

# 새로운 클램핑 회로를 적용한 센터탭 정류단 구조를 갖는 위상천이 폴-브릿지 컨버터

정현우, 유현우, 임천용  
 전북대학교 전기공학과

## Center-Tapped Phase-Shifted Full-Bridge Converter Using Novel Clamp Circuit

Hyeon-Woo Jeong, Hyeon-Woo Yu, and Cheon-Yong Lim  
 Department of Electrical Engineering, Jeonbuk National University, Korea

### ABSTRACT

본 논문에서는 기존 저전압 직류 전력변환장치 (LDC) 나 서버용 전원에 주로 사용되는 센터탭 정류단 (CTR) 구조를 갖는 위상 천이 폴-브릿지 (PSFB) 컨버터의 주요 문제점들을 개선하는 새로운 PSFB 컨버터를 제안한다. 기존의 PSFB 컨버터는 정류단 다이오드의 높은 전압 스트레스, 1차측에서 발생하는 큰 환류 전류, 그리고 높은 정격 전압을 갖는 CTR 다이오드로 인한 여전히 높은 2차측 정류단에서의 도통 손실과 같은 문제점을 가지고 있다. 제안하는 PSFB 컨버터는 CTR 구조를 갖는 변압기의 2차측 와인딩에 각각 추가로 센터탭을 내고 그 지점을 커패시터와 다이오드로 구성된 클램핑 회로와 연결한 구조이다. 제안하는 컨버터는 12V/30A 360W 출력에서 설계된 프로토타입을 통해 실험적으로 검증되었다.

### 1. 서론

위상 천이 폴-브릿지 (PSFB) 컨버터는 간단한 제어, 넓은 전압 이득, 쉬운 영 전압 스위칭 (ZVS) 와 같은 장점으로 인해 저전압 직류 전력변환장치 (LDC) 나 서버용 전원과 같은 많은 어플리케이션에서 적용되고 있다<sup>[1]</sup>. 특히나 센터탭 정류단 (CTR) 구조를 갖는 PSFB 컨버터는 정류단 다이오드에서 도통 손실을 줄일 수 있기 때문에 출력 전압이 낮으면서 출력 전류가 큰 어플리케이션에서 많이 사용된다. 하지만 기존의 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터는 정류단 다이오드의 큰 전압 스트레스, 1차측 환류 전류의 발생, 그리고 높은 정격 전압을 갖는 CTR 다이오드로 인한 여전히 높은 2차측 정류단에서의 도통 손실과 같은 문제점을 가지고 있다.

환류 전류를 없애며 CTR 다이오드의 전압 스트레스를 클램핑하기 위한 연구가 많이 제안되어 왔다<sup>[2,3]</sup>. 하지만 대부분 능동 소자를 사용하거나 추가되는 소자가 너무 많다는 한계점을 갖는다<sup>[2]</sup>. 선행 연구 [3]에서는 비교적 적은 수의 수동 소자를 사용한 Capacitor-Diode-Diode (CDD) 클램프 회로가 제안되었다. 하지만 이 방법은 출력 인덕터를 거치지 않고 출력 커패시터로 직접 흐르는 전류 경로가 있어서 출력 커패시터가 커진다는 문제를 갖는다. 더욱이 출력으로 넘어가는 모든 전류가 정격 전압이 높은 CTR 다이오드를 통해 흐르기 때문에 2차측 정류단의 도통 손실이 높다는 한계점을 여전히 갖게 된다. 본 논문에서는 새로운 클램프 회로를 통해 기존의 문제점들을 해결하는 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터를 제안한다.

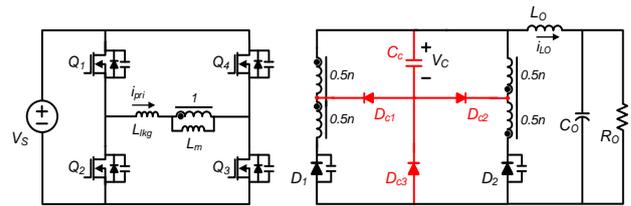
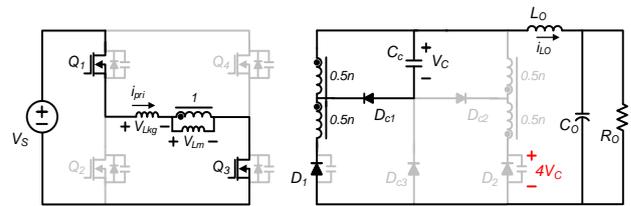
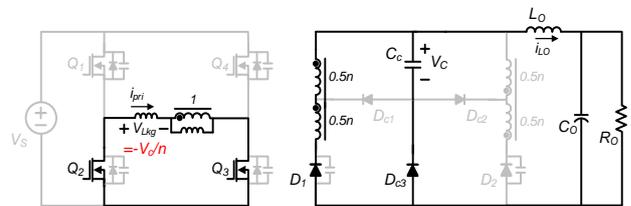


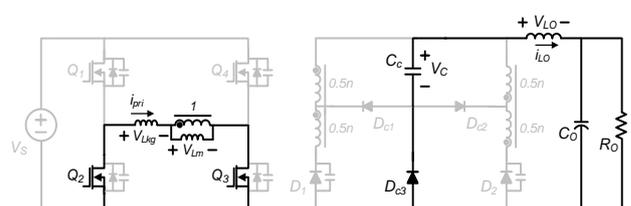
그림 1 제안하는 회로



(a)



(b)



(c)

그림 2 제안하는 컨버터의 구간별 동작 회로도. (a) CTR 다이오드에 최대 역전압이 걸리는 구간, (b) 환류 전류가 줄어드는 구간, (c) CTR 다이오드가 꺼지고 난 직후의 구간.

### 2. 제안하는 컨버터의 설명

#### 2.1 제안하는 컨버터의 주요 동작

그림 1 은 제안하는 컨버터 회로를 나타낸다. 제안하는 회로는 기존의 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터의 변압기 2차측

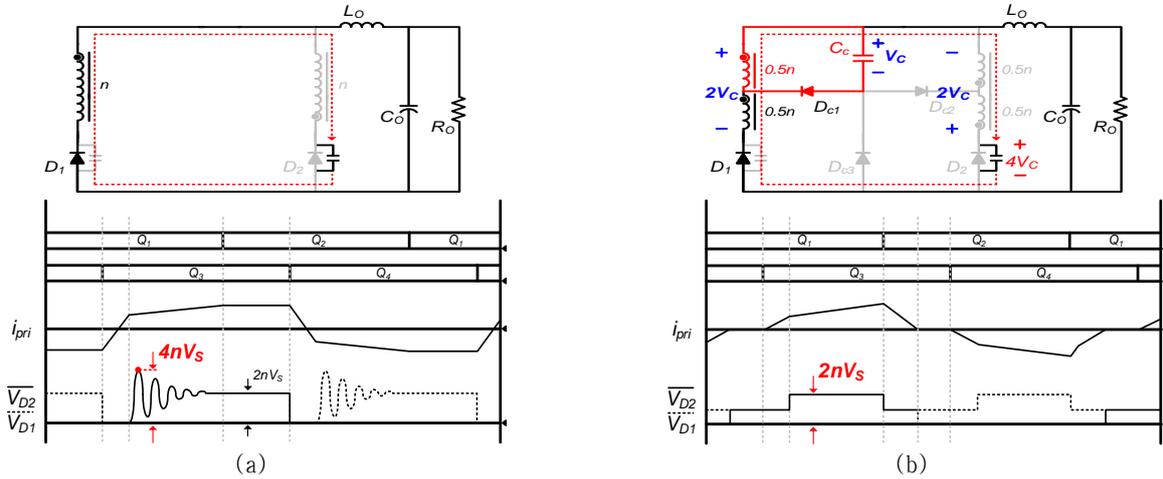


그림 3 CTR 다이오드에 최대 역전압이 걸리는 구간의 2차측 정류단 등가회로와 동작 파형. (a) 기존 회로, (b) 제안하는 회로.

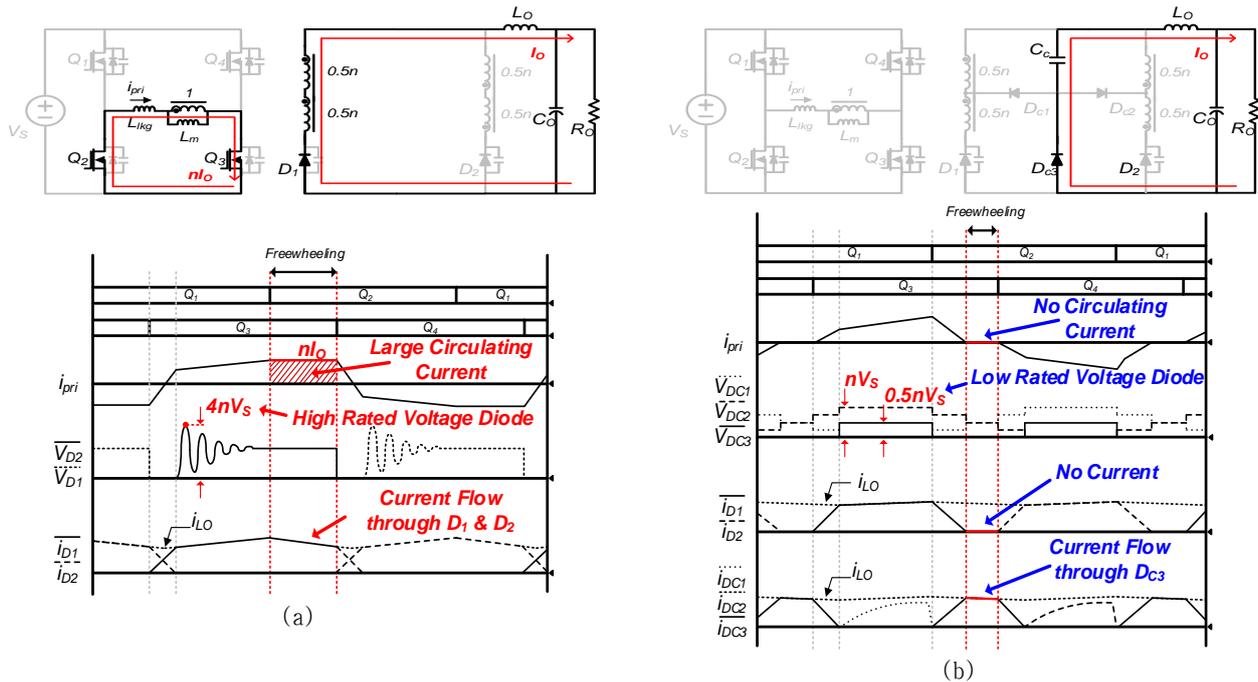


그림 4 환류 기간 동안의 등가 회로와 동작 파형. (a) 기존 회로, (b) 제안하는 회로.

와인딩에 각각 추가로 센터탭을 내고 그 지점을 커패시터와 다이오드로 구성된 클램핑 회로와 연결한 구조이다.

그림 2 는 제안하는 컨버터의 특징을 나타낸다. 그림 2(a) 는 2차측 정류단의 커뮤테이션이 끝나고 CTR 다이오드에 역전압이 최대로 걸리는 시점의 등가 회로도이다. 변압기 2차측 와인딩에 추가로 설계된 센터탭이 클램핑 전압  $V_C$  로 클램핑 된다. 즉, 턴 수  $0.5n$  에 해당하는 전압이  $V_C$  이기 때문에 턴 수  $2n$  에 해당하는 CTR 다이오드  $D_2$  의 최대 전압은  $4V_C$  로 클램핑 된다. 여기에서  $n$  은 1차측 턴 수 대비 2차측 턴 수의 비를 의미한다.  $4V_C$  는 입력전압  $V_S$  가 2차측으로 투영된 값의 두 배인  $2nV_S$  와 동일하며 이는 기존 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터의 정류단 다이오드의 최대 전압인  $4nV_S$  와 비교했을 때 절반만큼 작은 전압 스트레스를 갖는다. 따라서 낮은 정격 전압을 갖는 다이오드를 사용함으로써 순방향 전압 강하가 낮아지고 정류단의 도통 손실을 줄일 수 있다. 그림 2(b) 는 1차측 환류 전류가 줄어드는 구간의 등가 회로도이다. 클램프 다이오드  $D_{C3}$  가 켜져 있기 때문에 변압기 2차측에  $V_C$  전압이

걸리게 되면서 1차측 변압기의 전압은  $V_C/n$  이 걸리게 된다. 이로 인해 1차측 누설 인덕턴스에는  $-V_C/n$  이 걸리게 되면서 1차측 전류는 자화 인덕턴스  $L_m$  에 흐르는 전류를 만날 때까지 감소하게 된다. 따라서 환류 전류가 감소하게 되어 도통 손실을 줄일 수 있다. 그림 2(c) 은 CTR 다이오드  $D_1$  이 꺼지고 난 직후의 등가 회로도이다. 이전 구간에서 1차측 전류가  $L_m$  전류를 만날 때까지 감소하였기 때문에 이 구간에서는 1차측에서 2차측으로 넘어가는 전류가 없다. 따라서 환류 전류에 의한 도통 손실은 발생하지 않는다. 더욱이 출력 전류가 CTR 다이오드  $D_1$  과  $D_2$  를 거치지 않고, 대신에  $D_{C3}$  를 통해 흐르는 것을 알 수 있다.  $D_{C3}$  의 최대 전압은  $0.5nV_S$  로써, CTR 다이오드의 최대 전압 대비 1/4 에 해당한다. 따라서 낮은 정격 전압을 갖는 다이오드를 통해 전류가 흐름으로써 2차측 정류단에서의 도통 손실을 줄일 수 있다.

## 2.2 제안하는 컨버터의 장점

### 2.2.1 2차측 정류단 다이오드의 정격 전압 저감

그림 3 은 CTR 다이오드에 최대 역전압이 걸리는 구간의 2차측 정류단의 등가 회로와 동작 파형을 나타낸다. 기존 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터의 경우 누설인덕턴스와 다이오드 기생 커패시턴스와의 공진으로 인해 CTR 다이오드의 최대 역전압은 입력전압  $V_s$  가 2차측으로 투영된 값의 네 배인  $4nV_s$  와 동일하다. 제안하는 회로의 경우 변압기 2차측 와인딩에 추가로 설계된 센터탭이 클램핑 전압  $V_C$  로 클램핑 된다. 즉, 턴 수  $0.5n$  에 해당하는 전압이  $V_C$  이기 때문에 턴 수  $2n$  에 해당하는 CTR 다이오드  $D_2$  의 최대 전압은  $4V_C$  로 클램핑 된다.  $4V_C$  는 입력전압  $V_s$  가 2차측으로 투영된 값의 두 배인  $2nV_s$  와 동일하며 이는 기존 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터의 정류단 다이오드의 최대 전압인  $4nV_s$  와 비교했을 때 절반만큼 작은 전압 스트레스를 갖는다. 따라서 낮은 정격 전압을 갖는 다이오드를 사용함으로써 순방향 전압 강하가 낮아지고 정류단의 도통 손실을 줄일 수 있다.

### 2.2.2 1차측 환류 전류 저감

그림 4 는 1차측 환류 기간 동안의 등가 회로와 동작 파형이다. 기존 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터의 경우 환류 기간 동안 출력 전류가 변압기를 통해 흐르고 1차측으로 투영된다. 이 전류는 전력 전달에 기여하지 않기 때문에 순환 전류가 되어 도통 손실이 커지게 된다. 제안하는 회로의 경우 환류 기간 동안 출력 전류가 클램핑 커패시터  $C_c$  를 통해 흐르고 변압기를 통해 흐르지 않아 순환 전류가 없다.

### 2.2.3 2차측 정류단 도통 손실 저감

그림 4 에서 볼 수 있듯이 기존 CTR 구조를 가진 PSFB 컨버터와 달리 제안하는 회로의 경우 출력 전류가 CTR 다이오드  $D_1$  과  $D_2$  를 거치지 않고, 대신에  $D_{C3}$  를 통해 흐르는 것을 알 수 있다.  $D_{C3}$  의 최대 전압은  $0.5nV_s$  로써, CTR 다이오드의 최대 전압 대비 1/4 에 해당한다. 따라서 낮은 정격 전압을 갖는 다이오드를 통해 전류가 흐르므로써 2차측 정류단에서의 도통 손실을 줄일 수 있다.

## 3. 실험 결과

제안하는 컨버터의 성능을 검증하기 위해 240V~413V 입력, 12V/30A 360W 출력, 그리고 70kHz 동작 주파수를 갖는 프로토타입으로 실험이 진행되었다. 턴 수  $n$  은 0.07 으로 설계되었다.

그림 5 는 제안하는 컨버터의 1차측 전류 파형과 정류단의 전압 파형을 나타낸다. 그림 5 는 노미날 입력 전압 360V 일 때의 파형으로써, 1차측 전류 파형은  $L_m$  전류를 만날 때까지 감소하게 된다. 그 결과 환류 전류가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한 정류단의 전압 파형을 보면 최대 전압 스트레스가 58V 로써 전압 링잉이 매우 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이는 이론적으로 클램핑되는 전압인  $2nV_s (=50.4V)$  보다 약간 큰 값으로 이 차이는 클램프 회로에서 발생하는 기생 인덕턴스와 같은 누설요소 때문이다. 이러한 기생 성분은 CTR의 PCB 패턴 경로를 최적화하고 누설 인덕턴스가 작은 평면 변압기 구조를 사용할 경우 개선할 수 있다.

노미날 입력 전압 360V, 출력 조건 12V, 30A 에서 측정 효율은 90.0% 로 측정되었다. 이러한 측정값의 주된 원인은 낮은 정격전압을 갖는 CTR 다이오드 사용, 그리고 1차측 환류 전류 감소로 인한 도통 손실이 감소하였기 때문이다. 또한, CTR

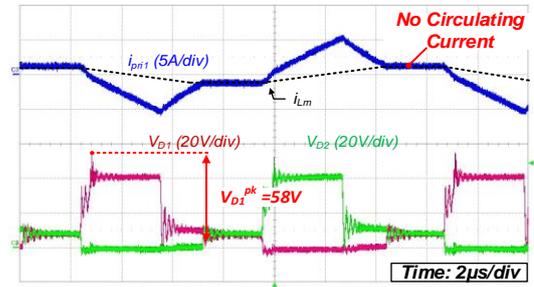


그림 5 제안하는 컨버터의 1차측 전류파형과 정류단 전압 파형 ( $V_{in}=360V$ ,  $V_C=12V$ ,  $I_C=30A$ )

다이오드  $D_1$  과  $D_2$  를 통하지 않고 정격 전압이 낮은 클램핑 다이오드  $D_{C3}$  를 통해 출력 인덕터로 전류를 전달하는 구간에 의해 2차측 정류단에서 도통 손실이 줄어들었기 때문이다. 이러한 특징으로 인해 기존 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터 대비 높은 효율을 가질 것으로 기대된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 새로운 클램프 회로를 통해 기존 CTR 구조를 갖는 PSFB 컨버터의 단점을 개선하는 컨버터를 제안하였다. 제안하는 컨버터는 기존 컨버터와 비교하여 2차측 정류단 다이오드의 정격 전압 저감, 1차측 환류 전류 저감 그리고 2차측 정류단 도통 손실을 저감한다는 장점을 갖는다. 제안하는 컨버터는 LDC 나 서버용 전원 장치의 토폴로지로서 유용할 것이라 기대된다.

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 첨단분야 혁신융합대학사업(에너지신산업)의 연구결과입니다.

본 과제물(결과물)은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2024RIS-008).

## 참고 문헌

- [1] Y. Bak, et al. "Dynamic Characteristic Improvement of Phase-Shift Full-Bridge Center-Tapped Converters Using a Model Predictive Control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 69, no. 2, pp. 1488-1497, Feb. 2022.
- [2] J. Dudrik, et al. M. Pástor, M. Lacko and R. Žatkovič, "Zero-Voltage and Zero-Current Switching PWM DC-DC Converter Using Controlled Secondary Rectifier With One Active Switch and Nondissipative Turn-Off Snubber," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 7, pp. 6012-6023, July 2018.
- [3] B. Gu, et al. "Hybrid-Switching Full-Bridge DC-DC Converter With Minimal Voltage Stress of Bridge Rectifier, Reduced Circulating Losses, and Filter Requirement for Electric Vehicle Battery Chargers," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 3, pp. 1132-1144, March 2013.