

# 병렬 MOSFET 스위치를 이용한 ZCT PWM Boost Converter

김태우, 허도길, 김학성  
 금오공과대학교 전자제어공학과

## A ZCT PWM Boost Converter using parallel MOSFET switch

Tea-Woo Kim, Do-Gil Hur, Hack-Sung Kim

Dept. Electronics & control eng., Kum-oh Nat'l Univ. of Technology

### ABSTRACT

A ZCT(Zero Current Transition) PWM(Pulse-Width Modulation) boost converter using parallel MOSFET switch is proposed in this paper. The IGBT(main switch) of the proposed converter is always turned on with zero current switching and turned off with zero current/zero voltage switching. The MOSFET(auxiliary switch) is also operates with soft switching condition. In addition to, the proposed converter eliminates the reverse recovery current of the freewheeling diode by adding the resonant inductor,  $L_r$ , in series with the main switch. Therefore, the turn on/turn off switching losses of switches are minimized and the conduction losses by using IGBT switch are reduced. In addition to, using parallel MOSFET switch overcomes the switching frequency limitation occurred by current tail. As mentioned above, the characteristics are verified through experimental results.

의 도움으로 IGBT의 소프트 스위칭을 구현하는 방법으로서, IGBT가 도통시의 주 스위치로 동작하고 병렬 접속된 MOSFET에 의해 IGBT의 소프트 스위칭을 가능하게 하였다. 그러나 턴-온/턴-오프시에 MOSFET에 스위칭 손실이 발생하게되어 효율이 떨어진다.

본 논문에서는 주 스위치가 공진 전류에 의해서 받는 전류 스트레스를 최소화하였고, 테일 전류에 의한 스위칭 손실과 스위칭 주파수 제한을 극복한 ZCT PWM 승압형 컨버터를 제안한다. 제안된 회로에서 IGBT에 병렬 MOSFET 스위치를 달아서 주 스위치 IGBT가 항상 영전류/영전류영전압 조건에서 턴-온/턴-오프가 일어나고, 보조 스위치 MOSFET는 영전류영전압/영전압 조건에서 턴-온/턴-오프가 일어나게 공진형 커패시터와 다이오드를 추가하였다. 그리고 주 다이오드의 역회복 전류를 주 스위치에 직렬로 공진형 인덕터를 달아 급격한 전류의 변화(di/dt)를 제한함으로써 스위칭 손실과 EMI 노이즈를 최소화하였다. 위 특징을 실험 결과를 통하여 증명하였다.

### 1. 서론

최근에는 부분 공진형 스위칭 컨버터에 사용되는 스위칭 소자로 전압 강하가 낮고 전압 및 전류 정격이 높은 특성을 갖는 IGBT가 많이 사용되고 있다.<sup>[1]~[5]</sup> 그러나 IGBT는 MOSFET에 비해 스위칭 속도가 느리고, 특히 턴-오프 시에 테일 전류(tail current) 때문에 심각한 스위칭 손실을 야기하므로 효율이 낮아지며 스위칭 주파수도 제한을 받는다. 턴-오프시 테일 전류에 의한 손실을 줄이기 위해서는 소프트 스위칭(soft switching) 기법중에서 영전압 스위칭보다는 영전류스위칭이 효과적이다.<sup>[4]</sup> 그러나 기존의 영전류스위칭 기법<sup>[2]</sup>은 고전력에 적용하기에는 과도한 스위치 전류 스트레스와 공진 기간의 증가로 인하여 완전히 만족스럽지 못하다. 또 다른 방법으로 IGBT와 MOSFET 병렬 스위치를 사용하는 방법이 제시되었다.<sup>[3]</sup> 이 방법은 MOSFET의 빠른 스위칭 특성

### 2. 동작 원리

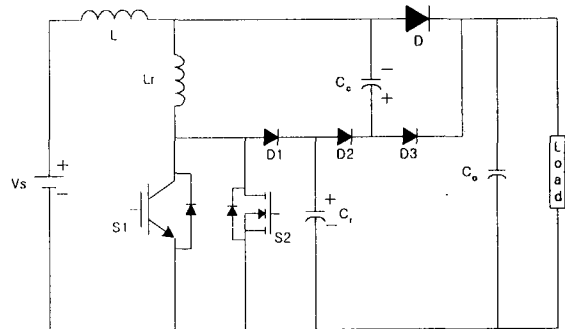


그림 1 제안된 컨버터

Fig. 1 Proposed Converter

그림 1은 제안된 ZCT PWM 승압형 컨버터이다. 그림에서 보는 것처럼 정류용 다이오드의 역회복

전류를 제한하고 스위치들이 소프트 스위칭 하기 위해서 공진형 인덕터( $L_r$ )과 공진형 커패시터 ( $C_c$ ,  $C_r$ ) 및 다이오드(D1,D2,D3) 추가하였다.

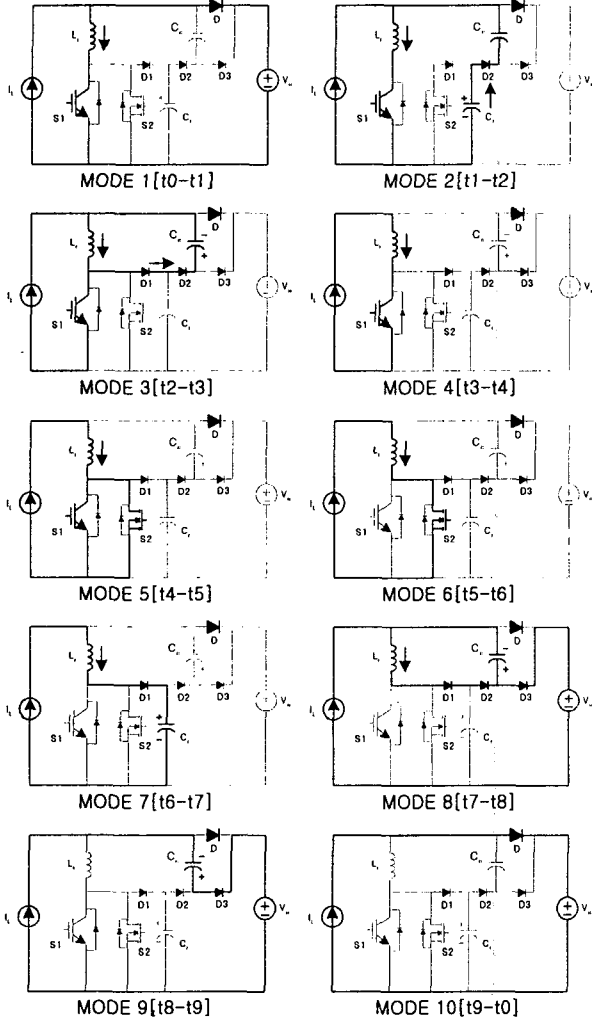


그림 2 동작모드  
Fig. 2 stage of operation

스위칭 싸이클은 주 스위치가 턴-온 되면서 시작한다. 싸이클이 시작되기 전에는 일반적인 승압형 컨버터에서 처럼 S1과 S2는 오프상태이고 따라서 다이오드(D)에 정상상태 입력 전류  $I_L$ 가 흐르고 출력 전압은  $V_o$ 이다. 이때 커패시터  $C_r$ 의 전압은  $V_o$ 과 동일하다.

(1) MODE 1 [M1] : 주 스위치가 영전류 조건에서 턴-온 되면  $I_{Lr}$ 는 선형적으로 증가한다.

$$I_{Lr} = \frac{V_o}{L_r}(t-t_0) \quad (1)$$

(2) MODE 2 [M2] : 공진형 인덕터 전류  $I_{Lr}$ 이 입력 전류  $I_L$ 와 같아지면  $L_r$ ,  $C_r$ ,  $C_c$ 들이 공진 한다.  $C_r$ 은 공진 전압이 0이 될 때까지 방전한다.

$$I_{Lr}(t) = I_L + \frac{V_o(0)}{Z_0} \sin \omega_n t \quad (2)$$

$$V_{Cc}(t) = V_o \frac{C_r}{C_c + C_r} (1 - \cos(\omega_1(t-t_1))) \quad (3)$$

$$V_{Cr}(t) = V_o \frac{C_r}{C_c + C_r} (1 + \frac{C_c}{C_r} \cos(\omega_1(t-t_1))) \quad (4)$$

여기서

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_r C}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C}}, \quad C = \frac{C_c C_r}{C_c + C_r} \text{ 이다.}$$

(3) MODE 3 [M3] :  $V_{Cr}$ 가 영(zero)이 되면 다이오드 (D1)이 턴-온되고,  $I_{Lr}$ 은  $C_r$ 을 충전시킨다.

$$V_{Cc}(t) = V_o \frac{C_r}{C_c} \cos(\omega_n(t-t_2)) + V_o \frac{\sqrt{C_c(C_r - C_c)}}{C_r} \sin(\omega_n(t-t_2)) \quad (5)$$

$$I_{Lr}(t) = I_L \cos(\omega_n(t-t_2)) + \frac{V_{Cc}}{Z_0} \sin(\omega_n(t-t_2)) \quad (6)$$

여기서

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_r C_c}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_c}} \text{ 이다.}$$

(4) MODE 4 [M4] : 주 스위치는 도통상태이고 다이오드(D)는 오프 상태로서 일반적인 승압형 PWM 컨버터와 동일하게 작동하는 기간에 해당한다.

(5) MODE 5 [M5] : 주 스위치가 턴-오프되기전에 보조 스위치가 영전압/영전류조건에서 턴-온된다.

(6) MODE 6 [M6] : 보조 스위치가 턴-온 상태를 유지할 때 주 스위치는 영전압/영전류조건에서 턴-오프되므로 IGBT가 턴-오프시 발생하는 테일 전류가 보조 스위치를 통해서 흐르게 됨으로 스위칭 손실이 일어나지 않는다.

(7) MODE 7 [M7] : 보조 스위치 S2가 턴-오프되면 공진형 인덕터 전류  $I_{Lr}$ 은 공진형 커패시터  $C_r$ 을  $V_o$ 까지 충전한다.

$$V_{Cr}(t) = \frac{I_{Lr}}{C_r}(t-t_6) \quad (7)$$

(8) MODE 8 [M8] : 공진형 인덕터 전류  $I_{Lr}$ 은 다이오드(D1, D2, D3)을 통해서 출력단으로 흐른다. 이때 다이오드 D3가 턴-온되면  $C_c$ 에 충전된 에너지는  $I_{Lr}$ 과 함께 공진형태로 방전을 시작한다.

$$V_{Cc}(t) = V_{Cc}(t_3) \cos(\omega_n(t-t_8)) \quad (8)$$

$$I_{Lr}(t) = I_L - \frac{V_{Cc}(t_3)}{Z_0} \sin(\omega_n(t-t_8)) \quad (9)$$

여기서

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_r C_c}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_c}} \text{ 이다.}$$

(9) MODE 9 [M9] : 공진형 인덕터 전류  $I_{Lr}$ 이 영(zero)이 되면  $C_c$ 에 남은 에너지는 입력 전류  $I_L$ 에 의해서 방전을 한다.

$$V_{C_c}(t) = \frac{I_L}{C_c}(t-t_8) \quad (10)$$

(10) MODE 10 [M10] : 공진형 커패시터 전압  $V_{C_c}$ 가 영(zero)이 되면, 주 다이오드(D)가 도통되면서 에너지를 출력단으로 전달한다. 따라서, 스위칭 주기동안 컨버터의 PWM동작은 그림 2 및 3과 같이 MODE 1에서 MODE 10에 걸쳐 이루어진다.

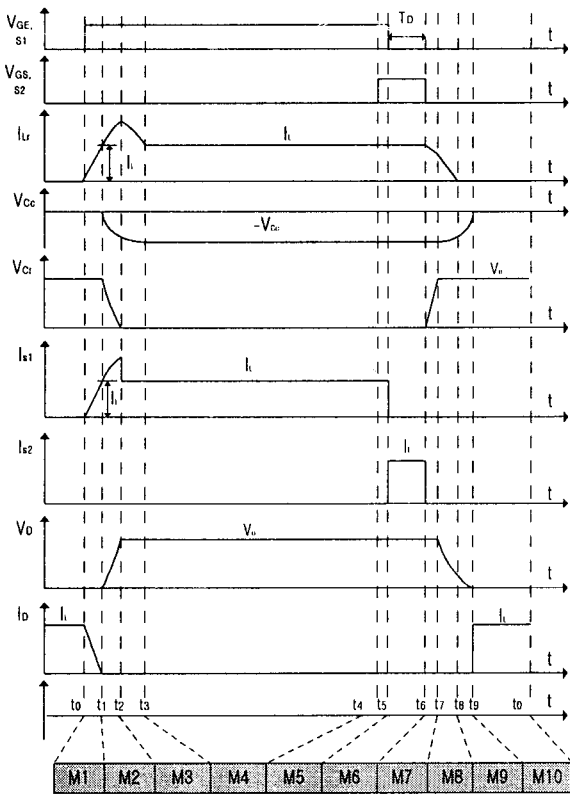


그림 3 스위칭 한 주기 동안의 동작 파형  
Fig. 3 Typical waveform of proposed converter

### 3. 회로 특성

#### 3.1 스위칭 소자들의 스위칭 조건

동작 모드(mode)분석으로부터 각 스위치와 주 다이오드의 스위칭 조건을 정리하면 표1과 같이 주 스위치는 항상 소프트 스위칭 조건을 만족한다. 즉 주 스위치 영전류에서 턴-온이 된다. 턴-오프 시에는 주 스위치에 병렬로 달아준 보조 스위치에 의해서 영전류/영전압조건에서 스위칭이 일어난다. 그리고 보조 스위치는 주 스위치가 온 상태조건에서 턴-온하고, 공진형 커패시터( $C_r$ )에 의해서 영전압에서 턴-오프 한다. 주 다이오드(D)는 영전압에서 턴-온 되고, 영전류에서 턴-오프 된다.

표 1 스위칭소자의 스위칭 조건

Table 1 Switching conditions of switching devices

스위칭 소자	Turn on 조건	Turn off 조건
S1	ZCS	ZVS and ZCS
S2	ZVS and ZCS	ZVS
D	ZVS	ZCS

#### 3.2 공진형 소자값 설계 절차

공진형 인덕터  $L_r$ 과 공진형 커패시터  $C_r, C_c$ 값은 다음 제시한 규칙에 의하여 결정한다.

1) MODE 1에서 소프트 스위칭(soft switching) 조건에 부합하려면 MODE 8에서  $I_{Lr}$ 이 영이 되어야한다.

$$\frac{1}{2} L_r I_L^2 < \frac{1}{2} L_r I_{\pi}^2 + \frac{1}{2} C_r V_o^2 = \frac{1}{2} C_c V_{C_c}^2 \quad (11)$$

2) (11)식에서  $C_c$ 의 값에 따라서 주 다이오드 D에 양단에 걸리는 전압 스트레스가 결정된다. 이 전압 스트레스를 제한하기 위해서  $C_c$ 의 값을 10배 정도로 잡지만, 실제로 역 회복 에너지도 고려해야함으로 대략 20~30배 정도로 결정한다.

3) 공진형 인덕터  $L_r$ 의 값은 역 회복손실을 줄이기 위해서 가능하면 크게 선택한다. 다음 수식<sup>[6]</sup>에 따라 큰  $L_r$ 를 선택하면 역 회복 전류  $I_{\pi}$ 은 결과적으로 작아진다.

$$I_{\pi} \propto \sqrt{I_L \frac{dI_L}{dt}} \propto \sqrt{\frac{I_L}{L_r}} \quad (12)$$

전체적으로 공진형 인덕터  $L_r$ 과 공진형 커패시터  $C_r, C_c$ 의 값을 결정하는데 반복적인 과정과 절충이 필요하다.

### 4. 실험 결과

제안된 회로의 동작을 확인하기 위하여 스위칭 주파수 100KHz로 작동되는 승압형 컨버터를 시험용으로 제작하였다. 컨버터의 전력회로는 그림1과 같고 컨버터의 주요 부품은 표2와 같다.

표 2 시험용 컨버터에 사용된 부품

Table 2 Components for prototype converter

Component	Value/Model
입력전압 $V_s$	50V
인덕터 L	1mH
공진형 인덕터 $L_r$	4 $\mu$ H
공진 커패시터 $C_r, C_c$	10nF, 50nF
주 스위치 S1 (IGBT)	GT25J101
보조 스위치 S2 (MOSFET)	IRF740
출력 커패시터( $C_o$ )	100 $\mu$ F
스위칭 주파수( $f_s$ )	100kHz
다이오드(D,D1,D2,D3)	F6D

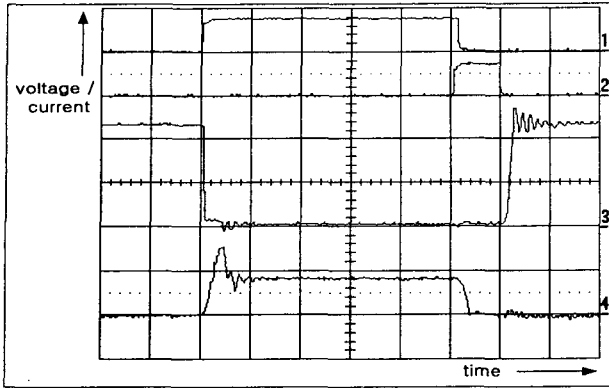


그림 4 주 스위치 전압과 전류 파형  
 Fig. 4 Current and voltage of main switch S1  
 1:  $V_{gs1}$  (20V/div, 1  $\mu$ s) 2:  $V_{gs2}$  (20V/div, 1  $\mu$ s)  
 3:  $V_{ce1}$  (50V/div, 1  $\mu$ s) 4:  $I_{ce1}$  (5A/div, 1  $\mu$ s)

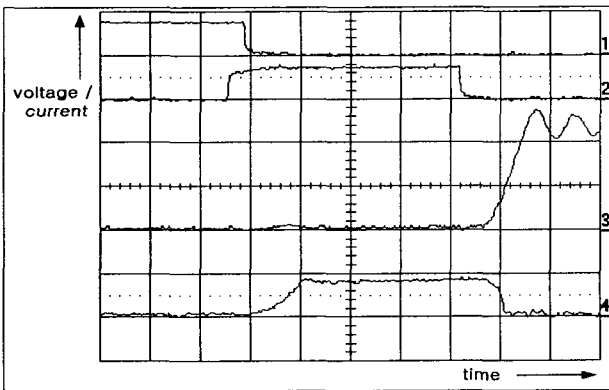


그림 5 보조 스위치의 전압과 전류  
 Fig. 5 Voltage and current of auxiliary switch  
 1:  $V_{gs2}$  (20V/div, 0.2  $\mu$ s) 2:  $V_{gs1}$  (20V/div, 0.2  $\mu$ s)  
 3:  $V_{ds2}$  (50V/div, 0.2  $\mu$ s) 4:  $I_{ds2}$  (5A/div, 0.2  $\mu$ s)

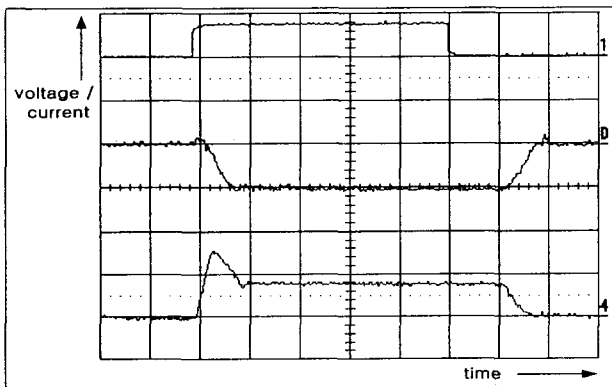


그림 6 Cc 전압과 Lr 전류  
 Fig. 6 Voltage of Cc and current of Lr  
 1:  $V_{gs1}$  (20V/div, 1  $\mu$ s) D:  $V_c$  (20V/div, 0.2  $\mu$ s)  
 4:  $I_{Lr}$  (5A/div, 1  $\mu$ s)

실험결과 각 스위치(S1, S2)의 전압과 전류 그리고 공진형 캐패시터의 전압과 공진형 인덕터의 전류파형은 그림 4~6과 같다. 그림 4, 5는 주 스위치/보조 스위치의

스위칭 특성을 확인하기 위하여 콜렉터-에미터/드레인-소스 전압과 콜렉터/드레인 전류를 각각 측정된 파형을 나타낸 것이다. 주 스위치는 턴-온시 영전류에서 스위칭되고, 턴-오프시 영전류/영전압에서 스위칭됨을 확인하였다. 그리고 보조 스위치는 영전류/영전압에서 턴-온하고, 영전압에서 턴-오프함을 확인하였다. 그림 6는 공진형 인덕터(Lr)와 공진형 캐패시터(Cc)의 전류 및 전압 파형을 보여주고 있다. 전체적인 효율은 입력 전력을 100[W]~300[W]사이에서 측정된 결과가 93[%]~95[%]사이에서 동작함을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 IGBT와 MOSFET 병렬 스위치에 공진 소자와 다이오드를 추가한 ZCT PWM 승압형 컨버터를 제안하였다. 주 스위치 IGBT는 영전류에서 턴-온되고 영전압/영전류에서 턴-오프하고, 병렬로 달린 보조 스위치 MOSFET는 영전류/영전압에서 턴-온하고 영전압에서 턴-오프하므로 스위칭 손실을 최소화하였다. 그리고 IGBT를 사용하여 도통손실을 줄였고, IGBT의 스위칭 주파수 제한을 MOSFET으로 극복하여 고주파에 동작이 가능하게 하였다. 그래서 제안된 컨버터는 고주파 동작이 용이하고 고 전력 밀도 시스템을 구현하는데 적합하다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. M. Jiang, G. C. Hua, E. Yang, and F. C. Lee, "Soft-switching of IGBTs with the help of MOSFETs", IEEE PESC Rec., pp. 151-157, 1993.
- [2] J. Kolar et al., "Analysis fo turn-off behavior and switching losses of a 1200 V/50 A zero-voltage or zero-current switched IGBT", in Conf. Rec. IEEE APEC'91, 1991, pp. 1508-1514.
- [3] Hang-Seok Choi, B. H. Cho, "Novel Zero-Current -Switching (ZCS) PWM Switch Cell Minimizing additional Conduction Loss," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., 2001, pp. 872-877.
- [4] M. Nakamura, M. Shimada, T. Myoui, H. Sadakata, S. Moisseev, M. Nakaoka, "Performance Evaluations on Soft-Switching Boost Power Converter with a Single Auxiliary Passive Resonant Snubber," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., 2001, pp. 1057-1063.
- [5] Min-Kwang Lee, D. Y. Lee, D. S. Hyun, " New Zero-Current-Transition PWM DC/DC Converters Without Current Stress," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., 2001, pp. 1069-1074.
- [6] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, Power Electronics : Converters, Applications and Design. New York : Wiley, 1989, pp. 462-467.