

# 고효율 결합 인덕터 정류단 위상천이 폴브릿지 컨버터를 위한 새로운 동기정류기 제어 기법

김재상, 김건우, 문건우  
KAIST

## A New Synchronous Rectifier Control Method for High Efficiency Phase-Shifted Full-Bridge Converter with Coupled Inductor Rectifier

Jae-Sang Kim, Keon-Woo Kim, Gun-Woo Moon  
KAIST

### ABSTRACT

본 논문에서는, 결합 인덕터 정류단을 갖는 위상천이 폴브릿지 컨버터에 적용할 수 있는 새로운 동기정류기 제어 기법을 제안한다. 결합 인덕터 정류단을 활용하면 1차측 환류 전류를 감소시켜 도통 손실을 줄일 수 있지만, 동시에 줄어든 전류로 인하여 레깅-레그 스위치의 영전압 스위칭을 달성하기 어려워진다. 이를 해결하기 위하여 변압기의 자화 전류를 이용할 수 있지만, 컨버터가 넓은 출력 전압 범위로 설계되는 경우 낮은 시비율을 기준으로 작게 설계된 자화 인덕턴스로 인하여, 높은 시비율로 구동 시 과도한 자화 전류로 인한 불필요한 도통 손실이 증가하는 문제점을 갖는다. 제안하는 제어 기법은 기존 동기정류기 제어와 달리 동기정류기를 기존보다 먼저 구동시켜 1차측에 환류 전류를 순간적으로 재생성할 수 있고, 이를 이용하여 레깅-레그 스위치의 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. 따라서, 작은 자화 전류로 영전압 스위칭을 달성할 수 있으므로 1차측의 도통 손실을 줄여 높은 효율을 얻을 수 있다. 제안하는 동기정류기 제어 기법의 효용성을 증명하기 위하여, 400V 입력, 27-54V/13A 출력에서 실험 검증을 진행하였다.

### 1. 서 론

위상천이 폴브릿지 컨버터(PSFB)는 1차측 스위치의 영전압 스위칭 동작으로 고효율 동작이 가능하고 출력 전압 제어가 간단하다는 장점을 가지는 컨버터이다. 그림 1.(a)의 회로 구성을 가지는 PSFB 컨버터는 이러한 장점으로 서버용 전원장치, 전기 자동차 충전기, 고용량 LED 드라이버와 같은 다양한 중-고용량 DC/DC 컨버터에 널리 활용된다.<sup>[1]</sup> 하지만 PSFB 컨버터를 넓은 출력 전압 범위로 설계하면 낮은 시비율로 동작하는 조건에서 컨버터 입력이 출력으로 전달되지 않는 프리-휠링 구간이 증가하게 되고, 이 구간동안 1차측에 큰 환류 전류가 발생하게 되고 불필요한 도통 손실을 발생하는 문제를 가진다.

다양한 선행 연구들이 2차측에 스너버 구조를 추가함으로써, 이러한 환류 전류 문제를 해결하였다. 추가된 스너버 구조들은 프리-휠링 구간 동안 스너버 전압을 1차측에 인가하여 환류 전류를 감소시킬 수 있고, 결과적으로 불필요한 도통 손실을 줄일 수 있다. 또한, 제안된 몇몇 스너버 구조는 반도체 소자를 클램프하여 전압 스트레스를 낮출 수 있어 전압 레이팅이 낮고 성능이 좋은 반도체 소자를 적용할 수 있다. 이 중, 최근에 연구된 결합 인덕터 정류단(CIR)은 그림 1.(b)와 같이 추가 소자

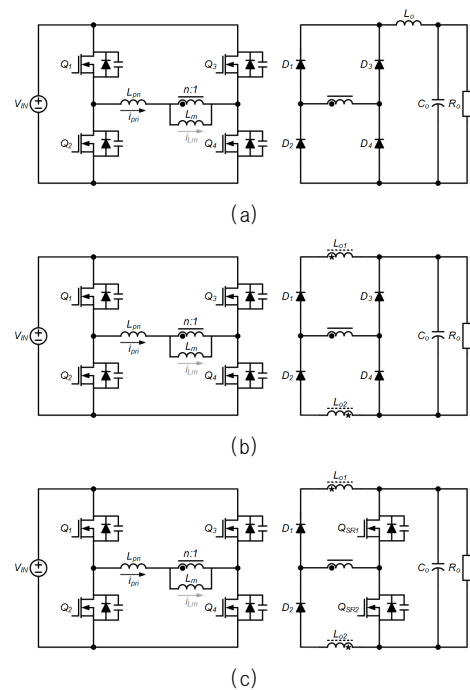
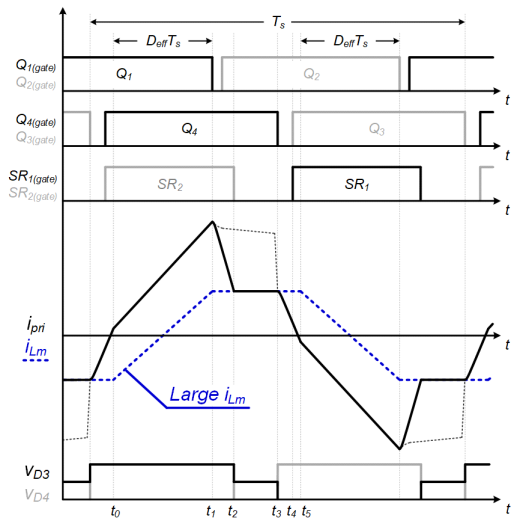


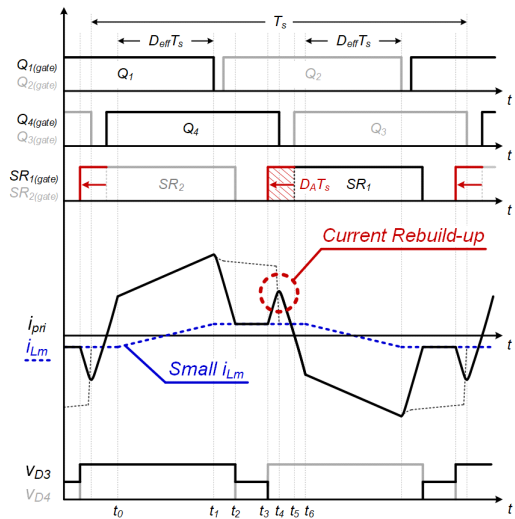
그림 1. 위상천이 폴브릿지 컨버터. (a) 폴브릿지 정류단, (b) 결합 인덕터 정류단, (c) 동기정류기를 포함한 결합 인덕터 정류단.

없이 인덕터의 구조를 결합 인덕터로 교체함으로써 환류 전류를 없앨 수 있고 우측 다이오드 D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>를 출력 전압으로 클램프시킬 수 있다.<sup>[2]</sup> 따라서, 추가되는 반도체 소자 없이 높은 효율을 달성할 수 있다.

앞에서 언급한 다양한 연구들은 PSFB 컨버터의 1차측 환류 전류를 줄임으로써 불필요한 도통 손실 없앨 수 있어 효과적이다. 하지만 동시에 줄어든 환류 전류로 인해, 레깅-레그 스위치의 영전압 스위칭(ZVS)에 필요한 전류가 부족해지고, 높은 전압 레이팅을 가지는 1차측 스위치가 하드 스위칭이 발생하여 큰 스위치 방전 손실을 야기하는 문제를 가지게 된다. 이러한 문제를 해결하는 방법들 중 하나는 레깅-레그 스위치에 MOSFET 대신 IGBT를 활용하여 영전류 스위칭을 달성하는 영전압 영전류 스위칭(ZVZCS)이다. 이 방법은 스위칭 손실을 줄일 수 있지만, MOSFET의 온 저항에 비해 IGBT의 포화 전압으로 인한 손실이 더 크기 때문에 1차측 도통 손실이 증가하는 문제를 가진다. 또 다른 방법은 1차측 변압기의 자화 전류를 크게 만들어 ZVS를 달성하는 방법이다. 하지만 이 경우, 1



(a)



(b)

그림 2. 동기정류기 구동 방식에 따른 동작 파형. (a) 기존 동기정류기 제어 기법 적용 시, (b) 제안하는 동기정류기 제어 기법 적용 시.

차측 레깅-레그 스위치의 ZVS 최악 조건인 낮은 시비율을 기준으로 설계해야 되기 때문에 높은 시비율로 동작 할 때, 과도한 자화전류로 인하여 큰 도통 손실이 발생하는 문제를 가진다.

본 논문에서는 CIR을 갖는 PSFB 컨버터에 적용되어 과도한 자화 전류로 인한 손실 문제없이 1차측 레깅-레그 스위치의 ZVS를 달성할 수 있는 새로운 동기정류기(SR) 제어 기법을 제안한다. 제안하는 SR 제어 기법은 기존보다 SR을 먼저 구동함으로써 1차측 환류 전류를 순간적으로 재생성시킬 수 있고, 이를 이용하여 1차측 레깅-레그 스위치의 ZVS를 달성할 수 있다. 따라서, 자화 전류가 작아도 ZVS를 달성할 수 있으므로 과도한 자화 전류로 인한 손실을 줄일 수 있어 넓은 출력 전압 조건에서 더 높은 효율을 달성할 수 있다.

## 2. 제안하는 SR 제어 기법의 특성

### 2.1 제안하는 SR 제어 기법의 기본 원리

제안하는 SR 제어 기법은 그림 1.(c)와 같은 구조에서 적용될 수 있다.  $D_1$ 과  $D_2$ 도 SR로 대체할 수 있지만 본 논문에서 제안하는 핵심 회로 동작은 오직  $D_3$ 와  $D_4$ 에 관련있으므로 두 다이오드만을 각각  $SR_1$ 과  $SR_2$ 로 대체한다. 그림 2.(b)는 제안하는 제어 기법의 핵심 파형을 나타낸다. 그림 2.(a)와 같이 SR을 다이오드처럼 동작시키는 일반적인 SR 제어 기법과 다르게, 그림 2.(b)의 제안하는 SR 제어 기법은 SR을 기존보다 먼저 구동함으로써 변압기 2차측에 출력 전압의 절반을 인가할 수 있고 이를 이용하여 1차측의 환류 전류를 순간적으로 재생성할 수 있다. 결과적으로 재생성된 환류 전류를 이용하여 레깅-레그 스위치의 ZVS를 달성할 수 있기 때문에 자화 전류가 작은 설계에서도 ZVS를 달성할 수 있어 자화전류로 인한 손실을 줄일 수 있다.

### 2.2 제안하는 SR 제어 기법의 분석

1차측 레깅-레그 스위치의 ZVS를 달성하기 위하여 필요한 최소 전류는 스위치 전압의 공진 분석을 통하여 얻을 수 있다. 레깅-레그 스위치의 스위칭 동작에서 스위치의 출력 커패시터  $C_{oss3}$ ,  $C_{oss4}$ 와 1차측 누설 인덕터  $L_{pri}$ 가 공진하며 이를 이용하여 스위치 전압  $v_{ds3}(t)$ 을 표현하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다:

$$v_{ds3}(t) = V_{\infty} - v_{tr,p}(1 - \cos(\omega_o(t-t_4))) - I_{pri}(t_4)Z_o \sin(\omega_o(t-t_4)) \quad (1)$$

이 때,  $V_{in}$ 은 입력 전압,  $V_o$ 은 출력 전압,  $v_{tr,p} = nV_o/2$ ,  $\omega_o = 1/\sqrt{L_{pri}(C_{oss3} + C_{oss4})}$ ,  $Z_o = \sqrt{L_{pri}/(C_{oss3} + C_{oss4})}$ 를 나타낸다.

ZVS를 달성하기 위해서, 스위치 전압의 최솟값은 0보다 작아야한다. 따라서 (1)로부터 ZVS를 위해 필요한 1차측 전류 조건은 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$i_{pri}(t_4) \geq \frac{1}{Z_o} \sqrt{\left(\frac{V_{IN} - v_{tr,p}}{2}\right)^2 - v_{tr,p}^2} \quad (2)$$

1차측 전류는 자화 전류와 재생성된 전류  $i_{rebuild}$ 의 합으로 나타낼 수 있고,  $i_{rebuild}$ 는 SR이 먼저 구동된 시간  $D_A$ 에 비례한다. 따라서 식 (2)를 이용하여 1차측 스위치의 ZVS를 달성하기 위한 추가적인 SR 구동 시간을 구하면 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다:

$$D_A T_s \geq \frac{L_{pri}}{2Z_o} \sqrt{\left(\frac{V_{IN}}{v_{tr,p}} - 1\right)^2 - 4} - \frac{D_{eff} T_s}{2} \frac{V_{IN}}{v_{tr,p}} \frac{L_{pri}}{L_m} \quad (3)$$

## 3. 실험 결과

제안하는 SR 제어 기법의 실효성을 검증하기 위해 400V 입력과 27-54V/13A의 넓은 출력 전압 범위를 가지는 시작품 컨버터를 제작하고 실험하였다. 표 1은 검증에 활용된 비교군 컨버터의 설계를 요약한다. 동등한 비교를 위하여 1차측 스위치와 변압기는 동일하게 설계하였으며, 기존 SR 제어 기법이 레깅-레그 스위치의 ZVS를 달성하기 위하여 변압기의 자화인덕턴스를 작게 설계하는 것과 달리 제안하는 SR 제어 기법을 할

표 1 시작품 컨버터들의 설계 값

	기존 SR 제어 기법을 사용하는 풀브릿지 정류단 PSFB 컨버터	기존 SR 제어 기법을 사용하는 결합 인덕터 정류단 PSFB 컨버터	제안하는 SR 제어 기법을 사용하는 결합 인덕터 정류단 PSFB 컨버터
리딩-레그 스위치	IPP60R190 (600V, 190mΩ)		
레깅-레그 스위치	IPP60R420 (600V, 420mΩ)		
변압기	PQ3230 (Lm = 4200μH, 52:8)	PQ3230 (Lm = 600μH, 54:8)	PQ3230 (Lm = 2700μH, 54:8)
D1, D2	VF20120 (150V)		
SR1, SR2	IPP147N12N (120V, 56A, 14.7mΩ)	IPA057N08N (80V, 60A, 5.7mΩ)	

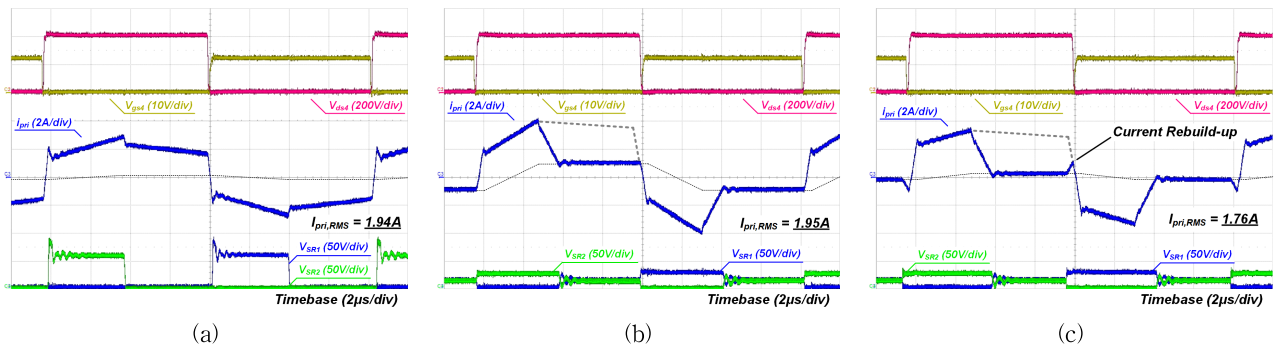


그림 3. 27V/13A 출력 부하조건에서의 실험 파형. (a) 풀브릿지 정류단 위상천이 풀브릿지 컨버터, (b) 기존 제어 방식이 적용된 결합 인덕터 정류단 위상천이 풀브릿지 컨버터, (c) 제안하는 제어 방식이 적용된 결합 인덕터 위상천이 풀브릿지 컨버터.

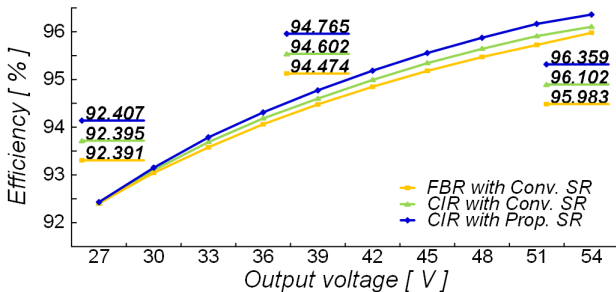


그림 4. 13A 출력 조건에서 시작품 컨버터들의 측정 효율.

용하면 자화 전류가 작아도 ZVS를 달성할 수 있으므로 크게 설계 될 수 있다.

그림 3은 시작품 컨버터들의 27V 출력 조건에서 핵심 실험 파형들이다. 그림 3(a)는 풀브릿지 정류단(FBR)을 가지는 PSFB 컨버터는 프리휠링 구간동안 1차측에 환류 전류가 흐르는 것에 비해 CIR을 사용하는 PSFB 컨버터는 환류 전류가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 레깅-레그 스위치의 ZVS를 위하여 자화 전류가 크게 설계되어 1차측에 자화 전류로 인한 도통 손실이 발생한다. 이에 비해 제안하는 SR 제어 기법을 적용한 컨버터는 자화 전류가 작아도 레깅-레그 스위칭 직전에 환류 전류를 재생성하여 ZVS를 달성할 수 있기 때문에 1차측 도통 손실을 최소화 시킬 수 있다.

그림 4는 시작품 컨버터들의 효율 측정 결과이다. 27V 출력 조건에서 제안하는 SR 제어 기법이 적용된 컨버터는 낮은 1차측 도통 손실로 높은 효율을 가지지만 SR이 먼저 켜지면서 하드 스위칭하며 추가적인 스위칭 손실을 발생 시켜 효율 향상 효과가 제한된다. 이에 비하여 54V 출력 조건에서 제안하는 SR 제어 기법은 과도한 자화 전류로 인한 불필요한 1차측 도

통 손실을 감소 시켜 높은 효율을 가질 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 CIR을 갖는 PSFB 컨버터에 적용될 수 있는 새로운 SR 제어 기법을 제안하였다. 제안하는 SR 제어 기법은 기존보다 SR을 먼저 구동시켜 줌으로써 1차측에 환류 전류를 순간적으로 재생성할 수 있고 이를 이용하여 1차측 레깅-레그 스위치의 ZVS를 달성할 수 있다. 따라서, 자화 전류가 작아도 ZVS를 달성 할 수 있기 때문에 기존 SR 제어 기법의 설계에서 과도한 자화 전류로 인한 손실을 줄일 수 있으며, 이로 인해 넓은 전압 범위에서 높은 효율을 달성할 수 있다.

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2019R1A2B5B02070509)

#### 참고 문헌

- [1] Y. D. Kim, K. M. Cho, D. Y. Kim, C. E. Kim, and G. W. Moon, "A small conduction loss phase-shifted full-bridge converter for server power supply," in 2011 KIPE Power Electronics Annual Conference, pp. 372-373, Jul. 2011.
- [2] 한정규, 최승현, 문건우. "넓은 입력전압 범위에서 높은 효율을 가지는 위상천이 풀브릿지 컨버터." 전력전자학회논문지, 24(1), 66-69, 2019.