

LVDC용 SiC기반 다중전압(48V/80V) 200A급 스마트 지게차 충전기

안정훈, 선다운, 송성근[†]
전자부품연구원

Development of Multi-Charging Voltage (48V/80V) 200A Smart Forklift Battery Charger based on SiC-FET for LVDC

Jung-Hoon Ahn, Daun Sun, and Sunggeun Song[†]
Korea Electronics Technology Institute

ABSTRACT

본 논문은 저전압 직류배전 (LVDC)이 도입된 공장 및 물류 센터 등에서 다수의 전동 지게차를 운용할 때, 효과적으로 충전할 수 있는 지게차 배터리 충전기를 제안하였다. 제안하는 충전기는 SiC 반도체 및 의도적으로 비대칭으로 설계한 공진 인덕터를 사용한 두 개의 위상천이 폴브릿지 컨버터로 구성된다. 이를 통하여 최대 200A급 고속 충전 및 다종의 배터리 규격 (48V, 80V) 대응과 함께 고효율, 고전력밀도를 달성 하였다.

1. 서 론

PV 등 DC 발전 신재생 에너지의 확대, 디지털 DC 부하의 급증, 배터리 ESS, UPS 등 DC 연계 스마트 에너지 기술과 고효율 송·배전의 이점 등으로 DC 송배전 시장은 빠르게 성장 하고 있다. 송전단에 초점을 맞춘 초고전압, 고전압 직류송전 (HVDC, MVDC)의 연구와 다르게 저전압 직류배전 (LVDC)은 기존 380V_{AC} 배전의 역할을 대체 할 기술로서 배전단 뿐만 아니라 개별 전기·전자기들이 DC 입력을 받을 수 있도록 DC 부하로 전환하는 연구 개발이 병행 되어야 한다.

LVDC 연구 및 실증은 가전기기의 일괄 변경에 어려움이 있는 주거공간보다는 배전설비 및 전기 부하들을 턴키로 변경할 수 있는 공장, 물류 센터 등 산업시설을 대상으로 수행되고 있다. 특히, 전동 지게차 및 충전기는 산업시설의 다양한 전기 부하들 가운데 범용적 수요를 갖고 전기 사용량이 높아 DC 부하로 개발 시 대표성이 있으며, EMS 등 장치와 연동 할 경우 충전 시간 조절 등 전력 수급 조절의 기능을 할 수 있어 부수적인 이점도 예상된다.

따라서 본 논문에서는 380V_{DC} LVDC 시스템에서 사용가능한 DC 지게차충전기 연구 개발을 수행하였다. 비대칭 공진 인덕터를 적용한 2기의 PSFB 컨버터를 직·병렬로 사용하여 48V 및 80V 배터리 대응 및 최대 200A 충전이 가능하도록 하였으며, 저전압 대전류 전력변환장치임에도 불구하고 SiC 반도체를 적용하여 최대 96.47% 이상 고효율 및 2.66kW/L의 높은 전력밀도를 달성하였다.

2. 본 론

2.1 다중 전압 대응 지게차 충전기 개발

표 1은 전동 지게차 구동용 배터리의 전압 범위를 나타낸다. 납산 배터리의 단위 셀 전압 범위는 1.8V~2.2V이며, 48V 및 80V 배터리를 모두 커버하기 위해서는 43V에서 95V의 넓은

표 1 지게차 48V, 80V 규격 납산 배터리 특징
Table 1 Properties of Lead-Acid 48V, 80V Batteries

규격	셀의 개수	최저 전압	공칭 전압	최대 전압
48V	24개 직렬	43V	48V	56V
80V	48개 직렬	72V	80V	95V

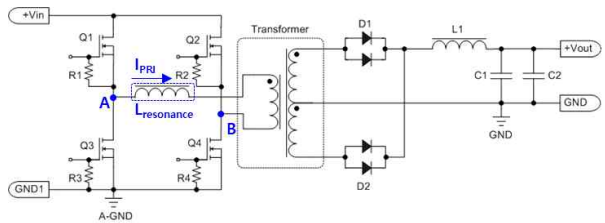


그림 1 ZVS PSFB 컨버터 토폴로지
Fig. 1 Topology diagram of ZVS PSFB converter

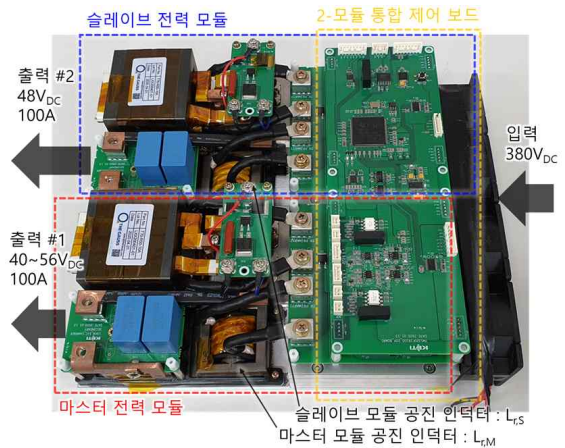
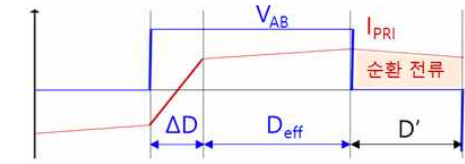


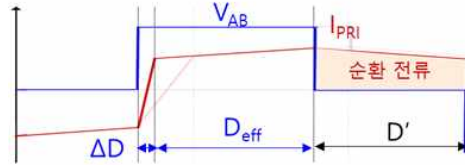
그림 2 개발한 지게차 충전기 하드웨어
Fig. 2 Hardware of the developed forklift battery charger

전압범위에서도 고효율 충전이 가능해야 한다. 넓은 전압범위와 최대 200A의 부하 가변 폭을 고려하면 주파수 제어 방식보다 고정 주파수 제어 방식을 갖는 그림 1의 PSFB 토폴로지가 다중 전압 대응에 유리하다. 그러나 PSFB 토폴로지의 경우 낮은 전압 영역에서 고효율을 기대하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 그림 2와 같이 3:1:1 권선비의 변압기를 사용하는 두 개의 PSFB 컨버터를 하나의 전력 모듈로 구성하여, 배터리 규격에 맞추어 직렬 및 병렬로 제어하는 방식을 적용 한다. 또한, 전력 밀도 최적화를 위하여 스위칭 주파수는 100kHz로 정하고, 스위치의 손실 및 방열 설비 최소화를 위하여 SiC 반도체를 주 스위치로 선정한다.

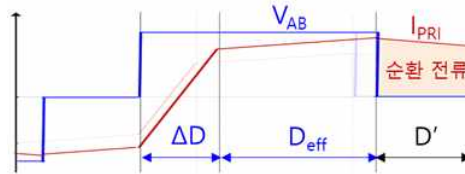
2.2 비대칭 공진 인덕터 적용 직병렬 효율 최적화



(a) PSFB 컨버터의 유효 듀티 (기준 파형)



(b) 공진 인덕터 (Lr) 인덕턴스 감소 조건



(c) 충전 전력 증가 조건

그림 3 PSFB 컨버터 조건 별 유효듀티 및 순환전류

Fig. 3 Relation between available duty and circular current according to resonance inductor and output load

$$L_{resonance} \geq \frac{(2C_{oss} + C_{TR}) V_{link}^2}{I_{PRI}} \quad (1)$$

PSFB 컨버터의 ZVS 만족을 위해서는 스위치의 기생 컵에 저장된 에너지를 충분히 방전 시킬 수 있는 식 (1)을 만족하는 공진 인덕턴스가 필요하다.

$$\Delta D = D_{eff} \cdot 4 \frac{L_{resonance}}{R_{Load} (N_F / N_s)^2} f_s \quad (2)$$

이때, 식 (2)과 같이 주파수, 부하, 권선비, 공진 인덕턴스에 따라 입출력 전압 전달비를 결정하는 유효 듀티 (D_{eff})와 오프 듀티처럼 기여되는 듀티 손실 (ΔD)이 결정된다. 부하가 크고 공진 인덕턴스가 작을수록 듀티 손실이 커지며, 이 경우 컨버터가 최대 출력 가능한 전압은 낮아지게 된다.

그림 3은 공진 인덕턴스 및 부하에 따른 듀티 손실과 순환 전류가 흐르는 환류 구간을 나타낸다. 동일 부하 및 출력 전압 조건에서 공진 인덕턴스가 감소하여 환류구간이 증가하면 전체 효율이 감소한다. 반대로 너무 높은 인덕턴스 값은 중부하에서 최대 출력 전압 (혹은 전류)을 제한 한다. 이러한 경향은 그림 4의 실험 결과로 확인 할 수 있다. 이때, 배터리 충전 종지전압 (56V)에서 75%의 충전 전류 (컨버터 당 75A)를 보장하는 것을 기준으로 설계 하면, 공진 인덕턴스의 값은 3.7uH이하로 선정하는 것이 합리적이다.

그러나 두 개의 PSFB 컨버터로 구성된 경우 경부하 효율을 증가시키기 위하여 두 모듈이 상시 병렬 운전 하지 않고 최적 효율 운전을 위하여 Phase-Shading 기법의 동작이 가능하다. 이 때, 공진 인덕턴스를 의도적으로 비대칭하게 설계하여 경부하 영역에서 높은 공진 인덕턴스를 갖는 컨버터를 단독 동작시켜서 효율을 높이고, 중부하에서 낮은 공진 인덕턴스를 갖는 컨버터를 병렬 운전시켜서 최대 전압 충전전류를 높이면 그림 5와 같이 전부하 구간 고효율 달성이 가능하다.

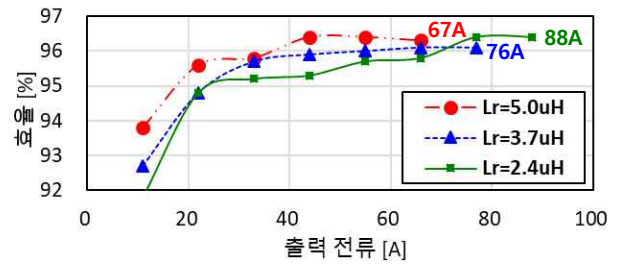
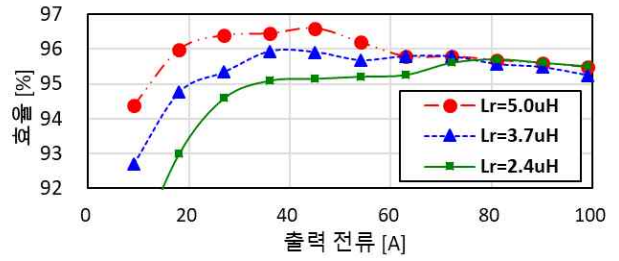


그림 4 공진 인덕터 및 출력 전류에 따른 효율 곡선

Fig. 4 Power efficiency of PSFB converter according to resonance inductor and output current

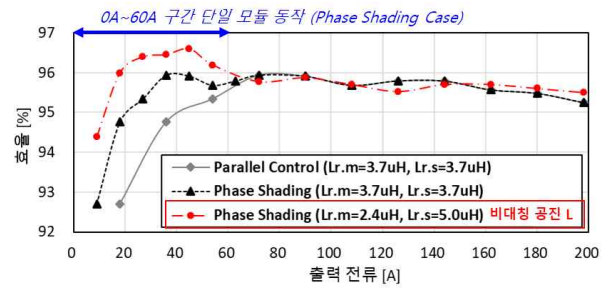


그림 5 지게차 충전기 제어방식 및 공진 인덕터 별 최종 효율

Fig. 5 Power efficiency of the forklift battery charger according to control method and resonance inductor

3. 결론

본 논문은 380-V_{DC} LVDC 시스템에 적합한 48V 및 80V 다중 전압 대응 지게차 충전기의 설계 및 제어 방법을 제안 하였다. 넓은 전압 범위를 효과적으로 제어하기 위하여 2기의 PSFB 컨버터를 직병렬로 사용 하였다. SiC 반도체 소자 적용 및 배치설계를 통하여 2.66kW/L의 고전력밀도를 달성하고, 전부하 영역 고효율 만족을 위하여 Phase-Shading기법 및 비대칭 공진 인덕턴스 적용 설계법을 적용 최대 효율 96.47%을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 광역협력관산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다. (과제번호: P0006191)

참고 문헌

- [1] Y. S. Kim, C. Y. Oh, W. Y. Sung, and B. K. Lee, "Topology and Control Scheme of OBC - LDC Integrated Power Unit for Electric Vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 3, 2017