

# GaN소자와 평면변압기를 이용한 700kHz 차량용 DC-DC컨버터 개발

김상진<sup>1</sup>, Adhis<sup>1</sup>, 김규영<sup>1</sup>, 최세완<sup>1</sup>, 양대기<sup>2</sup>, 홍석용<sup>2</sup>, 이윤식<sup>3</sup>, 여인용<sup>3</sup>  
 서울과학기술대학교<sup>1</sup>, 데스틴파워(주)<sup>2</sup>, 현대자동차(주)<sup>3</sup>

## Development of Low voltage DC-DC converter for xEV with high frequency·high power density based on GaN-HEMT and Planar transformer

Sang-jin Kim<sup>1</sup>, Adhistira<sup>1</sup>, Kyu-young Kim<sup>1</sup>, Se-wan Choi<sup>1</sup>,  
 Dae-ki Yang<sup>2</sup>, Seok-yong Hong<sup>2</sup>, Youn-sik Lee<sup>3</sup>, In-yong Yeo<sup>3</sup>

Seoul National University of Science and Technology<sup>1</sup>, Destin Power Inc<sup>2</sup>, Hyundai Motors Inc<sup>3</sup>

### ABSTRACT

본 논문은 전기자동차용 8.1kW/L의 높은 전력밀도를 갖는 저전압 DC-DC 컨버터(Low-voltage DC-DC converter, LDC)의 설계 방법을 제안한다. 넓은 전압범위에서 높은 전력밀도를 성취하기 위해 위상전이 풀-브릿지(Phase Shift Full-Bridge, PSFB) 컨버터의 2차측 토폴로지 후보군의 비교를 통해 전류-더블러 토폴로지로 토폴로지가 선정되었다. 또한 자속 상쇄 기법이 적용된 매트릭스 변압기를 적용한 PSFB 컨버터와 냉각기의 구조설계를 통해 8.1kW/L의 전력밀도를 달성하였으며 1.8kW 시작품을 제작하여 성능을 검증하였다.

### 1. 서 론

최근 와이드 밴드 갭(WBG) 기반의 전력 반도체 소자의 상용화는 전기자동차(xEV) 응용에서 저전압 배터리 충전기용 DC-DC컨버터의 중량 및 부피를 줄일 수 있는 발판이 되고 있다. 특히 갈륨 나이트 라이드(GaN) 소자는 실리콘(Si)소자와 비교하여 고온에서 동작 가능하며 스위치의 패키지가 작고, 고속 스위칭에도 손실이 작아 고효율, 고전력밀도가 요구되는 응용에 널리 쓰이고 있다 [1].

본 논문에서는 대전류, 고주파 응용에서 위상전이 풀-브릿지(Phase Shift Full-Bridge, PSFB)컨버터의 2차측 토폴로지 선정 시 높은 전력밀도를 달성하기 위해 고려해야 할 측면들에 대해 논의하고 후보 토폴로지들의 비교를 수행했다. 높은 전력밀도 달성을 위해 700kHz의 스위칭 주파수를 적용하였으며 스위치 구동에 필요한 게이트 드라이버 회로를 설계 및 제작하였다. 또한 자속 상쇄 기법이 적용된 평면 변압기를 설계 및 제작하여 성능을 검증하였으며 스위치, 다이오드 및 자성체를 효과적으로 방열하기 위한 냉각기, 클램프의 구조를 설계하고 제작 및 검증하였다.

### 2. 토폴로지 선정

위상전이 풀-브릿지(Phase Shift Full-Bridge, PSFB)컨버터의 높은 목표 전력밀도 달성을 위해 적합한 2차측 구조에 따른 특성을 비교하였다. 비교를 수행한 2차측 구조는 센터탭(Center tap, CT) 구조와 전류-더블러(Current doubler, CD)

구조이며, 자성체의 수, 유효주파수, 전류정격 및 자성체의 단면적에 대하여 비교를 수행하였다.

표 1은 PSFB 컨버터 2차측 구조를 센터탭 구조와 전류 더블러 구조를 사용하였을 경우의 특성 비교결과를 나타낸다. 센터탭 구조는 1개의 출력 인덕터만을 사용할 수 있으며 인덕터의 유효주파수가 2배의 스위칭 주파수이기 때문에 더 작은 필터 인덕턴스를 사용할 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 출력 전류(130A)가 커 권선의 폭이 넓고 동손이 크다는 단점을 갖는다. 전류-더블러는 절반의 전류, 2배의 인덕턴스를 갖는 인덕터를 2개 사용하기 때문에 센터탭 토폴로지에 비해 인덕터 단면적이 2배인 것을 알 수 있다.

하지만 변압기 측면에서 전류-더블러는 센터탭 구조에 비해 절반의 턴비를 갖고, 2차측 전류정격이 작기 때문에 변압기의 단면적이 센터탭 구조에 비해 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 턴비가 센터탭 구조에 비해 절반이기 때문에 누설 인덕턴스를 줄여 듀티손실을 최소화 할 수 있다 [2]. 전류 더블러 토폴로지는 센터탭 토폴로지에 비해 인덕터의 단면적은 크지만 턴비가 작아 결과적으로 작은 자성체 면적을 가지며 누설 인덕턴스 최소화가 가능하다.

표 1. 토폴로지 비교

Parameter	PSFB-CD	PSFB-CT
Circuit Diagram		
Number of magnetics	1 transformer 2 inductor	1 transformer 1 inductor
Effective switching frequency	$f_{sw}$	$2 \times f_{sw}$
Output filter inductance	650nH (65A)	350nH (130A)
Transformer secondary current rating	65A	90A
Leakage inductance value	1.2 $\mu$ H	1.2 $\mu$ H
Transformer turn ratio	5:1	10:1:1
Magnetics footprint	Transformer: 830mm <sup>2</sup> Inductor: 663mm <sup>2</sup> × 2EA Total : 2157mm <sup>2</sup>	Transformer: 1800mm <sup>2</sup> Inductor: 654mm <sup>2</sup> × 1EA Total : 2454mm <sup>2</sup>

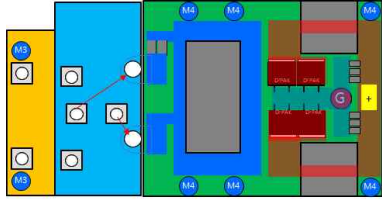


그림 1. 1.8kW 저전압 배터리 충전기 구조 설계 결과

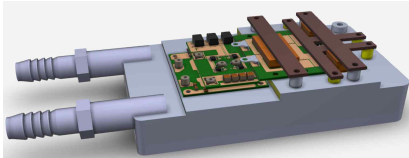


그림 2. 1.8kW LDC 3D 도면

### 3. 높은 전력밀도 확보를 위한 구조설계

그림 1은 700kHz, 1.8kW LDC의 구조 설계 결과를 나타낸다. 제안하는 LDC는 크게 풀-브릿지 보드, 게이트 드라이버 보드, 변압기와 2차측 정류부를 포함하는 파워보드로 구성된다. 먼저, 목표 전력밀도를 달성하기 위해 선정된 700kHz의 스위칭 주파수로 동작하는 GaN 스위치의 방열을 위해 풀-브릿지 보드는 절연 금속 기판(Insulated Metal Substrate, IMS)보드를 사용하였다. IMS보드는 단일 레이어로 제작하고 게이트 드라이버 보드를 IMS보드 위에 얹는 방식으로 구성하여 제한된 공간을 효율적으로 사용할 뿐만 아니라 GaN 스위치의 게이트 단자와 게이트 드라이버 IC의 출력단자 사이의 거리를 줄일 수 있었다. 선정된 전류-더블러 PSFB 컨버터는 출력 인덕터의 전류 패스 임피던스 차이로 인해 전류 불균형이 발생할 수 있기 때문에 파워보드 PCB의 중심을 기준으로 양쪽 전류패스의 임피던스가 동일하도록 구성하였다. 또한 D2PAK 패키지 다이오드를 사용하여 출력 다이오드가 파워보드에서 차지하는 비중을 줄였다.

그림 2는 스위칭 소자 및 자성체, PCB의 방열을 고려하여 설계된 냉각기 및 1.8kW LDC의 3D 도면을 나타낸다. 냉각기와 직접적으로 맞닿아 방열이 효과적으로 이루어지는 IMS보드와는 달리 FR-4 PCB로 제작된 파워보드의 전류패턴, 출력 다이오드를 방열하기 위해 그림 1의 아래 그림과 같이 자성체가 차지하는 면적을 제외한 부분은 PCB와 냉각기가 직접적으로 맞닿게 하여 전류패턴 및 다이오드를 방열할 수 있도록 설계하였다. 변압기와 출력 인덕터에서 발생하는 열은 그림 2에 나타난 클램프를 이용하여 냉각할 수 있도록 하였고, 출력 다이오드에도 또한 클램프를 이용하여 추가적으로 냉각할 수 있도록 설계하였다.

### 4. 실험결과

그림 3은 입력전압 310V, 1.8kW 상황에서 변압기와 인덕터의 측정온도를 나타낸다. 클램프를 이용한 냉각 없이 변압기 최고온도 52.7°C, 인덕터 최고온도 약 30°C로 온도가 측정되었다. 그림 4는 입력전압 200V, 출력전압 15.1V, 1.8kW상황에서의 실험결과를 나타낸다. GaN 스위치가 700kHz로 동작하는

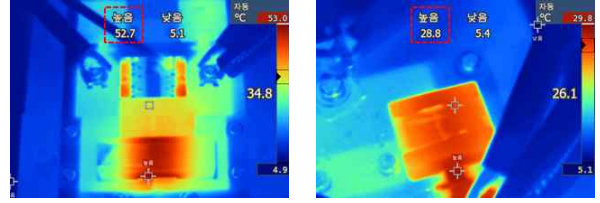
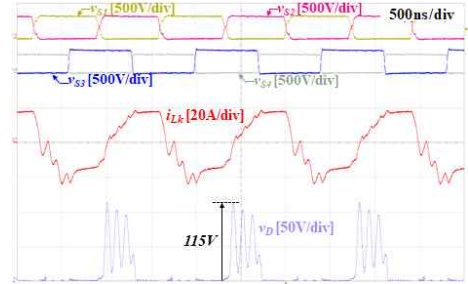
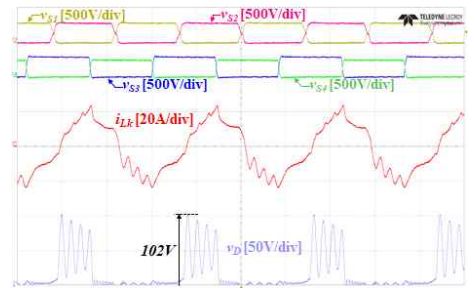


그림 3. 1.8kW LDC 측정온도 (a) 변압기 (b) 인덕터



(a)



(b)

그림 4. 1.8kW LDC 정격 실험파형 (a)  $V_{in}=310V$ ,  $V_o=13.9V$ , (b)  $V_{in}=200V$ ,  $V_o=13.9V$

것을 확인할 수 있으며, 4개의 스위치 모두 ZVS를 성취하는 것을 확인할 수 있다. 또한 출력 다이오드에는 별도의 스너버 회로없이 병렬 캐패시터만을 이용하여 전압 서지 최대값을 줄였다.

### 5. 결론

본 논문에서는 전기자동차 LDC 응용에서 높은 전력밀도를 갖기 위해 가장 적합한 PSFB의 2차측 토폴로지가 무엇인지 비교하였다. 전류-더블러 구조는 센터탭 구조에 비해 자성체의 단면적이 작고 변압기 및 인덕터에 흐르는 전류가 작아 권선의 폭을 작게 사용할 수 있으며 절반의 턴비를 사용 가능하여 누설 인덕턴스를 작게 만들 수 있다는 장점이 있기 때문에 전류-더블러 구조로 토폴로지를 선정하였다. 또한 냉각기 및 PCB의 구조설계를 바탕으로 제작한 1.8kW LDC는 8.1kW/L의 전력밀도를 달성하였다.

### References

- [1] A. Stippich *et al.*, "Key components of modular propulsion systems for next generation electric vehicles," in *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 249-258, December 2017.
- [2] N. H. Kutkut, "A full bridge soft swiached telecom power supply with a current doubler converter," *Proceedings of Power and Energy Systems in Converging Markets*, Melbourne, Victoria, Australia, 1997, pp. 344-351.