

전기자동차용 자연냉각방식 고효율 800V-48V, 4kW LDC 개발

우현식, 이동한, 최세완†

서울과학기술대학교

Development of natural cooled high-efficiency 800V-48V, 4kW LDC for electric vehicles

Hyunsik Woo, Donghan Lee, Sewan Choi†

Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 800V 배터리를 탑재한 전기자동차용 자연냉각방식의 고효율 출력 48V, 4kW LDC(Low Voltage DC-DC Converter)를 제안한다. 제안하는 LDC는 하프 브리지 LLC 공진형 컨버터 모듈 2개로 구성된다. LLC 컨버터의 정류단을 다이오드로 구성하는 경우, 무부하 동작 시 비선형적인 전압 이득의 문제가 발생할 수 있다. 이에 본 논문에서는 공진형 컨버터 모듈 간의 이슈와 무부하 제어 방식에 대한 성능 비교를 소개한다.

1. 서론

최근 온실가스 환경 문제로 인해 전기자동차와 같은 친환경 자동차 산업이 주목을 받고 있다. 전기자동차에서 12V 배터리를 사용하여 보조 전원을 공급하는 대신, 전압을 상승시켜 48V로 전환하는 시도가 진행되고 있다. 보조 전원의 전압이 상승하면 전력 변환 시 발생하는 전력 변환 손실이 감소하고, 차량 내부의 하네스 두께가 줄어들어 차체 무게를 줄일 수 있어 전기자동차의 구동 효율이 증가하는 장점이 있다. 이와 더불어 전기자동차의 성능 향상으로 인해 차량 내부의 보조전원의 사용량 또한 증가하고 있다. 이에 더 많은 전력을 제공하기 위하여 컨버터를 병렬로 구성하는 모듈형 LDC가 검토되고 있다. 그러나 모듈형 LDC를 사용하는 경우 모듈 간 기생성분, 소자 및 센싱 오차 등에 의해 출력 전류 불균형이 발생한다. 이는 전체 시스템의 효율 및 신뢰성 저하를 야기하며, 모듈별 다른 스위칭 주파수를 사용해야 한다. LLC 공진형 컨버터는 모든 전압 범위와 부하 범위에서 ZVS 턴 온을 성취하여 높은 효율을 달성할 수 있는 장점이 있어 많은 응용분야에서 활용되는 토폴로지 중 하나이다.

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터를 적용한 48V 보조전원용 LDC를 제안한다. 제안하는 LDC는 1차 측에 하프 브리지, 2차 측은 다이오드 정류기를 사용한다. 2 모듈로 병렬 구성하여 발생하는 이슈와 경부하 제어 방식으로 많이 사용되는 Duty 제어와 Burst Mode의 성능 비교에 대하여 소개한다^[1]

2. 병렬 구조 LLC 컨버터

병렬 구조에서 중요한 것은 두 모듈 간의 소자나 센싱 오차가 없는 것이 가장 중요하다. 그림 2에서와 같이 설계한 값에서 5% 이내 오차를 가진 수동소자 값으로 전압 Gain을 곡선을 그렸다. 소자 오차로 인해 전압 Gain이 다른 것을 확인할 수 있다. 따라서 같은 전압을 출력하기 위해서는 서로 다른 스위

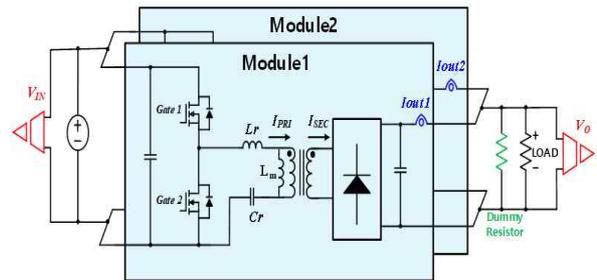


그림 1. 병렬 구조 LLC 공진형 컨버터

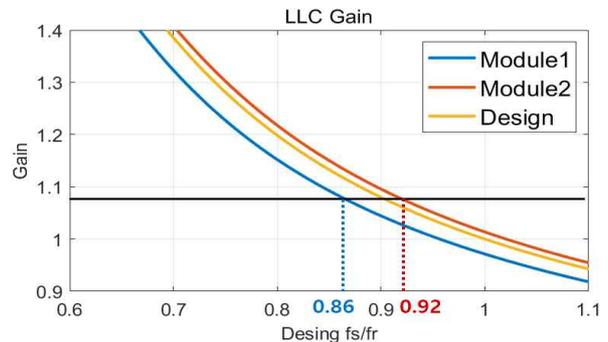


그림 2. 수동 소자의 오차로 인한 모듈 Gain 그래프

칭 주파수를 사용해야 한다. 만일 같은 스위칭 주파수를 사용하면 모듈 간 전류 불균형이 생기게 되어, 더 많은 전류가 흐르는 모듈의 소자에는 스펙 이상의 부하를 감당하게 된다. 이는 소자의 발열 및 소손된다.

3. 무부하 및 경부하 제어

다음의 2가지 방법을 사용한다. 1차 측 GATE의 Duty를 제어하는 방법과 히스테리시스 제어인 Burst Mode 제어가 방법이 있다. 그림 3(a),(b)에서 Normal Mode 즉 부하가 걸린 상태에서는 출력 전압을 유지한다. 무부하 상태가 되면 LLC Gain의 상승으로 인해 전압이 상승한다. 이후 다음 동작을 하게 된다. 그림 3(a)와 같이 Duty Cycle이 50%에서 감소시킨다. 출력 전압이 48V가 되면 Duty Cycle이 유지한다. Duty 제어는 PI 제어기를 사용하여 정상상태에 빠르게 도달할 수 있다. 그림 3(b)의 Burst Mode는 오차 범위를 넘게 되면 1차 측 스위칭을 모두 OFF 한다. 이후 오차 범위 이하로 떨어지게 되면 1차 측 스위칭을 ON 시킨다. 이를 반복하여 출력 전압을 유지한다.

표 1은 두 방식의 차이를 비교한다. Duty 제어는 스위칭 소자가 계속 동작해서 손실이 크지만, Burst Mode는 단위 시간당 스위칭 횟수가 적어 손실이 적다. 그리고 Duty 제어는 초기

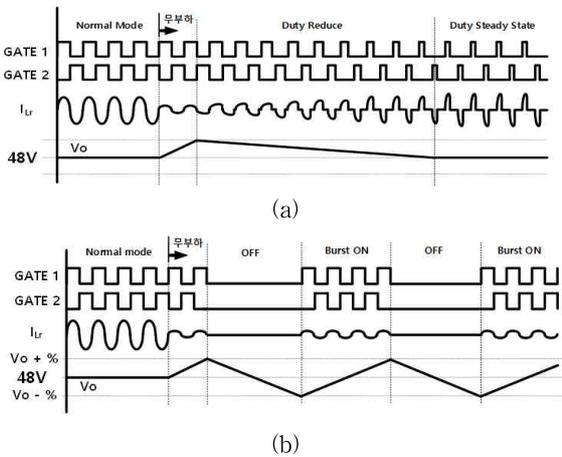


그림 3. (a) Duty 제어 동작 (b) Burst Mode 동작

	Duty 제어	Burst Mode
손실	크다	적다
출력 전압 리플	적다	크다
제어 방법	PI제어기	히스테리시스 제어기

표 1. Duty 제어 vs Burst Mode 비교

동작 후 일정하게 전압을 유지하지만 Burst Mode는 선정한 전압 범위에서 반복적으로 스위칭하기 때문에 전압 리플이 큰 단점이 있다. 그리고 Duty 제어는 PI제어기를 사용하여 제어 속도가 조절이 가능하다. Burst Mode는 히스테리시스 제어기를 사용하여 전압 리플 범위를 설정할 수 있다.

4. 실험 결과

그림 4는 LDC 시작품 사진이다. 그림 4(a)는 2kW LLC 컨버터 단일 모듈이며, 그림 4(b)는 Case의 구조이다. 그림 5(a)는 입력 800V, 출력전압 48V 2kW 단일 모듈 실험 파형이다. 무부하에서 Duty 제어와 Burst Mode 동작을 그림 5(b),(c)와 같이 확인했다. 그림 5(d)는 입력 800V, 출력전압 48V에서 4kW에서 자연냉각으로 20분 동작 모듈 온도 측정 결과이다.

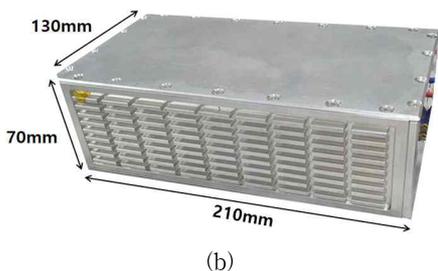
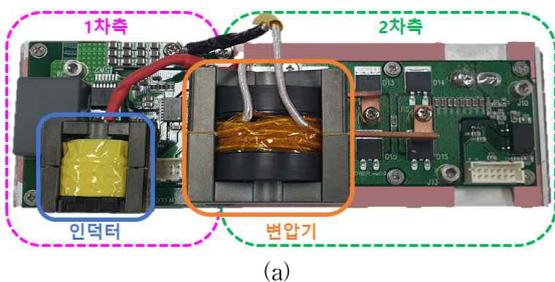


그림 4. LDC 시작품 사진 (a) 모듈 단품 (b) Case

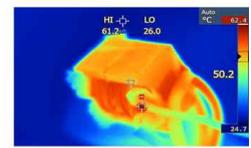
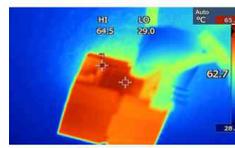
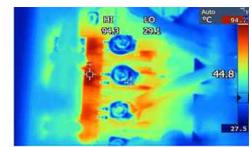
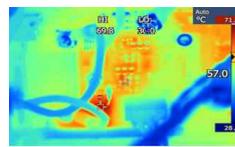
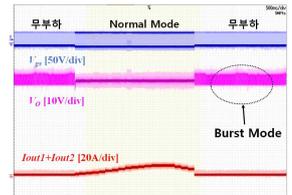
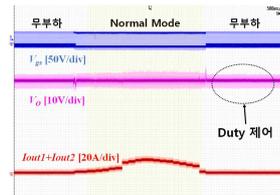
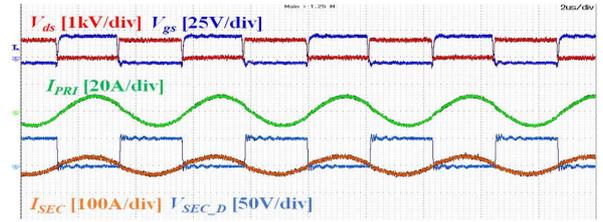


그림 5. (a) 1 모듈 입력 800V, 출력 48V, 2kW 동작 파형 (b)Duty 제어 (c)Burst Mode (d) 자연냉각 20분 동작 온도



그림 6. 4kW 실측 효율

5. 결론

본 논문에서는 2개의 모듈이 병렬 구조인 하프 브리지 LLC 공진형 컨버터의 이슈 및 무부하 제어 방법을 제안 및 비교하였다. 그림 6에서와 같이 입력전압 800V, 출력전압 48V, 최대 95.56%의 자연냉각방식의 고효율 4kW LDC를 개발하였다.

이 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단 LINC 3.0 사업의 지원을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

[1] L. Shi, B. Liu and S. Duan, "Burst-Mode and Phase-Shift Hybrid Control Method of LLC Converters for Wide Output Range Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 2, pp. 1013-1023, Feb. 2020