

SiC를 이용한 전기버스용 3kW 고효율 저전압 전력변환장치 개발

강민혁*, 정은진**, 강찬호**, 이병국*†

*성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과, **EGTRONICS

Development of 3kW LDC for High Efficiency using SiC for EV BUS

Min-Hyuck Kang*, Eun-Jin Jung**, Chan-Ho Kang** and Byoung Kuk Lee*†

*Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

**EGTRONICS Co., Ltd.

ABSTRACT

본 논문은 상용급 전기버스의 24 V 전장전력공급장치로써 고전압배터리부터 저전압으로 변성하는 전력변환장치인 저전압 직류변환장치 (Low Voltage DC/DC Converter : LDC) 개발에 관하여 기술한다. 제안하는 LDC는 효율을 높이기 위해 트랜스포머 1차 측 위상천이 전브리지 스위칭 소자에 SiC MOSFET을 사용하고, 2차 측에 동기정류방식을 적용하였다. 고효율 성능을 검증하기 위해 시작품을 제작하고 시험을 통해 3 kW 97% 이상의 고효율, 고출력, 고밀도의 특성을 확인하였다.

1. 서론

이산화탄소 감축 및 각종 환경규제에 대응하고 고갈되는 화석연료에 대처하기 위한 다양한 친환경자동차 개발 및 양산이 이루어지는 등 현대 사회의 수송산업 패러다임이 변화하고 있다. 이 중 버스나 트럭과 같은 대형 상용차는 디젤연료를 사용하고 그 용량이 커서 배출되는 질소산화물이 많을 뿐 아니라 대기 중의 오존과 결합하여 심각한 미세먼지 농도 상승 등 도심지 대기오염의 심각한 주범으로 파악되고 있어 전기버스 개발에 전 세계가 역량을 집중시키고 있다.

전기버스에 적용되는 전력변환장치 중 모터구동 인버터는 기술 한계에 도달하여 거의 동일한 토폴로지와 성능을 가지지만, 전장전력 공급용 LDC의 경우 반도체 소자의 발전 및 동기정류방식 등을 통해 기존보다 효율 상승이 가능하다. 최근 전기버스는 시스템 효율성 제고 및 양산성 향상을 위해 기존 1대의 대용량 LDC를 적용하지 않고, 고효율 소용량 LDC를 전장품 사용목적에 구분하여 여러 개로 분산배치함으로써 냉각, 장착, 원가절감 등의 다양한 이점을 얻을 수 있다.

이에 본 논문에서는 3 kW 고효율 LDC를 개발하기 위해 트랜스포머의 1차 측 고전압 스위칭부에는 위상천이 영전압 스위칭 전브리지 컨버터 (Phase Shift ZVS Full Bridge Converter) 토폴로지에 SiC (Silicon Carbide) MOSFET 스위칭소자를 적용하였고, 2차 측 저전압부에 동기정류기 (Synchronous Rectifier) 를 적용하였다^{[1]-[3]}. ZVS의 넓은 제어범위와 경부하에서 정격부하까지 거의 균등한 효율특성 및 97% 이상의 고효율 특성을 가지도록 회로를 설계하였다. 설계의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 구성하고, 입력전압범위 450~650 V_{dc}, 출력전압 및 전류 28 V_{dc}, 110 A의 3 kW LDC 시작품을 제작하여 실험을 통해 성능을 확인하고자 한다.

2. Phase Shift Full Bridge DC-DC converter

2.1 동작원리 및 회로설계

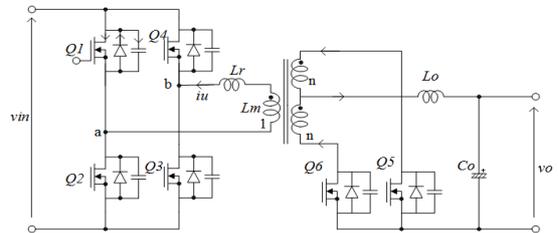


그림 1 Phase Shift Full Bridge 컨버터 회로도

Fig. 1. Phase Shift Full Bridge converter circuit.

그림 1은 본 논문에서 제안한 1차 측 전브리지 스위칭 회로와 2차 측 센터탭 동기정류방식 회로를 표시하였다. 전브리지 스위칭에는 ZVS 위상천이방식을 적용하고 소프트 스위칭은 트랜스포머의 누설인덕터 L_r 와 자화인덕터 L_m 를 이용하여 데드타임 동안에 ZVS함으로써 구현한다. 스위칭주파수 f_s 는 일정하고, 4개의 스위칭 소자를 가지는 전브리지 회로 위상천이방식의 PWM을 인가시킴으로써 출력전압을 제어한다.

전기버스는 배터리 입력전압이 높아서 기존 Si MOSFET의 긴 t_{rr} 시간으로 인하여 효율이 감소되었으나 t_{rr} 시간이 17배 짧은 SiC MOSFET를 적용함으로써 스위칭 손실을 저감하여 효율을 개선하였다. 또한 2차 측에 다이오드 정류기 대신 동기정류 스위치를 사용함으로써 도통손실을 줄였다.

2.2 시작품 사양 및 파라메타 설계

전기버스용 3 kW LDC는 450~650 V_{dc} 입력전압에 대해 3 kW 28 V 출력과 모듈 크기 310×130×56 mm 이내에 실장되기 위해서 스위칭 주파수를 100 kHz가 되도록 선정하고 주요파라미터 및 부품의 설계사양은 다음과 같이 선정하였다. 공진 인덕터 설계는 SiC MOSFET의 데이터시트 (C2M004012D : 1200 V, 60 A, C_{iss} 1893 pF, t_{rr} 54 ns) 값을 기준으로 정격부하의 10% 이상에서 ZVS 스위칭이 가능하도록 설계하였다. 데드타임은 기존 Si MOSFET에 비해 반 이상 줄인 400 ns이하로 설계하고 스위칭주파수를 100 kHz로 높여 사이즈를 감소

표 1 LDC 3 kW 설계 파라미터
Table 1 Design parameter of 3 kW LDC

Parameter	Value	비고
Q ₁ , Q ₂ , Q ₃ , Q ₄	C2M0040120D	SiC
Q ₅ , Q ₆	AUIRFP4568	Si
L _m	230 [μH]	
L _r	8 [μH]	
L _o	3.3 [μH]	
Turn ratio	N _p :N _{S1} :N _{S2} =12:1:1	
C _o	88 [μF]	
Dead time (t _d)	150 [nsec]	

시켰다. 또한, 기생성분을 제거하기 위해 PCB패턴을 상부면과 하부면에 각각 GND패턴과 고전압패턴이 오도록 보강하고, 대 전류가 흐르는 2차 측 부스바 권선의 길이를 동일하게 하여 임피던스 값을 같게 하였으며, 전류 불평형을 해결하기 위해 센터탭 방식을 사용하였다. 트랜스포머는 방열을 위하여 코어의 중측 에어갭을 사용하여 코어를 최대한 밀착시켰다.

최적설계를 위한 입출력관계식은 식 (1)과 같이 표시한다. 식 (2)는 스위칭 소자의 소프트스위칭 조건식을 표시한다.

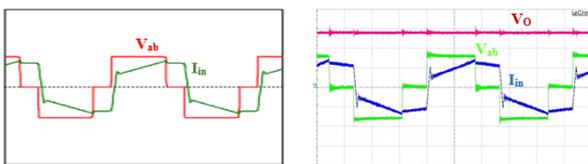
$$V_o = n(1 - 2\frac{T_\phi}{T}) V_{in} \quad (1)$$

$$t_d \gg 2\frac{C_R}{I_{MO}} \quad (2)$$

식 (2)의 소프트스위칭 조건식에 의해 데드타임 t_d의 설정은 스위치 기생용량과 1차 측 트랜스의 인덕턴스에 의하여 정해지는 것을 알 수 있고 표 1은 설계 파라미터를 나타낸다.

3. 실험 결과

제안회로의 동작원리와 특성을 확인하기 위해 위상천이 영전압 전브리지 스위칭 방식의 3 kW LDC 시작품을 제작하여 실험을 수행하였다. 스위치소자는 CREE사의 SiC MOSFET를 사용하고 입출력 조건을 감안하여 실험을 수행하였다. 기존의 Si MOSFET를 사용할 경우 500 ns이상의 데드타임을 설정한 데 비하여 SiC MOSFET를 사용하였을 때는 150 ns이내로 설정이 가능하였다. 입력전압 550 V_{dc}, 출력전압 28 V_{dc}, 출력전류 110 A, 출력전력 3 kW 정격 부하에서 1차 측 전류, 전압과 형에 대한 시뮬레이션과 실험결과 파형이 그림 2 (a)와 (b)에 나타내었다. 그림 3은 입력전압 450 V_{dc}, 550 V_{dc}, 650 V_{dc} 3조건에서 각각의 부하에 대한 효율 특성을 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 입력전압 450 V_{dc}, 출력부하 55.5 A에서 97.11%의 고효율이 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a) 시뮬레이션 결과 (b) 실험 결과

그림 2 시뮬레이션 및 실험결과

Fig. 2. Simulation & Experiment waveforms.

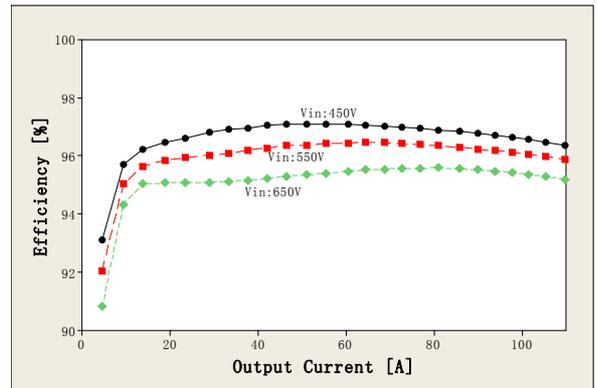


그림 3 입력전압 조건 별 부하에 따른 효율 특성

Fig. 3. The efficiency according to the load condition for each input voltage.

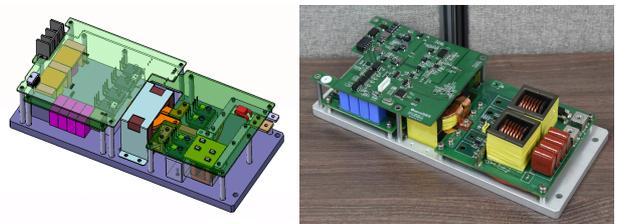


그림 4 3D 모델링 및 3 kW LDC 제작물

Fig. 4. 3D modeling and 3 kW LDC module.

그림 4는 3 kW LDC 모듈의 3D 모델링과 시작품을 나타내고 있고, 부피 310×130×56 mm에 3 kW의 출력을 달성하여 1.33 kW/L 성능을 달성하였다.

4. 결론

본 논문에서는 전기버스에 사용되는 3 kW LDC 전력변환의 고효율, 소형화를 위해 트랜스포머 1차 측 스위칭부를 위상천이 영전압 스위칭 전브리지 회로에 SiC MOSFET를 적용하였고, 2차 측에 동기정류 스위치를 적용하여 시작품을 제작하였다. 그 결과 450~650 V_{dc}의 넓은 입력전압에서도 3 kW 이상의 출력과 97% 이상의 고효율을 달성하고, 기존 제품들에 비해 크기를 월등히 줄여 고출력밀도를 가지게 되었다. 향후 각종 온도환경시험과 전자파 시험 등의 내환경 시험을 통해 제품의 품질을 확보할 계획이다.

참고 문헌

[1] A.Jangwanitler, J.C.Balda, "Phase-shifted PWM full-bridge DC-DC converters for automotive application: reduction voltages", *IEEE Transaction of Power Electronics*, pp. 111-115, Oct. 2004.
 [2] I.D.Jitaru, "A 3kW Soft Switching DC-DC Converter", *Proceeding of APEC'00*, Vol.1, pp. 86-92, Feb. 2005.
 [3] M. Pahlevaninezhad, "A Novel ZVZCS full-bridge DC/DC converter used for electric vehicles", *IEEE Trans, Power Electronics*, vol. 27, no. 6, pp. 2752-2769, Dec. 2013.