

3레벨 LCLC 공진 컨버터를 적용한 비접촉 전원

이현관, 공영수, 김은수, 조정구*
 전주대학교, 그린파워(주)*

Contactless power supply using three-level LCLC resonant converter

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

ABSTRACT

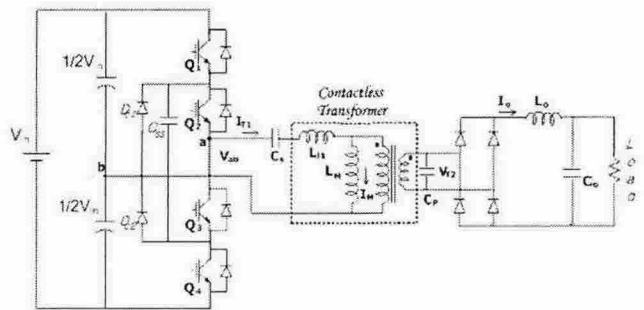
For transferring the primary power to the secondary one, the high frequency series resonant converter has been widely used for the contactless power supply system. However, the high frequency series resonant converter has the disadvantages such as the low efficiency, the high voltage gain characteristics and deviation of the phase angle in the overall load range. To improve this disadvantage, In this paper, the characteristics of the high efficiency and unit voltage gain as well as inphase are revealed in the proposed three-level LCLC (Inductor - Capacitor - Inductor - Capacitor)resonant converter. 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, 2차측 픽업 코일은 긴 1차측 권선 상에 일부 분만이 결합되어 있어 1차 측 누설 인덕턴스가 자화 인덕턴스에 비해 크므로 1차측 전류의 많은 부분이 자화 인덕턴스를 통해서 흐르게 되고 자화 인덕턴스를 통해서 흐르는 많은 자화 전류는 비접촉 전원에서 큰 손실 특성을 가질 뿐만 아니라 효율을 저감 시킨다. 또한 부하저항 변화에 대해 매우 높은 전압이득 변화가 나타나고, 주파수 제어를 위한 주파수 제어범위가 매우 협소한 특성이 있다. 이러한 3레벨 직렬공진 컨버터의 문제점과 효율을 개선하기 위해 3레벨 직·병렬공진 컨버터를 제안하고, 입력 임피던스와 전압 이득에 대한 이론적인 수식과 시뮬레이션을 바탕으로, 4kW 용량의 시제품을 실험한 결과에 대해서 서술하고자 한다.

2. 3레벨 직·병렬 공진 컨버터의 전압이득 및 입력 임피던스 특성

그림1은 3레벨 직·병렬 공진 컨버터(a)와 등가회로(b)를 나타냈다. 3레벨 직·병렬 공진 컨버터의 공진 주파수는 두가지 공진특성을 나타낸다. 저항부하가 단락일때, 직렬공진 특성을 나타내며 직렬 공진 주파수는 $f_{sr} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{eq} C_s}}$ 이고, 저항 부하가 개방일 때, 병렬공진 특성을 나타내며 병렬 공진 주파수는 $f_{pr} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_p C_p}}$ 로 나타낸다. 그리고 그림1(b)는 3레벨 직·병렬 공진 컨버터의 등가회로이고, R_p, L_d 는 비접촉 변압기 1차 측의 긴 권선에 의한 권선 저항과 누설인덕턴스, C_s 는 비접촉 변압기 1차 측의 직렬공진 커패시터, L_m 은 자화인덕턴스, $N^2 L_s, \frac{C_p}{N^2}, N^2 R_{eq}$ 는 권선 비를 고려하여 비접촉 변압기 1차 측에서 바라본 2차 측의 누설인덕턴스, 병렬공진 커패시터 그리고 등가 부하저항이며, $V_{ab}, I_1, N \cdot V_{out}, \frac{I_2}{N}$ 는 3레벨 직·병렬 공진 컨버터의 1차 측 전압과 전류 그리고 비접촉 변압기 1차 측에서 바라 본 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)

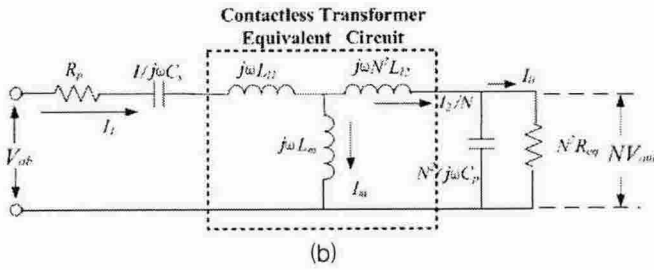


그림 1. 3레벨 직·병렬 공진 컨버터 주회로와 등가회로
 (a) 3레벨 직·병렬 공진 컨버터의 주회로
 (b) 등가회로

그림 1(b)의 등가회로에 대한 입력 임피던스 크기는 식(1)과 같고, 입·출력에 대한 전압이득은 식(2)와 같다.

$$|Z_{in}| = \left| \frac{1 + \frac{L_p}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_s} + A\alpha + jQ_s \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right) + jQ_p \left\{ \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 - 1 \right\}}{\frac{\alpha}{R_{eq}} + j \frac{1}{\omega L_m} \left\{ \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 - 1 \right\}} \right| \quad (1)$$

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

여기서,

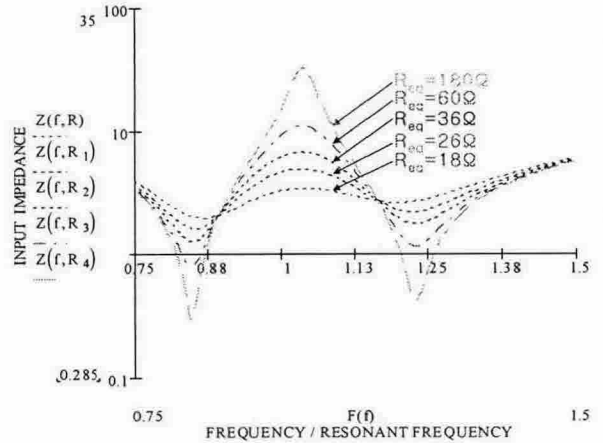
$$L_{eq} = \frac{L_m \cdot L_p N^2}{L_m + L_p N^2} + L_p, \quad \alpha = \frac{1}{N^2} + \frac{L_p}{L_m}, \quad L_p = L_m + L_p N^2$$

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

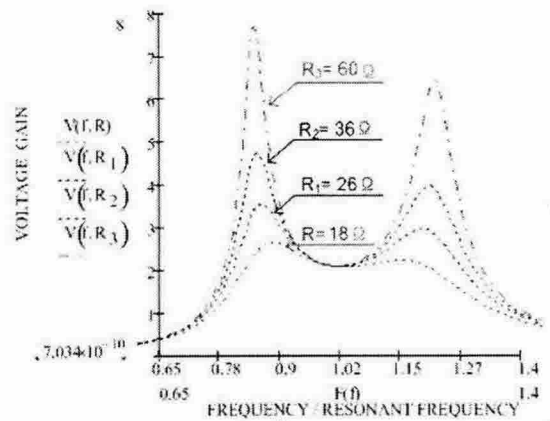
$$Q_s = \frac{\omega_s L_{eq} \alpha}{R_{eq}}, \quad Q_p = \frac{R_s}{\omega L_m}, \quad A = \frac{R_s}{R_{eq}} + \frac{C_p}{C_s} - \omega^2 C_p L_{eq}$$

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

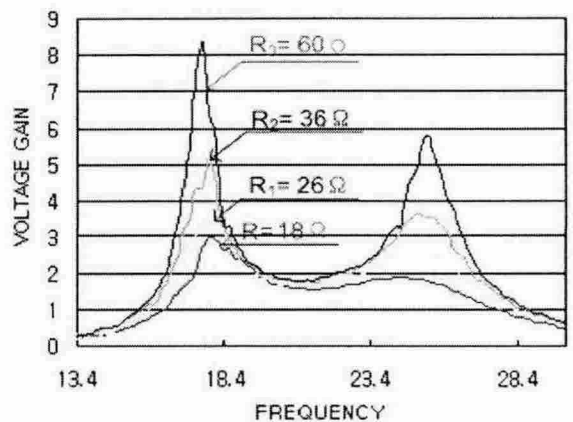
그림 2(a)는 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 등가 저항 변화에 대한 입력 임피던스 시뮬레이션이다. 입력 임피던스의 크기는 등가저항의 크기가 증가함에 따라 표준화된 공진 주파수 ($F(f)=1$)에서 입력 임피던스의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 2(b)는 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 등가 부하 저항 변화에 대한 전압이득 시뮬레이션이고, 그림 2(c)는 3레벨 직·병렬공진 컨버터를 200Hz 주파수 범위로 13.4kHz~30kHz 범위에 대해서 부하저항을 가변 하여 실측한 전압이득이다. 실측한 그림 2(c)의 전압 이득은 측정오차 차이만 있을 뿐 시뮬레이션 결과와 동일한 형태를 따른다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 직렬커패시터 $C_s = 0.9\mu F$, 병렬커패시터 $C_p = 0.92\mu F$, 직·병렬공진 주파수 $f_r = 20.16kHz$ 일 때 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 전압이득
 (a) 시뮬레이션 입력 임피던스 크기 특성
 (b) 시뮬레이션 전압이득 특성
 (c) 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 그림2(a)에서와 같이 표준화된 공진 주파수에서 등가 저항이 증가함에 따라 입력 임피던스가 증가하여 무부하 또는 경부하시에 자화 인덕턴스를 통해 흐르는 순환전류를 줄일 수 있고 일정동작 스위칭 주파수에서도 안정된 전압이득을 얻을 수 있어 효율특성이 개선됨을 알 수 있다. 본 논문의 비접촉 전원에 적용된 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 비접촉 변압기의 측정값들은 표. 1에 나타났다.

표. 1 적용한 비접촉 변압기의 측정 인덕턴스

	L_s	L_p	L_{eq}	L_{L1}	L_{L2}	L_{Aux}	L_m
측정값	63.26	22.01	12.58	12.24	2.2	56.7	9.77
	μH	μH	μH	μH	μH	μH	μH

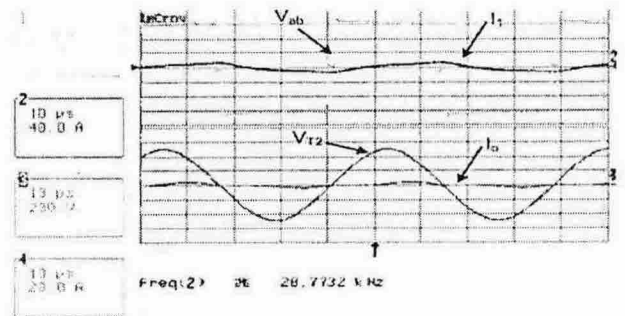
3. 실험 및 고찰

표 2 표준화된 파라메타

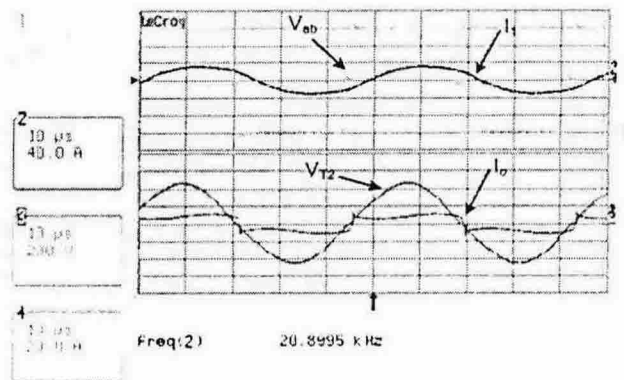
입력	220VAC
출력전압 제어범위	300VDC, $\pm 10\%$
출력 용량	4kW
스위칭 주파수 및 주회로 방식	21kHz, 3레벨 LLC 공진컨버터
부하 조건	저항부하
적용 소자	IGBT (600VDC, 300A)
냉각 방식	팬 냉각
코어	EE118 (병렬 6개)

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 직류전압(300VDC)을 150VDC로 분압하여 3레벨 직·병렬공진 컨버터 입력으로 받고, 일정 공진 주파수에서 출력 4kW용량에 대하여 실험하였다. 본 논문의 실험에 적용한 3레벨 직·병렬 공진컨버터는 60 Ω (685W)에서 18 Ω (4kW) 부하에 대해 실험하였고, 그림3의 (a),(b),(c)는 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 685W,

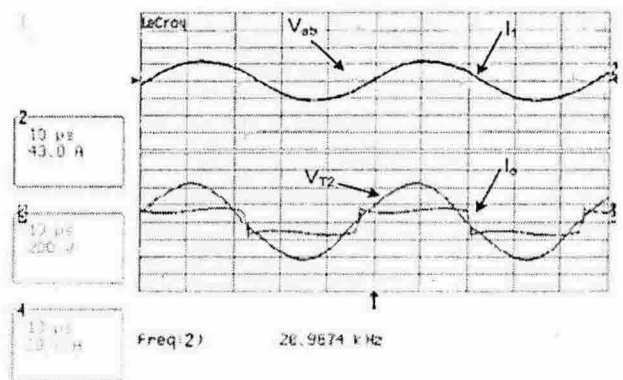
2.6kW, 4kW에 대한 각각의 실험결과 파형이다. 그림3의 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 실험결과 파형으로부터 경 부하(685W)에서도 비접촉 변압기 1차 측 순환 전류는 거의 흐르지 않는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 표준화된 공진 주파수에서 비접촉 변압기 2차측의 자화인덕턴스와 병렬 커패시터의 병렬 공진에 의한 임피던스 증가로 자화인덕턴스를 통해 흐르는 자화전류를 줄였기 때문이다. 또한 3레벨 직·병렬공진 컨버터는 모든 부하범위에 대해서 전압과 전류가 항상 동상이 되는 것을 볼 수 있고, 이러한 특성에 의해서 효율특성이 개선됨을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림3. 3레벨 직·병렬공진 컨버터의 1차 측 단자 전압(V_{ab}), 전류(I_1) 및 2차 측 단자 전압(V_{r2}), 전류(I_o) 실험파형, (50V/div., 40A/div., 200V/div., 20A/div., 10us/div.) (a) 685W, (b) 2.6kW, (c) 4kW

그림4는 일정 출력전압(300VDC)에서 부하출력 변화에 대한 출력전압 변화를 나타낸 것이다. 그림 4는 3레벨 직·병렬 공진 컨버터의 부하 출력 변화에 대한 효율특성을 나타낸 것이며, 그림4에서 나타난 것처럼 658W와 1.3kW를 제외하고 90%이상의 효율을 얻었다.

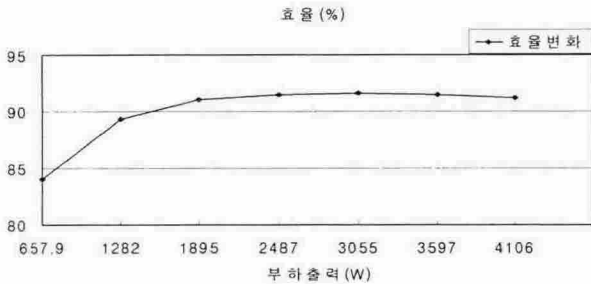


그림4. 부하 출력 변화에 대한 효율특성

4. 결론

본 논문은 3레벨 직·병렬 공진컨버터에 대해 이론적으로 해석하였고, 해석한 이론을 바탕으로 3레벨 직·병렬 공진컨버터의 입력 임피던스 크기에 대해 시뮬레이션을 하였으며, 전압이득 특성에 대해 시뮬레이션을 하고 실측한 전압이득 특성을 비교하여 나타내었다. 또한 4kW 용량에 대해 실험하였으며, 그 결과를 통해 3레벨 직·병렬 공진컨버터의 단자 전압(V_{ab})과 전류(I_1)는 경 부하에서 중 부하까지 전 부하 범위에 대해서 항상 동상이 되는 결과를 얻었고 경부하시에 비접촉 변압기 1차측에 흐르는 순환전류를 줄였다. 마지막으로 3레벨 직·병렬 공진 컨버터의 부하출력 변화에 대한 효율이 658W과 1.4kW를 제외하고 90%이상의 효율을 얻었다.

이 논문은 에너지 관리공단 프로젝트 사업의 세부 과제인 “차세대 고효율, 고성능 비접촉 전력전송장치 개발” 과제의 위탁과제(2003 - E- EL12 - P - 09-3- 020- 2004)로 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] G. B. Joung, and B. H. Cho, "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of transcutaneous transformer," IEEE Trans. PE., vol. 13, pp.1013-1022, 1998. 11.
- [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, 이현관, "낮은 커플링 변압기를 갖는 비접촉 전원의 개선된 고효율 공진컨버터," 전기학회 논문지, 제54B권, 제1호, pp.33-39, 2005. 1.
- [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.