

CLLLC 기반 25kW급 양방향 급속충전기 DC/DC 전력 모듈 최적 설계 방법

염정원¹⁾, 정한빛¹⁾, 윤광식¹⁾, 정승민¹⁾, 임창민¹⁾, 이일운^{1†}
명지대학교¹⁾

Optimal Design Method for a 25kW Bidirectional Fast Charger DC/DC Power Module Based on CLLLC

Jeong-Won Yeom, Han-Bit Jeong, Gwang-Sik Yun, Seung-Min Chung, Chang-Min Lim
and Il-Oun Lee
Myongji University

ABSTRACT

본 논문은 CLLLC 기반 25kW급 양방향 급속충전기 DC/DC 전력 모듈 최적 설계 방법에 대해 발표한다. 전력 모듈은 12.5kW급 CLLLC 공진형 컨버터 2개로 구성된다. 두 CLLLC 공진형 컨버터의 1차측 풀브리지는 병렬로 결선되어 있으며, 2차측 풀브리지는 출력전압 조건에 따라 직·병렬로 결선된다. 각 12.5kW급 CLLLC 공진형 컨버터는 변압기 1개와 1차측 공진 인덕터 2개, 2차측 공진인덕터 2개로 구성되어 있고, 높은 효율을 위해 공진주파수 부근에서 동작하도록 설계되었다. 자성체들은 크기, 손실을 고려하여 설계되었고, Ansys 소프트웨어를 활용하여 열적 스트레스 분석, 냉각 성능을 고려하여 선정되었다.

1. 서론

최근 풍력, 태양광, 수력 등 재생에너지 비중이 높아지면서 재생에너지가 가지는 간헐성 문제를 해결하기 위해 대규모 ESS와 같은 유연성 자원의 필요성이 커지고 있다.

따라서 전기자동차를 이동형 ESS(Energy Storage System)로 사용하기 위해 전기자동차에 V2G (Vehicle to Grid) 기술탑재를 의무화하는 법안이 발의되고 있다. 이를 위해 전기자동차 충전기도 양방향 동작이 가능하게 되어야 한다. 또한 전기자동차의 배터리 전압 범위가 차량 제조사에 따라 다르기 때문에 전기자동차 충전기는 넓은 출력전압 범위를 필요로 한다. 이를 위해 입력전압 600-900V, 출력전압 200-1000V, 25kW급 CLLLC 기반 양방향 급속충전기 DC/DC 모듈 최적 설계 방법에 대해 발표한다.

2. 25kW급 DC/DC 모듈

2.1 25kW급 DC/DC 전력 모듈 구성

그림 1은 본 논문에서 발표하는 25kW급 DC/DC 전력 모듈을 나타낸다. 전력 모듈은 12.5kW급 CLLLC 공진형 컨버터로 2개로 구성된다. 두 CLLLC 공진형 컨버터의 1차측 풀브리지는 병렬로 배치되어 있다. 2차측 풀브리지는 출력전압에 따라 직·병렬로 결선된다. CLLLC 공진형 컨버터가 공진주파수 부근에서 동작할 수 있도록 출력전압에 따라 입력전압이 600-900V로 가변되도록 하였다.

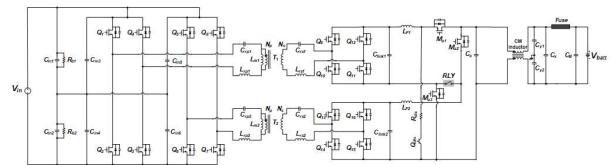


그림 1. 25kW급 DC/DC 전력 모듈

2.2 25kW급 DC/DC 전력 모듈 동작 모드

25kW급 DC/DC 전력 모듈의 출력전압에 따라 직렬 혹은 병렬로 결선된다.

그림 2(a)는 출력전압이 200-550V일 때 2차측 결선을 나타낸다. M_{k2} , M_{k3} 가 도통되고, RLY가 개방되어 2차측이 병렬로 결선된다.

그림 2(b)는 출력전압이 550-1000V일 때 2차측 결선을 나타낸다. M_{k2} , M_{k3} 가 개방되고, RLY가 도통되어 2차측이 직렬로 결선된다.

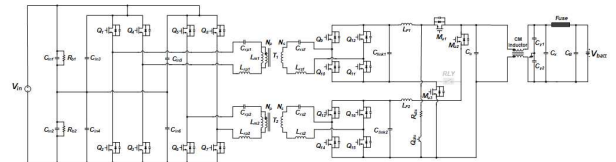


그림 2(a). 출력전압이 550V 미만일 때 2차측 결선

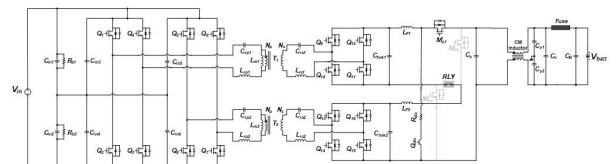


그림 2(b). 출력전압이 550V 이상일 때 2차측 결선

2.3 CLLLC 공진형 컨버터 설계

2.3.1 CLLLC 공진형 컨버터 공진 파라미터 설계

식 (1)은 $f_{sw}=f_0$ 일 때 정방향 이득을 나타낸 수식이고, 식 (2)는 $f_{sw}=f_0$ 일 때 역방향 이득을 나타낸 수식이다.

그림 3(a)는 전력 모듈의 정방향 등가회로이다. 이 회로를 통해 도출된 공진탱크 전압 이득 수식은 식 (3)과 같다.

그림 3(b)는 전력 모듈 역방향 등가회로이다. 이 회로를 통해 도출된 공진탱크 전압 이득 수식은 식 (4)와 같다

$$V_{batt(low)} = \frac{N_S}{N_P} V_{in} = \frac{V_{in}}{n}, \quad V_{batt(high)} = \frac{N_S}{2} V_{in} = \frac{N_S}{N_P} V_{in} = \frac{V_{in}}{n} \quad (1)$$

$$V_{in} = n V_{batt(low)}, V_{in} = \frac{n V_{batt(high)}}{2} \quad (2)$$

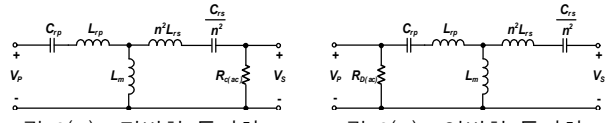


그림 3(a). 정방향 등가회로 그림 3(b). 역방향 등가회로

$$\frac{n V_S}{V_P} = M_{charging} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c^2 + \beta_c^2}} \quad (3)$$

$$\frac{V_P}{n V_S} = M_{discharging} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_D^2 + \beta_D^2}} \quad (4)$$

$$k = \frac{L_m}{L_r}, Z_O = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}, f_n = \frac{f_{sw}}{f_o}$$

$$R_{c(ac)} = \frac{16n^2}{\pi^2} \cdot \frac{V_{batt}^2}{P_O}, V_S = V_{batt} \quad (2\text{차측 병렬 결선})$$

$$R_{c(ac)} = \frac{4n^2}{\pi^2} \cdot \frac{V_{batt}^2}{P_O}, V_S = \frac{V_{batt}}{2} \quad (2\text{차측 직렬 결선})$$

$$R_{D(ac)} = \frac{16n^2}{\pi^2} \cdot \frac{V_{in}^2}{P_O}$$

$$\alpha_c = \frac{1}{k} \left(1 - \frac{1}{f_n^2}\right) + 1$$

$$\beta_c = Q_c \left[f_n \left(1 + a + \frac{a}{k}\right) - \frac{1}{f_n} \left(1 + a + \frac{2a}{k}\right) + \frac{a}{k f_n^3} \right]$$

$$\alpha_D = \frac{a}{k} \left(1 - \frac{1}{f_n^2}\right) + 1$$

$$\beta_D = Q_c \left[f_n \left(1 + a + \frac{a}{k}\right) - \frac{1}{f_n} \left(1 + a + \frac{2a}{k}\right) + \frac{a}{k f_n^3} \right]$$

그림 4(a)는 위 수식을 통해 얻어진 정방향 전압 이득 곡선이다. 2차측 결선 상태에 따라 이득 곡선이 달라지지만 최소주파수와 최대주파수는 병렬 결선 시에 나타난다. 최소주파수는 74kHz이고 최고주파수는 128kHz이다. 공진주파수는 동작 범위를 고려하여 100kHz로 선정하였다.

그림 4(b)는 역방향 전압 이득 곡선이다. 역방향 동작 시 2차측 결선 상태에 따라 전압 이득이 변하지 않는다. 이때 최소주파수는 42kHz, 최대주파수는 100kHz이다.

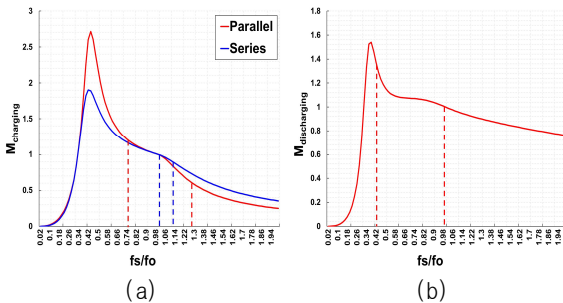


그림 4. (a) 정방향 전압 이득 곡선, (b) 역방향 전압 이득 곡선

표 1. CLLC 공진형 컨버터 공진 파라미터 설계 결과

n	1.8	f _o	100kHz
L _m	100μH	L _{rp}	25μH
L _{rs}	6.944μH	C _{rp}	101.424nF
C _{rs}	365.126nF	-	-

2.3.2 변압기 설계

변압기는 12.5kW급으로 EE7055 코어를 3적층하고, 1차측은 11turns, 2차측은 6turns으로 설계하였다. 변압기 코일에서 발생하는 열을 냉각시키기 위해 코어 사이에 3mm의 간격을 주었고, Ansys 소프트웨어를 활용하여 코일 온도가 110°C 이하로 유지되도록 변압기를 배치하였다.

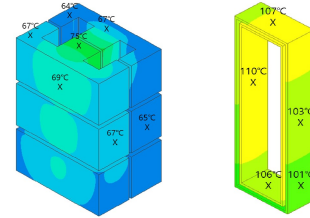


그림 5. 변압기 코어 및 코일 온도

2.3.3 공진인덕터 설계

1차측 공진인덕터는 10μH 인덕터 2개를 직렬 결선하여 구성하였고, 2차측 공진인덕터는 3.47μH 인덕터 2개를 직렬 결선하여 구성하였다. Ansys 소프트웨어를 활용하여 코일 온도가 130°C 이하로 유지되도록 1차, 2차측 공진인덕터를 배치하였다.

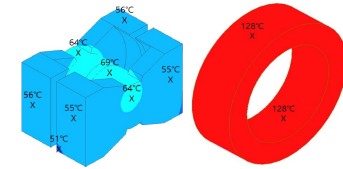


그림 6. 1차측 공진인덕터 코어 및 코일 온도

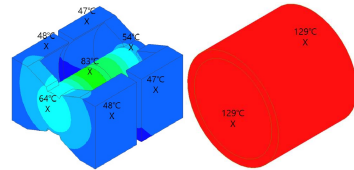


그림 7. 2차측 공진인덕터 코어 및 코일 온도

3. 결론

본 논문에서는 입력전압 600-900V, 출력전압 200-1000V, 25kW급 CLLC 기반 양방향 급속충전기 DC/DC 모듈 최적 설계 방법에 대해 발표하였다. CLLC 공진형 컨버터 파라미터는 컨버터가 공진주파수 근처에서 동작할 수 있도록 설계되었고, 설계된 자성체는 Ansys 소프트웨어를 통해 검증되었다. 추후 프로토타입을 통해 타당성을 확보할 예정이다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술기획평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)(No. 20019073, 차량용 모듈러형 고집도 전력모듈 및 고전력밀도 전력변환 적용기술 개발)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] Z. U. Zahid, Z. M. Dalala, R. Chen, B. Chen and J. -S. Lai, "Design of Bidirectional DC - DC Resonant Converter for Vehicle-to-Grid (V2G) Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, pp. 232-244, Oct. 2015
- [2] Sang-Youm Lee, Woo-Seok Lee, Jun-Young Lee, & Il-Oun Lee (2021). Performance of an SiC-MOSFET Based 11-kW Bi-directional On-board Charger. THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, 26(5), 376-379.