

새로운 소프트 스위칭 풀브리지 DC-DC컨버터

유선호, 트란다이딩, 부하이남, 최우진
 송실대학교, 전기공학부

A Novel Soft Switching Full Bridge DC-DC Converter

Sunho Yu, Dai Duong Tran, Hai Nam Vu and Woojin Choi
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University

ABSTRACT

위상천이 풀브리지 컨버터는 소자의 기생성분과 PWM의 위상천이를 이용한 소프트 스위칭을 통해 고효율을 얻을 수 있기 때문에 산업현장에서 널리 사용되어 왔다. 그러나 ZVS(Zero Voltage Switching) 범위가 한정적이며, 누설인덕턴스에 의해 듀티 손실이 발생하고, 특히 경부하시 순환전류에 의한 손실 증가로 인해 효율이 낮아지는 단점이 있다. 본 논문에서는 2차측에 프리휠링을 위한 스위치와 다이오드를 추가함으로써 기존의 위상천이 풀브리지(PSFB) 컨버터가 가지는 단점들을 극복한 새로운 소프트 스위칭 풀브리지 컨버터를 소개하고, 3kW급 프로토타입을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

1. 서론

기존 위상천이 풀브리지 컨버터의 경우 스위치의 기생커패시터와 변압기의 누설인덕턴스를 이용하여 별다른 추가 회로없이 소프트 스위칭이 가능하기 때문에 대전력 변환 분야의 응용용으로 널리 사용되었다. 그러나 ZVS 범위가 좁고, 경부하시 (20%부하 이하구간)에서 효율이 낮으며, 변압기 인덕턴스에 의한 듀티손실과 위상천이 구간동안 1차측에서 순환전류에 의해 손실이 발생하는 단점이 있다.^[1] 또한 2차측 정류 다이오드에 전압 링잉이 심해 고압용 토폴로지에서는 스너버 회로의 사용이 필수적이다. 그동안 위상천이 풀브리지 컨버터의 단점을 극복하기 위해 다양한 연구들이 진행 되어왔다.^[1,2] 대표적인 예로는 2차측에 에너지 회수형 스너버 회로를 삽입한 형태이며,^[2] 이 방법을 이용하면 위상천이가 이루어지는 구간에서 2차측 스위치의 전압링잉의 발생을 줄여줌과 동시에 순환전류를 줄일 수 있다. 그러나 스너버 회로의 소자수 증가와 함께 스너버에 의한 손실 때문에 전체 효율 증대에 여전히 한계가 존재한다.

본 논문에서는 그림 1과 같은 새로운 소프트 스위칭 풀브리지 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 1차측 PWM에 위상천

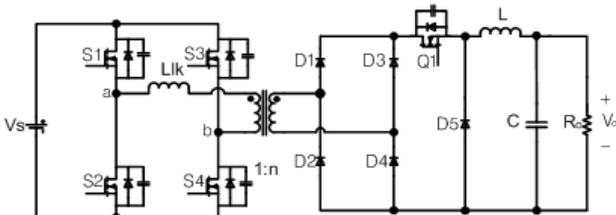


그림 1 제안하는 새로운 소프트 스위칭 풀브리지 컨버터
 Fig. 1 Proposed novel soft switching full bridge converter

이를 필요로 하지 않으며, 2차측에 프리휠링을 위한 스위치와 다이오드가 추가된 구조이다. 제안하는 컨버터의 장점은 다음과 같이 요약 될 수 있다.

1. 기존 PSFB 보다 높은 DC 변환 이득 및 낮은 듀티 손실
2. 1 차측 스위치의 ZVS Turn on 과 ZCS Turn off
3. 작은 누설인덕턴스에 의해 전 부하 구간 ZVS 가능
4. 순환 전류가 없으며 경부하에서 높은 효율
5. 2차측 수동소자의 크기 감소.

2. 제안된 새로운 소프트 스위칭 풀브리지 컨버터와 기존의 PSFB 컨버터의 비교

제안된 소프트 스위칭 풀브리지 컨버터의 동작은 1차측 스위치 S1~S4가 두 개씩 대칭적으로 동작하고, 2차측 스위치는 1차측에 동기화 되어 동작하나 ZVS과 ZCS를 위하여 시간차를 두고 온/오프 된다. 따라서 2차측 스위치는 1차측 스위치의 두 배의 스위칭 주파수로 동작하게 되며, 제안된 컨버터의 출력 필터 크기는 PSFB 컨버터에 비해 반으로 줄어들게 된다.

2.1 전압 변환비와 듀티손실

PSFB 컨버터와 제안하는 컨버터의 전압 변환 비율은 모두 식 (1)과 같고, 듀티 손실은 각각 식 (2) 및 (3)과 같다. 그림 2는 표 1 사양의 두 컨버터의 전압 변환비를 비교한 그림이며, 제안된 컨버터는 최대 듀티에서 0.48에서 변환비가 57% 높다.

$$M = \frac{V_o}{V_s} = 2n(D - \Delta D) = 2nD_{eff} \quad (1)$$

$$\Delta D_{PSFB} = \frac{2nL_{lk}}{V_s T} \left[2L_o - \frac{V_o(1-D)}{L} \frac{T}{2} \right] \quad (2)$$

$$\Delta D_{SSFB} = \frac{2nL_{lk}}{V_s T} \left[\frac{D - D_{sec}}{2} \frac{V_o}{L} \frac{T}{2} \right] \quad (3)$$

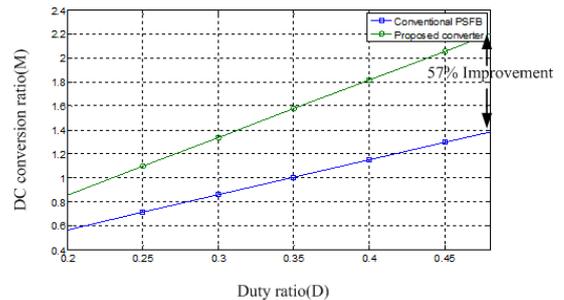


그림 2 듀티에 따른 DC변환 비율 비교
 Fig. 2 DC conversion ratio versus duty ratio

2.2 1차측 스위치의 소프트 스위칭 범위

두 컨버터 모두 영전압 스위치 턴온의 조건은 식(4)와 같이 보장하기 위한 1차 전류는 식(5)와 같이 표현된다. 이때 변압기의 자화전류는 식(6)과 같이 표현되는데 PSFB 컨버터에서는 위상천이가 늘어날수록 자화전류의 피크치가 줄어들게 되어 영전압 스위칭이 제한을 받게 되지만 제안된 컨버터의 경우 위상천이가 없으므로 그림 3에서 보듯이 일정값 이상의 누설 인덕턴스의 값만 보장되면 전구간에서의 ZVS 턴온이 가능해진다.

$$\frac{1}{2} L_{lk} I_p^2 > \frac{1}{2} (2C_{oss}) V_s^2 \quad (4)$$

$$i_{p-peak} = i_m + \frac{I_o}{n} \quad (5)$$

$$i_m = \frac{V_s}{2(L_{lk} + L_m)} \left(\frac{T}{2} - t_{ph} \right) \quad (6)$$

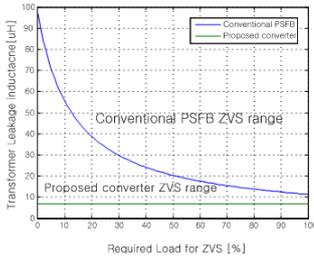


그림 3 제안된 컨버터와 PSFB 컨버터의 ZVS 범위 비교

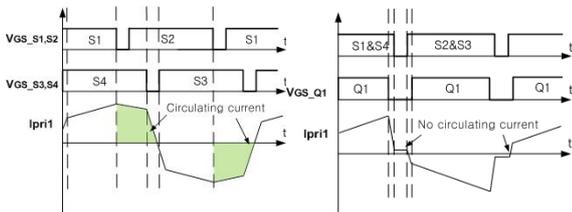
Fig. 3 Comparison of the ZVS range of the proposed converter and PSFB converter

제안된 컨버터의 1차측 스위치의 ZCS 턴오피는 2차측 스위치 오프 후 전류가 0이 된 이후 가능하며, 그 조건은 식(7)과 같다. 2차측 스위치 오프 듀티의 최소치를 0.1 정도로 가정하면 전구간에서 ZCS 턴오피가 가능함을 알 수 있다.

$$\Delta t_{zcs} > \frac{nL_{lk}}{V_s} I_o \quad (7)$$

2.3 순환 전류 및 경부하시 효율

PSFB의 경우 위상천이 기간 중 1차측에 순환전류가 발생하며, 이로 인해 변압기와 스위칭 소자에 도통 손실이 발생하게 된다(그림 4(a)). 그러나 제안된 컨버터의 경우 2차측 프리휠링 전류가 다이오드 D5를 통하여 bypass되므로 1차측에 순환전류가 발생하지 않으며, 특히 경부하시 효율이 PSFB에 비해 크게 향상된다(그림 4(b)).



(a) PSFB converter (b) Proposed converter

그림 4 변압기 1차측 전류파형

Fig. 4 Primary current waveform of the transformer.

2.4 2차측 수동 소자의 크기

두 종류 컨버터의 출력 인덕턴스는 모두 식 (4)에 의해서 결정된다. 그런데, 제안된 컨버터에서는 2차측 스위치가 2배의 주파수로 동작하므로 출력필터의 크기는 1/2로 작아지게 되며, 듀티 손실 또한 작기 때문에 인덕턴스는 한층 더 작아지게 된다.

$$L = \frac{V_{o,max} (1 - D_{min})}{\Delta I_L \times f_s} \quad (8)$$

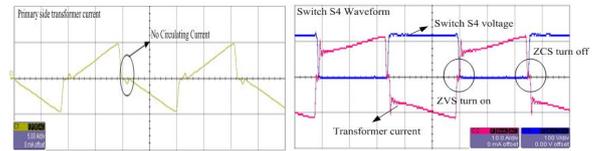
3. 실험결과

제안된 컨버터의 유용함을 검증하기 위해서 3kW급 프로토타입을 제작하였으며, 컨버터의 사양은 표 1과 같다. 그림 5는 제안된 컨버터의 경/중부하에서의 실험 파형이다. 그림에서 보듯이 순환전류가 전혀 없으며, 1차측 스위치 S4의 ZVZCS도 확인되었다. 그림 6에서는 PSFB 컨버터와 제안된 컨버터의 효율을 비교하였다. 제안된 컨버터의 효율이 월등히 높음을 알 수 있으며, 특히 경부하시 효율이 매우 높음을 알 수 있다.

표 1 제안하는 컨버터의 실험 사양

Table 1 Specification of the proposed converter

Input Voltage	DC 200V
Output Voltage	DC 400V
Output Power	3kW
Switching Frequency	50kHz
Transformer Turns Ratio	1 : 2.3
Magnetizing Inductance of the Transformer	600uH
Leakage Inductance of the Transformer	6.5uH



(a) 1차측 전류 (300W 출력) (b) S4의 스위칭 파형 (3kW 출력)

그림 5 변압기 1차측 전류 및 스위치 S4의 ZVZCS 파형

Fig. 5 Primary current of the transformer and the ZVZCS switching waveform of the switch S4

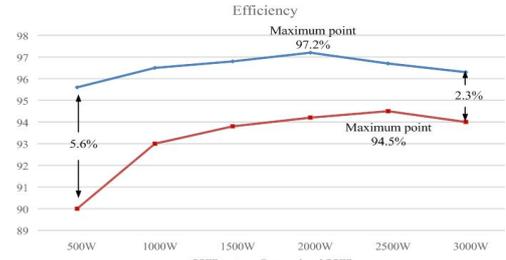


그림 6 제안된 컨버터와 PSFB 컨버터의 효율

Fig. 6 Efficiency of the proposed converter and PSFB converter

4. 결론

본 논문에서는 위상천이가 없는 새로운 소프트 스위칭 풀브리지 컨버터를 제안하였고, 추가 프리휠링 회로를 통해 다양한 장점들을 얻을 수 있음을 확인했다. 기존의 PSFB 컨버터에 비해 월등히 높은 효율을 얻을 수 있었으며, 수동소자의 크기도 현저히 감소시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Mishima, Tomokazu, Kouhei Akamatsu, and Mutsuo Nakaoka. "A High Frequency Link Secondary Side Phase Shifted Full Range Soft Switching PWM DC DC Converter With ZCS Active Rectifier for EV Battery Chargers." Power Electronics, IEEE Transactions on 28.12 (2013): 5758-5773.
- [2] Kim, Eun Soo, and Yoon Ho Kim. "A ZVZCS PWM FB DC/DC converter using a modified energy recovery snubber." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 49.5 (2002): 1120-1127.