

낮은 커플링 변압기를 갖는 개선된 고효율 공진 컨버터

공영수, 김은수, 양승철, 박진영, 김종무*, 강도현*, 조정구**
 전주대학교, 전기연구원*, 그린파워(주)**

An improved high efficiency resonant converter with low coupling transformer

Y.S. Kong, E.S. Kim, S.C. Yang, J.Y. Park, J.M. Kim*, D.H. Kang*
 Jeonju University, KERI*, Green Power Co.,Ltd**

Abstract - The high frequency series resonant converter has been widely used for the non-contact power supply system with the large air gap and the increased leakage inductance of the non-contact transformer. However, the high frequency series resonant converter has the disadvantages of high voltage gain characteristics in the overall load range due to the large air gap and the circulating magnetizing current. In this paper, unit voltage gain is revealed in the proposed three-level series-parallel resonant converter. The results are verified on the simulation results and the 5kW experimental prototype.

1. 서 론

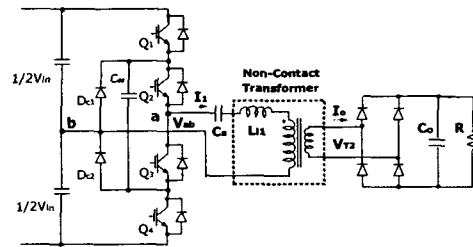
본 논문에서 적용하고 있는 비접촉 전원은 변압기 1차측 권선 길이가 3m 로 누설인덕턴스가 크고, 비접촉 변압기 1차측과 2차측 사이에 큰 에어 갭을 갖고, 2차측 픽업코일은 긴 1차권선 상에 일부분만이 결합되어 있기 때문에 1차측의 에너지를 2차측으로 전달하는데 많은 어려움이 있을 뿐만 아니라, 커플링이 좋지 않아 결합계수 k 가 작다. 또한 비접촉 변압기의 1차측 누설 인덕턴스는 자화 인덕턴스에 비해서 크기 때문에 1차측 전류의 많은 부분이 자화 인덕턴스를 통해서 흐르게 된다 [3][4]. 이러한 자화 인덕턴스를 통해서 흐르는 많은 자화 전류는 비접촉 전원에서 큰 손실 특성을 가진다. 이처럼 1차측의 에너지를 2차측으로 전달하는 문제점을 극복하기 위해 일반적으로 직렬공진 컨버터가 주로 적용되어 왔다. 그러나 직렬공진 컨버터는 부하에 따른 큰 전압이득 특성 및 1차측 전압과 전류를 동상으로 제어할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 직렬공진 컨버터의 문제점을 개선하기 위해 Three-level 직·병렬공진 컨버터를 제안하고, 전압 이득에 대한 시뮬레이션을 바탕으로, 5kW 용량의 시제품을 실험한 결과에 대해서 서술하고자 한다.

2. 직렬공진 컨버터와 직·병렬공진 컨버터의 전압이득 특성

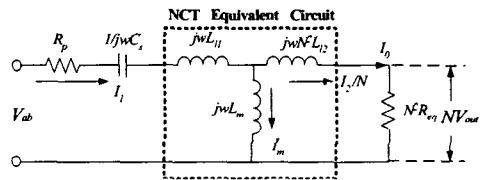
2.1 직렬공진 컨버터

그림1은 비접촉 변압기를 적용한 Three-level 직렬공진 컨버터(a)와 등가회로(b)를 나타냈다. C_s 와 L_{ω} 가 함께 공진 할 때의 공진 주파수 $f_{sr} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\omega} C_s}}$ 이고, L_{ω} 는 비접촉 변압기의 2차측 권선을 단락 시키고 측정 한 등가 누설 인덕턴스이다. 그리고 비접촉 변압기 1차측에서 바라 본 2차측의 등가 부하저항과 누설인덕턴스

는 비접촉 변압기의 권선 비의 제곱에 의해 곱해진 값이고, 전류와 전압은 권선 비에 의해 곱해진 값들이다. 그리고 Three-level 직렬공진 컨버터는 소자의 ZVS를 위해 스위칭 주파수를 공진 주파수 f_{sr} 보다 높은 주파수에서 스위칭 동작을 하는 것이 좋다[1].



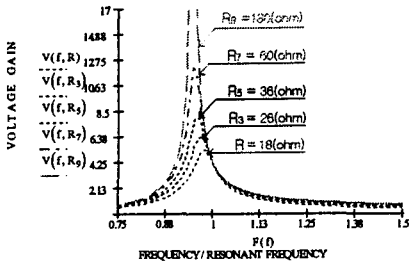
(a) Three-level 직렬공진 컨버터



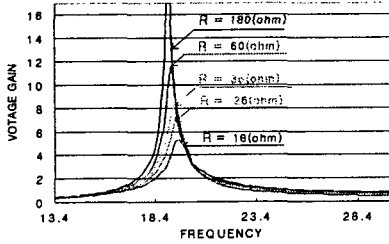
(b) 등가회로

그림1. Three-level 직렬공진 컨버터와 등가회로
 Fig.1 Three-level series resonant converter and equivalent circuit

그림1(b)는 등가회로이고 R_p, L_{l1}, L_{l2}, C_s 는 큰 에어 비접촉 변압기 1차측의 권선 저항과 누설인덕턴스 및 자화인덕턴스와 직렬 커패시터이다. 그리고 $N^2 L_{\omega}$ 와 $N^2 R_{\omega}$ 은 비접촉 변압기 1차측에서 바라본 2차측의 누설인덕턴스와 등가 부하저항이다. 그리고 등가 부하저항은 부하저항, 정류다이오드 및 필터(Filter)를 등가화한 값이다. 그림2(a)는 등가 부하저항과 스위칭 주파수 (f_s)의 변화에 따른 비접촉 변압기의 전압이득 시뮬레이션이고, 그림2(b)는 Three-level 직렬공진 컨버터의 실측한 전압이득이다. 이러한 전압 이득특성은 등가 부하저항 변화에 대한 전압이득 특성이 너무 크기 때문에 적용된 Three-level 직렬공진 컨버터에 큰 부담을 줄뿐만 아니라, Three-level 직렬공진 컨버터의 인버터 단자 전압 (V_{ab})과 전류 (I_1)가 동상이 되지 않기 때문에 큰 전압 이득에 비례해서 많은 1차측 공진 전류 (I_1)가 흐르게 된다. 또한 매우 작은 주파수 변화에 대해서 너무 큰 전압이득 변화를 나타내기 때문에 소프트 스위칭을 하기 위한 공진 주파수의 제어 조건 범위가 너무 협소하여 주파수 제어가 어려운 단점을 가지고 있다.



(a)시뮬레이션 전압이득 특성



(b)측정된 전압이득 특성

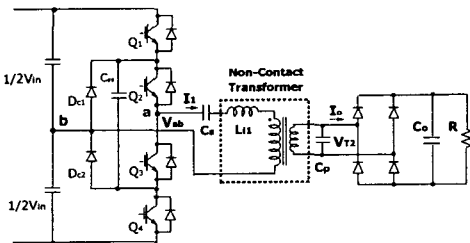
그림 2. $C_s = 0.9\mu F$, $k = 0.619$, $f_r = 20.12kHz$ 일 때의

Three-level 직렬 공진 컨버터의 전압 이득

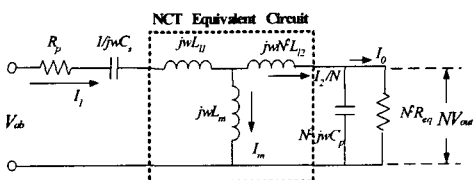
Fig.2 Voltage gain of the series resonant converter in the condition of $C_s = 0.9\mu F$, $k = 0.619$ and $f_r = 20.12kHz$

2.2 직·병렬공진 컨버터

그림1의 큰 에어 갭을 갖는 비접촉 변압기를 적용한 Three-level 직렬공진 컨버터의 등가 부하저항 변화에 대한 너무 높은 전압 이득특성과 Three-Level 직렬공진 컨버터의 인버터 단자 전압 (V_{ab})과 전류 (I_1)의 위상차 그리고 주파수 제어의 어려움 등과 같은 단점을 개선하기 위해 본 논문에서는 비접촉 변압기 2차측에 병렬 커패시터 (C_p)를 추가함으로써 Three-level 직렬공진 컨버터에서 나타난 문제점을 개선하려고 한다. 그림 3(a)은 비접촉 변압기 2차측에 병렬로 커패시터를 적용한 직·병렬공진 Three-level 컨버터와 등가회로(b)를 나타냈다.



(a)Three-level 직·병렬 공진 컨버터

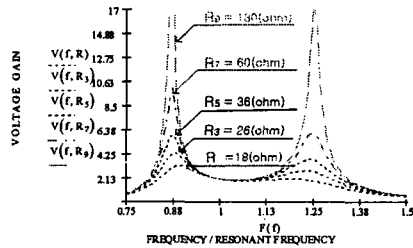


(b)등가회로

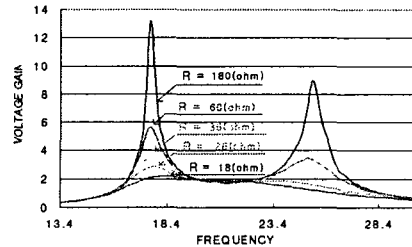
그림 3. Three-level 직·병렬 공진 컨버터와 등가회로

Fig.3 Three-level series-parallel resonant converter and equivalent circuit

그림4(a)는 비접촉 변압기 2차측에 병렬 커패시터를 추가시킨 Three-level 직·병렬공진 컨버터의 전압이득 시뮬레이션이고, 그림4(b)는 Three-level 직·병렬공진 컨버터의 실측한 전압이득이다. 실측한 그림4(b)는 전압이득 차이만 있을 뿐 시뮬레이션 결과와 동일한 형태를 따른다. 이러한 전압이득 차이는 실험 측정 오차와 소자들의 전압강하에 의해 발생하는 오차이다. 그리고 그림 4(a),(b)의 전압이득 특성곡선 결과로 Three-level 직·병렬공진 컨버터는 비접촉 변압기 2차측을 단락 시킨 등가 직렬공진 주파수와 병렬공진 주파수가 일치된 부분에서는 모든 등가 부하저항 변화에 대해서 입·출력 전압이득 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 전압 이득 특성곡선으로부터 병렬공진 주파수와 비접촉 변압기 2차측을 단락 시킨 등가 직렬공진 주파수가 일치된 부분에서 Three-level 직·병렬공진 컨버터의 인버터 단자 입력 전압 (V_{ab})과 전류 (I_1)가 모든 등가 부하저항 변화에 대해서 동상이 되는 것을 알 수 있다. 그리고 비접촉 변압기 2차측의 병렬공진에 따른 임피던스 증가에 의해 자화인덕턴스를 통해 흐르던 많은 자화전류를 줄일 수 있고, 일정동작 스위칭 주파수에서도 안정된 전압이득을 얻을 수 있다. 그러나 직렬공진 주파수와 병렬공진 주파수를 정확히 일치했을 경우 일정 주파수 제어가 너무 민감하기 때문에 안정한 동작을 얻기 위해서는 병렬공진 주파수를 직렬공진 주파수보다 높은 주파수에 위치 해야 한다.



(a)시뮬레이션 전압이득 특성



(b)측정된 전압이득 특성

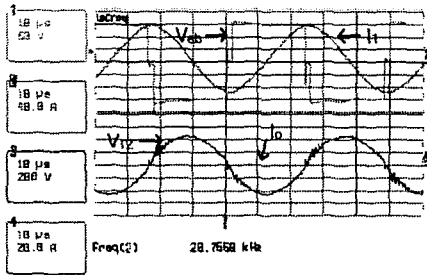
그림 4. $C_s = 0.9\mu F$, $C_p = 1.6\mu F$, $k = 0.619$ 직·병렬공진 주파수 $f_r = 21.7kHz$ 일 때 Three-level 직·병렬공진 컨버터의 전압이득

Fig.4 Voltage gain of the series parallel resonant converter voltage gain in the condition of $C_s = 0.9\mu F$, $C_p = 1.6\mu F$, $k = 0.619$ and $f_r = 21.7kHz$

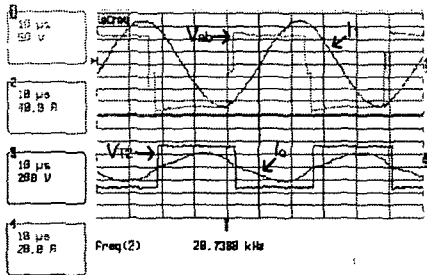
3. 실험 및 고찰

본 논문에서 비접촉 전원의 픽업코일에 사용된 코아는 페라이트 재질의 코아를 선정하여 사용하였으며 주 회로의 입력 조건은 3상의 상용 입력 전원 220VAC를 입력하여 브리지 정류회로를 거쳐서 정류된 직류전압을 Three-level 직렬공진 컨버터와 Three-level 직·병렬공진 컨버터 입력으로 받고, 일정 주파수에서 출력

5kW 대하여 실험하고 비교했다. 본 논문의 실험에 적용한 두 공진 컨버터는 같은 커플링 계수로 무부하에서 5kW 부하출력 대해 실험하였고, 1차측 스위칭 소자는 600V, 300A IGBT를 사용하였다. 그림5의 (a),(b)는 Three-level 직렬공진 컨버터의 무부하와 4.2kW의 실험결과 파형이고, 그림6의 (a),(b)는 Three-level 직·병렬공진 컨버터의 무부하와 4.6kW에 대한 실험결과 파형이다. 그림5의 Three-level 직렬공진 컨버터 실험결과 파형에서 볼 수 있듯이 무부하에서는 비접촉 변압기 1차측에 무부하 순환전류가 많이 흐른다. 반면에 그림6의 Three-level 직·병렬공진 컨버터의 실험결과 파형으로부터 무부하에서 비접촉 변압기 2차측의 병렬공진에 의한 임피던스 증가로 무부하에서 자화인덕턴스를 통해 흐르는 자화전류를 줄이기 때문에 비접촉 변압기 1차측 전류는 거의 흐르지 않는다. 또한 Three-level 직·병렬공진 컨버터는 모든 부하범위에 대해서 전압과 전류가 항상 동상이다.



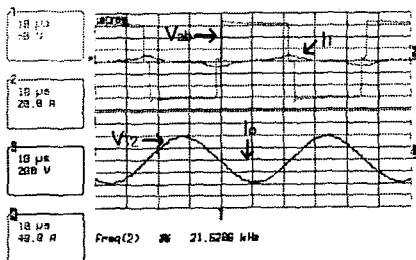
(a) Three-level 직렬공진 컨버터 (무부하)



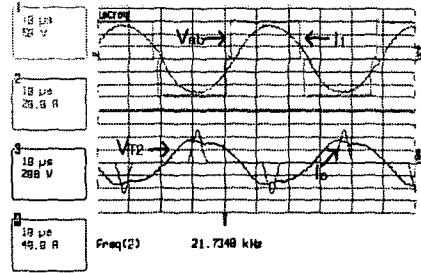
(b) Three-level 직렬공진 컨버터 (4.2kW)

그림5. Three-level 직렬공진 컨버터의 고주파 인버터 1차측 단자 전압(V_{ab}), 전류(I_1) 및 2차측 단자 전압(V_{T2}), 전류(I_o) 실험파형

Fig.5 Experimental waveforms of the terminal voltage(V_{ab}) and current(I_1) in the primary, and of the terminal voltage(V_{T2}) and current(I_o) in the secondary for high frequency inverter of three-level series resonant converter



(a) Three-level 직·병렬공진 컨버터 (무부하)



(b) Three-level 직·병렬공진 컨버터 (4.6kW)

그림6. Three-level 직·병렬공진 컨버터의 고주파 인버터 1차측 단자 전압(V_{ab}), 전류(I_1) 및 2차측 단자 전압(V_{T2}), 전류(I_o) 실험파형

Fig.6 Experimental waveform of the inverter voltage(V_{ab}) and current(I_1) in the primary, and of the inverter voltage(V_{ab}) and current(I_o) in the secondary for high frequency inverter of three-level series parallel resonant converter

3. 결 론

본 논문에서는 긴 1차측 권선 따른 누설인덕턴스와 1차측 권선과 2차측 픽업코일 사이의 넓은 에어 갭을 갖는 비접촉 변압기를 적용한 직렬공진 Three-level 컨버터와 직·병렬공진 Three-level 컨버터의 입·출력 전압 이득특성을 시뮬레이션하고, 5kW에서 두 공진 컨버터를 실험하여 비교 검토하였다. 실험결과로 직·병렬공진 Three-level 컨버터의 비접촉 변압기 2차측의 병렬공진에 의한 임피던스 증가로 자화인덕턴스에 흐르는 순환전류를 많이 줄였고, 고주파 인버터의 1차측의 전압과 전류를 항상 동상으로 일치시켰다.

(참 고 문 헌)

- Robert L. Steigerward, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.3, pp.174-182, 1988.
- A. I. Pressman, "Switching Power Supply Design", McGraw-Hill, Second Edition, 1999.
- G. B. Joung, and B. H. Cho, "An Energy Transmission System for an Artificial Heart Using Leakage Inductance Compensation of Transcutaneous Transformer", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.13, pp.1013-1022, 1998.
- C. G. Kim, D. H. Seo, J. S. You, J. H. Park, and B. H. Cho, "Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.48, pp.1238-1246, 2001.
- A. Ghahary, and B. H. Cho, "Design of a Transcutaneous Energy Transmission System Using a Series Resonant Converter", *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec.*, pp.1-8, 1990.

이 논문은 한국전기연구원의 기관고유사업의 위탁연구비 지원에 의하여 연구되었음