

릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템의 효율 분석 단순화 방안

김 주 희*

The Simplification Method of Efficiency Analysis for a Wireless Power Transfer System with Relays

Juhui Kim*

요 약

본 논문에서는 릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템의 집중소자 변수를 모두 고려하여 최대효율을 분석하였다. 임의의 시스템을 모의한 후 비인접 결합 계수의 고려 범위 및 배치 거리를 조정하여 릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템의 최대효율 및 최대 효율 도출 주파수에 관해 확인하였다. 분석 결과 전체 비인접 결합계수가 아닌 가장 큰 비인접 결합계수 1 개만 고려한 단순화 시스템을 통해서도 최대효율 및 해당 주파수 도출이 가능함을 확인하였다.

Key Words : Wireless Power Transfer, Shifted frequency, Maximum Efficiency, Simplification method, Coupling coefficient

ABSTRACT

In the paper, we study an efficiency of a wireless power transfer system with relays including all lumped-parameters. The maximum efficiency and its corresponding frequency of a wireless power transfer system with relays are analyzed by varying the number of nonadjacent coefficients or a distance between resonators of the simulated certain systems. The analysis results show that the maximum efficiency and its corresponding frequency can be obtained by the simplified system included not the

entire nonadjacent coupling coefficients but the biggest one only.

I. 서 론

무선 전력 전송 시 자기 공명 방식을 적용할 경우 자기 유도 방식 대비 시스템의 전력 전송 거리를 늘릴 수 있다^[1]. 이와 더불어 전송 경로상 릴레이 공진기를 추가 배치해 릴레이가 없는 시스템과 비교하여 더 먼 거리에서 동일 효율을 달성할 수 있다^[2]. 이러한 릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템의 경우 통상적으로 비인접 결합계수가 매우 작아 무시 가능하다고 가정하여 분석한다^[3]. 하지만 비인접 결합계수로 인해 최대효율이 중심주파수에서 이동되어 나타나는 현상이 있으므로^[4], 최대효율을 얻기 위해서는 비인접 결합계수를 포함하여 시스템을 분석해야 한다. 이때 모든 비인접 결합계수를 포함하여 시스템의 효율 계산 시 전류 관계식이 복잡하게 나타나 연산 복잡도 상승을 야기한다.

본 논문에서는 릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템의 최대효율 및 최대효율 도출 주파수에 대한 비인접 결합계수의 영향성을 확인하고 최소 고려 비인접 결합계수의 범위를 제시하여 릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템 분석 정확도를 보장하는 단순화 방안을 제안하고자 한다.

II. 비인접 결합계수를 고려한 효율 산출 방법

그림 1은 릴레이를 포함하는 n 개의 공진기로 구성된 무선 전력 전송 시스템의 등가회로이다. 시스템 양단은 송신 및 수신 공진기이며, 그 외 등가회로는 릴레이를 나타낸다. 매틀랩을 활용해 효율 계산하기 위해 시스템의 등가회로에 대한 수식을 행렬로 표시하였으며, 이는 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) & j\omega M_{12}\sqrt{L_1 L_2} & \cdots & j\omega M_{1n}\sqrt{L_1 L_n} \\ j\omega M_{12}\sqrt{L_1 L_2} & R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) & \cdots & j\omega M_{2n}\sqrt{L_2 L_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j\omega M_{1n}\sqrt{L_1 L_n} & j\omega M_{2n}\sqrt{L_2 L_n} & \cdots & R_n + j\left(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

각 공진기의 회로 모델을 위한 임피던스 성분은 각 R_i, L_i, C_i ($i=1,2,\dots,n$)로, 공진기 사이의 결합계수는 k_{ij}

* First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-6020-875X)Hanwha Systems, Infra Technology R&D center, Power Control Team, juhui.kim@hanwha.com, 전문연구원, 정회원
 논문번호 : 202210-261-A-LU, Received October 31, 2022; Revised November 2, 2022; Accepted November 2, 2022

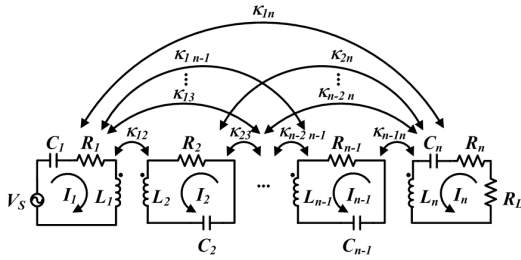


그림 1. n개의 공진기를 사용한 무선 전력 전송 시스템의 등가회로
 Fig. 1. An equivalent circuit of a wireless power transfer system with n resonators

($i=1,2,\dots,n, i \neq j$)로 나타냈다. 그리고 각 공진기에 흐르는 전류는 I_i 송신 공진기의 전압공급원은 V_S 수신 공진기의 부하는 R_L 로 나타냈다.

무선 전력 전송 시스템의 효율은 식 (2)로 연산 가능하며, 여기서 분모는 식 (1)의 역행렬 연산을 통해 얻은 전류에 대한 행렬과 각 공진기의 저항성분 행렬의 곱을 통해 얻을 수 있다. 이때 비인접 결합계수가 주파수에 미치는 영향 분석을 위해 $j(\omega L_i - 1/\omega C_i)$ 및 K_{ij} 성분을 모두 고려하여 연산한다.

$$\eta = \frac{R_L}{R_1 \left| \frac{I_1}{I_n} \right|^2 + R_2 \left| \frac{I_2}{I_n} \right|^2 + \dots + (R_n + R_L)} \quad (2)$$

최대효율 η_{max} 는 최적부하 R_{Lmax} 및 최대효율 도출 주파수 f_{max} 를 식 (2)에 대입하여 계산할 수 있다. 먼저 식 (2)를 R_L 에 대해 미분하여 $R_{Lmax}(\omega)$ 를 얻을 수 있고, 이를 식 (2)에 대입하여 ω 에 대해 미분하면 f_{max} ($\because f_{max} = \omega_{max} / 2\pi$)를 얻을 수 있다. 최종적으로 η_{max} 는 식 (2)의 변수 R_L 에 대해 최적부하인 $R_{Lmax}(\omega_{max})$ 를 대입하면 얻을 수 있다.

상기 연산 과정은 무선 전력 전송 시스템의 집중소자 값들을 모두 알고 있을 때 연산 가능하도록 모두 매크로 코드로 작성하였다.

III. 모의실험 결과

작성된 매크로 코드로 임의의 변수를 대입하여 시스템을 모의하였다. 우선 임의로 설정한 무선 전력 전송 시스템은 같은 크기의 평면형 정사각 공진기 6개가 25cm 간격으로 배치되었다고 가정하였으며, 공진기에 대한 집중소자 값은 $R_i = 0.02976\Omega$, $L_i =$

488.886nH, $C_i = 1127.127\text{pF}$ ($i=1,2,\dots,6$)이고 공진기들의 공진주파수 f_0 는 6.78MHz으로 선정하였다. 그리고 동일형상의 공진기가 등간격으로 배치된 대칭구조의 시스템이므로 변수 대입을 위해 필요한 결합계수는 공진기 사이의 거리가 각 25cm, 50cm, 75cm, 100cm, 125cm인 총 5가지 경우로 구분할 수 있다. 이를 각 K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 로 정의 후 계산을 통해 값을 획득하였다⁵⁾. 여기서 K_0 는 공진기 사이에 공진기가 없는 인접 결합계수이며, $K_1 \sim K_4$ 는 공진기 사이에 공진기가 1~4개 배치된 비인접 결합계수가 된다. 최초에 효율을 계산할 때 비인접 결합계수를 무시하고 인접 결합계수 K_0 만 고려하여 효율을 산출한 후 비인접 결합계수 K_1 부터 K_4 까지 하나씩 순서대로 누적하여 반복 계산하였다. 반복 연산한 값을 정리하여 누적된 결합계수의 숫자인 $n(k)$ 에 대해 최대효율과 해당 효율이 도출되는 주파수를 그림 2와 같이 얻을 수 있다.

그림 2의 결과에서 최대효율 η_{max} 는 인접 결합계수만 고려한 경우 대비 모든 결합계수를 고려한 경우와 크게 차이가 없으나, 최대효율 도출 주파수 f_{max} 는 두 경우에서 차이가 발생함을 알 수 있다. 이에 따라 인접 결합계수만 고려하는 경우 최대효율을 얻을 수 있는 주파수를 알 수 없으므로 전송 효율을 최대로 활용하는 것에 한계가 있다. 하지만 비인접 결합계수를 1개 이상 고려했을 경우 ($n(k) > 1$) 최대효율 도출 주파수 지점이 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 시스템을 η_{max} 로 운용하기 위해서는 f_{max} 를 확인하여야 하며, 이를 위해서는 최소한 비인접 결합계수 중 가장 큰 값을 갖는 K_i 은 고려해 주파수 변동에

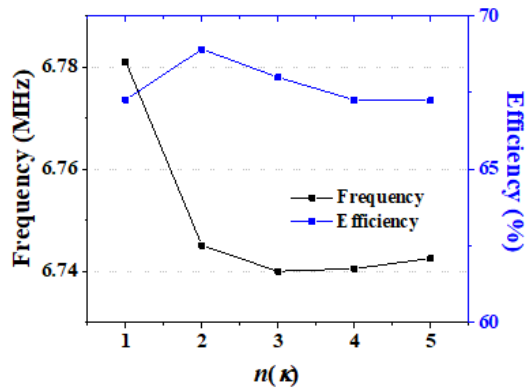


그림 2. 비인접 결합계수 고려 개수에 따른 최대효율 및 최대효율 도출 주파수
 Fig. 2. Maximum efficiencies and corresponding frequencies depending on the number of nonadjacent coupling coefficients included in the calculation

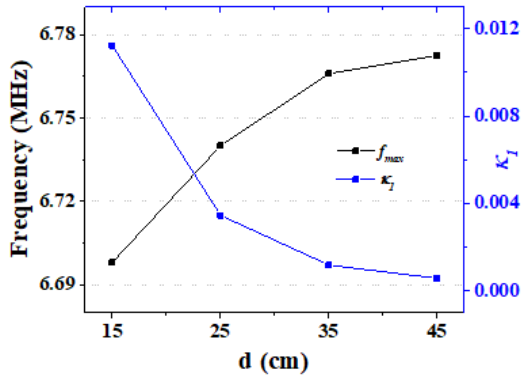


그림 3. 공진기 배치 간격 증가에 따른 최대효율 도출 주파수 및 비인접 결합계수 k_I 의 변화
 Fig. 3. Variation of the frequency of the maximum efficiency and the coupling coefficient k_I according to the increment of the distance between resonators

확인이 필요함을 알 수 있다.

추가로 k_I 에 의한 f_{max} 변화 특성을 확인하기 위해 6개의 공진기를 등간격 d 로 배치 후 이를 변경하여 비인접 결합계수 k_I 를 조정하였다. 그리고 이에 따른 f_{max} 와 k_I 의 변화 추이를 그림 3과 같이 나타냈으며, 여기서 공진기 사이 배치 간격 d 는 15cm부터 45cm까지 10cm씩 변경하였다.

두 인접한 공진기 사이 거리 d 가 가장 가까운 15cm의 경우 비인접 결합계수 k_I 가 가장 큰 값을 갖게 되며, f_{max} 가 공진기의 공진주파수인 6.78MHz 대비 이동이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 d 의 거리가 증가하여 k_I 의 값이 줄어들어 따라 주파수의 이동 수치 또한 작아져 공진주파수에 근접해 가는 경향을 확인할 수 있다. 그림 2와 그림 3의 결과를 종합하면 f_{max} 의 예측을 위해 릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템의 모든 비인접 결합계수를 고려하지 않고 비인접 결합계수 중 가장 큰 k_I 만 고려해 단순화하여 연산하여도 유효한 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다수의 릴레이를 포함한 무선 전력 전송 시스템의 효율에 비인접 결합계수가 미치는 영향을 분석하였다. 수식을 통해 최적부하를 도출하고 최대효율과 최대효율 도출 주파수를 계산하였다. 그리고 임의의 시스템을 모의하여 포함되는 비인접 결합계수의 범위 및 각 공진기 간 배치를 달리하여 최대효율 도출 주파수 변화에 관해 확인하였다. 이를 통해 비인접 결합계수가 최대효율 도출 주파수의 이동에

영향을 미치며, 가장 큰 비인접 결합계수 값에 가장 크게 종속됨을 알 수 있었다. 따라서 무선 전력 전송 시스템을 최대효율로 운용하기 위한 최대효율 도출 주파수를 파악하기 위해서는 최대 비인접 결합계수 1개까지만 고려한 단순화 연산을 통해 유효한 값 도출이 가능함을 알 수 있다.

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. Mag.*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007. (<https://doi.org/10.1126/science.1143254>)
- [2] 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. (<https://doi.org/10.7840/kics.2019.44.1.61>)
- [3] J.-H. Kim, B.-C. Park, and J.-H. Lee, "New analysis method for wireless power transfer system with multiple n resonators," *J. Electromagnetic Eng. and Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 173-177, Sep. 2013. (<https://doi.org/10.5515/JKIEES.2013.13.3.173>)
- [4] C. K. Lee, W. X. Zhong, and S. Y. R. Hui, "Effect of magnetic coupling of nonadjacent resonators on wireless power domino-resonator systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 1905-1916, Apr. 2012. (<https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2169460>)
- [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. (<https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2093534>)