

차세대 연료전지 자동차용 25kW, 300kHz 고승압 소프트 스위칭 컨버터

김선주¹, 하이 프란¹, 김진영¹, 기에우 흐우 폭¹, 최세완[†], 박준성², 윤혜성³

25 kW, 300 kHz High Step-Up Soft-Switching Converter for Next-Generation Fuel Cell Vehicles

Sunju Kim¹, Hai Ngoc Tran¹, Jinyoung Kim¹, Huu-Phuc Kieu¹, Sewan Choi[†],
Jun-Sung Park², and Hye-Sung Yoon³

Abstract

This paper proposes a high step-up converter with zero-voltage transition (ZVT) cell for fuel cell electric vehicle. The proposed converter applies a ZVT cell to a dual floating output boost converter (DFOBC) so that not only the main switch but also the ZVT switch can achieve full-range soft switching. The current rating of the ZVT switch is 17% of the main switch. The proposed converter has high reliability in that no timing issue occurs. Therefore, online calculation is not required. The minimum turn-on time of the ZVT switch that guarantees soft switching at all loads and input/output voltage is obtained by analysis. In addition, the proposed DFOBC allows the use of a 650 V device even at 800 V output and has the advantage of being able to boost the voltage by 3.5 times with 0.56 duty. Planar coupled inductor with PCB winding was successfully implemented with the converter operated at 300 kHz. The 25 kW prototype achieves peak efficiency of 99% and power density of 63 kW/L.

Key words: DFOBC, FCEV, Soft-switching, ZVT (Zero-voltage-transition) cell, Planar coupled inductor

1. 서 론

최근 친환경 자동차로 각광받고 있는 연료전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)는 오염물질의 배출이 없고, 짧은 급유 시간으로 장거리 주행이 가능하다는 장점이 있다.

FCEV의 파워 트레인 구성은 그림 1^{[1]-[3]}}과 같이 구성되며,

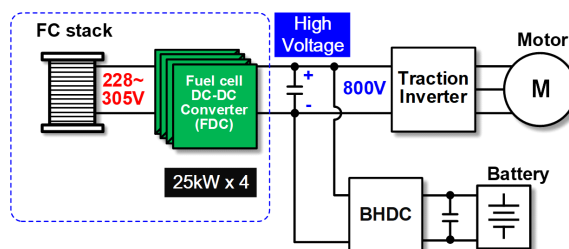


Fig. 1. Block diagram of fuel cell electric vehicle system.

전력을 공급하기 위한 연료전지(Fuel cell, FC) 스택과 전력관리를 통해 회생에너지를 흡수하고 고효율 영역에서 연료전지 스택을 운영하기 위한 고전압 배터리(Battery)가 보조 전원으로 구성된다. 이를 위한 전력변환 장치로서 연료전지용 DC-DC 컨버터(Fuel Cell DC-DC Converter, FDC)와 양방향 DC-DC 컨버터(Bidirectional High-voltage DC-DC Converter, BHDC)가 있다.

최근 배터리 전기차(Battery Electric Vehicle, BEV)의 800V 시스템 개발^{[4],[5]}}과 함께 인버터 및 모터의 공용화를 위하여 FCEV의 DC 링크 전압을 800V까지 높이는

Paper number: TKPE-2021-26-6-4

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 Electric Drive Research Center, Korea Automotive Technology Institute, Korea

³ Power Research Lab., YOUNGHWATECH Co., Korea
Manuscript received Sep. 9, 2021; revised Sep. 17, 2021; accepted Sep. 23, 2021

— 본 논문은 2021년 전력전자학회 우수추진논문임

— 본 논문은 2021년 전력전자학회 우수논문상 수상논문임

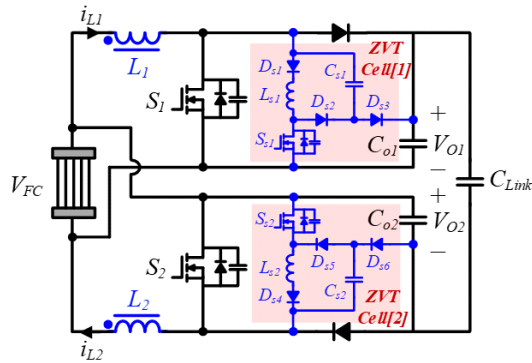


Fig. 2. Proposed high gain converter with ZVT cell.

것을 고려하고 있다. 고전압의 DC 링크는 더욱 가벼운 차량, 높은 효율, 높은 모터 출력의 장점을 가질 수 있으나, DC 링크의 전압을 800V로 높이게 되면 FDC는 높은 승압비와 스위칭 손실로 인해 효율이 저하되는 문제가 있다. 따라서 고승압비를 갖는 부스트 컨버터가 요구된다^{[6],[7]}.

기존에 제시되었던 FDC로서 Toyota社 연료전지 자동차인 Mirai^[2]의 FDC는 114kW급의 4상 인터리브 부스트 컨버터를 사용하며 최대 DC 링크 전압은 약 650V이다. Si IGBT 파워 모듈을 사용하고 하드 스위칭으로 동작하기 때문에 주파수는 20kHz 이하이며, 필터 인덕터는 낮은 주파수로 인해 부피가 큰 코어와 짧은 단선으로 설계되어 전력밀도는 8.8kW/L이다.

Honda社의 FCV^[3]의 FDC는 100kW, 2상 인터리브 부스트 컨버터 두 모듈로 설계되었으며 DC 링크 전압은 500V이다. 각 모듈에서 coupled 인덕터를 사용하여 필터 인덕터의 부피를 줄였고, 스위치와 다이오드에 Full SiC 모듈을 사용하였으나 하드 스위칭으로 인하여 스위칭 주파수는 10kHz이고, 전력밀도는 6.33kW/L이다. 현재의 하드 스위칭 방식으로는 스위칭 주파수에 제한으로 인하여 전력밀도를 높이는 데 한계가 있다. 또한 미 에너지부의 2017년 보고서^{[8],[9]}에 따르면 2025년 차세대 부스트 컨버터는 100kW/L의 매우 높은 전력밀도가 요구된다. 이를 달성하기 위하여는 WBG 소자를 사용하여 하고, 고주파 동작을 위하여 소프트 스위칭 적용이 필수적이다. 또한, 앞서 언급한 800V 출력의 FDC를 위하여는 고승압 컨버터의 적용이 유리하다.

본 논문에서는 높은 전력밀도와 고효율을 달성하기 위한 새로운 FDC를 제안한다. 제안한 FDC는 0.56 듀티로 3.5배의 승압이 가능한 DFOBC^[10] 구조로서 인터리빙 효과를 갖고 스위치의 전압정격이 낮아져 700V급의 SiC 소자 적용이 가능하다. DFOBC의 경우 인터리빙 컨버터와 달리 각 스위치의 그라운드가 달라 스위치 구동부의 절연이 필수적이다. 추가로, 입력과 출력의 그라운드는 다르지만 전압 차는 연료전지의 고정전압과 같아 동작시 Common mode noise는 발생하지 않는다. 또한, 부하나 입출력 전압에 따른 스위칭 타이밍 이슈가 없는

TABLE I
COMPARISON BETWEEN PROPOSED HIGH GAIN DFOBC^[1] AND CONVENTIONAL INTERLEAVING BOOST CONVERTER

Comparison	DFOBC	Interleaving Boost
Topology		
Switches	2EA	2EA
Diodes	2EA	2EA
Voltage ratio	$\frac{1+D}{1-D}$	$\frac{1}{1-D}$
Duty range	0.44-0.56	0.61-0.71

ZVT 셀^{[11],[12]}의 적용으로 소프트 스위칭이 가능하여 300kHz의 고주파 동작이 가능하다. 제안하는 FDC의 타당성 및 성능 검증을 위해 planar coupled 인덕터와 PCB 와인딩을 적용한 25kW급의 시작품을 제작하였으며 63kW/L의 높은 전력밀도와 최대 99%의 효율을 달성하였다.

2. 제안하는 소프트 스위칭 DFOBC

제안하는 연료전지 자동차용 고승압 소프트 스위칭 컨버터는 그림 2와 같다. 제안하는 컨버터는 낮은 듀티로 고승압 달성이 가능하며, 스위치 정격이 낮은 DFOBC와 메인 스위치 및 다이오드뿐만 아니라 ZVT 셀의 모든 스위칭 소자까지 소프트 스위칭이 가능한 2가지 타입의 ZVT 셀로 구성된다.

제안하는 고승압 DFOBC와 기존 인터리빙 부스트 컨버터의 비교를 표 1에 나타내었다. 두 컨버터 모두 같은 스위칭 소자 개수를 가지지만, 링크전압이 800V인 응용에서는 기존의 인터리빙 부스트 컨버터의 경우, 1200V 클래스의 스위치를 사용해야 하는 반면, 제안하는 DFOBC의 경우, 800V 출력에서 스위치에 걸리는 전압 정격은 최대 551V로 700V 또는 900V의 소자정격을 갖는 SiC 스위치 사용이 가능하다. 승압비의 경우, 기존 인터리빙 부스트 컨버터는 228 - 305V의 연료전지의 전압 범위에서 800V의 승압을 위한 듀티는 0.61 - 0.71이나, 제안하는 DFOBC의 필요 듀티는 0.44 - 0.56으로 낮아져 고승압 동작이 용이하다. 또한, 커플링 인덕터 설계 시 0.5 듀티 부근의 동작으로 인터리빙 효과가 극대화되어 인덕터의 부피를 더욱 작게 할 수 있다^[13].

그림 2의 제안하는 ZVT 셀은 스위치, 인덕터, 커패시

TABLE II
EFFECT OF THE PROPOSED 300KHZ CONVERTER
WITH ZVT CELL ON PASSIVE COMPONENT
VOLUMES (1P.U.: VOLUME OF 25kHz)

Comparison		Hard Switching (25 kHz)	Soft Switching (300 kHz)
Inductor	Inductance (L)	104 μ H	8.6 μ H
	Volume	1 P.U.	0.12 P.U.
	Type	 (Bulky core, Solid wire)	 (Ferrite core, PCB winding)
Capacitor	Capacitance (C)	16 μ F	1.3 μ F
	Volume	1 P.U.	0.07 P.U.
	Type	 (Tall film capacitor)	 (Low profile capacitor)

터 1개와 다이오드 3개로 구성되며, DFOBC의 상측에 연결되는 부스트 타입의 ZVT 셀과 하측에 연결되는 벡 타입의 ZVT 셀로 구성된다. 제안하는 ZVT 셀의 특징은 DFOBC의 메인 스위치(S_1, S_2)와 다이오드(D_1, D_2)뿐만 아니라 ZVT 셀의 스위치(S_{s1}, S_{s2})와 다이오드(D_{s1-6}) 모두 소프트 스위칭을 하기 때문에 스위칭 손실이 거의 없다. 또한, 그림 3은 각 스위치 소자 전류 정격을 나타내었으며, ZVT 셀의 스위치와 다이오드는 메인 스위치 전류정격의 각각 19%와 10%로 낮은 정격의 소자이다.

표 2에 FDC를 25kHz의 하드 스위칭과 300kHz의 소프트 스위칭을 적용하여 설계하는 경우 고주파 동작의 효과를 나타내었다. 고주파 스위칭으로 필요한 인덕턴스가 1/12로 됨에 따라 페라이트 코어와 PCB 와인딩을 적용할 수 있으므로 부피는 80% 이상 감소한다. 또한, 커패시턴스 역시 1/12로 감소하고 MLCC의 적용으로 90% 이상의 부피감소가 되는 것을 확인할 수 있다.

3. ZVT 스위치 턴-온 타이밍 설계

메인 스위치의 소프트 스위칭을 성취하기 위해 메인 스위치 턴-온 전에 ZVT 셀의 동작이 먼저 이루어져야 하며, 메인 스위치의 ZVS 턴-온 조건을 만족시키기 위해선 최소한의 턴-온 시간이 보장되어야 한다. 그림 4는 제안하는 고주파 소프트 스위칭 컨버터의 벡 타입 ZVT 셀 파형을 나타내며, 메인 스위치의 ZVS 턴-온을 보장하기 위한 최소 듀티는 t_r 과 t_{re} 의 합인 $t_{ss,min}$ 과 같으며, 그 시간은 그림 5에 나타난 두 동작 모드의 등가회로를 통해 구할 수 있다.

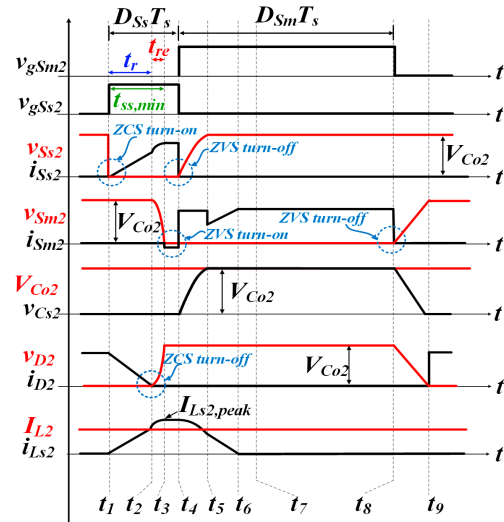


Fig. 4. Key waveforms of the proposed DFOBC with ZVT cell.

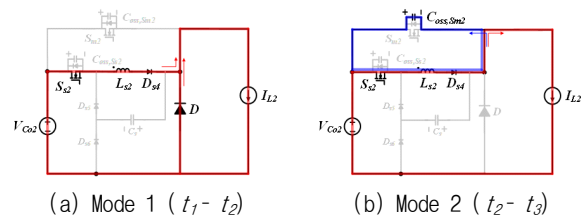


Fig. 5. Equivalent circuits of mode 1 & 2.

Mode 1 ($t_1 - t_2 = t_r$): t_1 에서 스너버 스위치 S_s 가 턴-온되고 스너버 다이오드 D_{s2} 가 도통된다. 스너버 스위치를 통과하는 전류의 기울기는 식 (1)에 의해 결정되며 0A에서부터 서서히 증가한다.

$$\frac{di_{Ls2}}{dt} = \frac{V_{Co2}}{L_{s2}} \quad (1)$$

$$\frac{I_{Ls2}}{t_2 - t_1} = \frac{V_{Co2}}{L_{s2}} \quad (2)$$

$$\frac{I_{Ls2}}{t_2 - t_1} = \frac{V_{Co2}}{L_{s2}} \quad (3)$$

$$t_r = t_2 - t_1 = L_{s2} \frac{I_{L2}}{V_{Co2}} \quad (4)$$

이에 따라 스너버 스위치(S_s)는 그림 4에서와 같이 ZCS 턴-온한다. i_{Ls} 가 I_L 에 도달하면 메인 다이오드가 ZCS 턴-오프되면서 다음 모드로 넘어간다.

Mode 2 ($t_2 - t_3 = t_{re}$): 메인 다이오드가 턴-오프되면 스너버 인덕터 L_s 와 메인 스위치의 기생 커패시터 $C_{oss,Sm2}$ 가 공진 회로를 생성한다. 이 구간에서는 기생 커패시터에 저장된 모든 에너지가 스너버 인덕터로 전달되며, 스너버 인덕터의 전류가 $i_{Ls,peak}$ 까지 충전되는 동안 메인

스위치의 전압은 0V로 방전된다. 이 모드의 L_s 의 전류 및 $C_{oss,Sn2}$ 의 전압의 식은 아래와 같으며,

$$i_{Ls2}(t) = I_{L2} + V_{Co2} \sqrt{\frac{C_{oss,Sn2}}{L_{s2}}} \sin(w_1(t-t_2)) \quad (5)$$

$$v_{Coss,Sn2}(t) = V_{Co2} \cos(w_1(t-t_2)) \quad (6)$$

또한 공진주파수 w_1 은 L_s 와 C_{ds_m} 로 결정된다.

$$w_1 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_{ds_m}}} \quad (7)$$

t_3 에서 L_s 의 전류는 최대가 되며 그때의 값은 식 (8)과 같다.

$$i_{Ls2,peak} = I_{L2} + V_{Co2} \sqrt{\frac{C_{oss,Sn2}}{L_{s2}}} \quad (8)$$

즉, L_s 의 전류가 최대가 되기 위한 시간은 공진 주기의 1/4과 같으며, 식 (9)와 같다.

$$t_{re} = t_3 - t_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_{s2} C_{oss,Sn2}} \quad (9)$$

마지막으로 소프트 스위칭을 위한 ZVT 셀의 최소 시간은 t_r 과 t_{re} 의 합과 같으며, 식 (4)와 (9)를 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

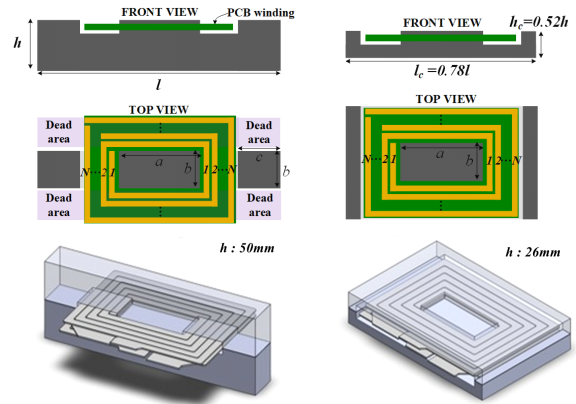
$$t_r + t_{re} = L_{s2} \frac{I_{Ls2}}{V_{Co2}} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_{s2} C_{oss,Sn2}} \quad (10)$$

결과적으로 소프트 스위칭을 보장하기 위한 ZVT의 최소 턴-온 듀티는 식 (11)과 같다.

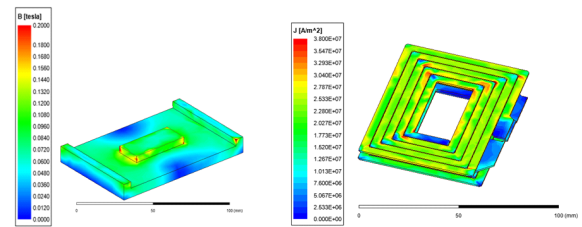
$$D_{ss} \geq \left(L_{s2} \frac{I_{Ls2}}{V_{Co2}} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_{s2} C_{oss,Sn2}} \right) f_s \quad (11)$$

4. Planar Coupled 인덕터 설계

그림 6은 300kHz 주파수에서 최대 입력 전류 109A의 10% 리플 조건을 만족시키기 위한 두 가지 타입의 커플 인덕터 설계안이며 기존의 EE 코어와 제안하는 커스터마이징 코어를 나타낸다. 기존의 EE 타입의 인덕터의 경우 많은 권선 수를 위해 높이가 높으며, PCB 와인딩을 적용할 경우 Dead area의 빈 공간이 생기게 되어 FDC 전체 부피를 높이는 단점이 있다. 제안하는 커스터마이징 코어는 기존 EE 코어와 단면적은 동일하나 Dead area 부분까지 코어를 확장한 플라나 형태로 구성하여 기존대비 절반 정도의 높이를 달성하였으며 PCB 와인딩을 코어 내부로 적용하여 부피를 최소화하였다. 그림 7은 제안하는 플라나 인덕터의 3D FEA 시뮬레이



(a) Conventional EE core (b) Proposed customized core
Fig. 6. Comparison between the off-the-shelf EE core and proposed customized core.



(a) Flux distribution (b) Current distribution
Fig. 7. FEA simulation results of planar inductor.

션 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 설계한 플라나 코어의 자속밀도를 나타내며, 그림 7(b)는 PCB 권선의 전류밀도를 나타낸다. 코어의 평균 자속밀도는 150mT, PCB 와인딩의 전류밀도 20A/mm²이며 실제 제작 사진은 그림 8과 같다.

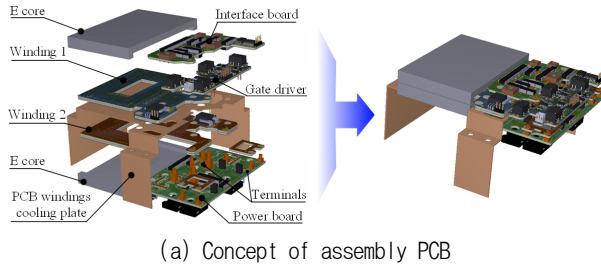
5. 제작 및 실험 결과

제안하는 FDC의 전체 시스템 시작품의 실험 구성은 다음과 같다.

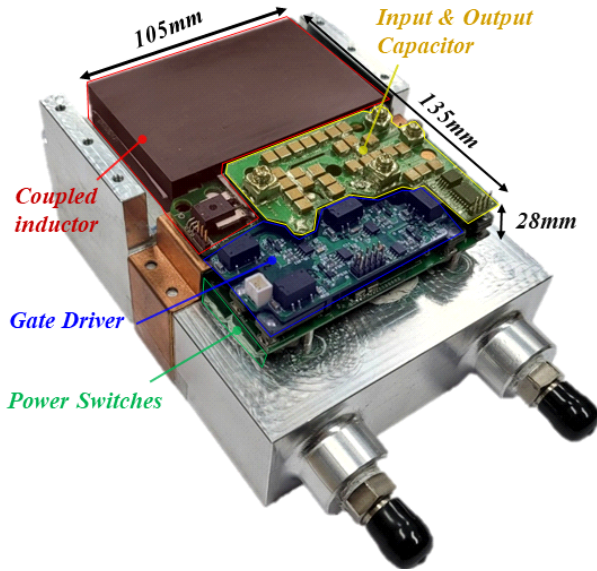
- P_o : 25kW
- f_{sw} : 300kHz
- V_{ir} : 228V - 305V
- Volume: 0.4L
- V_{Link} : 800V
- Power density: 63kW/L

그림 8은 본 논문에서 제안하는 ZVT 셀을 적용한 고출압 FDC 제작 사진이다. 그림 8(a)는 시작품의 3D사진이며 스위치로 구성된 PCB 위에 플라나 인덕터와 게이트 드라이버 및 인터페이스를 구성하여 부피를 최소화하였으며 PCB 와인딩 사이에 쿨링 플레이트를 추가하여 도통 전류에 의한 와인딩 발열을 개선하였다.

다층의 PCB로 구성된 25kW급의 전체 시작품 사진은 그림 8(b)와 같으며 히트싱크부를 제외한 부피는 약 0.4L를 달성하였다.



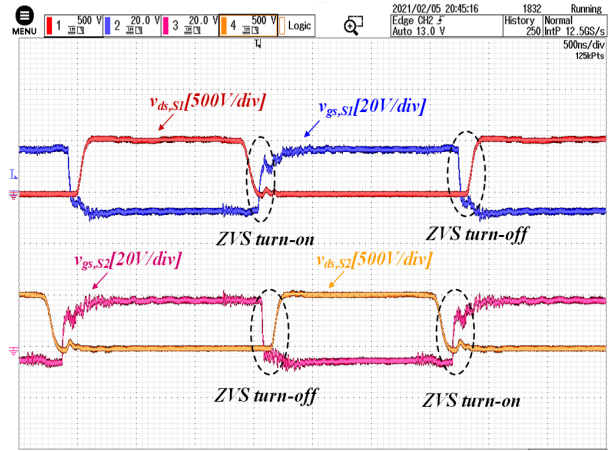
(a) Concept of assembly PCB



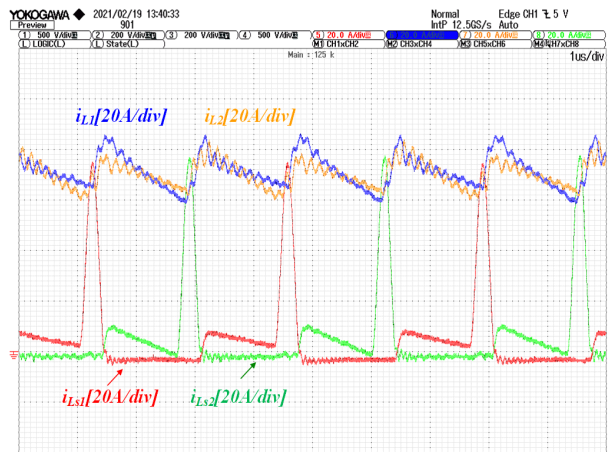
(b) Prototype with heatsink

Fig. 8. Proposed 25 kW, 300 kHz, 63 kW/L ZVT DFOBC prototype.

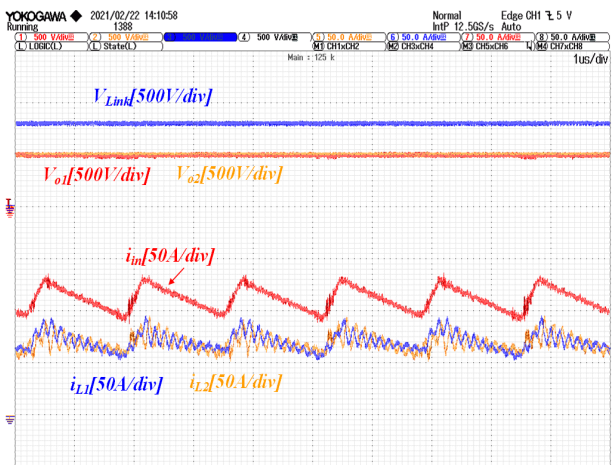
그림 9는 시작품의 주요 실험 파형을 나타낸다. 그림 9(a)는 제안하는 FDC의 두 메인 스위치(S_{m1} , S_{m2})의 드레인 소스 전압과 게이트 파형을 나타내었으며 각 스위치 턴-온, 오프 구간에서 스위치 전압이 먼저 방전하여 ZVS 턴-온, 오프하는 것을 확인할 수 있다. 9(b)는 입력 coupled 인덕터의 전류 파형(i_{L1} , i_{L2})과 ZVT 셀 측 보조 인덕터의 전류 파형(i_{Ls1} , i_{Ls2})을 나타낸다. ZVT 스위치의 턴-온에 의해 보조 인덕터의 전류가 상승하게 되고, 입력 인덕터보다 높아졌을 때 메인 스위치의 전압이 방전되어 ZVS 턴-온을 성취할 수 있다. 그림 9(c)는 제안하는 FDC의 출력 링크 전압(V_{Link})과 각각의 출력 커패시터 전압(V_{O1} , V_{O2}) 그리고 입력 전류 파형이다. 800V의 링크전압에서 각 출력 커패시터의 전압은 514V이고 입력전류의 경우 PCB 와인딩의 기생 커패시터에 의해 발생하는 인덕터 전류 링잉이 180도 위상차로 인해 상쇄되는 것을 확인할 수 있다. 그림 10은 시작품의 측정 효율을 나타내며, 효율은 Yokogawa사의 WT3000을 이용하여 측정하였다. 최고 효율은 $V_{in}=305V$, $P_o=10kW$ 상황에서 99%를 달성하였으며 최소 효율은 $V_{in}=228V$, $P_o=25kW$ 에서 97.7%를 달성하여 전 부하 및 전압 범위에서 고효율을 달성하였다.



(a) Soft switching of the main switches



(b) Input inductor currents and snubber inductor currents



(c) Input currents and output capacitor voltages

Fig. 9. Experimental results at 25 kW, 300 kHz, 228 - 800 V.

그림 11은 25kW의 손실 분석을 나타내며 메인 스위치의 도통 손실이 가장 큰 부분을 차지하는 반면, ZVT 셀에 의한 소프트 스위칭 동작으로 300kHz 동작에서도 스위칭 손실은 전체의 10%인 것을 확인할 수 있다. 또한 ZVT 셀의 손실 또한 전체 FDC 손실에서 8.7%를 차지하며 낮은 것을 확인할 수 있다.

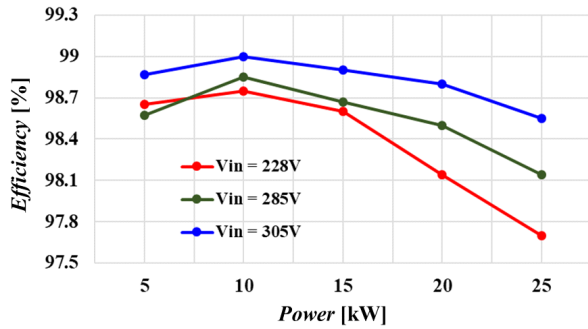
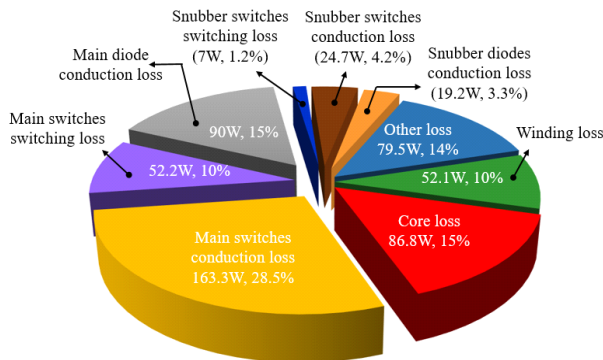


Fig. 10. Measured efficiency.

Fig. 11. Loss breakdown at $P_o = 25$ kW, $V_{in} = 228$ V.

6. 결 론

본 논문에서는 300kHz의 스위칭 주파수를 적용한 63kW/L의 고전력 밀도를 갖는 연료전지 자동차용 고승압 소프트 스위칭 FDC를 제안한다. 800V의 링크전압을 위해서 DFOBC 방식의 고승압 컨버터가 적용되었으며 300kHz 고속 스위칭 주파수로 인덕터스와 커패시터스가 기존 25kHz 대비 1/12로 낮아져 수동소자 부피를 80% 이상 저감하였다. 또한, 제안하는 컨버터는 스위칭 손실을 제거하기 위해 ZVT 셀을 적용하여 300kHz의 고속 스위칭 동작에도 높은 효율을 달성하였다. 25kW급의 최종 스택을 제작하여 본 논문의 타당성을 검증하였다. FDC 동작 전 범위에서 최고 효율 99%와 최저 효율 97.7%를 달성하였으며, EMI 및 하우징을 제외한 전력부의 전력밀도는 63kW/L를 만족하였다. 제안하는 컨버터는 차세대 FDC 목표를 위해 본 스택의 30kW 동작 및 부피 저감을 통해 전력밀도를 더욱 높이는 연구를 진행할 것이며, 고전력밀도와 고효율이 요구되는 차세대 FDC를 위한 적합한 솔루션이 될 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “수소연료전지차 부품실용화 및 산업기반육성사업”으로 수행된 연구 결과입니다. (과제번호: P0000270)

References

- [1] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, and M. Xu, “Power management for fuel-cell power system cold start,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 10, pp. 2391 - 2395, Oct. 2009.
- [2] Y. Hasuka, H. Sekine, K. Katano, and Y. Nonobe, “Development of boost converter for MIRAI,” *SAE Technical Paper*, 2015-01-1170, 2015.
- [3] R. Kitamoto, S. Sato, H. Nakamura, and A. Amano, “Development of fuel cell boost converter using coupled-inductor for new FCV,” *SAE Technical Paper*, 2017-01-1224, 2017.
- [4] C. Jung, “Power up with 800-V systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles,” *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 5, No. 1, pp. 53 - 58, Mar. 2017.
- [5] H. Kim, J. Park, S. Kim, R. M. Hakim, H. P. Kieu, and S. Choi, “Single-stage EV on-board charger with single- and three-phase grid compatibility,” in *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 583 - 589, 2021.
- [6] A. Komatsuzaki and S. Hashino, “Development of high-power-density DC-DC converter using coupled inductors for clarity plug-in hybrid,” *SAE Technical Paper*, 2018-01-0458, 2018.
- [7] S. Kimura, Y. Itoh, W. Martinez, M. Yamamoto, and J. Imaoka, “Downsizing effects of integrated magnetic components in high power IEEE transaction on power electronics regular paper density DC - DC converters for EV and HEV applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 52, No. 4, pp. 3294 - 3305, Jul./Aug. 2016.
- [8] A. Khaligh and M. D’Antonio, “Global trends in high-power on-board chargers for electric vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 4, pp. 3306 - 3324, Apr. 2019.
- [9] U.S. DRIVE Department of Energy, “Electrical and electronics technical team roadmap,” Oct. 2017.
- [10] S. Choi, V. G. Agelidis, J. Yang, D. Coutellier, and P. Marabeas, “Analysis, design and experimental results of a floating-output interleaved-input boost-derived DC-DC high-gain transformer-less converter,” *IET Power Electronics*, Vol. 4, No. 1, pp. 168 - 180, Feb. 2011.
- [11] H. N. Tran and S. Choi, “A family of ZVT DC - DC converters with low-voltage ringing,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 35, No. 1, pp. 59 - 69, Jan. 2020.
- [12] H. Bodur and A. F. Bakan, “A new ZVT-PWM DC-DC converter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 40 - 47, Jan. 2002.
- [13] M. Hirakawa et al., “High power DC/DC converter using extreme close-coupled inductors aimed for

electric vehicles,” in *The 2010 International Power Electronics Conference (ECCE ASIA)*, Sapporo, pp. 2941 - 2948, 2010.



김선주(金善宙)

1994년 3월 9일생. 2017년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2019년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2019년~현재 동 대학원 전기정보공학과 박사과정.



하이 프란(Hai Ngoc Tran)

1991년 9월 15일생. 2014년 Ho Chi Minh City University of Technology 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2021년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업(공학박사). 2021년~현재 일본 교토대 박사후 연구원.



김진영(金珍榮)

1998년 7월 29일생. 2017년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 학사과정.



기에우 호우 폭(Huu-Phuc Kieu)

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



최세완(崔世罔)

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. 당 학회 회장.



박준성(朴峻成)

1982년 4월 26일생. 2009년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2011년 동 대학원 에너지환경대학원 신에너지공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 신에너지공학과 졸업(공학박사). 2015~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 책임연구원.



윤혜성(尹慧聖)

1979년 8월 20일생. 2005년 아주대 전기전자공학부 졸업. 2020년~현재 명지대 전기공학과 석사과정. 2014년~현재 영화테크 책임연구원.