

에너지 저장 시스템을 위한 LLC/동기 벽컨버터 기반 고효율 배터리 충방전기 설계

이태영, 이일운*, 조영훈, 김한구**, 조준석**, 최규하
 건국대학교 전력전자연구소, 계명대학교*, (주)이이시스**

LLC Resonant and Synchronous Buck Converter Based High Efficiency Battery Charger for Energy Storage Systems

Taeyeong Lee, Il Oun Lee*, Younghoon Cho, Hangoo Kim**, Junseok Cho**, Gyu Ha Choe
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ., Keimyung University*, EESYS**,

ABSTRACT

This paper proposes an isolated DCDC converter that consists of unregulated LLC resonant converter and non isolated synchronous buck converter for battery charger of energy storage systems application. The unregulated converter operates as transformer with fixed duty ratio and switching frequency. The synchronous buck converter is installed in the output of the LLC resonant converter. And the converter charges and discharges the battery by controlling a current of battery. The proposed converter can get the high efficiency by separating function. This paper explains design of an unregulated converter and synchronous converter.

1. 서론

절연형 배터리 충방전기의 토폴로지로는 여러 가지가 존재한다. 대표적으로 DAB(Dual Active Bridge) 컨버터와 LLC 공진형 컨버터를 예로 들 수 있는데 두 컨버터 모두 출력 전압에 따른 효율 변동이 큰 단점이 있다. LLC 공진형 컨버터의 경우 출력 전압의 가변 범위가 좁고, DAB 컨버터의 경우 순환 전류가 크다. 배터리 충방전기에 두 컨버터를 적용한 경우 배터리의 전압 및 부하에 따라 효율이 달라지게 된다.^[1] 이러한 단점을 보완하여 전 부하에서 충방전기의 고효율화를 위해 역할을 분리하여 두 개의 전력 변환 장치로 나뉜 컨버터를 제안한다. 절연을 담당하는 컨버터는 고정 스위칭 주파수로 제어되는 LLC 공진형 컨버터로 구성하고, 배터리 충방전 제어를 담당하는 컨버터는 양방향 동기 벽 컨버터로 구성하였다.^[2] 또한 효율 향상 전략으로 출력 커패시턴스가 작은 실리콘 카바이드(SiC) 기반의 소자를 이용하였다. 8.5kW급 절연형 배터리 충방전기 시제품을 제작하였고, 최대 97.6%의 효율을 가지는 것을 확인하였다.

2. 제안하는 컨버터

2.1 LLC 공진형 컨버터

절연을 담당하는 LLC 공진형 컨버터는 그림 1과 같이 1차 측과 2차측을 절연시켜주는 고주파 변압기와 2차측에 직렬 연결된 LC탱크로 구성된다. 인덕터와 커패시터로 구성된 LC탱크에 의해 공진주파수가 결정되고, 이 공진 주파수와 스위칭 주파수의 비에 의해 출력 전압이 결정된다. LLC 공진형 컨버터의 등가회로로 구할 수 있는 전압 전달비 K 는 (6)과 같다.

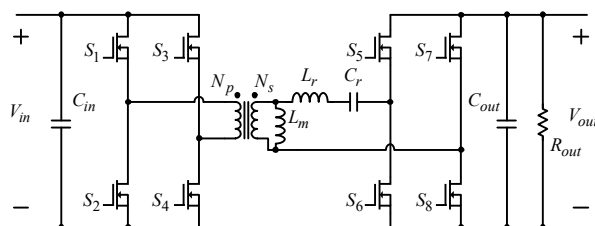


그림 1. LLC 공진형 컨버터의 토폴로지

공진 탱크의 L_r , C_r 과 등가화된 부하 저항 R_{ac} 로 구할 수 있는 Q factor와 공진 인덕턴스와 자화 인덕턴스로 구할 수 있는 m factor, 그리고 스위칭 주파수와 공진 주파수의 비 F_x 로 전압 전달비를 구할 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{N_p^2}{N_s^2} \cdot R_o \quad (2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R_{ac}} \quad (3)$$

$$F_x = \frac{f_s}{f_r} \quad (4)$$

$$m = \frac{L_r + L_m}{L_r} \quad (5)$$

$$K(Q, m, F_x) = \frac{|V_{ac}(s)|}{|V_{in.ac}(s)|} \quad (6)$$

$$= \frac{F_x^2(m-1)}{\sqrt{(m \cdot F_x^2 - 1)^2 + F_x^2 \cdot (F_x^2 - 1)^2 \cdot (m-1)^2 \cdot Q^2}}$$

(6)에서 확인 할 수 있듯이 $F_x = 1$ 즉, 공진 주파수와 스위칭 주파수가 같을 때 전압 전달비는 1이 된다. 이 때 고주파 변압기의 권선비에 의해 출력 전압이 결정된다. 공진 주파수와 동일하게 고정된 스위칭 주파수로 동작하여 컨버터는 절연을 하는 변압기와 동일한 기능을 한다. 따라서 입력 전압이 일정하다면 LLC 공진형 컨버터의 출력 전압도 일정하게 제어된다. 출력 전압 동작점이 고정됨에 따라 전력이 낮은 동작점 이외에서는 일정한 효율을 가지게 된다.

2.2 동기 벽컨버터

동기 벽컨버터의 토폴로지는 그림 2에서 확인할 수 있고, LLC 공진형 컨버터의 출력단에 연결되게 된다. 인덕터 전류의 리플을 줄여 배터리 수명을 연장할 수 있게 2상 인터리브드로

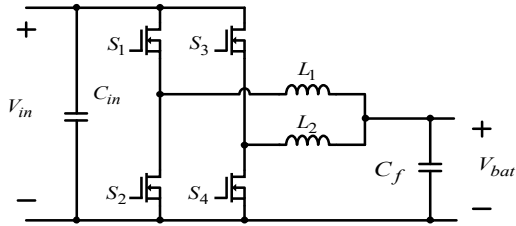


그림 2. 2상 인터리브드 동기 벡 컨버터의 토폴로지 구성하였다. 배터리의 충방전 제어는 인덕터 전류의 방향을 제어함으로써 가능하다. 양방향 동기 컨버터의 경우 충방전 모드에 따라 상단 또는 하단 스위치의 영전압 스위칭이 발생하여 효율을 향상할 수 있다. 배터리 충전 모드인 경우 그림 2에서 하단 스위치 S_2, S_4 에서 영전압 스위칭이 되고, 배터리 방전 모드인 경우 상단 스위치 S_1, S_3 에서 영전압 스위칭이 발생한다. 전압 정격이 900V인 SiC 소자를 이용하고 영전압 스위칭으로 스위칭 손실을 줄여 효율 향상이 될 것을 기대할 수 있다.

3. 실험 결과

제한된 컨버터의 동작을 알아보기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 구성하고, 시뮬레이션과 동일한 파라미터로 실험을 진행하였다. 시스템의 파라미터는 표 1에 정리했고, 실험 주요 파형은 그림 4, 그림 5에서 확인 할 수 있다.

표 1 제안하는 컨버터의 시뮬레이션 및 실험 파라미터

LLC 공진형 컨버터		동기 벡 컨버터	
F_{sw}	100kHz	F_{sw}	40kHz
L_m	105μH	L	1mH
L_r	10μH	C_f	45μF
C_r	250nF	C_{in}	30μF
N	13 : 9		
V_{in}	700V	V_{in}	480V
V_{out}	480V	V_{bat}	340V ~ 450V
P	8.5kW	P	8.5kW



그림 3. 8.5kW 절연형 배터리 충방전기 시작품

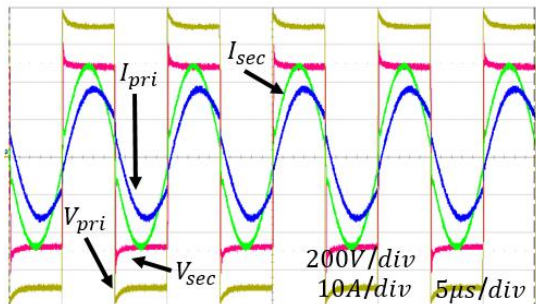


그림 4. LLC 공진형 컨버터의 주요 파형

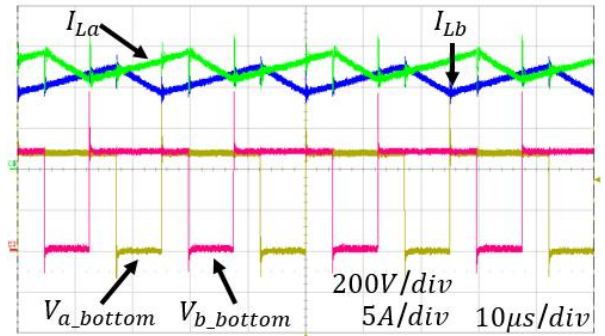


그림 5. 2상 인터리브드 동기 벡 컨버터의 주요 파형

그림 4는 LLC 공진형 컨버터가 8.5kW 전력 조건에서 고정 주파수로 스위칭 동작을 할 때 고주파 변압기의 1차측, 2차측 전압 및 전류의 파형이다. 1차측 스위칭 소자는 영전압 스위칭이 되고, 2차측 소자는 영전류 스위칭에 가깝게 동작하여 스위칭 손실이 적다는 것을 실험 파형으로도 예측 가능하다.

그림 5는 2상 인터리브드 동기 벡 컨버터가 그림 4와 같이 동작하는 LLC 공진형 컨버터와 연계하여 8.5kW 전력으로 배터리 충전 모드 동작하는 경우에서의 a상, b상의 하단 스위치의 드레인 소스 전압과 인덕터 전류를 도시한 파형이다. 배터리는 8.5kW에서 전압이 340V가 되도록 등가화된 저항 부하를 사용하였다.

효율 곡선은 YOKOGAWA社의 전력 분석기 WT1800를 이용하여 측정된 결과이다. 이는 그림 6에 정리하였다.

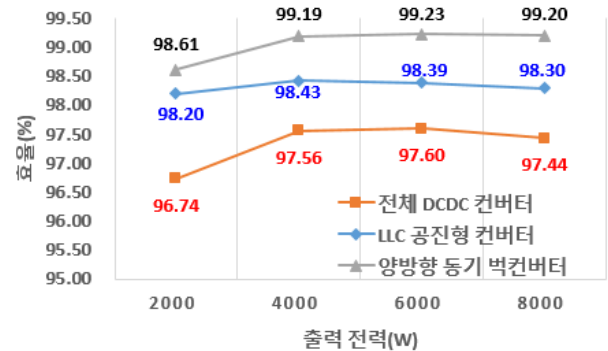


그림 6. 제안하는 컨버터의 전력 부하별 효율 곡선

4. 결론

설계된 파라미터대로 구성된 컨버터의 동작을 시뮬레이션으로 확인해보았고, 시뮬레이션과 동일하게 실제 실험에서도 똑같은 파형을 얻을 수 있었다. 그림 5에서 전력 조건인 6kW에서 컨버터 최대 효율은 97.6%이었고, 부하 전반적으로 96% 이상임을 확인 할 수 있다. 절연형 배터리 충방전기 회로에 적용하였을 때 다른 회로로 구성된 시스템보다 더 나은 성능을 가질 것을 예상할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 오은태, "넓은 입력범위를 갖는 고정 시비율 공진 컨버터를 이용한 2kW급 연료전지용 양방향 DC DC 컨버터", 명지대학교 대학원, 2010.
- [2] J. Y. Lee, Y. S. Jeong and B. M. Han, "An Isolated DC/DC Converter Using High Frequency Unregulated LLC Resonant Converter for Fuel Cell Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 7, pp. 2926-2934, July 2011.