

# MOSFET 동기정류를 이용한 저전압 능동 클램프 Forward 컨버터에 관한 연구

김희준, 지호균\*  
한양대학교 전기공학과

## Low Voltage Active-Clamp Forward Converter with MOSFET Synchronous Rectification

Hee Jun Kim and Ho Kyun Ji\*  
Power Electronics Control Lab.  
Dept. of Electrical Engineering  
Hanyang Univ.

### Abstract

The MOSFET synchronous rectification in the Active-Clamp Forward converter is presented. The Active-Clamp Forward converter has little dead time during the off time of the main switch and it is suitable for the MOSFET synchronous rectification comparing to the other Forward converter topologies.

Using the MOSFET synchronous rectification on the Active-Clamp Forward converter with 3.3[V] output and 500[kHz] switching frequency, the improvement of efficiency is achieved comparing with the conventional Schottky barrier diode rectification.

### 1. 서론

5[V] 이하의 저전압 전원공급장치의 경우 정류손실은 전손실의 40~60[%]에 달하며 이는 정류기로서 사용되는 쇼트키 다이오드의 순방향 전압강하로 인한 것이다. 이와 달리 낮은  $R_{DS(on)}$ 을 갖는 MOSFET의 경우 ON 전압강하가 쇼트키 다이오드에 비하여 작으므로 저전압 전원공급 장치의 경우 쇼트키 다이오드 정류기를 MOSFET 동기정류기로 대체함으로써 정류손실을 줄일 수 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1][2]

그러나 이러한 동기정류기를 일반적인 Forward 컨버터에 적용시키는데는 다음과 같은 문제점이 존재한다.[3] 리셋전선을 이용한 Forward 컨버터의 경우 변압기의 2차측 전압이 0 전압이 되는 데드타임이 존재하게 된다. 이때에 환류 역할을 하는 MOSFET는 턴오프 되어 출력전류는 보다 다이오드를 통하여 흐르거나 이를 방지하기 위하여 MOSFET에 병렬로 부가한 쇼트키 다이오드를 통하여 흐르게 되어 전도손실이 증가하게 된다. 이를 극복하기 위한 효과적인 방법은 데드타임을 최소화하여 MOSFET의 전도기간을 최대화시키는 것이다. 능동 클램프 Forward 컨버터는 주스위치 OFF 기간의 대부분을 리셋

기간으로 사용하여 데드타임이 거의 없는 회로로 알려져 있다.[4]

따라서 본 논문에서는 동기정류에 적합하도록 데드타임을 최소화 할 수 있는 회로형태로서 능동 클램프 Forward 컨버터를 선정하여 스위칭 주파수 500[kHz], 입력전압 40~60[V], 출력 3.3[V]/10[A]인 동기정류 능동 클램프 Forward 컨버터를 구성하여 동작원리 및 실험결과를 제시 하였다.

### 2. MOSFET 동기정류기

#### 2.1. MOSFET 동기정류기 구동회로

동기정류기의 구동회로는 주변압기의 2차측 파형을 그대로 이용할 수 있도록 그림1과 같이 구성하였다. 이 회로의 동작원리는 다음과 같다. 2차측 전압  $V_{sec}$ 가 정(+)의 전압이면 초기에 출력전류는 보다 다이오드  $D_1$ 을 통하여 흐르게 된다. 따라서  $SR_2$ 의  $V_{GS}$ 는 0 전압에 도달하여 OFF 되고 2차측 전압이 드레인 소스간에 걸리게 된다. 이와 동시에  $SR_1$ 의 게이트에  $V_{sec}$  전압이 걸리게 되어  $SR_1$ 이 ON 된다.  $V_s$ 가 부(-)의 전압이면 반대의 상황이 된다. 즉,  $V_{sec}$ 가  $SR_1$ 의 드레인 소스간에 걸리게 되어  $SR_2$ 가 ON 되어 출력전류를 흘려주게 된다.

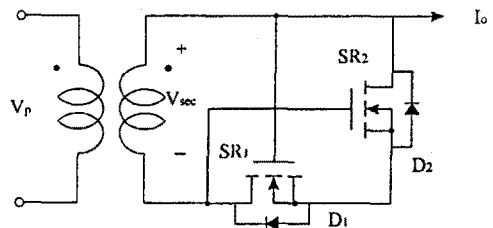


그림 1. 동기정류기 구동회로

이 회로의 장점은 동기정류기의 구동을 위한 부가적인 회로요소가 불필요하다는 점이다. 그러나

변압기의 2차측 전압을 구동전압으로 사용하기 때문에 동기정류기의 효율을 최대화 하기 위해서는 다음과 같은 두가지 사항을 고려해 주어야 한다.

1. MOSFET의 보디 다이오드가 도통되지 않도록 데드 타임이 최소화 되어야 한다.
2. MOSFET의 안정한 동작을 위하여 최대 입력전압 인가시에 변압기 2차측 전압의 크기가  $\pm 20(V)$ 를 넘지 않도록 하여야 한다.

## 2.2. 능동 클램프 Forward 컨버터

그림 3에 능동 클램프 Forward 컨버터의 회로도 및 주요 동작파형을 나타내었다. 보조 스위치  $Q_2$ 가 자화전류의 환원을 위한 경로를 제공하도록 되어 있다.

해석의 간편화를 위하여 출력 필터 인덕터 및 클램프 커패시터를 각각 전류원 및 전압원으로 동가치환하면 정상상태시 한 스위칭 주기당 다음과 같은 6개의 단계로 나누어 해석 할 수 있다.

- $t_0-t_1$  :  $Q_1$ 은  $t_0$  시점에서 턴온되며 환류 다이오드  $D_2$  및 보조 스위치  $Q_2$ 는 이 기간동안 OFF 상태를 유지한다.
- $t_1-t_2$  :  $Q_1$ 은  $t_1$  시점에서 턴오프 된다.  $C_s$ 가 1차측 환산 인덕터 전류( $I_o/N$ )에 의해 선형으로 충전된다.  $V_{DS}$ 가  $V_i$ 에 도달하면  $D_1$ 이 OFF 되고 다음 단계로 넘어간다.
- $t_2-t_3$  : 자화전류에 의하여  $V_{DS}$ 가 계속 선형 증가하여  $t_3$  시점에서 최대치에 이른다.  $V_{DS(max)}$ 은 변압기의 volt-second 평형조건에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$V_{DS(max)} = V_{C(max)} = V_i \left[ 1 + \frac{D_{Q1} + \left(\frac{\Delta t_1}{4}\right)}{D_{Q2} + \left(\frac{\Delta t_1 + 2\Delta t_2}{4}\right)} \right] \quad (3)$$

- $t_3-t_4$  :  $t_3$  시점에서  $Q_2$ 의 보디 다이오드가 턴온 된다.  $V_{DS}$ 는 이 구간동안  $V_C$ 로 클램프 된다. 자화전류는  $-(V_C - V_i)/L_m$ 의 비율로 선형 감소한다.  $t_4$  시점에서 자화전류는 0이 된다.  $Q_2$ 가 영전압 스위칭을 하기 위해서는 이구간내에 턴온 되어야 한다.

- $t_4-t_5$  :  $t_4$  시점에서 자화전류가 익으로 흐르게 된다. 변압기는  $Q_2$ 의 전도로 인하여 연속적으로 리셋되고 BH 곡선의 3사분면에서 동작하게 된다.

- $t_5-t_0$  :  $t_5$  시점에서  $Q_2$ 는 턴오프 되고  $L_m$ ,  $C_s$ 간의 공진이 시작된다.  $C_s$ 는 부(-)의 자화전류에 의하여 방전된다. 주스위치의 턴온 손실을 줄이기 위해서  $V_{DS}$ 가  $V_i$ 에 도달하기전에  $Q_1$ 이 턴온 되지 않도록 하여야 한다.  $t_0$  시점에서  $Q_1$ 이 턴온 되고

다음 주기가 시작된다. 이 기간동안의 주스위치의 전압 및 입력전류는 식(4)(5)와 같이 기술할 수 있다.

$$i_m = I_m \cos \omega t - \frac{1}{Z_C} (V_{DS} - V_{in}) \sin \omega t \quad (4)$$

$$v_{DS} = V_{in} + \frac{(V_{DS} - V_{in}) \cos(\omega t + \phi)}{\cos \phi} \quad (5)$$

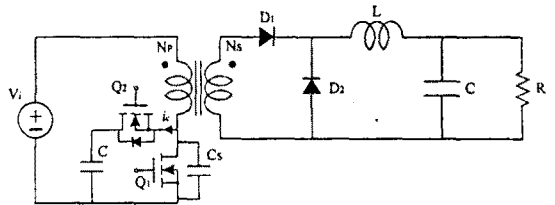
여기서,  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_m C_s}}$  : 고유 주파수

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_m}{C_s}} \quad : \text{특성 주파수}$$

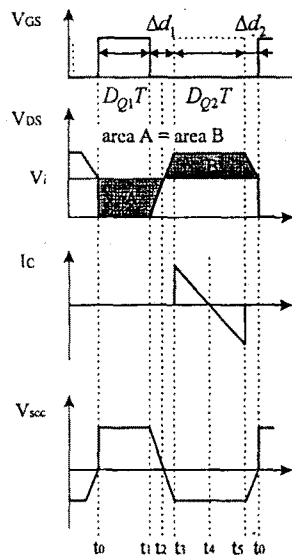
$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_m Z_C}{V_{DS} - V_{in}} \quad : \text{초기위상}$$

$$i_m(t_5) = I_m, v_{DS}(t_5) = V_{DS} \quad : \text{초기치}$$

(5)식으로부터 주스위치의 전압이 입력전압과 같아지는 시점을 계산할 수 있으며 이를 이용하여 Forward 컨버터의 데드 타임을 일정하게 조절할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 능동 클램프 Forward 컨버터

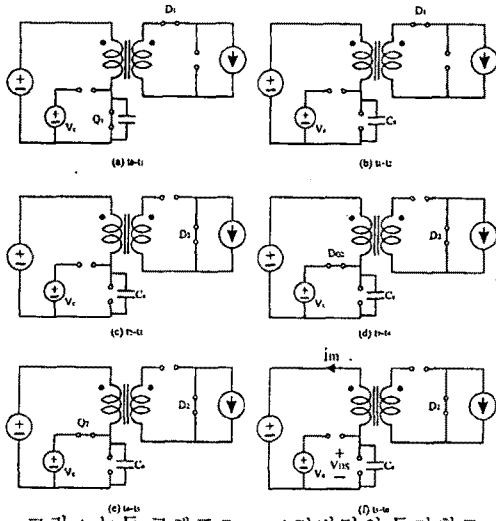


그림 4. 능동 클램프 Forward 컨버터의 등가회로

이 회로의 장점은 다음과 같다.

1. 일반적인 Forward 컨버터에 비하여 광범위한 입력전압 범위에 걸쳐 주스위치의 전압스트레스가 작다.
2. Forward 컨버터의 데드타임 조정은 그림3에서 보는바와 같이  $\Delta t_2$  에 의하여 조절 가능하다.
3. 자화 에너지가 전원측으로 회생된다.
4. 클램프 커패시터의 전하평형에 의하여 BH 곡선의 1, 3사분면을 사용함으로써 변압기를 효율적으로 이용할 수 있다.

이상과 같은 장점으로 인하여 능동 클램프 Forward 컨버터는 동기정류에 적합한 회로형태임을 알 수 있다.

### 3. 실험결과

쇼트키 다이오드 정류기와 MOSFET 동기정류기의 효율 비교를 위하여 스위칭 주파수 500[kHz], 입력 40~60[V], 출력 3.3[V]/10[A] 능동 클램프 컨버터를 구성하였다. 동기정류기로서 사용하는 MOSFET에서 일어나는 정류손실은 MOSFET의 보디 다이오드가 도통되지 않는다고 전제하면  $R_{DS(on)}$ 에 의한 전도손실과 입력 커패시턴스에 의한 구동손실이 대부분이다. MOSFET 1개에 대한 손실은 다음과 같이 평가 할 수 있다.

$$P_{MOS} = R_{DS(on)} I_o^2 D + \frac{1}{2} C_{in} (E_o / D)^2 f \quad (6)$$

여기서,

$R_{DS(on)}$  : MOSFET의 드레인 소스간 ON 저항

$I_o$  : MOSFET로 흐르는 출력전류의 실효치

$D$  : MOSFET가 도통되는 시비율

$C_{in}$  : MOSFET의 입력 커패시턴스

$E_o$  : 출력전압

$f$  : 스위칭 주파수

쇼트키 다이오드의 손실은 순방향 전압강하에 의한 손실이 대부분이며 다음과 같이 기술 된다.

$$P_s = I J_{offset} + I_o^2 R_b \quad (7)$$

여기서,

$V_{offset}$ : 순방향 전압강하

$R_b$  : Bulk 저항

그러므로 (6)(7)식을 비교해 보면  $P_{MOS} \leq P_s$ 가 만족되어야 동기정류기를 사용하여 효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.

그림5에 실제작 컨버터의 회로도를 나타내었다. 그림6은 쇼트키 다이오드 정류기를 사용한 경우와 MOSFET 동기정류기를 사용한 경우의 효율을 비교해 놓은 것이다. 동기정류 능동 클램프 Forward의 경우에 쇼트키 다이오드 정류기를 사용한 경우보다 비교적 높은 효율을 나타냄을 알 수 있다. MOSFET 동기정류기의 효율곡선이 중부하로 감에 따라 하향화 추세를 갖게 되는데 이는 출력전류의 증가로 인하여 MOSFET의 전도손실이 증가하고 또한 MOSFET의 발열로 인하여 채널 저항이 증가하기 때문이다. 강부하에서의 MOSFET 동기정류기의 손실은 대부분이 구동손실로 이루어진다.

그림7은 능동 클램프 Forward 컨버터의 입력전압 변화에 따른 주스위치의 전압 스트레스 변화 곡선이다. 표1은 실제작 컨버터의 잔력회로 구성요소 일람이다. 그림 8~10에 실제작 컨버터의 작부 곡형을 나타내었다.

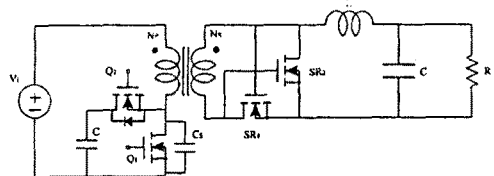


그림5. 동기정류 능동 클램프 Forward 컨버터

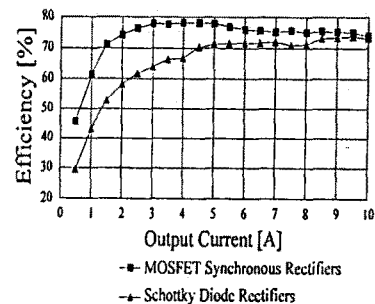


그림 6. 쇼트키 다이오드 정류기 및 MOSFET 동기정류기를 사용한 능동 클램프 Forward 컨버터의 실측 효율곡선

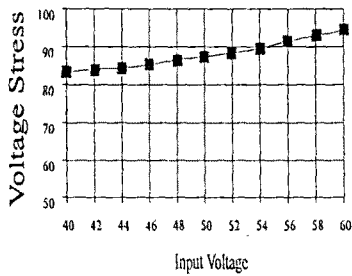


그림 7. 입력전압 변화에 따른 전압 스트레스의 변화

표1 실제작 컨버터의 전력회로 구성요소

	쇼트키 다이오드 정류기	MOSFET 동기정류기
주스위치 $Q_1$	IRF540	IRF540
보조스위치 $Q_2$	IRF540	IRF540
변압기 코어	PC50 LP23/8Z	PC50 LP23/8Z
1차측 권선수	10	10
2차측 권선수	2	2
클램프 커패시터	10nF	10nF
정류기	S30D40C	IRFZ44
필터 인덕터	4.2 $\mu$ H	4.2 $\mu$ H
필터 커패시터	40 $\mu$ F	40 $\mu$ F
입력 커패시터	40 $\mu$ F	40 $\mu$ F

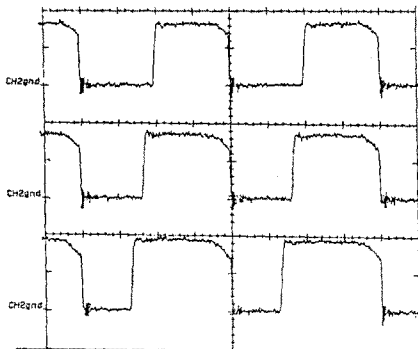


그림 8. 입력전압 변화에 따른 전압 스트레스의 변화  
(a)  $V_{in} = 40V$  (b)  $V_{in} = 48V$  (c)  $V_{in} = 60V$

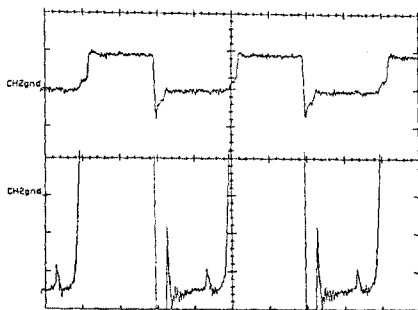


그림 9. 능동 클램프 Forward 컨버터의 쇼트키 다이오드 파형 (a)  $V_{D2}$  10V/div (b)  $V_{D2}$  200mV/div

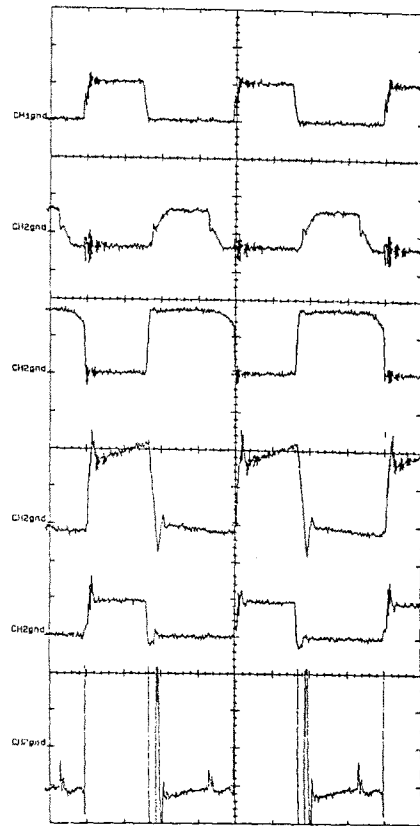


그림 10. 동기정류 능동 클램프 Forward 컨버터의 각부 파형  
(a)  $V_{GS,Q1}$  10V/div (b)  $V_{GS,Q2}$  10V/div (c)  $V_{DS,Q1}$  50v/div  
(d)  $I_i$  1A/div (e)  $V_{SR2}$  10V/div (f)  $V_{SR2}$  200mV/div

#### 4. 결론 및 전망

MOSFET 동기정류기에 적합한 회로로서 능동 클램프 Forward 컨버터를 선정하였으며 동작원리를 살펴봄으로서 타당성을 입증하였다. 또한 능동 클램프 Forward 컨버터에 동기정류기 및 쇼트키 다이오드 정류기를 각각 채용하여 MOSFET 동기정류기가 효율의 측면에서 우수함을 확인할 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Richard Blanchard and Phillip E. Thibodeau, "The Design of a High Efficiency, Low Voltage Power Supply Using MOSFET Synchronous Rectification and Current Mode Control", IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, pp.355-361, 1985.
- [2] Blanchard and M. Alexander, "Use MOSPOWER Transistors as Synchronous Rectifiers in Switched-Mode Power Supplies", MOSPOWER Applications Handbook, Siliconix Technical Article, pp.5-95-5-100, 1984, Siliconix Inc.
- [3] H.K. Ji and H.J. Kim, "The Improvement of the Power Conversion Efficiency by using Self-Driven Synchronous Rectification in PWM Forward DC-DC Converter", JTC-CSSC, pp.59-64, July 1993.
- [4] C.S. Lcu, G. Hua, and F.C. Lee "Comparison of The Forward Circuit Topologies With Various Reset Schemes.", VPEC Seminar, pp.101-109, Sep. 1991.