

전류 증배 정류회로를 이용한 능동 클램프 포워드 컨버터의 분석

장바울, 조보형
서울대학교 전기컴퓨터공학부

Analysis of an Active Clamp Forward Converter with Current-Doubler Rectifier

Paul Jang, Bohyung Cho

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 전류 증배 정류회로를 이용한 능동 클램프 포워드 컨버터의 정상상태를 분석한다. 기존 분석들 대비 변압기의 누설 인덕턴스와 전류 증배 정류회로에서의 전류 불균형 현상을 고려하여 회로 동작의 정확한 이해를 도모한다. 분석 결과의 타당성은 100W급 (3.3 V/30.3 A) 모의 실험을 통해 검증한다.

1. 서론

능동 클램프 포워드 컨버터에 전류 증배 정류회로를 이용할 시 낮은 도통 손실과 출력 리플 저감 등의 장점을 가질 수 있어 고전류, 저전압 특성을 갖는 DC DC 변환에 이용할 수 있다. 전류 증배 정류회로를 이용한 능동 클램프 포워드 컨버터는 이미 [1]에서 제안되어 출력 인덕터들 간에 전류 분배가 균일하게 이루어졌다는 가정 하에 분석이 이루어진 바 있지만 [2]를 통해 실제로는 전류 분배가 균일하지 않음이 알려져 있다. 이에 기존 분석들 대비 변압기의 누설 인덕턴스와 전류 증배 정류회로에서의 전류 불균형 현상을 고려하여 회로 동작의 정확한 이해를 도모하고 100W급 (3.3 V/30.3 A) 모의 실험을 통해 분석 결과의 타당성을 검증한다.

2. 동작 원리

2.1 모드 분석

모드 1 (t_0-t_1): 메인 스위치 S_1 이 턴 온 되어 있는 구간이다. 입력 전압은 누설 인덕턴스 L_r 과 자화 인덕턴스 L_m 에 나뉘어 걸린다. 출력단에는 D_1 이 꺼져있고, D_2 가 도통하여 출력 인덕터의 전류 방정식을 형성한다. 이 구간은 S_1 이 턴 오프 될 때 끝난다.

모드 2 (t_1-t_2): 변압기 1차단으로 반사되는 전류 때문에 C_{s1} 에 걸리는 전압이 상승하는 구간이다. V_g v_{cs1} 의 전압이 L_r 과 L_m 에 나뉘어 걸린다. 1차단에서는 $C_{s1}+C_{s2}$ 와 L_m+L_r 의 공진에 의해 방정식이 형성된다. 출력단에는 D_1 이 꺼져있고, D_2 가 도통하여 출력 인덕터의 전류 방정식을 형성한다. 이 구간은 $v_{cs1}=V_g$ 일 때 끝난다.

모드 3 (t_2-t_3): $C_{s1}+C_{s2}$ 와 L_r 의 공진에 의해 v_{cs1} 이 상승하는 구간이다. 2차단의 다이오드들이 모두 도통하기 때문에 변압기는 동작하지 않는다. 이 구간은 $v_{cs1}=V_g+V_{cc}$

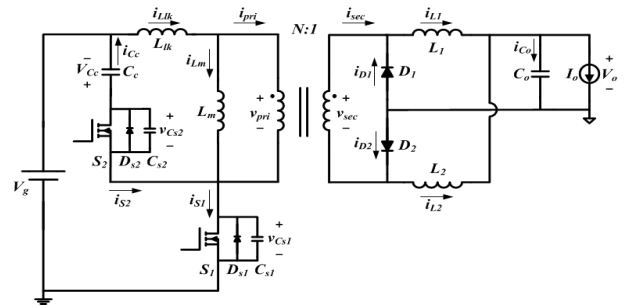


그림 1 전류 증배 정류회로를 이용한 능동 클램프 포워드 컨버터의 회로도

Fig. 1 Circuit diagram of active-clamped forward converter using current-doubler rectifier

일 때 끝난다.

모드 4 (t_3-t_4): v_{cs1} 가 V_g+V_{cc} 에 도달하면 보조 스위치 S_2 의 body 다이오드인 D_{s2} 가 도통하기 시작한다. 한편 2차단의 다이오드들은 계속 모두 도통하기 때문에 변압기는 동작하지 않으며 따라서 클램프 전압 v_{cc} 가 모두 L_r 에 걸린다. 1차단에서는 C_c 와 L_r 의 공진에 의해 방정식이 세워진다. 이 구간은 S_2 가 턴 온 될 때 끝난다.

모드 5 (t_4-t_5): 모드 4에서 D_{s2} 로 흐르던 전류가 S_2 로 흐르는 것을 제외하고는 모드 4와 모두 동일하다. 2차단의 전류 순환이 끝나면 모드 5가 종료된다.

모드 6 (t_5-t_6): 2차단의 전류 순환이 끝나 D_2 가 꺼지고 D_1 만 도통한다. 클램프 전압 v_{cc} 가 L_r 과 L_m 에 나뉘어 걸리며 L_m+L_r 와 C_c 의 공진에 의해 방정식이 형성된다. 모드 6은 S_2 가 턴 오프 될 때 끝난다.

모드 7 (t_6-t_7): C_1+C_2 와 L_m+L_r 가 공진을 시작한다. L_r 과 L_m 에 V_g v_{cs1} 가 나뉘어 걸리며 2차단에서는 다이오드 D_1 만 도통한다. 이 구간은 $v_{cs1}=V_g$ 일 때 끝난다.

모드 8 (t_7-t_8): C_1+C_2 와 L_r 의 공진에 의해 전압이 하강하는 구간이다. 2차단의 다이오드들이 모두 도통하기 때문에 변압기는 동작하지 않으며 $v_{cs1}=0$ 일 때 끝난다.

모드 9 (t_8-t_9): v_{cs1} 가 0에 도달하면 D_{s1} 이 도통하기 시작한다. 한편 2차단의 다이오드들은 계속 모두 도통하기 때문에 변압기는 동작하지 않으며 따라서 클램프 전압 v_{cc} 가 모두 L_r 에 걸린다. C_c 와 L_r 의 공진에 의해 방정식이 세워진다. 이 구간은 S_1 이 턴 온 될 때 끝난다.

모드 10 (t_9-t_0): 모드 9에서 D_{s1} 로 흐르던 전류가 S_1 로

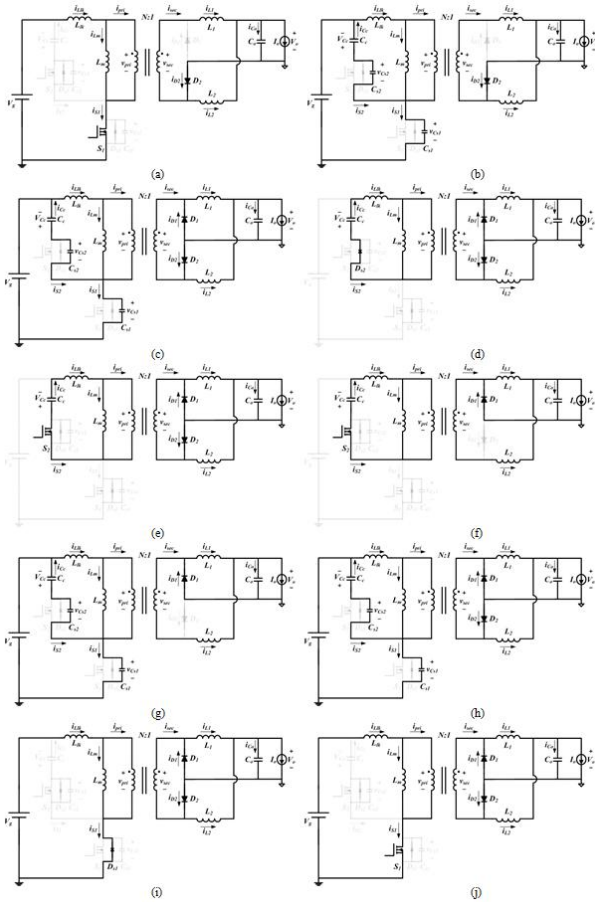


그림 2 동작 모드별 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuits of each mode

흐르는 것을 제외하고는 모드 9와 모두 동일하다. 2차단의 전류 순환이 끝나면 모드 10이 종료된다.

2.2 전류 불균형 현상 분석

출력 인덕터 L_1 , 출력 인덕터 L_2 와 변압기의 2차단에 존재하는 ESR을 각각 R_{L1} , R_L , R_t 라 했을 때 L_1 과 L_2 에 흐르는 정상 상태 전류 값은 다음과 같다. [2]

$$I_{L1} = \frac{R_{L2} + D'R_t}{R_{L1} + R_{L2} + (D+D')R_t} I_o \quad (1)$$

$$I_{L2} = \frac{R_{L1} + DR_t}{R_{L1} + R_{L2} + (D+D')R_t} I_o \quad (2)$$

3. 모의 실험 결과

전류 증배 정류회로를 이용한 능동 클램프 포워드 컨버터 분석 결과의 타당성을 검증하기 위해 100W급의 컨버터를 설계하고 모의 실험을 수행하였다. 컨버터의 설계 조건은 $V_{in} = 40V$, $V_o = 3.3V$, $P_o = 100W$ 로 정하였으며 이에 따른 설계 사항은 $N = 7$, $L_m = 100\mu H$, $L_1 = L_2 = 1\mu H$, $C_o = 220\mu F$, $f_s = 250kHz$, $R_{L1} = R_{L2} = 1m\Omega$, $R_t = 3m\Omega$ 이다.

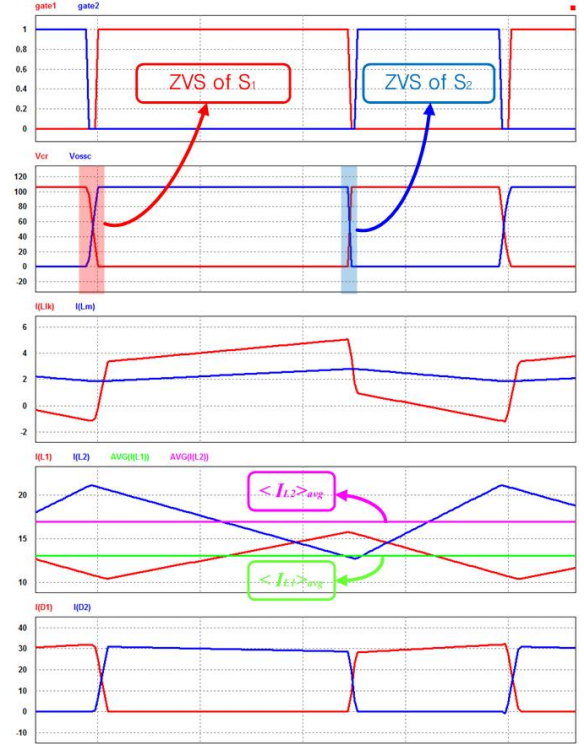


그림 3 모의 실험 주요 파형
Fig. 3 Simulation waveforms

그림 3을 통해 분석 결과의 타당성을 확인할 수 있다. 설계 조건에 따라 S_1 과 S_2 가 소프트 스위칭을 하고 있음을 확인할 수 있으며 출력 인덕터에서의 전류 불균형 현상 역시 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전류 증배 정류회로를 이용한 능동 클램프 포워드 컨버터의 정상상태를 분석하였다. 기존 분석들 대비 변압기의 누설 인덕턴스와 전류 증배 정류회로에서의 전류 불균형 현상을 고려하여 회로 동작의 정확한 이해를 도모하였으며 결과의 타당성은 100W급의 모의 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 삼화양행의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Lazlo Huber and Milan M Jovanovic, "Forward Flyback Converter with Current Doubler Rectifier : Analysis, Design, and Evaluation Results", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 14, Issue. 1, pp.184-192, 1999
- [2] Yangyang Wen, Hong Mao, and Issa Batarseh, "DC Bias Analysis and Small Signal Characteristic of Active Clamp Forward Flyback DC DC Converter with a Current Doubler Rectifier", in Proc. IEEE APEC 2005, Vol. 3, Issue. 1, pp.1531-1536