

# 보조스위치가 동기정류기 구동 신호로 제어되는 능동 클램프형 플라이백 컨버터의 스위칭 특성에 관한 연구

안태영<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup> 청주대학교 전자공학과

## A Study on Switching Characteristics of Active Clamp Type Flyback Converter with Synchronous Rectifier Driving Signals Controlling Auxiliary Switch

Tae Young Ahn<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup> Department of Electronic Engineering, Cheongju University

### ABSTRACT

In this paper, the switching characteristics of the active clamp type flyback converter, which is deemed suitable for the miniaturization of the external power supply for home appliance, were analyzed and the process of reducing the switching loss was explained. The active clamp type flyback converter operating in the DCM has confirmed that the surge voltage of the main switch does not occur and the turn-off / on loss of the switch do not occur in principle. Also, in the case of the switch for synchronous rectifier, it was showed that the switch current showed half-wave rectified sinusoidal characteristic, and the switching loss was reduced. The switching characteristics of the experimental results gathered from 120 W class prototype were compared with the theoretical waveform in the steady-state and it was confirmed that the power conversion efficiency of the active clamp type flyback converter was maintained high due to the reduction of the switching loss.

**Key Words** : Active clamp snubber, Quasi resonant switching, Valley switching, Flyback converter, Synchronous rectifier

### 1. 서 론

최근 가정에서 사용하는 평판형 디스플레이가 대형화 되고 소비전력이 증가하면서 상품 형태에 맞는 고효율의 전원 공급 장치가 필요하게 되었다. 일반적으로 TV용 전원은 모듈 형태의 내장형과 어댑터 형태의 외장형으로 구분되며, 최근에는 유지 관리가 용이한 어댑터 형태의 외장형의 비율이 증가하고 있다. 이 경우 전원장치의 사이즈를 줄이기 위해서는 발열을 최소화 시키면서 전원장

치의 전력변환 효율을 극대화 시킬 필요가 있다. 특히 전원장치의 가격 경쟁력을 높이기 위해서 각 제조사는 부품수가 적은 회로 구성을 선호하게 되고 그 결과 소프트 스위칭 기술이 적용된 플라이백 회로 방식과 같은 고효율 컨버터가 주목받고 있다.

본 논문에서는 디지털 가전 디스플레이용 외장형 전원 장치의 소형화에 적합하다고 판단되는 능동 클램프형 플라이백 컨버터의 스위칭 특성을 분석하고 스위칭 손실이 저감 되는 과정을 설명한다. 또한 120W급 전원장치의 시험 회로를 제작하여 정상상태에서 스위칭 특성을 이론 결과와 비교하였고 그 결과 능동 클램프형 플라이백 컨

<sup>†</sup> E-mail: tyahn@cju.ac.kr

버터의 스위칭 손실이 저감 되면서 전원장치의 전력변환 효율이 높게 유지 된다는 것을 확인하였다.

## 2. 불연속 모드 플라이백 컨버터

그림 1에는 플라이백 컨버터의 기본 회로가 나타나 있다. 먼저 회로에서 스위치  $S_1$ 이 턴온 되면 변압기  $T_1$ 의 자화인덕턴스  $L_M$ 내부에 전력이 저장되고 턴오프 되면 저장되었던 전력이 출력으로 전달된다. 일반적으로 플라이백 컨버터의 동작 특성은  $L_M$ 의 전류에 따라 불연속 모드 (DCM discontinuous conduction mode)와 연속 모드 (CCM continuous conduction mode)로 나뉘지고, 그림 2에는 DCM에서 동작하는 정상상태 파형을 나타내었다. 이때 입출력전압비는 CCM일 때 식 (1)과 같고, DCM에서는 식 (2)와 같다. 이때 정수  $\tau$ 는 식 (3)과 같다.

$$M = \frac{NV_o}{V_{IN}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (1)$$

$$M = \frac{NV_o}{V_{IN}} = \frac{D}{\sqrt{\tau}} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{2L_M}{N^2R_LT_S} \quad (3)$$

그림 3은 식 (1)과 (2)를 이용하여 나타낸 시비율과 입출력전압비의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 정수  $\tau$ 에 따라서 DCM과 CCM의 경계가 달라지며 정수  $\tau$ 가 작을수록 DCM 구간이 넓어진다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 일정한 시비율 조건에서 부하 전류에 대한 출력전압을 나타낸 것이다. 그림에서 DCM의 출력전압은 식 (4), CCM에서 출력전압은 식 (5)로 표현되며 경계모드 (BM boundary mode)은 식 (6)로 나타낼 수 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 DCM에서 동작하는 경우 부하에 대한 전압 이득은 급격하게 높아지고, 제어 특성이 불안해지지만 원리적으로는 스위치가 턴온시 스위칭 손실이 없는 영전류 스위칭이 가능하여 고효율 동작이 가능하다는 특징이 있다.

$$V_o = \frac{V_{IN}^2 D^2}{2L_M f_s I_o} \quad (4)$$

$$V_o = \frac{V_{IN} D}{N(1-D)} \quad (5)$$

$$I_o = \frac{NV_{IN} M}{2L_M f_s (M+1)^2} \quad (6)$$

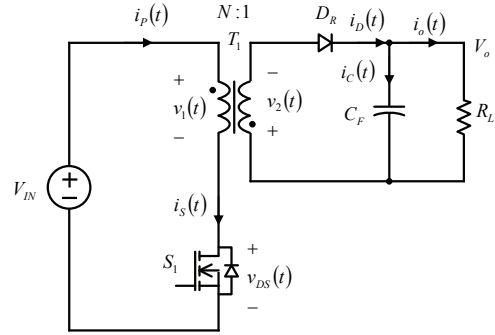


Fig. 1. Basic circuit of flyback converter.

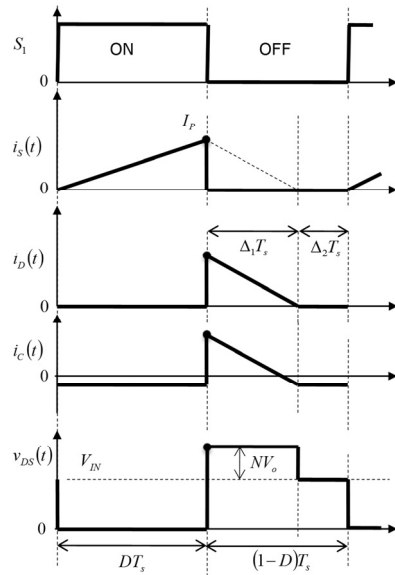


Fig. 2. Steady-state waveform in DCM.

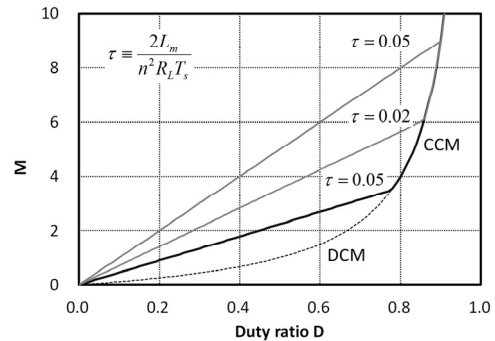


Fig. 3. Voltage gain characteristics in DCM and CCM.

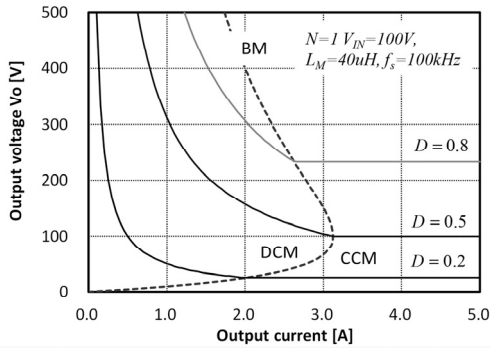


Fig. 4. Output voltage characteristics in DCM and CCM.

### 3. 능동 클램프형 플라이백 컨버터

그림 5에는 RCD스너버를 적용한 플라이백 컨버터의 기본 회로를 나타내었으며, 그림 6에는 DCM에서 동작 하는 경우 정상상태에서의 주요 파형을 나타내었다. 특히 그림 5의 회로에서는 변압기의 2차측에 존재하는 정류용 다이오드 대신에 MOSFET를 적용한 동기 정류기를 적용 하여 정류기의 전도 손실을 저감 시켰다. 그림 5의 회로 는 DCM에서 동작하기 때문에 턴온 스위칭 손실은 저감 되지만, 그림 6의 동작 파형에서 시간  $t_1$ 에서 발생하는 턴 오프 서지 전압은 스위치 내압을 높이고 전원장치의 신뢰성을 저하시키는 원인으로 알려져 있다.

그림 7에는 능동 클램프형 플라이백 컨버터의 기본 회로가, 그림 8에는 정상상태에서 동작하는 주요 파형을 나타내었다[1]. 턴오프 시 발생하는 서지 전압을 일정하게 제한하는 능동 클램프용 보조 스위치  $S_2$ 는 그림 8과 같이 동기정류기 스위치  $S_R$ 의 구동 신호  $v_{GSR}$ 로 제어되므로 회로가 간단하며, 서지가 저감 되고 턴온 스위칭 손실이 작아져서 고효율 동작이 가능한 것으로 알려져 있다[2].

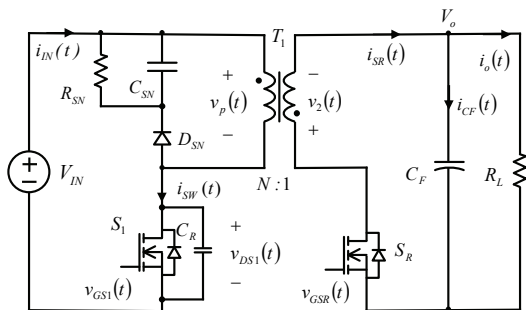


Fig. 5. Basic circuit of the flyback converter with RCD snubber.

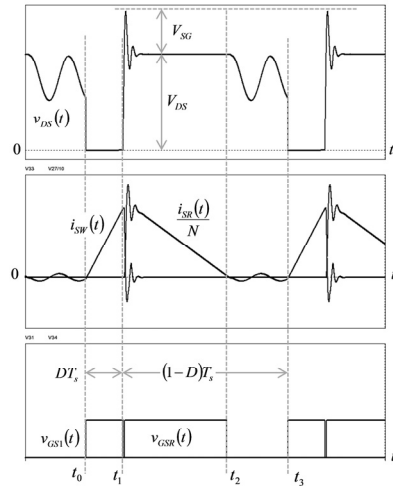


Fig. 6. Steady-state waveform of the flyback converter with RCD snubber.

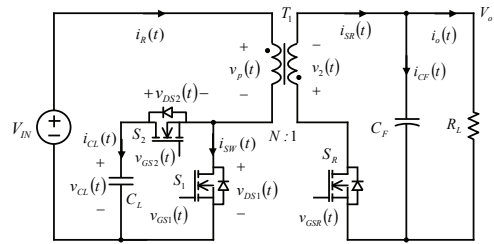


Fig. 7. Basic circuit of the flyback converter with active clamp snubber.

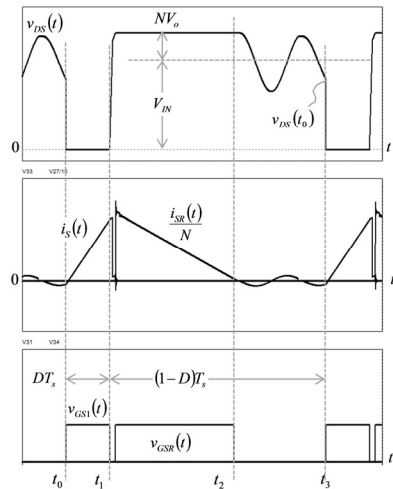


Fig. 8. Steady-state waveform of the flyback converter with active clamp snubber.

#### 4. 정상상태의 스위칭 특성

그림 9는 앞 절에서 설명된 그림 7의 능동 클램프형 플라이백 컨버터의 등가회로를 나타내었다[3,4]. 그림에서 변압기는 누설인덕턴스와 자화인덕턴스로 나타내었고, 변압기 2차측 회로는 권선비를 고려하여 1차측으로 이동시켰다. 특히 스위치는 서지 전압에 관여하는 등가 커패시터만 고려하였으며, 기타 내부 기생 저항은 무시하였다.

그림 10은 정상상태에서 동작하는 경우 부하전력에 따른 주요 동작 파형을 나타내었다. 일반적으로 플라이백 컨버터가 DCM에서 동작하는 경우 DCM 구간에 해당하는  $t_5-t_6$  기간에 자화인덕턴스  $L_M$ 과 스위치 기생 커패시터에 의해 스위치 전압은 식 (7)과 같이 공진하게 된다.

$$v_{DS1}(t) = (NV_o - V_{IN}) \cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_M C_R}} t\right) + V_{IN} \quad (7)$$

이때 턴온 시 스위치의 병렬 커패시터  $C_R$ 에 저장된 에너지가 단락 되면서 식 (8)과 같은 턴오프 전력손실이 발생된다.

$$P_{L6} = \frac{1}{2} C_R (V_{IN} - NV_o)^2 f_s \quad (8)$$

일반적으로 이러한 턴온 손실을 줄이기 위해서 공진 기간에 스위치 전압이 최저점  $t_6$ 에 이르렀을 때 턴온 되도록 제어하는 스위칭 기법을 QR(quasi resonant) 스위칭 또는 밸리(valley) 스위칭이라고 한다. 그림 10에서 알 수 있듯이 낮은 부하에서는 시비율이 작기 때문에 DCM 구간이 증가하여 두번째 밸리에서 턴온 되었으나, 부하가 증가하면 시비율이 증가하여 첫번째 밸리에서 턴온 되고 있음을 알 수 있다. 한편 능동 클램프 회로를 적용한 플라이백 컨버터의 동기정류기 스위치의 경우에는 그림 10과 같이 스위치의 전류가 공진하면서 전파 정류된 정현파가 되고 이 때 전류는 다음의 식과 같다.

$$i_{SR}(t) = \frac{NDV_{IN}}{L_M f_s} \left(1 - \cos \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}} t\right) - \frac{N^2 V_o}{L_M} t \quad (9)$$

따라서 동기정류기의 스위치 전압은 전류의 공진 때문에 서로 중첩되는 기간이 존재하지 않고, 그 결과 동기정류기의 스위칭 손실은 원리적으로 없으며, 대부분의 손실은 MOSFET의 온저항에 의한 전도 손실이라고 판단할 수 있다. 이상의 결과로부터 보조스위치가 동기정류기 구동

신호로 제어되는 능동 클램프형 플라이백 컨버터는 주 스위치와 동기정류기용 스위치 모두 소프트 스위칭 동작에 의해 스위칭 손실이 최소화 되면서 높은 효율의 전원 장치 설계가 가능할 것으로 기대된다.

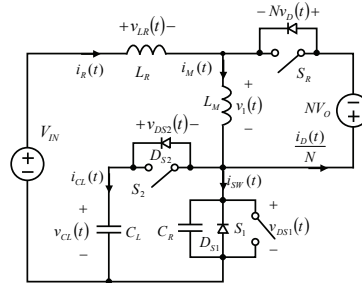


Fig. 9. Equivalent circuit of the flyback converter

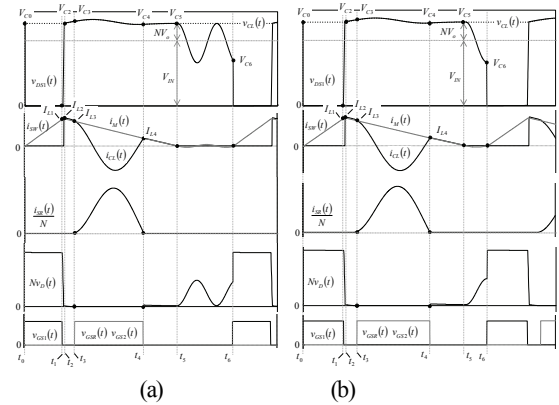


Fig. 10 (a) Theoretical operating waveform at low load current (tuned on at the second valley).

(b) Theoretical operating waveform at higher load current (tuned on at the first valley).

#### 5. 실험결과

앞 절에서 설명한 정상상태에서 동작하는 능동 클램프형 플라이백 컨버터의 스위칭 특성과 손실 특성을 확인하기 위해서 그림 11과 같은 실험 회로를 구성하였다. 그림에서 플라이백 컨버터는 온세미사의 NCP1380과 같은 밸리 스위칭 제어 소자를 적용하였으며, 능동 클램프와 동기정류기용 스위치는 TEA1791로 제어하였다. 표 1에는 실험 회로의 전기적 사양이 나타나 있다. 입력전압은 단상 220V에 대응하는 직류전압을 인가하였으며, 최대 전력은 120W로 설계하였다. 표 2에는 변압기의 물리적 사양을 표로 나타내었으며, 표 3에는 주요 스위치의 모델과

정격을 나타내었다. 그림 12는 실험 회로의 PCB설계 결과를 나타내었으며, 전원장치의 높이를 낮추기 위해서 주요 소자는 모두 표면 실장 부품을 사용하였다.

그림 13은 실험회로의 부하별 주요 동작 파형을 나타내었다. 위로부터 주스위치 전압, 주스위치 전류, 클램프 커패시터 전류, 동기정류용 스위치 전류, 전압이다. 그림 (a)에서는 부하 전력이 60W일 때 스위치의 벨리는 세번째에서 턴온 되었으며, 90W인 경우 두번째 벨리에서 턴온 되었다. 특히 주 스위치 전압의 턴오프 서지는 거의 관측되지 않았으며 주요 동작 파형은 앞 절의 그림 10과 같이 이론 동작 파형과 일치하고 있다는 것을 확인하였다.

스위치의 스위칭 손실 특성을 관찰하기 위해서 부하 전력이 60W인 경우 시간 축을 확대하여 그림 14에 나타내었다. 그림 (a)는 스위치 턴온 상태이며 이 때 스위치 전압은 일정하게 증가하고, 동기정류기 전류는 0에서 시작되는 공진 특성 때문에 전압과 중첩되지 않는다. 그림 (b)의 경우에서도 턴온 시 전류가 0에서 시작되고 동기정류기 스위치도 전류와 전압이 중첩되지 않아서 스위칭 손실은 매우 적을 것으로 관측되었다.

그림 15는 실험 회로의 전력변환 효율을 부하별로 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 실험회로는 부하 전력이 60W이상인 경우 모든 입력전압 범위에서 94% 이상 고효율을 나타내었으며, 최대 효율은 90W부하전력에서 95.41%이었다. 이러한 결과는 능동 클램프형 플라이백 컨버터의 주스위치와 동기정류기의 소프트 스위칭 동작에 의해 스위칭 손실이 최소화 되면서 전원장치의 전력변환 효율이 개선 된 것으로 판단된다.

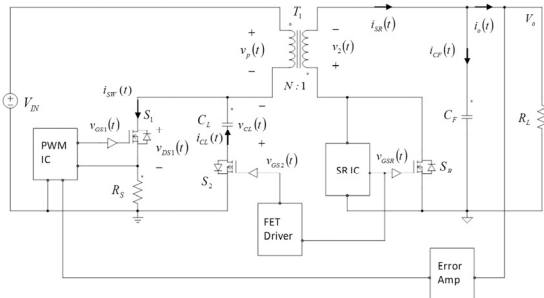


Fig. 11. Basic structure of the experimental flyback converter.

Table 1. Electrical specifications of experimental circuit

Parameters	Unit	Value
Input voltage range	Vdc	160 - 360
Output voltage	Vdc	19
Max. load power	W	120
Max. load current	A	6.3

Table 2. Physical characteristics of transformer

Parameters	Unit	Value
Model name		PQ3220
Maker		TDK
Turns ratio		32:4:5
Magnetizing inductance	$\mu\text{H}$	275
Material		PC40
Primary wire size	mm	0.1mmx30
Secondary wire size	mm	0.1mmx180

Table 3. Electrical specifications of major switches

Switch	Spec.	Model name
S1	600V 0.38 $\Omega$	FCD380N60E
S2	-500V 4.9 $\Omega$	FQP3P50TM
SR	80V 8.5m $\Omega$	BUK9Y8R5

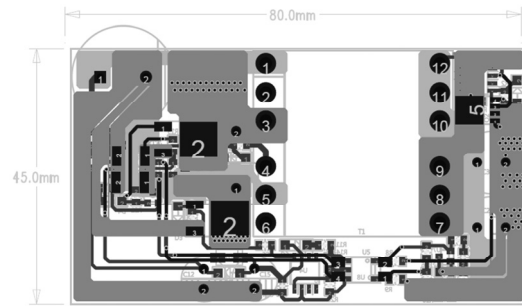


Fig. 12. PCB design of experimental flyback converter.

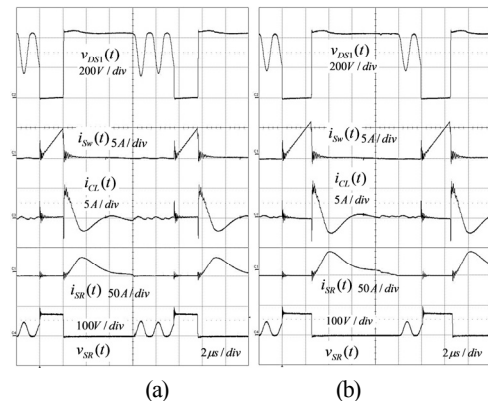


Fig. 13. (a) Experimental waveform at 60W.

(b) Experimental waveform at 90W.

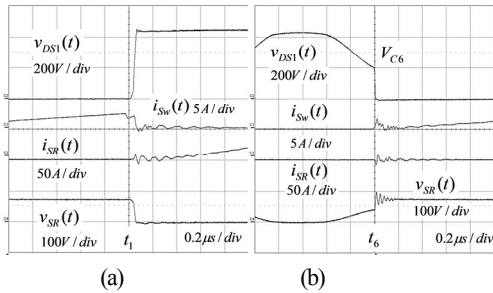


Fig. 14. (a) Turn-off state waveform of main switch at 60W.  
(b) Turn-on state waveform of main switch at 60W.

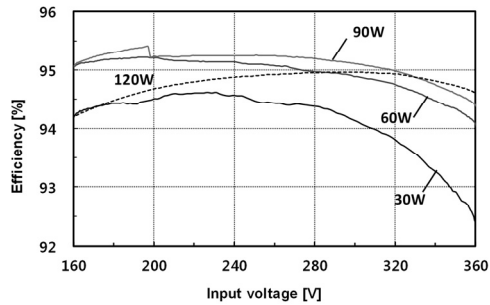


Fig. 15. Power conversion efficiency at each load.

## 6. 결 론

본 논문에서는 가전 디스플레이용 외장형 전원장치의 소형화에 적합하다고 판단되는 능동 클램프형 플라이백 컨버터의 스위칭 특성을 분석하고 스위칭 손실이 저감되는 과정을 등가 회로와 이론 동작 파형으로 설명하였다. DCM에서 동작하는 능동 클램프형 플라이백 컨버터는 주스위치의 서지 전압이 발생하지 않고 스위치의 턴오프 손실과 턴온 손실이 원리적으로는 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 또한 동기정류기용 스위치의 경우에는 스위칭 전류가 반파 정류된 정현파 특성을 보이고 있어서 스위칭 손실이 저감 된다는 것을 밝혔다.

정상상태에서 동작하는 컨버터의 스위칭 특성과 손실

특성을 확인하기 위해서 120W급 전원장치의 시험 회로를 제작하였다. 실험회로로부터 정상상태에서 스위칭 특성을 이론 파형과 비교하였고 스위칭 손실이 저감되어 전력변환 효율이 높게 유지 된다는 것을 확인하였다. 특히 실험회로에서 출력 전력 60W 이상에서는 모든 입력전압에 대해 94% 이상의 높은 효율을 나타내었으며 최대 효율은 90W 부하전력에서 95.41%이었다.

## 감사의 글

이 논문은 2018학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음

## 참고문헌

1. J. S. Yoo, T. Ahn, G. Yu, J. Lee and J. Lee, "A study on novel active clamp snubber applied DC-DC quasi resonant flyback converter to effectively reduce switch voltage surge," 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, NSW, 2017, pp. 1-5.
2. L. Xue and J. Zhang, "Highly Efficient Secondary-Resonant Active Clamp Flyback Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 2, pp. 1235-1243, Feb. 2018.
3. J. Zhang, X. Huang, X. Wu and Z. Qian, "A High Efficiency Flyback Converter With New Active Clamp Technique," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 7, pp. 1775-1785, July 2010.
4. Y. Wang, S. Zhang, Y. Guan, X. Liu and D. Xu, "Single-stage QR AC-DC converter based on buck-boost and flyback circuits," in IET Power Electronics, vol. 10, no. 1, pp. 103-111, 2017.

접수일: 2018년 8월 7일, 심사일: 2018년 9월 15일,  
게재확정일: 2018년 9월 15일