

11kW 양방향 충전기를 위한 CLLLC 공진 컨버터 설계

이우석, 이상연, 최승원, 이준영, 이일운[†]
 명지대학교

Design of CLLLC Resonant converter for 11kW Bidirectional Charger

Woo-Seok Lee, Sang-Youn Lee, Seung-Won Choi, Jun-Young Lee, and Il-Oun Lee[†]
 Myongji University

ABSTRACT

본 논문은 11kW급 양방향 탑재형 충전기를 위한 CLLLC 공진 컨버터 설계에 대하여 발표한다. CLLLC 공진 컨버터의 공진 탱크 설계하였으며, 고효율화를 위하여 SiC-MOSFET을 사용하고, 배터리 전압에 따라 링크전압 가변 알고리즘과 동기 정류기를 적용하였다. 그 결과를 바탕으로 프로토타입을 제작하여 실험한 결과를 발표한다.

1. 서론

대기 오염, 지구 온난화, 화석연료 부족 등과 같은 에너지 문제가 대두됨에 따라 전기자동차(Electric Vehicles, EV) 및 플러그인 하이브리드 자동차(Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEVs)의 관심이 증가하고 있으며, 주행거리를 향상을 위하여 배터리 용량이 증가하고 있다. 이러한 배터리 용량이 증가함으로써 배터리가 스마트 그리드의 에너지 저장장치의 역할을 대체할 수 있어 단순히 EV/PHEVs 배터리를 충전하는 탑재형 충전기(On-Board Charger, OBC)의 역할만 하는 것이 아니라 배터리에서 계통으로 에너지를 내보낼 수 있는 Vehicle to Grid(V2G)의 역할이 가능한 양방향 OBC에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^[1-2]

본 논문에서는 OBC의 양방향 동작을 위하여 양방향 동작이 가능한 11kW급 양방향 CLLLC 공진 컨버터의 전압 이득 특성을 분석하고, 고효율을 위한 동작 방안을 제안하고 시제품 제작하여 그 타당성을 검증한 결과를 발표한다.

2. CLLLC 공진 컨버터

2.1 CLLLC 공진 컨버터 구조 및 장점

그림 1은 CLLLC 공진 컨버터 구조를 보여준다. CLLLC 공진 컨버터의 구조는 1차측 풀브리지 인버터부, 1차측 공진탱크, 2차측 공진탱크, 2차측 풀브리지 인버터부로 구성된다.

CLLLC 공진 컨버터의 장점은 1차측과 2차측에 공진탱크가 존재하고 있어 양방향 전력전달은 쉽게 할 수 있다. CLLLC 공진 컨버터는 일반적인 LLC 공진형 컨버터와 유사하게 동작하며, 전부하 구간에서 영전압 스위칭(Zero-Voltage Switching)을 통하여 스위칭 손실을 감소시킬 수 있어, 고주파 동작이 가능하여 고전력밀도화에 유리하다.

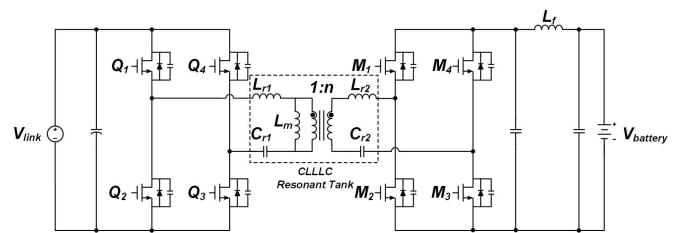


그림 1 CLLLC 공진 컨버터 회로도

2.2 CLLLC 공진 컨버터 전압 이득

CLLLC 공진 컨버터의 전압 이득은 기본 고조파 근사법(Fundamental Harmonic Approximation, FHA)을 이용하여 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 이를 통하여 CLLLC 공진 컨버터의 전압 이득식을 계산하면 충전모드는 수식(1), 방전모드는 수식(2)로 나타낼 수 있다.

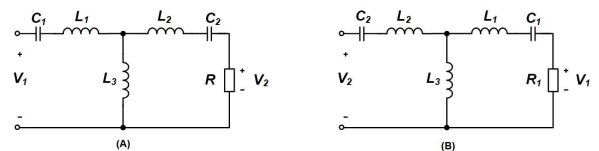


그림 2 CLLLC 공진 컨버터 FHA 등가회로
 (A) 충전모드 등가회로, (B) 방전모드 등가회로

$$\left| \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} \right| = \frac{A}{\sqrt{B^2 + C^2}} \quad (1)$$

$$\left| \frac{V_1(j\omega)}{V_2(j\omega)} \right| = \frac{A_R}{\sqrt{B_R^2 + C_R^2}} \quad (2)$$

$$A = A_R = \omega^3 C_1 C_2 L_3 R$$

$$B = B_R = \omega^4 (L_1 L_2 C_1 C_2 + L_1 L_3 C_1 C_2 + L_2 L_3 C_1 C_2) - \omega^2 (L_2 C_2 + L_3 C_2 + L_3 C_1 + L_1 C_1) + 1$$

$$C = \omega C_2 R - \omega^3 (L_1 C_1 C_2 R + L_3 C_1 C_2 R)$$

$$C_R = \omega C_1 R - \omega^3 (L_2 C_1 C_2 R + L_3 C_1 C_2 R)$$

$$C_1 = C_{r1}, C_2 = n^2 C_{r2}, V_1 = V_{link}, V_2 = V_{battery}, L_1 = L_{r1}, L_2 = L_{r1}/n^2, L_3 = L_m$$

$$R = \frac{8}{n^2 \pi^2} R_o, R_1 = \frac{8}{\pi^2} R_o$$

충전모드와 방전모드에서 공진 탱크의 구조는 대칭이지만 등가회로의 구성 요소가 달라 각 모드의 전압 게인 특성이 다르다. 그림 3은 위의 전압 이득 수식을 이용하여 표1을 바탕으로 충전모드와 방전모드의 전압이득 곡선을 보여준다. 그림

3(A)는 충전모드의 전압이득 곡선으로 공진주파수와 스위칭 주파수가 일치하는 138kHz 구간에서 전압 이득이 1이 되며, 최소 스위칭 주파수 80kHz까지 스위칭 주파수를 사용하여 최대 전압 이득은 1.8까지 사용한다. 그림 3(B)는 방전모드의 전압이득 곡선으로 공진주파수와 스위칭 주파수가 일치하는 127kHz 구간에서 전압 이득이 1이 되며, 최소 스위칭 주파수 80kHz까지 스위칭 주파수를 사용하여 최대 전압 이득은 1.5까지 사용한다.

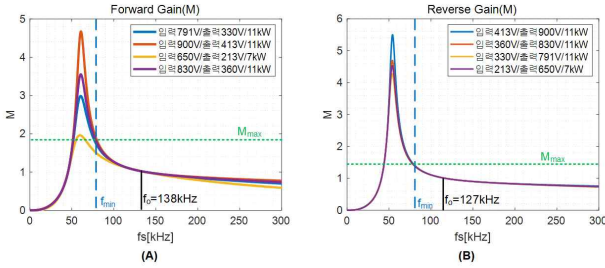


그림 3 CLLC 공진형 컨버터의 전압 이득
(A) 충전모드 전압 이득 곡선, (B) 방전모드 전압 이득 곡선

2.3 CLLC 공진 컨버터 설계

2.3.1 공진 파라미터 설계

CLLC 공진 컨버터의 공진 파라미터를 설계하기 위하여 우선 변압기의 턴비를 결정한다. 턴비는 CLLC 공진 컨버터가 공진주파수에서 동작할 때 최소의 순환전류, ZVS 동작을 보장하여 최대 효율을 달성할 수 있다. 따라서 변압기 턴비는 입력 전압과 nominal 배터리 전압으로 계산되며, 그림4의 링크 전압 가변 알고리즘을 고려하여 수식(3)과 같이 계산된다.

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{in}}{V_{bat,nom}} = \frac{791}{330} \approx 2.4 \quad (3)$$

변압기 턴비가 결정되면 다음은 공진주파수를 선정한다. 공진주파수는 스위칭 주파수 동작 범위와 스위칭 손실을 고려하여 140kHz로 설계하였으며, 수식(4)를 통하여 계산되며, 1차측 공진 파라미터는 인덕터는 24μH, 캐패시터는 55nF으로 설계하였다. 2차측 공진 파라미터는 1차측과 대칭 구조가 되도록 설계하며, 수식(5)와 같이 계산된다.

ZVS 동작을 보장하기 위하여 자화 인덕턴스(L_m)를 설계한다. 자화 인덕턴스의 최대값은 수식(6)을 통하여 계산되며, 본 논문에서는 100μH를 사용하였다.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{r1}C_{r1}}} \quad (4)$$

$$L_{r2} = \frac{L_{r1}}{n^2}, C_{r2} = n^2C_{r1} \quad (5)$$

$$L_m \leq \frac{t_d T_s}{8C_{oss}} \quad (6)$$

2.3.2 링크전압 가변 알고리즘 및 제어알고리즘

CLLC 공진 컨버터의 공진주파수와 스위칭 주파수가 같은 조건일 때, 스위치의 Turn-off 손실이 최소화가 되며, 가장 높은 효율로 동작한다. 일반적인 CLLC 공진 컨버터의 경우 링크 전압이 고정되어있고, 넓은 배터리 전압 범위를 만족시키기 위하여 넓은 스위칭 주파수 가변 범위를 가지게 된다. 이 경우 공진주파수 영역에서 멀어지게 되어 Turn-off 손실이 증가하며, 스위칭 주파수의 증가로 스위칭 손실이 증가하게 된다.

위 문제를 개선하기 위하여 배터리 전압에 따라 링크 전압 가변 알고리즘을 적용하여 CLLC 공진 컨버터가 항상 공진주

파수 영역에서 동작하도록 하였다. 본 논문에서 그림 4와 같이 배터리 전압 213V~413V에서 CLLC 공진 컨버터의 스위칭 주파수가 공진주파수 영역에서 동작하도록 링크 전압을 선형적으로 650V~900V로 가변하도록 하였다.

충전모드 제어알고리즘은 배터리 전류, 전압을 제어함으로써, CC-CP-CV로 충전하도록 제어알고리즘을 구현하고 5kW 이상의 부하 조건에서 동기 정류기 동작을 하도록 하였으며, 스위칭 주파수는 80~300kHz 범위로 제한하였다.

방전모드 제어알고리즘은 배터리 전압에 따라 링크전압 지령을 650~900V까지 지령이 입력되고, 5kW 이상의 부하 조건에서 동기 정류기 동작을 하도록 하였으며, 스위칭 주파수는 80~300kHz 범위로 제한하였다.

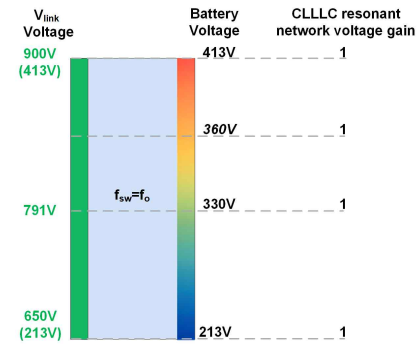


그림 4 링크 전압 가변 알고리즘

2.3.3 반도체 소자 설계

CLLC 공진 컨버터의 반도체 소자 설계는 1차측 스위치의 절리는 전압 스트레스는 900V이며, RMS 전류는 13A, Peak 전류는 25A이다. 2차측 스위치의 절리는 전압 스트레스는 413V이며, RMS 전류는 25A, Peak 전류는 50A이다. 이를 바탕으로 스위치의 전압 스트레스 90% 마진, RMS 전류 50% 마진, Peak 전류의 70% 마진을 가지고 반도체 소자를 선정하였다.

2.3.4 손실분석

표 1의 설계 사양을 바탕으로 CLLC 공진 컨버터의 손실분석을 진행하여 손실과 효율을 예측하였다. 그림 5는 입력 900V, 출력 413V, 11kW 부하 조건에서 손실분석 결과를 보여준다. 손실분석 결과 총 270W의 손실이 발생하며, 예측효율은 97.6% 효율이 예측된다.



그림 5 입력 900V, 출력 413V, 11kW 부하 조건 손실분석 결과

3. 실험 결과

CLLC 공진 컨버터의 설계 사양은 표 1과 같다. 그림 6은 CLLC 공진 컨버터의 충전모드 입력 900V, 출력 413V, 출력 11kW 부하 조건, 방전모드 입력 413V, 출력 900V, 출력 11kW 부하 조건의 주요 동작 파형을 보여준다. (A) 1차측 공진전류, 2차측 공진전류, 1차측 스위치 Q₂V_{DS} 파형, 입력전압을 보여주고, (B) 1차측 공진전류, 2차측 공진전류, 2차측 스위치 M₂V_{DS} 파형, 배터리전압 보여준다. 주요 동작파형을 통하여 CLLC 공진 컨버터가 충·방전모드에서 정상적으로 동작하는 것을 확

인 할 수 있으며, ZVS 동작을 확인 할 수 있다.

그림 7은 충·방전모드 효율데이터로 충전모드에서 95.73%, 방전모드에서 96.51% 효율을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

표 1 CLLC 공진 컨버터의 설계 사양 및 사용한 부품

Major ratings	Output Power	11kW
	Input Voltage(V_{link})	650 ~ 900VDC
	Output Voltage(V_O)	213 ~ 413VDC
Devices	Primary Switches ($Q_1 \sim Q_4$)	SCTWA50N120(1200V/50A@100°C)
	Secondary Switches ($M_1 \sim M_4$)	SCT3030AL(650V/49A@100°C)
Transformer(T_1)		(2.4T:1T) L_m :100 μ H L_{lk} :3.62 μ H
Resonant Inductor(L_{r1}, L_{r2})		L_{r1} : 20 μ H L_{r2} : 5.46 μ H
Resonant Cap(C_{r1}, C_{r2})		55nF / 300nF
Output filter inductor		50 μ H
Output filter capacitor		2.2 μ F
Switching frequency		80~300kHz
Resonant frequency		138kHz / 127kHz

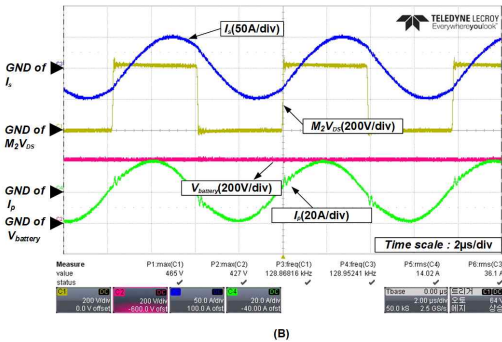
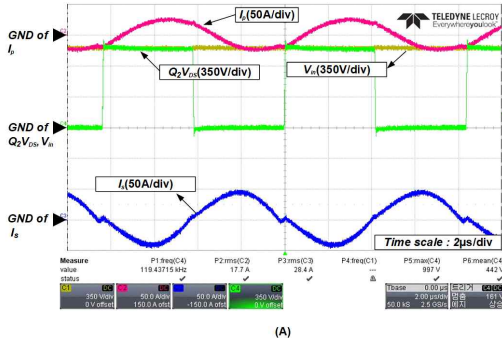


그림 6 주요 동작 파형 (A) 충전모드 입력:900V, 출력:413V, 출력: 11kW 조건 동작 파형, (B) 방전모드 입력:413V, 출력:900V, 출력 11kW 조건 동작 파형



그림 7 효율 데이터 (A) 충전모드 입력:900V, 출력:413V, 출력: 11kW 조건 효율 데이터 (B) 방전모드 입력:413V, 출력:900V, 출력 11kW 조건 효율 데이터

그림 8는 CLLC 공진 컨버터의 충전모드 CC-CP-CV 충전

구간의 효율을 보여준다. CC-CP 구간에서 94% 이상의 효율을 달성하며, CV 구간에서는 입력 900V, 출력 413V, 11kW 부하 조건에서 최대 효율은 97.53% 달성하며, 전부하 구간에서 85% 이상의 효율로 동작한다.

그림 9는 CLLC 공진 컨버터의 방전모드의 출력전압 및 부하별 효율 보여준다. 배터리전압 413V, 출력전압 900V 11kW 부하 조건에서 최대 96.51% 효율을 달성하고, 배터리 전압 213V~413V 조건에서 전부하 구간에서 81% 이상의 효율로 동작하며, 또한 배터리 전압에 상관없이 일정한 효율범위에서 동작하는 것을 확인할 수 있다.

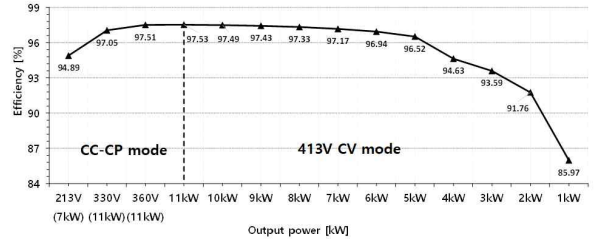


그림 8 충전모드 CC-CP-CV 효율 그래프

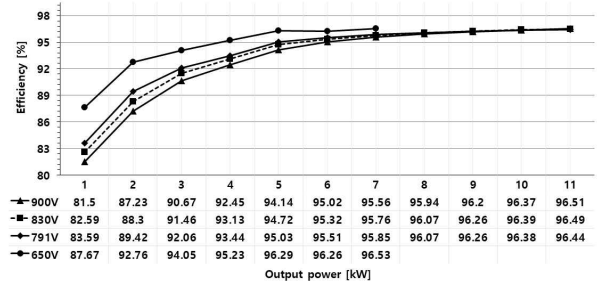


그림 9 방전모드 출력전압 및 부하별 효율 그래프

4. 결론

본 논문에서는 11kW급 양방향 충전기를 위한 CLLC 공진 컨버터 설계에 관하여 기술하였으며, 고효율화를 위하여 링크전압 가변 알고리즘과 동기 정류기를 적용하여, 11kW급 프로토타입을 제작하여 성능을 검증하였다. 충전모드에서 출력전압 413V, 11kW 부하 조건에서 최대 97.53% 효율을 달성하고, 전부하 구간에서 85% 이상의 효율로 동작하는 것을 확인하였으며, 방전모드에서 배터리전압 413V, 11kW 출력조건에서 최대 96.51% 효율을 달성함을 확인하고, 모든 배터리 전압에서 81% 이상의 효율로 동작하는 것을 확인하였다. 향후 고효율의 양방향 탑재형 충전기에 고효율화를 위한 방안으로 링크 전압 가변 알고리즘과 동기 정류기를 사용한 CLLC 공진형 컨버터가 타당한 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 오재성, 김민지, 이준환, 우정원, 김은수, 원종섭. (2019). V2G EV 충전기(OBC)를 위한 개선된 고효율 양방향 공진컨버터. 전력전자학회논문지, 24(6), 438-444.
- [2] 추경민, 원일권, 김도윤, 김영렬, 원종연. (2016). V2G를 고려한 전기자동차용 11kW급 OBC의 설계. 전력전자학회 학술대회 논문집, (), 71-72.