

위상이동 제어 방식을 이용한 풀브리지 컨버터의 효율개선에 관한 연구

서재광* 김 용* 백수현* 권순도**
*동국대학교 **대림대학

A Study on Efficiency Improvement of F-B Converter with phase-shifted control method

Jai-Kwang Suh* Yong Kim* Soo-Hyun Baek* Soon do Kwan**
*Dongguk Univ. **Daelim College

Abstract - This paper is concerned on developing DC-DC converter. In contrast to resonant converter, this converter requires no external resonant elements and operates with constant switching frequency. In conventional PWM converter, two MOSFET switches of the converter are simultaneously turned on and turned off. In presented converter, to achieve Zero Voltage Switching, the two legs of the bridge are operated DC-DC converter is phase shifted. Phase shifted Full Bridge ZVS PWM Converter have an effect on the power system. Operation principle and features are illustrated by the experiment results from 50W, 250kHz with MOSFET switch.

1. 서 론

전력 전자 시스템은 기본적으로 반도체 스위치, 커패시터, 인덕터, 트랜스포머 및 각종 제어회로로 이루어져 있다. 이 중에서 반도체 스위치와 제어회로를 제외한 리액티브 소자 즉, 커패시터, 인덕터, 트랜스포머 등의 크기와 무게는 스위칭 주파수에 크게 의존한다⁽¹⁾. 최근 활발하게 연구되고 있는 영전류 및 영전압 스위칭 기법은 스위치에 흐르는 전류가 0이거나 스위치 양단 전압이 0일 때 스위칭함으로써 스위칭 손실을 크게 감소시킬 수 있으므로 스위칭 주파수를 높이는 것이 가능하다. 그러나 영전류 및 영전압 스위칭 컨버터는 전류나 전압 스트레스(stress)가 크고 스위칭 주파수를 가변하여 출력을 제어하여야 하며 제어회로가 복잡해지는 단점이 있다. 기존의 PWM 컨버터는 전압 및 전류 스트레스가 작고 제어가 용이한 반면에 기생요소들이 회로의 동작에 영향을 주어 효율을 감소시키며, 서지 노이즈의 증가를 초래하게 된다. 공진형 컨버터의 경우 L, C 성분이 자기 기생요소를 흡수함으로써 서지노이즈의 발생이 작아지므로 고주파수에서 동작이 가능하며 전력 밀도가 높다는 장점이 있지만 내압이 큰 스위칭소자를 사용해야 하고 제어회로가 복잡해지는 단점이 있다⁽²⁾. 이러한 단점을 개선하기 위해 본 연구에서는 위상이동 제어방식을 적용하고, MOSFET의 출력커패시턴스와 변압기의 누설인덕턴스를 공진요소로 이용하여 컨버터의 전력 밀도를 높일 수 있는 영전압 스위칭 풀브리지 PWM 컨버터를 제안하고자 한다. 또한 풀브리지 영전압 스위칭 컨버터는 고주파수에서 동작하므로 자기요소의 설계가 용이하고, 넓은 부하영역에 대해 1차측의 모든 스위치의 영전압 스위칭을 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 제안된 회로

그림 1은 제안된 영전압 스위칭 풀브리지 PWM 컨버터

를 나타낸다.

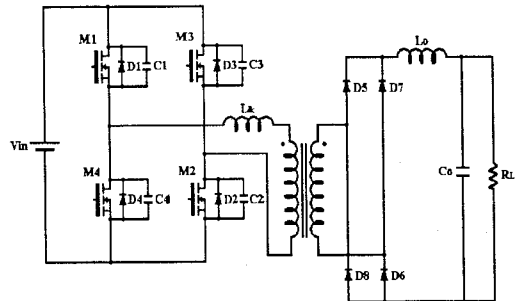


그림 1. 제안된 영전압스위칭 풀브리지 컨버터 회로

제안된 회로는 왼쪽 스위치(Left leg switch) M1, M4는 출력인덕턴스 Lo에 저장된 에너지에 의해 영전압 스위칭이 일어나고 오른쪽 스위치(Right leg switch) M2, M3는 누설인덕턴스 Llk에 저장된 에너지에 의해 영전압 스위칭이 이루어진다. 위상이동 PWM 풀브리지 컨버터는 주스위치에서 영전압 스위칭이 가능하도록 변압기의 누설인덕턴스를 결합한 방식이다. 그러나, 영전압 스위칭은 누설인덕턴스를 증가시키거나 외부에 큰 공진 인덕터를 추가하여 넓은 부하범위를 갖도록 하여야 하며 높은 입력전압과 전력밀도의 고주파 전력변환을 가능하게 하려면 1차측의 스너버회로를 제거해야 한다. 결과적으로, 이와 같이 함으로써 컨버터의 전력밀도와 효율을 개선할 수 있게 된다.

2.1.1 제안된 회로의 특징

영전압 스위칭 풀브리지 PWM 컨버터는 회로의 두 레그(Left leg switch와 Right leg switch)에 위상 지연을 두고 스위칭 소자의 내부 커패시터 및 변압기의 누설인덕턴스를 이용하여 영전압 스위칭을 하게 되며 PWM 컨버터에 비해서 RMS 전류정격이 높지만 스위칭 손실과 스트레스가 현저하게 줄어든다는 장점이 있다. 그러므로 PWM 컨버터에 비해 전력 밀도와 효율을 상승시킬 수 있다. 그러나 높은 회생에너지와 정류기에서의 기생 리잉(ringing) 현상이 발생하고 오른쪽 스위치 M3, M2에서의 영전압 스위칭 범위가 좁다는 단점이 있다. 고주파수 스위칭으로 인한 스위칭 과도상태 동안에 발생하는 스위칭 손실은 전체 시스템의 성능을 좌우하는 요인이 된다. 일반적으로 주회로에 부가적으로 스너버 회로를 추가하여 이러한 문제점을 해결한다. 그러나 스너버 회로를 사용하면 시스템 전체의 부피가 커지게 되고 스너버 회로 자체에서 손실이 발생한다. 그러므로 회로의 기생요소들(누설인덕턴스, 기생커패시턴스)을 사용하여 영전압 스위칭 동작을 확보한다. 영전압 스위칭을 확보하기 위해서는 누설인덕턴스에 축적되는 에너지가 스위치의 출력 커패시터와 변압기의 기생 커패시터보다 커야 한다. 안전한 영전압 스위칭 범위를 확보하

기 위해서는 변압기의 누설인덕턴스를 증가시키거나 변압기와 직렬로 부가적인 인덕터를 추가해야 한다⁽³⁾. 그러나 이 방법은 유효 듀티비의 손실을 초래하고 환류 에너지를 증가시켜 도통손실을 증가시키게 되므로 2차측에 클램프 회로를 추가하여 순환전류를 0으로 만들어 주어 변압기와 스위치 등에서 발생하는 도통손실을 감소시킬 수 있다.

2.2 제안된 회로의 동작원리

그림 2는 영전압 스위칭 풀브리지 PWM 컨버터의 이론적인 파형을 나타낸다.

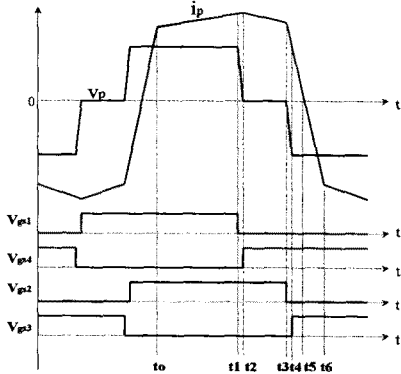


그림 2. 제안된 컨버터 회로의 이론적인 파형

V_{gs1} 과 V_{gs4} 는 왼쪽 스위치 M1, M4의 구동신호이고 V_{gs2} 와 V_{gs3} 는 오른쪽 스위치 M2, M3의 구동신호이다. 식(2.1)은 영전압 스위칭을 확보하기 위한 누설인덕턴스의 크기를 나타낸다⁽³⁾.

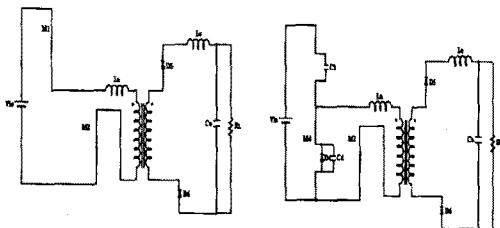
$$L_{lk} > 2 \left(\frac{4}{3} C_{ds} + \frac{1}{2} C_{TR} \right) \frac{V_i^2}{I_2^2} \quad (2.1)$$

I_2 : 그림 2의 t_5 동안 1차측에 흐르는 전류

즉 누설인덕턴스에 저장된 에너지는 스위치의 출력커패시턴스 C_{ds} 와 변압기의 권선 커패시턴스 C_{TR} 에 저장된 에너지의 합보다 커야 한다.

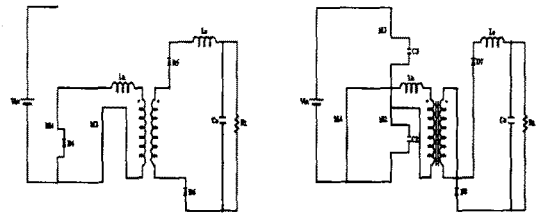
2.2.1 각 모드별 동작회로

그림 3은 각 모드별 동작회로를 나타낸다. 전압 스위칭 풀브리지 PWM 컨버터의 동작주기는 다음과 같이 6개의 모드로 구분할 수 있다. 왼쪽 스위치 M1, M4와 오른쪽 스위치 M2, M3는 교번적으로 턴온, 턴오프되고 양 쪽 스위치 사이에서 오른쪽 스위치의 위상이동 동작에 따라 컨버터의 듀티비가 결정된다.



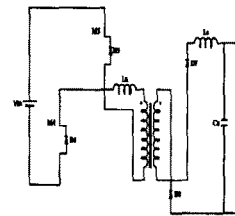
(a) 모드 1

(b) 모드 2

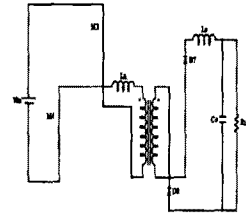


(c) 모드 3

(d) 모드 4



(e) 모드 5



(f) 모드 6

그림 3. 각 모드별 동작회로

(a) 모드 1 : 스위치 M1과 M2가 동시에 도통되는 구간이고 이때 컨버터는 전력을 부하측으로 전달하고 출력 필터 인덕터의 전류는 선형적으로 증가한다.

(b) 모드 2 : 스위치 M1이 턴오프되고 1차측으로 흐르는 전류는 스위치 M1의 출력커패시턴스 C1을 충전시키고 스위치 M4의 출력커패시턴스 C4를 방전시킨다. 공진 인덕턴스와 C1, C4가 공진하여 M1의 출력커패시턴스 전압 V_{c1} 을 상승시킨다. V_{c1} 이 입력전압과 같아지면 스위치 M4의 내장 다이오드 D4가 도통하기 시작한다.

(c) 모드 3 : 입력 전압이 출력단과 분리되는 프리윙링 구간이다. D4가 도통하고 있을 때 스위치 M4를 턴온시키면 M4의 영전압 스위칭이 가능하다. 1차측 전류는 스위치 M4의 내장 다이오드 D4와 M2를 통해 순환하게 된다. 스위치 M2가 오프하면 이 모드가 종료된다.

(d) 모드 4 : 이 모드에서는 누설인덕턴스와 스위치 M2, M3의 출력커패시턴스 C2, C3가 공진하여 스위치 M3의 출력커패시턴스의 양단전압 V_{c3} 를 강하시킨다. 즉, 누설인덕턴스에 저장된 에너지가 C2를 충전시키고 C3를 방전시킨다. 이 구간에서는 누설인덕턴스에 저장된 에너지만으로 M3의 출력커패시턴스 전압 V_{c3} 를 감소시킬 수 있을 만큼 커야 한다. 이 구간에서는 V_{c3} 가 0이 되어 D3가 도통하기 시작하면 종료된다.

(e) 모드 5 : 이 모드는 D3, D4가 도통하는 구간이다. V_{c3} 가 0이 되어 M3를 턴온하면 영전압 스위칭이 이루어진다.

(f) 모드 6 : 변압기 1차측 전류가 0이 된 이후에 이미 턴오프되어 있는 스위치 M3와 M4를 통해 부(negative)의 값으로 감소하기 시작하는 구간이다.

2.3 변압기 권선수

본 논문에서는 Magnetics사의 PQ코어 중에서 스위칭 주파수와 power handling을 고려하여 42016-UG를 사용하였다. 변압기의 1차측 권선수는 파라데이의 법칙으로부터 유도되고 식(2.2)와 같이 표현된다.

$$N_p = \frac{V_p \times 10^4}{K_f B_m A_c f} \quad (2.2)$$

Kf : 파형 계수, Bm : 자속밀도, Ac : 코어 단면적,

고주파 변압기 1차측 권선수는 식(2.2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다⁽⁴⁾.

$$N_p = \frac{50 \times 10^4}{4.0 \times 0.5 \times 0.62 \times 250 \times 10^3} = 1.613 \text{ [turns]}$$

변압기 1차측 권선수는 16턴으로 하였고 변압기의 2차측 권선수는 식(2.3)을 이용하여 구한다.

$$N_s = N_p \times \left(\frac{V_s}{V_p} \right) \quad (2.3)$$

$$N_s = 1.613 \times \left(\frac{5}{50} \right) = 0.1613 \text{ [turns]}$$

변압기의 2차측 권선수는 2턴으로 하였다.

2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션은 출력전압 5V, 출력전류 10A로 행하여 93%의 효율을 얻을 수 있었다. 하드웨어 제작은 50W, 10A, 스위칭 주파수 250kHz로 하였다.

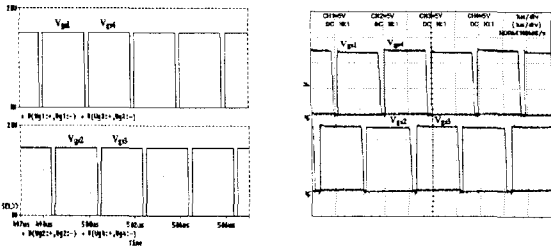


그림 4. 스위치 구동신호 파형

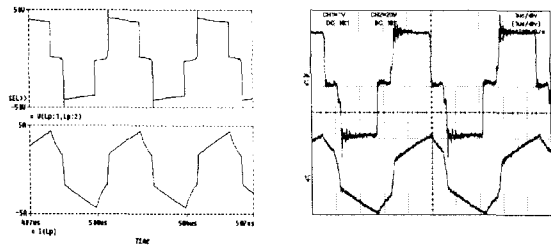


그림 5. 변압기 1차측 전압과 전류 파형

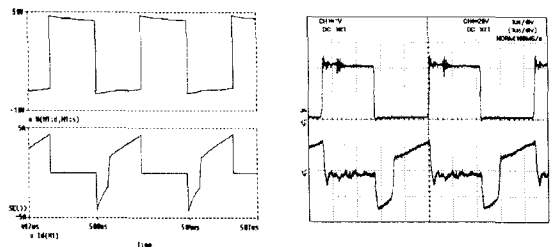


그림 6. 스위치 M1의 전압과 전류 파형

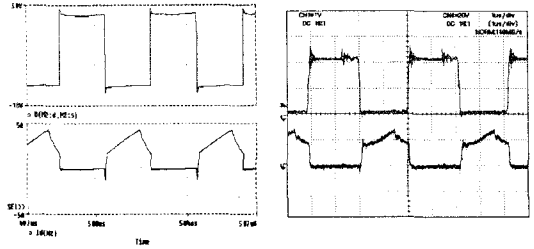


그림 7. 스위치 M2의 전압과 전류 파형

그림 4는 제안된 회로의 MOSFET 스위치의 구동 신호를 나타내며 오른쪽 스위치 M2, M3의 구동신호 Vgs2와 Vgs3가 왼쪽 스위치 M1, M4의 구동신호 Vgs1과 Vgs4를 기준으로 위상이 이동됨을 확인할 수 있다. 그림 5는 고주파 변압기의 1차측 전압 Vp와 전류 Ip의 파형으로 스위치 M1과 M2가 턴온될 때 변압기 1차측 전류의 기울기가 상승되고 영전압 스위칭 PWM 풀브리지 컨버터의 이론적인 파형과 거의 일치됨을 확인할 수 있다. 그림 6는 스위치 M1의 드레인과 소오스간의 전압 Vds1과 전류 Ids1을 나타내며 그림 7은 왼쪽 스위치 M2의 양단 전압 Vds2와 전류 Ids2의 파형을 나타낸다.

3. 결 론

제안된 풀브리지 ZVS PWM 컨버터의 모드별 동작원리를 해석하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 위상이동 제어용 집적회로인 UC3875를 사용하여 진상 스위치를 기준으로 지상 스위치의 위상을 이동시켜 부하범위의 변동에 따른 출력전압을 제어하고 영전압 스위칭 동작영역을 확보하기 위해 고주파 변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하지 않고 변압기 설계시에 누설인덕터의 크기만을 조정함으로 고주파 변압기의 2차측 전압 이용률을 향상시켰다. 전부하일 때 시스템의 효율이 90%가 되었다. 또한 효율과 전력밀도가 높은 대용량 컨버터의 개발에 대한 가능성을 보여주었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Gaoqiang Li, Yong Kang, and Jian Chen, " A Novel Phase-shifted PWM Converter", IPEMC 1997
- [2] Xinbo Ruan, Yangguang Yan, "An Improved Phase-Shifted Zero-Voltage and Zero-Current Switching PWM Converter, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'98, pp. 811-815
- [3] J.G. Cho, J.A.Sabate, G.Haa, and F.C.Lee, "Zero-Voltage and Zero-Current-Switching Full Bridge PWM Converter for High Power Applications", Power Electronics Specialist Conference, 1994, pp. 95-101
- [4] 정보기술 연구소, " 트랜스포머 및 인덕터 설계 기술", pp. 64-86