인터리브 방식을 이용한 액티브 클램핑 포워드 컨버터에 관한 연구

정재엽* . 김 용* . 권순도** . 배진용*** . 이동현*
*동국대학교 . **대림대학 . ***특허청

A Study on the Interleaved Active-Clamping Forward Converter

Jae-Yeop Jung* . Yong Kim* . Soon-Do Kwon** . Jin-Yong Bae*** . Dong-Hyun Lee*
*Dongguk University . **DaeLim College . ***KIPO

Abstract - This paper presents the interleaved active-clamping ZVS(Zero Voltage Switching) forward converter, which is mainly composed of two active-clamping forward converters. Only two switches are required, and each one is the auxiliary switch for the other. The circuit complexity and cost are thus reduced. The leakage inductance of the transformer or an additional resonant inductance is employed to achieve ZVS during the dead times. The duty cycles are not limited to be equal and within 50%. The complementary switching and the resulted interleaved output inductor currents diminish the current ripple in output capacitors. Accordingly, the smaller output chokes and capacitors lower the converter volume and increase the power density. Detailed analysis and design of this new interleaved active-clamping forward converter are described.

1. 서 론

일반적으로 포워드 컨버터는 설계가 간단하고, 제작비용이 저감되기 때문에 전력변환장치에 널리 사용되고 있다. 하지만, 변압기 누설 인덕터에 저장된 에너지를 회수해야 하는 문제점을 지니고 있다. 이것을 해결하기 위한 방안으로 보조 권선을 추가하거나, 변압기 누설인덕터와 주 스위치 커패시터의 공진을 통하여 누설 인덕터에 저장된 에너지를 회수하는 방안이 제시되고 있다.

기존의 방식은 누설 인덕터에 저장된 에너지를 완전히 회수하지 못할 뿐 아니라, 누설인덕터와 스위치 커패시터의 공진으로 인하여 주 스위치에 높은 전압스트레스 또한 가해지는 문제점을 내재하고 있다[1]-[9].

본 논문에서는 이러한 포워드 컨버터에 관한 기존의 문제점을 해결하기 위하여, 2개의 스위치를 지닌 인터리브 액티브 클램핑 포워드 컨버터를 제안하고자 한다. 제안된 컨버터는 접지쪽 스위치가 주 스위치로서 영전압 스위칭을 하며, 다른 스위치가 보조스위치로서 동작하므로 액티브-클램핑을 위한 추가 스위치가 필요 없게 된다. 또한, 2개의 변압기를 1차측은 직렬로, 2차측은 병렬로 연결함으로서 출력 전류의 공유가 자연스럽게 이루어지고, 이로 인하여 출력 리플이 저감되는 장점이 있다.

본 연구에서는 제안한 컨버터의 동작모드 해석 및 특성에 관하여 논하였으며, 25[W]급 프로토타입을 제작, 100[㎑]에서 실험하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 인터리브 방식을 이용한 액티브 클램핑 포워드 컨버터

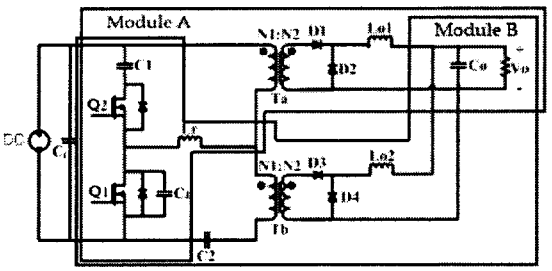


그림 1. 제안된 인터리브 액티브-클램핑 포워드 컨버터

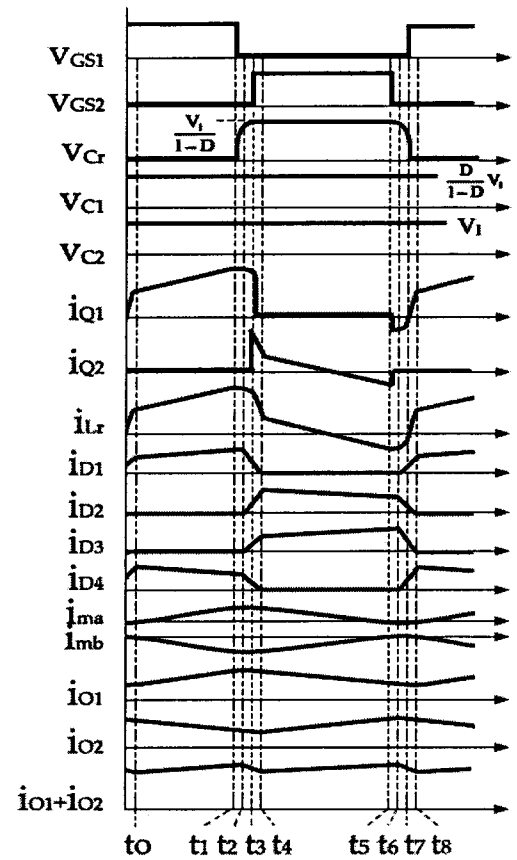


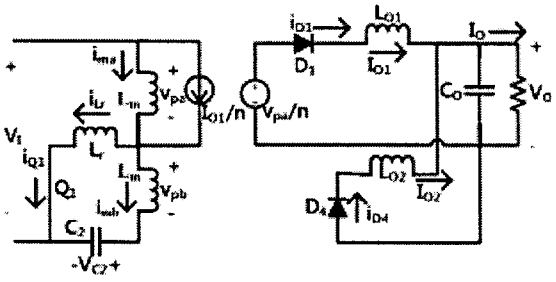
그림 2. 제안된 회로의 이론적인 각부 파형

그림 1은 제안된 인터리브 액티브-클램핑 포워드 컨버터를 나타낸다. 모듈 A는 변압기 T_a, 클램핑 커패시터

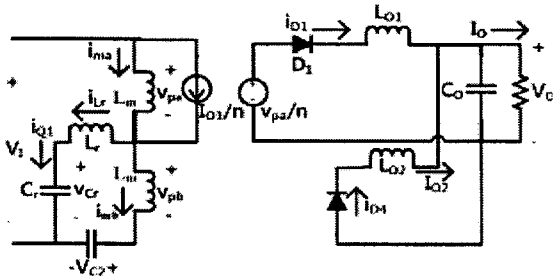
C_1, 주 스위치 Q_1, 보조 스위치 Q_2, 정류 다이오드 D_1, 환류 다이오드 D_2, 출력 커패시터 C_O, 출력 인덕터 L_{O1}으로 구성되어 있다. 모듈 B는 변압기 T_b, 클램핑 커패시터 C_2, 주 스위치 Q_2, 보조 스위치 Q_1, 정류 다이오드 D_3, 환류 다이오드 D_4, 출력 커패시터 C_O, 출력 인덕터 L_{O2}로 구성되어 있다. C_r은, Q_1과 Q_2의 출력 커패시턴스와 변압기 1차 권선의 기생 커패시턴스의 병렬연결한 값과 같다. T_a 와 T_b의 1차측은 직렬로 연결되어져 있다. 출력 인덕터인 L_{O1} 와 L_{O2} 은 병렬로 연결되어져 있고, 부하 전류를 동등하게 공유한다.

2.2 제안하는 컨버터의 동작원리

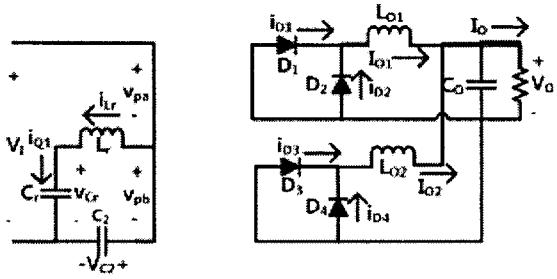
그림 2는 제안된 인터리브 액티브-클램핑 영전압 스위칭 포워드 컨버터의 주요 파형을 나타냈다. 그림3은 제안된 회로의 모드별 동작을 나타내고 있으며, 한주기를 8개의 모드로 나눌 수 있다.



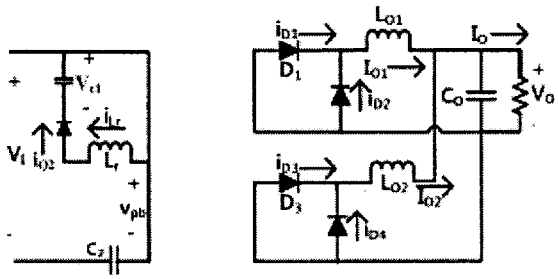
모드 Ⅰ : $t_0 \le t \le t_1$



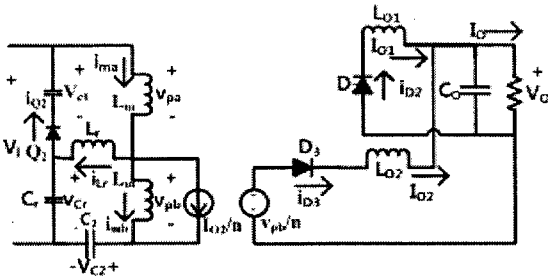
모드 Ⅱ : $t_1 \le t \le t_2$



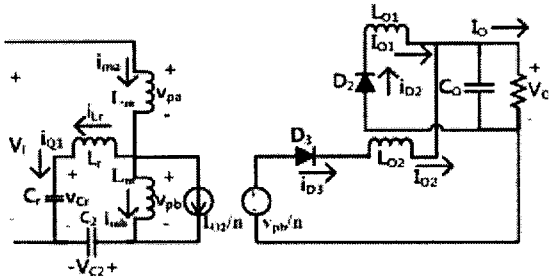
모드 Ⅲ : $t_2 \le t \le t_3$



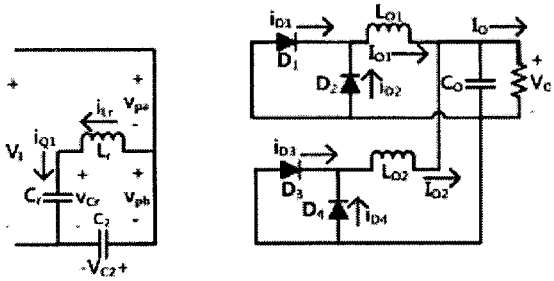
모드 Ⅳ : $t_3 \le t \le t_4$



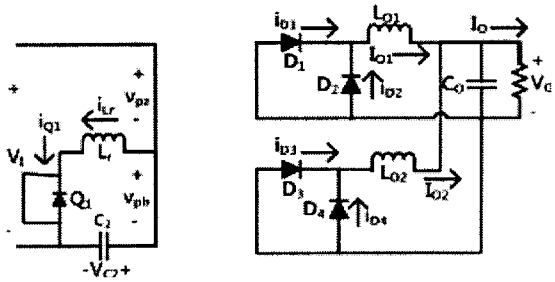
모드 Ⅴ : $t_4 \le t \le t_5$



모드 Ⅵ : $t_5 \le t \le t_6$



모드 Ⅶ : $t_6 \le t \le t_7$



모드 Ⅷ : $t_7 \le t \le t_8$

그림 3. 제안된 회로의 모드별 동작

1) 모드 Ⅰ : $t_0 \le t \le t_1$

이 모드는 Q_1이 도통되고, D_1과 D_4가 전도되는 상태이다. 모듈 A에서, v_{pa}는 V_I가 된다. 그러므로 자화 전류 i_{ma}는 선형적으로 증가한다. 입력 전력은 변압기 T_a를 통과하며 2차측으로 전송된다. 출력 인덕터 전류 I_{O1}은 부하전류의 절반정도가 되고, 정류 다이오드 D_1을 통과하여 흐른다. 모듈 B에서, Q_2는 단락이다. v_{pb}는 $-V_{C2}$ (또는 $-V_I$)와 같다. 자화 전류 i_{mb}는 선형적으로 감소한다. 출력 인덕터 L_{O2}에 저장되어진 에너지는 부하로 방전된다. 출력 인덕터 전류 I_{O2}는 부하 전류의 절반정도 이며, 환류 다이오드 D_4를 통하여 흐른다. 이 구간에서, 공진 커패시터 전압 v_{Cr}은 0으로 유지된다. 그리고 공진 인덕터 전류 i_L은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = \frac{V_I}{L_r + \frac{L_m}{2}}(t - t_0) + i_{Lr}(t_0) \qquad (1)$$

2) 모드 Ⅱ : $t_1 \le t \le t_2$

이 모드는 t_1에서 시작한다. 모듈 A에서, D_1은 여전히 부하 전류의 절반이 흐르고, 환류다이오드 D_2에는 전류가 흐르지 않는다. 공진 인덕터 전류 i_{Lr}은 0 에서부터 V_I까지 공진 커패시터 C_r에 충전된다. 모듈 B에서, 출력 인덕터 L_{O2}는 출력 전력을 공급하며 방전을 유지한다. 출력 인덕터 전류 I_{O2}는 부하 전류의 절반이 되며 다이오드 D_4를 통과하여 흐른다. 이 모드에서, 공진 인덕터 전류 i_L과 공진 커패시터 전압 v_{Cr}은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = \omega_{r1} C_r V_I \sin\omega_{r1}(t-t_1) + i_{Lr}(t_1)\cos\omega_{r1}(t-t_1) \quad (2)$$

$$v_{Cr}(t) = \frac{i_{Lr}(t_1)}{\omega_{r1} C_r}\sin\omega_{r1}(t-t_1) + V_I[1-\cos\omega_{r1}(t-t_1)] \quad (3)$$

여기서

$$\omega_{r1} = \sqrt{\frac{1}{(L_r + \frac{L_m}{2})C_r}} \quad (4)$$

3) 모드 Ⅲ : $t_2 \le t \le t_3$

이 모드는 $v_{Cr} = V_I$ 일때 t_2에서 시작하고, $v_{Cr} = V_I + V_{C1}$ 일때 t_3에서 끝난다. 모듈 A에서, 1차측 전압 v_{pa}는 0으로 감소한다. 그래서 D_1과 D_2는 둘 다 전도된다. D_1을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소하나, D_2를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가한다. 출력 인덕터 L_{O1}에 저장된 에너지는 부하 전력을 공급하기위해 방전된다. 모듈 B에서는, 1차측 전압 v_{pb}가 0이 된다. 그래서 D_3과 D_4는 둘 다 전도된다. D_3을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가하고, D_4를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소한다. 출력 인덕터 L_{O2}는 부하에 전류를 공급하며 방전을 유지한다. 이 구간에서, 공진 인덕터 전류 i_{Lr}와 공진 커패시터 전압 v_{Cr}은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = i_{Lr}(t_2)\cos\omega_{r2}(t-t_2) \quad (5)$$

$$v_{Cr}(t) = \frac{i_{Lr}(t_2)}{w_{r2} C_r}\sin\omega_{r2}(t-t_2) + V_I \quad (6)$$

여기서

$$\omega_{r2} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (7)$$

Q_2에서 영전압 스위칭 동작을 하기 위해, L_r에 저장된 초기 에너지는 V_I부터 $(V_I + V_{C1})$까지 C_r에 충전되도록 요구되어지는 에너지보다 훨씬 커야만 한다.

$$\frac{1}{2} L_r i^2 L_r(t_2) \ge \frac{1}{2} C_r[(V_I + V_{C_1})^2 - V_I^2] \quad (8)$$

$$L_r \ge \frac{D(2-D) C_r V_I^2}{(1-D)^2 i^2_{Lr}(t_2)} \quad (9)$$

4) 모드 Ⅳ : $t_3 \le t \le t_4$

t_3이 지난 후에, 공진 커패시터 전압 v_{Cr}은 $(V_I + V_{C1})$에서 클램프 되어진다. 공진 인덕터 전류 i_{Lr}은 클램핑 커패시터 C_1을 충전시키며 Q_2의 바디다이오드를 통해 흐른다. i_{Lr}은 선형적으로 감소하고, 이 때 Q_2는 도통되어질 수 있다. C_1이 C_r보다 훨씬 크다고 가정하였기 때문에, V_{C1}은 거의 일정하게 유지된다. 모듈 A에서, i_{D1}은 선형적으로 감소하고 i_{D2}는 선형적으로 증가한다. 이와는 반대로 모듈 B에서, i_{D3}는 선형적으로 증가하고, i_{D4}는 선형적으로 감소한다. 이 구간에서, i_{Lr}은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = -\frac{DV_I}{(1-D)L_r}(t-t_3) + i_{Lr}(t_3) \quad (10)$$

5) 모드 Ⅴ : $t_4 \le t \le t_5$

t_4에서, 모듈 A의 2차측의 i_{D1}은 0으로 감소한다. I_{O1}은 D_2를 통해 흐르고, 부하 전류의 절반이 된다. 출력 인덕터 L_{O1}은 출력 전력을 공급하며 방전된다. 1차측 전압 v_{pa}는 $-V_{C1}$이 된다. 자화 전류 i_{ma}는 선형적으로 감소한다. 모듈 B에서, i_{D4}는 0으로 감소한다. I_{O2}는 D_3를 통해 부하 전류의 절반정도가 흐른다. 1차측 전압 v_{pb}는 V_{C1}과 같아지고, 자화 전류 i_{mb}는 선형적으로 증가한다. 입력 전력은 T_b를 통해 2차측에 전달된다. 공진 커패시터 전압 v_{Cr}은 이 구간에서 $(V_I + V_{C1})$으로 유지된다. 공진 인덕터 전류 i_{Lr}은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = -\frac{DV_I}{(L_r + \frac{L_m}{2})(1-D)}(t-t_4) + i_{Lr}(t_4) \quad (11)$$

이 모드동안, i_{Lr}은 Q_2를 통해 흐르며, 극성이 변할것이다. 그래서, Q_2에서 영전압 스위칭 동작을 얻을 수 있을 것이다.

6) 모드 Ⅵ : $t_5 \le t \le t_6$

이 모드에서 Q_2는 단락될 것이다. 공진 전류 i_{Lr}은 공진 커패시터 C_r을 통해 흐른다. 공진 커패시터 전압 v_{Cr}은, $(V_I + V_{C1})$에서 V_I로 방전된다. 모듈 A에서, 1차 전압 v_{pa}는 $(V_I - V_{Cr})$이 된다. 2차측 전압은 음이되고, D_1은 단락된다. 출력 인덕터 전류 I_{O1}은 환류 다이오드 D_2를 통해 부하 전류의 절반정도가 흐른다. 모듈 B에서, 1차측 전압 v_{pb}는 양이며, $(v_{Cr} - V_I)$가 된다. 그러므로 D_4는 역바이어스가 된다. 출력 인덕터 전류 I_{O2}는 정류 다이오드 D_3을 통해 부하 전류의 절반이 흐른다. 이 구간에서 공진 전류 i_{Lr}과 전압 v_{Cr}은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = \frac{\omega_{r1} C_r (2-D) V_I}{1-D}\sin\omega_{r1}(t-t_5) + i_{Lr}(t_5)\cos\omega_{r1}(t-t_5) \quad (12)$$

7) 모드 Ⅶ : $t_6 \le t \le t_7$

이 모드는 v_{Cr}은 V_I의 값을 가지며 시작한다. 모듈 A에서, 1차측 전압 v_{pa}는 0이다. 출력 인덕터 L_{O1}은 부하 전력을 공급하며 방전된다. 2차측에서, 정류 다이오드 D_1을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가하고, 환류다이오드 D_2를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소한다. 모듈 B에서, 1차측 전압 v_{pb}는 0이된다. 출력 인덕터 L_{O2}는 부하에 전력을 공급하며 방전한다. 2차측에서, 정류 다이오드 D_3을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소하고, 환류다이오드 D_4를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가한다. 이 구간에서, 공진 전류 i_{Lr}과 전압 v_{Cr}는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = i_{Lr}(t_6)\cos\omega_{r2}(t-t_6) \quad (13)$$

$$v_{Cr}(t) = \frac{i_{Lr}(t_6)}{\omega_{r2} C_r}\sin\omega_{r2}(t-t_6) + V_I \quad (14)$$

Q_1이 영전압 스위칭 동작을 하기 위해서는, L_r에 저장되어있는 초기 에너지는 반드시, V_I에서 0으로 방전되도록 요구되어지는 C_r의 에너지보다 커야한다.

$$\frac{1}{2} L_r i^2_{Lr}(t_6) \ge \frac{1}{2} C_r V_I^2 \quad (15)$$

$$L_r \ge \frac{C_r V_I^2}{i^2_{Lr}(t_6)} \quad (16)$$

8) 모드 Ⅷ : $t_7 \le t \le t_8$

이 모드는 t_7에서 v_{Cr}은 0으로 감소되고 0에서 클램핑된다. Q_1의 바디 다이오드는 전도되고, Q_1은 ZVS동작을 성취하며 도통되어진다. 모듈 A에서, D_1을 통해 흐르는

2차측 전류는 $i_{D1} = I_{O1}$이 될 때까지 선형적으로 증가한다. D_2를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 0이 될 때까지 감소한다. 모듈 B에서, D_4를 통과하여 흐르는 2차측 전류는 $i_{D4} = I_{O2}$가 될때까지 선형적으로 증가한다. D_3을 통과하여 흐르는 전류는 0으로 선형적으로 감소한다. 이 모드동안에, 공진 전류 i_{Lr}의 극성이 변하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = \frac{V_I}{L_r}(t - t_8) + i_{Lr}(t_8) \qquad (17)$$

t_8에서, Q_1은 다시 도통되고, 이 모드는 끝이난다. 그리고 또다시 모드 I이 시작되며 주기가 반복된다.

2.3 실험결과

제안된 인터리브 방식을 이용한 액티브 클램핑 포워드 컨버터의 특성 파악을 위하여 입력 DC 100V, 출력 5V/5A, 스위칭 주파수 100[㎑], 출력 25W급의 프로토타입을 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타내었다.

표1. 프로토타입 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{in})	DC 100V
출력전압 (V_O)	DC 5V
출력전류 (I_O)	5A
최대출력 (P_o)	25W
스위칭 주파수 (f)	100 ㎑
출력 인덕터 (L1)	67.88 μH
출력 인덕터 (L2)	77.6 μH
2차측 다이오드 D_1, D_2, D_3, D_4	SBL3045PT
변압기 T_a , T_b	EI40, N1:N2=16:4
스위치 Q1, Q2	IRFP 460
입력 커패시터 (C_I)	1000 μF × 2
출력 커패시터 (C_O)	10000 μF × 3
클램핑 커패시터 (C_1 , C_2)	1 μF
PWM IC	UCC 2808

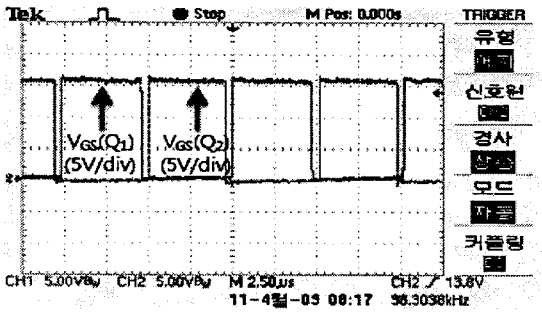


그림 4. 스위치 Q_1, Q_2의 게이트 신호

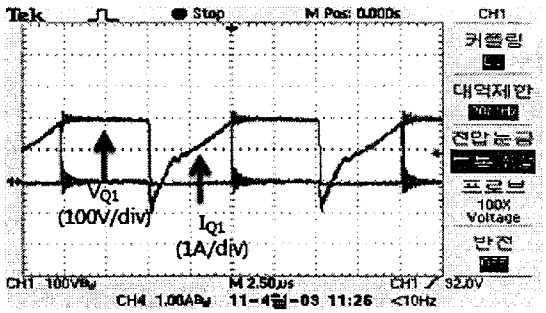


그림 5. 스위치 Q_1 전압, 전류

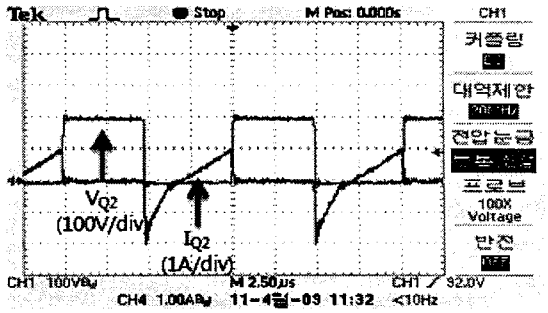


그림 6. 스위치 Q_2 전압, 전류

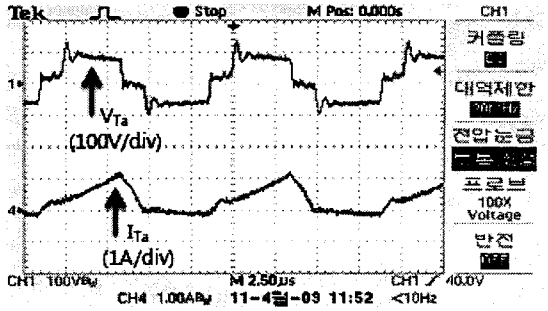


그림 7. 변압기 T_a 전압, 전류

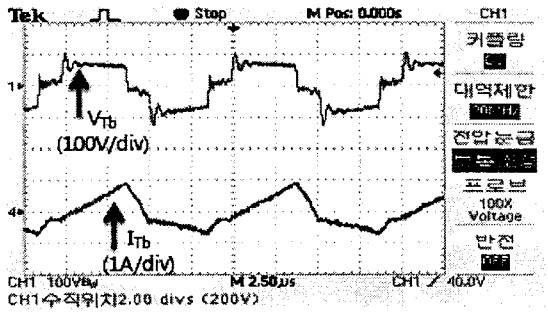


그림 8. 변압기 T_b 전압, 전류

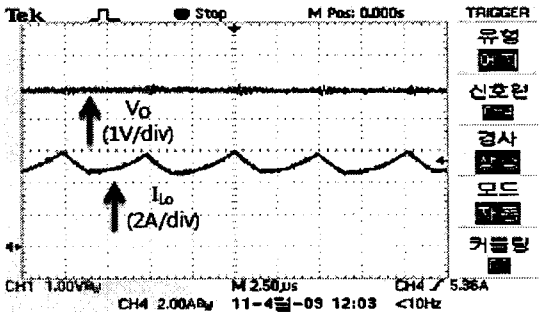


그림 9. 출력전압, 인덕터 Lo 전류

그림 5는 스위치 Q_1의 영전압 스위칭(ZVS)파형을 나타내며, 그림 6은 스위치 Q_2의 영전압 스위칭(ZVS)파형을 나타낸다.

3. 결 론

본 논문에서는 2개의 액티브 클램핑 포워드 컨버터로 구성된, 새로운 방식의 인터리브 액티브 클램핑 영전압 스위칭 포워드 컨버터를 나타내었다. DC 100[V], 출력 5[V]/5[A], 스위칭 주파수 100[㎑], 출력 25[W]급의 프로토타입을 제작하였고, 안정적으로 영전압 스위칭 동작을 하는 것을 확인하였다. 하지만 낮은 출력으로, 출력을 높일시의 동작을 확인하는데 무리가 있었고, 향후 제안한 토폴로지의 출력을 높여 본 토폴로지의 신뢰성을 확인할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] F.D.Tan, "The forward converter:From the classic to the contemporary," in Proc. 17th Annu. IEEE Appl. Power electron. Conf. and Expo., 2002, pp. 857-863.
[2] B.R. Lin, K.Huang, and D.Wang, "Analysis design and implementation of an active clamp forward converter with synchronous rectifier," IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol.53, no.6, pp.1310-1319, Jun. 2006.
[3] A.Acik and I.Cadirci, "Active clamp ZVS forward converter with soft-switched synchrounous rectifier for maximum efficiency operation," in Proc. 29th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 1998, pp.1237-1242.
[4] H.K.Ji and H.J.Kim, "Active clamp forward converter with MOSFET synchronous rectification," in Proc. 25th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 1994, pp.895-901.
[5] Yu-Kang Lo, Tsu-Shou Kao, and Jing-Yuan Lin, "Analysis and Design of an Interleaved Active-Clamping Forward Converter", IEEE Transactions on industrial, Electronics, Vol.54, No.4, August. 2007.
[6] R.Watson, F.C.Lee, G.C.Hua, "Utilization of an active-clamp circuit to achieve soft switching in flyback converter," IEEE Trans. Power Electron., vol.11, no.1, pp.162-169, Jan. 1996
[7] Y.H.Xi and P.K.Jain, "A forward converter topology employing a resonant auxiliary circuit to achieve soft switching and power transformer resetting," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.50, no.1, pp.132-140, Feb. 2003
[8] D.B Costa and C.M.C.Duarte, "The ZVS-PWM active-clamping CUK converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.51, no.1, pp.54-60, Feb. 2004
[9] T.Jin, W.Zhang, A.Azzolini, and K.M.Smedley, "A new interleaved forward converter with inherent demagnetizing feature," in Proc. 40th IEEE Ind. Appl. Conf., 2005, pp.625-630