

飛び石式走行中非接触給電システムの特性解析

宇野 皓¹⁾ 金子 裕良¹⁾ 岸 洋之²⁾ 藤田 稔之²⁾

Characteristic Analysis of Dynamic Wireless Power Transfer System by Stepping Stone Coils

Hiroshi Uno Yasuyoshi Kaneko Hiroyuki Kishi Toshiyuki Fujita

Dynamic wireless power transfer system by stepping stone coils similar to the wireless power transfer coils for parking on the ground is useful because it can be shared with parking. In this paper, we investigated a method of connecting the primary ground side coils in parallel with the inverter power supply in the magnetic field coupling system of the series-series (SS) circuit topology, and switching the ground side power supply coil with the semiconductor switch according to the position of the secondary side coil.

KEY WORDS: EV and HV systems, energy control system, Wireless Power Transfer, Electrical system[E1]

1. ま え が き

近年, 地球温暖化をはじめとした, 環境問題の関心が高まってきたしており, 環境保護施策の一つとして, 電気自動車が注目されている。現在はケーブルとコネクタにより給電を行う方法や, パンダグラフを用いて給電を行う方法がある。しかし, いずれの方式より, 利便性, 保守性, 安全性に優れている非接触給電方式が注目されている[1]。電気自動車はガソリン車と比較すると, 航続距離の短さやエネルギー充填に時間がかかるといった短所がある。それらを解決する方法の一つとして走行中非接触給電が注目されている。

走行中非接触給電に関して, 一次直列二次直列コンデンサ方式(SS方式)の一次側コイルを直列接続した研究[2], 一次並列二次直列コンデンサ方式(PS方式)の一次側コイルを並列接続した研究[3], SS方式の一次側コイルを並列接続してワイヤレスインホイールモータへの給電を走行中に行う研究[4]などがある。さらに, 上記で挙げたコンデンサ方式や一次側コイルの接続方式の解析が行われている[5]。解析を行うことで各コイルの回路特性を明らかにすると, 設計指針や駆動可能かどうかの判定などに有益だと考えられる。

本研究では, 走行中非接触給電への応用が期待されているSS方式の一次側コイルを並列接続した回路(並列SS方式)について, 一次側コイルが2つかつ二次側コイルが1つの場合について検討する。特に, 並列SS方式の場合, スイッチなしでは二次側コイルが正対していない一次側コイルに過大な電流が流れ, 回路破壊を引き起こす可能性がある。そのため, 並列SS方式で駆動できる範囲を併せて検討する。実験とシミュレーションを行い, これらの有用性を検証した。

2. 並列SS方式

2.1. 並列SS方式の概要

回路を Fig.1 に示す。SS方式は結合係数が低いと入力インピーダンスが低下するという特性を持つ。並列SS方式でも二次側コイルとの距離が離れている一次側コイルに過大な電流が流れ, 回路故障の原因となる。そのため, 二次側コイルの位置に応じて, 能動的に回路を切り替える必要がある。並列SS方式の回路解析シミュレーションを行った。

2.2 シミュレーション

本研究では回路に過大な電流が流れ, 実験中の素子の破壊を防ぐために, 実験前に回路シミュレータ PSIM による検討を行った。シミュレーションの回路図を Fig.3 に示す。これに使用したコイルを Fig.4, 5 に示す。このコイルは給電電力が3kW程度まで耐えられるように設計してある。これらのコイルを Fig.6 のように配置し, 100mm 間隔でコイルの定数測定を行った。これらのコイルを用いた定数測定結果を Fig.7 に示す。Fig.4(a)より, 自己インダクタンスは測定点により, 若干の変動がある。今回は $x=0\text{mm}$ 地点と $x=300\text{mm}$ 地点のコイル

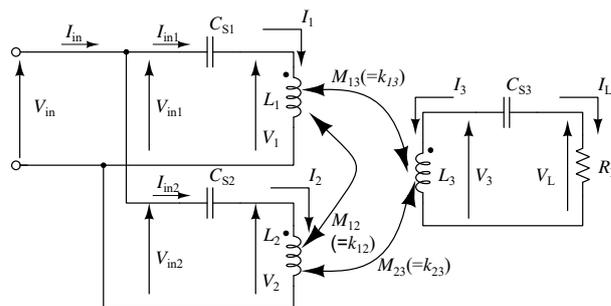


Fig.1 Parallel SS topology

1) 埼玉大学(338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

2) (株)テクノバ(100-0011 東京都千代田区内幸町 10-3)

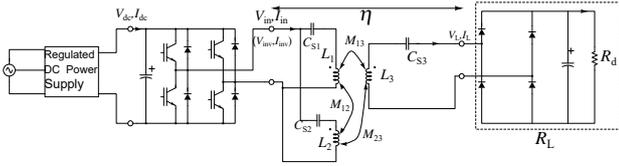


Fig.3 Simulation and experiment circuit

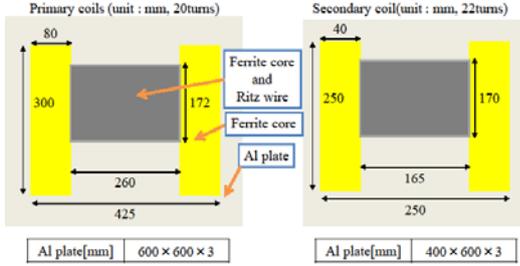


Fig.4 Coil size



Fig.5 Coil physics

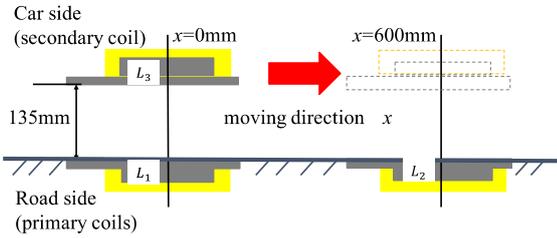


Fig.6 Experimental condition

Table 1 Parameters

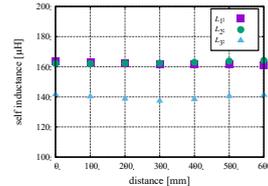
C_{Si} ($i=1,2$)	$\frac{1}{\omega^2 L_i}$ ($x=0\text{mm}$)	$\frac{1}{\omega^2(L_i + M_{12})}$ ($x=0\text{mm}$)	$\frac{1}{\omega^2 L_i}$ ($x=300\text{mm}$)	$\frac{1}{\omega^2(L_i + M_{12})}$ ($x=300\text{mm}$)
V_m [V]	76.32			
C_{S1} [μF]	0.0214	0.0210	0.0217	0.0215
C_{S2} [μF]	0.0216	0.0212	0.0216	0.0214
C_{S3} [μF]	0.0247		0.0254	
R_d [Ω]	30			

パラメータを用いて、次式からコンデンサ値を決定した。

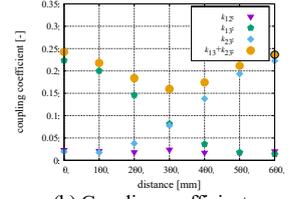
$$C_{S1} = \frac{1}{\omega^2 L_1}, C_{S2} = \frac{1}{\omega^2 L_2}, C_{S3} = \frac{1}{\omega^2 L_3} \quad (1)$$

$$C_{S1} = \frac{1}{\omega^2(L_1 + M_{12})}, C_{S2} = \frac{1}{\omega^2(L_2 + M_{12})}, C_{S3} = \frac{1}{\omega^2 L_3} \quad (2)$$

(1)式は単独 SS 方式で用いた決定式、(2)式は並列 SS 方式で用いたコンデンサ決定式である。

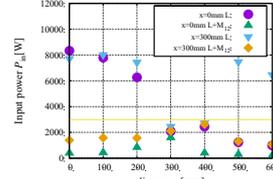


(a) Self-inductances

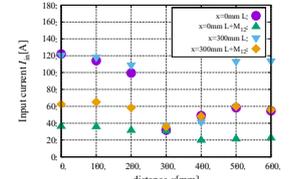


(b) Coupling coefficients

Fig.7 Result of measured parameters



(a) Input power



(b) Input current

Fig.8 Input power and Input current(Simulation)

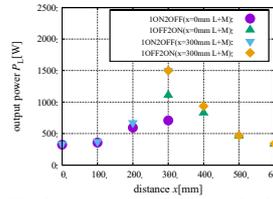


Fig.9 Output power during single drive (Simulation)

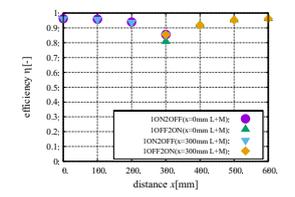


Fig.10 Efficiency during single drive (Simulation)

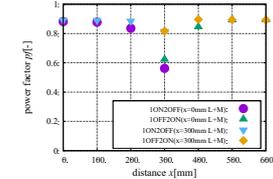
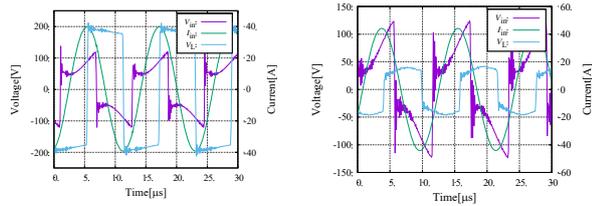


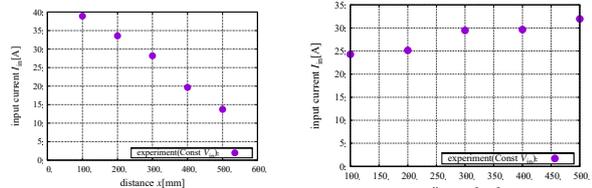
Fig.11 Power factor during single drive (Simulation)

今回シミュレーションや実験で用いるパラメータを Table 1 に示す。但し、表中の L_i ($i=1,2$) は一次側コイルの自己インダクタンスを表しており、二次側補償コンデンサの決定に関与していない。これらのパラメータを用いて、入力電圧を一定にしたときの入力電流と入力電力についてシミュレーションした結果を Fig.8 に示す。Fig.8(a)より、一次側の補償コンデンサを L_i のみで決めた時、設計定格電力の 3kW を超えている。また Fig.8(b)より、一次側の補償コンデンサを L_i のみで決めた時、 $x = 0 \sim 200\text{mm}$ 付近で入力電流がおおよそ 100A 流れる可能性があり、回路破壊を引き起こす可能性がある。原因として、正対していない方の一次側コイルからの電力が二次側コイルに送られるためである。よって、本研究では $L_i + M_{12}$ で決定した場合のみ実験を行う。

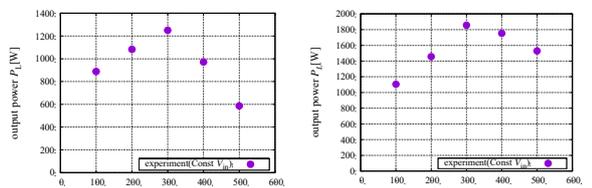
先程の並列 SS 方式の結果を踏まえて、片方の一次側コイルを駆動させたときの出力電力、トランス間効率、総合入力力率を Fig.9, 10, 11 にそれぞれ示す。本研究では片方の一次側コイルのみを駆動させたとき、 $x = 300\text{mm}$ 地点を除けば、概ね $x = 300\text{mm}$ を線対称とした変化がみられる。よって片方の一次側コイルを駆動させる際、 L_1 側のみ実験を行う。



(a) Using coil parameters at 0 mm (c) Using coil parameters at 300 mm
Fig.12 Input and output wave of parallel SS topology (Experiment)



(a) Using coil parameters at 0 mm (b) Using coil parameters at 300 mm
Fig.13 Input current (Experiment)



(a) Using coil parameters at 0 mm (b) Using coil parameters at 300 mm
Fig.14 Output power (Experiment)

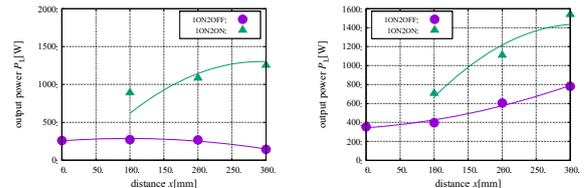
3.実験結果

3.1 各部電圧電流特性

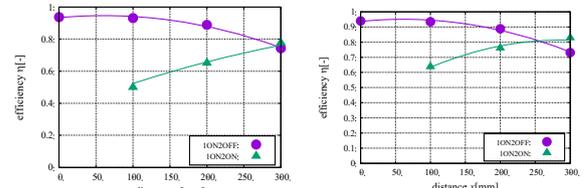
Table 1 のパラメータを用いて、給電実験を行った。Fig.12 に二次側コイルが $x = 300\text{mm}$ 地点にある時の入力電圧・電流、出力電圧波形を示す。 $x = 300\text{mm}$ 地点のコイルパラメータで決めた補償コンデンサを使用した時は、 $x = 0\text{mm}$ 地点のコイルパラメータのものより力率が良い。これは、見かけ上の一次側コイルのパラメータが大きく変化しており、補償コンデンサ値の差がわずかでも、回路全体には大きな影響を与える。

また、Fig.13 に給電時の並列 SS 方式の入力電流を、Fig.14 に出力電力をそれぞれ示す。Fig.13(a) から $x = 0\text{mm}$ 地点のコイルパラメータで決めた時、単調に減少している。これは、 L_1 側から L_2 側に向かうにつれ、本来合わせていたコンデンサ値とコイルパラメータに差が生じるため、本来なら L_2 側より L_1 側に電流が多く流れるものの、力率が低下し全体的および L_1 側に流れる電流も小さくなるためと考えられる。 $x = 300\text{mm}$ 地点のコイルパラメータで決めた Fig.13(b) では、Fig.5 に示すコイル形状の非対称性による影響はあるものの、Fig.13(a) より位置による入力電流の変化は少ない。

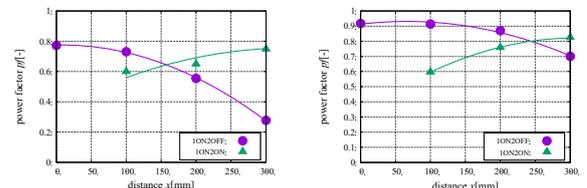
Fig.14 より、出力電力は $x = 300\text{mm}$ 地点の一次側コイル同士の間中部で最大値を迎える。これは出力電力を決める M_{13} と M_{23} の和が最小になるからである。但し、 $x = 0\text{mm}$ 地点のコイ



(a) Using coil parameters at 0mm (b) Using coil parameters at 300mm
Fig.15 Transition of output power in SS topology and parallel SS topology (Experiment)



(a) Using coil parameters at 0mm (b) Using coil parameters at 300mm
Fig.16 Transition of efficiency in SS topology and parallel SS topology (Experiment)



(a) Using coil parameters at 0mm (b) Using coil parameters at 300mm
Fig.17 Transition of power factor in SS topology and parallel SS topology (Experiment)

ルパラメータで決めた時の出力電力より、 $x = 300\text{mm}$ 地点のコイルパラメータで決めた時の出力電力の方が大きい。その理由としては、前者は二次側コイルから見て、 $x = 600\text{mm}$ 地点にある一次側コイル L_2 側から発生する磁束が大きいものの、二次側コイルが受け取る磁束はそれほど多くないためである。それに対し、後者はそれぞれの一次側コイルにほぼ均等の大きさの電流が流れるため、二次側コイルが受け取る磁束は前者の場合と比較すれば多くなる。

3.2 並列 SS 方式としての駆動可能範囲の検討

並列 SS 方式は回路特性上、SS 方式と切換えを行いながら駆動させる必要がある。本研究では、一次側コイルにスイッチを挿入した場合を想定して、 $x = 0 \sim 300\text{mm}$ 地点まで、一次側コイルを単体駆動させたときの出力電力、トランス間効率、総合入力力率について、入力電圧一定で測定を行った。また、これらの推移を比較して、並列 SS 方式で駆動できる範囲とその判定法を実用的観点から検討する。SS 方式と並列 SS 方式の出力電力の推移を Fig.15 に、トランス間効率を Fig.16 に、総合入力力率を Fig.17 にそれぞれ示す。但し、図中の線は二次関数を最小二乗法によってフィッティングさせた補間線である。出力電力は補間線の交点がないため、回路を切替えるパラメータとしては扱いにくい。補間線の交点があるのは、トランス間効率と総合入力力率である。但し、トランス間効率は出力電

力を車載側から通信して参照しなければならない。総合入力力率は電源側のみの情報を参照すれば良いため、微小時間の回路切替えに有利であると考えられる。

3.4 単独 SS 方式駆動時の出力電力を増加した場合

前節で回路の切替えの判定は総合入力力率を参照すれば良いことを提案した。しかし、SS 方式の出力電力は、並列 SS 方式駆動時の出力電力と比較して小さい。これを解決する手段として SS 方式駆動時の入力電圧を上げ、並列 SS 方式駆動時は入力電圧を下げる方法である。これにより、SS 方式駆動時のトランス間効率や総合入力力率の低下を抑えつつ、出力電力を上げることができる。そこで本研究では、SS 方式で駆動している時の入力電圧を並列 SS 方式で駆動している時の 2 倍程度に引き上げた際の出力電力とトランス間効率、総合入力力率について測定を行った。その時の出力電力とトランス間効率、総合入力力率を Fig.18, 19, 20 にそれぞれ示す。尚、測定は $x=0\sim 200\text{mm}$ 地点のみ測定した。コンデンサは $x=300\text{mm}$ 地点のコイルパラメータを用いて、(2)式から決定した。また、図中の線は二次関数を最小二乗法によってフィッティングさせた補間線である。Fig.18 から入力電圧を 2 倍にすると出力電力が増加することが分かる。しかし、定電圧入力のため、二次側コイルが移動すると、出力電力が際なく上がってしまう。これを解決するには、一次側コイルを単体で駆動する SS 方式では、定電流入力で駆動するという方法が考えられる。この時、二次側コイルが移動した場合、回路全体の入力アドミタンスは 0 に向かうため、並列 SS 方式で駆動した場合の出力電力の交点を得ることができる。また、Fig.19, 20 から入力電圧を 2 倍にしてもトランス間効率や総合入力力率は、入力電圧を引き上げなかった場合と比較してもほぼ変化しない。そのため、前節での回路の切替えに関する議論はそのまま適用可能と考えられる。

4. まとめ

本研究は走行中非接触給電への応用が期待される並列 SS 方式について基本的な検討を行った。各部電流電圧特性はコンデンサ決定法やコイルパラメータによりその推移が大きく変わることを示した。一次側コイル切替えは総合入力力率によって行うことを提案した。また、SS 方式駆動時は入力電圧を並列 SS 方式の 2 倍程度に引き上げることによって、トランス間効率や総合入力力率の低下を殆ど起こすことなく、出力電力を引き上げられることを確認した。二次側コイルが静止した状態においては、回路切替えは総合入力力率を参照し、一次側コイルが単体駆動している時(SS 方式駆動時)は、一次側コイルが二つ駆動している時(並列 SS 方式駆動時)より入力電圧を引き上げることで、出力電力の変動を小さくすることができる。今後は、模擬走行装置を用いた実験を行い、二次側コイルを停止した場合の結果とどの程度の差が生じるかについて

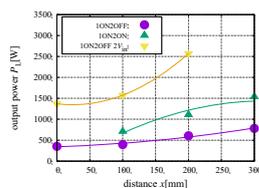


Fig.18 Output power in double input voltage during single drive

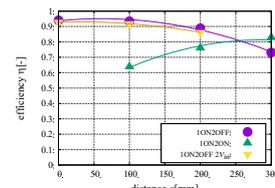


Fig.19 Efficiency in double input voltage during single drive

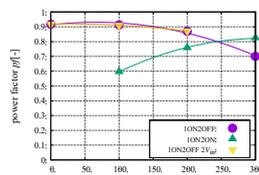


Fig.20 Power factor in double input voltage during single drive

て検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 阿部茂, "EV・PHEV 用非接触給電の技術動向", 電学誌, Vol. 133, No. 1, pp. 25-27 (2013).
- [2] T. Fujita et al., "A Dynamic Wireless Power Transfer System Applicable to a Stationary System," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 53, No. 4, pp. 3748-3757 (2017).
- [3] T. Fujita et al., "A Study of Dynamic Wireless Power Transfer System Based on Parallel-Series Resonant Topology -Bench Test and Real Car Test-," in Proc. EVS31, 20189178 (2018).
- [4] K. Hata et al., "Design and Implementation of Sensorless Vehicle Detection System for In-motion Wireless Power Transfer," in Proc. EVS31, 20189289 (2018).
- [5] H. Uno et al., "Analysis of Circuit for Dynamic Wireless Power Transfer by Stepping Stone System" in Proc. EVS31, 20189177 (2018).