능동형 스너버를 사용한 고효율 비대칭 하프-브리지 컨버터

최승현, 한정규, 정연호, 문건우
한국과학기술원

Asymmetrical Half-Bridge Converter Using Active Snubber for High Efficiency

Seung Hyun Choi, Jung Kyu Han, Yeonho Jeong, and Gun Woo Moon
KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 능동형 스너버를 사용한 비대칭 하프 브리지 컨버터를 제안한다. 비대칭 하프 브리지 컨버터는 홀드 업 시간을 고려하여 넓은 입력전압 범위에서 설계되면, 노미널 동작 시 작은 시비율로 동작하여 변압기에 큰 오프셋 전류가 발생한다. 또한 변압기가 작은 턴 비로 설계되어 1차측 전류 스트레스와 2차측 정류기의 전압 스트레스가 커지는 문제점이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해, 제안하는 컨버터에서는 추가 스위치를 사용해 추가적인 전압이득을 얻음으로써, 홀드 업 동작 시 낮아지는 입력 전압을 보상한다. 때문에 제안하는 컨버터는 홀드 업 상태를 고려하지 않고 설계될 수 있어, 노미널 시에 큰 시비율로 동작한다. 게다가 추가 스위치는 능동형 스너버로 사용되어 2차측 정류기 다이오드의 전압 링잉을 제거하여 전압 스트레스를 저감시킨다. 이와 같은 특징으로 인하여 제안하는 컨버터는 전 부하 영역에서 높은 효율을 갖는다. 제안하는 컨버터의 효용성을 검증하기 위해 320 410V 입력전압과 19.5V/200W 출력에서 실험이 진행되었다.

1. 서론

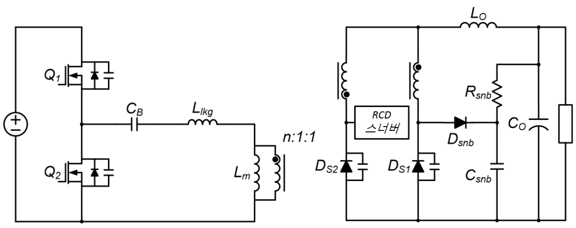
비대칭 하프 브리지 컨버터는 적은 소자수를 갖고, 영전압 스위칭이 가능하기 때문에 저용량 전원장치에 많이 쓰이는 토폴로지이다. 하지만, 비대칭 하프 브리지 컨버터는 홀드 업 시간 조건을 고려하여 넓은 입력전압 범위에서 설계되면, 1차측 스위치 동작의 비대칭이 심화되어 변압기에 큰 오프셋 전류가 생긴다. 변압기의 큰 오프셋 전류는 변압기 부피를 증가시킬 뿐 아니라, 스위치의 영전압 스위칭 조건을 악화시켜 스위칭 손실을 증가시킨다. 또한 변압기가 작은 턴 비로 설계되어, 1차측 전류 스트레스와 2차측 정류단 다이오드의 전압 스트레스가 커져 도통 손실이 커진다. 따라서 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터는 홀드 업 조건을 고려하여 설계 시 낮은 효율을 갖는다.

이러한 비대칭 하프 브리지 컨버터의 문제점을 해결하고자 여러 연구들이 진행되었다. 하프 브리지 제타 컨버터를 정류단에 병합한 컨버터는 홀드 업 상태에서 하프 브리지 제타 컨버터로 동작시킬 수 있어, 추가적인 전압이득을 얻을 수 있다[1]. 따라서 노미널 시 1차측 스위치 동작의 비대칭성을 줄일 수 있다. 하지만, 하프 브리지 제타 컨버터로 동작 시 변압기에 큰 오프셋 전류가 생겨 변압기 부피가 커지는 단점을 가진다.

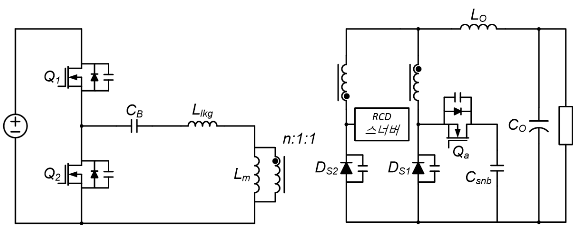
또 다른 연구에서는, 1차측에 추가 스위치와 다이오드를 사용하여 변압기의 오프셋 전류를 제거하였다[2]. 때문에 1차측 스위치의 영전압 스위칭 조건이 완화되었고, 변압기의 부피도 작다. 하지만, 추가 스위치와 다이오드에 큰 환류전류가 흘러 1차측 도통 손실이 크다는 한계를 갖는다.

최근에는 2차측 정류단에 추가 스위치를 사용하여 부스트 컨버터를 병합한 회로가 제안되었다[3]. 홀드 업 상태에서 병합된 부스트 컨버터를 사용하여 추가 전압 이득을 얻을 수 있다. 하지만, 2차측 추가 스위치 동작 시 출력 캐패시터의 전류가 불연속이 되어 출력 캐패시터의 부피가 크게 증가한다는 한계를 갖는다. 또한 추가 스위치가 하드 스위칭하고, 홀드 업 시에만 쓰여 스위치 이용률이 낮다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 연구들의 한계를 극복하기 위해 새로운 비대칭 하프 브리지 컨버터를 제안한다. 제안된 회로는 홀드 업 상태에서 추가적인 전압이득을 내어 홀드 업 시간과 관계없이 설계할 수 있고, 변압기의 오프셋 전류가 작아 변압기 부피가 작다. 또한 2차측 추가 스위치가 영전압 스위칭이 가능하고, 능동형 스너버로 사용되어 다이오드의 전압 스트레스를 줄인다. 마지막으로 제안된 컨버터는 연속적인 출력 캐패시터 전류를 갖고 있어 크기가 증가하지 않는다.



(a) 기존 비대칭 하프-브리지 컨버터

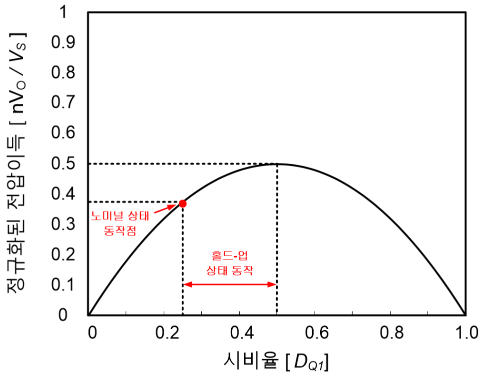


(b) 제안된 컨버터

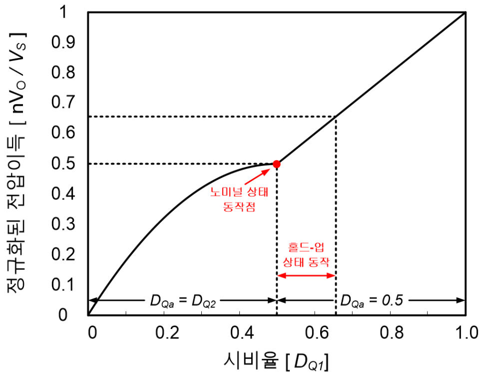
그림 1. 제안된 컨버터의 도출. (a) 기존 비대칭 하프-브리지 컨버터, (b) 제안된 컨버터

2. 제안된 컨버터

제안된 컨버터는 그림 1(a)에 소개된 비대칭 하프 브리지 컨버터의 스너버를 그림 1(b)와 같이 변경한 회로이다. 이번 장에서는 제안된 컨버터의 도출, 동작 원리 등에 대해서 설명한다.

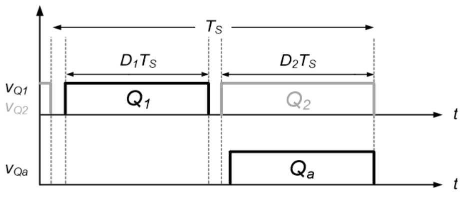


(a) 기존 비대칭 하프-브리지 컨버터의 전압 이득 곡선

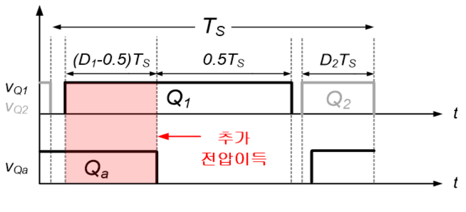


(b) 제안된 컨버터의 전압이득 곡선

그림 2. 전압이득 곡선 및 시비율 설계 사항. (a) 기존 비대칭 하프-브리지 컨버터의 전압이득 곡선, (b) 제안된 컨버터의 전압이득 곡선



(a) 노미널 상태에서의 스위치 동작

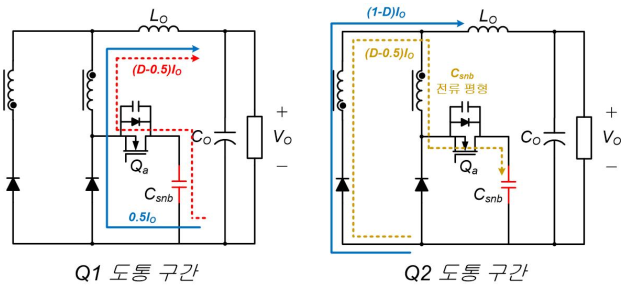


(b) 홀드-업 상태에서의 스위치 동작

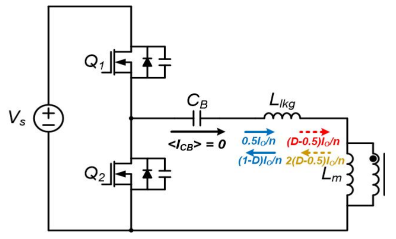
그림 3. 제안된 컨버터의 스위치 동작. (a) 노미널 상태에서의 스위치 동작, (b) 홀드-업 상태에서의 스위치 동작

2.1 제안된 컨버터의 도출

비대칭 하프 브리지 컨버터는 변압기의 누설 인덕턴스와 2차측 정류기 다이오드 기생 캐패시터의 공진으로 인해, 2차측 다이오드의 전압 링잉이 생겨, 전압 스트레스가 높아진다. 높은 전압 스트레스로 인해 순방향 전압 강하가 높은 다이오드를 사용하게 되면, 큰 도통 손실이 발생하여 효율이 감소한다. 따라서 일반적으로 그림 1(a)와 같이 각 다이오드에 RCD 스너버를



(a) 2차측 정류단 전류와 전류 평형



(b) 1차측에 투영된 전류와 전류 평형

그림 4. 홀드-업 동작 시 전류의 흐름. (a) 2차측 정류단 전류와 전류 평형 (b) 1차측에 투영된 전류와 전류 평형

사용하여 전압 스트레스를 감소시킨다. RCD 스너버를 사용하면 공진 에너지의 일부를 저항을 통해 열로 방출시킬 수 있기 때문에 다이오드의 전압 링잉을 감소시켜, 전압 스트레스를 줄일 수 있다.

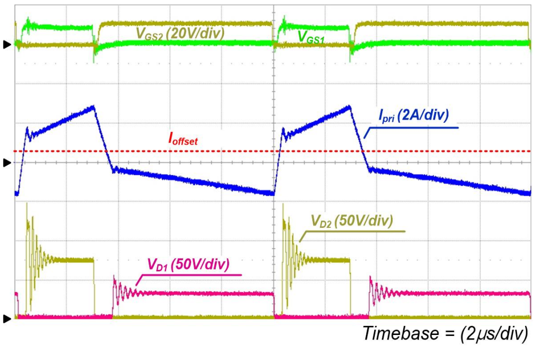
제안된 컨버터는 그림 1(b)와 같이, RCD 스너버 중 하나를 능동형 스너버로 치환한 회로이다. 능동형 스너버는 스위치와 캐패시터로 구성되어 있으며, 기존 RCD 스너버와는 달리 저항 소자를 사용하지 않는다. 때문에 스너버 저항에서의 손실이 발생하지 않아 스너버 손실이 작다. 또한 기존 RCD 스너버는 다이오드의 전압 링잉을 완전히 제거할 수는 없지만, 제안된 회로의 능동형 스너버는 다이오드의 전압 링잉을 제거할 수 있다. 따라서 다이오드 D_{S1}의 전압 스트레스를 줄여 보다 성능 좋은 다이오드를 사용할 수 있다. 마지막으로, 추가 스위치를 사용하여 홀드 업 시에 추가적인 전압이득을 낼 수 있어 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터가 갖는 단점들을 해결할 수 있다.

2.2 제안된 컨버터의 동작

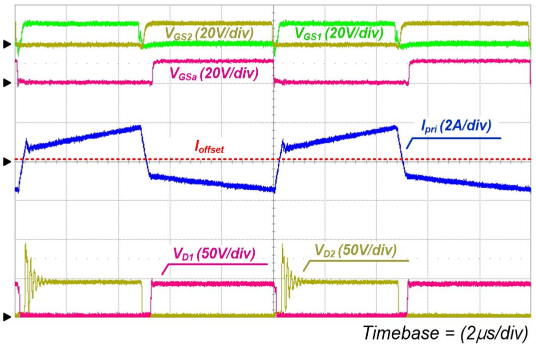
기존 비대칭 하프 브리지 컨버터는 0.5 시비율에서 최대 전압이득을 갖는다. 따라서 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이, 노미널 동작에서 낮은 시비율로 동작한다. 1차측 메인 스위치의 비대칭성으로 인해 2차측에서 1차측으로 투영되는 전류의 불균형이 생긴다. 이때 1차측 캐패시터의 전류 평형이 이루어져야 하므로 변압기에 오프셋 전류가 생긴다. 따라서 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터는 1차측 스위치의 비대칭적 동작으로 인해, 변압기에 큰 오프셋 전류를 갖는다.

그에 반해 제안된 컨버터는 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이, 0.5 시비율 이상에서 추가 전압이득을 갖는다. 때문에 홀드 업 조건과 관계없이 시비율 0.5 부근에서 노미널 동작을 하도록 설계될 수 있다. 따라서 제안된 회로는 1차측 스위치가 노미널 동작에서 대칭적으로 동작하여 변압기의 오프셋 전류가 작다.

노미널 동작에서 추가 스위치 Q_a는 그림 3(a)와 같이 스위치 Q_2에 동기시켜 동작시킴으로써 다이오드 D_{S1}의 전압 링잉을 제거하는 능동형 스너버로 사용된다. 또한 추가 스위치는 충분한 데드타임을 주고 턴 온 하면, 영전압 스위칭이 보장되



(a) 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터의 실험 파형



(b) 제안된 컨버터의 실험 파형

그림 5. 100% 부하 조건에서 파형. (a) 기존 비대칭 하프-브리지 컨버터의 실험 파형, (b) 제안된 컨버터의 실험 파형

표 1 비대칭 하프-브리지 컨버터와 제안된 컨버터의 설계

	기존 비대칭 하프-브리지	제안된 컨버터
노미널 동작 시비율	0.25	0.45
변압기 오프셋 전류	0.82A	0.12A
변압기 코어	PQ3220	PQ2620
변압기 턴 비	6.25 : 1 : 1	9 : 1 : 1

기 때문에 능동형 스너버 동작으로 인한 손실이 매우 작다.

홀드 업 상태에서는 스위치 Q_1과 스위치 Q_a의 도통 구간을 겹치게 하여 추가적인 전압 이득을 얻을 수 있다. 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이, 홀드 업 상태에서도 추가 스위치는 스위치 Q_2에 맞추어 턴 온 하여 능동형 스너버로 동작한다. 입력전압이 내려갈수록 스위치 Q_1의 도통 구간을 늘려 전압 이득을 키움으로써 출력전압을 유지시킨다.

제안된 컨버터는 홀드 업 상태에서 1차측 스위치가 비대칭적인 동작을 하지만, 추가 스위치 시비율을 0.5로 동작시키면 오프셋 전류가 발생하지 않는다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, Q_1 도통 구간과 Q_2 도통 구간에서 각각 2차측에서 1차측으로 넘어오는 전류의 총량이 같다. 따라서 1차측 캐패시터의 전류 평형이 이루어져, 변압기 오프셋 전류가 생기지 않는다. 결과적으로, 제안된 컨버터는 추가 스위치를 사용하여 변압기의 오프셋 전류를 작게 만들 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 컨버터의 효용성을 검증하기 위해, 320 410V_{DC} 입력전압 범위, 19.5V/200W 출력을 가진 전원장치의 프로토타입을

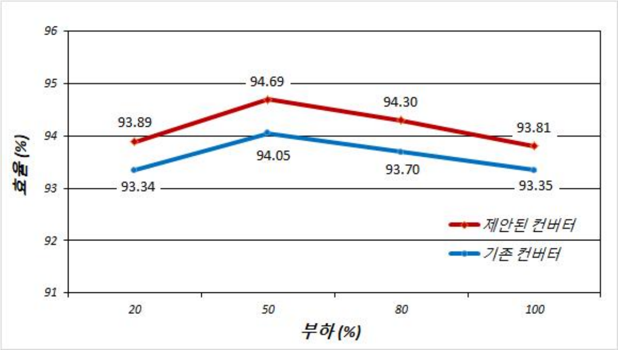


그림 6. 측정된 효율

제작하여 실험을 진행하였다.

그림 5를 보면 알 수 있듯이, 기존의 비대칭 하프 브리지 컨버터는 1차측 스위치의 비대칭이 크고, 그로인해 변압기에 큰 오프셋 전류가 생긴다. 반면에 제안된 컨버터는 1차측 스위치의 대칭적인 동작을 하고, 변압기에 작은 오프셋 전류를 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. 표 1에서 확인할 수 있듯이, 제안된 컨버터는 변압기 오프셋 전류가 작기 때문에 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터보다 작은 변압기를 갖는다. 또한 제안된 컨버터의 능동형 스너버가 다이오드 D_{S1}의 전압링잉을 제거하였음을 확인할 수 있었다.

그림 6에 두 컨버터의 효율을 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 제안된 컨버터가 전 부하영역에서 보다 높은 효율을 갖는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는, 능동형 스너버를 사용한 고효율 하프 브리지 컨버터가 제안되었다. 제안된 컨버터는 2차측에 추가 스위치를 사용하여 홀드 업 상태에서 추가적인 전압이득을 얻을 수 있었다. 따라서 제안하는 회로는 홀드 업 조건을 고려하지 않고 정상 동작 상태에서 설계될 수 있다. 또한 추가 스위치는 능동형 스너버로 사용되어 다이오드 전압 스트레스를 줄인다. 이로 인해, 제안된 회로는 기존 비대칭 하프 브리지 컨버터가 갖는 문제점을 해결하여 전 부하 영역에서 높은 효율을 달성하였다.

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B2010328)

참 고 문 헌

[1] J. I. Baek, J. K. Kim, J. B. Lee, H. S. Youn, and G. W. Moon, "Integrated asymmetrical half bridge zeta (AHBZ) converter for DC/DC stage of LED driver with wide output voltage range and low output current," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 12, pp. 7489 7498, Dec. 2015.

[2] 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.

[3] J. K. Han, J. W. Kim, and G. W. Moon, "A high efficiency asymmetrical half bridge converter with integrated boost converter in secondary rectifier," *IEEE Trans. Power. Electron.*, vol. 32, no. 11, pp. 8237 8242, Nov. 2017.