

# 전기자동차의 유리를 통한 커패시티브 커플링 LLC 무선 전력 전송 컨버터

유영수<sup>1</sup>, 이강현<sup>†</sup>

## Capacitive Coupling LLC Wireless Power Transfer Converter Through Glasses of Electric Vehicles

Young-Soo You<sup>1</sup> and Kang-Hyun Yi<sup>†</sup>

### Abstract

This work proposes a capacitive coupling-based wireless battery charging circuit that is built with vehicle glasses for electric vehicles. A capacitive coupling wireless power transfer offers many advantages, such as low metal impact and low energy transfer efficiency changes in accordance with changes in position. However, a large coupling capacitor is needed for high power transfer. Therefore, a new capacitive coupling-based wireless power transfer LLC resonant converter built with the glasses of an electric vehicle is proposed. The proposed converter is composed of coupling capacitors with glasses of an electric vehicle and two transformers for impedance transformation. The proposed LLC converter can transfer large power and obtain high efficiency with zero voltage switching. The validity and features of the proposed circuit is verified by experimental results with a 1.2 kW prototype.

**Key words:** Capacitive coupling wireless power transfer, LLC resonant converter, Zero voltage switching

### 1. 서 론

세계적으로 환경규제가 강화되면서 전기자동차와 전기자동차 충전 방식에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 전기자동차 충전 방식은 크게 플러그인 방식(Plug-in), 무선 충전 방식, 배터리 교체 방식으로 나뉘며 현재는 안정성과 편리함에서 유리한 조건을 가지고 있는 전기자동차 무선충전 방식에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>.

전기자동차 배터리 충전을 위한 무선 충전 방식은 크게 인덕티브 방식과 커패시티브 커플링 방식으로 나누어진다. 두 가지 방식 모두 그림 1과 같이 공급된 DC 전압을 인버터를 통한 전력변환과 임피던스 매칭을 통해 1차 측으로 전달된다. 1차 측으로 전달된 에너지는

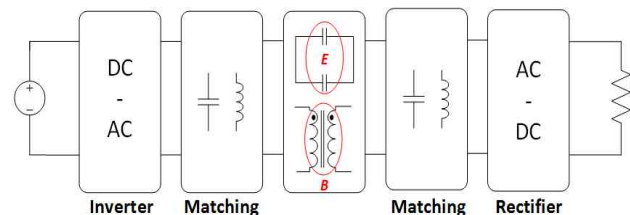


Fig. 1. Simple structure of wireless power transfer system with magnetic and electric coupling.

전기장이나 자기장의 형태로 2차 측으로 전달되고 전달된 에너지는 다시 임피던스 매칭과 정류기를 통해 전기자동차 충전을 위한 전력에너지로 변환된다<sup>[2-3]</sup>.

인덕티브 방식을 통한 전기자동차 충전 방식은 코일에 생성되는 자기장을 이용한 전력 전달 방식으로 전파와 노이즈, 금속에 대한 영향성, 위치 변화에 따른 에너지 전송효율 변화가 크다는 단점을 가지고 있다. 반면, 커패시티브 커플링 방식은 유전체에 전극을 형성하여 전력을 전달하는 방식으로 전력전송 자유도는 부족하지만 전기장을 이용하는 방식이기 때문에 인덕티브 방식에서 나타내는 문제점을 최소화시킬 수 있다<sup>[4-6]</sup>. 하지만 커

Paper number: TKPE-2016-21-6-12

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: khyi@daegu.ac.kr, School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu University  
Tel: +82-53-850-6652 Fax: +82-53-850-6619

<sup>1</sup> Dept. of Electronic Engineering, Daegu University  
Manuscript received Sep. 13, 2016; revised Oct. 17, 2016;  
accepted Nov. 5, 2016

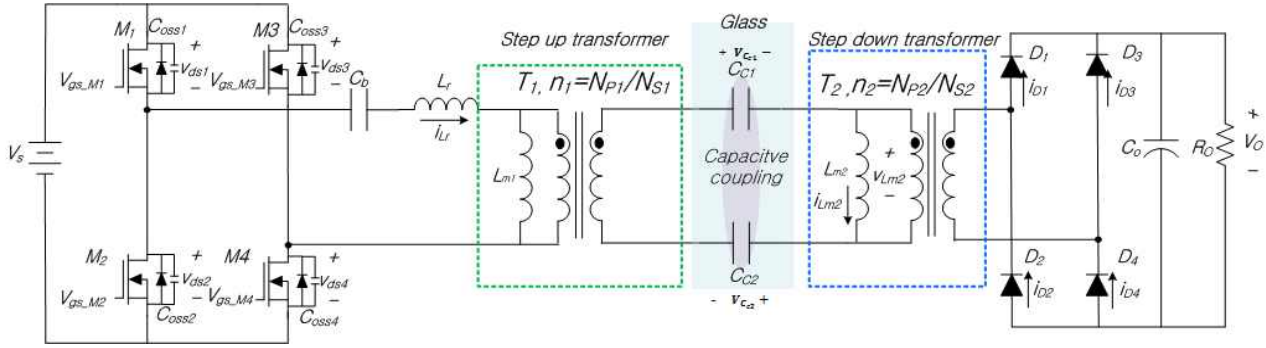


Fig. 2. A proposed capacitive coupling wireless power transfer LLC converter.

패시티브 커플링 방식을 통한 대용량 전력전송을 위해서는 큰 커플링 커패시터 형성이 매우 중요하다. 기존의 방식은 범퍼와 매우 얇은 폴리에틸렌 유전체를 사용하여 범퍼에 알루미늄 포일을 붙여 1차 측을 형성하고 외부에 2 차 측을 구성하여 커플링 커패시터를 구성하는 방식의 시스템을 제시하였다<sup>[5]</sup>. 앞에서 제시한 방식처럼 큰 커플링 커패시터를 얻기 위해서는 금속판의 면적을 크게 하거나, 금속판과 금속판 사이의 거리를 가깝게 하거나 유전율이 큰 물질을 이용하여 커플링 커패시터를 증가 시킬 수 있다. 만약 앞에서 제시한 방법을 통해 커플링 커패시터를 크게 얻을 수 없다면 커패시터의 임피던스를 줄이기 위해서 고주파 구동을 하여야 한다. 하지만 고주파 구동은 스위칭 손실이 증가하게 되고, 고주파 대용량 컨버터 구현에도 어려움이 있다.

본 논문에서는 전기 자동차의 큰 부분을 차지하고, 상대 유전율이 3~10을 갖는 전기자동차의 유리를 이용한 전기자동차 충전 방식을 제안한다. 공기나 일반적인 수지 계열보다 높은 상대 유전율과 큰 크기의 유전체를 이용하여 전극을 형성하여 큰 커플링 커패시터를 얻을 수 있다. 제안하는 시스템 회로의 송신측에는 외부 공진 인덕터와 커플링 커패시터의 임피던스를 작게 보이기 위한 승압 변압기로 구성되어 있으며, 수신 측은 Quality-factor를 통한 출력전압 설계를 위한 강압 변압기와 정류기로 구성되어 있다. 영전압 스위칭 및 2차측 정류 다이오드의 영전류 스위칭을 위하여 강압 변압기의 자화 인덕터, 공진 인덕터 그리고 커플링 커패시터로 이루어진 LLC 직렬 공진 컨버터로 동작하도록 설계한다. 모든 스위치의 영전압 스위칭을 이루게 되고, 출력 전압 이득도 LLC 컨버터와 유사하게 얻을 수 있다. 제안하는 회로의 동작과 특성을 검증하기 위하여 간이 동판과 유리를 이용하여 커플링 커패시터를 구성하고, 1.2kW 송수신 회로를 설계 및 제작하여 검증하였다.

## 2. 제안하는 커패시티브 커플링 무선 전력 LLC 컨버터

그림 2는 제안하는 시스템 회로의 구성을 나타낸다.

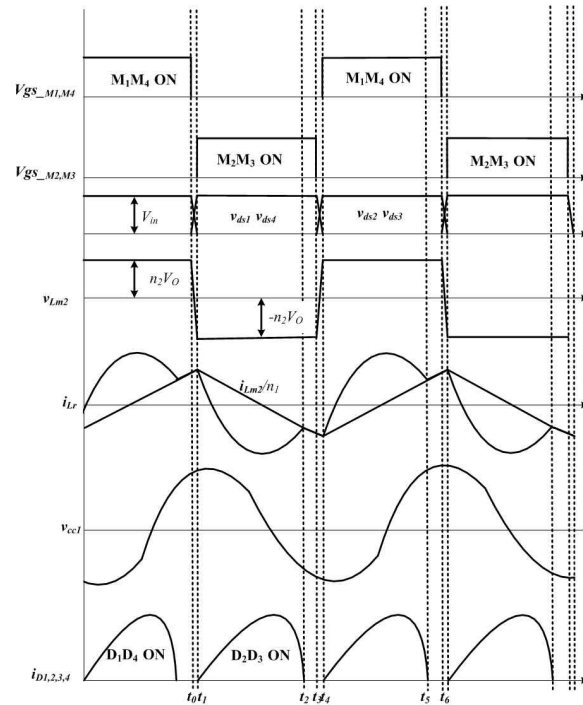


Fig. 3. Key wave forms of the proposed converter.

제안하는 시스템은 유리 유전체로 구성된 커플링 커패시터를 기준으로 1차 측에는 커패시티브 커플링 동작을 위한 풀 브리지 인버터와 외부 공진 인덕터, 임피던스 변환을 통한 커플링 커패시터를 크게 보이게 위한 승압 변압기로 구성되어 있다. 2차 측은 Quality-factor 조절을 통한 출력전압을 조절하기 위한 수신 측 강압 변압기와 정류회로로 구성되어 있다.

### 2.1 제안하는 LLC 컨버터 동작

제안하는 시스템 회로 동작은 송신 측 변압기 자화 인덕턴스를 크게 설계하여 이상적인 변압기로 보이게 하였으며 외부 공진 인덕터, 커플링 커패시터, 수신 측 변압기 자화 인덕턴스 설계를 통해 LLC 직렬 공진 컨버터와 유사하게 동작하게 하였다. 제안하는 시스템 회로의 동작과 특성을 확인하기 위해 Model - Mode6으로 동작 모드를 나누어 분석하였다.

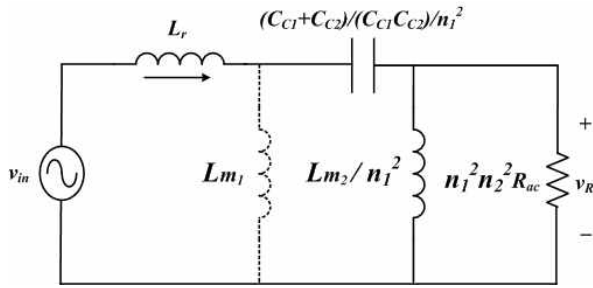


Fig. 4. AC equivalent circuit of the proposed converter for output voltage gain.

TABLE I  
EXPERIMENTAL SPECIFICATION OF THE  
PROTOTYPE

Parameter		Value
$T_1$	Core	EI6044
	$L_{M1}$	4 [mH]
	$N_{p1}:N_{s1}$	30:72
$T_2$	Core	EI6044
	$L_{M2}$	1350 [uH]
	$N_{p2}:N_{s2}$	72:30
$C_{c1}$ and $C_{c2}$		8 [nF]
$L_r$		135 [uH]
$V_S$		400 [V]
Output Power		1200 [W]
Switching frequency		98 [kHz]
$M_1-M_4$		STW13NK100Z
$D_1-D_4$		SCS240AE2

**Mode1 ( $t_0-t_1$ ):** Mode 1은 모든 스위치가 꺼져 있는 구간으로 1차 측 전류는 스위치의 출력 커패시터를 충전 및 방전 하게 된다.

**Mode2 ( $t_1-t_2$ ):** Mode 2는  $M_2$ 와  $M_3$  스위치가 켜지게 되고 이 기간 동안 1차 측 공진 인덕터 전류가 상승하며 커플링 커패시터와 1차 측 인덕터의 공진을 통해 2차 측으로 전력이 전달되며 정류 다이오드  $D_2$ 와  $D_3$ 가 켜지게 된다.

**Mode3 ( $t_2-t_3$ ):** 1차 측 인덕터와 커플링 커패시터의 공진이 끝나는 지점으로 1차 측과 2차 측이 분리되는 구간이 Mode 3이 시작 된다. 앞서 켜져 있던 다이오드  $D_2$ 와  $D_3$ 이 꺼지게 된다.

Mode4 - Mode6은 유사한 동작을 함으로 생략하였다. 제안한 회로는 LLC 직렬 공진 컨버터와 유사하게 동작한다.

## 2.2 제안하는 컨버터의 전압 이득

제안하는 컨버터 전압이득 분석을 위해 송신측 자화 인덕턴스와 커패시터  $C_b$ 를 무한대로 가정하고 변압기 턴 비를 고려하면 LLC 직렬 공진 컨버터와 유사한 간

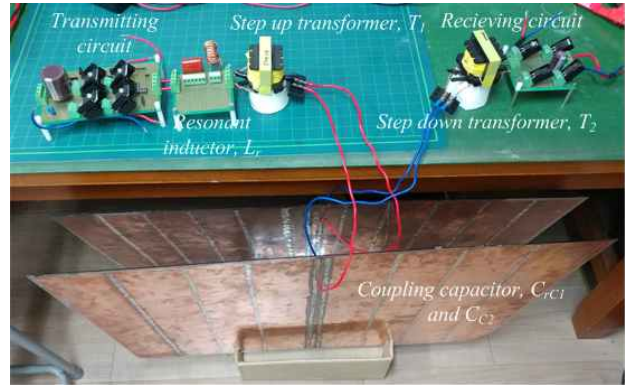


Fig. 5. Experimental set.

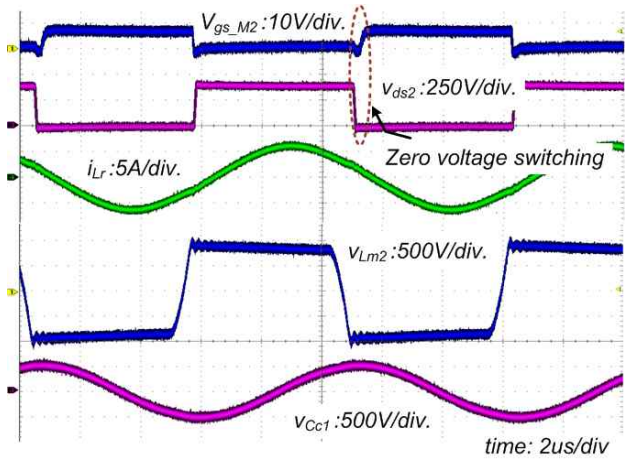


Fig. 6. Experimental key waveform of the proposed converter.

략화 회로를 그림 4와 같이 얻을 수 있다. 간략화 회로를 통해 턴 비를 고려하여 입력전압과 출력전압의 기본과 성분만을 고려한 전압이득 특성 식 (1)을 유도하였다. 유도된 공식은 일반적인 LLC 직렬 공진 컨버터 전압이득 특성식과 다르게 송, 수신측 변압기 턴 비를 모두 고려해야하는 차이점을 가지고 있다. 하지만, 기본적인 전압 이득은 LLC 컨버터와 유사하다.

$$\frac{V_o^F}{V_i^F}(j\omega) = M(j\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_o} - 1\right)^2 (m - 1)}{\left(\frac{\omega^2}{\omega_p^2} - 1\right) + j \frac{\omega}{\omega_o} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \left(\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1\right) (m - 1) Q\right)} \quad (1)$$

여기서,  $C_r = \frac{C_{c1}}{C_{c1} + C_{c2}} n_1^2$ ,  $L_p = \frac{L_{m2}}{n_1^2} + L_r$ ,  $Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{n_1^2 n_2^2 R_{ac}}$ ,  $R_{ac} = \frac{8n_1^2 n_2^2}{\pi^2} R_o$ ,  $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ ,  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_p C_r}}$ ,  $m = \frac{L_p}{L_r}$  를 의미하며  $V_o^F$ 와  $V_i^F$ 는 입출력 전압의 기본 고조파 성분만을 나타낸다.

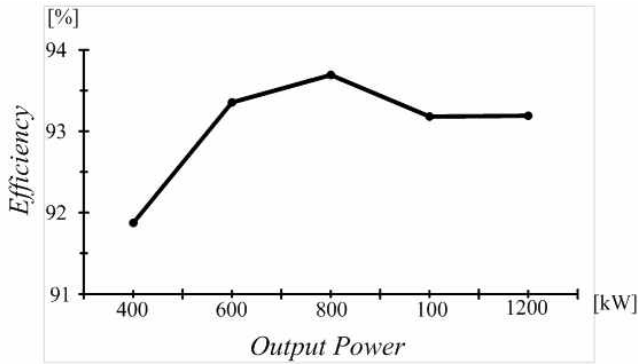


Fig. 7. Efficiency according to the load variation.

### 3. 실험결과

제안하는 시스템 회로를 동작과 특성 검증을 위하여 프로토타입을 제작하였다. 자세한 실험 사양은 표1과 같다. 유리 와 간이 동판을 통해 커플링 커패시터를 구성하였으며 1차 측은 풀 브리지 인버터와 외부에 공진 인덕터를 설계하였다. 두 개의 변압기를 EI6044 코어를 통해 설계하였으며 2차 측은 풀 브리지 정류기로 구성하였다. 그림 5는 실험에서 사용한 주요 수동 소자를 나타내고 있다. 커플링 커패시터는 그림 5에서 보듯이 유리를 이용하여 간이 제작하였다. 그림 6의 실험 결과 파형을 통해 소프트 스위칭 동작과 앞서 이론적 분석에서 예측하였듯이 제안된 시스템이 LLC 직렬 공진 컨버터와 유사한 동작을 확인할 수 있다. 그림 7에 나타난 효율 및 출력 부하 그래프를 통해 전체적으로 90% 이상의 효율과 최대 부하시 93.6%의 높은 효율로 동작함을 확인하였다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 커패시티브 커플링 무선 전력 전기자동차 충전 방식을 제안하였다. 자동차에 있는 유리를 이용하여 큰 커플링 커패시터를 얻었으며, 임피던스를 더욱 줄이기 위하여 두 개의 변압기를 이용한 임피던스 변환을 사용하였다. 또한 안정된 전압 이득과 높은 효율을 얻기 위하여 강압 변압기의 자화 인덕턴스를 이용하여 LLC 직렬 공진 컨버터와 유사하게 동작하도록 설계하였다. 실험 결과를 통해 제안한 시스템의 대용량 전력 전송이 가능성과 이론적 분석과 동일하게 동작함을 검증하였으며, 영전압 스위칭과 높은 효율을 확인하였다. 이를 통해, 전기자동차 유리를 통해 커패시티브 커플링 방식 무선 전력 전송이 가능함을 확인하였다.

본 연구는 2015년도 대구대학교 교내 연구비 지원에 의한 논문입니다.

### References

- [1] F. Musavi, M. Edington, and W. Eberle, "Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies," *Proceeding of 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1804-1810, 2012.
- [2] C. Liu, A. P. Hu, and M. Budhia, "A generalized coupling model for capacitive power transfer systems," *Proceeding of 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 274-279, 2010.
- [3] C. Liu, A. P. Hu, and N. K. C. Nair, "Coupling study of a rotary capacitive power transfer system," *Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2009.
- [4] K. H. Yi, "6.78 MHz capacitive coupling wireless power transfer system," *Journal of Power Electronics*, Vol. 15, No 4, pp 987-993, July 2015.
- [5] J. Dai and D. C. Ludois, "Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper," *Proceeding of 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 3307-3313, 2015.
- [6] J. Kim and F. Bien, "Electric field coupling technique of wireless power transfer for electric vehicles," *Proceeding of TENCON Spring Conference*, pp. 267-271, Apr. 2013.