

銅パイプコイルを用いた数百 kW 級ワイヤレス給電の実機検証

山縣 一輝*, 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

Verification of Hundreds kW-class Wireless Power Transfer with Copper Pipe Coil.

Kazuki Yamagata*, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

Wireless power transfer (WPT) for electric vehicles has been studied to put it into practical use. In recent years, however, as the cruising distance of electric vehicles is extended, the battery capacity of the electric vehicles which are the target of power transfer tends to be increased. As a result, the conventional transmission power requires a long charging time, which may lead an inconvenience of wireless power transfer. Therefore, it is necessary to increase the transmission power. This paper proposes a wireless power transfer system using a pair of copper pipe coils. The proposed system uses water cooling as a cooling method to prevent heating of the coils. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves a power transmission of 150 kW.

キーワード : ワイヤレス給電, 電気自動車, 大電力化

Keywords : Wireless power transfer, Electric vehicle, High power

1. はじめに

現在, 電動車両向けワイヤレス給電技術の実用化に向けた検討が進められている。その一方で, 近年の電動車両は航続距離延長を目的とし, 給電対象であるバッテリー容量が大容量化する傾向にある。そのため, 従来の伝送電力では充電時間が長時間となり, ワイヤレス給電の利便性低下を招く恐れがある。従って, 伝送電力の大電力化が求められている。

大電力のワイヤレス給電では伝送コイルに高周波大電流を通流させるため, コイルの発熱が問題となる。本問題を解決するために, リッツ線を並列使用して大電力用コイルを製作する手法が提案されている⁽¹⁻²⁾。しかし, 本手法で数百 kW 級の伝送を行う場合, リッツ線の並列数が増大し, 電流をバランスさせるための設計が複雑化することが懸念される。また, コイルの冷却方式が自然空冷であるため, 動作中にコイルの温度がリッツ線の被覆の温度上限を超過する恐れがあり, 大電力用途には適さない。他にも, コイルを複数個使用して大電力化を実現する手法が提案されているが, コイル間のクロスカップリングを防止する必要があるため, 設計の自由度が低下する⁽³⁻⁴⁾。

そこで, 本論文では一組の銅パイプコイルを用いた伝送電力 500 kW のワイヤレス給電システムを提案する。提案手法ではコイルの発熱対策として冷却方式に強制水冷を採用する。電磁界解析を用いてコイルの寸法設計を行い, 提案

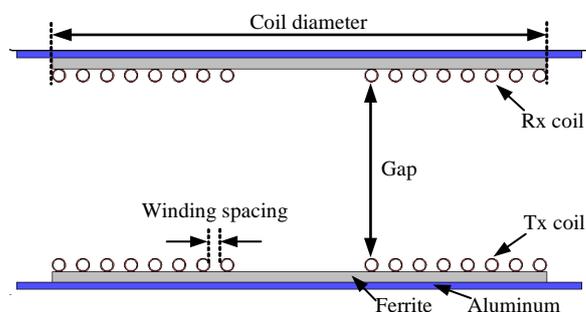


Fig. 1. A cross section of analysis model.

システムを使用した電力伝送試験により 150 kW の電力伝送を実現したため報告する。

2. コイルの設計パラメータ選定

ワイヤレス給電における送受電の伝送コイルの寸法設計には巻数, コイル径, 巻線間隔, 送受電間の伝送距離等の自由度があり, これらの組み合わせによりコイルのインダクタンスや結合係数等の回路パラメータが定まる。また, SS 方式を用いたワイヤレス給電システムで高い伝送効率を得るためには, 回路パラメータの関係は以下の最大効率条件式を満足することが求められる⁽⁵⁾。

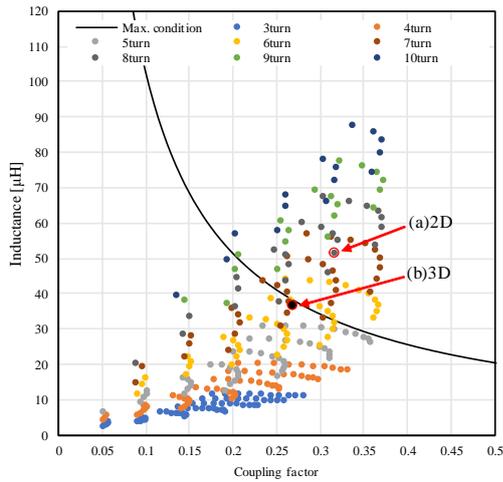


Fig. 2. Analysis results of inductance and coupling factor for each combination of design parameters.

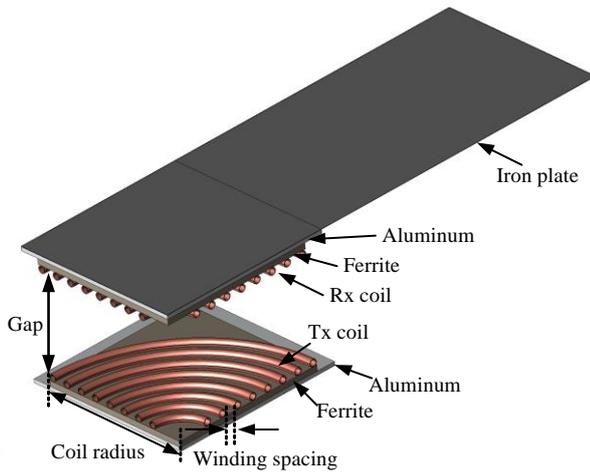


Fig. 3. 3D analysis model.

Table 1. Analysis results with selected design parameters.

	Value
Inductance [μH]	36.7
Coupling factor	0.27

$$L_2 = \frac{R_{eq}}{\omega k} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 L_2 は受電側インダクタンス、 R_{eq} は等価負荷抵抗、 ω は伝送角周波数、 k は結合係数である。

本論文では大電力のシステムを検討するため、伝送効率を高める必要があることから、式(1)を満足することを前提条件としてコイルの寸法設計を行う。寸法を決定するに

あたり、巻数、コイル径、巻線間隔、伝送距離の4つを設計パラメータとして、各パラメータの組み合わせによるインダクタンスと結合係数の変化を明らかにするために、有限要素法による電磁界解析を行った。なお、上記の設計パラメータの内、伝送距離については米国自動車技術会が定めたSAE J2954で示されているZ3規格に対応できるように250 mmとした。

Fig. 1に解析で使用した伝送コイルの2Dモデルを示す。コイルの形状はスパイラル形状を採用し、寸法は送電側と受電側で同一とした。また、コイルの外側に遮蔽用のフェライトとアルミニウムを配置した。これに加えて、受電側には電動車両の車体を模擬した鉄板を配置した。

Fig. 2に伝送距離250 mmの場合におけるインダクタンスと結合係数の解析結果を示す。各プロットが各設計パラメータを組み合わせた際の解析結果を示している。図中の黒色の曲線は式(1)を基に引いた曲線である。2Dモデル使用による解析の誤差を考慮して、プロット(a)の設計パラメータを選定した。

検証のため、選定した設計パラメータを適用した3Dモデルを作成して、再度インダクタンスと結合係数を解析した。Fig. 3に解析に使用した3Dモデルを示す。なお、解析時間短縮のためモデルは1/4モデルとした。Table 1に3Dモデルによるインダクタンスと結合係数の解析結果を示す。また、Table 1の結果をプロット(b)としてFig. 2に追加した。Fig. 2より、選定した設計パラメータを適用したコイルのインダクタンスと結合係数の関係が、最大効率条件に近いことがわかる。

次に、Fig. 3のモデルを使用して500 kWの電力伝送を想定した解析を行った。回路は送電側に周波数9 kHz、振幅600 Vの矩形波電圧源を接続して、受電側に抵抗負荷を接続した構成とする。本解析では基本波近似法(FHA)により、矩形波の基本波成分のみを考慮するため、抵抗負荷の値は以下の式を基に設定した。

$$R_{eq} = \frac{8 V_{DC2}^2}{\pi^2 P_{out}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 V_{DC2} は受電側出力電圧、 P_{out} は定格電力である。また、本検討ではSS方式による補償を適用するため、送電側及び受電側コイルと直列にキャパシタを追加した。キャパシタの値は以下の式を基に設定した。

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1}, \quad C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 C_1 は送電側キャパシタンス、 C_2 は受電側キャパシタンスである。

上記のパラメータを使用して解析を行った結果、受電側に接続した負荷抵抗の消費電力が512 kWとなった。従って、設計した伝送コイルにより500 kWの電力伝送が可能であることが確認できた。

3. 試験環境及び電力伝送試験結果

〈3・1〉 伝送コイルの製作 実機試験を行うために、前章で選定した設計パラメータを基に銅パイプ製のスパイラルコイルを 2 つ製作した。また、製作したコイルに加えて解析モデルと同一寸法のフェライトタイル及びアルミ板を配置して送受電の伝送コイルを組み立てた。

Fig. 4 に伝送コイルの外観を示す。コイル間の伝送距離は解析モデルと同じく 250 mm としている。なお、試験の都合上、本試験では車体模擬のための鉄板は配置していない。

〈3・2〉 伝送コイルのパラメータ測定 Table 2 に送受電の伝送コイルの自己インダクタンスと結合係数の測定結果を示す。Table 2 より、実機の伝送コイルのインダクタンス値は電磁界解析で求めた値より 26%程度大きいことがわかる。この誤差の要因は解析モデルで考慮していなかった、コイル端部の引き出し口と接続用のブスバーの影響であると考えられる。

〈3・3〉 電力伝送試験の回路構成 Fig. 5 に電力伝送試験の試験環境を示す。Fig. 5(a)は本試験の回路図である。送電側の電源には高周波熱錬社製の高周波電源を使用した。本電源は系統から 3 相 440 V を受電して単相交流を出力する。本試験では電源の出力周波数を 8.5 kHz に設定した。送受電の共振キャパシタの容量はいずれも 7.2 μF である。また、受電側の負荷には水抵抗器を使用した。Fig. 5(b)に試験環境の外観を示す。

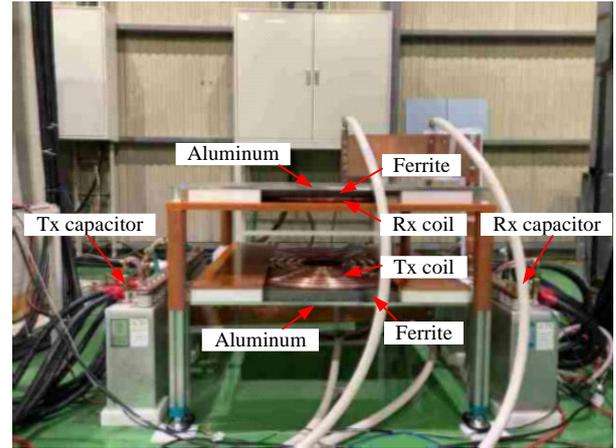
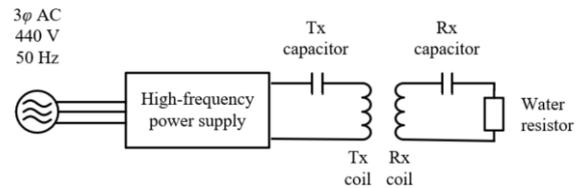


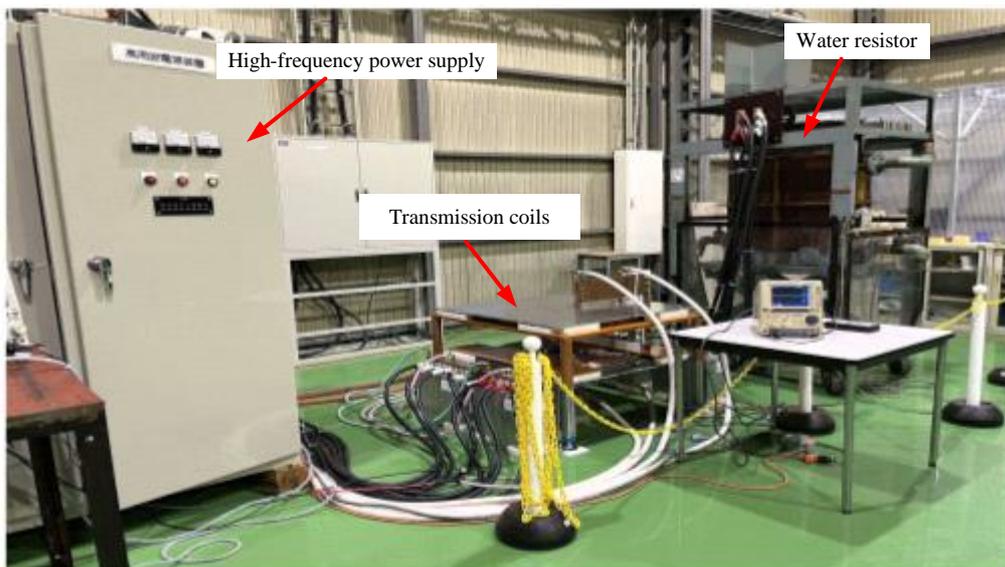
Fig. 4. Transmission coils of transmission and receiving.

Table 2. Measurement result of self-inductance and coupling factor of transmission coils.

	Value
Tx coil inductance [μH]	46.4
Rx coil inductance [μH]	46.7
Coupling factor	0.23

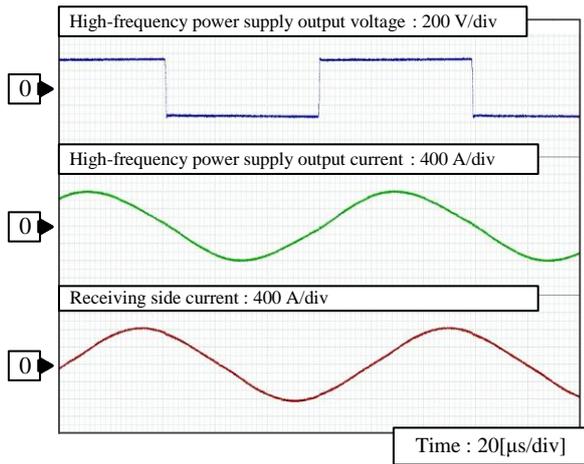


(a) Circuit diagram.

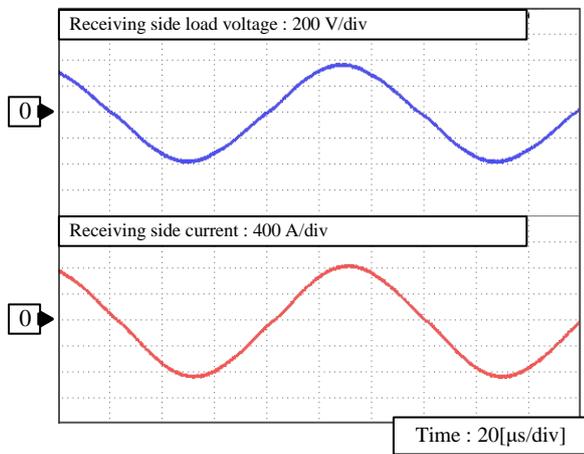


(b)

Fig. 5. Circuit configuration of power transmission.



(a) Voltage and current waveforms on the transmission side and current waveforms on the receiving side.



(b) Voltage and current waveforms on receiving side.
Fig. 6. Waveform at transmission of 155 kW.

〈3・4〉 電力伝送時の動作波形 Fig. 6 に負荷への伝送電力を 155 kW としたときの各部の動作波形を示す。Fig. 6(a)の Ch. 1 は高周波電源出力電圧，Ch. 2 は高周波電源出力電流，Ch. 3 は受電側電流である。Fig. 6(b)の Ch. 1 は負荷電圧，Ch. 2 は受電側電流である。Fig. 6 より，送電側と受電側の双方で電圧と電流がほぼ同位相となっているため，共振による補償が行えていることがわかる。

〈3・5〉 電力伝送時の効率特性 Fig. 7 に負荷への伝送電力を 10 kW から 155 kW まで変化させたときの効率特性を示す。本試験では高周波電源出力から受電側負荷までの伝送効率と，高周波電源入力から受電側負荷までのシステム効率を測定した。

Fig. 7 より，155 kW 伝送時に高周波電源出力から負荷までの伝送効率は 93%程度，高周波電源入力から受電側負荷までのシステム効率は 83%程度となることがわかった。以上の結果から，提案のワイヤレス給電システムにより 150 kW の電力伝送が可能であるといえる。

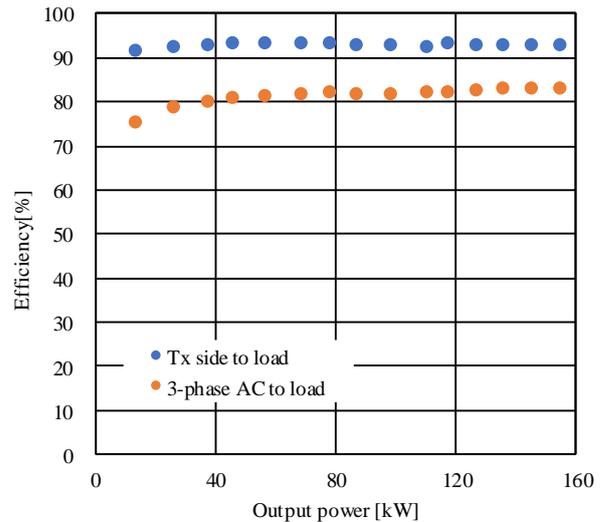


Fig. 7. Measurement result of efficiency characteristics.

4. まとめ

本論文ではワイヤレス給電の大電力化を目的として，銅パイプコイルを使用したワイヤレス給電システムを提案した。SS 方式における最大効率条件を満足させるために，電磁界解析を用いて送受電の伝送コイルの寸法設計を行い，解析結果から 500 kW の電力伝送を行える可能性を示した。その後，実機試験により提案システムで 150 kW の電力伝送を実現した。また，このときの高周波電源出力から受電側負荷までの伝送効率は 93%程度となった。今後は，伝送電力の増加と効率改善の検討を行う。

謝辞

本研究の実施にあたり，試験設備の構築並びに実機試験に関して高周波熱錬株式会社より多大なご支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- (1) H. Hu, S. Duan, T. Cai, P. Zheng, "A Current-Sharing Compensation Method for High-Power-Medium-Frequency Coils Composed of Multiple Branches Connected in Parallel," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 5, pp. 4637-4651, May 2021
- (2) H. Zhou, J. Chen, Q. Deng, F. Chen, A. Zhu, W. Hu, X. Gao, "Input-Series Output-Equivalent-Parallel Multi-Inverter System for High-Voltage and High-Power Wireless Power Transfer," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, No. 1, pp. 228-238 Jan. 2021
- (3) J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S.-J. Jeon, and D.-H. Cho, "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, March 2014
- (4) H. Hao, G. A. Covic, and J. T. Boys, "A Parallel Topology for Inductive Power Transfer Power Supplies," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 3, pp. 1140-1151, March 2014
- (5) R. Bosshard, J. W. Kolar, J. Mühlethaler, I. Stevanović, B. Wunsch, F. Canales, "Modeling and η - α -Pareto Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles," vol. 3, no. 1, pp. 50-64, 2015