초소형 전기자동차용 고밀도 LDC 설계

김태원 이재원 송현석 채용웅 김준호
계명대학교

High-density LDC design for ultra-compact electric vehicles

TaeWon Kim, JaeWon Lee, HyeonSeok Song, YongYoong Chai, JunHo Kim
Keimyung University

ABSTRACT

본 논문은 초소형 전기자동차용 Low voltage DC-DC Converter(LDC)의 고전력밀도화 기법을 제시한다. Sync-Buck 구조를 사용해 구조를 단순화하고, Planar 인덕터 적용, PCB와 방열 plate를 사용하여 PCB와 방열 기구물의 접촉면을 증대시킴으로써 전력밀도를 향상시킬 수 있음을 보인다. 500W(12V, 41.67A)급 시제품 제작 및 배터리 입력 조건인 58V~84V 영역에서 실험을 통해 제안한 기법의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

세계 각국은 Euro 6 정책으로 대기오염의 원인인 배기가스 배출을 제한하고 있다. 이에 따라 전기자동차용 차량의 주행 및 안전, 편의기능 사용을 위한 LDC의 연구가 진행되고 있다. LDC는 엔진룸, 차량 후석 시트 하단이나 트렁크 공간에 장착되므로 고밀도화가 요구되고 있다.

기존의 LDC는 Phase Shift Full Bridge(PSFB)컨버터와 Active Clamp Forward(ACF)컨버터를 사용하였다.[1~3] PSFB 컨버터는 넓은 입출력 범위의 전압제어에 적합하나 순환 전류에 의해 1차측 스위치의 도통손실이 발생하는 단점이 있다. 따라서 PSFB의 장점을 가지면서 순환전류가 발생하지 않아 중부하 이상에서의 손실을 저감할 수 있는 ACF 컨버터가 연구되었다. 그러나 초소형 전기차의 배터리 전압이 낮으므로 변압기의 사용이 불필요하며 고전력 밀도의 달성을 위해서는 구조가 단순하면서 출력 필터를 갖는 회로의 적용이 필요하다.

본 논문에서는 PSFB, ACF 컨버터 회로보다 구조가 단순하고 변압기를 사용하지 않는 Sync-Buck 컨버터를 이용하여 초소형 전기자동차용 LDC의 고밀도 및 경량화를 달성한다. Planar 인덕터를 이용해 전체 부피를 감소시키고, 방열 plate를 사용하여 PCB와 방열 기구물의 접촉면을 증대하여 열전도를 용이하게 함으로써 전력밀도를 향상시키는 기법을 제시한다. 출력 500W(12V, 41.67A)급 시제품 제작 및 실험을 통해 전력밀도와 효율을 검증한다.

2. 고밀도 LDC 설계

2.1 설계 과정

2.1.1 자성체 설계

Sync-Buck 컨버터는 단순한 구조를 가지며, 주요설계소자는 출력 인덕터로 볼 수 있다. 본 연구에서는 Low profile 구조를 위해 Planar core를 사용하며, 방열 plate를 두 장의 PCB 사이에 배치하는 구조를 갖는다. 그러므로 core 선정 및 PCB 패턴의 구성에 있어 PCB 패턴의 전류밀도가 그림 1의 α 길이에 영향을 받는다는 것을 고려해야 한다. 또한, PCB 내부 층의 수가 패턴의 전류 밀도 및 core의 높이에 영향을 미치므로 턴 수 및 PCB 패턴의 가닥수를 함께 선정해야 한다.

$$J = \frac{I_{rms}}{\alpha H N_{Layer}} \quad (1)$$

$$L = \frac{V_o(1-D)}{\triangle i_L f} \quad (2)$$

$$N = \frac{L I_{peak}}{A_e B_{\max}} \quad (3)$$

식 (1)에서 J는 인덕터 PCB 패턴에서의 전류 밀도, I_{rms}는 전류실효값, α는 코어의 내부 길이(그림 1), H는 PCB 패턴의 두께, N_{Layer}는 PCB 패턴의 가닥 수 이다. 식 (2)에서 V_o는 출력전압, D는 시비율, $\triangle i_L$은 인덕터의 전류 리플, f는 스위칭 주파수, L은 인덕터의 인덕턴스이다. 식 (3)에서 N은 턴 수, I_{peak}는 인덕터 전류 최대치, A_e는 인덕터 코어의 단면적, $B_{\max}$는 최대 자속밀도이다.

식 (1), (2), (3)으로부터 인덕터의 인덕턴스, 코어, PCB 패턴의 구성 정보를 선정할 수 있다. α의 길이를 PCB 패턴의 최대 너비로 정하면, PCB 패턴의 가닥 수와 전류 밀도가 식 (1)의 관계를 갖는다. 식 (2)와 (3)으로부터 최대 자속 밀도를 넘지 않기 위한 인덕턴스와 턴 수(그림 2)가 정해지면 PCB 내부 층의 수를 선정할 수 있다.

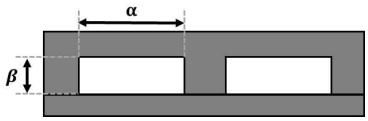


그림 1 Planar core 구조 (EI Type)

턴 수 / 전류리플	3 Turn	4 Turn	5 Turn	6 Turn	7 Turn
35% (L=7.1uH)	0.512	0.384	0.307	0.256	0.219
40% (L=6.2uH)	0.457	0.343	0.274	0.229	0.196
45% (L=5.5uH)	0.415	0.311	0.249	0.207	0.178
50% (L=4.9uH)	0.381	0.286	0.229	0.190	0.163
55% (L=4.5uH)	0.353	0.265	0.212	0.177	0.151
60% (L=4.1uH)	0.330	0.248	0.198	0.165	0.141

B_{max} 0.31 이상
B_{max} 0.26~0.31
B_{max} 0.21~0.26
B_{max} 0.21 이하

그림 2 턴 수에 따른 코어의 최대 자속밀도

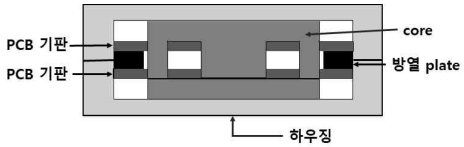


그림 3 LDC 내부 구조 개념도

그림 4 LDC 시제품 내부구조

(a) 가로 (b) 세로 (C) 높이

그림 5 시제품 하우징 구조

표 1 시제품 사양 및 구성소자

Parameter	Value
입력전압	72V nominal (58V~84V)
출력전력 (전압, 전류)	500W (12V,41.67A)
주파수	100kHz
MOSFET	BSC040N10NS5
자성체	ELP 43/10/28(EI Type) (턴수: 4Turn, 인덕턴스(4.5uH)

2.2 LDC의 고밀도화 기법

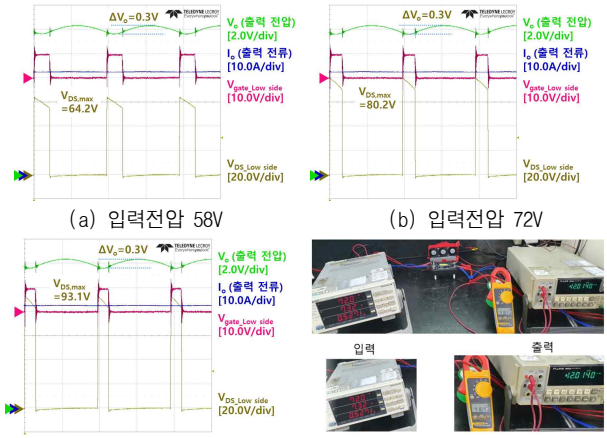
Sync-buck 컨버터 구조에서 고밀도화를 위해서는 인덕터의 부피 저감이 필요하고, 이를 위해 Planar 코어를 적용한다. 이를 통해 Low profile의 구조를 가질 수 있지만, PCB 패턴의 너비가 제한되어 패턴의 전류밀도가 높아지게 된다. 이는 패턴에서의 손실 상승으로 이어져 발열량을 높이게 되므로 그림 3과 같이 PCB 사이에 방열 plate를 배치하여 열을 방출시키는 구조로 설계한다. 또한, 인덕터 코어의 양면을 하우징과 밀착시킴으로써 하우징을 통해 인덕터의 열이 외부로 방출되는 구조를 형성한다.

방열 plate와 PCB의 두께를 코어의 β 값 이하가 되도록 설계하여, 하우징의 높이를 20mm로 제한한다. 반도체 소자들을 SMD type으로 선정하였으며 모든 소자는 PCB의 한쪽 면만을 활용한다. 하우징에 스위칭 소자와 접촉할 수 있는 기구 구조를 만들어 스위치의 열을 하우징을 통해 방열될 수 있도록 설계한다.

제작된 시제품의 내부 및 하우징은 그림 4, 5와 같으며 EI 형태의 코어를 사용함으로써 코어의 높이를 최소화하여, 하우징 기준 0.126L(94mm x 67mm x 20mm)로 제작되었다. 하우징을 포함한 전력밀도는 3.93W/mm^3 (64.48W/inch^3)이다.

2.3 실험결과

표 1의 입력전압 영역에서 시제품의 동작을 Full load 조건까지 검증하였으며, 그림 6은 실험 환경 세팅과 Full Load 조건에서 전압별 실험 파형이다. 파형에서 확인할 수 있듯이 모든 전압 조건에서 정상 동작함을 확인할 수 있다.



(a) 입력전압 58V (b) 입력전압 72V

(c) 입력전압 84V (d) 실험환경 세팅

그림 6 Full load (500W) 동작 파형 및 실험 환경 세팅

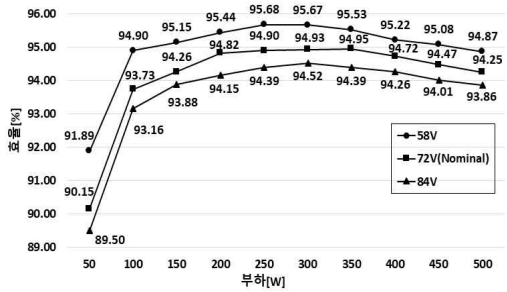


그림 7 입력 전압에 따른 부하별 효율

출력 전압의 리플은 0.3V (2.5%) 수준이며, Full load 조건임에도 출력 전류에 리플이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 하부 스위치의 최대 전압 스트레스는 93.1V로써 선정된 소자의 동작에 문제가 없음을 확인하였다. 그림 7은 시제품의 입력 전압에 따른 부하별 효율 측정 결과이다. 72V(Nominal)입력에서 최대효율 94.95%를 달성하였으며, 모든 입력 전압 영역에 대해 20% 이상의 부하 조건에서 93% 이상의 효율을 보임을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 Sync-Buck 구조를 사용하여 구조를 단순화하고, Planar 인덕터 및 방열 plate 적용과 PCB 패턴 와인딩을 사용하여 초소형 전기차용 LDC를 고밀도로 설계하였다. 설계상 고려 사항과 방열 방안을 제시하였으며, 시제품 제작 및 평가를 통해 제안된 기법의 타당성을 검증하였고, 최종적으로 3.93W/cm^3(64.48W/inch^3)의 전력밀도와 모든 입력 전압 영역에 대해 20% 이상의 부하 조건에서 93% 이상의 효율을 갖는 LDC를 제작하였다.

본 연구는 대구광역시 미래형자동차 선도기술개발사업의 지원으로 수행되었음 (과제번호 DG-2017-06)

참 고 문 헌

[1] 윤한신, “하이브리드 및 전기자동차 등 환경차 전장 부하용 LDC 시스템의 기술동향”:전력전자학회지25(2),2020.4,32-36

[2] 김종필, 이우영, 김삼균, 하승우, 김석준“HEV/PHEV용 고효율 2단 LDC 설계”:한국자동차공학회 춘계학술대회,2013.5,1879-1886(8 pages)

[3] 신민호, 엄태호, 김준모, 이정, 김석훈, 이용석, 원충연 “고효율 분산형 LDC 전원장치의 최적설계”:조명전기설비학회논문지 31(4),2017.4,57-64