

차세대 통합 변압기를 적용한 4kW Low-Voltage DC 컨버터

권경현¹⁾, 이동인¹⁾, 정성욱¹⁾, 권영빈²⁾, 김홍성²⁾, 김세인²⁾, 윤한신¹⁾

인천대학교 전기공학과

A Novel 4kW Output Low-Voltage DC Converter With Integrated Planar Transformer

Gyeong-Hyun Kwon¹⁾, Dong-In Lee¹⁾, Seong-Wook Jeong¹⁾,

Young-Bin Kwon²⁾, Hong-Seong Kim²⁾, Se-In Kim²⁾, Han-Shin Youn¹⁾

Department of Electrical Engineering, Incheon National University

코어 단면적 감소 및 턴비 감소로 인한 LDC 컨버터 전체 전력밀도가 증가하였다.

ABSTRACT

본 논문에서는 일차 측 권선을 공유하는 통합 평면 변압기를 적용한 Low-Voltage DC Converter (LDC)를 제안한다. 최근 자율주행 기술이 발전함에 따라, 4kW 급 출력 전력이 요구되는데, 이를 만족시키기 위해서는 기존 2kW 급 LDC 2ea를 직. 병렬연결된 모듈이 주로 사용되어, 자성체가 총 4개가 사용되었다. 동일 4kW 전력 기준, 제안하는 회로는 기존 4개의 자성체 코어를 3개로 통합하고, 1차 측 권선을 공유함에 코어 단면적 감소 및 LDC 전력 밀도 증가를 보장한다.

1. 서론

최근 전기 자동차의 충전 시스템 (EVs)에서의 저전압 (LV) 배터리 충전과 전원 공급을 위한 Low-Voltage DC Converter (LDC)의 필요성이 더욱 부각되고 있다. 자율주행 기술의 발전하면서, EVs의 충전 시스템에서 전력 요구 증가에 기반한다. 차세대 자율주행 기술 맞춤 LDC 대 전력화 기술은 반드시 필요하며, 전력 용량 증가에 따른 부피 증가를 최소화하기 위해 LDC 부피 감소 연구는 필수적이다.

일반적으로 LDC 컨버터의 부피 중 약 50%는 변압기와 출력 인덕터와 같은 자성체가 차지하고 있다. 이로 인해, 그림 1과 같이 출력 인덕터와 변압기가 통합된 새로운 LDC 컨버터가 많이 개발된 사례가 있으나^[1], 4kW급 LDC 컨버터 구성을 위해 직.병렬연결 2kW LDC 컨버터 2ea (자성체 코어 4ea)가 사용되고 있다. 결과적으로 출력 인덕터와 변압기를 통합함에도 불구하고 부피 저감의 효과는 크지 않다.^[1]

결과적으로, 본 논문에서는 고효율, 고전력 밀도 단일 4kW Active-Clamp Forward (ACF) 타입 LDC 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 기존 4개의 자성체를 자기 회로 기반 3개로 통합하였으며,

2. 본론

2.1 제안하는 LDC 컨버터

제안하는 4kW 단일 LDC 컨버터는 1차 측 권선을 공유하여 변압기와 인덕터가 통합된 형태이다. 그림 1 (a), (b)에서 보여주는 회로는 기존 2kW LDC 2개를 직. 병렬연결한 회로와 제안하는 4kW 단일 LDC 컨버터 회로이다.

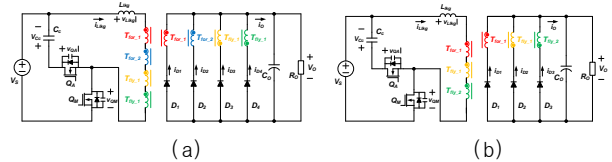


그림 1 (a) 기존 4kW LDC, (b) 제안하는 4kW LDC
Fig.1 (a) Conventional 4kW LDC, (b) Proposed 4kW LDC

그림 1 (b)에 나타난 제안하는 LDC 컨버터는 4kW의 출력 전력을 보장한다. 이전에는 동일한 4kW 출력 전력을 달성하기 위해 그림 1. (a)와 같이 2kW LDC 컨버터를 직. 병렬 연결하였다. 그러나 제안된 회로는 1차 권선을 공유하는 변압기를 기반으로 하여 두 개의 2kW LDC 컨버터를 단일 회로로 통합한 것이다.

2.2 제안하는 변압기 형상

그림 2은 기존 및 제안하는 LDC 컨버터의 1차 측 권선을 보여준다. 기존 및 제안하는 컨버터는 평면 변압기를 사용하여, 변압기 1차 측 권선은 PCB 2층과 3층에 직렬로 배치된다. 상술에 의하여 유도된 자기 회로는 그림 3에서 보여준다. 그림 2 (a)와 같이 1차 측 권선이 배치된 경우 생성되는 코어 내 자속은 R_a 와 R_b 에서 상쇄 된다. 결론적으로 제안하는 변압기는 R_a 와 R_b 를 제거해 두 개의 코어를 하나로 통합하였다.

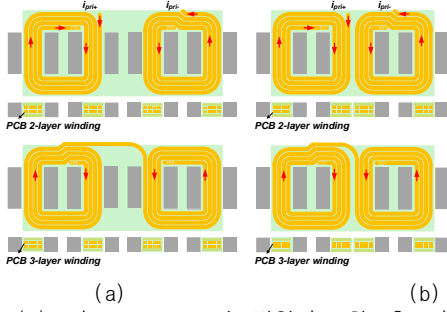


그림 2 (a) 기존 4kW LDC의 변압기 1차 측 권선, (b) 제안하는 4kW LDC의 변압기 1차 측 권선
Fig.1 (a) Primary winding of the transformer in the Conventional 4kW LDC, (b) Primary winding of the transformer in the Proposed 4kW LDC

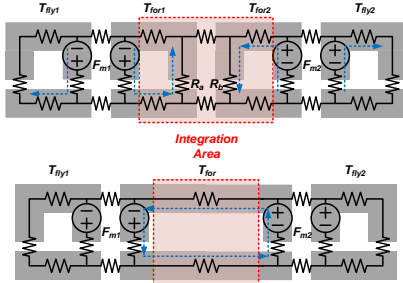


그림 3 1차측 권선에 의해 유도된 기존 및 제안하는 자기 회로.

Fig.3 Magnetic circuit of both the proposed and the conventional transformer.

2.3 제안하는 LDC 컨버터 동작원리

제안 LDC 컨버터는 통합 평면 변압기 및 액티브 클램프 구조를 가지는 LDC 컨버터이다. 그림 4 (a)는 제안하는 LDC 컨버터의 동작 파형을 나타낸다.

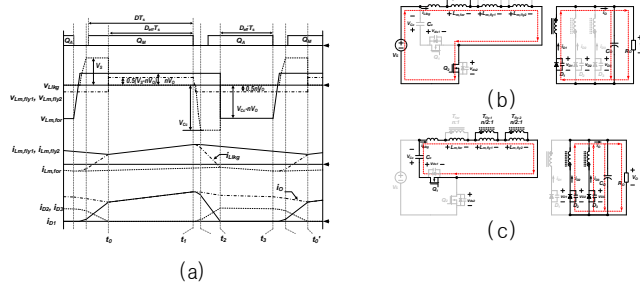


그림 4 (a) 동작 파형, (b) 메인 스위치 턴 온, (c) 보조 스위치 턴 온
Fig.1 (a) key waveform. (b) Turn-on main switch. (c) Turn-on Auxiliary switch.

Moed 1 ($t_0 - t_1$): 1차측 메인 스위치가 턴-온되면 누설 인덕턴스 전류(i_{Lkg})는 각각의 T_{By} 의 자화 전류에 도달한다. 이때 누설 인덕턴스 전류의 식은 아래의 식과 같다.

$$i_{Lkg}(t) = i_{Lm, fly}(t_0) + \frac{V_s - nV_o}{2L_{m, fly}}(t - t_0) \quad (1)$$

Moed 2 ($t_2 - t_3$): 1차측 보조 스위치가 턴-온되면 두 개의 T_{By} 에 저장되어있던 에너지가 출력으로 전달된다. 이때 다이오드 전류의 식은 아래의 식과 같다.

$$i_{D2}(t) = i_{D3}(t) = \frac{i_o(t)}{2} = \frac{i_{Lm, fly}(t) - i_{Lm, for}(t)}{2n} \quad (2)$$

3. 시뮬레이션

표 1 제안된 LDC 컨버터 파라미터

Table 1 Proposed LDC converter parameters

Parameter	Value
DC input voltage (V_{in})	826V
DC output voltage (V_o)	15.1V
Output power (P_o)	3.6kW
Switching frequency (F_{sw})	200kHz
Forward inductance ($L_{m, for}$)	30 μ H
Flyback inductance ($L_{m, fly}$)	15 μ H

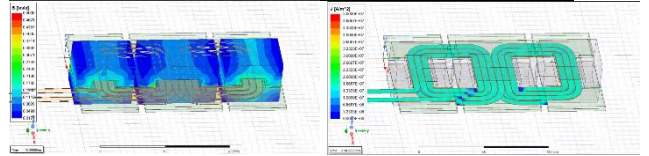


그림 5 제안하는 변압기의 자속밀도와 전류밀도

Fig.5 magnetic flux density and current density of the proposed transformer.

제안 LDC 컨버터의 통합 평면 변압기를 검증하기 위해 Maxwell을 사용한 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션의 구성요소 파라미터와 입출력 사양은 표 1에 요약되어 있다. 시뮬레이션 결과는 그림 5에 나타나있다. 그림 5를 통해 제안하는 평면 변압기의 최대 자속 밀도 및 전류밀도는 각 0.3T, 40A/mm²을 초과하지 않음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 두 개의 기존 2kW LDC 컨버터를 통합한 새로운 4kW LDC 컨버터를 제안한다. 1차측 권선을 공유하는 변압기는 기존 4개에서 3개로 코어 수가 감소하였다. 결론적으로, 코어 단면적 감소하여 전력 밀도 증가 및 가격 경쟁력이 상승하였다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로
정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된
지역지능화혁신인재양성사업임.
(IITP-2024-RS-2023-00259678)

참고 문헌

[1] Lee D-W, Lim J-H, Lee D-I, Youn H-S. A High-Power-Density Active-Clamp Converter with Integrated Planar Transformer. *Energies*. 2022.
[2] D. -W. Lee, H. -S. Youn and J. -K. Kim, "Development of Phase-Shift Full-Bridge Converter With Integrated Winding Planar Two-Transformer for LDC," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 1215-1226, March 2023.