배전압 셀을 이용한 비절연형 소프트스위칭 고승압 컨버터 최적 설계

이상혁, 최세완
서울과학기술대학교

Optimal Design of Non-isolated Soft-switching High Step-up Converter Using Voltage Multiplier Cells

Sanghyuk Lee, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 배전압셀을 이용한 비절연 고승압 컨버터의 최적설계기법을 제안한다. 제안한 컨버터는 배전압셀 수를 적절히 선정하여 소자의 전압정격을 줄일 수 있으며 작은 듀티로도 높은 승압비를 얻을 수 있다. 제안한 컨버터의 ZVS 영역 분석, 주요 수동소자 설계를 통하여 모든 스위치의 ZVS 턴온을 달성시킬 수 있는 설계기법을 제시한다. 1kW급 시작품으로 제안한 설계기법의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 태양광 전력변환장치, 직류전원 백업을 위한 무정전 전원장치, 자동차 HID 램프 등 응용분야에서 고승압을 갖는 비절연형 DC DC 컨버터에 대한 필요성이 증대되고 있다. 이와같이 높은 승압비가 요구되는 경우 일반 부스트 컨버터로는 듀티가 매우 커져 스위치 및 다이오드의 전압 및 전류 스트레스가 커지고 다이오드 역방향 회복 특성에 의한 문제로 고승압 달성이 어렵다. 따라서 작은 듀티로도 높은 승압비를 갖는 고승압 컨버터가 제안되었는데, 인덕터를 커플링한 방식[1-3]은 승압비가 커지면 소자의 전압과 전류 스트레스가 커지고, 입력전류 리플도 커져 수동소자의 부피가 커지는 단점이 있다. 변압기 없이 작은 듀티로 큰 승압비를 얻을 수 있는 고승압 컨버터[4] 는 인터리빙으로 입력전류 리플이 작고 배전압 셀 수를 적절히 조절하여 소자 선정이 용이해지는 장점이 있다. 또한 모든 스위치의 ZVS 턴 온과 다이오드 ZCS 턴 오프가 가능하여 스위칭 주파수를 높일 수 있다.

본 논문에서는 이 고승압 컨버터의 ZVS 영역 분석, 주요 수동소자 설계를 통하여 모든 스위치의 ZVS 턴온을 달성시킬 수 있는 설계기법을 제시한다.

2. 배전압셀을 이용한 비절연형 소프트스위칭 고승압 컨버터 최적설계

그림 1은 배전압셀을 이용한 비절연형 소프트스위칭 고승압 컨버터 회로를 나타낸다. 제안한 컨버터는 D=0.5에서 약 4배로 승압되는 특징이 있다. 그림 2는 제안한 컨버터의 동작 파형이며, 메인스위치와 클램프스위치의 파형을 보면 필터인덕터($L_{1,2}$) 전류와 보조인덕터(L_A)의 전류에 의해 ZVS가 성취되는 것을 확인할 수 있다. 메인스위치의 ZVS 전류는 보조인덕터 전류 피크값과 필터인덕터 전류 최소값의 차로 나오고, 클램프스위치의 ZVS 전류는 필터인덕터 전류 최대값으로 나온다. 메인스위치와 클램프스위치 ZVS 전류를 구해보면 다음과 같다.

$$I_{SM,ZVS} = I_{LA,pk} - I_{L,\min} = I_{LA,pk} - (I_{L,av} - \frac{\Delta I_L}{2})$$
$$= \frac{V_{CC} + V_{CA} - V_O}{L_A \cdot f_S}(1-D) - (\frac{P_o}{2V_i} - \frac{V_i \cdot D}{2 \cdot L \cdot f_S}) \quad (1)$$

$$I_{SC,ZVS} = I_{L,\max} = I_{L,av} + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{P_o}{2V_i} + \frac{V_i \cdot D}{2 \cdot L \cdot f_S} \quad (2)$$

여기서 $L = L_1 = L_2$이다. 스위치가 ZVS 턴 온 하려면 다음 조건을 만족해야 한다

$$\frac{1}{2} L_A \cdot I_{SM,ZVS}^2 > \frac{1}{2} C_{os,tot} \left(\frac{V_i}{1-D} \right)^2 \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} L \cdot I_{SC,ZVS}^2 > \frac{1}{2} C_{os,tot} \left(\frac{V_i}{1-D} \right)^2 \quad (4)$$

여기서 $C_{os,tot}$는 스위치 내부 커패시턴스 값이다. 위 식들을 이용해서 ZVS 영역을 그래프로 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3(a)는 메인스위치의 ZVS 범위를 나타내며 그림 3(b)는 클램프

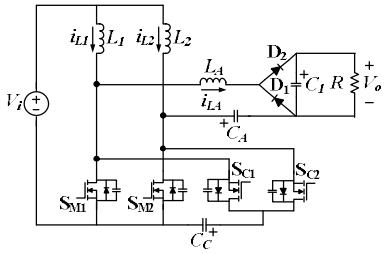


그림 1 제안한 비절연형 소프트스위칭 고승압 컨버터

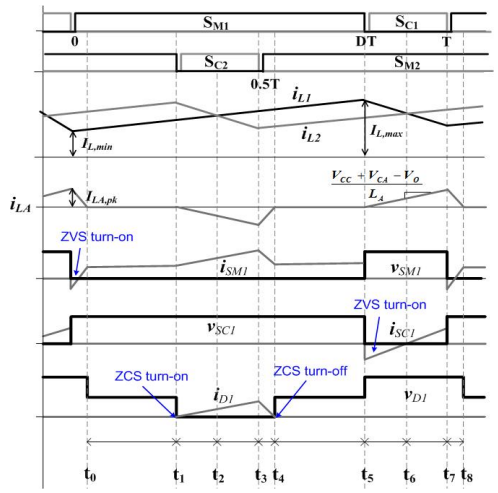
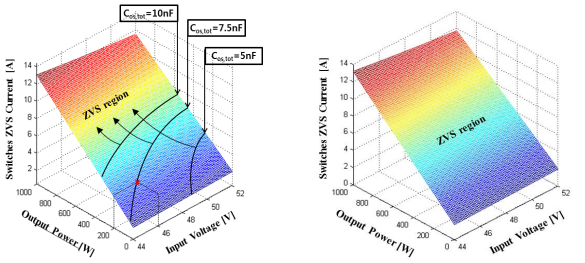


그림 2 제안한 컨버터의 동작 파형



(a) 메인스위치 (b) 클램프스위치

그림 3. 입력전압과 파워 변화에 따른 메인스위치와 클램프스위치의 ZVS 전류와 ZVS 영역 (L=520uH, L_A=6.5uH, f_S=50kHz)

스위치의 ZVS 범위를 나타낸다.

ZVS 영역을 구해보면 알 수 있듯이, 제안한 컨버터에서 L_A는 가장 중요한 설계소자이다. 클램프스위치는 $i_{L,max}$로 ZVS전류가 결정되므로 모든 부하에서 ZVS가 가능하지만, 메인스위치는 $i_{LA,pk}$ $i_{L,min}$값에 따라 ZVS 여부가 결정된다.

위 식(3)에 식(1)을 대입하여 L_A를 구하는 식으로 정리하면 L_A 최소조건을 구할 수 있는 식(5)가 나온다. 예를들어 다음의 사양으로 설계시 400W 이상에서 메인스위치가 ZVS 턴 온이 되게 L_A를 설계해 보자. V_i = 48V, V_o= 380V, L = 520uH, $C_{os,tot}$ = 7.5nF, f_s = 50kHz인 조건에서 L_A 최소조건을 구하게 되면 L_A는 5.87uH이 나오고 이 값보다 크게 L_A를 설계하면 400W 이상에서 메인스위치는 ZVS 턴 온이 된다.

L_A 최대조건은 스위치 전압을 일정전압 이상 넘지 않도록 제한하여 구할 수 있다. 제안한 컨버터의 스위치 전압 정격은 $V_i/(1-D)$이며, 스위치 전압 정격이 220V가 넘지 않도록 제한하면 $D < 0.78$이 나온다. D = 0.78을 제안한 컨버터의 전압전달비 식(6)에 대입하여 L_A를 구하는 식으로 정리하면 L_A < 14.88uH라는 최대조건이 나온다.

$$\frac{V_o}{V_i}=\frac{D-1+\sqrt{(1-D)^2+16k}}{4k} \quad , \; D>0.5, \quad k=\frac{L_A \cdot f_s}{R} \qquad (6)$$

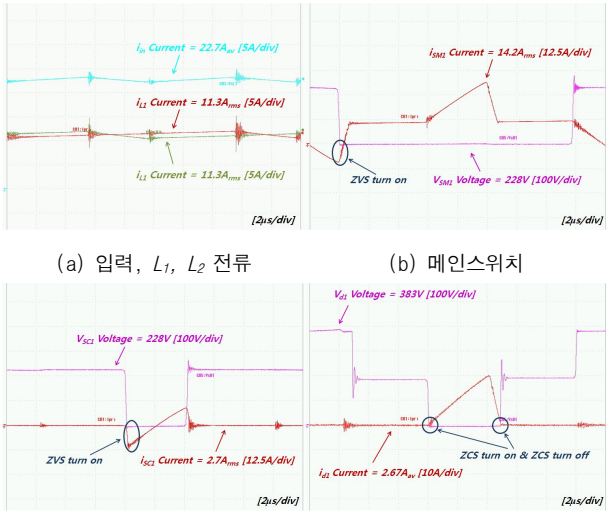
최소, 최대조건을 이용하면 5.87uH < L_A < 14.88uH라는 L_A 값 범위를 구할 수 있다. 이 때 L_A값이 커질수록 일정 출력전압을 내기 위한 듀티는 커지며, 듀티가 커질수록 스위치 전압정격은 높아지는 단점이 있으므로 범위 내에서 최소가 되는 L_A값을 선정하는 것이 좋다. 그래서 본 논문에서는 L_A = 6.5uH로 선정하였다.

3. 실험 결과

제안한 컨버터의 타당성을 입증하기 위해 다음의 설계사양으로 제작한 후 실험파형을 그림 4에 나타낸다.

P_o = 1kW V_i = 48V V_o = 380V f_s = 50kHz $L_{1,2}$ = 520uH
L_A = 6.5uH C_C = 3uF C_A = 9uF C_1 = 6uF

그림 4는 소프트스위칭 고승압 컨버터의 실험파형이다. 그림 4(a)는 입력전류의 인터리빙 효과를 보여주며 그림 4(b),(c)는 메인스위치와 클램프스위치가 각각 ZVS 턴 온 되는 것을 보여주며 그림 4(d)는 다이오드가 ZCS 턴 오프 되는 것을 보여준다. 그림 5은 제안한 컨버터의 실험 효율 그래프이다. 제안한 컨버터는 전 부하 영역에서 93.4% 이상의 효율을 보이며, 400W에서 최고 효율 97.4%가 측정되었다.



(a) 입력, L_1, L_2 전류 (b) 메인스위치

(c) 클램프스위치 (d) 다이오드

그림 4 제안한 컨버터의 실험파형

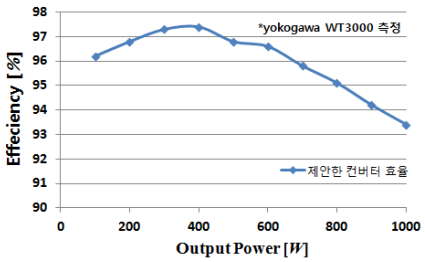


그림 5 측정 효율

4. 결 론

본 논문에서는 제안한 컨버터의 ZVS 영역 분석, 주요 수동소자 설계를 통하여 원하는 부하영역에서 모든 스위치의 ZVS 턴온을 달성시킬 수 있는 설계기법을 제시한다. 보조 인덕터는 제안한 컨버터의 효율을 결정하는 중요한 소자이므로 이론적 설계가 필요하다. 보조 인덕터 설계과정을 수식적인 유도로 증명하였으며, 실험을 통해 메인스위치와 클램프스위치 모두 계산된 영역에서 ZVS 턴 온이 성취되는 것을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] Q. Zhao, Fred C. Lee, "High Performance Coupled Inductor DC DC Converter", in Proc. IEEE APEC, pp.109 113, Feb. 9 13, 2003.

[2] Luo. F.L, Ye. H, "Positive Output Cascade Boost Converters", IEE Trans. Electric Power Applications, Vol. 151, No.5, pp.590 606, Sept. 2004.

[3] Prudente. M, Pfitscher. L, Bules. R, "Voltage Multiplier Cells Applied to Non Isolated DC DC Converters", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 23, pp. 871 887, March. 2008

[4] 이상혁, 최세완, 김표수, "배전압 셀을 이용한 비절연형 고승압 컨버터", 전력전자학술대회 논문집, pp. 19 20. 2011. 7.

$$L_A > \frac{V_i \cdot L \cdot [(P_O \cdot L \cdot f_S - V_i^2 \cdot D) \cdot (1-D)^2 \cdot \{2V_i - V_O \cdot (1-D)\} + 2C_{os,tot} \cdot V_i^3 \cdot L \cdot f_S^2 - 2\sqrt{C_{os,tot} \cdot V_i^3 \cdot L \cdot f_S^2 \cdot [(P_O \cdot L \cdot f_S - V_i^2 \cdot D) \cdot (1-D)^2 \cdot \{2V_i - V_O \cdot (1-D)\} + C_{os,tot} \cdot V_i^3 \cdot L \cdot f_S^2]}]}{(P_O \cdot L \cdot f_S - V_i^2 \cdot D)^2 \cdot (1-D)^2} \qquad (5)$$