

# 위상-천이 제어 기법의 액티브 정류기 구조를 갖는 고효율 풀-브릿지 컨버터

한정규, 김건우, 최승현, 문건우  
한국과학기술원

## A High Efficiency Full-Bridge Converter With Phase-Shifted Controlled Active Rectifier

Jung-Kyu Han, Keon-Woo Kim, Seung-Hyun Choi, and Gun-Woo Moon  
KAIST

### ABSTRACT

본 논문에서는, 위상-천이 제어 기반의 액티브 정류기 구조를 갖는 새로운 고효율 풀-브릿지 컨버터를 제안한다. 기존의 위상-천이 풀-브릿지 컨버터는 풀-브릿지 구조로 인한 스위치의 작은 도통손실과, 영전압 스위칭 등의 특징으로 인해 높은 용량에서 널리 쓰이는 토폴로지이다. 하지만, 위상-천이 풀-브릿지 컨버터는 넓은 입력전압 범위에서 설계되면 1차측에 큰 환류 전류가 생겨 도통손실이 증가하는 문제점을 갖는다. 따라서 이를 해결하기 위해, 제안하는 회로는 액티브 정류기를 사용하여 1차측 스위치들이 항상 최대 시비율로 동작할 수 있게 한다. 이로 인하여 순환 전류가 사라져 넓은 입력전압 범위에서도 높은 효율을 달성 할 수 있다. 뿐만 아니라, 제안하는 정류기의 구조 상 특징으로 인해 액티브 정류기의 스위치는 전압 링잉을 갖지 않고 출력 전압으로 고정되어 낮은 전압 스트레스를 갖는다. 제안하는 회로의 효율성을 증명하기 위해, 250-400V 입력, 56V/12.8A 출력에서 실험이 진행되었다.

### 1. 서론

최근 들어 인터넷이 전 세계적으로 보급됨에 따라서, 데이터 센터의 전력 소비량이 급격하게 증가하고 있다. 이와 같은 추세에 따라서 서버용 전원장치는 높은 효율을 요구하고 있으며, 서버용 전원장치의 특징인 홀드-업 시간을 만족하기 위해 넓은 입력전압 범위에서 동작을 요구하고 있다.

다양한 DC/DC 컨버터들 중, 그림 1의 위상-천이 풀브릿지 컨버터는 풀-브릿지 구조로 인한 작은 도통 손실과, 1차측 스위치의 영전압 스위칭 동작으로 인해 서버용 전원장치에서 널리 쓰이는 토폴로지이다. 하지만, 위상천이 풀브릿지 컨버터는 홀드-업 시간을 만족하기 위해 넓은 입력전압 범위에서 설계되면, 입력 전압이 높은 노미널 동작 시 작은 유효 시비율로 동작하여 1차측에 큰 순환전류가 발생한다<sup>[1]</sup>. 뿐만 아니라, 정류기 다이오드에서 기생 성분간의 공진으로 인해 큰 전압 링잉을 발생시켜 전압 스트레스가 큰 다이오드를 사용하여야 한다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 그림 2와 같은 새로운 액티브 정류기 구조를 갖는 풀-브릿지 회로를 제안한다. 제안하는 회로의 1차측 스위치는 항상 최대 시비율로 동작하며, 액티브 정류기의 위상-천이 기법을 통해 출력 전압을 제어한다. 제안하는 회로는 1차측 스위치가 최대 시비율로 동작하기 때문에, 순환 전류가 발생하지 않으며 액티브 브릿지의 스위치 전압이 출력 전압으로 클램핑되는 장점을 갖는다.

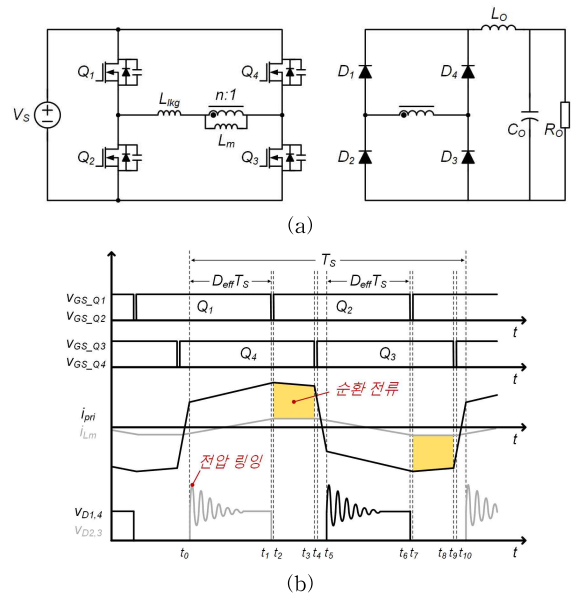


그림 1. 위상-천이 풀-브릿지 컨버터의 특징. (a) 위상-천이 풀-브릿지 회로 구조, (b) 노미널 동작 시 주요 파형.

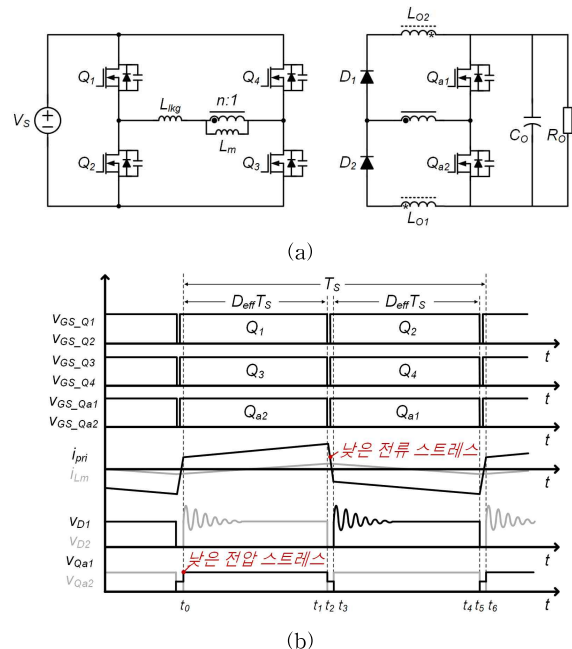


그림 2. 제안하는 컨버터의 특징. (a) 액티브 정류기 구조를 가지는 회로 구조, (b) 노미널 동작 시 주요 파형.

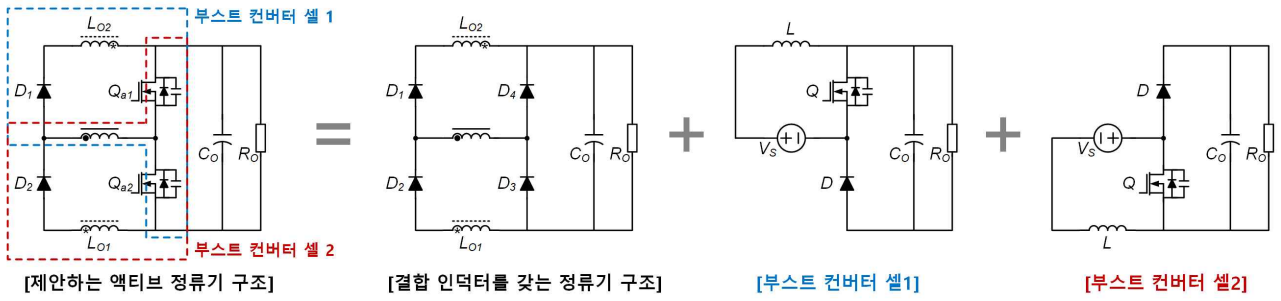


그림 3. 제안하는 액티브 정류기의 구조적 특성.

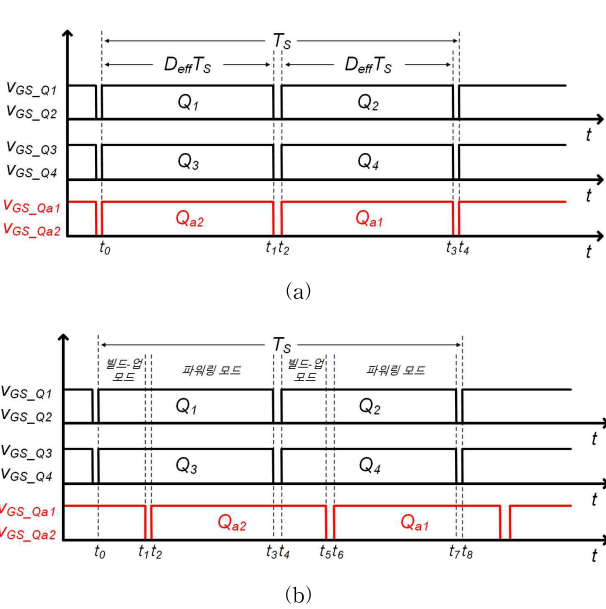


그림 4. 제안하는 컨버터의 스위치 구동 특성. (a) 노미널 동작 시 스위치 동작, (b) 홀드-업 동작 시 스위치 동작.

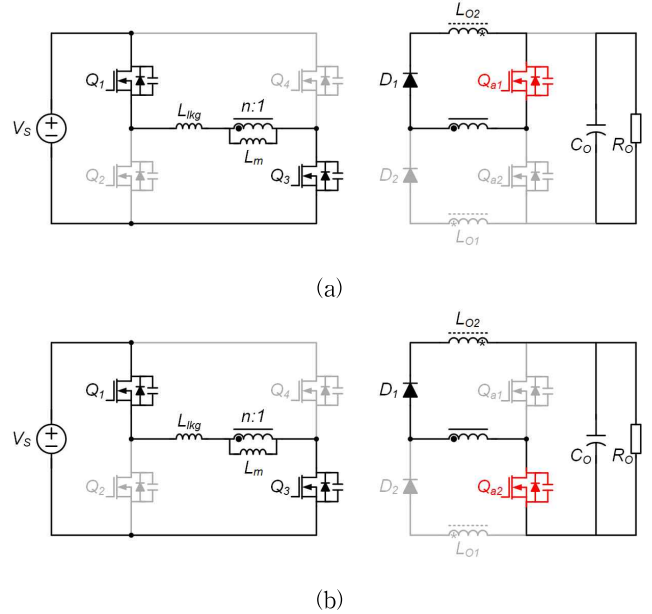


그림 5. 홀드-업 동작 시 전류 도통 경로. (a)  $t_0-t_1$  시 도통 경로, (b)  $t_2-t_3$  시 도통 경로.

## 2. 제안하는 회로의 특징

### 2.1 제안하는 액티브 정류기의 구조적 특성

제안하는 회로의 정류기 부분을 보면, 그림 3과 같이 결합 인덕터를 갖는 풀-브릿지 정류기 구조<sup>[2]</sup>와, 2개의 부스트 컨버터 셀로 이루어진 것을 알 수 있다. 이는  $Q_{a1}$ 과  $Q_{a2}$ 를  $D_1$ 와  $D_3$ 가 도통 하는 시기에 켜질 경우, 동기 정류기로 사용할 수 있으며, 변압기의 2차측 전압 방향에 맞춰 켜질 경우 부스트 컨버터로 동작시킬 수 있음을 의미한다. 이를 통해, 제안하는 컨버터는 노미널 동작 시  $Q_{a1}$ 과  $Q_{a2}$ 를 동기 정류기로 사용하여 도통 손실을 저감하고, 홀드-업 동작 시 추가 전압 이득을 얻기 위해  $Q_{a1}$ 과  $Q_{a2}$ 를 부스트 컨버터의 스위치로 사용한다.

### 2.2 제안하는 액티브 정류기의 스위치 구동 기법

2.1 절에서 설명한 것과 같은 동작을 만들기 위해, 제안하는 회로는 그림 4와 같이 동작한다. 먼저, 노미널 동작 시에는 입력 전압이 높기 때문에 추가 전압 이득을 필요로 하지 않아, 그림 4(a)와 같이  $Q_{a1}$ 과  $Q_{a2}$ 는  $Q_1, Q_3$ 와 동시에 켜지며 동기 정류기로써 동작한다. 그리고, 홀드-업 상태에서는 입력 전압이 낮아지기 때문에, 추가적인 전압 이득을 얻기 위해  $Q_{a1}$ 과  $Q_{a2}$ 의 위상을 오른쪽으로 천이시킨다. 이때, 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이,  $Q_1, Q_3, Q_{a1}$ 이 동시에 켜지게 되면 변압기의 2차측 전압을 입력 전압으로 하는 부스트 컨버터와 등가회로가 만들어지고,  $Q_{a1}$ 이 꺼지게 되면 그림 5(b)와 같이 빌드-업된 전류는

$Q_{a2}$ 를 통해 출력으로 전달되게 된다. 이와 같은 동작으로 인해 제안하는 액티브 정류기 회로는 부스트 컨버터를 통합시킨 구조로 볼 수 있으며, 홀드-업 동작 시 추가 전압 이득을 얻어 넓은 입력전압 범위에서 동작할 수 있게 한다. 뿐만 아니라, 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이,  $Q_{a1}$ 과  $Q_{a2}$ 는 각각 부스트 컨버터의 다이오드로 동작할 때 켜지기 때문에, 부스트 컨버터 동작을 하면서도 영전압 스위칭이 가능하다는 장점이 있다.

### 2.3 넓은 입력 범위에서 제안하는 회로가 갖는 장점

일반적인 DC/DC 컨버터는 홀드-업 조건을 만족하기 위해 넓은 입력 전압 범위에서 설계되면, 입력 전압이 가장 낮은 상황에서 최대의 시비율을 갖도록 설계된다. 이로 인해, 효율이 중요한 노미널 동작 시 작은 시비율로 동작하도록 요구되고, 이는 일반적으로 회로에 불리한 영향을 일으키게 된다. 뿐만 아니라, 이러한 문제점은 홀드-업 시간이 길어져 입력 전압 범위가 넓어질수록 심화된다.

반면에, 제안하는 회로는 입력 전압이 높은 노미널 동작 시, 1차측 스위치가 최대의 유효 시비율로 동작한다. 그리고, 홀드-업 동작 시 입력 전압이 낮아지게 되면, 이를 보상하기 위해 액티브 정류기가 동작하여 추가적인 전압 이득을 만들어 낸다. 따라서 제안하는 회로는, 홀드-업 구간이 아닌 노미널 동작 시 최적의 효율을 갖도록 설계될 수 있다. 또한, 홀드-업 시간이 길어져도 액티브 정류기의 위상-천이 구간이 길어질 뿐 노미널 동작에는 영향을 미치지 않는다.

표 1 프로토타입 컨버터 들의 설계 값

	1. 풀-브릿지 정류기를 갖는 위상-천이 풀-브릿지 컨버터	2. 결합 인덕터 정류기를 갖는 위상-천이 풀-브릿지 컨버터	3. 제안하는 액티브 정류기를 갖는 풀-브릿지 컨버터
노미널 동작 시 유효 시비율	0.28	0.23	0.48
리딩 레그 스위치	IPP60R280 (600 V, 280 mΩ)		
레깅 레그 스위치	11N65M5 (650 V, 430mΩ)		
변압기	PQ3230 (600μH, 34:10)	PQ3230 (400μH, 35:10)	PQ3225 (2000μH, 35:5)
영전압 스위칭 범위	전 부하 조건	전 부하 조건	전 부하 조건
$D_1, D_2$ 의 전압 스트레스	200	230	240
$Q_{d1}, Q_{d2}$ 의 전압 스트레스	200	56	56

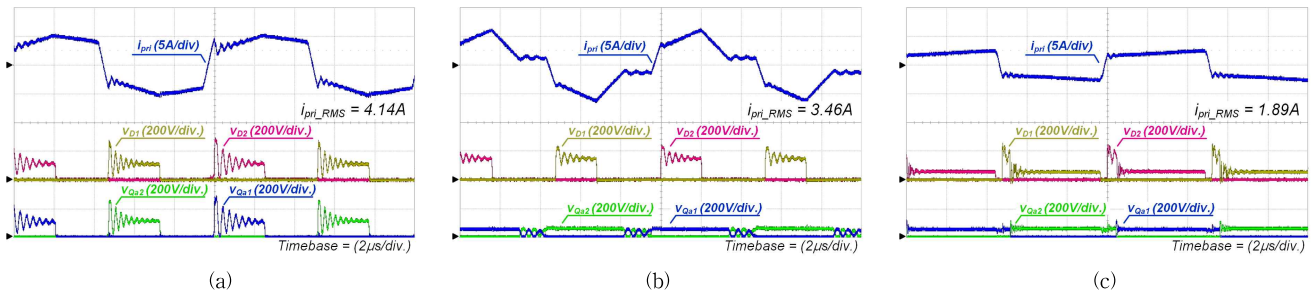


그림 6. 100% 부하조건에서의 실험 파형. (a) 풀-브릿지 정류기를 갖는 위상-천이 풀-브릿지 컨버터, (b) 결합 인덕터 정류기를 갖는 위상-천이 풀-브릿지 컨버터, (c) 제안하는 컨버터.

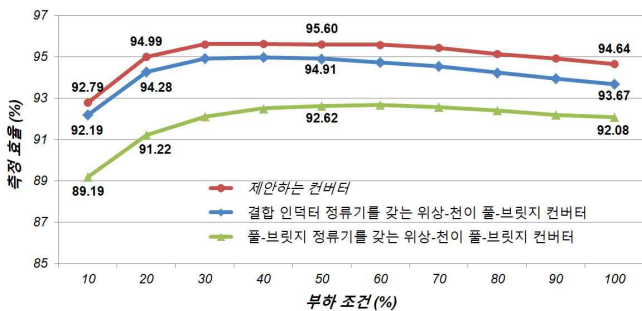


그림 7. 노미널 동작 시 프로토타입 컨버터들의 측정 효율.

### 3. 실험 결과

제안하는 회로의 효율성을 증명하기 위해, 250-400V 입력과 56V/12.8A의 출력 조건에서 실험이 진행되었다. 표 1은 프로토타입 컨버터들의 설계 값을 나타낸다. 표에서 볼 수 있듯이, 기존의 회로들은 홀드-업 동작 시 가장 낮은 입력 전압에서 최대의 시비율을 갖도록 설계되어, 효율이 중요한 노미널 동작 시 낮은 시비율로 동작하게 된다. 반면, 제안하는 회로는 노미널 동작 시 최적의 시비율로 동작하게 되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 결합 인덕터 정류기와 제안하는 정류기는  $Q_{d1}$ 과  $Q_{d2}$ 의 전압이 출력 전압으로 클램핑되기 때문에, 매우 낮은 전압 스트레스를 갖는 것을 확인할 수 있다. 모든 프로토타입 컨버터들은 전 부하 영역에서 영전압 스위칭이 가능하도록 설계되었으며, 제안하는 회로와의 공정한 비교를 위해 기존 회로들의 정류기에서 2개의 다이오드 대신 2개의 동기 정류기가 사용되었다.

그림 6은 100% 부하 조건에서 프로토타입 컨버터들의 동작 파형을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 풀-브릿지 정류기를 갖는 위상-천이 풀-브릿지 컨버터의 경우, 낮은 유효 시비율로 인해 매우 큰 순환 전류가 발생하여, 1차측에 4.14A의 RMS 값을 갖는다. 뿐만 아니라, 정류기 다이오드의 공진으로 인해

큰 전압 스트레스를 갖는 것을 확인할 수 있다. 결합 인덕터 정류기를 갖는 컨버터의 경우, 순환 전류를 제거하여 비교적 낮은 RMS 값을 갖지만, 작은 시비율로 인해 여전히 큰 전류 스트레스를 갖는다. 반면, 제안하는 컨버터의 경우, 순환 전류가 없을 뿐 아니라, 최대의 유효 시비율로 동작하기 때문에 1.89A의 RMS 값을 갖는다. 뿐만 아니라,  $Q_{d1}$ 과  $Q_{d2}$ 의 전압 스트레스가 매우 낮은 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 노미널 동작 시 프로토타입 컨버터들의 측정 효율을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제안하는 컨버터는 넓은 입력조건에 관계없이 노미널 동작 시 최대의 유효 시비율로 동작하여 전 부하 영역에서 높은 효율을 달성 하게 된다.

### 4. 결론

본 논문에서는, 새로운 액티브 정류기를 갖는 풀-브릿지 컨버터를 제안하였다. 제안하는 회로는 기존 위상-천이 풀-브릿지 컨버터와 달리, 1차측 스위치가 항상 최대의 유효 시비율로 동작하며, 액티브 정류기의 위상-천이 기법을 통해 출력 전압을 제어한다. 이로 인해, 넓은 입력 전압 범위를 갖는 조건에서도 노미널 동작 시 최대의 유효 시비율로 동작하게 되어, 홀드-업 조건에 관계 없이 높은 효율을 달성 할 수 있었다. 이와 같은 특징들로 인해, 제안하는 회로는 홀드-업 조건을 필요로 하는 많은 어플리케이션에서 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A2B5B02070509)

### 참고 문헌

- [1] 김영도, 조규민, 김덕유, 김정은, 문건우, “서버파워를 위한 작은 도통 손실을 갖는 위상 천이 풀 브릿지 컨버터”, 전력전자학회 학술대회 논문집, 372-373, 2011.
- [2] 한정규, 최승현, 문건우, “넓은 입력전압 범위에서 높은 효율을 가지는 위상천이 풀브릿지 컨버터”. 전력전자학회논문지, 66-69, 2019.