

MIMO WPT 시스템의 최대 효율을 위한 최적화 방법

Method to Optimize Maximum Efficiency in MIMO WPT

이형욱¹ · 부승현² · 나세훈³ · 이범선⁴

Hyeongwook Lee¹ · Seunghyun Boo² · Sehun Na³ · Bomson Lee⁴

요약

본 논문에서는 다중 입·출력 무선전력전송 시스템의 최대 전송 효율 구현을 위한 송신기 입력 및 수신기 부하 제어 방법을 제안하였다. 최대 전송 효율 구현에 필요한 각 송신기의 입력전압과 수신기의 부하를 송수신기 간의 성능지수를 이용하여 유도하였다. 유도한 최적 입력전압과 최적 부하는 적절한 예시를 통해 Genetic algorithm을 이용해 최적화한 결과나 회로 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인하였다. 본 논문에서 제시된 이론적 방법을 적절히 활용한다면, 근거리 다중 입·출력 무선전력전송 시스템의 효과적인 설계가 가능할 것이다.

Abstract

In this paper, we proposed a method to control input powers and receiver loads for maximum efficiency in multiple-input multiple-output(MIMO) wireless power transfer(WPT) systems. The input voltage ratio between transmitters and receiver loads for maximum transfer efficiency is derived in terms of figure of merits. The theoretically derived input voltages for the transmitters and optimum loads for the receivers were found to be similar to those obtained by a genetic algorithm. We demonstrate the effectiveness of the theory using a few design examples. Using the results obtained from this study, effective and simplified designs of MIMO WPT systems will be possible.

Key words: Load Optimization, Input Voltage Optimization, Magnetic Coupling, MIMO, Wireless Power Transfer

I. 서론

자계 결합 무선전력전송 방식이 소개된 이후로, 이를 활용한 응용들이 다양한 분야에서 연구되고 있으며, 근래에는 다수의 송·수신기를 사용하는 Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) 시스템에 대한 연구가 활발하다^{[1]~[4]}. 둘 이상의 송신기를 갖는 무선전력전송

시스템에서 수신기의 위치 이동에 대한 자유도를 높일 수 있는 전송 효율의 개선은 필수적이다. 본 논문에서는 최대 효율 구현을 위해 필요한 각 송신기의 최적 입력전압 비와 수신기의 최적 부하를 유도하였다. Multiple-Input Single-Output(MISO) 시스템을 분석하여 유도된 송신기의 최적 전압과 수신기의 최적 부하 표현식을 MIMO 시스템에 사용할 수 있도록 확장하였다. 제안된

「본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2019-2016-0-00291).」
경희대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kyung Hee University)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0002-1856-3579>), 2: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0003-2979-2091>), 3: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0001-6758-7529>),
4: 교수(<https://orcid.org/0000-0003-1223-0113>)

· Manuscript received February 7, 2019 ; Revised March 27, 2019 ; Accepted March 28, 2019. (ID No. 20190207-006S)

· Corresponding Author: Bomson Lee (e-mail: bomson@khu.ac.kr)

표현식의 정확도를 검증하기 위해 적절한 예시를 바탕으로 비선형 함수의 최적해를 찾는 기법인 Genetic Algorithm(GA)을 이용한 최적화 결과와 비교하여 유사함을 보였다.

II. 이론

그림 1은 다수의 송·수신기를 가진 자계결합 무선전력전송 시스템을 나타내었다. 자계결합 방식의 전송 효율은 각 송·수신 루프의 Q-factor($Q_m = \omega_o L_m / R_m$, $Q_{m+n} = \omega_o L_{m+n} / R_{m+n}$)와 송·수신 루프 간의 결합 계수($k_{m,m+n} = M_{m,m+n} \sqrt{L_m L_{m+n}}$)의 곱에 비례하며 이를 성능지수 $F_{m,m+n} = k_{m,m+n} \sqrt{Q_m Q_{m+n}}$ 으로 정의하였다^[5]. 각 송·수신 루프에는 손실 저항(R_m, R_{m+n})과 인덕턴스(L_m, L_{m+n})이 존재한다. 또한, 루프의 공진을 위한 커패시턴스(C_m, C_{m+n})을 갖는다. 송신 루프에 인가된 전압 V_m 과 유도된 전류 I_m 을 이용하여 Z-matrix로 나타내면 식 (1)과 같고, 이때 전송 효율은 식 (2)와 같다^[3].

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_M \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1M} & \cdots & Z_{1,M+N} \\ \vdots & & & & \vdots \\ Z_{M1} & & & & Z_{M,M+N} \\ Z_{M+1,1} & & & & Z_{M+1,M+N} \\ \vdots & & & & \vdots \\ Z_{M+N,1} & Z_{M+N,M} & Z_{M+N,M+N} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ \vdots \\ I_M \\ I_{M+1} \\ \vdots \\ I_{M+N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{L,total}}{P_{in,total}} = \frac{\sum_{n=M+1}^{M+N} \frac{1}{2} R_{L_n} |I_n|^2}{\sum_{m=1}^M \frac{1}{2} Re[V_m I_m^*]} \quad (2)$$

식 (1)에서 각 변에 역행렬을 취하면 $[I] = [Z]^{-1} [V]$ 로 각 송·수신 루프에 흐르는 전류를 구할 수 있다. 송신기 간 커플링이 송·수신기 간 커플링에 비해 매우 작다면, $M=2, N=1$ 인 MISO 시스템에서 수신 루프에 흐르는 전류 I_3 는 식 (3)과 같이 유도할 수 있으며, 부하에 전송된 전력은 식 (4)이다. 이때, $\beta = R_{L,3} / R_3$ 이다.

$$I_3 = \frac{j\sqrt{R_3}(\sqrt{R_1} R_2 F_{13} V_1 + \sqrt{R_2} R_1 F_{23} V_2)}{1 + \beta + F_{13}^2 + F_{23}^2} \quad (3)$$

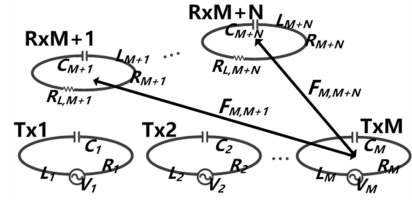


그림 1. MIMO 자계 결합 무선전력전송 시스템
Fig. 1. MIMO magnetically coupled WPT system.

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{1}{2} |I_3|^2 R_L \\ &= \frac{\beta}{2(1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta)^2} \\ &\quad (\sqrt{R_1} R_2 F_{13} V_1 + \sqrt{R_2} R_1 F_{23} V_2)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

그림 1과 유사하게 총 입력 전력은 각 송신기에 인가된 전력의 합으로서 식 (5)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} P_{in,total} &= \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{V_1^2}{R_1} + \frac{V_2^2}{R_2} - \frac{(\sqrt{R_2} F_{13} V_1 + \sqrt{R_1} F_{23} V_2)^2}{(1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta) R_1 R_2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 전송 효율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_L}{P_{in,total}} \\ &= \frac{\beta}{1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta} \frac{(\sqrt{R_2} F_{13} + \sqrt{R_1} F_{23} \frac{V_2}{V_1})^2}{(1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta)(R_2 + (\frac{V_2}{V_1})^2 R_1 - (\sqrt{R_2} F_{13} - \sqrt{R_1} F_{23} \frac{V_2}{V_1})^2)} \end{aligned} \quad (6)$$

이때, $m = V_2 / V_1$ 을 정의하면 전송 효율 식 (6) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta(m, \beta) &= \\ &= \frac{\beta}{1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta} \frac{(\sqrt{R_2} F_{13} + \sqrt{R_1} F_{23} m)^2}{(1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta)(R_2 + R_1 m^2 - (\sqrt{R_2} F_{13} - \sqrt{R_1} F_{23} m)^2)} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 $\frac{\partial \eta}{\partial m} = 0$, $\frac{\partial \eta}{\partial \beta} = 0$ 을 만족할 때, 최댓값을 가지므로 이때의 해는 아래와 같다.

$$m_{opt} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{R_2 F_{23}}}{\sqrt{R_1 F_{13}}} = \frac{k_{23} \sqrt{L_2}}{k_{13} \sqrt{L_1}} \quad (8)$$

$$\beta_{opt} = \frac{R_{L,3}}{R_3} = \sqrt{1 + F_{13}^2 + F_{23}^2} \quad (9)$$

또한, 이때의 최대 효율은 식 (10)이다.

$$\eta_{max}(m, \beta) = \frac{\frac{\beta_{opt}}{1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta_{opt}} \left(\sqrt{R_2 F_{13}} + \frac{\sqrt{R_2 F_{23}}}{F_{13}} \right)^2}{(1 + F_{13}^2 + F_{23}^2 + \beta_{opt}) \left(R_2 + \left(\frac{\sqrt{R_2 F_{23}}}{F_{13}} \right)^2 - \left(\sqrt{R_2 F_{13}} - \frac{\sqrt{R_2 F_{23}}}{F_{13}} \right)^2 \right)} \quad (10)$$

이 결과를 송신기 개수가 M 개인 MISO 시스템으로 확장하면 아래와 같이 일반화할 수 있으며, 이를 만족할 때에 최대 전송 효율을 얻을 수 있다.

$$V_1 : V_2 : \dots : V_M = F_{1, M+1} : F_{2, M+1} : \dots : F_{M, M+1} \quad (11)$$

$$\beta_{opt} = \sqrt{1 + \sum_{m=1}^M F_{m, M+1}^2} \quad (12)$$

위의 결과를 바탕으로 MIMO 시스템의 최대 효율 구현을 위한 최적 전압 비와 최적 부하는 아래와 같이 추정할 수 있다.

$$V_1 : \dots : V_M = \sum_{n=1}^N F_{1, M+n} : \dots : \sum_{n=1}^N F_{M, M+n} \quad (13)$$

$$\beta_{opt} = \sqrt{1 + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N F_{m, M+n}^2} \quad (14)$$

또한, 송신기가 하나인 SISO 및 SIMO 시스템에서는 다음과 같이 최적 부하가 유도된다^[3].

$$\beta_{opt} = \sqrt{1 + \sum_{n=1}^N F_{1, n+1}^2} \quad (15)$$

III. 시뮬레이션 결과

앞장에서 유도한 최대 효율을 구현하는 최적 전압비와 최적 부하를 검증하기 위하여 EM 시뮬레이션을 이용하

였다. 그림 2는 각각 두 개의 송·수신기를 가진 MIMO WPT($M=2, N=2$) 시스템을 보여준다. 이때, 식 (13), 식 (14)를 적용하여 최대 효율 구현을 위한 송신기 입력전압 비와 수신기 부하는 각각 다음과 같다.

$$V_1 : V_2 = F_{13} + F_{14} : F_{23} + F_{24} \quad (16)$$

$$\beta_{opt} = \sqrt{1 + F_{13}^2 + F_{14}^2 + F_{23}^2 + F_{24}^2} \quad (17)$$

송·수신기는 지름 10 cm의 원형 루프 형태이며, 두께 0.1 mm로 모두 동일하다. 각 루프는 0.034 ohm의 손실 저항, 266.5 nH의 인덕턴스와 공진을 위한 2.067 nF의 커패시터를 가진다. 루프의 공진주파수는 6.78 MHz로 Q-Factor는 334.2이다. 송신 루프간 및 수신 루프간 중심 거리(d)는 15 cm이며, 송·수신 루프 사이의 수직 거리(h)는 20 cm이다. 송·수신기 간 성능지수 각각을 표 1에 나타내었다. 식 (13), 식 (14)의 검증을 위해 두 수신 루프 중 하나의 수신 루프(Rx4)가 두 송신 루프로부터 멀어지는 상황을 시뮬레이션하였다. Rx4와 송신 루프(Tx1, Tx2) 사이의 거리가 매우 멀어져 커플링이 매우 작아진다면 ($F_{14}, F_{24} \rightarrow 0$), 수신 루프가 하나인 MISO 시스템이 된다. 비선형 함수의 최적해를 찾는 기법인 GA를 이용하여 얻은 결과

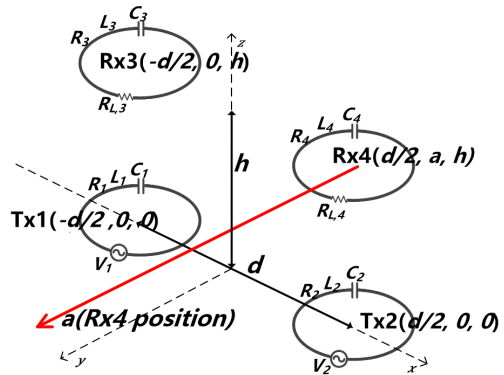


그림 2. 2x2 MIMO 무선전력전송 시스템
Fig. 2. 2x2 MIMO wireless power transmission system.

표 1. 송·수신기 간 성능지수
Table 1. Figure of merits between Tx's and Rx's.

a	F_{13}, F_{24}	F_{14}, F_{23}	F_{12}, F_{34}
0 cm	1.72	0.50	-3.28

와 비교하였다. 식 (2)의 전송 효율을 얻는 과정에서 GA를 적용하였으며, 효율이 최대가 될 때의 최적 부하(β_{opt})와 최적 입력전압 비(m_{opt})를 얻어 식 (13) 및 식 (14)의 결과와 비교하였다. 식 (13) 및 식 (14)의 유도과정에서 송신기 간 커플링을 송수신기 간 커플링에 비해 매우 작다고 가정하였지만, GA의 결과는 이를 모두 고려하여 얻은 결과이다.

그림 3은 수신 루프 Rx4의 위치에 따른 최적 전압 비와 최적 부하를 나타낸 것이다. 식 (16) 및 식 (17)을 이용하여 유도된 전압 비 및 부하저항 값과 GA를 이용하여 구한 전압 비 및 부하저항 값을 비교하였다. Rx4의 위치 (a)를 변화하며 결과를 관찰하였다. 식 (16) 및 식 (17)은 송신기 간(또는 수신기 간) 커플링이 매우 작은 경우에 close-form 형태로 유도한 것으로써, GA를 이용하여 얻은 최적 전압비와 최적 부하값과 다소 차이가 있지만 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 4는 그림 2의 MIMO WPT 시스템의 전송 효율을

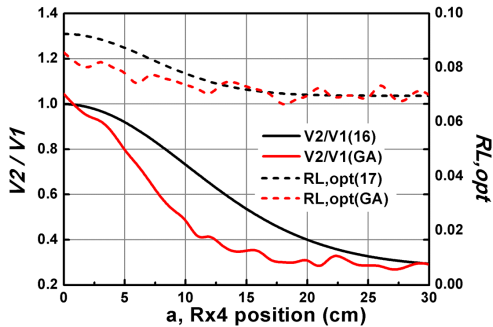


그림 3. Rx4 위치에 대한 최적 전압 비와 최적 부하
Fig. 3. Optimum input voltage ratio and optimum load.

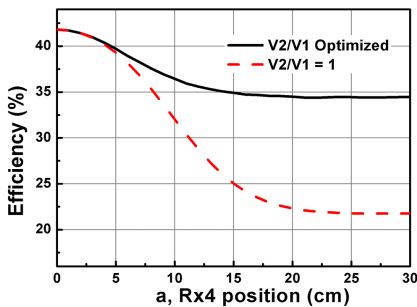


그림 4. 전압 제어 방법 적용 유무에 따른 전송 효율
Fig. 4. Transmission efficiency as a function of a(Rx4 pos.).

나타냈다. 송신 루프의 입력전압 비와 수신 루프의 부하값은 각각 식 (16)과 식 (17)로 최적화하였으며, 위 시뮬레이션 상황에서 전압 제어 방법 유무에 따라 최대 12%의 효율 개선이 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다수의 송신기를 갖는 MISO, MIMO 자계 결합 무선 전력 전송 시스템에서 최대 효율 구현을 위한 송신기 사이의 최적 입력전압 비와 수신기의 최적 부하를 유도하였다. 또한, 적절한 예시에서 GA를 이용해 최적화한 결과와 비교하여 제시한 방법에 대한 유효성을 검증하였으며, 회로 시뮬레이션 결과를 통해 유사함을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 방법을 다수의 송신기를 갖는 무선전력전송 시스템에서 이용하면 시스템의 효과적인 설계가 가능할 것이다.

References

- [1] M. Q. Nguyen, Y. Chou, D. Plesa, S. Rao, and J. C. Chiao, "Multiple-inputs and multiple-outputs wireless power combining and delivering systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6254-6263, Nov. 2015.
- [2] D. Armitz, M. S. Reynolds, "MIMO wireless power transfer for mobile devices," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 15, no. 4, pp. 36-44, Oct.-Dec. 2016.
- [3] S. Kim, B. Lee, "Analysis of efficiencies for multiple-input multiple-output wireless power transfer systems," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 16, no. 2, pp. 126-133, Apr. 2016.
- [4] S. Kim, S. Hwang, S. Kim, and B. Lee "Investigation of single-input multiple-output wireless power transfer systems based on optimization of receiver loads for maximum efficiencies," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 3, pp. 145-153, Jul. 2018.
- [5] G. Kim, B. Lee, "Analysis of magnetically coupled wireless power transfer between two resonators based on power conservation," in *2014 Wireless Power Transfer Conference*, Jeju, 2014, pp. 231-234.