

# 可変インピーダンスを考慮した回路方式の検討と 特性評価

山田 潤\*, 金子 裕良 (埼玉大学)

Study about Circuit Topologies and Characterization with Variable Impedance

Jun Yamada\*, Yasuyoshi Kaneko (Saitama University)

## 1. はじめに

現在, PHEV や EV への給電は電気ケーブルを用いるコンダクティブ方式が主流だが, 利便性・保守性などの観点から非接触給電方式が注目されており, 研究開発が盛んにおこなわれている。EV はバッテリー容量の制約により連続航続距離に大きく影響され, 既存のガソリン車等と比較し短いという欠点があるが, 非接触給電により駐車中だけでなく走行中も給電が可能であり, 連続航続距離を拡大することができると考えられる。駐車中給電で検討されている共振コンデンサを一次二次直列または一次直列二次並列に配置した SS, SP 方式は, 走行中の位置ずれや無負荷状態ではインピーダンスが低下し, 過大な電流が流れてしまう課題がある<sup>(1)</sup>。解決手段として, 中継コイル方式が提案されている<sup>(2)</sup>。中継コイルを用いることで位置ずれ時や無負荷状態においてインピーダンスが増加し, 過大な電流が流れることを抑えることができる。別の回路方式として, 一次並列二次直列にコンデンサを配置した PS 方式<sup>(3)</sup>が提案されており, 中継コイル方式と同様に位置ずれ等でインピーダンスを増加させることができる。本稿では, 理想変圧器特性が得られる中継コイル方式の設計方法を提案し, これと PS 方式を理論的な観点から比較し, 特性評価を行った。

## 2. 中継コイル方式と PS 方式

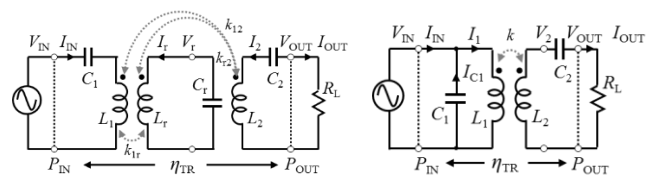
本稿で検討した中継コイルを用いた中継コイル方式と, 一次並列二次直列にコンデンサを設置した PS 方式の回路を図 1 に, コンデンサ値と回路方式の特性を表 1 に示す。

### (2.1) 中継コイル方式

図 1(a)に示す通り, 一次, 中継部, 二次にそれぞれコンデンサ  $C_1$ ,  $C_r$ ,  $C_2$  を直列に接続している。コンデンサ値は表 1 で示す式を用いて設計することにより, 理想変圧器特性が得られる。入出力特性は, 一次と二次コイルのインダクタンスで決定され, 中継コイルのインダクタンスに依存しない。さらに二次コイルの位置ずれで, 中継コイルとの結合係数  $k_{r2}$  が低下すると入力インピーダンス  $Z_{IN}$  が増加することから, 入力電圧  $V_{IN}$  一定とした場合, 入力電流  $I_{IN}$  が低下し, 過大な電流が流れない。

### (2.2) PS 方式

一次側のコンデンサ  $C_1$  は, 一次コイルと並列に接続し,



(a) Repeater Coil topology. (b) PS Capacitor topology.

図 1 回路方式

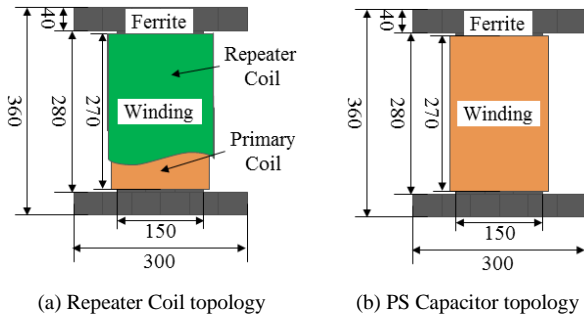
Fig.1. Circuit topologies

表 1 コンデンサ値と回路方式の特性

Table 1. Capacitor values and characteristics of circuit topologies.

Type	Repeater Coil topology	PS Capacitor topology
Capacitor	$\begin{cases} \frac{1}{\omega C_1} = \omega L_1 \left(1 - \frac{k_{1r} k_{r2}}{k_{r2}}\right) \\ \frac{1}{\omega C_r} = \omega L_r \\ \frac{1}{\omega C_2} = \omega L_2 \left(1 - \frac{k_{r2} k_{12}}{k_{1r}}\right) \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{1}{\omega C_1} = \omega L_1 \\ \frac{1}{\omega C_2} = \omega L_2 (1 - k^2) \end{cases}$
I/O characteristics	$\begin{cases} V_{IN} = \frac{k_{1r}}{k_{r2}} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} V_{OUT} \\ I_{IN} = \frac{k_{r2}}{k_{1r}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} I_{OUT} \end{cases}$	$\begin{cases} V_{IN} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} V_{OUT} \\ I_{IN} = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} I_{OUT} \end{cases}$
Impedance $Z_{IN}$	$\left(\frac{k_{1r}}{k_{r2}}\right)^2 \frac{L_1}{L_2} R_L$	$\frac{1}{k^2} \frac{L_1}{L_2} R_L$
$R_{Lmax}$	$\omega M_{r2} \sqrt{\frac{r_1}{r_r} \left(\frac{M_{r2}}{M_{1r}}\right)^2 + \frac{r_2}{r_1}}$	$\omega M \sqrt{\left(\frac{M}{L_1}\right)^2 + \frac{r_2}{r_1}}$
$\eta_{max}$	$\frac{1}{1 + \frac{2r_r}{\omega M_{r2}} \sqrt{\frac{r_1}{r_r} \left(\frac{M_{r2}}{M_{1r}}\right)^2 + \frac{r_2}{r_1}}}$	$\frac{1}{1 + \frac{2r_1}{\omega M} \sqrt{\left(\frac{M}{L_1}\right)^2 + \frac{r_2}{r_1}}}$

一次コイルと共振するよう定める。また, 二次側のコンデンサ  $C_2$  は, 電源率が 1 となるよう定める。このとき中継コイル方式と同様, 理想変圧器特性が成り立つ。入出力特性は中継コイル方式と同様, 一次と二次コイルのインダクタンスで決定される。さらに位置ずれで結合係数  $k$  が低下すると  $Z_{IN}$  が増加することから, 入力電圧  $V_{IN}$  一定とした場合, 過大な入力電流が流れない。



(a) Repeater Coil topology (b) PS Capacitor topology

図 2 トランスの寸法

Fig.2. Transformer dimensions

表 2 トランス定数

Table 2. Transformer Parameters

Type	Repeater Coil topology	PS Capacitor topology
$N_1 / N_r / N_2$ [Turn]	4T / 28T / 14T	4T / - / 14T
$r_1 / r_r / r_2$ [mΩ]	13.57 / 389.41 / 76.28	8.45 / - / 76.96
$L_1 / L_r / L_2$ [μH]	6.85 / 68.77 / 39.53	6.32 / - / 69.73
$k_{1r} / k_{r2} / k_{12}$	0.907 / 0.210 / 0.194	- / - / 0.200
$C_1 / C_r / C_2$ [μF]	2.987 / 0.0127 / 0.0534	0.555 / - / 0.0527
$R_{Lmax}$ [Ω]	7.19	6.92
$Z_{IN}$ [Ω]	13.3	15.7
$\eta_{max}$ [%]	97.73	97.72

### 3. 給電実験による比較

作成した図 2 のトランスを使用して中継コイル方式と PS 方式の給電実験を行った。一次側コイルと二次側コイルは同形状の H 型ソレノイドトランスを用いた。二次側コイルは PS 方式の一次コイルと同形状とした。各コイルの背面には磁気遮蔽用のアルミ板(W600×D600×H1mm)を設置した。ギャップ 160mm の標準状態のトランス定数を表 2 に、実験回路図を図 3 に示す。基本周波数  $f_0=85\text{kHz}$  での特性を比較するため、本稿ではバンドパスフィルタを用い、正弦波入力での比較をした。整流器後の負荷は、トランス効率が最大となるよう調整し、 $9\Omega$  とした。また、標準状態で出力電力  $P_L$  が 3.0kW となるよう入力電圧  $V_{IN}$  を決定し、給電実験を行った。

標準状態での給電結果を図 4 に、無負荷状態での給電結果を図 5 に示す。図 4 より、入力電圧・電流の力率はほぼ 1 となった。図 5 より、無負荷状態での入力電流は標準状態より大幅に減少している。電流波形は中継コイル方式と PS 方式は同形状となっている。

位置ずれ時の出力電力とインピーダンスを図 6 に示す。位置ずれ時の出力電力は、2 方式とも同等の特性であり、位置ずれと共に出力が抑えられている。位置ずれ拡大によりインピーダンスが増加しているためである。

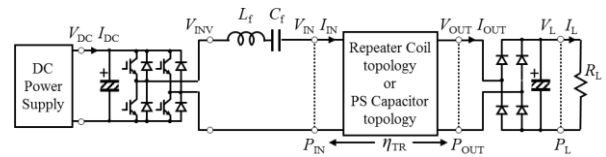
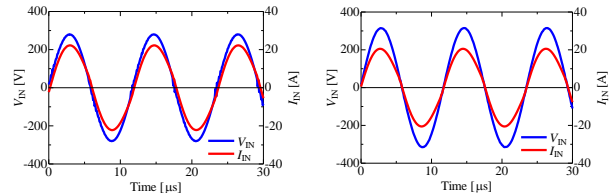


図 3 実験回路

Fig.3. Experimental Circuit

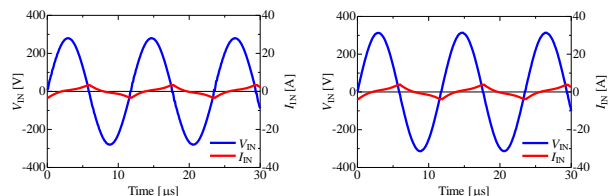


(a) Repeater Coil topology.

(b) PS Capacitor topology.

図 4 標準状態の入力波形

Fig. 4. Input waveform at standard position.

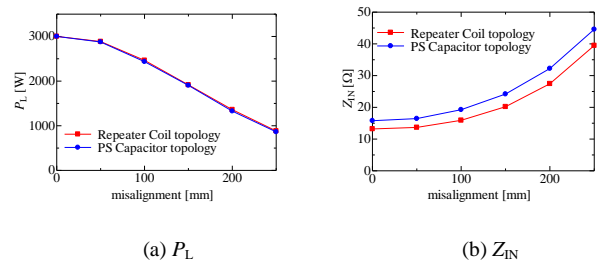


(a) Repeater Coil topology.

(b) PS Capacitor topology.

図 5 無負荷状態の入力波形

Fig. 5. Input waveform under no-load condition.



(a)  $P_L$

(b)  $Z_{IN}$

図 6 位置ずれ時の  $P_L$  と  $Z_{IN}$

Fig. 6.  $P_L$  and  $Z_{IN}$  at misalignment.

### 4. まとめ

本稿では、位置ずれ時や無負荷時に過大な電流が流れない中継コイル方式と PS 方式の特性比較を行った。そこで、理想変圧器特性が得られる中継コイル方式の設計方法を提案した。2 方式は同様の特性を示し、位置ずれや無負荷状態になるとインピーダンスが増加し、入力電流が低下することを確認した。

### 文献

- (1) 今野他:平成 27 年電学全大 No.4-210,pp.353-354 (2015)
- (2) Koh Kim Ean et al. : "New Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling for Charging Moving Electric Vehicle", EVTec and APE Japan, May 2014
- (3) 藤田他:電学論 Vol.127,No.2,pp.174-180 (2007.2)