

고효율 및 고전력밀도 3-레벨 LLC 공진형 컨버터

구현수, 김효훈, 지상근*, 류동균*, 최흥균*, 한상규†
국민대학교 POESLA, 솔루션*

High-Efficiency and High-Power-Density 3-Level LLC Resonant Converter

Hyun Su Gu, Hyo Hoon Kim, Sang Keun Ji*, Dong kyun Ryu*, Heung Gyoon Choi*,
Sang Kyoo Han†

Power Electronics System Laboratory, Kookmin University, SoluM*

ABSTRACT

본 논문은 고효율 및 고전력밀도 3 레벨 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 전원회로의 고전력밀도화를 위해서는 고주파 구동이 필수적이지만 기존 LLC 컨버터는 스위칭 손실로 인하여 한계를 갖는다. 스위칭 손실은 스위치 전압 침투치 감소를 통해 저감 가능하다. 전압 침투치는 4개 스위치의 직렬연결을 통해 저감시킬 수 있으며, 각 스위치의 전압평형을 위한 추가적인 회로가 필수적이다.^{[1][2]} 따라서 본 논문에서는 스위칭 손실을 저감시킴으로써 1MHz 고주파 구동이 가능하며, 단 하나의 커패시터를 이용하여 모든 스위치의 전압평형을 이룰 수 있는 3 레벨 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 또한 제안회로의 전압평형 원리를 이용하여 n 레벨 컨버터로 확장 가능하여 스위치 전압 침투치를 더욱 저감시켜 입력전압이 높은 응용례의 적용에도 적합하다. 제안회로의 타당성 검증을 위해 350W급 시제품을 제작하여 실험 결과를 제시한다.

1. 서론

최근 초소형 및 초고밀도 전원장치가 제품의 핵심기술로 부상하고 있다. 전력변환 컨버터 내 큰 부피를 차지하는 리액티브 소자의 소형화를 위해서는 고주파 구동이 필수적이지만 고주파 구동은 스위치의 심각한 손실과 발열을 발생시킨다. 스위칭 손실은 스위치 양단전압을 낮춰 전압과 전류가 중첩되는 크기와 시간을 줄임으로써 확연히 개선할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 4개 스위치의 직렬연결을 통한 스위칭 손실 저감 및 단 하나의 커패시터를 이용하여 모든 스위치의 전압평형을 이룰 수 있는 고효율 및 고전력밀도 3 레벨 LLC 공진형 컨버터를 제안한다.

2. 제안 3-레벨 LLC 공진형 컨버터

2.1 제안회로 전압평형 원리

그림 1은 제안 3 레벨 LLC 공진형 컨버터를 나타낸다. 제안회로는 4개의 스위치(M₁ M₄)가 직렬로 연결되며, 이와 병렬로 4개의 공진 커패시터(C_{r1} C_{r4})가 직렬로 연결된다. 공진 인덕터(L_{r1}/L_{r2})와 트랜스포머(L_{m1}/L_{m2}) 및 밸런싱 커패시터(C_B)는 그림 1과 같이 연결된다. 제안회로는 M₁/M₃와 M₂/M₄ 스위치가 각각 동시에 구동된다. M₁/M₃이 턴 온 시, 그림 1의 'A'와 같은 경로로 도통하며 KVL(Kirchhoff's Voltage Law)에 의해 V_{CB} = V_{Cr1} + V_{Cr2}가 된다. 반대로 M₂/M₄가 턴 온 시, 'B'와 같은

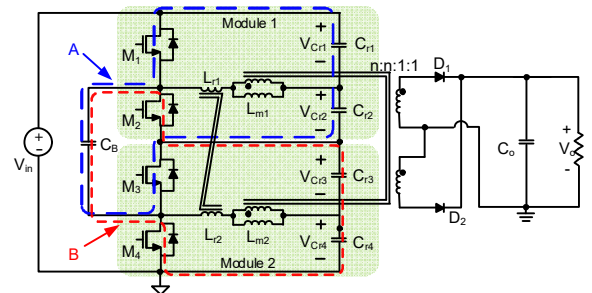


그림 1. 제안 3-레벨 LLC 공진형 컨버터

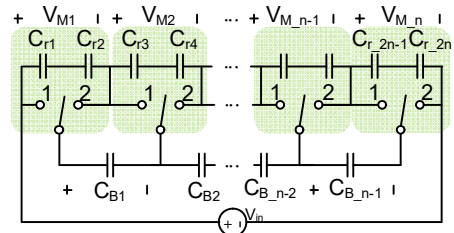


그림 2. 간략화된 제안 n-레벨 LLC 컨버터 1차 측

경로로 KVL에 의해 $V_{CB} = V_{Cr3} + V_{Cr4}$ 가 된다. 상기 동작으로 식 (1)이 성립하게 된다.

$$V_{CB} = V_{Cr1} + V_{Cr2} = V_{Cr3} + V_{Cr4} \quad (1)$$

또한, 입력전압(V_m)과 공진 커패시터(C_{r1} C_{r4})의 KVL에 의해 다음 식이 도출된다.

$$V_{in} = V_{Cr1} + V_{Cr2} + V_{Cr3} + V_{Cr4} \quad (2)$$

상기 식(1)과 (2)에 의해 다음과 같은 수식이 도출된다.

$$V_{CB} = V_{Cr1} + V_{Cr2} = V_{Cr3} + V_{Cr4} = \frac{V_{in}}{2} \quad (3)$$

이를 통해 공진 커패시터와 병렬로 연결된 모든 스위치 전압 침투치를 입력전압의 절반으로 보장할 수 있다. 또한, 제안회로의 전압평형 동작원리는 그림 2와 같이 응용된다. 따라서 모든 모듈의 전압평형을 통해 모든 스위치의 전압 침투치를 V_{in}/n 으로 모듈 수에 비례하게 감소시킬 수 있다.

2.2 최적설계 및 체적저감 방안

제안회로는 스위칭 주파수(400kHz~2MHz) 및 L_m과 L_r의 비율(L_n=L_m/L_r=1~10)을 기준으로 스위칭 손실과 자기소자 손실분석을 통해 설계하였다. 그림 3과 같이 L_n과 주파수 변화에 따른 손실분석 결과, L_n=7에서 1MHz를 구동 주파수로 선정하였다.

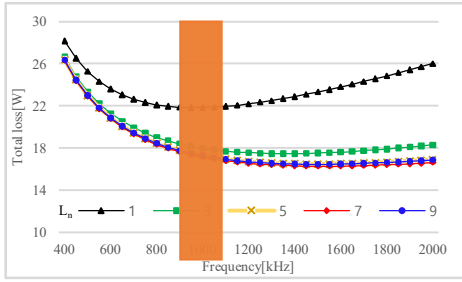


그림 3. 제안회로 손실분석

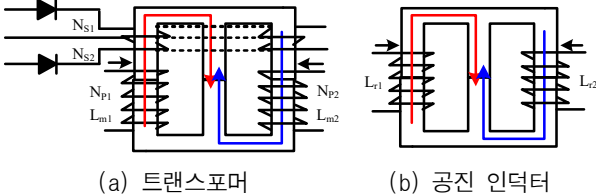


그림 4. 자기소자 커플링 방안

제안 3 레벨 LLC 컨버터는 일반적인 권선방식으로 각각의 자기소자를 사용하면 4개의 코어(L_{m1}/L_{m2} , L_{r1}/L_{r2})가 요구되어 전체적인 사이즈가 커지고 높은 비용의 단점을 갖는다. 따라서 제안회로는 그림 4와 같이 하나의 코어에 트랜스포머를 커플링 시켜주었으며, 공진 인덕터 또한 하나의 코어에 커플링 시켜 적용함으로써 2개의 자기소자를 이용하여 제안회로를 구성함으로써 더욱 체적을 저감하였다.

3. 제안 3-레벨 LLC 공진형 컨버터 실험결과

제안된 3 레벨 LLC 공진형 컨버터의 우수성과 이론적 분석의 타당성 검증에 위해 시작품을 제작하여 고찰된 실험 결과를 제시한다. 실험에 사용된 사양 및 소자 파라미터는 출력전력=350W(19.5V/18A), 입력전압=390V, C_{r1} C_{r2} =5.5nF, C_B =100nF, L_{m1} = L_{m2} =15uH, L_{r1} = L_{r2} =2.25uH, Transformer 턴 수=5:5:1:1, 스위칭 주파수=1MHz를 사용하였다. 그림 5는 정상상태 주요파형으로 스위치 M_1 게이트와 양단전압 및 L_{r1} 전류를 나타낸다. 스위치 턴 온 시, 영전압 스위칭(ZVS)이 보장됨을 알 수 있다. 그림 6(a)는 정상상태에서 각 모듈 및 캐패시터의 전압이 $V_{in}/2$ 으로 전압평형이 이루어지는 것을 확인할 수 있으며, (b)를 통해 각 모듈에 흐르는 공진전류가 평형을 이루는 것을 알 수 있다.

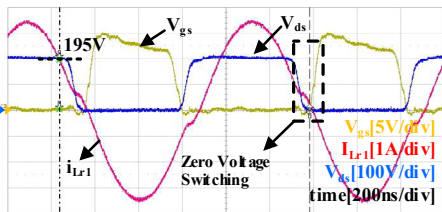


그림 5. 제안 3-레벨 LLC 컨버터 정상상태 주요파형

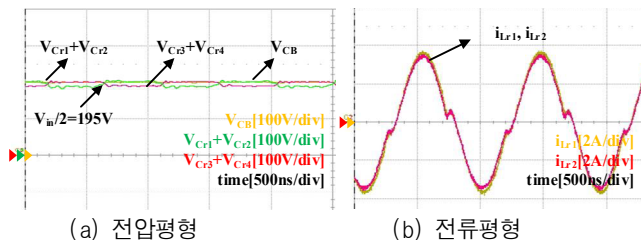


그림 6. 제안 3-레벨 LLC 컨버터 전압평형 및 전류평형

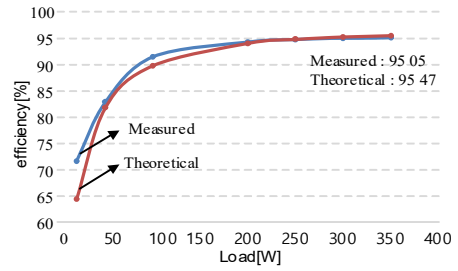


그림 7. 제안 3-레벨 LLC 컨버터 부하별 효율

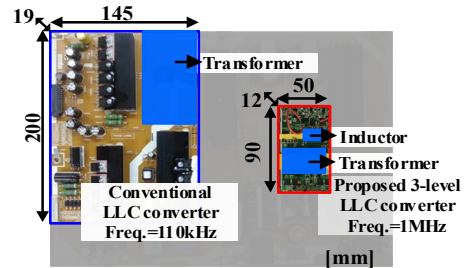


그림 8. 기존 LLC 컨버터 및 제안 3-레벨 LLC 컨버터 시작품

제안회로의 효율은 그림 7과 같이 전부하 350W에서 95.05%로써 우수한 성능을 보이고 있으며, 이론적 분석과 실험결과로부터 제안회로의 우수성과 각부 소자 설계가 타당함을 알 수 있다. 제안회로는 그림 8과 같이 고주파 구동으로 리액티브 소자의 사이즈를 대폭 저감시켜 기존 LLC 컨버터 대비 약 90%의 체적 저감으로 고전력밀도화를 달성하였다.

4. 결론

본 논문에서는 고효율 및 고전력밀도를 동시에 획득할 수 있는 3 레벨 LLC 공진형 컨버터를 제안하였다. 제안회로는 4개 스위치의 직렬연결을 통해 스위치 전압 첨두치를 저감시킴으로써 손실을 저감하였으며, 단 하나의 캐패시터를 이용하여 모든 스위치의 전압평형을 이루었다. 또한 제안회로의 전압평형 원리를 이용하여 n 레벨 컨버터로 확장이 용이해 전압 첨두치를 V_{in}/n 으로 더욱 저감할 수 있었다. 따라서 입력 전압이 높은 응용례에도 적용 가능하며 우수한 성능을 기대할 수 있다. 제안회로의 타당성 검증에 위해 350W급 시작품 제작을 통해 우수한 성능 및 설계의 타당함을 확인하였다.

본 논문은 SoluM Inc.의 Module Power 개발사업과 2017년 국민대학교 교내 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- [1] I. O. Lee, S. Y. Cho, and G. W. Moon, "Three level resonant converter with double LLC resonant tanks for high input voltage applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 9, pp. 3450-3463, Sep. 2012.
- [2] Y. Gu, Z. Lu, L. Hang, Z. Qian, and G. Huang, "Three level LLC series resonant DC/DC converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 781-789, Jul. 2005.