

높은 승압비를 가진 공진형 소프트 스위칭 부스트 컨버터

박건욱*, 정두용*, 이수원*, 정용채**, 원충연*, 서광덕***
 성균관대학교*, 남서울대학교**, 이엔테크놀로지***

A Soft Switching Boost Converter with High Voltage Gain Using a Single Switch

Kun-wook Park, Doo-yong Jung, Su-won Lee Yong-chae Jung, Chung-yuen Won, Kwang-duck Seo

Sungkyunkwan University, Namseoul university, EN technology

ABSTRACT

A dc/dc converter for low voltage of battery application and fuel cell system is required to step up and regulate the low and widely variable voltage. In this paper, we have proposed a soft switching boost converter with high voltage gain using a single switch. Through the theoretical analysis and experimental result, operation modes and characteristics of the proposed topology is verified.

1. 서론

신재생 에너지의 다양한 활용에 따라 태양전지나 연료전지의 소용량, 저전압 조건에서의 계통연계 운전이 요구되고 있다. 이러한 경우 50~100[V]의 저전압 입력 조건에서 계통 연계 운전을 위해서는 4~8배의 승압비가 요구된다. 그러나 일반적인 부스트 컨버터는 0.7이상의 시비율로 동작시키기 어렵다. 따라서 작은 시비율로 높은 승압비가 요구되는 경우에는 변압기를 사용하여 승압을 실현하는 경우가 많은데 변압기의 부피 및 무게 때문에 시스템의 크기가 커지고 무거워진다^[1].

본 논문에서는 높은 승압비를 가진 공진형 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 제안하였다. 제안된 토폴로지는 변압기를 사용하지 않고 높은 승압비를 구현할 수 있으며, 기존의 컨버터에 비해 스위칭 소자의 전류 스트레스와 도통손실을 줄일 수 있다. 또한 스너버 커패시터를 추가하여 ZVS조건에서 스위치를 턴-온, 턴-오프 함으로써 스위칭 손실도 절감할 수 있다. 제안된 컨버터의 이론적 분석과 실험을 통해 토폴로지의 타당성을 검증하였다.

2. 제안된 소프트 스위칭 부스트 컨버터

2.1 회로 구성

그림 1은 본 논문에서 제안한 높은 승압비를 가진 공진형 소프트 스위칭 부스트 컨버터의 회로이다. 기존의 부스트 컨버터는 주 인덕터 L , 스위치 S , 출력단 다이오드 D_{out} , 출력단 커패시터 C_{out} 으로 구성된다. 여기에 전력 전달 및 소프트 스위칭을 수행하는 공진 인덕터 L_r , 공진 커패시터 C_r , 스너버 커패시터 C_s 를 추가하여 제안한 토폴로지를 구성하였다.

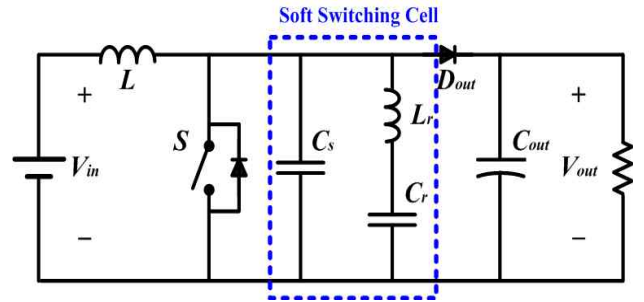


그림 1 제안된 컨버터의 회로도
 Fig. 1 Schematic of the proposed converter

2.2 모드 분석

본 논문에서는 제안한 토폴로지를 주 인덕터와 공진 인덕터, 스너버 커패시터의 전류와 스위치의 전압, 전류 파형을 기준으로 7개의 모드로 구분하였다^[3].

그림 2는 각 파형에 따른 모드 구분을 나타낸다.

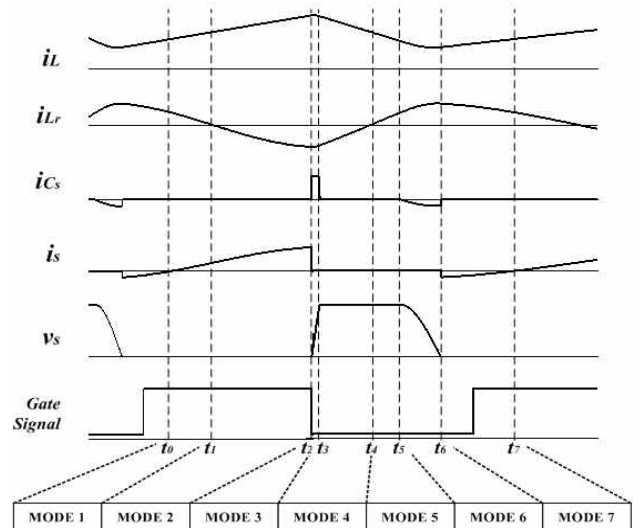


그림 2 제안된 컨버터의 각부 파형
 Fig. 2 Waveforms of the proposed converter

그림 3은 각 동작 모드에 따른 전류 경로를 나타 낸 것이다.

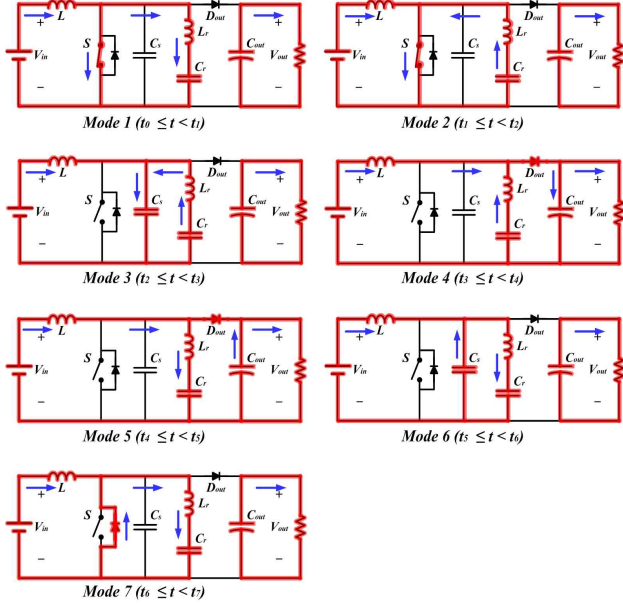


그림 3 동작 모드에 따른 전류 경로
Fig. 3 Operation modes of proposed converter

MODE 1 ($t_0 \leq t < t_1$)

스위치가 턴-온 되면 MODE 1이 시작되며 주 인덕터 전류가 스위치와 공진회로를 통해 흐른다. 공진커패시터 C_r 이 완전 충전되면 MODE 1이 끝난다.

공진회로 전류와 공진커패시터 전압은 각각 다음과 같다.

$$i_{L_r}(t) = i_L(t_0) \cos \omega_r t - \frac{v_{C_r}(t_0)}{Z_r} \sin \omega_r t \quad (1)$$

$$v_{C_r}(t) = v_{C_r}(t_0) \cdot \cos \omega_r t + i_L(t_0) \cdot Z_r \sin \omega_r t \quad (2)$$

위 식에서 $\omega_r = \frac{1}{Z_r}$, $Z_r = \sqrt{L_r \cdot C_r}$ 이다.

MODE 2 ($t_1 \leq t < t_2$)

공진 커패시터 C_r 이 완전 충전되어 공진회로 전류의 방향이 바뀌면 MODE 2가 시작된다. 주 인덕터 전류와 공진회로 전류가 모두 스위치를 통해 흐른다.

$$i_{L_r}(t) = -\frac{v_{C_r}(t_1)}{Z_r} \sin \omega_r t \quad (3)$$

$$v_{C_r}(t) = v_{C_r}(t_1) \cdot \cos \omega_r t \quad (4)$$

MODE 3 ($t_2 \leq t < t_3$)

스위치가 턴-오프 되어 스너버 커패시터로 전류가 흐르면 MODE 3가 시작된다. 스위치는 영 전위 상태가 되고 ZVS 조건에서 턴-오프가 수행된다. 스너버 커패시터 C_s 가 완전 충전 되면 MODE 3이 끝난다.

공진회로 전류와 공진 커패시터, 스너버 커패시터 전압은 다음과 같다.

$$i_{L_r}(t) = \frac{C}{C_s} i_L(t_2) + \left(i_{L_r}(t_2) - \frac{C}{C_s} i_L(t_2) \right) \cos \omega_a t - \frac{v_{C_r}(t_2)}{Z_a} \sin \omega_a t \quad (5)$$

$$v_{C_r}(t) = \frac{i_L(t_2)}{C_r + C_s} t + \frac{C}{C_s} \cdot v_{C_r}(t_2) \cdot \left(1 + \frac{C_s}{C_r} \cos \omega_a t \right) + \frac{C}{C_r} Z_a \left(i_{L_r}(t_2) - \frac{C}{C_s} i_L(t_2) \right) \sin \omega_a t \quad (6)$$

$$v_{C_s}(t) = \frac{i_L(t_2)}{C_r + C_s} t + \frac{C}{C_s} \cdot v_{C_r}(t_2) \cdot (1 - \cos \omega_a t) + \frac{C}{C_s} Z_a \left(\frac{C}{C_s} i_L(t_2) - i_{L_r}(t_2) \right) \sin \omega_a t \quad (7)$$

위 식에서 $\omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_r C}}$, $Z_a = \sqrt{\frac{L_r}{C}}$, $C = \frac{C_r C_s}{C_r + C_s}$ 이다.

MODE 4 ($t_3 \leq t < t_4$)

스너버 커패시터의 전압이 출력 전압과 같아져서 출력 다이오드가 도통되면 MODE 4가 시작된다. 주 인덕터와 공진회로에 축적된 에너지가 모두 출력단 다이오드를 통해 부하로 전달된다. 공진 커패시터 C_r 이 완전 방전 되어 공진회로에 흐르는 전류의 방향이 바뀌면 MODE 4가 끝난다.

$$i_{L_r}(t) = i_{L_r}(t_3) \cdot \cos \omega_r t + \frac{V_o - v_{C_r}(t_3)}{Z_r} \sin \omega_r t \quad (8)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o - (V_o - v_{C_r}(t_3)) \cos \omega_r t + i_{L_r}(t_3) \cdot Z_r \sin \omega_r t \quad (9)$$

MODE 5 ($t_4 \leq t < t_5$)

주 인덕터 전류가 공진회로와 부하측으로 흐른다. 주 인덕터 전류가 감소하여 공진회로의 전류와 같아지면 MODE 5가 끝난다.

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o - v_{C_r}(t_4)}{Z_r} \sin \omega_r t \quad (10)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o - (V_o - v_{C_r}(t_4)) \cdot \cos \omega_r t \quad (11)$$

MODE 6 ($t_5 \leq t < t_6$)

스너버 커패시터 C_s 가 방전하면서 MODE 6이 시작된다. 스너버 커패시터의 전압이 출력 커패시터의 전압보다 낮아지면 출력 다이오드가 개방되면서 MODE 6이 끝난다.

$$i_{L_r}(t) = \frac{C}{C_s} i_L(t_5) \left(1 + \frac{C_s}{C_r} \cos \omega_a t \right) + \frac{V_o - v_{C_r}(t_5)}{Z_a} \sin \omega_a t \quad (12)$$

$$v_{C_r}(t) = \frac{i_L(t_5)}{C_r + C_s} t + v_{C_r}(t_5) + \frac{C}{C_r} (V_o - v_{C_r}(t_5)) (1 - \cos \omega_a t) + \left(\frac{C}{C_r} \right)^2 i_L(t_5) Z_a \sin \omega_a t \quad (13)$$

$$v_{C_s}(t) = \frac{i_L(t_5)}{C_r + C_s} t + \frac{C}{C_r} V_o \left(1 + \frac{C_r}{C_s} \cos \omega_a t \right) + \frac{C}{C_s} \cdot v_{C_r}(t_5) \cdot (1 - \cos \omega_a t) - \frac{C}{C_r + C_s} i_L(t_5) Z_a \sin \omega_a t \quad (14)$$

위 식에서 $C = \frac{C_r C_s}{C_r + C_s}$, $Z_a = \sqrt{\frac{L_r}{C}}$, $\omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_r C}}$ 이다.

MODE 7 ($t_6 \leq t < t_7$)

스너버 커패시터 C_s 가 완전 충전되어 공진회로의 에너지가 스위치의 역병렬 다이오드를 통해 흐르면서 MODE 7이 시작된다. 스위치는 영전위 상태이므로 이 구간에서 스위치를 턴-온 함으로써 ZVS 스위칭한다. 역병렬 다이오드가 개방되고 스위치로 전류가 흐르면서 MODE 7이 끝난다.

$$i_{L_r}(t) = i_{L_r}(t_6) \cos \omega_r t - \frac{v_{C_r}(t_6)}{Z_r} \sin \omega_r t \quad (15)$$

$$v_{C_r}(t) = v_{C_r}(t_6) \cdot \cos \omega_r t + i_{L_r}(t_6) \cdot Z_r \sin \omega_r t \quad (16)$$

3. 실험

제한한 토폴로지의 동작을 확인하기 위해 그림 4와 같이 실험 세트를 제작하였다. 표 1은 실험세트를 제작할 때 사용된 소자들의 값을 나타내었다.

그림5는 공진 인덕터 전류, 스위치 전압, 공진 커패시터 전압 파형이다. 스위치 전압이 게이트 온, 오프 신호시에 영전압이므로 ZVS 스위칭 조건을 만족한다.

그림 6은 공진 인덕터 전류, 출력전압, 입력전압 파형이다. 제한한 토폴로지는 80[V]입력과 0.5의 듀티에서 400[V]의 출력을 나타냄을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 작은 시비율로 높은 승압비를 갖는 공진형 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터의 이론적 분석과 실험을 통해 토폴로지의 타당성을 검증하였다. 실험 결과 제안한 토폴로지는 0.5 시비율에서 5배의 승압비로 동작하며 스위치 턴-온 턴-오프 시 ZVS 동작이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

이러한 토폴로지는 저전압 출력특성을 갖는 배터리나 연료 전지 혹은 저용량 태양광 발전 시스템에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 출연금으로 수행한 특성화 대학원 사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] 양진영 외, "연료전지 응용을 위한 높은 승압비와 낮은 전류리플을 갖는 무변압기형 부스트 컨버터", 전력전자학회 논문지 제13권, 제2호, 2008. 4.
- [2] 박성식 외, "고승압비를 갖는 비절연 ZVZCS CCM 부스트 컨버터", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, 2008. 10.
- [3] 박건욱 외, "높은 승압비를 가진 단일 스위칭형 소프트 스위칭 부스트 컨버터", 전력전자학회 하계학술대회 논문집, 2009. 7.

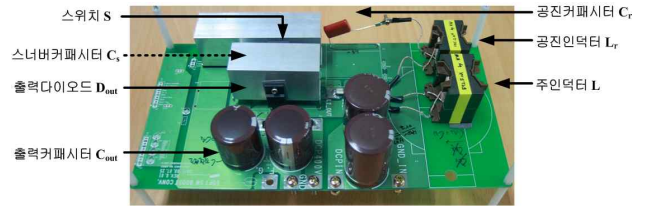


그림 4. 제안된 토폴로지의 실험 세트
Fig. 4 The hardware of proposed converter

표 1 실험세트에 사용된 소자값
Table 1 Parameters of each elements

항 목	사 양
주 인덕터 L	504.2 [μ H]
공진 인덕터 L_r	101.2 [μ H]
스위치 S	IXSX40N60BD1
출력 다이오드 D_{out}	F40U60DN
스너버 커패시터 C_s	66 [nF]
공진 커패시터 C_r	2660 [nF]
출력 커패시터 C_{out}	250V 1000 μ F 2개 직렬

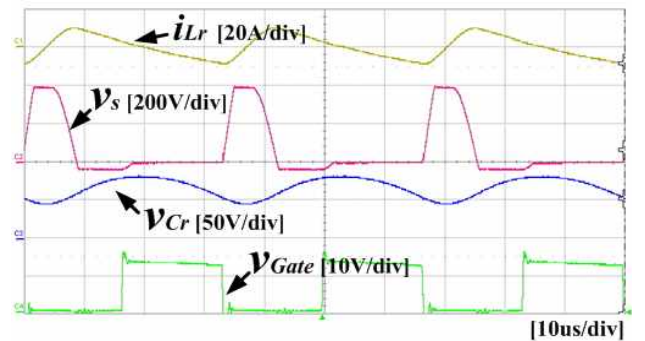


그림 5. 공진인덕터 전류, 스위치 전압, 공진 커패시터 전압 파형
Fig. 5 Resonant Inductor current, switch and resonant capacitor voltage Waveforms

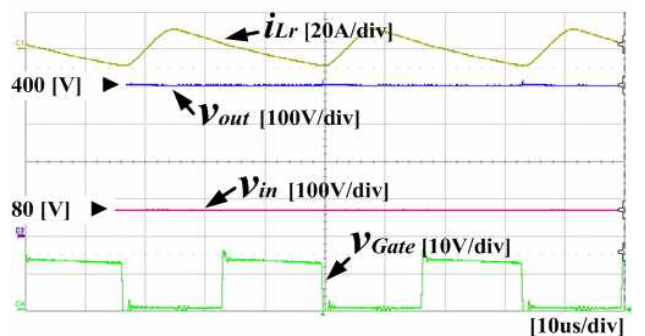


그림 6. 공진 인덕터 전류, 출력전압, 입력전압 파형
Fig. 6 Resonant Inductor current, output and input voltage Waveforms