전력전자학술대회 논문집 2001. 7. 4 ~ 7. 7

에너지 회생 변압기를 사용한 영전압 과도상태(ZVT) 부스트 역률보상 회로

양준현, 이동영, 조보형
서울대학교 전기공학부

Magnetic Coupled ZVT PWM Boost PFC Pre-regulator

Joon-Hyun Yang, Dong-Young Lee, Bo-Hyung Cho
Power Electronics System Laboratory
The School of Electrical Engineering Seoul National University

ABSTRACT

A zero-voltage transition (ZVT) PWM boost PFC converter using a transformer to recover the resonant energy into the input voltage is proposed. The proposed converter reduces turn-off switching loss of the auxiliary switch. The resonant current of the auxiliary circuit is optimally reduced by the feed-forwarded input voltage. Moreover, the resonant energy of the auxiliary circuit is recovered into the load and input voltages. In this paper, the modes of converter operation are explained and analyzed, design guidelines are given, and experimental results of 1.2kW, 200kHz prototype system are presented.

1. 서 론

최근 각종 전원장치의 역률 개선을 위해서DC/DC 컨버터의 전단에 추가되는 역률 보상 회로가 전원 장치의 필수 요소가 되었다. 전원 system의 소형화, 경량화 및 고효율화에 대한 요구가 증가되고 있는 상황에서 역률 규제를 만족시키기 위해 이러한 pre-regulator를 추가하는 것은 큰 부담이 된다. 그러므로 가능한 한 간단한 회로로써 고효율을 얻을 수 있는 역률 개선 회로가 필요하게 되고 고효율을 얻기 위한 다양한 종류의 소프트 스위칭 방식들이 제안되고 있다[3-8]. 일반적으로 소프트 스위칭 방식은 크게 영전압 스위칭 방식과 영전류 스위칭 방식으로 나눌 수 있다. 영전압 스위칭 방식은 턴-온 손실이 큰 MOSFET과 같은 다수 캐리어 반도체 소자에 적합하고 영전류 스위칭 방식은 턴-오프 손실이 큰 IGBT와 같은 소수 캐리어 반도체 소자에 적합하다. 특히 부하가 1~2kW급인 경우 ON-LOSS가 상대적으로 적은 MOSFET를 이용하는 것이 유리하므로 영전압 스위칭 방식을 적용하는 것이 타당하다. 이러한 영전압 스위칭 방식은 Liu에 의해 처음 제안된 이후 지금까지 여러 종류의 영전압 스위칭 방법이 제안되었다[1]. 지금까지 발표된 대부분의 영전압 스위칭 방식은 보조 스위치가 하드 스위칭을 함으로써 시스템의 효율 저하와 스위칭 노이즈에 의한 EMI 문제를 발생시킨다. 이 문제를 개선하고자 하는 보조 스위치의 소프트 스위칭 방식이 제안되었다[6-7]. 그러나 이 방식들은 주로 변압기를 사용해서 보조 스위치의 손실을 줄이도록 출력전압을 feedback하는데, 역률 보상 회로에서 입력전압이 낮고 부하전류가 적은 경우 영전압 스위칭에 실패해서 손실이 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 최소의 소자를 사용해서 넓은 입력전압 및 부하전류 영역에 걸쳐 주 스위치는 영전압 소프트 스위칭, 보조 스위치는 선택적으로 소프트 스위칭 시키는 영전압 과도상태(ZVT) 부스트 역률개선 회로를 제시한다. 이 방식은 부하전류가 클 때 주 스위치와 보조 스위치 모두 소프트 스위칭을 하며 영전압 스위칭을 위해 필요한 공진전류가 보조 회로를 통해서 입력측으로 에너지가 회생되기 때문에 고효율을 구현할 수 있다. 제안된 회로방식은 특히 MOSFET를 사용하는 대전력 부스트 컨버터 응용에 적합하며, 본 논문에서는 역률보상 회로를 예로 들어 분석하고 설계과정을 설명한다.

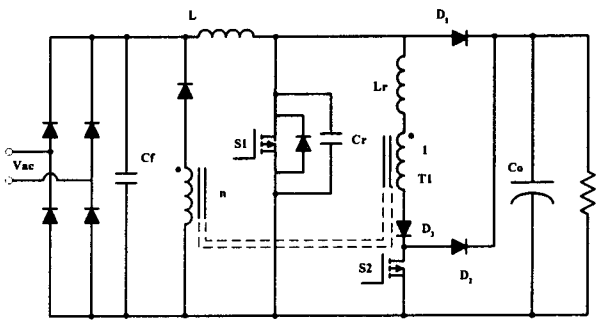

그림 1 입력전압측 에너지 회생 변압기를 사용한 영전압 과도상태 스위칭 부스트 역률보상 회로

Fig. 1 Magnetic Coupled ZVT PWM Boost PFC Pre-regulator

2. 본 론

2.1 영전압 과도상태 스위칭 회로

일반적으로 CCM 부스트 역률보상 회로는 부하 전류에 비례하는 전류 기준치에 의해 제어된다. 따라서 변압기를 사용해 보조 스위치의 손실을 줄이도록 출력전압을 feedback하는 영전압 스위칭 부스트 역률보상 회로는 특정 입출력 전압에 의해 effective duty가 정해지며, 규정된 부하전류 이하의 조건에서는 부스트 다이오드가 턴온 되지 못하는 상태이므로 주 스위치의 내부 capacitor Cr이 Vo로 충전되지 못한다. 그러므로 입력전압이 낮고, 부하전류가 적은 경우 영전압 스위칭에 실패하고 Cr에 충전된 전압이 모두 전력손실이 되는데 그때의 부하전류는 다음 식으로 규정된다.

$$I_{L(\min - zvt)} < \frac{Vo^2 \cdot Cr \cdot f}{Vo - Vi} \qquad (1)$$

제안된 영전압 과도상태 스위칭 회로는 그림 1에 나타나 있는 것처럼 보조 스위치와 공진 인덕터 그리고 입력전압 측으로 에너지를 회생하는 변압기로 구성 되어있다. 그림 2는 기존의 영전압 스위칭 방식과 제안된 영전압 스위칭 방식의 전류 파형들을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기존 방식은 보조 스위치에 흐르는 전류가 턴-오프시 하드스위칭을 함으로써 손실이 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 제안된 방식에서는 보조 회로의 도통 손실을 기존의 방식과 동등한 수준으로 유지하고 보조 스위치의 턴 오프시에도 영전류 스위칭을 가능하게 함으로써 손실을 최소로 하였다.

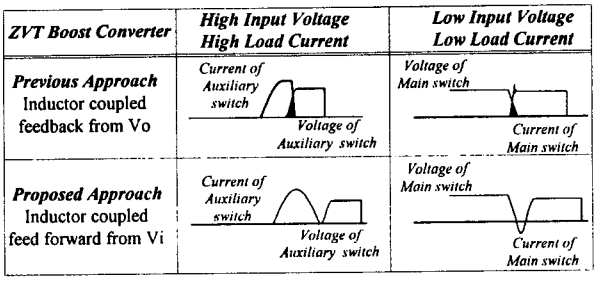

그림 2 소프트 스위칭 관련 주스위치, 보조스위치 손실비교
Fig. 2 Comparison of Switchig Losses

2.2 동작원리

제안된 회로의 동작원리를 DC 입력전압이 인가된 상황을 예로 들어 설명한다. 먼저 정상 상태에서의 동작원리를 분석하기 위해 입력측의 부스트 인덕터는 스위칭 한 주기 동안 정전류원으로 간주할 수 있을 정도로 크고 모든 소자는 이상적인 것으로 가정한다. 제안된 방식은 한 스위칭 주기동안 6개의 동작 모드를 가지며 각 모드의 기본 파형과 등가회로들이 각각 그림 3과 4에 나타나 있다.

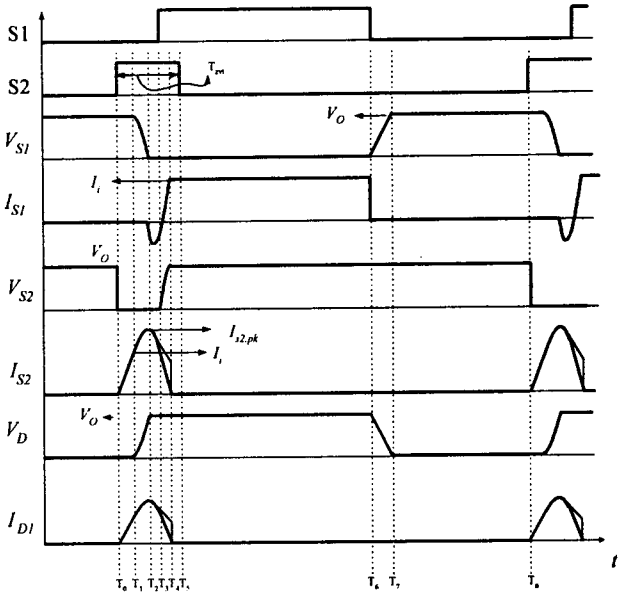

그림 3 중요 동작 파형
Fig. 3 Operating key waveform

Mode1 (T_0-T_1): T_0 이전에 입력 전류 Is가 다이오드 D1과 부스트 인덕터 L을 통해 출력단으로 흐르고 있다. T_0에 보조 스위치 S2가 턴온하면서 공진 인덕터의 전류가 $\frac{Vo - \frac{Vi}{n}}{Lr}$의 기울기로 증가하고 그에 따라 D1의 전류도 선형적으로 감소한다. T_1에서 D1의 전류가 0이 되는데 다이오드의 전류가 0이 된 후에 오프되므로 리버스 리커버리 전류가 현저히 줄어든다.

Mode2 (T_1-T_2) : T_1에서 Lr의 전류가 입력 전류에 이르고 나서 Cr1의 전압이 0이 될 때까지 공진하게 된다. Cr1값에 의해 주 스위치 S1은 드레인 전압의 $\frac{dv}{dt}$ 가 조절된다. Cr1이 완전히 방전될 때까지 Lr의 전류는 계속 증가한다. 이 구간의 끝에서 S1의 바디 다이오드가 도통하게 된다.

Mode3 (T_2-T_3) : 이 구간이 시작될 때 도통된 주 스위치 S1의 바디 다이오드 때문에 S1의 드레인 전압이 0이 된다. 이 구간에서 S1이 턴온 하면 영전압 스위칭이 된다.

Mode4 (T_3-T_4) : 이 구간에서 Lr의 전류가 2차 권선 전압 Vi에 의해 역으로 전달된 1차 권선전압 $\frac{Vi}{n}$에 의해 감소된다. 보조 스위치 S2가 턴온 되어 있어도 Lr의 전류는 자동적으로 0이 된다. 그러므로 보조 스위치도 영전류 턴 오프가 된다.

Mode5 (T_4-T_5) : 이 구간에서 실제적으로는 변압기의 여자전류가 흐르나 통상적으로 매우 적은 양이므로 무시된다. 이 여자전류는 D2를 통해 빠져나가 변압기는 리셋된다. 입력전압이 낮은 경우 이 구간까지 Lr 전류가 지속되었다가 오프된다.

Mode6 (T_5-T_7) : 이 구간은 부스트 컨버터 회로와 똑같이 다이오드를 통해서 부하에 전류가 공급되는 과정이다.

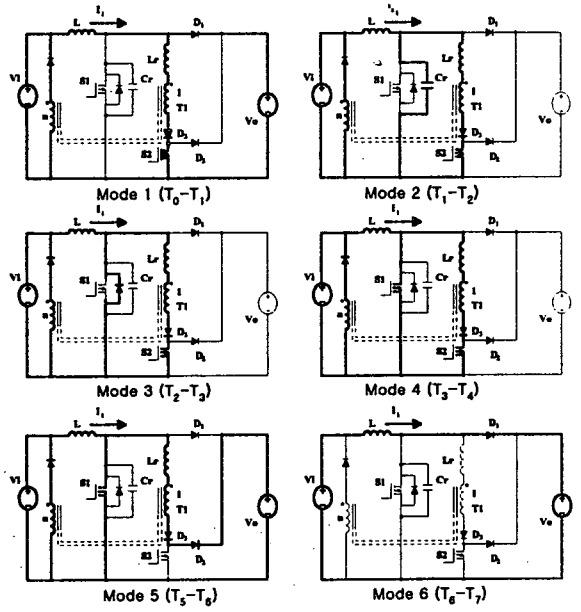

그림 4 동작모드
Fig. 4 Operation modes

2.3 설계절차

주 스위치가 모든 입력전압 영역 및 부하 영역에서 영전압 스위칭을 하기 위해서는 다음 조건이 만족 되어야 한다.

$$Vcr(t) = \frac{Vin}{n} + (Vo - \frac{Vin}{n})\cos\omega_0 t < 0 \qquad (2)$$

$$\text{여기서 } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LrCr}}$$

$$\therefore \frac{Vin}{n} < \frac{Vo}{2} \qquad (3)$$

변압기 권선비 n은 통상적인 경우 1.5~2의 값으로 결정된다. 2 이상의 값으로 할 경우 변압기 2차측 다이오드의 전압 스트레스가 증가하므로 trade- off를 고려하여 설계한다. 일반적인 영전압 과도상태 부스트 역률개선 회로와 설계 방법은 동일하나 입력전압이 가장 높은 경우를 기준으로 영전압 과도상태 duty비를 결정한다.

부스트 컨버터의 사양은 다음과 같다.

입력전압 : 220VAC, 출력전압 : 400VDC

출력전력 : 1.2kW, 스위칭주파수 : 200kHz

공진 인덕터와 캐패시터의 값은 다음과 같이 결정되었다.

Lr=10uH, Cr=1.2nF

역률개선 회로용 제어기는 TI사의 UC3855를 사용하였다. 이 제어기는 주 스위치 S1의 드레인 전압이 0이 되는 것을 감지하여 주 스위치 S1을 턴 온 시키고 보조 스위치 S2를 턴 오프시키는 기능을 갖고 있으므로 저전압 입력 시 보조 스위치 S2가 영전류 턴 오프가 안 되는 경우라도 최소한의 도통손실만 발생하므로 고효율 전원장치에 적합하다.

제작된 부스트 컨버터의 회로도는 그림 5에 나타나 있고 사용된 소자들은 표 1에 정리되어 있다.

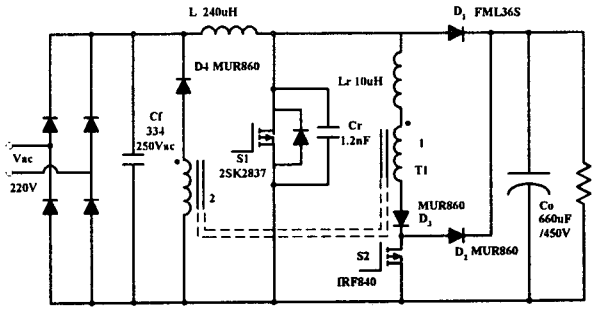

그림 5 영전압 과도상태스위칭 부스트 역률개선회로
Fig. 5 Implemented circuit of the new ZVT PWM Boost PFC circuit

표 1 사용된 부품 목록
TABLE I Utilized components and parameters

Components	Parameters
Lr	Magnetics 55586 , 10 μH
Lo	PQ5050 , 240uH
Cr	1.2nF ,polypropylene capacitor
Co	3*220 μF/450V , electrolytic capacitor
S1	2SK2837 (600V, 20A)
S2	IRF840 (500V, 8A)
D1	FML36S(600V, 20A)
D2, D3	MUR860(600V, 8A)
D4	UF4006(600V, 1A)
T1	PQ2020 (Nx = 2)

2.4 실험 결과

그림 6, 7은 주 스위치와 보조 스위치의 전압 및 전류 파형을 보여주고 있다. 입력전압이 높고 부하전류가 큰 경우 주 스위치와 보조 스위치 모두 영전압/영전류 스위칭을 하고, 입력전압이 낮고 부하전류가 적은 경우 주 스위치는 계속 영전압 스위칭을 하지만 보조 스위치는 턴 오프시 하드 스위칭을 한다. 그러나 부하전류가 적은 경우이므로 공진 인덕터에 흐르는 전류가 적어서 이 하드 스위칭에 의한 손실은 매우 적은 것을 알 수 있다. 출력 다이오

드는 턴 오프시 영전류 스위칭을 하므로 주 스위치 S1의 턴온시 역회복에 의한 서지 전류가 없음을 볼 수 있다. 효율은 Voltech사의 전력 분석기(PM3300)를 이용하여 측정하였으며 이것이 그림 8에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 효율은 최대 부하시 97.4% 이다.

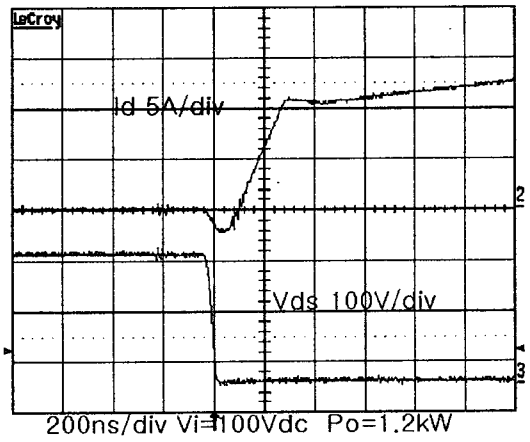

그림 6 주 스위치의 전압 전류 파형
Fig. 6 Current and voltage waveforms of S1

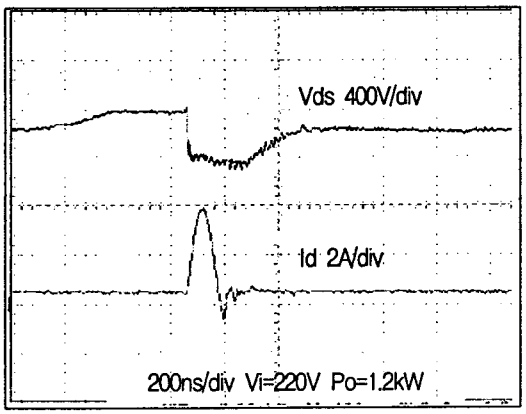

그림 7 보조 스위치의 전압 전류 파형
Fig. 7 Current and voltage waveforms of S2

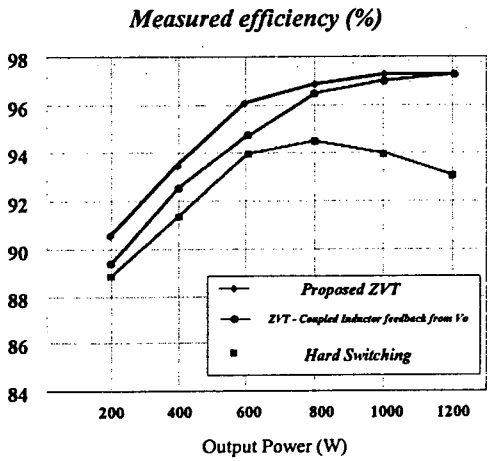

그림 8 측정 효율 (입력전압 AC220V)
Fig. 8 Measured efficiency

3. 결 론

입력전압과 부하전류의 전 영역에 대해서 주 스위치가 영전압 스위칭을 하고, 보조 스위치의 전류를 제한하여 보조 스위치의 도통 손실까지 최소화한 영전압 과도상태 스위칭 부스트 역률개선 회로를 제안하였다. 제안된 회로는 입력전압이 낮고 부하전류가 적은 경우 부분적으로 보조 스위치가 하드 스위칭 턴 오프를 하지만 무시할 만큼 적은 손실이다. 보조 스위치의 소프트 스위칭은 부하전류가 커서 손실이 클 때에만 이루어지므로 출력전압을 바이어스 전압으로 사용하는 변압기 결합형 ZVT 부스트 역률보상 회로 보다 효율을 개선하였다. 제안된 회로는 입력전압 과 부하전류 변동이 심한 PDP나 CRT Display 장치의 역률개선용 Pre-Regulator에 적합하다. 200kHz로 동작하는 1.2kW 부스트 역률보상 회로를 제작하여 실험을 통해 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 (주)삼성SDI의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] K. H. Liu, F. C. Lee, Zero-voltage switching technique in DC/DC converters, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 53, pp. 293~304, Jul 1990.

[2] D. C. Martins, F. J. M. Seixas, J. A. Brilhante and I. Barbi, A family of DC-to-DC PWM converters using a new ZVS commutation cell, in Power Electronics Specialists Conference Rec., pp. 524 ~530, 1993.

[3] G. Hua, C. S. Leu, Y. Jiang, and F. C. Lee, Novel zero-voltage-transition PWM converters, IEEE transactions on Power Electronics, vol. 9, pp. 213~219, Mar. 1994.

[4] I. Barbi, J. C. Bolacell, D. C. Martins, and F. B. Libano, Buck quasi-resonant converter operating at constant frequency: Analysis, design and experimentation, in IEEE Power Electronics Specialist Conference Rec., pp. 873~880, 1989.

[5] G. Ivensky, D. Sidi and S. Ben-Yaakov, A soft switcher optimized for IGBTs in PWM topologies, IEEE Applied Power Electronics Conference Rec., pp. 900~906, 1995.

[6] C. A. Canesin, C. M. C. Duarte, and I. Barbi, A new family of pulse-width-modulated zero-current-switching dc/dc converters, in IEEJ IPEC Rec., pp. 1379~1384, 1995.

[7] L. Yang and C. Q. Lee, "Analysis and design of boost zero-voltage-transition PWM converter," in IEEE Appl. Power Electronics Specialists Conference Rec., pp. 707~713, 1993.

[8] F. T. Wakabayashi, M. J. Bonato, and C. A. Canesin, A new family of zero-current-switching PWM converter, in IEEE Power Electronics Specialist Conference Rec., pp. 451~456, 1999.