

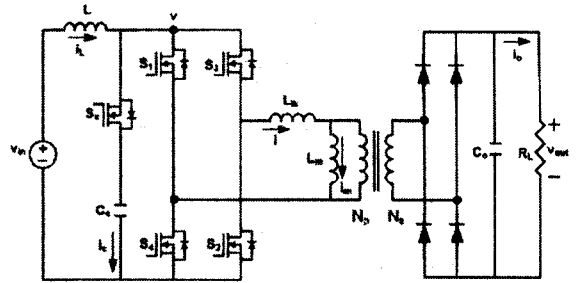
능동 클램프형 전류형 단상 풀브리지 DC-DC 컨버터의 동작 해석

차 한주, 최 순호, 안 치형
 충남대학교 전기공학과

Analysis of Current Fed Full Bridge DC-DC Converter with Active Clamp

Hanju Cha, Soonho Choi, Chihyung Ahn
 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - Isolated current fed full-bridge converter with active clamp is analyzed in this paper. An active clamp branch is used for limiting the voltage overshoot in the bridge switches and rectifier diodes. Zero voltage switching(ZVS) is also realized by using the energy stored in the transformer leakage inductance. To analyze the converter, 6 modes of operation are introduced and investigated. For each of the modes, voltage and current equations are derived together with corresponding equivalent circuits. 200W prototype dc-dc converter is assembled and verifies the effectiveness of the analysis and simulation.



〈그림 1〉 능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터

1. 서 론

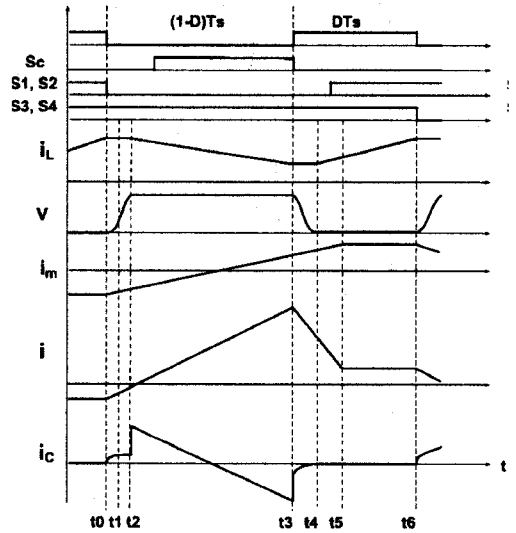
최근 미래의 에너지원으로 떠오르는 연료 전지는 30~60V의 낮은 직류 출력 전압을 갖는다[1]. 따라서 낮은 직류 전압을 높은 직류 전압으로 변환한 후 인버터를 통해 220V 교류 출력을 얻는 것에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 논문에서는 낮은 전압을 높은 전압으로 변환하는 능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터의 동작에 대해 해석하고, 시뮬레이션을 통해 결과를 확인해 보았다. 능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터의 주요 특징은 다음과 같다[2].

- 브리지 스위치와 정류 다이오드의 전압 오버슈트가 클램프 커패시터를 통해 제한된다.
- 모든 스위치는 턴온할 때 ZVS로 동작한다.
- 입력 전류는 연속이다.
- 능동 클램프 회로를 통해 변압기의 누설 인덕턴스에 저장된 에너지의 방전 경로를 구성한다.

2. 회로의 모드별 해석

그림 1은 능동 클램프를 이용한 전류형 풀브리지 컨버터의 회로이다. 한 주기는 6개의 모드가 대칭적으로 구성되어 있으며, 각 동작 모드에 따라 변압기 1차측의 전압 및 전류, 그리고 시간에 대한 수식을 정리하였다. 회로의 해석에 앞서 다음과 같이 가정한다[2].

- 입력 전류는 연속이다.
- 스위치는 기생 커패시터와 역병렬 다이오드를 가지며, 이상적이다.
- 클램프 커패시터와 출력 커패시터의 전압은 일정하다.
- 인덕터와 변압기 코일의 저항은 무시한다.
- 변압기의 누설 인덕턴스는 1차측으로 환산하였다.
- 스위치 S1~S4 및 Sc는 기생 커패시턴스 Crl~Cr4 및 Crs를 갖는다.



〈그림 2〉 주요 전압, 전류의 파형

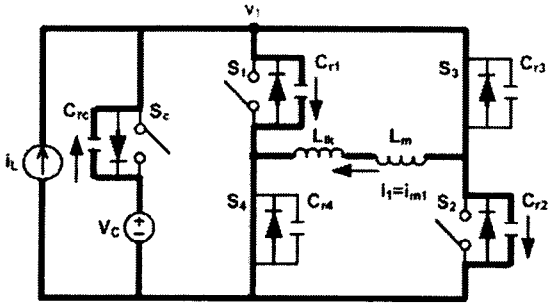
t0이전에 S1~S4 스위치는 모두 턴온되어 있고, L에는 에너지가 저장되고 있으며 따라서 iL은 증가하고 있다.

t0~t1: t0에서 S1과 S2가 턴 오프 되면서 변압기를 통해 2차측으로 전류가 흐르고, Cr1, Cr2가 충전되면서 v1은 0V에서 증가하기 시작한다.

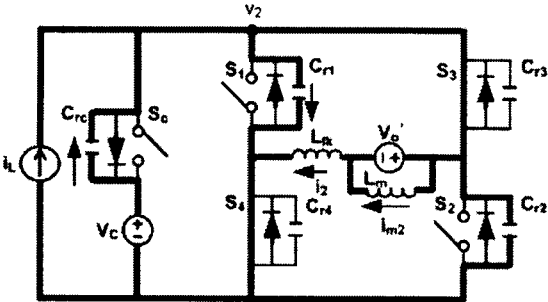
$$v_1(t) = \sqrt{\frac{L_m + L_k}{C_r}} (I_{Lmax} - I_{mmin}) \sin(\omega_1 t) \quad (1)$$

$$i_1(t) = (I_{mmin} - I_{Lmax}) \cos(\omega_1 t) + I_{Lmax} \quad (2)$$

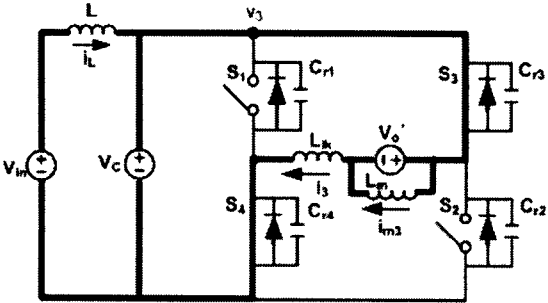
$$T_1 = \frac{1}{\omega_1} \sin^{-1} \left[\frac{V_o'}{\omega_1 L_m (i_m(0) + I_{Lmax})} \right] \quad (3)$$



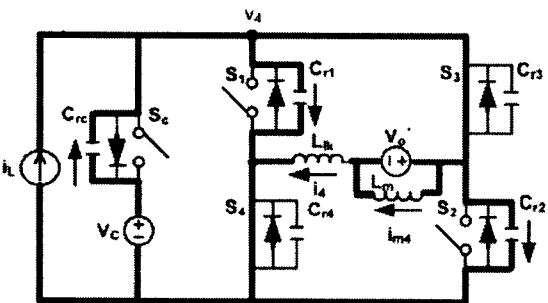
Mode 1 ($t_0 \sim t_1$)



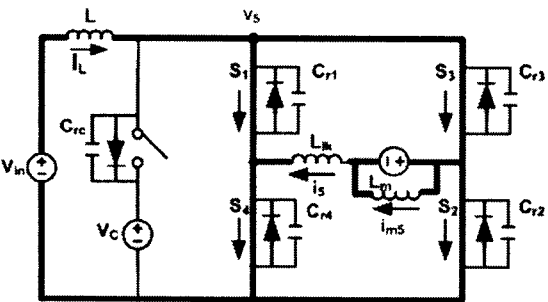
Mode 2 ($t_1 \sim t_2$)



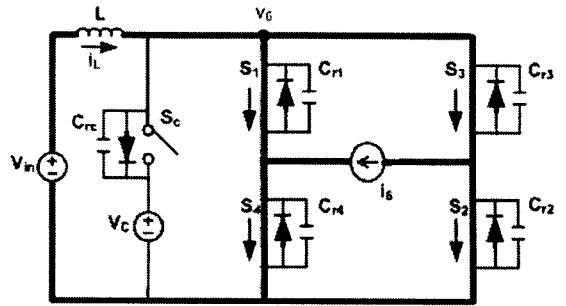
Mode 3 ($t_2 \sim t_3$)



Mode 4 ($t_3 \sim t_4$)



Mode 5 ($t_4 \sim t_5$)



Mode 1 ($t_5 \sim t_6$)

〈그림 3〉 각 모드별 등가회로

$t_1 \sim t_2$: t_1 에서 L_m 에 걸린 전압이 V_o' 와 같아지면 2차측의 다이오드가 턴 온 되어 출력 전압 V_o' 는 L_m 과 병렬로 연결된다.

$$V_o' = \frac{V_{out}}{n} \quad (\because n = \frac{N_s}{N_p}) \quad (4)$$

$$v_2(t) = \sqrt{\frac{L_{lk}}{C_r}} [I_{Lmax} - i_1(T_1)] \sin(\omega_2 t) + [v_1(T_1) - V_o'] \cos(\omega_2 t) + V_o' \quad (5)$$

$$i_2(t) = \sqrt{\frac{C_r}{L_{lk}}} [v_1(T_1) - V_o'] \sin(\omega_2 t) + [i_1(T_1) - I_{Lmax}] \cos(\omega_2 t) + I_{Lmax} \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_2} \left[\sin^{-1} \left(\frac{V_{ca} - V_o'}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \right) \right] \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{L_s}{C_r}} (I_{Lmax} - i_1(T_1)), \quad \beta = (v_1(T_1) - V_o') \quad (8)$$

$t_2 \sim t_3$: t_2 에서 $v_2 = V_c$ 가 되고, S_c 의 다이오드는 턴 온 되며 C_{r1} , C_{r2} , C_{rc} 에는 전류가 흐르지 않는다. 이 때 S_c 는 오프 상태이고, 다이오드에 전류가 흐르므로, ZVS 할 수 있다. 이 구간은 실질적으로 에너지가 2차측으로 전달되는 구간이며, i_L 이 감소하면서 클램프 커패시터에 흐르는 전류의 방향이 바뀐다.

$$v_3(t) = V_c \quad (9)$$

$$i_3(t) = \frac{V_c - V_o'}{L_{lk}} t + i_2(T_2) \quad (10)$$

$$T_3 = (1 - D) T_s - T_1 - T_2 \quad (11)$$

$t_3 \sim t_4$: t_3 에서 S_c 가 오프되면 C_c 에 흐르는 전류는 급격히 감소하고 L_{lk} 와 C_{r1} , C_{r2} , C_{rc} 의 공진에 의한 전류가 흐른다. C_{r1} , C_{r2} , C_{rc} 는 방전하면서 전압이 낮아지며, t_4 에서 $v = 0V$ 가 된다.

$$v_4(t) = \sqrt{\frac{L_s}{C_r}} [I_{Lmin} - i_3(T_3)] \sin(\omega_4 t) + (V_c - V_o') \cos(\omega_4 t) + V_o' \quad (12)$$

$$i_4(t) = \sqrt{\frac{C_r}{L_{lk}}} (V_c - V_o') \sin(\omega_4 t) + [i_3(T_3) - I_{Lmin}] \cos(\omega_4 t) + I_{Lmin} \quad (13)$$

$$T_4 = \frac{1}{\omega_4} \left[\sin^{-1} \left(\frac{V_c - V_o'}{\sqrt{\delta^2 + \lambda^2}} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{\delta^2 + \lambda^2}} \right) \right] \quad (14)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{L_{lk}}{C_r}} (I_{Lmin} - i_3(T_3)), \quad \lambda = (V_c - V_o') \quad (15)$$

$t_4 \sim t_5$: t_4 에서 C_{r1} 과 C_{r2} 양단의 전압은 0V이므로 i_L 과 i_4 의 차에 해당하는 전류가 S_1 과 S_2 의 다이오드에 흐르고, S_1 과 S_2 는 ZVS 한다. 그리고 이 구간 동안 C_c 에는 전류가 흐르지 않는다. L_{lk} 에는 $-V_o'$ 의 전압이 일정하게 걸리며, 따라서 i_4 는 $-V_o'/L_{lk}$ 의 기울기를 가지며 감소한다.

$$v_5(t) = 0 \quad (16)$$

$$i_5(t) = i_4(T_4) - \frac{V_o'}{L_{lk}}t \quad (17)$$

$$T_5 = \frac{i_4(T_4) - i_{m4}(T_4)}{V_o' \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{lk}} \right)} \quad (18)$$

$t_5 \sim t_6$: t_5 에서 S_1, S_2, S_3, S_4 모두 온 상태이므로, $v_6 = 0V$ 를 유지하며, L양단의 전압은 V_{in} 으로 일정하고, L_m 에는 일정한 전류 I_{mmax} 가 흐른다. 이 구간 동안 L에 에너지가 저장된다.

$$v_6(t) = 0 \quad (19)$$

$$i_6(t) = i_{m6}(t) = i_{m5}(T_5) \quad (20)$$

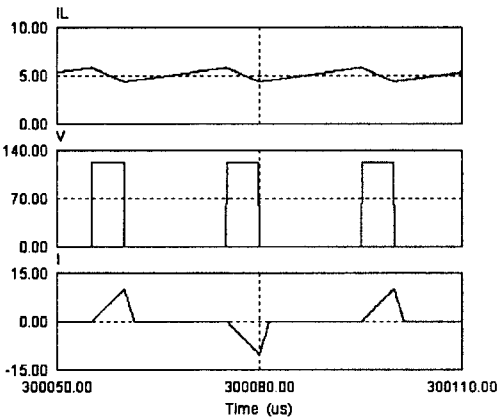
$$T_6 = DT_s - T_4 - T_5 \quad (21)$$

t_6 이후에는 지금까지의 6개의 모드가 대칭적으로 동작하며 한주기를 이룬다.

3. 시뮬레이션 및 실험 파형

앞에서 해석한 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 하여 파형을 얻었다. 회로에 쓰인 파라미터는 다음과 같다.

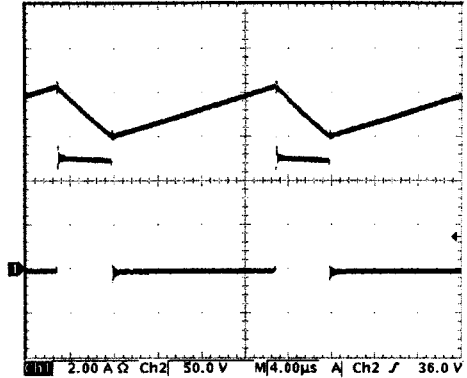
- | | |
|-------------|----------------------|
| - 입력 전압 | $V_{in} = 30V$ |
| - 듀티비 | $D = 0.75$ |
| - 스위칭 주기 | $T_s = 40\mu s$ |
| - 입력 인덕턴스 | $L = 315\mu H$ |
| - 누설 인덕턴스 | $L_{lk} = 13.5\mu H$ |
| - 자화 인덕턴스 | $L_m = 3mH$ |
| - 클램프 커패시턴스 | $C_c = 110\mu F$ |
| - 출력 커패시턴스 | $C_o = 680\mu F$ |



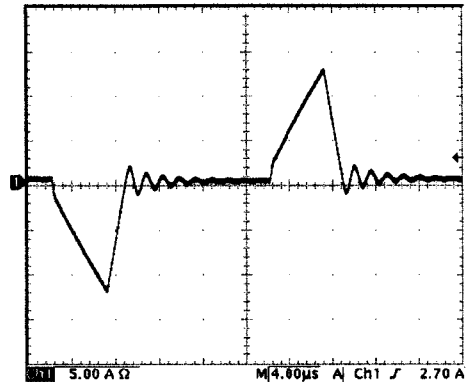
(그림 4) 입력 전류 i_L , 브리지 전압 v , 변압기 1차 전류 i 의 시뮬레이션 파형

그림 4에서 전류 i_L 이 하강하는 동안, 브리지의 전압 상승이 클램프 커패시터에 의해 제한되며, 변압기를 통해 부하에 에너지가 전달되는 것을 확인할 수 있다.

200W 부하에 대한 실험 결과는 그림 5에 있으며, 입력 전류 i_L , 브리지 전압 v 그리고 변압기 1차 전류 i 는



(그림 5) 입력 전류 i_L 과 브리지 전압 v 의 실험 파형



(그림 6) 변압기 1차 전류 I 의 실험 파형

시뮬레이션 파형과 잘 일치한다.

4. 결 론

능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터는 기존의 풀브리지에 비해 클램프 커패시터와 한 개의 스위치만 추가 되었음에도 모든 스위치의 ZVS와 그 양단의 전압을 클램핑하는 좋은 특징을 갖고 있다. 이 논문에서는 회로의 모드별 분석을 통해 주요 전압 및 전류의 수식을 유도하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 그것의 정당성을 확인하였다.

실제 회로의 구성은 입력 전압 30~60V, 출력 전압 370V에서 100W와 200W의 부하를 갖도록 설계되었으며, 회로의 파형 검증 및 손실 분석은 다음 논문에서 다루기로 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] M.W. Ellis, M.R. VonSpakovsky, D.J. Nelson, "Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century", Proceedings of the IEEE Vol.89, Issue 12, pp. 1808-1818, 2001
- [2] V. Yakushev, V. Meleshin, S. Fraidlin, "Full-bridge isolated current fed converter with active clamp", Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 560-566, 1999
- [3] R. Watson, F.C. Lee, "A soft-switched, full-bridge boost converter employing an active clamp circuit", IEEE PESC, Vol. 2, pp. 1948-1954, 1996
- [4] K. Wang, F.C. Lee, J. Lai, "Operation principles of Bi-directional full-bridge DC/DC converter with unified soft-switching scheme and soft-starting capability", IEEE PESC, pp. 1058-1062, 2000