

1차측 보조회로를 이용한 ZVT Forward 컨버터에 관한 연구

이동현* . 김 용* . 배진용* . 윤신용* . 이규훈** . 조규만***
 *동국대학교. **스마트비전텍. ***청주기능대학

A Study on ZVT Forward Converter using Primary Auxiliary Circuit

Dong-Hyun Lee*, Yong Kim*, Jin-Yong Bae*, Shin-Yong Yoon*, Kyu-Hoon Lee**, Kyu-Man Cho***
 *Dongguk University. **Smartvision Tech. ***Chongju Polytechnic College

Abstract - This paper presents an ZVT(Zero Voltage Transition) Forward Converter using Primary Auxiliary Circuit operation. An auxiliary resonant circuit was added to the basic forward converter, implementing the ZVT technique for the main switch. The switch employed by the auxiliary circuit operates under Zero-Current-Switching(ZCS) condition. The complete operating principle, simulation and experimental results are presented

1. 서 론

최근 전력용 반도체 소자의 발달에 힘입어 전력변환시스템의 소형 경량화에 관심이 집중되고 있다. SMPS(Switch Mode Power Supply)에서는 스위칭 주파수를 높임으로써 시스템의 소형화와 경량화가 이루어지고 있으나, 고주파 동작의 경우 저주파에서 동작할 때보다 스위칭시 발생하는 손실(온·오프 손실)이 전체 시스템 효율 저하에 큰 영향을 끼치고 있다. 이런 문제점을 해결하고자 최근에 영전압 스위칭(ZVS), 영전류 스위칭(ZCS)과 같은 소프트 스위칭 컨버터에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 ZVS방식은 MOSFET와 같이 턴온 손실이 큰 다수 캐리어 소자에 적합하고, ZCS방식은 IGBT와 같이 턴오프 손실이 큰 소수 캐리어 소자에 적합하다. 한편 영전압·영전류 스위칭(ZVZCS) 방식의 경우는 단일 전력변환장치 내에서 영전압과 영전류 방식을 혼합하여 사용하는 방식으로 풀 브리지와 같은 대전력 장치에 주로 응용되고 있으며, 최근 다각적으로 연구되는 영전압 천이 스위칭(ZVT)과 영전류 천이 스위칭(ZCT)은 주 스위치 턴온 또는 턴오프시 보조 스위치를 함께 동작시켜 경부하시에도 강제적으로 영전압 및 영전류 스위칭이 가능하게 함으로써 전 부하 범위에서 효율 향상을 꾀하고 있다.[1-2]

본 논문에서는 1차측 보조회로를 이용한 ZVT Forward 컨버터에 대하여 논하였다. 기존의 공진형 컨버터는 중부하이상에서 영전압 스위칭(ZVS)이 이루어졌으나, 경부하시 효율이 급격히 감소하며, 스위치의 전압 및 전류 스트레스가 증가한다는 문제점을 지니고 있다. 제안된 컨버터는 일반적인 Forward 컨버터의 1차측에 보조 스위치와 공진 회로를 추가함으로써 이러한 문제점을 해결하였으며, 전 부하영역에서 영전압 스위칭(ZVT)이 가능함을 확인하였다.[3-5] 또한 주 스위치와 다이오드의 전압 스트레스와 도통 손실이 저감되므로 고밀도, 고효율 컨버터의 구현이 가능하다. 제안된 컨버터의 특성은 MOSFET를 사용하여 600W급 시작품을 제작, 100kHz에서 실험하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 일반적인 공진형 컨버터

공진형 컨버터는 전압 공진형과 전류 공진형으로 나눌 수 있으며, 그림 1은 일반적인 공진형 스위치 회로를 나타낸다.

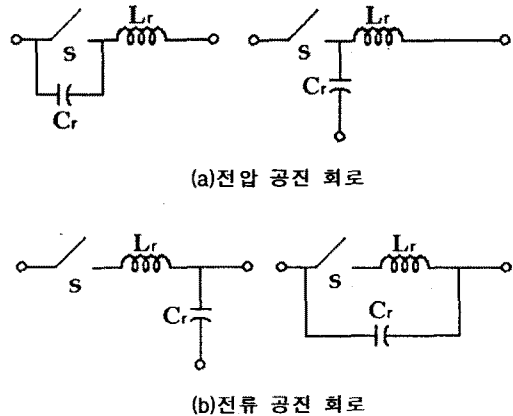


그림 1. 일반적인 공진형 스위치 회로

그림 1.(a)의 전압 공진 회로에서는 공진용 커패시터가 스위치와 병렬로 접속되어 스위치가 턴오프되면 스위치의 전압이 공진을 하게되며, 이 전압이 피크값을 지나서 0으로 감소된 후에 스위치의 턴온이 이루어진다. 결국 스위치는 영전압에서 턴온·턴오프되며 이러한 동작을 영전압 스위칭(ZVS)이라고 한다. 그림 1.(b)의 전류 공진 회로에서는 공진형 인덕터가 스위치와 직렬로 접속되어 있어 스위치를 흐르는 전류가 공진을 하게되며, 결과적으로 스위치는 영전류에서 턴온·턴오프하게 되고 이러한 스위칭 동작을 영전류 스위칭(ZCS)이라고 한다.

그러나 공진형 컨버터는 전류 또는 전압이 공진하므로 스위칭 소자에 큰 전류 및 전압 스트레스가 발생하여, 전압 및 전류 용량이 큰 반도체 소자가 요구된다. 더구나 모든 전력이 공진 인덕터를 통하여 흐르기 때문에 도통 손실이 증가하게되며, 공진 인덕터에 저장되는 에너지는 입력 전압과 부하 전류에 의존적이므로 소프트 스위칭 조건이 입력 전압과 부하 전류의 변화에 민감하다는 단점이 있다.[1-2][6-7]

2.2 제안된 ZVT Forward 컨버터

그림 2는 제안된 ZVT Forward 컨버터의 회로를 나타낸다. 제안된 컨버터는 1개의 보조 스위치, 2개의 보조 다이오드와 공진소자를 사용하여 넓은 부하영역에서 안정된 소프트 스위칭 동작(ZVT)이 이루어지도록 하였다.

기존의 공진형 컨버터에 비하여 커패시터 1개와 보조 스위치 1개, 다이오드 2개가 추가된 형태지만, 기존의 컨버터가 가진 문제점을 해결하여 고밀도·고효율 특성을 보인다.[3]

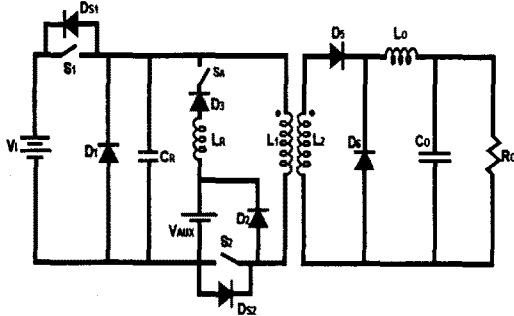


그림 2. 제안된 ZVT Forward 컨버터 회로도

제안된 컨버터는 다음과 같은 동작 특성을 가진다.

- 1) 전 부하영역에서의 소프트 스위칭 동작
- 2) 스위치 S_1 , S_A 의 전압은 입력 전압 V_i 로 클램핑되고, 스위치 S_2 와 다이오드 D_2 의 전압은 V_{AUX} 와 같다.
- 3) 고주파 동작에서의 고밀도·고효율 특성

2.3 이론적인 파형 및 동작 특성

그림 3,4는 1차측 보조회로를 이용한 ZVT Forward 컨버터의 이론적인 회로 각부 파형과 모드별 등가회로를 나타낸다.

모드별 정상상태 해석을 위해 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 입력 전압 V_i 와 보조전압원 V_{AUX} 의 리플전압은 무시한다.
- 3) 누설 인덕턴스는 매우 작으므로 무시한다.
- 4) 출력 전류(I_o)는 일정하며 출력 전류 리플은 무시한다.

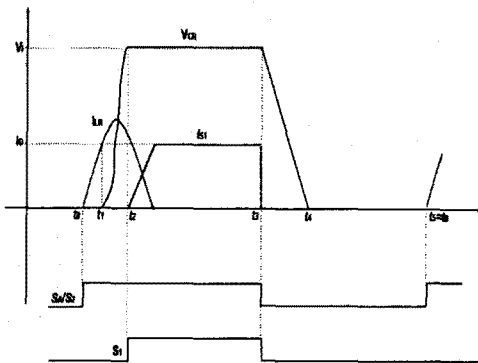
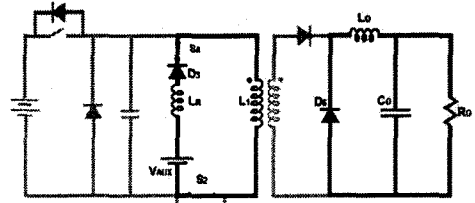
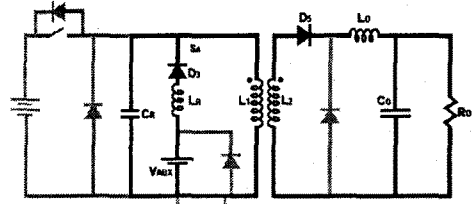


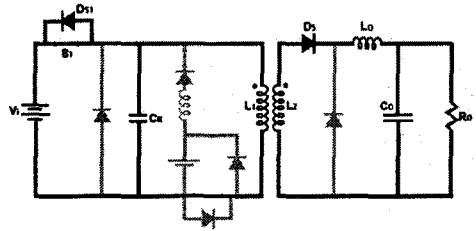
그림 3. 이론적인 회로 각부 파형



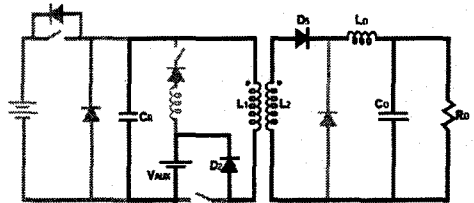
모드 I (t_0-t_1)



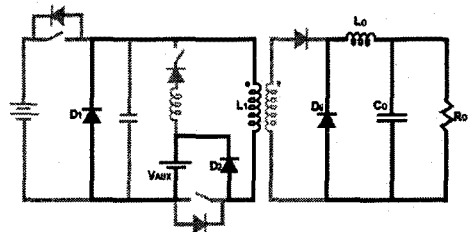
모드 II (t_1-t_2)



모드 III (t_2-t_3)



모드 IV (t_3-t_4)



모드 V (t_4-t_5)

그림 4. 모드별 등가회로

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

스위치 S_A 와 S_2 가 턴오프되는 모드로서 스위치 S_2 는 영전압 스위칭(ZVS)동작을 하고 공진 인덕터 L_R 의 전류(I_{LR})는 0에서부하 전류(I_o)까지 선형적으로 증가한다. 이때 V_{AUX} 는 전압원으로 동작하며, 공진 커패시터 C_R 의 전압(V_{CR})은 0으로 유지된다.

$$v_{c_r}(t) = 0 \quad (1)$$

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

모드II는 공진 인덕터전류(I_{LR})가 부하 전류(I_o)와 같을때 시작된다. 보조전압원(V_{AUX})은 L_R 과 C_R 을 공진시키면서 에너지를 2차측에 전달한다. 이 기간동안 공진 커패시터의 전압(V_{CR})은 0에서 시작하여 입력 전압(V_i)까지 선형적으로 증가한다.

$$v_{c_r}(t) = V_{AUX} - V_{AUX} \times \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$

스위치 S_1 이 턴오프되는 모드로서 스위치 S_1 은 ZVS형태로 턴오프되며, 공진 인덕터전류(I_{LR})는 0으로 서서히 감소한다. 이 기간동안 공진 커패시터 C_R 의 전압(V_{CR})은 V_i 로 클램프된다. 이 기간 동안에 주 전력은, 1차측에서 2차측으로 전달된다.

$$v_{c_r}(t) = V_i \quad (3)$$

4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

스위치 S_1 , S_2 및 S_A 가 턴오프되는 모드로서 S_A 는 영전류 스위칭(ZCS)으로 턴오프된다. 공진 커패시터 C_R 의 전압은 V_i 에서 0까지 선형적으로 감소하며, C_R 에 저장된 에너지는 다이오드 D_2 를 통하여 2차측으로 전달된다.

$$v_{c_r}(t) = V_i - \frac{I_o}{C_R} \times t \quad (4)$$

5) 모드 V : $t_4 \leq t \leq t_5$

공진 커패시터의 전압(V_{CR})이 0에 도달하면 변압기 누설인덕터의 에너지는 환류다이오드 D_1 과 다이오드 D_2 를 통하여 보조 커패시터의 전압(V_{AUX})으로 저장된다. 이때 2차측 출력 전류(I_o) 역시 2차측 환류다이오드 D_6 를 통하여 환류한다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{F_s}{4\pi F_o} \left[\frac{2}{\alpha} + \pi \right] + D \quad (5)$$

여기서, F_o : 공진 주파수, F_s : 스위칭 주파수,

$$\alpha = \frac{I_o}{V_{AUX}} \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}, \quad D : \text{duty ratio}$$

2.3 실험결과

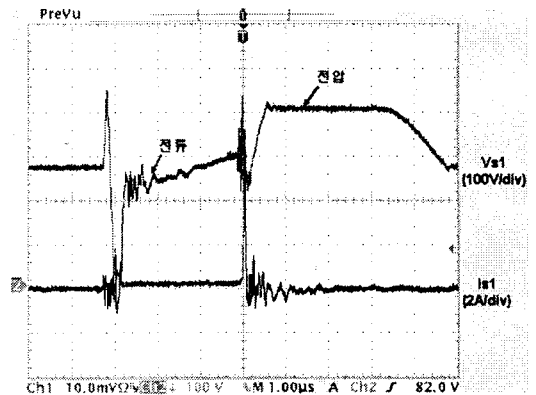
제안된 방식의 타당성을 검증하기 위하여 100kHz, 600W DC/DC ZVT Forward 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다. V_{AUX} 로는 보조 커패시터(C_T)를 사용하였다

그림 5는 경부하($P_o=120W$) 및 전부하($P_o=600W$)시 제안된 ZVT Forward 컨버터의 주 스위치(S_1)의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 제안된 ZVT Forward 컨버터는 기존의 방식에 비하여 주 스위치(S_1)의 턴온 전에 공진 인덕터(L_R)로부터 전원(V_i)쪽으로 역전류를 흘림으로써 경부하시에도 안정된 영전압 스위칭(ZVS) 함을 알 수 있

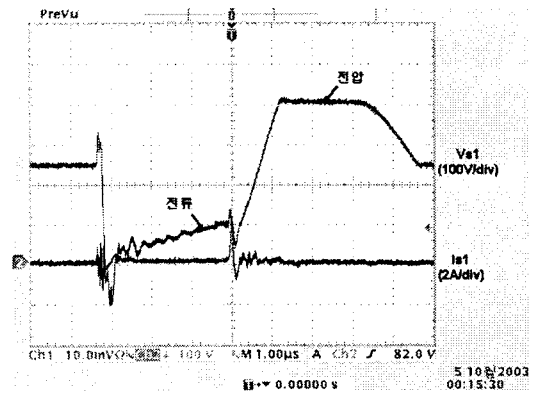
다. 그림 6은 경부하($P_o=120W$) 및 전부하($P_o=600W$)시 주 스위치(S_2)의 전압·전류 파형으로 전 부하영역에 걸쳐 안정적으로 영전압 스위칭(ZVS)동작을 하는 것을 볼 수 있다.

표1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력 전압 (V_{in})	DC 400 V
출력 전압 (V_o)	DC 48 V
최대 출력 (P_o)	600 W
주 스위치 (S_1/S_2)	2SK1522. RENESAS
보조 스위치 (S_a)	2SK1522. RENESAS
1차측 다이오드 ($D_1/D_2/D_3$)	SF20L60U. Shindengen
2차측 다이오드 (D_5/D_6)	KSF30A40B. NI
공진 인덕터 (L_r)	5.3 uH
공진 커패시터 (C_r)	1 nF
보조 커패시터 (C_T)	1 uF
스위칭 주파수 (f)	100 kHz

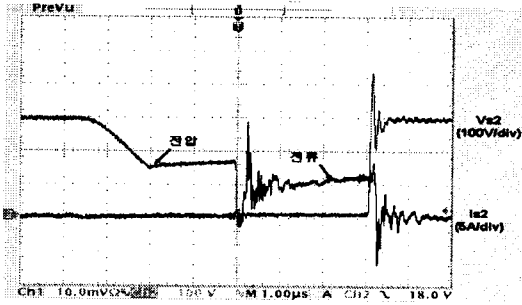


(a) 전부하시

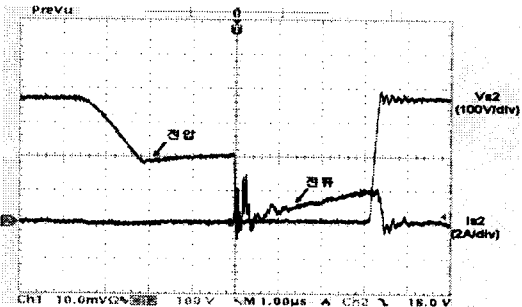


(b) 경부하시

그림 5. 제안된 ZVT Forward 컨버터의 주 스위치 (S_1) 전압·전류 파형



(a) 전부하시



(b) 경부하시

그림 6. 제안된 ZVT Forward 컨버터의 주 스위치 (S₂) 전압·전류 파형

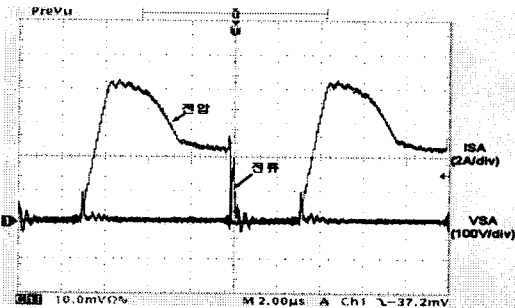


그림 7. 제안된 ZVT Forward 컨버터의 보조 스위치 (S_A) 전압·전류 파형

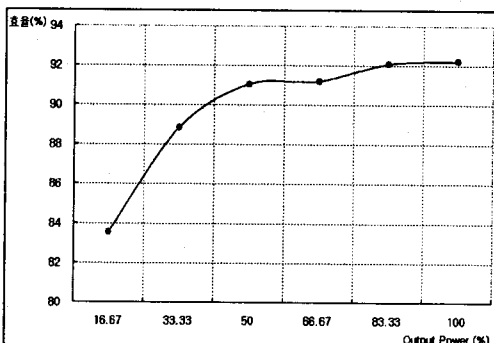


그림 8. 제안된 ZVT Forward 컨버터의 효율곡선

그림 7은 경부하($P_o=120W$)시 제안된 ZVT Boost 컨버터의 보조 스위치(S_A) 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 보조 스위치(S_A)는 거의 영전류 상태에서 턴오프함을 알 수 있다.

그림 8은 부하에 따른 컨버터의 효율 특성을 나타낸다. 제안된 컨버터는 전 부하 영역에 걸쳐 비교적 우수한 효율 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 1차측 보조회로를 이용한 ZVT Forward 컨버터에 대하여 논하였다. 제안된 컨버터는 전 부하영역에서 안정적인 영전압 스위칭 동작을 하여 스위치 S₁, S_A의 전압이 입력전압 V_i로 클램핑되고, 스위치 S₂와 다이오드 D₂의 전압은 V_{AUX}와 같으므로 스위치 전압 스트레스가 저감되며, 일반적인 Forward 컨버터에 비하여 리셋 권선이 제거되는 장점을 지닌다. 제안된 컨버터는 고밀도·고정밀 전원이 요구되는 통신장비 시스템에 적용 가능 하리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 배진용, 김용외, "능동 스너버를 이용한 ZVT DC/DC Boost 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 186~189, KIEE 2002 춘계학술대회
- [2] F. C. Lee, "High-Frequency Quasi-Resonant Converter Technologies", Proceeding on the IEEE, vol. 76, April 1988
- [3] Dias, C.P. Pereira, A.A. Vieira, J.B., Jr. Farias, V.J. de Freitas, L.C. "An improved self-resonant PWM forward converter" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual , Volume: 2 , 15-19 Feb. 1998 Page(s): 620 -625 vol.2
- [4] G. Hau, C. Leu, and F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Power Electronics Specialist Conf. Rec., pp. 55~61, 1992
- [5] Filho, N.P. Jose Farias, V. Carlos, L. de Freitas, L.C. "A novel family of DC-DC PWM converters using the self-resonance principle" Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE , 20-25 June 1994 Page(s): 1385 -1391 vol.2
- [6] Tae-Woo Kim, Hack-Sung Kim, and Hee-Wook Ahn, "An improved ZVT PWM boost converter", The Proceedings of The PESC'00, pp. 615~619, 2000
- [7] J. H. Kim, D. Y. Lee, H. S. Choi, and B. H. Cho, "High performance boost PFC with improved ZVT converter", The Proceedings of The APEC'01, pp. 337~342, 2001