

# 무선전력전송에서 빠른 시스템 충전을 위한 임피던스 매칭 방법

이 기 송\*, 최 현 호<sup>o</sup>

## An Impedance Matching Method for Fast System Charging in Wireless Power Transfer

Kisong Lee\*, Hyun-Ho Choi<sup>o</sup>

요 약

본 논문에서는 N개의 수신기가 존재하는 무선전력전송 시스템을 등가회로 모델을 이용하여 수학적으로 모델링 하고, 시스템 충전 시간을 도출한다. 도출한 수식을 통해 수신기의 수가 늘어남에 따라 시스템 충전 시간이 급격 하게 늘어남을 확인하고, 이를 해결하기 위한 임피던스 매칭 방안을 제안한다. 제안 방안은 모든 수신기들이 송신 기와의 거리에 상관없이 같은 효율 및 충전 시간을 달성하도록 만든다. Advanced Design System 기반의 회로 수 준의 시뮬레이션을 통해 분석 결과의 정확성을 검증하고, 제안 방안이 기존 방안에 비하여 시스템 충전 시간을 획 기적으로 감소시킴을 확인하였다.

**Key Words** : Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance, System Charging Time, Impedance Matching

### ABSTRACT

In this paper, we mathematically formulate a wireless power transfer (WPT) system with N receivers using an equivalent circuit model and derive a system charging time. Based on the derived equations, we confirm that the system charging time increases exponentially as the number of receivers increases, and also propose an impedance matching method to solve this problem. In the proposed method, the receivers achieve the same efficiency and charging time regardless of their distances from a transmitter. Through circuit-level simulations with Advanced Design System, we demonstrate the accuracy of our analysis, and confirm that the proposed method reduces the system charging time remarkably compared to the conventional method.

### 1. 서 론

무선전력전송(Wireless Power Transfer, WPT) 기 술은 Qi, PMA(Power Matters Alliance), A4WP (Alliance for Wireless Power)의 3가지 국제 표준을

가지고 있다<sup>1)</sup>. Qi와 PMA는 자기유도 기술을 기반으 로 200~300 kHz의 주파수 대역을 사용하며, A4WP 는 자기공진 기술을 기반으로 6.78 MHz의 주파수 대 역을 사용한다. 일반적으로 자기공진 기술을 이용한 A4WP가 장거리 무선 충전에 적합하다. 실제 2007년

\* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1C1B1016261)  
• First Author : (ORCID:0000-0001-8206-4558)Chungbuk National University, School of Information and Communication Engineering, kslee85@cbnu.ac.kr, 정회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6785-2596)Hankyong National University, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201808-253-A-RN, Received August 20, 2018; Revised October 10, 2018; Accepted October 11, 2018

MIT에서는 자기 공진 기반의 WPT 기술의 적용 가능성은 실험적으로 보였다<sup>2)</sup>. 뿐만 아니라 다수의 공진기가 존재하는 WPT 시스템에서의 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>3-8)</sup>. [3]에서는 효율을 최대화하기 위한 최적의 릴레이 위치를 실험적으로 보였으며, [4]에서는 릴레이를 이용하면 원거리뿐만 아니라 근거리에서도 효율의 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다. [5,6]에서는 2개의 수신기가 존재하는 환경에서 효율을 최대화하기 위한 최적의 수신기 위치를 도출하였으며, [7,8]에서는 다수의 수신기가 존재할 때 각 수신기가 필요로 하는 전력을 전송하기 위한 임피던스 매칭 기법 및 주파수 선택 기법을 각각 제안하였다. 하지만 다수의 수신기가 존재하는 WPT 시스템에서 시스템 충전 시간을 개선하기 위한 방안에 대한 연구는 지금까지 수행되지 않았다.

본 논문에서는 한 개의 송신기(Transmitter, Tx)와 N 개의 수신기(Receiver, Rx)가 존재하는 WPT 시스템에서 전체 Rx의 충전을 완료하는데 소요되는 시간인 시스템 충전 시간을 향상시키고자 한다. 등가회로 모델을 이용하여 WPT N-Rx 시스템을 수학적으로 모델링 한 후, 시스템 충전 시간을 수식적으로 도출하였다. 도출된 수식을 통해 기존 방안의 비효율적인 충전 시간 문제를 정의하고, 이를 해결하기 위해 Tx로부터의 거리에 상관없이 모든 Rx들이 같은 효율 및 충전 시간을 달성하게 하는 임피던스 매칭 방안을 제안한다. Advanced Design System (ADS) 시뮬레이션을 통해 제안 방안의 시스템 충전 시간을 도출하고 기존 방안 대비 성능 이득을 확인한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 한 개의 Tx와 N개의 Rx가 일렬로 배치되어 있는 자기공진(Magnetic resonance) 기반의 WPT 시스템을 고려한다.

그림 1은 고려하는 WPT N-Rx 시스템의 등가회로 모델을 보여준다. Tx에는 교류 신호를 생성해주는 교류 전압  $V_s$ 가 연결되어 있으며, Rx i에는 수신된 전력을 소모할 수 있는 부하 저항  $R_{L,i}$ 가 연결되어 있다. 각각의 공진기 I는 자기 인덕턴스  $L_i$ 와 내부 저항  $r_i$ 를

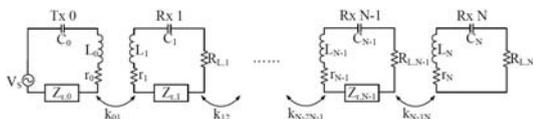


그림 1. 자기공진 기반 N-Rx 무선전력전송 시스템  
Fig. 1. Magnetic resonance based WPT N-Rx system

갖는다. 여기서 아래 첨자  $i \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$ 이며, 0은 Tx,  $\{1, 2, \dots, N\}$ 은 Rx들을 의미한다. 또한, 각각의 공진기는 같은 공진 주파수  $f_0$ 에서 공진할 수 있도록  $C_i$ 의 커패시턴스가 각각 직렬로 연결되어 있다. 이러한 경우 공진 주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \dots = \frac{1}{\sqrt{L_N C_N}}. \quad (1)$$

또한, 각각의 공진기에서의 등가 입력 임피던스는 아래와 같다.

$$Z_0 = r_0 + j\omega L_0 + \frac{1}{j\omega C_0},$$

$$Z_i = R_{L,i} + r_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} \text{ for } i \in \{1, \dots, N\}. \quad (2)$$

수식 (2)에서 사용되는 주파수가 공진 주파수와 일치할 때에는  $j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i}$ 의 리액턴스(Reactance) 성분은 사라지고 저항 성분만 남게 된다.

Tx의 교류 전압  $V_s$ 는  $i_0$ 의 교류 전류를 생성하며, 이 교류 전류는 자기장을 발생시킨다. 이 자기장 중 일부가 Rx 1으로 전달되고, 이로 인해 교류 전류  $i_1$ 이 유도된다. 또한, 그 중의 일부의 자기장이 순서대로 Rx 2, Rx 3, ..., Rx N으로 전달되어 각각의 교류 전류  $i_2, i_3, \dots, i_N$ 를 발생시킨다. 이 과정을 통해 각각의 Rx들은 Tx로부터 전력을 무선으로 받을 수 있다. 공진기 i와 j 사이의 자기 유도 계수는 커플링 계수(Coupling coefficient)  $k_{ij}$ 로 표현할 수 있다. 여기서  $k_{ij}$ 는 공진기 i와 j 사이의 거리인  $d_{ij}$ 의 세 제곱에 반비례한다. 또한, 커플링 계수는  $k_{ij} = k_{ji}$ 와 같이 상호보완적이다<sup>7)</sup>. 이와 같은 특징과 키르히호프 전압 법칙(Kirchhoff's Voltage Law, KVL)을 이용하여 의해 다음과 같은 관계식을 생성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_0 & j\omega k_{01}\sqrt{L_0 L_1} & \dots & j\omega k_{0N}\sqrt{L_0 L_N} \\ j\omega k_{01}\sqrt{L_0 L_1} & r_1 + R_{L,1} & \dots & j\omega k_{1N}\sqrt{L_1 L_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j\omega k_{0N}\sqrt{L_0 L_N} & j\omega k_{1N}\sqrt{L_1 L_N} & \dots & r_N + R_{L,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ \vdots \\ i_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

여기에서 인접하지 않은 두 공진기는 충분히 떨어

져 있으므로 그들 사이의 교차결합(cross coupling)은 무시할 수 있다고 가정한다<sup>3-8)</sup>. 동일한 형태의 Tx와 Rx를 고려하면  $r_0 = r_1 = \dots = r_N = r$ ,  $L_0 = L_1 = \dots = L_N = L$ ,  $C_0 = C_1 = \dots = C_N = C$ 의 관계를 이용하여 수식을 단순화 할 수 있다. 또한, 인접한 공진기들이 등간격으로 배치된 상황을 고려하여  $k_{01} = k_{12} = \dots = k_{N-1N} = k$ 라 가정한다.

### III. WPT N-Rx 시스템의 충전 시간 분석 및 제안하는 임피던스 매칭 방안

3장에서는 2장의 등가회로 모델로부터 유도된 기본 수식을 이용하여 기존 WPT N-Rx 시스템의 충전 시간 도출하고 시스템 충전 시간의 비효율성 문제를 제기한다. 아울러 이를 해결하기 위한 효율적인 임피던스 매칭 방안을 제안한다. 이를 위해 먼저 Rx i+1에 의해 공진기 i에서 보이는 반사 임피던스(Reflected impedance)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Z_{r,i} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{L,i+1} + r + Z_{r,i+1}} \text{ for } i \in \{0, 1, \dots, N-1\}. \quad (4)$$

수식 (4)에서  $Z_{r,N} = 0$ 이다. Rx i로 넘어온 전력의 일부는 내부 저항 및 부하 저항에서 소모되고, 전체 임피던스 중 반사 임피던스의 비율만큼의 전력이 Rx i+1로 전달된다. 그러므로 Rx i에서의 전력전송 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_i = \left( \frac{Z_{r,0}}{r + Z_{r,0}} \right) \left( \prod_{k=1}^{i-1} \frac{Z_{r,k}}{R_{L,k} + r + Z_{r,k}} \right) \left( \frac{R_{L,i}}{R_{L,i} + r + Z_{r,i}} \right) \text{ for } i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (5)$$

수식 (5)를 통해 Rx i의 충전 시간은  $t_i = \frac{1}{\eta_i}$ 로 구할 수 있다. 또한, 수식 (5)에서 곱해지는 각각의 항은 그 값이 1보다 작기 때문에 i가 커질수록 효율은 줄어든다. 즉, Tx에서 가장 먼 곳에 위치한 Rx의 효율이 가장 낮으며, 결과적으로 이 Rx의 충전이 완료되어야 시스템 내의 모든 Rx가 충전된다. 그러므로 WPT N-Rx 시스템의 충전 시간은 다음과 같이 Rx N의 효율의 역수로 정의된다.

$$T = \frac{1}{\eta_N}. \quad (6)$$

기존 시스템의 경우 Tx에서 근거리에 위치한 Rx가 이미 충분한 전력을 수신한 상황에서도 대부분이 전력이 근거리에 위치한 Rx에게 전달되고, 원거리에 위치한 Rx에는 전력이 거의 전달되지 못하는 문제점이 있다. 이로 인해 Rx의 수가 늘어날수록 시스템 충전 시간이 기하급수적으로 증가하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 모든 Rx들이 Tx로부터 떨어진 거리에 상관없이 동일한 전력을 수신할 수 있게 하는 임피던스 매칭 방안을 제안한다. 제안 방안에서는 근거리의 Rx들이 충전 효율 면에서 약간의 손해를 보지만, 원거리에 위치한 Rx들의 충전 효율을 향상시켜 전체적으로 시스템 충전 시간을 훨씬 더 단축시킬 수 있다.

제안 방안을 도출하기 위해 먼저 다음의 조건  $\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_N = \eta$ 로부터 각 Rx가 동일 전력을 수신하기 위한 부하 저항 값을 다음과 같이 찾을 수 있다.

$$R_{L,i}^* = \frac{R_{L,i+1} \omega^2 M^2}{(R_{L,i+1} + r + Z_{r,i+1})^2} \text{ for } i \in \{1, 2, \dots, N-1\}. \quad (7)$$

즉, Rx N의 부하 저항 값  $R_{L,N}$ 을 기준으로 Rx N-1, Rx N-2, ..., Rx 1까지 순서대로 수식 (7)에 따라 자신의 부하 저항 값을 조정하면 된다. 그 후 수식 (7)을 수식 (5)에 대입하면 제안 방안의 충전 효율은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\eta = \left( \frac{Z_{r,0}^*}{r + Z_{r,0}^*} \right) \left( \prod_{k=1}^{i-1} \frac{Z_{r,k}^*}{R_{L,k}^* + r + Z_{r,k}^*} \right) \left( \frac{R_{L,N}}{R_{L,N} + r} \right). \quad (8)$$

제안 방안의 경우 모든 Rx들이 Tx로부터의 거리에 상관없이 수식 (8)로 주어지는 동일한 효율을 달성하기 때문에 동시에 충전이 완료된다. 그러므로 시스템 충전 시간은 다음과 같이 정의된다.

$$T = \frac{1}{\eta}. \quad (9)$$

### IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 ADS를 이용한 회로 수준 (Circuit-level)의 시뮬레이션을 통해 기존 방안과 제안 방안의 시스템 충전 시간을 비교한다. 그림 2는 전체 Rx 수가 2일 때, 즉, Tx, Rx 1, Rx 2로 구성된

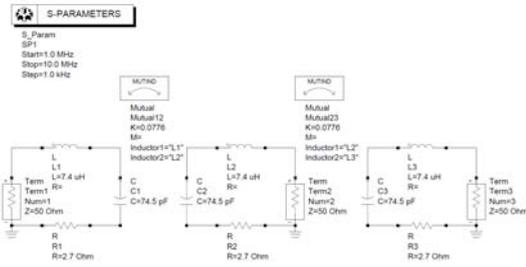


그림 2. N=2일 때 ADS 시뮬레이션 환경  
Fig. 2. ADS simulation environments when N=2

ADS 시뮬레이션 환경을 보여준다. 각각의 공진기는 6.78 MHz의 공진 주파수를 가지며, 7.4 uH의 인덕턴스, 74.5 pF의 커패시턴스, 2.7 옴의 내부 저항이 연결되어 있다. 또한, 기존 방안의 경우는 50 옴의 부하 저항이 Rx에 연결되어 있으며, 제안 방안의 경우 수식 (7)을 통해 찾은 부하 저항을 Rx에 연결하였다.

그림 3은 인접 공진기 간의 거리가 20 cm 일 때 (즉,  $k=0.0776$ ), Rx의 수(N)에 따른 Rx N에서의 효율 ( $\eta_N$ )을 보여준다. Rx의 수가 늘어날수록 두 방안 모두  $\eta_N$ 이 상당히 작아짐을 확인할 수 있다. N=3일 때 기존 방안의 경우 가장자리에 위치한 Rx N의 효율이 3% 미만으로 떨어지며,  $N \geq 4$ 일 때는 Rx N의 효율은 거의 0에 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 반면 제안 방안의 경우 N=7인 경우에도 모든 Rx들이 상대적으로 높은 9%대의 효율을 유지한다.

그림 4는 Rx의 수(N)에 따른 시스템 충전 시간(T)을 보여주는 결과이다. 기존 방안의 경우 Rx의 수가 늘어날수록 시스템 충전 시간도 기하급수적으로 늘어난다. 예를 들어 N=7일 경우에 시스템 충전 시간이

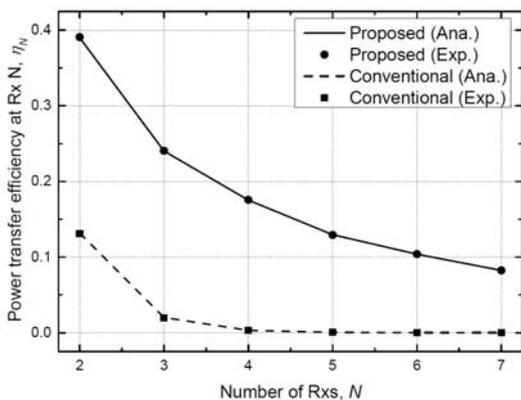


그림 3. Rx N에서의 효율 vs. Rx의 수  
Fig. 3. Power transfer Efficiency at Rx N vs. number of Rx's

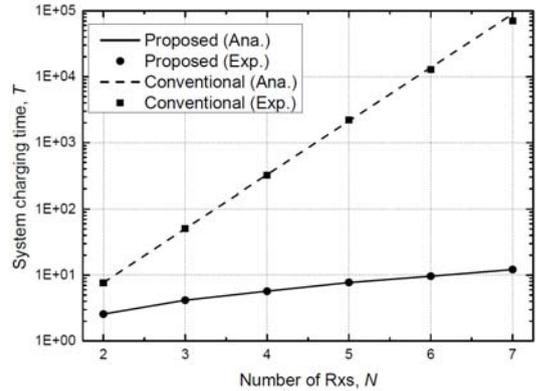


그림 4. 시스템 충전 시간 vs. Rx의 수  
Fig. 4. System charging time vs. number of Rx's

$10^5$ 초에 육박해 실제 환경에서 활용하기에 부적합하다. 반면, 제안 방안의 경우 N=7인 경우에도 10초 정도의 시스템 충전 시간을 유지하여 기존 방안에 비해 시스템 충전 시간을 획기적으로 감소시킬 수 있다. 즉, Tx에 근거리에서 위치한 Rx는 효율 면에서 약간의 손해를 보지만 원거리에서 위치한 Rx의 효율이 크게 개선되어, 시스템 전체의 충전 시간 관점에서는 큰 이득을 보게 된다. 또한, 그림 3과 4에서 분석 값과 시뮬레이션 값이 모두 일치하여 분석의 정확성을 확인할 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 등가회로 모델을 이용하여 WPT N-Rx 시스템을 수학적으로 모델링하고 시스템 충전 시간을 도출하였다. 도출한 수식을 바탕으로 기존 방안의 경우 Rx의 수가 늘어날수록 시스템 충전 시간이 기하급수적으로 늘어나는 문제점을 확인하고, 이를 해결하기 위해 Tx와의 거리에 상관없이 모든 Rx들이 같은 효율을 달성할 수 있게 하는 임피던스 매칭 방안을 제안하였다. ADS 기반의 시뮬레이션 결과, Rx 수가 증가하더라도 제안 방안은 기존 방안에 비해 시스템 충전 시간을 획기적으로 감소시켜 합리적인 시간 내에 모든 Rx들을 충전시킬 수 있었다. 본 연구 결과는 WPT N-Rx 시스템의 충전 시간을 향상시켜 다양한 무선충전 적용 분야에서 실제적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 추후 릴레이가 일렬의 등간격으로 배치되지 않는 일반적인 환경에서 시스템 충전 시간을 개선할 수 있는 방안에 대해 연구를 수행할 계획이다.

References

- [1] D. Ahn, S. Kim, S.-W. Kim, J. Moon, and I. Cho, "Wireless power transmitter and receiver supporting 200-khz and 6.78-mhz dual-band operation without magnetic eld canceling," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 9, pp. 7068-7082, Sep. 2017.
- [2] 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.
- [3] W. X. Zhong, C. K. Lee, and S. Y. R. Hui, "General analysis on the use of teslas resonators in domino forms for wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 261-270, Jan. 2013.
- [4] 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.
- [5] K. Lee and K. Shin, "Impact of configuration of coils on efficiency of 3-coil wireless power transfer systems," *J. KICS*, vol. 42, no. 12, pp. 2273-2275, Dec. 2017.
- [6] K. Lee and K. Shin "Analysis of power transfer efficiency for wireless power transfer system with two receivers," *J. KICS*, vol. 42, no. 12, pp. 2311-2315, Dec. 2017.
- [7] K. Lee and D.-H. Cho, "Analysis of wireless power transfer for adjustable power distribution among multiple receivers," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 950-953, 2015.
- [8] 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.

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

최 현 호 (Hyun-Ho Choi)



2001년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업  
 2003년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사  
 2007년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사  
 2007년 3월~2011년 2월 : 삼성중합기술원 전문연구원

2011년 3월~현재 : 국립환경대학교 전기전자제어공학과 부교수  
 <관심분야> 이동통신시스템, 분산 네트워크, 저전력 통신, 무선전력전송, 생체모방 알고리즘