

친환경자동차용 5kW급 양방향 저전압 직류 변환장치 개발

박준성, 정병길, 권민호, 최세완
서울과학기술대학교

Development of 5kW Bi-directional Low Voltage DC-DC Converter for Eco-friendly Vehicles

Junsung Park, Byoungkil Jung, Minho Kwon, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 친환경 자동차용 양방향 절연형 저전압 직류 변환장치(Low voltage DC DC converter, LDC)를 제안한다. 제안한 컨버터는 직렬 공진형 컨버터를 이용한 2단 방식으로 비절연 컨버터가 전압 및 양방향 제어를 하며 절연부는 고정 듀티와 고정 주파수로 동작시켜 전 부하영역에서 ZCS 턴온 및 턴오프가 가능한 장점을 갖는다. 또한 양방향 전압제어가 가능한 제어 전략을 제안하였다. 5 kW급 시제품으로 제안한 방식의 타당성을 검증하였으며 강압모드시 최고효율 95.13 %, 승압모드시 최고효율 95.08 %를 달성하였다.

1. 서론

모든 친환경 자동차에서 사용되는 LDC는 차량 내 전장시스템에 에너지를 공급하는 역할로 고전압으로부터 저전압 보조 배터리를 충전한다. 친환경 자동차 중 연료전지자동차는 연료전지의 낮은 동특성을 보완하기 위해 그림 1과 같이 양방향 동작이 가능한 LDC가 필요하다. 또한 엔진 제너레이터 발전 시스템에서도 정상동작일 때 부하에 전력을 공급함과 동시에 저전압 배터리를 충전하고 고전압측 전압이 떨어지면 저전압측 배터리가 방전해서 고전압을 유지할 수 있는 양방향 LDC가 필요하다. 이런 양방향 LDC는 일반적으로 한쪽 전압만 제어하는 기존 양방향 컨버터와 달리 고전압측 전압 상황에 따라 고전압과 저전압 모두 제어가 필요하다.

본 논문에서는 저전압 대전류(28V, 178A)응용에 적합한 2단 방식의 양방향 고효율 LDC의 토폴로지와 양방향 전압제어가 가능한 제어 전략을 제안한다. 제안한 컨버터는 절연부의 직렬 공진 컨버터를 고정주파수로 최적점에서 동작시켜 전 부하에서 ZCS 턴온 및 턴오프 스위칭을 할 수 있다. 그리고 비절연 컨버터로 양방향 전압제어를 수행하므로 제어가 간단하고 끊임 없는 양방향 모드전환이 가능한 장점을 갖는다.

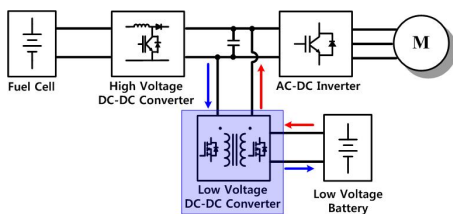


그림 1. 제안하는 양방향 LDC용 DC-DC 컨버터

2. 제안하는 양방향 LDC

제안하는 양방향 LDC를 그림 1에 나타내었으며 그림 2는 주요 파형이다. 제안한 LDC는 2단 방식으로 비절연부는 하프브리지 양방향 컨버터를 사용하였으며 절연부는 직렬 공진형 컨버터에 저전압 대전류측 손실을 줄이기 위해 소자수가 적은 센터탭 구조를 적용하였다. 절연부의 직렬공진 컨버터는 듀티(D=0.5)와 스위칭 주파수를 고정하여 사용하며 공진주파수를 아래의 수식과 같이 선정하여 양방향 동작 모두 전부하 영역에서 ZCS 턴온 및 턴오프가 가능하다.^[1]

$$f_r = \frac{1}{2D} f_s = \frac{1}{1-2D_s} f_s \quad (1)$$

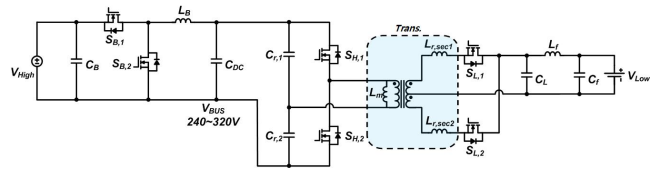


그림 2. 제안하는 고효율 양방향 LDC

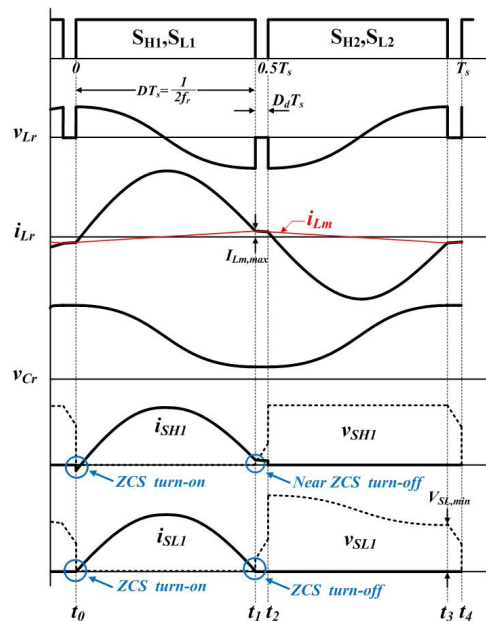


그림 3. 제안하는 고효율 양방향 LDC의 주요파형

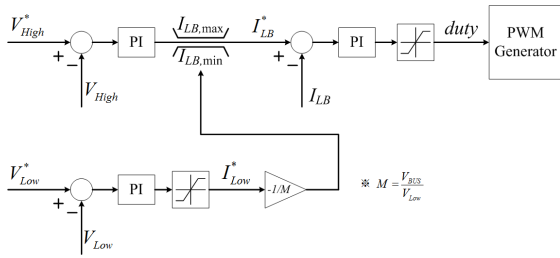


그림 4. 제안하는 양방향 제어전략

또한 전부하 영역에서 ZCS 턴온 및 턴오프를 유지하기 위해 그림 3의 $V_{SL,min}$ 이 0 V 이상이 되어야한다. 따라서 공진인덕터 L_r 을 아래의 수식과 같이 설계한다.

$$L_r < \frac{2n^2 V_{Low}}{\pi^2 I_{Low} f_r} \quad (2)$$

그리고 제안하는 LDC는 L_r 을 작게하여 Q곡선을 완만하게 사용하므로 고정주파수로 동작시켜도 전압이득이 공진소자 공차에 영향이 거의 없다.

기존 양방향 컨버터는 한쪽 전압을 제어하여 그 전압이 올라가거나 내려감에 따라 양방향 모드전환을 하게 된다. 하지만 양방향 LDC는 V_{High} 에 따라서 V_{High} 또는 V_{Low} 제어가 필요하다. 본 논문에서는 그림 4와 같이 정상동작일 때 V_{High} 보상기는 음의방향으로 포화되고 V_{Low} 보상기는 인덕터 전류의 음의 포화값 $I_{LB,min}$ 을 조절하여 저전압측 전압과 전류를 제어한다. 하지만 V_{High} 가 기준전압 V_{High}^* 이하로 떨어지게 되면 포화되어 있던 V_{High} 보상기가 인덕터 전류를 제어하여 V_{High} 를 제한한다. 이때 V_{Low} 보상기가 포화된다. 이렇게 각 보상기가 포화될 때 Windup 현상이 발생하여 이를 막기 위해 Anti windup을 사용하였다.

3. 실험 결과

제한한 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 5 kW, 28 V 시제품을 아래의 사양으로 제작하였다.

- ▶ P_o 5 kW ▶ V_{Low} 24~32 V ▶ V_{High} 360~440 V ▶ $N_p:N_s$ 5:1:1
- ▶ C_r 1.88 uF ▶ $L_{r,sec}$ 0.23 uH ▶ 절연부 f_s 48 kHz ▶ 비절연부 f_s 20 kHz

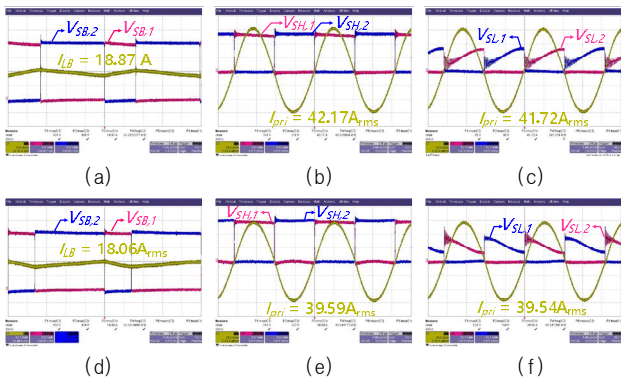
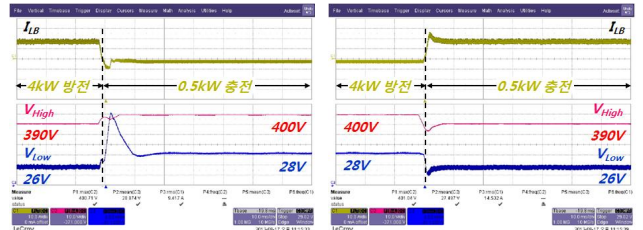


그림 5. 정격부하 실험파형 (a)승압모드 비절연부 (b)승압모드 절연부 고전압측 스위치 (c)승압모드 절연부 저전압측 스위치 (d)강압모드 비절연부 (e)강압모드 절연부 고전압측 스위치 (f)강압모드 절연부 저전압측 스위치

그림 5는 최대부하일 때 실험파형으로 (a), (b), (c)는 승압모드 스위칭 소자의 각부 파형이며 (d), (e), (f)는 강압모드시 스위칭 소자의 각부 파형이다. 절연부의 고전압측 스위치와 저전압측 스위치가 모두 ZCS 턴온 및 턴오프가 되는 것을 볼 수 있다.



(a) (b)

그림 6. 모드전환 실험파형 (a)승압모드→강압모드 (b)강압모드→승압모드

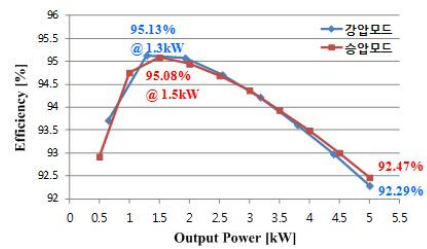


그림 7. 측정효율



그림 8. 제안하는 양방향 LDC 시제품 사진

그림 6은 제안한 양방향 제어전략에 따른 승·강압모드 전환 실험 파형이다. 그림 7은 제안한 컨버터의 승·강압 모드시 측정 효율로 YOKOGAWA사의 WT3000으로 측정하였으며 모든 영역에서 승·강압시 92%이상의 효율을 달성하였고 최고효율은 승압모드시 약 1.5 kW에서 95.08 %, 강압모드시 약 1.3 kW에서 95.13 %가 측정되었다.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차 LDC용 절연형 양방향 DC DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 제어가 간단하고 직렬 공진 컨버터를 최적점에서 동작시켜 승·강압시 전 부하에서 ZCS 턴온 및 턴오프 스위칭을 하여 고효율을 달성할 수 있다. 모든 영역에서 승·강압시 92 %이상 효율을 유지하며 승압모드시 최대부하효율 92.47 %, 강압모드시 최대부하효율 92.29 %를 달성하였다.

참고 문헌

[1] 김민재, 박준성, 최세완, “고정주파수에서 동작하는 SRC를 이용한 3.3kW급 고효율 차량 탑재형 충전기 개발,” 전력전자학회 2011년도 추계학술대회 논문집, 2011. 7, pp. 179-180.