

고효율 소프트 스위칭 부스트 컨버터

정두용*, 김재형*, 정용채**, 원충연*
*성균관대학교, **남서울대학교

A High Efficiency Soft Switching Boost Converter

Dooyong Jung*·Jaehyeng Kim*·Yongchae Jung**·Chungyuen Won*

*Sungkyunkwan University, **Namseoul University

ABSTRACT

This paper proposes soft switching boost converter operating in zero current switching(ZCS) mode for photovoltaic and fuel cell power generation. The proposed topology is capable of reducing the size, and capability of passive element by using soft switching, and it allows for reduction of IGBT switching losses, for the increased of switching frequency. A detail mode analysis of operating in presented. We present the converter topology, principle of operation and simulation results obtained from the PSIM simulator. The performance of the proposed technique in evaluation on 1kW(380V,2.6A) experimental prototype circuit operating at 30kHz.

1. 서론

전력 변환기의 소형화, 경량화의 요구에 따라 높은 주파수의 스위칭 소자 동작이 요구되고 있다. 그러나 높은 스위칭 주파수에 의해 스위칭 손실이 크고, 많은 스위치 스트레스는 변환기의 효율을 현저히 감소시킨다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 스위치의 턴-온과 턴-오프 동작을 소프트 스위칭 즉, 영전압 스위칭(ZVS) 또는 영전류 스위칭(ZCS)으로 만들어 수동소자의 크기와 용량을 줄이고 스위칭 손실을 감소시키는 토폴로지들이 많이 연구되고 있다.^[1~4]

본 논문에서는 단일 스위치를 사용한 고효율 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 제안하였다.^[5] 제안하는 토폴로지는 공진을 이용한 소프트 스위칭을 통하여 스위치 턴 온 시 ZCS 동작을 하며, 7개의 동작모드로 구분 할 수 있다. 앞으로 태양광발전과 연료전지발전의 계통연계형 인버터의 활용을 위하여 출력 전압 380[V]에서의 동작 특성을 구현하였다.

2. 회로 설명 및 동작모드 해석

2.1 동작모드 해석

그림1은 제안된 고효율 소프트 스위칭 부스트 컨버터 회로도이다. 기존의 부스트 컨버터 회로에 하나의 인덕터, 두 개의 커패시터 그리고 두 개의 다이오드를 더 사용하였다. 스위치 하나로 on/off 제어를 하고 L_2 와 C_{r2} 의 공진에 의해 ZCS 동작 함으로써 스위칭 손실을 줄일 수 있다.

전류 경로에 7개의 동작모드로 나누어 설명한다.

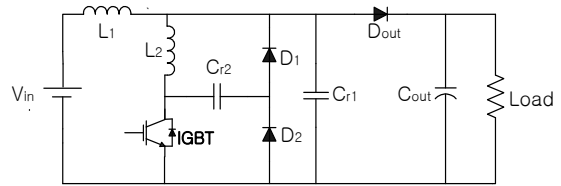


그림 1 제안된 소프트 스위칭 부스트 컨버터 회로
fig. 1 Proposed soft switching boost converter

MODE 1 [$T_0 \leq t < T_1$]

스위치는 Off 상태이고 태양전지 어레이 직류출력이 D_{out} 을 통해 부하에 직접 전달된다. 이때 C_{out} 과 C_{r1} 에는 출력전압과 같은 크기의 전압이 충전된다.

$$i_{L1}(t) = i_{L1}(t_7) - \frac{V_o - V_{in}}{L} t$$

$$i_{L2}(t) = 0$$

$$v_{cr1}(t) = V_o$$

$$v_{cr2}(t) = 0$$

MODE 2 ($T_1 \leq t < T_2$)

스위치가 ZCS 조건으로 On되면 Mode 2가 시작된다. 이 경우 보조 공진 인덕터 L_2 에는 출력전압이 걸리므로 전류가 선형적으로 상승한다. 이 전류가 주 인덕터 L_1 의 전류와 같아지면 출력측 다이오드 D_{out} 의 전류는 영이 된다.

$$i_{L1}(t) \approx I_{min}$$

$$i_{L2}(t) = \frac{V_o}{L_r} t$$

$$v_{cr1}(t) = V_o$$

$$v_{cr2}(t) = 0$$

MODE 3 [$T_2 \leq t < T_3$]

출력측 다이오드 D_{out} 의 전류가 영이 되어 Off되면 공진모드인 구간이 시작된다. 이 구간동안 보조 공진 인덕터 L_2 와 보조 공진커패시터 C_{r1} 이 공진을 하여 C_{r1} 의 전압이 출력전압에서 영으로 떨어진다. 이 경우 주 인덕터 L_1 의 전류는 L_2 와 스위치를 통해서 흐른다.

이 때 부하는 C_{out} 에 충전되어 있던 전압이 방전되면서 지속적으로 전력공급을 받는다.

$$\begin{aligned}
i_{L1}(t) &\approx I_{\min} \\
i_{L2}(t) &= I_{\min} + \frac{V_o}{Z_{r1}} \sin \omega_{r1} t, \quad i_{L2}(t) = i_{L2}(t_3) \\
v_{cr1}(t) &= V_o \cos \omega_{r1} t \\
v_{cr2}(t) &= 0 \\
\omega_{r1} &= \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{r1}}} \\
Z_{r1} &= \sqrt{\frac{L_2}{C_{r1}}}
\end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
i_{L1}(t) &\approx i_{L1}(t_4) \\
i_{L2}(t) &= i_{L2}(t_3) \cos \omega_{r2} t \\
v_{cr2}(t) &= Z_{r2} i_{L2}(t_3) \sin \omega_{r2} t \\
\omega_{r2} &= \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{r2}}}, \quad Z_{r2} = \sqrt{\frac{L_2}{C_{r2}}}
\end{aligned} \quad (5)$$

MODE 6 [$T_5 \leq T < T_6$]

MODE 6에서는 C_{r2} 의 전압은 감소하며, D_2 - C_{r2} - L_2 - D_{out} - C_{out} 의 경로로 계속 공진을 하여 C_{r2} 의 에너지를 L_2 로 이동시킨다. C_{r2} 의 전압이 영이 되면 L_2 의 전류는 Mode 5에서의 전류방향과 반대로 흐른다. C_{r2} 의 전압이 영이 되면 스위치의 역병렬 다이오드가 도통되면서 다음 모드로 넘어간다.

$$\begin{aligned}
i_{L1}(t) &= i_{L1}(t_5) - \frac{V_o - V_{in}}{L} t, \quad i_{L1}(t) = i_{L1}(t_6) \\
i_{L2}(t) &= \left(\frac{V_o}{Z_{r2}} i_{L2}(t_3) \right) \sin \omega_{r2} t, \quad i_{L2}(t) = i_{L2}(t_6) \\
v_{cr1}(t) &= V_o \\
v_{cr2}(t) &= V_o - (V_o - Z_{r2} I_3) \cos \omega_{r2} t
\end{aligned} \quad (6)$$

MODE 7 ($T_7 \leq T < T_8$)

Mode 7에서도 두 개의 전류경로가 있다. 주 인덕터 L_1 의 전류는 D_{out} 를 통해서 출력으로 에너지를 전달하며, 선형적으로 감소한다. 보조 공진인덕터 L_2 의 전류도 D_{out} 을 통해서 부하로 에너지를 전달하는데 스위치의 역 병렬 다이오드를 통해 흐른다. 보조공진 인덕터 L_2 의 전류가 영이 되면 Mode 7은 종료된다.

그림 3은 본 논문에서 제안된 소프트 스위칭 부스트 컨버터의 정상 상태의 각 부 파형을 나타내며 모든 소자는 이상적인 것으로 가정 한다.

$$\begin{aligned}
i_{L1}(t) &= i_{L1}(t_6) - \frac{V_o - V_{in}}{L} t, \quad i_{L1}(t) = i_{L1}(t_7) \\
i_{L2}(t) &= i_{L2}(t_6) \frac{V_o}{L_2} t, \quad i_{L2}(t) = i_{L2}(t_7) = 0 \\
v_{cr1}(t) &= V_o \\
v_{cr2}(t) &= 0
\end{aligned} \quad (7)$$

MODE 4 [$T_3 \leq T < T_4$]

보조 공진커패시터 C_{r1} 의 전압이 영이 되면 두 보조 다이오드 D_1 과 D_2 가 ON되면서 모드가 시작된다. 이 구간동안 보조 공진인덕터 L_2 의 전류는 둘로 나뉘는데 하나는 주 인덕터 L_1 의 전류이고 다른 하나는 두 보조다이오드를 통해서 환류하는 전류이다. 이 구간이 부스트 컨버터의 온 구간으로 주 인덕터의 전류는 선형적으로 상승한다.

$$\begin{aligned}
i_{L1}(t) &= I_{\min} + \frac{V_{in}}{L_1} t, \quad i_{L1}(t) = i_{L1}(t_4) \\
i_{L2}(t) &= i_{L2}(t_3) \\
v_{cr1}(t) &= 0 \\
v_{cr2}(t) &= 0
\end{aligned} \quad (4)$$

MODE 5 [$T_4 \leq T < T_5$]

스위치는 영전압 조건에서 Off된다. 이때 두 개의 전류경로가 생긴다. 하나는 L_1 - C_{r1} - V_{in} 의 경로로 보조 공진커패시터 C_{r1} 의 전압이 영에서 출력전압 V_{out} 까지 선형적으로 상승한다. 두 번째는 L_2 - C_{r2} - D_1 의 경로로 두 번째 공진이 발생한다. L_2 에 저장된 에너지가 C_{r2} 로 이동한다. 이 에너지 이동이 모두 끝나면 L_2 의 전류는 영이 되고 C_{r2} 의 전압은 최대값이 된다.

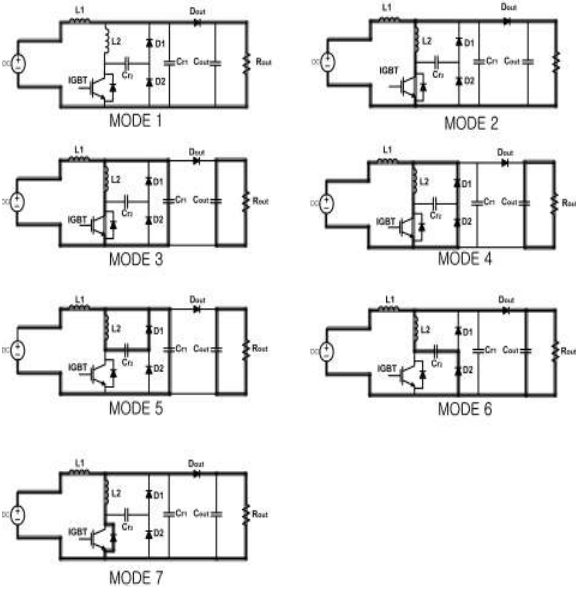


그림 2. 제안된 회로의 동작 모드
Fig. 2 Operation mode of proposed converter

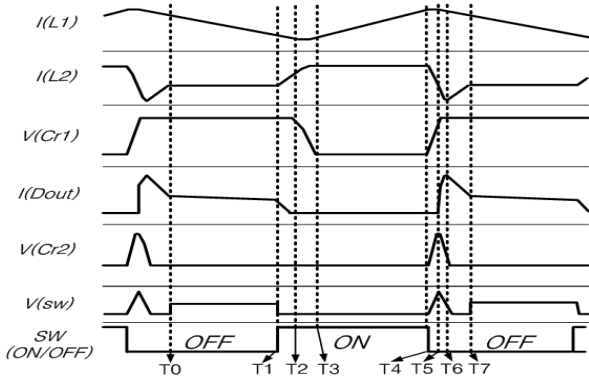


그림 3. 제안된 컨버터 각 부 파형
Fig. 3 An each waveforms of proposed circuit

3 실험 결과

제안된 토폴로지의 타당성을 확인하기 위해 1[kW]급 시제품을 제작 실험하였다. 그림 4는 전 부하에서 주 인덕터와 공진 인덕터의 전류를 나타낸다. 그림 5는 전 부하에서 동작파형이며, (1)은 부스트 인덕터의 전류 파형, (2)는 스위치 양단의 전압, (3)은 하단에 게이트드라이브 PWM 신호를 나타낸다.

그림 6은 100% 부하에서 ZCS동작을 나타내는 스위치 전압, 전류이다. 실험 결과 10% ~ 100% 부하의 전 구간에서 ZCS되는 것을 확인하였다. 그림 7은 부하변동에 따른 효율을 나타낸다. 실험에서 최대 효율 96%, 40% 부하 이상에서는 92% 이상의 효율을 확인 하였다.

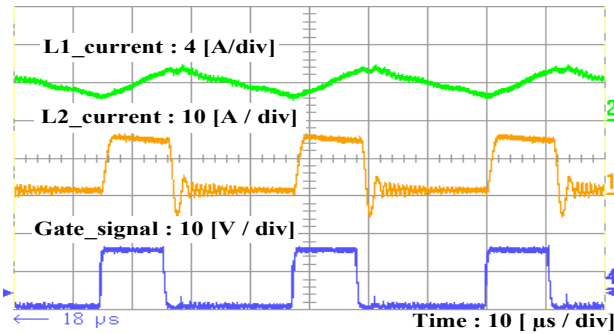


그림 4 주 인덕터 L₁, 공진 인덕터 L₂ 전류 파형
Fig. 4 Current waveforms of inductor L₁ and inductor L₂

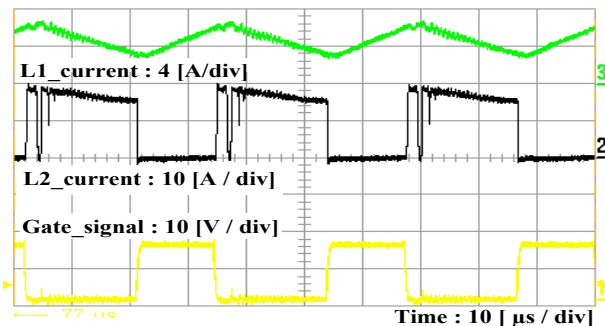


그림 5 100% 부하에서 동작파형
Fig. 5 Experimental results of operation waveforms at 100% load

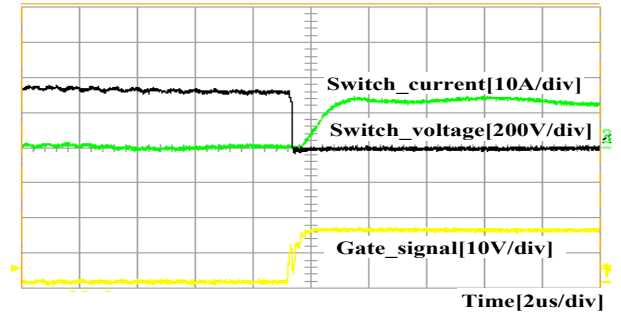


그림 6 100% 부하시 영전류 동작파형
Fig. 6 Zero current switching operation waveforms at full load

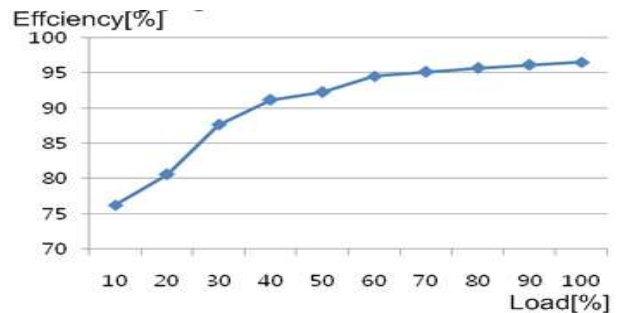


그림 7 부하변동에 따른 효율 특성
Fig. 7 Efficiency characteristics by according to the load

4 결론

본 논문에서는 공진형 부스트 컨버터를 제안하였다. 단일 스위치 사용으로 소프트 스위칭을 동작을 하므로 기존 하드 스위칭 토폴로지에 비하여 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 제안된 회로의 실험을 위해 30kHz로 동작하는 1kW 시제품을 제작하였고, 동작특성 및 효율을 측정하여 최대효율 96%를 얻었다.

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한
에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] C.A Canesin, C.M.C. Duarte, and I. Barbi, " A new family of pulse-width-modulated zero-current-switching ac/dc converter", in IEEJ IPEC Rec., pp.1379-1384, 1995.
- [2] C.A Canesin and I. Barbi, "Novel Zero-Current-switching PWM converter", IEEE transaction on Industrial Electronics, vol. 44, pp.372-381, June, 1997.
- [3] K.Wang, G. Hua, and F.C. Lee, "Analysis, design and ZCS-PWM Boost converters", IEEJ International Power Electronics Conference, pp.1202-1207, 1995.
- [4] M. Schenck, K. Stanton, and J.S Lai, "Fuel Cell and Power Conditioning System Interactions", Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference, Austin, TX, pp.114-120, March, 2005.
- [5] 정두용, 김재형, 정용채, 원충연 "태양광 발전용 소프트 스위칭 부스트 컨버터", 추계 전력전자 학술대회 논문집, 2007.