

## 효율 개선을 위한 직·병렬 공진컨버터 적용 비접촉 전원

공영수, 이현관, 김은수, 조정구\*, 김종무\*  
전주대학교, 그린파워(주)\*, 전기연구원\*

### Series-parallel resonant converter using a contactless power supply for the efficiency improvement

Y.S. Kong, H.K. Lee, E.S. Kim, J.G. Cho, J.M. Kim\*  
Jeonju University, Green Power Co.,Ltd\*, KERI\*

#### ABSTRACT

To improve the efficiency characteristics in the resonant converter using the contact-less power supply with the large air-gap and the long primary winding, this paper suggests the three-level series-parallel resonant converter (SPRC). The voltage gain characteristics of the proposed converter have the unit gain in a resonance frequency point of the series and parallel, and input voltage and current in the primary of SPRC are always in phase for the all equivalent load resistance because of the parallel resonant tank of the high impedance. The results are verified on the simulation based on the theoretical analysis and the 4kW experimental prototype.

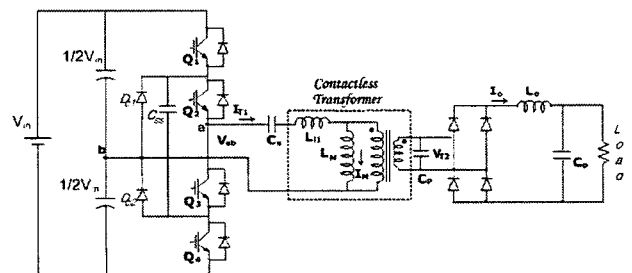
#### 1. 서 론

기존 3레벨 직렬공진 컨버터를 적용하고 있는 비접촉 전원은 변압기 1차 측 권선 길이가 3m로 누설인덕턴스가 크고, 비접촉 변압기 1차 측과 2차 측 사이에 큰 공극을 갖고, 2차 측 픽업코일은 긴 1차권선 상에 일부분만이 결합되어 있기 때문에 1차 측의 에너지를 2차 측으로 전달 하는데 많은 어려움이 있을 뿐만 아니라, 결합이 좋지 않아 결합계수  $k$ 가 작다[4]. 또한 비접촉 변압기의 1차 측 누설 인덕턴스가 자화 인덕턴스에 비해서 크기 때문에 1차 측 전류의 많은 부분이 자화 인덕턴스를 통해서 흐르게 된다[1-3]. 이러한 자화 인덕턴스를 통해서 흐르는 많은 자화 전류는 비접촉 전원에서 큰 손실 특성을 가질 뿐만 아니라 효율을 저감 시킨다. 이러한 1차 측의 에너지를 2차 측으로 전달하는 문제점과 효율을 개선하기 위해 3레벨 직·병렬공진 컨버터를 제안하고, 전압 이득에 대한 이론적인 수식과 시뮬레이션을 바탕으로, 5kW 용량의 시제품을 실험한 결과에 대해서 서술하고자 한다.

#### 2. 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 전압이득 특성

그림 1은 3레벨 직·병렬공진 컨버터(a)와 등가회로(b)를 나타냈다. 그림 1(a)의 3레벨 직·병렬 공진컨버터의 스위칭 동작은 기존 3레벨 컨버터와 같고<sup>[5]</sup>, 스위칭 주파수는 등가 직렬공진 주파수  $f_{sr} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{eq} C_s}}$  와 병렬

공진 주파수  $f_{pr} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_p C_p}}$  을 일치시킨 주파수에서 동작한다. 그리고 그림 1(b)은 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 등가회로이고,  $R_p, L_p$ 는 비접촉 변압기 1차 측의 권선에 의한 권선 저항과 누설인덕턴스,  $C_s$ 는 비접촉 변압기 1차 측의 직렬공진 커패시터,  $L_m$ 은 자화인덕턴스,  $N^2 L_b, \frac{C_p}{N^2}, N^2 R_a$ 는 권선 비를 고려하여 비접촉 변압기 1차 측에서 바라본 2차 측의 누설인덕턴스, 병렬공진 커패시터 그리고 등가 부하저항이며,  $V_{ab}, I_1, N \cdot V_{ar}, \frac{I_2}{N}$ 는 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 1차 측 전압과 전류 그리고 비접촉 변압기 1차 측에서 바라본 2차 측의 전압과 전류이고,  $I_m$ 은 자화전류이다. 또한 등가저항( $R_{eq}$ )은 3레벨 직·병렬 공진컨버터의 비접촉 변압기 2차 측의 다이오드, 커패시터, 인덕터 및 부하저항을 등가화한 값으로  $R_{eq} = \frac{\pi^2 R}{8}$  이다.



(a)

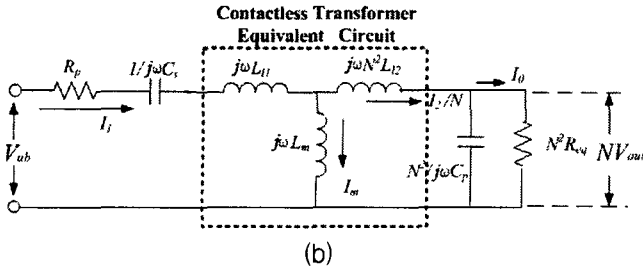


그림 1 3레벨 직병렬 공진 컨버터와 등가회로  
(a) 3레벨 직병렬 공진 컨버터  
(b) 등가회로

그림 1(b)의 등가회로에 대한 입·출력에 대한 전압이득은 (1)과 같다.

$$|V_d| = \frac{8}{N \cdot \pi^2} \cdot \frac{1}{\left| 1 + \frac{L_d}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_s} + A\alpha + jQ_s \left( \frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right) + jQ_p \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 - 1 \right|} \quad (1)$$

여기서,

$$L_{eq} = \frac{L_m \cdot L_p N^2}{L_m + L_p N^2} + L_d, \quad \alpha = \frac{1}{N^2} + \frac{L_p}{L_m}, \quad L_p = L_m + L_p N^2$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_s}}, \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{C_p L_p}}, \quad C_p = \frac{C_p}{N^2}$$

$$Q_s = \frac{\omega_s L_{eq} \alpha}{R_s}, \quad Q_p = \frac{R_s}{\omega L_m}, \quad A = \frac{R_s}{R_{eq}} + \frac{C_p}{C_s} - \omega^2 C_p L_{eq}$$

$$R_{eq} = \frac{\pi^2 R}{8}$$

그림 2(a)는 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 등가 부하저항 변화에 대한 전압이득 시뮬레이션이고, 그림 2(b)는 3레벨 직·병렬공진 컨버터를 200Hz 주파수 범위 13.4kHz~30kHz 범위에 대해서 부하저항을 가변 하여 실측한 전압이득이다. 실측한 그림 2(b)의 전압 이득은 측정 오차 차이만 있을 뿐 시뮬레이션 결과와 동일한 형태를 따른다.

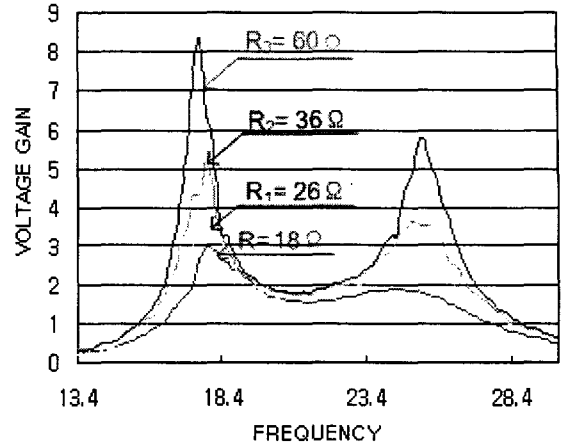
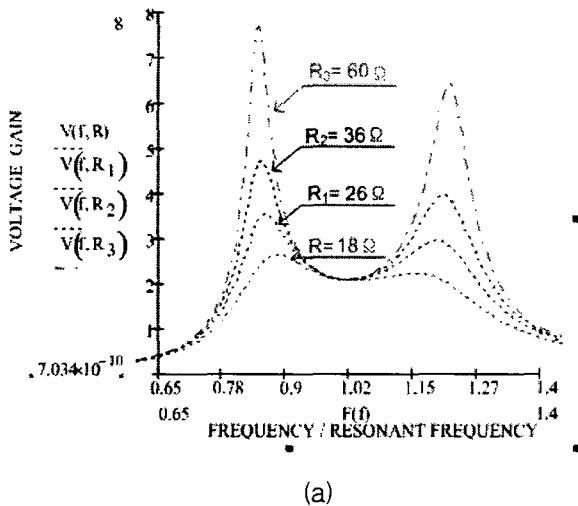


그림 2 직렬커패시터  $C_s = 0.9\mu F$ , 병렬커패시터  $C_p = 0.92\mu F$ , 결합계수  $k = 0.655$  직병렬공진 주파수  $f_r = 20.16kHz$  일 때 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 전압이득  
(a) 시뮬레이션 전압이득 특성  
(b) 측정된 전압이득 특성

이러한 전압이득 차이는 실험 측정 오차와 소자들의 전압강하에 의해 발생하는 오차이다. 그리고 3레벨 직·병렬공진 컨버터는 비접촉 변압기 2차 측을 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 비접촉 변압기 2차 측을 단락 시킨 등가 직렬공진 주파수와 병렬공진 주파수가 일치된 부분에서 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 단자 입력 전압 ( $V_{ab}$ )과 전류 ( $I_1$ )가 모든 등가 부하저항 변화에 대해서 항상 동상(In-phase)이 되는 것을 알 수 있다. 또한 큰 공극을 갖는 비접촉 변압기 2차 측의 병렬공진에 따른 임피던스 증가에 의해 자화인덕턴스를 통해 흐르는 많은 자화전류를 줄일 수 있고, 일정동작 스위칭 주파수에서도 안정된 전압이득을 얻을 수 있어서 효율특성이 개선됨을 알 수 있다. 본 논문의 비접촉 전원에 적용된 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 비접촉 변압기의 측정값들은 표. I에 나타났다.

표 I 적용한 비접촉 변압기의 측정 인덕턴스

	$L_s$	$L_p$	$L_{eq}$	$L_1$	$L_2$	$L_{Aux}$	$L_m$
측정값	63.26 $\mu H$	22.01 $\mu H$	12.58 $\mu H$	12.24 $\mu H$	2.2 $\mu H$	56.7 $\mu H$	9.77 $\mu H$

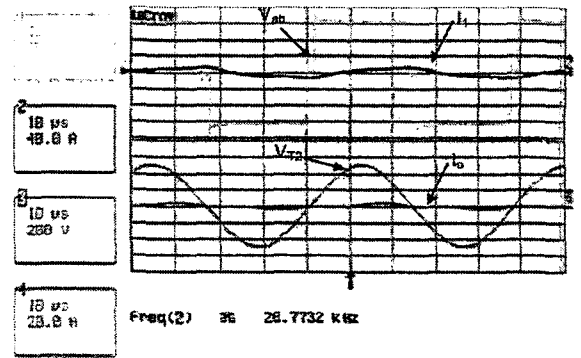
(3)은 안정된 출력전압을 얻기 위한 주파수 조건이고 (3)의 조건에 의해 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 전압 이득 특성 곡선을 그림2와 같다. 그리고 표. I 의 값과 (3)을 이용하여 안정된 출력을 위한 1차 측 직렬공진 커패시터와 2차 측 병렬공진 커패시터 값을 얻을 수 있다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}C_s}} \leq \frac{1}{\sqrt{C_p L_p}} \quad \text{--- (3)}$$

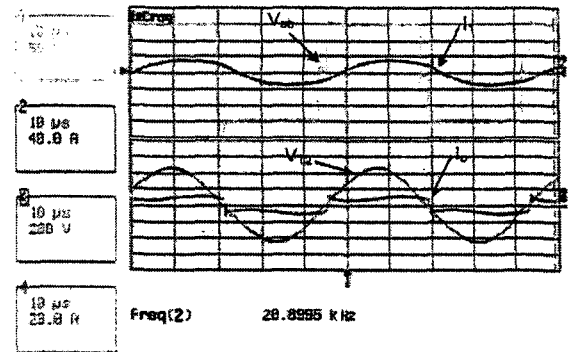
(3)에 의해 얻어진 1차 측 직렬공진 커패시터와 2차 측 병렬공진 커패시터는 각각  $0.9 \mu F$ 와  $0.92 \mu F$  이다. 그리고  $\omega_0$ 는 등가 직렬공진 주파수와 병렬공진 주파수가 일치한 주파수이거나 등가 직렬공진 주파수 ( $f_r = 20.16 kHz$ )보다 병렬공진 주파수 ( $f_r = 20.86 kHz$ )가 높은 주파수에 있어야 한다.

### 3. 실험 및 고찰

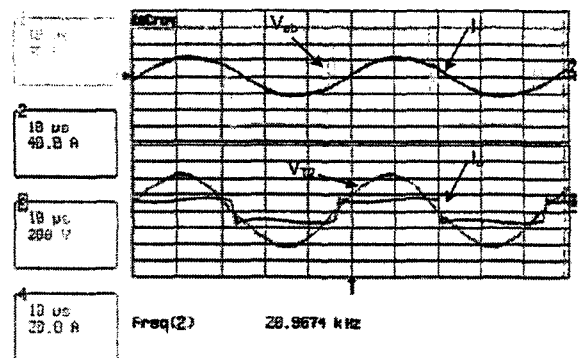
본 논문에서 비접촉 전원의 픽업코일에 사용된 코어는 페라이트 재질의 코어(EE118)를 선정하여 사용하였으며 주회로의 입력 조건은 3상의 상용 입력 전원 220VAC를 입력하여 브리지 정류회로를 거쳐서 정류된 직류전압을 3레벨 직·병렬공진 컨버터 입력으로 받고, 일정 주파수에서 출력 5kW용량에 대하여 실험하였다. 본 논문의 실험에 적용한 3레벨 직·병렬 공진컨버터는 180Ω(685W)에서 18Ω(5kW) 부하에 대해 실험하였고, 1차 측 스위칭 소자는 600V, 300A IGBT를 사용하였다. 그림 3의 (a),(b),(c)는 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 685W, 2.6kW, 4kW에 대한 각각의 실험결과 파형이다. 그림3의 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 실험결과 파형으로부터 경 부하에서도 비접촉 변압기 1차 측 순환전류는 거의 흐르지 않는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 비접촉 변압기 2차 측의 자화인덕턴스와 병렬커패시터의 병렬공진에 의한 임피던스 증가로 경 부하에서 자화인덕턴스를 통해 흐르는 자화전류를 줄이기 때문이다. 또한 3레벨 직·병렬공진 컨버터는 모든 부하범위에 대해서 전압과 전류가 항상 동상이 되는 것을 볼 수 있고, 이러한 특성에 의해서 효율 특성이 개선됨을 알 수 있다. 그림4는 일정 입력전압(300VDC)에서 부하출력 변화에 대한 출력전압 변화를 나타낸 것이다. 그림4의 출력전압은 90Ω 저항부하에서 18Ω 저항부하까지 21V의 출력전압 차이가 나타난다. 이러한 출력전압 차이는 스위칭 소자에서 발생하는 전압강하와 비접촉 변압기 1차 측의 긴 권선에 의한 권선저항에 의해서 발생하는 전압강하라는 것을 알 수 있다. 또한 그림 5는 3레벨 직·병렬 공진컨버터를 적용한 비접촉전원 시스템 사진이다.



(a)



(b)



(c)

그림 3 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 1차 측 단자 전압( $V_{ab}$ ), 전류( $I_1$ ) 및 2차 측 단자 전압( $V_{t2}$ ), 전류( $I_o$ ) 실험 파형, (50V/div., 40A/div., 200V/div., 20A/div., 10us/div.) (a) 685W, (b) 2.6kW, (c) 4kW

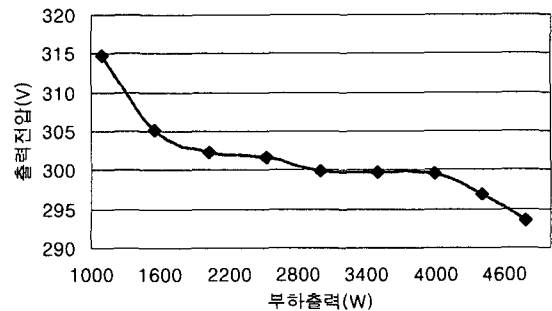


그림 4 부하출력 변화에 대한 출력전압 변동

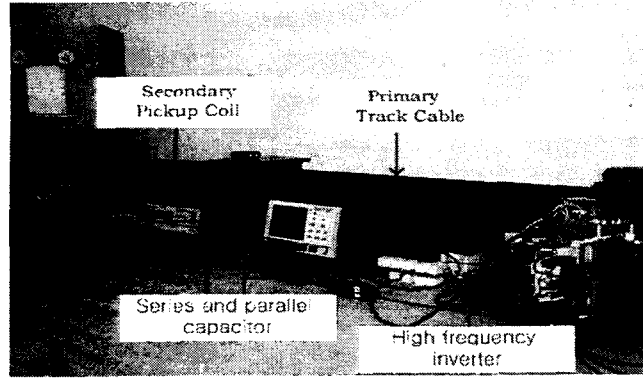


그림 5 비접촉전원 시스템

#### 4. 결 론

본 논문은 3레벨 직·병렬 공진컨버터에 대해 이론적으로 해석하였고, 해석한 이론을 바탕으로 3레벨 직·병렬 공진컨버터의 전압이득 특성에 대해 시뮬레이션을 하고 실측한 전압이득 특성을 비교하여 나타내었다. 또한 5kW 용량에 대해 실험하였으며, 그 결과를 통해 3레벨 직·병렬 공진컨버터의 단자 전압( $V_{ab}$ )과 전류( $I_1$ )는 경부하에서 중 부하까지 전 부하 범위에 대해서 항상 동상이 되는 결과를 얻었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. H. Nishimura, K. Hirachi, Y. Maejima, K. Kuwana, and M. Saito, "Characteristic of a Novel Energy Transmission For a Rechargeable Cardiac Pacemaker By Using a Resonant DC-DC Converter", in Proc. IEEE IECON'93, Vol. 2, 1993, pp.875-880.
- [2] 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, 2001.
- [3] A. Ghahary, and B. H. Cho, "Design of a Transcutaneous Energy Transmission System Using a Series Resonant Converter", in IEEE PESC, 1990, pp.1-8.
- [4] 공영수, 김은수, 양승철, 김종무, 신병철, "직·병렬 공진형 컨버터를 이용한 비접촉전원", 전력전자학회 논문지, 제9권, 제5호, 2004.10, pp. 405-412.
- [5] E.S Kim, B.Y Byun, Y.H Kim, Y.G Hong, " A Three Level ZVZCS Phase-Shifted DC/DC Converter Using A Tapped Inductor And A Snubber Capacitor", IEEE APEC, 2001.3, pp. 980-985.