

移動体への給電に適した複数の中継コイルを含む非接触給電回路の特性評価

山本 達哉*, 金子 裕良 (埼玉大学)

An Evaluation of Wireless Power Transfer System with Plural Repeater Coils for Moving Objects
Tatsuya Yamamoto, Yasuyoshi Kaneko (Saitama University)

1. はじめに

近年利便性や安全性、保守性の向上といった観点から、電気自動車(EV)や工場内の搬送コンベアへの給電に非接触給電を用いることが検討されている。走行中の EV への給電では、車両側(2次側)コイルの有無に応じて、直列または並列接続された複数の地上側(1次側)コイルをスイッチで切り替える方式が提案され、さらにスイッチレスでコイルの切り替えが可能な回路トポロジも研究されている⁽¹⁾。これは並列接続された1次側コイルに対し、1次2次直列コンデンサ方式に1つの中継コイルを付加した方式、または1次並列2次直列コンデンサ方式(PS方式)を採用し、2次側コイルと結合していない1次側コイルの入力インピーダンスを増加させ、電源から1次側コイルへの電力を抑えている。

しかし、これらの方式では入出力の電圧比を1:1にしたい場合に、1次側に対して2次側のコイルの巻数を大きくする必要があり、設計が困難な場合がある。また、回路構成が非対称であることから双方向給電⁽²⁾には不向きである。

本稿ではこれらを解決する回路トポロジとして、中継コイルを2巻線用いる方法(中継2巻線方式)およびコンデンサを1次側・2次側とも並列に接続する方法(PP方式)を提案し、理論解析と特性評価を行う。

2. 中継2巻線方式とPP方式

中継2巻線方式とPP方式の回路図を図1に、補償コンデンサの最適値と回路の諸特性を表1にそれぞれ示す。

<2・1>中継2巻線方式 図1(a)に示す通り、1次側と2次側のコイルの間に中継コイルが2巻線ある。また、すべてのコイルに補償コンデンサが直列接続されている。表1に示す式を用いてコンデンサを設計することで、インタンス変換器特性が得られるとともに、入力率が1になる。2つの中継コイルがそれぞれ1次側・2次側コイルと密結合しているとき、2次側が位置ずれすると入力インピーダンス Z_{in} が増加するため、入力電圧 V_{IN} 一定での駆動時に入力電流を抑制できる。

<2・2>PP方式 図1(b)に示す通り、1次側と2次側両方のコイルに並列にコンデンサが接続されている。こちらも表1に示す式を用いてコンデンサを設計することで、中

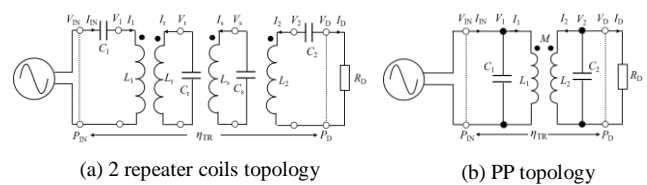


図1 非接触給電回路
Fig.1. Wireless power transfer circuit

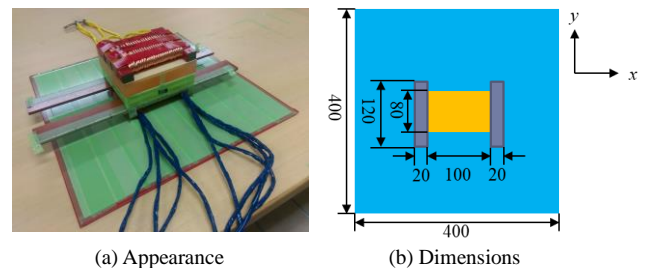


図2 実験で使用したトランス
Fig.2. Transformer used in the experiment

表1 コンデンサの最適値と回路特性
Table 1. Optimum value of capacitor and characteristics of circuit

Topology	2 Repeater Coils	PP
Capacitor	$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1 \left(1 - \frac{k_{12} k_{13}}{k_{rs}}\right)}$, $C_r = \frac{1}{\omega^2 L_r \left(1 - \frac{k_2 k_{rs}}{k_{rs}}\right)}$ $C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2 \left(1 - \frac{k_2 k_{2s}}{k_{rs}}\right)}$, $C_s = \frac{1}{\omega^2 L_s \left(1 - \frac{k_{13} k_{rs}}{k_{rs}}\right)}$	$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1 (1 - k^2)}$ $C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2 (1 - k^2)}$
I/O characteristics	$\begin{cases} V_{IN} = j\omega \frac{k_{1r} k_{2s} - k_1 k_{rs}}{k_{rs}} \sqrt{L_1 L_2} I_D \\ I_{IN} = -\frac{1}{j\omega} \frac{k_{rs}}{k_{1r} k_{2s} - k_1 k_{rs}} \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2}} V_D \end{cases}$	$\begin{cases} V_{IN} = j\omega \frac{1 - k^2}{k} \sqrt{L_1 L_2} I_D \\ I_{IN} = -\frac{1}{j\omega} \frac{k}{1 - k^2} \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2}} V_D \end{cases}$
Z_{in}	$\left(\frac{k_{1r} k_{2s} - k_1 k_{rs}}{\omega k_{rs}}\right)^2 L_1 L_2 \frac{1}{R_D}$	$\left(\frac{\omega(1 - k^2)}{k}\right)^2 L_1 L_2 \frac{1}{R_D}$
R_{Dmax}	$\frac{k_{1r} k_{2s} - k_1 k_{rs}}{k_{rs}} r_2 Q_2 \sqrt{\frac{k_{rs}^2 Q_r + k_{2s}^2 Q_2}{k_{rs}^2 Q_s + k_{1r}^2 Q_1} \frac{Q_1 Q_s}{Q_2 Q_r}}$	$\frac{1 - k^2}{k} r_2 Q_2 \sqrt{\frac{k^2 Q_1 + Q_2}{k^2 Q_2 + Q_1}}$
η_{TRmax}	$\frac{1}{1 + \frac{2}{(k_{1r} k_{2s} - k_1 k_{rs}) k_{rs} Q_1 Q_2} \left((k_{rs}^2 Q_r + k_{2s}^2 Q_2) (k_{rs}^2 Q_s + k_{1r}^2 Q_1) \frac{Q_1 Q_s}{Q_2 Q_r} \right)}$	$\frac{1}{1 + \frac{2}{(1 - k^2) k Q_1 Q_2} \left(k^2 Q_1 + Q_2 \right) (k^2 Q_2 + Q_1)}$

継2巻線方式と同様の特性を得ることができる。なお、コンデンサの値は従来研究で示されていた設計法⁽³⁾とは異なり、負荷抵抗に依存せずに決定することができる。2次側が位置ずれすると入力インピーダンス Z_{in} が増加するため、入力電圧 V_{IN} 一定での駆動時に入力電流を抑制できる。

3. 非接触給電トランス

表1に示した理論解析結果が実機でも成り立つか検証す

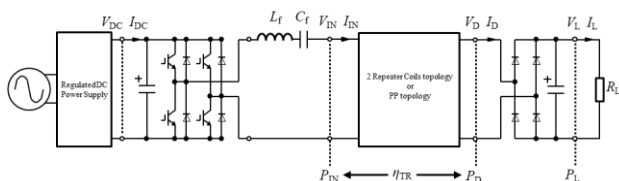


図3 実験回路
Fig. 3. Experimental circuit

表2 トランス定数
Table 2. Transformer parameters

Topology	2 Repeater Coils	PP
Gap length [mm]	60.0	
$N_1 / N_r / N_s / N_2$ [Turn]	4 / 18 / 18 / 4	4 / - / - / 4
$r_1 / r_r / r_s / r_2$ [mΩ]	9.79 / 105 / 105 / 10.5	12.8 / - / - / 11.6
$L_1 / L_r / L_s / L_2$ [μH]	6.78 / 54.0 / 55.5 / 6.71	5.83 / - / - / 6.03
$k_{12} / k_{rs} / k_{1s} / k_{2r}$	0.201 / 0.245 / 0.237 / 0.229	0.226 / - / - / -
k_{1r} / k_{2s}	0.924 / 0.930	- / -
$ Z_{in} $ [Ω]	11.8	12.3
R_{Dmax} [Ω]	12.1	14.4
η_{TRmax} [%]	96.8	96.4

表3 実験条件
Table 3. Experimental conditions

Topology	2 Repeater Coils	PP
f_0 [kHz]	85.0	
R_L [Ω]	25.0	30.0
$C_1 / C_r / C_s / C_2$ [μF]	4.90 / 0.0629 / 0.0696 / 4.34	0.587 / - / - / 0.629
L_f [μH]	104	
C_f [μF]	0.0336	

るため、両方式に対応したトランスの製作と定数測定を行った。実機の外觀と寸法を図2に示す。コイル形状はソレノイド型とした。中継2巻線方式では1次側・2次側各々のコイルの上から、更に密着するように中継コイルを巻いた。このとき、中継コイルに流れる電流を減らすため、巻数を1次側・2次側コイルの4.5倍にした。また、両方式とも1次側・2次側コイルの背面にアルミ板を設置した。

製作したトランスの磁気ギャップ60mmの正対時(標準状態)における定数測定結果を表2に示す。中継2巻線方式では k_{1r} , k_{2s} が0.9以上となり、他のコイル間と比べてより密に結合していることを確認した。

4. 給電実験結果

製作したトランスを用いて中継2巻線方式とPP方式の給電実験を実施した。実験回路を図3、給電時の条件を表3に示す。電源には方形波インバータを用いたが、基本周波数 $f_0=85\text{kHz}$ での特性を確認するため電源出力部にバンドパスフィルタを挿入し、正弦波で入力した。整流器後の負荷抵抗 R_L はトランス間給電効率 η_{TR} が最高になる値に定めた。直流入力電圧 V_{DC} は、各方式における標準状態で整流後の出力電力 P_L が1.5kWになる値になるように調整した。

標準状態と2次側不在時における給電時の入力波形をそれぞれ図4、図5に示す。電圧・電流とも波形は両方式でほぼ同じであった。また、入力力率はほぼ1だった。また、両方式とも2次側不在時は、標準状態と比べて入力電流 I_{IN}

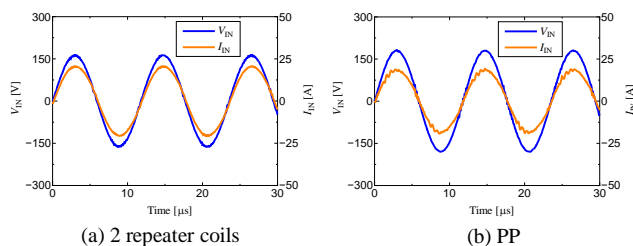


図4 標準状態での入力波形
Fig. 4. Input waveform at standard position

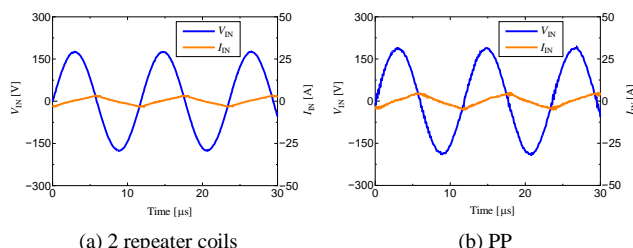


図5 2次側不在時の入力波形
Fig. 5. Input waveform without secondary coil

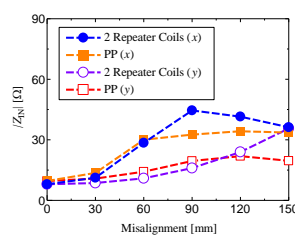


図6 位置ずれ時の $|Z_{IN}|$
Fig. 6. $|Z_{IN}|$ at misalignment

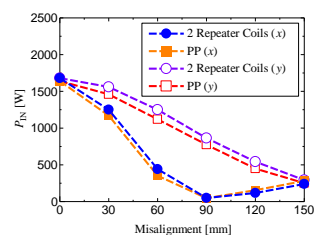


図7 位置ずれ時の P_{IN}
Fig. 7. P_{IN} at misalignment

の波高値および入力力率が大幅に低下した。

位置ずれ時の入力インピーダンスの大きさ $|Z_{IN}|$ と入力電力 P_{IN} の変化をそれぞれ図6、図7に示す。両方式とも V_{DC} 一定の時、位置ずれ時に $|Z_{IN}|$ が増加するとともに P_{IN} が低減することを確認した。

5. まとめ

本稿では定電圧源で駆動されている非接触給電トランスにおいて、2次側位置ずれ・不在時に入力電力を抑制できる回路トポロジの特性評価について述べた。1次側と2次側で対称な回路構成が可能な中継コイルを2巻線使用する方式およびPP方式の2方式を提案し、その類似性とイミタンス変換器特性が得られる設計法を提案した。そして、実機による給電実験結果より、2次側の位置ずれ時に入力インピーダンスが増加することで、入力電流や電力を抑制できることを確認した。

文 献

- (1) 山田他: 電学論, Vol. 137, No.11, pp.815-826 (2017)
- (2) 望月他: 半導体電力変換研究会, SPC-11-180 (2011)
- (3) Chwei-Sen Wang et al.: IEEE Trans. on Ind. Electron., Vol.52, No.5, pp.1308-1314 (2005)