

# 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터의 토폴로지

(Topology of a soft switching high frequency insulated PWM DC-DC converter)

이수호\* · 권순걸 · 서기영 · 이현우 · 문상필

경남대학교

(S.H. Lee · S.K. Kwon · K.Y. Suh · H.W. Lee · S.P. Mun)

(Kyungnam University)

Abstract

In this paper, proposed new partial resonance ZCS PWM controlled High frequency insulated Full-bridge DC-DC converter not using exciting current of high frequency transformer. It is compared with the existing principles in characteristics. It also realizes a widely stabilized ZVS operating using new ON-OFF control method at synchronized power rectification MOSFET of high frequency insulated transformer secondary. Besides, it is brought over 97[%] measurement efficiency by proposed DC-DC converter.

## 1. 서론

전력용 MOSFET, IGBT등 MOS 게이트 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 펄스 변조 스위칭 모드 고주파 절연형 DC-DC 컨버터의 소형·경량화, 고성능화·저소음화하기 위한 스위칭 주파수의 고주파화 기술이 도입되어지고 있다. 그러나, 기존의 하드 스위칭 고주파 PWM 절연형DC-DC 컨버터는 펄스 변조 캐리어 주파수의 고주파화를 수반하고, 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭 손실의 증대나 스위칭 과도현상이 수반된 전압 서지나 전류 서지에 의한 EMI의 노이즈의 발생등의 문제점이 있다.

또한, 스위칭 주파수의 고주파화에도 한계가 나타나고 있다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 스위칭 모드 PWM DC-DC 컨버터내의 전력용 반도체 스위칭 소자와 고주파 트랜스를 포함한 L-C공진회로, 스너퍼 회로등을 이용하여 영전압 스위칭(ZVS) 또는 영전류 스위칭(ZCS)의 상태 천이로 온 시키는 소프트 스위칭 PWM 고주파 절연형 DC-DC 컨버터의 회로 기술에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

본 연구에서는 고주파 변압기스의 여자 전류를 이용하지 않고, 새로운 부분공진 영전압 스위칭 PWM 제어를 이용한 고주파 절연형 풀-브리지 DC-DC 컨버터의 회로를 제안하여 그 동작 원리를 기존 방식과 비교하고자 한다. 또한, 고주파 절연 트랜스 2차측에 동기 정류용 전력용 MOSFET에 새로운 기능을 부가한 온-오프 제어 방식을 이용하여 넓은 부하 범위에 걸쳐 안정된 영전압 스위칭(ZVS) 동작을 실현하고자 한다.

끝으로 제안한 DC-DC 컨버터의 실험장치에 의해서 실측 효율을 97[%]이상 달성하고자 하며, 직류 무정전원의 PWM 정류기의 출력단에 이용되는 새로운 방식을 스위칭 전원으로써 유효성이 있음을 증명하고자 한다.

## 2. 제안한 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터

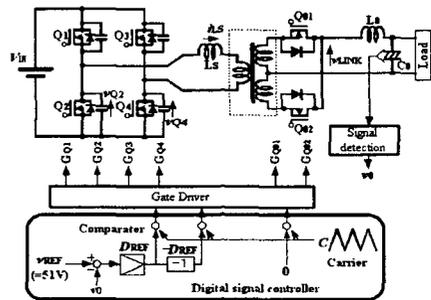


그림 1 제안한 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC/DC 컨버터

Fig. 1 Proposed high frequency transformer soft switching PWM DC-DC converter

그림 1은 기존의 무손실 스너퍼 커패시터에 의한 고주파 변압기 1차측 부분 전압 공진 ZVS-PWM 방식 DC-DC 컨버터의 주 회로를 나타낸 것이며, 그림 2는 제안한 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터의 주 회로 구성을 나타낸 것이다. 제안한 회로는 기존의 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터 회로의 고주파 절연 변압기 2차측에 전력용 MOSFET  $Q_{01}$ ,  $Q_{02}$ 을 이용하여 동기 정류시켰으며, 이러한 2차측

의 전력용 MOSFET를 1차측의 전력용 MOSFET의 소프트 스위칭 동작을 실현하기 위해 새로운 온-오프 제어 방식을 사용하였다.

또한, 고주파 변압기에 병렬로 접속된 등가 여자 인덕턴스  $L_p$ 를 기준 인덕턴스보다 7.5배 더 큰  $150[\mu\text{H}]$ 를 사용하여 무효전류를 적게 하고, 동시에 출력 필터 인덕터  $L_o$ 의 값은 5분의 1 정도로 줄였다.

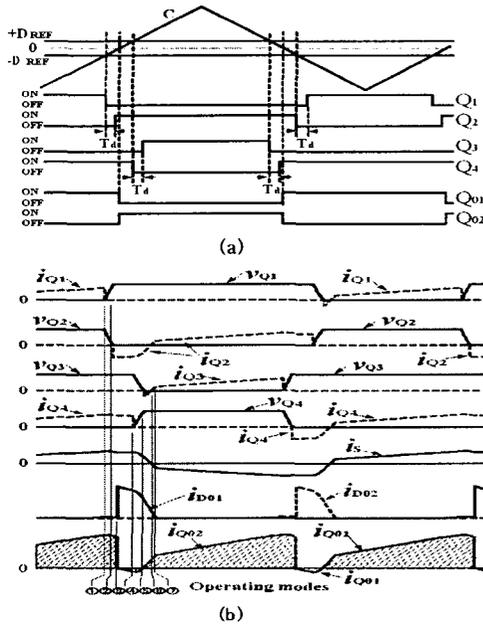


그림 2 제안한 DC-DC 컨버터의 동작 전압과 전류파형  
(a) 게이트 펄스 신호 생성 파형  
(b) 동작 파형

Fig. 2 Operating voltage and current waveforms of the proposed DC/DC converter  
(a) Gate pulse signal processing waveforms  
(b) Operating waveforms

제안한 회로는 2차측의 동기 정류용 전력용 MOSFET를 50[%]의 듀티율(d)로 능동적으로 온-오프 시키는 것으로 1차측의 전력용 MOSFET의 소프트 스위칭을 도와줌으로써 무부하를 포함한 넓은 부하 변화 범위에서 영전압 소프트 스위칭 동작을 실현할 수 있다.

그림 2는 제안한 회로의 제어 방식에 있어서 온-오프 신호의 생성 및 동작 파형을 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 주 스위치 Q1에서 Q4의 온-오프 신호는 그림 2와 동일하지만 고주파 절연 변압기 2차측의 전력용 MOSFET  $Q_{01}$ ,  $Q_{02}$ 에 듀티율 50[%]의 새로운 온-오프 신호를 공급하고 있다. 그림 2(b)에서 출력 전류 파형이 채칭된 부분은 전력용 MOSFET( $Q_{01}$  또는  $Q_{02}$ )와 이것에 병렬로 접속된 다이오드의 양쪽에 전류가 흐르고 있는 기간을 나타낸 것이다.

그림 3은 제안 회로의 무부하에 있어서 동작 모드 전이와 등가 회로를 나타낸 것이며, 동작원리를 설명하면

다음과 같다.

모드 1은 직류 전압( $V_{IN}$ )을 스위치 Q1과 Q4를 통하여 부하측으로 전력을 공급하는 모드이다. 이때,  $L_o$ 의 전류는 증가하고,  $L_s$ 에 전류가 축적된다.

모드 2는 스위치 Q1을 턴-오프 하는 모드이다. 이때,  $L_s$ 의 에너지가 스위치 Q1에 병렬로 접속된 커패시터를 충전하며, 스위치 Q1의 단자 전압은 0로부터 서서히 상승하며, 동시에 스위치 Q2의 단자 전압이 감소한다.

모드 3은 스위치 Q2의 단자 전압이 0이 되는 모드이다. 이때,  $L_s$ 의 전류는 스위치 Q4와 Q2로 환류(還流)한다. 이 기간에 스위치 Q2는 영전압 턴-온한다. 스위치 Q1과 Q4가 도통하고,  $L_s$ 을 포함한 고주파 변압기의 입력 단자 전압이 0가 되기 때문에  $L_o$ 의 전류가 감소한다.

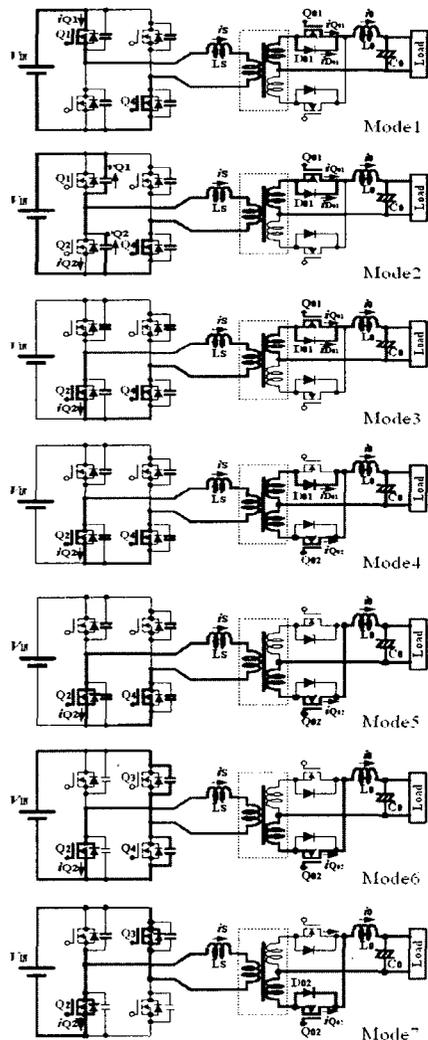


그림 3 제안한 PWM DC-DC 컨버터의 동작 모드  
Fig. 3 Mode of the proposed PWM DC-DC converter

모드 4는 스위치  $Q_{01}$ 가 영전압 턴-오프하고, 스위치  $Q_{02}$ 는 영전류 턴-온되는 모드이다. 이때,  $L_0$ 의 전류와  $i_{d0}$ 가 감소하며, 스위치  $Q_{02}$ 에 전류가 흐르게 된다. 그리고  $L_S$ 의 단자 전압이 0이 되며, 스위치  $Q_4$ 의 전류는 상승한다

모드 5는  $i_{d0}$ 가 0가 되어 다이오드  $D_{01}$ 이 역회복 되는 모드이다. 이때,  $L_0$ 의 전류는 감소하고,  $i_{d0}$ 는 부(-)로 증가한다. 그리고  $L_S$ 의 전류, 즉 스위치  $Q_4$ 의 전류는 상승한다.

모드 6은 스위치  $Q_4$ 를 턴-오프 하는 모드이다. 이때,  $L_S$ 의 에너지가 스위치  $Q_4$ 에 병렬로 접속된 커패시터를 충전하고, 스위치  $Q_4$ 의 단자 전압은 0로부터 서서히 상승한다. 그리고 동시에 스위치  $Q_3$ 의 단자 전압이 감소한다.

모드 7은 스위치  $Q_3$ 의 단자 전압이 제로가 되는 모드이다. 이때,  $L_S$ 의 전류는 스위치  $Q_3$ 에 병렬로 접속된 다이오드에 흐른다. 이 기간에 스위치  $Q_3$ 은 영전압 턴-온한다. 그리고  $i_{d0}$ 의 극성이 반전되고, 스위치  $Q_{02}$ 와  $D_{02}$ 에 병렬로 전류가 흐른다.

제안한 고주파 절연형 영전압 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터 회로는 온-오프 기능부 동기 정류용 능동 스위치  $Q_{01}$ 과  $Q_{02}$ 의 스위칭 작용에 의하고, 한계 설계된 출력 필터 인덕터  $L_0$ 에 전류 리플이 생기며, 이 전류에 의해서 스위치 전류  $i_{Q1} \sim i_{Q2}$ 는 상승한다. 따라서, 기존의 소프트 스위칭 회로에서 전류의 상승에 필요했던  $L_P$ 를 생략한 고주파 변압기를 사용할 수 있기 때문에 고주파 트랜스, 전력용 반도체 스위칭 소자의 전류 증대도 대폭적으로 저감할 수 있다.

표 1 실험에 사용된 회로 정수  
Table 1 Circuit parameters used in experiment

입력 직류전압( $V_{IN}$ )	350[VDC]	
출력 직류전압( $V_0$ )	51[VDC]	
스위칭 주파수( $f_s$ )	35[kHz]	
스위치	MOSFET (Q1~Q4)	2SK1522×3Parallel
	MOSFET (Q01, Q02)	2SK3158×6Parallel
무손실 스너버 커패시터 (C1~C4)	4.7[nf]×2Parallel	
여자 인덕터( $L_P$ )	150[μH]	
공진 리액터( $L_S$ )	20[μH]	
평활 리액터( $L_0$ )	6[μH]	
평활 커패시터( $C_0$ )	1000[μf]×6Parallel	
고주파 변압기 코어	PQ 50/50 Ferrite core pc44	
다이오드	MOSFET Body-Diode	

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과고찰

표 1은 그에 따른 회로 정수를 나타낸 것이다. 그림 4와 그림 5는 50[A]부하시와 무부하에 있어서 실험 파형을 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 스위치 단자 전압  $v_{Q_i}$ 의  $dv/dt$ 가 억제되며, 전압 소프트 스위칭이 달성된다.

그림 6은 부하 전류를 50[A]에서 0으로 급변시킬 경우 각 부의 실험 파형을 나타낸 것이며, 그림 7은 부하 전류를 0에서 50[A]으로 급변시켰을 때의 각 부 실험 파형을 나타낸 것이다. 그림 6과 그림 7에서 부하 변동 시에서도 입력 전류( $i_R$ )는 정현파의 형태로 제어되며 과도시에 있어도 변압기가 포화되지 않아도 동작할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

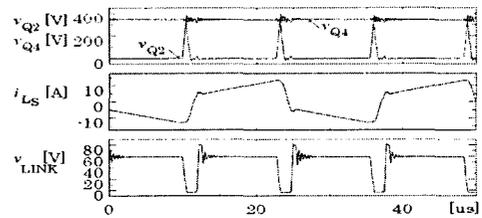


그림 4 실험결과 파형(50[A]부하)  
Fig. 4 Experimental result waveforms (50[A]load)

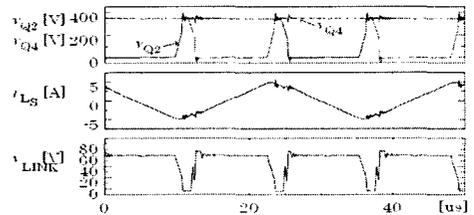


그림 5 실험결과 파형(무부하)  
Fig. 5 Experimental result waveforms (no-load)

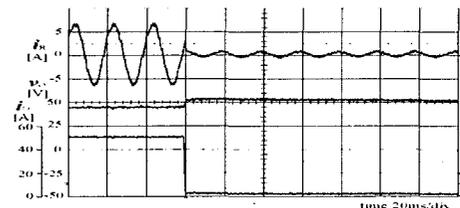


그림 6 부하변동시의 응답 파형  
(부하전류 50(A)⇒0(A))  
Fig. 6 Transient waveforms of charge load  
(load current 50(A) to 0(A))

그림 8은 부하 전류에 대한 실측 변환 효율과 변환 손실의 부하 특성을 나타낸 것이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 제안한 전력변환의 전 손실은 출력 전력에 대하여 증가되며, DC-DC컨버터의 최대효율은 97.5[%]를 달성하고 있다.

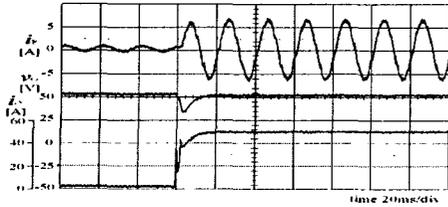


그림 7 부하변동시의 응답 파형  
(부하전류 0(A)⇒50(A))

Fig. 7 Transient waveforms of charge load  
(load current 0(A) to 50(A))

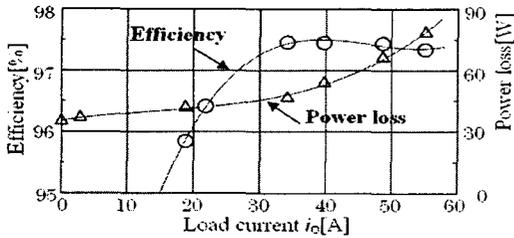


그림 8 부하 전류에 따른 효율과 손실  
Fig. 8 Efficiency and power loss characteristics  
with load current

#### 4. 결론

제안한 회로는 기존의 동기 정류 방식을 이용한 고주파 절연형 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터에 고주파 절연 변압기의 2차측에 동기 정류용 전력용 액티브 스위치를 부가한 회로이다. 이 부가된 스위치의 온-오프 작용에 의해서 주 스위치의 턴-오프 전류가 상승하며, 무손실 커패시터의 충·방전 동작을 완전하게 시킬 수 있다. 그리고 제안한 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터 회로의 동작 원리와 특징을 기존의 방식 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터와 비교한 결과 제안한 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터 회로는 무부하로부터 정격 부하에 걸치는 넓은 부하 범위에서 영전압 소프트 스위칭(ZVS)을 실현할 수 있다. 또, 기존의 연속 공진전류 전류(轉流)방식의 영전류 소프트 스위칭 PWM 제어 DC-DC 컨버터 방식에 비해 전력용 반도체 스위칭 소자나 고주파 변압기 코일의 피크 전류가 적기 때문에 전체적인 도통 손실의 저감 및 온-오프 기능부 동기 정류 효과나 필터 인덕턴스의 저감 효과가 더해진다. 그리고 97.5[%]의 극히 높은 전력변환 효율을 얻을 수 있다.

이러한 결과에 의해서 제안한 소프트 스위칭 PWM DC-DC 컨버터 회로는 자동차용 42[V] 전원시스템이나 항공 우주 시스템의 전력 인터페이스 전원 등에 유용하게 적용할 수 있는 것으로 사료된다.

■ 이 논문(보고서)은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

#### 참고 문헌

- (1) 麻生 眞司, 古越 隆一, 電流共振型(SMZ方式)電源, サンケン技報, Vol.26, No.1, pp.11-22, 1993
- (2) 横山 伸明, 通信機用共振型スイッチング電源, サンケン技報, Vol.27, No.1, pp.64-69, 1994
- (3) 佐藤 伸二, 高効率DC/DCコンバータの開発, サンケン技報, Vol.32, No.1, pp.32-35, 1998
- (4) 佐藤 伸二, 高効率部分共振形DC/DCコンバータ, 日本電率協會主催第11次スイッチング電源テクニカルフォーラム, セッション2, pp.1-10, 1999
- (5) B.H Choo, D.Y Lee, S.B Yoo, D.S Hyun, A Novel Full-Bridge ZVZCS PWM DC /DC Converter with a Secondary Clamping Circuit, Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference(PESC), Vol.2, pp.936-941, 1998