

単一容量による電界結合方式における等価回路の構築及び 回路パラメータ同定手法の検討

学生員 庄子 聖人 正員 居村 岳広 フェロー 堀 洋一（東京理科大学）

Equivalent Circuit Modeling and Parameter Identification Method for Single Capacitive Coupled Wireless Power Transfer

Kiyoto Shoji, Student Member, Takehiro Imura, Member, Yoichi Hori, Fellow

Single capacitive coupled wireless power transfer (SCC-WPT) is a technology that simplifies system structures by utilizing only a single plate each for power transmission and reception. While existing studies often individually model stray capacitances within these systems, a quantitative method to rigorously verify their assumed locations in equivalent circuit models has remained lacking. In this study, we propose a parameter identification method using the least squares approach to compare multiple candidate models, estimate physical parameters, and validate the selected circuit structure. Specifically, a non-linear least squares algorithm was developed for an SP-compensated SCC-WPT system, utilizing input impedance data across a wide range of varying load resistances. Electromagnetic field analysis showed that the derived equivalent circuit model achieved high accuracy, recording a residual sum of squares of 1.37×10^{-4} between the analytical and calculated input impedances. Furthermore, experimental results confirmed a strong agreement between the calculated values and the measured trends. This demonstrates the proposed method's ability to objectively derive effective circuit models for characteristic analysis and design optimization of SCC-WPT systems.

キーワード：ワイヤレス電力伝送，電界共振結合，単一容量式ワイヤレス電力伝送

Keywords：wireless power transfer, Electric field resonance coupling, single capacitive coupled wireless power transfer

1. 序論

近年、有線充電における断線や感電リスクの解消に向け、ワイヤレス電力伝送（WPT）への期待が高まっている。WPTの非放射型（結合型）の一つである電界結合方式（CPT）は、磁界結合方式（IPT）と比較して、金属異物による効率低下や発熱リスクがなく、安価で軽量であるという利点を持つ⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし、一般的なCPTはFig.1のように、送電側と受電側にそれぞれ対となる計4枚の金属プレートが必要とするため、機器設計の自由度が制限されるという課題が存在する。

この課題を解決する手法として、送受電に各1枚の金属プレートのみを用いる「単一容量による電界結合方式（Single Capacitive Coupled Wireless Power Transfer: SCC-WPT）」が注目されている⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾。SCC-WPTはFig.2のように物理的な帰還線を持たず、電極と大地（アース）や周囲の媒体との間に形成される浮遊容量を利用して仮想的な閉回路を構成する。これにより、構造が単純化され、システム

の軽量化や設計の自由度が大幅に向上する。SCC-WPTシステムに関する研究はその補償回路の工夫による効率の増加や原理の解明に関する研究がある一方で、その特殊な伝送メカニズムゆえに、動作原理や回路パラメータの解析手法・モデリングは未だ探求段階にある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

SCC-WPTシステムのパラメータ同定に関する先行研究において、水中の予測困難な環境の影響を単一の未知インピーダンス（ Z_g ）としてブラックボックス化し、その値を実験的に同定する手法が提案されている⁽⁹⁾。この手法はシステムの振る舞いをマクロに予測する上で非常に有効である。しかし、同定されたインピーダンスの実数成分が負の値となるなど、物理的な回路素子としての直感的な理解や損失解析が困難であるという課題が残されている。また、実製品への応用を考えた場合、未知の寄生要素を単一のインピーダンスとして一括りにするのではなく、回路構造に対応した個別の物理量として正確に把握できるより詳細な診断手法が求められる。

そこで本研究では、空気中で動作するSP補償回路を用い

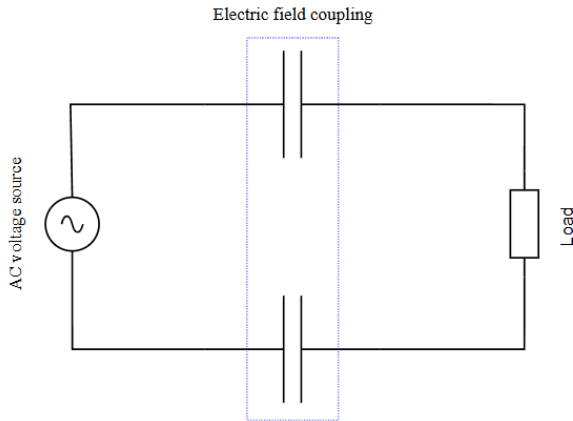


Fig. 1 CPT transmission

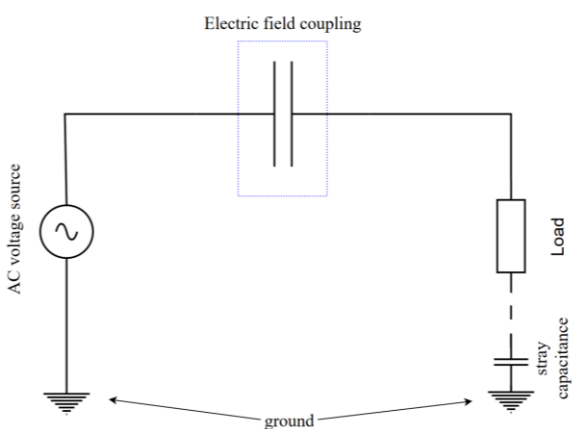


Fig. 2 SCC-WPT transmission

た SCC-WPT システムを対象とし、等価回路モデルの構築及び、回路の妥当性を検証できる新たなパラメータ同定手法を提案する。具体的には、浮遊容量の配置パターンが異なる複数のモデル候補において、負荷抵抗を広範囲に変化させた際の入力インピーダンス変動特性に対して非線形最小二乗法を適用する。これにより、同定されたパラメータの妥当性を評価することで、自身で仮定した浮遊容量の位置が実態に即しているかを確かめられ、SCC-WPT システムにおける等価回路の導出を可能にし、回路設計における妥当性を示すことが出来る。

2. 原理

〈2・1〉 システム構成 本研究では、Fig.2 のような SCC-WPT 回路について考える。この構成において、送受電プレートは空間的に隔離して結合容量を形成し、大地（アース）を共通の帰路として浮遊容量を形成することで電力伝送を行う。

本研究で扱う回路の構成としては、Fig.3 に示す送電側に直列インダクタ L_1 、受電側に並列インダクタ L_2 を配置した SP(series-parallel) 回路を採用した。また、以後の解析において、交流電源の入力電圧を V_{in} とし、受電側の負荷抵抗 R_L は特性評価のための可変パラメータとして扱う。

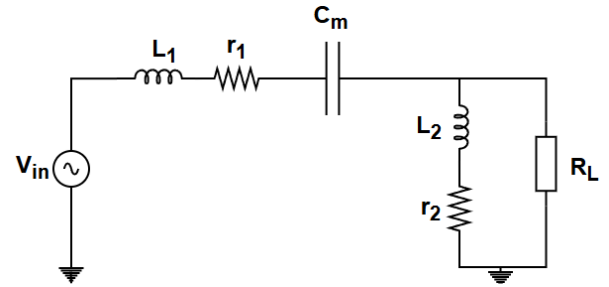


Fig. 3 SP(series-parallel) circuit

〈2・2〉 提案等価回路モデル SCC-WPT の伝送特性を正確に解析するためには、プレート間の結合容量 C_m に加え、回路構造に起因して生じる浮遊容量を適切にモデル化する必要がある。

Fig.4 に示すような一般的な静電容量モデル⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾では、送電側および受電側のプレートとアース間の対地容量 C_{f1} , C_{f2} 及び受電側回路とアース間の浮遊容量 C_{ff} が考慮される。しかし、この基本モデルは、経験則的に決定されるものであり、実測される入力インピーダンスの負荷特性を完全に再現しているかは分からない。

そこで本研究では、回路の配線構造に起因する寄生素素を考慮し、送電側の配線間に生じる浮遊容量 C_{p1} を新たに追加した等価回路モデルを提案する (Fig.5)。提案モデルは、送電側の補償インダクタ L_1 に対して C_{p1} が並列に作用する構成となる。次章では、この提案モデルに基づく入力インピーダンスの定式化と、各浮遊容量 (C_{f1} , C_{f2} , C_{ff} , C_{p1}) の妥当性を検証するためのパラメータ同定手法について述べる。また、Fig.6 にアース記号を排除した等価回路図を示す。

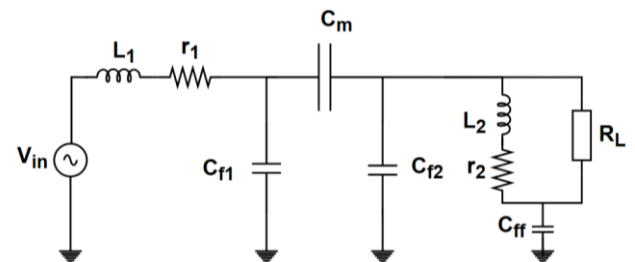


Fig. 4 A typical equivalent circuit accounting for stray capacitance in an SP circuit

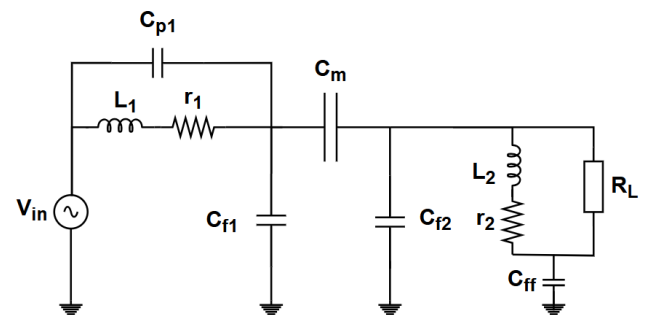


Fig. 5 Proposed equivalent circuit accounting for stray capacitance in the SP circuit

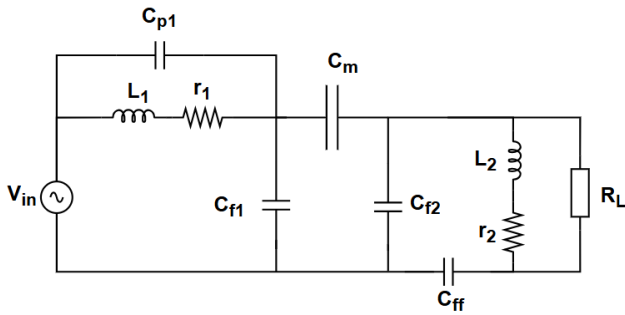


Fig. 6 Equivalent circuit diagram

3. パラメータ同定手法

〈3・1〉 非線形最小二乗法を用いた同定手法 本研究では、提案した等価回路モデルに含まれる未知の浮遊容量を特定するため、負荷抵抗 R_L を変化させた際の入力インピーダンス Z_{in} の周波数特性に着目する。入力インピーダンスは、 R_L および同定対象となる各浮遊容量を未知パラメータの集合 $C = [C_{f1}, C_{f2}, C_{ff}, C_{p1}]$ と定義したとき、入力インピーダンス Z_{in} は R_L および C の関数として、(1)式で記述できる。

$$Z_{in} = f(R_L, C) \dots\dots\dots (1)$$

解析や実測によって得られた n 個のデータセット $(R_{Li}, Z_{meas,i}) (i = 1, 2, \dots, n)$ に対し、計算値 $Z_{calc,i}$ との差を最小化する最適パラメータ C を推定する。入力インピーダンスは複素数であり、その特性曲線は実部と虚部に分かれる。しかし、パラメータの同定を実部と虚部で完全に独立して行くと、双方で物理的に矛盾した異なるパラメータが導出されるおそれがある。

そこで本手法では、パラメータ C が実部と虚部双方の特性を同時に満たすように、(2)式に示すように複素残差の絶対値の二乗和、すなわち実部と虚部それぞれの残差の二乗和を合算した単一の残差平方和 S を評価関数として定義した。

$$S = \sum_{i=1}^n |Z_{meas,i} - Z_{calc,i}|^2$$

$$= \sum_{i=1}^n \left[\{ \text{Re}(Z_{meas,i}) - \text{Re}(Z_{calc,i}) \}^2 + \{ \text{Im}(Z_{meas,i}) - \text{Im}(Z_{calc,i}) \}^2 \right] \dots\dots\dots (2)$$

この最小化問題に対し、非線形最小二乗法の一種であるレーベンバーグ・マルカート法を適用することで、各浮遊容量値を一意に特定する。

〈3・2〉 等価回路モデルの妥当性検証方法 等価回路モデルの妥当性を検証する具体的な手順について述べる。まず、物理的な回路構造から推測される複数の等価回路モデルを立案する。次に、それぞれのモデルに対して前節の同定手法を適用し、最終的な残差平方和 S の大きさや近似グラフの妥当性、グラフの同定されたパラメータの妥当性を比較評価する。

実測データに対する適合精度が高く、かつ算出された容量値が物理現象と矛盾しない場合、そのモデル構造が実際のシステムの特性を最も正確に表現していると判断できる。このように、複数の回路候補間で比較評価を行うことで、経験則に頼らずに浮遊容量の最適な配置を客観的に特定することが可能となる。

4. シミュレーション

〈4・1〉 解析条件およびモデル構築 提案手法の有効性を検証するため、電磁界解析ソフト Altair FEKO を用いたシミュレーションを行った。解析に使用したモデルを Fig.7 に示す。解析モデルには、実際の実験系を模した SCC-WPT システムを構築し、物理的な配線やプレートの配置を再現した。解析周波数を 8.00 MHz とし、負荷抵抗 R_L を 20 Ω~200 Ω の範囲で 20 Ω ずつ変化させた際の入力インピーダンス Z_{in} を算出した。

本解析で用いた主要な解析条件および回路パラメータを Table 1 に示す。結合容量 C_m を含む各パラメータの値は、事前の解析値に基づき設定した。

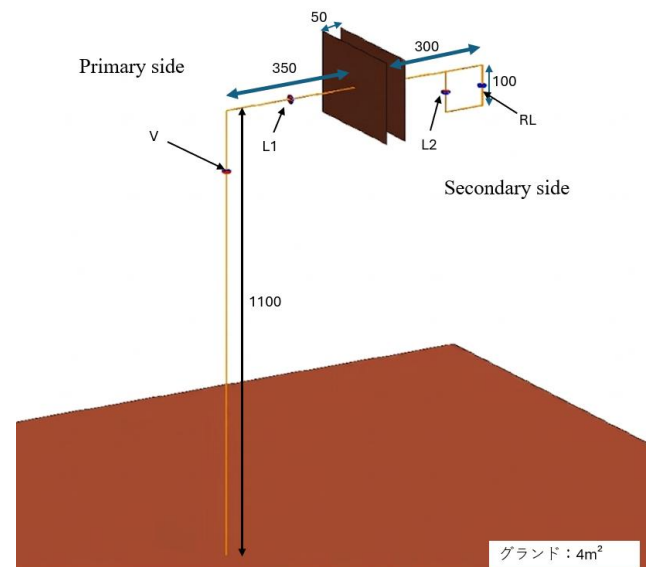


Fig. 7 Simulation model

Table 1 Analysis Conditions

Symbol	Value
frequency	8.00 MHz
r_1	1.0 Ω
L_1	32.0 μH
r_2	1.0 Ω
L_2	32.2 μH
C_m	21.4 pF

〈4・2〉 解析結果 シミュレーションによって得られた入力インピーダンスの負荷特性に対し、第3章で述べた同定手法を適用した。本手法による浮遊容量位置の特定を行っていない一般的な等価回路モデル(Fig.4)に基づくパラメータ同定結果及び入力インピーダンスの負荷抵抗変化のグラフを Table 2 及び Fig.8 に、本手法による浮遊容量位置の特定を行った提案等価回路モデル(Fig.6)を用いたパラメータ同定結果及び入力インピーダンスの負荷抵抗変化のグラフを Table 3 及び Fig.9 に示す。

本手法による浮遊容量位置の特定を行っていない一般的な等価回路モデルを使用したパラメータ同定では、負荷抵抗 R_L の変化に対して、同定した浮遊容量値を用いた入力インピーダンスの計算値は解析結果と大きく乖離しており、残差平方和も 1.47 と大きな値となった。さらに、同定された送電側浮遊容量 C_{f1} が負の値をとり、物理的な容量成分として破綻していることから、この従来モデルがシステムの物理現象を正確に表していないことは明白である。

Table 2 Parameter Identification Results

Symbol	Value
C_{f1}	-3.70 pF
C_{f2}	59.88 pF
C_{ff}	4.94 pF
residual sum of squares	1.47

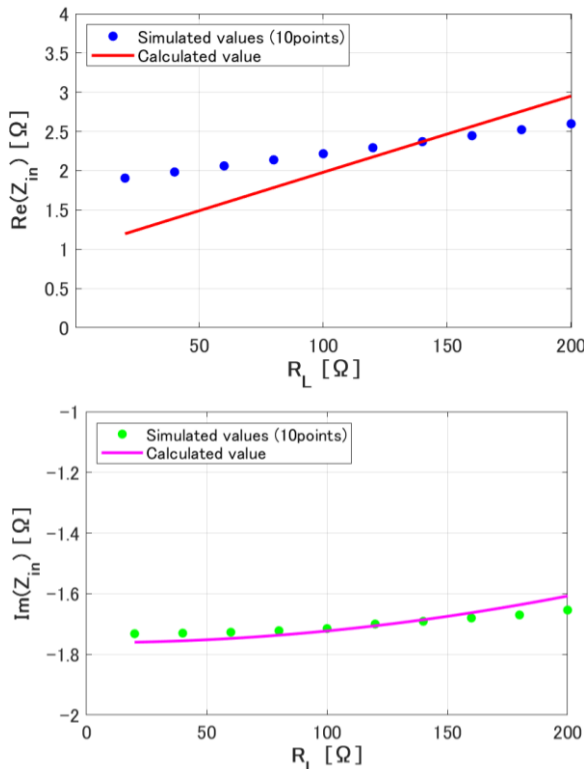


Fig. 8 Comparison of analytical and calculated values
in the conventional model
(top: real part, bottom: imaginary part)

一方、提案した等価回路モデルを用いた同定結果では、負荷抵抗 R_L の変化に対し、計算値と解析値が極めて高い精度で一致していることが確認できる。残差平方和は 1.37×10^{-4} と従来モデルから大幅に低減しており、入力インピーダンスの実部および虚部の双方において、特性曲線の変動推移を正確に再現できていることが確認された。

また、同定された各浮遊容量の値は回路の物理的な構造から推定される値の範囲内であった。以上の結果から、提案モデルがシミュレーション上において SCC-WPT システムの物理現象を正確に表現できていることが確認された。

Table 3 Parameter Identification Results

Symbol	Value
C_{f1}	2.63 pF
C_{f2}	8.54 pF
C_{p1}	3.22 pF
C_{ff}	0.82 pF
residual sum of squares	1.37×10^{-4}

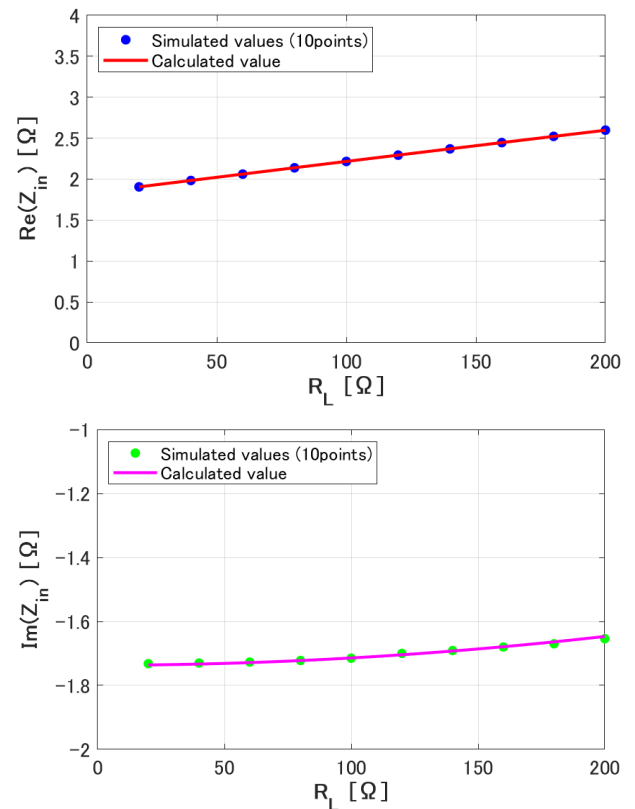
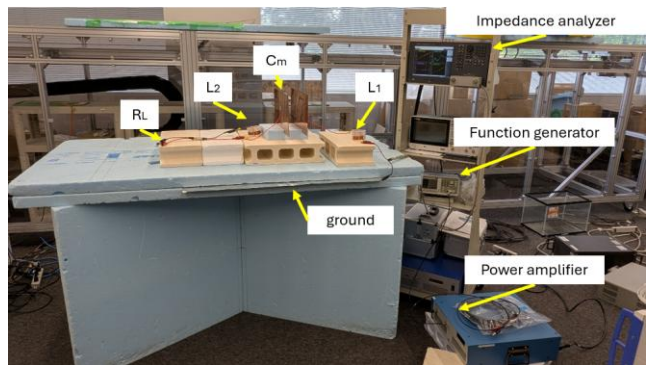


Fig. 9 Comparison of analytical and calculated values
in the proposed model
(top: real part, bottom: imaginary part)

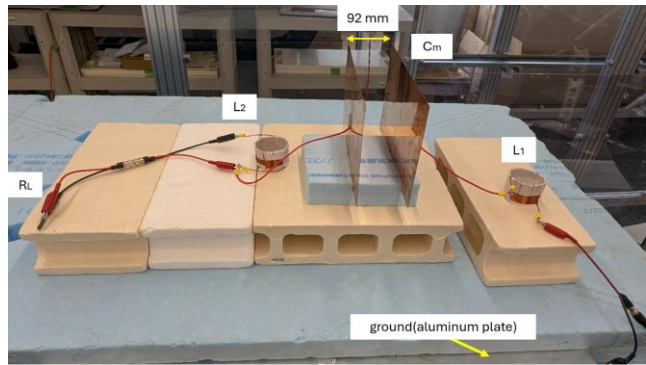
5. 実験

〈5・1〉 実験システム構成 実験系の構成を Fig.10、各パラメータの値を Table 4、変動させた負荷抵抗の測定値を Table 5 に示す。送受電プレートには200 mm × 300 mmの銅板を用い、アース板には1.5 m四方のアルミニウム板を用いた。アース板からの高さを180 mmで一定に保ち配置した。回路構成は Fig.3 に基づき、送電側に直列インダクタ L_1 、受電側に並列インダクタ L_2 を接続した。

入力インピーダンスの測定にはインピーダンスアナライザを用い、周波数7.36 MHzにおいて負荷抵抗 R_L を変化させた際の入力インピーダンス Z_{in} を記録した。また、インダクタ等の各素子定数は、Table 4 に示すとおりであり、 C_m は実測値である。



(a) System Appearance.



(b) Circuit configuration

Fig. 10 Experiment System.

Table 4 Analysis Conditions

Symbol	Value
frequency	7.36 MHz
r_1	2.6 Ω
L_1	70.66 μ H
r_2	2.1 Ω
L_2	63.70 μ H
C_m	23.82 pF

Table 5 Resistance values used in the experiment

Resistance[Ω]	
real part	imaginary part
4.34	0.041
8.71	-0.0351
17.25	0.597
42.58	1.43
63.50	4.90
84.10	8.78
165.37	33.58

Table 6 Parameter Identification Results

Symbol	Value
C_{f1}	2.49 pF
C_{f2}	0.93 pF
C_{p1}	4.00 pF
C_{ff}	0.30 pF
residual sum of squares	0.193

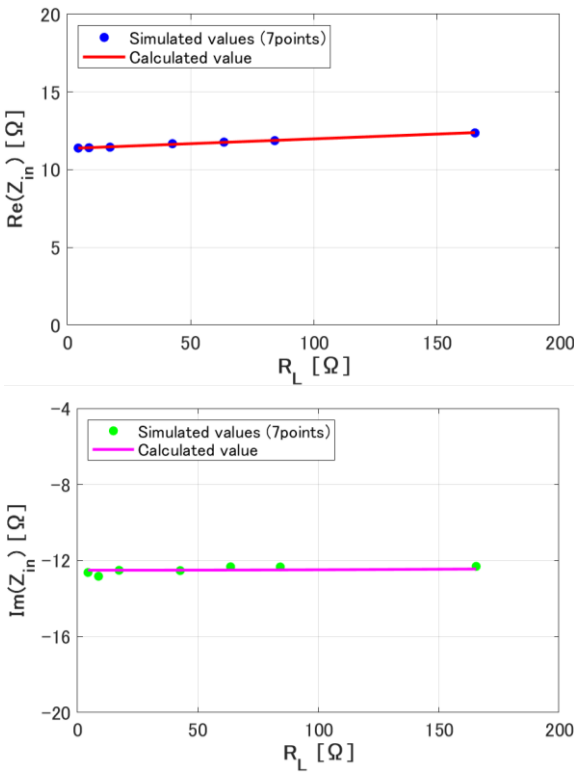


Fig. 11 Comparison of measured and calculated values
in the proposed model
(top: real part, bottom: imaginary part)

〈5・2〉 パラメータ同定結果 実験結果に対し、提案した同定手法を適用した。パラメータ同定結果及び入力インピーダンスの負荷抵抗変化のグラフを Table 6 及び Fig.11 に示す。

Table 6 より、負荷抵抗 R_L の変化に対して、同定した浮遊容量値を用いた入力インピーダンス値の計算値と解析値の残差平方和が0.193と解析結果と比較して大きい値となったが、Fig.11 に示すパラメータを用いた計算値と実測値の比較を見ると、測定結果を良好に近似していることが確認された。実験における残差平方和については、測定環境における微小な寄生要素や接続配線の負荷成分影響や負荷抵抗の虚数成分による影響が考えられる。

これらの結果は、提案した等価回路構造が実際の物理現象を正しく捉えていることを裏付けている。これにより、実際の実験環境においても、提案した等価回路構造および同定手法が SCC-WPT システムの特性解析に有効であることが示された。

〈5・3〉 電力伝送による検証 実機実験において同定したパラメータの正確性を確かめるために電力伝送時の出力電力が測定値と同定したパラメータを用いた計算値で一致するかを検証した。電力伝送実験には Fig.10 に示す装置を用い、ファンクションジェネレータから出力された正弦波信号をパワーアンプで増幅し、交流電源として印加した。また、負荷抵抗として定格500 Ω の抵抗を用いた。尚、動作周波数(7.08 MHz)における実測インピーダンスは $356.9 + j223.7 \Omega$ であったため、パラメータ同定及び理論計算にはこの実測値を用いた。

測定結果および計算結果を Table 7 に示す。Table 7 より、共振周波数7.08 MHzにおいて、回路に26.0 mWの電力を入力した際の出力有効電力の測定値は5.0 mWであり、計算値は5.3 mWであった。両社の誤差率は5.7 %であったことから、計算値と測定値は極めて良好に一致したといえる。これにより、同定した等価回路モデルが実際の回路系の電力伝送挙動を正確に表現できていることが実証された。尚、本条件におけるシステム全体の伝送効率率は20.8 %であった。これは、本実験が同定手法の妥当性検証を主目的とした回路であり、効率を最大化するためのインピーダンス整合や最適負荷の選定を行っていないためである。しかし、本研究で確立したパラメータ同定手法を活用し、各寄生要素を考慮した回路設計を行うことで、伝送効率の向上が見込まれる。

Table 7 Power transmission results

Symbol	Value
frequency	7.08 MHz
Load resistance	$356.9 + j223.7 \Omega$
Input power	26.0 mW
Calculated output power	5.3 mW
Measured output power	5.0 mW
error rate	5.7 %
efficiency	20.8 %

6. 結論

本研究では、SCC-WPTにおいて、回路の伝送特性に影響を与える浮遊容量を等価回路へとモデル化し、それらを個別に同定する手法を提案した。複数の負荷抵抗での入力インピーダンスに対し非線形最小二乗法を適用することで、パラメータの推定のみならず、仮定した回路構造そのものの妥当性を客観的に評価するプロセスを構築した。

電磁界解析による検証の結果、提案手法により求めた等価回路モデルでは解析値と計算値の残差平方和が 1.37×10^{-4} と、極めて小さな値となり、高精度でインピーダンス特性を再現できた。さらに、実機実験においても、残差平方和が0.193と小さい値をとり、同定されたパラメータを用いた計算値が実測値の変動推移と定性的に一致した。加えて、実機を用いた電力伝送実験では、共振周波数における出力有効電力の測定値と計算値が良好に一致し、本手法の有効性とモデルの正当性が実証された。

以上より、本手法は浮遊容量の最適な配置を特定でき、システムの最適設計や特性診断における理論的基盤となる。今後の展望として、本手法によるパラメータ同定を活用した伝送効率最大化のためのパラメータ最適化や、他の補償回路方式への応用を目指す。

文 献

- (1) Y. Wang, H. Zhang and F. Lu, "Review, Analysis, and Design of Four Basic CPT Topologies and the Application of High-Order Compensation Networks," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 6181-6193, May 2022
- (2) M. P. Theodoridis, "Effective Capacitive Power Transfer," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 12, pp. 4906-4913, Dec. 2012.
- (3) M. Z. Erel, K. C. Bayindir, M. T. Aydemir, S. K. Chaudhary and J. M. Guerrero, "A Comprehensive Review on Wireless Capacitive Power Transfer Technology: Fundamentals and Applications," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 3116-3143, 2022.
- (4) L. J. Zou, A. P. Hu and Y. -g. Su, "A single-wire capacitive power transfer system with large coupling alignment tolerance," 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Chongqing, China, 2017, pp. 93-98
- (5) C. Liang et al., "A Multicell SCC Capacitive Coupler With Strong Lateral, Longitudinal, and Rotational Antioffset Performance," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 40, no. 4, pp. 6230-6247, April 2025
- (6) T. Marcrum et al., "Impedance Matching a Quarter Wave Resonant Receiver to Improve Efficiency in Unipolar Capacitive Wireless Power Transfer," 2023 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE), San Diego, CA, USA, 2023, pp. 1-4
- (7) Z. Liu, Y. Su, H. Hu, Z. Deng and R. Deng, "Research on Transfer Mechanism and Power Improvement Technology of the SCC-WPT System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 1, pp. 1324-1335, Jan. 2023
- (8) L. J. Zou, Q. Zhu, C. W. Van Neste and A. P. Hu, "Modeling Single-Wire Capacitive Power Transfer System With Strong Coupling to Ground," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 2295-2302, April 2021
- (9) C. Da, L. Wang, F. Li, C. Tao and S. Li, "Modeling and Parameter Identification of Underwater Single Capacitor Coupled WPT System," 2025 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE), Rome, Italy, 2025, pp. 1-5