

보조 권선형 능동 스너버를 적용하여 낮은 스위치 서지 전압 특성을 갖는 유사 공진형 컨버터에 관한 연구

안태영^{*†}

^{*†} 청주대학교 전자공학과

A Study on Quasi Resonant Converter with Low Switching Surge Voltage Characteristics by Applying Auxiliary Winding Type Active Snubber

Tae Young Ahn ^{*†}

^{*†} Department of Electronic Engineering, Cheongju University

ABSTRACT

In this paper, a new type of active snubber was proposed to lower the excessive rated voltage of the clamp capacitor which was a problem in the conventional circuit by applying auxiliary winding into the active snubber. A simplified equivalent circuit of the proposed snubber was derived by applying it to QR flyback converter, and the equivalent circuits for each switch state was shown under the steady-state condition. In addition, the maximum voltage of the clamp capacitor as well as the main switch was found by using the steady-state equations. In particular, it was found that the clamp capacitor voltage could be controlled by the auxiliary winding ratio. In order to verify the utility and practicality of the proposed converter with auxiliary winding type active snubber circuit, a prototype with an output voltage of 19V and a maximum load current of 6A was produced and the results were reported.

Key Words : Active Clamp, Quasi Resonant, Flyback Converter, Synchronous Rectifier, Soft Switching

1. 서 론

일반적으로 각 전자기기 등에 안정된 전원을공급해주는 전원장치의 사이즈를 줄이기 위해서는 주요 부품의 발열을 최소화 시키면서 전원장치의 전력변환 효율을 극대화 시킬 필요가 있다. 특히 전원장치의 가격 경쟁력이 필요한 중소 용량에서는 유사 공진과 같은 소프트 스위칭 기술이 적용된 QR(Quasi resonant) 플라이백 회로 방식과 같은 고효율 컨버터가 주목받고 있다.

본 논문에서는 기존의 능동 스너버에서 문제가 되었던

클램프 커패시터의 과도한 정격 전압을 낮출 수 있는 새로운 방식의 보조 권선형 능동 스너버를 새롭게 제안하였다. 제안된 스너버는 QR 플라이백 컨버터에 적용하여 간략화 된 등가회로를 유도하였으며, 정상상태에서 각 스위치 상태별 등가회로를 나타내었다. 또한 정상상태 결과식을 이용하여 주스위치뿐만 아니라 클램프 커패시터의 최대 전압을 알 수 있었으며, 특히 클램프 커패시터 전압이 보조 권선비에 의해 조절이 가능하다는 것을 밝혔다. 제안한 보조 권선형 능동 스너버 회로의 유용성과 실용성을 확인하기 위해서 출력전압 19V, 최대부하전류 6A의 전원장치의 실험 회로를 제작하여 그 결과를 보고하였다.

[†]E-mail: tyahn@cju.ac.kr

2. 능동 클램프형 플라이백 컨버터

Fig 1에는 기존 QR플라이백 컨버터의 기본 회로가 나타나 있으며, Fig 3 (a)에는 정상상태의 주요 파형을 보여주고 있다[1]. 정상상태일 때 주스위치 S_1 의 전압이 최저이면 턴 온 되기 때문에 턴 온 손실을 줄일 수 있으나, 턴오프 시 과도한 서지 전압이 발생하고 이후 식 (1)과 같이 안정화 된다. 턴오프 서지를 낮추기 위해서 RCD 스너버를 사용하지만 스너버 손실 때문에 효율 개선에는 한계가 있다.

$$v_{DS1}(t) = V_{IN} + NV_o \quad (1)$$

이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 P-ch형 스위치를 사용한 능동 클램프 회로가 제안 되었으며, Fig 2에 나타내었다. Fig 3(b)에는 정상상태의 주요 파형이 나타나 있다[2,3]. 그림에서 스위치의 턴오프 시 발생하는 과도한 서지 전압을 보조 스위치와 클램프 커패시터로 클램핑 시켜주고, 그 결과 주스위치 전압 서지가 급격하게 안정된다. 이 때 주스위치 전압은 식 (2)와 같다. 그러나 보조 스위치로 사용되는 P-ch MOSFET는 제조 공정상 높은 전압을 달성하기 어렵고 소자의 가격이 높게 형성되어 있고 따라서 제품 설계 시 높은 전압에서는 사용이 제한된다는 단점이 있었다[4-6].

$$v_{DS1}(t) = (NV_o - V_{IN}) \cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_M C_R}} t\right) + V_{IN} \quad (2)$$

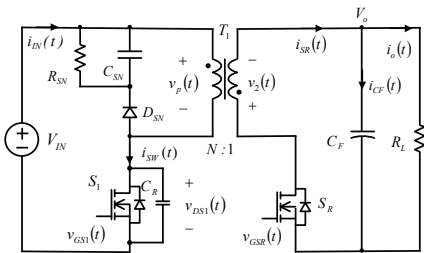


Fig. 1. Fundamental circuit of the QR flyback converter.

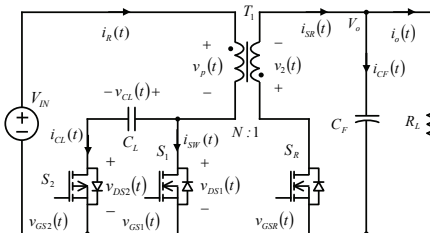


Fig. 2. Fundamental circuit of the flyback converter with P-ch type active clamp snubber.

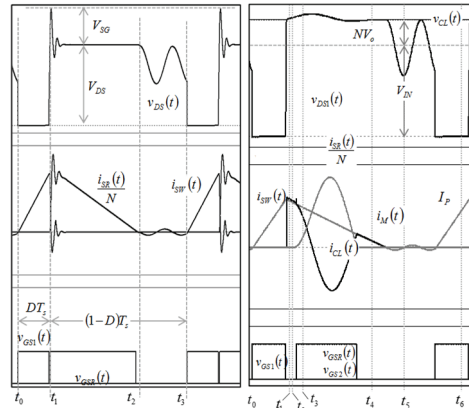


Fig. 3. (a) Steady-state waveform of the flyback converter, (b) Steady-state waveform of the flyback converter with P-ch type active clamp snubber.

3. 보조 권선형 능동 스너버

앞 절의 단점을 개선하기 위해서 Fig 4에는 본 논문에서 제안한 보조 권선형 능동 스너버를 적용한 QR 플라이백 컨버터의 기본 회로가 나타나 있다. 그림에서 주스위치 S_1 이 제어 회로에 의해 일정한 주파수와 시비율로 스위칭 되고, 변압기 2차측에 있는 동기 정류용 스위치와 동시에 턴온과 턴오프 스위칭이 되도록 보조 스위치를 구동한다고 가정한다. 변압기는 기존의 1차와 2차권선 N_1 N_2 외에 능동 스너버용 권선 N_A 이 추가되어 총 3개의 권선이 변압기에 구성된다.

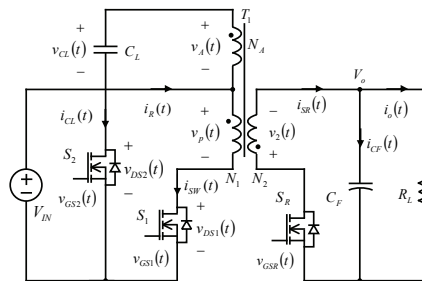


Fig. 4. The proposed converter with auxiliary winding type active clamp snubber.

Fig 5에는 제안된 컨버터가 정상상태에서 동작하는 경우 등가회로를 나타내었다. 등가회로에서 모든 스위치 소자는 이상적이라고 가정하며, 기타 내부 기생 저항은 무시하였다. 또한 출력전압은 일정하다고 가정하였고, 변압기는 누설 인덕터 L_R 와 자화 인덕터 L_M 만 고려하였다. Fig 5 (a)는 클램프 커패시터 C_L 가 있는 경우이며, Fig 5 (b)는 클

램프 커패시터 전압 v_{CL} 이 일정 전압원으로 가정한 등가 회로이다. 보조 스위치는 기존 능동 클램프에서 사용하였던 P-ch형 대신 N-ch형 스위치를 사용하였으며, 이 때 보조 스위치는 구동 전위가 접지와 같기 때문에 구동 회로가 간단하다.

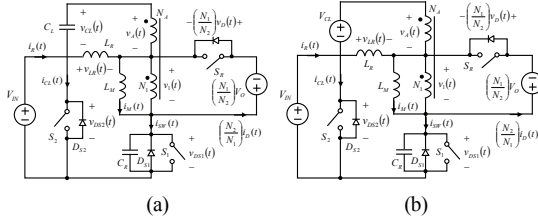


Fig. 5. (a) Equivalent circuit of the clamp capacitor model, (b) Equivalent circuit of the clamp voltage model.

4. 정상상태 특성

Fig 6은 본 논문에서 제안된 컨버터의 등가회로가 정상 상태에서 동작하는 경우 주 스위치 S_1 와 보조 스위치 S_A 의 상태에 따라 유도된 상태별 등가회로를 나타낸 것이다. Fig 7은 주요 소자의 정상상태에서 주요 동작 파형을 나타낸 것이다. 위로부터 주스위치 전압 v_{DS1} , 자화 인덕터 전류 i_M , 클램프 커패시터 전류 i_{CL} , 정류기 스위치 전류 i_D , 정류기 스위치 양단 전압 v_D , 스위치 구동 전압 v_{GS1A} 이다.

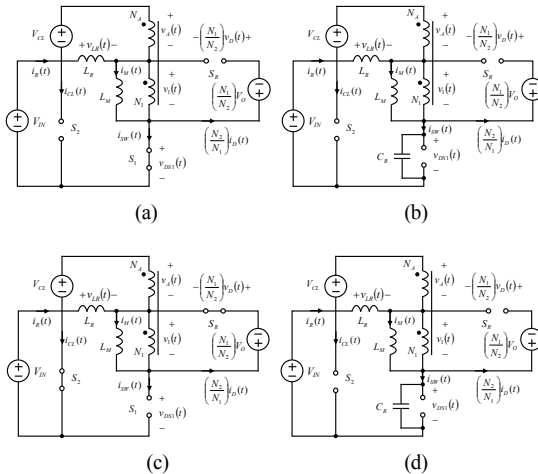


Fig. 6. (a) The steady-state equivalent circuit ($t_0 - t_1$), (b) The steady-state equivalent circuit ($t_1 - t_2$), (c) The steady-state equivalent circuit ($t_2 - t_3$), (d) The steady-state equivalent circuit ($t_3 - t_4$).

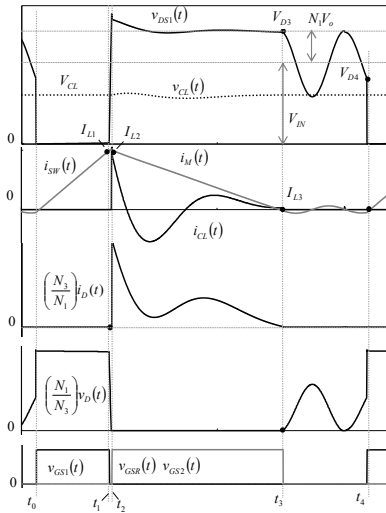


Fig. 7. Steady-state waveform of the proposed converter.

본 논문에서 제안된 컨버터의 정상상태 동작은 다음과 같이 간단하게 설명된다. 먼저 Fig 6 (a)와 같이 t_0 에서 스위치가 턴온 되면 자화 인덕턴스에 의해 스위치 전류가 0에서 상승한다. 이때 스위치 S_2 , S_A 는 턴오프 된다. t_1 에서 스위치가 턴오프 되면 Fig 6 (b)와 같이 누설 인덕터에 저장된 에너지는 스위치 병렬 커패시터 C_R 로 충전되면서 일정하게 상승한다. t_2 에서 스위치 전압 v_{DS1} 이 입력전압보다 커지면 스위치 S_2 , S_A 가 턴온 되고, Fig 6 (c)와 같이 변압기 자화 인덕턴스 에너지가 2차측으로 전달된다.

이때 누설인덕턴스에 저장된 전류 에너지는 클램프 커패시터로 바이패스 되면서 서지 전압을 흡수하여 주 스위치의 전압 서지를 억제한다. t_3 에서 변압기 2차측 전류가 0에 도달하면 Fig 6 (d)와 같이 QR 모드가 되면서 전압이 공진하고 이후 공진 전압이 최저 일 때 턴온 되고 t_4 에서 한 주기가 끝난다.

한편 Fig 6(c)에서 주스위치 전압은 다음 식과 같다.

$$v_{DS1}(t) = v_{CL}(t) - v_A(t) - v_1(t) \quad (3)$$

이 때 변압기 권선비에 의해 각 전압은 다음과 같다.

$$v_A(t) = \left(\frac{N_A}{N_1}\right)v_1(t) \quad (4)$$

$$v_1(t) = -\left(\frac{N_1}{N_2}\right)V_o \quad (5)$$

만약 권선비가 $N_A=N_1$ 이면, 위 식은 아래와 같다.

$$V_{CL} = V_{IN} - \left(\frac{N_1}{N_2} \right) V_o \tag{8}$$

$$v_{DS1}(t) = V_{IN} + \left(\frac{N_1}{N_2} \right) V_o \tag{9}$$

식 (8)은 클램프 커패시터의 전압이 스위칭 주파수 또는 부하에 관계 없이 권선비로만 결정된다는 것을 알 수 있다. 특히 최대값이 입력전압보다 항상 작기 때문에 기존의 능동 클램프 방식에 비해 클램프 커패시터의 전압 정격을 낮출 수 있다.

5. 실험 결과

본 논문에서는 제안한 보조 권선형 능동 스너버를 적용한 QR 플라이백 컨버터의 유용성과 실용성을 확인하기 위해서 Fig. 8과 같은 실험 회로를 제작하였다. 그림에서 주 스위치 제어 소자는 온세미사의 NCP1380를 적용하였으며, 능동 클램프와 동기정류기용 스위치는 동기정류기 전용 구동 소자인 TEA1791를 이용하였다. Table 1에는 실험 회로의 전기적 사양이 나타나 있다. 표에서 입력전압은 단상 220V에 대응하는 직류전압을 인가하였으며, 출력전압은 19V, 최대 전력은 120W로 설계하였다. Table 2에는 변압기의 물리적 사양을 표로 나타내었으며, Table 3에는 주요 스위치의 모델과 정격을 나타내었다. Fig 9는 시험 회로를 측정하고 계측하기 위한 실험 환경 사진을 나타내었다.

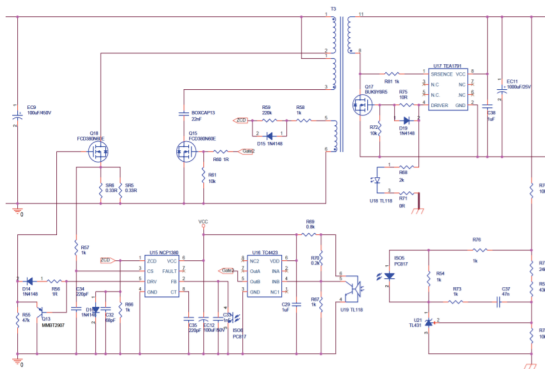


Fig. 8. Experimental circuit diagram.

Fig 10은 실험 회로의 부하별 주요 동작 파형을 나타내었다. 위로부터 주스위치 전압, 주스위치 구동 전압, 정류기 스위치 전류, 전압이다. Fig 10 (a)에서는 무부하 상태의 실험 파형이며, 낮은 주파수에서 스위칭 된다. Fig. (b)에서

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
Turns ratio		32:32:5
Magnetizing inductance	μH	270
Leakage inductance	μH	3.4

Table 3. Electrical specifications of the switches

Switch	Spec.	Model name
S1, S2	600V 0.38Ω	FCD380N60E
SR	80V 8.5mΩ	BUK9Y8R5

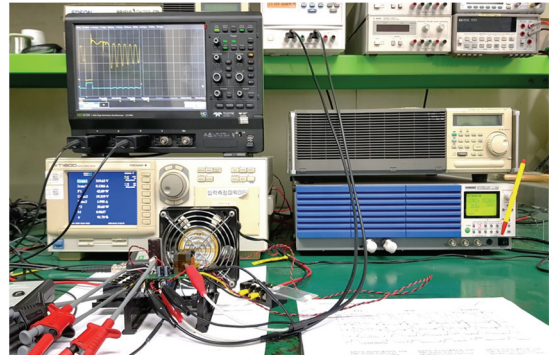


Fig. 9. Experimental circuits and measuring equipment.

(d)까지는 부하 전력을 점차 증가 시켰을 때의 파형이며, 특히 주 스위치 전압의 턴오프 서지는 일정 수준으로 클램프되고 있고 주요 동작 파형은 앞 절의 Fig. 7과 같이 이론 동작 파형과 일치하고 있다는 것을 알 수 있었다.

Fig 11에서는 스너버 회로가 없는 QR 플라이백 컨버터의 스위치 전압과 비교한 실험파형이다. Fig 11 (a)에서는 스너버가 없는 경우의 회로이며, 턴오프 시 스위치 전압이 과도하게 상승되며 최대 194V로 확인 되었다. Fig 11 (b)는 본 논문에서 제안한 스너버를 적용한 스위치 전압이며 서지 전압이 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

Fig 12 (a)는 실험 회로의 전력변환 효율을 입력 전압에 대해 측정된 것이다. 출력이 90W 일 때 전 부하 범위에서 93.1% 이상의 높은 효율을 나타내었으며, 30W출력의 경우

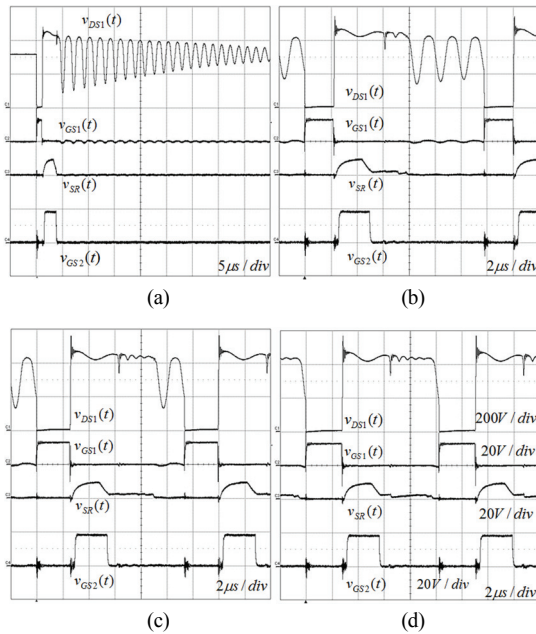


Fig. 10. (a) Experimental waveform at no load, (b) Experimental waveform at 30W, (c) Experimental waveform at 60W, (d) Experimental waveform at 120W.

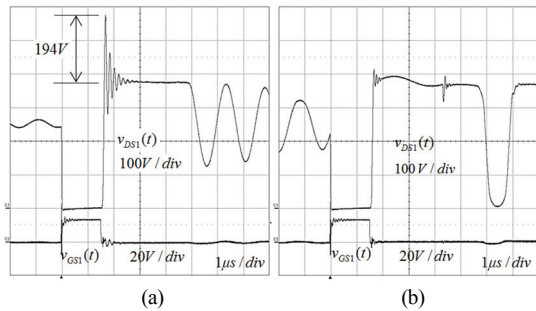


Fig. 11. (a) Switch waveform during turn-off state without snubber, (b) switch waveform during turn-off state with the proposed snubber.

에도 최저 91.3% 이상으로 관측되었다. Fig. (b)는 전력변환 효율을 부하별로 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 실험 회로는 부하 전력이 20W 이상인 경우 모든 입력전압 범위에서 90% 이상 고효율을 나타내었으며, 최대 효율은 90W부하전력에서 93.7%이었다. Fig. (c)는 부하에 따른 내부 전력 손실이며 최대 손실은 최대부하에서 약 8.1W로 관측되었다. Fig. (d)는 출력전압의 부하 특성이며 최대 0.1% 이내의 출력전압 안정도를 나타내었다.

이상의 결과로부터 본 논문에서 제안한 보조 권선형 능동 스너버를 적용한 QR 플라이백 컨버터는 안정된 QR

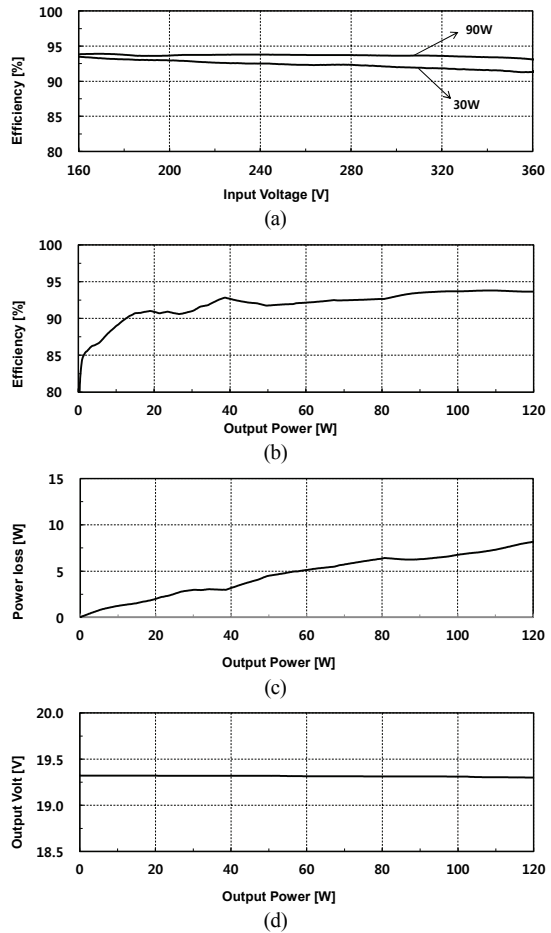


Fig. 12. (a) Power conversion efficiency with input voltage, (b) Power conversion efficiency with output load, (c) Internal losses with output load, (d) Output voltage with output load.

모드 동작을 수행하면서 스위치 전압의 서지를 낮게 유지시키고, 클램프 커패시터 전압을 기존의 방식에 비해 낮출 수 있었다. 또한 N-ch형 스위치를 사용하기 때문에 높은 전압 정격을 자유롭게 선택 할 수 있으며, 구동 회로가 간단해 지는 장점이 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 기존의 능동 스너버에서 문제가 되었던 클램프 커패시터의 과도한 정격 전압을 낮출 수 있는 새로운 방식의 보조 권선형 능동 스너버를 새롭게 제안하였다. 제안된 스너버는 QR 플라이백 컨버터에 적용하여 간략화 된 등가회로를 유도하였으며, 정상상태에서 각 스

위치 상태별 등가회로를 나타내었다. 또한 정상상태 결과식을 이용하여 주스위치뿐만 아니라 클램프 커패시터의 최대 전압을 알 수 있었으며, 특히 클램프 커패시터 전압이 보조 권선비에 의해 조절이 가능하다는 것을 밝혔다. 제안한 보조 권선형 능동 스너버 회로의 유용성과 실용성을 확인하기 위해서 120W급 전원장치의 시험 회로를 제작하였다. 실험 결과로부터 실험회로는 전 부하 범위에서 스위치의 전압 서지를 억제하여 전원장치의 전력변환 효율이 높게 유지 된다는 것을 확인하였다.

또한 본 논문에서 제안한 보조 권선형 능동 스너버를 적용한 QR 플라이백 컨버터는 안정된 QR 모드 동작을 수행하면서 스위치 전압의 서지를 낮게 안정화 시키고 클램프 커패시터 전압을 입력전압 보다 낮출 수 있었다. 또한 N-ch형 스위치를 사용하기 때문에 높은 전압 정격을 자유롭게 선택 할 수 있었으며, 구동 회로가 간단해 지는 장점이 있었다.

참고문헌

1. J. Zhang, H. Zeng and X. Wu, "An Adaptive Blanking Time Control Scheme for an Audible Noise-Free Quasi-Resonant Flyback Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 10, pp. 2735-2742, 2011.
2. T. Ahn, "A Study on Switching Characteristics of Active Clamp Type Flyback Converter with Synchronous Rectifier Driving Signals Controlling Auxiliary Switch," *Journal of KSDT*, vol. 17, no. 3., pp. 21-26, Sep. 2018.
3. 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," *ICEMS*, 2017, pp. 1-5.
4. M. Chen and J. sun, "Reduced-order averaged modeling of active-clamp converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, No. 2, pp. 487-494, Mar. 2006.
5. B. R. Lin and J. Y. Dong, "Analysis and implementation of an active clamping zero-voltage turn-on switching zero-current turn-off switching converter," in *IET Power Electronics*, vol. 3, Issue. 3, pp. 429-437, Apr. 2010.
6. B. R. Lin and J. Y. Dong, "Analysis of an integrated flyback and zeta converter with active clamping technique," in *IET Power Electronics*, vol. 2, Issue. 4, pp. 355-363, Jul. 2009.

접수일: 2018년 12월 10일, 심사일: 2018년 12월 20일,
 게재확정일: 2018년 12월 21일