

방향성 결합기를 이용한 부하 임피던스 측정 시스템 설계

Design of Load Impedance Measurement System with Directional Coupler

한해빈 · 노정은 · 허영민 · 홍해찬 · 이문규

Hae-Been Han · Jeong-Eun Roh · Young-Min Huh · Hae-Chan Hong · Moon-Que Lee

요 약

본 논문에서는 가변 부하를 갖는 무선전력전송을 위한 부하 임피던스 측정 시스템을 설계 및 제작하였다. 제안한 구조는 부하로의 입사 및 반사 전압파를 분리하기 위한 방향성 결합기, 입사파와 반사파의 진폭 비율과 위상차를 계산하는 이득·위상 검출기, 측정 데이터를 PC에 연동하기 위한 DAQ 보드, 반사 계수와 임피던스 계산을 위한 MATLAB으로 구성된다. 제안한 구조의 검증을 위해 6.78 MHz에서 동작하는 부하 임피던스 측정 시스템을 제작하였다. 실험 결과, 부하 임피던스의 반사 계수 오차는 8.5 %FS(full-scale) 이내로 계산되었다.

Abstract

This study presents a load impedance measurement system for wireless power transfer (WPT) with variable loads. The proposed structure consists of a directional coupler separating the incident and reflected voltage waves into the load, a gain/phase detector that calculates the amplitude ratio and phase difference of both waves, a DAQ board that converts the measured raw data into PC-based data, and a MATLAB code that extracts the reflection coefficient and load impedance. A load impedance measurement system operating at 6.78 MHz is manufactured to verify the proposed structure. The experimental results show that proposed system calculates the reflection coefficient error within 8.5 %FS (full-scale).

Key words: Wireless Power Transfer (WPT), Directional Coupler, Impedance Measurement System, Reflection Coefficient

I. 서 론

최근 스마트폰과 같은 모바일 장치, 전동 킥보드 등 다양한 전동 이동수단의 수요가 급증하고 있다. 이러한 전자제품은 배터리를 통해 전력을 공급받으며, 배터리 용량의 한계로 지속적인 충전이 필요하다. 또한, 유선에서 무선으로 충전 시스템의 변화가 일어나고 있어 무선 전력 전송 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다^{[1]~[3]}. 그중, 수~

수십 MHz에서 동작하는 자기 공명 방식의 무선 전력 전송은 근접장 효과를 이용하며, 송수신 코일의 공진 주파수를 일치시키기 때문에 자기 유도 방식보다 효율이 높고 인체에 대한 영향이 적다^[4]. 최대 효율의 전력 전송은 임피던스 정합이 필수적이며, 이때, 부하 임피던스의 값을 알아야 이에 맞게 정합 회로를 구성하여 임피던스 정합을 이룰 수 있다. 무선 전력 전송 시스템은 충전 위치, 거리 또는 수신부의 개수, 종류에 따라 부하 임피던스가

「이 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021-0-00169).」

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과(School of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul)

· Manuscript received February 22, 2022 ; Revised March 14, 2022 ; Accepted April 18, 2022. (ID No. 20220222-019)

· Corresponding Author: Moon-Que Lee (e-mail: mqlee@uos.ac.kr)

달라진다. 특히, 무선 전력 전송에서의 효율은 부하 임피던스에 크게 의존하며, 최대의 효율은 하나의 부하 임피던스값에서만 나타난다. 더불어, 높은 품질 계수(Q-factor)를 갖는 무선 전력 전송 시스템의 경우, 송수신 코일의 결합 계수에 따라 공진 주파수 분리 현상이 일어나게 되고^[5], 이는 심각한 효율 저하 문제를 일으킨다. 이에 최대 효율의 무선 전력 전송을 위해 부하 임피던스를 측정 및 정합에 대한 연구가 진행되고 있다^{[6][7]}. 기존 무선 전력 전송 시스템은 송수신 기간 데이터 통신으로 충전 중에 상태 정보를 받아 부하 임피던스를 측정한다^[8]. 이러한 방식의 측정 시스템은 스위치가 오작동할 수 있어, 데이터 통신 없이 충전상태를 측정하는 방법이 필요하다^[9]. 본 논문은 무선 전력 전송 시스템에서 방향성 결합기를 이용한 부하 임피던스 실시간 측정 시스템을 제시하고 검증한다.

II. 부하 임피던스 측정 시스템 이론

2-1 부하 임피던스 측정 시스템 구성 및 개요

그림 1은 무선 전력 전송에서의 부하 임피던스 측정 시스템 구조를 보여준다. 임피던스 측정 시스템은 전력 증폭기, 방향성 결합기, 전압 이득·위상 감지기로 구성되

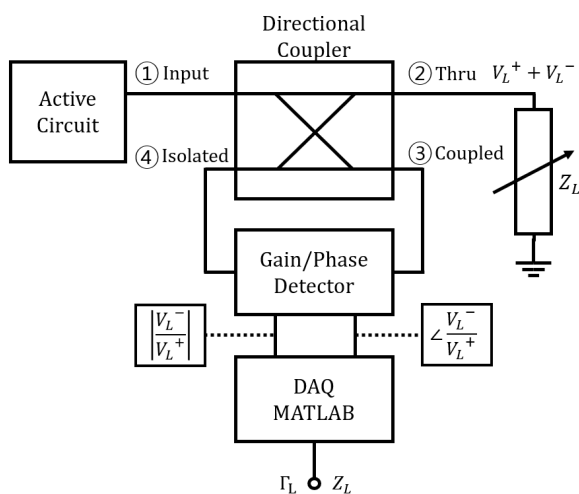


그림 1. 제안된 부하 임피던스 측정 시스템의 블록 다이어그램

Fig. 1. Block diagram of the proposed load impedance measurement system.

어 있다. 전력 증폭기는 6.78 MHz에서 동작하고, 100-W급 출력 전력을 갖는다. 전력 증폭기의 최대 출력 전력과 이득·위상 감지기의 최대 입력 전력 사양 고려 시, 40 dB 이상의 결합도가 요구된다. 이에 방향성 결합기는 6.78 MHz에서 40 dB의 결합도 성능을 갖도록 설계하였다. 이득·위상 감지기는 방향성 결합기의 결합 포트와 격리 포트에서 출력된 신호의 크기와 위상을 비교한다. MATLAB을 통해 이득·위상 감지기에서 출력된 값을 바탕으로 부하 임피던스를 추출한다.

2-2 부하 임피던스 측정을 위한 방향성 결합기 설계

그림 2는 부하 임피던스 측정을 위한 DC 차단 특성을 갖는 집중소자로 구성된 방향성 결합기이다. 무선 전력 전송 시스템에서는 6.78 MHz의 낮은 주파수 대역을 사용하기 때문에 전송선로로 설계하는 것은 비현실적이다. 따라서 집중소자로 구성된 방향성 결합기를 설계하였다.

집중소자로 구성된 90° 하이브리드 결합기는 우수-기수 모드 분석을 통해 구할 수 있으며^{[10][11]}, 이 결합기를 직렬 연결하여 2단으로 구성하였다(그림 2). 2단 방향성 결합기는, 1단 방향성 결합기 대비, 대역폭이 향상되며, 이로 인해 부하 임피던스 측정 시스템의 성능 편차가 감소한다. 표 1은 DC 차단 특성을 갖는 집중소자로 구성된 방향성 결합기의 파라미터를 나타낸다. 방향성 결합기는 모든 포트가 동일한 특성 임피던스(Z_0)를 갖고, 결합기를

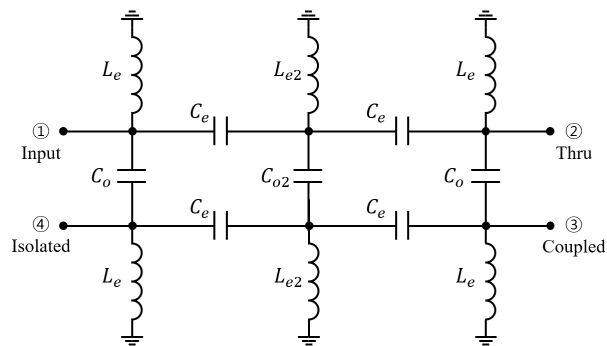


그림 2. 집중소자로 구성된 DC 차단 특성을 갖는 방향성 결합기

Fig. 2. Directional coupler using lumped-elements with DC block characteristics.

표 1. 방향성 결합기의 집중소자 파라미터

Table 1. Parameter of lumped-element in directional coupler.

Component	Parameter
L_e	$\frac{Z_0}{\omega_0} \sqrt{\frac{1-C/2}{1+C/2}}$
L_{e2}	$L_e/2$
C_e	$\frac{L_e}{Z_0^2(1-C/2)}$
C_o	$C_e C/2$
C_{o2}	$2C_o$

구성하는 집중소자 파라미터는 중심 주파수(ω_0)와 결합 계수(C)에 의해 결정된다.

2.3 부하 임피던스 측정 이론

임의의 부하 임피던스는 그림 3과 같이 방향성 결합기로 측정할 수 있다. 계산의 편의를 위해 방향성 결합기의 모든 포트가 정합되고 가역적 특성을 갖는 경우, 방향성 결합기의 산란 매트릭스는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{41} \\ S_{21} & S_{11} & S_{41} & S_{31} \\ S_{31} & S_{41} & S_{11} & S_{21} \\ S_{41} & S_{31} & S_{21} & S_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & T & C & I \\ T & 0 & I & C \\ C & I & 0 & T \\ I & C & T & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때, T , C , I 는 각각 방향성 결합기의 투과 계수, 결합 계수, 격리 계수를 나타낸다.

포트 2에 임의의 부하 Z_L 에 대한 부하의 반사 계수는

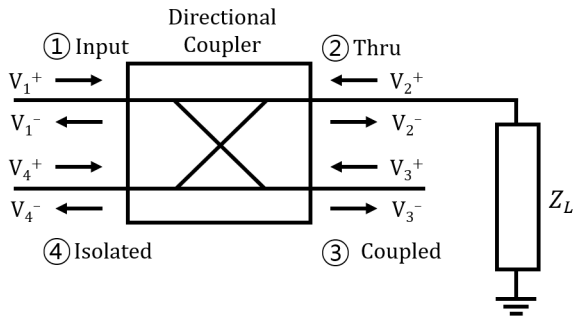


그림 3. 방향성 결합기의 회로망

Fig. 3. Circuit network of directional coupler.

Γ_L 이고, 종단 조건을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_2^+ &= \Gamma_L V_2^- \\ V_2^- &= TV_1^+ + IV_3^+ + CV_4^+ \\ V_2^+ &= \Gamma_L(TV_1^+ + IV_3^+ + CV_4^+) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 모든 포트에 대입하여 포트 2를 소거하여 산란 매트릭스를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_1^- &= TV_2^+ + CV_3^+ + IV_4^+ \\ &= T\Gamma_L(TV_1^+ + IV_3^+ + CV_4^+) + CV_3^+ + IV_4^+ \\ &= T^2\Gamma_L V_1^+ + (C + T\Gamma_L) V_3^+ \\ &\quad + (I + T\Gamma_L) V_4^+ \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_3^- &= CV_1^+ + IV_2^+ + TV_4^+ \\ &= (C + T\Gamma_L) V_1^+ + I^2\Gamma_L V_3^+ \\ &\quad + (T + C\Gamma_L) V_4^+ \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_4^- &= IV_1^+ + CV_2^+ + TV_3^+ \\ &= (I + T\Gamma_L) V_1^+ + (T + C\Gamma_L) V_3^+ \\ &\quad + C^2\Gamma_L V_4^+ \end{aligned} \quad (5)$$

식 (3)~식 (5)를 통해, 각 입력, 결합, 격리 포트에 대한 산란 매트릭스 $[S']$ 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_3^- \\ V_4^- \end{bmatrix} = [S'] \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_3^+ \\ V_4^+ \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [S'] &= \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} & S'_{13} \\ S'_{21} & S'_{22} & S'_{23} \\ S'_{31} & S'_{32} & S'_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} T^2\Gamma_L & C + T\Gamma_L & I + T\Gamma_L \\ C + T\Gamma_L & I^2\Gamma_L & T + C\Gamma_L \\ I + T\Gamma_L & T + C\Gamma_L & C^2\Gamma_L \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)로 S'_{21} , S'_{31} 과 부하 반사 계수의 관계식을 나타낼 수 있다.

$$\frac{S'_{31}}{S'_{21}} = \frac{I + T\Gamma_L}{C + T\Gamma_L} \quad (8)$$

식 (8)에서 $T \approx -1$, $|\Gamma_L| \leq 1$, $|I| \ll |C|$ 를 가정하면, 부하 반사 계수는 아래와 같이 간단하게 정리할 수 있다. 이때, Γ_L' 는 근사화된 부하 반사 계수이다.

$$\Gamma_L' = -\frac{S_{31}'}{S_{21}'} \quad (9)$$

그림 4와 같이, 시간 영역에서 각 출력 포트 3, 4에서의 신호 크기 및 위상을 비교하면 다음과 같이 실시간으로 부하 반사 계수를 추출할 수 있다.

$$S_{31}' = \frac{V_4^-}{V_1^+} \bigg|_{V_4^+ = 0} = \frac{V_4}{V_1^+} = \frac{V_{4m} e^{j\theta}}{V_1^+} \quad (10)$$

$$S_{21}' = \frac{V_3^-}{V_1^+} \bigg|_{V_3^+ = 0} = \frac{V_3}{V_1^+} = \frac{V_{3m} e^{j\phi}}{V_1^+} \quad (11)$$

식 (10) 및 식(11)을 식 (9)에 대입하여 반사 계수를 방향성 결합기의 결합 및 격리 포트에 대한 전압의 크기와 위상으로 정리하면 다음과 같다.

$$\Gamma_L' = -\frac{V_{4m}}{V_{3m}} e^{j(\theta - \phi)} \quad (12)$$

식 (12)는 무손실, 이상적 방향성(분리도)의 조건에서 유도된 수식이므로, 이 수식으로는 측정에서 정확한 부하

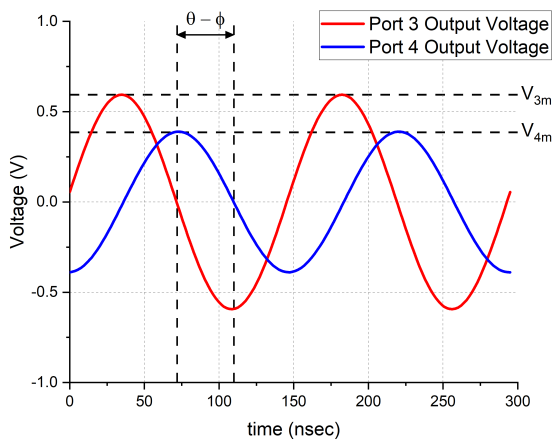


그림 4. 포트 3, 4 출력 신호의 크기 및 위상 비교
Fig. 4. Comparison of magnitude and phase of output signals of 3 and 4 ports.

임피던스 추출이 어렵다. 정확한 부하 임피던스 측정을 위해 제작된 방향성 결합기의 삽입 손실($|T| < 1$)과, 분리도($|I| > 0$)를 고려해야 하며, 이에 따라 식 (8)을 정리하면 다음과 같다.

$$\Gamma_L = \frac{I - C \frac{S_{31}'}{S_{21}'}}{T \left(\frac{S_{31}'}{S_{21}'} I - C \right)} = -\frac{I + C \Gamma_L'}{T(I \Gamma_L' + C)} \quad (13)$$

2.4 이득 · 위상 감지기

부하 임피던스를 측정하기 위해 방향성 결합기의 포트 3과 4에서 출력된 신호의 크기와 위상 차이를 알아야 한다. 이를 위해, Analog Device社의 AD8302 전압 이득 · 위상 검출기를 사용하였다. AD8302를 사용한 부하 임피던스 측정 모듈은 그림 5와 같다.

이때, 포트 3, 4로 전달된 신호의 크기 비(V_{MAG}) 및 위상차(V_{PHS})는 다음과 같다^[2].

$$V_{MAG} = 0.9 + 0.3 \log(|\Gamma_L'|) \quad (14)$$

$$V_{PHS} = 0.9 + 0.01(|\angle \Gamma_L' - 90|) \quad (15)$$

식 (15)로는 포트 3, 4 신호의 위상차의 크기만 얻을 수 있다. 따라서 $\angle \Gamma_L'$ 의 부호 판별을 위해 전자 계전기로 위상 지연을 발생시키고, V_{PHS} 의 변화로 부호를 판별한다^[13]. 위상 지연으로 V_{PHS} 가 증가하면 $\angle \Gamma_L'$ 가 음수, V_{PHS} 가 감

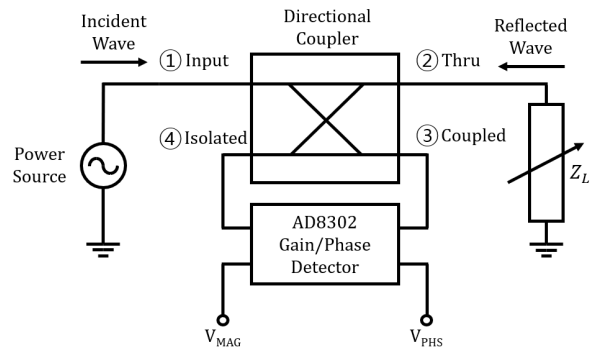


그림 5. AD8302를 이용한 부하 임피던스 측정 모듈
Fig. 5. Load impedance measurement module with AD8302.

소하면 $\angle \Gamma'_L$ 가 양수이다. 식 (14) 및 식(15)와 $\angle \Gamma'_L$ 의 부호로 부하의 반사 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|\Gamma'_L| = 10^{\frac{V_{MAG}-0.9}{0.3}} \quad (16)$$

$$\angle \Gamma'_L = \pm 100 V_{PHS} \quad (17)$$

$$\Gamma'_L = 10^{\frac{V_{MAG}-0.9}{0.3}} e^{-j(\pm \frac{5}{9} \pi V_{PHS})} \quad (18)$$

식 (18)을 식 (13)에 대입하여 부하의 반사 계수를 추출할 수 있다.

III. 부하 임피던스 측정 시스템 검증 결과

그림 6(a)는 설계한 부하 임피던스 측정 시스템의 전체 구조를 보여준다. 그림 6(b)는 임피던스 측정 시스템에 사용된 DC 차단 특성을 갖는 집중소자형 방향성 결합기이다. 무선 전력 전송 시스템의 부하는 임의의 값을 갖는다. 제작한 방향성 결합기는 중심 주파수인 6.78 MHz에서 모든 포트가 50 Ω 에 정합되어 있다. 그림 7은 제작한 방향

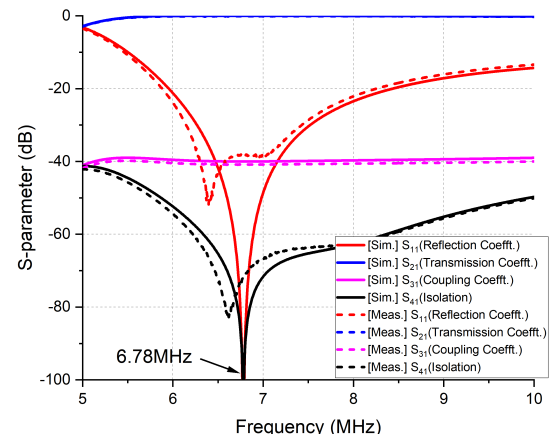
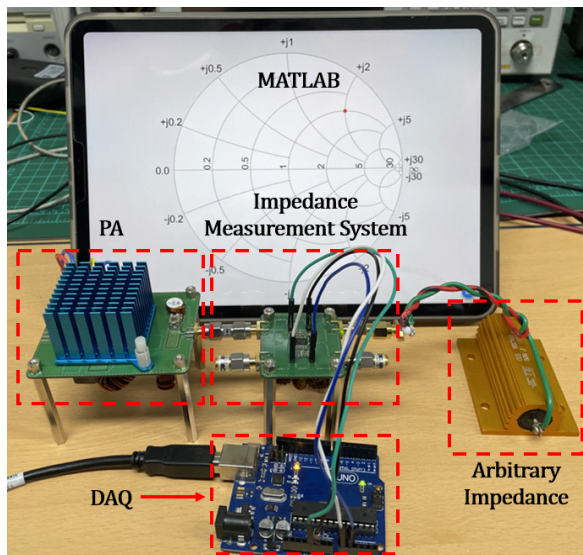


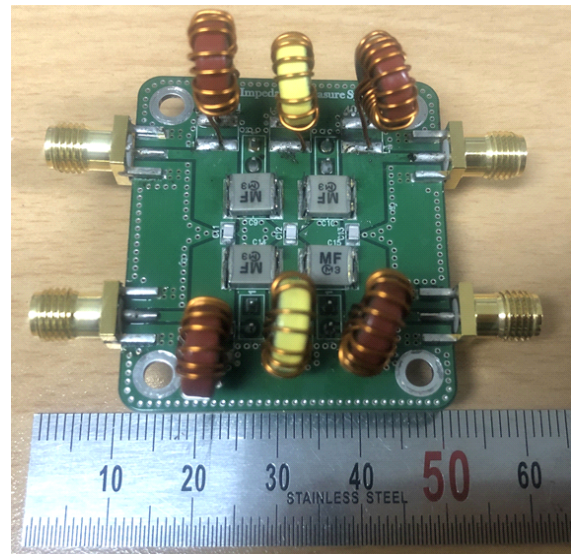
그림 7. 제작한 방향성 결합기의 산란 매트릭스
Fig. 7. S-parameters of manufactured directional coupler.

성 결합기의 산란 매트릭스를 나타낸다. 제작한 방향성 결합기는 6.78 MHz에서 38.1 dB의 반사 손실, 0.1 dB의 삽입 손실, 40.9 dB의 결합도, 31 dB의 방향성의 성능을 갖는다.

제안된 임피던스 측정 시스템은 이득·위상 감지기에 서 측정된 데이터를 바탕으로 식 (13)과 식 (18)을 통해



(a) 설계한 부하 임피던스 측정 시스템 구조
(a) Structure of the designed load impedance measurement system



(b) 제작한 DC 차단 특성을 갖는 집중소자 방향성 결합기
(b) Fabricated lumped-element directional coupler with DC block characteristic

그림 6. 제작한 부하 임피던스 측정 시스템
Fig. 6. Manufactured the load impedance measurement system.

부하 임피던스의 반사 계수를 추출한다. 표 2와 그림 8은 본 시스템을 이용하여 측정한 부하의 실제값과 측정값을 보여준다. 표 3은 기존 연구와 본 연구와의 반사 계수 오차 비교를 나타낸다. 측정 결과, 부하 임피던스 측정 시스템의 반사 계수 오차는 8.5 %FS 이내이다.

IV. 결 론

본 논문에서 제안한 임피던스 측정 시스템은 6.78 MHz

표 2. 부하 임피던스 측정 결과 비교

Table 2. Comparison of load impedance measurement results.

Γ_{ideal}	Γ_{meas}	Reflection coefficient error $ \Gamma_{ideal} - \Gamma_{meas} $
$0 \angle 0^\circ$	$0.02 \angle 107^\circ$	2.0 %FS
$0.44 \angle 78^\circ$	$0.41 \angle 78^\circ$	3.0 %FS
$0.45 \angle 139^\circ$	$0.42 \angle 133^\circ$	5.5 %FS
$0.52 \angle 55^\circ$	$0.50 \angle 56^\circ$	2.2 %FS
$0.71 \angle 70^\circ$	$0.77 \angle 62^\circ$	1.2 %FS
$0.74 \angle 143^\circ$	$0.71 \angle 138^\circ$	7.0 %FS
$0.82 \angle -68^\circ$	$0.84 \angle -67^\circ$	2.5 %FS
$0.96 \angle 74^\circ$	$0.94 \angle 79^\circ$	8.5 %FS

FS: Full-scale.

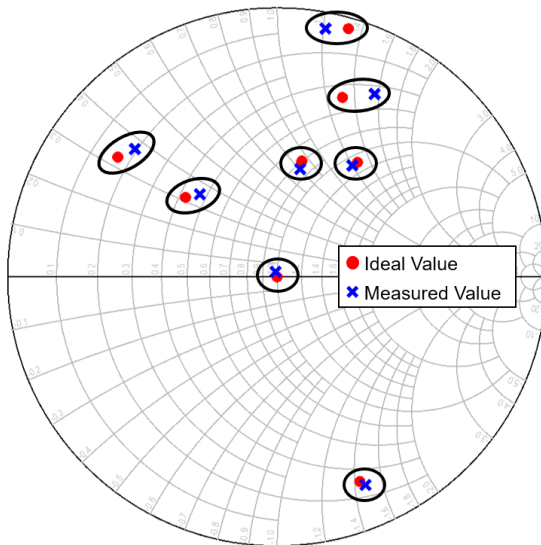


그림 8. 부하 임피던스 측정 시스템 결과

Fig. 8. Load impedance measurement system results.

표 3. 반사 계수 오차 비교

Table 3. Comparison of reflection coefficient error.

Ref.	Center frequency	Reflection coefficient error
[14]	433 MHz	37 %FS
[15]	400 MHz	28 %FS
This work	6.78 MHz	8.5 %FS

FS: full-scale.

방향성 결합기, 이득·위상 감지기, MATLAB으로 구성되어 있다. 방향성 결합기는 DC 차단 특성을 갖고 집중 소자로 구성되어 있다. 이득·위상 감지기는 방향성 결합기의 결합 및 격리 포트의 전압의 크기 및 위상을 측정한다. MATLAB은 실시간으로 측정된 부하 임피던스를 보여준다. 제안된 임피던스 측정 시스템을 이용하여 실제 부하에 가까운 값을 측정하였다. 본 논문에서 제안한 부하 임피던스 측정 시스템은 충전 위치, 거리 또는 수신부의 개수, 종류에 따른 가변 부하 상태의 무선 전력 전송에서 실시간으로 임피던스를 측정할 수 있어, 무선 전력 전송 시스템에 유용하게 적용될 것으로 기대한다.

References

- [1] S. Li, C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, Mar. 2015.
- [2] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, and G. Jung, et al., "Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1179-1192, Mar. 2014.
- [3] J. S. Kim, G. S. Lee, N. Y. Kim, and C. W. Kim, "3D scanning magnetic resonance wireless power transfer system to eliminate dead-zones and achieve maximum transfer efficiency," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 1, pp. 72-78, Jan. 2020.

- [4] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34-48, Jan. 2008.
- [5] W. Q. Niu, J. X. Chu, W. Gu, and A. D. Shen, "Exact analysis of frequency splitting phenomena of contactless power transfer systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, no. 6, pp. 1670-1677, Jun. 2013.
- [6] Y. Lim, H. Tang, S. Lim, and J. Park, "An adaptive impedance-matching network based on a novel capacitor matrix for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4403-4413, Aug. 2014.
- [7] A. P. Sample, D. T. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [8] C. C. Huang, C. L. Lin, "Wireless power and bidirectional data transfer scheme for battery charger," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 6, pp. 4679-4689, Jun. 2018.
- [9] H. S. Jang, H. S. Tae, K. S. Kim, T. D. Yeo, K. S. Oh, and J. W. Yu, "Performance improvement using real-time detection of time-variant load impedance of the receiver in wireless power transfer system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 6, pp. 679-689, Jun. 2014.
- [10] M. A. Y. Abdalla, K. Phang, and G. V. Eleftheriades, "A compact highly reconfigurable CMOS MMIC directional coupler," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 2, pp. 305-319, Feb. 2008.
- [11] Y. C. Chiang, C. Y. Chen, "Design of a wide-band lumped-element 3-dB quadrature coupler," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 3, pp. 476-479, Mar. 2001.
- [12] Analog Devices, "AD8302: LF-2.7 GHz RF/IF gain and phase detector," 2018. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8302.pdf>
- [13] J. Yang, L. Zhou, "A portable antenna VSWR meter based on integrated detector and its calibration method," in *2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Chengdu, May 2010, pp. 918-920.
- [14] J. Buckley, K. G. McCarthy, B. O'Flynn, and C. O'Mathuna, "The detuning effects of a wrist-worn antenna and design of a custom antenna measurement system," in *The 40th European Microwave Conference*, Paris, Sep. 2010, pp. 1738-1741.
- [15] V. Kible, R. N. de Lima, K. B. de Brito, A. Büla, and A. Zimmermann, "Quadrature block for UHF reflection coefficient measurements using a directional coupler and injection locking," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 1, pp. 275-285, Jan. 2020.

한 해 빈 [서울시립대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5267-5753>



2022년 2월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2022년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, RF 레이다, WPT, 위성통신시스템 등

홍 해 찬 [서울시립대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0002-4818-4721>



2017년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 학부생
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, RF 레이다, WPT 등

노 정 은 [서울시립대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3664-4409>



2016년~2020년: (주)케이알에프 통신연구소 DS팀 선임연구원
2019년 2월: 동양미래대학교 정보통신공학과 (공학사)
2021년 2월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, RF 레이다, 무선통신시스템 등

이 문 규 [서울시립대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-2231-8509>



1992년: 한국과학기술원 전기및전자학과 (공학사)
1994년: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1999년~2002년: 한국전자통신연구원 위성탐재부품팀 선임연구원
2015년 11월~2018년 2월: 과학기술정보통신부 전파위성PM/CP
2002년~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, RF 레이다/센싱, 무선통신시스템 등

허 영 민 [서울시립대학교/학사생]

<https://orcid.org/0000-0002-8248-914X>



2016년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 학부생
[주 관심분야] RF 회로 및 시스템, RF 레이다/센싱, WPT, 5G, 6G 등