

역률 개선과 출력 전압 조정을 위한 불연속 모드의 승압형 컨버터가 결합된 단일 전력단 포워드-플라이백 컨버터

이 성세, 강 정일, 구 관본, 문 건우
한국과학기술원

DCM Boost Converter Integrated Single-Stage Forward-Flyback Converter for Power Factor Correction and Output Voltage Regulation

Sung-Sae Lee, Jung-Il Kang, Gwan-Bon Gu, and Gun-Woo Moon
KAIST

ABSTRACT

In this paper, a DCM operated boost integrated single-stage forward-flyback converter is proposed. This proposed converter has high power factor, low harmonic distortion, and tight output regulation. To increase efficiency, zero voltage switching with asymmetrical control^[1] is used. This converter also give low voltage stress in switch and this results in low conduction loss with low turn-on resistance.

1. 서 론

입력 전압으로부터 원하는 출력 전압을 얻기 위한 컨버터로 최근 스위칭 방식의 전력 컨버터가 많이 사용되고 있다. 하지만 이러한 스위칭 방식의 컨버터는 입력 전류에 많은 고조파 성분을 포함하고 있어서 이에 대한 대책을 마련 해야한다. 가장 일반적인 방법으로서 2단 방식의 전력 컨버터를 생각할 수 있다. 하지만 이러한 2단 방식은 전력단이 2개 필요할 뿐만 아니라 제어루프 또한 2개가 필요하게 되어서 효율 및 제작 비용에 있어서 바람직하지 못하다.^[2] 따라서 이 논문에서는 2단방식을 벗어나 하나의 제어 루프로 출력전압 조정과 역률 개선을 동시에 가능하도록 한 단일 전력단 전력 컨버터를 제시한다. 최근 컨버터의 소형화에 따른 스위칭 주파수의 증가로 발생하는 스위칭 손실을 최소화 하기 위해서 영전압 기법을 사용한다. 제안된 컨버터에서는 기존의 능동형 클램프 방식 컨버터의 문제점인 높은 스위치 전압 스트레스 문제를 해결하여 낮은 전압 스트레스를 갖는 스위치를 사용할 수 있도록 하였다. 따라서 낮은 도통저항을 가진 스위치를 사용할 수 있게 되어 스위치의 도통

손실을 최소화하여 전반적인 고효율 컨버터의 설계가 가능하게 된다.

2. 동작 원리

그림 1에서 보는바와 같이 제안된 컨버터는 일반적인 하프-브리지 컨버터의 출력 인덕터를 없으며 2개의 변압기를 사용하여 ZVS(Zero Voltage Switching)을 위하여 Asymmetrical Control 방법을 사용하고 있다. 또한 PFC(Power Factor Correction)을 위해서 부스트 컨버터를 사용하였으며 여기서 스위치 SW_2 는 부스트 컨버터와 하프-브리지 컨버터에 공통으로 사용되고 있다. 그림 2는 정상상태 해석을 위한 주요 파형을 나타내며 그림 3은 각 모드에서의 전류 경로이다. 먼저 정상상태 해석을 위해 다음과 같은 몇 가지 가정을 하기로 한다.

- (a) 다이오드 D_1, D_2 의 reverse recovery time은 없는 것으로 한다.
- (b) 링크전압 V_1, V_2 는 스위칭 주기동안 일정한 전압이다.

이때 V_1 과 V_2 의 값은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$V_1 + V_2 = V_{link} \quad (1)$$

$$V_1(1 - D) = V_2D \quad (2)$$

따라서

$$V_1 = V_{link}(D) \quad (3)$$

$$V_2 = V_{link}(1 - D) \quad (4)$$

와 같다.

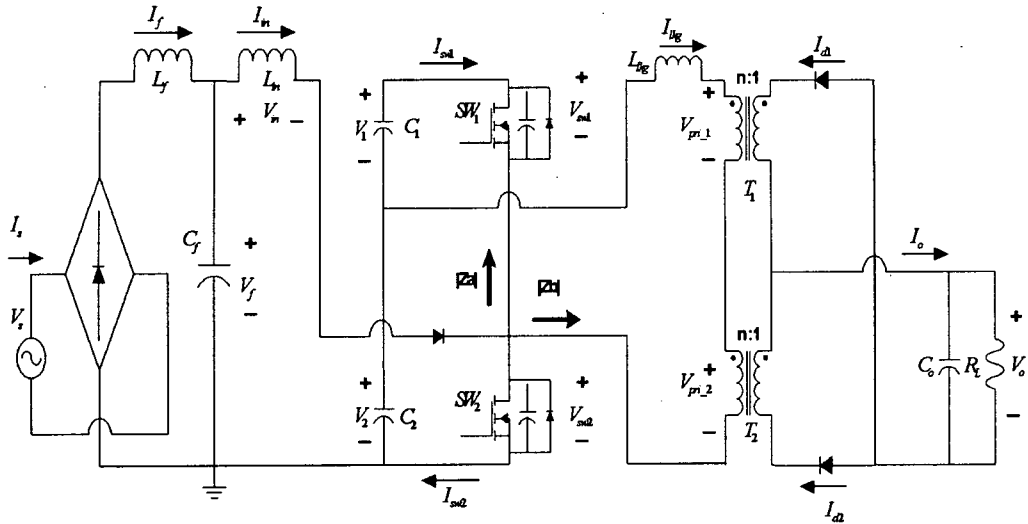


그림 1 고효율 단상 전력단 파워드-플라이백 AC/DC Converter

제안된 컨버터의 동작원리를 각 모드별 해석을 하면 다음과 같다.

①모드 M_1 : 스위치 SW_2 가 ON 되는 M_1 구간에서는 커패시터 C_2 의 전압 V_2 가 SW_2 와 변압기 T_2 를 통해서 2차측으로 파워를 전달한다. 이때 2차측 다이오드 D_1 은 OFF 상태가 되며 D_2 는 ON 상태가 된다. SW_2 에 흐르는 전류 I_{SW2} 는 그림 2에서와 같이 Primary 전류 I_{lkg} 와 입력 인덕터 전류 I_{in} 의 합으로 표현되다.

$$I_{sw2} = I_{lkg} + I_{in} = \frac{I_o}{n} + \frac{V_f}{L_{in}} t \quad (5)$$

변압기 T_2 의 일차측 전압 $V_{pri,2}$ 는 nV_o 이며 이때 변압기 T_1 의 일차 측 전압 $V_{pri,1}$ 은 $(V_2 - nV_o)$ 와 같다. 따라서 변압기 T_2 가 파워를 2차측으로 전달하는 동안 변압기 T_1 의 자화 인덕터에는 에너지를 저장되는데 이 에너지는 후술하는 M_3 와 M_4 단계에 2차측으로 넘어가게 된다

②모드 M_2 : SW_2 가 ON에서 OFF되는 순간 모드 M_2 가 시작된다. 이때 누설 인덕터에 흐르고

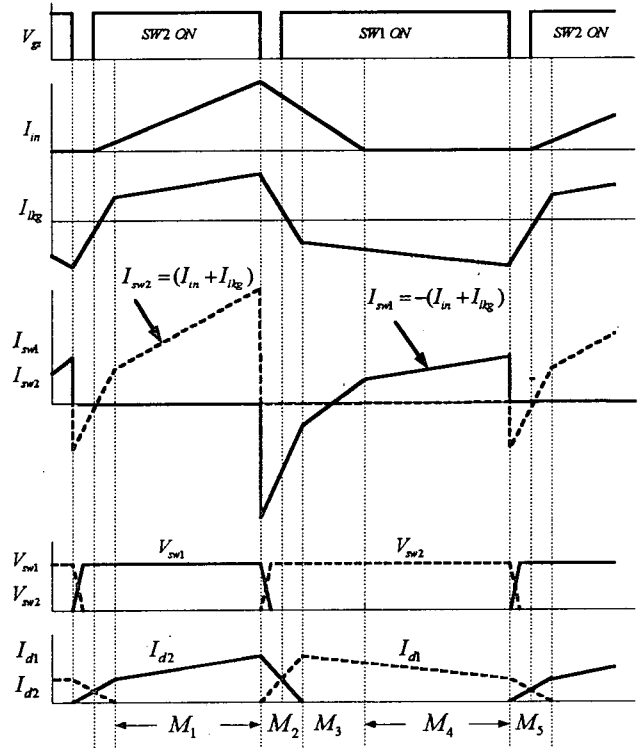


그림 2 모드 해석을 위한 주요 파형

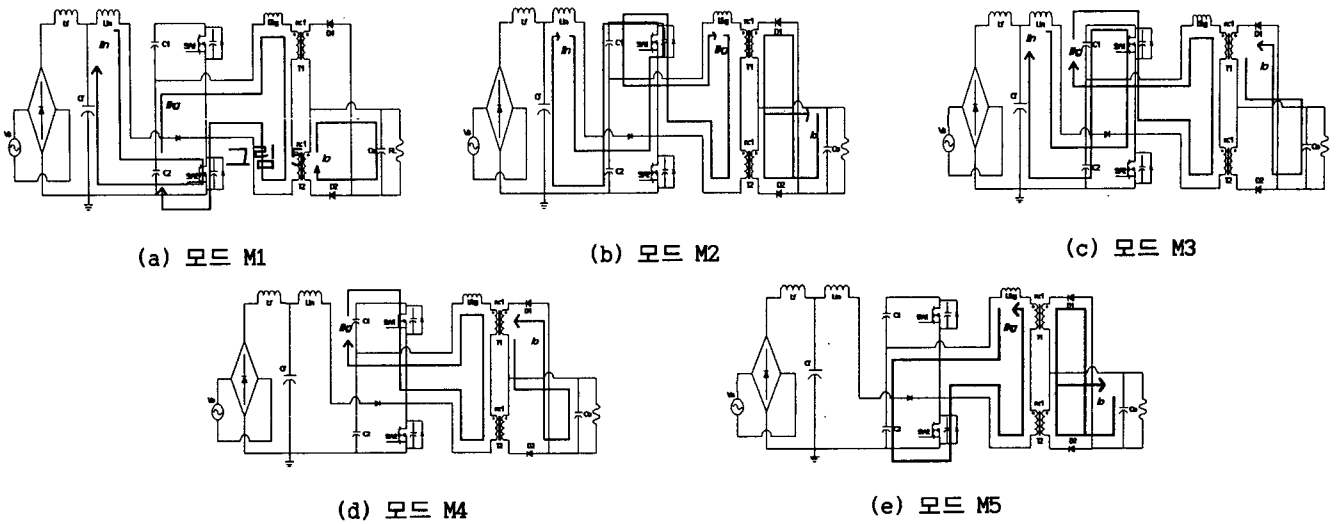


그림 3 각 모드별 주요 전류 경로도

있던 전류 I_{lkg} 는 계속 흘러야 하므로 SW_1 의 출력 커패시터 C_{SW1} 을 통해서 흐르게 되며 $-V_1/L_{lkg}$ 의 기울기를 가지며 감소한다. 또한 모드 M_1 에서의 입력 인덕터 전류 I_{in} 도 SW_1 의 출력 커패시터를 통해서 흐르게 되어 그림 2에서 보는 바와 같이 SW_1 의 전압 V_{SW1} 이 급격히 영 전압이 된다. 그런 후 전류 I_{lkg} 와 I_{in} 은 SW_1 의 역방향 내부 다이오드를 통해서 흐르게 된다. 위와 같이 SW_1 의 전압 V_{SW1} 이 영으로 떨어지고 난 뒤 SW_1 이 ON 되므로 ZVS가 이루어져 스위칭 손실을 줄일 수가 있다. 2차측에서는 다이오드 D_1 과 D_2 가 모두 ON되어서 출력 전류 I_o 를 프리휠링 하게 한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 2차측 전류 I_{ω} 가 계속 감소하여 영이 되면 모드 M_2 가 끝나게 된다.

③모드 M_3 : 모드 M_3 에서는 SW_1 이 ON이 되어 변압기 T_1 을 통해서 2차측으로 파워를 전달하게 된다. 이때 모드 M_1 에서 magnetic inductor에 저장되어 있던 에너지도 같이 2차측으로 전달되며 2차측에서는 다이오드 D_1 만 도통한다. 스위치 SW_1 에 흐르는 전류 I_{SW1} , 변압기 T_1 및 T_2 에 걸리는 점압 V_{pri-1} , V_{pri-2} 는 각각

$$I_{sw1} = -(I_{lkg} + I_{in}) \quad (6)$$

$$V_{pri-1} = -nV_o \quad (7)$$

$$V_{pri-2} = -(V_1 - V_{pri-1}) \quad (8)$$

와 같다.

따라서 변압기 T_2 의 자화 인덕터에는 에너지가 저장되며 이 에너지는 앞의 모드 M_1 단계에서 2차측으로 전달된다. 입력 인덕터의 전류 I_{in} 은 그림 1에서 임피던스 $|Zb|$ 가 $|Za|$ 보다 훨씬 크므로 거의 대부분 SW_1 의 역방향 내부 다이오드를 통해서 흐르며 따라서 출력 전압에 거의 영향을 주지 않는다.

④모드 M_3 는 입력 인덕터 전류 I_{in} 이 영이 되면 끝나게 된다.

④모드 M_4 : 모드 M_4 는 입력 인덕터 전류 I_{in} 이 영인 경우이며 나머지 동작은 모드 M_3 와 동일하다.

⑤모드 M_5 : SW_1 이 TURN OFF되는 순간 모드 M_5 가 시작되는데 이때 누설 인덕터의 전류 I_{lkg} 는 C_2 를 통해서 SW_2 의 출력 Capacitor C_{SW2} 로 흐르고 SW_2 의 드레인 소스간 전압 V_{SW2} 를 영으로 만들어 ZVS를 가능하게 한다. 이때 SW_1 이 ZVS될 때와는 달리 입력 인덕터 전류 I_{in} 이 없으므로 V_{SW2} 가 영으로 되는 시간은 V_{SW1} 이 영으로 되는 시간에 비해 길다. 이때 ZVS가 이뤄지기 위해서는 누설 인덕터에 저장된 에너지가 스위치의 출력 커패시터에 저장된 에너지보다 크게 누설 인덕터를 설계해야 한다. 2차측에서는 모드 M_2 에서와 같이 다이오드 D_1 과 D_2 모두 도통하게 된다.

3. 컴퓨터 모의 실험 및 실험 결과

위 회로에 대한 모의실험 결과를 제시 하고자 한다. 모의실험의 설계 사양은 다음과 같다.

- (a) rms 입력 전압 V_s : $110V_{rms}$
- (b) 출력 전압 : $18V_{DC}$
- (c) 출력 전력 : 60W
- (d) 스위칭 주파수 : 100kHz
- (e) SW_2 의 최대 Duty : 0.5

모의 실험 결과 파형으로부터 PFC와 ZVS 및 제안된 컨버터의 성능을 제시한다. 먼저 그림 4에서 입력 전압 V_s 와 입력 전류 I_s 가 고 역률을 보인다. 그림 5는 스위치 SW_1 의 V_{SW1} , I_{SW1} 및 SW_2 의 V_{SW2} , I_{SW2} 를 각각 보이며 여기서 각 스위치가 ZVS가됨을 알 수 있다. 그림 6은 입력 인덕터 전류(I_{in})와 누설 인덕터 전류(I_{lk}) 및 각 스위치의 전류(I_{SW1} , I_{SW2})를 보여주고 있는데 앞의 모드 설명에서와 같이 스위치 SW_1 이 ON된 구간에서는 $I_{SW1} = -(I_{in} + I_{lk})$ 임을 알 수 있고 SW_2 가 ON된 구간에서는 $I_{SW2} = (I_{in} + I_{lk})$ 임을 보여주고 있다. 그림 7은 출력 전압과 출력 전류의 파형을 각각 보여 주고 있다. 모의 실험에서 알 수 있듯이 제안된 컨버터가 ZVS 및 PFC에 있어서 우수한 성능을 보여줌을 알 수 있다.

위의 모의 실험과 동일한 사양으로 실험을 수행한 결과를 제시한다. 그림 8에서 입력 전류가 입력 전압과 거의 동상이며 작은 고조파 성분만을 포함하고 있으므로 고 역률을 보인다. 그림 9은 두 스위치가 각각 드레인-소스간의 전압이 영으로 된후 전류가 흐르므로 영전압 스위칭을 얻을 수 있다. 그림 10은 각 스위치의 드레인-소스간 전압과 누설 인덕터에 흐르는 전류를, 그림 11은 2차측의 각 다이오드의 전압 전류를 보여주며 그림 12는 출력 전압과 출력 전류를 보인다. 실험 결과에서 보듯이 제안 컨버터는 고역률과 출력 전압 조정 특성이 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 Half-bridge를 기반으로 한 포워드-플라이백 AC/DC 컨버터를 제시하였다. 이 컨버터에서 Boost 컨버터를 DCM으로 동작시킴으로서

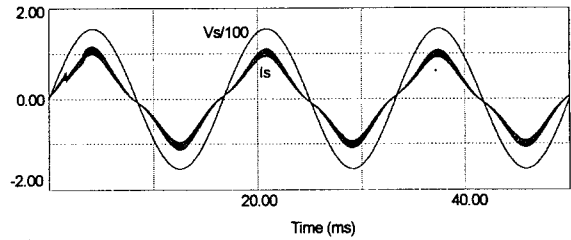


그림 4 라인전압(V_s) 및 라인전류(I_s)

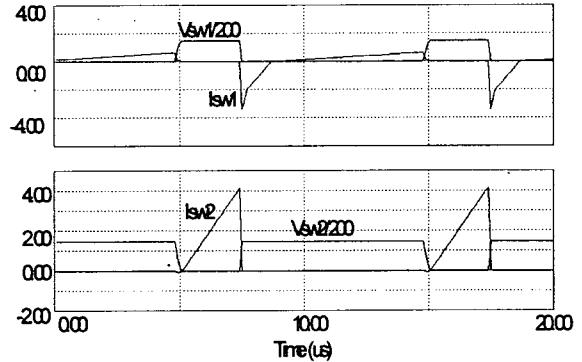


그림 5 스위치 전압 전류

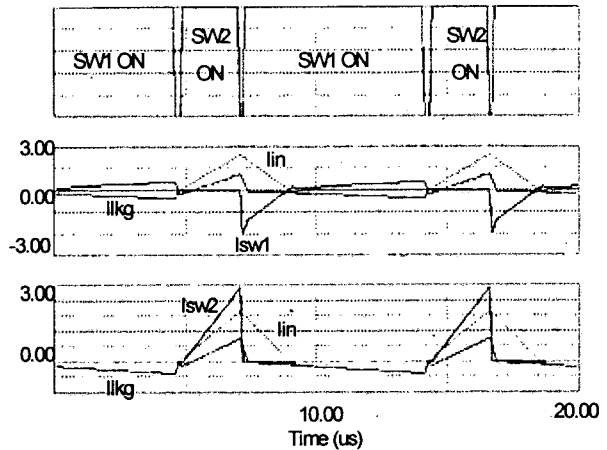


그림 6 입력 인덕터 전류 및 누설 인덕터 전류

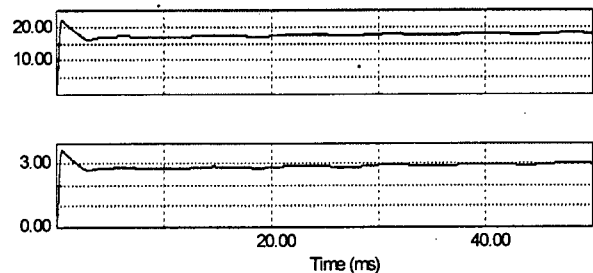


그림 7 출력전압(V_o) 및 출력전류(I_o)

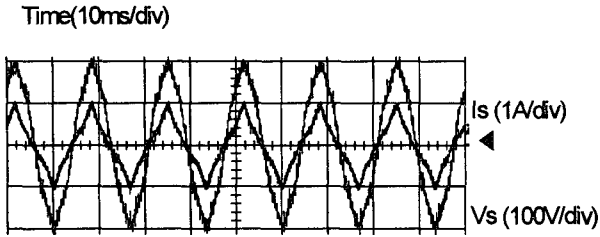


그림 8 라인전압(V_s) 및 라인전류(I_s)

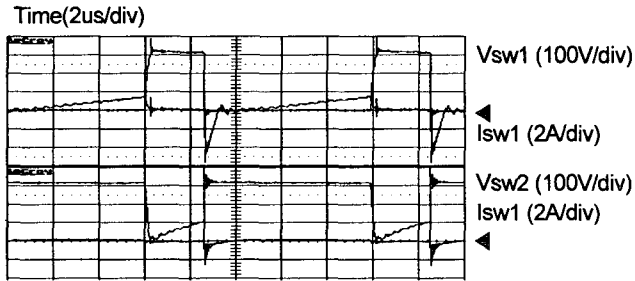


그림 9 스위치 SW1 및 SW2의 전압 전류

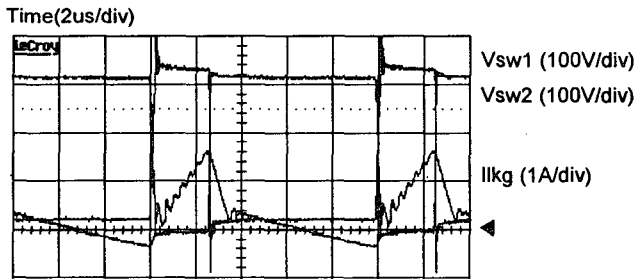


그림 10 리키지 인덕터 전류(I_{lg}) 및 스위치 전압

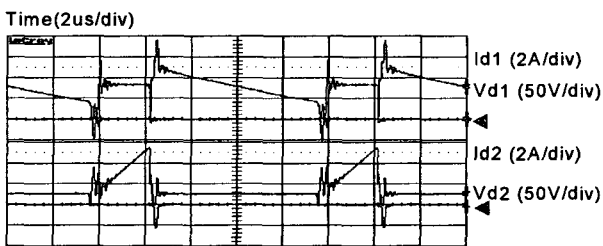


그림 11 2차측 다이오드 D1, D2의 전압, 전류

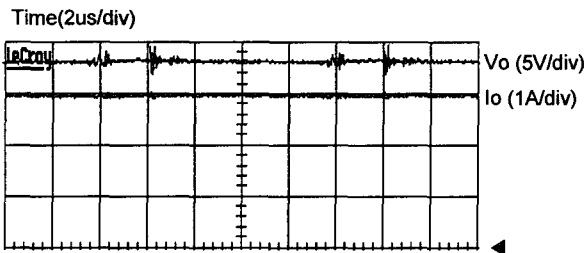


그림 12 출력전압(V_o) 및 출력전류(I_o)

IEC 1000-3-2 class D규정을 만족하도록 역률 개선을 하였으며 스위칭 손실을 줄이기 위해서 각 스위치에 영전압 기법을 사용하였다. 또한 Active clamp 방식의 문제점인 스위치 양단에 높은 전압 스트레스를 감소시킴으로서 낮은 도통저항을 가진 스위치를 사용할수있도록 하였으며 따라서 스위치의 도통 손실을 줄여 고 효율이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] P. Imbertson and N. Mohan, "Asymmetrical Duty Cycle Permits Zero Switching Loss in PWM Circuits with No Conduction Loss Penalty," IEEE Trans. on industrial. Applications, vol 29, 1993, pp. 121~125
- [2] M. H. Kheruluwala, R. L. Steingerwald, and R. Gurumoorthy, "Fast Response High Power Factor Converter with A Single Power Stage," IEEE-PESC, 1991, pp. 769~779.
- [3] J. Y. Lee, G. W. Moon, Y. S. Jung, and M. J. Youn, "A New Single-stage AC/CD Converter with High Efficiency and high Power Factor", IEEE-INTELEC, 1996, pp. 261~270