 효율을 나타내었다. 해당 효율 비교는 동일한 전력밀도를 가진 FDC에 대해 진행하기 위하여, 두 가지 경우 모두 스위칭주파수는 100 kHz에서 계산하였다. 제안하는 FDC의 경우 정격부하에서 99.4%, 50% 부하에서 최고효율 99.45%로 전 부하에서 효율 99.83% 이상 달성할 수 있을 것으로 기대되며, 하드스위칭 FDC의 경우 정격부하에서 99.05%, 90% 부하에서 최고효율 99.06%로 전 부하에서 효율 97.93% 이상 달성할 수 있을 것으로 예상된다. 해당 효율 비교에 따

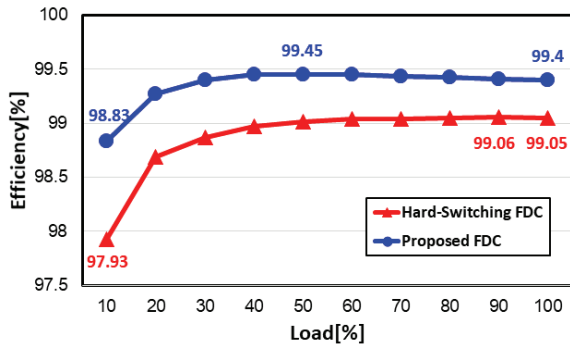


Fig. 9. Efficiency Comparison Between (@ $V_{in} = 400$, $D = 0.5$).

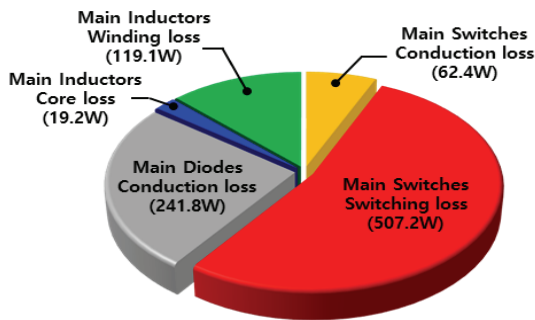


Fig. 10. Loss breakdown of Hard-Switching FDC (@ $P_o = 100$ kW, $V_{in} = 400$ V, $D = 0.5$).

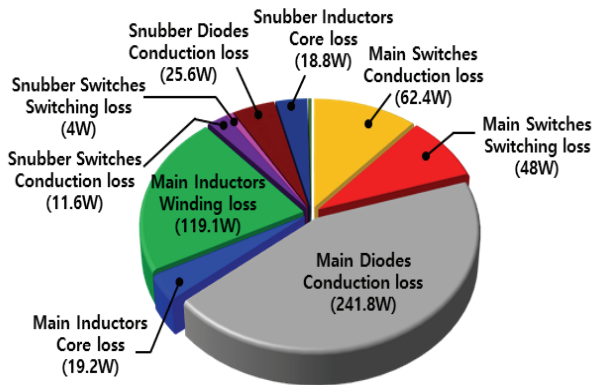


Fig. 11. Loss breakdown of Proposed FDC (@ $P_o = 100$ kW, $V_{in} = 400$ V, $D = 0.5$).

르면 제안하는 FDC 적용 시 정격효율 0.35%, 최고 효율 0.39% 그리고 전 범위 효율 0.9% 증가가 가능해진다. 이 두 컨버터의 효율을 더 자세히 분석하기 위하여 손실 비교도 진행하였다. 하드스위칭 FDC와 제안하는 FDC의 손실 분석은 각각 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 하드스위칭 FDC의 경우 총 손실이 949.7 W로 그 중 메인 스위치의 스위칭 손실이 507.2 W로 53.4%를 차지하게 된다. 이에 비해 제안하는 FDC의 경우 총 손실 603.7 W 중 메인스위치의 스위칭 손실이 48W로 7.9%를 차지한다. 제안하는 FDC를 적용함으로써, 메인

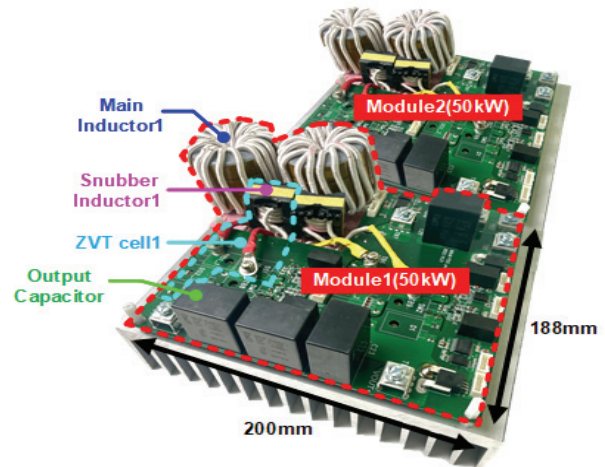


Fig. 12. Proposed FDC Prototype.

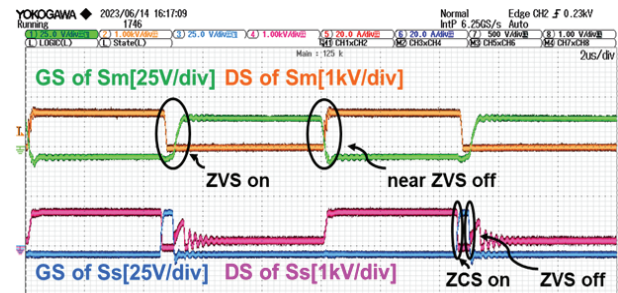


Fig. 13. Switching Waveform of Proposed FDC (@ $P_o = 85$ kW).

스위치의 스위칭 손실을 대폭 저감하여 효율증대가 가능해진다.

3. 제작 및 실험

제안하는 FDC의 동작 및 타당성을 검증하기 위하여 아래 설계사양에 따라 실험을 진행하였다.

- $P_{O(max)} = 100$ kW
- $\Delta I_{in} = 10\%$
- $f_{sw} = 100$ kHz
- $V_{FC} = 300$ V ~ 400 V
- $V_O = 700$ V ~ 800 V

그림 12는 제안하는 FDC를 적용한 100kW급 시작품이다. 각 하나의 모듈이 50 kW를 출력하는 구조이다. 하우징 제외 전력밀도 27.2 kW/L를 달성하였다. 그림 13은 해당 FDC의 스위칭 파형이다. 해당 파형을 통하여 메인 스위치의 경우 ZVS 턴 온, ZVS 턴 오프 그리고 스너버 스위치의 경우 ZCS 턴 온, ZVS 턴 오프를 하는 것을 확인할 수 있다. 그림 14는 부하 별 동작파형을 나타내며, 20 kW 씩 부하를 급변하여도 해당 컨버터가 문제없이 출력전압을 고정전압으로 제어하는 것을 검증하였다. 그림 15는 본 논문의 FDC에 적용한 ZVT 동작 파형이다. 이를 통하여 스너버 스위치에 추가적인 전압 스트레스 없이, 메인스위치의 소프트스위칭을 위하여 컨버터의 전체 동작 구간 중 일부의 부분만 작동시키는 것을 확인할 수 있다. 그림 16은 각 모듈의 인터리브드

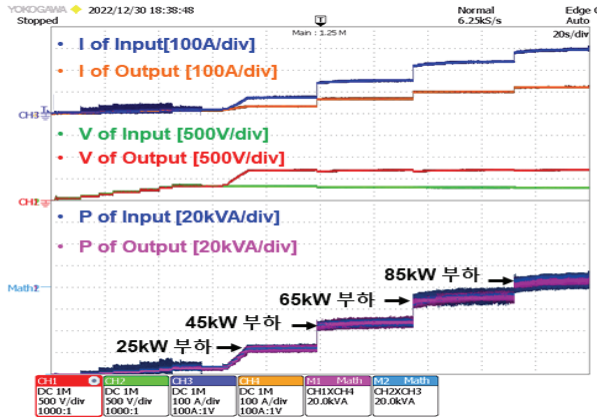
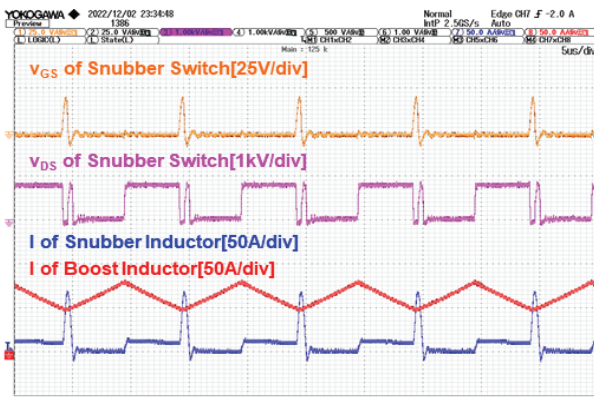
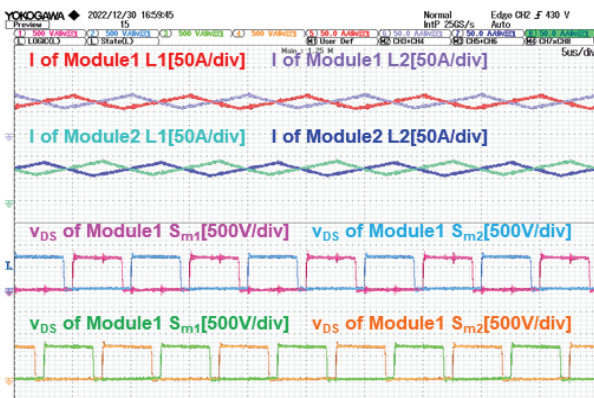


Fig. 14. Waveform depends on the load of Proposed FDC.

Fig. 15. Waveform of FDC's ZVT cell Operation ($P_o=85$ kW).Fig. 16. Waveform of Proposed Boost Converter ($P_o=85$ kW)

부스트 컨버터 정상상태 동작파형이다. 인덕터 전류를 통하여 각상 제어가 불균형 없이 균일하게 제어되며, 메인 스위치 양단전압을 통해 ZVT 셀을 사용하더라도 추가적인 전압 스트레스가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 그림 17은 제안하는 FDC의 측정효율이며 50% 부하에서 최고 효율 99.09%, 정격부하에서 98.87% 그리고 전 범위 효율 98.5% 이상을 달성하였다. 그림 18은 100 kW에서 30분 동작 시 메인 스위치의 온도이다.

Ambient 온도는 28.5 °C이며, 메인 스위치가 91.1 °C

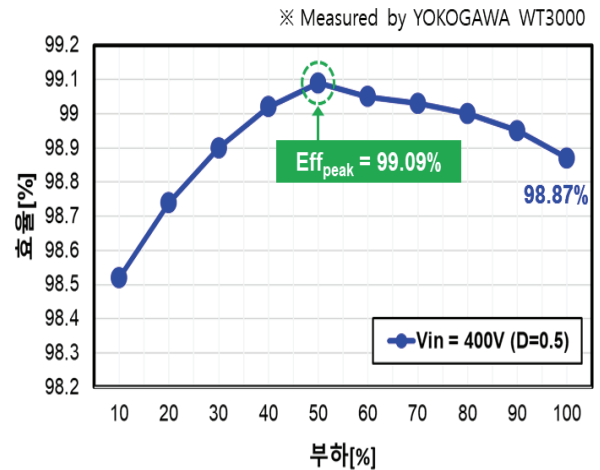


Fig. 17. Measured Efficiency of proposed FDC.

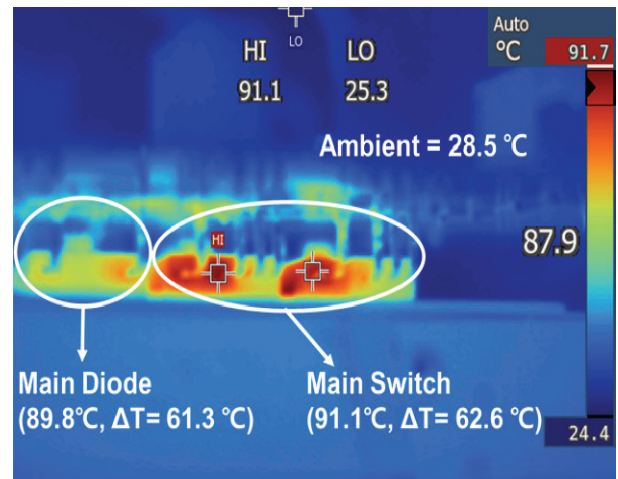


Fig. 18. Temperature of Switch at 100kW for 30 minutes operation.

로 $\Delta T = 62.6$ °C로 측정되었다. 효율 및 온도 측정 당시 공랭 환경에서 실험을 진행하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 FCEV용 100 kW급 소프트스위칭이 가능한 부스트 컨버터를 제안한다. FDC의 소프트스위칭을 위하여 부스트 컨버터에 ZVT 셀을 적용하였으며, 이를 통해 100 kHz 고속 스위칭 주파수로 인덕턴스와 커패시턴스가 기존 10 kHz 대비 각각 88%와 78%로 낮아져 수동소자의 부피를 최대 71.2% 감소시켰다. 또한 동일주파수에서 하드스위칭 FDC 대비 스위칭 손실을 90% 감소시킬 수 있어, 최저효율 0.9% 증가시킬 수 있다. 100 kW급 시작품을 제작하여 제안하는 FDC의 타당성을 검증하였다. 전 범위에서 98.5% 이상의 효율을 달성하였으며, 최고효율 99.09% 그리고 정격 효율은 98.87%를 성취하였다. EMI 및 하우징을 제외한 전력밀도는 27.2 kW/L를 달성하였다.

이 논문은 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20212020800020)

References

- [1] K. Jin, X. Ruan, M. Yang and M. Xu, "Power management for fuel-cell power system cold start," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 10, pp. 2391-2395, Oct. 2009.
- [2] Hasuka, Y., Sekine, H., Katano, K., and Nonobe, Y., "Development of boost converter for MIRAI," *SAE Technical Paper*, 2015-01-1170, 2015.
- [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, 2017.
- [4] J. M. Correa, F. A. Farret, L. N. Canha and M. G. Simoes, "An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 5, pp. 1103-1112, Oct. 2004.
- [5] Hasuka, Y., Sekine, H., Katano, K., and Nonobe, Y., "Development of boost converter for MIRAI," *SAE Technical Paper*, 2015-01-1170, 2015.
- [6] Guichao Hua, Ching-Shan Leu, Yimin Jiang and F. C. Y. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 9, No. 2, pp. 213-219, March. 1994.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Sewan Choi, Hai N. Tran. "Active snubber cell for soft-switched and boost converter including the same." KR Patent 10-2018-0137964, filed November 12, 2018, Issued November 8, 2019
- [11] Hai N. Tran, Adhistira M. Naradhipa, Sun-Ju Kim, Sewan Choi, "Zero-voltage-transition PWM DC-DC converter using a new active-snubber-cell." *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 23, No.4, pp. 273-280, Oct. 2018
- [12] R. T. Li and C. N. Ho, "An active snubber cell for N-phase interleaved DC-DC converters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 344-351, June. 2016.
- [13] B. Akhlaghi and H. Farzanehfard, "Family of ZVT interleaved converters with low number of components," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 11, pp. 8565-8573, Nov. 2018.
- [14] J. Prakash and M. Veerachary, "Zero-voltage zero-current transition network for dual-phase interleaved converter," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 56, No. 4, pp. 3940-3953, July-Aug. 2020.
- [15] 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
- [16] Jinyoung Kim, Kieu Huu Phuc, Nguyen Dinh Bao Hung, Sewan Choi, Donghan Lee, & Siddhant Bikram Pandey, "Performance analysis of 100kW, 100kHz, 99% soft-switching boost converter for FCEV," *Power Electronics Conference, Korea*, 2023



김진영 (金珍榮)

1998년 7월 29일생. 2022년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2022년~현재 동 대학원 전기정보공학과 석사과정.



기에우 호우 폭(Kieu Huu Phuc)

1997년 4월 11일생. 2020년 Hanoi University of Science and Technology 전기공학과 졸업. 2020년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 석·박통합과정.



응웬 딩 바오 흥(Nguyen Dinh Bao Hung)

1999년 12월 5일생. 2022년 Hanoi University of Science and Technology 전기공학과 졸업. 2022년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 석·박통합과정.



이동한 (李東翰)

1993년 8월 12일생. 2018년 한국교통대 전기공학과 졸업. 2020년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업(석사). 2020년~현재 동 대학원 전기정보공학과 박사과정. 2022년 10월~현재 (주)솔루션엑스 개발팀 선임연구원.



시단트 비크람 판데(Siddhant Bikram Pandey)

1994년 3월 21일생. 2023년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업(석사). 2023년 6월~현재 (주)솔루션엑스 개발팀 선임연구원.



최세완 (崔世完)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M University 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 2022년~현재 (주)솔루션엑스 대표. 당 학회 명예회장.