

능동 클램프 방식을 이용한 AC/DC ZVT 승압형 컨버터의 평균전류모드 제어에 관한 연구

배진용* · 김 용* · 김필수** · 임남혁** · 윤석호*** · 장성원****
 *동국대학교, **대림대학, ***김천대학, ****중일엔지니어링

A Study on the Average Current-Mode Control AC/DC ZVT-Boost Converter with Active-Clamp Method

Jin-Yong Bae*, Yong Kim*, Pill-Soo Kim**, Nam-Hyuk Lim**, Suk-Ho Yoon***, Sung-Won Chang****
 *Dongguk University, **Daelim College, ***Kimcheon College, ****Joong-Il Engineering

Abstract - This paper presents average current-mode control AC/DC ZVT(Zero Voltage Transition) Boost Converter. This boost converter perceives feed forward signal of input and feedback signal of output for average current-mode control. Proposed converter employs active-clamp method for ZVT. This converter gives the good PFC(Power Factor Correction), low line current harmonic distortions and tight output voltage regulations. This converter also has a high efficiency by active-clamp method. The principle of operation, feature, and design considerations are illustrated and verified through the experiment with a 150W, 120kHz prototype converter.

따라서 출력 전압의 맥동이 크고 입력 전류가 불연속적이며 돌입전류에 가까운 펄스성 형태의 전류가 흐르게 되어 입력단에 많은 양의 고조파 성분을 포함하게 되며, 낮은 역률을 갖게 된다.

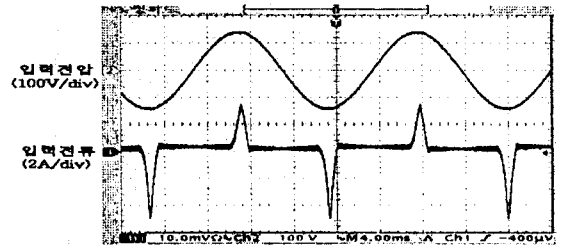


그림 1. 역률 개선전의 입력 전압 전류파형

1. 서 론

교류 전원으로부터 직류 전압을 얻기 위해서는 교류전압을 정류하여야 한다. 이 때 흔히 사용되는 커패시터 입력형 정류기는 일정한 직류 전압을 얻기 위해 커패시터의 용량이 매우 커야한다. 이로 인해 정류기의 입력 전류는 진폭이 큰 펄스형태가 되어 고조파가 많이 포함되며, 역률은 낮아진다. 역률이 낮으면 전원선의 효율이 나빠지므로 AC 전원에서 부하에 공급하는 실효 전력을 감소시킨다. 뿐만 아니라 전류의 왜곡에 의해 교류 전원 전압에 현저한 일그러짐이 발생함에 따라 상용 전원에 연결된 다른 전자 기기나 시스템에 나쁜 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 단상 AC/DC 승압형 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 역률개선을 위해 연속전류모드 방식인 평균전류모드 PWM 방식으로 제어된다. [1-4] 전류 파형의 전고조파 왜율(THD : Total Harmonic Distortion)을 감소시키고 시스템을 소형화하기 위해 120(kHz)의 빠른 속도로 스위칭 하였다. 이러한 고속의 스위칭시 발생하는 스위칭 손실을 저감하기 위해 다이오드 양단에 능동 클램프를 사용하여 주 스위치를 넓은 부하 영역에 걸쳐 영전압 스위칭(ZVT)함으로써 컨버터의 효율을 향상시키고자 한다. [1][2] 또한 제안된 컨버터는 입력 전압/전류의 Feed Forward 및 출력 전압의 Feedback으로 입력 전압 및 부하 변동에도 일정한 직류 전압을 얻을 수 있다.

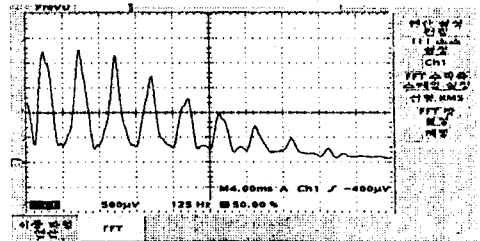


그림 2. 입력 전류의 고조파 해석 (역률 개선전)

그림 2는 역률 개선전 입력 전류의 FFT 파형을 나타낸다. 여기서 전고조파 왜율(THD)은 기본파의 실효값에 대한 다른 모든 고조파의 실효값의 비로써 다음과 같이 된다.

$$THD = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (1)$$

여기서

- I_H : 전고조파의 실효값
- I_1 : 기본파의 실효값
- I : 입력 전류의 실효값

또한 역률은 식 (2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (2)$$

2. 본 론

2.1 역률 개선전

그림 1은 역률개선 회로를 삽입하기 전에 입력 전압과 전류의 파형을 보여준다. 직류 링크단의 평활용 커패시터를 사용하는 다이오드 정류기는 교류입력 전압이 필터 커패시터의 충전 전압을 초과할 때만 전류가 흐르게 한다.

식 (2)로부터 입력 전력의 역률은 $PF = 0.4885$ 이다. 매우 낮은 역률로 인해 무효전력이 증가되고 이에 따라 전원선의 전류 값이 커져서 전력 손실을 증가시킨다.

2.2 제안된 회로

그림 3은 능동 클램프 방식을 이용한 AC/DC ZVT 승압형 컨버터를 나타낸다. 제안된 컨버터는 기존의 평균 전류모드로 동작하는 AC/DC 승압형 컨버터에 능동 클램프 방식을 적용함으로써 고역률, 고효율 컨버터를 구현하고자 한다.

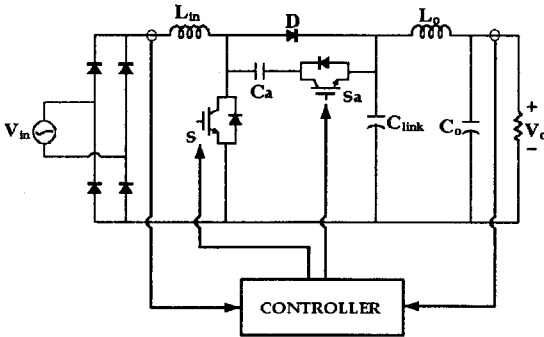


그림 3. 제안된 AC/DC ZVT 승압형 컨버터

주 스위치(S)의 턴 온시 스위칭 손실을 줄이기 위해서, 능동 클램프 스위치(S_a)의 턴 온을 주 스위치(S)의 턴 온 앞부분에서만 같이 하여, 주 스위치의 영전압 스위칭을 넓은 부하 범위에서 하도록 하였다.

2.3 이론적인 파형 및 동작특성

모드별 정상상태 해석을 위해서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 출력측 평활용 인덕터는 충분히 커서 스위칭 기간 동안 부하전류는 일정하다.
- 3) 출력측 평활용 커패시터는 충분히 커서 스위칭 기간 동안 출력 전압은 일정하다.

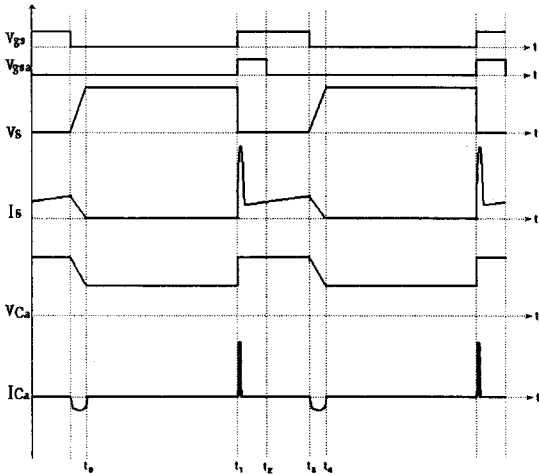
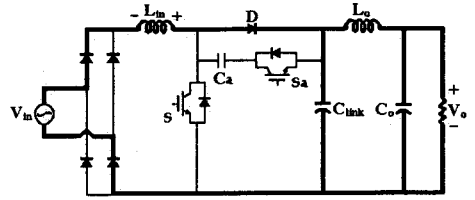
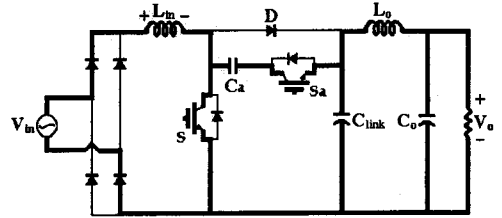


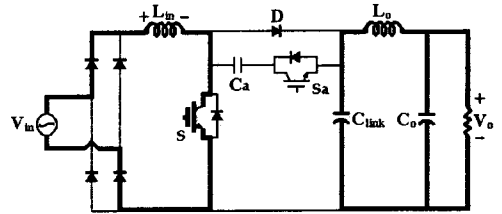
그림 4. 회로 각부 파형 (이론치)



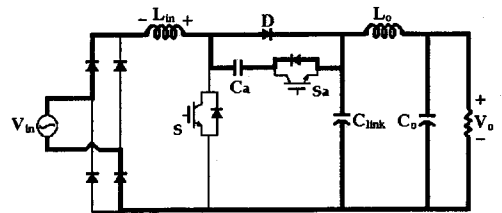
MODE I ($t_0 \sim t_1$)



MODE II ($t_1 \sim t_2$)



MODE III ($t_2 \sim t_3$)



MODE IV ($t_3 \sim t_4$)

그림 5. 제안된 회로의 모드별 동작

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

주 스위치(S)와 능동 클램프 스위치(S_a)가 턴오프시 입력 전압과 승압 인덕터(L_{in}) 전압은 중첩되고, 출력측 필터를 통해 승압되어서 부하로 전달된다.

$$\frac{di_{L_{in}}}{dt} = -\frac{1}{L_{in}} V_{C_{ink}} + \frac{1}{L} V_{in} \quad (3)$$

여기서 출력 임피던스를 Z_o 라고 하면,

$$\frac{dV_{C_{ink}}}{dt} = -\frac{1}{C_{link}} i_{L_{in}} + \frac{1}{C Z_o} V_{C_{ink}} \quad (4)$$

출력 임피던스(Z_o)는 주파수 특성을 가지므로 식 (5)와 같이 된다.

$$Z_o = \frac{1}{1 + \frac{L_o}{R_o}s + L_o C_o s^2} \quad (5)$$

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

모드 II는 주 스위치(S)와 능동 클램프 스위치(S_a)가 동시에 턴온 되는 구간이다. 승압 인덕터(L_{in})는 충전되고, 주 스위치(S)가 도통 되는 순간에 능동 클램프 스위치(S_a)가 도통되어서 승압 인덕터(L_{in})과 능동 클램프 커패시터(C_a)의 공진으로 넓은 부하 영역에서 주 스위치(S)의 영전압 스위칭을 가능하게 한다.

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$

모드 III은 능동 클램프 스위치(S_a)가 턴오프되고, 계속적으로 승압 인덕터(L_{in})는 에너지를 축적하는 구간이다. 다이오드(D)를 통한 전류 흐름은 없으므로, 전력은 필터를 통하여 부하로 방전된다.

$$\frac{di_{L_{in}}}{dt} = \frac{V_L}{L} \quad (6)$$

$$\frac{dV_{C_{link}}}{dt} = -\frac{V_{C_{link}}}{C_{link} Z_o} \quad (7)$$

4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

주 스위치(S)가 턴오프되면, 입력 전압과 승압 인덕터(L_{in})전압은 중첩되어서 출력 필터를 통하여 승압되어서 부하로 전달되고, 스위치 양단의 전압이 출력 전압보다 낮으므로 능동 클램프 스위치 다이오드를 통하여 커패시터 전압을 방전시킨다.

2.4 평균전류모드 방식

본 논문에서는 입력 전류 맥동의 평균값이 입력 전압에 비례하도록 제어하는 평균전류모드 방식을 사용하였다. 평균전류모드 방식은 전류의 실효치가 작으며, 노이즈에 강인하다는 장점이 있다.

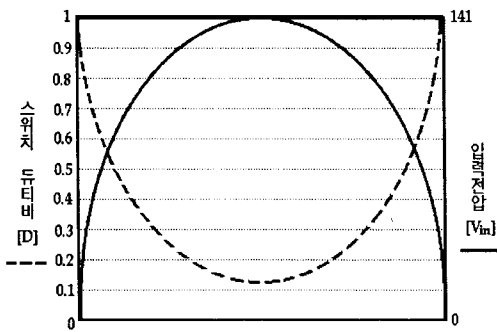


그림 6. 반주기 동안 스위치 듀티비의 변화

그림 6은 입력전압이 110[V]일 때, 반주기 동안의 스위치 듀티비를 나타낸다.

교류 입력전압에 대하여 일정한 직류 출력전압을 얻기 위한 스위치 듀티비의 변화는 다음과 같이 구할 수 있다.

AC/DC 컨버터의 입출력 관계식에서

$$V_o = -\frac{1}{1 - D(t)} \times V_{in,peak} \sin \omega t \quad (8)$$

따라서, 스위치의 듀티비는 식 (9)와 같이 된다.

$$D(t) = 1 - \frac{V_{in,peak}}{V_o} \sin \omega t \quad (9)$$

2.4 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 120kHz, 150W AC/DC ZVT 승압형 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{in})	100 V
출력전압 (V_o)	200 V
승압 인덕터 (L_{in})	1 mH
주 스위치 (S)	IXFR32N50Q, IXYS
다이오드 (D)	DSEI 30, IXYS
능동클램프 스위치 (S_a)	IRFP840, SAMSUNG
능동클램프 커패시터 (C_a)	10 nF
링크 커패시터 (C_{link})	470 uF
출력단 인덕터 (L_o)	30 uH
출력단 커패시터 (C_o)	100 uF
스위칭 주파수 (f)	120 kHz

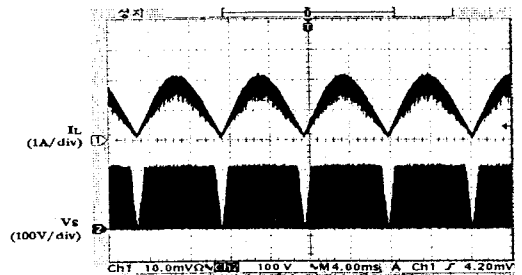


그림 7. 인덕터 전류 파형 및 스위치 전압 파형

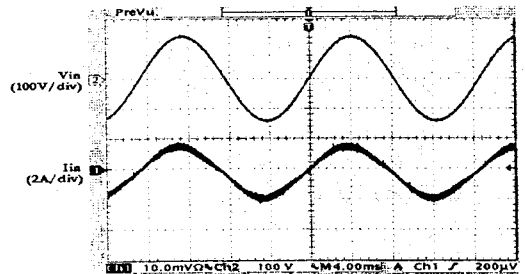


그림 8. 역률 개선후 입력 전압, 전류 파형

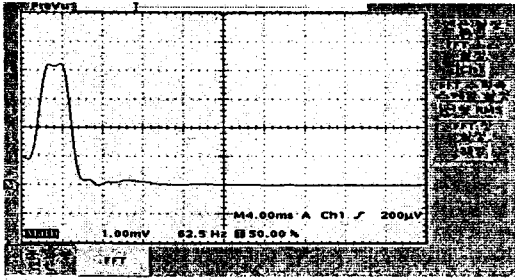


그림 9. 입력 전류의 고조파 해석 (역률 개선후)

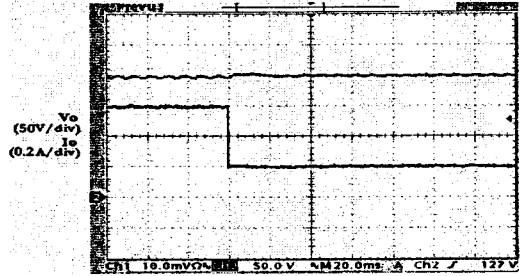


그림 12. 부하 변동시 출력 전압 전류 파형 (0.6A→0.2A)

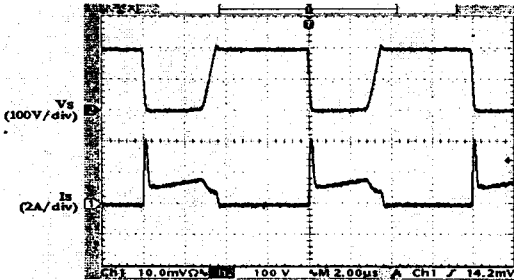


그림 10. 주 스위치 전압 전류 파형

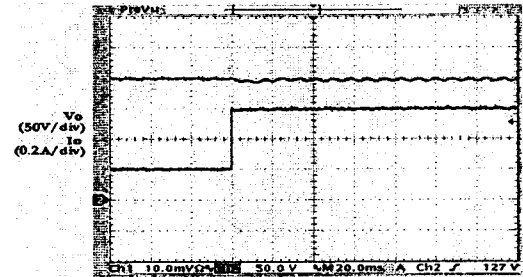


그림 13. 부하 변동시 출력 전압 전류 파형 (0.2A→0.6A)

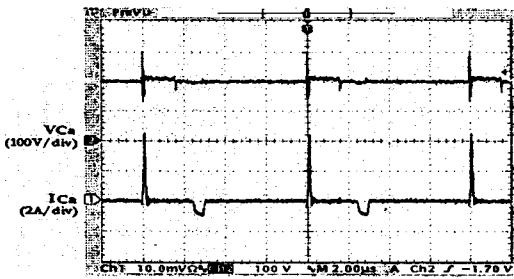


그림 11. 능동 클램프 커패시터 전압 전류 파형

3. 결 론

본 논문에서는 능동 클램프 방식을 이용한 AC/DC ZVT 승압형 컨버터를 제안했다. 제안된 컨버터는 역률 개선을 위한 연속 전류모드 방식인 평균전류모드 방식으로 제어하며, 동시에 다이오드 양단에 능동 클램프 회로를 이용하여 고속의 스위칭시, 스위칭 손실을 저감하였다. 제안된 컨버터 제어기의 전압 보상기와 전류 보상기가 함께 동작하므로 부하 변동에 대해서 우수한 동특성 가지고 고효율로 동작됨을 확인할 수 있으며, 동시에 승압형 인덕터 전류가 연속전류모드 방식이므로 대용량의 AC/DC 전력 변환 장치에 많은 적용이 가능 하리라고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] David M.Xu, J M. Zhang, X H. Wu and Z. Qian, "A Novel Single-Phase Active-Clamped ZVT-PWM PFC Converter", The Proceedings of The APEC'2000, pp. 456~459, February 2000
- [2] Carlos Oliveira and Dragan Maksimovic, "Zero-Current-Transition Converter For High-Power-Factor AC/DC Application", The Proceedings of The APEC'96, pp. 159~165, March 1996
- [3] W. Tang, F. C. Lee and R. B. Ridley, "Small-Signal Modeling of Average Current-Mode Control", The Proceedings of The APEC'93, pp. 747~755, March 1993
- [4] Dragan Maskimovic and Robert Erickson, "Universal-Input, High-Power-Factor, Boost Double Rectifiers", The Proceedings of The APEC'95, pp. 459~465, March 1995

그림 7은 인덕터(L_{in}) 전류 파형과 주 스위치(S)의 전압 파형을 나타낸다. 스위치의 듀티비가 입력 전압 파형에 의해서 가변되고, 그에 따라서 입력 전류 맥동의 평균값이 입력 전압에 비례하도록 제어하는 평균전류모드 방식으로 동작됨을 확인할 수 있다. 그림 8은 역률 개선 후의 입력 전압과 전류 파형을 나타내고, 그림 9는 입력 전류의 FFT분석 파형이다. 그림 9에서 역률을 구하면, $PF = 0.9972$ 로서 매우 높은 입력 역률을 이룸을 알 수 있다. 그림 10은 주 스위치 양단의 전압과 전류 파형으로 주 스위치가 턴온시 영전압 스위칭이 됨을 확인할 수 있었다. 능동 클램프 방식을 적용하지 않은 경우 정격 부하에서 효율이 82%인데 비하여 능동 클램프 방식을 적용한 경우 효율이 86.7%로 도전손실이 저감됨을 확인할 수 있었다. 그림 11은 능동 클램프 커패시터(C_a)의 전압과 전류 파형을 나타낸다. 그림 12와 그림 13은 설계된 전압 제어기와 전류 제어기에 의한 ZVT 승압형 컨버터의 부하 변동시 전압과 전류 파형을 나타낸다. 출력 전압의 오버슈트는 약 5V이며, 정상 상태 도달 시간이 약 20m[sec]이다.