

비대칭 하프 브리지 컨버터의 경부하 효율 향상을 위한 새로운 동기 정류기 제어 기법

박정찬, 최승현, 방지훈, 심주연
한국과학기술원

A New Synchronous Rectifier (SR) Control Method for Improving Light Load Efficiency in Asymmetrical Half-Bridge Converter

Jeongchan Park, Seung-Hyun Choi, Jihun Bang, Juyeon Sim
KAIST

ABSTRACT

본 논문은 비대칭 하프 브리지 컨버터의 경부하 효율 향상을 위한 새로운 동기 정류기 제어 기법을 제안한다. 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터의 단점을 개선하기 위하여 직렬 커패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터가 제안되었다. 해당 컨버터는 트랜스포머의 dc-offset 전류의 제거, 다이오드의 균등한 평균전류 등의 다양한 장점을 가지고 있다. 따라서 중부하에서는 작은 도통 손실을 가지게 된다. 그러나 경부하에서는 높은 스너버 손실과 영전압 스위칭을 위한 에너지의 부족과 같은 어려움을 겪는다. 이러한 단점을 개선하기 위해 본 논문에서는 새로운 동기 정류기 스위치 제어 기법을 제안한다. 제안된 기법을 통해 중부하 조건에서 동기 정류기 스위치를 메인 스위치와 동기화하여 기존의 직렬 커패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터와 동일하게 작동한다. 따라서 중부하 조건에서의 장점을 그대로 가지게 된다. 또한, 제안된 컨버터는 동기 정류기를 항상 켜줌으로써 경부하 조건에서 스위칭 손실을 감소시킨다. 결과적으로 제안된 컨버터는 경부하 조건에서 직렬 커패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터에 비해 높은 효율을 달성할 수 있다. 제안하는 컨버터의 유효성은 300-400 V 입력과 48 V/400 W 출력으로 설계된 프로토타입을 통해 검증되었다.

1. 서론

비대칭 하프 브리지 컨버터는 적은 수의 소자, 영전압 스위칭 및 간단한 제어로 인해 LED 드라이버, TV 전원 공급 장치 및 산업용 어댑터와 같은 저~중용량 어플리케이션에서 사용되어 왔다.^[1] 일반적으로 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터는 그림 1에서 보이는 바와 같이 넓은 입력전압에서 설계될 경우, 노미널 입력전압에서 비대칭적인 시비율을 가지게 된다. 이로 인하여 변압기에 dc-offset가 크게 발생하게 되며 정류단 소자에 높은 전압 스트레스와 불균등한 전류가 흐르게 되는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점들은 전부하 조건에서 비대칭 하프 브리지 컨버터의 효율을 크게 악화시키게 된다.

최근, 이러한 단점을 개선하기 위해 직렬 커패시터 정류기를 갖는 AHB 컨버터가 제안되었다.^[2] 그림 2와 같이 풀브릿지 정류기에 직렬 커패시터를 추가하여 트랜스포머에 걸리는 dc-offset 전류를 완전히 제거하였으며 1차측 스위치의 영전압 스위칭 조건이 개선되었다. 또한, 불균등했던 2차측 전류가 균등해졌다. 이를 바탕으로 중부하 조건에서 도통 손실이 크게 줄어 들었다. 하지만, 경부하에서는 영전압 스위칭을 위해서 여전히 출력 전류의 크기에 의존하게 되어 조건을 만족하기 어려워진다.

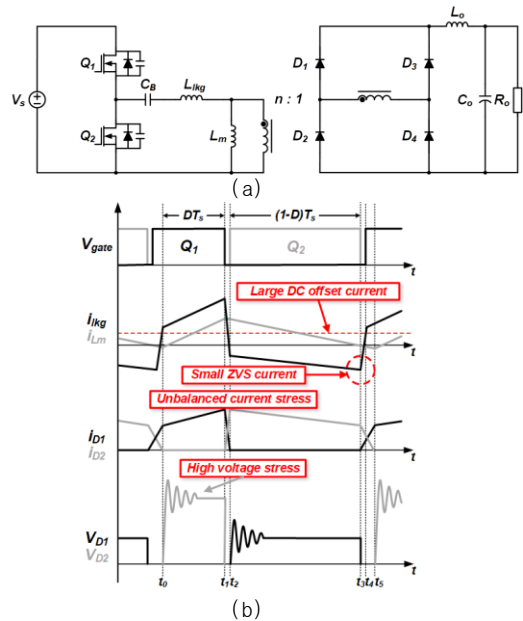


그림 1. 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터 (a) 구조 (b) 파형

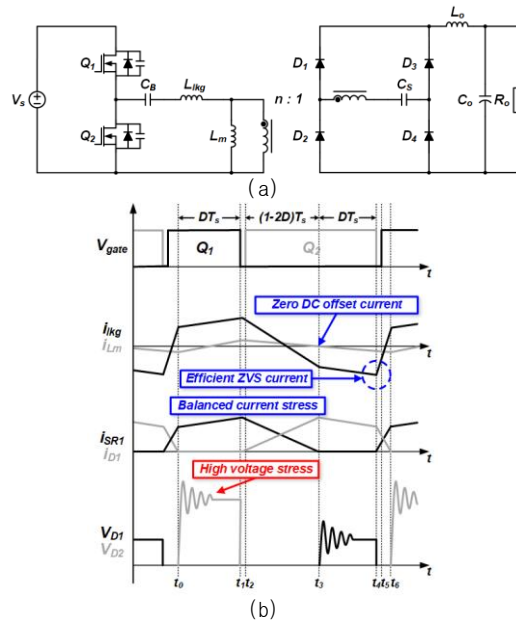


그림 2. 직렬 커패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터 (a) 구조 (b) 파형

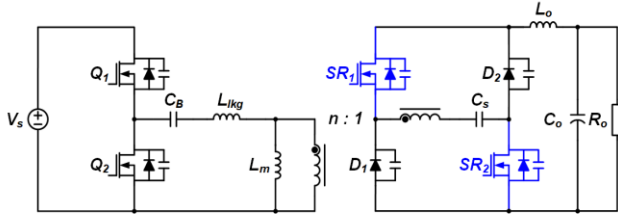


그림 3. 제안하는 회로 구조

본 논문에서는 기존 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터의 한계점을 극복하기 위해 새로운 동기 정류기 제어 기법을 제안한다. 제안하는 동기 정류기 제어 기법을 통하여 서로 다른 두 구조의 컨버터로 동작할 수 있게 된다. 그 중 하나는 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터와 유사하게 동작하여 중부하에서 낮은 도통 손실을 가지게 된다. 또한, 경부하에서는 동기 정류기의 제어를 다르게 하여 1차측의 파형이 달라지게 되며 이를 바탕으로 경부하에서도 영전압 스위칭을 하기에 충분한 에너지를 확보할 수 있어 낮은 스위칭 손실을 가진다. 따라서 제안하는 제어 기법을 통해 중부하뿐 아니라 경부하에서도 높은 효율을 가질 수 있다.

2. 제안된 기법

그림 3은 제안하는 컨버터의 회로도를 나타낸다. 그림에 보이는 바와 같이, 제안하는 제어 기법을 적용하기 위하여 기존 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 하프 브리지 컨버터 구조의 2차측 2개의 다이오드를 2개의 동기 정류기로 대체하였다. 이러한 구조의 변화로 인해 제안된 컨버터는 새로운 동기 정류기 제어를 적용했을 때, 두 개의 서로 다른 정류기 구조로 동작할 수 있다. 따라서 제안하는 기법을 통해 다양한 부하 조건에서 컨버터의 1차 측의 전류 파형을 조정할 수 있다.

1.1 중부하에서의 동기 정류기 제어

그림 4에서 보이는 바와 같이 중부하에서의 제안하는 동기 정류기 제어 기법은 1차측 스위치 Q1과 동기 정류기의 제어를 동기화 시킴으로써 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터와 유사하게 동작할 수 있다. 이를 통해 제안된 컨버터는 대칭적인 동작을 보이게 되며 중부하에서 작은 도통 손실을 가지게 된다.

1.2 경부하에서의 동기 정류기 제어

그림 5에서 보이는 바와 같이 경부하에서는 동기 정류기를 항상 켜줌으로써 누설 인덕턴스에 걸리는 전압이 스위치 Q2가 꺼지기 전까지 일정하게 유지된다. 따라서 해당 구간동안 1차측의 전류 기울기가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있으며 아래 (1)과 같이 나오게 된다.

$$i_{lk}(t) = i_{lk}(t_1) + \frac{-V_{CB} + nV_{CS}}{L_{lk}}(t - t_1) \quad (1)$$

이를 바탕으로 Q1의 영전압 스위칭을 위해 필요한 전류가 충분히 확보되어 경부하 조건에서도 영전압 스위칭을 쉽게 달성할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 경부하에서 더 작은 스위칭 손실을 달성할 수 있다.

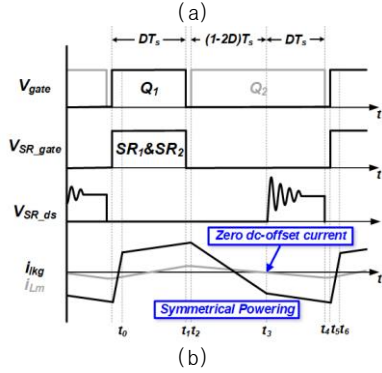
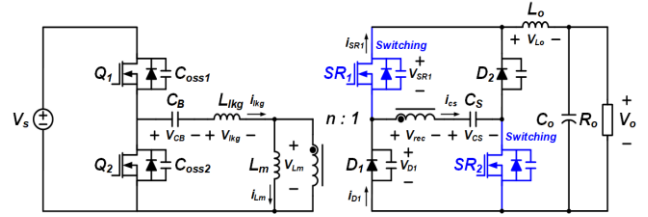


그림 4. 중부하에서의 동작 (a) 회로 (b) 파형

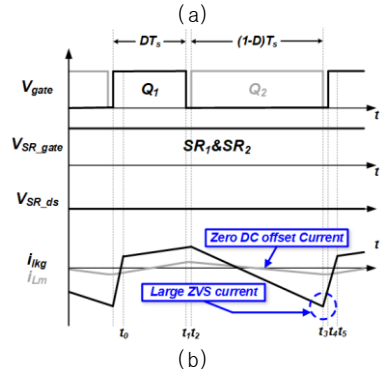
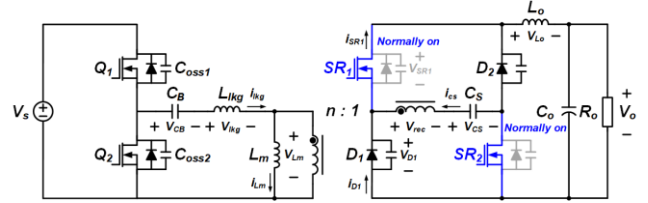


그림 5. 경부하에서의 동작 (a) 회로 (b) 파형

3. 실험결과

제안하는 기법의 타당성을 검증하기 위해 $V_s = 300-400$ V, $V_o = 48$ V, $f_s = 100$ kHz 400 W 프로토타입을 제작하였으며 실제 결과는 표 1에 나타내었다. 동기 정류기와 다이오드 간의 차이로 인한 효율 결과의 차이를 방지하기 위해 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터 또한, 2개의 2차측 다이오드가 2개의 동기 정류기로 대체하였다. 이때, 비대칭 하프 브리지 컨버터는 전부하에서 동기 정류기를 1차측 Q1 스위치와 동기화 시키는 반면에, 제안하는 컨버터는 앞서 말했던 바와 같이 경부하에서는 항상 동기 정류기를 켜주게 된다.

이때, 제안하는 컨버터는 부하 조건에 따라 동기 정류기의 제어를 달리하여 영전압 스위칭 조건이 크게 향상되어 높은 자화 인덕턴스 값과 낮은 누설 인덕턴스 값으로 설계하였다. 이를 바탕으로 두 컨버터 모두 30% 부하 조건에서 영전압 스위칭을 달성하도록 하였다.

표 1 프로토타입 컨버터 설계

	비대칭 하프 브리지 컨버터	제안하는 컨버터
1차측 스위치	IPP60R280P7 (600 V, 280 m Ω)	
변압기	PQ3535 (350 μ H, n=2)	PQ3230 (700 μ H, n=2.58)
누설 인덕턴스	27 μ H	15 μ H
정류기 다이오드 D_1, D_2	VS-15ETH03 -M3 (300V, 15A, 1V _F)	VS-8ETH03 -M3 (300V, 8A, 0.92V _F)
직렬 캐패시터 C_s	-	Ceramic capacitor (100V, 10 μ F)*2ea
SR 스위치 SR_1, SR_2	IPP200N25N3 (150V, 20m Ω)	
출력 인덕터	CH234060 (120 μ H)	CH270060 (240 μ H)
출력 캐패시터	Aluminum electrolytic capacitor (100 V, 270 μ F)	

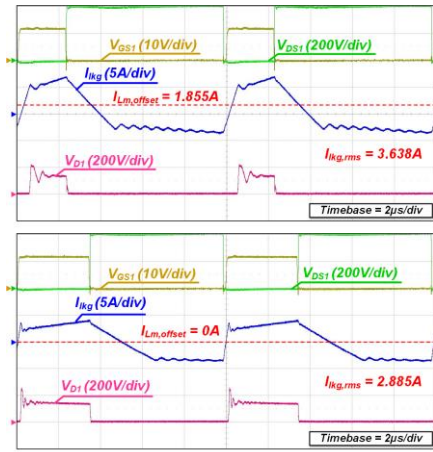


그림 6. 100% 부하 조건에서의 실험 파형. (a) 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터 (b) 제안하는 회로

그림 6은 100% 부하 조건의 실험 파형을 나타낸다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이, 기존의 비대칭 하프-브리지 컨버터는 비대칭적인 동작으로 인하여 dc-offset 전류가 변압기에서 발생함을 확인할 수 있다. 반면, 그림 6(b)에서 보이는 바와 같이 제안하는 컨버터는 기존 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터와 동일하게 동작하므로 dc-offset 전류가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 7은 30% 부하 조건의 실험 파형을 나타낸다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 제안하는 컨버터는 높은 자화 인덕턴스 값과 낮은 누설 인덕턴스 값으로 설계되었음에도 불구하고 영전압 스위칭을 위하여 충분한 전류를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 동기 정류기의 제어를 달리하여 파형이 바뀌었음에도 dc-offset 전류가 제거되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8은 400V 입력전압에서 측정된 효율 결과를 나타낸다. 결과를 통해 알 수 있듯이, 경부하에서는 영전압 스위칭 조건이 크게 개선되었기에 작은 스위칭 손실을 가지며, 중부하에서는 기존 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 컨버터와 동일하게 동작하여 작은 도통 손실을 가지게 된다. 따라서 제안하는 컨버터는 전부하에서 높은 효율을 달성하게 된다.

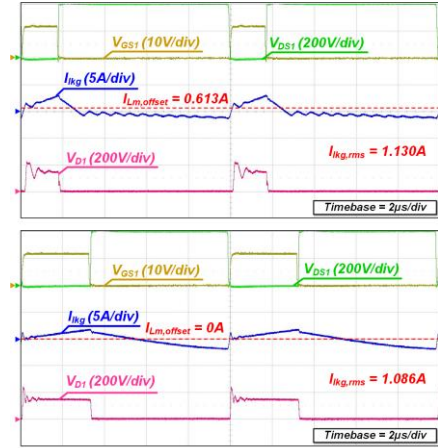


그림 7. 30% 부하 조건에서의 실험 파형. (a) 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터 (b) 제안하는 회로

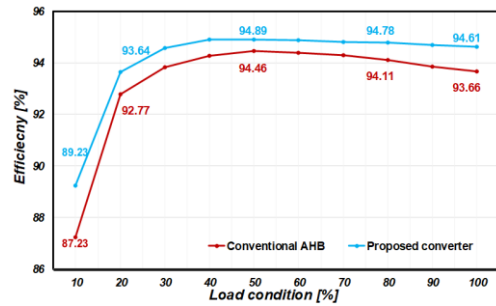


그림 8. 400V 입력 전압 조건에서의 측정 효율

4. 결론

본 논문에서는 비대칭 하프 브리지 컨버터의 경부하 효율 향상을 위한 새로운 동기 정류기 제어 기법이 제안되었다. 기존 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지 컨버터에서 두 개의 다이오드를 동기 정류기로 교체함으로써 서로 다른 정류기 구조를 간단히 통합할 수 있었다. 따라서 제안된 회로는 중부하 조건에서 직렬 캐패시터 정류기를 갖는 비대칭 하프 브리지와 같이 동작하여 중부하에서 높은 효율을 가진다. 또한, 경부하 조건에서는 영전압 스위칭을 위한 전류를 충분히 가지기 때문에 스위칭 손실이 작다. 따라서 제안된 컨버터는 기존의 연구들에 비하여 전부하 조건에서 높은 효율을 달성하였다.

이 성과는 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021R1A5A1031868)

참고 문헌

- [1] M. Hong, J. A. Qahouq, S. Luo, and I. Batarseh, "Zero-voltage-switching half-bridge DC-DC converter with modified PWM control method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 4, pp. 947-958, Jul. 2004.
- [2] J. Bae, J.-S. Kim, M. Lee, J.-K. Han and G.-W. Moon, "High-Efficiency Asymmetrical Half-Bridge Converter with Linear Voltage Gain," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 12, pp. 14850-14861, Dec. 2022