

작은 출력 전류 리플을 가지는 고밀도 듀얼 하프 브리지 LLC 공진형 컨버터

김건우, 김재상, 문건우
KAIST 전기 및 전자공학부

High Power Density Dual Half Bridge LLC Resonant Converter With Reduced Output Current Ripple

Keon-Woo Kim, Jae-Sang Kim, Gun-Woo Moon
School of Electrical Engineering, KAIST

ABSTRACT

이 논문은 넓은 출력 전압 범위를 조절할 수 있는 새로운 듀얼 하프 브리지 LLC 공진 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 전압 더블러 모드와 전압 키프러플러 모드 두 가지 작동 모드를 사용함으로써 좁은 스위칭 주파수 변동 범위에서도 넓은 출력 전압 범위를 조절할 수 있다. 또한 새로운 정류기 구조를 제안함으로써 출력 커패시터의 출력 전류 리플을 감소시켜 출력 커패시터의 크기를 감소시킨다. 따라서 제안된 컨버터는 넓은 출력전압 범위를 조절할 수 있으면서 높은 전력 밀도를 달성할 수 있다.

1. 서 론

지난 몇 년간 LED 드라이버나 배터리 충전과 같은 넓은 출력 전압 범위를 갖는 어플리케이션이 중요한 이슈로 떠오르고 있다.^[1-3] 이러한 어플리케이션들은 높은 효율을 요구하고 있기에 LLC 공진형 컨버터가 적절한 DC-DC 컨버터로 사용되고 있다. LLC 공진형 컨버터는 1차측 스위치의 영진압 스위칭이 가능하며 정류기 다이오드가 출력전압으로 클램핑 되기 때문에 높은 효율을 얻을 수 있다.^[4-5] 하지만 넓은 범위의 출력 전압 범위를 제어하기 위해서는 넓은 범위의 동작 스위칭 주파수가 필요하며, 낮은 자화 인덕턴스를 필요로 한다. 이에 따라 1차측 스위치의 높은 도통 손실로 인해 효율이 감소하고, 2차측 커패시터에 흐르는 전류가 증가하면서 낮은 전력 밀도를 갖게 된다.

이러한 한계점을 극복하기 위해서 많은 연구들이 진행되었다.^[6-8] [6]의 경우 넓은 출력 전압 범위를 제어하기 위해 전압 더블러 모드와 전압 키프러플러 모드를 사용한다. 두 개의 모드를 바꿔가며 사용함으로써 좁은 스위칭 주파수 영역 안에서 넓은 출력 전압을 제어한다. 하지만 이 컨버터는 두 개의 추가적인 MOSFET을 필요로 한다. 다음으로 [7]에서는 펄스 폭 변조 방식을 이용해 출력 전압을 제어하는 LLC 공진형 컨버터를 제안했다. 이 컨버터는 스위칭 주파수를 고정된 상태로 동작을 하기 때문에 자성체의 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 추가적인 MOSFET을 필요로 하며 2배 이상의 전압 이득을 얻기 위해서는 펄스 주파수 변조 방식 또한 필요로 한다는 한계점이 있다. 다음으로 [8]에서는 듀얼 하프 브리지 LLC 공진형 컨버터 구조를 가지며 전압 더블러 모드와 전압 키프러플러 모드를 바꾸며 동작을 하여 넓은 출력 전압 범위를

제어할 수 있다. 하지만 2차측 커패시터 큰 전류가 흐르기 때문에 전류 스트레스 조건을 맞추기 위해 많은 개수의 커패시터를 병렬로 연결해서 사용해야 하고, 이에 따라 전력 밀도가 감소한다는 문제점이 있다.

앞서 설명한 연구들은 대부분 효율을 개선하는 것에 중점을 두고 있다. 또한 기존의 연구들은 대부분 스위칭 주파수를 높여 자성체의 크기를 줄이는 것에 대해 관심을 가지고 있다. 자성체도 컨버터 안에서 큰 부분을 차지하지만 출력 커패시터 또한 큰 부피를 차지하기 때문에 크기를 줄일 필요가 있다. 따라서 이 논문에서는 출력 커패시터의 크기를 줄인 새로운 듀얼 하프 브리지 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 전압 더블러 모드와 전압 키프러플러 모드를 이용하여 좁은 주파수 영역에서 넓은 출력전압 범위를 제어한다. 또한 제안하는 새로운 정류기 구조를 통해 출력 커패시터에 흐르는 전류 스트레스를 저감하여 높은 전력밀도를 가질 수 있는 컨버터를 제안한다.

2. 제안회로의 동작 분석

그림 1은 제안하는 컨버터의 회로를 나타내고 있다. 1차측은 듀얼 하프 브리지 LLC 공진형 컨버터로 이루어져 있고, 2차측은 제안하는 정류기의 형태를 갖고 있다. 제안하는 컨버터는 스위칭 주파수를 변화시키는 방식을 이용하여 출력 전압을 제어하며 전압 더블러 모드와 전압 키프러플러 모드가 존재한다. 전압 더블러 모드 동안은 스위치 Q_1 과 Q_3 가 같이 켜지거나 그와 상보적으로 스위치 Q_2 와 Q_4 가 같이 켜진다. 그리고 전압 키프러플러 모드 동안은 스위치 Q_2 과 Q_4 가 같이 켜지거나 그와 상보적으로 스위치 Q_3 와 Q_1 가 같이 켜진다. 간단한 분석을 위해 아래의 가정을 하겠다.

- 1) 스위칭 주파수, f_s 는 공진 주파수, f_r 보다 낮은 상태로 동작한다.
- 2) 출력 커패시터는 충분히 크기 때문에 출력 커패시터에 걸리는 전압은 일정하다.
- 3) 데드 타임은 무시할정도로 충분히 작다.

그림 2 (가)는 전압 더블러 모드 동안 제안하는 컨버터의 파형을 나타낸다. 전압 더블러 모드 동안은 C_{or} 을 통해 전류가 흐르면서 빌드업 동작을 하고, C_{os} 를 통해 전류가 흐르면서 파워링 동작을 하거나 이와 반대의 동작을 하게 된다. 또한 C_{o2} 를 통해서 전류가 흐르지 않는다. 그림 2 (나)는 전압 키프러플러 모드 동안 제안하는 컨버터의 파형을 나타낸다. 전압

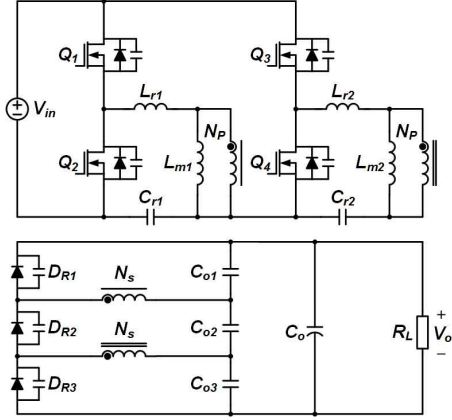


그림 1 제안하는 컨버터의 회로
Fig. 1 Circuit diagram of proposed converter

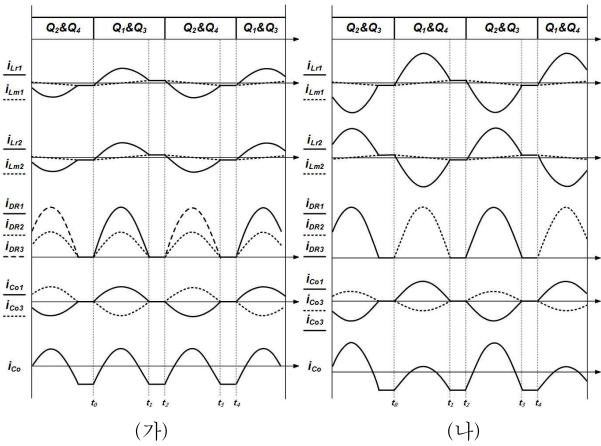


그림 2 제안하는 회로의 동작 파형. (가) 전압 더블러 모드 동안의 파형. (나) 전압 쿼드러플러 모드 동안의 파형.
Fig. 2 Operational waveforms of proposed converter. (a) Voltage doubler mode. (b) Voltage quadrupler mode.

쿼드러플러 모드동안은 C_{o1} 과 C_{o3} 를 통해 전류가 흐르면서 빌드업 동작을 하고, C_{o2} 를 통해 전류가 흐르면서 파워링 동작을 하거나 이와 반대의 동작을 하게 된다.

3. 제안회로의 특징 분석

3. 1. DC 전압 이득

일반적으로 LLC 공진형 컨버터의 전압이득은 FHA 방법을 통해 계산된다. 하지만 FHA 방법은 스위칭 주파수가 공진 주파수와 같을 때의 조건에서 계산된 방법이 기 때문에 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 많이 낮을 때는 정확하지 않은 특징을 가진다. 따라서 더 정확한 전압 이득 관계를 구하기 위해 [9]에서 제안된 개선된 전압 이득 모델을 이용하겠다.

제안하는 컨버터는 두 개의 모드가 있고 이에 대해 각각 다른 전압 이득을 가진다. [9]에서 제안된 개선된 전압 이득 모델을 바탕으로 전압 더블러 모드에서의 개선된 AC 등가 저항, $R_{mac,d}$ 과 개선된 질리티 요소, $Q_{m,d}$,

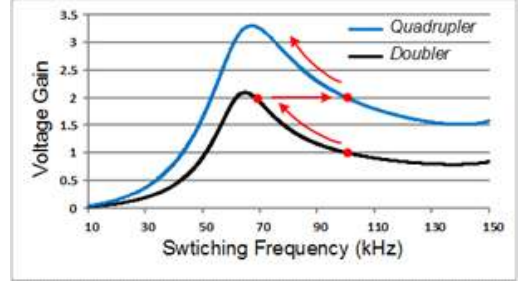


그림 3 제안하는 컨버터의 전압이득
Fig. 3 Voltage gain graph of proposed converter

$$R_{mac,d} = \frac{\theta \sin(0.5\theta)}{\theta - \sin\theta} \frac{4n^2 R_o}{\pi^2}, \quad (1)$$

$$Q_{m,d} = \sqrt{\frac{2\pi L_r f_s R_{mac,d} \tan(0.5\delta) (C_r + \frac{1}{2\pi f_s R_{mac,d} \tan(0.5\delta)})}{R_{mac,d}^2 C_r}}, \quad (2)$$

$$M_{LLC,d} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi^2}{32k}\right) \left(1 - \frac{f_r}{f_s}\right)^2 + \left(\frac{f_s}{f_r} - \frac{f_r}{f_s}\right)^2} Q_{m,d}^2}, \quad (3)$$

와 개선된 전압 이득, $M_{LLC,d}$ 를 구해보면 다음과 같다.

여기서 R_o 는 출력 저항, n 은 트랜스포머의 턴비, L_r 은 공진 인덕턴스, C_r 은 공진 커패시턴스, $k=L_m/L_r$, $\theta=\pi f_s/f_r$ 그리고 $\delta=(1-f_r/f_s)\pi$ 이다.

비슷한 방식으로 전압 쿼드러플러 모드에서도 전압 이득을 구할 수 있고, 이를 바탕으로 제안하는 컨버터의 전압 이득을 구해보면 그림 3과 같이 나타난다. 그림 3에서 보이는 것처럼 제안하는 컨버터는 두 가지 모드를 바꿔가며 넓은 출력 전압 범위를 제어할 수 있다.

3. 2. 출력 커패시터 전류 리플

평균 전류가 I_o 인 출력 전류가 정류기 다이오드를 따라 흐르므로 정류기 다이오드에 흐르는 평균 전류도 I_o 이지만 커패시터에 흐르는 전류는 모드에 따라 다르다. 전압 더블러 모드에서는 전류가 C_{o1} 과 C_{o3} 로 나누어져 흐르고 C_{o1} 과 C_{o3} 가 같다고 했을 때 C_{o1} 과 C_{o3} 에는 정류기 다이오드에 흐르는 전류의 절반이 흐른다.

다음으로 전압 쿼드러플러 모드에서는 전류가 C_{o1} , C_{o2} 와 C_{o3} 로 나누어져 흐른다. 이 때 전류가 C_{o2} 와 $0.5C_{o1}$ 에 해당하는 커패시터로 나누어져 흐르므로 아래와 같이 전류가 흐르게 된다.

$$i_{C_{o1}} = i_{C_{o3}} = \frac{0.5C_{o1}}{0.5C_{o1} + C_{o2}} i_{DR}, \quad (4)$$

$$i_{C_{o2}} = \frac{C_{o2}}{0.5C_{o1} + C_{o2}} i_{DR}, \quad (5)$$

따라서 식 (4)와 (5)에 따르면 커패시터에 흐르는 전류는 C_{o1} 과 C_{o2} 의 커패시턴스비에 따라 다르게 흐를 수 있다. 그림 4에서는 커패시턴스의 비에 따른 출력 커패시터에 흐르는 전류 리플이 나타나있다. $C_{o2}=0.5C_{o1}=0.5C_{o3}$ 일 때 가장 작은 전류 리플을 가진다는 것을 알 수 있다.

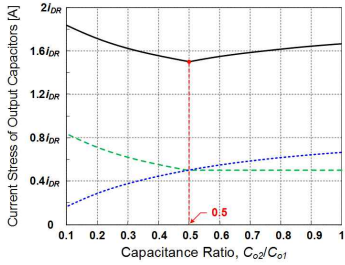


그림 4 출력 커패시터의 전류 리플
Fig. 4 Current ripple on output capacitors

4. 실험 결과

제안하는 컨버터의 성능을 확인하기 위해 1500W의 프로토타입을 제작해서 실험을 진행했다. 입력 전압은 400V이고 출력 전압은 150V에서 400V로 변화하는 조건에서 실험을 진행했다. 그림 5는 제안한 컨버터의 파형을 나타내고 있다. 파형에서 볼 수 있듯이 150V에서 300V까지는 전압 더블러 모드로 동작을 하고 300V에서 400V까지는 전압 쿼드러플러 모드로 동작하게 된다.

제안하는 컨버터의 출력 커패시터는 3개의 필름 커패시터와 10개의 전해 커패시터로 이루어져 있고, 컨벤셔널 컨버터 같은 경우 4개의 필름 커패시터와 12개의 전해 커패시터로 이루어져 있기 때문에 15750mm³의 크기만큼을 줄일 수 있고 이에 따라 전력밀도가 크게 증가한다. 또한 그림 6에 나와 있듯이 전압 더블러 모드에서는 약간 낮은 효율을 가지지만 전압 쿼드러플러 모드에서는 매우 높은 효율을 가진다.

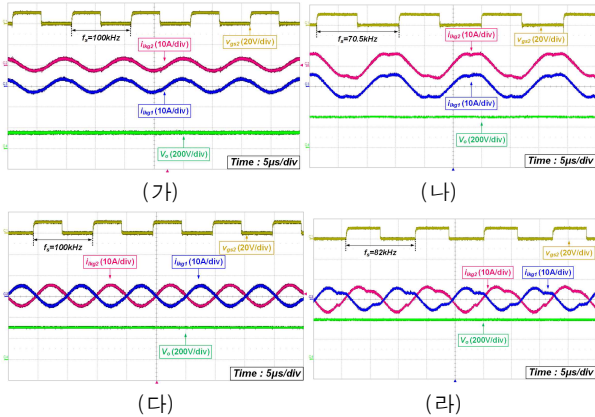


그림 5 제안하는 컨버터의 동작 파형. (가) $V_o=150V$ (전압더블러모드). (나) $V_o=300V$ (전압더블러모드). (다) $V_o=300V$ (전압쿼드러플러모드). (라) $V_o=400V$ (전압쿼드러플러모드).

Fig. 5 Current ripple on output capacitors. (a) $V_o=150V$ (Voltage doubler mode). (나) $V_o=300V$ (Voltage doubler mode). (다) $V_o=300V$ (Voltage quadrupler mode). (라) $V_o=400V$ (Voltage quadrupler mode).

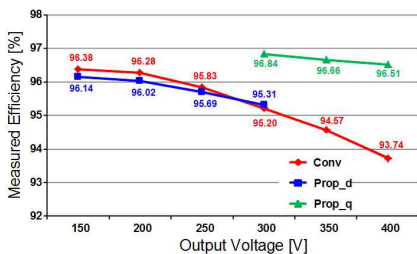


그림 6 제안된 컨버터와 기존 컨버터의 효율 비교
Fig. 6 Measured efficiency of prototype converters

5. 결론

본 논문에서는 제안된 정류기가 적용된 듀얼 하프 브리지 LLC 공진형 컨버터가 제안되었다. 제안된 컨버터는 두 개의 모드를 사용함으로써 좁은 동작 주파수 범위에서 동작이 가능하다. 또한 제안된 정류기 구조로 인해 출력 커패시터에 흐르는 전류 리플이 줄어들어 출력 커패시터의 크기를 크게 줄일 수 있다. 따라서 제안된 컨버터는 넓은 출력 전압 범위를 요구하는 어플리케이션에서 높은 효율과 전력 밀도를 가질 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(NRF-2019R1A2B5B02070509)

참고 문헌

- [1] X. Chen, D. Huang, Q. Li, and F. C. Lee, "Multichannel LED Driver With CLL Resonant Converter," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 3, no. 3, pp.589-598, Sep. 2015
- [2] F. Musavi, M. Craciun, D. S. D. S. Gautam, W. Eberle, and W. G. Dunford, "An LLC resonant DC-DC converter for wide output voltage range battery charging applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5437 - 5445, Dec. 2013.
- [3] H. Haga and F. Kurokawa, "Modulation method of a full-bridge three level LLC resonant converter for battery charger of electrical vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 2498 - 2507, Apr. 2017.
- [4] J. B. Lee, J. K. Kim, J. I. Baek, J. H. Kim, and G. W. Moon, "Resonant capacitor on/off control of half-bridge LLC converter for high-efficiency server power supply," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5410-5415, Sep. 2016.
- [5] B. C. Kim, K. B. Park, C. E. Kim, B. H. Lee, and G. W. Moon, "LLC resonant converter with adaptive link-voltage variation for a high-power density adapter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 9, pp. 2248 - 2252, Sep. 2010.
- [6] H. Wu, Y. Li, and Y. Xing, "LLC Resonant Converter With Semiactive Variable-Structure Rectifier (SA-VSR) for Wide Output Voltage Range Application", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 5, pp. 3389 - 3394, May. 2016.
- [7] H. Wang, and Z. Li, "A PWM LLC Type Resonant Converter Adapted to Wide Output Range in PEV Charging Applications", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 5, pp. 3791 - 3801, Jun. 2017.
- [8] J. I. Baek, C. E. Kim, K. W. Kim, M. S. Lee, and G. W. Moon, "Dual Half-Bridge LLC Resonant Converter with Hybrid-Secondary-Rectifier (HSR) for Wide-Output-Voltage Applications," in *proc IPEC-ECCE ASIA 2018*, May. 2018.
- [9] J. Liu, J. Zhang, T. Q. Zheng, and J. Yang, "A Modified Gain Model and the Corresponding Design Method for an LLC Resonant Converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 9, pp. 6716 - 6727, Oct. 2016.