

# 능동 클램프 회로가 적용된 위상천이 풀-브리지 컨버터의 스위치 제어 방법

정광순, 이용철, 김호경\*, 박찬현\*, 김석희\*, 홍성수  
 국민대학교 전력전자 연구소, (주)유라코퍼레이션\*

## Switch Control Method for Phase-Shift Full-Bridge Converter Using Active Clamp Circuit

Kwang Soon Jeong, Yong Chul Lee, Ho Kyung Kim\*, Chan Hyun Park\*, Seok Hee Kim\*,  
 Sung Soo Hong  
 Kookmin University Power Electronics Center, YURA CORPORATION\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 능동 클램프 회로를 이용한 위상천이 풀 브리지 컨버터(Phase shift Full Bridge Converter)의 스위치 제어 방법을 제안한다. 기존의 위상천이 풀 브리지 컨버터는 2차 측 정류 스위치에서 스파이크 전압이 발생하며, 순환 전류(Circulating current)로 인한 도통 손실이 발생하는 단점을 지닌다. 위의 문제를 극복하는 회로로서 2차 측에 능동 클램프 회로를 적용하는 방법이 연구되었다. 하지만, 낮은 부하에서 클램프 커패시터의 전압이 상승하여, 2차 측 소자의 전압 스트레스가 증가하고, EMI 문제가 발생하는 단점을 지닌다. 본 논문에서는 위상천이 풀 브리지 컨버터의 2차 측에 능동 클램프 회로 및 동기 정류 스위치(Synchronous rectifier switch)를 적용하여, 클램프 커패시터의 전압 상승을 억제하는 해결 방안을 제시하며, 능동 클램프 회로의 스위치 제어 방법을 제안한다. 또한, 회로의 구조, 동작 원리 및 스위치 제어 방법을 설명하고, 모의 실험을 수행하여 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

위상천이 풀 브리지 컨버터는 1차 측 스위치의 영전압 스위칭이 가능하고, 스위치의 전류 스트레스가 낮아, 대용량 DC/DC 컨버터에 널리 이용된다<sup>[1]</sup>. 하지만, 순환 전류로 인하여 도통 손실이 발생하고, 변압기의 누설 인덕턴스와 2차 측 정류 스위치의 기생 출력 커패시턴스 간의 공진으로 인하여 2차 측 정류 스위치에서 스파이크 전압이 발생하는 단점을 지닌다. 위의 단점을 극복하는 회로로서 위상천이 풀 브리지 컨버터의 2차 측에 능동 클램프 회로를 적용하는 방법이 연구되었다<sup>[2]</sup>. 이 방식은 공진 에너지를 출력 측으로 회생시켜, 높은 효율을 얻을 수 있다. 하지만, 클램프 커패시터에서 출력 측으로 전달되는 에너지가 부하 전류 이하로 제한되므로, 낮은 부하에서는 클램프 커패시터에 저장되는 공진 에너지의 일부만 출력 측으로 전달된다. 이는 클램프 커패시터의 전압이 상승하여 2차 측 소자의 전압 스트레스가 증가하며, EMI가 발생하는 원인이 된다. 본 논문에서는 위상천이 풀 브리지 컨버터의 2차 측에 능동 클램프 회로 및 동기 정류 스위치를 적용하여 클램프 커패시터의 전압 상승을 방지하는 해결 방안을 제시하며, 능동 클램프 회로의 스위치 제어 방법을 제안한다. 또한, 모의 실험을 통하여 제안한 스위치 제어 방법의 타당성을 검증한다.

### 2. 컨버터 구조 및 동작원리

#### 2.1 컨버터의 구조

그림 1은 2차 측에 동기 정류 스위치와 능동 클램프 회로를 적용한 위상천이 풀 브리지 컨버터를 나타낸다. 2차 측에 스위치( $M_{CL}$ )와 커패시터( $C_{CL}$ )로 구성되는 능동 클램프 회로를 적용하여, 2차 측 정류 스위치의 양단 전압을 클램프(clamp)하고, 공진 에너지를 부하로 회생시킨다. 또한, 동기 정류 스위치를 적용하여, 낮은 부하에서 클램프 커패시터의 전류 평형을 만족시켜, 클램프 커패시터의 전압 상승을 방지한다.

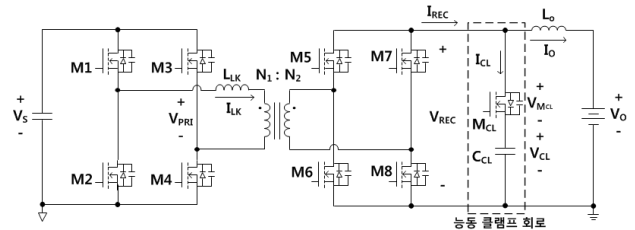


그림 1 동기 정류 스위치와 능동 클램프 회로를 적용한 위상천이 풀-브리지 컨버터

Fig. 1 Phase-Shift Full-Bridge Converter with Synchronous Rectifier and Active Clamp Circuit

#### 2.2 컨버터의 동작 원리

능동 클램프 회로의 스위치 동작을 설명하기 위하여 관련된 모드에 대해 분석한다. 그림 2는 주요 동작 파형을 나타낸다.

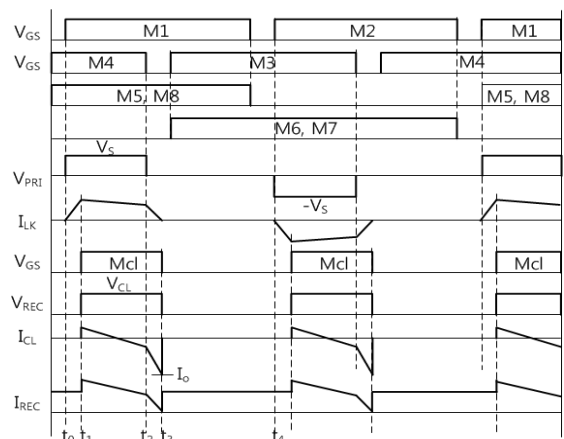


그림 2 주요 동작 파형

Fig. 2 Operation waveforms

모드 1 [ $t_1 \sim t_2$ ] :  $t_1$ 시점에서 누설 인덕턴스의 전류  $I_{LK}$ 가 1차 측으로 반영된 출력 전류  $I_O$ 까지 증가하여 변압기의 누설 인덕턴스( $L_{LK}$ )와 2차 측 정류 스위치의 기생 출력 커패시턴스 간의 공진이 발생한다. 공진에 의해  $M_{CL}$  스위치가 영전압 스위칭을 하고, 2차 측 정류 스위치의 양단 전압은 클램프 전압  $V_{CL}$ 로 클램프 된다.

모드 2 [ $t_2 \sim t_3$ ] :  $M_4$  스위치가 '턴 오프'된 후,  $M_3$  스위치가 영전압 스위칭을 한다. 누설 인덕턴스 양단에 1차 측으로 반영된 클램프 전압  $V_{CL}$ 이 인가되어 누설 인덕턴스 전류  $I_{LK}$ 가 감소한다. 누설 인덕턴스 전류  $I_{LK}$ 가 0에 도달하는 시점에서  $M_{CL}$ 이 '턴 오프'된다. 그러므로, 부하에 따라  $M_{CL}$  스위치의 '턴 오프' 시점이 달라진다. 부하가 작은 경우에  $M_{CL}$  스위치는  $M_4$ 와 동시에 '턴 오프'되어, 모드 2가 존재하지 않게 된다.

모드 3 [ $t_3 \sim t_4$ ] : 누설 인덕턴스의 양단에는 0이 인가되어 누설 인덕턴스의 전류는 0을 유지한다.

### 3. 능동 클램프 회로의 스위치 제어 방법

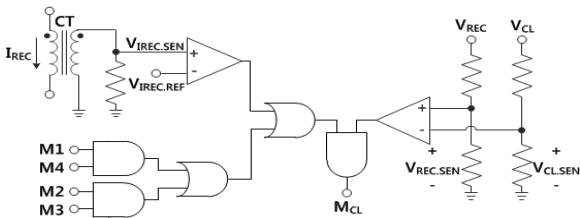
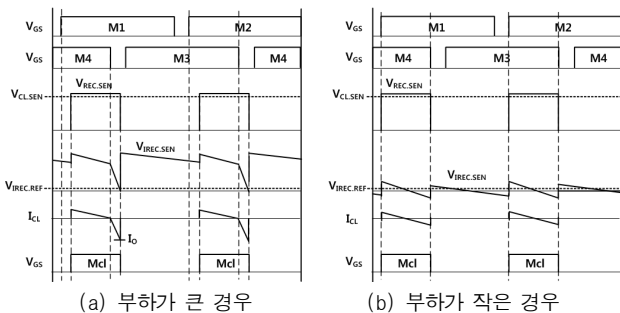


그림 3 제안된 스위치 제어 방법의 구현  
Fig. 3 Implementation of the proposed switch control method

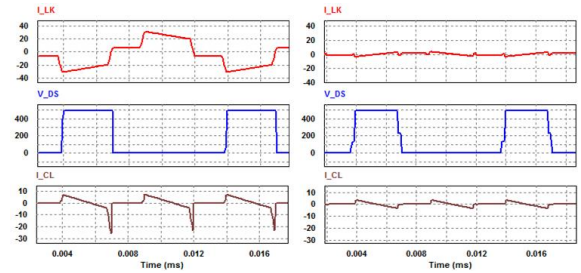
그림 3은  $M_{CL}$  스위치를 제어하기 위한 회로를 나타낸다.  $M_{CL}$  스위치는 2차 측 정류 스위치가 클램프 전압( $V_{CL}$ )으로 클램프 되는 시점에 영전압 스위칭을 한다. 따라서,  $V_{REC}$ 와  $V_{CL}$ 로부터 생성된 신호를 비교하여, 2차 측의 정류된 전압( $V_{REC}$ )이 클램프 전압( $V_{CL}$ )에 도달되는 시점에서 '턴 온'시킨다.  $M_{CL}$  스위치의 '턴 오프' 시점은 부하에 따라 결정되며, 그림 4는 부하에 따른 스위치 제어 회로의 동작과형을 나타낸다. 부하가 큰 경우에 능동 클램프 회로는 순환 전류를 제거하는 기능을 한다. 따라서,  $M_{CL}$  스위치는 순환 전류가 0이 되는 시점에 '턴 오프'되어야 한다. 순환 전류가 0이 되는 시점은  $I_{REC}$ 가 0이 되는 시점과 동일하므로, 2차 측의 정류된 전류  $I_{REC}$ 로부터 생성된 신호를 기준 전압  $V_{REC\_REF}$ 와 비교하여 '턴 오프' 시점을 결정한다. 부하가 작은 경우에는 클램프 커패시터의 전류 평형을 유지하기 위하여  $M_1$ 과  $M_4$  또는  $M_2$ 와  $M_3$ 를 AND게이트로 신호 처리한 신호에 맞추어 '턴 오프' 시점을 결정한다.



(a) 부하가 큰 경우 (b) 부하가 작은 경우  
그림 4 스위치 제어 회로의 동작 파형  
Fig. 4 Operation waveforms of switch control circuit

### 4. 모의 실험

동작 원리 및 제안된 스위칭 제어 방법의 타당성을 검증하기 위하여 모의 실험을 수행하였으며, 모의 실험에 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 그림 5는 모의 실험의 결과 파형이다. 누설 인덕턴스 전류( $I_{LK}$ )를 살펴보면 순환 전류가 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, 부하에 관계없이 클램프 커패시터의 전류( $I_{CL}$ )가 전류 평형을 만족하여, 클램프 커패시터의 전압이 상승하지 않고, 동기 정류 스위치의 양단 전압( $V_{DS}$ )이 클램프 되는 것을 알 수 있다.



(a) 출력 전력 : 6kW (b) 출력 전력 : 100W

그림 5 시뮬레이션 파형  
Fig. 5 Waveforms of simulation

표 1 모의 실험에 사용된 파라미터  
Table 1 Parameter for simulation

입력 전압 ( $V_{in}$ )	400V	변압기 턴비 ( $N_1:N_2$ )	1 : 1.2
출력 전압 ( $V_o$ )	300V	출력 인덕턴스 ( $L_o$ )	640uH
누설 인덕턴스 ( $L_{LK}$ )	4uH	스위칭 주파수 ( $f_{sw}$ )	100kHz
자화 인덕턴스 ( $L_m$ )	5mH		

### 5. 결론

본 논문에서는 2차 측에 능동 클램프 회로와 동기 정류 스위치를 사용한 위상천이 풀 브리지의 스위치 제어 방식을 제안하였다. 제안된 제어 방식은 순환 전류를 제거하며, 부하에 따라 클램프 커패시터의 전압이 상승하지 않는다. 이는 2차 측 소자의 전압 스트레스를 경감시키고, EMI 문제를 완화시킨다. 최종적으로 모의 실험을 통하여 제안된 스위치 제어 방법의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 교육부 및 한국연구재단의 BK21플러스 SSEV 특화 전문 인력 양성 지원사업 및 유라 코퍼레이션의 연구비 지원의 결과로 수행되었음(31Z20130012993)

### 참고 문헌

[1] J. A. Sabaté V. Vlatkovic, R. B. Ridley, F. C. Lee, and B. H. Cho, "Design considerations for high voltage high power full bridge zero voltage switched PWM converter," IEEE APEC Rec. 1990, pp. 275-284.  
[2] J. G. Cho, G. H. Rim, "An Improved Zero Voltage and Zero Current Switching Full Bridge PWM Converter with Secondary Active Clamp," IEEE PESC Rec. vol 2, 1998, pp. 948-954.