



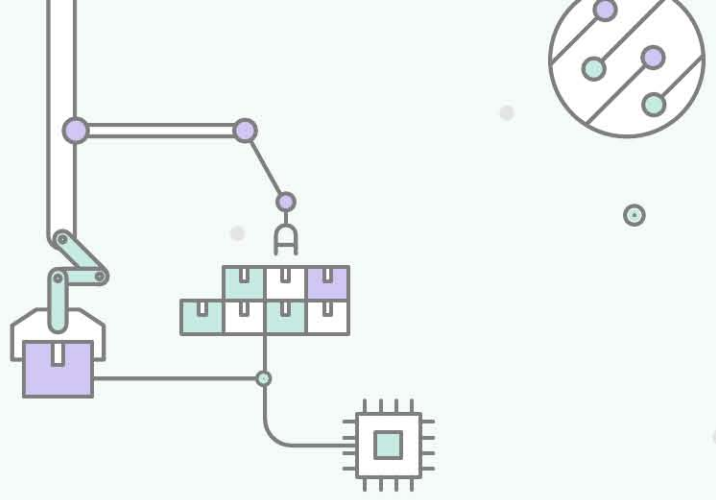
## 센터탭 클램프 회로를 이용한 고효율 · 저비용 · 고밀도 전기 자동차 충전 시스템

본 논문에서는 두 개의 다이오드와 한 개의 커패시터로 구성된 새로운 클램프 회로를 제안한다. 매우 간단한 구조를 통해 기존 위상 천이 풀-브릿지(PSFB) 컨버터의 여러 한계들을 개선함으로써 전기 자동차 배터리 충전 시스템에서 고효율, 저비용, 고전력밀도를 달성할 수 있다. 제안하는 클램프 회로는 이차측 정류단의 전압 스트레스를 클램핑 함으로써 낮은 정격 전압을 갖는 다이오드를 사용하여 정류단에서의 도통 손실을 줄일 수 있다. 또한, 일차측 전류에서 발생하는 환류 전류를 제거함으로써 도통 손실을 더욱 줄일 수 있다. 게다가 이차측 정류단에서 발생하는 역회복 전류를 줄임으로써 SiC 가 아닌 Si 다이오드를 사용할 수 있게 되고, 그로 인해 비용을 상당히 줄일 수 있다. 마지막으로 출력 인덕터의 크기를 줄임으로써 전력밀도를 향상시킬 수 있다. 제안하는 컨버터의 효율성을 검증하기 위해 3.3 kW의 프로토타입으로 실험을 진행하였다.

# 1. 서론

지구 온난화, 자원 고갈, 미세 먼지 등과 같은 환경적인 문제가 대두됨에 따라서 친환경적인 전기 자동차에 대한 관심은 급증하고 있다. 이러한 추세에 따라 전세계 전기차 판매량은 해마다 급증하고 있으며, 고전압 배터리를 충전시켜주는 충전 시스템인 On-Board Charger(OBC)의 판매량 또한 매년 급증하고 있다. OBC에서 요구되는 주요한 특징은 연비를 높이기 위한 높은 효율, 산업 경쟁력을 높이기 위한 낮은 비용, 그리고 부피를 줄이기 위한 높은 밀도이다.

위상 전이 풀-브릿지 PSFB 컨버터는 여러 장점으로 인해 수 kW급 파워 범위에서 많이 적용되고 있다. 하지만 해결되어야 할 문제점들이 있다. 첫 번째로, 1차측에 환류 전류가 크게 발생한다. 두 번째로, 기생 성분끼리의 공진으로 인하여 정류기 다이오드의 전압 스트레스가 매우 커진다. 세 번째로, 정류단



에서 크게 발생하는 역회복 전류에 의해 스위칭 손실이 크게 발생한다<sup>[1]</sup>. 전기자동차용 충전기와 같이 출력 전압이 큰 어플리케이션에서는 정류단의 정격 전압이 커지며 그에 따라 역회복 특성이 나빠지기 때문에 역회복 전류에 의한 문제는 더욱 심각해진다.

환류 전류를 없애며 정류단의 전압 스트레스를 클램핑하기 위한 연구가 많이 제안되어왔다<sup>[2]</sup>. 하지만 능동 소자를 사용하여 회로의 복잡도가 높아지거나 추가되는 소자가 너무 많아진다는 한계점을 갖는다. 정류단에서 발생하는 역회복 전류에 의한 문제점을 해결하기 위하여서는 역회복 특성이 우수한 SiC 다이오드를 주로 사용해왔다. 하지만 SiC 다이오드는 순방향 전압 강하가 높아서 도통 손실이 커질 뿐만 아니라 비용이 매우 높아진다는 한계점을 갖는다. 마지막으로, 출력 전압이 크기 때문에 출력 필터단이 커진다는 한계점을 가진다. 본 논문에서는 새로운 클램프 회로를 통해 기존의 문제점들을 해결하는 PSFB 컨버터를 제안한다.

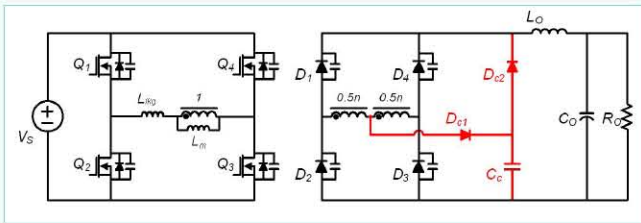


그림 1 제안하는 센터탭 클램핑(CTC) 회로

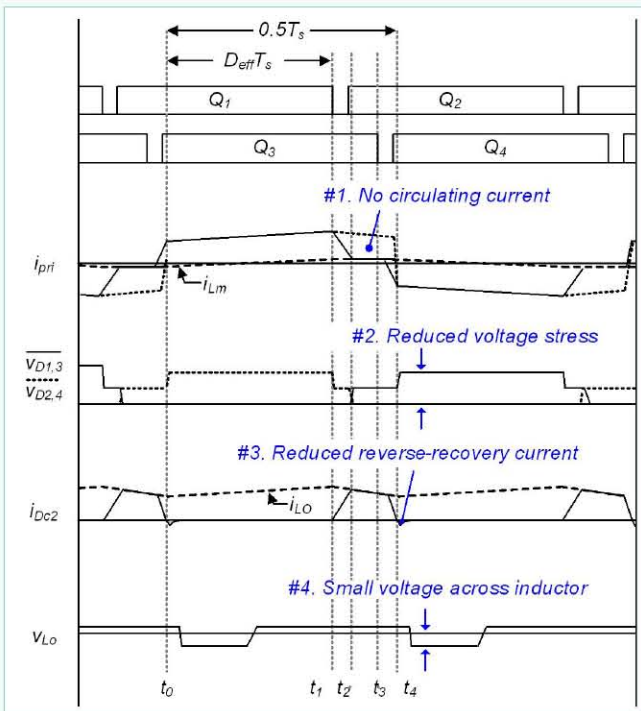


그림 2 제안하는 CTC 회로의 동작 파형

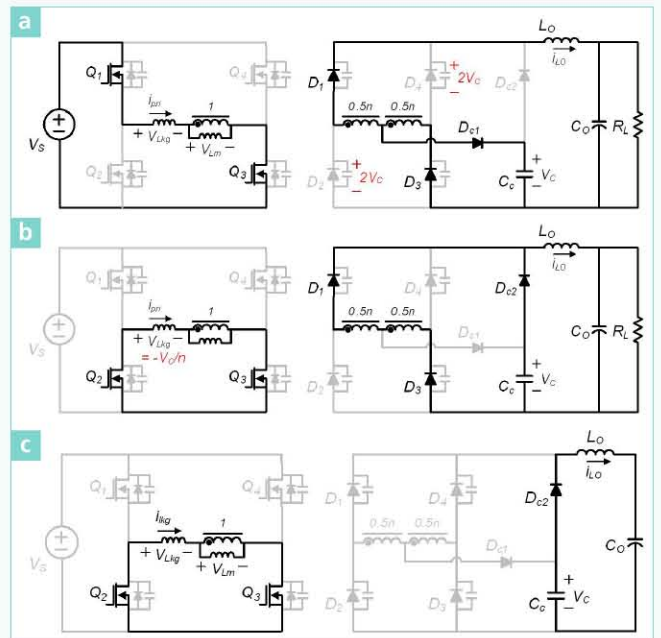
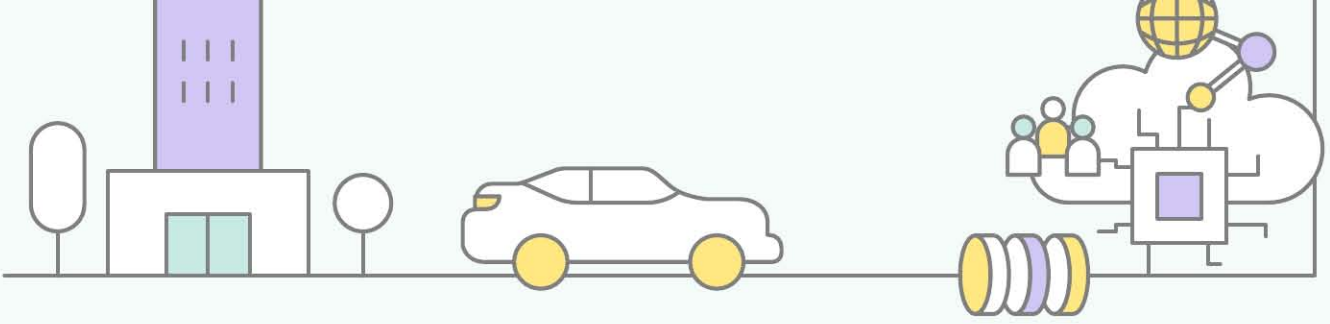


그림 3 제안하는 CTC 회로의 구간별 등가 회로도. (a) 풀-브릿지 정류단에 최대 역전압이 걸리는 구간 ( $t_0-t_1$ ), (b) 환류 전류가 줄어드는 구간 ( $t_1-t_2$ ), (c) 풀-브릿지 정류단이 꺼지고 난 직후의 구간 ( $t_2-t_3$ )



## 2. 제안하는 컨버터의 설명

### 2.1 제안하는 센터탭 클램핑(CTC) 컨버터

그림 1은 제안하는 센터탭 클램핑(CTC) 컨버터 회로를 보여준다. 기존의 PSFB 컨버터의 구조에서 변압기의 2차측 센터탭에 축전기와 정류기로 구성된 회로를 연결한 구조이다. 그림 2는 제안된 컨버터의 동작 파형을 보여준다. PSFB와 동일하게 위상을 조절함으로써 출력 전압을 제어한다. 그림 3은 주요 구간별 동작 회로를 보여준다. 그림 3(a)는 커뮤테이션이 끝나고 풀-브릿지 정류단에 역전압이 최대로 걸리는 시점의 동작 회로도이다. 변압기의 2차측 센터탭이 클램핑 전압  $V_c$ 로 클램핑 되기 때문에 풀-브릿지 다이오드  $D_2$ 와  $D_4$ 에는  $2V_c$ 의 전압으로 클램핑된다.  $2V_c$ 은 입력 전압  $V_s$ 이 2차측으로 투영된  $nV_s$ 와 동일하며 이는 정류단에서 가질 수 있는 가장 작은 전압 스트레스이다. 따라서 낮은 전압 내압을 갖는 다이오드를 사용함으로써 순방향 전압 강하를 낮출 수 있고 결국 정류단에서의 도통 손실을 줄일 수 있다. 그림 3(b)는 1차측 환류 전류가 줄어들어 가는 구간의 동작 회로도이다. 변압기 2차측에  $V_c$ 의 전압이 걸리게 되어 이 전압이 1차측으로 투영된다. 이로 인해 기생 인덕턴스에는 음의 전압이 걸리게 되어 1차측 전류가 줄어들면서 환류 전류가 사라진다. 따라서 환류 전류에 의한 도통 손실을 줄일 수 있다. 그림 3(c)는 풀-브릿지 다이오드  $D_2$ 와  $D_4$ 가 꺼지고 난 직후의 동작 회로도이다. 클램프 다이오드  $D_{c2}$ 가 켜져 있기 때문에 풀-브릿지 정류단의 전압은  $V_c$ 로 클램핑 된다. 따라서  $D_2$ 와  $D_4$ 의 역전압은  $V_c$ 로 클램핑된다.  $V_c$ 은  $0.5nV_s$ 에 해당하는 매우 작은 값이기 때문에 역회복 전류와 역전압의 곱의 형태로 구해지는 크로스오버 스위칭 손실이 크게 줄어든다. 기존의 PSFB 컨버터의 경우에는  $2nV_s$ 에 해당하는 매우 큰 역전압이 걸린다는 점을 고려해 볼 때, 상당한 개선 효과가 있음을 알 수 있다.

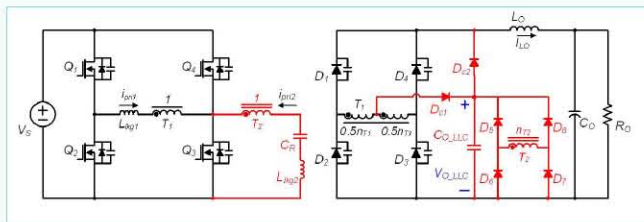


그림 4 하프-브릿지 LLC 컨버터가 통합된 제안된 컨버터

### 2.2 하프-브릿지 LLC 컨버터가 통합된(HB integrated CTC) 컨버터

그림 1에서 제안하는 클램프 회로의 경우에는 구조가 간단하지만 래깅-레그의 ZVS가 어려워진다는 한계점을 갖는다. ZVS 에너지를 확보하기 위해 자화 인덕턴스  $L_m$ 을 줄일 수 있지만 이 경우 1차측에 흐르는 전류의 RMS 값이 커져서 도통 손실이 커진다. 이를 해결하기 위해 제안하는 컨버터는 그림 4에서 볼 수 있듯이 하프-브릿지 LLC 컨버터를 기존 클램프 회로에 통합하였다. 래깅-레그 스위치를 하프-브릿지 LLC 컨버터와 공유하기 때문에 큰  $L_m$  값으로도 ZVS 에너지를 확보함으로써 1차측 도통 손실을 더욱 줄일 수 있다. 클램프 구조는 동일하기 때문에 그림 3에서 설명했던 효과도 동일하게 적용된다.

## 3. 실험 결과

효용성을 검증하기 위해 3.3kW의 프로토타입을 제작하였고 정전류 모드 충전 과정으로써 385V 입력, 270~420V/7.85A 출력으로 실험이 진행되었다.

그림 5는 출력 전압이 360V일 때 기존 PSFB 컨버터와 제안하는 컨버터의 주요 파형을 보여준다. 그림 5(a)는 기존 PSFB 컨버터의 파형이다. 환류 전류가 발생하며 2차측 정류단의 전압 스트레스가 1,000V가 넘을 정도로 매우 크게 걸림을 알 수 있다. 그림 5(b)는 제안하는 CTC 컨버터의 파형이다. 환류 전류가 제거되었으며, 2차측 정류단의 전압 스트레스가 520V로 상당히 줄어들었음을 알 수 있다. 그림 5(c)는 제안하는 HB integrated CTC 컨버터의 파형이다. 환류 전류가 제거되었으며, HB LLC 컨버터가 래깅-레그의 ZVS를 돕기 때문에 자화 전류가 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

그림 6은 정전류 모드에서 출력 전압별 측정 효율을 보여준다. 두 개의 제안하는 컨버터는 모두 2차측 정류단으로써 Si 다이오드를 사용함에도 불구하고 SiC 다이오드를 사용한 기존의 PSFB 컨버터보다 훨씬 높은 효율을 갖음을 확인할 수 있다. HB integrated CTC 컨버터의 경우에는 CTC 컨버터에 비해 HB 전원단이 추가됨으로써 부피는 늘어나지만, 일차측에서의 도통 손실을 줄임으로써 더 높은 효율을 얻을 수 있었다.

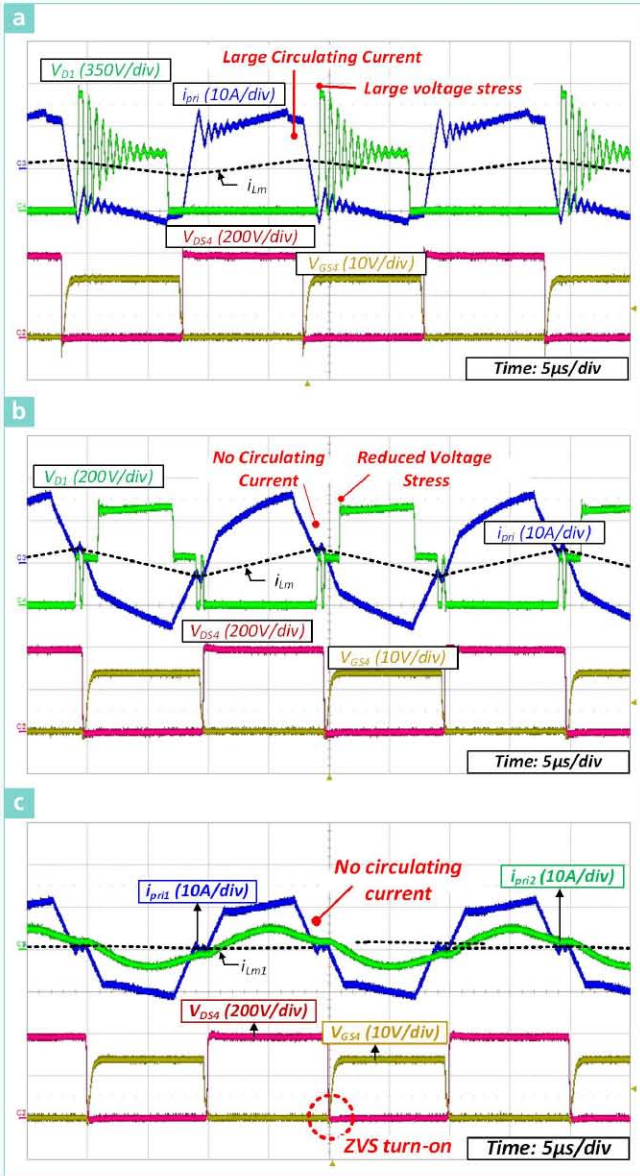


그림 5 기존 컨버터와 제안하는 컨버터의 주요 파형 ( $V_C=360V$ ,  $I_C=7.85A$ ) (a) 기존 PSFB 컨버터, (b) 제안하는 CTC 컨버터, (c) 제안하는 HB integrated CTC 컨버터

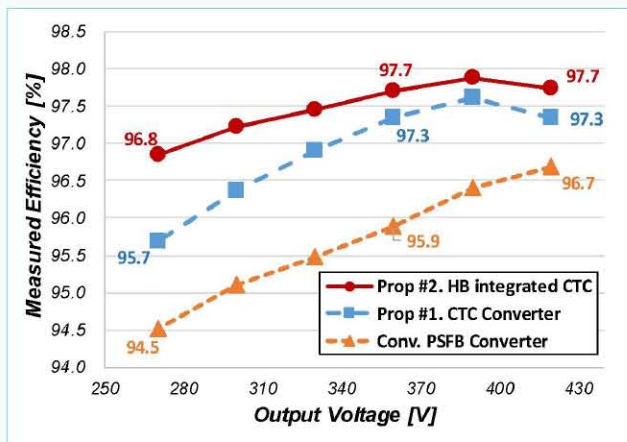
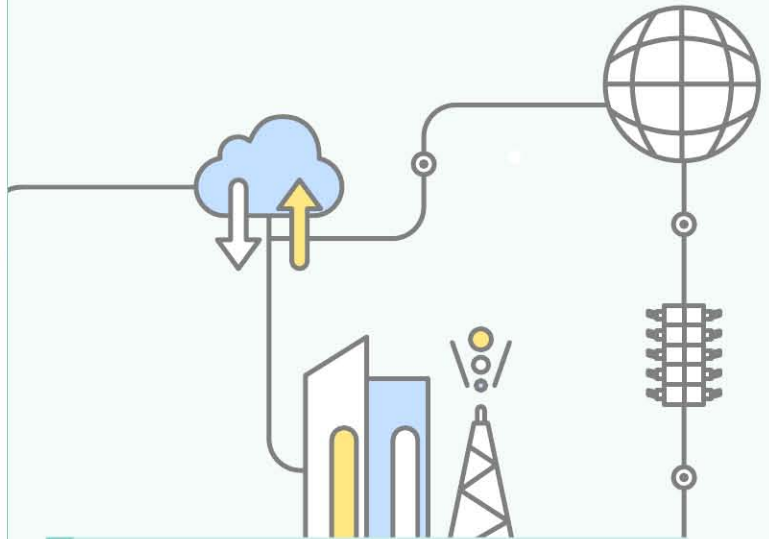


그림 6 정전류모드에서의 출력 전압별 측정 효율

## 4. 결론

새로운 클램프 회로를 통해 기존 PSFB 컨버터의 단점을 개선하여 고효율의 컨버터를 제안하였다. 출력 전압이 큰 어플리케이션에서 더욱 효과적이며 전기 자동차 배터리 충전 시스템에서 고효율, 저비용, 고전력밀도를 달성할 것이라 기대된다.



## 참고문헌

- [1] D. D. Tran et al., "A novel soft-switching full-bridge converter with a combination of a secondary switch and a nondissipative snubber," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 2, pp. 1440-1452, Feb. 2018.
- [2] J. Dudrik et al., "Zero-voltage and zero-current switching PWM DC-DC converter using controlled secondary rectifier with one active switch and non-dissipative turn-off snubber," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 7, pp. 6012-6023, Jul. 2018.
- [3] V. R. K. Kanamarlapudi et al., "A new ZVS full-bridge DC-DC converter for battery charging with reduced losses over full-load range," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 1, pp. 571-579, Jan. 2018.