

커패시티브 커플링 무선 전력 전송을 위한 MHz LLC 공진형 컨버터

유영수*, 문현원**, 이강현**

대구대학교 전자공학과*, 대구대학교 전자전기공학부**

High Frequency (MHz) LLC Resonant Converter for a Capacitive Coupling Wireless Power Transfer (CCWPT)

Young Soo You, HyunWon Moon, and Kang Hyun Yi
Daegu University

ABSTRACT

무선 전력 전송 방법은 자기장을 이용하는 인덕티브 커플링 방식과 자기 공진 방식, 그리고 전기장을 이용하는 커패시티브 커플링 방식으로 나눌 수 있다. 커패시티브 커플링 무선 전력 전송 방식은 인체에 대한 영향성이 없고, 전자기파 방해가 없다는 큰 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 커패시티브 커플링 무선 전력 전송에서 물리적으로 만들어진 커패시턴스를 크게 얻기 위하여 유리 유전체를 사용하고 동작 주파수를 매우 높게 하여 커패시턴스의 임피던스를 작게 보이도록 하게 하였다. 또한 좀 더 높은 입출력 전압비를 얻고, MOSFET의 스위칭 손실을 최소화 하기 위하여 커패시티브 커플링 무선 전력 전송에 적합한 MHz LLC 공진형 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 모바일 기기 충전을 위한 4.2W 시스템을 구성하여 검증하였다.

1. 서론

최근 모바일 기기와 전기 자동차를 선 없이 충전하기 위하여 무선 전력 전송 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 무선 전력 전송 기술은 자기장을 이용하는 인덕티브 커플링 방식과 자기 공진 방식이 있으며 전기장을 이용하는 커패시티브 커플링 방식으로 구분할 수 있다. 인덕티브 방식은 변압기의 원리와 유사하며, 현재 기술 완성도가 높아 상용화까지 되었다. 하지만, 송신 코일과 수신 코일이 정확하게 정합되어야 전력이 전송되는 단점을 가지고 있다^[1-2]. 자기 공진 방식은 송수신 코일간의 공명 현상을 이용하여 거리가 떨어져도 송수신 코일이 정확히 정합되지 않아도 전력이 전송되는 사용자 편의성이 우수하다. 하지만 인체 유해성, 효율, 전자파 방해 등의 단점을 가지고 있다^[3-4].

본 연구에서는, 물리적으로 생성된 커패시터에 전계를 이용하여 변위 전류를 발생시켜 전력을 전달하는 CCWPT (Capacitive Coupling Wireless Power Transfer)에 대한 연구이다. 물리적으로 생성된 커패시턴스는 송수신 기기간의 유전체 두께와 전극의 면적에 의해 결정되는데 그 값이 매우 작게 된다. 작은 커패시턴스는 큰 임피던스를 갖게 되어 전력 전달이 잘 안되게 된다^[5]. 따라서, 좀 더 큰 커패시턴스를 얻기 위하여 유리 유전체를 사용하고, 고주파 동작을 하게 되면 임피던스를 작게 보이게 할 수 있다. 또한, 높은 입출력 전압 이득과 송신회로의 턴-온 스위칭 손실을 최소화하기 위한 높은 양호도를 갖는 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 일반적인 전력용 소자를 이용하여, 4.2W 모바일 기기 충전을 위한 6.78MHz LLC 컨버터를 구성하여 동작과 특성을 검증하였다.

2. 제안한 고주파 커패시티브 커플링 무선 전력 전송 LLC 공진형 컨버터

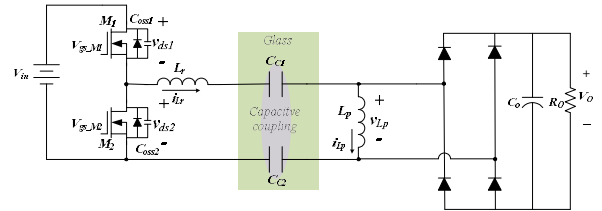


Fig.1 Proposed LLC converter for the CCWPT

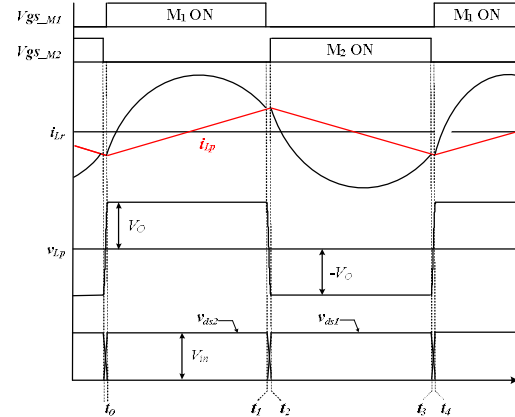


Fig.2 Key waveforms of the proposed circuit

2.1 제안하는 고주파 LLC 컨버터

CCWPT를 위한 고주파 LLC 컨버터를 Fig. 1과 같이 제안한다. 유리 유전체를 통하여 얻어진 전력 전송용 커패시터 2개와 공진을 위한 인덕터 그리고, 높은 출력 이득과 턴온 손실을 감소시키기 위한 인덕터로 공진 탱크를 구성한다. 송신 측에는 일반적인 Half-bridge 컨버터를 이용하여 LLC 컨버터를 구성하였다. 동작은 변압기가 없는 LLC 컨버터와 유사하게 동작하고, Fig. 2와 같이 커플링 커패시터와 공진인덕터 사이에 공진을 통해 수신측에 전력을 전달하게 된다.

2.2 커플링 커패시턴스 추정과 입출력 전압 이득

CCWPT에서, 전력을 전달하기 위한 커패시터 구성은 Fig. 3과 같다. 이때 얻어지는 커패시턴스는 아래와 같은 수식으로 구할 수 있다. 커패시턴스를 결정하는 주 요인은 유전체의 유전상수와 두께 및 전극 면적으로 정해지게 된다. 일반적으로 전자제품을 구성하는 ABS 수지는 2~3의 상대 유전율을 갖기 때문에 이보다 더 높은 유리를 이용하면 더 큰 커패시턴스를 얻을 수 있다.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 S}{(d_1 + d_2) / \epsilon_r + d_{air}} \quad (1)$$

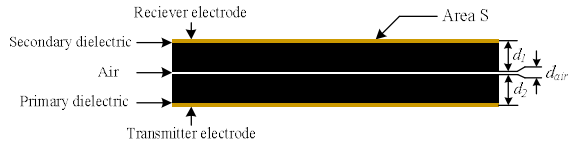


Fig.3 Structure of capacitor between transmitter and receiver

Table 1 Experimental Specification

V_{in}	35V	출력 전력	4.2W
L_r	1.6uH	전극 면적	196[cm ²]
C_{e1}, C_{e2}	695pF	유리 유전체 두께 (d_1+d_2)	2mm
L_p	491nH	동작 주파수	6.78MHz

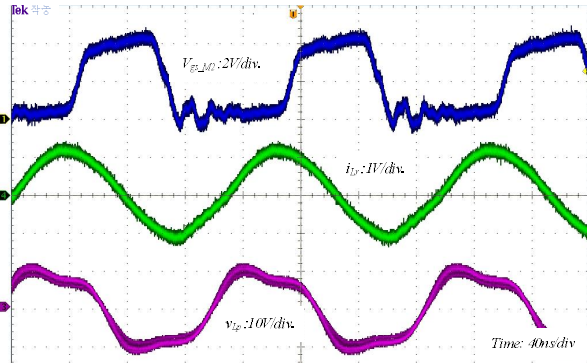


Fig.4 Experimental waveforms

출력 전압 이득은 DC/DC 컨버터로 많이 사용되는 기존의 LLC 컨버터와 동일하게 구할 수 있는데, 차이점은 공진 커패시턴스가 작고 자화 인덕턴스와 공진 인덕턴스의 비가 아주 작게 된다. 이는 높은 양호도를 가지며 단순 LC 직렬 공진형 컨버터에 비하여 출력 전압 이득을 높게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 실험 결과

제안된 컨버터의 동작과 특성을 검증하기 위하여, Table 1과 같은 실험 사양으로 Prototype을 제작하였다. 동작 파형은 6.78MHz 구동 주파수로 Fig. 4와 같이 잘 동작함을 알 수 있다. 제안된 회로는 제어 없이 최대 출력 4.2W를 전달 할 수 있는 반면에 단순 LC 직렬 공진 컨버터는 3.74W정도만 전달 되게 된다. 동일한 전력 수신에 있어서도 제안된 컨버터는 예상과 같이 Fig. 6에 보듯이 더 높은 전압을 얻을 수 있으며, 송신측 입력 전류도 Fig. 5에서와 같이 단순 직렬 공진 컨버터보다 10% 이상 적게 소모되므로 더 높은 전력 전달 효율을 보인다. 또한 무 부하에서도 안정적인 전압을 얻을 수 있게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 무선 전력 전송 방법 가운데, 인체유해성과 전자파 방해가 없는 CCWPT에 적합한 고주파 LLC 컨버터를 제안하였다. CCWPT는 커플링 커패시턴스가 중요한 설계 요인이 되는데, 큰 커패시턴스를 얻기 위하여 유리 유전체를 사용하고 높은 출력 전압 이득과 송신 회로 반도체 소자의 턴온 스위칭 손실을 저감하기 위하여 고주파 LLC 컨버터를 제안하였다. 4.2W 전력 수신을 위한 시스템을 구성하여, 단순 직렬 공진형 시스템에 비하여 높은 전력 전달 효율과 큰 전압 이득을 확인하였다.

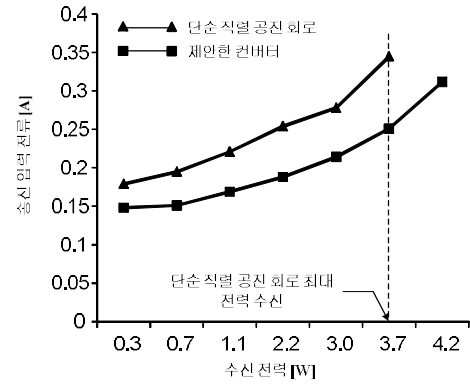


Fig.5 Input current according to the received power

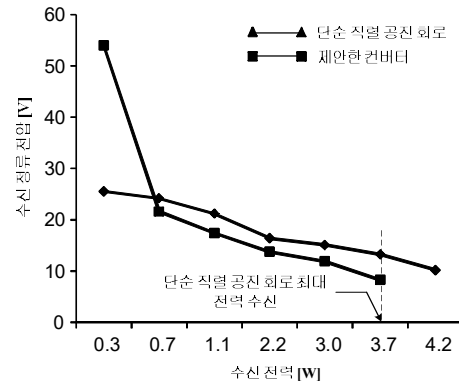


Fig.6 Rectified output voltage according to the received power

이 논문은 2015년 통일문화재단 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Johari, R., Krogmeier, J.V., and Love, D.J. , "Analysis and Practical Considerations in Implementing Multiple Transmitters for Wireless Power Transfer via Coupled Magnetic Resonance," IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 61, no.4, pp. 1771-1783, Apr., 2014.
- [2] Zhen Ning Low, Chinga and R.A., Ryan Tseng and Jenshan Lin, "Compensate Capacitor Optimization for Kilowatt-Level Magnetically Resonant Wireless Charging System " IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 61, no.12, pp. 6758-6768, Dec., 2009.
- [3] Mirbozorgi, S.A., Bahrami, H., Sawan, M. and Gosselin, B., "A Smart Multi coil Inductively Coupled Array for Wireless Power Transmission ", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 61, no.11, pp. 6061-6070, Nov., 2014.
- [4] Dukju Ahn, and Songcheol Hong, "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge" Proceeding of Annual KIPE conference, pp. 623-624, 2012, July
- [5] A. P. Hu, C. Liu, and H. L. Li, "A novel contactless battery charging system for soccer playing robot," in Proc. 15th IEEE Int. Conf. Mechatronics and Machine Vision in Practice, Auckland, New Zealand, 2008, pp. 646-650.