

# 출력제어와 도통손실 감소를 위해 2차측 스위치를 사용한 소프트스위칭 하프브리지 컨버터

김 영 필, 김 진 우, 김 태 응, 이 성 백  
광운대학교 전자공학과  
전화 : 02-940-5113 / 핸드폰 : 011-9753-7033

## Soft-Switching Half-Bridge Converter using Secondary Switches for Output Control and Conduction Loss Reduction

Young Phil Kim, Jin Woo Kim, Tae Woong Kim, Sung Paik Lee  
Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University  
E-mail : young\_phil@hanmail.net

### Abstract

In this paper, a soft switching half-bridge converter using secondary switches for output control and conduction loss reduction is proposed. The conventional half-bridge converter must be fixed on duty cycle for soft switching. The proposed converter was consisted of two added switches in series of the secondary rectifier diodes. The main switches with constant duty cycle are operated ZVS. The secondary switches are operated ZV-ZCS. Especially, the primary switches were fixed duty cycle for maximum voltage conversion ratio. Output of converter is controlled by duty cycle or phase-shifted time of secondary switches. The conduction loss of the proposed converter can be reduced by the secondary switches. The operation characteristic, analysis, simulation and experimental results of the proposed converter are presented.

### I. 서론

소프트 스위칭 PWM 컨버터는 기존의 하드 스위칭 컨버터들과 비교해 볼 때 낮은 디바이스 스트레스와 높은 효율을 갖는 등 몇가지의 장점을 가지고 있다.

일반적으로 브리지형의 소프트 스위칭 컨버터는 높은 출력 전력을 얻을 수 있기 때문에 많이 사용되고 있지만 영전압 스위칭을 이루기 위해 순환 전류를 필요

로하기 때문에 도통 손실이 크다. 그중 하프-브리지 컨버터는 두 스위치의 데드타임이 영전압 스위칭을 하기 위해 고정되어 있어야 하고, 듀티비에 따른 전압 전달비의 변화와 1차측에서 2차측으로의 전달 파형이 트랜스포머를 거치면서 왜곡이 생기기 때문에 1차측에서 출력제어가 어렵다. 이를 보완하기 위해 보조스위치나 보조회로, 가포화 인덕터를 사용한 하프-브리지 컨버터가 연구되었지만 보조 스위치의 스위칭 손실과 가포화 인덕터의 코어손실 등 문제점이 발생하였다. 그래서 이러한 도통손실 및 출력제어 문제를 해결하기 위해 2차측 정류 다이오드에 직렬로 스위치를 연결하였다. 제안된 컨버터는 2차측 스위치의 영향으로 도통손실을 최대한 줄일 수 있고 1차측 스위치는 영전압 스위칭을 이룰 수 있도록 충분한 데드타임을 갖는 듀티비로 고정하고 2차측 스위치의 듀티비를 조절하거나 위상천이 시간을 변화시켜 출력을 제어하였다. 또한, 경부하에서도 2차측 스위치로 인해 1차측 스위치는 완전한 영전압 스위칭을 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 위에서 언급된 도통 손실 및 출력제어를 해결하기 위해 제안된 컨버터를 기반으로 기존의 소프트 스위칭 하프-브리지 컨버터와 비교하고 스위칭 주파수를 50kHz, 출력 전력을 20W로 설정하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 분석하고 설명하였다.

### II. 구성 및 동작 원리 특성

#### 2.1 구성 및 특성

본 논문에서 제안된 출력제어와 도통손실 감소를 위

해 2차측 스위치를 사용한 소프트 스위칭 하프-브리지 컨버터의 기본회로구성을 그림1.에서 나타내고 있다.

제안된 컨버터의 회로는 1차측은 기존의 소프트 스위칭 하프-브리지 컨버터의 회로구성과 같고, 2차측 정류 다이오드에 직렬로 스위치  $S_3, S_4$  를 새롭게 추가한 형태이다.

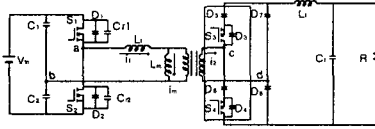


그림 1. 제안된 컨버터

1차측 스위치들은 공진 캐패시터와 누설 및 자화 인덕터의 공진에 의해 영전압 스위칭을 하고, 2차측 스위치들은 1차측 스위치들보다 ON 시간을 더 길게 하여 1차측 전류  $i_1$ 의 감소 시점을 지연시켜준다. 또한, 2차측 스위치는 2차측 전류  $i_2$ 가 '0'이 됨에 따라 트랜스포머 2차측으로의 에너지 전달이 없고 환류로 인해 영전압, 영전류 스위칭을 한다.

2.2 동작 원리

제안된 컨버터의 동작 구간은 반주기를 기준으로 스위치  $S_1$ 이 OFF된 순간을 모드1로 하여  $S_2$ 가 ON되어 에너지가 전달되는 순간까지 여섯 개의 동작구간으로 나누었고, 2차측 스위치들은 가장 큰 에너지 전달을 위해 위상 천이 시간을 '0'으로 설정하여 설명하였다. 그림2와 그림3.에서는 각 모드 별로 컨버터 동작에 대한 등가 회로 및 이상적인 동작파형을 보여주고 있다.

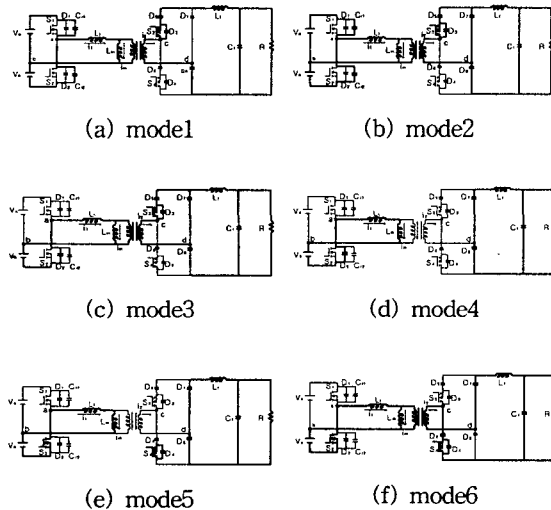


그림2. 등가 회로

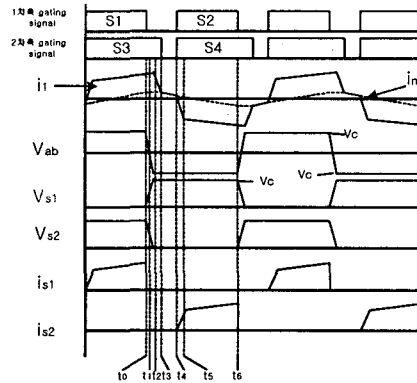


그림3. 제안된 컨버터의 이상적인 파형

(1) 모드1 ( $t_0 \sim t_1$ )

모드1은  $S_1$ 이 OFF된 직후이며 1차측 스위치에 병렬로 연결되어 있는 캐패시터  $C_{r1}$ 은 충전,  $C_{r2}$ 는 방전을 한다. 스위치 양단의 전압  $V_{s1}$ 은 '0'에서  $V_c/2$ 까지 증가,  $V_{s2}$ 는  $V_c$ 에서  $V_c/2$ 까지 감소하며 1차측 양단 전압  $V_{ab}$ 는  $V_c/2$ 에서 '0'으로 감소한다.

(2) 모드2 ( $t_1 \sim t_2$ )

모드2는  $V_{ab}$ 가 '0'이 되는 시점이며, 1차측 스위치 양단의 전압  $V_{s1}$ 은  $V_c/2$ 에서  $V_i$ 까지 증가하고  $V_{s2}$ 는  $V_c/2$ 에서 '0'까지 감소한다. 이때 1차측 스위치에 병렬로 연결되어 있는 캐패시터와 트랜스포머의 누설인덕턴스와 자화인덕턴스로 공진이 일어나기 시작하고  $V_{ab}$ 는 '0'에서  $-V_c$ 까지 증가하며  $i_{D3}$ 는 감소하고  $i_{D1}$ 은 증가하기 시작한다.

(3) 모드3 ( $t_2 \sim t_3$ )

모드3은 1차측 스위치에 병렬로 연결되어 있는 캐패시터가 완전히 충전,방전이 일어난 시점으로써 2차측 다이오드  $D_7, D_8$ 이 도통하여 2차측 에너지는 환류하며, 스위치  $S_2$ 의 역병렬 다이오드  $D_2$ 가 도통하여 1차측 에너지는 누설인덕턴스에 저장된 에너지가 소모된다. 따라서, 1차측 전류  $i_1$ 은 감소를 시작한다.

(4) 모드4 ( $t_3 \sim t_4$ )

모드4는 2차측 스위치  $S_3$ 가 OFF 되는 시점이며 2차측 에너지는 환류를 계속하게 된다. 1차측 전류  $i_1$ 은 2차측 스위치 때문에 전류의 방향이 바뀌지 않고 자화 자류  $i_m$ 의 전류 값과 일치하며 이때 트랜스포머 2차측에서 흐르는 전류  $i_2$ 는 자화전류  $i_m$ 과 1차측 전

## 출력제어와 도통손실 감소를 위해 2차측 스위치를 사용한 소프트스위칭 하프브리지

류  $i_1$ 이 같으므로 두 전류의 차가 흐르게 되어 전류의 값은 '0'이 된다. 또한 트랜스포머의 1차측은 자화 인덕터에 저장된 에너지만이 흐르게 된다.

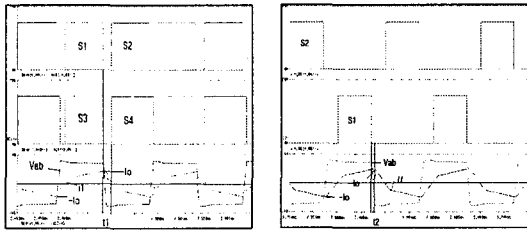
### (5) 모드5 ( $t_4 \sim t_5$ )

모드5는 1차측 스위치  $S_2$ 와 2차측 스위치  $S_4$ 가 ON 되는 시점으로써 이때 2차측 정류 다이오드  $D_8$ 은 아직 환류로 인해 도통되어 있는 상태이고  $i_{D8}$ 은 줄기 시작한다. 따라서  $S_4$ 가 ON이 되었지만 1차측 에너지가 2차측으로 전달이 되지 못한다.

### (6) 모드6 ( $t_5 \sim t_6$ )

모드6은  $i_{D8}$ 이 완전히 '0'이 되는 시점으로써  $D_8$ 이 OFF가 됨으로써 2차측 스위치  $S_4$ 는 동작을 시작한다. 이때 1차측 에너지가 2차측으로 전달이 되기 시작한다. 모드6이 끝나면 다시 모드가 반복되므로 그 이상의 모드 설명은 생략하였다.

## 2.3 제안된 컨버터와 기존 컨버터의 비교



(a)제안된 컨버터

(b)기존의 컨버터

그림4. 비교파형

위의 비교 파형에서 볼수 있듯이 제안된 컨버터의 1차측 전압  $V_{ab}$ 는  $t_1$ 시 양에서 음으로 변화할 때 1차측 전류  $i_1$ 은 '0'에 가깝게 감소하여 유지한다. 여기서  $I_2$ 를 영전압 스위칭을 이루기 위한 전류라고 가정할때 영전압 스위칭 조건은 식(1)과 같다.

$$i_1(t_1) \geq I_2 \quad (1)$$

따라서,  $I_2$ 와  $i_1$ 에 의해 스위치 전류는 다음과 같다.

$$i_{sw} = i_1(t_1) + I_0 \quad (2)$$

$$i_{sw} \geq I_2 + I_0 \quad (3)$$

그림4. (b) 기존의 컨버터 파형에서  $V_{ab}$ 는  $t_2$ 시 음으로 변할 때  $i_1$ 은  $I_0$ 에서  $-0.67I_0$ 로 변한다. 따라서  $i_1$ 은 영전압 스위칭을 이루기 위해  $I_0$ 보다 크거나 같아야 하고 영전압 스위칭 조건은 식(4)와 같다.

$$i_1(t_2) \geq I_2 + I_0 \quad (4)$$

이 때 스위치에 흐르는 전류  $i_{sw}$ 는 식(6)에서 볼수 있듯이  $I_0$ 보다 1.5배 이상 커진다.

$$i_{sw} = i_1(t_2) + I_0 \quad (5)$$

$$i_{sw} \geq I_2 + 1.67 \times I_0 \quad (6)$$

결과적으로 식(7)에서 볼수 있듯이 제안된 컨버터에서는 스위치에 흐르는 전류가 두배이상 줄기 때문에 도통손실도 50%정도 줄일수 있다. 또한 2차측 스위치에 의해 부하전류가 1차측으로 전달되는 것을 막아 1차측 스위치의 영전압 스위칭에 부하전류가 영향을 주지 않는다는 특징을 가지고 있다.

$$P_{DS} = I^2 R_{DS} \quad (7)$$

## III. 시뮬레이션 및 실험 결과

### 3.1 시뮬레이션 및 실험조건

표1. 시뮬레이션 및 실험변수

변수(Parameter)	값(Value)	변수(Parameter)	값(Value)
입력전압 $V_i$	40V	공진 캐패시터 $C_r$	20nF
누설 인덕터 $L_l$	8uH	1차측 듀티비 $D_1$	0.4
자화 인덕터 $L_m$	110uH	2차측 듀티비 $D_2$	0.465
필터 인덕터 $L_f$	1mH	스위칭 주파수 $f_s$	50kHz
필터 캐패시터 $C_f$	100uF	부하 저항 $R$	10Ω

아래의 그림 5. 에서 볼수 있듯이 2차측 스위치들은 위상 천이 시간을 '0'으로 했을 때 가장 큰 에너지 전달을 하기 때문에 시뮬레이션 및 실험은 위상천이 시간을 '0'으로 설정하였다.

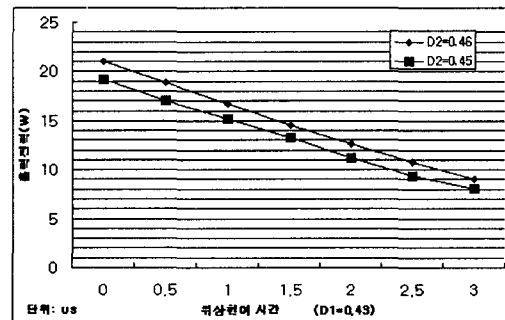


그림5. 위상천이 시간에 따른 출력전력

### 3.2 실험 파형 및 고찰

시뮬레이션 파형이나 실험 파형에서의 오버슈트나 링잉은 일반적으로 트랜스포머의 2차측에 R,C스너버를

이용해 제어를 할수 있다. 다음의 실험 파형 그림7.~10.은 제안된 컨버터의 1차측 트랜스포머 양단전압과 전류, 1차측 스위치의 전압과 전류파형을 나타내고 있고, 그림11.~12.에서는 기존의 소프트 스위칭 하프-브리지 컨버터의 1차측 전압과 전류파형을 나타내고 있다.

그림9.는 전류 파형이 양에서 음으로 바뀌는 시점에서 2차측 스위치에 의해 전류값이 짧은 시간동안 양으로 유지가 되고, 그림12.는 전류값이 곧바로 양에서 음으로 바뀌기 때문에 위에서 “제안된 컨버터와 기존 컨버터의 비교” 에서 언급된 이론적인 도통손실 부분을 실험파형으로 증명할수 있다.

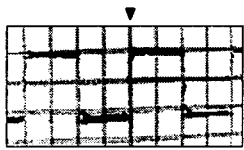


그림7. 1차측 전압( $V_{ab}$ )  
(20V/div, 5 $\mu$ s/div)

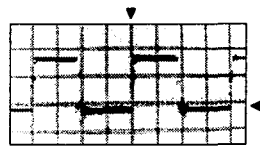


그림8.스위치전압( $V_{s2}$ )  
(10V/div, 5 $\mu$ s/div)

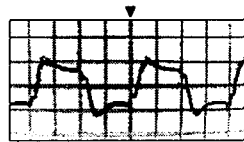


그림9. 1차측 전류( $i_1$ )  
(2A/div, 5 $\mu$ s/div)

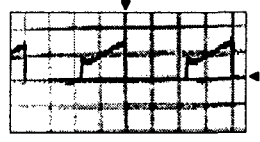


그림10. 스위치전류( $i_{s2}$ )  
(2A/div, 5 $\mu$ s/div)

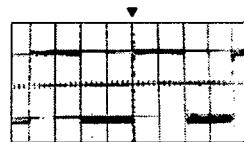


그림11.기존의 1차측 전압 ( $V_{ab}$ )  
(20V/div, 5 $\mu$ s/div)

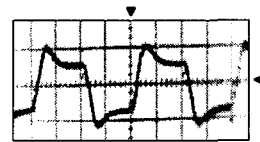


그림12. 기존의 1차측 전류 ( $i_1$ )  
(2A/div, 5 $\mu$ s/div)

## V. 결론

본 논문에서는 출력제어와 도통손실 감소를 위해 2차측 스위치를 사용한 소프트 스위칭 하프-브리지 컨버터를 제안하고 분석하였다. 기존의 소프트 스위칭 하프-브리지 컨버터는 듀티비 조절 한계와 전압 전달비의 문제가 있었다. 그래서 본 논문에서는 2차측의 정류 다이오드에 직렬로 스위치를 추가하여 1차측 스위치의 듀티비 조절없이 최대 에너지를 전달한후 2차측 스위치의 듀티비나 위상천이 시간 조절로 출력을 제어 하였으며 2차측 스위치의 영전압, 영전류 스위칭으로

기존의 출력제어를 위한 보조 회로나 가포화 인덕터를 사용했을때의 단점인 스위칭손실 및 도통손실과 코어 손실 없이 스위칭을 할수 있었다.

제안된 컨버터의 시뮬레이션 및 실험 결과에서 볼수 있듯이 기존의 컨버터와 비교했을 때 도통손실이 줄어들었기 때문에 기존의 컨버터에 비해 8~9% (부하저항 10 $\Omega$  시)의 효율 개선과 출력 제어가 가능하게 되었고, 또한 기존의 컨버터에서는 경부하에서의 소프트 스위칭이 어렵다는 단점을 갖고 있었지만, 본 논문에서는 2차측 스위치를 사용함으로써 영전압 스위칭을 이루기 위한 전류를 유지해줌으로써 넓은 부하범위에서도 소프트 스위칭이 가능하다. 따라서 제안된 컨버터는 부하가 수시로 변화되는 저 전력용 에너지 변환 장치 등에 적합함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] T.Morimoto, S.Shirakawa, O.Koudriavtsev and M.Nakaoka, "Zero-Voltage and Zero-Hybrid Soft-Switching Phase-Shifted PWM DC-DC Power Converter for High Power Applications ", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Volume: 1 , 2000 , Page(s): 104 -110
- [2] Junming Sun; Hamada, S.; Yoshitsugu, J.; Bin Guo; Nakaoka, M. "Zero voltage soft-commutation PWM DC-DC converter with saturable reactor switch-cascaded diode rectifier", Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on Volume: 45 4, April 1998 , Page(s): 348 -354
- [3] Hamada, S. Nakaoka, M. "Saturable reactor-assisted soft-switching asymmetrical PWM DC-DC converter with high-frequency transformer link" Electric Power Applications, IEEE, 1998, 79 -84
- [4] Yoshida, K.; Maeoka, T.; Ishii, T.; Ninomiya, T. "ZVS-PWM half-bridge converter using active current clamping with an auxiliary winding of a transformer", Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Volume: 2 , 1998 , Page(s): 942 -947 vol.2
- [5] Poon, F.N.K.; Pong, M.H.: "A constant power battery charger circuit with inherent soft switching and PFC" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Volume: 1 , 2000 , Page(s): 480 -484 vol.1