

3-코일 무선 전력 전송 시스템의 효율에 대한 코일 배치의 영향

이 기 송*, 신 경 섭^o

Impact of Configuration of Coils on Efficiency of 3-Coil Wireless Power Transfer Systems

Kisong Lee*, Kyungseop Shin^o

요 약

본 논문에서는 3-코일 무선전력전송 시스템을 수학적으로 모델링하고, 등가회로 모델을 이용해 달성 가능한 시스템 효율을 도출하였다. Advanced Design System 시뮬레이션을 통해 분석의 정확성을 검증하고, 코일 안테나의 위치가 시스템 효율에 어떠한 영향을 미치는 지를 확인하였다.

Key Words : Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance, Efficiency, Optimal Placement

ABSTRACT

In this paper, we provide a mathematical model for a 3-coil wireless power transfer system, and derive an achievable efficiency with an equivalent circuit model. Through simulation using Advanced Design System, we verify the accuracy of analytical results and confirm the effect of the placement of coil antennas on system efficiency.

I. 서 론

최근 무선전력전송 (Wireless Power Transfer, WPT) 기술은 기존의 유선 충전의 번거로움을 탈피하고, 사용자의 충전 편의성을 향상시켜 줄 미래 기술로

써 각광 받고 있다^[1]. 이에 따라 WPT와 관련하여 시스템 효율 분석 및 향상 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [2]에서는 공진기 특성에 따라 달성 가능한 효율을 분석하였고, [3]에서는 다수의 송신기를 사용함에 따라 얻을 수 있는 효율 측면에서의 다이버시티 이득을 분석하였다. 또한, 다수의 수신기가 존재하는 WPT 환경에서, 시스템 효율을 최대화하기 위한 수신기의 최적의 부하 저항 값 선정 방법^[4,5]과 각각의 수신기가 필요로 하는 전력을 전송하기 위한 방안^[6,7]에 대한 연구도 진행되었다. 하지만 3-코일 WPT 시스템의 효율 도출 및 효율에 영향을 미치는 요소에 대한 정확한 분석을 수행한 기존 연구는 존재하지 않는다.

본 논문에서는, 1 개의 송신기(Transmitter, Tx)와 이 송신기의 양쪽으로 각각 1 개의 수신기(Receiver, Rx)가 존재하는 3-coil WPT 시스템에서 코일 안테나의 배치와 효율 사이의 연관성을 밝히고자 한다. 고려하는 WPT 시스템을 회로적으로 모델링 한 후, 달성 가능한 시스템 효율을 도출하였다. Advanced Design System (ADS) 시뮬레이션을 통해 Tx와 Rx2의 위치가 고정되어 있을 때, 효율을 최대화하는 최적의 Rx1 위치가 존재함을 보이고, Tx와 Rx2의 위치의 변화가 최적의 Rx1 위치에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였다.

II. 3-코일 무선전력전송 시스템의 효율

본 논문에서는 Tx 양쪽에 각각 1개의 Rx가 존재하는 자기공진 (Magnetic resonance) 기반의 3-코일 WPT 시스템을 고려한다.

그림 1은 3-코일 WPT 시스템의 등가회로 모델을 보여준다. Tx에는 외부 전압 V_s 와 소스 저항 R_s 가 연결되어 있으며, Rx에는 부하 저항 R_L 이 연결되어 있다. 각각의 코일 안테나는 L_i 의 자기 인덕턴스 및 r_i 의 내부 저항을 갖는다. 여기서 아래 첨자 $i \in \{0, 1, 2\}$ 이며, 0은 Tx, 1은 Rx1, 2는 Rx2를 의미한다. 또한, 코일 안테나가 같은 공진 주파수에서 공진할 수 있도록 C_i 의 커패시턴스를 직렬로 연결한다. 코일 안테나의 공진하는 주파수는 다음과 같다^[2,3].

$$\omega_o = 2\pi f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (1)$$

* 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2015R1C1A1A010 51747)

• First Author : Chungbuk National University, School of Information and Communication Engineering, ksllee85@cbnu.ac.kr, 정희원

o Corresponding Author : Semyung University, School of Computer Science, ksshin@semyung.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-11-339, Received November 7, 2017; Revised November 30, 2017; Accepted November 30, 2017

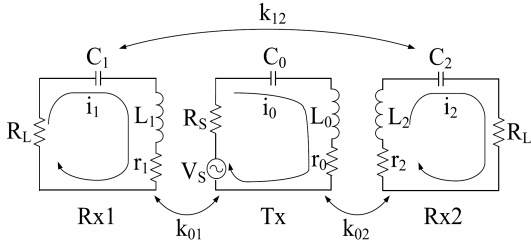


그림 1. 자기공진 기반 3-코일 무선전력전송 시스템
Fig. 1. Magnetic resonance based 3-coil WPT system

각 코일 안테나의 등가 임피던스는 수식 (2)와 같이 얻을 수 있다⁶⁾.

$$\begin{aligned} Z_0 &= R_S + r_0 + j\omega L_0 + \frac{1}{j\omega C_0}, \\ Z_1 &= R_L + r_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, \\ Z_2 &= R_L + r_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}. \end{aligned} \quad (2)$$

두 코일 안테나 i와 j 사이의 상호 커플링의 세기는 다음과 같은 커플링 계수(Coupling coefficient) k_{ij} 로 표현할 수 있다. 여기서 k_{ij} 는 코일 안테나 i와 j 사이의 거리인 d_{ij} 의 세 제곱에 반비례한다³⁾. 또한, 키르히호프 전압 법칙(Kirchhoff's Voltage Law, KVL)에 의해 다음과 같은 관계식을 생성할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_1 i_1 + j\omega k_{01} \sqrt{L_0 L_1} i_0 + j\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2} i_2 &= 0, \\ j\omega k_{01} \sqrt{L_0 L_1} i_1 + Z_0 i_0 + j\omega k_{02} \sqrt{L_0 L_2} i_2 &= V_S, \\ j\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2} i_1 + j\omega k_{02} \sqrt{L_0 L_2} i_0 + Z_2 i_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Rx1과 Rx2 사이의 거리는 충분히 멀어, 두 코일 안테나 사이의 교차결합(cross coupling)은 $k_{12} \approx 0$ 으로 무시할 수 있다고 가정한다^{3,4)}. 수식 (3) 으로부터 각각의 코일 안테나에 유도되는 전류는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} |i_0| &= \frac{1}{Q_0 \zeta_1 + Q_0 \zeta_2 + 1} \frac{V_S}{Z_0}, \\ |i_1| &= \frac{\sqrt{Q_0 Q_1} k_{01}}{Q_0 \zeta_1 + Q_0 \zeta_2 + 1} \frac{V_S}{\sqrt{Z_0 Z_1}}, \\ |i_2| &= \frac{\sqrt{Q_0 Q_2} k_{02}}{Q_0 \zeta_1 + Q_0 \zeta_2 + 1} \frac{V_S}{\sqrt{Z_0 Z_2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

수식 (4)에서 $Q_0 = \frac{\omega L_0}{Z_0}$, $Q_1 = \frac{\omega L_1}{Z_1}$, $Q_2 = \frac{\omega L_2}{Z_2}$,

$\zeta_1 = Q_1 k_{01}^2$, $\zeta_2 = Q_2 k_{02}^2$ 로 정의되며, Q_i 는 코일 안테나 i의 품질계수(Quality factor)이다.

S 파라미터 정의 $S_{21} = 2 \frac{V_L}{V_S} \sqrt{\frac{R_S}{R_L}}$ ^[2]와 수식 (4)

를 이용하여, Rx1과 Rx2에서의 입력 전력 대비 출력 전력인 $|S_{10}|^2$ 와 $|S_{20}|^2$ 을 각각 다음과 같이 이끌어 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} |S_{10}|^2 &= \frac{4Q_0 \zeta_1 \beta_0 \beta_1}{(1 + Q_0 \zeta_1 + Q_0 \zeta_2)^2}, \\ |S_{20}|^2 &= \frac{4Q_0 \zeta_2 \beta_0 \beta_2}{(1 + Q_0 \zeta_1 + Q_0 \zeta_2)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\beta_0 = \frac{R_S}{Z_0}$, $\beta_1 = \frac{R_L}{Z_1}$, $\beta_2 = \frac{R_L}{Z_2}$ 로 정의된다. 최종적으로 3-코일 WPT 시스템의 전체 효율은 다음과 같이 $|S_{10}|^2$ 와 $|S_{20}|^2$ 의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \eta &= |S_{10}|^2 + |S_{20}|^2 \\ &= \frac{4Q_0 \beta_0 (\zeta_1 \beta_1 + \zeta_2 \beta_2)}{(1 + Q_0 \zeta_1 + Q_0 \zeta_2)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

이 결과를 바탕으로 4장에서 ADS 시뮬레이션을 통해 3-코일 WPT 시스템의 효율에 영향을 미치는 요소를 분석해 보고자 한다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 ADS를 이용한 시뮬레이션을 통해 분석의 정확성을 확인하였다. 그림 2는 중앙에 위치한 Tx와 양쪽에 위치한 Rx1과 Rx2로 구성된 ADS 시뮬레이션 환경을 보여준다. Tx, Rx1, Rx2는 각각 7.4uH의 인덕턴스, 74.5pF의 커패시턴스, 2.7옴의 내부 저항, 50옴의 소스 저항과 부하 저항이 연결되어 있

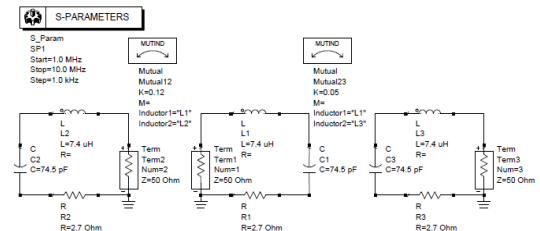


그림 2. ADS simulation environments
Fig. 2. ADS 시뮬레이션 환경

며, 이때의 품질계수 및 공진주파수는 6.0과 6.78 MHz이다.

그림 3은 Tx와 Rx1 사이의 커플링 계수(k_{01})에 따른 전체 효율을 보여주는 결과이다. Tx와 Rx2 사이의 커플링 계수를 각각 $k_{02} = 0.05$, $k_{02} = 0.1$, $k_{02} = 0.15$ 로 고정된 3가지 경우에 대해서 결과를 확인하였다. k_{02} 가 고정된 경우, 시스템 전체 효율을 최대화하는 최적의 k_{01} 값이 존재하며, 이 k_{01} 값에 상응되는 거리 값이 Tx와 Rx1 사이의 최적의 거리가 된다. 특히 $k_{02} = 0.05$ 일 때는 $k_{01} = 0.165$, $k_{02} = 0.1$ 일 때는 $k_{01} = 0.135$, $k_{02} = 0.15$ 일 때는 $k_{01} = 0.075$ 가 최적의 값이었다. 이는 Tx와 Rx2가 멀리 떨어져 있을수록 ($k_{02} = 0.05$), Rx1을 Tx와 가까이 위치시키는 것이 시스템 전체 효율 향상 측면에서 유리하다는 것을 보여준다. 또한, 분석 값과 시뮬레이션 값이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

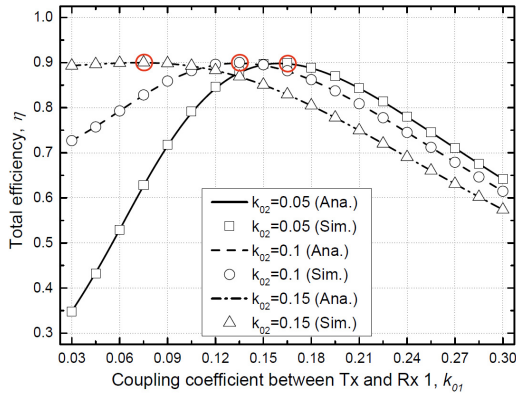


그림 3. Tx와 Rx1 사이의 커플링 계수에 따른 전체 효율
Fig. 3. Total efficiency against a coupling coefficient between Tx and Rx1

IV. 결론

본 논문에서는 3-코일 WPT 시스템의 효율 및 효율에 영향을 미치는 요소에 대하여 분석하였다. 먼저, 등가회로 모델을 이용하여 3-코일 WPT 시스템을 수식적으로 모델링하고, 전체 시스템 효율을 도출하였다. ADS 시뮬레이션을 통해 Tx와 Rx2의 위치(k_{02})가 고정되어 있을 때 최적의 Rx1의 위치(k_{01})가 존재함을 확인했으며, k_{02} 가 달라짐에 따라 k_{01} 에 미치는 효과도 분석하였다. 본 연구 결과는 3-coil WPT 시스템에서 코일 안테나의 배치와 효율 사이의 연관성을 밝힘으로써, WPT 시스템의 효율 향상과 관련하여 새로운 연구 방향성을 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Sci. Express*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [2] K. Lee, H. Yang, and I.-H. Ra, "Comparison of achievable efficiency for different resonator structures in a magnetic resonance-based wireless power transfer system," *J. KIICE*, vol. 21, no. 5, pp. 1035-1041, May 2017.
- [3] K. Lee and D.-H. Cho, "Diversity analysis of multiple transmitters in wireless power transfer system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 6, pp. 2946-2952, Jun. 2013.
- [4] A. Kurs, R. Moffatt, and M. Soljagic, "Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, pp. 044102, Jan. 2010.
- [5] M. Fu, T. Zhang, C. Ma, and X. Zhu, "Efficiency and optimal loads analysis for multiple-receiver wireless power transfer systems," *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, vol. 63, no. 3, pp. 801-812, Mar. 2015.
- [6] K. Lee and D.-H. Cho, "Analysis of wireless power transfer for adjustable power distribution among multiple receivers," *IEEE Ant. Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 950-953, 2015.
- [7] M. Fu, T. Zhang, P. C.-K. Luk, X. Zhu, and C. Ma, "Compensation of cross coupling in multiple-receiver wireless power transfer systems," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 12, no. 2, pp. 474-482, Apr. 2016.