

# ZVS Full-bridge 컨버터의 ZVS 공진 에너지 불평형 문제와 해결 방법

이동영, 이일운, 조보형

서울대학교 전기공학부 전력전자 시스템 연구실

## ZVS Resonant Energy Unbalance Problem & Solution of ZVS Full-bridge Converter

Dong-Young Lee, Il-Oun Lee, Bo-Hyung Cho

Power Electronics System Laboratory

School of Electrical Engineering Seoul National University

### ABSTRACT

ZVS Full-bridge converter is widely used in medium power level(1~3kW). ZVS can be designed within a limited load range and ZVS failure at light load condition is assumed to be acceptable within the given efficiency and thermal constraints. However, unbalanced ZVS resonant energy caused by dc blocking capacitor may alleviate the switching loss problem at light load condition. ZVS resonant energy is unbalanced by dc blocking capacitor. This problem causes loss and heat concentration of a switch leg. In this paper, this problem is analyzed, and a novel control method is proposed to solve the problem.

ZVS 스위칭이 100% 실패하고 스위칭 손실을 무시할 수 없다.

FB 컨버터의 경우, 변압기에 인가되는 전압의 DC 성분을 제거하기 위해서 DC blocking 캐패시터가 존재하고 시스템의 여러 가지 원인에 의해 일정한 DC 전압이 유지된다. 이 전압에 의해서 ZVS를 가능하게 하는 공진 인덕터의 에너지가 불평형을 이루게 된다. ZVS 공진 에너지가 충분한 부하 조건에서는 문제가 되지 않지만 ZVS가 실패하는 부하 조건에서는 공진 에너지 불평형에 의해 한쪽 스위치 leg에 스위칭 손실이 집중되고 스위칭 손실에 의한 열이 집중되어 시스템의 신뢰성을 악화시킨다.

본 논문에서는 이러한 문제점이 발생하는 원인과 문제점들을 분석하고 간단한 제어로 해결할 수 있는 방법을 제시한다.

### 1. 서론

전원 시스템의 EMI 노이즈 문제를 해결하고 고속의 스위칭시 발생하는 스위칭 손실을 감소하기 위해서 영전압 스위칭 기술이 널리 사용되고 있다. 특히 1~3 kW의 중간정도의 전력에서는 소자수가 적고 제어가 간단한 ZVS (zero voltage switching) FB (full-bridge) PWM (pulse width modulation) 회로가 주로 사용된다. 그림 1은 ZVS FB PWM 컨버터의 회로도이다.

간단한 phase shift 제어방법으로 MOSFET 스위치의 영전압 스위칭을 가능하게 하므로 가격과 성능 면에서 매우 우수하다. 하지만 ZVS FB 회로의 경우 ZVS 조건이 부하의 조건에 의해 좌우된다. 즉 일정한 부하 이상에서 ZVS 조건이 만족하도록 설계할 경우 그보다 작은 부하에서는 ZVS 조건이 일부 실패하며 최악의 경우 무부하 시에는

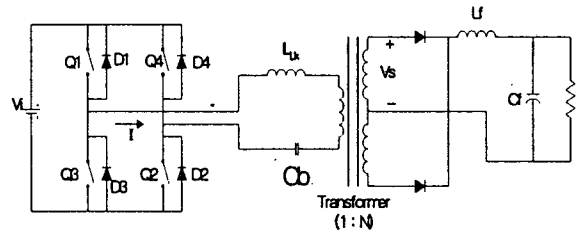


그림 1 ZVS FB PWM 컨버터  
Fig. 1 ZVS FB PWM Converter

### 2. ZVS 공진 에너지 불평형 문제

#### 2.1 ZVS FB 회로의 특징

ZVS FB 컨버터의 경우 소자수가 적고 제어가 간단하며 많은 전력을 처리할 수 있으므로 수 kW 전력에서 널리 사용된다. 그림 1에서 보듯이 ZVS 공진을 일으키기 위해서 변압기와 직렬로 삽입된 공진 인덕터가 필요하다. 이 인덕터와 스위치의

drain-source 간에 존재하는 캐패시턴스가 공진을 일으켜서 ZVS를 가능하게 한다. 그리고 변압기에 인가되는 DC 전압 성분을 제거하기 위해서 DC-blocking 캐패시터가 존재한다. 식 (2.1)은 간략한 ZVS 조건식이다. 식에서 보듯이 부하의 넓은 영역에서 ZVS가 가능하게 하려면 인덕터의 크기가 매우 커진다. 그림 2는 ZVS FB 컨버터의 변압기 전류와 변압기 전압을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 변압기 전류가 부하 전류 만큼 감소해야만 변압기에 걸리는 입력 전압이 부하로 전달되므로 유효 듀티는 부하 전류와 스위칭 주파수, 인덕터의 크기에 의해서 좌우된다. 즉 부하 전류가 크고 인덕터가 큰 경우 부하에 전달되는 유효 듀티는 최소가 된다. 그러므로 ZVS가 이루어지는 조건은 부하의 변동폭으로부터 전원 시스템의 최대 듀티와 유효 듀티를 얼마나 설계할 것인가에 의해 결정된다.

첫째 부하의 변동폭이 결정되고 최악의 경우 평균 부하의 2~3배 까지에서도 유효 듀티가 포화되지 않아야 한다.

둘째 전원시스템의 정격을 고려한 변압기 권선 비와 최대 듀티가 설계되고 시스템의 효율을 고려한 최대 스위칭 주파수가 결정된다.

셋째 부하 변동폭과 설계된 유효 듀티로부터 인덕턴스 값이 결정되면 ZVS 조건이 실패하는 부하가 결정된다.

이렇듯 부하 변동이 심하고 스위칭 주파수가 높은 ZVS FB 컨버터의 경우 공진 인덕터를 일정값 이상으로 설계할 수가 없다. 제한된 공진 인덕터에 의해 ZVS가 이루어지는 조건이 제한된다.

$$E = \frac{1}{2} L_{Lk} I_{1차}^2 > \frac{4}{3} C_{MOSFET} V_{입력}^2 \quad \text{식(2.1)}$$

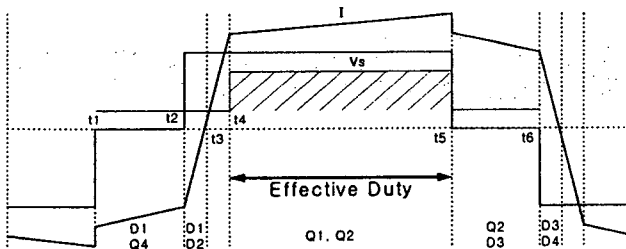


그림 2 ZVS FB 컨버터의 변압기 전류와 변압기 전압  
Fig. 2 Current & Voltage of ZVS FB Converter's transformer

## 2.2 ZVS 공진 에너지 불평형 문제

앞에서 제한된 크기의 공진 인덕터에 의해 ZVS FB 회로는 부하에 따라 ZVS가 실패하게 된다. 특히 평균 부하보다 2~3배나 변하는 부하 조건에서는

공진 인덕터의 크기는 더욱 작아진다.

ZVS가 실패할 경우 스위칭의 손실이 증가하게 된다. 게다가 그림 3에서 보듯이 DC blocking 캐패시터에 저장된 DC 전압에 의해 변압기 전류가 free wheeling 하는 구간에서 인덕터 전류가 한쪽으로 치우치게 된다. 치우친 공진 인덕터 전류에 의해 ZVS 공진 에너지의 불평형을 이루게 되고 공진 에너지가 감소한 쪽의 스위치 leg에서는 스위칭 손실이 더욱 증가하고 공진 에너지가 증가한 스위치 leg에서는 스위칭 손실이 감소한다. 이렇듯 부하가 작은 구간에서는 공진 에너지의 불평형에 의해서 스위칭 손실이 한쪽 leg에 집중되고 손실 열이 집중된다. 따라서 한쪽 스위치 leg에만 열 스트레스가 집중되므로 이상적인 동작을 가정한 설계보다 시스템의 신뢰성이 저하된다. 그림 4는 DC blocking 캐패시터에 의해 공진 전류가 불평형을 이루는 등가 회로이다. 그림에서 보듯이 DC 전압에 의해 공진 인덕터 전류는 한 방향으로만 증가하고 한쪽으로 공진 에너지가 치우치게 된다.

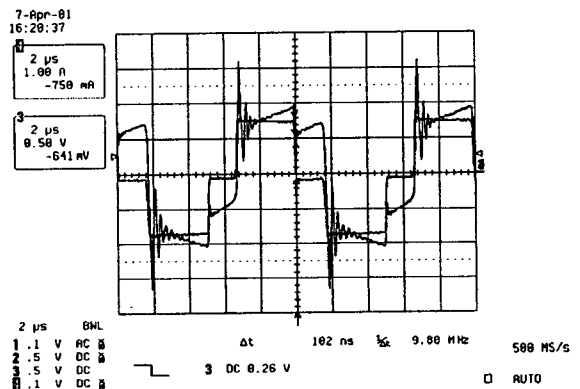


그림 3 공진 에너지 불평형 변압기 전압, 전류 파형  
Fig. 3 Resonant Energy Unbalance waveform of Transformer Voltage & Current (1A/div, 250V/div, 2us/div.)

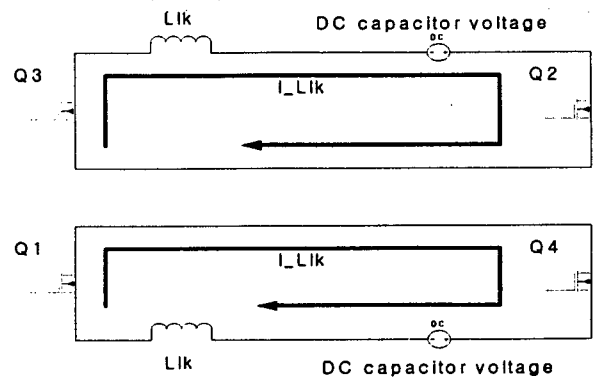


그림 4 공진 에너지 불평형 등가 회로  
Fig. 4 Equivalent Circuit of Resonant Energy Unbalance

### 3. 제안된 제어 방법의 원리와 구현

#### 3.1 제안된 제어 방법의 원리

여러 가지 이유로 인해 변압기에 인가되는 준구형파는 DC 전압 성분을 포함하게 되고 DC blocking 캐패시터에 의해 DC 성분을 막아준다. 이때 발생하는 DC 전압에 의해 공진 인덕터의 흐르는 공진 에너지 전류가 비대칭을 이루게 된다. 즉 한쪽으로 에너지가 치우치게 된다. 그러므로 DC blocking 캐패시터에 인가되는 DC 전압을 측정하여 변압기에 인가되는 준구형파를 보정하게 되면 DC 전압 성분을 제거하여 공진 에너지의 불균형을 해결할 수가 있다.

그림 5에서 보듯이 여러 가지 이유에 의해 비대칭이 된 변압기 전압을 보정하기 위해서 DC blocking 캐패시터에 저장된 전압의 크기와 극성을 판단하고 극성에 맞게 한쪽 스위치 leg의 ON gating 신호의 duty를 가변하므로 보정이 가능하다. DC 성분의 전압이 없어지도록 제어하므로 피드백 제어기는 전원 시스템에 비해 매우 느린 적분기를 사용해도 충분하다.

일정한 극성의 DC 전압 성분이 발생하면 한쪽 스위치 leg의 ON gating 신호의 가변 duty를 감소시키므로 반대 극성의 DC 성분이 증가하고 DC 성분은 작아지고 negative feedback 제어에 의해 DC 성분이 0이 되는 지연시간을 결정한다. 반대 극성의 DC 전압 성분이 발생하면 다른 쪽 스위치 leg의 ON gating 신호의 duty를 가변시켜야 한다.

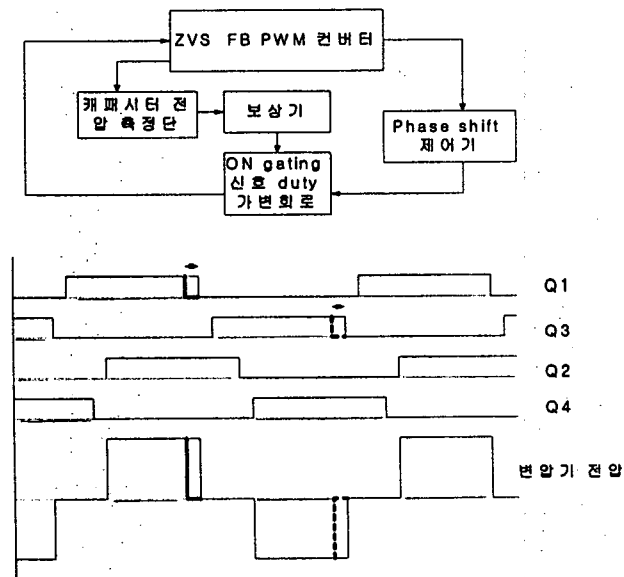


그림 5 제안된 제어기의 구조와 gating 신호 및 변압기 전압  
Fig. 5 Proposed Control Scheme & Gating Signal, Voltage of Transformer

#### 3.2 제안된 제어기의 구현

제안된 제어기는 크게 DC 전압을 측정하는 부분과 ON gating 신호의 duty를 가변하는 부분, negative feedback 보상기로 구성된다.

일단 극성이 다른 DC blocking 캐패시터의 전압을 측정하는 부분은 차동증폭기로 설계가능하다. 본문에서는 간단히 절연을 고려하여 두 개의 photo-coupler로 구성하고 DC 전압의 극성에 따라 한쪽 photo-coupler만 작동하게 제작한다. photo-coupler에 의해 측정된 전압 신호를 보상하고 DC 전압 성분을 줄이기 위해 스위치 leg의 duty 가변 회로를 제어한다.

보상기 부분은 negative feedback을 구현하기 위해서 photo-coupler에서 측정한 전압을 비반전 적분기를 통해 보상한다. 적분기에서 나온 제어 전압에 의해 ON gating 신호의 duty 가변 시간이 결정된다. 가변 시간은 BJT 트랜지스터의 에미터 컬렉터 간의 저항값을 전압으로 가변시킨다. ON gating 신호 duty 가변 회로는 monostable multivibrator 4538 CMOS 논리회로로 구현하였다.

이 회로는 phase shift 제어기에서 나온 한쪽 스위치 leg의 gating 신호를 일정한 ON gating 신호의 duty를 갖는 신호로 변환시킨다. 가변된 한쪽 스위치 leg의 ON gating 신호에 의해 변압기에 인가되는 준구형파의 DC 전압 성분이 제거되고 한 주기 동안 공진 인덕터의 공진 에너지 전류는 균형을 이루게 된다. 균형을 이룬 공진 에너지에 의해 양쪽의 스위치 leg의 ZVS 정도가 같아지고 스위칭 손실열이 같아져서 작은 부하에서 스위칭 손실열이 집중되는 문제를 해결할 수가 있다. 그림 6은 제안된 제어기의 회로도이다.

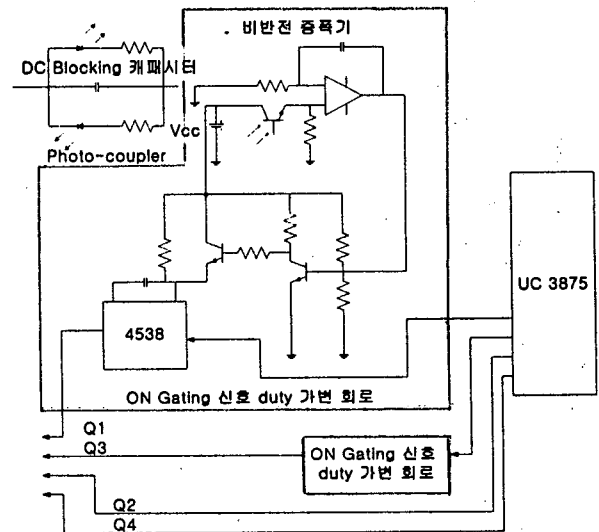


그림 6 제안된 제어기의 회로도  
Fig. 6 Circuit of Proposed Control

#### 4. 실험 결과 및 분석

제안된 제어기의 성능을 검증하기 위해서 1kW ZVS FB 컨버터를 설계하고 제작하였다. 입력 전압은 PFC 회로의 출력 전압인 400V로 설계하고 출력 전압은 180V이다. 평균 부하 전류는 6A이고 부하 변동이 심하므로 순시적으로 출력의 3배까지 변한다. 이러한 조건을 고려하여 컨버터를 설계하고 제작하였다. 제작된 컨버터의 설계값은 표1에 정리하였다. 평균 부하에서 측정된 효율은 95%이다. 하지만 변동 부하로 인하여 제작된 컨버터는 공진 인덕터의 크기가 작으므로 평균 부하의 80%에서 ZVS가 실패한다. 표 2는 ZVS가 실패하는 부하 조건(40% 부하)에서 제안된 제어기를 사용한 스위치의 열과 사용하지 않은 스위치의 열을 측정하는 것이다. 제안된 제어기를 사용한 경우 양쪽 스위치의 열이 골고루 분산되고 제어기를 사용하지 않은 경우에는 한쪽 스위치에서만 높은 열이 발생하는 것을 볼 수가 있다. 그림 7은 제안된 제어기를 사용한 경우의 변압기 전류이다. 그림 3과 그림 7에서 보듯이 제어기를 사용하지 않은 경우 공진 에너지의 불균형이 발생하고 제어기를 사용한 경우 공진 에너지가 균형을 이루는 것을 볼 수가 있다.

표 1 실험에 사용된 컨버터의 설계값  
Table 1 Design Value of Experimental Converter

	값	비고
변압기	PQ 4040 2개	턴비 36 : 26
출력 인덕터	260 uH	(20A)
공진 인덕터	10 uH	(20A)
출력 캐패시터	44 uF	(250V)
DC block 캐패시터	4.7 uF	(63V)
스위치	2SK2837	(600V,20A)
다이오드	FML36S	(600V,20A)

표 2 제안된 제어기를 사용한 회로와 사용하지 않은 회로의 스위치 측정 열  
Table 2 Measured Heat with & without proposed control

	Q1	Q2	Q3	Q4
공진 에너지 불균형	35 °	70 °	35 °	65 °
제안된 제어기 사용	41 °	42 °	41 °	42 °

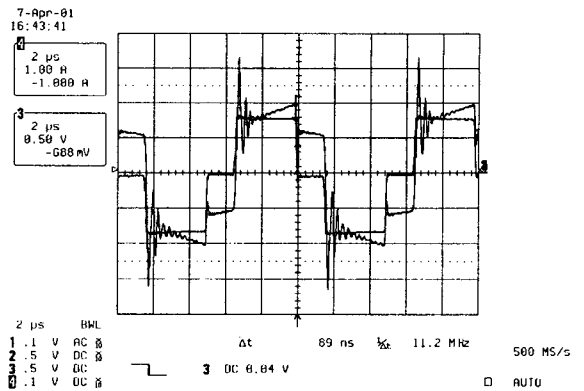


그림 7 제안된 제어기를 사용한 회로의 변압기 전압, 전류  
Fig. 7 Transformer current & voltage of Proposed control(1A/div. 250V/div. 2us/div.)

#### 5. 결론

본 논문에서는 작은 부하에서 ZVS FB PWM 컨버터에 발생하는 공진 에너지 불균형의 문제점을 분석하였다. 공진 에너지의 불균형이 발생하는 원인을 분석하고 불균형을 해결하는 제어 방법을 제시하였다. 제안된 제어 방법으로 인해 공진 에너지의 불균형을 해결하고 작은 부하시 공진 에너지의 불균형으로 인해 한쪽 스위치 leg에 스위칭 손실이 집중되고 손실 열이 집중되는 문제점을 해결하였다. 제안된 제어기는 작은 부하에서 발생하는 한쪽 스위치의 손실 열이 집중되는 문제를 해결하므로 전원시스템의 신뢰성을 향상시킨다.

#### 참고 문헌

- [1] J .A. Sabate, V. Vlatkovic, R. B. Ridley, F. C. Lee, and B. H. Cho, "Design Considerations for High-Voltage-Switched PWM Converter," IEEE APEC, pp. 275~284, 1990.
- [2] V.Vlatkovic, J.A.Sabate, R.B.Ridley, F.C.Lee, and B.H.Cho, "Small-Signal Analysis of the Zero-Voltage Switched Full-Bridge PWM Converter," High Frequency Power Conversion pp. 262~271, 1990.
- [3] G. Hua, F. C. Lee, and M. M. Jovanovic, "An Improved Zero-Voltage-Switched PWM Converter Using A Saturable Inductor," IEEE PESC, pp. 189~194, 1991.
- [4] R.Redl, L.Balo, D.W.Edwards, "Optimum ZVS Full-Bridge DC/DC Converter with PWM Phase-Shift Control : Analysis, Design Considerations, and Experimental Results," IEEE APEC, pp. 159~165, 1994.