

# 무선전력전송 시스템의 효율을 최대화하는 최적의 릴레이 수

이준섭\*, 이기송<sup>o</sup>

## Optimal Number of Relays for Maximizing the Efficiency of Wireless Power Transfer System

JunSeob Lee\*, Kisong Lee<sup>o</sup>

### 요약

본 논문에서는 릴레이가 포함된 자기공진 무선전력 전송 시스템에서 릴레이의 개수와 시스템 효율간의 관계를 수학적으로 분석하였다. 또한, Advanced Design System을 이용한 시뮬레이션을 통해 송신기와 수신기 사이의 거리가 일정할 때, 최대의 효율을 달성하는 최적의 릴레이 개수가 존재함을 확인했다.

**Key Words** : Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance, Efficiency, Coupling Coefficient, Relay

### ABSTRACT

In this paper, we mathematically analyzed the relationship between the number of relays and the efficiency of a magnetic resonant wireless power transfer system. In addition, through Advanced Design System simulations, we confirmed that there is an optimal number of relays for achieving the maximum system efficiency when the distance between the transmitter and the receiver is constant.

## I. 서론

최근 IoT 기기와 휴대용 전자기기의 발전과 함께 유선 충전의 불편함을 해소하고자 무선전력전송 기술에 대한 관심이 높아지면서, 이와 관련된 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 무선전력전송은 크게 자기공진 방식과 자기유도방식으로 나뉜다. 자기공진을 이용한 무선전력전송(Magnetic Resonant Wireless Power Transfer, MRWPT)시스템은 자기유도방식의 무선전력전송과 비교하여, 높은 효율을 유지하면서 전달 거리를 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다<sup>1)</sup>.

MRWPT 시스템의 최대 장점인 전달 거리를 늘리기 위한 여러 가지 방법 중 대표적인 방법으로 릴레이를 송수신기 사이에 배치하는 방법이 있다<sup>2-4)</sup>. 이와 관련된 기존의 연구 중 [2]는 릴레이가 한 개일 때 송신기와 수신기와의 거리에 따라 변하는 시스템의 효율에 대해서 연구했고, 기존연구 [3]은 품질계수(Quality factor)와 연관시켜 최적의 릴레이 위치에 대해 분석했다. 또한, [4]에서는 다수의 릴레이가 배치되는 환경에서 최적의 릴레이 배치는 등간격이 아님을 보이고, 릴레이가 배치되는 각도가 시스템에 미치는 영향에 대해서 분석했다. [5]에서는 중간에 위치한 공진기가 릴레이인지 수신기인지에 따라 최적의 송신기 위치를 도출하였다.

릴레이를 고려한 기존의 연구는 대부분 최적의 릴레이 배치와 관련한 것으로, 릴레이의 수가 시스템의 효율에 미치는 영향을 분석한 연구는 없었다. 따라서 본 논문에서는 송신기와 수신기의 위치가 고정된 환경에서 다수의 릴레이가 존재할 때의 효율을 수식적으로 도출해보고, Advanced Design System (ADS) 시뮬레이션을 통해 시스템의 효율을 최대화하는 최적의 릴레이 수를 확인하고자 한다.

## II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 MRWPT 시스템의 등가회로 모델을 보여준다. 거리  $d_0$  만큼 떨어져 있는 한 쌍의 송신기(Transmitter, Tx)와 수신기(Receiver, Rx)가 존재하며, 송수신기 사이에 N개의 릴레이

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

• First Author : (ORCID:0000-0001-8206-4558)Chungbuk National University, School of Information and Communication Engineering, ljs30671@cbnu.ac.kr, 정희원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-6097-5369)Chungbuk National University, School of Information and Communication Engineering, kslee85@cbnu.ac.kr, 정희원

논문번호 : 201811-358-A-LU, Received November 7, 2018; Revised November 27, 2018; Accepted November 27, 2018

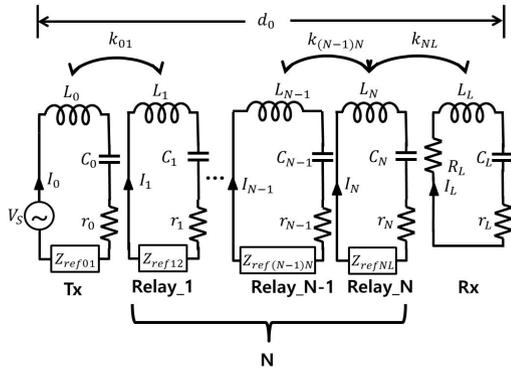


그림 1. 시스템 모델  
Fig. 1. System model

(Relay)가 배치되어 있다. Tx는 외부 전압  $V_S$ 로부터 전원을 공급 받고, Rx에는 부하 저항  $R_L$ 이 연결되어 있다. Tx, Rx, 릴레이 모두 각각 내부 저항  $r_i$ 과 인덕턴스  $L_i$ 를 가지고 있다. 또한, 모든 공진기가 동일한 공진주파수  $f_0$ 에서 공진 할 수 있도록 캐패시턴스  $C_i$ 를 연결한다. 여기서 아래첨자  $i \in \{0, 1, \dots, N, L\}$ 이며, 0은 Tx,  $i \in \{1, \dots, N\}$ 은 릴레이,  $L$ 은 Rx를 의미한다.

공진기  $i$ 와  $j$ 간의 자기결합의 정도는 커플링계수 (Coupling coefficient,  $k_{ij}$ )로 나타낼 수 있으며,

$$k_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}}$$

로 표현된다. 여기서  $M_{ij}$ 은 두 공진기 간의 상호인덕턴스(Mutual inductance)이다. Tx와 연결된 외부전원이 교류 전류를 발생시키고, 발생된 교류 전류가 인덕터를 통해서 자기장을 생성한다. 이때 발생한 자기장이 인접해 있는 릴레이의 인덕터에 전달되어 전류를 유도한다. 이러한 과정이 순차적으로 Rx까지 반복되면서, Rx는 무선으로 전력을 전달 받을 수 있게 된다.

본 논문의 시스템 모델에서는 두 공진기는 충분히 떨어져 있다고 가정하고, 인접하지 않은 공진기 간의 교차결합은 고려하지 않는다.

### III. 릴레이의 개수와 효율 간의 관계

3장에서는 릴레이를 이용한 MRWPT 시스템에서 릴레이의 개수가 시스템 전체의 효율에 어떤 영향을 미치는지 수식적으로 분석해보고자 한다. 먼저,  $(i + 1)$ 번째 공진기에 의해  $i$ 번째 공진기에서 보이는

반사 임피던스는 수식 (1)과 같이 표현 될 수 있다.

$$Z_{refi(i+1)} = \frac{\omega_0^2 k_{i(i+1)}^2 L_i L_{(i+1)}}{r_{(i+1)} + Z_{ref(i+1)(i+2)}} \quad (1)$$

수식 (1)에서  $i \in \{0, 1, \dots, N-1\}$ 이며, 제안하는 시스템 모델에서  $N + 1$ 번째 공진기는 Rx이므로  $Z_{refN(N+1)} = Z_{refNL}$  이 된다. 또한, Rx에 의해 N번째 릴레이에서 보이는 반사 임피던스  $Z_{refNL}$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{refNL} = \frac{\omega_0^2 k_{NL}^2 L_N L_L}{R_L + r_L} \quad (2)$$

외부 전원에서 공급된 전력은 공진기들을 거쳐 가면서 각 공진기의 내부저항 성분에 의해서만 소모되고, 전체 임피던스 중 반사 임피던스 비율만큼의 전력이 다음의 공진기로 전달된다. 그러므로 릴레이가  $N$ 개일 때의 시스템 전체의 효율  $\eta$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \left( \prod_{k=0}^N \frac{Z_{refk(k+1)}}{r_k + Z_{refk(k+1)}} \right) \frac{R_L}{R_L + r_L} \quad (3)$$

식(3)에서도 역시  $Z_{refN(N+1)} = Z_{refNL}$ 이 성립한다.

### IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 릴레이의 개수와 효율  $\eta$ 과의 상관 관계를 확인하기 위해  $f_0 = 6.78MHz$ 에서 공진하는 공진기를 시스템 모델에 맞춰 설계하고, ADS시뮬레이터를 이용해 회로 수준의 시뮬레이션을 시행하였다. Tx, Rx, 릴레이 모두 내부저항  $r = 2.7\Omega$ , 인덕턴스  $L = 7.35\mu H$ , 캐패시턴스  $C = 75pF$ 가 연결되어 있다. Rx에는 부하저항  $R_L = 50\Omega$ 이 추가적으로 연결되어 있다<sup>5)</sup>. Tx, Rx 사이의 거리( $d_0$ )가 각각 100cm일 때와 50cm일 때, 릴레이의 개수를 0개부터 16개까지 한 개씩 차례로 늘려가며 시뮬레이션을 시행했다.

기존 연구 [5]에서는 공진기 사이의 거리가 5cm부터 40cm까지 5cm 간격으로 그에 대응하는 커플링 계수 값을 제공하고 있다. 시뮬레이션에 필요한 추가적인 거리에 대응하는 커플링 계수 값은 [5]의 실험값과

MATLAB의 Data Fitting 기능을 이용하여 유추하였다. 그림 2는 실험적으로 제공하는 커플링 계수 값과 MATLAB의 Data Fitting 기능을 이용하여 유추한 커플링 계수 값이 잘 일치함을 보여준다. 고려하고 있는 시스템 모델에서는 각 공진기가 등간격으로 배치되었기 때문에, 거리( $d_0$ )와 릴레이의 개수( $N$ )가 정해지면 모든 공진기가 같은 값의 커플링계수를 가지게 된다.

그림 3은 릴레이 개수에 따른 시스템 효율을 보여준다.  $d_0 = 50\text{cm}$ 인 경우, 효율은 릴레이의 개수가 2개일 때까지 급격하게 증가하다가 그 이후 증가폭이 점차 감소한다. 릴레이의 개수가 4개일 때,  $\eta = 0.7724$ 로 최고 효율을 달성하고, 릴레이의 개수가 그 이상으로 늘어나는 경우는 오히려 효율이 감소함을 확인할 수 있다. 마찬가지로 Tx와 Rx 사이의 거

리가  $d_0 = 100\text{cm}$ 인 경우에는  $N=10$ 일 때  $\eta = 0.6232$ 로 최고 효율을 달성하고, 릴레이의 개수가 그 이상으로 늘어나는 경우는 효율이 점차 감소하는 경향을 보였다. 그러므로 Tx와 Rx의 거리가 정해진 환경에서는 최고 효율을 달성하는 최적의 릴레이의 개수가 존재함을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 릴레이를 이용한 MRWPT 시스템에서 릴레이의 개수가 시스템의 효율에 미치는 영향을 분석해왔다. 먼저, 등가회로 모델을 이용하여 시스템을 모델링하고, 전체 임피던스 중 반사 임피던스 비율만큼의 전력이 다음의 공진기로 전달된다는 점에 착안하여, N개의 릴레이가 존재할 때의 시스템 효율을 수식적으로 도출하였다. 또한, ADS를 이용해서 송수신기 사이의 거리가 50cm일 때와 100cm일 때 각각의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 두 경우 모두 릴레이의 개수가 증가하면 효율도 함께 증가하다가 릴레이의 개수가 일정 수 이상이 되면 오히려 효율이 감소하게 되는 것을 확인 하였다. 즉, 송수신기 사이의 거리가 일정한 경우, 최대의 효율을 달성할 수 있는 최적의 릴레이 개수가 존재하며 그 수 이상의 추가적인 릴레이의 사용은 오히려 시스템 효율을 감소시킬 수 있음을 확인했다.

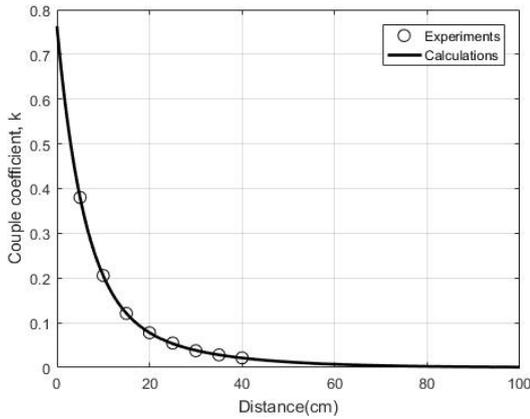


그림 2. 거리에 따른 커플링 계수  
Fig. 2. Coupling coefficient vs. Distance

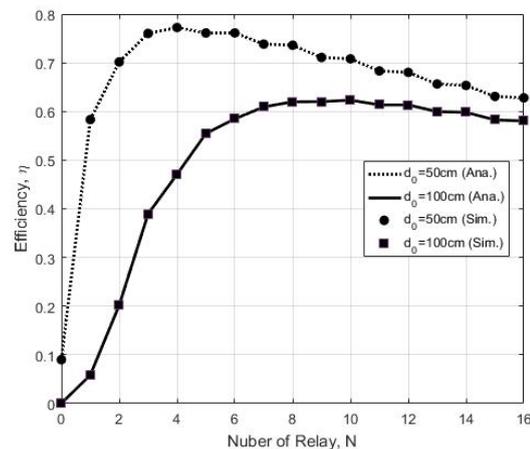


그림 3. 릴레이 개수에 따른 시스템 효율  
Fig. 3. Efficiency vs. Number of relays

### References

- [1] 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, Sep. 2014.
- [2] X. Zhang, S. L. Ho, and W. N. Fu, "Quantitative design and analysis of relay resonators in wireless power transfer system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 4026-4029, Apr. 2012.
- [3] K. S. 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. Wireless Compon. Lett.*, vol. 27, no. 5, May 2017.
- [4] W. Zhong, C. K. Lee, and S. R. Hui, "General

analysis on the use of tesla's resonators in domino forms for wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 261-270, Jan. 2013.

- [5] 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, Nov. 2012.