

고승압비를 갖는 LC 공진 탱크 결합형 부스트 컨버터

좌승우, 김준호, 문건우
한국과학기술원

High Step-up Boost Converter with LC Resonant Tank

Seung-Woo Jwa, Jun-ho Kim and Gun-Woo Moon
KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

본 논문에서는 태양전지, 연료전지 등 저전압 에너지원 응용에 적합한 고승압 컨버터를 제안한다. 제안하는 토폴로지는 부스트 컨버터를 기반으로 LC 병렬 공진 탱크를 이용함으로써 높은 승압비를 얻을 수 있다. 추가된 스위치와 다이오드는 각각 영전압 스위칭 턴 온과 영전류 스위칭 턴 오프의 특성을 갖는다. 250W (380V, 0.658A)의 시작품을 제작하여 제안하는 회로의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

친환경적이고 지속 가능한 에너지원의 수요가 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 대표적인 친환경 에너지원인 태양광 발전 (Photovoltaic, PV)이나 연료 전지는 낮은 전압 특성 (25–45V)을 가지고 있다. 따라서 이들 에너지원의 사용을 위해서는 승압이 요구된다. 이는 그리드를 통해 실제 사용처로 전력전송이 이루어져야 하기 때문이다. 가장 많이 사용되는 220V 단상 그리드와의 연결을 위해서는 인버터의 DC 버스 전압이 380V의 높은 전압을 만족해야 한다.^[1] 그러므로 이러한 시스템에 적합한 고승압비의 컨버터가 요구된다. 기존의 부스트 컨버터는 요구되는 승압비를 만족시키지 못한다.^[2] 따라서 본 논문에서는 높은 전압 이득을 위한 부스트 컨버터 기반의 LC 병렬 공진 탱크 결합형 토폴로지를 제안하고, 실험을 통해 타당성을 검증한다.

2. 본론

2.1 구조 및 동작 원리

제안된 컨버터는 그림 1과 같이 부스트 컨버터에 공진 인덕터 L_r , 공진 캐패시터 C_r 로 구성된 병렬 공진 탱크를 결합한 형태를 가진다. 부스트 컨버터에 의해 입력 전압이 승압되어 출력 캐패시터 C_{O1} 에 충전되고, 이 전압이 LC 병렬 공진기에 의해 승압되어 출력 캐패시터 C_{O2} 에 전달 된다. 그러므로 최종 출력 전압은 출력 캐패시터의 전압 V_{CO1} 과 V_{CO2} 의 합으로 결정된다.

제안하는 컨버터의 주요 파형은 그림 2와 같이 나타난다. 출력 전압은 스위치 S_1 의 시비율 D_1 을 조정하여 제어되며, 스위칭 주파수 f_s 와 스위치 S_2 의 시비율 D_2 는 일정한 값으로 유지된다. 또한 S_1 과 S_2 는 동시에 턴 오프 한다.

제안하는 컨버터의 동작은 인가된 스위칭 신호에 따라 그림 3과 같이 총 6개의 모드로 나눌 수 있다.

$M_1 [t_0-t_1]$: S_1 과 S_2 가 켜지고 부스트 인덕터 L_{in} 에 흐르는 전류 I_{in} 과 L_r 에 흐르는 전류 I_{Lr} 이 각각 입력 전압 V_{in} 과 V_{CO1} 에 의해 증가한다.

$M_2, M_3 [t_1-t_3]$: S_1 과 S_2 가 동시에 꺼지고 V_{DS1} 과 V_{DS2} 의 전압이 각각 V_{CO1} 과 V_{CO2} 로 제한된다. M_2 와 M_3 는 V_{Cr} 전압이 0V에 도달하는 기점으로 나뉜다.

$M_4 [t_3-t_4]$: L_{in} 과 L_r 에 저장된 에너지가 각각 다이오드 D_{O1} 과 D_{O2} 를 통해 C_{O1} 과 C_{O2} 로 전달된다.

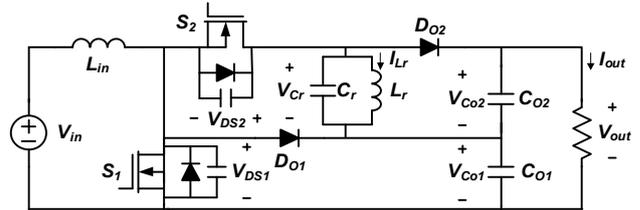


그림. 1 제안하는 LC 공진기 결합형 부스트 컨버터

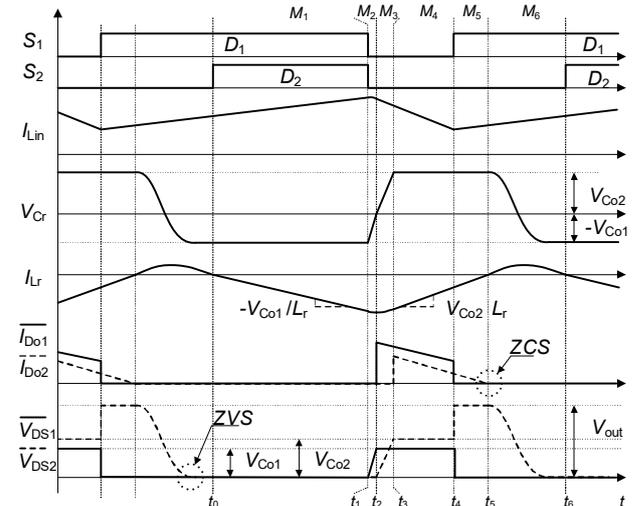


그림. 2 제안하는 컨버터의 주요 파형

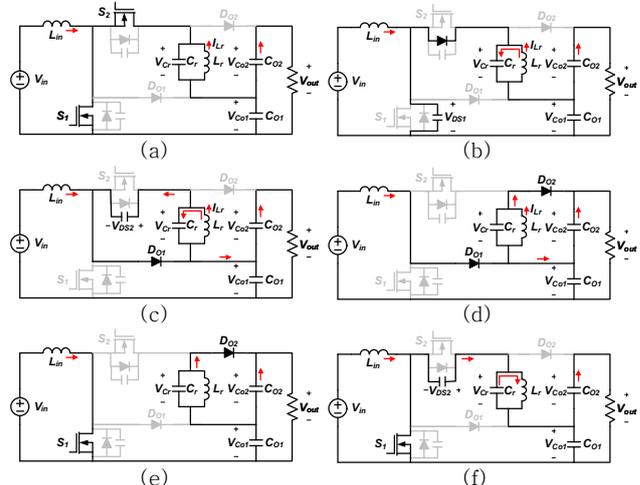


그림. 3 제안하는 컨버터의 동작 모드

- (a) $M_1 [t_0-t_1]$, (b) $M_2 [t_1-t_2]$, (c) $M_3 [t_2-t_3]$
(d) $M_4 [t_3-t_4]$, (e) $M_5 [t_4-t_5]$, 그리고 (f) $M_6 [t_5-t_6]$

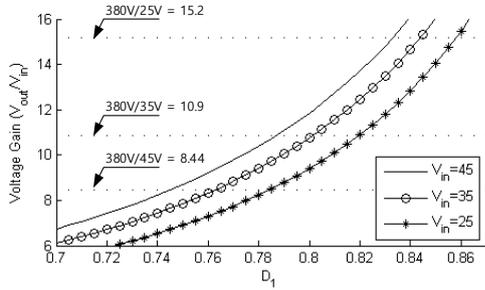


그림. 4 제안하는 컨버터의 전압 이득 곡선 ($D_2 = 0.3$)

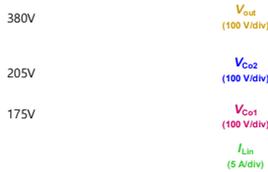
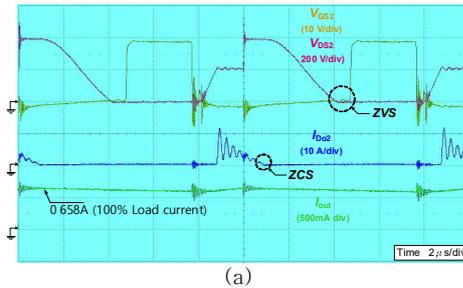
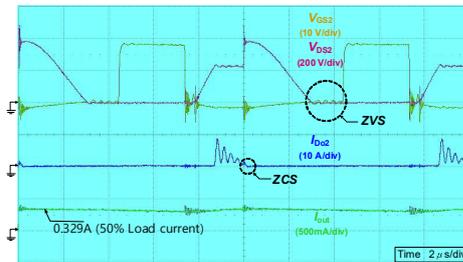


그림. 5 출력 전압 및 입력 전류 (100% 부하 조건)



(a)



(b)

그림. 6 ZVS 특성 및 ZCS 특성 (a) 100% 부하 (b) 50% 부하

$M_5 [t_4 - t_5]$: S_1 이 커지고 I_{lin} 이 V_{in} 에 의해 증가한다. 한편, L_r 이 0A로 감소하면서 D_{O2} 의 영전류 스위칭(Zero Current Switching, ZCS) 턴 오프가 일어난다.

$M_6 [t_5 - t_6]$: L_r 과 C_r 의 공진에 의해 공진 캐패시터의 전압 V_{Cr} 이 $-V_{Co1}$ 까지 감소하고 S_2 의 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching, ZVS)을 위한 조건을 만족시킨다.

2.2 전압 이득 및 공진기 설계

제안하는 컨버터의 입력력 관계식은 L_{in} 의 전압-시간 관계와 L_r 를 통해 출력으로 전달되는 에너지량을 통해 얻을 수 있다.

$$V_{out} = V_{Co1} + V_{Co2} = \frac{V_{in}}{1-D_1} - A + \sqrt{A^2 + (B+1) \left(\frac{V_{in}}{1-D_1} \right)^2} \quad (1)$$

여기서, $A = \frac{\omega_r^2 L_r I_{out}}{f_s}$, $B = \left(\frac{\omega_r D_2}{f_s} \right)$, 공진 주파수 $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ 이다.

다음으로 공진기 설계는 V_{DS2} 의 전압이 M_6 동안 0V에 도달하기 위한 V_{Co1} 의 조건을 고려하는 것으로부터 시작한다.

이를 위해 V_{DS2} 의 전압 변동을 수식으로 나타내면 아래와 같다

$$V_{DS2}(t-t_5) = V_{Co2} \cos(\omega_r(t-t_5)) + V_{Co1} \quad (2)$$

여기서, $V_{Co1} = V_{in}(1-D_1)^{-1}$ 이다. 따라서, V_{DS2} 가 0V에 도달하여 ZVS가 가능하기 위해서는 $V_{Co2} \geq V_{Co1}$ 가 만족되어야 한다. 이를 통해 최대 D_1 이 선정된다.

선정된 D_1 을 전압 이득 공식에 적용하여 출력 전압을 계산할 수 있다. 이 때, 설계된 L_r 의 크기에 따라 목적하는 출력 전압의 달성 여부가 결정된다. 이는 전압 이득 공식에서 볼 수 있듯이 L_r 이 커질수록 승압비가 작아지기 때문이다. 그러므로 선정된 최대 D_1 을 사용하여 목적하는 출력 전압을 만족시키는 L_r 의 최대값을 구할 수 있다. 작은 L_r 은 S_2 와 D_{O2} 의 전류 스트레스를 키우고, L_r 의 리플 증가로 인해 코어 손실의 증가를 야기한다. 따라서, L_r 은 최대값으로 설계되어야 한다.

앞서 설명한 ZVS 조건에서 최악 조건은 V_{Co1} 과 V_{Co2} 가 같을 때이며, 따라서 V_{Co1} 과 V_{Co2} 가 $0.5 V_{out}$ 으로 축전되는 조건에서 공진 주파수의 설계를 진행한다. 설계를 위해서 각 모드의 길이를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta t_1 = t_3 - t_1 = \frac{1}{\omega_r^2 L_r} \frac{V_{Co2}}{I_{Lr,peak}} \quad (3)$$

$$\Delta t_2 = t_5 - t_3 = (L_r I_{Lr,peak}) / V_{Co2} \quad (4)$$

$$\Delta t_3 = t_6 - t_5 = \pi / \omega_r \quad (5)$$

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = 1 - D_2 \quad (6)$$

$$D_1 > D_2 + \pi / \omega_r \quad (7)$$

여기서, $I_{Lr,peak} = \frac{D_2 V_{Co1}}{f_s L_r}$ 이다.

중부하에서의 ZVS를 위해서 D_1 이 최대일 때, (6)을 만족해야 하며, 또한 경부하에서는 (7)을 만족해야 한다. 최종적으로 (1), (6)과 (7)을 만족하는 L_r 과 ω_r , D_2 의 값을 선정할 수 있다. 본 논문에서는 $L_r = 110 \mu\text{H}$, $C_r = 11\text{nF}$, $D_2 = 0.3$ 으로 선정하였다.

2.3 실험 결과

제안하는 컨버터의 타당성을 입증하기 위해서 250W (380V, 0.658A, $f_s = 100\text{kHz}$) 사양의 시스템을 설계하였다. 그림 4는 전압 이득 곡선의 그래프이다. 입력전압은 25-45V, 출력전압은 380V로 요구되는 승압비는 8.44-15.2로써, 요구하는 승압비를 만족함을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 또한 입력 전류 맥동이 없는 것을 보인다. 그림 5는 100% 부하 조건에서의 출력 전압 및 입력 전류 파형이다. 제안하는 컨버터가 출력전압을 380V로 레귤레이션하며 요구되는 승압비를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6에서 S_2 의 ZVS 턴 온 특성과 D_{O2} 의 ZCS 턴 오프 특성을 확인할 수 있다. 이를 통해 경부하로 변화해도 ZVS특성과 ZCS특성을 유지하는 것을 알 수 있다. 실험을 통해 공칭 입력 전압 $V_{in} = 40\text{V}$, 100%부하 조건에서 91.6%의 효율을 달성할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 기존의 부스트 컨버터에 LC 병렬 공진 탱크를 결합한 회로를 제안하였다. 제안한 회로는 높은 승압비, 스위치 S_2 및 다이오드 D_{O2} 의 소프트 스위칭, 스위치 S_1 과 D_1 의 전압 스트레스를 가짐을 확인하였다. 250W사양의 실험을 통해 제안된 회로의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0028680)

참고 문헌

- [1] G. Wu, X. Ruan, and Z. Ye, "Nonisolated High Step-Up DC-DC Converters Adopting Switched-Capacitor Cell," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 383-393, 2015, Jan.
- [2] T. J. Liang and K. C. Tseng, "Analysis of integrated boost-flyback step-up converter," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 152, pp. 217-225, 2005, March.