

# 능동 스너버를 갖는 2KW 소프트 스위칭 ZVT 역률 보정 컨버터 설계

朴庚洙, 金倫鎬, 朴京秀  
중앙대학교

## Design of A 2KW Soft-Switching ZVT Power Factor Correction Converter with Active Snubbers

Kyoung-Soo Park, Yoon-Ho Kim, Kyoung-Soo Park  
Chung-Ang University

### ABSTRACT

In this paper a soft switching ZVT power factor converter using active snubbers is designed to improve efficiency and reduce voltage spike and parastic ringing. The main switch achieves ZVT and the auxiliary switch performs with ZCS. A 2KW soft switching ZVT converter is designed with switching frequency 100kHz, output voltage 400VDC.

Then the designed system is realized and experimental results shows that the measured efficiency and power factor were over 97.45% and 0.997 respectively with an input current THD less than 3%.

### 1. 서 론

최근 산업화, 전자화, 정보화 사회를 거치면서 전원 환경에 민감한 부하의 사용이 급증하는 반면 각종 기기 설비와 전력전자의 스위칭에 따른 강제 전류로 인한 고조파 발생과 역률 저하는 상대적으로 전력품질을 저하시키며, 전력계통의 효율을 저하시키는 문제를 야기하고 있다. 그리고 종래의 ZVT 컨버터에서는 보조 스위치가 턴-오프(Turn-off)할 때 하드 스위칭을 하고, 보조회로에 흐르는 전류가 입력 전류와 같게되어 도통손실 및 기생 인덕턴스 또는 기생 커패시터로 인해 보조 스위치가 오프(Off)할 때 스위칭의 손실 및 Ringing이 커져서 에너지 변환 효율을 저감시킨다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 결합 인덕터를 사용하여 보조 스위치가 턴-온(turned on)하면 결합 인덕터의 효과로 인하여 보조 스위치의 전류 스트레스를 감소시키고, 스너버 커패시터는 주 스위치와 보조 스위치의 턴-오프 구간에서 전압 상승률을 감소시키는 턴-오프 스너버 커패시터로 동작한다. 실제회로에서 보조 스위치가 턴-오프 스위칭 시, 스너버 커패시터는 초기에 보조 스위치의 드레인 전압을 0(Zero)V로 제어할 수 있고, 주 스위치가 턴-오프 스위칭 할 때, 전압 스파이크(Spike)를 감소시킬 수 있다. 따라서 주 스위치와 보조 스위치의 양 스위치의 턴

-오프 전압 스파이크(Spike) 및 기생진동(Ringing)을 효율적으로 감소시킨다. 여기서 결합 인덕터(Coupled inductor)와 변압기는 각각 마그네틱 코어(Magnetic core)에 몇 개의 권선으로 구성되어 있기 때문에 외형적으로는 상당히 비슷하지만, 동작원리와 스위칭 컨버터 동작에서 이들의 역할에는 많은 차이점이 있다. 결합 인덕터에는 변압기가 가지고 있지 않는 공극(Air gap)이 있고, 전류 흐름, 자속 레벨(Flux levels), 전류 방향, 전류 비율(scaling), 누설 인덕턴스는 이들의 단자 파형에 미치는 효과가 서로 다르다. 변압기는 우선 전력 전송을 위해 사용되며, 이상적인 변압기에 입력되는 전력은 변압기에서 출력되는 전력과 같다. 그러나 결합 인덕터는 전력(Power) 컨버터에서 스위칭 사이클동안 에너지 저장을 위해 주로 사용되는 소자이므로 결합 인덕터에 입력되는 전력은 어느 순간에 결합 인덕터에서 출력되는 전력과 다르다. 변압기는 전압, 전류 비율 조절과 dc 절연, 싱글(Single) 컨버터에서 다중 출력을 얻기 위해 사용된다. 그러나 결합 인덕터는 하나의 코어를 사용해서 컨버터의 부피(Volume)를 줄이는데 사용되고, 다중 출력 컨버터의 전압 변동률을 개선하고, 한 권선으로부터 다른 권선으로의 리플 전류를 조절하기 위해 사용된다. 본 논문에서는 결합 인덕터와 능동 스너버를 적용한 2[KW] 소프트 스위칭 ZVT 역률 보정 컨버터를 설계하여 실현하였고, 결합 인덕터와 변압기의 특성과 기능에 대해 검토하였다.

### 2. 결합 인덕터와 변압기의 특성과 파형비교

그림 1은 같은 전압원  $v_1$ 에 의해 구동된 Coupled inductor와 변압기의 자기 및 전기파형이 나타나 있다. 변압기 1차측은  $v_1$ 에 의해 구동되고, Coupled inductor는  $N_1$ 측에서는  $v_1$ 에 의해,  $N_2$ 측에서는  $v_2 = v_1 \cdot$  의해 구동된다. 변압기 2차측 전압은 구형파이고, 2차측 부하는 저항이므로 1차측에 유도된 2차 전류는 구형파이고, 여기에 권선 전류  $i_1$ 을 발생하기 위한 자화 전류가 추가된 파형이 된다. Coupled inductor의 1차측 전류

는 삼각 리플 요소를 가진 dc 요소의 형태를 가진다. Coupled inductor의  $\Phi_1$  은 dc 요소를 가진다. Coupled inductor에서의 총 자속  $\Phi$ 는  $\Phi_1 + \Phi_2$ 이다. 그러나 변압기의 총 자속  $\Phi$ 는  $\Phi_1 - \Phi_2$ 이 된다. 변압기의 자화 전류는 ac 파형이지만 인덕터의 자화 전류는 삼각 ac 리플 요소를 가진 dc 파형이 된다.

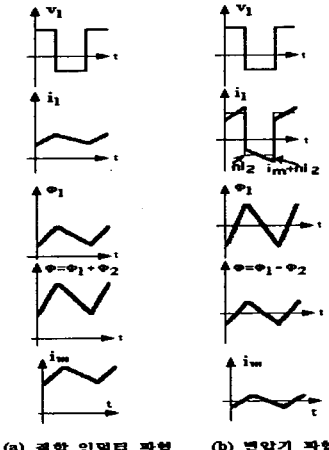


그림 1. 변압기와 결합 인덕터의 비교 파형

### 3. 결합 인덕터와 능동 스너버를 적용한 소프트 스위칭 ZVT 승압 컨버터

그림 2와 같이 능동 스너버와 결합 인덕터를 적용한 소프트 스위칭 ZVT 승압 컨버터는 승압 인덕터  $L_b$ , 주 스위치  $Q_1$ , 블로킹 다이오드  $D$ , 그리고 보조회로(ZVT switching cell)로 구성된다. 그림 3는 컨버터의 이상적인 기본 동작 파형을 나타낸다.

#### 3.1 동작원리 및 분석

다음은 능동 스너버를 가진 개선된 소프트 스위칭 ZVT 승압 컨버터의 세부적인 동작 모드를 나타낸다. 이것은 Left-leg에서 Right-leg으로 옮겨가는 스위칭 동작은 다음의 9가지 동작모드로 나눌 수 있다.

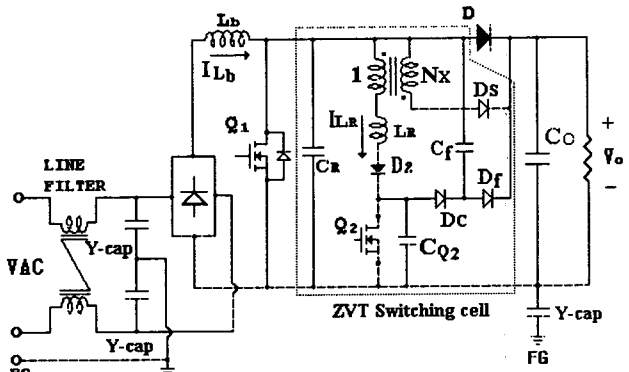


그림 2 능동 스너버와 결합 인덕터를 적용한 주 회로

#### 3.2.1 모드 1 (Before $T_0$ )

모드 1(Before  $T_0$ )에서 부스터 인덕터  $L_b$ 로 흐르는 전류  $I_{Lb}$ 는 블로킹 다이오드  $D$ 를 통해서 부하로 흐른다.

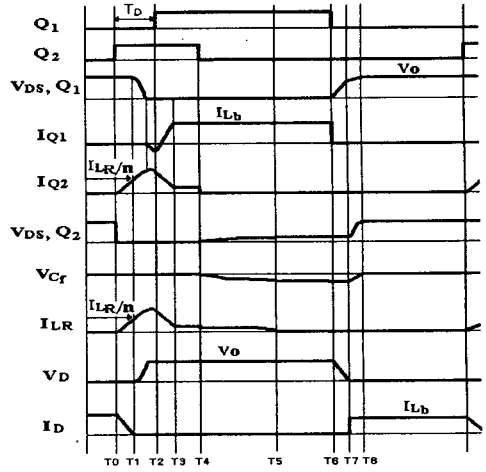


그림 3 능동 스너버를 적용한 컨버터의 이상적인 동작 파형

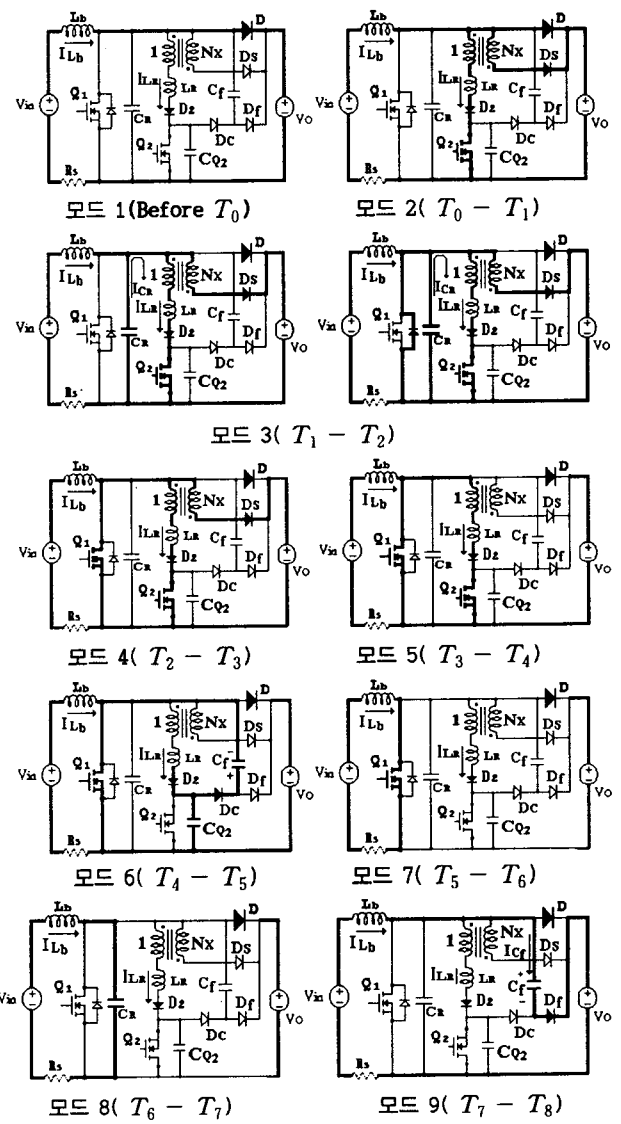


그림 4 컨버터의 동작모드

이때 스너버 커패시터  $C_r$ 의 충전된 전하는 0(Zero)으로 방전이 끝난 상태이고, 모든 자화 에너지는 부하로 방전이 되었다. 그리고 공진 커패시터  $C_r$ 의 충전전압

$V_{C_R}$ 는  $V_0$ 로 충전된 상태이고, 보조 스위치  $S_{Q2}$ 는 off 상태, 주 스위치  $S_{Q1}$ 은 ZVS로 off 되었다고 한다.

### 3.2.2 모드 2 ( $T_0 - T_1$ )

$T_0$ 에서 또 다른 스위칭 주기가 시작되고,  $S_{Q2}$ 는 다시 ZCS로 턴-온 된다.  $S_{Q2}$ 가 턴-온(turn-on)하면  $I_{L_R}$ 의 전류  $di_{L_R}/dt$ 는 결합변압기의 턴-수비( $n$ )에 따른 전류  $I_{L_S}/n$ 에 도달할 때까지 선형적으로 증가하고, 블로킹 다이오드 D의 전류는 동시에 감소하여 소프트 스위칭으로 턴-오프 된다.

### 3.2.3 모드 3 ( $T_1 - T_2$ )

$T_1$ 에서  $L_R$ ,  $D_2$ ,  $Q_2$ 로 흐르는 전류가  $I_{L_S}/n$ 이 되고,  $L_R$ 과  $C_R$ 은 공진을 시작한다. 공진 주기는 공진 커패시터  $C_R$ 가 방전하여  $C_R$ 의 양단전압 즉 주 스위치  $S_{Q1}$ 의 드레인 전압이 0(Zero)V가 될 때까지 계속된다.

### 3.2.4 모드 4 ( $T_2 - T_3$ )

이 모드의 시작에서  $C_R$ 가 방전하여, 공진 전류는  $C_R \rightarrow L_R \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_1$ 의 바디(Body) 다이오드로 순환하여 바디 다이오드가 턴-온 된다. 공진 커패시터  $C_R$ 와 공진 인덕터  $L_R$ 이 공진되어,  $S_{Q1}$ 의 드레인(Drain) 전압이 0V가 되고, 이때  $S_{Q1}$ 가 ZVS로 턴-온 한다.

### 3.2.5 모드 5 ( $T_3 - T_4$ )

$T_3$ 에서  $S_{Q1}$ 과  $S_{Q2}$ 는 턴-온(Turn-on)상태이므로, 결합 변압기에 남아있는 자화 전류  $I_{L_m}$ 와  $L_R$ 에 남아 있는 에너지가  $S_{Q2}$ 를 통해 전압원  $V_{in}$ 으로 흐른다.

### 3.2.6 모드 6 ( $T_4 - T_5$ )

이 모드에서  $S_{Q2}$ 가 턴-오프 되는 순간  $S_{Q2}$ 로 흐르는  $I_{L_m}$ 와  $L_R$ 에 남아있는 전류는  $C_{Q_2}$  및  $C_f$ 로 충전된다. 이 때  $C_f$ 의 전압 극성은 음으로 바뀌게 된다.

### 3.2.7 모드 7 ( $T_5 - T_6$ )

입력 DC 전압 원, 부스터 인덕터  $L_b$  그리고 주 스위치  $S_{Q1}$ 로 에너지는 순환한다.

### 3.2.8 모드 8 ( $T_6 - T_7$ )

이 모드는  $S_{Q1}$ 은 on에서 ZVS로 턴-오프(turn-off)하면서 시작한다. 이것은  $S_{Q1}$ 로 흐르는 전류는  $C_R$ 로 흐르기 때문에 주 스위치에 걸리는 전압은 서서히 증가하여  $V_0$ 로 충전된다. 동시에 블로킹 다이오드 D의 전압도 서서히 감소하여 소프트 스위칭 턴-온 된다.

### 3.2.9 모드 9 ( $T_7 - T_8$ )

$T_7$ 에서 공진 커패시터  $C_R$ 의 전압이  $V_0$ 로 충전되고, 이 때 스너버 커패시터  $C_f$ 의 전압 극성은 음으로 충전된 상태이므로 공진 커패시터  $C_R$ 로 흐르는 전류는 스너버 커패시터  $C_f$ 와  $D_f$ 를 통해 부하로 방전을 시작한다.

## 4. 시스템의 구성

2000W, 100kHz, 능동 스너버를 갖는 소프트 스위칭 ZVT 역률 보정 컨버터가  $25 \times 12.5 \times 6$ cm 크기로 제작하였다. 승압 인덕터  $L_b$ 의 제작은 고조파 스위칭 리플에 따른 손실을 저감하기 위해 승압인덕터  $L_b$ 의 피크-피크 리플 전류는 피크 승압인덕터  $L_b$  전류  $I_{L_{bb}}$ 의 15%가 되도록 설계하였으며, 승압인덕터  $L_b$ 값은  $350 \mu H$ , 높은 주파수에서도 낮은 손실을 갖는 코어(Cores)를 사용하였다.

공진 커패시터는 스위칭 전류가 커패시터로 전환될 때 턴-오프 손실을 줄이기 위해 큰 충전(Charging)전류를 충전할 수 있어야 한다. 또한 기생 인덕터와 기생 커패시터를 고려하여 공진 커패시터  $C_R$ 값을 결정하였다. 따라서 Dissipation Factor ( $\tan \delta$ )가 0.2%이고 손실이 낮은 세라믹 커패시터를 사용했다.

주 MOSFET는 2SK1020을 그리고 보조 MOSFET는 APT5024 AVR을선택하였다. 블로킹 다이오드 APT30D 60B는 역 회복 시간  $t_{rr}$ 은 50ns이다. 공진 인덕턴스  $L_R$ 는 고주파에서 포화되지 않고, 손실이 작은 공진 인덕터 코어와 코일은 릿츠(Lits)를 사용하였다. 여기서 공진 인덕터 값은  $6.2 \mu H$ 를 사용하여 동작 특성을 실험하였다. 그리고 코어는 TDK사의 PQ30/20을 선택하였다.

본 논문에서 사용한 제어회로는 UC3854BN를 사용했다.

## 5. 실험 결과

본 논문에서 능동 스너버를 갖는 2000W 소프트 스위칭 ZVT 역률 보정 컨버터의 동작 특성을 실험을 통해서 확인했다. 그림 5은  $V_{in}=210VAC$ ,  $V_o=400VDC$ , 스위칭 주파수 100kHz, 1500W, 역률 0.996일 때 입력 전압·전류 파형이다. 그리고 그림 6은 능동 스너버를 갖는 컨버터의 입력 전류에 대한 고조파 분석이다. 따라서 표 1에서 보는 바와 같이 능동 스너버를 갖는 컨버터가 하드 스위칭 보다 전체 고조파 왜곡(THD)이 작고, 3%이하인 것을 알 수 있다. 이것은 IEC61000-3-2 표준 중에서 스위칭 전원 장치(Class D)에 대한 고조파 제한치 보다 이한 것을 알 수 있다. 그림 7는  $V_{in}=210VAC$ ,  $V_o=400VDC$ ,  $P_o=1000W$ 에서 능동 스너버를 갖는 컨버터의 실험 결과 파형이다. 그림 7(a)는 주 스위치  $Q_1$ 이 영 전압 스위칭(ZVS)으로 소프트 스위칭하는 것을 볼 수 있으며, 그림 7(b)는 보조 스위치  $Q_2$ 로 흐르는 공진 전류가 약 10A가 흐르는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 전압 스파이크(Spike) 및 기생 인덕턴스와 기생 커패시터로 인한 기생 진동(Ringing)이 상당히 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 그림 8은 효율곡선으로 전부하와 높은 입력에서 전체 최대 효율 약97.5%을 얻었다.

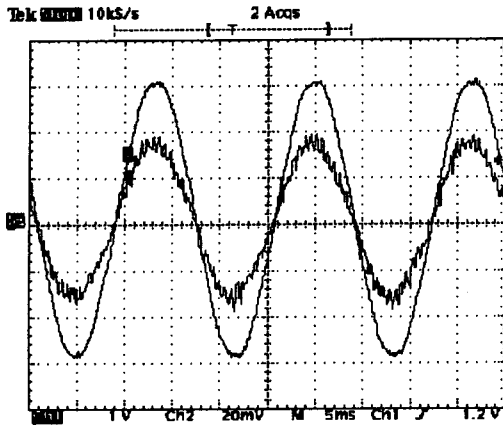
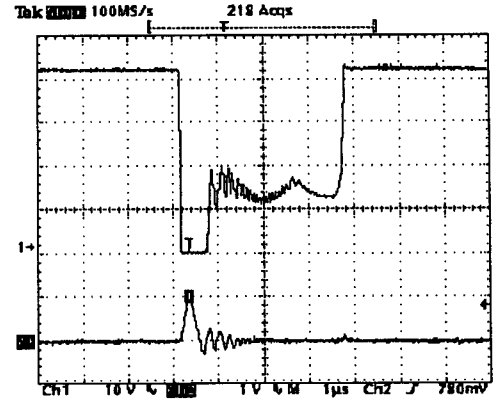
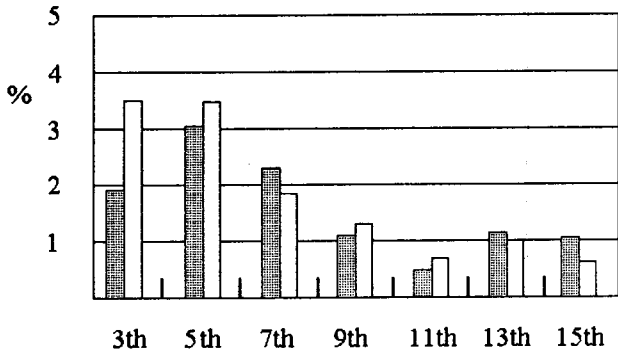


그림 5 입력 전압·전류 파형  
(100V/div, 5A/div, 5ms/div)



(b) 보조 스위치 전압, 전류 파형  
(100V/div, 10A/div, 1μs/div)  
그림 7 컨버터의 주 스위칭과 보조 스위칭의  
전압, 전류 파형



Hamonics (▨ : Vin=170V, □ : Vin=265V)

그림 6 능동 스너버를 갖는 컨버터의 입력 전류에 대한 고조파 분석(Po=2000W)

표 1 능동 스너버를 갖는 ZVT 컨버터의 입력 전류 THD

Converter	THD
하드 스위칭 컨버터	0.0782
제한된 소프트 스위칭 컨버터	0.0295

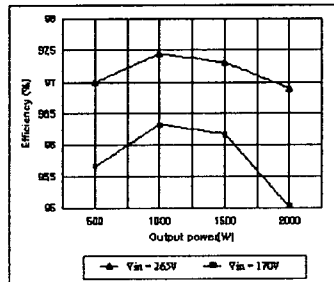


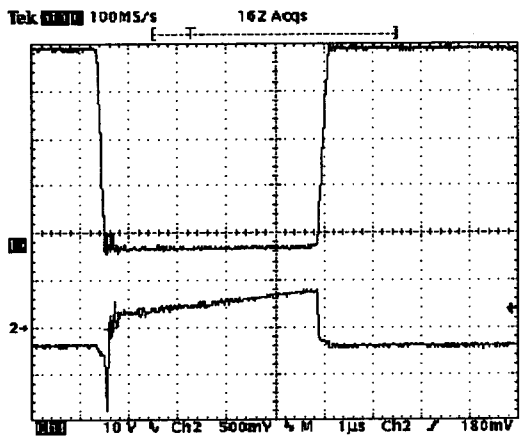
그림 8 능동 스너버를 갖는 컨버터의 효율 곡선

### 6. 결론

본 논문은 변압기와 결합 인덕터의 특성을 검토하였고, 자화(磁化)와 누설(Leakage) 효과를 포함한 변압기와 결합 인덕터의 차이점을 고찰하였다. 그리고 결합 인덕터와 능동 스너버를 적용하여 입력 170VAC와 265VAC 전압 범위에서 스위칭 주파수 100kHz, 출력 400VDC, 2kW 소프트 스위칭 ZVT 역률 보정 컨버터를 설계하여 이를 실현하였으며, 모드별 동작 파형을 분석하고, 실험을 통해 검토하였다. 전체 고조파 왜곡율(THD)을 3%이하로 제한 할 수 있었고, 역률 0.997 그리고 효율 97.45%을 얻을 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] G. Hua, Ching-Shan Leu, Yimin Jiang and Fred C. Y. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters," *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 9, No. 2, pp. 213~219, March 1994.
- [2] Ray L. Lin, Yiqing Zhao and Fred C. Lee, "Improved Soft-Switching ZVT Converters Using Coupled Inductor Based Active Snubber Cell," *Proceedings of VPEC97*, Sept. 1997, pp. 195~201.
- [3] Ray L. Lin, Yiqing Zhao, and Fred C. Lee, "Improved Soft-Switching ZVT Converters With Active Snubber," *Conference Proceeding of VPEC98*, Vol. 2, pp. 1063~1069.



(a) 주 스위치 전압, 전류 파형(100V/div, 10A/div, 1μs/div)