

# 11 kW 급 양방향 CLLC 컨버터의 고효율 동작을 위한 공진 네트워크 대칭 설계 및 비대칭 설계에 따른 효율 분석

곽기준, 조현우, 이주아, 심동현, 이병국†  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Efficiency Analysis of Symmetrical/Asymmetrical Resonant Network Design for High-Efficiency Operation of an 11 kW Bidirectional CLLC Converter

Gijun Kwak, Hyeonu Jo, Ju-A Lee, Dong Hyeon Sim, Byoung Kuk Lee  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 11 [kW] 급 양방향 CLLC 컨버터의 고효율 동작을 위하여 공진 네트워크 대칭·비대칭 설계기법에 따른 효율 분석을 진행한다. 이를 위하여 CLLC 컨버터의 등가회로를 바탕으로 공진 네트워크 파라미터 변화에 따른 정·역방향 전압 이득 특성을 분석하고, 각 설계기법에 적합한 공진 네트워크 파라미터를 도출한다. 이후, 시뮬레이션을 통해 각 설계기법에 따른 공진 네트워크의 양방향 동작을 검증하고, 손실 분석을 통하여 고효율 동작에 최적화된 설계 방안을 선정한다.

### 1. 서론

최근 전기자동차의 V2X (Vehicle to everything) 기술에 관한 관심이 높아짐에 따라 on-board charger (OBC)의 양방향 전력 제어에 관한 연구가 진행되고 있다. 기존 OBC의 dc-dc 컨버터로 주로 사용되는 LLC 컨버터의 경우 1차 측에만 공진 네트워크가 존재하여 방전 동작 시 승압이 불가능해 V2X 동작에 활용할 수 있는 배터리 전압 범위가 한정적이다. 반면, 그림 1의 CLLC 컨버터는 2차 측의 공진 네트워크를 활용한 방전 동작에서의 승압이 가능하여 LLC 컨버터보다 넓은 배터리 전압 범위를 활용할 수 있어 V2X 동작에 유리하다<sup>[1]</sup>.

CLLC 컨버터 공진 네트워크의 설계는 공진 네트워크 파라미터의 대칭 여부에 따라 대칭 설계와 비대칭 설계로 구분된다. 대칭 설계에서는 1차 측과 2차 측의 공진 네트워크 파라미터가 동일하며, 1차 측 공진 네트워크 파라미터에 의해 2차 측 파라미터가 결정된다<sup>[2]</sup>. 하지만 OBC와 같이 입출력 전압 범위가 큰 어플리케이션에서 대칭 설계를 적용하는 경우 양방향 동작 시 동작 주파수 범위가 필요 이상으로 증가하여 효율 저하를 유발할 수 있다. 반면, 비대칭 설계는 대칭 설계에 비해 설계 자유도가 높으므로 충·방전 동작 모두를 고려한 전압 이득 곡선 최적화가 가능하며, 이를 통한 동작 주파수 감소로 효율을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 11 [kW] 급 CLLC 컨버터의 대칭·비대칭 설계에 따른 양방향 동작에서의 손실 비교를 통해 고효율 동작에 최적화된 설계기법을 선정한다. 이를 위해 공진 네트워크 파라미터 및 변압기 권선비에 따른 전압 이득 수식을 도출하고, 각 설계기법에 따른 전압 이득 곡선과 동작 주파수 범위를 분석한다. 다음으로 시뮬레이션을 통해 양방향 동작을 검증하고, 설계기법에 따른 효율 분석 및 비교를 진행한다.

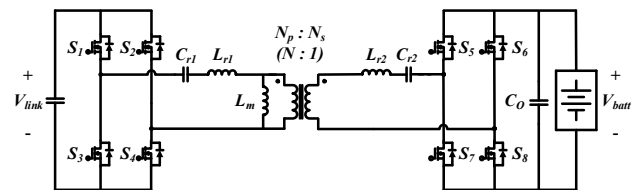


그림 1 CLLC 컨버터 회로도  
 Fig. 1 CLLC converter circuit diagram.

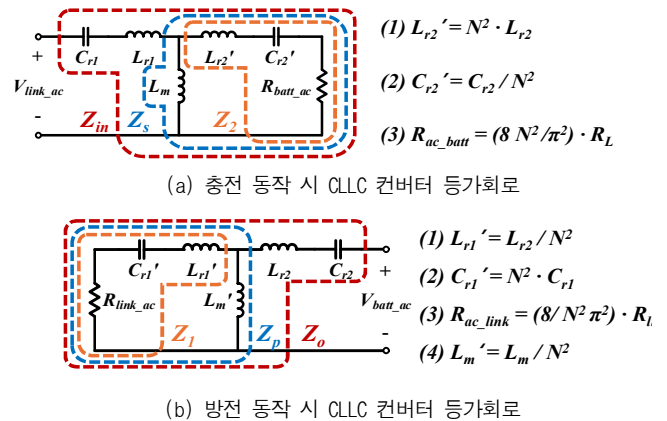
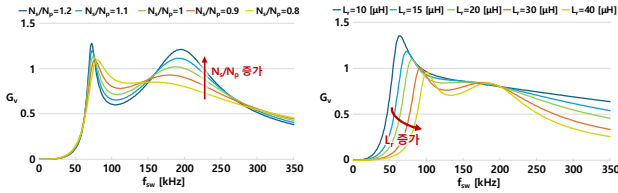


그림 2 충·방전 동작 시 CLLC 컨버터 등가회로 구성  
 Fig. 2 Equivalent circuit of CLLC converter during charging and discharging operation.

## 2. CLLC 컨버터 수식 및 특성 분석

### 2.1 CLLC 컨버터 등가회로 및 전압 이득 수식 도출

CLLC 컨버터는 변압기 권선비에 따라 충·방전 동작 시 1·2차 측으로 환산되는 공진 네트워크 파라미터가 상이하다. 이러한 특성 때문에, CLLC 컨버터의 양방향 동작을 고려하기 위해서는 충·방전 동작 시의 등가회로를 바탕으로 양방향에서의 전압 이득을 모두 고려해야 한다. 그림 2는 기본파 분석 (Fundamental harmonic approximation, FHA)을 기반으로 나타낸 CLLC 컨버터의 등가회로이다. 그림 2-(a)는 충전 동작 시 등가회로를 나타내며, 1차 측 공진 파라미터 ( $L_{r1}$ ,  $C_{r1}$ ), 자화 인덕턴스 ( $L_m$ ), 변압비를 고려한 2차 측 공진 파라미터 ( $L_{r2}'$ ,  $C_{r2}'$ )와 배터리 측 등가 저항 ( $R_{batt,ac}$ )으로 구성된다. 전압 이득 수식을 도출하기 위해, 등가회로 내 임피던스를 변압비를 고려한 2차 측 임피던스( $Z_2$ ), 자화 인덕턴스와 2차 측 임피던스



(a)  $N_p/N_s$  변화에 따른 전압 이득 곡선 (b)  $L_{r1}$ 에 따른 전압 이득 곡선  
 그림 3 공진 네트워크 파라미터에 따른 전압 이득 곡선 변화  
 Fig. 3 Variation of voltage gain curve according to changes of resonant network parameter.

표 1 CLLC 컨버터 설계 조건  
 Table 1 Design specifications of CLLC converter

Parameter	Value	[Unit]
입력 전압, $V_{link}$	680 ~ 800	[V]
출력 전압, $V_{batt}$	320 ~ 826	[V]
출력 전력, $P_o$	7.04 ~ 11	[kW]
공진 주파수, $f_r$	200	[kHz]
최대 출력 전류, $I_{batt,max}$	22	[A]
CC 동작 전압, $V_{CC}$	320 ~ 490	[V]
CP 동작 전압, $V_{CP}$	490 ~ 826	[V]
동작 주파수, $f_{sw}$	100 ~ 300	[kHz]

$$G_{V_{char}} = \frac{V_{batt}}{V_{link}} = \frac{Z_s}{Z_{in}} \cdot \frac{R_{link,ac}}{Z_2} \cdot \frac{1}{N} \quad (1)$$

$$G_{V_{dischar}} = \frac{V_{link}}{V_{batt}} = \frac{Z_p}{Z_o} \cdot \frac{R_{link,ac}}{Z_1} \cdot N \quad (2)$$

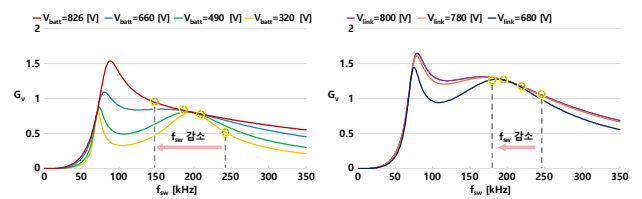
$$L_{r1} = L_{r2}' = N^2 L_{r2}, \quad C_{r1} = C_{r2}' = C_{r2}/N^2 \quad (3)$$

간의 병렬 임피던스 ( $Z_s$ ), 입력 임피던스 ( $Z_{in}$ )로 분류한다. 이때, 전압 분배를 통해 구한 전압 이득식은 식 (1)과 같다. 더불어 그림 2-(b)는 방전 동작 시 CLLC 컨버터의 등가회로를 나타내며 2차 측 공진 파라미터 ( $L_{r2}$ ,  $C_{r2}$ ), 변압비를 고려한 자화 인덕턴스 ( $L_m'$ ) 및 1차 측 공진 파라미터 ( $L_{r1}'$ ,  $C_{r1}'$ ), DC-link 측 등가 저항 ( $R_{link,ac}$ )로 구성된다. 방전 동작 시의 전압 이득은 충전 동작과 유사하게 등가회로 내 임피던스  $Z_1$ ,  $Z_p$ ,  $Z_o$ 를 이용해 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 과정에서 1·2차 측 공진 네트워크 파라미터가 식 (3)을 만족하면 대칭 설계, 만족하지 않으면 비대칭 설계로 분류한다.

## 2.2 공진 네트워크 파라미터 변화에 따른 특성 분석

표 1은 본 논문에서의 CLLC 컨버터 설계 조건을 나타낸다. 본 논문에서 설계하는 CLLC 컨버터는 비대칭적인 입·출력 전압 범위를 만족해야 하며, 이를 위해 적절한 공진 네트워크 파라미터를 선정을 통한 전압 이득 달성이 필요하다. 그림 3-(a)는 변압기 권선비에 따른 충전 동작에서의 전압 이득 곡선의 변화를 보여준다. 2차 측 권선수 ( $N_s$ )가 증가하면 공진 주파수 ( $f_r$ ) 부근에서 권선비에 의한 전압 이득이 증가한다. 또한, 1차 측으로 환산되는  $L_{r2}$ ,  $C_{r2}$ 의 크기가 증가해 주파수 변화에 따른 전압 이득 변화 폭이 커진다.

그림 3-(b)는  $L_{r1}$ 의 변화에 따른 전압 이득 곡선의 변화를 보여준다.  $L_{r1}$ 이 증가할수록 주파수에 따른 유도성 임피던스가 증가해 최대도 응답할 수 있는 전압 이득이 감소하고, 주파수 변화에 따른 전압 이득의 변화폭이 증가한다. 이와 같이 권선비 및 공진 인덕턴스 ( $L_r$ )는 전압 이득 곡선 최적화에 중요한 역할을 한다.



(a) 대칭 설계 충전 동작 (b) 대칭 설계 방전 동작

(c) 비대칭 설계 충전 동작 (d) 비대칭 설계 방전 동작

그림 4 설계기법에 따른 전압 이득 곡선 및 동작 주파수 범위  
 Fig. 4 Voltage gain curve and operating frequency range based on design method.

표 2 CLLC 컨버터 공진 네트워크 설계 결과  
 Table 2 Results of CLLC converter resonant network

Parameter	대칭 설계	비대칭 설계	[Unit]
$L_{r1}$	20	20	[μH]
$C_{r1}$	31.66	31.66	[nF]
$L_{r2}$	12.8	20	[μH]
$C_{r2}$	49.47	31.66	[nF]
$L_m$	72	75	[μH]
$N_p : N_s (N)$	1.25 : 1 (1.25)		

그러나 대칭 설계를 적용할 경우, 1차 측 공진 인덕턴스 ( $L_{r1}$ )에 따라 2차 측 공진 인덕턴스 ( $L_{r2}$ )가 결정되므로 방전 동작에서 전압 이득 곡선 최적화가 어렵다. 반면, 비대칭 설계에서는 1·2차 측 공진 인덕턴스를 개별적으로 선정할 수 있어, 충·방전 동작 모두에서 전압 이득 곡선의 최적화가 가능하다.

## 3. CLLC 컨버터 설계 및 손실 분석

### 3.1 CLLC 컨버터 설계 및 시뮬레이션 검증

표 2는 CLLC 컨버터의 설계 결과를 나타낸다. 설계 과정에서 1·2차 측 공진 인덕턴스 ( $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ )는 변압기의 누설 인덕턴스로 만족할 수 있는 20 [μH] 이하의 값으로 설계하여 전력 밀도를 증가시키고자 하였다. 또한, 배터리 충·방전 프로파일 진행에 따라 동작 주파수 ( $f_{sw}$ )가 감소하도록 하여 주파수 제어의 편의성을 높이도록 설계하였다.

그림 4는 설계기법에 따른 충·방전 동작 시 전압 이득 곡선을 보여준다. 그림 4에서 충·방전 동작 모두 배터리 프로파일에 따라 주파수가 감소하는 방향으로 제어가 가능하며, 비대칭 설계기법에서 대칭 설계에 비해 동작 주파수 범위가 감소했음을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6은 각 설계기법에 따른 CLLC 컨버터의 동작을 시뮬레이션을 통해 검증한 결과이다. FHA 분석에서와 마찬가지로, 비대칭 설계는 대칭 설계에 비해 동작 주파수 범위가 감소하여 효율 증가를 기대할 수 있지만, 2차 측 공진 네트워크 파라미터가 달라짐에 따라 각 소자에 걸리는 전압 및 흐르는 전류가 대칭 설계와 상이하므로 손실 분석을 통해 설계기법에 따른 효율을 확인할 필요가 있다.

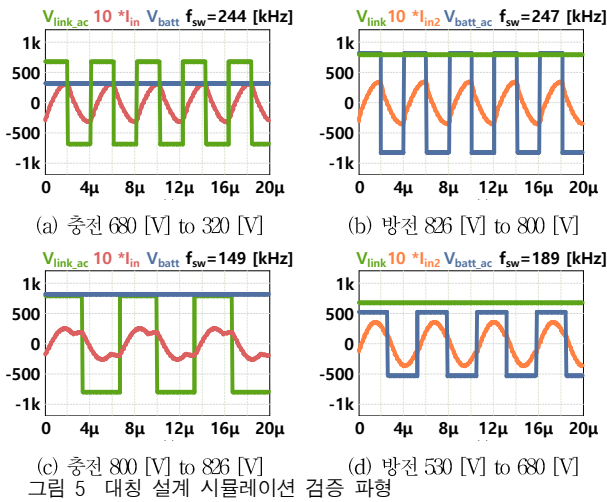


그림 5 대칭 설계 시뮬레이션 검증 파형

Fig. 5 Simulation waveforms in symmetrical design.

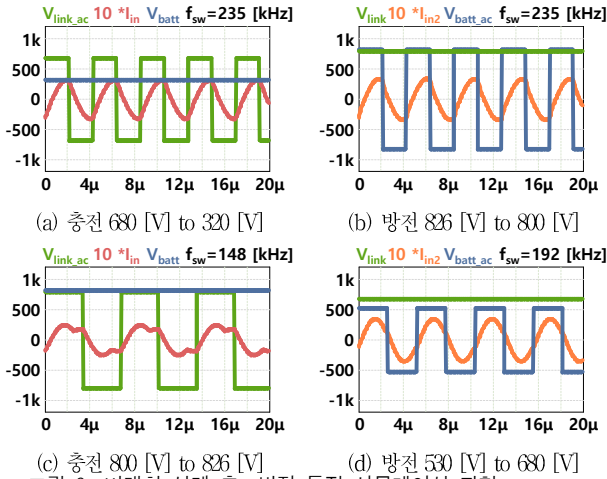


그림 6 비대칭 설계 충·방전 동작 시뮬레이션 파형

Fig. 6 Simulation waveforms in asymmetrical design.

### 3.2 설계기법에 따른 손실 분석

시뮬레이션 검증을 바탕으로 설계기법에 따른 충·방전 동작에서 손실 분석을 진행하였으며, 손실 분석 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 동작 주파수 영향이 적은 정류 다이오드 손실, 역병렬 다이오드 손실, 도통 손실은 설계기법에 관계없이 유사한 양상을 보였다. 반면, 동작 주파수의 영향을 크게 받는 스위칭 손실 및 공진 네트워크 손실은 비대칭 설계에서 대칭 설계에 비해 감소하였다. 손실 분석 비교 결과, 비대칭 설계를 적용했을 때 전 영역에서 손실이 감소했으며 특히 방전 동작에서 최대 83.74 [W]의 손실 감소가 확인되었다. 이를 바탕으로 도출한 설계기법에 따른 효율 비교는 그림 8에서 확인할 수 있다. 효율 또한 전 영역에서 비대칭 설계가 더 우수했으며, 최대 0.76%의 효율 향상이 확인되었다. 결과적으로, 설계기법에 따른 손실 및 효율 분석 결과를 통해 비대칭 설계에서 동작 주파수 범위 감소에 따른 효율 향상을 확인하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 11 [kW] 급 CLLC 컨버터의 양방향 고효율 동작을 위하여 공진 네트워크 대칭 설계 및 비대칭 설계에 따른 효율 분석을 진행하였다. 이를 위하여 CLLC 컨버터 설계에

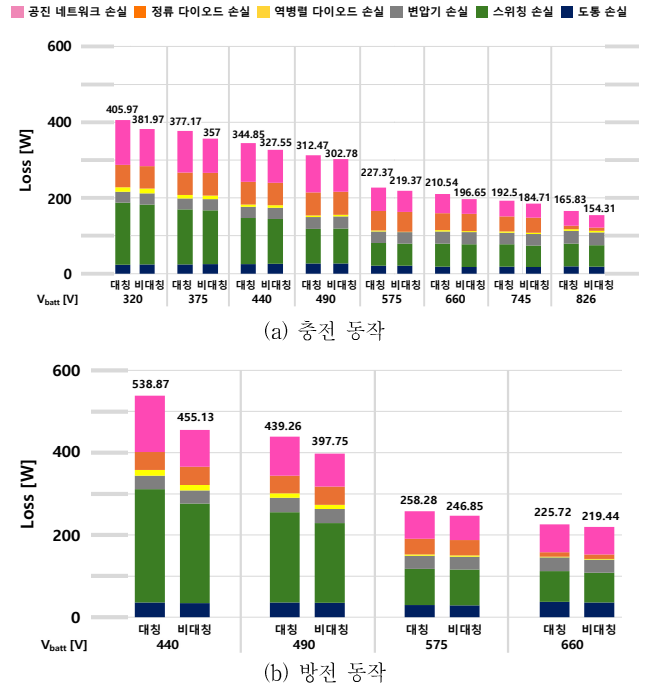


그림 7 CLLC 컨버터 설계기법에 따른 손실 분석 결과

Fig. 7 Loss analysis results based on design method.

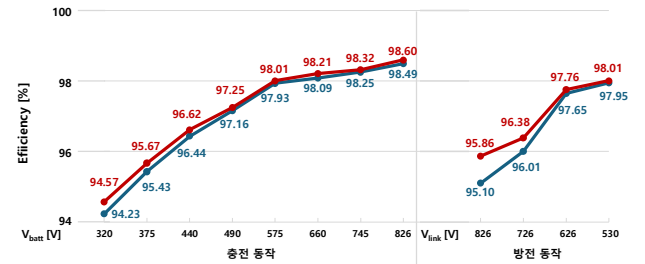


그림 8 설계기법에 따른 효율 비교 결과

Fig. 8 Efficiency comparison results based on design method.

필요한 등가회로 및 전압 이득 수식을 도출하였으며, 공진 네트워크 파라미터 변화에 따른 전압 이득을 분석하였다. 이후 시뮬레이션을 바탕으로 설계기법에 따른 동작 효율을 분석한 결과 양방향 동작에서 주파수 범위를 저감할 수 있는 비대칭 설계가 고효율 동작에 더 적합한 설계기법임을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00401742, GaN 전력모듈 기반 고효율·고밀도 전 기자동차용 인버터 기술개발)

### 참고 문헌

- [1] J. Min and M. Ordonez “Bidirectional Resonant CLLC Charger for Wide Battery Voltage Range: Asymmetric Parameters Methodology”, *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 36, No. 6, pp. 6662–6673, 2021, June.
- [2] B. Zhao, X. Zhang, and J. Huang “AI Algorithm-Based Two Stage Optimal Design Methodology of High-Efficiency CLLC Resonant Converters for the Hybrid AC-DC Microgrid Applications”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 66, No. 12, pp. 9756–9767, 2019, December.