

교번으로 동작하는 포워드 영전압 스위칭 다중 공진형 컨버터

오덕진*, 황치면*, 김창선**, 김희준*

*한양대학교 전기공학과 **목포대학교 전기공학과

Alternated Forward ZVS Multi-Resonant Converter

Deog-Jin Oh*, Chi-Meon Hwang*, Chang-sun Kim**, Hee-Jun Kim*

*Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ. **Dept. of Electrical Eng., Mokpo National Univ.

Abstract

In this paper, we proposed the alternated forward zero voltage switching multi-resonant converter (AT Forward ZVS MRC). The AT forward ZVS MRC has similar characteristics with clamp mode forward ZVS MRC. So it can reduce the voltage stress to two or three times a input voltage and also provides a high power density[W/inch²]. The proposed converter type is verified through the experimental converter with 48V input voltage, 5V/50W output voltage/power. The measured maximum voltage stress is 170V of 2.9 times the input voltage and the maximum efficiency of 81.66% is measured.

하며, 이로 인해 소형화에 지표가 되는 높은 전력밀도[W/inch²]를 기대할 수 있게 되었다[2]. 그러나 공진 현상으로 인한 스위치 양단의 높은 전압 스트레스는 입력 전압의 4~5배 정도로 스위치의 정격을 높이는 결과를 초래하며, 이로 인한 스위치의 온-저항의 증가로 전도 손실이 증가하는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 클램프 모드 다중 공진형 컨버터가 제안되기도 하였다[3][4].

본 논문에서는 공진 전압 스트레스를 줄일 수 있는 AT 포워드 영전압 스위칭 다중 공진형 컨버터를 제안하였다. 입력 전압을 두 개의 입력 필터 커패시터를 이용하여 양분함으로써 공진 전압 스트레스를 입력 전압의 2~3배 정도로 줄일 수 있다. 또한 공진 현상으로 인해 에너지가 입력측에 회생되고 변압기 2차측 커패시터를 통해 변압기의 자동 리셋을 제공한다. 입력 48V, 출력 5V, 50W의 실험을 통하여 본 회로의 타당성을 입증하였다. 측정된 최대 전압 스트레스는 입력 전압이 58V일 때 170V이고 최대 효율은 입력 전압이 38V일 때 81.66%로 측정되었다.

1. 서론

고효율을 실현할 수 있고 고주파 스위칭 응용이 가능한 포워드 영전압 스위칭 다중 공진형 컨버터(Forward Zero Voltage Switching Multi-Resonant Converter : Forward ZVS MRC)는 기존의 하드 스위칭 되는 PWM(Pulse Width Modulation) 스위치에 직렬로 인덕터와 병렬로 커패시터를 연결하고, 수동 스위치인 정류 다이오드에 병렬로 커패시터를 연결한 다중 공진 스위치를 이용하여 구성된다[1]. 이러한 회로 구조는 스위치에 존재하는 기생 리액턴스 성분인 접합 커패시턴스와 변압기에 존재하는 누설 인덕턴스 등을 회로에 흡수시킴으로써 기생 발진을 일으키지 않고 회로에 이용이 가능하다. 그 결과, PWM 컨버터에 비해 다중 공진형 컨버터는 높은 효율을 갖고도 수 MHz 대의 고주파에서 동작이 가능

2. 교번으로 동작하는 포워드 다중 공진형 컨버터

교번으로 동작하는 포워드 다중 공진형 컨버터(Alternated Forward Zero Voltage Switching Multi-Resonant Converter : AT Forward ZVS MRC)는 기생 리액턴스 성분을 공진 회로에 흡수함으로써 수 MHz 대의 고주파 스위칭이 가능하기 때문에 높은 전력 밀도를 갖는 온-보드 형태로 분배 전원 시스템의 부하 컨버터 모듈로 이용이 가능하다. 그리고 공진 전압 스트레스가 입력 전압의 2~3배 정도로 줄어들어 오프라인 전원 방식의 응용 또한 가능하다.

그림 1의 제안된 컨버터는 교번으로 동작시키기 위해 변압기 1차측은 직렬 형태로 구성되며, 두개의 입력 필터 커패시터(C_{S1} , C_{S2})에 의해 변압기 1차측의 입력 전압이 양분된다. 이 커패시터 양단에 나타나는 전압이 공진에 이용되는 전압원이 되므로 공진 전압 스트레스는 입력 전압의 2~3배 정도가 된다. 입력 측에 구성된 두 개의 다중 공진 스위치는 공진 인덕터(L_{R1} , L_{R2})와 공진 커패시터(C_{R1} , C_{R2}) 그리고 스위치(Q_1 , Q_2)로 구성이 된다. 이 두 개의 스위치는 교번으로 동작하기 때문에 변압기 2차측 커패시터(C_D)에 걸리는 전압의 주파수는 1차측의 2배가 된다. 반파 정류회로를 구성하고 있는 다이오드 (D_{F1} , D_{F2})는 C_D 에 걸리는 전압의 극성에 따라 온,오프가 된다.

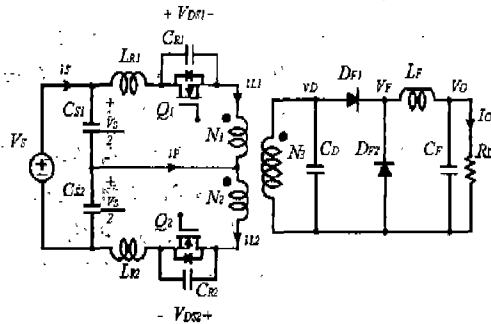


그림 1. AT 포워드 다중 공진형 컨버터

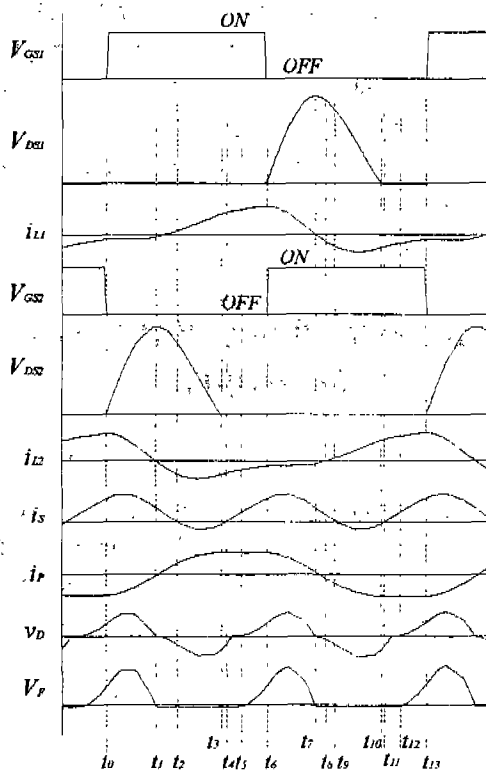


그림 2. AT 포워드 다중공진형 컨버터의 이론적인 파형

클램프 모드 다중 공진형 컨버터와 비교하면 전압 스트레스에 있어서 비슷한 특성을 나타내며, 제어 회로에 있어서 교번으로 동작하는 스위치의 데드 타임만을 조정하면 되기 때문에 일반적인 다중 공진형 컨버터와 유사하게 제어 회로가 간단하다.

그림 2는 AT Forward ZVS MRC의 이론적인 파형을 나타낸다. V_{GS1} 과 V_{GS2} 는 스위치 Q_1 , Q_2 의 구동 파형을 나타내고, i_{L1} 과 i_{L2} 는 공진 인덕터에 흐르는 전류를 나타내며, 스위치가 오프 상태일 때 스위치에 걸리는 V_{DS1} , V_{DS2} 는 공진 전압 파형으로 나타난다. i_S 는 컨버터의 입력 전류를 나타내며, i_F 는 변압기를 통하여 흐르는 전류를 나타낸다.

3. 실험 및 고찰

제안된 컨버터의 정격 입력은 48V이고 출력은 5V/50W이다. 컨버터는 주파수 가변 제어 방식으로 제어되기 때문에 최소, 최대 주파수가 존재하며 변압기 2차측 동작 주파수는 1MHz에서 2MHz가 된다. 그리고 두 개의 스위치가 교번으로 동작하기 때문에 데드 타임을 갖고 시비율은 0.45에서 0.48로 고정되어 동작한다. 그림 3은 AT Forward ZVS MRC의 제어 블록도를 나타낸다. 제어 회로는 오차 증폭기와 주파수 가변 발진기 그리고 구동 회로로 구성되어 있다. 오차 증폭기는 컨버터의 출력 전압을 검출하여 기준 전압과 비교하며 그 오차분 만큼이 가변 주파수 발진기의 주파수를 가변한다. 가변 주파수 발진기는 시비율과 최대, 최소 주파수를 결정할 수 있으며 온 타임과 오프 타임이 동시에 가변되면서 주파수가 가변된다. 데드 타임은 one-shot 발진기에서 결정되며 구동 회로를 통해 스위치 Q_1 및 Q_2 가 구동된다. 표 1은 실험에 사용된 소자들의 값과 종류를 정리하였다. 여기서 T 는 변압기를 나타내고 N_1 , N_2 는 변압기 1차측 권수, N_3 는 2차측 권수를 각각 나타낸다.

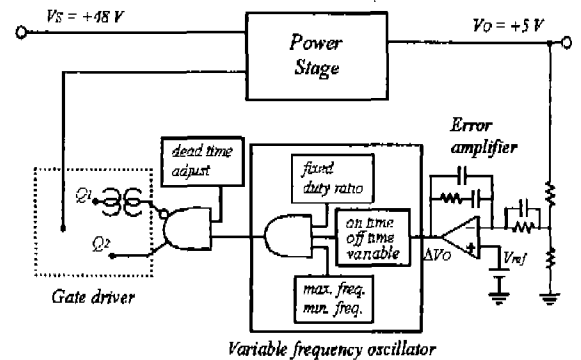


그림 3. AT 포워드 다중공진형 컨버터의 제어블럭도

표 1. 실험에 사용된 소자

Circuit parameter		Component value
Primary switch(Q_1, Q_2)		IRF640
T	Core	Mn-Zn ferrite core
	Turns ratio(N)	1.5
	N_1, N_2	3 Ts, USTC
	N_3	2 Ts, Cu foil
	Leakage inductance	520 nH (500KHz) 490 nH (1MHz)
Resonant inductor(L_{R1}, L_{R2})	3 μ H	
Resonant capacitor(C_{R1}, C_{R2})	5.7 nF	
Rectifiers(D_{F1}, D_{F2})	60CNQ035	
Input filter cap.(C_{S1}, C_{S2})	22 μ F	
Output filter cap.(C_F)	22 μ F	
Output filter ind.(L_F)	24 μ H	

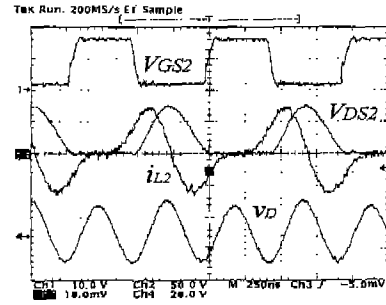
그림 4와 그림 5는 제안된 컨버터에 있어서 각각 정격 입력일 때 경부하와 중부하에서의 실험 파형을 나타낸다. V_{GS2} 는 스위치 Q_2 의 구동파형을 나타내고 V_{DS2} 는 드레인-소스 사이의 공진 전압 파형을 나타낸다. 영전압에 도달한 후 스위치가 온이 되어 영전압 스위칭이 이루어지는 것을 관찰할 수 있다. i_{L2} 는 공진 인덕터를 통하여 흐르는 전류를 나타내며, v_D 는 변압기 2차측 공진 커패시터에 걸리는 전압으로 변압기 1차측 스위칭 주파수의 2 배임을 알 수 있고 교류 전압 형태로 변압기의 자동 리셋트가 됨을 알 수 있다. 그리고 i_P 는 변압기를 통하는 전류로 스위치 Q_1, Q_2 의 공진에 관여하는 전류로서 가감하여 영전류로 도달할 때 각각 Q_1, Q_2 의 공진 전압은 최대 값에 도달하는 것을 알 수 있다. 스위칭 주파수는 500KHz에서 1MHz까지 동작하고 있고 변압기 2차측은 1MHz에서 2MHz까지 동작하는 것을 확인할 수 있다. 경부하일 때 공진 전압 스트레스는 75V, 중부하일 때는 140V로 입력 전압의 약 2.9배 정도임을 알 수 있다.

그림6은 컨버터가 개루프일 때 부하 전류에 대한 출력 전압 특성을 나타낸다. 특성 곡선에서 C_N 은 C_D 의 변화에 따른 특성을 나타내며, 변압기 1차측 공진 커패시터와 2차측 공진 커패시터의 비로서 정의된다. 따라서 C_N 은 정규화된 값으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있고 N 은 변압기의 권수비를 나타낸다. 또한 f_N 은 스위칭 주파수 f_s 와 식(3)의 공진 주파수 f_0 의 비로 정규화시켜 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

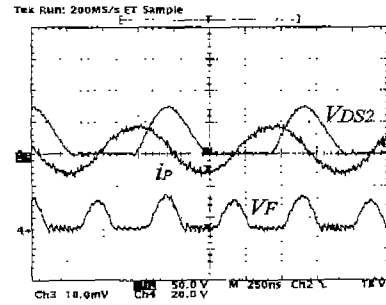
$$C_N = \frac{C_D}{N^2 C_R} \quad (C_R = C_{R1} = C_{R2}) \quad (1)$$

$$f_N = \frac{f_s}{f_0} \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} \quad (L_R = L_{R1} = L_{R2}) \quad (3)$$

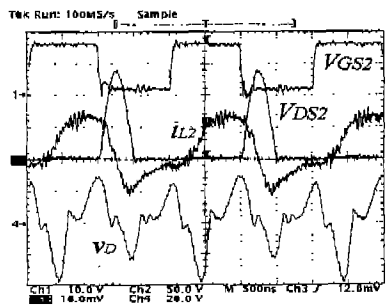


(a) V_{GS2} (10V/div), V_{DS2} (50V/div), i_{L2} (2A/div), v_D (20V/div)

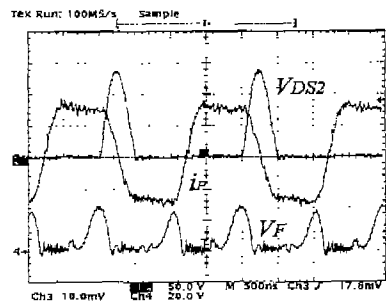


(b) V_{DS2} (50V/div), i_P (2A/div), V_F (20V/div)

그림 4. 정격 입력, 경부하일 때의 각 부분의 실험파형 ($V_S=48.1V, V_O/I_O=5.07V/0.5A$)



(a) V_{GS2} (10V/div), V_{DS2} (50V/div), i_{L2} (5A/div), v_D (20V/div)



(b) V_{DS2} (50V/div), i_P (5A/div), V_F (20V/div)

그림 5. 정격 입력, 중부하일 때의 각 부분의 실험파형 ($V_S=48.1V, V_O/I_O=5.07V/10A$)

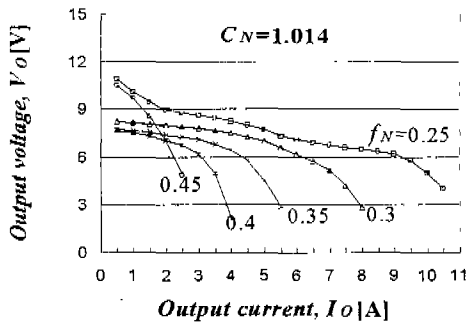


그림 6. 부하 전류에 대한 출력 전압 특성($C_D=13nF$)

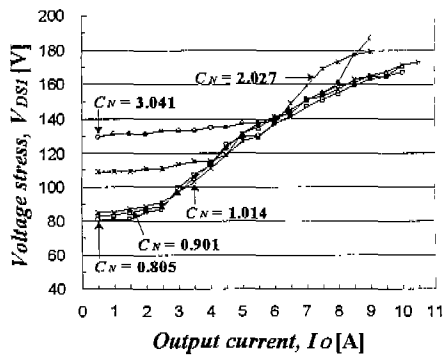


그림 7. 부하 전류에 대한 Q_1 의 전압 스트레스

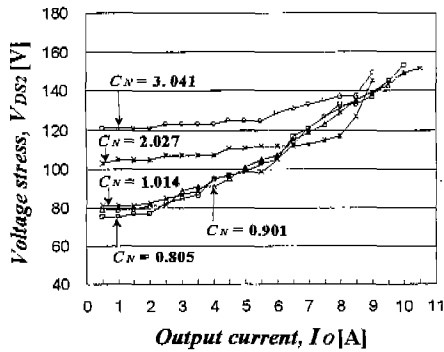


그림 8. 부하 전류에 대한 Q_2 의 전압 스트레스

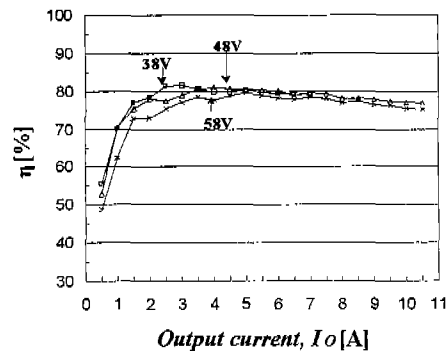


그림 9. 입력 전압에 따른 부하전류에 대한 컨버터의 효율

그림 7과 그림 8은 각기 다른 C_N 에서 부하 전류에 대한 공진 스위치, Q_1 과 Q_2 의 전압 스트레스를 나타낸다. 두 개의 스위치에 걸리는 전압 스트레스는 약 30V정도 Q_1 이 높게 나타나고 부하가 증가할수록 그리고 C_N 이 증가할수록 증가한다는 것을 알 수 있다. C_N 이 1.014인 경우 입력 전압이 58V일 때 Q_1 의 최대 전압 스트레스는 입력 전압의 2.9배인 170V로 측정되었다. 그림 13은 부하 변동에 따른 컨버터의 효율을 나타낸다. 최대 효율은 입력 전압이 38V일 때 81.66%로 측정되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 교번으로 동작하는 포워드 영전압 스위칭 다중 공진형 컨버터(Alternated Forward ZVS MRC)를 제안하였다. 제안된 컨버터는 입력 전압을 입력 필터 커패시터를 이용하여 양분함으로써 공진 전압 스트레스도 입력 전압의 2~3배로 줄어든다. 입력 48V, 출력 5V/50W 정격의 컨버터를 제작, 실험하여 그 타당성을 입증하였다. 실험을 통하여 컨버터의 개루프 출력은 C_N 과 스위칭 주파수에 따라 반비례하고, 부하 변동에 따른 출력 전압 변동률이 적음을 확인하였다. 그리고 폐루프 특성에서 입력 전압 58V에서 최대 전압 스트레스는 입력 전압의 2.9배인 170V로 측정되었고 최대 효율은 81.66%로 측정되었다.

참고 문헌

- [1] K. H. Liu, R. Oruganti, F. C. Lee, "Resonant switch Topologies and characteristics", IEEE PESC, pp.106-116, 1985.
- [2] W. A. Tabisz, F. C. Lee, "Zero voltage switching multi - resonant technique - A novel approach to improved performance of high frequency quasi - resonant converters", IEEE PESC, pp.9-17,1988.
- [3] H. J. Kim, C. S. Kim, S. H. Lee, I. H. Lee., "A development of the 2MHz clamp mode forward ZVS MRC on board power module for telecommunication application", IEEE INTELEC, pp.321-325, Sep., 1993.
- [4] H. J. Kim, C. S. Leu, R. Farrington, F. C. Lee, "Clamp Mode Zero voltage switched Multi Resonant Converters", IEEE PESC, pp.78-84, 1992.