

接地端子を有する 5-plate 構造カプラを用いた 電界型非接触給電システムにおける雷サージ対策の基礎検討

学生員 徳力 雅也 上級会員 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

Basic Study on Lightning Surge Mitigation in a Capacitive Wireless Power Transfer System Using a Five-Plate Coupler with a Grounded Electrode

Masaya Tokuriki*, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a capacitive wireless power transfer (CPT) coupler structure for mitigating lightning surge effects. The proposed coupler structure is based on a conventional four-plate structure and incorporates an additional grounded plate on the primary side. The grounded plate provides a path for surge currents to flow to ground, reducing their influence on the secondary side. The separation condition of the proposed structure is derived and verified through circuit simulations. Simulation results demonstrate that lightning surge currents are effectively diverted to the grounded plate. Furthermore, the insulation breakdown factor on the secondary side remains approximately 0.2 under high-voltage conditions, indicating that dielectric breakdown does not occur. These results confirm the effectiveness of the proposed coupler structure for improving surge tolerance in CPT systems.

キーワード：電界型非接触給電システム, 5-plate カプラ構造, 接地電極, 雷サージ
(Capacitive wireless power transfer system, 5-plate coupler structure, Grounded electrode, Lightning surge)

1. はじめに

電気自動車や AGV, モバイル端末などのバッテリー給電技術の一つとして, 非接触給電(Wireless Power Transfer : WPT)技術が注目を集めている⁽¹⁾。中でも電界型非接触給電(Capacitive Wireless Power Transfer : CPT)システムは, WPT 技術における電力伝送手法の一種である。CPT では絶縁部に複数の平行平板が用いられており, 電界結合することで電力伝送が行われる。

CPT の結合部(カプラ)の構成としては, 一次側と二次側でそれぞれ 2 枚の金属の平行平板電極を配置した 4-plate 構造が広く用いられている。この構造では設計自由度が高く, 補償回路を適切に設計することで, 伝送回路の高効率化, 定電流/定電圧特性を実現できる。そのため, 多くの先行研究において 4-plate 構造を前提とした検討が行われてきた⁽²⁾⁽³⁾。

一方で, 4-plate 構造では電力伝送に利用される 4 枚の電極のみでカプラが構成されるため, カプラ内部に接地経路を設けられない。このため, 通常動作時の電力伝送性能は確保されるが, 雷サージのような異常電圧印加時における電流の迂回経路が存在しない。

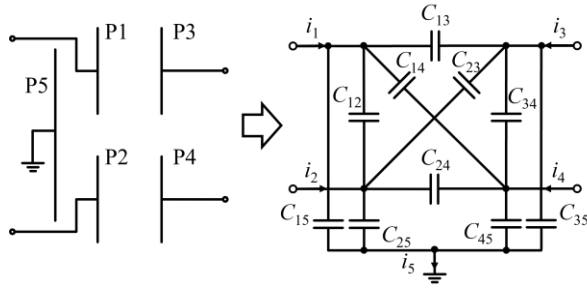
特に, 屋外設備や配電設備との接続が想定される用途では, 雷サージ等の過渡的な高電圧がシステムへ侵入する可能性がある。これらの高電圧がカプラに印加された場合, 電極間の電界強度が局所的に増大し, 絶縁破壊を引き起こす恐れがある。また, 絶縁破壊に伴う異常電流は電力変換器や負荷機器の損傷だけでなく, 感電や火災などの人的・物的被害につながる。

そこで本研究では, 接地端子を有する 5-plate 構造カプラの CPT システムを提案する。提案構成では, 従来の 4-plate 構造の一次側に接地電極を追加し, 通常時の電力伝送経路とは独立した異常電流の通流経路を形成する。これにより, 雷サージの過渡現象に対する耐性向上を目指す。

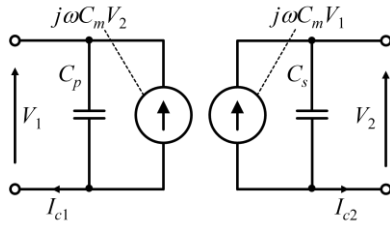
本稿では, 提案手法について共振補償回路の等価モデルから 5-plate における共振条件を導出し, 通常動作時, 異常時の分離条件について示す。また, このシステムの妥当性検証のために, シミュレーションにより特性評価を行う。

2. 5-plate 構造カプラ

〈2・1〉 カプラ等価容量 図 1 に提案構造における伝送カプラの回路モデルを示す。図 1 に示すカプラ構造では, 主結合容量(C_{13}, C_{24})・漏れ結合容量(C_{12}, C_{34}),



(a) 5-plate full model capacitive coupler circuit.



(b) Capacitive equivalent circuit model.

Fig. 1. 5-plate capacitive coupler model.

クロスカップリング容量(C_{14} , C_{23})の 3 種類の結合容量と、各プレート(P1~P4)と接地プレート(P5)間で生じる接地容量(C_{15} , C_{25} , C_{35} , C_{45})で構成される。なお、これら容量はすべて実験的に測定が可能である⁽⁴⁾。

図 1(a)に示すフルモデル回路から、キルヒホッフの電流則を用いることで、(1)式のようにまとめることができる。

$$\begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} C_p & -C_m \\ -C_m & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、一次側等価容量 C_p 、二次側等価容量 C_s 、等価結合容量 C_m は以下のとおりである。

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{15} + C_{15}}{4} + \frac{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}}{4} \quad (2)$$

$$C_s = C_{34} + \frac{C_{35} + C_{45}}{4} + \frac{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}}{4} \quad (3)$$

$$C_m = \frac{C_{13} + C_{14} - C_{23} - C_{24}}{4} \quad (4)$$

このとき、カプラ固有の結合係数 k_c は以下のようを与える。

$$k_c = \frac{C_m}{\sqrt{C_p C_s}} \quad (5)$$

〈2・2〉共振条件導出 通常、CPT の電力伝送方式では、共振補償インダクタ (L_p , L_s) を接続し共振条件を満たすことで、力率の改善による伝送効率の向上を図る。提案構造では、カプラに対して直列に補償インダクタを接続する直列共振(S/S)を採用する。

前述した等価回路はアドミタンス行列形式で考えているため、インピーダンス行列へ変換すると⁽⁵⁾、式(6)が得られる。

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega_c (C_p C_s - C_m^2)} \begin{bmatrix} C_s & C_m \\ C_m & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

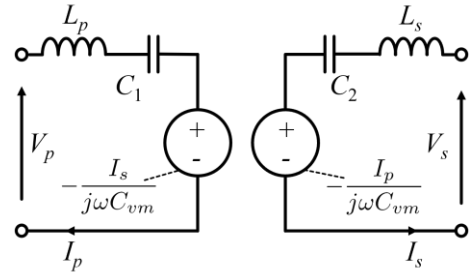


Fig. 2. Impedance model of 5-plate capacitive coupler.

したがって、提案構造を有する伝送回路は図 2 のような等価回路として考えられる。ここで、補償インダクタ L_p , L_s と等価結合容量 C_{vm} は次のように得られる。

$$L_p = \frac{1}{\omega_c^2 C_1} = \frac{C_s}{\omega_c^2 (C_p C_s - C_m^2)} \quad (7)$$

$$L_s = \frac{1}{\omega_c^2 C_2} = \frac{C_p}{\omega_c^2 (C_p C_s - C_m^2)} \quad (8)$$

$$C_{vm} = \frac{C_m}{C_p C_s - C_m^2} \quad (9)$$

この時、図 2 に示す共振回路の出力は定電流を達成する。ここで、共振回路出力電流 I_s は次式にて与えられる。

$$I_s = \frac{\omega_c (C_p C_s - C_m^2)}{C_m} V_p \quad (10)$$

3. 異常電流経路の解析

2 章では 5-plate 構造カプラの等価回路および共振条件を導出し、通常時の電力伝送特性について検討した。しかし、提案構造で追加した接地プレート P5 は電力伝送を目的としたものではなく、雷サージ等の異常電流をアースへ逃がすために導入したものである。そのため、通常時の有効電流と異常時の電流経路を分離して考える必要がある。

本章では、有効電力を伝送する差動モード(Differential Mode : DM)経路と、接地経路へと通流させるコモンモード(Common Mode : CM)経路を考える。提案構造では、CM 経路は雷サージのような異常電流を逃がす経路として活用するため、DM 経路の有効電流成分が流れ込むのは望ましくない。そこで、DM 経路と CM 経路を分離する条件について検討する。

DM 成分に含まれる電流が CM 経路を通流しない条件を検討するために、接地プレート P5 へ流入する電流 i_5 に着目する。 i_5 は次式にて表される。

$$i_5 = j\omega_c \left[(C_{15} + C_{25})v_{c1} + \frac{C_{15} - C_{25}}{2}v_{d1} + (C_{35} + C_{45})v_{c2} + \frac{C_{35} - C_{45}}{2}v_{d2} \right] \quad (11)$$

ここで、 v_{d1} は一次側差動電圧(P1-P2)、 v_{c1} は一次側同相電圧(P1,2-P5)、 v_{d2} は二次側差動電圧(P3-P4)、 v_{c2} は二次側同相電圧(P3,4-P5)である。(11)式より、 i_5 中には DM 成分と CM 成分の双方が含まれていることがわかる。このうち、DM 成分のみが 0 となる条件を考えればよい。したがって、 $C_{15} = C_{25} / C_{35} = C_{45}$ とすればよい。

また、このほかにもクロスカップリング容量を通り、DM 電圧から CM 電流が生じる経路が存在する。これは一次側、あるいは二次側の電流の和に着目することで評価できる。一次側 CM 電流を i_{c1} とした時、DM 電圧の印加に伴い生じる CM 電流は次式にて与えられる。

$$i_{c1} = \frac{j\omega_c}{2} [(C_{13} + C_{14} - C_{23} - C_{24})v_{d1} + (-C_{13} + C_{14} - C_{23} + C_{24})v_{d2}] \quad (12)$$

したがって、任意の DM 電圧に対して CM 電流を発生させないためには $C_{13} = C_{24}$ かつ $C_{14} = C_{23}$ を満たせばよい。

以上をまとめると、理想的に対称なカプラ構造であるとき、DM 経路と CM 経路は完全に分離される。

4. シミュレーション

〈4・1〉 DM 経路動作検証 本提案構造の妥当性検証のためにシミュレーションを行った。図 3 にシミュレーション回路を、表 1 にシミュレーション条件を示す。提案構造の一次側端子には単相フルブリッジインバータを接続し、二次側は直接負荷抵抗を接続している。なお、 C_{35} 及び C_{45} は他の結合容量に対して十分に小さいため、本稿では無視する。

図 4 に共振回路入出力電圧/電流及び P_s 流入電流を示す。ここで、上記結果はそれぞれ表 1 に示す定格時の実効値を 1 p.u. として描画した。結果より、入力電流に高調波成分が重畳しているが、入出力共に電圧/電流の位相がゼロであるとわかる。また、この時に接地端子に流入する電流がゼロとなることがわかる。したがって、通常の DM 経路の動作について、接地端子に電流が流入せず有効電力が二次側へすべて送られているといえる。

〈4・2〉 雷サージ投入時の動作検証 提案構造が異常電流に対して有効か検証するために、通常動作中に雷サージを模擬した電圧モデルを投入し、その動作を確認する。図 5 に本シミュレーションで用いた雷サージモデルを示す。このモデルは IEC 61000-4-5 を参考に作成した⁽⁶⁾。この

モデルをインバータ出力の両端子に接続してシミュレーションを実行した。

図 6 に上記モデルを動作中に接続した際のシミュレーション結果を示す。シミュレーションでは 10 μ sec 時点で雷サージモデルを投入し、この影響を確認した。結果より、雷サージ突入の瞬間に接地電流 i_s へと通流する様子が確認できる。この時、二次側電流は振幅最大値が 1.90 p.u. から 1.33 p.u. まで 30.1%ほど減少しており、雷サージによる電流の増大などは見られない。すなわち、二次側の健全性を保つことが可能となる。同様に、二次側電圧振幅も 1.11 p.u. から 0.786 p.u. と 29.2%ほど減少しており、高電圧になる様子は見られない。したがって、本提案構造によって雷サージの影響が二次側に生じないことが確認できた。

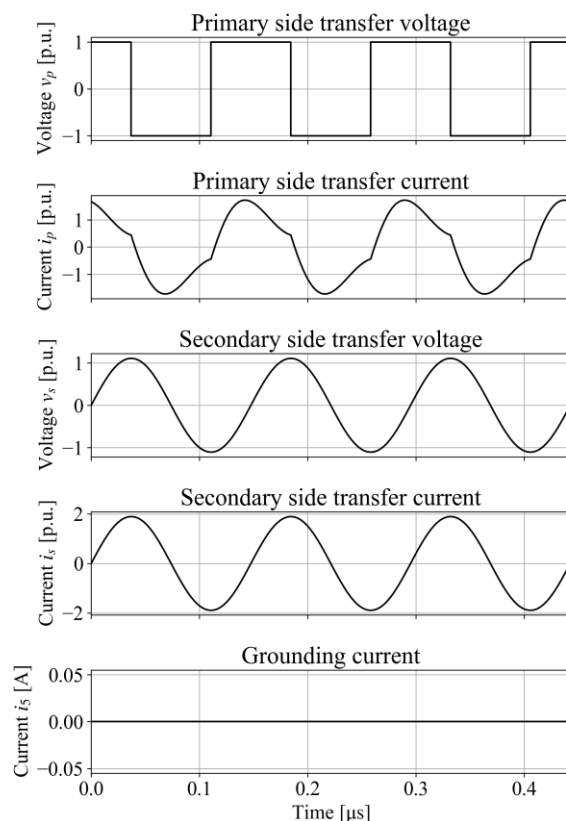


Fig. 4. Simulation results of operating waveform in the proposed system.

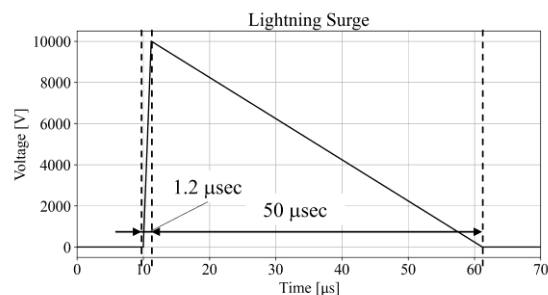


Fig. 5. Lightning surge voltage model.

Fig. 3. Simulation circuit configuration.

Table 1. Simulation conditions.

Parameters	Symbol	Value
Input voltage	V_{in}	350 [V]
Output power	P_{out}	500 [W]
Resonant frequency	f_c	6.78 [MHz]
Primary side equivalent capacitance	C_p	200 [pF]
Secondary side equivalent capacitance	C_s	81.2 [pF]
Equivalent coupling capacitance	C_m	74.6 [pF]

〈4・3〉 5-plate 構造における絶縁破壊 図 7 に有限要素法による電磁界解析を用いて、提案構造における絶縁破壊箇所の有無を検証した結果を示す。本解析では絶縁破壊が生じる電界を 1 とした時の電界分布を示したものであり、1 以上で絶縁破壊、1 に近いほど絶縁破壊しやすいことを示している。金属板配置は図 1(a)と同様に配置しており、このうち P_1 に雷サージを模擬した電位を与えている。結果より、電位を与えた P_1 の電極端では高電界がかかることがわかるが、それ以外の空間では電界は微小であり、絶縁破壊の可能性は極めて低い。なお、絶縁破壊係数は最大で 0.68 であり、どの点でも絶縁破壊は起こさないことを確認した。また、一次側端子から P_5 までは絶縁破壊係数は 0.35 程度と得られたが、一方で二次側端子までは最大でも 0.20~0.25 程度の絶縁破壊係数しか得られていない。以上より、高電界が生じた際も二次側への被害は抑えられると考えられる。

5. まとめ

本論文では、接地電極を有する 5-plate 構造のカプラを適用した CPT システムを提案した。提案構造では従来の 4-plate 構造に接地された電極を 1 枚追加し、雷サージをはじめとする異常電流の流通経路を生成した。通常の電力伝送経路とは独立し、異常電流のみを逃がす経路となるような条件の導出を行った。

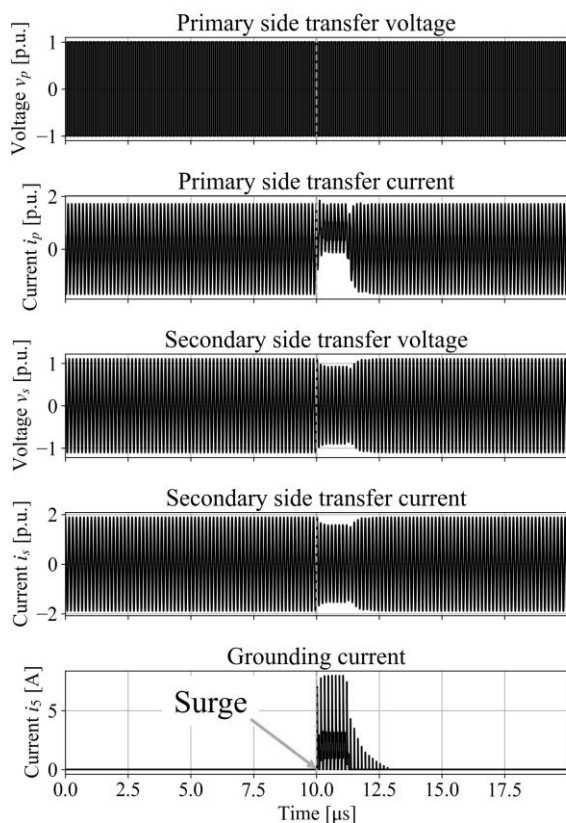


Fig. 6. Simulation results of operating waveform in the proposed system with lightning surge model.

本提案構造の妥当性を検証するために、シミュレーションによる解析を行った。その結果、通常動作では接地電極に電流が流れることなく電力伝送を実現した。次に、雷サージを模擬した電圧を印加した結果、接地電極へと電流が流れることを確認し、二次側への被害を 30.1%抑制した。最後に、本提案構造を電磁界解析した結果、絶縁破壊係数が最大で 0.68 と得られ、絶縁破壊が生じないことを確認した。

文 献

- (1) 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).
- (2) Takehiro Imura, Kenta Suzuki, Katsuhiro Hata, Yoichi Hori, "Comparison of Four Resonant Topologies Based on Unified Design Procedure for Capacitive Power Transfer," IEEE Journal of Industry Applications, vol. 10, No. 3, pp. 339-347, (2021).
- (3) H. Zhang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu and C. C. Mi, "A Four-Plate Compact Capacitive Coupler Design and LCL-Compensated Topology for Capacitive Power Transfer in Electric Vehicle Charging Application," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 12, pp. 8541-8551, Dec. (2016).
- (4) J. Lian and X. Qu, "Design of a Double-Sided LC Compensated Capacitive Power Transfer System With Capacitor Voltage Stress Optimization," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 67, no. 4, pp. 715-719, April (2020).
- (5) E. Rong, P. Sun, G. Yang, J. Xia, Z. Liu and S. Li, "5-kW, 96.5% Efficiency Capacitive Power Transfer System With a Five-Plate Coupler: Design and Optimization," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 40, no. 1, pp. 2542-2555, Jan. 2025.
- (6) IEC 61000-4-5, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and Measurement Techniques – Surge Immunity Test, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2014.

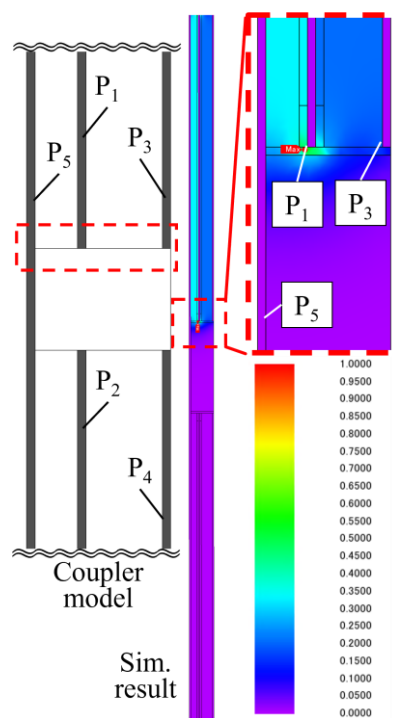


Fig. 7. Simulation results of electromagnetic analysis under surge voltage conditions.