

고효율 저가격의 양방향 단일 전력변환 AC-DC 컨버터

김광섭, 이성호, 권봉환
포항공과대학교 전자전기공학과

High efficiency and Low Cost Bidirectional Single Power-Conversion AC-DC Converter

Kwang Seop Kim, Sung Ho Lee, Bong Hwan Kwon

Department of Electronic and Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 고효율 에너지 저장 시스템에 적합한 양방향 단일 전력변환 AC DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 단일 전력변환을 통해 저가격, 고효율 특성을 가지며, 기존 양방향 전력변환 시스템에 비해 소형화되었다. 본 논문에서는 양방향 단일 전력변환 AC DC 컨버터를 능동 클램프를 가지는 플라이백 컨버터로 구현하였다. 전력 용량과 효율을 높이기 위해 연속전류모드를 채택하였으며, 양방향 전류 제어를 위해 분할 적분 제어기를 이용하였다. 최종적으로 시제품을 제작하여 제안하는 양방향 컨버터의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

양방향 AC DC 컨버터는 에너지 저장시스템, 전기차, 무정전 전원 장치와 같은 다양한 분야에서 사용되고 있다. 기존 양방향 AC DC 전력변환 시스템은 PFC(Power Factor Collection) 기능을 가지는 양방향 AC DC 컨버터와 양방향 DC DC 컨버터로 구성된 Two stage 구조를 가진다. 이러한 Two stage 시스템은 구성 상 전력 손실이 높고, 소자 수가 많아 회로의 복잡도가 증가한다. 또한 높은 정격 전압의 DC link 전해 커패시터를 요구하여 무게 및 부피를 증가시킨다.^{[1],[2]}

본 논문에서는 기존의 Two stage 양방향 전력변환 컨버터의 문제점을 극복할 수 있는 고효율, 저가격 특성을 가지는 양방향 단일 전력변환 AC DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 시스템은 양방향 AC DC 컨버터 하나만으로 구성된 단일 전력변환 구조를 가진다. 따라서 전력 손실이 낮고, 소자 수가 적어 회로 구성이 간단하다. 또한 높은 정격 전압의 DC link 전해 커패시터를 필요로 하지 않아 양방향 전력변환 시스템을 소형화할 수 있다.

이러한 양방향 단일 전력변환 AC DC 컨버터를 구성하기 위해 본 논문은 넓은 입력력 범위를 보장해줄 수 있는 플라이백 구조를 이용하였다. 이 플라이백 컨버터는 전력 용량과 효율을 높이기 위해 연속전류모드에서 동작한다. 또한 능동 클램프를 이용하여 전압 스파이크를 완화시켰으며, 양방향 전류 제어를 위해 분할 적분 제어기를 이용하였다.

2. 양방향 단일 전력변환 AC-DC 컨버터

2.1 시스템 구성 및 특징

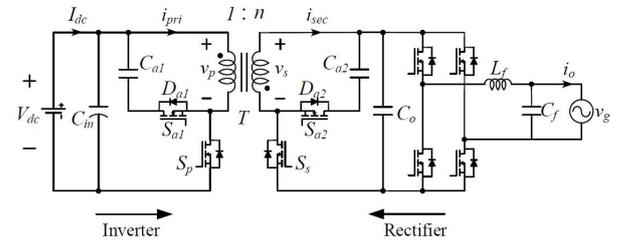


그림 1 제안하는 양방향 단일 전력변환 AC-DC 컨버터

그림 1은 본 논문에서 제안하는 양방향 단일 전력변환 AC DC 컨버터로, 변압기 T와 스위치 S_p, S_s 로 구성된 플라이백 컨버터와 Unfolding Bridge가 합쳐진 구조이다. 플라이백 컨버터의 이차 측 다이오드가 동기 정류기 S_s 로 대체되어, 도통 손실이 감소하며 양방향 전력변환이 가능하다. 일차와 이차 측의 능동클램프는 스위치 S_{a1}, S_{a2} 와 클램프 커패시터 C_{a1}, C_{a2} 로 구성되며, 변압기의 누설 에너지로 인한 전압 스파이크를 완화하고, 이 에너지의 재사용이 가능하게 한다. 플라이백 컨버터의 직류 전압과 전류는 4개의 스위치로 구성된 Unfolding Bridge와 L_f, C_f 로 이루어진 필터를 거쳐 계통과 연계된다.

2.2 동작원리

제안하는 컨버터는 Inverter 모드에서 DC 전력을 계통에 적합한 AC 전력으로, Rectifier 모드에서 계통의 전력을 DC 전력으로 변환한다. 양방향 전력변환 모두 연속전류모드를 기반으로, 그림 2와 같은 게이트 신호를 가진다. S_p, S_s 는 서로 상호적으로 동작하고, S_{a1}, S_{a2} 는 고정된 듀티비로 각각 S_p, S_s 가 켜지기 전에 짧은 시간동안 켜진다. 높은 역률을 달성하기 위해 PLL(Phase Locked Loop)을 이용하여 계통 전압과 위상을 동기화 시키며, 공칭 듀티비 D_n 와 분할적분제어기를 통한 제어 듀티비 ΔD 의 합으로 식 (1) S_p 듀티비를 얻는다.

$$D = D_n + \Delta D = \frac{V_g |\sin \omega_g t|}{n V_{bat} + V_g |\sin \omega_g t|} + \Delta D \quad (1)$$

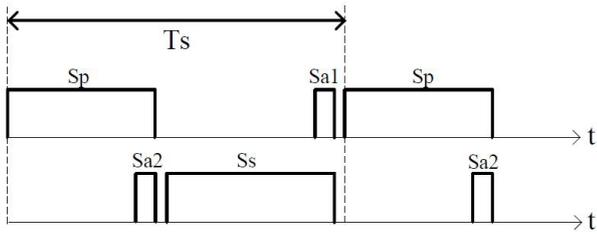


그림 2 게이트 신호

S_p 가 꺼질 때, 누설 인덕터 전류는 D_{a1} 를 통해 클램프 커패시터 C_{a1} 으로 흡수되어 스위치 S_p 의 전압 스파이크가 완화된다. 그 후, S_{a1} 의 턴온 시간동안, 클램프 커패시터에 충전된 누설 에너지가 출력으로 전달된다. 같은 방식으로 S_s 의 전압 스파이크는 S_{a2} , D_{a2} , C_{a2} 의 동작으로 완화된다. 이처럼 능동 클램프를 짧은 듀티비로 구동할 경우 순환 에너지를 줄여 효율 향상에 도움을 주며, 클램프 커패시턴스를 더 작게 설계할 수 있게 한다.

Unfolding Bridge는 4개의 스위치가 2개씩 쌍을 이뤄 상보적으로 동작한다. PLL을 통해 계통 전압의 위상이 0도와 180도마다 스위치 쌍을 반전시킨다. 이를 통해 플라이백 컨버터 직류 전압, 전류와 계통이 연계될 수 있다.

3. 양방향 전류제어 알고리즘

연속전류모드에서의 플라이백 컨버터는 제어 출력전류 전달함수에 RHPZ가 존재하여 제어에 어려움이 있다. 본 논문에서는 연속전류모드 플라이백 컨버터를 제어하기 위해 분할적분제어를 이용하였다. 그림 3은 적분제어기와 분할적분제어기의 개념도이다. 기존 적분제어기의 경우 과거의 error값이 그 error와 무관한 현재의 제어 입력에도 영향을 끼친다. 분할적분제어기는 주기를 갖는 시스템에서 이런 문제를 해결할 수 있다. 한 주기를 n개의 구간으로 분할하고, 각 구간끼리 error를 공유하지 않게 하여, 과거의 error 값이 그와 무관한 구간에서 제어 입력에 영향을 끼치지 않도록 만든다. 또한 k번째 구간에서의 error는 다음 주기의 k번째 구간에서 다시 쓰인다. 이로 인해 주기적으로 발생하는 전류 error를 줄일 수 있다.

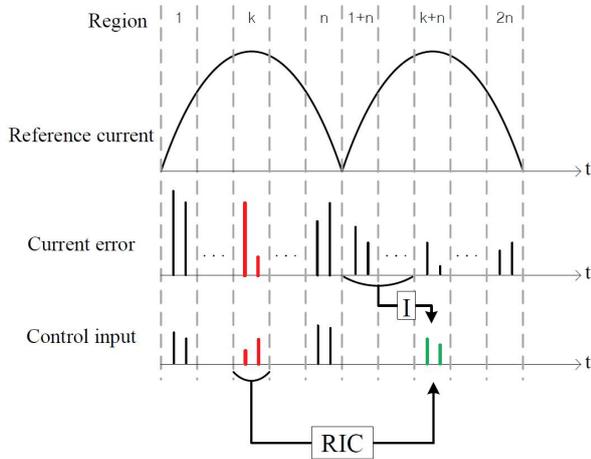


그림 3 분할적분제어

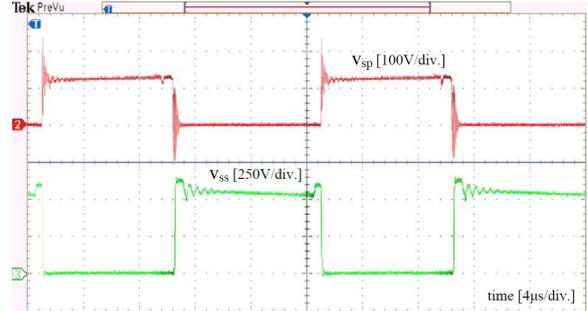


그림 4 S_p , S_s 의 전압 스파이크 파형

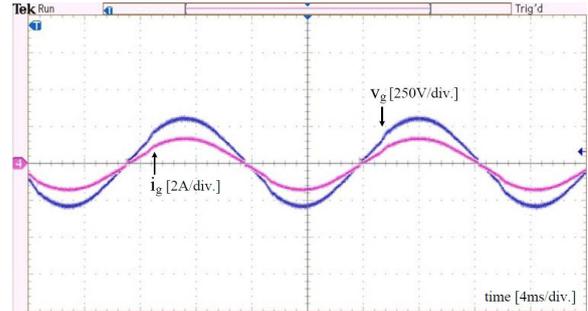


그림 5 Inverter 모드에서 출력 전압과 전류 파형

4. 실험 결과

본 논문에서 제안하는 컨버터의 이론적 해석과 성능을 검증하기 위해 200W 시작품을 제작하여 실험하였다. 실험에서 사용된 직류 전압은 60V, 계통 전압은 220 V_{rms} 60Hz이며, 메인 스위치는 50kHz로 동작한다. 그림 4는 측정된 전압 스파이크 파형으로, 스위치 S_p , S_s 의 전압 스파이크는 각각 240V와 650V으로 스파이크가 감소함을 확인할 수 있다. 그림 5는 Inverter 모드 200W 정격에서의 계통 전압과 전류이며, 두 파형은 동상이다. Inverter 모드에서 측정된 역률은 0.99이며, 효율은 94%이다.

5. 결론

본 논문에서는 양방향 단일 전력변환 AC DC 컨버터를 제안하였다. 제안하는 컨버터는 단일 전력변환을 기반으로 기존 양방향 AC DC 시스템에 비해 저가격, 고효율 특성을 가지며 회로의 소형화가 가능하다.

참고 문헌

- [1] Majid Pahlevani, Praveen Jain "A Fast DC Bus Voltage Controller for Bidirectional Single Phase AC/DC Converters", IEEE Transactions on power electronics, Vol. 30, No. 8, 2015, August.
- [2] Omer C. Onar, Kobayashi, Dylan C. Erb, Alireza Khaligh "A Bidirectional High Power Quality Grid Interface With a Novel Bidirectional Noninverted Buck Boost Converter for PHEVs", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 3, 2012, March.