

# 낮은 커플링 변압기를 갖는 LCLC 공진컨버터 동작특성

## Operating Characteristics in LCLC Resonant Converter with A Low Coupling Transformer.

孔泳秀\* · 金恩洙† · 李賢官\* · 趙貞九\*\* · 金倫鎬\*\*\*  
(Young-Su Kong · Eun-Soo Kim · Hyun-Kwan Lee · Jung-Goo Cho · Yoon-Ho Kim)

**Abstract** - Conventionally, 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 disadvantages, In this paper, the characteristics of the high efficiency and unit voltage gain as well as in-phase 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.

**Key Words** : Low Coupling Transformer, Contactless Power Supply System, LLC(Inductor-Inductor-Capacitor), LCC(Inductor-Capacitor-Capacitor), LCLC(Inductor-Capacitor-Inductor-Capacitor)

### 1. 서 론

비접촉 전원(Contactless power supply system)은 전원 공급을 전력선(Power cable)에 의한 전원공급 대신 유도적인 결합(Magnetic coupling)을 사용함으로써 어떠한 기계적인 접촉 없이 전기에너지를 공급 할 수 있는 전원 장치이다. 그림1은 비접촉 전원의 주 회로도로써 공진인버터, 비접촉 변압기 그리고 2차측 정류부분으로 구성 되어있다. 그리고 그림1에서 비접촉 전원의 비접촉 변압기는 긴 1차측 라인과 2차측 픽업 코일(Pick-up)로 구성되어 있으며, 그림2에 나타낸 것처럼 비접촉 변압기는 20m~40m정도이고 2차측 픽업코일은 1차측 라인에 일부분만 결합되어 있다. 또한 긴 1차측 라인과 2차측 픽업코일은 넓은 공극이 존재하기 때문에 비접촉 변압기 1차측 누설인덕턴스가 증가하여 상대적으로 자화인덕턴스(Magnetizing inductance)가 감소하게 된다. 이러한 이유 때문에 비접촉 전원은 무부하 순환전류(Circulating current)가 많이 흐르게 되고, 1차측 에너지를 2차측으로 전달하는데 많은 어려움 가진다. 따라서 기존에 비접촉 변압기를 적용한 비접촉 전원은 비접촉 변압기 1차측 누설인덕턴스와 커패시터의 직렬공진을 이용한 직렬 공진컨버터를 적용하여왔다. 하지만 직렬 공진컨버터를 적용한 비접촉 전원은 다음과 같은 특성을 가지고 있다. 첫째로 부하저항 변화에 대해 매우

높은 전압이득 변화가 나타나고, 주파수 제어를 위한 주파수 제어범위가 매우 협소하다. 두 번째로 모든 부하범위에 대해 비접촉 전원의 공진인버터 단자 전압과 전류를 동상으로 제어 할 수 없으므로 많은 무효 전력분에 따른 낮은 효율특성(60~70%)을 가진다.<sup>[1]-[6]</sup>

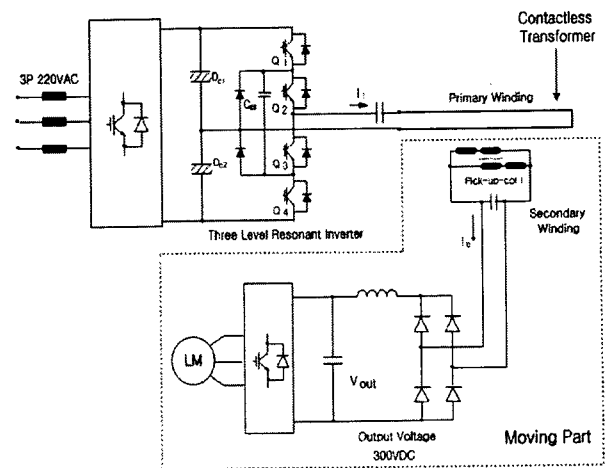


그림1 3레벨 공진컨버터를 적용한 비접촉 전원의 주회로도  
Fig.1 The main circuit of the contactless power supply using a three-level resonant converter

이러한 직렬 공진컨버터의 특성은 많은 문제점이 있어 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 3레벨 LCLC(Inductor-Capacitor-Inductor-Capacitor) 공진컨버터를 적용하였다. 3레벨 LCLC 공진컨버터를 적용했을 경우 얻을 수 있는 이점들은 첫째로 자화인덕턴스와 2차측 병렬커패시터의 병렬공진에

† 교신저자, 正會員 : 全州大 工大 電氣電子工學科 助敎授 · 工博  
E-mail : eskim@jj.ac.kr  
\* 學生會員 : 全州大 工大 電氣電子工學科 碩士課程  
\*\* 正會員 : 그린파워(주) 代表 · 工博  
\*\*\* 正會員 : 中央大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博  
接受日字 : 2005年 5月 16日  
最終完了 : 2005年 6月 3日

의한 임피던스 증가로 인해 무부하 또는 경부하에서 자화인덕턴스를 통해 흐르는 순환전류 감소시킬 수 있다. 두 번째로 부하저항 변화에 대해 표준화된 공진주파수에서 일정 전압이득 특성을 얻을 수 있어 일정 주파수 제어 가능하며, 세 번째로 모든 부하범위에 대해 비접촉 전원의 공진 인버터 단자 전압과 전류를 동상에 가깝게 제어 할 수 있으므로 무효 전력을 저감 할 수 있어 높은 효율특성을 얻을 수 있다. 이와 같은 3레벨 LCLC 공진컨버터의 특성을 비접촉 전원에 적용하기 위해 본 논문에서는 3레벨 LCLC 공진컨버터에 대해 이론적인 해석을 통한 표준화 및 시뮬레이션을 통해 최적설계를 하고, 5kW 용량의 시제품을 제작하여 실험한 결과에 대해서 서술하고자 한다.

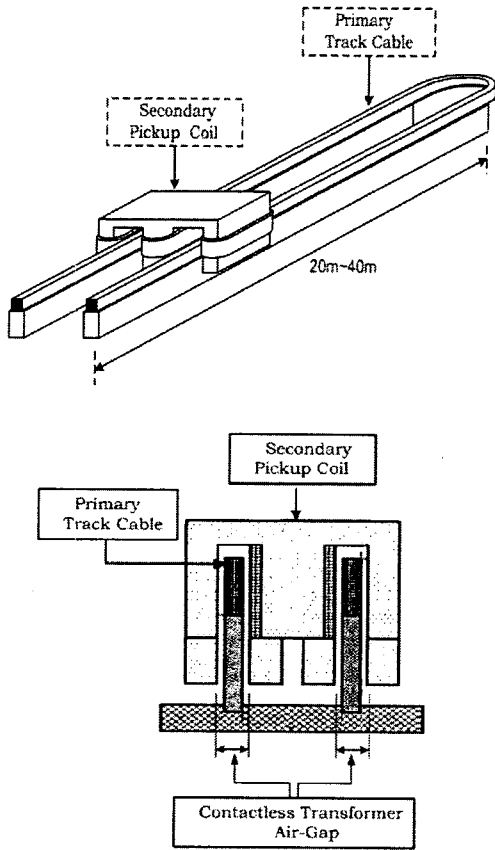


그림2 비접촉 변압기의 구성도  
**Fig.2** The configuration of the contactless transformer

**2. 3레벨 LCLC 공진컨버터**

본 논문에서는 기존 직렬공진을 적용한 비접촉 전원(Contactless power supply)의 여러 가지 문제점들을 효과적으로 개선하기 위해, 3레벨 LCLC 공진컨버터를 제안하고 그림3에 나타내었다. 그림3의 Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>는 공진탱크에 고주파 AC전압을 인가하기 위한 스위치이고, C<sub>s</sub>와 L<sub>11</sub>은 비접촉 변압기(Contactless transformer) 1차측의 직렬공진을 위한 직렬공진 커패시터와 1차측 누설인덕턴스(Leakage inductance)이고, L<sub>M</sub>과 C<sub>p</sub>는 비접촉 변압기의 병렬공진을 위한 자화인덕

턴스(Magnetizing inductance)와 2차측 병렬공진 커패시터이다. 이러한 3레벨 LCLC 공진컨버터는 표준화된 공진주파수에서 두 가지의 공진특성을 나타내는데, 저항부하가 단락 일 때는 직렬공진 특성을 저항부하가 개방 일 때는 병렬공진 특성을 나타낸다. 그러한 두 가지 공진특성 중 저항부하가 단

락 일 때 직렬 공진주파수( $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_s L_n}}$ )는 비접촉 변압기 1차측 누설인덕턴스(L<sub>n</sub>)와 1차측 직렬 커패시터(C<sub>s</sub>)의 공진에 의해서 이루어지고, 저항부하가 개방 일 때 병렬 공진주파수( $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_p L_M}}$ )는 비접촉 변압기의 자화인덕턴스(L<sub>M</sub>)와 2차측 병렬 커패시터(C<sub>p</sub>)에 의해서 이루어진다. 그리고 그림4는 3레벨 LCLC 공진컨버터의 등가회로를 나타낸 것이고, V<sub>ab</sub>는 그림3의 Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>의 스위칭 동작에 의해서 얻어지는 공진 인버터 전압을 구형파 전원으로 등가화한 것이며, 등가저항(R<sub>eq</sub>)은  $R_{eq} = \frac{\pi^2}{8} R_L$ 이며 출력 다이오드, 인덕터, 커패시터 및 부하저항을 등가화한 등가저항이다<sup>[7]</sup>. 그리고 비접촉 변압기는 2차측 픽업코일이 1차측 라인에 일부분에만 결합되어 있기 때문에 2차측 누설인덕턴스가 1차측 누설인덕턴에 비해 매우 작아 2차측 누설인덕턴스를 무시 할 수 있어 그림4의 점선내의 회로로 등가화 할 수 있다. 이와 같은 3레벨 LCLC 공진컨버터의 특성에 대해 그림4의 등가회로를 이용하여 이론적인 내용을 아래에 서술하였으며, 수식의 단순화를 위해서 권수비(N=n1/n2)는 1로 하였다.

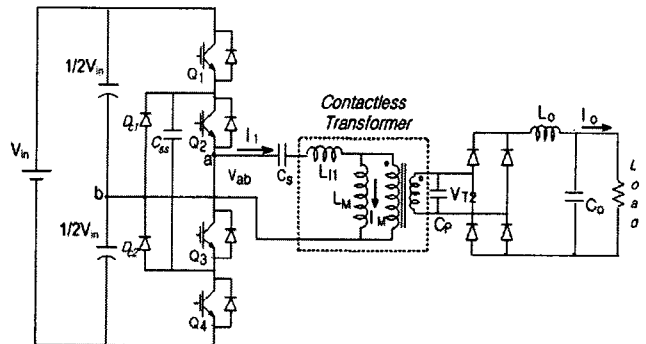


그림3 3레벨 LCLC 공진컨버터의 주회로  
**Fig.3** The main circuit of the three-level LCLC resonant converter

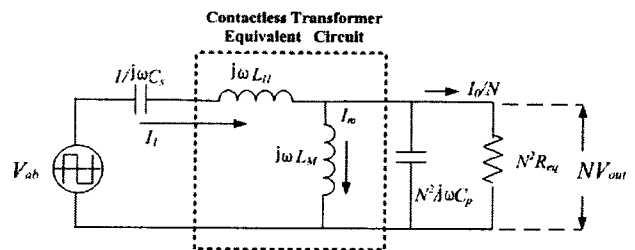


그림4 3레벨 LCLC 공진컨버터의 등가회로  
**Fig.4** The equivalent circuit of the three-level LCLC resonant converter

2.1 3레벨 LCLC 공진컨버터의 입력임피던스 특성 분석

그림4의 3레벨 LCLC 공진컨버터의 등가회로부터 표준화된 입력임피던스( $Z_{norm} = |\frac{Z_{in}}{Z_o}|$ ) 크기값은 (1)과 같고, 위상각은( $\phi$ ) (2)와 같다. 또한 표준화에 사용된 모든 파라메타들은 표1에 나타내었다.

표 1 표준화된 파라메타

Table 1 The normalized parameter

인덕턴스 비	$\gamma = \frac{L_n}{L_m}$
커패시턴스 비	$\delta = \frac{C_p}{C_s}$
병렬공진주파수	$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_p L_m}}$
표준화된 공진주파수	$f_r = 2\pi \frac{\omega}{\omega_o}$
특성임피던스	$Z_o = \omega_o L_M = \frac{1}{\omega_o C_p} = \sqrt{\frac{L_M}{C_p}}$
부하 Quality factor	$Q_L = \frac{R_{eq}}{\omega_o L_M} = \frac{R_{eq}}{Z_o} = \omega_o C_p R_{eq}$

그리고 표1에서  $\gamma$ 는 누설인덕턴스( $L_n$ )와 자화인덕턴스( $L_m$ )의 비이고,  $\delta$ 는 직렬공진 커패시터( $C_p$ )와 병렬공진 커패시터( $C_s$ )의 비이며,  $F_r$ 은 표준화된 공진주파수이다. 그리고  $Z_o$  및  $Q_L$ 은 특성임피던스와 부하 Quality factor이다.

$$Z_{norm} = Q_L \sqrt{\frac{[1 + \gamma 1 - F_r^2 + \delta 1 - (\frac{1}{F_r})^2]^2 + \frac{1}{Q_L^2} (F_r \cdot \gamma - \frac{1}{F_r} \cdot \delta)^2}{1 + Q_L^2 (F_r - \frac{1}{F_r})^2}} \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{1}{Q_L} (F_r \cdot \gamma - \frac{1}{F_r} \cdot \delta) - [1 + \gamma 1 - (F_r)^2 + \delta 1 - (\frac{1}{F_r})^2] Q_L (F_r - \frac{1}{F_r}) \quad (2)$$

그림5(a)는  $Q_L=3$ 에서 인덕턴스 비( $\gamma$ )와 커패시터 비( $\delta$ )를 변화시키면서 시뮬레이션 한 표준화된 입력임피던스( $Z_{norm}$ ) 크기 특성곡선이고, 그림5(b)는  $\gamma=7, \delta=7$ 에서  $Q_L$ 을 변화시키면서 시뮬레이션 한 표준화된 입력임피던스( $Z_{norm}$ ) 크기 특성곡선이며, 그림6(a),(b)는 그림5(a),(b)와 동일한 조건에서 표준화된 위상 특성곡선이다. 그림5(a),(b)의 A 영역처럼  $F_r$ 이 1보다 낮은 주파수 영역에서는 LLC 임피던스 특성이 나타나고, B영역처럼  $F_r$ 이 1보다 높은 주파수 영역에서는 LCC 임피던스 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 5(a),(b)의 A와 B영역의 임피던스 특성곡선에서 기울기가 음(Negative slope)인 경우에는 용량성 리액턴스 특성, 기울기가 양(Positive slope)인 경우에는 유도성 리액턴스 특성이 나타나는 것을 볼 수 있을 뿐만 아니라 일정한  $Q_L$ 에서  $F_r$ 이 1과 같은 경우 인덕턴스 비( $\gamma$ )와 커패시턴스 비( $\delta$ )가 증가하더라도 표준화된 입력임피던스 특성곡선

( $Z_{norm}$ ) 기울기의 변화가 없고, 또한 일정한 인덕턴스 비( $\gamma$ )와 커패시턴스 비( $\delta$ )에서  $F_r$ 이 1인 경우  $Q_L$ 이 증가함에 따라 표준화된 입력임피던스( $Z_{norm}$ ) 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림6(a),(b)의 표준화된 위상 특성곡선의 영역 A1과 영역 B1에서 알 수 있는 것처럼  $F_r$ 이 1에 가까워질수록 표준화된 위상 특성곡선의 위상차가 점점 감소하고,  $F_r$ 이 1과 같은 경우에는 표준화된 위상 특성곡선의 위상차가  $0^\circ$ 이 되는 것을 알 수 있다.

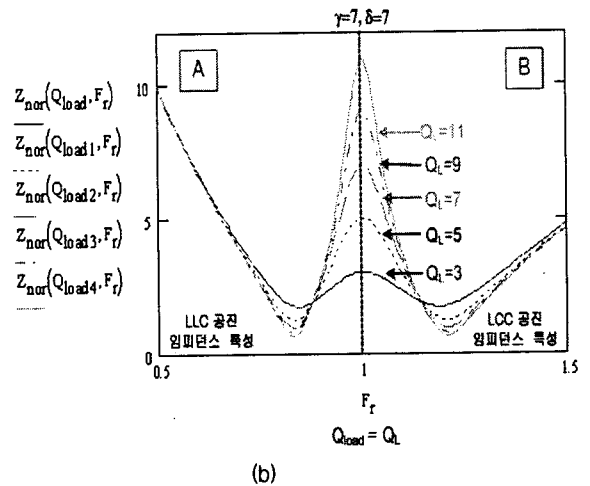
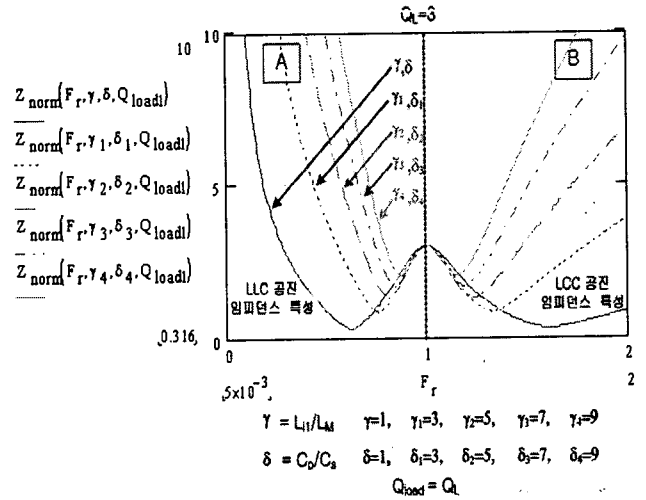


그림 5 표준화된 임피던스의 크기 특성

- (a)  $Q_L=3$ 에서  $\gamma, \delta$ 에 대한 표준화된 입력임피던스 특성
- (b)  $\gamma=7, \delta=7$ 에서  $Q_L$ 에 대한 표준화된 입력임피던스 특성

Fig. 5 The normalized impedance characteristics

- (a) The normalized impedance characteristics for  $\gamma, \delta$  at  $Q_L=3$
- (b) The normalized impedance characteristics for  $Q_L$  at  $\gamma=7, \delta=7$

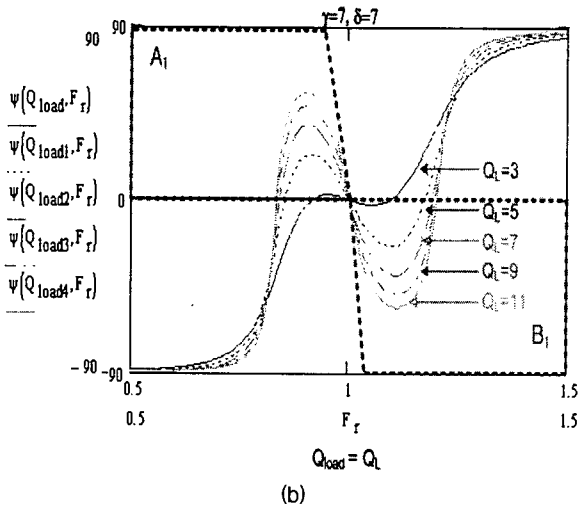
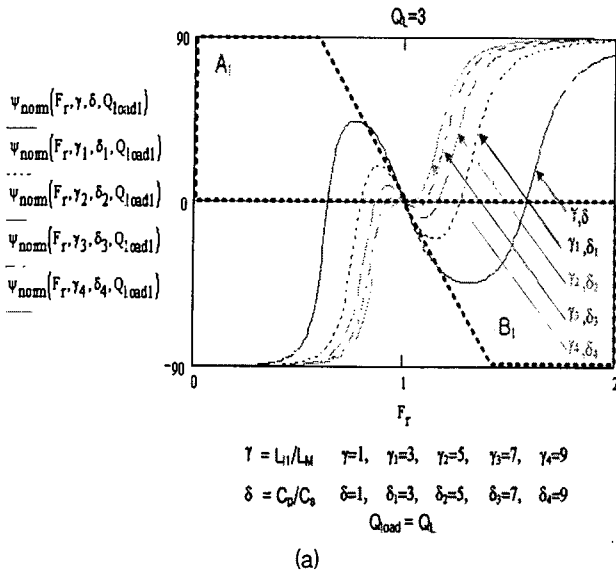


그림6 표준화된 위상 특성

- (a)  $Q_L=3$ 에서  $\gamma, \delta$ 에 대한 표준화된 위상 특성
- (b)  $\gamma=7, \delta=7$ 에서  $Q_L$ 에 대한 표준화된 위상 특성

Fig.6 The normalized phase characteristics

- (a) The normalized phase characteristics for  $\gamma, \delta$  at  $Q_L=3$
- (b) The normalized phase characteristics for  $Q_L$  at  $\gamma=7, \delta=7$

이와 같이  $F_r$ 이 1인 경우 그림5(b)에서 설명한 것과 같이  $Q_L$ 이 증가함에 따라 표준화된 입력 임피던스( $Z_{norm}$ )가 증가하여 무부하 또는 경부하시에 자화인덕턴스를 통해 흐르는 순환전류를 줄일 수 있고, 그림6(a),(b)의 표준화된 위상곡선의 위상차가  $0^\circ$ 이 되기 때문에 비접촉 전원의 공진인버터 단자 전압( $V_{ab}$ )과 전류( $I_1$ )를 동상이 되도록 제어 할 수 있어 효율을 개선 할 수 있다.

### 2.2 3레벨 LCLC 공진컨버터의 전압이득 특성분석과 전류특성분석

그림3의 제안된 3레벨 LCLC 공진컨버터에서  $Q_L \geq 3$ 이면, 공진탱크에 인가되는 전압은 구형파와 입력전압( $V_{ab}$ )의 기본파 성분만 인가되게 되고, 인가되는 구형파 전압의 기본파 성분은  $V_{ab} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{V_{in}}{2} \right)$  가 된다. 따라서 그림4의 3레벨 LCLC 공진컨버터 등가회로부터 표준화된 전압이득 ( $M_V = \left| \frac{V_{out}}{V_{ab}} \right|$ )은 (3)과 같이 구할 수 있고, 표준화된 전류 특성은 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$M_V = \frac{1}{\sqrt{[1 + \gamma - F_r^2 + \delta - \left(\frac{1}{F_r}\right)^2]^2 + \frac{1}{Q_L^2} \left(F_r \cdot \gamma - \frac{1}{F_r} \cdot \delta\right)^2}} \quad (3)$$

$$I_{norm} = \frac{4V_{in}}{\pi Z_o Q_L} \sqrt{\frac{1 + Q_L^2 \left(F_r - \frac{1}{F_r}\right)^2}{[1 + \gamma - F_r^2 + \delta - \left(\frac{1}{F_r}\right)^2]^2 + \frac{1}{Q_L^2} \left(F_r \cdot \gamma - \frac{1}{F_r} \cdot \delta\right)^2}} \quad (4)$$

그림7(a)의 표준화된 전압이득 특성은  $Q_L=3$ 이고, 인덕턴스 비( $\gamma$ )와 커패시터 비( $\delta$ )를 증가시키면서 시뮬레이션 한 결과이고 그림7(b)는  $\gamma=7, \delta=7$ 에서  $Q_L$ 을 증가시키면서 시뮬레이션 한 결과이며, 그림8(a),(b)는 그림7(a),(b)와 동일한 조건에서 시뮬레이션 결과이다. 그림7(a),(b)로부터  $F_r$ 이 1보다 낮은 주파수에서는 LLC공진 전압이득 특성이,  $F_r$ 이 1보다 높은 주파수에서는 LCC공진 전압이득 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 그림7(a),(b)의 표준화된 전압이득 특성곡선으로부터  $F_r$ 이 1에 가까워질수록 LLC공진 전압이득과 LCC공진 전압이득이 단위 이득(Unity Gain)에 가까워지는 것을 알 수 있고,  $F_r$ 이 1에서는 인덕턴스 비( $\gamma$ )와 커패시터스 비( $\delta$ ) 그리고  $Q_L$  변화와 관계없이 항상 표준화된 전압이득 특성곡선은 단위 이득(Unity Gain)이 되는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 8(a)에서 볼 수 있는 것처럼  $Q_L$ 이 일정한 경우  $F_r$ 이 1에서는 LLC영역과 LCC영역의 표준화된 전류가 인덕턴스 비( $\gamma$ )와 커패시터스 비( $\delta$ )에 관계없이 항상 일정 하지만, 그림 8(b)에서 볼 수 있는 것처럼  $\gamma=7, \delta=7$ 일 경우  $Q_L$ 의 변화에 대해 표준화된 전류가 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이  $F_r$ 이 1에서는 그림5(b)에서 설명한 것처럼  $Q_L$ 이 증가함에 따라 입력 임피던스가 증가하므로 입력전류를 제한 할 수 있는 것을 그림8(b)에 나타냈고, 그림 6(a),(b)에서 설명한 것처럼 공진인버터의 단자 전압과 전류의 위상차가  $0^\circ$ 이기 때문에 무효 전력을 저감 할 수 있을 뿐만 아니라, 그림7(a),(b)에 나타난 것처럼 일정 입력전압에 대해 일정 출력전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

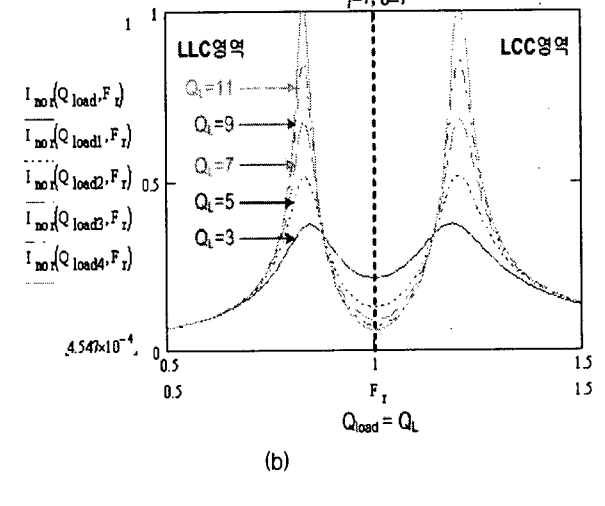
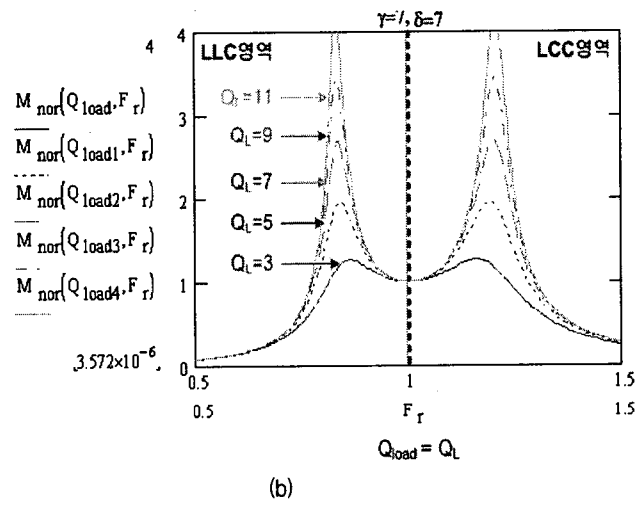
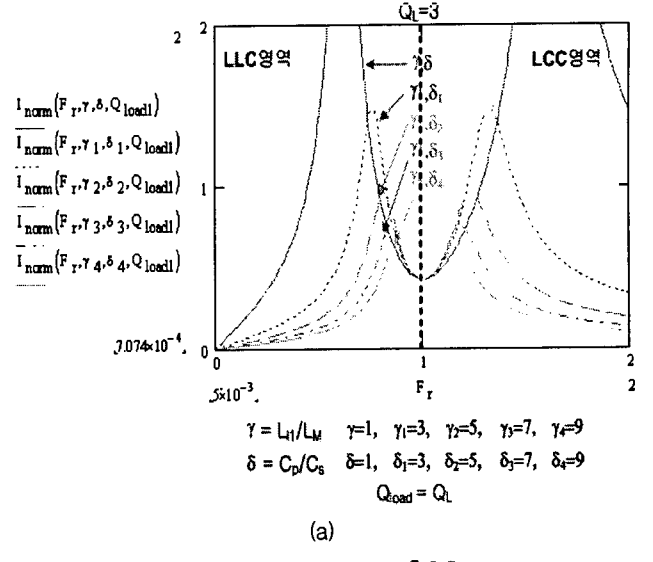
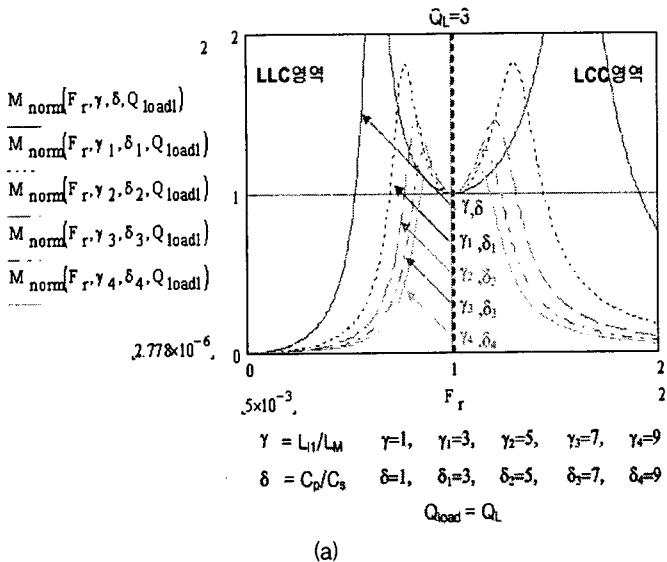


그림7 표준화된 전압이득 특성

- (a)  $Q_L=3$ 에서  $\gamma, \delta$ 에 대한 표준화된 전압이득 특성
- (b)  $\gamma=7, \delta=7$ 에서  $Q_L$ 에 대한 표준화된 전압이득 특성

Fig.7 The normalized voltage gain characteristics

- (a) The normalized voltage gain characteristics for  $\gamma, \delta$  at  $Q_L=3$
- (b) The normalized voltage gain characteristics for  $Q_L$  at  $\gamma=7, \delta=7$

3. 설계 절차

본 논문에서 제안한 3레벨 LCLC 공진컨버터는 그림 5(a),(b)와 그림7(a),(b) 그리고 그림 8(a),(b)에서 설명한 것처럼  $F_r$ 이 1보다 낮은 주파수에서는 LLC공진 특성을 가지고,  $F_r$ 이 1보다 높은 주파수에서는 LCC공진 특성을 나타내었다. 이와 같이  $F_r$ 이 1에서 멀어질수록 LLC공진 특성영역이나 LCC공진 특성영역에서는 표준화된 입력임피던스 특성곡선의 기울기가 변하고 비접촉 전원의 공진인버터의 단자

그림8 표준화된 입력전류 특성

- (a)  $Q_L=3$ 에서  $\gamma, \delta$ 에 대한 표준화된 입력전류 특성
- (b)  $\gamma=7, \delta=7$ 에서  $Q_L$ 에 대한 표준화된 입력전류 특성

Fig.8 The normalized input current characteristics

- (a) The normalized input current characteristics for  $\gamma, \delta$  at  $Q_L=3$
- (b) The normalized input current characteristics for  $Q_L$  at  $\gamma=7, \delta=7$

전압과 전류의 위상차를 발생시켜 무효 전력을 증가시켜 효율특성을 저감시킬 뿐만 아니라, 일정 입력전압에 대한 일정한 출력전압을 얻을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 앞서 설명한 문제점을 개선하고, 최대 전력전달을 위해서 표준화된 공진주파수( $F_r$ )가 1일 때의  $L_{11}, L_M, C_s, C_p$ 값을 구하였다. 그리고 본 논문의 제안된 LCLC 공진컨버터의 설계사양은

$$V_{in} = 220 VAC, V_{out} = 300 VDC$$

$$P_o = 5kW, f_o = 21kHz, Q_L = 3, \gamma = 7, \delta = 7$$

이다. 주어진 설계사양에 맞추어 (7),(8),(9),(10),(11)을 이용하여  $N=0.5$ ,  $L_M=11.93\mu H$ ,  $L_n=83.51\mu H$ ,  $C_p=1.327\mu F$ ,  $C_s=0.758\mu F$ 의 값을 얻었으며, 본 논문에 사용되는 스위칭 주파수는  $21kHz$ 이다

$$M_V = \frac{NV_{out}}{V_{ab}} \tag{7}$$

$$Q_L = \frac{N^2 R_{eq}}{\omega L_M} \tag{8}$$

$$\gamma = \frac{L_n}{L_M} \tag{9}$$

$$\delta = \frac{C_p}{N^2 C_s} \tag{10}$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_M \frac{C_p}{N^2}}} \tag{11}$$

4. 실험결과

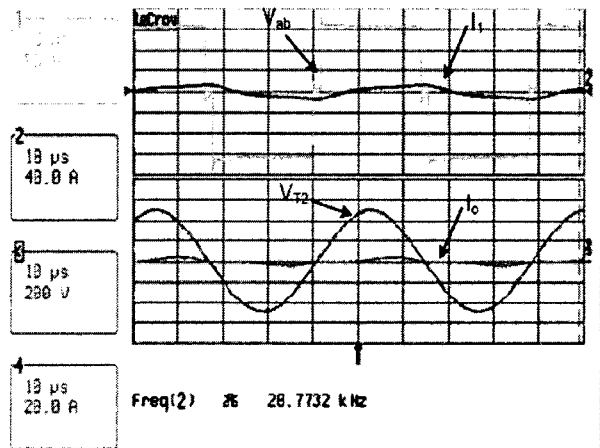
표 2 3레벨 LCLC 공진컨버터의 주요정격

Table2 The specifications of the three-level LCLC resonant converter

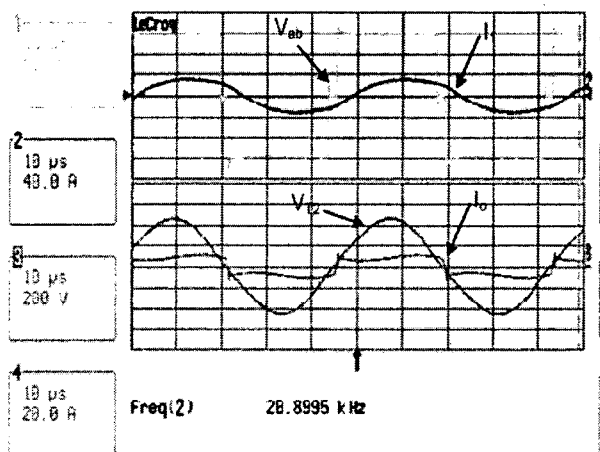
입력	220VAC
출력전압 제어범위	300VDC, ± 10%
출력 용량	4kW
스위칭 주파수 및 주회로 방식	21kHz, 3레벨 LCLC 공진컨버터
부하 조건	저항부하
적용 소자	IGBT (600VDC, 300A)
냉각 방식	팬 냉각
코어	EE118 (병렬 6개)

본 논문에서 비접촉 전원 대한 비접촉 변압기의 픽업코일에 사용된 코어는 페라이트 재질의 코어(EE118)를 선정하여 사용하였으며 주회로의 입력 조건은 3상의 상용 입력 전원 220VAC를 입력하여 브리지 정류회로를 거쳐서 정류된 직류 전압(300VDC)을 150VDC로 분압하여 제안된 3레벨 LCLC 공진컨버터 입력으로 받고, 표준화된 공진주파수( $F_r$ )가 1일 때에 대해 출력 4kW용량에 대하여 실험하였다. 그리고 실제 비접촉 변압기의 1차측 라인은 40m이지만 본 논문의 실험에 적용된 비접촉 변압기는 3m이다. 따라서 실험에 사용된 모든 파라미터를 40m의 비접촉 변압기를 사용 할 때의 값과 동일하게 맞추기 위해 3m의 비접촉 변압기에 직렬로 인덕터 ( $56.7\mu H$ )를 추가하여 실험하였다. 또한 직렬로 인덕터를 추가시킨 3m의 비접촉 변압기에 대해 측정된 인덕턴스 값은  $L_M=9.77\mu H$ ,  $L_n=68.94\mu H$  이고 커패시터 값은  $C_p=0.92\mu F$ ,  $C_s=0.88\mu F$  이다. 그리고 제안된 3레벨 LCLC 공진컨버터는 685W에서 4kW 부하에 대해 실험하였

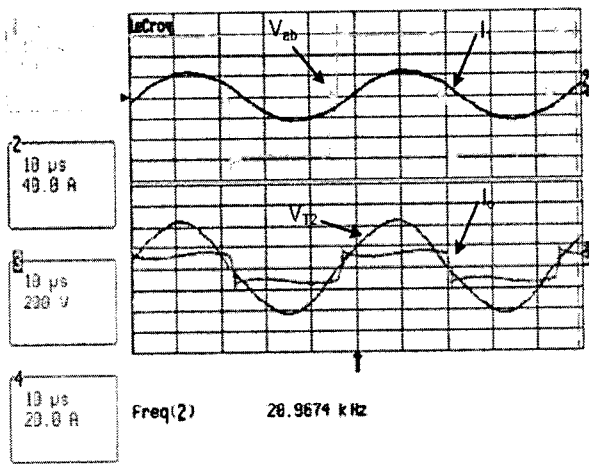
고, 1차측 스위칭 소자는 600V, 300A IGBT를 사용하였다. 그림9의 (a),(b),(c)는 제안된 3레벨 LCLC 공진컨버터의 685W, 2.6kW, 4kW에 대한 각각의 실험결과 파형이다. 그림 9(a)의 3레벨 LCLC 공진컨버터의 실험결과 파형으로부터 경부하(685W)에서 비접촉 변압기 1차측 순환전류를 저감시킬 수 있다. 왜냐하면 표준화된 공진주파수( $F_r$ )가 1에서 비접촉 변압기 2차측의 자화인덕턴스와 병렬커패시터의 병렬공진에 의한 임피던스 증가로 자화인덕턴스를 통해 흐르는 자화전류를 줄였기 때문이다. 또한 그림9(b),(c)로부터 제안된 3레벨 LCLC 공진컨버터의 공진인버터 단자 전압( $V_{ab}$ )과 전류( $I_1$ )가 동상에 가깝기 때문에 무효 전력이 저감되는 것을 알 수 있다. 그리고 그림10은 일정 입력전압에서 부하출력 변화에 대한 출력전압 변화를 나타낸 것이다. 그림10으로부터 알 수 있는 것처럼 출력전압은 부하출력 1kW에서 4kW에 대해 21V의 출력전압 차이만 나타날 뿐 일정 출력전압을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 출력전압 차이는 앞서 고려하지 않은 스위칭 소자의 전압강하와 비접촉 변압기 1차측의 긴 권선에 의한 권선저항의 전압강하이다. 그리고 그림11은 3레벨 LCLC 공진컨버터의 효율특성을 나타낸 것이며, 그림 11에 나타난 것처럼 부하출력이 658W와 1.3kW를 제외하고 90%이상의 높은 효율을 얻었다.



(a)



(b)



(c)

그림9 3레벨 LCLC 공진컨버터의 고주파 인버터 1차측 단자 전압( $V_{ab}$ ), 전류( $I_1$ )와 2차측 단자전압( $V_{T2}$ ), 전류( $I_o$ ) 실험파형, (50V/div., 40A/div., 200V/div., 20A/div., 10us/div.) (a) 685W, (b) 2.6kW, (c) 4kW

Fig.9 Experimental waveforms of the voltage( $V_{ab}$ ) and current( $I_1$ ) in the primary, and of the voltage( $V_{T2}$ ) and current( $I_o$ ) in the three-level LCLC resonant converter, (50VDC/div., 40A/div., 200V/div., 20A/div, 10us/div.) (a) 685W, (b) 2.6kW, (c) 4kW

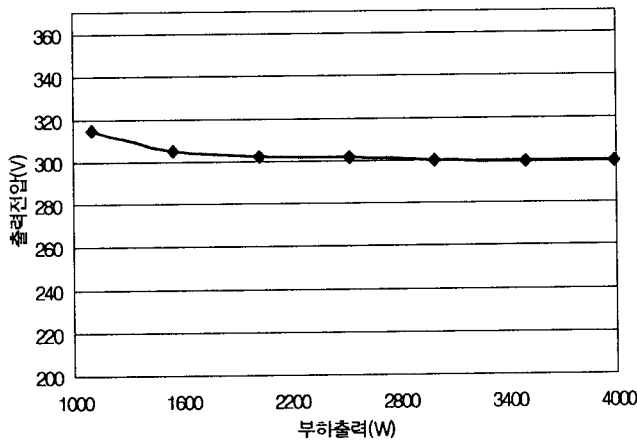


그림10 부하출력 변화에 대한 출력전압  
Fig.10 The output voltage variation for the several output power conditions

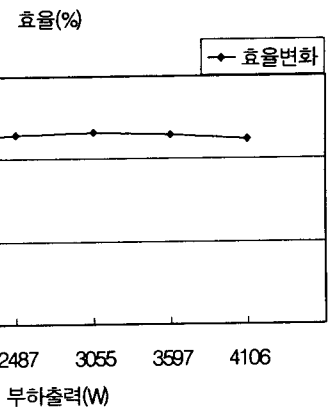


그림11 부하출력 변화에 대한 효율특성  
Fig.11 The efficiency characteristics for the output power variations

#### 4. 결 론

본 논문에서 제안한 3레벨 LCLC 공진컨버터를 적용한 비접촉 전원은 직렬공진을 적용한 비접촉 전원의 문제점을 개선하기 위해서 이론적으로 해석하여 표준화 하였고, 이러한 이론적 해석을 바탕으로 시뮬레이션 및 최적설계를 하였다. 그리고 표준화된 공진주파수( $F_r$ )가 1일 때에 4kW 용량에 대하여 실험하였으며, 실험한 결과 다음과 같은 실험 결과를 얻었다. 첫째로 경부하(685W)시 비접촉 변압기 1차측에 흐르는 순환전류를 줄였고, 둘째로 비접촉 전원의 공진인버터 단자 전압( $V_{ab}$ )과 전류( $I_1$ )를 동상에 가깝게 제어하였으며, 셋째로 일정 입력 전압(150VDC)에 대해 일정 출력전압(300VDC)을 얻었고, 마지막으로 3레벨 LCLC 공진컨버터의 부하출력(658W~4kW)에 대해 84%~92%의 높은 효율을 얻었다.

#### 감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] G. B. Joing, 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. vol. IE-48, pp.1238-1247, 2001. 12.
- [3] A. Ghahary, and B. H. Cho, "Design of a transcutaneous energy transmission system using a series resonant converter," IEEE PESC, Rec. pp.1-8, 1990. 6.
- [4] T. H. Nishimura, K. Hirachi, Y. Maejima, K. Kuwana, and M. Saito, "Characteristics of a novel energy transmission for a rechargeable cardiac pacemaker by using a resonant DC-DC converter," in Proc. IEEE IECON'93, vol. 2, pp.875-880, 1993.
- [5] C. Chakraborty, M. Ishida, and Y. Hori, "Novel half-bridge resonant converter topology realized by adjusting transformer parameters," IEEE Trans. vol. IE-49, pp.197-205, 2002. 2.
- [6] 공영수, 김은수, 이현관, "낮은 커플링 변압기를 갖는 비접촉 전원의 개선된 고효율 공진컨버터," 전기학회 논문지, 제 54B권, 제1호, pp.33-39, 2005. 1.
- [7] R. L. Steigerward, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE-35, pp.174-182, 1988. 4.



이 현 관 (李賢官)

1979년 10월 26일생. 2005년 전주대 전기전자공학부 졸업. 2005년~현재 동대학원 전력전자전공 석사과정.

Tel : 063-220-2906

Fax : 063-220-2056

E-mail : h1k2758@daum.net



조 정 구 (趙貞九)

1963년 3월 28일생. 1986년 경북대 전자공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 현재 (주)그린파워 대표 이사.

Tel : 055-285-8907

Fax : 055-285-8905



김 윤 호 (金倫鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(공학박). 현재 중앙대 공대 전기공학과 교수. 2003년 전력전자학회 회장 역임.

저 자 소 개



공 영 수 (孔泳秀)

1977년 10월 24일생. 2003년 전주대 전기전자공학부 졸업. 2003년~현재 동대학원 전력전자전공 석사과정.

Tel : 063-220-2906

Fax : 063-220-2056

E-mail : susu1457@hotmail.com



김 은 수 (金恩洙)

1964년 3월 26일생. 1986년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1989년~2001년 한국전기연구원. 전력전자연구그룹 선임연구원(T/L). 2001년 9월~현재 전주대 공학부 전기전자공학 조교수. 현재 당 학회 편집위원

Tel : 063-220-2906

Fax : 063-220-2056

E-mail : eskim@jj.ac.kr