

전기자동차 LDC용 절연형 DC-DC 컨버터 비교 분석

이승준, 김이삭, 장원용, 윤지현, 김민우, 이채연, 정현우, 박정욱
연세대학교

Comparative Analysis of Isolated DC-DC Converter for LDC in Electric Vehicle

Seungjun Lee, Issac Kim, Won-Yong Jang, Jihyeon Yun, Minwoo Kim, Chaeyeon Lee,
Hyeonwoo Jung, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차용 low-voltage dc-dc converter (LDC)에 이용되는 절연형 DC-DC 컨버터인 phase-shifted full-bridge (PSFB) 컨버터와 LLC 공진형 컨버터를 비교·분석한다. PSFB 컨버터와 LLC 컨버터는 일차측 스위치의 zero-voltage switching (ZVS) 이 가능하여 스위칭 손실을 저감할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 각 컨버터의 토폴로지 및 제어 방식을 분석하고, PSIM 시뮬레이션을 통해 각 컨버터의 모든 부하 구간에서의 효율에 대해 비교·분석한다.

1. 서론

최근 전기자동차의 수요가 급격하게 증가하여 전기자동차 충전 시스템의 효율성과 안정성에 대한 요구가 높아지고 있다. 이에 따라, 전기자동차 충전 시스템에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있으며, 특히 전기자동차의 전장 시스템에 전력을 공급하는 저전압 배터리와 고전압 배터리 간 전력을 변환하는 low-voltage dc-dc converter (LDC)의 중요성이 부각되고 있다. LDC 회로로 널리 사용되는 절연형 DC-DC 컨버터로는 phase-shifted full-bridge (PSFB) 컨버터와 LLC 공진형 컨버터가 있다.

PSFB 컨버터는 넓은 입력 전압 범위를 가질 수 있지만 경부하 조건에서 zero-voltage switching (ZVS) 동작이 제한되고, LLC 공진형 컨버터는 모든 부하 범위에서 ZVS 동작이 가능하지만 입력 전압 범위가 제한된다. 본 논문에서는 PSFB 컨버터와 LLC 공진형 컨버터의 토폴로지와 제어 방식을 분석하고, 400 V 충전 시스템 사양을 고려하여 설계한 컨버터의 PSIM 시뮬레이션을 통해 각 컨버터의 모든 부하 구간에서의 효율을 비교·분석한다.

2. 본론

2.1 토폴로지 및 제어 방식

본 논문에서 선정된 LDC용 PSFB 컨버터의 토폴로지는 그림 1과 같이 풀브릿지 컨버터, 변압기, center-tapped rectifier로 구성된다. 또한, PSFB 컨버터는 1차측 스위치의 출력 커패시터 2개와 변압기의 누설 인덕턴스 사이에서의 공진을 이용하여 ZVS 동작이 가능하다. 본 논문에서 선정된 LDC용 LLC 공

진형 컨버터는 그림 2와 같이 풀브릿지 컨버터, 공진 탱크, 변압기, center-tapped rectifier로 구성된다. 또한, LLC 공진형 컨버터는 변압기 1차측에 L_r , C_r 로 구성된 공진 탱크의 공진 현상에 의해 ZVS 동작이 가능하다.

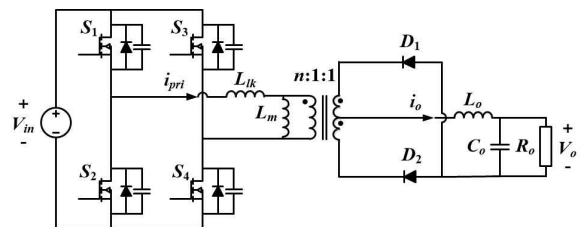


그림 1. PSFB 컨버터의 회로 구성도.

Fig. 1. Circuit configuration of PSFB converter.

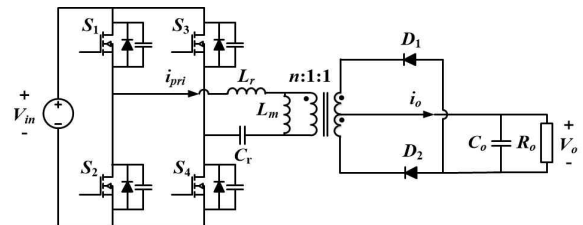


그림 2. LLC 공진형 컨버터의 회로 구성도.

Fig. 2. Circuit configuration of LLC resonant converter.

PSFB 컨버터는 각 스위치의 duty를 0.5로 고정하고, 스위치 S_1 , S_2 와 스위치 S_3 , S_4 게이트 신호 사이의 위상 차이로 출력 전압을 제어하는 phase-shift modulation 방식을 사용한다. LLC 공진형 컨버터는 각 스위치의 duty를 0.5로 고정된 뒤 스위칭 주파수를 조절하여 전압을 제어하는 pulse frequency modulation (PFM) 방식을 사용한다.

2.2 PSFB 컨버터 설계 조건

PSFB 컨버터의 변압기 권선비는 최소 입력 전압에서도 12 V 전압을 출력할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한, 컨버터가 ZVS 동작을 수행하기 위해, 1차측 인덕터의 에너지 용량이 공진에 참여하는 1차측 스위치 출력 커패시터의 에너지 용량보다 커야 한다^[1]. 해당 조건은 (1)과 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2} L_{lk} i_{pri}^2 > C_{oss} V_{in}^2 \quad (1)$$

2.3 LLC 공진형 컨버터 설계 조건

LLC 공진형 컨버터는 ZVS 동작을 달성하기 위해선 그림 3의 초록색으로 표시된 inductive region에서 동작해야 하며, 공진 인덕턴스 L_r 의 에너지 용량이 공진에 참여하는 1차측 스위치 출력 커패시터 에너지 용량보다 커야 한다. 해당 조건은 (2)와 같이 수식으로 나타낼 수 있다^[2].

$$L_r > \frac{k_{\min} t_{dt}}{16 C_s f_r} \quad (2)$$

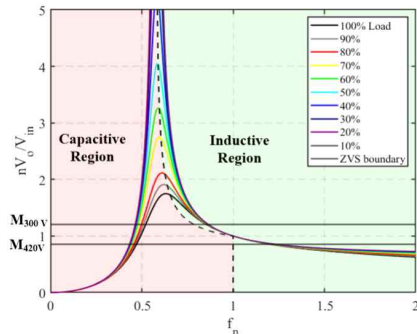


그림 3. LLC 공진형 컨버터의 부하별 전압 이득 곡선.
Fig. 3. LLC resonant converter voltage gain curve by load range.

2.4 설계 사양

표 1 PSFB 컨버터 설계 파라미터
Table 1 Design parameters of PSFB converter

파라미터	값
입력 전압 (V_{in})	300-420 [V]
출력 전압 (V_o)	12 [V]
변압기 권선비 (n)	20
출력 전력 (P_{out})	1.8 [kW]
누설 인덕턴스 (L_{lk})	5 [μ H]
자화 인덕턴스 (L_m)	1 [mH]
출력 커패시턴스 (C_o)	2 [mF]
출력 인덕턴스 (L_o)	10 [μ H]
스위칭 주파수 (f_s)	100 [kHz]
MOSFET 모델	P3M12017K4
다이오드 모델	150EUB04

표 2 LLC 공진형 컨버터 설계 파라미터
Table 2 Design parameters of LLC resonant converter

파라미터	값
입력 전압 (V_{in})	300-420 [V]
출력 전압 (V_o)	12 [V]
변압기 권선비 (n)	30
출력 전력 (P_{out})	1.8 [kW]
공진 인덕턴스 (L_r)	50 [μ H]
자화 인덕턴스 (L_m)	100 [μ H]
공진 커패시턴스 (C_r)	50 [nF]
출력 커패시턴스 (C_o)	2 [mF]
공진 주파수 (f_r)	100 [kHz]
스위칭 주파수 (f_s)	85-122 [kHz]
MOSFET 모델	P3M12017K4
다이오드 모델	150EUB04

본 논문에서는 상기한 설계 조건과 400 V 전기자동차 시스템의 사양을 고려하여 표 1, 2와 같이 컨버터 파라미터를 설계하였다. 즉, PSFB 컨버터는 300 V를 기준으로 12 V로 강압할 수 있도록 권선비를 설계하였고, LLC 공진형 컨버터는 300-420 V 범위의 승·강압 구간의 범위가 같도록 360 V를 기준으로 권선비를 설계하였다. 또한, PSFB 컨버터는 (1) 조건, LLC 공진형 컨버터는 (2) 조건을 만족하며 동작 지점이 그림 3의 inductive region에 위치하도록 설계하였다.

2.5 시뮬레이션 결과

그림 4와 같이 PSIM 시뮬레이션을 통해 PSFB 컨버터와 LLC 공진형 컨버터의 부하별 효율을 나타내었다. 전체 부하 구간에서 PSFB 컨버터가 LLC 공진형 컨버터에 비해 높은 효율을 갖는다.

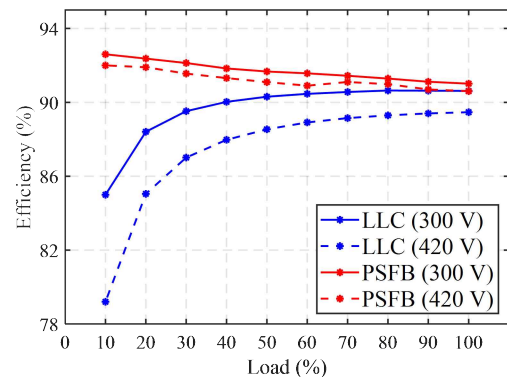


그림 4. 각 컨버터의 부하별 효율 비교.
Fig. 4. Efficiency comparison for each converter.

3. 결론

본 논문에서는 전기자동차 LDC용 절연형 DC-DC 컨버터인 PSFB 컨버터와 LLC 공진형 컨버터를 비교·분석하였다. PSFB 컨버터 및 LLC 공진형 컨버터를 분석하고, PSIM 시뮬레이션을 통해 효율을 비교하기 위해 400 V 전기자동차 시스템을 고려하여 1.8 kW 출력 전력, 300-420 V 입력 전압, 12 V 출력 전압을 기준으로 각 컨버터를 설계하였다. 설계한 컨버터의 부하별 효율은 전체 부하 구간에서 PSFB 컨버터가 LLC 공진형 컨버터에 비해 높게 측정되었다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A3B2079407)

참고 문헌

- [1] L. Zhao, H. Li, Y. Hou, and Y. Yu, "Operation analysis of a phase-shifted full-bridge converter during the dead-time interval," *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 9, pp. 1777 - 1783, Jul. 2016.
- [2] J.-H. Jung, H.-S. Kim, M.-H. Ryu, and J.-W. Baek, "Design methodology of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1741 - 1755, Apr. 2013.