

インピーダンスマップ手法を用いた停車中および走行中ワイヤレス給電用コイルの組み合わせによる伝送特性の評価

太田 隼人* 櫻井 良哲 居村 岳広 堀 洋一 (東京理科大学)

Evaluation of Transfer Characteristics of Wireless Power Transfer Using Impedance Map Methodology for Combination of Coils for Stationary and Dynamic Charging

Hayato Ota*, Ryotetsu Sakurai, Takehiro Imura, Yoichi Hori (Tokyo University of Science)

The compatibility between SWPT and DWPT is not confirmed while DWPT is researched. The methodology of evaluating quantity and efficiency of power transfer using impedance map for combination of SWPT and DWPT coils is proposed. The evaluation methodology is validated by comparing results from experiment, circuit simulation and proposed evaluation methodology.

キーワード：電気自動車，ワイヤレス電力伝送，停車中ワイヤレス電力伝送，走行中ワイヤレス電力伝送，インピーダンスマップ

(Electric Vehicle, Wireless Power Transfer, Stationary Wireless Power Transfer, Dynamic Wireless Power Transfer, Impedance Map)

1. はじめに

近年、炭素の排出を削減し、環境負荷を小さくする観点で、電気自動車の技術に注目が集まっている⁽¹⁾。ところが電気自動車には従来のエンジン車と比べて重く、走行距離が短いという短所がある。そこで、駐車場または道路上などの路面から電気自動車が無線で電力を受け取るワイヤレス電力伝送(Wireless Power Transfer: WPT)を行うことで、電気自動車の走行距離を延ばすことができる⁽²⁾。

電気自動車のワイヤレス電力伝送には、自動車が停車中に電力を受け取る停車中ワイヤレス電力伝送(Stationary Wireless Power Transfer: SWPT)と、走行中に電力を受け取る走行中ワイヤレス電力伝送(Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT)がある⁽³⁾⁽⁴⁾。通常、路面の送電コイルと車上の受電コイルには同じ方式のコイルが使われて研究が行われている。

ところが、自動車が走る道路上の DWPT 送電コイルから SWPT 受電コイルをもつ自動車が効率よく電力を受け取ったり、駐車場の SWPT 送電コイルから DWPT 受電コイルをもつ自動車が効率よく電力を受け取ったりすることができないことがあり、その効率を評価する方法が確立されていない。

そこで、送電側が SWPT コイルで受電側が DWPT コイルのとき、またはその逆の組み合わせのとき、送電側から受電側へ送れる電力の大きさと伝送効率のような WPT の伝

送特性を、インピーダンスマップ手法⁽⁴⁾⁽⁶⁾を用いて評価する方法を提案する。インピーダンスマップにより、送電コイルと受電コイルの位置関係や負荷の大きさなどの回路の状態と WPT の伝送特性の関係を可視化することができる。

2. 本研究の WPT 回路の条件

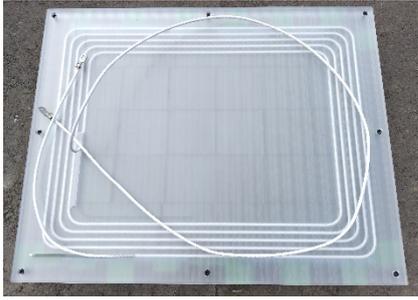
〈2・1〉 送電コイルと受電コイル

本研究の WPT 回路で使われる送受電コイルは表 1 の通りである。コイルは図 1 の写真のものであり、すべて一重巻きである。

表 1 本研究で使用したコイル

Table. 1 Coils used in this research.

Coil type	Size [mm]	Turns	Pitch [mm]	Self inductance [μ H]
SWPT Transmitter	650 × 500	5	15	$L_1 = 39.3$
SWPT Receiver	380 × 380	8	15	$L_2 = 41.2$
DWPT Transmitter	1700 × 600	7	25	$L_1 = 133$
DWPT Receiver	800 × 600	7	11	$L_2 = 116$



(a) SWPT transmitter coil.



(b) SWPT receiver coil.



(c) DWPT transmitter coil.



(d) DWPT receiver coil.

図1 本研究で使用したコイルの写真
Fig. 1 Pictures of coils used in this research.

〈2・2〉 共振コンデンサ

共振コンデンサ C_1, C_2 は回路を動作させる周波数 85 kHz および送受電コイルのインダクタンス L_1, L_2 に応じて、表 2 の通りに回路が共振状態となる静電容量に設計した。

表 2 それぞれの種類のコイルに対する共振コンデンサ

Table. 2 Capacitance of resonant capacitor with each type of coil.

Coil type	Capacitance[nF]
SWPT Transmitter	$C_1 = 89.64$
SWPT Receiver	$C_2 = 85.23$
DWPT Transmitter	$C_1 = 26.46$
DWPT Receiver	$C_2 = 30.22$

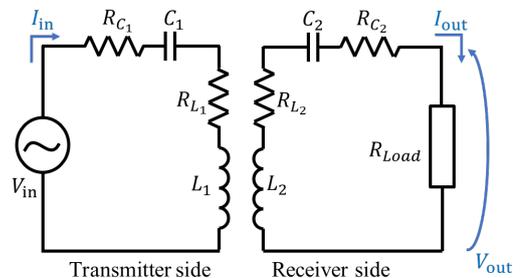
〈2・3〉 回路図とパラメータ

図 2 に本研究で使用した S-S 方式の WPT 回路を示す。この回路で使用されているパラメータの説明は表 3 に示す通りである。ただし、送電側の交流電源電圧 V_{in} は 1 V(実効値)で一定とし、その電源の周波数も 85 kHz とした。送受電コイルの 4 通りの組み合わせと、送受電コイルの間の距離 d が 100 mm, 200 mm, 300 mm の 3 通りの組み合わせによる WPT 回路の伝送特性を検証した。

送受電コイルの間の距離 d を変化させることによって、送受電コイルの結合係数 k も変化する。回路シミュレーションやインピーダンスマップで伝送特性を検証するとき、結合係数 k を設定する必要がある。そのため、伝送特性に加えて 3 章の通りにコイルの間の距離 d に対応する結合係数 k の測定も行った。

また、交流電源 V_{in} から回路に供給される電力を P_{in} 、負荷抵抗 R_{Load} が受け取る電力を P_{out} として、本稿における WPT 回路の伝送効率 η の定義を式(1)に示す通りとする。ここで、電圧 V_{in}, V_{out} と電流 I_{in}, I_{out} は複素数であり、上線がついているものは複素共役である。 $Re[\]$ は括弧内の複素数の実部を表す。

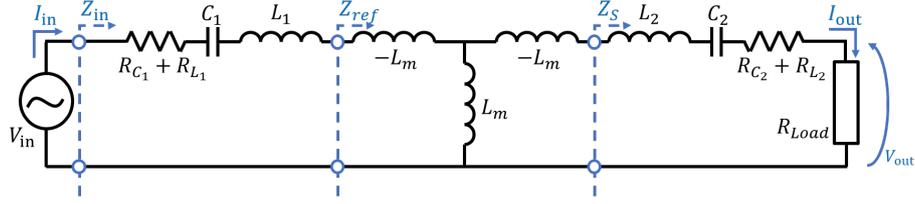
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Re[\overline{V_{out}}I_{out}]}{Re[\overline{V_{in}}I_{in}]} \quad (1)$$



(a) Actual circuit diagram.

図 2 S-S 型の WPT 回路

Fig. 2 S-S topology WPT circuit.



(b) T-type equivalent circuit diagram.

図2 S-S型のWPT回路

Fig. 2 S-S topology WPT circuit.

表3 図2の回路図のパラメータの説明

Table 3 Explanations of parameters in Fig. 2.

Parameter	Explanation
V_{in}	Alternating voltage source
I_{in}	Current from alternating voltage source V_{in}
Z_{in}	Input impedance
R_{C_1}	Series internal resistance of resonant capacitor in transmitter side
C_1	Resonant capacitor in transmitter side
R_{L_1}	Series internal resistance of transmitter coil
L_1	Inductance of transmitter coil
Z_{ref}	Reflected impedance which is equivalent impedance of receiver seen from transmitter
L_m	Mutual inductance of transmitter and receiver coil
Z_s	Combined impedance of receiver circuit
L_2	Inductance of receiver coil
R_{L_2}	Series internal resistance of receiver coil
C_2	Resonant capacitor in receiver side
R_{C_2}	Series internal resistance of resonant capacitor in receiver side
R_{Load}	Load resistance
V_{out}	Voltage of the load R_{Load}
I_{out}	Current in the load R_{Load}

3. 送受電コイルの結合係数の測定

本章では、WPT回路の伝送効率の実験による測定、回路シミュレーションによる解析、インピーダンスマップによる伝送特性の図式化のために、送電コイルと受電コイルの結合係数 k の測定方法を説明する。

測定の条件は、表1に示される、送電側および受電側に使われるコイルの4つの組み合わせおよび、送受電コイル間の距離 d が100 mm, 200 mm, 300 mmの3つの組み合わせによる合計12通りの条件である。

送電コイルの自己インダクタンスが L_1 、受電コイルの自

己インダクタンスが L_2 、それらによる相互インダクタンスが L_m のとき、コイル間の結合係数 k は式(2)で表される。WPT回路の動作周波数が f のとき、送電側または受電側のコイルの Q 値は式(3)で表される。

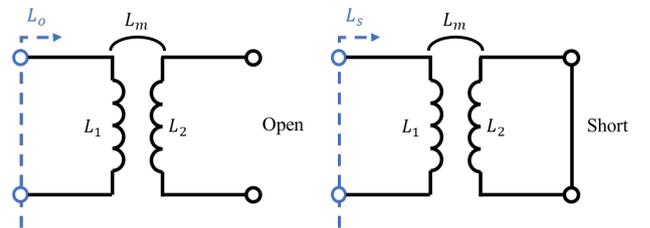
$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{2\pi f L_i}{R_{C_i} + R_{L_i}} \quad \begin{matrix} (i = 1 \text{ in Tx}) \\ (i = 2 \text{ in Rx}) \end{matrix} \quad (3)$$

本研究では送受電コイルの Q 値が十分大きく、コイルや共振コンデンサの内部抵抗が十分小さいものとする。このときにおいて、図3(a)のように受電コイルを開放したときの送電コイルから見たインダクタンス L_o と、(b)のように受電コイルを短絡したときの送電コイルから見たインダクタンス L_s を、インピーダンスアナライザで測定した。インピーダンスアナライザで測定された85 kHzにおける直列インダクタンスの測定値を L_o, L_s とした。この L_o, L_s を用いて、結合係数 k を式(4)で計算した⁽⁵⁾。

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_s}{L_o}} \quad (4)$$

以上にて測定された結合係数 k の値は、本稿の回路シミュレーションおよびインピーダンスマップの描画において、送受電コイルの組み合わせとコイル間の距離といった条件に応じて使用した。



(a) Open receiver coil.

(b) Short receiver coil.

図3 結合係数 k を測定する方法を示す回路図

(コイルの内部抵抗は省略)

Fig. 3 Circuit diagram describing measurement method of coupling coefficient k (Internal resistances of coils are omitted).

4. WPT 回路の伝送効率の検証

本章では、インピーダンスマップの描画によって得られる WPT の伝送効率の有用性の確認のために、本研究の WPT 回路の伝送効率を、測定実験と LTspice での回路シミュレーションにて求める方法を説明する。

〈4・1〉 測定実験

図 2 の WPT 回路の交流電源 V_{in} と負荷抵抗 R_{Load} をベクトルネットワークアナライザ (Vector Network Analyzer: VNA) の端子に置き換える形で、図 4 のように交流電源電圧 V_{in} から負荷抵抗 R_{Load} への電力の伝送効率 η を測定した。

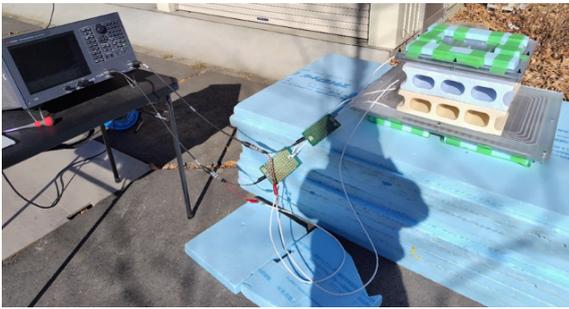


図 4 WPT 回路の伝送効率の測定

Fig. 4 Measuring power transfer efficient in the WPT system.

〈4・2〉 回路シミュレーション

測定実験と同じ条件で、回路シミュレーションソフトウェア LTspice を用いて図 2 の WPT 回路のシミュレーションを行い、交流電源電圧 V_{in} から負荷抵抗 R_{Load} へ電力を送る効率 η を解析した。ここで効率 η を求めるためには、図 2 の WPT システムにおける V_{in} , I_{in} , V_{out} , I_{out} の波形のうち定常状態の 1 周期分の平均をとったものをそれら 4 つの変数の値とし、実験と同様に式 (1) にて効率 η を計算した。

回路シミュレーションでは、送受電コイルの組み合わせやそれらの間の距離といった WPT 回路の条件に応じて回路パラメータの値を利用する必要がある。実験では送受電コイルの距離 d を 100 mm, 200 mm, 300 mm と変化させていたが、回路シミュレーションではそれに伴う結合係数 k を設定してシミュレーションを行った。

5. インピーダンスマップの描画

〈5・1〉 描画方法

本節では、送受電コイルのインダクタンス L_1, L_2 、位置ずれ、負荷 R_{Load} を含む受電側の回路の状態と、WPT の伝送特性(負荷に伝送可能な電力 P_{out} 、出力電圧 V_{out} 、効率 η などがある)の関係を可視化することができるインピーダンスマップを、MATLAB を用いて描画する方法を説明する。

本研究の WPT システムを表している図 2 をもとに WPT の伝送特性を計算するにあたり、本論文では引用文献⁽⁶⁾を

もとに、受電コイルの誘導起電力 V_{ind} 、受電側の合成インピーダンス Z_S 、反射インピーダンス Z_{ref} 、負荷側の合成インピーダンス Z_{ac} 、回路の入力電力 P_{in} 、出力電力 P_{out} はそれぞれ式 (5) ~ (10) を用いて計算した。

$$V_{ind} = j\omega L_m \frac{V_{in}}{Z_{in}} \quad (5)$$

$$Z_S = R_{C_2} + R_{L_2} + R_{Load} + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) \quad (6)$$

$$Z_{ref} = \frac{(\omega L_m)^2}{Z_S} \quad (7)$$

$$Z_{ac} (= R_{ac} + jX_{ac}) = R_{Load} \quad (8)$$

$$P_{in} = \frac{R_{in}}{R_{in}^2 + X_{in}^2} V_{in} (Z_{in} = R_{in} + jX_{in}) \quad (9)$$

$$P_{out} = R_{ac} \left(\frac{V_{ind}}{Z_S}\right)^2 \quad (10)$$

負荷抵抗 R_{Load} は 6 Ω から 20 Ω までの範囲で 1000 段階の値を使った。また、ある送受電コイルの組み合わせにおいて、コイル間の距離 d を 100 mm から 300 mm まで 1000 段階変化させる意味で、送受電コイルの結合係数 k は $d = 100[\text{mm}]$ のときの値から $d = 300[\text{mm}]$ のときの値までの 1000 段階の値を使った。

〈5・2〉 描画されたインピーダンスマップ

〈5・1〉 節の方法で描画された、WPT 回路の電力伝送の効率 η および出力電力すなわち伝送可能な電力 P_{out} と、反射インピーダンス $Z_{ref} (= R_{ref} + jX_{ref})$ の関係を表すインピーダンスマップを、4 通りの送受電コイルの組み合わせについて図 5 に示す。

図 5 に示されるインピーダンスマップの横軸と縦軸はそれぞれ反射インピーダンス Z_{ref} の抵抗成分 R_{ref} (反射抵抗、Reflected resistance) とリアクタンス成分 X_{ref} (反射リアクタンス、Reflected reactance) である。

それに加えて、 Z_{ref} は送受電コイルのインダクタンス、位置ずれ、負荷を含む受電側の回路の状態に応じて変化するインピーダンスである。図 5 のインピーダンスマップを描画するときは 〈5・1〉 節で述べた通り、負荷抵抗 R_{Load} を 6 Ω から 20 Ω まで 1000 段階刻み、コイルの結合係数 k をコイル間の距離 d が 100 mm から 300 mm のものまで 1000 段階刻んで、伝送効率を計算した(ただし伝送可能な電力 P_{out} についてはそれ以外の範囲についても計算した)。

よって、図 5 のインピーダンスマップの色のついた図形はこの抵抗負荷 R_{Load} およびコイル間の距離 d の範囲に対応する反射インピーダンス Z_{ref} の範囲を示しており、伝送効率 η を色で示している。また、「kW」の表記がある黒い実線はある Z_{ref} における伝送可能な電力 P_{out} を示している。

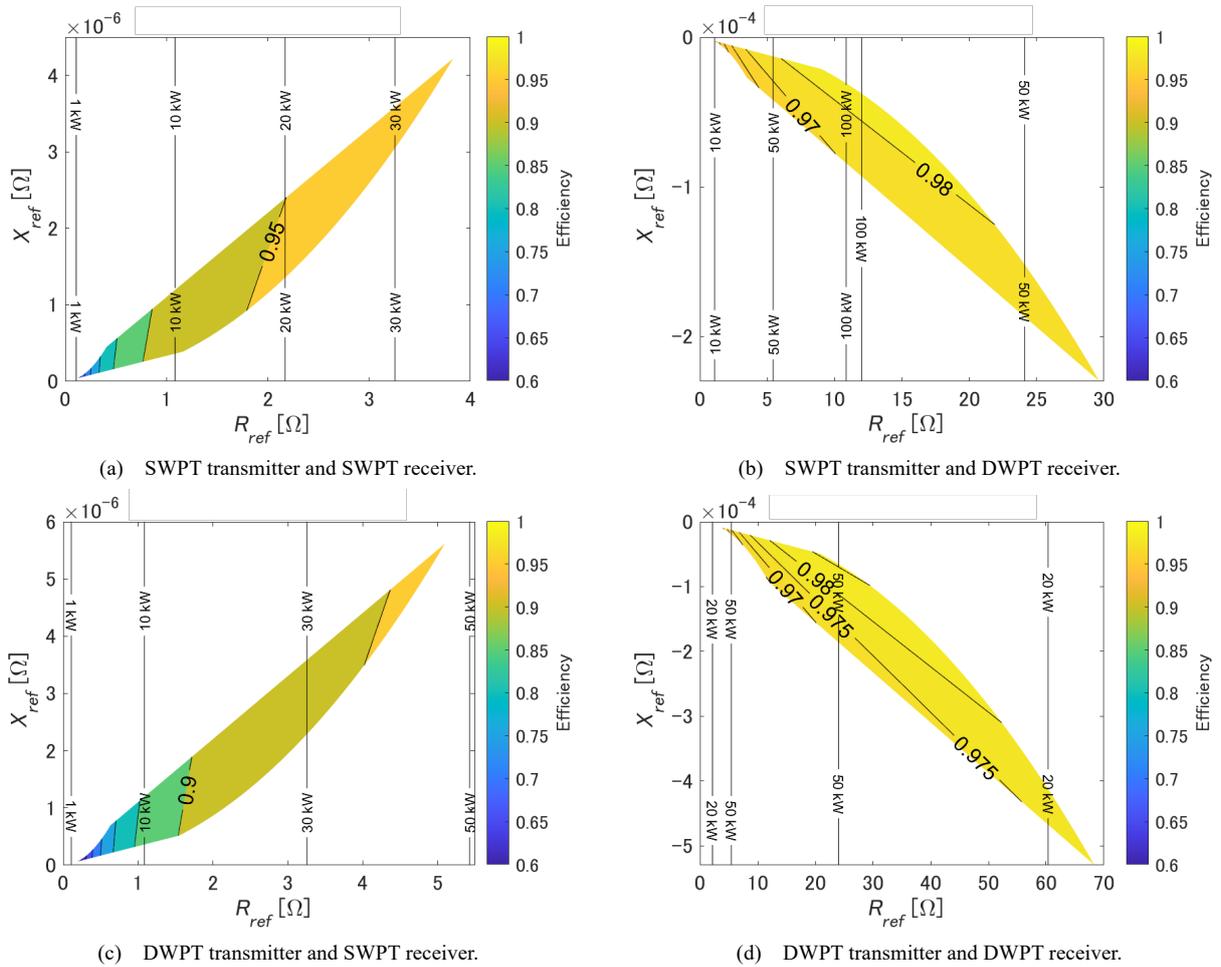


図5 WPT回路の電力伝送効率 η (図形の色で示す)と出力電力 P_{out} (電力の値がある黒線)を表現するインピーダンスマップ

Fig. 5 Impedance maps which indicates power transfer efficiency η (indicated by shape color) and output power P_{out} (indicated by black lines with power value) in the WPT system.

〈5・3〉 インピーダンスマップによる伝送特性の評価

送電側のコイルがSWPTで受電側のコイルがDWPTのとき、このコイルの組み合わせで負荷抵抗 R_{Load} や結合係数 k のとりうる範囲が〈5・1〉節のとおりするとき、伝送効率 η を0.9以上に保ちながら、停車中に走行中給電が前提の電気自動車に充電可能と判断できる。

さらに、送電側のコイルがDWPTで受電側のコイルがSWPTのとき、伝送効率 η が0.9を下回る Z_{ref} の範囲が含まれている。

図5(a)のSWPT同士のときと図5(c)のように、伝送効率 η や出力電力 P_{out} が低い範囲が多く含まれるときは、負荷や送受電コイルの位置ずれの範囲を制限することにより、伝送効率 η を0.9以上に保ち、10 kW以上の電力 P_{out} を走行中の電気自動車に伝送できるようになると判断できる。

表4に、この4つの送受電コイルの組み合わせにおいて、伝送効率 η が0.9以上かつ出力電力 P_{out} が10 kW以上と

なり、電気自動車への質の良いWPTが行える反射インピーダンス Z_{ref} の範囲をまとめた。伝送効率 η の面では、受電側のコイルがDWPTのときは常に特性が良いと判断できるが、出力電力 P_{out} の面では、常にインピーダンス Z_{ref} の範囲、すなわち負荷やコイル間のずれに注意すべきだと考えられる。

表4 WPTシステムが良い電力伝送特性を持つ Z_{ref} の範囲

Table. 4 Range of Z_{ref} with which the WPT system has good power transfer characteristics.

Transmitter	Receiver	Range of Z_{ref}	
		High transfer efficiency η	High output power P_{out}
SWPT	SWPT	$0.8[\Omega] < R_{ref}$	$1.1[\Omega] < R_{ref}$
SWPT	DWPT	Whole range	$1[\Omega] < R_{ref}$
DWPT	SWPT	$1.5[\Omega] < R_{ref}$	$1.1[\Omega] < R_{ref}$
DWPT	DWPT	Whole range	$1[\Omega] < R_{ref}$

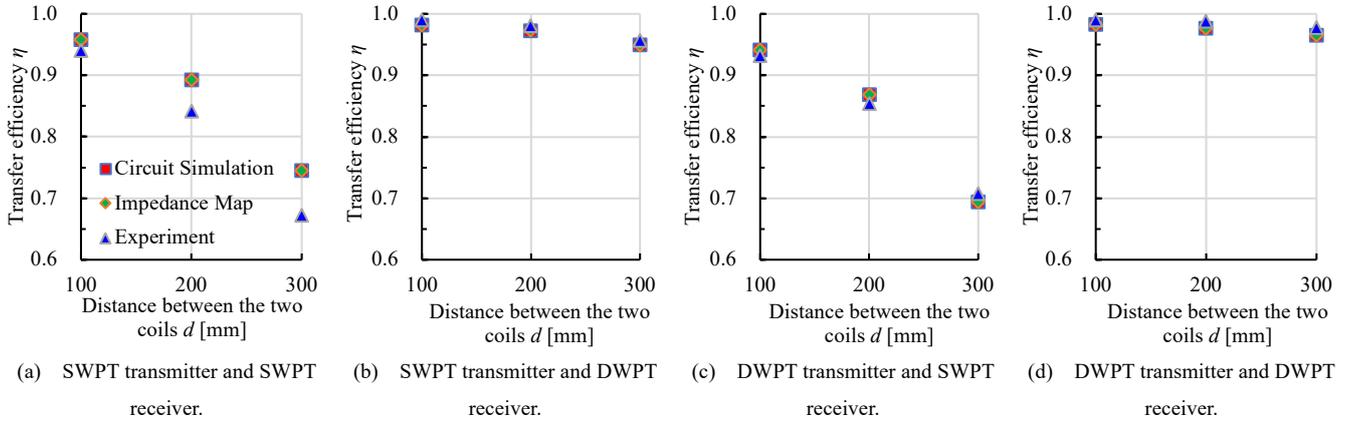


図6 $R_{Load} = 10[\Omega]$ のときのWPT回路の電力伝送効率 η と2つのコイルの距離との関係の比較

Fig. 6 Comparison of relationships between power transfer efficiency η and distance between two coils when $R_{Load} = 10[\Omega]$ in the WPT system.

6. 伝送効率の比較検討

本章では、4章の実験および解析結果による伝送効率 η と、5章のインピーダンスマップによる伝送効率 η を比較することにより、インピーダンスマップの描画でSWPTコイルとDWPTコイルの組み合わせにより電気自動車に十分に電力を送れるかどうかを確認する手法の有用性を示す。

図6は $R_{Load} = 10[\Omega]$ のときのそれらの伝送効率の比較のために、WPT回路の伝送効率 η と送受電コイル間の距離 d の関係を示すグラフである。負荷抵抗 R_{Load} を 6Ω から 20Ω まで変化させたとき、SWPTコイル同士の場合は実験値と比較すると9%の誤差が発生したが、それを除けば3%以内の誤差でおさまっている。これにより、本研究で提案するインピーダンスマップの描画によるSWPTコイルとDWPTコイルの組み合わせに対する伝送特性の検討の手法が有効であると考えられる。

7. まとめ

電気自動車のワイヤレス電力伝送(WPT)に使われる送電コイルおよび受電コイルには、停車中ワイヤレス電力伝送(SWPT)向けのコイルと走行中ワイヤレス電力伝送(DWPT)向けのコイルがある。そのうえで、同一のWPTシステムにおいて路面側にSWPTコイルがあり車両側にDWPTコイルがあるとき、またはその逆の組み合わせのコイルがあるときに、本論文にてインピーダンスマップ手法を利用して電気自動車に十分な電力を送れるかどうかを確認する手法を提案した。

インピーダンスマップを利用することによって得られる、送電コイルと受電コイルの位置ずれなどのWPTシステムの状態に対するシステムの質(特に伝送される電力および伝送効率)の変化を示すことができるという利点があるが、その位置ずれが常に起きる電気自動車のWPTの伝送特性の評

価に大きく役立つ。

上述のコイルの組み合わせにおいて十分な電力伝送ができることがわかると、路面側および車両側の両者のコイルをSWPT向けまたはDWPT向けのいずれかに統一する必要がなくなり、電気自動車のWPTシステムのコスト削減につながる。

謝辞

本研究の一部は、株式会社ダイヘンの協力のもと国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP21005)の結果得られたものです。

文献

- (1) 畑村耕一:「電気自動車(EV)のカーボンニュートラル走行を実現するための条件」,自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 2 pp. 564-569 (2019-3)
- (2) C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi and C. T. Rim: "Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 10 pp. 6533-6545 (2016-10)
- (3) Z. Zhou, L. Zhang, Z. Liu, Q. Chen, R. Long and H. Su: "Model Predictive Control for the Receiving-Side DC-DC Converter of Dynamic Wireless Power Transfer", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 9 pp. 8985-8997 (2020-9)
- (4) K. Takeda, T. Imura, T. Fujita, T. Koseki and Y. Minagawa: "Visualized Evaluation of Feasibility of Power Transmission with Electrical Constraints in Wireless Power Transfer", 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW) pp. 288-293 (2020)
- (5) 畑勝裕・居村岳広・堀洋一:「磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送におけるkQ積の簡易測定法」,電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 398 pp.5-10 (2017)
- (6) 櫻井良哲・居村岳広・堀洋一:「ワイヤレス電力伝送における効率と電力の互換性可視化手法」,電気学会研究会資料(Web), No. SPC-22-132-138 pp.23-28 (2022-7)