

두 개의 변압기를 이용한 소프트스위칭 방식의 하프브리지 DC-DC 컨버터

유두희, 박종문, 정강률
순천향대학교 전자정보공학과

Soft-switching Half-bridge DC-DC Converter Using the Two Transformers

Doo-Hee Yoo, Jong-Moon Park, Gang-Youl Jeong
SoonChunHyang University, Asan 336-745, Korea

ABSTRACT

본 논문은 소프트스위칭으로 동작하는 두 개의 변압기를 갖는 하프브리지 DC-DC 컨버터에 관한 것으로서, 종래의 중·대용량에 적용된 스위칭모드파워서플라이들의 단점을 개선하고, 특히 제안된 컨버터는 소프트스위칭 방식으로 동작함으로써 주 스위치의 전압/전류로 인한 스트레스를 최소화하여 시스템 전체 효율을 증가시킨다.

제안된 컨버터는 200W(25V/8A)의 프로토타입으로 제작/설계하였고 실험을 통해 컨버터의 성능을 증명한다.

1. 서 론

최근 들어, 산업전반에 사용되는 전기기기들의 용량이 증가하면서 전원을 공급하는 스위칭모드파워서플라이(Switching Mode Power Supply; SMPS)의 소형화와 높은 효율이 요구되고 있다. 이에 따라 많은 전력토폴로지들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 능동클램프 컨버터는 구조가 간단하지만 주 스위치의 영전압스위칭(Zero Voltage Switching; ZVS)동작이 힘든 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 자화전류를 늘려 ZVS 범위를 넓힐 수 있지만 그에 따른 스위치 도통손실이 커지는 단점이 있다. 또한 푸쉬-풀 컨버터는 제어와 설계가 용이하지만 입력전압의 두 배의 크기의 스위치 내압으로 스위치의 전압스트레스가 증가하여 대부분 낮은 입력전압에서만 사용된다. 또한 포워드-플라이백 컨버터는 출력전류의 리플을 줄일 수 있지만 여전히 출력인덕터를 사용해야하는 단점이 있으며, 풀브리지 컨버터는 변압기의 이용률이 높지만 스위칭소자 수가 많고 회로가 복잡하다는 단점이 있다^[1].

본 논문에서는 두 개의 변압기를 갖는 소프트스위칭 방식의 하프브리지 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 ZVS와 영전류스위칭(Zero Current Switching; ZCS)으로 동작하는 소프트(Soft) 스위칭 방식으로 스위칭 손실을 최소화하여 전체 효율을 증가시킨다. 최대출력용량 200W(25V/8A)의 프로토타입 컨버터를 설계/제작하였고 실험을 통해 컨버터의 성능을 증명하였다.

2. 제안된 컨버터의 동작원리와 해석

그림 1은 제안된 두 개의 변압기를 이용한 소프트스위칭 방식의 하프브리지 DC-DC 컨버터의 회로도이다. 전력반도

체스위치 Q_1 , Q_2 는 ZVS동작을 달성하기 위해 펄스폭 변조방식(Pulse Width Modulation; PWM)으로 동작한다. C_1 과 C_2 는 Q_1 , Q_2 의 기생캐패시터이며, D_1 과 D_2 는 Q_1 , Q_2 의 바디다이오드이다. L_{m1} , L_{m2} 는 각 변압기의 자화인덕터이며 L_r 은 공진인덕턴스로서 본 회로에서는 변압기의 누설인덕턴스를 이용하여 구조를 간략화한다. C_b 는 블로킹 커패시터이며 변압기 2차측의 정류다이오드 D_{o1} 과 D_{o2} , 평활커패시터 C_o 로 구성된다.

제안된 컨버터 해석에 앞서 회로의 해석을 용이하게 하기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 제안된 컨버터는 정상상태 동작을 하고 있다.
- 2) 스위칭 소자들은 이상적이다.
- 3) C_b , C_o 의 크기가 충분히 커서 각각의 전압 V_b 와 V_o 는 일정한 값을 갖는다.
- 4) C_1 , C_2 의 완전한 충/방전을 위해 L_r 에 충분한 에너지가 저장되어야 한다.
- 5) $N_1=N_{s1}/N_{p1}$, $N_2=N_{s2}/N_{p2}$ 이다. ($N_1=N_2$)

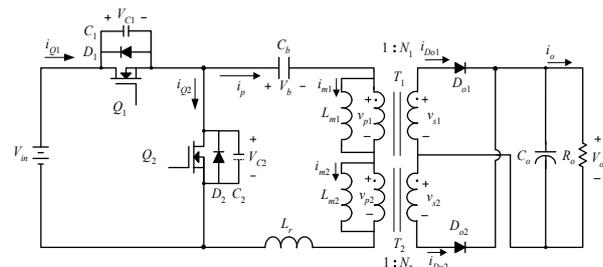


그림 1. 제안된 두 개의 변압기를 이용한 소프트스위칭 방식의 하프브리지 DC-DC 컨버터 회로도

Fig. 1 The circuit of the proposed soft-switching half-bridge DC-DC converter using the two transformers.

제안된 컨버터는 스위칭 반주기 동안에는 공진을 위한 공진 인덕터로 사용되고 나머지 스위칭 반주기 동안에는 에너지 전달을 위한 변압기로 사용되는 두 개의 변압기를 직렬로 연결하여 2차측 출력 인덕터가 필요 없는 구조를 보인다.

전압-시간 균형 법칙에 따라 커패시터 C_b 의 양단 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_b = DV_{in} \quad (1)$$

여기서, D 는 스위치의 통류율이다.

그림 2는 제안된 두 개의 변압기를 갖는 소프트스위칭 방식의 하프브리지 DC-DC 컨버터의 주요 동작 파형을 나타낸다.

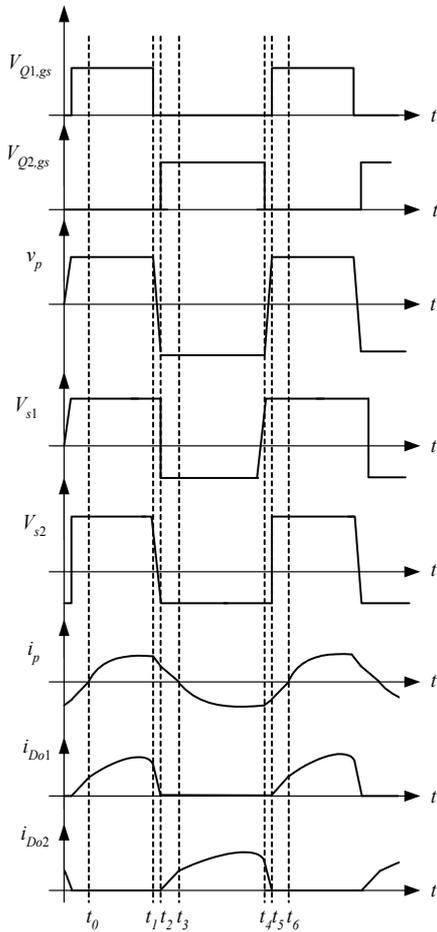


그림 2. 제안된 두 개의 변압기를 갖는 소프트스위칭 방식의 하프브리지 DC-DC 컨버터의 이론적인 주요파형
 Fig 2. The theoretical key waveforms of the proposed soft-switching half-bridge DC-DC converter using the two transformers

제안된 컨버터의 동작은 그림 3과 같이 6개의 모드가 있으며 각각의 모드 설명은 다음과 같다.

모드 1 ($t_0 \sim t_1$): t_0 에서 스위치 Q_1 이 1차측 전류 i_p 의 방향이 바뀌기 전에 턴온되어 ZVS 동작을 만족한다. 2차측 D_{o1} 은 턴온 상태를 유지하며, 변압기 T_1 은 1차측 에너지를 2차측으로 유도시키며 T_2 의 L_{m2} 는 인덕터와 같은 역할을 한다. 1차측 전류는 순방향으로 흐르며 다음과 같다.

$$i_p(t) = i_p(t) \cos \omega_r(t - t_0) + \frac{V_{in} - V_b(t_0) - NV_o}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (2)$$

여기서 $\omega_r = 2\pi f_r$ 이다.

모드 2 ($t_1 \sim t_2$): t_1 에서 Q_1 이 턴오프된다. 이구간은 데드타임 구간이다. 2차측 정류다이오드 D_{o1} 은 여전히 도통된 상태이다. i_p 를 통해 Q_1 의 기생커패시터 C_1 은 충전되며, Q_2 의 기생커패시터 C_2 는 방전이 된다. Q_2 의 스위칭 전압이 DV_{ds} 까지 감소한다. 2차측 V_{s2} 의 전압은 극성이 바뀌어 $-V_o$ 로 인가된다. 자화인덕턴스와 공진커패시터, 공진인덕턴스로 구성된 공진회로에 의해 공진한다. i_{Do1} 이 0으로 감소하면 모드가 종료된다.

$$V_{C1} \approx \frac{i_p(t_1)}{C_r}(t - t_1), \quad V_{C2} \approx V_{in} - \frac{i_p(t_1)}{C_r}(t - t_1) \quad (3)$$

모드 3 ($t_2 \sim t_3$): t_2 에서 T_2 의 에너지가 2차측으로 전달되고 변압기 턴비에 의한 출력전압 보다 커져 D_{o2} 가 턴온된다. 이 때 변압기 1차측 전류 i_p 는 다음과 같이 선형적으로 감소한다.

$$i_p(t) = -\frac{V_b - NV_o}{L_{m2}}(t - t_2) + i_p(t_2) \quad (3)$$

자화인덕턴스 L_{m1} 과 공진인덕턴스, 공진커패시터가 공진된다. 나머지 **모드 4~모드 6**의 동작은 **모드 1~모드 3**의 동작원리와 유사하다.

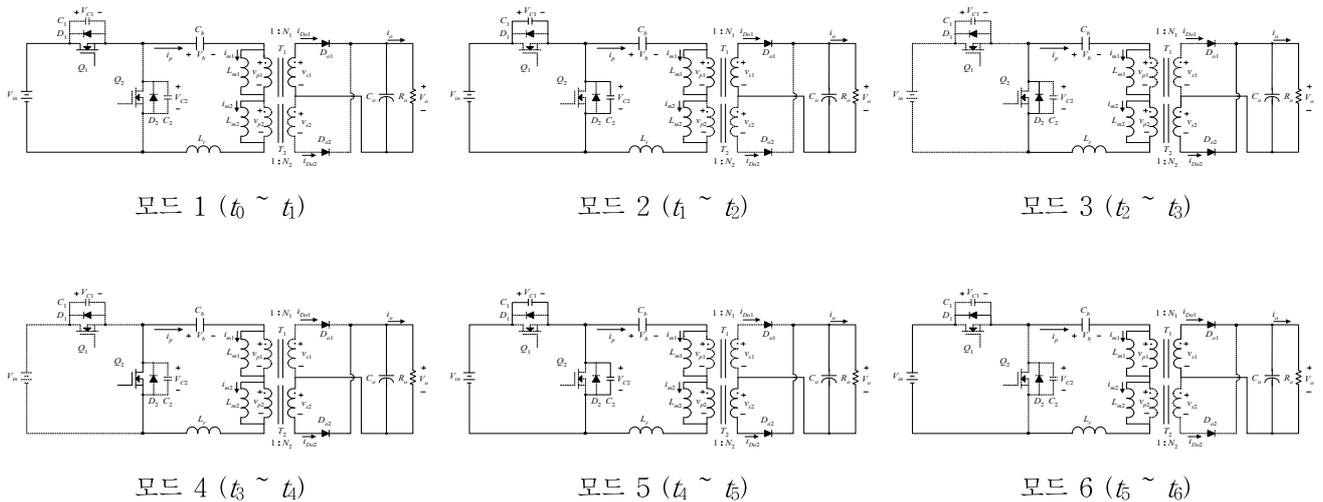


그림 3. 제안된 컨버터의 6개의 동작모드
 Fig 3. Six operating mode of the proposed converter.

3. 실험 결과

표 1과 같은 사양으로 프로토타입 컨버터를 설계하고 제작/실험하였다. 표 2는 설계회로 파라미터를 보인다. 그림 4는 Q_1 , Q_2 의 게이트-소스, 드레인-소스 전압과 스위칭 전류로 흐르는 전류를 보인다. 이 그림을 통해 스위치가 ZVS 동작을 만족함을 알 수 있다. 그림 5는 컨버터의 주요 부분의 실험파형을 보인다.

표 1 제안된 컨버터의 프로토타입 설계사양

Table 1. The prototype design specification of the proposed converter

항목	값
입력전압 V_{in}	380V _{DC}
출력전압 V_o	25V
최대출력전력 $P_{o,max}$	200W
스위칭 주파수 f_s	100kHz
공진 주파수 f_r	150kHz

표 2 제안된 컨버터의 설계회로 파라미터

Table 2. The selected circuit parameters of the proposed converter

항목	값
N_1, N_2	0.35
L_{m1}, L_{m2}	500uH
$L_r(L_{r1}+L_{r2})$	100uH
C_b	40nF
Deadtime	300ns

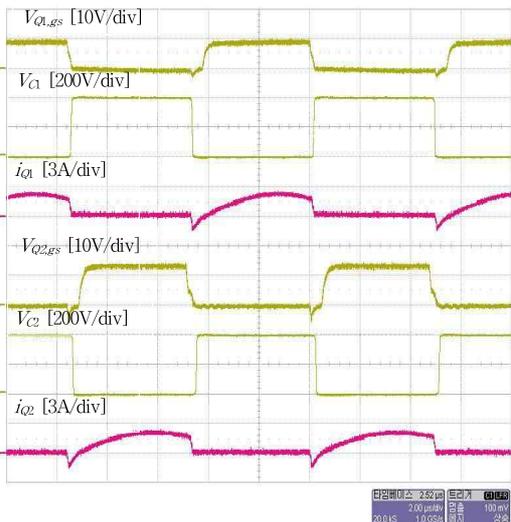


그림 4. 스위치 Q_1 , Q_2 의 게이트-소스, 드레인-소스 전압과 스위칭 전류 실험파형 (2us/div)

Fig. 4 The experimental waveforms of the gate-source, drain-source voltage and switching current of the Q_1 , Q_2 .(2us/div)

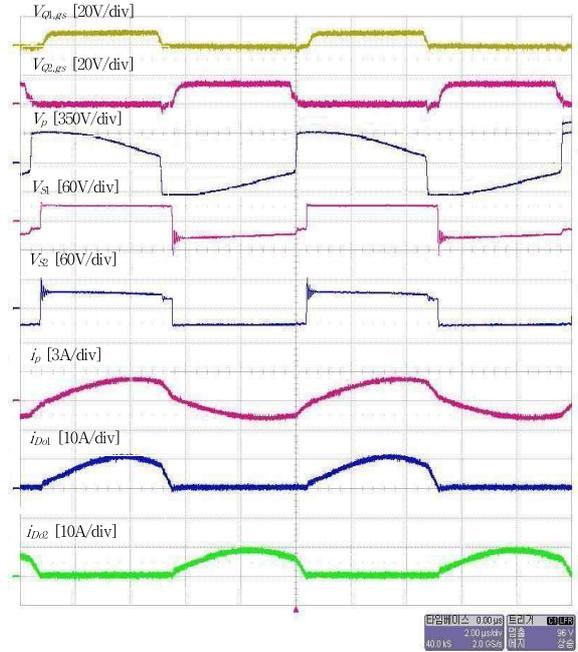


그림 5. 제안된 컨버터의 주요 부분의 실험파형 (2us/div)

Fig 5. The experimental waveforms of the key parts of the implemented converter.(2us/div)

4. 결 론

본 논문에서는 두 개의 변압기를 이용한 소프트스위칭 방식의 하프브리지 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 스위칭 주기에 따라 1차측 에너지를 2차측으로 전달시키는 변압기의 역할과 누설 인덕턴스와 같은 인덕터 역할을 하는 두 개의 변압기를 직렬로 연결하여 2차측 출력인덕터가 필요 없는 구조를 보이며, 소프트스위칭으로 주 스위칭의 전압/전류 스트레스를 최소화하여 전체효율을 증가시킨다. 또한 본 논문에서 제안한 200W(25V/8A)의 프로토타입 컨버터를 설계, 제작하였고 이론적 파형과 일치함을 보여 시스템의 성능을 증명하였다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] Miftakhutdinov, R. Nemchinov, A. Meleshin, V. Fraidlin, S., "Modified asymmetrical ZVS half-bridge DC-DC converter", Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 567-574, 1999, Mar.
- [2] Bor-Ren Lin, Huann-Keng Chiang, Chien-Chih Chen, "Analysis and Implementation of a ZVS-PWM Converter With Series-Connected Transformers", Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on, Vol. 54, No. 10, pp. 917-921, 2007, Oct.