

정렬이 어긋난 릴레이가 무선 전력 전송 효율에 미치는 영향

이 기 송*, 이 웅 섭^o

Effect of Misaligned Relay on Efficiency of Wireless Power Transfer

Kisong Lee*, Woongsup Lee^o

요 약

본 논문에서는 송수신기와 정렬이 어긋나게 배치된 릴레이가 무선 전력 전송의 효율에 미치는 영향을 수학적으로 분석하였다. 또한, 회로 레벨의 시뮬레이션을 통해 분석의 정확성을 검증하였고, 릴레이가 심하게 어긋나는 경우 릴레이를 사용하지 않는 것이 더 높은 전력 전송 효율을 보장함을 확인했다.

Key Words : Wireless power transfer, achievable efficiency, misalignment, relay, load resistance

ABSTRACT

In this paper, we mathematically analyze the effect of misaligned relay with a transmitter or a receiver on the efficiency of wireless power transfer. Through circuit-level simulations, we validate the exactness of our analysis and show that it is better not to use the relay for ensuring higher achievable efficiency when it is severely misaligned.

I. 서 론

최근 높은 효율을 유지하면서 전력 전송 거리를 늘리기 위하여 릴레이를 활용한 무선 전력 전송(Wireless power transfer, WPT)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[1-4]. [1]에서는 송신기와 수신기의 중앙에 릴레이가 존재하는 환경에서 최적의 임피던스 매칭 방안을 제안하였으며, [2]에서는 릴레이를 이용하면 근거리에서도 안정적인 전력 전송 성능을 보장할 수 있음을 보였다. [3]에서는 효율 향상을 위한 송신기와 릴레이 사이의 최적의 거리를 도출하였으며, [4]에서는 효율 최대화 측면에서 최적의 릴레이 수가 존재함을 보였다. 하지만 공진기 간의 정렬이 어긋난 경우 공진기 사이의 유도 결합 세기가 약해져 시스템의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고^[5], 기존 연구는 모든 공진기가 완벽히 정렬된 환경에서의 연구가 대부분이다.

본 논문에서는 릴레이가 송수신기와 어긋나게 배치된 경우 전력 전송의 효율에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 등가 회로 모델을 이용하여 최적의 부하 저항을 찾고, 이를 이용하여 달성 가능한 효율을 수식적으로 도출하였다. 또한, Advanced Design System(ADS) 시뮬레이션을 통해 도출한 수식의 정확성을 검증하고, 릴레이가 특정 값 이상으로 어긋난 경우는 릴레이의 사용이 오히려 시스템의 성능을 열화시킬 수 있음을 확인하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하고 있는 WPT 시스템의 등가 회로 모델을 보여준다. 한 쌍의 송신기(Transmitter, Tx)와 수신기(Receiver, Rx) 사이에 1개의 릴레이(Relay)가 배치되어 있다. Tx는 전원 공급을 위한 외부 전압 V_S 가 연결되어 있으며, Rx에는 전달된 전력을 소비하는 부하 저항 R_L 이 연결되어 있다. 각각의 공진기는 내부 저항 r_i 과 자기 인덕턴스 L_i 를 가지고 있다. 여기서 아래첨자 $i \in \{0, r, 1\}$ 이며, 0은 Tx, r 은 릴레이, 1은 Rx를 의미한다. 또한, 모든 공진

* 이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B6003297).

• First Author : (ORCID:0000-0001-8206-4558)Dongguk University, Department of Information and Communication Engineering, kisonlee@dongguk.edu, 부교수, 정희원

^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-9431-7804)Gyeongsang National University, Department of Information and Communication Engineering, Institute of Marine Industry, wslee@gnu.ac.kr, 부교수, 정희원

논문번호 : 202004-095-A-LU, Received April 23, 2020; Revised April 27, 2020; Accepted April 27, 2020

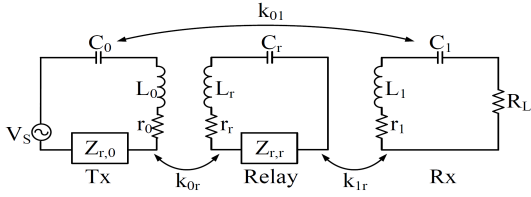


그림 1. 등가 회로 모델
Fig. 1. Equivalent circuit model

기에는 식 (1)과 같은 동일한 공진주파수 f_0 를 갖도록 캐패시턴스 C_i 가 연결되어 있다.

$$\omega_o = 2\pi f_o = \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (1)$$

공진기 i 와 j 간의 자기 결합의 세기는 커플링 계수 (Coupling coefficient) $k_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}}$ 로 나타낸다.

여기서 M_{ij} 은 두 공진기 간의 상호인덕턴스이다.

본 논문에서는 인접하지 않은 두 공진기 사이의 커플링 계수(k_{01})는 인접한 두 공진기 사이의 커플링 계수(k_{0r} , k_{1r})보다 충분히 작다고 가정 한다 ($k_{01} \approx 0$)^[4]. 또한, 공진기의 정렬이 맞지 않는 경우 결합이 약해져 커플링 계수는 작아진다^[5].

그림 1에서 확인할 수 있듯이, Rx에 의해 relay에서 보이는 반사 임피던스($Z_{r,r}$)와 relay에 의해 Tx에서 보이는 반사 임피던스($Z_{r,0}$)는 각각 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Z_{r,r} = \frac{\omega_o^2 k_{1r}^2 L_1 L_r}{R_L + r_1}, \quad Z_{r,0} = \frac{\omega_o^2 k_{0r}^2 L_o L_r}{Z_{r,r} + r_r}. \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 Tx에서 Rx로 전달되는 전력 전송 효율(η)은 식 (3)과 같이 도출할 수 있다. 식 (3)에서 Q_i 는 공진기 i 의 품질 계수(Quality factor)로써

공진의 세기를 나타내며, $Q_i = \frac{\omega_o L_i}{r_i}$ 로 표현된다.

또한, $Q_L = \frac{\omega_o L_1}{R_L}$ 이다. 식 (3)에서 우리는 다음과

같은 3가지 조건에서 η 가 향상될 수 있음을 확인할 수 있다. 첫 번째 두 공진기 사이의 자기결합이 강하여 k_{ij} 가 클 때, 두 번째 각 공진기가 높은 품질 계수 Q_i 를 가질 때, 마지막으로 부하 저항을 잘 조절하여 Q_L 값을 최적화하는 것이다.

η 를 Q_L 에 대하여 미분한 다음의 조건 $\frac{\partial \eta}{\partial Q_L} = 0$ 으로부터 최적의 Q_L 값을 식 (4)와 같이 찾을 수 있다.

$$Q_L^* = \frac{Q_1 \sqrt{1 + Q_o Q_r k_{0r}^2}}{\sqrt{(1 + Q_r Q_1 k_{1r}^2)(1 + Q_o Q_r k_{0r}^2 + Q_r Q_1 k_{1r}^2)}}. \quad (4)$$

또한, Q_L 과 R_L 의 관계로부터 최적의 부하 저항은 식 (5)와 같이 찾을 수 있다.

$$R_L^* = \frac{r_1 \sqrt{(1 + Q_r Q_1 k_{1r}^2)(1 + Q_o Q_r k_{0r}^2 + Q_r Q_1 k_{1r}^2)}}{\sqrt{1 + Q_o Q_r k_{0r}^2}}. \quad (5)$$

식 (5)를 식 (3)에 대입함으로써 달성 가능한 전력 전송 효율(Achievable power transfer efficiency)은 식 (6)과 같이 얻어진다. 식 (6)에서 η^* 는 릴레이와 Tx 혹은 Rx 사이의 커플링 계수인 k_{0r} 와 k_{1r} 에 비례하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 릴레이의 위치가 어긋나 Tx 및 Rx와 정렬이 맞지 않는 경우 k_{0r} 와 k_{1r} 의 값이 작아지며, 이는 결과적으로 달성 가능한 전력 전송 효율을 심각하게 저하시킨다.

$$\eta = \frac{Z_{r,0}}{r_o + Z_{r,0}} \times \frac{Z_{r,r}}{Z_{r,r} + r_r} \times \frac{R_L}{R_L + r_1} = \frac{1}{1 + \frac{Q_L}{Q_1} \left[1 + \frac{1}{Q_r Q_1 k_{1r}^2} \left(1 + \frac{Q_1}{Q_L} \right)^2 + \frac{1}{Q_o Q_r k_{0r}^2} \left(\frac{1}{\sqrt{Q_r Q_1 k_{1r}^2}} \left(1 + \frac{Q_1}{Q_L} \right) + \sqrt{Q_r Q_1 k_{1r}^2} \right)^2 \right]}}. \quad (3)$$

$$\eta^* = \frac{Q_o Q_r^2 Q_1 k_{0r}^2 k_{1r}^2}{\left(\sqrt{(1 + Q_o Q_r k_{0r}^2)(1 + Q_r Q_1 k_{1r}^2)} + \sqrt{1 + Q_o Q_r k_{0r}^2 + Q_r Q_1 k_{1r}^2} \right)^2}. \quad (6)$$

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 분석의 정확성을 확인하기 위해 ADS를 이용해 회로 레벨의 시뮬레이션을 시행하였다. 각각의 공진기는 $r_i = 2.7\Omega$, $L_i = 7.35\mu H$, $C_i = 74.5\rho F$ 가 연결되어 $Q_i = 116$ 을 가지며, $f_0 = 6.78MHz$ 의 주파수에서 공진한다. 또한, Tx와 Rx 사이의 거리는 60cm라 가정하고 $k_{01} = 0.0136$ 으로 설정하였다. 시뮬레이션에서 사용한 파라미터들은 [3]의 실제 실험값을 참고하였다.

그림 2는 릴레이와 송수신기 사이의 결합 계수에 대한 최적의 부하 저항의 관계를 보여준다. 본 결과에서 exact는 인접하지 않은 공진기 사이의 결합 계수 k_{01} 까지 고려하여 얻은 정확한 값이며, anal.은 식 (5)

로부터 얻은 분석 값이다. 결합 계수가 커질수록 최적의 부하 저항이 커짐을 확인할 수 있으며, anal. 값은 exact 값과 같은 경향성을 보이며 대체로 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 릴레이와 송수신기 사이의 결합 계수에 대한 달성 가능한 전력 전송 효율을 보여준다. 결합 계수가 작을수록 송수신기와 릴레이의 정렬이 심하게 어긋난 것으로 해석할 수 있으며, 결합 계수가 0.02보다 작은 경우에는 릴레이를 사용하지 않은 경우보다 오히려 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. anal. 값은 exact 값과 대체적으로 일치하나 결합 계수가 작을 때는 오차가 발생한다. 릴레이와 송수신기 사이의 결합 계수가 작아짐에 따라 분석에서 충분히 작다고 가정했던 k_{01} 의 영향이 k_{0r} 이나 k_{1r} 에 비해 작지 않아져 오차가 발생한다.

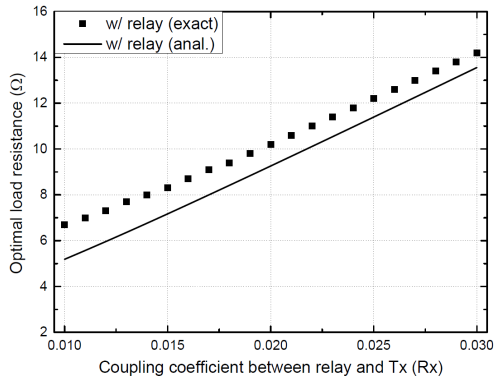


그림 2. 최적의 부하 저항 vs. 릴레이와 송수신기 사이의 결합 계수
Fig. 2. Optimal load resistance vs. Coupling coefficient between relay and Tx (Rx)

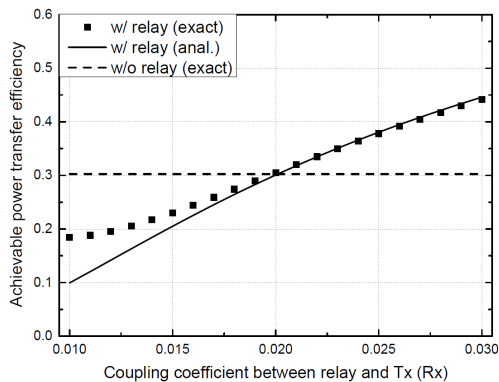


그림 3. 달성 가능한 전력 전송 효율 vs. 릴레이와 송수신기 사이의 결합 계수
Fig. 3. Achievable power transfer efficiency vs. Coupling coefficient between relay and Tx (Rx)

IV. 결론

본 논문에서는 송수신기와 어긋나게 배치된 릴레이가 무선 전력 전송 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 수학적 모델링을 통해 최적의 부하 저항 및 달성 가능한 전력 전송 효율을 수식적으로 도출한 후, 회로 레벨의 시뮬레이션을 통해 분석의 정확성을 검증하였다. 또한, 릴레이와 송수신기 사이의 정렬이 심하게 어긋나 결합 계수가 0.02이하로 떨어지게 되면, 오히려 릴레이를 사용하지 않는 것이 더 높은 효율을 달성함을 확인하였다.

References

- [1] J. W. Kim, H. C. Son, K. H. Kim, and Y. J. Park, "Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 389-392, 2011.
- [2] J. Lee, K. Lee, and D.-H. Cho, "Stability improvement of transmission efficiency based on a relay resonator in a wireless power transfer system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 3297-3300, May 2017.
- [3] K. S. Lee and S. H. Chae, "Power transfer efficiency analysis of intermediate-resonator

for wireless power transfer,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 3, pp. 2484-2483, Mar. 2018.

- [4] J. Lee and K. Lee, “Optimal number of relays for maximizing the efficiency of wireless power transfer system,” *J. KICS*, vol. 44, no. 1, pp. 61-64, Jan. 2019.
- [5] K. Fotopoulou and B. W. Flynn, “Wireless power transfer in loosely coupled links: Coil misalignment model,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 2, pp. 416-430, Feb. 2011.