

二次側複数コイルにおける 非接触給電回路の解析

福島 健太*, 金子 裕良 (埼玉大学)

Analysis of Circuit for Wireless Power Transfer in Secondary Side Multiple Coils
Kenta Fukushima*, Yasuyoshi Kaneko (Saitama University)

1. はじめに

近年, 小型電子機器向け非接触給電が注目されている。この用途ではコストや利便性の観点から, 送電側は一台の電源およびインバータで駆動し, 複数の機器に給電することが望ましい。このような複数の二次側コイルを有する非接触給電回路の理論的検討を行っている研究も多数存在する⁽¹⁾⁽²⁾。また, 非接触給電ではコンデンサ回路方式により得られる特性が変化することが知られている⁽³⁾。そこで本稿では, 非接触給電で多く使用されている 3 つのコンデンサ回路方式において二次側複数コイルを有する非接触給電回路の理論解析を行い, 給電実験によりその妥当性を検証した。また, 各方式での比較をし, 最適な回路方式を検討した。

2. 理論解析

一次直列二次直列コンデンサ方式(SS 方式)での二次側複数非接触給電回路を図 1 に示す。本解析では式が容易になるよう二次側コイル間の相互結合はゼロ, 二次側コイル・負荷はすべて同一であるとした⁽¹⁾式。各コンデンサは各閉回路内で共振, あるいは入力率が 1 となるよう決定した。これにより, 表 2 に示す特性解析結果が得られる。

$$\begin{cases} L_{21} = L_{22} = \dots = L_{2n} \equiv L_2 \\ M_1 = M_2 = \dots = M_n \equiv M \\ R_{D1} = R_{D2} = \dots = R_{Dn} \equiv R_D \\ I_{D1} = I_{D2} = \dots = I_{Dn} \equiv I_D \end{cases} \quad (1)$$

表 2 の n は二次側コイル個数を表し, $n=1$ では従来の一次側 1 コイル対二次側 1 コイルと同様の結果となることから, 二次側 1 コイル時も含む拡張した記述であるといえる。出力電力一定(V_D, I_D 一定)とするには, 入出力特性結果より SS 方式および一次直列二次並列コンデンサ方式(SP 方式)では入力電圧 V_{IN} を, 一次並列二次直列コンデンサ方式(PS 方式)では入力電流 I_{IN} を n 倍にすればよいとわかる。また, 各コンデンサ決定式に注目すると, SS 方式のみ n が含まれないことから, SS 方式は同じ共振コンデンサ値で受電コイルの個数が変わっても入力率がずれない。

3. 給電実験

表 2 に示す特性解析結果の妥当性を検証するため, 給電

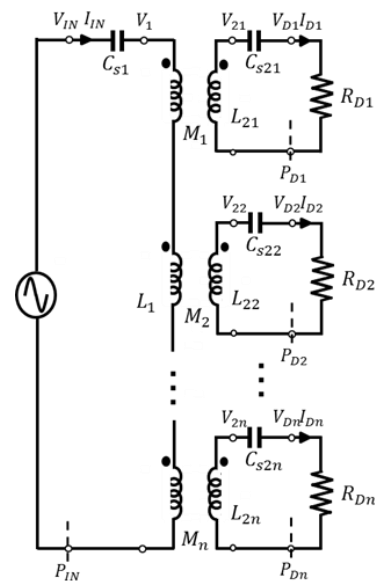


図 1. 二次側複数コイル非接触給電回路

Fig 1. WPT circuit of secondary side multiple coils

表 1. トランス定数(SS 方式 3 コイル)

Table 1. Transformer parameters (SS topology 3coils)

| f [kHz] | 100 | r_1 [Ω] | 1.66 |
|---------------------|-------|-----------------------|---------|
| L_1 [μ H] | 513 | r_{21} [Ω] | 0.560 |
| L_{21} [μ H] | 175 | r_{22} [Ω] | 0.553 |
| L_{22} [μ H] | 175 | r_{23} [Ω] | 0.551 |
| L_{23} [μ H] | 174 | C_{S1} [μ F] | 0.00494 |
| k_{1-21} | 0.293 | C_{S21} [μ F] | 0.0145 |
| k_{1-22} | 0.302 | C_{S22} [μ F] | 0.0145 |
| k_{1-23} | 0.303 | C_{S23} [μ F] | 0.0145 |
| M [μ H] | 89.6 | | |

実験を行った。給電実験時には整流器と電子負荷を使用し, トランスには円形空芯コイルを用いた。SS 方式二次側 3 コイル時での定数を表 1 に示す。図 2 にそのときの入出力電圧電流波形を示す。SS 方式では入力電圧 V_{IN} と入力電流 I_{IN} は同相, 出力電流 $I_{D1} \sim I_{D3}$ は入力電圧 V_{IN} より 90° 進相であるが, 実験においても同様の結果が得られた。また, 各二次側コイルの負荷抵抗に 50W 一定給電とする条件で二次側

表 2. 二次側複数コイルにおける非接触給電回路の特性解析結果
Table 2. The analysis result of wireless power transfer in secondary side multiple coils

| | SS 方式 | SP 方式 ⁽¹⁾ | PS 方式 |
|--------------------|--|---|---|
| コンデンサ | $C_{S1} = \frac{1}{\omega^2 L_1}$ $C_{S2} = \frac{1}{\omega^2 L_2}$ | $C_S = \frac{1}{\omega^2 \left(L_1 - n \cdot \frac{M^2}{L_2} \right)}$ $C_P = \frac{1}{\omega^2 L_2}$ | $C_S = \frac{1}{\omega^2 L_1}$ $C_P = \frac{1}{\omega^2 \left(L_2 - n \cdot \frac{M^2}{L_1} \right)}$ |
| 入出力特性 | $\begin{bmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -n \cdot j\omega M \\ -j\frac{1}{\omega M} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ I_D \end{bmatrix}$ イミタンス変換器特性 | $\begin{bmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n \cdot \frac{M}{L_2} & 0 \\ 0 & \frac{L_2}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ I_D \end{bmatrix}$ 理想変圧器特性 | $\begin{bmatrix} V_{IN} \\ I_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{M} & 0 \\ 0 & n \cdot \frac{M}{L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ I_D \end{bmatrix}$ 理想変圧器特性 |
| 入力インピーダンス Z_{IN} | $n \cdot (\omega M)^2 \frac{1}{R_D}$ | $n \cdot \left(\frac{M}{L_2} \right)^2 R_D$ | $\frac{1}{n} \cdot \left(\frac{L_1}{M} \right)^2 R_D$ |
| 最大効率 η_{max} | $\frac{1}{1 + \frac{2}{\sqrt{n} \cdot \omega M} \sqrt{r_1 r_2}}$ | $\frac{1}{1 + \frac{2}{\sqrt{n} \cdot \omega L_2} \sqrt{r_1 r_2 \left(\frac{L_2}{M} \right)^2 + n \cdot r_2^2}}$ | $\frac{1}{1 + \frac{2}{\sqrt{n} \cdot \omega L_1} \sqrt{r_1 r_2 \left(\frac{L_1}{M} \right)^2 + n \cdot r_1^2}}$ |
| 最適負荷 R_{Dmax} | $\sqrt{n} \cdot \omega M \sqrt{\frac{r_2}{r_1}}$ | $\omega L_2 \sqrt{1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{L_2}{M} \right)^2}$ | $\sqrt{n} \cdot \omega M \sqrt{\frac{r_2}{r_1} + n \cdot \left(\frac{M}{L_1} \right)^2}$ |
| 二次側負荷等価回路 | $\frac{1}{\sum_{m=1}^n \frac{1}{R_{Dm}}}$ 並列接続 | $\sum_{m=1}^n R_{Dm}$ 直列接続 | — |

コイル数を増加させた際の入力電圧電流値の変化を図 3 に示す。特性解析結果と同様、入力電流 I_{IN} は変化せず入力電圧 V_{IN} のみが n 倍に変化することが確認できた。トランス効率 η_{Tr} と入力インピーダンス Z_{IN} の負荷変動特性給電実験結果と理論値との比較を図 4, 5 に示す。ともに理論値と実験値はほぼ一致していることがわかる。これより SS 方式での理論値の妥当性が確認できた。また、SP・PS 方式においても給電実験では特性解析結果と同様の結果が得られたことから、3 方式の理論式すべての妥当性が確認できた。

4. まとめ

本稿では、3 回路方式にて二次側複数コイルを有する非接触給電回路の理論解析を行い、給電実験より妥当性を確認した。SS 方式が二次側コイル個数によらずコンデンサ値不変であることから、二次側複数コイルでは有利である。

文献

- (1) 金子他:電学論D Vol.128,No.7,pp.919-925 (2008)
- (2) 居村:電学論D Vol.134,No.6,pp.625-633 (2014)
- (3) 藤田他:電学論D Vol.127,No.2,pp.174-180 (2007)

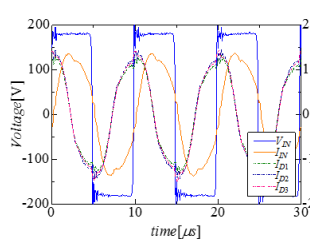


図 2. 電圧電流波形
Fig 2. Voltage and current waveform

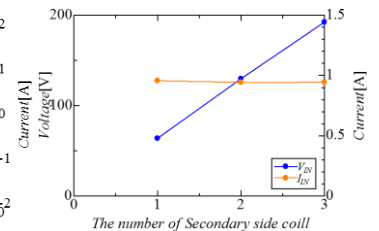


図 3. 出力電力一定時における入力電圧電流値
Fig 3. Input voltage and current value at constant output power

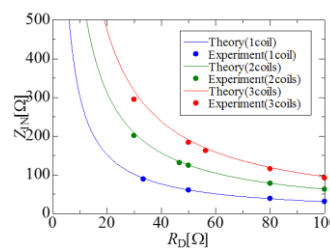


図 4. 入力インピーダンス
Fig 4. Input impedance

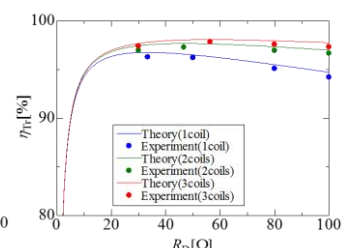


図 5. トランス効率
Fig 5. Transform efficiency