

탑재형 충전기용 듀얼 변압기 양방향 공진형 컨버터 설계

권유경, 김준호
계명대학교

Design of dual transformer bidirectional resonant converter for On-Board Charger

Yu-Gyeong Gwon, and Jun-ho Kim
Keimyung University

ABSTRACT

본 논문에서는 양방향 동작을 고려한 CLLC 컨버터의 설계 기법을 제안하고자 한다. 직렬-병렬 연결된 2개의 변압기를 이용한 구조에서 변압기의 누설 인덕턴스를 이용한 공진 탱크의 설계와 1차측과 2차측에 위치한 커패시터의 용량 간 차이가 존재하는 조건에서 공진형 컨버터의 설계를 보완하기 위한 공진 주파수와 전압 이득의 수식을 새롭게 정의한다. 출력 11kW급 (500V-850V, 15.7A Max.) 양방향 탑재형 충전기(On-Board Charger, OBC)용 DC-DC 컨버터를 대상으로 제안하는 설계 기법의 타당성을 시뮬레이션으로 검증한다.

1. 서론

최근 전기자동차의 배터리를 에너지 저장장치로써 활용하는 방안으로 배터리의 전력을 그리드 또는 독립형 부하를 지원하는데 사용하는 V2G, V2L와 같은 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 양방향 전력 흐름이 가능한 OBC의 필요성이 대두되고 있으며, 이를 위한 양방향 DC/DC 컨버터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다^{[1],[2]}.

양방향 동작이 가능한 대표적인 토폴로지로서 CLLC 공진형 컨버터가 있다. 해당 구조는 Zero Voltage Switching(ZVS) 동작으로 고효율 달성이 가능한 장점이 있으나 제한된 전압 이득 범위를 가지며 대전류 출력 조건에서 최대 전압 이득이 낮아지는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 2개의 변압기를 series-parallel로 연결한 CLLC 토폴로지를 이용하여 OBC의 출력 전류를 분할함으로써 요구 전압 이득을 확보할 수 있는 구조에서 양방향 동작 조건을 고려한 턴 비 설계와 변압기의 누설 인덕턴스를 이용한 공진 탱크 설계 방안을 제안한다. 제안하는 설계 기법을 활용하여 출력 11kW급 (540V-850V, 15.7A Max.) 양방향 컨버터를 설계하고, PSIM을 이용한 시뮬레이션으로 타당성을 검증한다.

2. 설계 기법

2.1 전압 이득

변압기의 자화 및 누설 인덕턴스를 이용하여 공진 탱크를 구성하는 경우, 그림 2와 같이 누설 인덕턴스를 1차측과

2차측으로 나누어 고려하는 조건에서 전압 이득 수식을 유도할 필요가 있다. 사용된 2개의 변압기를 동일하게 설계한다고 가정하면 턴 비(N_p/N_s), 자화 및 누설 인덕턴스의 크기를 동일하게 생각할 수 있다. 즉, $L_m=L_{m1}=L_{m2}$, $L_{lkp}=L_{lkp1}=L_{lkp2}$, $L_{lks}=L_{lks1}=L_{lks2}$ 로 가정한다. 또한 하나의 변압기만을 고려할 때, 1차측의 전압은 입력 전압의 절반이 되고 2차측의 전류가 절반이 된다. L_{lkp} 에 의한 공진 주파수는 1차측 공진 커패시터($C_{r,pri}$)의 2배 용량과의 공진이며, L_{lks} 에 의한 공진 주파수는 2차측 공진 커패시터($C_{r,sec}$)의 절반 용량과의 공진으로 파악할 수 있다.

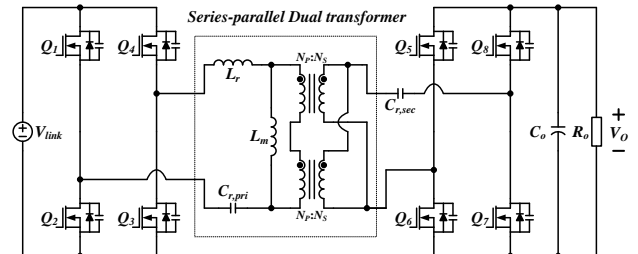


그림1 직렬-병렬 연결된 변압기를 사용한 양방향 CLLC 토폴로지
Fig. 1. Bidirectional CLLC topology with two transformer connected series-parallel

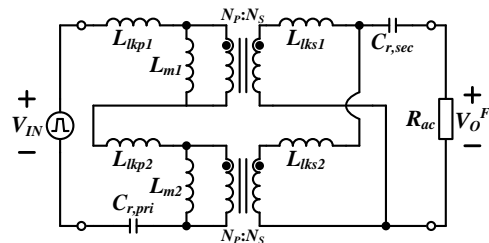


그림2 변압기 내부 파라미터를 고려한 공진 탱크
Fig. 2. Resonant tank with internal parameter of transformer

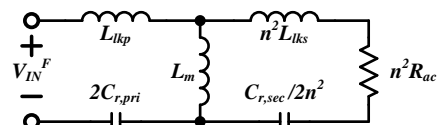


그림3 공진 탱크 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of resonant tank

FHA 기법을 통해 구한 등가 회로는 그림 3과 같다. 이를 통해 유도한 충전 방향에서의 전압 이득은 수식(1)과 같다.

$$M_v = \frac{nV_o^F}{V_{in}^F} = \frac{m_1}{\sqrt{\left(1+m_1-\frac{f_{r1}^2}{f_s^2}\right)^2 + \left(m_1Q\frac{f_s}{f_{r1}}\right)^2 \left[1-\frac{f_{r1}^2}{f_s^2} + \frac{1}{m_2}\left(1+m_1-\frac{f_{r1}^2}{f_s^2}\right)\left(1-\frac{f_{r2}^2}{f_s^2}\right)\right]^2}} \quad (1)$$

여기에서 사용된 파라미터는 아래와 같이 정의한다.

$$n = \frac{N_p}{N_s} \quad m_1 = \frac{L_m}{L_{lkp}} \quad m_2 = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2 \frac{L_m}{L_{lks}} \quad R_{ac}^e = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \frac{8R_o}{\pi^2}$$

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_{lkp}C_{r, pri}}} \quad f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.5L_{lks}C_{r, sec}}} \quad Q = \frac{1}{R_{ac}^e} \sqrt{\frac{L_{lkp}}{C_{r, pri}}}$$

수식으로부터 f_{r1} 과 f_{r2} 가 스위칭 주파수(f_s)와 동일하면 전압 이득(M_v)이 1이 됨을 알 수 있다. 그러므로 방전 동작 시에도 공진점에서의 이득은 1임을 알 수 있다.

2.2 컨버터 설계

양방향 컨버터의 설계를 위해서는 방전 동작 환경에 대한 고려가 우선 이루어져야 한다. V2L 기능을 이용해 독립형 부하에 전력을 공급하는 경우, 공급해야 할 전력량은 연결된 장치의 부하로부터 영향을 받으며, 변동성은 예측이 불가능하다. 따라서 DC/DC 컨버터가 방전 동작 시, 부하 변동에 따른 전압 이득의 변화가 최소화되는 공진점에서 동작하는 것이 제어적으로 유리하다. 그러므로 입출력 전압 이득을 고려하여 변압기의 턴 비 선정이 가능하다.

변압기의 자화 인덕턴스는 ZVS 달성 조건을 고려하여 설계 가능하다. 조건은 2가지이며, 첫째로 스위치의 기생 커패시터에 충전된 전하량을 방전시키기에 충분한 전류가 확보되어야 한다. 모든 스위치의 기생 커패시터가 dead time 동안 병렬 연결되며, 스위칭 주파수와 공진 주파수가 동일할 때, 해당 전류가 가장 작게 만들어짐을 고려하여 충분한 전류를 확보할 수 있는 자화 인덕턴스의 최댓값은 수식 (2)와 같이 표현 가능하다. 둘째로 전류의 방향이 dead time 이후에 변경되어야 한다. 공진 전류는 FHA를 적용하여 사인파의 형태로 표현 가능하므로 수식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 수식 (2)와 (3)으로부터 공진 주파수와 자화 인덕턴스가 동시에 설계되어야 함을 알 수 있다. 그리고 ZVS 에너지로 활용되는 전류가 스위치의 역방향 전류가 되어 스위치의 turn-off 스위칭 손실을 야기하므로 자화 인덕턴스는 최댓값으로 선정하는 것이 적합하다.

$$L_{m, max} = \frac{V_{Lm}DT_{dead}}{2(4C_{oss})V_{DS}f_r} = \frac{T_{dead}}{16C_{oss}f_r} \quad (2)$$

$$L_{m, max} = \frac{N_p V_{IN} V_o \left(\frac{0.5}{f_r} - T_{dead} \right)}{\pi P_o \sin(2\pi f_r T_{dead})} \quad (3)$$

여기에서, C_{oss} 는 스위치의 기생 커패시터, f_r 은 공진 주파수, T_{dead} 는 스위치의 dead time, P_o 는 출력 전력이다.

앞선 과정을 통해 변압기의 턴 비(n), 자화 인덕턴스(L_m), 공진 주파수(f_r)의 값을 결정하면, 공진 주파수를 결정짓는 변압기의 스위칭 주파수에 따른 입출력 전압 관계를 파악할 수 있다. 그리고 공진 커패시터($C_{r, pri}$, $C_{r, sec}$)와 누설 인덕턴스(L_{lkp} 와 L_{lks})를 선정함으로써 공진 탱크의 설계가 가능하다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

출력 11kW급의 출력 전압 500V~850V, 최대 출력 전류 15.7A의 양방향 탐재형 충전기용 공진형 컨버터의 파라미터 선정 결과는 표 1과 같다. 턴 비를 선정하기 위하여 배터리의 정격 전압을 720V(500V~850V)로 가정하고, 620V까지 3상 380V로 방전 가능하며, 전영역에서 단상 220V 방전이 가능한 조건을 기준으로 한다. 선정된 파라미터를 이용하여 구한 충전 동작에서 주파수에 따른 출력 전압 그래프는 그림 4와 같다.

시뮬레이션을 통해 충전 동작 시, 각 입출력 조건에서의 주파수를 그림 4에 함께 표기하였을 때, 예상 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 또한 방전 시, 예측한 것과 같이 공진점 동작을 통해 부하 변동에 영향을 받지 않으면서 3상과 단상 방전이 가능한 결과를 보임을 알 수 있다.

표1. C-LLC 컨버터의 파라미터 정보

TABLE1. Parameters for C-LLC converter

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|--------------------------|-----------------|--------------|--------|
| $n (=N_p/N_s)$ | 0.52(12/23) | f_r | 215kHz |
| $L_{lkp} (=n^2 L_{lks})$ | 7.5μH (27.56μH) | $C_{r, pri}$ | 36nF |
| L_m | 35μH | $C_{r, sec}$ | 40nF |

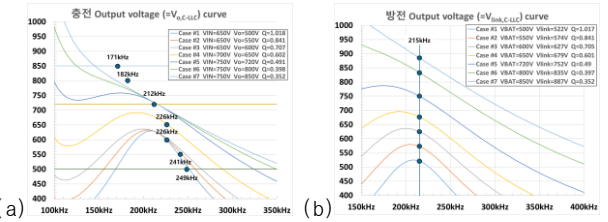


그림4 주파수에 따른 출력 전압 그래프 (a)충전 (b)방전
Fig. 4. Voltage conversion ratio according to frequency (a) charging (b) discharging

4. 결론

본 논문에서는 듀얼 변압기 양방향 공진형 컨버터 설계를 위한 주파수 선정과 변압기 설계 방안을 제안하였다. 이를 위해 변압기의 모델과 전압 이득 곡선을 구하기 위한 수식을 제안하였으며, 방전 가능한 배터리 전압 영역을 고려한 턴 비 설계와 공진 탱크를 구성하는 방안을 제시하였다. 출력 11kW급 시스템을 설계하고 시뮬레이션을 통해 설계 결과를 검토하였다. 향후 보완 연구를 통해 신뢰성을 확보하고자 한다.

이 연구는 한국산업기술기술평가원의 “자동차산업기술개발(그린카)(No. 20024348, 차종별 플렉시블 전력수요 대응이 가능한 모듈화 전력변환장치 기술개발)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

참고 문헌

- [1] Chun-Wei Lin, et al, “Novel Bidirectional On-Board Charger for G2V and V2X Applications on Wide-Range Batteries,” IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics, vol.12, no.2, April 2024
- [2] Hans Wouters, et al, “Bidirectional Onboard Chargers for Electric Vehicles: State-of-the-Art and Future Trends,” IEEE Trans. on Power Electronics, vol.39, no.1, Jan. 2024