

전기 자동차 배터리 충전을 위한 고효율, 고밀도를 갖는 새로운 위상 변조 PWM 풀 브릿지 컨버터

임천용, 문건우
한국과학기술원

A New Phase-Shifted PWM Full-Bridge Converter with High Efficiency and High Power Density for EV Charger

Cheon-Yong Lim and Gun-Woo Moon
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

기존 위상 변조 PWM 풀 브릿지 컨버터들의 단점인 큰 순환 전류, 심각한 이차측 전압 스트레스 및 스위칭 손실, 그리고 큰 출력 필터 문제를 개선할 수 있는 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 변압기의 2차측 센터탭에 축전기와 정류기로 구성된 클램핑 회로를 연결한 구조이다. 매우 간단한 구조를 통해 순환 전류를 제거하고 이차측 전압 스트레스를 낮출 수 있으며, 정류단의 스위칭 손실을 줄인다. 더불어 출력 필터의 크기 또한 작아진다. 실험을 통해 제안한 컨버터의 성능을 검증하였다.

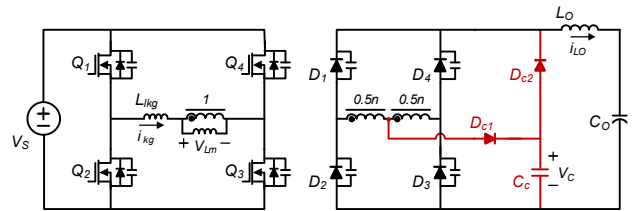


그림 1. 제안된 컨버터

1. 서론

위상 변조 PWM 풀 브릿지 컨버터 PSFB 은 배터리 충전기를 위한 수 kW급 파워 범위에서 많이 적용되고 있다. 일차측 스위치들이 영전압 스위칭 된 동작을 달성하며, 공진형 컨버터에 비해 간단하게 제어할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 전기 자동차용 배터리 충전기에 적용되었을 때 다음과 같은 단점들이 있다. 첫 번째로, 출력 전압의 범위가 매우 넓기 때문에 큰 순환 전류로 인해 도통 손실을 증가시킨다. 이차측에서는 출력 전압이 크고 역회복 전류가 흐르기 때문에 정류단의 전압 스트레스가 심각하게 커지며 정류단에서 발생하는 스위칭 손실도 매우 커진다. 마지막으로, 출력 전압이 크기 때문에 출력 필터단이 커진다는 한계점을 가진다.

PSFB 의 단점을 개선하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 우선, 순환 전류를 없애고 출력 인덕터의 크기를 줄이기 위해 주파수를 변동시키는 풀 브릿지 컨버터가 제안되었다 [1]. 하지만 넓은 출력 전압 범위에 대해서 동작 주파수가 매우 넓게 변하기 때문에 자성체나 축전기의 최적 설계가 어려워지는 한계를 가진다. 이차측 정류단의 전압 스트레스를 줄이기 위하여서는 능동 클램프 기법들이 많이 소개 되어 왔다 [2]. 하지만 추가적으로 스위치를 사용하기 때문에 전력 밀도를 떨어뜨리고 회로의 신뢰성을 저하시킨다는 한계점을 지닌다. 이차측 정류단에서의 스위칭 손실을 줄이기 위한 연구도 진행되었지만, 전력이 전달되는 경로에 스위치가 위치함으로써 추가적인 도통 손실과 스위칭 손실이 발생하는 문제를 여전히 지닌다 [3].

본 논문에서는 기존 PSFB 의 단점들을 개선할 수 있는 새로운 풀 브릿지 컨버터를 제안한다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 컨버터를 보여준다. 변압기의 2차측 센터탭에 축전기와 정류기로 구성된 클램핑 회로를 연결한 구조이다.

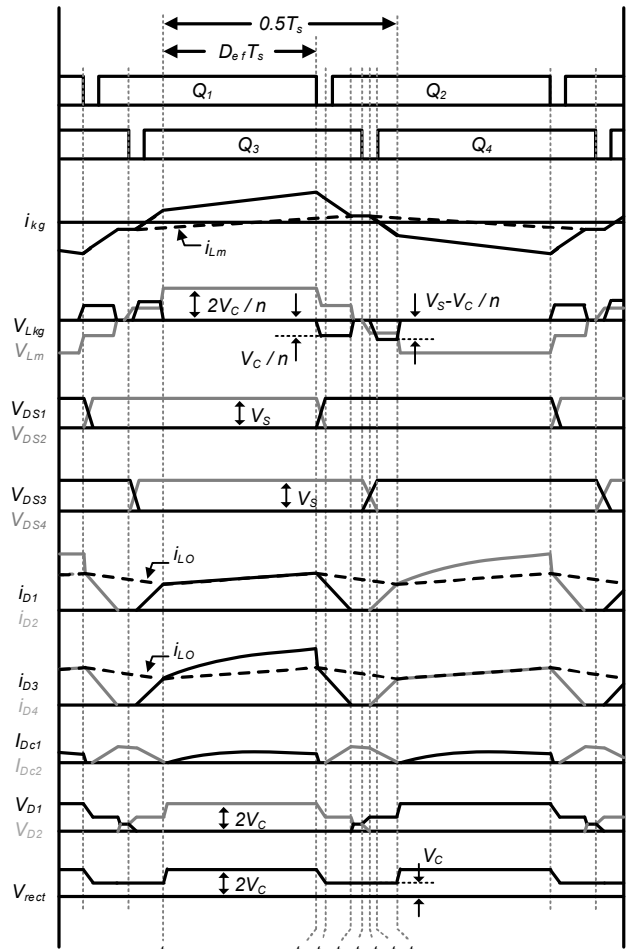


그림 2. 제안된 컨버터의 동작 파형들

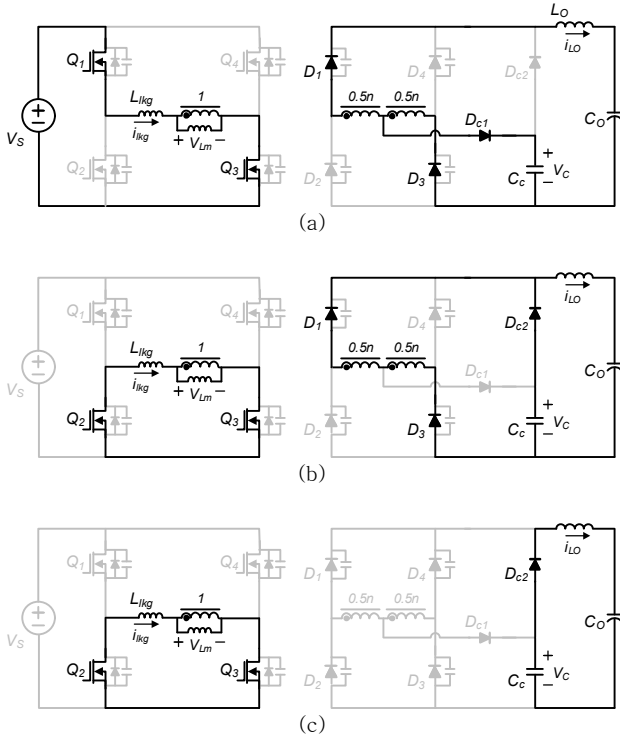


그림 3. 주요 구간 별 등가 회로도 (a) t_0-t_1 , (b) t_2-t_3 , (c) t_3-t_4

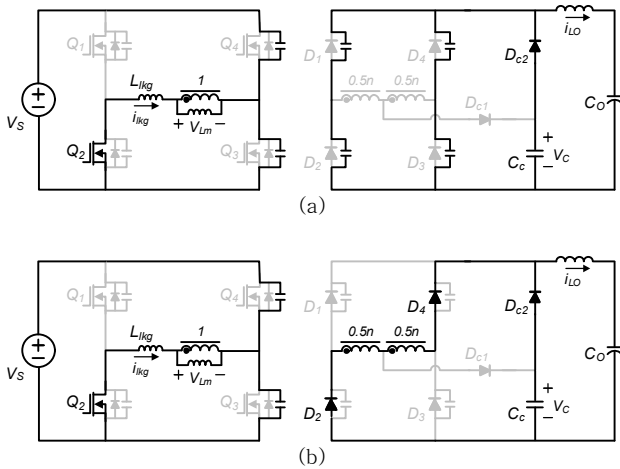
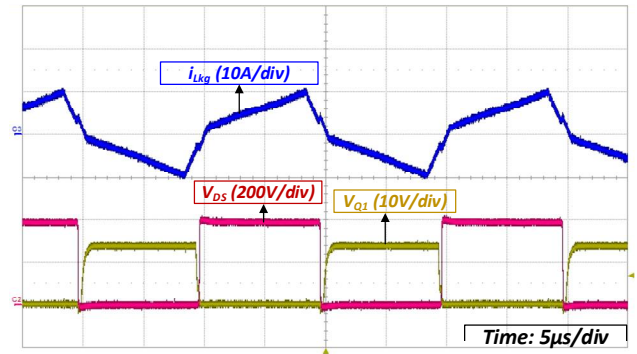


그림 4. 영전압 스위칭시 등가 회로도 (a) t_4-t_5 , (b) t_5-t_6

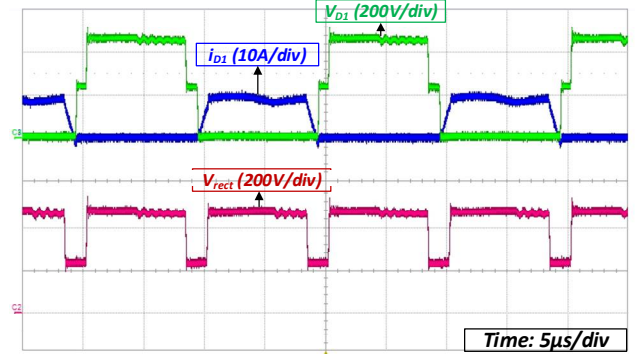
2. 제안된 컨버터

2.1 동작 원리

그림 2은 제안된 컨버터의 동작 파형을 보여준다. PSFB와 동일하게 위상을 조절함으로써 출력 전압을 제어한다. 그림 3은 주요 구간별 등가 회로를 보여준다. 그림 3(a)은 D_{c2} 를 통해 흐르던 전류가 정류기 다이오드 D_1 과 D_3 로 커뮤테이션이 완료된 직후 시작되는 t_0-t_1 구간이다. 이 때, D_{c1} 이 도통되기 때문에 반대쪽 정류기 다이오드 D_2 와 D_4 는 클램핑 전압 V_c 의 2배의 크기로 클램핑 된다. 그림 3(b)은 리딩 레그의 영전압 스위칭 턴 온 후 Q_2 와 Q_4 가 켜져 있는 t_2-t_3 구간이다. D_1 와 D_3 을 통해 흐르던 전류가 D_{c2} 로 커뮤테이션을 시작하며, 변압

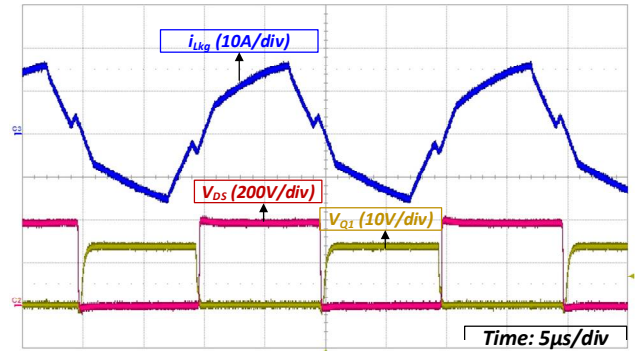


(a)

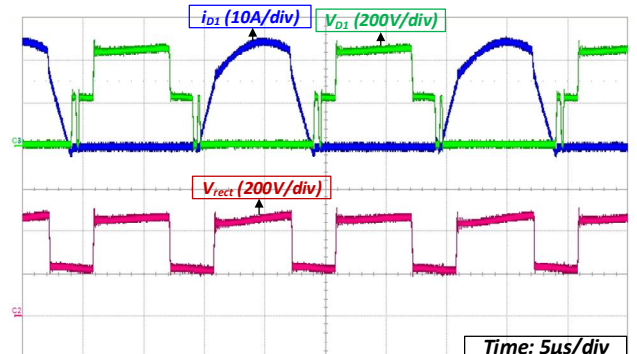


(b)

그림 5. 고정 출력 전압 CV 충전시 50% 부하에서의 주요 파형 (a) 일차측 전류 파형, (b) 이차측 정류단 파형

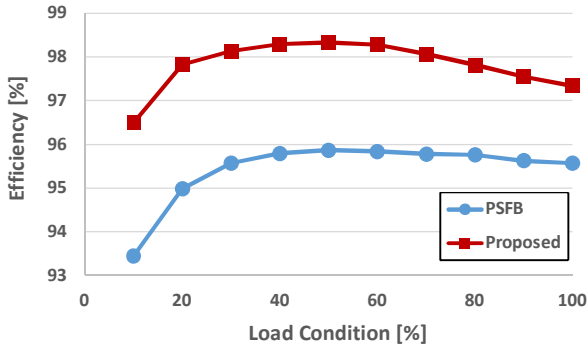


(a)

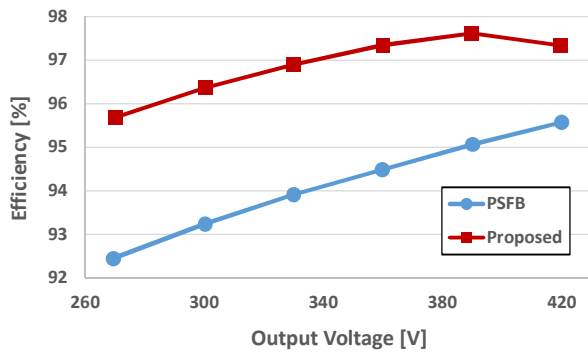


(b)

그림 6. 고정 출력 전류 CC 충전시 360V의 출력전압에서의 주요 파형 (a) 일차측 전류 파형, (b) 이차측 정류단 파형



(a)



(b)

그림 7. 효율 그래프 (a) $V_C=420V$, 부하별 효율, (b) $I_O=7.85A$, 출력전압별 효율

기의 2차측에 V_C 전압이 걸려 있기 때문에 1차측 기생 인덕턴스에 음의 전압이 걸림으로써 환류 전류가 없어진다. 그림 3(c) 은 D_1 과 D_3 로부터 D_{C2} 로 커패시션이 완료된 직후 시작되는 t_3-t_4 구간이다. 출력 인덕터가 리셋되는 구간이며, 출력 인덕터에 출력 전압 V_O 가 그대로 걸리던 기존 PSFB와 달리 V_O-V_C 가 걸리기 때문에 출력 인덕터의 부담이 줄어들게 된다. 또한 모든 출력 전류가 D_{C2} 를 통해서만 흐르기 때문에 D_1 과 D_3 는 꺼지게 되고 역전압이 V_C 로 작게 걸리기 때문에 정류기 다이오드에서 발생하는 스위칭 손실을 줄일 수 있다.

2.2 영전압 스위칭

그림 4은 보다 약조건인 래그 레그쪽 스위치의 영전압 스위칭시 등가 회로를 보여준다. 두 개의 구간에 걸쳐서 영전압 스위칭이 이루어진다. 그림 4(a)은 Q_3 가 꺼지면서 시작되는 t_4-t_5 구간이다. 래그 레그의 스위치와 이차측 정류단의 기생 캐패시터들이 공진에 참여하며 이 구간에서는 자화 인덕턴스에 저장되어 있던 전류 에너지로 영전압 스위칭이 진행된다. 그림 4(b)은 이차측 변압기의 전압이 V_C 로 클램핑이 되면서 시작되는 t_5-t_6 구간이다. 이 시점부터는 자화 인덕턴스가 공진에 참여하지 못하게 되기 때문에 기생 인덕턴스의 전류 에너지만으로 영전압 스위칭을 이루게 된다.

3. 실험결과

제안된 컨버터의 성능을 검증하기 위해 385V 입력, 270~420V/7.85A 출력의 사양으로 프로토타입 컨버터를 제작하고 실험하였다. 그림 5은 고정 출력 전압 CV 충전시

50% 부하에서 제안하는 회로의 주요 파형을 나타낸다. 그림 5(a)에서는 1차측 환류 전류가 제거된 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)에서는 정류기 다이오드의 전압 스트레스가 $2V_C$ 로 클램핑 되는 것을 확인할 수 있으며, 다이오드가 꺼진 직후에는 역전압이 V_C 로 작게 걸려 스위칭 손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 이차측 정류단을 통해 출력 인덕터에 인가되는 전압 파형으로부터, 출력 인덕터의 리셋 때에도 V_C 의 전압이 걸림으로써 출력 필터의 부담을 줄여주는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 고정 출력 전류 CC 충전시 360V의 출력 전압에서 제안하는 회로의 주요 파형을 나타낸다. 여기에서도 동일하게 제안하는 회로의 장점들을 확인할 수 있다.

그림 7은 CV 충전과 CC 충전시 제안하는 회로와 기존의 위상 변조 PWM 풀 브릿지 컨버터의 효율을 비교한 그래프이다. 전부하 영역과 전 출력전압 영역에서 높은 효율을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 변압기의 이차측 센터탭을 통해 클램핑 회로를 구성하여 전기 자동차 충전기 사양에서 높은 효율과 높은 전력 밀도를 갖는 새로운 위상 변조 PWM 풀 브릿지 컨버터를 제안하였다. 1차측 환류 전류를 없앴으며 다이오드의 전압 스트레스를 클램핑시켜 낮은 내압의 다이오드를 사용할 수 있었다. 또한 정류기 다이오드의 스위칭시 역전압을 줄임으로써 스위칭 손실을 저감시킬 수 있었으며, 출력 인덕터의 사이즈 또한 줄일 수 있었다. 385V 입력, 270~420V/7.85A 출력의 사양으로 프로토타입 컨버터를 제작하고 실험함으로써 유효성을 검증하였다.

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016R1A2B2010328).

참고 문헌

- [1] Y. Shin, C. Kim, and S. Han, "A pulse frequency modulated full bridge DC/DC converter with series boost capacitor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 11, pp. 5154-5162, Nov. 2011.
- [2] J. A. Sabate, V. Vlatkovic, R. B. Ridley, and F. C. Lee, "High-voltage, high-power, ZVS, full-bridge PWM converter employing an active snubber," in *Proc. 6th Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Dallas, TX, Mar. 10-15, 1991, pp. 158-163.
- [3] D. Tran, H. Vu, S. Yu, and W. Choi, "A novel soft-switching full bridge converter with a combination of a secondary switch and a non-dissipative snubber," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2, pp. 1440-1452, Feb. 2018.