

2개의 수신기가 존재하는 무선전력전송 시스템의 효율 분석

이 기 송*, 신 경 섭^o

Analysis of Power Transfer Efficiency for Wireless Power Transfer System with Two Receivers

Kisong Lee*, Kyungseop Shin^o

요 약

본 논문에서는 등가회로 모델을 이용하여 2개의 수신기가 존재하는 무선전력전송 시스템을 수학적으로 모델링하고, 각각의 수신기에서 달성 가능한 효율 및 전체 시스템 효율을 도출하였다. 또한, Advanced Design System을 이용한 회로 수준의 시뮬레이션을 통해 분석 결과를 검증하고, 수신기 1과 수신기 2가 고정된 경우 최적의 송신기 위치가 존재함을 보였다. 송신기와 수신기 2 사이에 relay가 존재하는 시스템과의 비교를 통해, 송신기가 중간에 위치한 공진기에 가까울수록 제안 시스템의 효율이 더 좋고, 송신기가 중간에 위치한 공진기에서 멀어질수록 relay 시스템의 효율이 더 좋음을 확인하였다.

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

ABSTRACT

In this paper, we present a wireless power transfer (WPT) system with two receivers using an equivalent circuit model and derive a power transfer efficiency (PTE) at each receiver and a total system PTE. We demonstrate the analytical results by using circuit-level simulations with Advanced Design System, and show that there is an optimal placement of transmitter when the position of two receivers is fixed. In addition, in comparison with a WPT relay system, it is confirmed that the proposed system achieves higher PTE than the WPT relay system as the distance between transmitter and intermediate resonator is shorter. Otherwise, the WPT relay system achieves higher PTE than the proposed system.

1. 서 론

최근 스마트폰, 태블릿 PC, 노트북 등 휴대할 수 있는 전자기기의 수요가 늘어남에 따라, 전자기기의 배터리를 충전의 번거로움을 호소하는 경우가 늘고 있다.

무선충전에 대한 소비자들의 요구가 늘어남에 따라, 무선전력전송(Wireless Power Transfer, WPT) 기술은 기존의 유선 충전의 번거로움을 극복하고 사용자의 편의성을 향상시킬 수 있는 기술로 각광받고 있다. 2007년 MIT에서는 자기 공진 기반의 WPT 기술의

* 이 논문은 2017학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2017)

• First Author : Chungbuk National University, School of Information and Communication Engineering, kslee85@cbnu.ac.kr, 정희원

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

논문번호 : KICS2017-11-328 Received November 1, 2017; Revised November 30, 2017; Accepted December 5, 2017

가능성은 실험적으로 보였다^[1]. 뿐만 아니라, 회로적으로 WPT 시스템을 모델링하고, 전력전송효율 (Power Transfer Efficiency, PTE)을 향상시키기 위한 방안들 역시 제안되었다^[2,3]. [4]에서는 2개의 송신기가 존재하는 환경에서 전력전송효율 측면에서의 다이버시티(Diversity) 효과를 분석하였고, [5]에서는 relay가 존재하는 WPT 시스템에서 최적의 송신기 위치를 도출하였다. 또한, 다수의 수신기가 존재하는 환경에서 각 수신기가 필요로 하는 전력을 전송해주기 위한 방안도 제안되었다^[6,7]. 하지만 2개의 수신기가 존재하는 WPT 시스템의 전체 효율 도출 및 WPT relay 시스템과의 비교 분석에 관한 기존 연구는 존재하지 않는다.

본 논문에서는 1 개의 송신기(Transmitter, Tx)와 2 개의 수신기(Receiver, Rx)가 존재하는 WPT 시스템에서 달성 가능한 전력전송효율을 분석하고자 한다. 등가회로 모델을 이용하여 WPT 2-Rx 시스템을 수학적으로 모델링 한 후, 각각의 Rx에서 달성 가능한 효율 및 전체 시스템 효율을 도출하였다. Advanced Design System (ADS) 시뮬레이션을 통해 Rx1과 Rx2의 위치가 고정되어 있을 때 효율을 최대화하는 최적의 Tx 위치가 존재함을 보였다. 또한, 중간에 Rx1 대신 relay가 존재하는 WPT relay 시스템과의 비교를 통해, Tx의 위치에 따라 두 시스템의 성능이 서로 역전될 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문은 2개의 수신기가 존재하는 무선전력전송 시스템에서 최적의 공진기 위치를 결정하는데 활용할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 1개의 Tx와 2개의 Rx가 존재하는 자기공진 (Magnetic resonance) 기반의 WPT 시스템을 고려한다.

그림 1은 본 논문에서 고려하고 있는 WPT 시스템의 등가회로 모델을 보여준다. Tx는 외부 전압 V_s 와 소스 저항 R_s 가 연결되어 있으며, 각각의 Rx에는 부

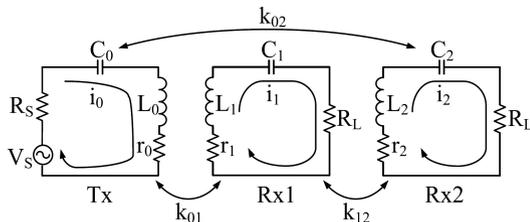


그림 1. 자기공진 기반 2-Rx 무선전력전송 시스템.
Fig. 1. Magnetic resonance based WPT 2-Rx system.

하 저항 R_L 이 연결되어 있다. 각각의 공진기는 L_i 의 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, 각각의 공진기는 같은 공진 주파수 f_0 에서 공진할 수 있도록 C_i 의 커패시턴스가 각각 연결되어 있다. 이러한 경우 공진기가 공진하는 주파수는 다음의 수식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}. \quad (1)$$

또한, 각각의 공진기에서의 등가 입력 임피던스는 아래의 수식과 같다.

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

Tx의 교류 전압 V_s 로부터 교류 전류 i_0 가 발생하며, 이는 다시 자기장을 발생시킨다. i_0 에 의해 생성된 일부의 자기장은 Rx1으로 전달되고, 이 자기장에 의해 교류 전류 i_1 이 유도된다. 또한, 일부의 자기장은 Rx2로 전달되어 교류 전류 i_2 를 발생시킨다. 이 과정을 통해 각각의 Rx는 Tx로부터 무선으로 전력을 전송 받을 수 있다. 공진기 i 와 j 사이의 자기장 세기는 다음과 같은 커플링 계수(Coupling coefficient) k_{ij} 로 표현할 수 있다. 여기서 k_{ij} 는 공진기 i 와 j 사이의 거리인 d_{ij} 의 세 제곱에 반비례한다^[4]. 또한, 커플링 계수는 다음과 같이 $k_{ij} = k_{ji}$ 상호 보완적이다. 이를 이용하여, 키르히호프 전압 법칙(Kirchhoff's Voltage Law, KVL)에 의해 다음과 같은 관계식을 생성할 수 있다.

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

여기서 Tx와 Rx2는 충분히 떨어져 있어, Tx와 Rx2 사이의 교차결합(cross coupling)은 $k_{02} \approx 0$ 으로 무시할 수 있다고 가정한다^[4,5]. 수식 (3)으로부터 각각의 공진기에서 발생하는 전류는 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 i_0 &= \frac{V_S}{Z_0 + \frac{\omega^2 k_{01}^2 L_0 L_1 Z_2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 k_{12}^2 L_1 L_2}}, \\
 i_1 &= \frac{j\omega k_{01} \sqrt{L_0 L_1} Z_2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 k_{12}^2 L_1 L_2} \cdot i_0, \\
 i_2 &= \frac{\omega^2 k_{01} k_{12} L_1 \sqrt{L_0 L_2}}{Z_1 Z_2 + \omega^2 k_{12}^2 L_1 L_2} \cdot i_0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

III. WPT 2-Rx 시스템에서의 효율

3장에서는 2장의 등가회로 모델로부터 유도한 기본적인 수식을 이용하여 WPT 2-Rx 시스템의 전체 효율을 도출하고자 한다. 먼저, S 파라미터 정의^[2]와 수식 (4)를 이용하여 Rx1에서의 S_{10} 을 다음의 관계를 이끌어 낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 |S_{10}| &= 2 \frac{V_{1,L}}{V_S} \sqrt{\frac{R_S}{R_L}} \\
 &= 2 \frac{j\omega \sqrt{L_0 L_1} \sqrt{R_S R_L} Z_2 k_{01}}{Z_0 Z_1 Z_2 + \omega^2 L_1 L_2 Z_0 k_{12}^2 + \omega^2 L_0 L_1 Z_2 k_{01}^2}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $V_{1,L} = i_1 \cdot R_L$ 로써 Rx1의 부하저항에 걸린 전압이다. (5)와 비슷하게 Rx2에서의 S_{20} 을 다음과 같이 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 |S_{20}| &= 2 \frac{V_{2,L}}{V_S} \sqrt{\frac{R_S}{R_L}} \\
 &= 2 \frac{\omega^2 L_1 \sqrt{L_0 L_2} \sqrt{R_S R_L} k_{01} k_{12}}{Z_0 Z_1 Z_2 + \omega^2 L_1 L_2 Z_0 k_{12}^2 + \omega^2 L_0 L_1 Z_2 k_{01}^2}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $V_{2,L} = i_2 \cdot R_L$ 로써 Rx2의 부하저항에 걸린 전압이다. S_{10} 와 S_{20} 는 입력 전압 대비 출력 전압으로써, 순방향 전압 비를 나타낸다. 공진주파수 ω_o 에서는 수식 (5)와 (6)의 Z_i 에서 리액턴스와 관련된 수식인 $j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i}$ 가 사라져 저항 성분만 남는다. 이를 이용하여, 각각의 Rx에서의 입력 전력 대비 출력 전력인 η_{10} 과 η_{20} 은 전압 비인 S_{10} 와 S_{20} 를 제공하여 각각 다음과 같이 얻을 수 있다^[8].

$$\begin{aligned}
 \eta_{10} &= |S_{10}|^2 \\
 &= \frac{4 Q_0^2 Q_1^2 k_{01}^2}{\tilde{Q}_0 \tilde{Q}_1 (1 + Q_1 Q_2 k_{12}^2 + Q_0 Q_1 k_{01}^2)^2}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \eta_{20} &= |S_{20}|^2 \\
 &= \frac{4 Q_0^2 Q_1^2 Q_2^2 k_{01}^2 k_{12}^2}{\tilde{Q}_0 \tilde{Q}_2 (1 + Q_1 Q_2 k_{12}^2 + Q_0 Q_1 k_{01}^2)^2}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 $Q_0 = \frac{\omega_o L_0}{R_S + r_0}$, $Q_1 = \frac{\omega_o L_1}{R_L + r_1}$, $Q_2 = \frac{\omega_o L_2}{R_L + r_2}$, $\tilde{Q}_0 = \frac{\omega_o L_0}{R_S}$, $\tilde{Q}_1 = \frac{\omega_o L_1}{R_L}$, $\tilde{Q}_2 = \frac{\omega_o L_2}{R_L}$ 로 정의되며, Q_i 는 공진기 i 의 품질계수(Quality factor)이다.

최종적으로 WPT 2-Rx 시스템의 전체 효율은 다음과 같이 η_{10} 과 η_{20} 의 합으로 표현 가능하다.

$$\begin{aligned}
 \eta &= \eta_{10} + \eta_{20} \\
 &= \frac{4 Q_0^2 Q_1^2 \tilde{Q}_2 k_{01}^2 + 4 Q_0^2 Q_1^2 Q_2^2 \tilde{Q}_1 k_{01}^2 k_{12}^2}{\tilde{Q}_0 \tilde{Q}_1 \tilde{Q}_2 (1 + Q_1 Q_2 k_{12}^2 + Q_0 Q_1 k_{01}^2)^2}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

본 논문에서는 WPT 2-Rx 시스템의 비교 시스템으로써, Tx와 Rx2 사이에 Rx1 대신 relay가 존재하는 WPT relay 시스템을 고려하고자 한다. WPT relay 시스템의 효율은 [5]에서 도출하였듯이 다음과 같다.

$$\eta_r = \frac{4 Q_0^2 Q_r^2 Q_2^2 k_{0r}^2 k_{2r}^2}{\tilde{Q}_0 \tilde{Q}_2 (1 + Q_r Q_2 k_{2r}^2 + Q_0 Q_r k_{0r}^2)^2}. \tag{10}$$

여기서 아래첨자 r 은 relay를 나타내며, $Q_r = \frac{\omega_o L_r}{r_r}$ 로 정의되며, L_r 과 r_r 은 각각 relay의 인덕턴스 및 내부저항이다. 4장에서 ADS 시뮬레이션을 통해 WPT 2-Rx 시스템과 WPT relay 시스템의 성능을 비교해보고자 한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 ADS를 이용하여 회로 수준(Circuit-level)의 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2는 Tx, Rx1, 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 있으며, 이때의 품질계수 및 공진주파수는 각각 6.0 및 6.78MHz이다. 비교방안으로써 중앙에 Rx1 대신 relay가 놓여있는 WPT relay 시스템을 고려하였다. Relay는 기본적으로 Tx 및 Rx와 동일한 구조를 갖으며, 소스 및 부하

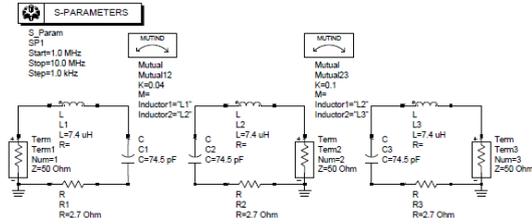


그림 2. ADS 시뮬레이션 환경.
Fig. 2. ADS simulation environments.

저항이 달려있지 않아 116.8의 높은 품질계수를 갖는다. 본 시뮬레이션에서 사용된 파라미터 값은 지름 30cm의 안쪽으로 3번 감긴 원형 spiral 형태의 코일 안테나에서 얻어진 값을 기반으로 하였으며, 자세한 값은 표 1에 정리가 되어 있다.

그림 3은 Rx1과 Rx2 사이의 커플링 계수가 0.1일 때 ($k_{12} = 0.1$), Tx와 Rx1 사이의 커플링 계수(k_{01})에 따른 각 Rx에서의 효율을 보여주는 결과이다. k_{01} 이 0.04에서 0.2까지 증가할수록 각 Rx에서의 효율은 증가하며, k_{01} 이 0.2보다 커지는 경우 각 Rx에서의 효율은 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 k_{12}

표 1. ADS 시뮬레이션에 사용되는 파라미터
Table 1. Parameters for ADS simulations

	Tx	Rx 1, Rx 2	Relay
Li	7.4 uH	7.4 uH	7.4 uH
Ci	74.5 pF	74.5 pF	74.5 pF
RS, RL	50 Ω	50 Ω	50 Ω
ri	2.7 Ω	2.7 Ω	2.7 Ω
Qi	6.0	6.0	116.8
fo	6.78 MHz	6.78 MHz	6.78 MHz

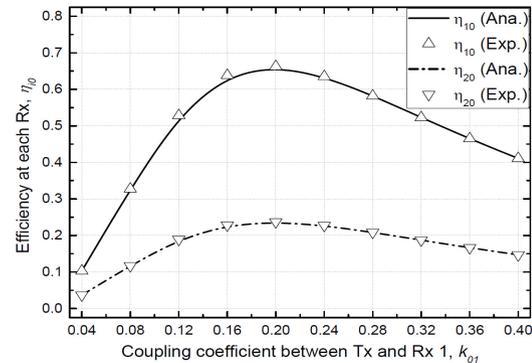


그림 3. Tx와 Rx1 사이의 커플링 계수에 따른 각 Rx에서의 효율.
Fig. 3. Efficiency at each Rx vs. coupling coefficient between Tx and Rx1.

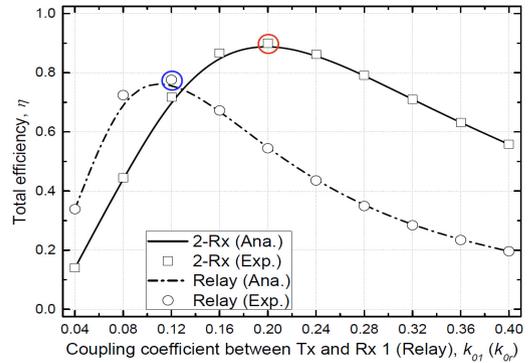


그림 4. Tx와 Rx1 사이의 커플링 계수에 따른 전체 효율.
Fig. 4. Total efficiency vs. coupling coefficient between Tx and Rx1.

가 고정된 경우, 각 Rx에서의 효율을 최대화하는 최적의 k_{01} 값이 존재하며, k_{01} 값에 상응되는 거리 값이 Tx와 Rx1 사이의 최적의 거리가 됨을 알 수 있다. 또한, 분석 값과 시뮬레이션 값이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 Rx1과 Rx2 사이의 커플링 계수가 0.1일 때 ($k_{12} = 0.1$), Tx와 Rx1 사이의 커플링 계수(k_{01})에 따른 전체 효율을 보여주는 결과이다. 전체 효율측면에서 최적의 k_{01} 값은 WPT 2-Rx 시스템의 경우 0.2이며, WPT relay 시스템의 경우 0.12이다. 이를 통해 중간에 위치한 공진기(Rx1 or relay)와 Rx2의 위치가 고정된 경우, WPT 2-Rx 시스템은 Tx와 Rx1사이의 거리가 비교적 가까울 때가 최적이고 WPT relay 시스템의 경우 Tx와 relay 사이의 거리가 비교적 멀 때가 최적임을 알 수 있다. 또한, k_{01} 값이 0.12보다 작거나 작을 때는 WPT relay 시스템이 더 높은 전체 효율을 보이며, k_{01} 값이 0.12보다 클 때는 WPT 2-Rx 시스템이 더 높은 효율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 장거리 전력 전송을 위해서는 relay를 사용하는 것이 유리하다는 기존의 결과와 부합한다. 그림 4에서도 역시 분석 값과 시뮬레이션 값이 일치함을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 등가회로 모델을 이용하여 WPT 2-Rx 시스템을 수식적으로 모델링하고 각각의 Rx에서 달성 가능한 효율 및 전체 시스템 효율을 도출하였다. ADS 시뮬레이션을 통해 Rx1과 Rx2의 위치가 고정되어 있을 때 최적의 Tx의 위치도 보였다. 또한,

WPT relay 시스템을 비교 시스템으로 선정하여 Tx의 위치에 따른 두 시스템의 효율을 비교 분석하였다. Tx와 relay 사이의 거리가 상대적으로 멀수록 WPT relay 시스템의 효율이 더 높은 반면, Tx와 Rx1 사이의 거리가 상대적으로 가까울수록 WPT 2-Rx 시스템의 효율이 더 높은 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 WPT 2-Rx 시스템의 효율 향상을 위한 최적의 공진기 배치에 관한 방향성을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Sci. Express*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.

[2] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.

[3] 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.

[4] 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.

[5] K. Lee and S. H. Chae, "Effect of quality factor on determining the optimal position of a transmitter in wireless power transfer using a relay," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 27, no. 5, pp. 521-523, May 2017.

[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] Y. Zhang, T. Lu, Z. Zhao, F. He, K. Chen, and L. Yuan, "Selective wireless power transfer to multiple loads using receivers of

different resonant frequencies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6001-6005, Nov. 2015.

[8] S. Y. R. Hui, W. X. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, Sept. 2014.

이 기 송 (Kisong Lee)



2013년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 2013년 9월~2015년 2월 : ETRI 융합기술연구소 연구원
 2015년 3월~2017년 8월 : 군산대학교 정보통신공학과 조교수

2017년 9월~현재 : 충북대학교 정보통신공학부 조교수
 <관심분야> 이동통신, 무선전력전송, 차세대 융합통신

신 경 섭 (Kyungseop Shin)



2011년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 2015년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 2015년 2월~2017년 8월 : KT 융합기술원 인프라연구소 5G TF 선임연구원

2017년 9월~현재 : 세명대학교 컴퓨터학부 조교수
 <관심분야> 차세대 이동통신, IoT 네트워크, 무선전력전송