

# 낮은 도통손실을 가지며 넓은 영전압 스위칭 범위를 갖는 두 개의 변압기를 이용한 능동 클램프 포워드 컨버터

문상철, 박기범, 문건우, 윤명중  
한국과학기술원

## A wide ZVS range two-transformer active-clamp forward converter with low conduction loss

SANGCHEOL MOON, KI-BUM PARK, GUNWOO MOON, MYUNGJOONG YOON  
KAIST

### ABSTRACT

Conventional active-clamp forward converter has narrow ZVS range of main switch. Although utilizing high magnetizing current can realize wide ZVS range, it increases the conduction loss. To solve this problem, a new asymmetric two-transformer active clamp forward converter is proposed. Proposed converter achieves wide ZVS range without severe conduction loss penalty, which results in high efficiency and high power density.

### 1. 서론

최근 차세대 이동통신 장비, 자동교환기 등의 통신장비 등에서는 작은 사이즈로 고품질의 전원을 높은 효율로 공급해 줄 수 있는 전력 공급 장치를 요구하고 있다. 이러한 중소용량의 컨버터로서 비교적 효율이 높고 ZVS가 가능한 능동클램프 포워드 컨버터<sup>[1]</sup>가 널리 사용 되어 왔다. 그러나 기존의 능동 클램프 포워드 컨버터의 경우 주 스위치의 ZVS가 힘든 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고 도통손실을 줄이기 위한 기존의 방법으로 자화전류의 크기를 조절하는 방법이 있다. 자화 전류의 크기를 줄이면 도통손실을 줄일 수 있으며, 자화 전류의 크기를 늘리면 주 스위치의 ZVS 범위를 넓일 수 있다. 그러나 자화 전류의 크기가 줄어들면 ZVS 범위가 줄어들고, 자화 전류의 크기를 늘리면 도통손실이 커지는 단점이 있다. 기존의 방법으로 는 이 두 가지 조건을 만족 시킬 수 없다. 이를 해결 하기 위해 본 논문에서는 두 개의 변압기를 이용한 능동클램프 포워드 컨버터<sup>[2-4]</sup>의 새로운 동작방법을 제안한다. 새롭게 제안하는 컨버터는 두 개의 변압기의 자화 인덕터를 비대칭으로 사용함으로써 도통손실을 줄이고 ZVS 범위를 넓힌다는 장점을 갖는다.

### 2. 본론

#### 2.1 동작원리

Fig 1은 제안된 컨버터의 회로도이다. 자화전류가 비대칭인 두 개의 변압기가 직렬로 연결되어서 출력단에 전력을 공급하게 된다. 변압기가 교번하며 인덕터로서의 역할을 하기 때문에 출력 인덕터가 부가적으로 필요하지 않고, 캐패시터만으로 필터링을 할 수 있다. 기본 동작은 기존의 능동 클램프 포워드와 동일하다. 스위치 Q1만 on 된 구간이 1차측에서 2차측으로 전

력이 넘어가는 파워링 구간이고, 스위치 Q1, Q2가 off 된 구간은 ZVS 및 커뮤테이션 구간, 스위치 Q2만 on 된 구간은 변압기 리셋 구간이다. 자세한 동작원리는 다음의 6개 모드로 나누어 설명할 수 있다.

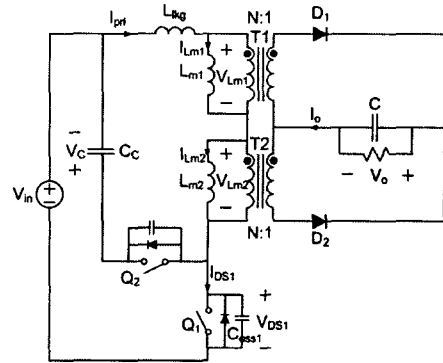


Fig 1 Schematic of the proposed converter

#### 2.2 모드해석

Fig 2는 정상상태에서 제안된 컨버터 동작의 주요 파형을 나타내고 있다. Fig 3은 각 모드별 동작상태를 나타낸 그림이다.

- Mode 1 ( $t_0 < t < t_1$ ) : 스위치 Q1이 on 된 구간이다. 첫 번째 변압기가 forward type의 컨버터로서 동작하는 구간이다. D1은 도통되어있고 D2는 역방향 바이어스 되어있기 때문에 T1의 1차측에는  $NV_o$ 의 전압이 걸린다. T2에는  $V_{in} - NV_o$ 의 전압이 걸리고  $L_{m2}$ 가 출력 인덕터 역할을 하게된다. 이때 변압기의 1차측에 흐르는 전류는 다음과 같이 얻어진다.

$$I_{pri}(t) = \frac{V_{in} - NV_o}{L_{m2}}(t - t_0) + I_{pri}(t_0) \quad (1)$$

- Mode 2 ( $t_1 < t < t_2$ ) : 스위치 Q1이 off 된 순간 Q1의 캐패시터에 전하가 충전되기 시작하여  $V_{DS1}$ 이 상승한다.  $V_{DS1}$ 가  $V_{in}$ 까지 상승하게 되면 T1,2의 양단에 0v의 전압이 걸리게 되어 D1, D2가 도통하게된다.

- Mode 3 ( $t_2 < t < t_3$ ) : D1, D2가 도통하면서 출력측 전류가 커뮤테이션하는 구간이다. D1을 통해 흐르던 전류가 점점 D2를 통해 흐르게 되고  $V_{DS1}$ 는  $V_{in} + V_c$ 까지 상승하게 된다.

- Mode 4 ( $t_3 < t < t_4$ ) : 스위치 Q2가 on된 구간이다.

이 구간에서 출력측 전류는 D2를 통해 흐르고 T1은 출력 인덕터로서 T2는 변압기로서 동작을 한다. T1의 1차측에는  $V_c - NV_o$ 의 전압이 걸리고, T2의 1차측에는  $NV_o$ 의 전압이 걸린다. 이때 변압기의 1차측에 흐르는 전류는

$$I_{pri}(t) = -\frac{V_c - NV_o}{L_{m2}}(t - t_3) + I_{pri}(t_3) \quad (2)$$

으로 얻어진다.

• Mode 5 ( $t_4 < t < t_5$ ) : 스위치 Q2가 off 된순간 Q2의 캐패시터에 전하가 충전되고 누설 인덕턴스의 의해서 Q1의 캐패시터에서 방전이 일어난다.  $V_{DS1} = V_{in}$ 일때 2차측에서 커뮤테이션이 시작된다.

• Mode 6 ( $t_5 < t < t_6$ ) : D1, D2가 도통하면서 출력측 전류가 커뮤테이션하는 구간이다. D2를 통해 흐르던 전류가 점점 D1을 통해 흐르게 되고  $V_{DS1}$ 의 전압이 '0'v 까지 떨어지게 되고  $t_6$ 에서 Q1이 on 되면서 Q1의 ZVS가 된다. 이때 ZVS조건은 다음의 식과 같다.

$$\frac{1}{2}L_{lkq}(I_{pri})^2 > \frac{1}{2}C_{oss1}(V_{IN})^2 \times 2 \quad (3)$$

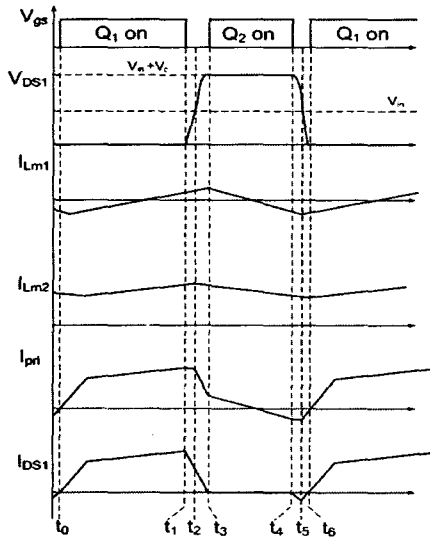


Fig 2 Key waveforms for mode analysis

### 3. 특성 비교 분석

먼저 (a)ZVS범위를 넓히기위해 자화인덕턴스를 줄인 기존의 컨버터와 (b)도통손실을 줄이기위해 자화인덕턴스를 늘인 기존의 컨버터와 (c)제안된 컨버터 특성을 비교해보면 다음과 같다. 여기서 제안된 컨버터의 on time 동안  $I_{pri}$ 의 기울기와 기존의 high  $L_m$ 의  $I_{pri}$ 의 기울기가 같도록  $L_m$ 값을 맞추었고 off time 동안은 low  $L_m$ 의  $I_{pri}$ 의 기울기와 같도록 맞추었다. 즉

$$L_{ma} = \frac{V_c}{V_c - NV_o} L_{m1}, L_{mb} = \frac{V_{in}}{V_{in} - NV_o} L_{m2} \quad (4)$$

$$L_{m1} = kL_{m2} \quad (0 < k \leq 1)$$

Fig 4에서 보듯이 Q1이 on time동안  $I_{pri,rms}$ 값이 가장 큰 (a)Low  $L_m$ 인 경우가 도통손실이 가장 크다. 그리고 (b)High  $L_m$ 인 경우와 (3)제안된 컨버터는 비슷한 도통손실을 갖는다. ZVS 할때  $I_{pri}$ 의 피크치를 보면 High  $L_m$ 인 경우가 가장 작아 ZVS가 잘 되지 않는다. 그리고 Low  $L_m$ 인 경우와 제안된 컨버터의 경우  $I_{pri}$  피크치가 커서 ZVS 범위가 더 넓다. 자세한 수식은 Table 1에 정리

하였다.

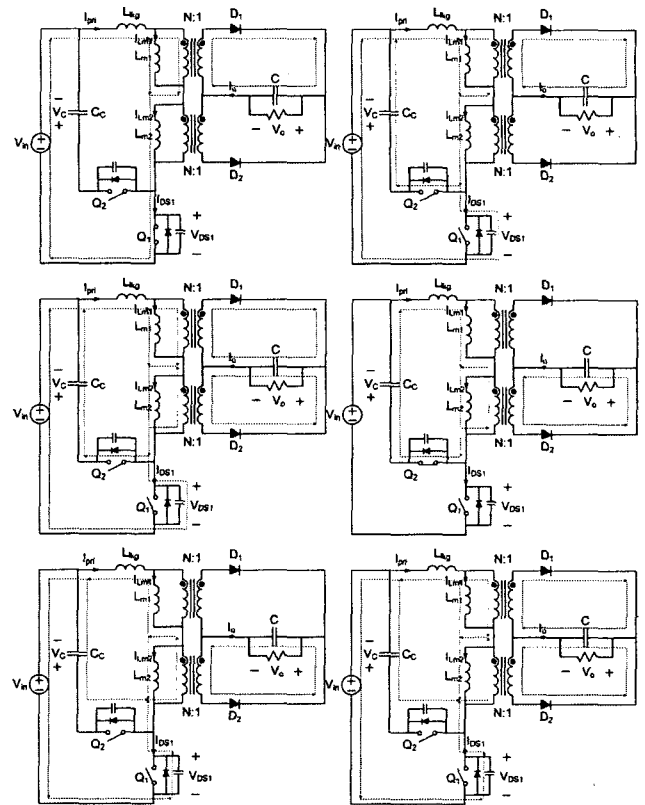


Fig 3 Mode 1~6

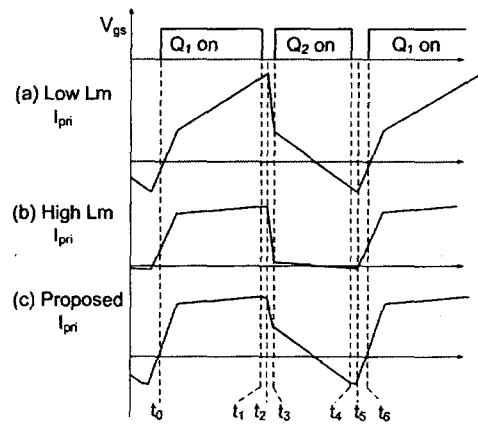


Fig 4  $I_{pri}$

Table 1 switch conduction loss and  $I_{pri}$

	low $L_m$ : $L_{ma}$	high $L_m$ : $L_{mb}$	proposed converter
switch conduction loss	$\{(V_{in})^2(DTs)^2 / 12(L_{ma})^2 + D^2(V_{in})^2 / R_o^2 N^4\} R_{DS}$	$(V_{in})^2 D^3 Ts R_{DS} / R_o^2 N^4$	$(V_{in})^2 D^3 Ts R_{DS} / R_o^2 N^4$
$I_{pri}$ at ZVS condition	$V_{in} D^3 Ts / 2kL_{mb} (1-D)^2$	$V_{in} D^2 Ts / 2L_{mb} (1-D)$	$V_{in} D^3 Ts / 2kL_{mb} (1-D)^2$
$\frac{Low L_m loss}{Proposed loss} = \left( \frac{R_o^2 N^4 Ts^2}{12L_{ma}^2} + N^2 \right) \times \frac{1}{DTs} > 1$			
$\frac{High L_m I_{pri}}{Proposed I_{pri}} = \frac{(1-D)K}{D} < 1$			

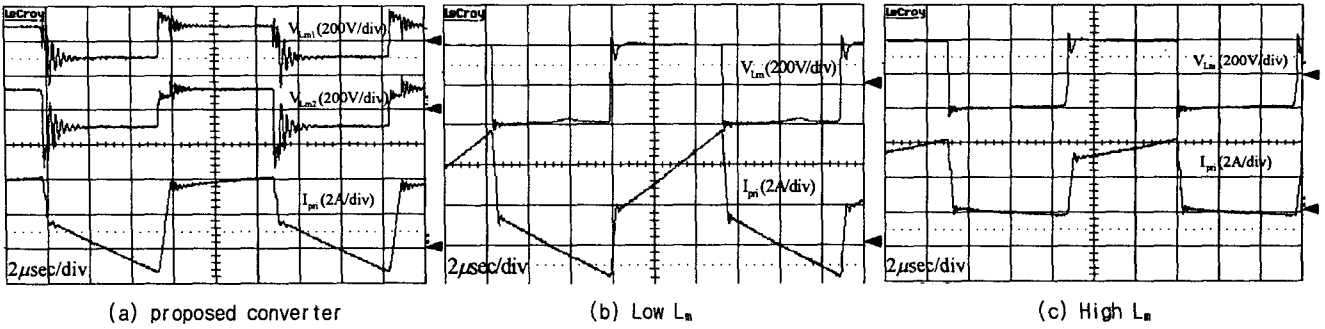


Fig 5 Experiment wave forms

#### 4. 실험 결과

제안된 컨버터의 실험 사양은 다음과 같다.

- ◎ 입력 전압  $V_{in} = 200V$
- ◎ 출력 전압  $V_{out} = 50V$
- ◎ 출력 전력  $P_{out} = 250W$
- ◎ 스위칭 주파수  $F_s = 100kHz$
- ◎ 턴비  $N_p : N_s = 2 : 1$
- ◎ Duty :  $D = 0.5$  at full load
- ◎ 자화 인덕턴스  $L_{m1} = 170\mu H, L_{m2} = 2mH,$   
 $L_{ma} = 335\mu H, L_{mb} = 1.83mH$
- ◎ 누설 인덕턴스  $L_{lk} = 20\mu H$

Fig 5에서 첫 파형은 제안된 컨버터의 두 개의 트랜스포머 양단 전압과  $I_{m1}$ 를 보여준다. 둘째 파형은 Low  $L_m$ 인 경우 변압기 양단 전압과  $I_{m1}$ , 셋째 파형은 High  $L_m$ 인 경우 변압기 양단 전압과  $I_{m1}$ 를 보여준다. Fig 6에서 첫째 파형은 정격에서 주 스위치의 ZVS가 잘되고 있음을 보여주고, 둘째 파형은 정격에서 보조 스위치의 ZVS를 보여준다. 셋째 파형은 20% load에서 ZVS가 안 되는 것을 보여준다. 실험 결과 제안된 컨버터는 약 23% load 까지 ZVS가 가능하였다.

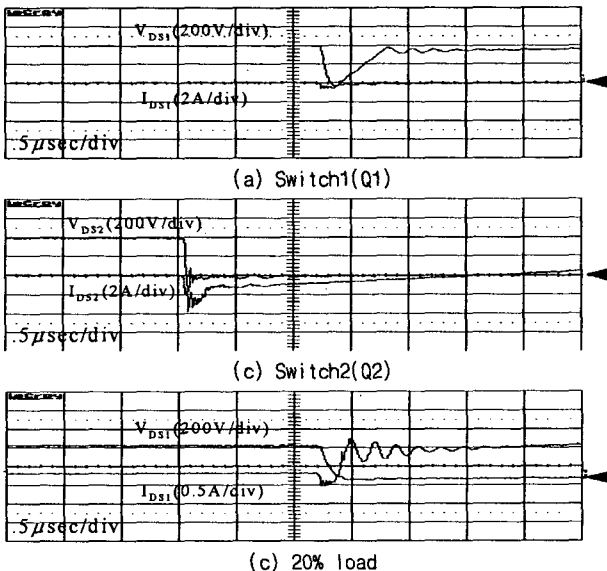


Fig 6 Experiment wave forms(ZVS of Proposed converter)

#### 5. 결론

본 논문에서는 직렬로 연결된 자화전류가 비대칭인 두 개의 변압기를 채용하여 능동 클램프 포워드 컨버터를 제안하였다. 그 결과 두 개의 변압기가 교번으로 출력 인덕터 역할을 하고

도통손실을 줄이고 주 스위치의 ZVS 범위를 넓히는 효과를 얻을 수 있었다. 그리고 모드 해석을 통하여 제안된 컨버터의 동작을 확인하였다.

200V 입력, 50V출력의 250W급 컨버터를 (a) Low  $L_m$ , (b) High  $L_m$  인 경우, (c) 제안된 컨버터에 대하여 각각의 prototype을 제작하고 결과를 비교분석 하였다. 제안된 컨버터의 효율은 정격에서 약 92%를 나타냈으며 최대 95%까지 얻을 수 있었고 10% load에서도 94%의 효율을 나타냈다. 기존의 Low  $L_m$  인 경우 정격에서 91%, 최대93%, 10% load에서 86%를 나타냈다. High  $L_m$  인 경우 정격에서 92%, 최대93%, 10% load에서 89%를 나타냈다.

본 논문에서 제안한 두 개의 변압기를 이용한 능동클램프 포워드 컨버터의 새로운 동작방법은 도통손실을 줄이고, ZVS범위를 넓히는 장점이 있다.

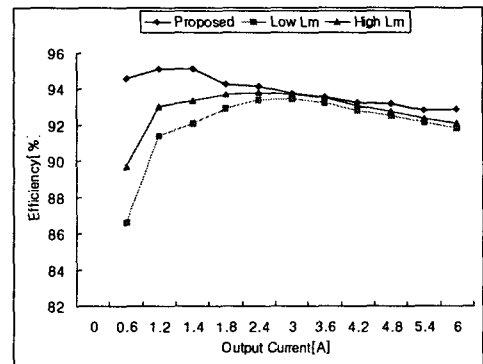


Fig 7 Efficiency

#### 참고 문헌

- [1] R Watson, FC Lee, GC Hua, "Utilization of an active clamp circuit to achieve soft switching inflyback converters", Power Electronics, IEEE Transactions on, 1996.
- [2] Icohen, D. hills, N. Y., "Pulse width modulated DC/DC converter with reduced ripple current stress and zero voltage switching capability," U.S. patent 5,291,382.
- [3] Yonghan Kang, Byungcho Choi, and Wonseok Lim, "Analysis and Design of a Forward-Flyback Converter Employing Two Transformaers", in Proc, IEEE PESC 2001, pp.357-362.
- [4] GB Koo, GW Moon, MJ Youn, "Analysis and design of phase shift full bridge converter with series-connected two transformers", Power Electronics, IEEE Transactions on, 2004.