

6.78MHz 직렬/병렬 공진을 이용한 자기 공진 무선 전력 전송 시스템

이병희*, 유영수**, 이강현**

한밭대학교 전자제어공학과*, 대구대학교 대학원 전자공학과**

6.78MHz Magnetic Resonance Wireless Power Transfer with Series and Parallel Resonances

Byoung-Hee Lee*, Young Soo You**, and Kang Hyun Yi**

Dept. Electronics and Control Engineering Hanbat National University*,

Dept. Electronics Engineering, Graduate School, Daegu University**

ABSTRACT

무선 전력 전송에서 자기장을 이용하는 방식은 인덕티브 커플링 방식과 자기 공진 방식이 있다. 자기 공진 방식은 송수신 코일의 크기를 작게 할 수 있고, 인덕티브 방식보다 전력 수신할 수 있는 범위가 넓다. 본 논문에서는 모바일 기기를 위한 자기 공진 무선 전력 전송의 표준 주파수로 유력한 6.78MHz 시스템을 구성하고, 직렬 공진 송신과 병렬 공진 수신을 제안한다. 전자파 노이즈를 억제하기 위하여 LC Low Pass Filter를 추가한 Half-bridge 인버터 송신 회로를 사용하여, 5.5W급 Smart phone 충전을 위한 Prototype을 제작 및 동작과 특성을 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 멀어지거나 송수신 코일이 정확히 정합되지 않아도 전력이 전송되며 사용자 편의성이 우수하다. 또한, 원거리 전송이 가능하며, 동시에 다수 수신기에 전력을 전달할 수 있는 장점을 가지고 있다^[3-4].

본 논문에서는 모바일 기기 충전을 위한 자기 공진 무선 전력 전송 시스템을 제안한다. 자기 공진 무선 전력 전송의 표준 단체인 A4WP의 모바일 기기 충전 표준 주파수인 6.78 MHz 구동을 위하여 송수신 회로를 설계하고, 직렬 공진 송신기와 병렬 공진 수신기를 이용하여 전력을 전달한다. 또한 전자파 노이즈를 최대한 억제하기 위하여 LC Low Pass를 추가한 Half-bridge 인버터 송신 회로를 제안한다. 직렬과 병렬 공진을 이용한 자기 공진 수신기의 이론적 전압 이득을 구해보고, 5.5 W 시스템을 구성하여 회로 동작을 검증하였다.

2. 직렬과 병렬 공진을 이용한 자기 공진 무선 전력 전송 시스템

2.1 제안하는 자기 공진 무선 전력 시스템

6.78MHz 모바일 기기 충전을 위한 자기 공진 무선 전력 전송 시스템은 Fig. 1과 같다. 입력 전압을 고주파 AC(Alternating Current) 전압으로 만들기 위한 Half-bridge 인버터와 사각파에서 만들어진 구형파의 하모닉 성분을 최대한

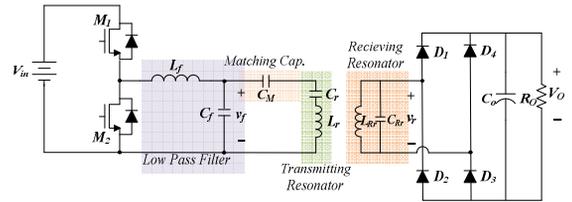


Fig. 1 Proposed 6.78MHz magnetic resonance WPT system

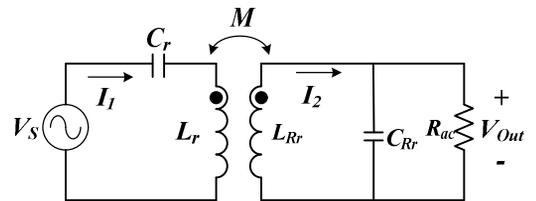


Fig. 2 Equivalent circuit model of the proposed series and parallel resonance magnetic resonance WPT

제거하기 위한 LC Low Pass Filter로 구성된다. 직렬 공진을 이용한 송신 공진기와 병렬 공진을 이용한 수신 공진기로 무선 전력 전송을 위한 공진 시스템을 구성하고, 부하에 최대 전력을 전달하기 위해 임피던스 매칭을 역할을 하는 커패시터(C_M)로 구성된다. 모든 수동 소자는 효율을 극대화하기 위하여 높은 양호도를 갖는 수동 소자를 사용하고, 반도체 소자는 Si를 기반한 소자를 이용하여 설계 하였다.

2.2 직렬 병렬 공진기의 전달 이득

제한한 직렬 공진 송신, 병렬 공진 수신 자기 공진 무선 전력 전송의 송수신 코일간 등가회로를 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 코일이나 회로에 존재하는 기생 저항은 고려하지 않았다. Half-bridge 인버터로 AC 전압 중 기본파 성분을 입력 전압으로 하고, 부하 저항은 AC 등가 저항을 이용하였다. 송신과 수신 각각에 Kirchhoff's voltage law (KVL)를 적용하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다^[5-6].

$$V_s = \left(\frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_r \right) I_1 - j\omega M I_2 \quad (1)$$

$$0 = -j\omega M I_1 + j\omega L_r I_2 + V_{Out} \quad (2)$$

$$\left| \frac{V_{Out}}{V_s} \right| = \left| \frac{j\omega M}{\left[\left(\frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_r \right) + \left(1 + j\omega R_{ac} C_r \right) \left(L_r / C_r - \omega^2 L_r L_r + \omega^2 M^2 \right) / R_{ac} \right]} \right| \quad (3)$$

Table 1 Experimental specification

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{in}	22 V	L_r	18.56 μ H
L_f	1.45 μ H	L_{Rr}	535 nH
C_f	220 pF	C_{Rr}	1.05 nF
C_M	330 pF	P_{out}	5.5 W
C_r	30 pF	Frequency	6.78 MHz

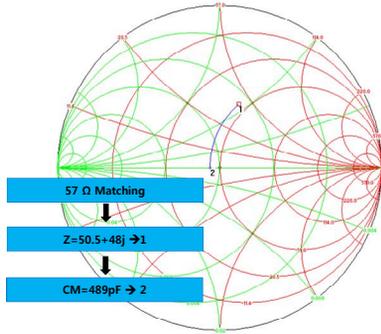


Fig. 3 Impedance matching with the Smith chart

M은 상호 인덕턴스를 나타내고, 입출력 전압 이득을 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

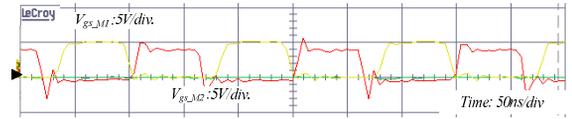
3. 실험 결과

제안된 컨버터의 동작과 특성을 검증하기 위하여, Table 1과 같은 실험 파라미터로 Prototype을 제작하였다. 구동 주파수는 6.78 MHz를 사용하여 송수신 공진기를 설계 하였다. 송수신 거리는 0.5cm정도 된다. 커패시터로 무효 전력을 최소화 하기 위한 부하 등가 저항을 57옴으로 하여, 임피던스 매칭을 하였다. 임피던스 매칭 방법은 수신 공진기와 부하 저항이 있는 상태에서 송신측에서 보이는 임피던스의 무효전력을 0로 하기 위하여 스미스 차트를 활용하여 Fig. 3과 같이 설계하였다. 출력 전력은 휴대폰 충전을 위한 5V/1A 충전을 위한 수신 전력 기준 5.5W를 기준으로 설계하였다. Fig. 4(a)는 6.78 MHz 구동을 위한 MOSFET Gate 신호를 나타내고 있다. 6.78 MHz 오실레이터 출력을 이용하여 Logic IC와 Gate 구동 IC를 사용하여 설계하였다. LC Low Pass Filter의 차단 주파수는 9 MHz로 정하여 각각 L_f 과 C_f 를 설계하였으며, 출력 파형은 Fig. 4(b)와 같다. 정류 동작도 Fig. 4(b)에서 보듯이 에너지를 잘 수신함을 확인 할 수 있었다. 최대 부하에서 효율은 약 74%를 보임을 Fig. 5에서 확인 할 수 있으며, 부하가 작아지면서 무효전력이 커짐에 따라 효율은 떨어짐을 알 수 있다.

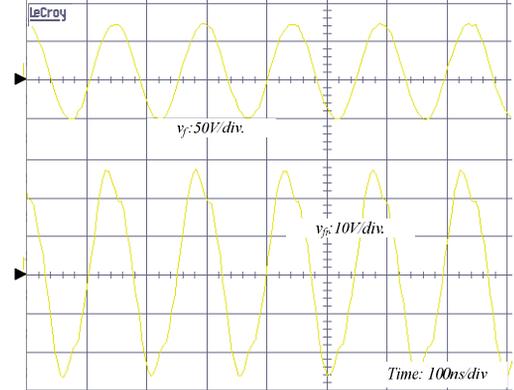
4. 결론

본 논문에서는 자기 공진 무선 전력 전송 시스템에 관한 연구이다. 모바일 기기 충전을 위한 A4WP의 표준 주파수인 6.78 MHz 동작주파수를 이용하여 송수신 공진기를 설계하였으며, 송신은 직렬 공진을 이용하고 수신은 병렬 공진을 이용하였다. 전자파 노이즈를 차단하기 위하여 LC Low Pass Filter를 설계하여 적용하고, 5.5 W 수신을 위한 Prototype 제작하여 동작 검증을 수행하였다. 무효 전력을 최소화 하기 위한 임피던스 매칭과 직병렬 공진을 통해 최대 효율 74%를 얻었으며, 모바일 기기 충전을 안정적으로 할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌



(a) Gate signal of M_1 and M_2



(b) Key waveforms of the transmitter and the receiver
Fig. 4 Experimental waveforms

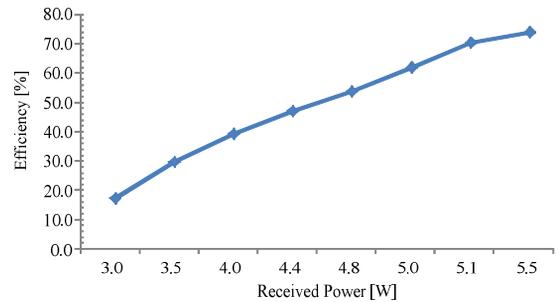


Fig. 5 Efficiency according to the received power

- [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] Sung-Han You, Young-Sun Kim, and Hoon-Chul Yang, "Design and Modeling Platform of Resonant Wireless Power Transfer System," Proceeding of The Korean Institute of Electrical Engineers Annual Conference, pp3-4, July, 2015
- [4] D. Ahn and S. Hong, "A Transmitter or a Receiver Consisting of Two Strong Coupled Resonators for Enhanced Resonant Coupling in Wireless Power Transfer," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 3, pp. 1193-1203, Mar. 2014.
- [5] R. Huang, B. Zhang, D. Qiu, and Y. Zhang, "Frequency Splitting Phenomena of Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer," IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 11, Nov. 2014.
- [6] D. Ahn, and S. Hong, "A Study on Magnetic Field Rep eater in Wireless Power Transfer," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 1, pp. 360-371, Jan. 2012.