

고효율 소프트 스위칭 부스트 컨버터의 설계 및 해석

박 소 리*, 박 상 훈*, 차 길 로* 원 충 연*, 정 용 채** ,이 수 원*
 성균관대학교*, 남서울대학교**

Design and analysis of high efficiency soft switching boost converter

So-Ri Park, Sang-Hoon Park, Kil-Ro Cha, Chung-Yuen Won, Yong-Chae Jung, Su-Won Lee
 Sungkyunkwan University*, Namseoul University**

ABSTRACT

A high efficiency soft switching boost converter is proposed in this paper. The conventional boost converter generates switching losses at turn on and off. Because of those, the whole system efficiency is reduced. The proposed converter utilizes soft switching method using resonant circuit with an auxiliary switch. Therefore, the proposed converter reduces switching losses lower than the hard switching. The proposed soft switching boost converter can be applied to photovoltaic system, power factor correction circuit and etc.

1. 서론

최근 스위칭 전원장치가 소형 경량화 됨에 따라 스위칭 주파수를 증가시키는 추세에 있다. 그러나 스위칭 주파수가 고주파화 됨에 따라 스위치 턴-온, 오프 시에 주기적으로 생기는 스위칭 손실 또한 증가하게 된다. 이는 시스템 전체 손실을 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 따라서 스위칭 손실을 감소시키는 방법에 관하여 공진을 이용한 컨버터의 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2,3].

특히 최근에는 공진을 이용하여 영전압 및 영전류 스위칭 동작을 동시에 할 수 있는 ZVZCS 컨버터에 대한 연구 결과가 많이 나오고 있다. 그러나 이러한 컨버터는 공진을 이루기 위한 보조회로의 구성이 복잡하고 이에 따라 보조회로를 구성하기 위한 비용이 상승됨에 따라 실제로 구현하는데 많은 어려움이 따른다^[1]. 또한 일반적인 보조스위치를 이용한 공진형 컨버터에서 주 스위치는 소프트 스위칭을 하지만 보조스위치는 하드스위칭을 하여 이러한 컨버터를 사용하였을 때에 오히려 보조 스위치의 스위칭 손실 때문에 회로구성에 들어가는 비용에 비해 전체 시스템의 효율을 향상시키지 못하는 경우가 있다^[3].

본 논문에서는 보조 스위치와 공진 회로를 이용한 새로운 소프트 스위칭 승압형 컨버터를 제안한다. 사용된 공진 회로는 공진 인덕터와 공진 커패시터 그리고 다이오드와 보조스위치로 구성되며 주 스위치가 영전압 부근에서 소프트 스위칭을 하기 위해 부분적인 공진을 한다. 보조 스위치 또한 공진 회로에 의해 소프트 스위칭을 한다. 따라서 다른 소프트 스위칭 컨버터에 비하여 스위칭 손실을 줄여 같은 주파수에서 기존의 컨버터를 사용할 때 보다 전체 시스템 효율을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 IGBT를 이용한 600[W], 30[kHz] 승압형 컨버터의 시뮬레이션과 축소모델을 제작하여 검증하였다.

2. 제안된 소프트 스위칭 승압형 컨버터

2.1 제안된 컨버터의 구성

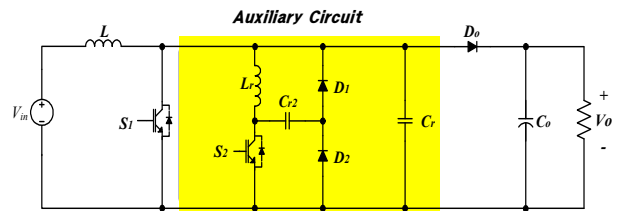


그림 1 제안된 소프트 스위칭 승압형 컨버터의 구성
 Fig. 1 Circuit diagram of the proposed converter

그림 1은 제안된 컨버터의 회로이다. 기본적인 승압형 컨버터에 보조스위치와 공진 커패시터 2개, 공진 인덕터와 다이오드 두 개가 더해져 주 스위치 및 보조 스위치의 소프트 스위칭을 가능하게 한다.

2.2 동작모드 분석

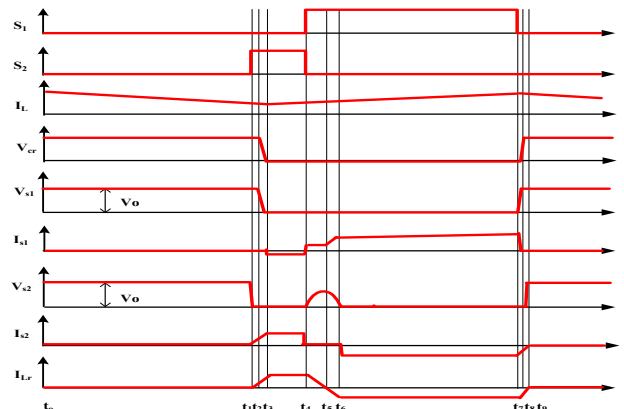


그림 2 제안된 회로의 중요 동작 파형
 Fig. 2 Key waveforms of the proposed converter.

그림 2는 제안된 컨버터의 동작 파형이고, 그림 3은 이에 대한 동작 모드별 회로도를 도시한 것이다.

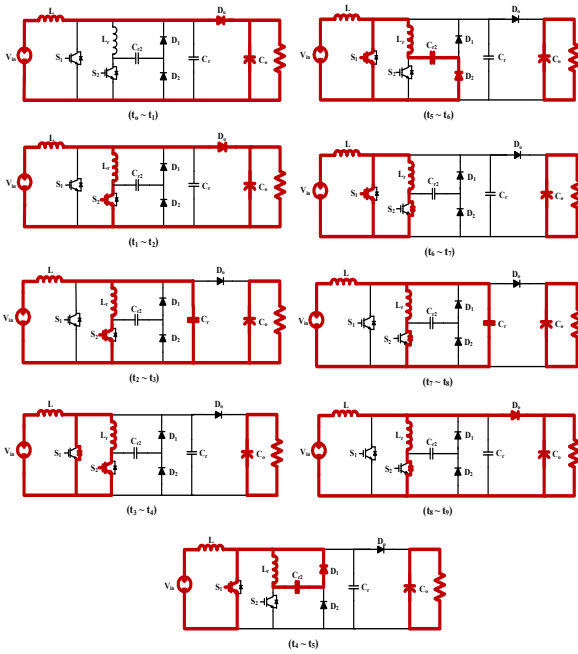


그림 3 제안된 회로의 동작 모드

Fig. 3 Equivalent circuits during one switching cycle

2.2 동작모드 설명

• 모드 1 ($t_0 - t_1$) : 모든 스위치가 오프되어 메인 인덕터에 축적된 에너지가 주 다이오드 D를 통해 부하단으로 전달된다. 이 때 보조 스위치가 턴-온 하면 모드 2가 시작 된다.

이 모드에서 인덕터에 흐르는 전류는 식(1)과 같다.

$$i_L(t) = I(t_0) - \frac{V_o - V_m}{L}(t - t_0) \quad (1)$$

이 때 공진 인덕터에는 전류가 흐르지 않고 공진 커패시터 C_r 은 출력전압으로 충전되어있고 공진 커패시터 C_{r2} 은 방전되어 있다.

•모드2 ($t_1 - t_2$) : 보조 스위치를 턴-온 하면 공진 인덕터를 통해 전류가 흐르게 되고 공진 인덕터에 흐르는 전류는 선형적으로 증가하게 된다. 공진 인덕터에 흐르는 전류의 양이 메인 인덕터에 흐르는 양과 같아지게 되면 이 모드는 종료된다.

이 때 공진 인덕터에 걸리는 전압은 출력전압과 같다.그러므로 공진 인덕터에 흐르는 전류는 식 (2)와 같다.

$$i_L(t) = \frac{V_o}{L_r}(t - t_1) \quad (2)$$

메인 인덕터에 흐르는 전류는 계속해서 같은 기울기로 감소한다. 이 모드가 끝나는 순간의 메인 인덕터 전류는 동작 모드에서의 최소값이 된다. 따라서 식 (3)과 같이 정의한다.

$$i_L(t_2) \approx I_{\min} \quad (3)$$

•모드3 ($t_2 - t_3$) : 모드 3은 공진 인덕터와 메인 인덕터에 흐르는 전류의 양이 같아지는 순간에 시작된다. 이때 주 다이오드는 차단되며 공진 커패시터 C_r 과 공진 인덕터는 공진

하게 된다. 이 커패시터의 공진으로 인한 방전이 모두 끝나 커패시터의 전압이 0이 되면 모드는 끝나게 된다. 공진 인덕터에 흐르는 전류는 메인 인덕터에 흐르는 전류와 공진 커패시터 C_r 과의 공진 전류의 합이므로 식 (4)와 같으며, 공진 커패시터 C_r 의 전압은 식 (5)과 같이 충전된다.

$$i_{Lr}(t) = I_{\min}(t) + \frac{V_o}{Z_r} \sin \omega_r(t - t_2) \quad (4)$$

$$V_{Cr}(t) = V_o \cos \omega_r(t - t_2) \quad (5)$$

이때의 공진 임피던스와 공진 각 주파수는 각각 Z_r 과 ω_r 로 표현된다.

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$$

•모드 4 ($t_3 - t_4$) : 공진 커패시터 C_r 과 공진 인덕터 L_r 이 공진을 하여 C_r 의 전압이 0이 되면 주 스위치의 역병렬 다이오드가 도통하며 이 모드가 시작된다. 이때 주 스위치에 걸리는 전압은 0이 되고 스위치의 on신호를 인가하여 주면 주 스위치는 영전압 구간에서 스위칭을 하는 것이 된다. 이 모드에서 메인 인덕터에 걸리는 전압은 입력 전압과 같다. 따라서 메인 인덕터에 흐르는 전류는 식 (6)과 같다.

$$i_L(t) = I_{\min} + \frac{V_m}{L}(t - t_3) \quad (6)$$

• 모드 5 ($t_4 - t_5$) : 모드 4에서 전류가 다이오드를 통해 환류하게 되면 커패시터 C_r 의 전압이 0이 되는 동시에 주 스위치는 영전압 조건에서 턴온하게 된다. 이때 보조스위치가 영전압 조건에서 오프되면 이 모드가 시작된다. 이 모드에서 공진 인덕터 L_r 과 C_{r2} 가 공진을 시작한다. 커패시터와 인덕터가 공진 후 공진 L_r 의 공진 전류가 0이 되면 공진 커패시터는 충전되고 종료 된다.이 모드에서 공진 인덕터에는 식 (7)와 같은 공진 전류가 흐른다.

$$i_{Lr}(t) = I_{Lr}(t_3) \cos \omega_r(t - t_4) \quad (7)$$

• 모드 6 ($t_5 - t_6$) : 모드 5가 끝나게 되면 공진 인덕터 L_r 에 전류가 반대방향으로 흐르면서 모드 6이 시작된다. 모드 6에서는 C_{r2} 가 충전되어 있는 상태에서 주 스위치와 D_2 를 통해 모드 5와는 반대방향으로 공진이 시작된다. 이때 커패시터 C_{r2} 는 공진이 되면서 충전되어있던 전압이 0으로 방전된다. 이 커패시터의 전압이 완전히 0으로 방전되면 공진주기가 모두 끝나게 되고 모드 6은 종료된다. 모드 5와 모드 6에 걸친 공진에 의해 공진 커패시터 V_{Cr2} 는 식 (8) 같이 충·방전을 한다.

$$V_{Cr2}(t) = Z_c I_{Lr}(t_3) \sin \omega_r(t - t_4) \quad (8)$$

•모드 7 ($t_6 - t_7$) : 모드 6이 끝나면 공진 커패시터 C_{r2} 의 전압이 0이 되고 보조 스위치의 역 병렬 다이오드가 도통한다. 이때 전류는 보조 스위치의 역병렬 다이오드와 공진 인덕터 그리고 주스위치를 통해서 환류된다. PWM 신호에 의하여 주 스위치가 오프 되는 시점에서 모드 7은 끝나게 된다. 이 구간동안 공진 인덕터에 흐르는 전류의 양은 t_3 에서와 같으나 방향은 반대 이다. 따라서 이 구간의 메인 인덕터와 공진 인덕터 전류는 다음과 같다.

$$i_L(t) = i_{Lm} + \frac{V_o}{L}(t-t_3) \quad (9)$$

$$i_{Lr}(t) = -I_{Lr}(t_3) \quad (10)$$

•모드 8 ($t_7 - t_8$) : 모드 8은 보조 스위치의 역병렬 다이오드에 흐르던 전류가 회복되는 구간으로 이 전류는 메인 인덕터에 흐르는 전류와 함께 공진 커패시터 Cr을 충전시키고 이 전압이 출력전압과 같아지면 모드는 종료된다. 이 때 공진 인덕터에 흐르는 전류는 식 (11)과 같다.

$$i_{Lr} = I_{Lr}(t_7) - \{I_{Lr}(t_7) + I_{Lr}(t_3)\} \cos \omega_r t \quad (11)$$

따라서 식(12)는 ZVS 조건이 된다.

$$Z_r \{I_{Lr}(t_7) + I_{Lr}(t_3)\} > V_o \quad (12)$$

•모드 9 ($t_8 - t_9$) : 모드 9는 공진 커패시터의 충전이 끝나고 주 다이오드가 도통하는 구간이다. 보조 스위치에 흐르는 전류가 완전히 회복된 후 이 모드는 끝나게 되고 다시 모드 1로 돌아가게 된다. 이 구간에서의 공진 인덕터의 전류는 식 (13)와 같다.

$$i_{Lr} = -I_{Lr}(t_3) + \frac{V_o}{L_r} t \quad (13)$$

3. 실험 결과

표 1. 실험에 사용된 각 파라미터 값
Table I. Experimental parameters.

입력전압	V_i	130~170[V]
출력전압	V_o	400[V]
스위칭 주파수	f_s	30[kHz]
공진 커패시터	C_r	3.3[nF]
공진 커패시터	C_{r2}	30[nF]
공진 인덕터	L_r	20[μH]
승압용 인덕터	L_m	1[mH]

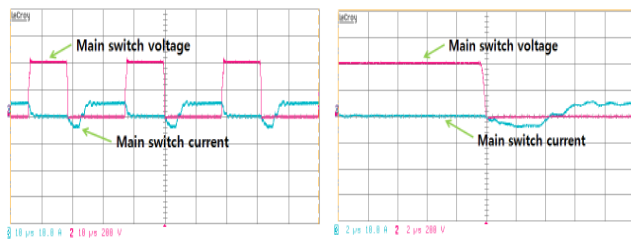


그림 4. 주 스위치의 전압 전류 파형
Fig. 4 Main switch voltage and current waveforms

그림 4는 주 스위치의 전압, 전류 파형이다. 그림 4-(b)는 그림 4-(a)를 확대한 파형이다. 주 스위치가 턴-온되기 전에 바디 다이오드가 환류 패스를 만들어 준다. 따라서 그림 4-(b)를 통해 주 스위치는 영전압 스위칭을 하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 보조 스위치의 파형이다. 보조 스위치 또한 영 전압에서 스위칭을 한다. 그림 4-(b)는 그림 4-(a)를 확대한 파형이다. 그림 (b)을 통하여 보조스위치 또한 영전압 스위칭을 하는 것을 볼 수 있다.

그림 5. 보조 스위치의 전압 전류 파형

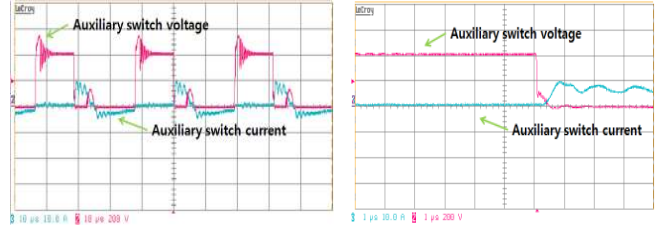


Fig. 5 Auxiliary switch voltage and current waveforms
(a) (Y-axis : Voltage-200[V], Current-10[A], X-axis : 10 [μs])
(b) Zoom in (Y-axis : Voltage-200[V], Current-10[A], X-axis : 1[μs])

표 2. 기존의 컨버터와 제안된 컨버터의 효율

Table II. Total efficiency of the circuits in the hard-switching and the proposed soft-switching converter

I_o	Load	Switching	Pi (W)	Po (W)	Effi. (η)
0.4[A]	26.67[%]	H	177.5	160.0	90.12
		S	1689.3	160.0	95.06
0.8[A]	53.33[%]	H	353.4	320.0	90.55
		S	315.2	320.0	95.17
1.2[A]	80.00[%]	H	533.3	480.0	91.01
		S	501.3	480.0	95.58
1.5[A]	100.0[%]	H	657.1	600.0	91.31
		S	623.5	600.0	96.23

표2. 는 기존의 하드 스위칭과 제안된 소프트 스위칭 승압형 컨버터의 부하전류의 변화에 따른 효율을 나타낸다. 위에서 보는 바와 같이 제안된 컨버터의 효율이 기존의 컨버터 보다 높게 나타남을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 보조 스위치와 공진 회로를 갖는 새로운 소프트 스위칭 승압형 컨버터를 제안 하였다. 주 스위치와 보조 스위치는 공진 인덕터와 커패시터에 의해 영전압 스위칭을 한다.

본 논문에서는 제안된 회로의 동작 설명과 이론적인 분석을 하였고, 600[W], 30[kHz]의 축소 모델을 제작, 시험함으로써 이를 검증 하였다. 본 논문에서 제안된 회로는 고효율 컨버터, 태양 광 발전용 DC/DC 컨버터, 역률 개선 회로 등에 적용할 수 있다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 출연금으로 수행한 특성화대학원사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

[1] Bodur H., Bakan A. F., "A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 19, Issue 3, pp. 676-684, May 2004.
[2] 김윤호, "소프트 스위칭 보조 스위치를 가지는 ZVT-PWM 부스트 컨버터", 전력전자 학술대회 논문집 전력전자학회 1998년 학술대회 논문집 1998. 7, pp. 265 ~ 268
[3] 박소리, 장수진, 원충연, 정용채, "저 손실형 소프트 스위칭 승압형 컨버터", 전력전자 학술대회 논문집 전력전자학회 2007년도 추계 학술대회 논문집2007. 11, pp. 34 ~ 36