

직렬-직렬 토폴로지를 채택한 무선전력전송 시스템의 누설자기장이 최소가 되기 위한 입력 전압과 출력 부하 결정 방법

Method for Determining Input Voltage and Output Load to Minimize Magnetic Field Leakage of a Wireless Power Transfer System with a Series-Series Topology

신 유 준¹

Yujun Shin¹

요 약

본 논문에서는 직렬-직렬 토폴로지를 채택한 무선전력전송 시스템에서 누설 자기장이 최소가 되도록 하는 입력 전압과 출력 부하를 결정하는 방법에 대해 제안하였다. 제안된 방법은 송신 코일과 수신 코일의 전류 크기가 같게 하여 두 전류의 페이저 합이 최소가 되게 하며, 최소가 된 전류 페이저 합은 누설 자기장이 최소가 되게 한다. 제안된 방법은 실험으로 증명되었다.

Abstract

In this paper, we proposed a method for determining the input voltage and output load that minimizes magnetic field leakage in a wireless power transfer system with a series-series topology. The proposed method is derived by ensuring that the currents in the transmitting and receiving coils are the same to ensure that the vector sum of the two currents is minimized, considering the minimum vector sum of the current minimizes magnetic field leakage. Moreover, the proposed method was experimentally proven.

Key words: Wireless Power Transfer, Magnetic Field, Input Voltage, Load, Series-Series Topology

I. 서 론

무선전력전송(WPT, wireless power transfer) 시스템은 자기장을 이용하여 송진(TX, transmitting side)에서 수신(RX, receiving side)으로 전력을 전송하는 기술이다. WPT 시스템은 모바일 애플리케이션에서부터 전기자동차까지, 매우 다양한 곳에 이용되고 있다^[1].

WPT 시스템은 자기장을 이용하여 에너지를 전송하는 특성상 누설 자기장(leakage magnetic field)에 대한 문제가

꾸준히 제기되고 있다. WPT 시스템의 누설 자기장을 최소화하기 위한 다양한 연구들이 진행되었지만^[1], 입력 전압 및 출력 부하와 누설 자기장과의 관계 연구된 바가 없다.

본 논문에서는 직렬-직렬 토폴로지(series-series topology)를 채택한 WPT 시스템에서 입력 전압, 출력 부하 저항을 결정하는 방법에 대해 제안하였다. 제안된 방법으로 입력 전압과 출력 부하 저항을 결정하면, 송신과 수신 코일에서의 전류 크기가 같아지고, 전류에 의한 자기장 페이저 합이 최소가 되어 누설 자기장이 최소가 된다. 제안

「이 연구는 2023학년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌음(과제번호: 20230216).」

계명대학교 자동차공학과(Department of Automotive Engineering, Keimyung University)

1: 조교수(<https://orcid.org/0000-0002-1678-137X>)

· Manuscript received April 9, 2024 ; Revised April 14, 2024 ; Accepted April 17, 2024. (ID No. 20240409-036)

· Corresponding Author: Yujun Shin (e-mail: yjshin@kmu.ac.kr)

된 방법은 실험으로 증명되었다.

II. 입력 전압, 출력 부하 저항 결정 방법

그림 1은 직렬-직렬 토폴로지를 가지는 WPT 시스템 회로도를 보여준다. 그림 1에서 인버터의 DC 입력 전압 V_{in} 과 인버터 출력 교류 전압(또는 AC 입력 전압)의 실효값 페이저 표현식 \dot{V}_{inv} 의 관계는 식 (1)과 같으며, DC 부하 저항(R_{load})과 정류기의 등가 입력 저항(R_L , 또는 AC 부하 저항)의 관계는 식 (2)와 같다^[2].

$$\dot{V}_{inv} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} V_{in} \angle 0^\circ \quad (1)$$

$$R_L = \frac{8}{\pi^2} R_{load} \quad (2)$$

단, 식 (2)는 전파 정류기 다이오드의 순방향 전압강하 (V_F)가 0이라 가정하여 유도되었다. 본 논문에서는 기본 파 성분만을 고려하여 \dot{V}_{inv} 와 정류기 등가 입력 저항(R_L)을 이용하여 회로 해석을 수행한다. TX, RX 코일의 전류 페이저 형식(\dot{I}_1, \dot{I}_2)을 구하기 위하여, 각 망에 대한 KVL 방정식을 세우면 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + R_1 & j\omega M \\ j\omega M & \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 + R_2 + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{inv} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

만약, 인버터의 동작 주파수(ω_o)가 TX, RX 측의 공진 주파수와 같다면, 식 (4) 및 식 (5)를 만족한다(그림 2).

$$\frac{1}{j\omega_o C_1} + j\omega_o L_1 = 0 \quad (4)$$

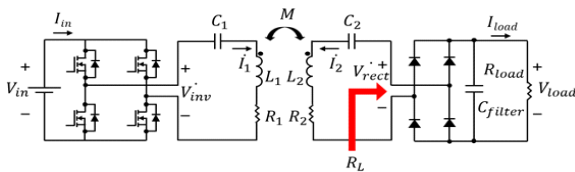


그림 1. 직렬-직렬 토폴로지를 채택한 WPT 시스템
Fig. 1. WPT system with series-series topology.

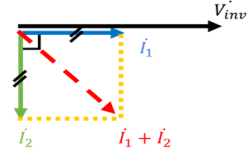


그림 2. 누설 자기장이 최소가 되는 전류 조건
Fig. 2. Current where magnetic field is minimized.

$$\frac{1}{j\omega_o C_2} + j\omega_o L_2 = 0 \quad (5)$$

식 (4) 및 식 (5)의 조건에서 식 (3)의 해를 구하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_2 + R_L}{\omega_o^2 M^2 + R_1(R_2 + R_L)} \dot{V}_{inv} \\ -\frac{j\omega_o M}{\omega_o^2 M^2 + R_1(R_2 + R_L)} \dot{V}_{inv} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서, TX와 RX 코일의 등가 저항 R_1, R_2 는 다른 회로 파라미터들보다 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하면, 식 (6)은 식 (7)과 같이 근사된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{R_L}{\omega_o^2 M^2} \dot{V}_{inv} \\ -\frac{j}{\omega_o M} \dot{V}_{inv} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 알 수 있듯이, 시스템이 공진 조건에 해당하면, \dot{I}_1 이 \dot{I}_2 보다 90도 위상이 앞선다. 만약, 시스템에서 요구하는 전력을 P_{out} 이라 가정하면 정류기 등가 부하 저항 R_L 은 식 (8)과 같이 결정되며, 이를 이용하면 식 (7)에서의 TX와 RX의 전류 크기는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$R_L = \frac{P_{out}}{I_2^2} = \frac{P_{out} \omega_o^2 M^2}{V_{inv}^2} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} |\dot{I}_1| \\ |\dot{I}_2| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{P_{out}}{V_{inv}} \\ \frac{1}{\omega_o M} V_{inv} \end{bmatrix} \quad (9)$$

한편, WPT 코일에서 누설되는 자기장은 코일의 전류의 세기에 비례하고, 전류 페이저의 합이 반드시 고려되어야 하며^[3], 전류 페이저 합의 크기가 최소가 되면 누설

되는 자기장도 최소가 된다. 전류의 페이저 합은 산술-기하 평균 부등식에 의해서, TX와 RX 코일 전류의 크기가 같을 때 식 (10)과같이 최소가 되며, 최솟값을 만족하는 각 전류 크기의 조건은 식 (11)과 같다.

$$|\dot{I}_1 + \dot{I}_2| \geq \sqrt{2\sqrt{|\dot{I}_1|^2}|\dot{I}_2|^2} = \sqrt{2\sqrt{\frac{P_{out}}{\omega_o M}}} \quad (10)$$

$$|\dot{I}_1| = |\dot{I}_2| \quad (11)$$

식 (11)의 조건을 식 (8) 및 식 (9)에 적용시키면, TX와 RX 전류가 같게하는 전압과 정류기 등가 부하 저항은 식 (12) 및 식 (13)과 같다.

$$V_{inv} = \sqrt{P_{out}\omega_o M} \quad (12)$$

$$R_L = \omega_o M \quad (13)$$

즉, 직렬-직렬 토폴로지를 채택한 WPT 시스템에서는 AC 입력 전압을 식 (12), AC 부하 저항은 식 (13)과 같이 선정하면 송신 및 수신 전류가 같아지고, 누설 자기장이 최소가 된다고 결론을 내릴 수 있다.

III. 실험을 통한 검증

그림 3은 제안된 AC 입력 전압과 AC 부하 저항을 결정 방법을 검증하기 위한 실험 및 측정 환경을 보여준다. 표 1은 그림 3의 실험에 사용된 공진주파수(85 kHz) 이외의 전기적 파라미터들을 보여준다. TX와 RX 코일은 기하학적으로 같으므로, 하나의 값으로 표기하였다. 표 1의 회로 소자들의 표기법은 그림 1의 표기와 같게 표기하였다.

표 2는 제안된 방법을 통해 계산된 AC 입력 전압 전압

표 1. 실험 설계 사양

Table 1. Experiment design specifications.

Parameters	Value
Operating frequency (f_o)	85 kHz
Target output power (P_{out})	50 W
Inductance of TX and RX coil (L_1, L_2)	37.1 μ H
Equivalent series resistance of TX and RX coil (R_1, R_2)	80 m Ω
Resonant capacitance of TX and RX side (C_1, C_2)	100 nF
Mutual inductance between TX and RX coils (M)	9.94 μ H

표 2. 제안된 방법으로 계산된 값들과 비교군들

Table 2. Values calculated using the proposed method and comparison groups.

Comparison group	Group 1	Group 2	Proposed	Group 3	Group 4
Calculated R_L [Ω]	1.31	3.31	5.31	7.31	9.31
Load resistance R_{load} [Ω]	1.62	4.08	6.55	9.02	11.5
Calculated V_{inv} [V]	32.8	20.6	16.3	13.9	12.3
Input voltage (V_{in}) [V]	36.4	22.9	18.1	15.4	13.7

과 AC 부하 저항을 나타낸다. 목표 출력 전력이 50 W라고 했을 때 제안된 식 (12) 및 식 (13)을 통해서 계산된 누설 자기장이 최소가 되는 입력 전압 (V_{inv})과 AC 부하 저항 (R_L)은 각각 16.3 V와 5.31 Ω 으로 계산되었다. 비교군들은 제안된 방법으로 계산된 저항보다 각각 ± 2 Ω , ± 4 Ω 들을 더하여 선정하였다. 실험을 위한 실제 DC 입력 전압 (V_{in})과 DC 부하 저항(R_{load})도 식 (1) 및 식 (2)을 통해 계산되어 함께 수록내었다.

그림 4는 표 2의 AC 입력 전압, AC 부하 저항을 적용하여 측정된 TX와 RX 코일의 전류를 보여준다. 앞서 식 (11)에서 예측되었듯이, 전류 크기의 페이저 합이 최소가 되는 조건은 TX와 RX의 전류 크기가 같은 조건이고, 제안된 5.31 Ω 의 저항을 적용하였을 때 두 전류가 같음을 알 수 있다. 한편, 식 (7)을 유도하기 위해 각 코일의 저항들이 다른 회로 파라미터들보다 충분히 작다고 가정한 것이 표 1 및 표 2를 통해 증명되었다.

또한, 그림 5는 제안된 방법으로 AC 입력 전압과 AC 부하 저항을 정하였을 때와 비교군들에서의 측정된 자기장을 보여준다. 그림 5에서의 모든 출력 전력은 50 W로

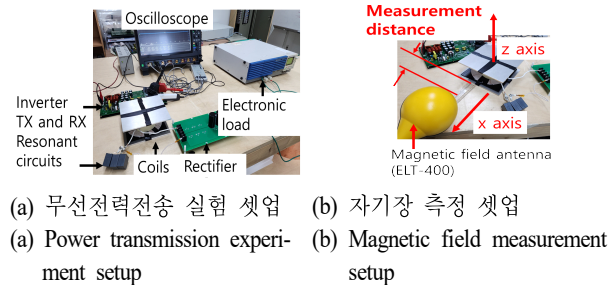


그림 3. 제안된 방법의 증명을 위한 실험 셋업
Fig. 3. Experimental setup to validate the proposed method.

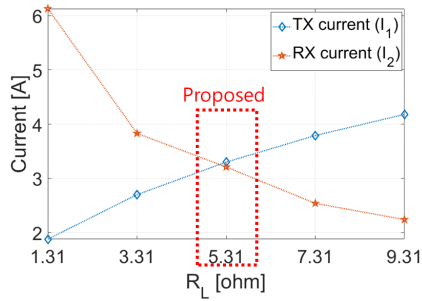
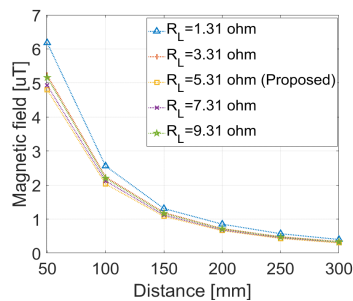


그림 4. 전류 측정 결과

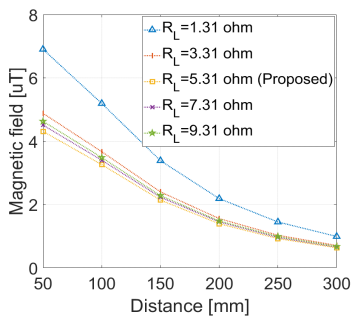
Fig. 4. Current measurement results.

동일하다. 자기장은 그림 3(b)와 같이 WPT 코일의 x축, z축 방향으로 자기장을 측정하였으며, 50~300 mm의 거리에서 50 mm 단위로 측정하였다. 측정 축과 관계없이 제안된 방법으로 AC 입력 전압, AC 부하 저항을 정한 경우에서 가장 낮은 자기장 값을 가짐을 알 수 있다. 한편, 보



(a) x 축

(a) x axis



(b) z 축

(b) z axis

그림 5. 그림 3(b)를 통해 측정된 거리에 따른 자기장 세기
Fig. 5. Magnetic field intensity according to distance measured through Fig. 3(b).

표 3. 제안된 그룹과 비교 그룹들의 50 mm 거리에서 측정된 자기장 세기[단위: μT]

Table 3. Magnetic field strength measured at a distance of 50 mm for the proposed and comparison groups [unit: μT].

Comparison group	Group 1	Group 2	Proposed	Group 3	Group 4
x axis	6.18	5.23	4.8	4.93	5.16
z axis	6.90	4.88	4.31	4.51	4.63

다 정확한 값의 확인을 위하여 각 케이스별로 50 mm 거리에서 측정된 자기장 세기를 표 3에서 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 직렬-직렬 토폴로지를 채택한 WPT 시스템에서 누설 자기장이 최소가 되도록 하는 입력, 출력 선정 방법에 대해 제안하였다. 제안된 방법은 TX와 RX의 코일 전류들을 동일하게 하여 전류의 페이저 합이 최소가 되고, 궁극적으로 누설 자기장이 최소가 되도록 하였다. 제안된 방법의 효용성은 실험으로 증명되었다. 보통 WPT 시스템의 출력 부하는 컨버터의 duty ratio로 조절하여 선택할 수 있음을 고려할 때, 본 논문의 내용의 가치는 충분하다고 결론지을 수 있다.

References

- [1] J. Park, D. Kim, K. Hwang, H. H. Park, S. I. Kwak, and J. H. Kwon, et al., "A resonant reactive shielding for planar wireless power transfer system in smartphone application," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 2, pp. 695-703, Apr. 2017.
- [2] H. Kim, J. Kim, J. Ahn, Y. Shin, B. Park, and S. Huh, et al., "Determination of compensation capacitor considering the dead-time characteristics for ZVS in wireless power transfer system," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 3, pp. 2501-2513, Jun. 2023.
- [3] S. Woo, Y. Shin, C. Lee, J. Rhee, J. Ahn, and J. Moon, et al., "Minimizing leakage magnetic field of wireless power transfer systems using phase difference control," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8202, Nov. 2022.