

능동 클램프형 전류형 단상 풀브리지 DC-DC 컨버터 실험 및 손실 분석

차 한주, 안 치형, 최 순호
충남대학교 전기공학과

Loss analysis of Current-Fed Full-Bridge DC-DC Converter with Active Clamp

Hanju Cha, Chihyung Ahn, Soonho Choi

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - In this paper, operation of isolated current-fed full-bridge converter with active clamp is investigated by simulation and experiments. Experimental waveforms show a good agreement with the corresponding simulation results. Further, losses such as conduction loss, turn-on/off loss of MOSFETs and diodes are measured and their characteristics in the converter is addressed. 200W prototype DC-DC converter is developed for verification of the derived operating modes, design rules and loss analysis.

1. 서론

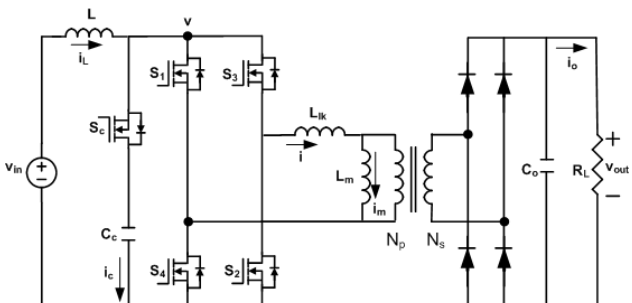
청정배기와 높은 에너지 효율로 인해 연료전지의 사용 범위는 확대되어 가고 있다. 반면에 30~60V의 낮은 출력 전압과 비선형적인 출력 특성을 가지고 있어 이로 인해 연료 전지의 출력 특성을 보완할 수 있는 전력 변환 장치의 필요성이 증대되어 가고 있다.[1] 이 논문에서는 낮은 직류전압을 높은 직류전압으로 변환하는 능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터의 동작에 대해 시뮬레이션과 실험을 통해 결과를 확인해 보았으며, 효율대비 회로 소자의 손실관계를 분석 하였다. 능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터의 주요 특징은 다음과 같다.

- 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.

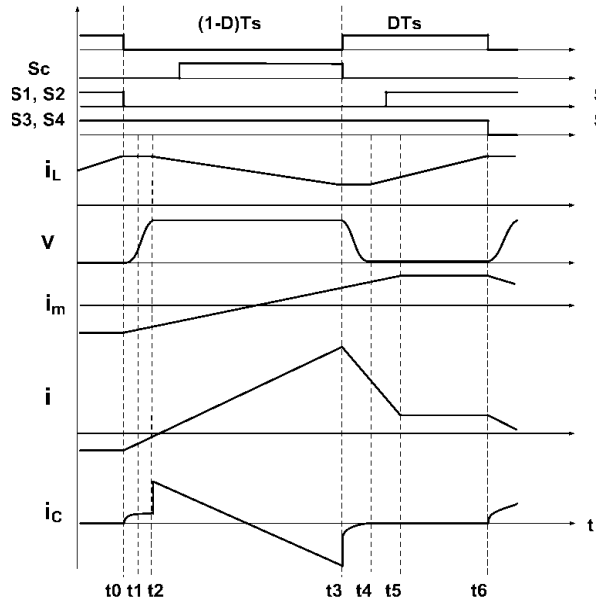
2. 회로의 동작 개요

각 모드별 해석한바와 같이 그림 1, 2는 능동 클램프를 이용한 전류형 풀브리지 컨버터의 회로와 동작파형이며, 한 주기는 6개의 모드가 대칭적으로 구성되어 있다. 회로의 기본 가정은 다음과 같다. [2][3]

- 입력 전류는 연속이다.
- 스위치는 기생 커패시터와 역병렬 다이오드를 가지며, 이상적이다.
- 클램프 커패시터와 출력 커패시터의 전압은 일정하다.
- 변압기의 누설 인덕턴스는 1차측 으로 환산하였다.
- 스위치 S₁~S₄ 및 S_c는 기생 커패시턴스 C_{r1}~C_{r4} 및 C_{rs}를 갖는다.



<그림 1> 능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터



<그림 2> 주요 전압, 전류의 파형

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

이전 논문 [2]에서 해석한 결과를 바탕으로 시뮬레이션과 실험을 통하여 파형과 동작 확인을 진행하였다. 회로사양은 다음과 같다

파라미터	사양
입력전압	$V_{in} = 30V$
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	$C_o = 680\mu F$

<표 1> 회로 사양

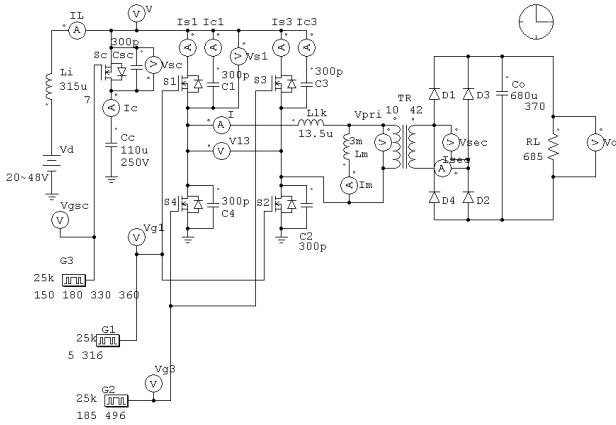
위와 같은 사양을 적용하여 다음 회로를 구성하였으며 표시된 각 인덕턴스의 입출력 전류 및 스위치의 전류 흐름과 트랜스포머의 1차측, 2차측 전류를 기본으로 시뮬레이션과 실험을 통해 검증 하였다.

- 출력 파형 및 측정 부위

 1. I_L : 입력인덕턴스의 전류(회로도의 I_L 위치)
 2. I_P : 트랜스포머의 1차측 입력 전류(회로도 I 위치)
 3. I_C : 클램프 커패시터 전류(회로도 I_C 위치)
 4. I_S : 트랜스포머의 2차측 출력 전류(회로도 I_{sec} 위치)
 5. V_{PN} : 브리지 전압(회로도 V 위치)

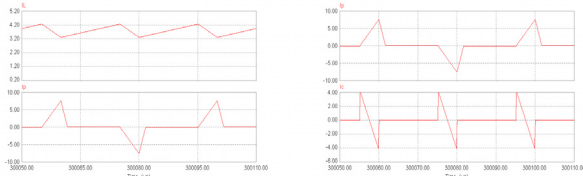
4. 손실 분석

손실분석은 출력기준으로 100W부하와 200W부하에서 진행하였고 실제 회로에서 입출력 손실 대비 MOSFET와 정류기의 스위칭 및 전도 손실을 비교 검증 하였다.

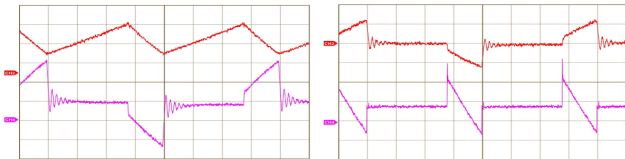


<그림 3> 시뮬레이션 및 실험 설계 회로

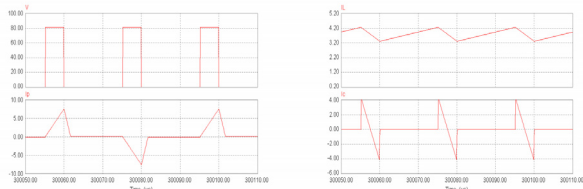
그림 3은 PSIM을 사용한 구현한 회로도이다. 입력 인덕턴스의 전류와 트랜스포머의 1차측 전류 및 클램프커패시의 듀티에 따른 전류의 특성 변화를 시뮬레이션과 실험 파형으로 확인 하였다.



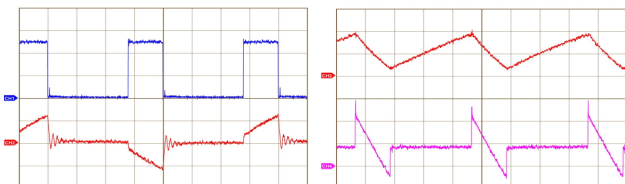
<그림 4> I_L - I_p 시뮬레이션 파형 <그림 5> I_p - I_c 시뮬레이션 파형



<그림 6> I_L - I_p 실험 파형 (Ch1:2A/D, Ch2:2.5A/D, 10us) <그림 7> I_p - I_c 실험 파형 (Ch1:5A/D, Ch2:2.5A/D, 10us)

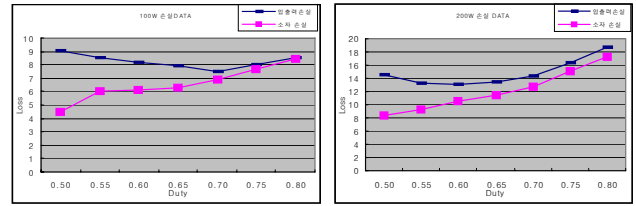


<그림 8> V_{PN} - I_p 시뮬레이션 파형 <그림 9> I_L - I_c 시뮬레이션 파형



<그림 10> V_{PN} - I_p 실험 파형 (Ch1:40V/D, Ch2:2.5A/D, 10us) <그림 11> I_L - I_c 실험 파형 (Ch1:2A/D, Ch2:2.5A/D, 10us)

그림 6에서는 입력 임피던스의 방전시간에 트랜스포머 1차측을 통해 에너지가 2차측으로 전달되는 것을 확인 하였으며 특히, 그림 11에서 클램프 커패시터의 동작 상태는 t_2 mode에서 실질적으로 에너지가 2차측으로 전달되는 구간에서의 i_L 이 감소하면서 클램프 커패시터에 흐르는 전류의 방향이 바뀔 수 있다. 또한 전류 i_L 이 하강하는 동안, 브리지의 전압 상승이 클램프 커패시터에 의해 제한되며, 변압기를 통해 부하에 에너지가 전달되는 것을 확인할 수 있다.



<그림 12> 100W 손실 비교

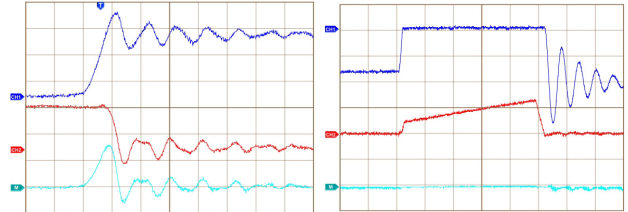
<그림 13> 200W 손실 비교

Duty		0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
입출력 (P _O -P _W)	100W	9.06	8.51	8.15	7.90	7.49	7.98	8.57
	200W	14.60	13.26	13.02	13.37	14.39	16.42	18.74
소자 (W)	100W	4.48	6.01	6.12	6.28	6.86	7.63	8.47
	200W	8.45	9.30	10.50	11.50	12.65	15.10	17.20

<표 2> 입출력 손실 대비 스위칭 손실 비교

100W와 200W공히 MOSFET와 출력측 다이오드의 스위칭 손실과 전도손실에 대한 측정 결과이며 스위칭 손실은 절대적으로 많은 반면에 전도손실은 Duty가 증가 할수록 커지는 것을 검토 결과 파악할 수 있다.

다음은 MOSFET소자의 주요 손실부분인 턴 오프 손실과 다이오드의 주요 손실인 전도 손실에 대한 실험 파형이다.



<그림 14> FET 턴 오프 손실 (Ch1:40V/D, Ch2:2A/D, 10us) <그림 15> 다이오드 손실 (Ch1:10V/D, Ch2:1A/D, 10us)

MOSFET는 실험 회로 동작 특성인 영전압 턴 온 으로 인하여 스위칭 턴 오프 손실과 전도 손실을 측정하였으며, 정류기는 스위칭 손실이 적으므로 전도 손실을 중심으로 결과를 산출하였다.

5. 결론

능동 클램프형 전류형 풀브리지 컨버터는 기존의 풀브리지에 비해 클램프 커패시터와 한 개의 스위치만 추가되었음에도 모든 스위치의 ZVS와 그 양단의 전압을 클램핑 하는 좋은 특징을 갖고 있다. 이전 논문[2]에서 회로의 모드별 분석을 통해 주요 전압 및 전류의 수식을 유도하였고, 본 논문에서는 시뮬레이션과 실험을 통해 그것의 정당성을 확인하였다. 또한 입력 전압 20~50V, 출력 전압 370V에서 100W와 200W의 부하를 갖도록 하는 실제 회로를 설계하여, 회로의 파형 검증 및 손실 분석을 진행한 결과 소자의 스위칭 손실은 절대적으로 존재하는데 반해 전도손실은 Duty비의 증가에 따라 증가하는 것을 알 수 있으며 실제 손실과 입출력 손실 간에 비례관계가 있음을 확인 하였다.

[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] 차한주, 최순호, 안치형, "능동 클램프형 전류형 단상 풀브리지 DC-DC 컨버터의 동작 해석" 대한전기학회 춘계 학술대회 4-19 2007
- [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