

고효율을 위한 능동 클램프 포워드 컨버터의 설계

엄태호¹, 김준모¹, 이정¹, 김성훈¹, 신민호², 원충연¹
 성균관대학교¹, APEL(주)²

Design of the active clamp forward converter for high efficiency

Tae Ho Eom¹, Jun Mo Kim¹, Jeong Lee¹, Sung Hun Kim¹, Min Ho Shin², Chung Yuen Won¹
 Sungkyunkwan University¹, APEL Co., Ltd.²

ABSTRACT

본 논문은 전기자동차의 HVBAT 전력을 LVBAT에 충전하는 LDC 전원장치의 고효율 설계 방법에 대하여 설명한다. 기존의 단일형 LDC 전원장치의 배터리 모듈 불평형 문제를 직렬 분배 방식의 모듈형 LDC로 설계하여 불평형 문제를 해결할 수 있는 장점을 갖고 있다. 제안하는 LDC 전원장치는 기존 단일형 1kW이상의 용량에서 모듈형의 150W용량을 가지며 절연이 가능한 포워드 컨버터로 설계하였다. 그리고 소형화가 가능하고 적은 부품수로 설계할 수 있는 능동 클램프 방식의 포워드 컨버터로 선정하였다. 또한 부피와 무게를 최소화하면서 고효율 구현이 가능한 설계기법을 제안하고 실험을 통하여 타당성을 검증한다.

1. 서론

전기자동차 시장의 발전 저해요소로 충전에 대한 전력공급의 한계가 문제되고 있어 고효율, 높은 이용률의 성능을 갖는 전기자동차 시스템이 요구된다. 전기자동차의 주행거리는 배터리의 효율적인 충, 방전 제어기법과 고효율 컨버터기술이 요구되고 있다. 주행거리가 150km인 배터리용량에 컨버터의 효율에 따라서 10%이상 저하될 수 있는 문제점을 가지고 있어 최근 LDC 전원장치의 효율은 95%이상의 고효율이 요구된다. 전력 당 부피와 무게 또한 이동수단의 연비를 저하시키는 요소로써 효율만큼 중요시되고 있고, 최적의 사이즈에 고효율 컨버터의 설계가 중요하다. 본 논문에서는 최적의 부피와 무게 대비 고효율의 컨버터 구현을 위하여 변압기의 최적화 설계 및 주파수 선정, 스위칭손실 분석을 통한 스위칭선정 및 필터 설계방법에 대하여 제안하고, 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.

2. LDC 시스템 구성 및 설계

2.1 전기자동차의 전력시스템 구성

그림 1은 전기자동차의 OBC(On board charger)와 LDC (Low voltage dc dc converter), HVBAT(고전압 배터리, High voltage battery)와 LVBAT(저전압 배터리, Low voltage battery)가 포함된 전기자동차의 전력시스템 구성을 나타낸다. HVBAT는 리튬 이온 배터리로 8셀이 한 모듈로 구성된다. 구성된 배터리 모듈 당 LDC를 병렬로 결선하여 LVBAT를 충전

하는 방식으로 시스템이 구성되어 있다. LDC의 입력 전압은 HVBAT 모듈의 출력 전압인 25V~34V이며, LDC의 출력은 LVBAT 전압인 12V로 제어된다.

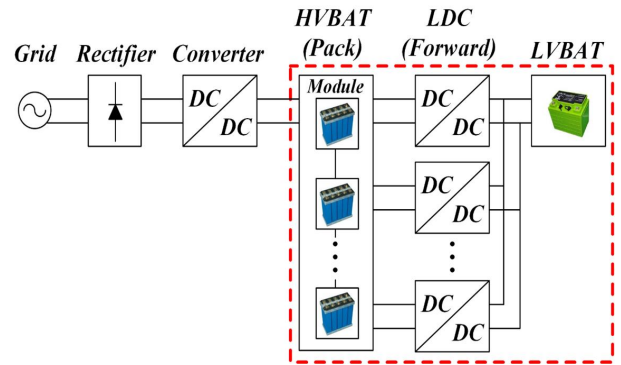


그림 1. 전기자동차의 전력시스템 구성
 Fig. 1. Power system configuration of electric vehicle

2.2 LDC 전원장치 구성

그림 2는 포워드 컨버터로 구성된 LDC 전원장치의 회로도를 나타낸다. LDC 전원장치의 부피 최적화를 위하여 LC 필터로 구성된 EMI 필터로 설계하였다. 또한 변압기의 포화를 방지하기 위하여 3권선 변압기로 구성된 기존의 포워드 컨버터가 아닌 스위치로 구성된 능동 클램프 포워드 컨버터로 설계하였다. 이를 위한 클램프 회로가 변압기 1차 측에 구성되어 있으며, 메인스위치 및 2차 측의 동기식 정류 스위치와 동기식 환류 스위치, 변압기로 구성하였다. 변압기는 2차 측의 전류량이 많기 때문에 2차 병렬 방식의 플래너 변압기를 사용하여 발열과 부피를 최소화하였다.

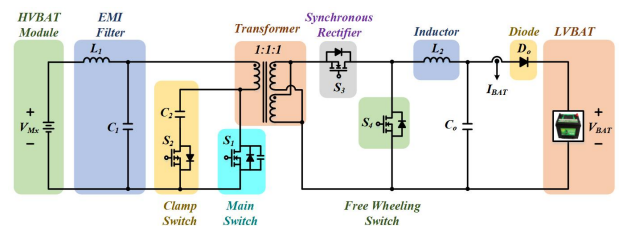


그림 2. 능동 클램프 포워드 컨버터의 회로 구성
 Fig. 2. Circuit configuration of active clamp forward converter

2.3 LDC 전원장치 설계

포워드 컨버터의 메인 스위치 소자는 일반적으로 내압을 고려하여 2배의 내압으로 설계를 한다. 요구되는 최고의 내압 대비 전류 용량이 크고 동일한 부피의 패키지 소자를 선정할 땐 $R_{DS(on)}$ 저항을 최소화하여 도통 손실을 감소하였다. 식 (1)을 통해 스위치 소자에서 발생하는 손실을 산출할 수 있다. 모든 스위치는 전 구간에서 ZVS(Zero voltage switching)을 수행하기 때문에 스위칭 손실은 무시될 수 있다. 스위치의 도통 손실과 바디 다이오드의 도통 손실, Reverse recovery로 인한 손실, 게이트 저항에 의한 전력 손실로 식 (2) ~ 식 (5)를 통해 스위치의 전체 손실을 산출할 수 있다.

$$P_{sw,loss} = P_{sw(s)} + P_{cond(s)} + P_{cond(d)} + P_{rr(d)} + P_{g(s)} \quad (1)$$

$$P_{cond(s)} = R_{ds(on)} I_{Q(rms)}^2 \quad (2)$$

$$P_{con(d)} = V_f I_{D(avg)} \quad (3)$$

$$P_{rr(d)} = f_{sw} V_{rr} Q_f \quad (4)$$

$$P_g = f_s V_g Q_g \quad (5)$$

그림 3은 스위칭 주파수에 따른 변압기의 온도 변동을 열화상 카메라를 이용하여 측정하였다. 스위칭 주파수가 낮을수록 전류 리플의 크기가 커지며, 이로 인하여 변압기 온도가 상승하며 코어 손실이 증가하게 된다. 반면, 스위칭 주파수가 증가함에 따라 전류 리플의 크기가 감소하며, 코어 손실이 감소하게 된다. 본 논문에서 제안하는 95%이상의 효율을 만족하는 범위로 변압기 손실이 2%이내에 발열이 가장 작은 스위칭 주파수인 250[kHz]로 선정하였으며, 변압기와 출력 측 인덕터의 온도를 최적화하여 고효율과 최소의 부피를 만족하는 소자값을 선정하였다.

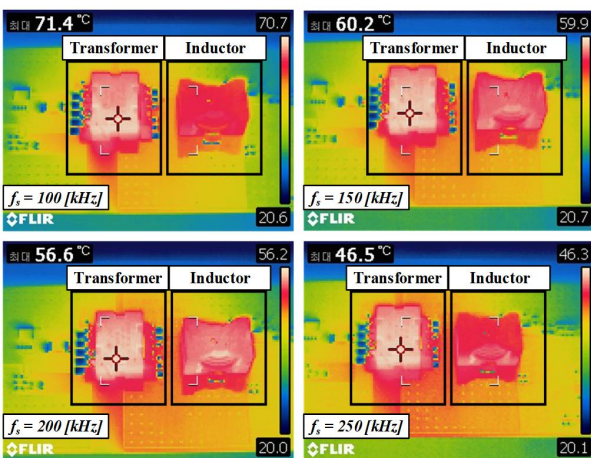


그림 3. 스위칭 주파수에 따른 변압기 온도
Fig. 3. Transformer temperature according to the switching frequency

3. 실험 결과

그림 4는 PCB 타입으로 제작한 LDC 모듈의 하드웨어 구성을 나타낸다. LDC 모듈과 메인 컨트롤러로 구성되며, LDC 모듈은 게이트 드라이버 회로를 포함하고 있고, 메인 컨트롤러는 TI社의 TMS320F28335 DSP를 사용하였다. 또한 CAN통신을 이용하여 제어되며, ADC는 전압, 전류를 센싱할 수 있게 필터와 절연을 위한 ISO가 포함된다.

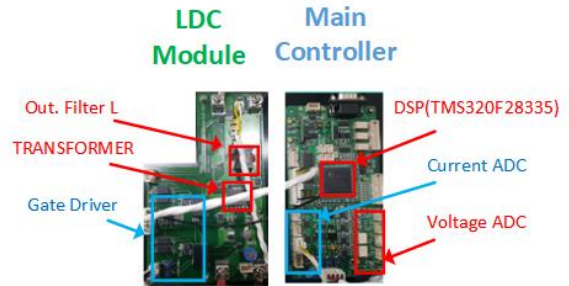


그림 4. LDC 모듈과 메인 제어기
Fig. 4. LDC Module and main controller

그림 5는 LDC 모듈의 부하량에 따른 효율 곡선을 나타낸다. 약 66% 부하에서 95.127%의 최대 효율을 측정하였다.

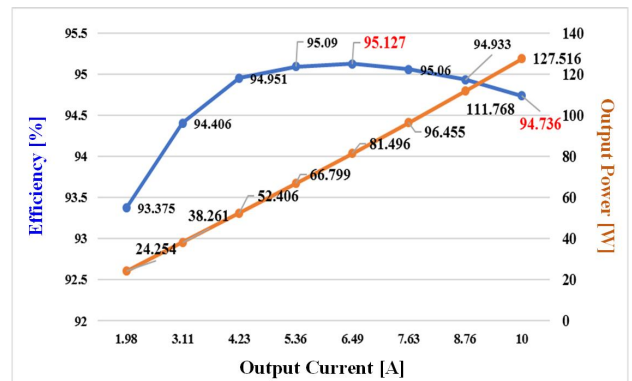


그림 5. LDC 모듈의 효율 곡선
Fig. 5. Efficiency curve of LDC module

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차의 LDC 전원장치에서 고효율을 구현하기 위하여 기존의 단일형이 아닌 모듈형으로 구성하였다. 또한 효율 향상을 위해 능동형 클램프 포워드 컨버터를 설계하여 분석하고, PCB 타입의 LDC를 제작하였다. 본 논문에서 제안하는 고효율을 위한 LDC의 설계에 대하여 실험을 통해 각 부하량에 대한 효율을 측정하여 검증하였다.

참고 문헌

[1] Bor Ren Lin, Kevin Huang and David Wang, "Analysis, design, and implementation of an active clamp forward converter with synchronous rectifier," IEEE Transactions on Circuit and Systems Part 1 : Regular Paper, vol. 53, pp. 1310-1319. June 2006.