

보조 스위치를 사용한 ZVS Two-Switch 포워드 컨버터에 대한 연구

정민혁*, 김용*, 엄태민**, 이규훈***, 이동현**
 동국대학교*, 티엠에스 아이엔씨**, 스마트비전텍***

A Study of ZVS Two-Switch Forward Converter Using Auxiliary Switch

Min-Hyuk Jung*, Yong Kim*, Tae-Min Um**, Kyu-Hun Lee***, Dong-Hyun Lee**
 Dongguk University*, TMS INC**, Smart Vision Tec***

Abstract - In this paper, a new soft-switching Two-switch Forward converter topology has been proposed. Compared with conventional two-switch forward converter, the proposed converter employs an auxiliary switch and a clamp capacitor to instead of two reset diodes, not only its duty cycle can exceed 0.5 to achieve wide range input voltage, but also soft switching can be achieved for all switches. Especially, voltage stress across main switches can be clamped at $1/2V_{in}$, voltage stress across auxiliary switch can be clamped at V_{in} . In addition, due to clamp capacitor series with the transformer, duty ratio can be extended with equation $V_o = \frac{V_{in}(1-D)D}{N}$. Therefore, as a kind of better cost-effective approach, it is very attractive for high input, wide range and high efficiency application.

있을 정도로 충분히 커야 하며, 변압기의 자화 인덕턴스 L_m 은 누설 인덕턴스 L_l 보다 커야 한다.

1. 서 론

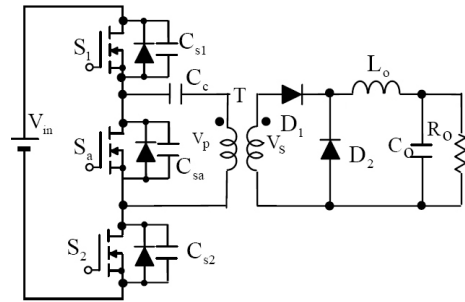
예전의 Single-Switch 포워드 컨버터는 간단한 구조와 낮은 가격이라는 장점 때문에 널리 사용되어 왔다 [1]. 하지만 스위치의 높은 스트레스 전압이라는 단점이 있기 때문에 이 점을 극복하기 위해 Two-Switch 포워드 컨버터가 제안되었고 이 컨버터를 Single-Switch 포워드 컨버터와 비교해보면 다음과 같은 특징이 있다. 변압기의 자화 에너지는 입력전압으로 회귀되어 효율을 높이고 EMI를 줄여주며, 스위치의 내압이 반으로 줄어드는 점이다. [2-3]. 그러나 Two-Switch 포워드 컨버터는 최대 Duty비가 0.5를 넘지 못하는 점과 Hard 스위칭이 이루어진다는 점, 큰 용량의 펄터 인덕터가 필요하다는 큰 단점을 지니고 있다. 이와 같은 이유로, Two-Switch 포워드 컨버터는 넓은 입력 전압 범위에서는 널리 사용되지 못했다. 이런 문제들을 해결하기 위해 많은 방법들이 제안되었다 [4-8]. 하지만, 이러한 방법들은 스위치 양단에 걸리는 전압이 거의 대부분 입력전압과 비슷하거나 오히려 높았고 특히 RCD(Resistor, Capacitor, Diode) 클램프 회로는 효율을 줄이기도 했다.

이 논문은 기존 두 개의 다이오드 대신 하나의 보조 스위치와 클램프 커패시터를 사용한 새로운 Soft-Switching Two-Switch 포워드 컨버터를 소개한다. 기존의 Two-Switch 포워드 컨버터와 비교해 보면, Duty비가 0.5를 넘기 때문에 넓은 입력 전압 범위에서의 사용이 가능하고 모든 스위치에 대하여 Soft-Switching이 가능하다. 제안된 컨버터에서 주 스위치 양단에 걸리는 전압 스트레스가 $1/2V_{in}$ 로 고정되고, 보조 스위치 양단에 걸리는 전압 스트레스는 V_{in} 로 고정된다. 출력전압은 $V_o = \frac{V_{in}(1-D)D}{N}$ 로 구해질 수 있고 여기서, D는 주 스위치의 Duty 비이다.

2. 본 론

2.1 회로 동작

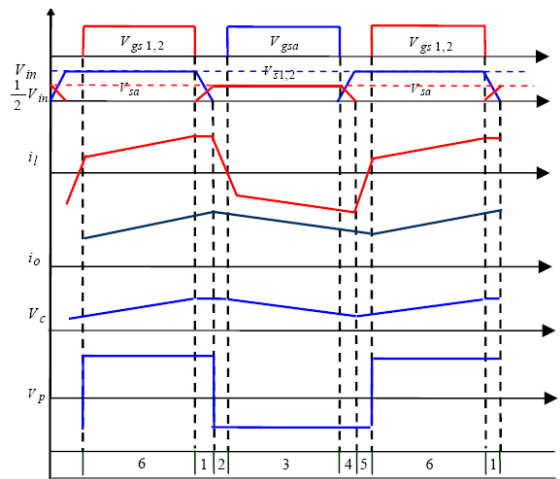
제안된 컨버터의 회로도가 그림 1에 나타나 있다. 이 제안된 컨버터는 주 스위치 S_1, S_2 와 주 스위치의 기생 커패시터 C_{S1}, C_{S2} , 보조 스위치 S_a 와 보조 스위치의 기생 커패시터 C_{Sa} , 클램프 커패시터 C_c , 변압기 T, 변압기의 누설 인덕턴스 L_l , 자화 인덕턴스 L_m , 정류 다이오드 D_1 , 환류 다이오드 D_2 , 출력 필터 인덕터 L_o , 출력 필터 커패시터 C_o , 그리고 부하인 R_o 로 이루어져 있다. 여기서 C_c 는 변압기 T의 1차 측 직렬로 연결되어 있고 주 스위치 S_1, S_2 는 변압기 T와 클램프 커패시터 C_c 에 병렬로 연결되어 있으며 보조 스위치 S_a 는 S_1, S_2 사이에 연결되어 있다. 동작해석을 간단히 하기 위해서, 모든 소자는 이상적인 소자로 여겨져야 되고 출력 필터 인덕터 L_o 는 일정한 출력전류 I_o 를 위해 충분히 커야 하며, 클램프 커패시터 C_c 는 커패시터 양단에 걸리는 리플을 무시할 수



<그림 1> 제안된 Two-Transistor 포워드 컨버터

2.2 동작 모드 해석

제안된 컨버터의 한 번의 스위칭 주기는 아래의 그림과 같이 여섯 개의 동작 모드로 나눌 수 있다. 아래 그림 2에 여섯 모드와 몇몇 중요한 파형을 나타내었고 각 모드의 자세한 설명은 아래의 설명과 같다.



<그림 2> 제안된 컨버터의 중요 파형들

Mode (1) [t_0-t_1] : 이 모드동안, 주 스위치 S_1, S_2 는 t_0 때 동시에 턴 오프 되고 정류 다이오드 D_1 은 온 상태를 유지한다. 자화 인덕턴스 전류 I_m 과 1차측으로 반사된 출력 전류 nI_o 는 $C_{S1}, C_{S2}, C_{Sa}, C_c$ 와 공진을 이룬다. 해석을 간단히 하기 위해, C_c 양단에 걸리는 전압을 V_c 라고 하면, 이 기간 동안, C_{S1}, C_{S2}, C_{Sa} 는 공진을 거치면서 충전 및 방전을 한다. 주 스위치 내압 V_{S1}, V_{S2} 가 급격히 상승하고 보조 스위치 내압 V_{Sa} 는 하강해 t_1 때는 0이 된다. V_{S1}, V_{S2} 가 입력전압을 나누기 때문에 둘 다 $1/2V_{in}$ 로 같아진다. 이를 표현하는 식은 아래와 같다.

$$V_{in} = V_{S1} + V_{S2} + V_{Sa} \tag{1}$$

$$V_{Sa} = V_c + L_m \frac{dI_m}{dt} \tag{2}$$

$$C_{S1} \frac{dV_{S1}}{dt} = C_{S2} \frac{dV_{S2}}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dV_{S1}}{dt} + \frac{dV_{S2}}{dt} = -\frac{dV_{Sa}}{dt} \quad (4)$$

$$C_{S1} \frac{dV_{S1}}{dt} - C_{Sa} \frac{dV_{Sa}}{dt} = I_m + nI_o \quad (5)$$

Mode (2) [t_1-t_2] : $t = t_1$ 일 때, 스위치 내압 V_{Sa} 은 0으로 떨어지고, 보조 스위치 S_a 에 역병렬로 결합된 D_{Sa} 은 턴 온 되고, 정류 다이오드 D_1 는 턴 오프 된다. 자화 전류 I_m 는 V_C 에 의해 선형적으로 증가한다. $t = t_2$ 일 때, 보조 스위치 S_a 는 ZVS를 하기 위해 반드시 게이트 신호가 인가되어야 한다. 자화 전류 I_m 의 식은 아래와 같다.

$$I_m = I_m(t_1) - \frac{V_C}{L_m}(t - t_1) \quad (6)$$

Mode (3) [t_2-t_3] : $t = t_2$ 일 때, 보조 스위치 S_a 는 ZVS 상태로 턴 온 되고, 자화 인덕턴스 L_m 은 클램프 커패시터 C_c 와 공진을 이루고 있다. 이 기간 동안, I_m 은 방향을 바꾸기 시작하고 I_m 의 식은 아래와 같다.

$$I_m = I_m(t_2) - \frac{V_C}{L_m}(t - t_2) \quad (7)$$

Mode (4) [t_3-t_4] : $t = t_3$ 일 때, 보조 스위치 S_a 는 턴 오프 된다. L_m 은 C_{S1} , C_{S2} , C_{Sa} , C_c 와 다시 공진을 이루고 이 기간 동안, C_{Sa} 는 충전되고 C_{S1} , C_{S2} 는 방전된다. V_{S1} , V_{S2} 가 0으로 떨어질 때, V_{Sa} 는 V_{in} 까지 상승한다. 이를 표현하는 식은 아래와 같다.

$$V_{in} = V_{S1} + V_{S2} + V_{Sa} \quad (8)$$

$$V_{Sa} = V_C + L_m \frac{dI_m}{dt} \quad (9)$$

$$C_{S1} \frac{dV_{S1}}{dt} = C_{S2} \frac{dV_{S2}}{dt} \quad (10)$$

$$\frac{dV_{S1}}{dt} + \frac{dV_{S2}}{dt} = -\frac{dV_{Sa}}{dt} \quad (11)$$

$$C_{S1} \frac{dV_{S1}}{dt} - C_{Sa} \frac{dV_{Sa}}{dt} = I_m \quad (12)$$

Mode (5) [t_4-t_5] : $t = t_4$ 일 때, V_{S1} , V_{S2} 는 0으로 떨어지고, 스위치에 역병렬로 연결된 D_{S1} , D_{S2} 는 턴 온 됴므로서 S_1 , S_2 는 ZVS가 가능하다.

Mode (6) [t_5-t_6] : $t = t_5$ 일 때, S_1 , S_2 는 ZVS 상태에서 턴 온 되고, 정류 다이오드 D_1 도 턴 온 된다. 이 기간 동안 자화 인덕턴스 전류 I_m 은 $(V_{in} - V_C)$ 에 의해 선형적으로 증가하고 식은 아래와 같다.

$$I_m = I_m(t_5) - \frac{V_{in} - V_C}{L_m}(t - t_5) \quad (13)$$

2.3 시뮬레이션 결과

위에서 설명된 제안된 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 PSIM을 이용해 스위칭 주파수 100[kHz]에서 실험하였고, 시뮬레이션의 결과로 부하전류가 10A, 1A일 때의 주 스위치 S_1 , S_2 의 V_{ds} , V_{gs} 와 변압기의 1차측 전압 V_p 와 필터 인덕터에 흐르는 전류 $I(L_{filter})$ 를 그림 3, 4, 5, 6에 각각 나타내었다. 그림 3과 그림 5를 살펴보면 여러 상태에 부하에 대해서도 모든 스위치가 ZVS로 턴 온 한다는 것을 알 수 있다.

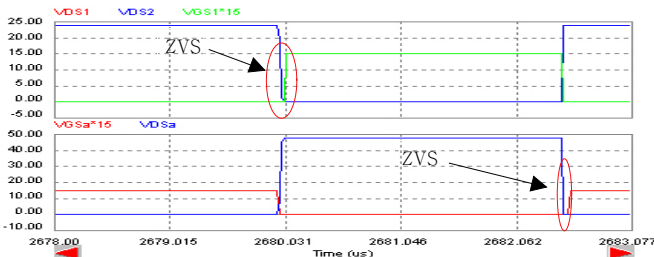


그림 3> 양 스위치의 V_{ds} , V_{gs}

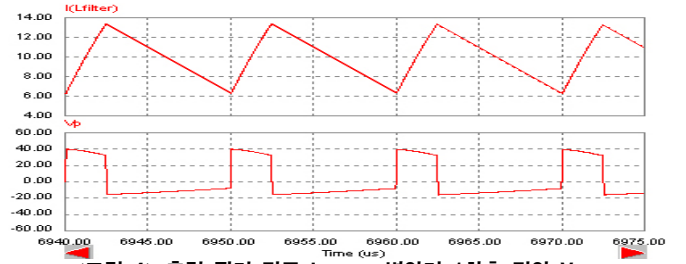


그림 4> 출력 필터 전류 $I(L_{filter})$, 변압기 1차측 전압 V_p

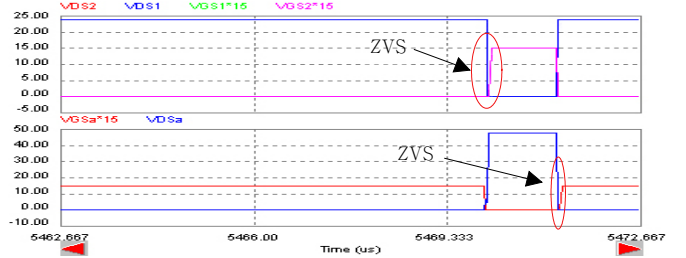


그림 5> 양 스위치의 V_{ds} , V_{gs}

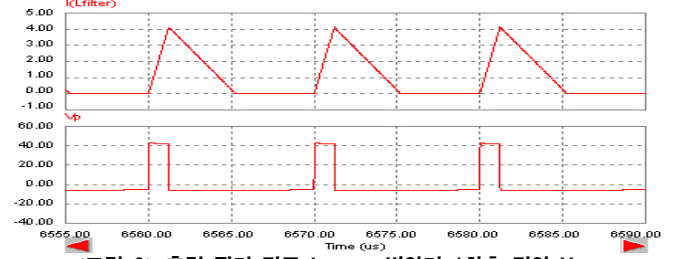


그림 6> 출력 필터 전류 $I(L_{filter})$, 변압기 1차측 전압 V_p

3. 결 론

이 논문에서 제안된 Soft-Switching Two-Switch 포워드 컨버터는 위에서의 동작모드 해석과 시뮬레이션 결과로 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 주 스위치 양단에 걸리는 전압 스트레스를 $1/2V_{in}$ 로 고정할 수 있고, 보조 스위치 양단에 걸리는 전압 스트레스를 V_{in} 로 고정할 수 있다.
2. 50%이상의 Duty비가 가능하다.
3. 모든 스위치가 ZVS로 턴 온이 가능하다.
4. 낮은 출력 전압을 얻을 수 있다.

그러므로, 비용적인 측면에서 볼 때, 높은 입력, 넓은 입력 전압 범위, 고효율 응용에서 제안된 Soft-Switching Two-Switch 포워드 컨버터는 활용가치가 매우 높을 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tan F.D, "The Forward converter : from the classic to the contemporary", IEEE APEC'02, pp857-863.
- [2] C.Treviso, A.Pereira, V.Farias, J.B. Viera and L.Freitas, "A 1.5KW Operation with 90% Efficiency of a Two Transistors Forward Converter with non-dissipative snubber", IEEE PESC'98, pp696-700.
- [3] M.Chen, D.Xu and M.Matsui, "Study on Magnetizing Inductance of High Frequency Transformers in the Two-Transistors Forward Converter", IEEE PCC-Osaka 2002, pp597-602.
- [4] J.Xu, X.Cao and Q.Luo, " An Improved Two-Transistors Forward Converter", IEEE PED'99, pp225-228.
- [5] Y.Gu, X.Gu, L.Hang, Z.Lu and Z.Qian, "Improved Wide Range Dual Switch Flyback DC/DC Converter", IEEE APEC'04, CD-ROM.
- [6] X.Gu, Y.Gu, L.Hang, X.Wu and Z.Lu, "A Novel ZVS Resonant Reset Dual Switch Forward DC/DC Converter", IEEE PESC'04, pp2708-2712.
- [7] Y.Gu, X.Gu, L.Hang, Y.Du, Z.Lu and Z.Qian, "RCD Reset Dual Switch Forward DC/DC Converter", IEEE PEDC'04, pp1465-1469.
- [8] Y.D.We, X.H.Wu, Y.L.Gu and H.Ma. "Wide Range Dual Switch Forward-Flyback Converters with symmetrical RCD Clamp", IEEE PESC'05, pp420-424.