

손실해석을 통한 능동 클램프 포워드 컨버터의 동작 특성비교

오덕진*, 김희준*, 김창선**
 한양대학교 전기공학과*, 목포대학교 전기공학과**

A Comparative Study of Operation characteristics of Active Clamp Forward Converter Based on Loss Analysis

Deog-Jin Oh*, Hee-Jun Kim*, Chang-Sun Kim**
 Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.*, Dept. of Electrical Eng. Mokpo National Univ.**

Abstract - In this paper, Operation characteristics of the active clamp(ACL) zero-voltage-switching(ZVS) forward converter(FC) and active clamp hard-switching(HS) forward converter are compared with respect to loss analysis. The losses of semiconductor (including conduction losses and switching losses), transformer(containing the core loss and copper loss) and parasitic element of passive element (capacitor, inductor) are measured and compared for each type. For an experiment we have built 50W ACL ZVS-FC and ACL HS-FC, in which the switching frequency is 200kHz, and test it. The experimental results show that both types of operation have nearly same characteristics.

2. 본 론

2.1 능동 클램프 포워드 DC/DC 컨버터

포워드 DC/DC 컨버터는 회로 구조상 안정성이 뛰어난 컨버터로서 높은 신뢰성이 요구되는 전원으로 많이 이용되고 있다. 그림 1은 능동 클램프 포워드 컨버터의 회로도를 나타낸다.

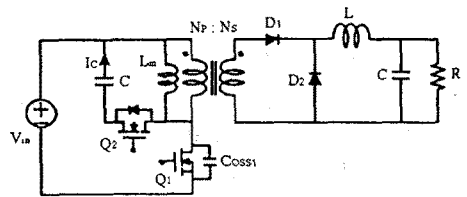


그림 1 능동 클램프 포워드 컨버터

1. 서 론

포워드 컨버터는 중·소형의 직류 안정화 전원장치로 많이 이용되고 있다. 그러나 다른 회로 방식에 비해 시스템의 상당 부분을 차지하는 변압기와 인덕터 등의 에너지 축적용 소자가 많이 이용되고 있으며, 이로 인해 소형·경량화에 대한 요구는 필수적이다. 에너지 축적용 소자의 소형화를 위해서는 컨버터의 스위칭 주파수를 높여야 하는데, 이를 통해 나타나는 문제점은 스위칭 소자의 스위칭 손실과 전압 스트레스를 들 수 있다. 스위칭 손실은 전이기간 동안 스위치의 전류와 전압이 중복됨으로써 나타나게 된다. 그리고 높은 전압 스트레스를 발생시키는 스위치의 기생 인덕턴스 혹은 변압기의 누설 인덕턴스와 스위치의 기생 커패시턴스의 공진으로 인해 노이즈가 증가하고 스위칭 소자의 신뢰성이 떨어지게 된다.

능동 클램프 포워드 컨버터는 커패시터와 직렬로 연결된 보조스위치를 변압기와 병렬 접속시킴으로써 변압기의 자화 에너지 및 누설 인덕턴스 에너지를 흡수하여 전원 측으로 회생시킬 수 있다. 또한 보조 스위치의 도통과 전압원으로 동작화 되는 클램프 커패시터를 이용해 변압기의 자화 에너지를 능동 리셋시킴으로써 50% 이상의 시비율에서도 동작이 가능하다. 이로 인해 광범위한 입력전압변화 혹은 교류입력에 대해 스위치의 전압 스트레스가 거의 일정하게 유지되는 장점을 갖는다.

본 논문에서는 능동클램프 포워드컨버터의 동작에 있어서 영전압 스위칭 동작모드와 비영전압 스위칭 동작모드의 특성비교를 손실해석을 통하여 수행하였다. 자성부품을 포함한 수동소자의 기생요소에 의한 손실과 반도체 소자에서 나타나는 스위칭손실 및 전도손실등 컨버터 전체의 손실을 해석하였다. 그 결과 두 동작모드에서 거의 동일한 손실 특성을 보였다. 이상의 해석결과는 50W, 200kHz의 능동클램프 포워드 컨버터를 제작, 실험함으로써 그 타당성을 입증하였다.

트랜스포머의 기생요소인 누설인덕턴스를 포함한 자화 인덕턴스와 주 스위치 Q1의 기생 출력 커패시턴스가 공진이 될 때 자화인덕턴스에 축적된 에너지가 기생 커패시턴스에 축적되는 에너지보다 큰 경우 이 컨버터는 영전압 스위칭모드로 동작하게 된다. 따라서 이 컨버터의 동작모드는 크게 비영전압스위칭 모드와 영전압 스위칭 모드로 나눌 수 있으며 트랜스포머의 자화인덕턴스의 값에 의해 결정된다.

2.1.1 비영전압 스위칭 동작모드

그림 2에 능동 클램프 포워드 컨버터의 비영전압 스위칭모드 동작에 있어서의 주요 파형을 나타낸다. 보조 스위치 Q2는 트랜스포머의 자화 에너지를 리셋시키면서 주스위치 Q1의 전압 스트레스를 Vc에 클램프시키는 역할을 한다.

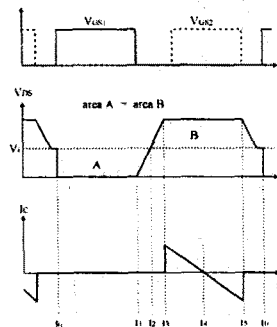


그림 2 동작 파형(비영전압 스위칭모드)

2.1.2 영전압 스위칭 동작모드

그림 3에 능동 클램프 포워드 컨버터의 영전압 스위칭모드 동작에 있어서의 주요 파형을 나타낸다. t0에서 t6까지의 동작은 비영전압 스위칭모드의 동작과 동일하

며 t_6 에서 t_0 까지의 동작에서 영전압 스위칭의 동작을 보이게 된다.

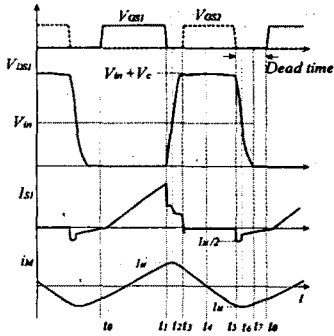


그림 3 동작 파형 (영전압 스위칭모드)

t_5 에서 보조스위치 Q_2 가 턴오프 되면 자화인덕턴스 L_m 과 출력 커패시턴스 C_s ($C_{oss1} + C_{oss2}$)의 공진에 의하여 부의 자화전류가 주 스위치 Q_1 의 출력 커패시터를 V_{in} 까지 방전시킨다. 그리고 t_6 의 시점 이후, 자화전류의 크기가 1차측으로 환산한 전류 I_o/N 보다 큰 경우 Q_1 의 출력 커패시터에서의 방전은 계속 일어나며 t_7 의 시점에서 영전압이 되고 결국 영전압 스위칭 동작을 하게 된다. 이로부터 자화전류의 크기가 영전압 스위칭에 관계됨을 알 수 있으며 자화전류의 크기는 트랜스포머의 자화인덕턴스 L_m 에 의해 조절된다.

2.2 손실 해석

능동 클램프 포워드 컨버터의 전체손실은 반도체 소자 (스위치, 다이오드)의 전도손실과 스위칭손실, 자성소자 (트랜스포머, 인덕터)의 철손과 동손 수동소자의 기생요소에 의한 손실등으로 구성된다.

2.2.1 전도손실

반도체소자의 전도손실은 스위치의 도통시 채널 저항을 통해 흐르는 전류에 의해서 발생하는 전도손실과 환류 다이오드와 포워드 다이오드의 순방향 전압강하에 의해 발생하는 전도손실로 크게 나누어진다.

MOSFET의 채널저항에 의해서 발생하는 전도손실은 다음식으로 주어진다.

$$P_{R_{DS(on)}} = I_{DSrms}^2 * R_{DS(on)} \quad (1)$$

여기서 $R_{DS(on)}$ 은 채널의 도통 저항, I_{DSrms} 은 스위치를 흐르는 전류의 실효치이다.

환류다이오드와 포워드다이오드의 순방향 전압강하에 의한 전도손실은 다음식으로 주어진다.

$$P_D = V_F * I_o \quad (2)$$

여기서 V_F 는 다이오드의 순방향 전압강하를 나타낸다.

2.2.2 스위칭 손실

MOSFET의 on, off 상태가 변화하는 과도상태에서 채널의 전류가 흐르는 상태에서 전압이 인가되어 스위칭 손실 P_s 가 발생되며, 이것은 회로의 동작모드에 따라 다르게 나타난다. 영전압 스위칭모드에서는 영전압 turn on으로 인해 turn on 손실은 존재하지 않는다. 스위칭 손실을 다음식으로 주어진다.

$$P_s = f_s * \text{energy}(\text{turn on} + \text{turn off}) \quad (3)$$

여기서 f_s 는 스위칭 주파수를 나타낸다.

2.2.3 자성소자 손실

자성소자인 트랜스포머와 인덕터의 손실은 크게 동손과 철손의 두 부분으로 나눌 수 있으며 철손은 또한 크게 와전류손과 히스테리시스손으로 나눌 수 있다. 그러나 트랜스포머와 인덕터의 코어로 사용되는 페라이트 코어의 겨우 코어의 저항이 매우 높아 와전류손은 무시하였다.

2.2.2.1 동손

고주파 자성소자의 동손은 다음 식으로 표현된다.

$$P_{CU} = I_{rms}^2 * R_{DC} \quad (4)$$

여기서 I_{rms} 는 권선에 흐르는 전류의 실효치이며 R_{DC} 는 권선의 형태와 저항률(ρ)에 의해 결정되는 DC 저항이다. 그러나 고주파 응용인 경우 표피효과, 근접효과 등에 의하여 등가적으로 저항이 상승하게 되는데 이 저항을 R_{AC} 라고 했을 때 식(4)의 동손은

$$P_{CU} = I_{rms}^2 * R_{AC} \quad (5)$$

로 수정 될 수 있다.

2.2.2.2 철손

자성소자의 철손은 자성재료의 재질에 따라 각각 다른 특성식으로 주어지며 스위칭 주파수와 자속밀도에 비례하여 증가한다. 철손의 실험식은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{fe} = K_{feo} * f^m * B_{ac}^n [W] \quad (6)$$

여기서 K_{feo} 는 비례상수, B_{ac} 는 자속밀도[mT] 이다.

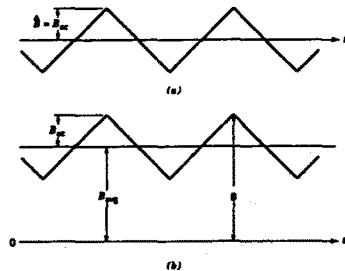


그림 4 자속밀도의 파형 (a) no time average and (b) with a time average

그림 4는 자속밀도(B_{ac})의 시간에 대한 변화를 나타내는 그림으로서 (a)는 평균값이 0일 때 (b)는 평균값이 0이 아닐 때를 나타낸다. 능동클램프 포워드 컨버터의 경우 트랜스포머와 인덕터 모두 (a)와 같은 양상으로 나타난다. 사용한 TDK社의 PC40계질의 페라이트 코어 Data-book에서 실험적으로 구해진 손실특성으로부터 철손의 특성식을 구하면 다음과 같다.

$$P_{fe} = 3.5292 * 10^{-6} * B_{ac}^{2.6206} [W] \quad (\text{at } 200\text{kHz}) \quad (7)$$

2.2 실험 결과

이상의 해석결과의 타당성을 입증하기 위해서 실험을 수행하였으며 실험세트의 설계사양은 다음과 같다.

- 입력 전압 : 50V
- 출력 전압 : 5V
- 출력 전류 : 10A
- 스위칭 주파수 : 200kHz

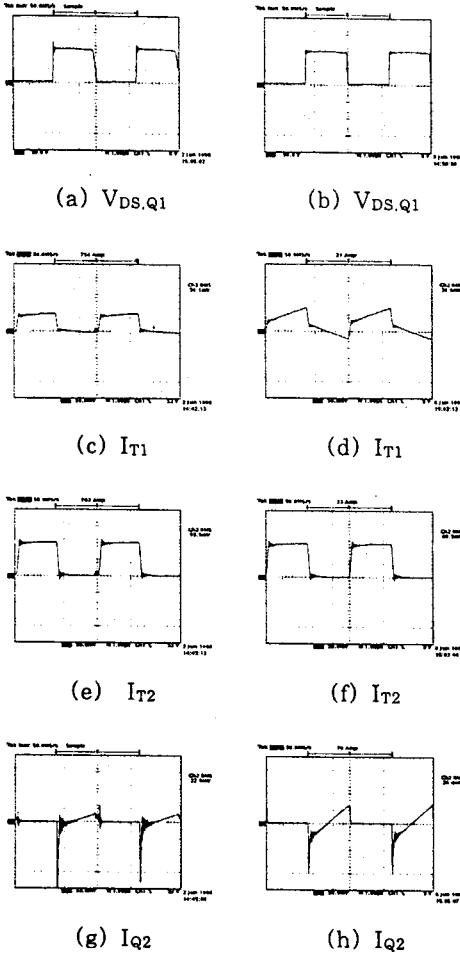
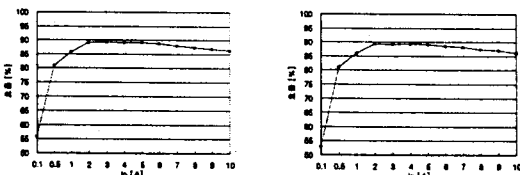


그림 5 각부의 실험 파형

(a),(c),(e),(g) : ACL HS-FC
 (b),(d),(f),(h) : ACL ZVS-FC

그림 5는 영전압 스위칭모드와 비영전압스위칭 모드에 있어서 각부의 파형을 나타낸다. (a), (b)는 주스위치 전압, (c), (d)는 트랜스포머 1차측 전류, (e), (f)는 트랜스포머 2차측 전류, (g), (h)는 보조스위치 전류 파형을 나타낸다.



(a) 비영전압 스위칭 (b) 영전압 스위칭
 그림 6 추정 효율

그림 6은 비영전압 스위칭 모드에서와 영전압 스위칭 모드에서의 추정효율을 나타낸다. 최대 효율은 비영전압 스위칭 모드에서 89.31%, 영전압 스위칭 모드에서 89.12% 이다.

표 1에 실험 결과를 정리하였다. 표 1의 결과로부터, 능동클램프 파워드 컨버터의 두 개의 동작모드에 있어서 손실은 거의 유사한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 손실분포에 있어서 주된 손실은 스위치, 다이오드, 인덕터이다.

표 1 능동클램프 파워드 컨버터의 손실 해석($I_o=10A$)

| 구 분 | | HS-FC | | ZVS-FC | |
|--------------|-------|----------------|---------|----------------|-------|
| | | 손실 [mW] | 비고 | 손실 [mW] | 비고 |
| 스위치 | 주스위치 | 2231.00 | 29.1% | 2296.40 | 35.0% |
| | 보조스위치 | 94.59 | | 532.33 | |
| 다이오드 | | 2500.00 | 31.3% | 2300.00 | 28.5% |
| 트랜스포머 | 동 손 | 1차측 | 118.61 | 139.70 | 15.2% |
| | | 2차측 | 1041.80 | 1057.00 | |
| | 철 손 | 26.65 | 26.10 | | |
| 필터 인덕터 | 동 손 | 1579.30 | 19.7% | 1563.80 | 19.4% |
| | 철 손 | 33.5[μ W] | | 42.2[μ W] | |
| 입력필터 커패시터 | | 41.1[μ W] | | 42.2[μ W] | |
| 출력필터 커패시터 | | 0.30 | 0.1% | 0.25 | 0.1% |
| 클램프 커패시터 | | 5.46 | | 4.49 | |
| Unknown Loss | | 398.60 | 5.0% | 146.40 | 1.8% |
| Total Loss | | 7.99[W] | 100% | 8.07[W] | 100% |

3. 결 론

본 논문에서는 손실해석을 통하여 능동 클램프 파워드 컨버터의 동작모드가 트랜스포머의 자화인덕턴스의 값에 의해 구분된다는 점을 규명하였다. 전체손실에서 스위치가 차지하는 비율은 영전압 모드인 경우 자화인덕턴스의 감소로 인한 자화전류의 증가로 인해 증가하며, 트랜스포머의 1차측 동손도 증가한다. 또한 효율에 있어서는 두 개의 동작모드가 거의 유사한 측정결과를 보이고 있음을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] L. Huber, D. Sable, G. Hua, F. C. Lee N. LaPrade, "Design of a High-Efficiency Power Converter for a satellite Solid-State Power Amplifier", IEEE, 1994
- [2] Dhaval Dalal, "Design Considerations for Active Clamp and Reset Technique", Unitrode Application Note, pp. 3.1-3.23, 1997
- [3] G. Stojcic, F.c. Lee, s. Hiti, "Small-Signal Characterization of Active-clamp PWM Converter", VPEC Seminar Proceedings, pp. 237-245, 1995
- [4] D.H. Park, H.J. Kim, Y.S. Sun, "A Development of the off-line Active Clamp ZVS Forward Converter for Telecommunication Applications", Proceeding Intellec '97, pp. 13.4, 1997

본 연구는 1998년도 한국과학재단 특정기초연구의 지원에 의하여 수행된 결과의 일부임.
 과제번호 : 96-0102-09-01-3