

# 飛び石式走行中非接触給電システムの回路解析

宇野 皓\*, 山田 潤, 金子 裕良 (埼玉大学) 藤田 稔之, 岸 洋之 ((株)テクノバ)

Analysis of Circuit for Dynamic Wireless Power Transfer by Stepping Stone System

Hiroshi Uno, Jun Yamada, Yasuyoshi Kaneko (Saitama University), Toshiyuki Fujita, Hiroyuki Kishi (Technova Inc.)

## 1. はじめに

近年、環境問題や省エネルギー化の観点から、次世代自動車の開発が行われており、その一つとして電気自動車が注目されている。電気自動車の問題点として、ガソリン車と比較して航続距離が短いことが指摘されている。この問題を解消するために、自動車の走行中に給電する走行中非接触給電が提案されている<sup>(1)</sup>。走行中非接触給電で提案されている回路トポロジーは SS 方式<sup>(2)</sup>と PS 方式<sup>(3)</sup>の 2 つがある。しかし、一次側のコイルの接続方法や、走行方向の位置ずれによる電流電圧変動を含めた解析を行われた例は少なく、コイル設計時のためにも必要である。

本稿では、SS 方式を直列に接続した直列 SS 方式と、PS 方式を並列に接続した並列 PS 方式を一次側コイルが 2 つ、二次側コイルが 1 つあるときの各部電流電圧特性と出力電力について解析を行い、その妥当性を回路シミュレーションにて確認した。

## 2. 1 次 2 つ 2 次 1 つの回路トポロジーの解析

図 1, 2 に今回解析を行った回路図を示す。図 1, 2 の回路の解析時において、以下の条件を考慮する。

- 一次側コイル同士の距離は大きく、相互結合は無視する。
- 巻線抵抗はリアクタンスより十分小さいとする。
- 一次側コイルは全て同一形状・性能とする。(L=L<sub>1</sub>=L<sub>2</sub>)
- PS 方式においては、0mm 地点での相互結合で共振条件(コンデンサ値)を決定し、途中で変化しない。(図 3)

以上の条件を適用した時、直列 SS 方式においては(1)式、並列 PS 方式においては(2)式のようにコンデンサ値が決定できる。この時の定電圧入力時の各部電流電圧特性を表 1、定電流入力時の各部電流電圧特性を表 2 に示す。但し、式(2)の  $\kappa$  は 0mm 地点での結合係数  $k_{13}^2+k_{23}^2$  を表している。

$$C_{S1} = C_{S2} = \frac{1}{\omega^2 L}, C_{S3} = \frac{1}{\omega^2 L_3} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_{P1} = C_{P2} = \frac{1}{\omega^2 L}, C_S = \frac{1}{\omega^2 (1-\kappa)L_3} \dots\dots\dots(2)$$

表 1, 2 から、両方式ともに、結合係数  $k_{13}$ ,  $k_{23}$  の合計値が電圧電流変動に大きな影響を与える。例えば、 $k_{13}+k_{23}$  が減少する時、 $k_{13}+k_{23}$  という項が分子にあれば、位置ずれ時に値が減少し、分母にあれば、位置ずれ時に値が増加する。

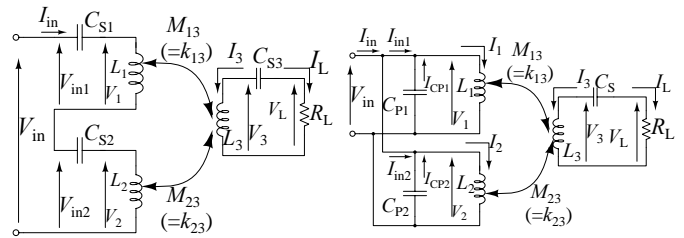


図 1 直列 SS 方式  
Fig 1. Series SS topology

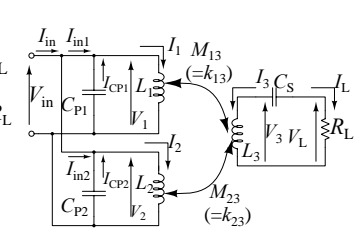


図 2 並列 PS 方式  
Fig 2. Parallel PS topology

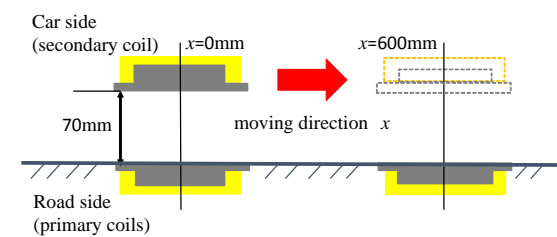


図 3 模式図

Fig 3. Pattern diagram

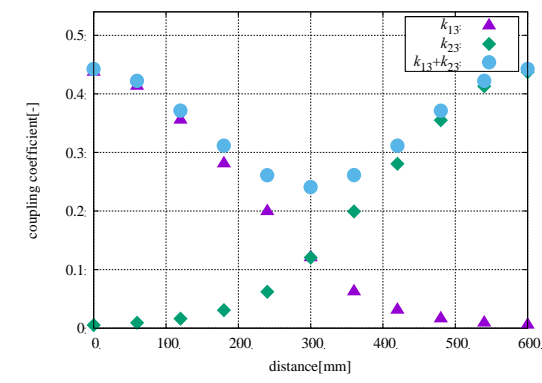


図 4. 結合係数の変動

Fig 4. Variable coupling coefficient

また、並列 PS 方式は 0mm 地点以外では、虚部が現れてくる為、位置ずれによる影響が直列 SS 方式と比較して大きい。更に、直列 SS 方式では、一次側コイルと二次側コイルの自己インダクタンスの積が重要になってくるのに対し、並列 PS 方式では、一次側コイルと二次側コイルの自己インダクタンスの比が重要となる。

表 1. 定電圧入力時の各部電流電圧特性

Table 1. voltage and current characters of constant input voltage

	直列 SS 方式	並列 PS 方式
$V_{in}$	一定	一定
$I_{in}$	$\frac{R_L}{(k_{13} + k_{23})^2 \omega^2 LL_3} V_{in}$	$\frac{L_3}{L} \frac{(k_{13} + k_{23})^2}{R_L + j(\kappa - k_{13}^2 - k_{23}^2)\omega L_3} V_{in}$
$V_L$	$j \frac{R_L}{(k_{13} + k_{23})\omega\sqrt{LL_3}} V_{in}$	$\sqrt{\frac{L_3}{L}} \frac{(k_{13} + k_{23})R_L}{R_L + j(\kappa - k_{13}^2 - k_{23}^2)\omega L_3} V_{in}$
$I_L$	$j \frac{V_{in}}{(k_{13} + k_{23})\omega\sqrt{LL_3}}$	$\sqrt{\frac{L_3}{L}} \frac{k_{13} + k_{23}}{R_L + j(\kappa - k_{13}^2 - k_{23}^2)\omega L_3} V_{in}$
$P_L$	$\frac{R_L}{(k_{13} + k_{23})^2 \omega^2 LL_3} V_{in}^2$	$\frac{L_3}{L} \frac{(k_{13} + k_{23})^2 R_L}{R_L^2 + (\kappa - k_{13}^2 - k_{23}^2)^2 \omega^2 L_3^2} V_{in}^2$

表 2. 定電流入力時の各部電流電圧特性

Table 2. voltage and current characters of constant input current

	直列 SS 方式	並列 PS 方式
$V_{in}$	$\frac{\omega^2(k_{13} + k_{23})^2 LL_3}{R_L} I_{in}$	$\frac{L}{L_3} \frac{R_L + j(\kappa - k_{13}^2 - k_{23}^2)\omega L_3}{(k_{13} + k_{23})^2} I_{in}$
$I_{in}$	一定	一定
$V_L$	$j\omega(k_{13} + k_{23})\sqrt{LL_3} I_{in}$	$\sqrt{\frac{L}{L_3}} \frac{R_L}{k_{13} + k_{23}} I_{in}$
$I_L$	$\frac{j\omega(k_{13} + k_{23})\sqrt{LL_3}}{R_L} I_{in}$	$\sqrt{\frac{L}{L_3}} \frac{I_{in}}{k_{13} + k_{23}}$
$P_L$	$\frac{\omega^2(k_{13} + k_{23})^2 LL_3}{R_L} I_{in}^2$	$\frac{L_3}{L} \frac{R_L I_{in}^2}{(k_{13} + k_{23})^2}$

3. シミュレーション

表 1, 2 で示した導出の妥当性を, 回路シミュレータソフト PSIM を用いて確認した。給電トランスには位置ずれに優れたソレノイドコイルを用い, コイル寸法を表 3 に示す<sup>(2)</sup>。表 4 に今回使用した定数を示す。この定数は, 文献(2)を参考に磁界解析ソフト JMAG を用いて得た。また, 測定点を走行方向に 0~600mm 移動させ, 60mm 間隔でとった時の結合係数の変動を図 4 に示す。以上の値を用いて, シミュレーションを行った。インバータ電源の出力電圧波形は正弦波とし, 負荷は整流器を用いず, 純抵抗のみで行った。

図 5(a)に定電圧入力時の直列 SS 方式と並列 PS 方式の出力電力の結果を, 図 5(b)に定電流入力時の直列 SS 方式と並列 PS 方式の出力電力の結果をそれぞれ示す。図 5 より, 理論式で算出された値がシミュレーション上でも再現できていることが確認でき, 出力電力について, 理論式の妥当性をシミュレーション上で確認できた。他の式についても同様の確認を行い, 式の妥当性を確認することができた。

4. まとめ

本稿では, 一次側コイル 2 つ, 二次側コイル 1 つある時の, 直列 SS 方式と並列 PS 方式の各部電流電圧特性と出力電力について解析を行った。また, 導出式はシミュレーションにより, 妥当性を確認した。今後は, SS 方式の回路を並列接続させた, 並列 SS 方式についても同様の解析を行い, 今回導出したものとの比較や, 一次側コイル数を増加させた場合についての解析を行う予定である。

文献

- (1) 大場他:自動車技術会秋季大会 297-20145827(2014)
- (2) 藤田他:電学論 D Vol.136,No.8,pp.522-531(2016)
- (3) 津田他:平成 29 年電学全大,4-183,pp.320-321(2017)

表 3. コイルの寸法<sup>(2)</sup>

Table 3. Coil Size

Size[mm]	240 × 305 × 25
Core Size[mm]	240 × 305 × 15
Winding Size[mm]	150 × 20 × 150
Al board[mm]	400 × 600 × 3
$N_1:N_2$ [Turn]	20:14

表 4. 定数表

Table 4. Parameter

$L_1$ [ $\mu$ H]	167.41
$L_2$ [ $\mu$ H]	167.27
$L_3$ [ $\mu$ H]	83.378
$r_1=r_2=r_3$ [m $\Omega$ ]	10
Frequency[kHz]	85
$I_{inmax}$ [A]	10
$V_{inmax}$ [V]	100
$R_L$ [ $\Omega$ ]	10
Gap[mm]	70

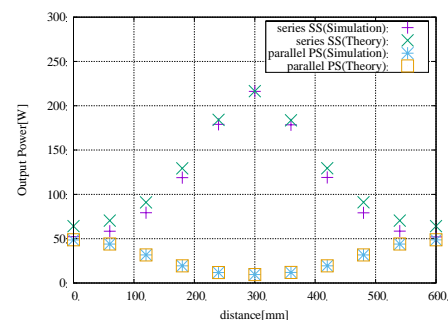


図 5. 定電圧入力時の出力電力  
Fig 5. output power of constant input voltage

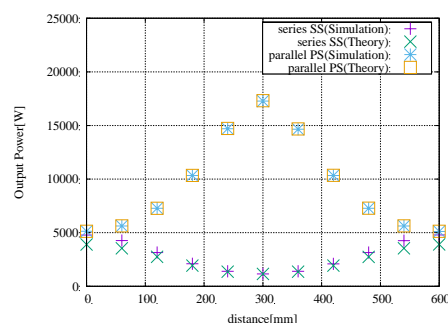


図 6. 定電流入力時の出力電力  
Fig 6. Output power of constant input current