

SMZ 하프브리지 컨버터의 공진특성 분석

연재율* 장도현
호서대학교 전기공학부

김희준
한양대학교 전자·컴퓨터 공학부

Analysis of resonant characteristics in Half-Bridge Converter using SMZ method

Jae-Eul Yeon* Do-Hyun Jang
Dept. of Electrical Engineering
Hoseo University

Hee-Jun Kim
School of Electrical engineering &
Computer Science
Hanyang University

Abstract - The SMZ half-bridge converter uses the resonance between the inductance of transformer and the resonant capacitances to transfer the input power to the load. In addition to this kind of characteristic of the converter, there are some features such as the capability of soft switching operation, a lower switching loss, and a higher power density in the converter. However in the low-voltage and high-output current applications of the converter, the extremely increased output ripple voltage prevents the converter from normal operation. In order to overcome the drawback of the converter, adding the output filter inductor to the converter, the converter shows the completely different resonant characteristics. In this paper, We analyzed the resonant characteristics of the SMZ converter with the output filter inductor and investigated what the analyzed results affect the converter operation. The experiment of a 150W prototype SMZ converter with 5V output and 310V input is carried out to verify the validity of the analyzed results.

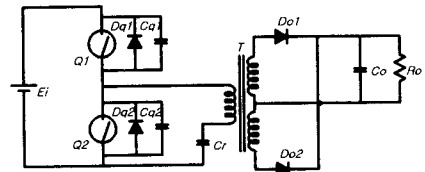
평활용 인덕터 필터를 삽입하였을 경우에 나타나는 특성을 분석하였으며, 이를 기존의 SMZ컨버터의 특성과 비교, 고찰하였다. 본 연구의 타당성을 입증하기 위해 입력 전압 310V, 출력전압 5V, 출력전류 30A의 150W급 컨버터를 제작하여 그 결과를 제시하였다.

2. SMZ 컨버터의 공진특성

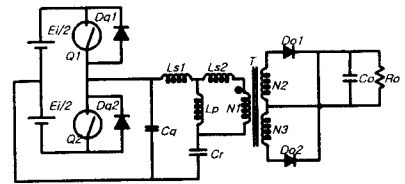
그림 1의(a)는 SMZ컨버터의 기본회로를 나타내고 있다. 두 개의 스위치 소자(Q_1, Q_2)와 전류 공진 커패시터(C_r)는 변압기(T)의 1차측에 연결되어 있으며, 정류다이오드(D_{o1}, D_{o2}) 및 평활용 커패시터는 변압기(T)의 2차측에 연결되어 있다. 그림 1의 (b)는 그림 1의 등가회로로써 변압기는 1차측 누설 인덕턴스(L_{s1}), 2차측 누설 인덕턴스 성분인 1차측 반영분(L_{s2}), 여자 인덕턴스(L_p) 그리고 이상변압기(T)로 나타낼 수 있으며, 커패시터(C_r)는 2개의 주스위치와 연결된 커패시터(C_{a1}, C_{a2})의 합성용량이 된다. 실제 회로에서 C_r 는 MOS-FET의 기생 커패시터만을 사용한다.^[1] 스위치 소자 Q_1 및 Q_2 는 각각 약 50%의 시비율로 교번으로 온, 오프를 반복하게 되며, 턴-온 시에는 ZVS 및 ZCS가 이루어지고, 턴-오프 시에는 ZVS만이 이루어지게 된다.^{[3],[11]}

1. 서 론

SMZ(Soft-switching Multi-resonant Zero-current-switch)방식의 하프브리지 컨버터는 변압기 여자 인덕턴스까지도 공진 요소로 포함시키는 개량된 형태의 직렬 공진형 컨버터이다. 2개의 스위치 소자를 사용해서 약 50%의 시비율로 교대로 온, 오프하는 주파수 제어방식의 컨버터로써, 스위치 소자의 병렬 커패시턴스를 이용해 스위치 양단의 전압기울기를 자유로이 설정할 수 있는 소프트 스위칭 회로이다. 주 회로의 부품수가 매우 적으면서도 변압기의 누설 인덕턴스에 저장되었던 에너지와 주스위치 및 변압기의 부유용량까지 모두 공진 회로에 포함 시켜 전원측으로 회생할 수 있는 특징으로 인해 효율이 매우 좋으며, 양산하였을 경우 효율의 분산도 매우 적다. 또한 턴-온, 턴-오프시 모두 소프트 스위칭을 할 수 있으므로 인해 컨버터의 방사 노이즈 또한 대단히 작은 장점을 지니고 있다. 그러나 SMZ컨버터에 있어서 변압기 2차측의 인덕턴스 성분은 1차측의 LC 공진 요소로 반영되는 현상이 발생하며, 이러한 특성으로 인해 기존의 SMZ컨버터에서는 출력측에 커패시터 필터만을 설치하거나, π 형 필터를 사용하는 경우가 많았다. 그런데, 출력측에 커패시터 필터만을 사용할 경우 SMZ 컨버터는 공진전류로 인해 출력전류가 증가할수록 출력 전압의 리플은 매우 커지게 되어 컨버터로써의 제 역할을 할 수가 없을 뿐만 아니라, π 형 필터를 적용할 경우에도 필터 1차측 커패시터는 높은 전류 스트레스로 받게 되어 출력전류는 극히 낮은 범위에서만 사용할 수 있는 한계가 있었다.^{[2],[3]} 본 논문에서는 이러한 SMZ컨버터에 있어서 출력전압의 리플을 저감시키기 위해 출력측에



(a) 기본회로



(b) 등가회로

그림 1. SMZ컨버터의 회로도

그림 2에 SMZ컨버터의 각 부분의 이론적 동작 파형을 나타낸다. 두 스위치가 동시에 off되는 dead time 구간에서 인덕턴스 L_{s1} , L_p 및 커패시턴스 C_r , $C_{a1}(C_{a2})$ 의 공진에 의해서 스위치 Q_1 의 역병렬 다이오드가 ON되어 스위치의 양단이 영전압 상태가 이루어지고 있는 동안 스위치를 턴-온 시킴으로써 영전압 스위칭이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 t_2 에서 t_4 까지의 구간은 스위치 Q_1 과 다이오드 D_{o1} 을 통하여 입력전압이 출력으로 전달

되는 구간으로서 이 때의 공진 요소는 L_{S1} , L_{S2} , L_P 및 C_r 이 된다. 그림 3에 $t_2 \sim t_3$, $t_3 \sim t_4$ 구간의 동작에 대한 등가회로를 나타낸다. 등가회로부터 공진 주파수는

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_r}} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } L_e = L_{S1} + \frac{L_P L_{S2}}{L_P + L_{S2}} \quad (2)$$

로 구할 수 있으며, 공진 주파수 f_r 이 스위칭 주파수 f_s 보다는 낮지만 거의 근접한 영역에서 동작하고 있음을 알 수 있다.

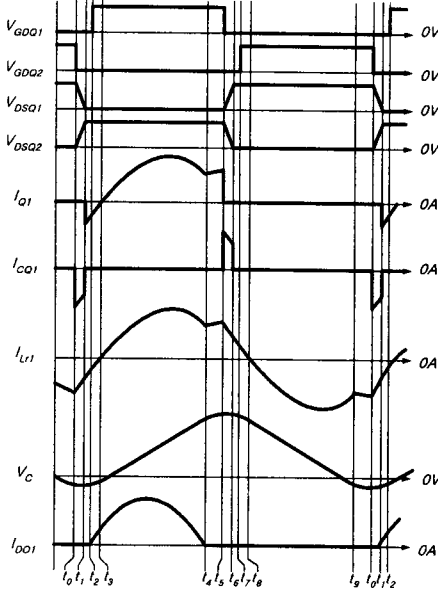
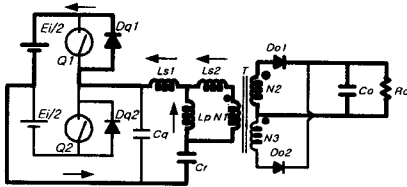
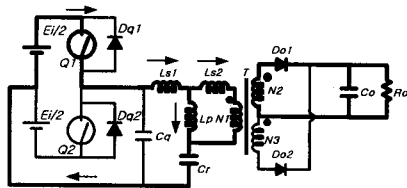


그림2. 각 부분의 이론적 동작파형



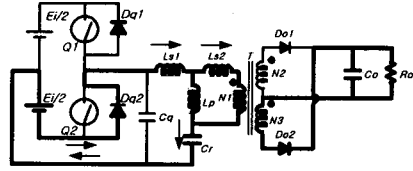
(a) $t_2 \sim t_3$



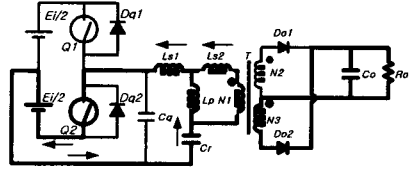
(b) $t_3 \sim t_4$

그림3. 전력전달 모드(1)

한편 또 다른 스위치 Q_2 에서의 영전압 스위칭 동작과 Q_2 및 다이오드 D_{02} 를 통한 입력전력의 출력 측으로의 전달도 $t_7 \sim t_8$ 까지의 구간에서 이루어지며, 앞서 설명한 $t_2 \sim t_4$ 까지 구간의 동작과 대칭적으로 동일한 동작을 보이며 그 등가회로를 그림 4에 나타낸다.



(a) $t_7 \sim t_8$



(b) $t_8 \sim t_9$

그림4. 전력전달 모드(2)

그림 2의 i_{D01} 의 파형과 그림 3 및 그림 4의 등가회로부터 한 주기 동안의 출력전류 i_o 는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

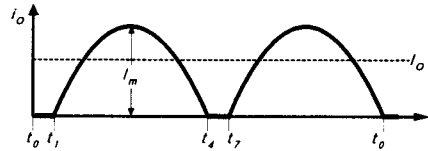


그림5. 출력전류의 파형

이 파형으로부터 $t_0 \sim t_1$, $t_4 \sim t_7$ 의 구간으로 주어지는 dead time을 무시한다면 I_O 를 출력전류의 평균치라고 가정할 때 출력전류의 피크치 즉, 출력전류의 리플 값은 근사적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_m = \frac{\pi}{2} I_O \quad (3)$$

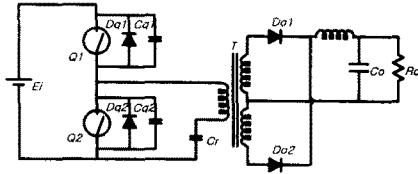
으로 구할 수 있다. 따라서 I_m 은 출력전류의 평균치 I_O 에 비해하고 있으며, 대용량 컨버터로써의 응용에 있어서 출력전압의 리플에 심각한 영향을 미치게 된다. 또한 이 영향을 완화시키기 위해서는 대용량의 커패시터를 사용해야 하므로 컨버터의 사이즈 증가의 한가지 원인으로 작용할 수 있음을 알 수 있다.

3. 출력측 인덕터 필터가 공진 특성에 미치는 영향

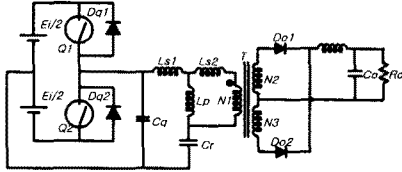
SMZ컨버터의 공진 특성으로 인하여 초래되는 출력 리플전압의 증대를 극복하기 위한 대책으로써 컨버터의 출력측에 인덕터 필터 L_r 를 추가한 경우의 회로도를 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서(a)는 기본회로, (b)는 등가회로를 나타낸다. 이 회로에 대한 각 부분의 이론적 동작 파형을 그림 7과 같이 나타낼 수 있으며, 이 파형을 보면 스위치에서의 영전압 스위칭은 매우 다른 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 식(2)로 주어지는 공진 요소의 L_e 에 L_r 를 1차측으로 환산한 $N^2 L_r$ 가 추가되므로써 공진 주파수 f_r 은 스위칭 주파수 f_s 보다 훨씬 낮은 영역에서 존재하고 있음을 알 수 있다.

$$L_e' = L_{S1} + \frac{L_P(L_{S2} + N^2 L_r)}{L_P + (L_{S2} + N^2 L_r)} \quad (4)$$

따라서 공진시 파형과 매우 다른 직선적인 파형을 나타내면서 거의 통상적인 영전압 스위칭 하프브리지 컨버터에서의 동작과 동일한 양상을 보이고 있다.



(a) 기본회로



(b) 등가회로

그림6. 출력측 인덕터 필터가 추가된 SMZ컨버터

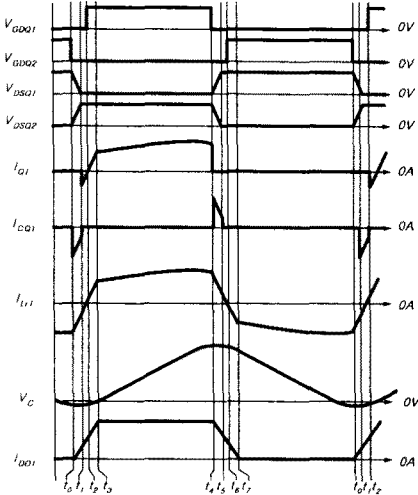


그림 7. 출력측 인덕터 필터에 의한 이론적 동작 파형

한편 앞서의 방법과 동일한 방법을 통해 그림 7의 파형으로부터 출력전류 I_o 의 파형을 구해보면 그림 8과 같이 된다.

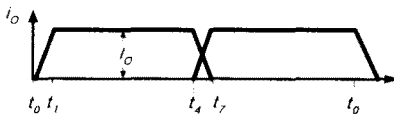


그림8. 출력전류의 파형

이 파형으로부터 $t_0 \sim t_1$ 및 $t_4 \sim t_5$ 로 주어지는 dead time을 무시할 경우 출력전류의 리플은 0이 된다. 따라서 출력 인덕터 필터 L_f 의 부가로 인한 출력전류의 리플 저감 효과는 $\frac{\pi}{2} I_o$ 가 되며, 이 효과는 대용량 컨버터 응용에 있어서 리플 저감의 효과를 극대화 할 수 있을 것이다.

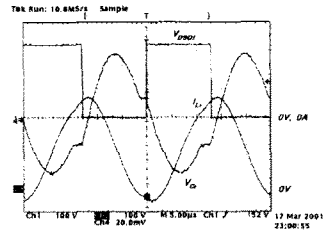
4. 실험결과

본 연구 결과를 입증하기 위해 SMZ 컨버터를 실험하였다. 출력 필터 인덕터 L_f 가 공진 특성에 미치는 영향을 입증하기 위해 우선 SMZ 컨버터를 실험하고, 다음이 컨버터에 L_f 를 추가하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 컨버터의 전기적 사양과 각 소자의 값은 표 1에 정리하여 나타냈다.

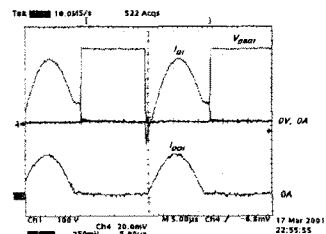
표1. 컨버터의 사양과 소자값

출력전력	150 [W]
입력전압	310 [V_{DC}]
출력전압	5 [V_{DC}]
출력전류 범위	0~30 [A]
변압기 여자 인덕턴스 (L_p)	4.8 [mH]
변압기 1차측 누설 인덕턴스 (L_{S1})	42 [nH]
변압기 2차측 평활용 인덕터 (L_f)	30 [μ H]
전압 공진 커패시터 (C_r)	25 [nF]
변압기 권수비 (M)	32

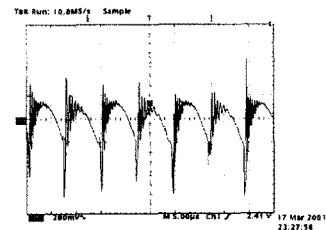
그림 9는 L_f 가 없는 SMZ컨버터의 실험 파형을 나타내고 있다. 이론적인 해석 결과와 좋은 일치율을 보여주고 있으며, 특히 그림 9(c)의 출력전압의 리플은 dead time과 surge노이즈를 무시하고도 약 400mV로 측정되어 8%의 높은 리플률을 나타내고 있다. 한편 그림 10은 L_f 를 부가한 경우로 $f_s = 54\text{kHz}$, $I_o = 30\text{A}$ 의 조건에서 구한 실험 파형을 나타낸다. 이 역시 이론적인 해석결과와 좋은 일치율을 보여주고 있다. 그림10(c)의 출력전압 리플은 dead time과 surge노이즈를 무시한 경우 약 20mV로써 0.4%의 매우 낮은 리플률을 나타낸다. 그림 11은 측정효율을 비교한 결과를 보여주며, 두 경우 모두 약 88%의 최대효율을 보임으로써 거의 동일한 특성을 나타내고 있다.



(a) 공진전류, 스위치 전압, 공진 커패시터 전압

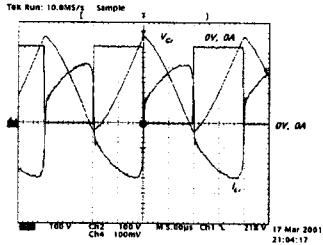


(b) 스위치 전압, 스위치 전류, 출력측 다이오드의 전류

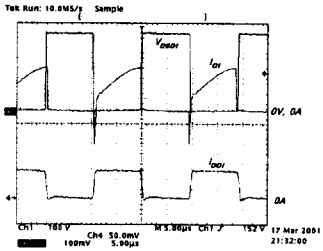


(c) 출력전압의 리플

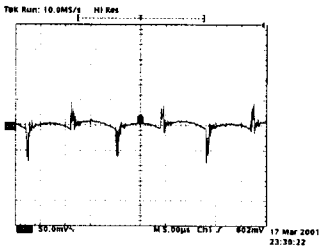
그림9. SMZ컨버터의 실험 파형



(a) 공진 전류, 스위치 전압, 공진 커패시터 전압



(b) 스위치 전압, 스위치 전류, 출력측 다이오드의 전류



(c) 출력전압의 리플

그림10. L_f 가 부가된 SMZ컨버터의 실험 파형

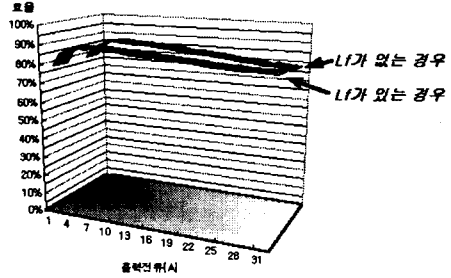


그림11. 측정효율 비교

5. 결 론

본 연구를 통해 SMZ 컨버터의 공진 특성을 분석하였으며, 그 공진 특성으로 인하여 출력전류의 리플치가 출력전류의 평균치에 비례하여 증대된다는 점을 밝혔다. 또한 이를 극복하기 위하여 출력필터 인덕터를 부가하였을 경우 공진 특성을 분석하였고 이 공진 특성으로 인하여 출력전류의 리플치는 0이 된다는 점도 밝혔다.

모든 해석의 결과는 입력전압310V, 출력전압 5V, 출력전력 150W의 Prototype SMZ 컨버터의 실험을 통하여 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Morita, K, "Novel Ultra Low-noise soft switch-mode Power supply" INTELEC1998, pp115-122, 1999
- [2] Furukawa, Y, Morita, K, Yoshikawa, T, "A High Efficiency 105W DC/DC Converter", INTELEC94, pp148-154, 1994
- [3] Furukoshi, R, Hoshino, M, Greenland, P, "an Application-Specific Hybrid IC for the Current Resonant(SMZ) Converter", Internal Symposium on Power-Semiconductor Devices & ICs, Kyoto, 403-407, 1998