

# 공유 인덕터와 단일 변압기를 이용한 전류 밸런싱 기능을 가진 이중 공진 탱크 LLC 컨버터

김현지, 홍다현, 차헌녕  
경북대학교

## Dual Resonant Tank LLC Converter with Shared Inductor and Single Transformer for Passive Current Balancing

Hyeonji Kim, Daheon Hong, Honnyong Cha  
Kyungpook National University

### ABSTRACT

하프 브릿지 LLC 컨버터는 풀 브릿지 LLC 컨버터에 비해 입력 전류의 리플이 크다. 두 개의 공진 탱크를 가진 하프 브릿지 LLC 컨버터는 이를 개선할 수 있지만, 공진 탱크 내 수동 소자들이 가진 허용 오차에 의해 전류 불평형 문제가 발생한다. 본 논문에서는 공유 인덕터와 단일 변압기를 이용한 새로운 이중 공진 탱크 LLC 컨버터를 제안한다. 제안하는 회로는 소자들의 파라미터 값 오차가 있더라도 전류 밸런싱을 효과적으로 유지할 수 있다. 제안하는 회로의 전류 밸런싱 원리를 분석하였고, 2-kW 하드웨어를 제작하여 성능을 증명하였다.

### 1. 서론

LLC 컨버터는 소프트 스위칭이 가능하여 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 이러한 장점으로 스위칭 주파수가 높더라도 고효율 달성이 가능해서 다양한 분야에 응용된다. LLC 토폴로지 중 하프 브릿지 LLC 컨버터는 풀 브릿지 LLC 컨버터에 비해 구조가 쉽고 단순하다. 그러나, 풀 브릿지 컨버터는 입력 전류의 주파수가 스위칭 주파수의 두 배인 반면, 하프 브릿지 컨버터는 입력 전류의 주파수가 스위칭 주파수와 같아 입력 전류 리플이 크다. 따라서, 큰 입력 커패시터가 필요하여 대전력에서는 적용이 제한된다. 이 문제를 완화하기 위해 그림 1(a)와 같은 두 개의 공진 탱크를 가진 하프 브릿지 LLC 컨버터가 소개되었다<sup>[1]</sup>. 이 회로는 두 공진 탱크의 인터리빙 효과로 인하여 입력 전류의 리플이 감소한다. 하지만, 공진 탱크에 존재하는 수동 소자들의 허용 오차로 인해 두 공진 전류 사이에 불평형이 발생한다<sup>[2]</sup>. 변압기 두 개를 활용하여 이 문제를 완화할 수 있지만<sup>[3]</sup>, 이는 크기, 비용, 코어 손실을 증가시킨다.

따라서, 본 논문에서는 공유 인덕터와 단일 변압기를 이용한 이중 공진 탱크 하프 브릿지 LLC 컨버터를 제안한다. 제안하는 회로는 변압기를 하나만 사용함으로써 크기와 비용, 코어 손실을 감소시킨다. 또한, 공유 인덕터와 단일 변압기를 사용함으로써 공진 전류를 자동으로 밸런싱할 수 있다.

### 2. 공유 인덕터와 단일 변압기를 사용한 이중 공진 탱크 LLC 컨버터

기존 회로는 공진 인덕터가 각각의 공진 탱크에 존재하지만, 제안하는 회로는 기존의 회로에서 병렬 연결된 두 인덕터

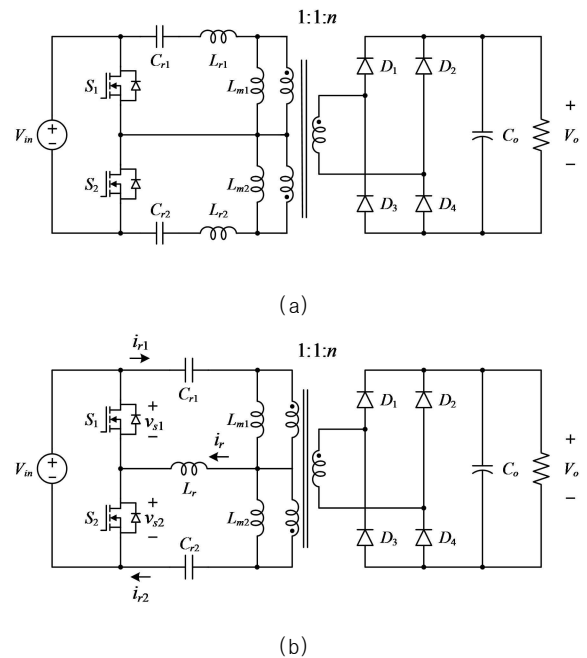


그림 1 이중 공진 탱크 하프 브릿지 LLC 컨버터 (a) 기존 컨버터, (b) 제안하는 컨버터

Fig. 1 Dual resonant tank half-bridge LLC converter (a) Conventional converter, (b) Proposed converter

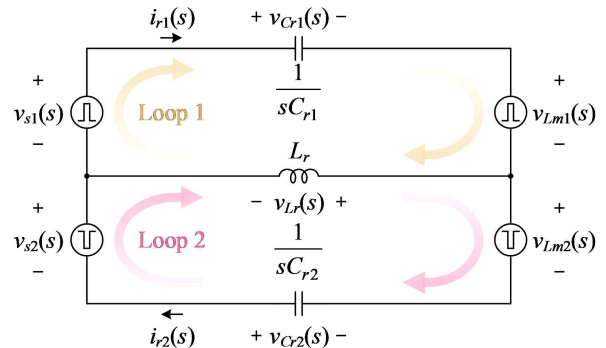


그림 2 제안하는 공진 탱크의 등가 회로

Fig. 2 Equivalent circuit of the proposed resonant tank

를 그림 1(b)와 같이 하나의 공진 인덕터로 대체한다. 따라서, 공유 인덕터의 인덕턴스는 기존의 절반이고, 기존 회로의 두

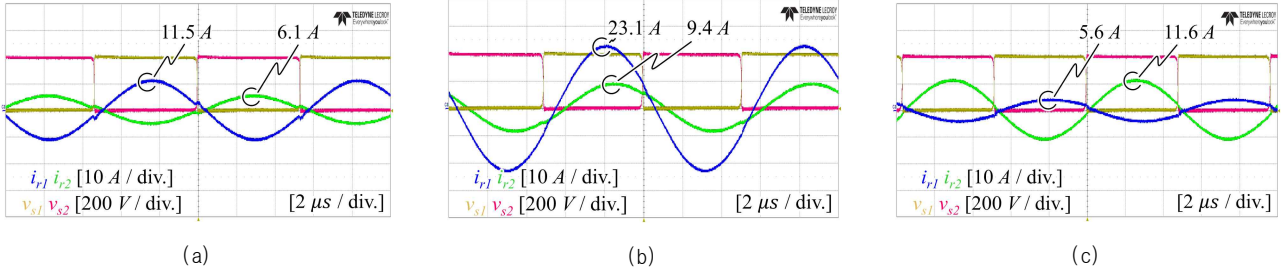


그림 3 미스매치 상황일 때 기존 회로의 스위치 전압과 공진 전류 파형 (a)  $f_s = 93\text{kHz}$ , (b)  $f_s = 98\text{kHz}$ , (c)  $f_s = 103\text{kHz}$   
 Fig. 3 Switch voltage and resonant current waveforms under mismatch conditions in the conventional converter (a)  $f_s = 93\text{kHz}$ , (b)  $f_s = 98\text{kHz}$ , and (c)  $f_s = 103\text{kHz}$

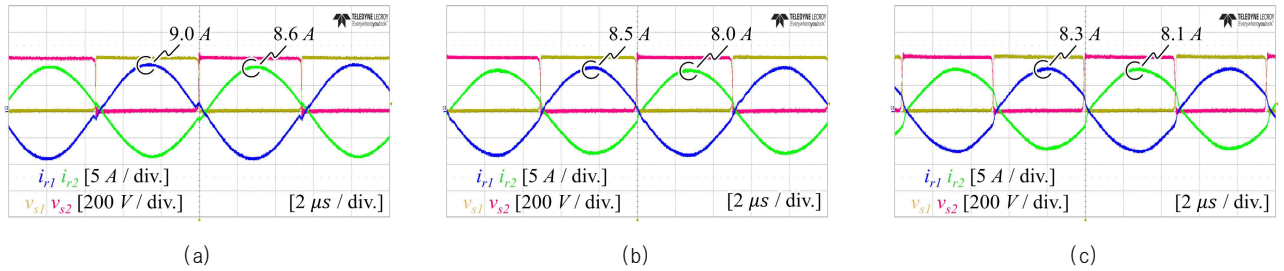


그림 4 미스매치 상황일 때 제안한 회로의 스위치 전압과 공진 전류 파형 (a)  $f_s = 93\text{kHz}$ , (b)  $f_s = 98\text{kHz}$ , (c)  $f_s = 103\text{kHz}$   
 Fig. 4. Switch voltage and resonant current waveforms under mismatch conditions in the proposed converter (a)  $f_s = 93\text{kHz}$ , (b)  $f_s = 98\text{kHz}$ , and (c)  $f_s = 103\text{kHz}$

공진 전류 합이 공유 인덕터로 흐른다. 그러므로, 제안하는 공유 인덕터의 크기는 기존 인덕터 두 개의 크기와 동일하다. 제안하는 회로의 공진 인덕터는 두 공진 탱크에서 공유하기 때문에 전류 불평형은 공진 커패시턴스 오차에만 영향을 받는다.

제안하는 회로의 공진 탱크를 등가 회로로 나타내면 그림 2와 같다. 공진 탱크의 입력 전압은 스위치 전압으로, 서로 크기는 같고 위상은 180도 차이를 가진다. 공진 탱크의 출력 전압은 자화 인덕터의 전압이다. 1차 측 두 권선이 동일할 턴 수와 극성이 반대인 상태로 감겨 있으므로, 두 전압은 크기는 같고 위상은 180도 차이를 가진다. 두 공진 탱크에 각각 키르히호프 전압 법칙을 적용하면, 두 커패시터의 전압이 같음을 알 수 있다. 두 커패시턴스는  $\delta$ 만큼 차이가 난다고 가정하면 ( $C_{r1} = \delta C_{r2}$ ), 두 공진 전류의 관계를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{r1}(s) = -\delta i_{r2}(s) \quad (1)$$

따라서, 두 공진 전류의 불평형 정도는 커패시턴스의 오차에 비례하여 결정되므로 허용 오차가 작은 커패시터를 사용한다면 전류 불평형 문제를 해결할 수 있다.

### 3. 실험 결과

2-kW 시제품을 제작하여 제안된 회로의 동작을 검증하였다. 공진 주파수는  $98\text{kHz}$ 로, 스위칭 주파수에 따른 전류 불평형 정도를 실험하였다. 미스매치 상황을 구현하기 위해 위쪽 공진 탱크엔  $110\text{nF}$ , 아래쪽 공진 탱크엔  $100\text{nF}$ 의 커패시터를 사용하였다. 미스매치 상황이 발생했을 때, 기존 토폴로지는 그림 3과 같이 전류 불평형이 발생하는 것과 달리, 제안된 토폴로지는 그림 4와 같이 전류가 밸런싱되는 것을 확인할 수 있다. 커패시턴스 오차가 존재하므로 큰 커패시턴스를 가진 공

진 탱크에 흐르는 전류가 작은 커패시턴스를 가진 공진 탱크에 흐르는 전류의 크기보다 크다. 전류가 완벽히 같게 밸런싱되지 않더라도, 기존의 토폴로지와 비교하여 전류 밸런싱 능력이 크게 향상되었음을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 공유 인덕터와 단일 변압기를 사용함으로써 전류 밸런싱이 가능한 이중 공진 탱크 하프 브릿지 LLC 컨버터를 소개한다. 제안하는 회로는 추가적인 요소 없이 간단한 회로 변형을 통해 구현 가능하다. 단일 변압기를 사용하기 때문에 크기, 비용, 코어 손실이 감소한다. 또한, 제안된 회로에서 커패시턴스 오차가 발생하더라도 전류 밸런싱이 가능하다. 전류 불평형의 정도는 커패시턴스의 차이에 비례하여 발생하므로, 작은 허용 오차를 가진 커패시터를 사용하는 것이 권장된다. 제안하는 회로의 전류 밸런싱 능력은 이론적 분석 및 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] S. Iqbal and M. I. Shahzad, "LLC resonant DC-DC converter with series connected primary windings of transformer." *IEEJ Trans. Elec. Electron. Eng.*, vol. 10, pp.229-236, Dec. 2014.
- [2] S. A. Arshadi *et al.*, "Unbalanced three-phase LLC resonant converters: analysis and trigonometric current balancing." *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 3, pp. 2025-2038, Mar. 2019.
- [3] B. -R. Lin and S. -F. Wu, "ZVS resonant converter with series-connected transformers." *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 8, pp. 3547-3554, Aug. 2011.