

액티브 클램프 포워드 컨버터의 출력 리플 저감에 관한 연구

정재엽*, 김 용*, 배진용**, 권순도***, 최근수****
 동국대학교*, 특허청**, 대림대학***, (주)다지아이****

A Study on the output ripple reduction of Active-Clamp Forward Converter

Jae-Yeop Jung*, Yong Kim*, Jin-Yong Bae**, Soon-Do Kwon***, Geun-Soo Choi****
 Dongguk University*, KIPO**, DaeLim College***, DGI****

Abstract - This paper presents an output ripple reduction of Active-Clamp Forward Converter, which is mainly composed of interleaving two active-clamping forward converters. By interleaving, Output ripple is 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 of this output reduction of Active-Clamp Forward Converter is described.

1. 서 론

교류를 직류로 정류하는 과정에서 소자의 비선형성으로 인해 고조파가 형성된다. 이를 충분히 억제하지 못하면 출력측에선 리플이 발생하게 되고, 이러한 리플은 제품의 신뢰도를 감소시키는 중요한 요인으로서 작용한다. [1]-[3]

본 논문에서는 출력리플을 저감시키기 위하여 인터리빙 방식의 액티브 클램핑 포워드 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 인터리빙 방식을 사용함으로써 출력리플을 저감하였다. 또한 2개의 변압기를 1차측은 직렬로, 2차측은 병렬로 연결함으로써 출력 전류의 공유가 자연스럽게 이루어져 다시 한번 출력리플을 저감하였다. 부가적으로, 단지 2개의 스위치만을 사용하여 제안된 컨버터를 동작시킴으로써 회로의 복잡성과 비용을 감소시켰다.

2. 본 론

2.1 제안된 액티브 클램프 포워드 컨버터

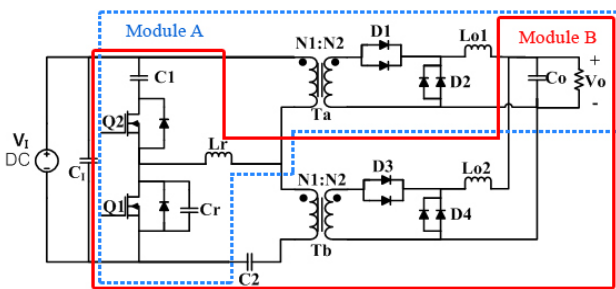


그림 1. 제안된 액티브 클램프 포워드 컨버터

그림 1은 제안된 액티브 클램프 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_r 은, Q_1 과 Q_2 의 출력 커패시턴스와 변압기 1차 권선의 기생 커패시턴스의 병렬연결한 값과 같다. T_a 와 T_b 의 1차측은 직렬로 연결되어 있다. 출력 인덕터인 L_{o1} 와 L_{o2} 은 병렬로 연결되어 있고, 부하 전류를 동등하게 공유한다.

2.2 제안된 컨버터의 동작원리

그림 2는 제안된 회로의 주요 이론적인 각부 파형을 나타냈다.

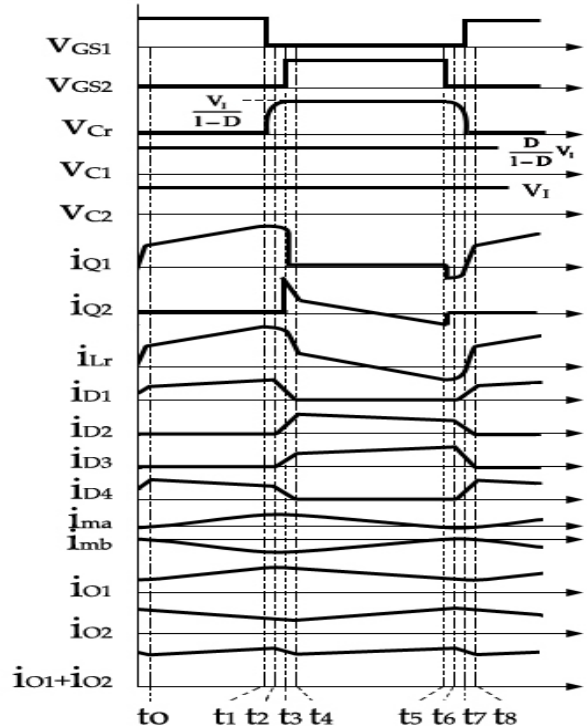


그림 2. 제안된 회로의 이론적인 각부 파형

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$
 이 모드는 Q_1 이 도통되고, D_1 과 D_4 가 전도된다. 모듈 A에서, v_{pa} 는 V_1 가 되므로, 자화 전류 i_{ma} 는 선형적으로 증가한다. 입력 전력은 변압기 T_a 를 통과하며 2차측으로 전송된다. 출력 인덕터 전류 i_{o1} 은 부하전류의 절반정도 흐르고, 정류 다이오드 D_1 을 통과하여 흐른다. 모듈 B에서, Q_2 는 단락되고, v_{pb} 는 $-V_1$ 와 같아진다. 자화 전류 i_{mb} 는 선형적으로 감소한다. 출력 인덕터 L_{o2} 에 저장되어진 에너지는 부하로 방전된다. 출력 인덕터 전류 i_{o2} 는 부하 전류의 절반정도이며, 환류 다이오드 D_4 를 통하여 흐른다. 이 구간에서, 공진 커패시터 전압 v_{Cr} 은 0으로 유지된다. 그리고 공진 인덕터 전류 i_L 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = \frac{V_1}{L_r + \frac{L_m}{2}}(t - t_0) + i_{Lr}(t_0) \quad (1)$$

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$
 이 모드는 t_1 에서 시작한다. 모듈 A에서, D_1 은 여전히 부하 전류의 절반이 흐르고, 환류다이오드 D_2 에는 전류가 흐르지 않는다. 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 0에서부터 V_1 까지 공진 커패시터 C_r 에 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_4 를 통과하여 흐른다.

$$i_{Lr}(t) = \omega_{r1} C_r V_1 \sin \omega_{r1}(t - t_1) + i_{Lr}(t_1) \cos \omega_{r1}(t - t_1) \quad (2)$$

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$
 이 모드는 $v_{Cr} = V_1$ 일때 t_2 에서 시작하고, $v_{Cr} = V_1 + V_{C1}$ 일때 t_3 에

서 끝난다. 모듈 A에서, 1차측 전압 v_{pb} 는 0으로 감소하므로, D_1 과 D_2 는 둘 다 전도된다. D_1 을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소하나, D_2 를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가한다. 출력 인덕터 L_{O1} 에 저장된 에너지는 부하 전력을 공급하기 위해 방전된다. 모듈 B에서는, 1차측 전압 v_{pb} 가 0이 되므로 D_3 과 D_4 는 둘 다 전도된다. D_3 을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가하고, D_4 를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소한다. 출력 인덕터 L_{O2} 는 부하에 전류를 공급하며 방전을 유지한다.

Q_2 에서 영전압 스위칭 동작을 하기 위해, L_r 에 저장된 초기 에너지는 V_1 부터 $(V_1 + V_{C1})$ 까지 C_r 에 충전되도록 요구되어지는 에너지보다 훨씬 커야만 한다.

$$\frac{1}{2} L_r i_{Lr}^2(t_2) \geq \frac{1}{2} C_r [(V_1 + V_{C1})^2 - V_1^2] \quad (3)$$

$$L_r \geq \frac{D(2-D)C_r V_1^2}{(1-D)^2 i_{Lr}^2(t_2)} \quad (4)$$

(4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

t_3 이 지난후에, 공진 커패시터 전압 v_{Cr} 은 $(V_1 + V_{C1})$ 에서 클램프 되어진다. 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 클램프 커패시터 C_1 을 충전시키며 Q_2 의 바디 다이오드를 통해 흐른다. i_{Lr} 은 선형적으로 감소하고, 이 때 Q_2 는 도통된다. C_1 이 C_r 보다 훨씬 크다고 가정하면, V_{C1} 은 거의 일정하게 유지된다. 모듈 A에서, i_{D1} 은 선형적으로 감소하고 i_{D2} 는 선형적으로 증가한다. 이와는 반대로 모듈 B에서, i_{D3} 은 선형적으로 증가하고, i_{D4} 는 선형적으로 감소한다.

$$i_{Lr}(t) = -\frac{DV_1}{(1-D)L_r}(t-t_3) + i_{Lr}(t_3) \quad (5)$$

(5) 모드 V : $t_4 \leq t \leq t_5$

t_4 에서, 모듈 A의 2차측의 i_{D1} 은 0으로 감소한다. I_{O1} 은 D_2 를 통해 흐르고, 부하 전류의 절반이 된다. 출력 인덕터 L_{O1} 은 출력 전력을 공급하며 방전된다. 1차측 전압 v_{pb} 는 $-V_{C1}$ 이 되고, 자화 전류 i_{mb} 는 선형적으로 감소한다. 모듈 B에서, i_{D4} 는 0으로 감소한다. I_{O2} 는 D_3 를 통해 부하 전류의 절반정도가 흐른다. 1차측 전압 v_{pb} 는 V_{C1} 과 같아지고, 자화 전류 i_{mb} 는 선형적으로 증가한다. 입력 전류는 T_b 를 통해 2차측에 전달된다. 공진 커패시터 전압 v_{Cr} 은 이 구간에서 $(V_1 + V_{C1})$ 으로 유지된다.

이 모드동안, i_{Lr} 은 Q_2 를 통해 흐르며, 극성이 변한다. 그래서, Q_2 에서 영전압 스위칭 동작을 얻을 수 있다..

(6) 모드 VI : $t_5 \leq t \leq t_6$

이 모드에서 Q_2 는 단락될 것이다. 공진 전류 i_{Lr} 은 공진 커패시터 C_r 을 통해 흐른다. 공진 커패시터 전압 v_{Cr} 은, $(V_1 + V_{C1})$ 에서 V_1 로 방전된다. 모듈 A에서, 1차 전압 v_{pb} 는 $(V_1 - V_{C1})$ 이 된다. 2차측 전압은 음이되고, D_1 은 단락된다. 출력 인덕터 전류 I_{O1} 은 환류 다이오드 D_2 를 통해 부하 전류의 절반정도가 흐른다. 모듈 B에서, 1차측 전압 v_{pb} 는 양이며, $(V_{Cr} - V_1)$ 가 된다. 그러므로, D_4 는 역바이어스가 된다. 출력 인덕터 전류 I_{O2} 는 정류 다이오드 D_3 을 통해 부하 전류의 절반이 흐른다.

(7) 모드 VII : $t_6 \leq t \leq t_7$

이 모드는 v_{Cr} 은 V_1 의 값을 가지며 시작한다. 모듈 A에서, 1차측 전압 v_{pb} 는 0이고, 출력 인덕터 L_{O1} 은 부하 전력을 공급하며 방전된다. 2차측에서, 정류 다이오드 D_1 을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가하고, 환류다이오드 D_2 를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소한다. 모듈 B에서, 1차측 전압 v_{pb} 는 0이 되고, 출력 인덕터 L_{O2} 는 부하에 전력을 공급하며 방전된다. 2차측에서, 정류 다이오드 D_3 을 통해 흐르는 전류는 선형적으로 감소하고, 환류다이오드 D_4 를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 증가한다.

Q_1 이 영전압 스위칭 동작을 하기 위해서는, L_r 에 저장되어있는 초기 에너지가 반드시, V_1 에서 0으로 방전되도록 요구되어지는 C_r 의 에너지보다 커야 한다.

$$\frac{1}{2} L_r i_{Lr}^2(t_6) \geq \frac{1}{2} C_r V_1^2 \quad (6)$$

$$L_r \geq \frac{C_r V_1^2}{i_{Lr}^2(t_6)} \quad (7)$$

(8) 모드 VIII : $t_7 \leq t \leq t_8$

이 모드는, t_7 에서 v_{Cr} 은 0으로 감소되고 0에서 클램프 된다. Q_1 의 바디 다이오드는 전도되고, Q_1 은 ZVS동작을 성취하며 도통되어진다. 모듈 A에서, D_1 을 통해 흐르는 2차측 전류는 $i_{D1} = I_{O1}$ 이 될 때 까지 선형적으로 증가한다. D_2 를 통해 흐르는 전류는 선형적으로 0이 될 때 까지 감소한다. 모듈 B에서, D_4 를 통과하여 흐르는 2차측 전류는 $i_{D4} = I_{O2}$ 가 될 때 까지 선형적으로 증가한다. D_3 을 통과하여 흐르는 전류는 0으로 선형적으로 감소한다. 이 모드동안에 공진전류 i_{Lr} 의 극성이 변한다.

t_8 에서, Q_1 은 다시 도통되고, 이 모드는 끝이난다. 그리고 또다시 모드 I이 시작되며 주기가 반복된다.

2.3 실험결과

그림 3은 스위치 Q_1 의 전압 전류 파형을 나타내며, ZVS동작을 하고있음을 보여준다. 그림 4는 출력 인덕터 L_{O1} 과 L_{O2} 의 전류파형을 나타내며, 인터리빙 동작을 하고있음을 보여준다. 그림 5는 출력전압과 출력전류를 나타내고 있으며 출력 리플이 저감됨을 보여준다.

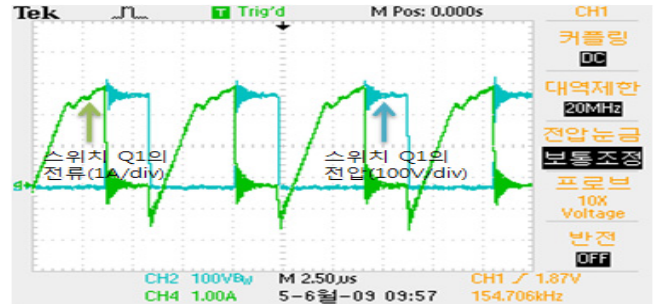


그림 3. 스위치 Q_1 의 전압,전류 파형

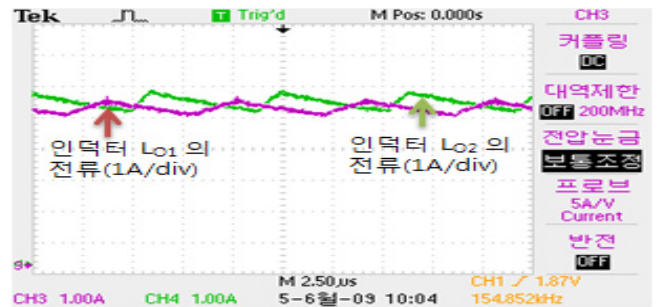


그림 4. 인덕터 L_{O1} 과 인덕터 L_{O2} 의 전류 파형

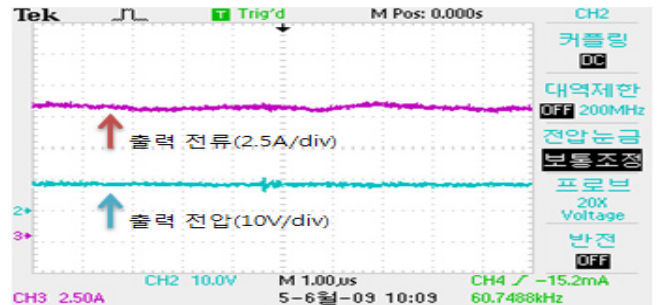


그림 5. 출력 전압, 출력 전류

3. 결 론

본 논문에서는 액티브 클램핑 포워드 컨버터의 출력리플 저감을 위해 인터리빙방식의 출력측 병렬 구조를 제안하였고, 타당성 검증을 위해 80[W]급 프로토 타입을 제작, 150[Khz]에서 실험하였다. 실험결과 출력 리플이 저감되는걸 볼 수 있었고, 영전압 스위칭을 사용하여 손실을 낮추었다. 또한, 액티브 클램핑시 두 개의 스위치가 서로 보조스위치 역할을 해줌으로서 추가적인 보조 스위치가 필요없어 제작비가 절감되었고, 상대적으로 회로도 간단해 지는 장점을 보였다.

[참 고 문 헌]

[1] Jae-Yeop Jung, Yong Kim, Soon-Do Kim, Jin-Yong Bae, Dong-Hyun Lee, "A Study on the Interleaved Active-Clamping Forward Converter", Proceedings of the KIEE EMECS Annual Spring Conference, pp.156-160, 2009
 [2] F.D.Tan, "The forward converter:From the classic to the contemporary," in Proc. 17th Annu. IEEE App. Power electron. Conf. and Expo., pp.857-863, 2002.
 [3] 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.