

SiC MOSFET을 적용한 10kW급 배터리 충전장치용 PWM 정류기 개발

주동명, 현병조, 박준성, 김진홍, 최준혁
전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터

Development of 10kW PWM Rectifier for Battery Charger with SiC MOSFET

Dongmyoung Joo, Byong Jo Hyon, Joon Sung Park, Jin-Hong Kim, Jun-Hyuk Choi
Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

본 논문에서는 SiC MOSFET을 적용한 10kW급 배터리 충전장치용 3상 PWM 정류기를 개발한다. 개발한 정류기는 3상 Bridge에 IGBT를 대체할 수 있는 WBG 전력반도체 SiC MOSFET을 적용하여 스위칭 주파수 향상 및 고전력밀도를 달성하였다. 개발한 10kW급 3상 PWM 정류기의 효율 및 THD 성능을 실험을 통해 검증한다.

1. 서론

지게차 및 골프카트의 납산 배터리를 충전하기 위한 기존의 산업용 충전기는 주요 전력변환반도체로 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)를 적용하였으나, IGBT의 스위칭 주파수 제한으로 인해 효율과 전력밀도가 낮은 단점이 있다. 반면 SiC MOSFET (Silicon Carbide Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor)을 적용하면 이러한 단점을 극복하고 고효율 고전력밀도 산업용 충전기 설계가 가능하다^[1]. 따라서 본 논문에서는 SiC MOSFET을 적용한 고전력밀도 10KW급 배터리 충전장치용 3상 PWM 정류기를 설계 및 개발하고 부하별 효율 및 THD 측정결과를 통해 성능을 검증하였다.

2. PWM 정류기 하드웨어 설계

2.1 하드웨어 구성

그림 1은 산업용 배터리 충전기의 구성도를 나타낸다. 충전기는 3상 교류 입력을 받아 역률제어 및 전압 승압의 역할을 하는 3상 PWM AC-DC 정류기 및 배터리의 충전 전력을 위한 절연형 DC-DC 컨버터로 구성되어 있다. 본 논문에서는 3상 PWM 정류기를 설계 및 개발하였으며, Vienna 정류기와 3상 PWM 컨버터 토폴로지 중 부품 수가 적고 회로 구성이 간단하며 양방향 전력 흐름이 가능하여 부하 변동시 전압 제어가 빠른 3상 PWM 컨버터 토폴로지를 적용하였다. 입력단 필터는 L 필터 대비 추가적인 고조파 저감을 위해 L-C필터로 구성하였으며, 발진을 막기 위해 커패시터와 직렬로 댐핑 저항을 추가하였다.

3상 Bridge에 적용한 스위치는 3상 380VLL 입력 전압 및 700V의 출력 전압 및 최대부하에서의 스위치 최대 전류값을 고려하여 Rohm사의 1200V SiC MOSFET SCT3030KL을 적용하였으며, 사용한 스위치의 주요 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 SiC MOSFET SCT3030KL의 주요 사양

Table 1 Specification of SiC MOSFET SCT3030KL

파라미터	값	단위
V_{DSS}	1,200	V
I_D (@100°C)	51	A
$R_{DS(on)}$ (@125°C)	45	mΩ
E_{on} (@600V/27A)	468	uJ
E_{off} (@600V/27A)	204	uJ

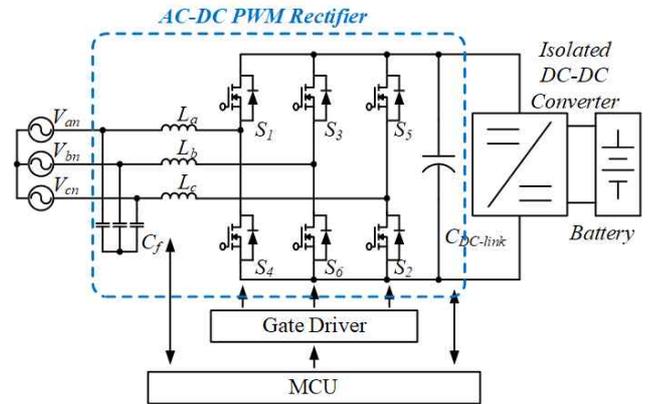


그림 1 산업용 배터리 충전기 시스템 구성도

Fig. 1 Diagram of an industrial battery charging system

2.2 게이트 드라이버 설계

게이트 드라이버 IC는 SiC MOSFET의 기본 구동 및 신호 절연, 양극성 전원 출력, 고속 스위칭이 가능한 Broadcom社의 옵토커플러 ACPL-W349를 선정하였다. 게이트 드라이버 IC의 CMTI (Common mode transient immunity)는 70kV/us이며, 최대 2.5A 암페어의 Sink/source 전류로 SiC MOSFET을 구동할 수 있기 때문에 고속 스위칭이 가능하다. 게이트 드라이버의 정격 구동 전류를 고려하여 게이트 저항은 turn-on 시 15ohm / turn-off 시 7.5ohm으로 선정하였다.

게이트 드라이버 IC의 전원 공급은 위상 스위치 및 아래상 스위치의 공급 전압 불균형을 피하기 위해 절연형 DC-DC 컨버터를 개별로 적용하였다. 또한 일반적인 SiC MOSFET은 구동을 위해 양극성의 전원이 필요하므로 18V/-3V의 전압을 출력하는 MORN SUN社의 QA01C-18을 적용하였으며, PCB 층간 기생 커패시턴스의 영향을 제거하기 위해 그림 2와 같이 1차 측과 2차 측을 분리하여 PCB Artwork을 진행하였다^[2].



그림 2 설계된 SiC MOSFET 구동용 게이트 드라이버
Fig. 2 A designed gate driver for driving SiC MOSFET

2.3 입력 필터 설계

입력 필터는 그림 1과 같이 L-C필터로 구성하였으며, IGBT를 적용한 기존 10kW급 3상 정류기들이 인덕터 설계 시 Block코어를 적용한 것과 달리, 전력밀도 향상을 위해 Toroidal형상의 코어를 적용하였다. 코어의 재질은 DC-bias 및 손실 특성이 좋은 Highflux재질의 분말자성코어를 선정하였다. 코어의 Size는 포화를 방지하기 위해 50.8mm의 높이를 갖는 코어를 2적층하였고 2pi 동선을 86턴 권선하여 1080uH의 무부하 인덕턴스를 확보하였다. 전부하 동작 시 인덕턴스를 예측하기 위해 식 (1)과 같이 전류에 따른 자화력을 계산하여 그림 3에 도시하였으며, 최대 전류에서 500uH 이상의 인덕턴스를 확보하였다.

$$H = (0.4\pi NI) / l \quad (1)$$

필터 커패시터는 2.2uF를 적용하였으며, 따라서 무부하 기준 공진 주파수는 약 3.4kHz로 스위칭 주파수인 30kHz의 1/9 부근에 위치한다.

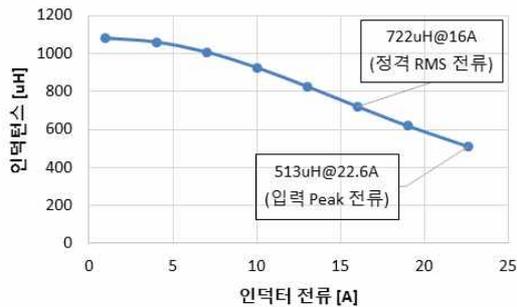


그림 3 설계된 필터 인덕터의 DC-bias 특성
Fig. 3 DC-bias characteristic of designed filter inductor

3. 실험 결과

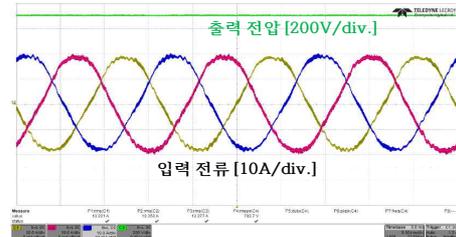
그림 4-(a)는 제작된 3상 PWM 정류기 하드웨어 시작품을 나타낸다. 제어기는 계통 전압의 위상을 검출하여 역률 제어 및 DC-link 전압제어를 수행하며, 그림 4-(b)와 같이 입력 전류의 전류 제어 및 700V로 전압 제어가 수행되는 것을 확인하였다. SiC MOSFET 구동 시 Drain-source 전압이 최대 765V로 기생 성분에 의한 영향이 100V 이하인 것을 확인하였다.

효율 및 THD 측정은 YOKOGAWA 전기의 WT1800 전력 분석계 및 CT1000 전류 센서를 활용하여 측정하였다. 최대 효율은 약 5.5kW 출력 조건에서 98.14%, THD는 8.1kW 출력 전력 조건에서 5.72%임을 확인하였다.

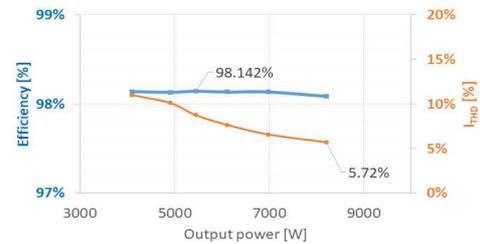
개발한 3상 PWM 정류기 하드웨어 시작품의 전력밀도는 2.27kW/L로, SiC MOSFET을 적용한 전력변환시스템의 고효율 및 고전력밀도 성능을 확인하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 4 개발된 10kW급 PWM 정류기: (a) 하드웨어 시작품 (b) 8kW 동작 시 주요 파형 (c) 효율 및 THD 측정 결과

Fig. 4 Designed 10kW PWM rectifier: (a) A H/W prototype (b) Key waveforms at 8kW (c) Measurement results of efficiency and THD

4. 결 론

본 논문에서는 SiC MOSFET을 적용한 3상 PWM 정류기를 설계 및 제작하였다. 제작된 하드웨어 시작품은 98.1%의 효율 및 2.27kW/L의 전력밀도를 달성하여 SiC MOSFET을 적용한 전력변환장치의 성능을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20172020108500)

참 고 문 헌

- [1] 김진학, 이우석, 최승원, 이준영, 이일운, "전기전동차 급속 충전기 고효율화를 위한 새로운 DC-DC 컨버터 토폴로지", 전력전자학회 논문지, Vol. 23, No. 4, pp. 182-189, 2018.
- [2] W. Zhang, X. Huang, F. C. Lee, Q. Li, "Gate drive design considerations for high voltage cascode GaN HEMT", Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), pp. 1484-1489, Mar. 2014.