

양방향 LLC 공진형 컨버터의 설계 방법

조철희, 신창수, 강소정, 이정현, 김동희[†]
전남대학교 전기공학과

Design Methodology of Bi-directional LLC Resonant Converter

Cheol-Hee Jo, Chang-Su Shin, So-Jeong Kang, Jeong-Hyeon Lee, Dong-Hee Kim[†]
Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문은 양방향 LLC 공진형 컨버터의 설계 방법을 제안한다. 기존 양방향 CLLC 공진형 컨버터의 1,2차 측 공진 네트워크는 충전 및 방전 모드에서 모두 공진 요소로 참여하여 부하에 따라 전압 이득 곡선의 다중 피크가 나타나는 문제를 갖는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 충전 및 방전 모드에 따라 1, 2차 측의 공진 네트워크가 독립적으로 동작할 수 있는 양방향 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 제안한 설계 방법의 타당성은 3.6kW 급 프로토타입을 통해 검증된다.

1. 서 론

최근 전기 자동차(EV), 에너지 저장 시스템 및 재생 에너지원의 급속한 발전으로 양방향 충전기에 대한 관심이 높아지고 있다. 양방향 충전기는 역방향 동작뿐만 아니라 계통의 전압 및 주파수를 조절하고 계통의 부하평준화에 도움이 되는 분산 에너지원의 역할도 수행할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 양방향 충전기에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.^[1]

전력의 크기와 방향을 제어하는 양방향 DC/DC 컨버터는 양방향 충전기의 핵심적인 부분으로서 다양한 토폴로지들이 제안되었다. 양방향 절연형 토폴로지 중 CLLC 공진형 컨버터는 모든 스위칭 소자에서 소프트 스위칭이 가능하여 최근 많은 관심을 받고 있다.^[1] CLLC 공진형 컨버터는 LLC 공진형 컨버터에서 2차 측의 LC 공진 네트워크가 추가된 형태로서 LLC 공진형 컨버터와 동일한 원리로 동작된다. 하지만, LLC 공진형 컨버터와 달리 1, 2차 측의 공진 커패시터는 순방향 및 역방향 전력 전달 시 모두 공진에 참여하여 LLC 및 CCL 공진 특성이 혼합된 특성을 갖는다. 이로 인해 그림 1과 같이 CLLC 공진형 컨버터는 특정부하 조건에서 낮은 이득 특성과 다중 피크 지점이 나타나고, 이는 도통 손실의 증가 및 특정 부하 조건에서 하드스위칭을 발생시킨다.

따라서 본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해 충전 및 방전 모드에 따라 1, 2차 측의 공진 네트워크가 독립적으로 동작할 수 있는 양방향 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 제안된 양방향 LLC 공진형 컨버터는 추가적인 다이오드 또는 스위치 소자 없이 PWM 신호를 변조하여 변압기의 권선 및 커플드 인덕터 기반의 공진 인덕턴스가 변경되어 동작된다. 제안된 양방향 LLC 공진형 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 3.6kW 급 프로토타입을 제작하고 실험을 진행하였다.

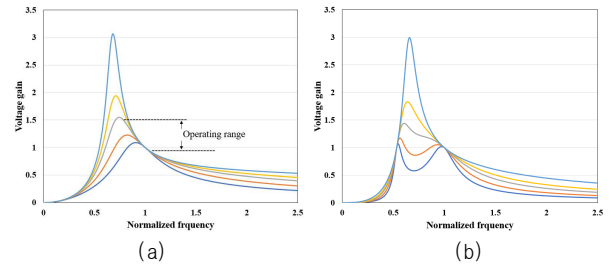


그림 1 (a) LLC 출력 이득 곡선, (b) CLLC 출력 이득 곡선
Fig. 1 Output gain curves (a) LLC and (b) CLLC resonant converters

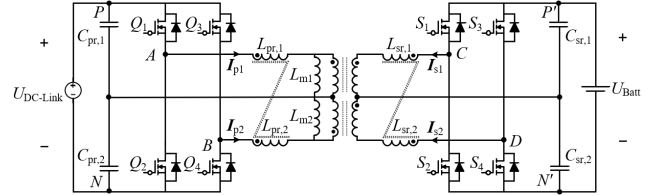


그림 2 제안된 양방향 LLC 공진형 컨버터
Fig. 2 Proposed bidirectional LLC resonant converter

2. 제안된 양방향 LLC 공진형 컨버터

2.1 제안된 양방향 LLC 공진형 컨버터의 동작원리

제안된 양방향 LLC 공진형 컨버터는 그림 2와 같이 1,2차 측의 Full-Bridge 인버터 및 정류기와 커플드 인덕터를 기반한 1, 2차 측의 공진 인덕터 및 공진 커패시터, 변압기로 구성된다. 먼저 커플드 인덕터를 기반한 1차 측의 공진 인덕턴스 $L_{pr,1}$ 과 $L_{pr,2}$ 의 전압 $V_{pr,1}$ 과 $V_{pr,2}$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{pr,1} = L_{pr,1} \frac{di_{p1}}{dt} + M_p \frac{di_{p2}}{dt} \quad (1)$$

$$V_{pr,2} = L_{pr,2} \frac{di_{p2}}{dt} + M_p \frac{di_{p1}}{dt} \quad (2)$$

두 개의 누설인덕턴스와 권선비는 동일한 전력을 부담하기 위해 동일하게 설계된다. 결과적으로 $L_{pr,1} = L_{pr,2}$ 와 같게 된다. 그림 3(a)와 같이 1차 측 Full-Bridge 인버터의 Q_1 및 Q_3 에 인가되는 PWM 신호 V_{GQ1} 과 V_{GQ3} 가 동상일 경우 $L_{pr,1}$ 과 $L_{pr,2}$ 의 인덕턴스는 식 (3)과 같이 증가하고 역상일 경우 식 (4)와 같이

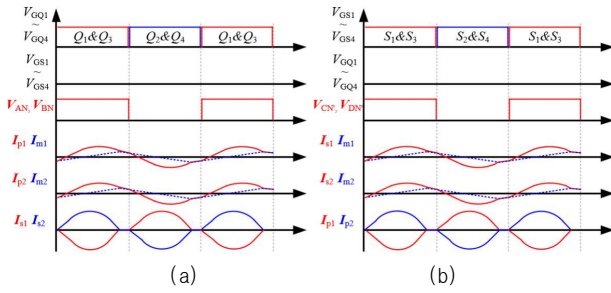


그림 3 (a) 충전 모드 및 (b) 방전 모드 동작 파형
Fig. 3 Operating waveforms of (a) charging and (b) discharging modes

표 1 전기적 사양
Table. 1 Electrical specification

Parameters	Value
입력전압, $U_{DC-Link}$	360[V]
배터리 전압, U_{Batt}	250~450[V]
출력 전력, P_{out}	450~3600[W]

감소한다. 여기서, k 는 결합계수를 의미한다. 따라서 충전 모드에서 Q_1 과 Q_3 가 동시에 On/Off 함으로서 $L_{pr,1}$ 과 $L_{pr,2}$ 의 인덕턴스 값을 생성할 수 있다. 동일한 원리로 방전 모드에서 그림 3 (b)와 같이 2차 측의 $L_{sr,1}$ 과 $L_{sr,2}$ 의 인덕턴스를 생성할 수 있다.

$$L_{pr,1}' = (1+k)L_{pr,1} \quad (3)$$

$$L_{pr,1}' = (1-k)L_{pr,1} \quad (4)$$

변압기의 경우 기존 변압기 권선법과 다르게 구성하여 Q_1 과 Q_3 가 동시에 On/Off 하는 충전 모드에서는 2차 측 전류 $I_{sr,1}$ 과 $I_{sr,2}$ 는 역상으로 흐르게 된다. 이에 따라 k 가 1인 이상적인 경우, $L_{sr,1}$ 과 $L_{sr,2}$ 의 인덕턴스는 제거된다. 방전모드에서도 동일한 원리가 적용된다. 따라서 충전 모드에서 $L_{pr,1}$ 및 $L_{pr,2}$ 는 $C_{pr,1}$ 및 $C_{pr,2}$ 와 각각 공진 네트워크를 구성하고, 방전모드에서 $L_{sr,1}$ 및 $L_{sr,2}$ 는 $C_{sr,1}$ 및 $C_{sr,2}$ 와 각각 공진 네트워크를 구성한다. 이와 같이 충전 모드에 따라 PWM 신호를 변경하여 1, 2 차 측의 공진 네트워크가 독립적으로 동작될 수 있다.

2.2 실험결과

제안한 양방향 LLC 공진형 컨버터의 타당성을 검증하기 위해 표 1과 같은 전기적 사양에서 3.6kW 급 프로토타입을 제작하여 실험을 진행한다. 그림 4는 충전 및 방전 모드에서 $U_{DC-Link}=360V$, 배터리 전압 $U_{Batt}=450V$ 및 출력 전력 $P_{out}=3600W$ 조건에서의 실험 파형을 보여준다. 그림 4와 같이 두 조건 모두 zero voltage switching을 통해 소프트 스위칭 조건을 만족하는 것을 알 수 있다. 그림 5 (a)와 (b)는 충전 및 방전 모드에서 제안된 양방향 LLC 공진형 컨버터 및 기존 CLLC 공진형 컨버터의 측정된 효율 그래프를 보여준다. 보이는 바와 같이 방전모드의 특정 부하조건을 제외하고 전반적인 부하 조건에서 제안하는 양방향 LLC 공진형 컨버터는 기존 CLLC 공진형 컨버터보다 높은 효율을 갖는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 충전 및 방전 모드에 따라 PWM 변조방식을 변

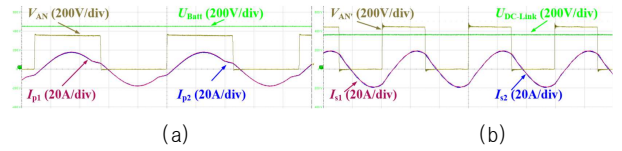
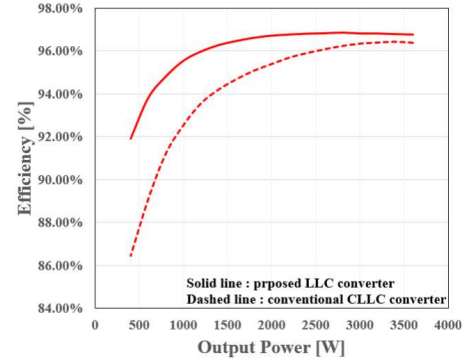
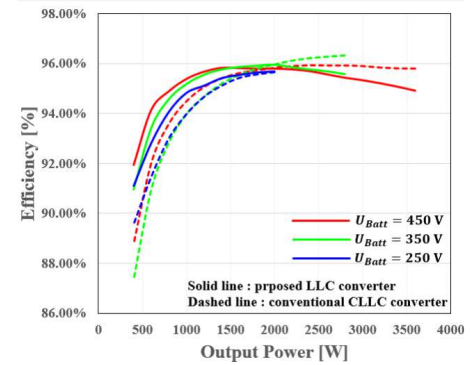


그림 4 정격 조건에서 제안하는 컨버터의 실험 파형 (a) 충전모드 (b) 방전모드
Fig. 4 Experimental waveforms of (a) charging and (b) discharging modes at rated output power



(a)



(b)

그림 5 측정된 컨버터의 효율 (a) 충전 모드, (b) 방전 모드
Fig. 5 Measured efficiency of converter (a) charging, (b) discharging

경하여 1, 2차 측의 공진 네트워크가 독립적으로 동작할 수 있는 양방향 LLC 공진형 컨버터를 제안하였다. 제안한 양방향 LLC 공진형 컨버터는 PWM 변조방식에 따라 변압기의 권선 및 커플드 인덕터 기반의 공진 인덕턴스가 변경되어 1, 2차 측의 공진네트워크를 독립적으로 동작시킨다. 실험결과, 제안한 양방향 LLC 공진형 컨버터는 기존 CLLC 공진형 컨버터에 비해 전반적인 부하 조건에서 향상된 효율을 갖는 것을 확인하였다.

본 연구는 2023년도 한국산업기술평가관리원의 자동차산업기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20018829)

참 고 문 헌

- [1] V.Monteiro, J. G. Pinto, and J. L. Afonso, "Operation modes for the electric vehicle in smart grids and smart homes: Present and proposed modes," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 65, no. 3, pp. 1007 - 1020, Mar. 2016.