

走行中給電可能な二輪車向け非接触給電システムの検討

学生員 大住 征有紀* 学生員 福島 健太

学生員 小林 涼太 正員 金子 裕良 (埼玉大学)

Study of Dynamic Wireless Power Transfer can be Two-wheeled Vehicle for Wireless Power Transfer System

Masayuki Osumi*, Student Member, Kenta Fukushima, Student Member
Ryota Kobayashi, Student Member, Yasuyoshi Kaneko, Member (Saitama University)

Study of dynamic wireless power transfer system has been developed. But this study has been conducted mainly in electric vehicle. So, there is a need for new system because two-wheeled vehicle is different from the shape of the car. In this paper, we proposed two new systems that can be running and parked in two-wheeled vehicle.

キーワード：電気自動車，電動二輪車，電動アシスト自転車，非接触給電，

Keywords：Electric vehicle, Electric motorcycle, Motor-assisted bicycle, Wireless power transfer

1. はじめに

近年，電気自動車およびプラグインハイブリッド自動車が環境問題等から普及が進んでいる。給電方式としてプラグとケーブルを用いたコンダクティブ給電方式が用いられているが，安全性・利便性・保守性から非接触給電方式が有望視されている⁽¹⁾⁽²⁾。また，非接触給電技術は自動車だけでなくの様々な用途として応用分野が拡大してきている。非接触給電システムの回路構成を図 1 に示す。

非接触給電技術には，いくつかの課題がある。その中の課題の一つとして，一充電での航続距離の問題や，充電時間が長いことがある。この問題の解決策として，走行中給電非接触給電システムの研究が進められている。走行中給電システムの検討は，オークランド大学，KAIST，東京大学，埼玉大学等で研究が進められている。また，電界結合を用いた走行中給電システムも研究されている。オークランド大学では，3 相 3 線方式の走行中給電システム⁽³⁾，KAIST の研究グループはループコイル方式⁽⁴⁾，東京大学では，中継コイルを用いた方法を提案している⁽⁵⁾。また，埼玉大学では，H 型コアソレノイドコイルを用いた方式が提案されている⁽⁶⁾。

航続距離，充電時間の問題は，電動二輪車や電動アシスト自転車にも共通する課題となっている。しかし，電気自動車向けに検討されている方式を二輪車に応用することは

困難であると考えられる。二輪車へ応用する問題は大きく 2 つある。1 つ目は，二輪車の場合は，自動車のように非接触給電装置を取り付けるための安定したスペースがない点である。2 つ目は，安定した荷台に非接触給電装置を取り付けた場合，給電装置間のギャップ長(送電距離)が長くなってしまふことで，送電効率が低下してしまう点である。

本稿では，送電距離が短い二輪車でも適用できる停車中および走行中給電が可能である，新しいシステムを提案する。

送電距離が短くできる給電方式として，タイヤ誘電方式⁽⁷⁾がある。この方式は，電極版を路面に埋め込み，タイヤ内のスチールベルト間がコンデンサと等価になることを用いた方式である。この方式では，周波数が MHz 帯であることや，電動アシスト自転車のような細いタイヤでは，高い効率で送電することが難しいことが考えられる。

この解決策として，電磁誘導方式で車輪を給電装置とし

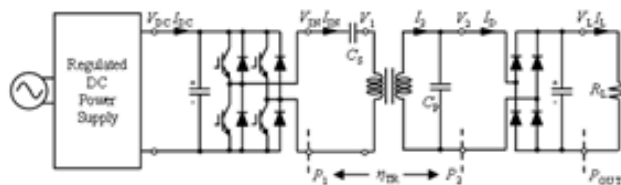


図 1. 非接触給電システムの回路図 (SP 方式)

Fig.1 Wireless power transfer system (SP topology)

た、二段式非接触給電システム方式と車輪を中継器としたシステム方式を提案する。提案する 2 つの方式は、給電装置間の送電距離を短くすることが可能であり、車輪を持つ移動体のすべてに適用可能であることが期待される。さらに、既存の駐輪システムのスイング式サイクルラック等への適用も容易になることが考えられる。

本稿では、新たに提案したシステムでの回路の接続方式での送電効率の比較、位置ずれ特性の比較を PSIM を用いた給電シミュレーションにより実施し、最適な方式を検討する。

2. 車輪を給電装置とみなしたシステム

〈2・1〉二段式非接触給電システム 図 2 に、提案する二段階非接触給電システムの構成を示す。前段部は、送電コイルがコの字型非接触給電トランス⁽⁸⁾、受電コイルが円形トランス（車輪）で構成している。後段部は、回転型非接触給電トランス⁽⁹⁾の構成になっている。本方式のように、二段式にすることにより、給電装置間の距離を短くすることが可能になる。

〈2・2〉車輪を中継器としたシステム 図 3 に、車輪を中継器としたシステムの構成を示す。送電コイルがコの字型非接触給電トランスで、円形トランスで中継することにより、コの字型非接触給電トランスで受電する構成になっている。本方式も、二段式非接触給電システムと同様に、給電装置間の距離を短くすることが可能になる。

〈2・3〉提案した 2 方式の違い 二段式非接触給電システムと車輪を中継器としたシステムの違いとして、給電装置の数に違いがある。二段式非接触給電システムは 4 個であるのに対して、中継器システムの場合は 3 個になる。

また、二段式システムの場合は、前段部と後段部は結合しないと仮定しているため、前段部のみの給電装置の結合と後段部のみの結合となる。そのため、前段部と後段部は切り離して考えることができる。しかし、中継器システムの場合は、送電コイルと中継器・中継器と受電コイルの結合以外に、送電コイルと受電コイルの結合があるために、3 個のコイルの結合を考慮した設計が必要となる。

3. 標準状態での各方式の給電シミュレーション

〈3・1〉二段式非接触給電システムの回路方式 二段式非接触給電システムの回路方式として、SNS 方式、SSS 方式、SNP 方式、SSP 方式の 4 つの方式がある。回路の構成を図 4 に示す。共振コンデンサ、負荷の値の理論式を表 1 に示す。

〈3・2〉給電シミュレーション結果 提案した車輪を給電装置とした二段式非接触給電システムの給電シミュレーションを行うために、前段部の実機を試作し抵抗値 r の定数測定を行った。給電シミュレーションにおいてインダクタンス L の値は、中継器システムの場合と比較を行うために磁界解析シミュレーションソフト JMAG による解析結果を使用した。後段部の定数は実機の測定結果を用いた。給電

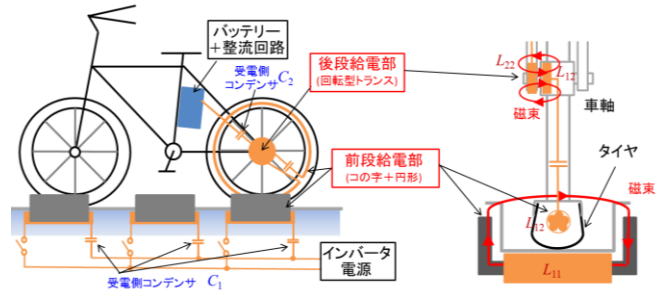


図 2 二段式非接触給電システム

Fig.2. Two-stage wireless power transfer system

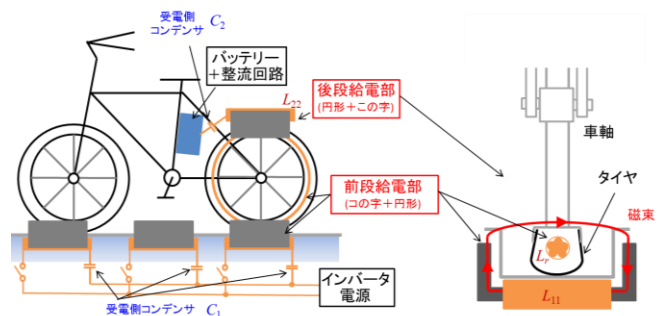


図 3 車輪を中継器としたシステム

Fig.3. System wheel is regarded as repeaters

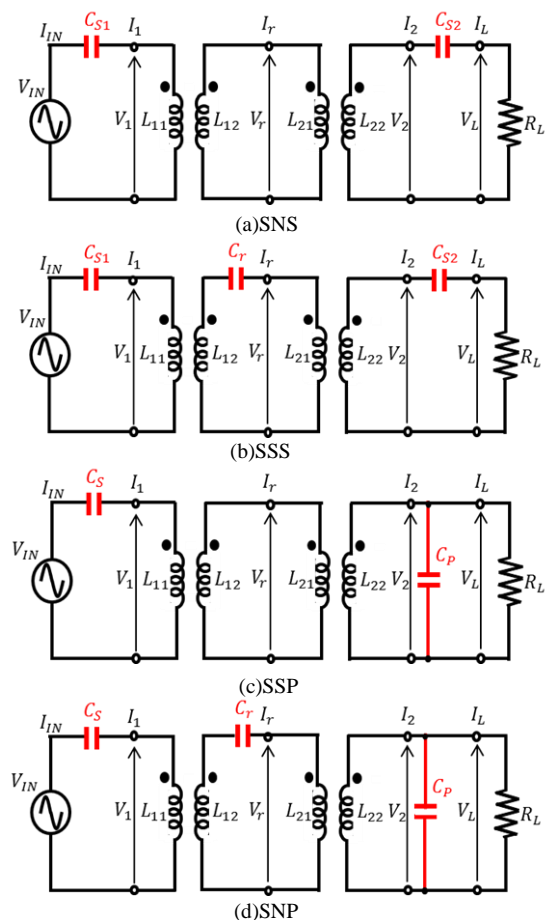


図 4 二段式非接触給電システムの回路

Fig.4. Circuit of two-stage wireless power transfer system

表 1 理論式 (二段式非接触給電システム)
Table 1. Theoretical formula (Two-stage Wireless Transfer System)

(a)SNS , SSS

	S-N-S方式	S-S-S方式
共振コンデンサ	$C_{s1} = \frac{1}{\omega^2(L_{11} - \frac{M_1^2}{L_{12} + L_{21}})}$ $C_{s2} = \frac{1}{\omega^2(L_{22} - \frac{M_2^2}{L_{12} + L_{21}})}$	$C_{s1} = \frac{1}{\omega^2 L_{11}}$ $C_r = \frac{1}{\omega^2(L_{12} + L_{21})}$ $C_{s2} = \frac{1}{\omega^2 L_{22}}$
入力インピーダンス	$Z_{IN} = \left(\frac{\omega M_1 M_2}{L_{12} + L_{21}}\right)^2 \frac{1}{R_L}$	$Z_{IN} = \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 R_L$
トランス効率 $r_r = r_{12} + r_{21}$	$\eta_{Tr} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega M_2)^2} (\alpha r_{11} + r_r) R_L + (\beta r_r + r_{22}) \frac{1}{R_L}}$ $\alpha = \left(\frac{L_{12} + L_{21}}{M_1}\right)^2$ $\beta = \left(\frac{M_2}{L_{12} + L_{21}}\right)^2$	$\eta_{Tr} = \frac{1}{1 + r_r \frac{1}{(\omega M_2)^2} R_L + \left\{r_{11} \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 + r_{22}\right\} \frac{1}{R_L}}$
最適負荷	$R_{Lmax} = \omega M_2 \sqrt{\frac{\beta r_r + r_{22}}{\alpha r_{11} + r_r}}$	$R_{Lmax} = \frac{\omega M_2}{M_1} \sqrt{\frac{M_2^2 r_{11} + M_1^2 r_{22}}{r_r}}$

(b)SNP , SSP

	S-N-P方式	S-S-P方式
共振コンデンサ	$C_s = \frac{1}{\omega^2 \left[L_{11} - \frac{M_1^2}{L_{12} + L_{21}} - \frac{(M_1 M_2)^2}{(L_{12} + L_{21})(L_{22}(L_{12} + L_{21}) - M_2^2)} \right]}$ $C_p = \frac{1}{\omega^2(L_{22} - \frac{M_2^2}{L_{12} + L_{21}})}$	$C_s = \frac{1}{\omega^2 L_{11}}$ $C_r = \frac{1}{\omega^2 \left\{ (L_{12} + L_{21}) - \frac{M_2^2}{L_{22}} \right\}}$ $C_p = \frac{1}{\omega^2 L_{22}}$
入力インピーダンス	$Z_{IN} = \left(\frac{M_1 M_2}{L_{22}(L_{12} + L_{21}) - M_2^2} \right)^2 R_L$	$Z_{IN} = \left(\frac{\omega L_{22} M_1}{M_2} \right)^2 \frac{1}{R_L}$
トランス効率 $r_r = r_{12} + r_{21}$	$\eta_{Tr} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega M)^2} \left\{ r_r M_2^2 + r_{22}(L_{12} + L_{21}) \right\} R_L + \left\{ r_{11} \left(\frac{A}{M_1 M_2} \right)^2 + r_r \left(\frac{L_{22}}{M_2} \right)^2 + r_{22} \right\} \frac{1}{R_L}}$ $A = L_{22}(L_{12} + L_{21}) - M_2^2$	$\eta_{Tr} = \frac{1}{1 + \frac{1}{(\omega L_{22})^2} \left\{ r_r \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 + r_{22} \right\} R_L + \left\{ r_r \left(\frac{L_{22}}{M_2} \right)^2 + r_{22} \right\} \frac{1}{R_L}}$
最適負荷	$R_{Lmax} = \frac{\omega A}{M_1 M_2} \sqrt{\frac{r_{11} A^2 + r_r (L_{22} M_1)^2 + r_{22} (M_1 M_2)^2}{r_r M_2^2 + r_{22} (L_{12} + L_{21})^2}}$	$R_{Lmax} = \frac{\omega L_{22} M_1}{M_2} \sqrt{\frac{r_r L_{22}^2 + r_{22} M_2^2}{r_{11} M_2^2 + r_{22} M_1^2}}$

装置を図 5, 定数結果を表 2 に示す。

定数結果をもとに PSIM を用いた給電シミュレーションを行った。標準状態での給電効率をまとめた結果を表 3 に示す。表 3 の結果は整流器なしの結果である。給電シミュレーションの結果から、整流器が正弦波、矩形波の両方で給電することが可能であり、SSS 方式と SSP 方式が高い効率で送電できることが分かった。

〈3・3〉位置ずれ特性 二段式非接触給電システムの位置ずれした場合のトランス効率を 4 つの方式で比較を行った。整流器を接続していない場合の結果を図 6 に、整流器を接続した場合の結果を図 7 に示す。入力波形は矩形波を用いた。

整流器を接続していない場合は、SSS 方式と SSP 方式が同じ特性を持ち、SNS 方式と SNP 方式が同じ特性を持つことがわかる。

また、SNS 方式と SNP 方式は、位置ずれが大きくなると SSS 方式と SSP 方式よりも大きく効率が低下することが分かった。

整流器を接続した場合は、後段部の共振コンデンサを並列に接続した、SNP 方式と SSP 方式が整流器の影響があることが分かった。以上の結果より、二段式非接触給電システムは SSS 方式が最も優れると考えられる。

4. 中継器システムの給電シミュレーション

〈4・1〉中継器システムの回路方式 二段式非接触給電システムにおいて SSS 方式が優れることから、中継器システムでは SSS 方式について検討する。中継器システムの回路の構成を図 8 に示す。共振コンデンサ、負荷の値の理論式を表 4 に示す。二段式非接触給電システムの SSS 方式の違いとしては、共振コンデンサを決めるときに、3 つのコイ

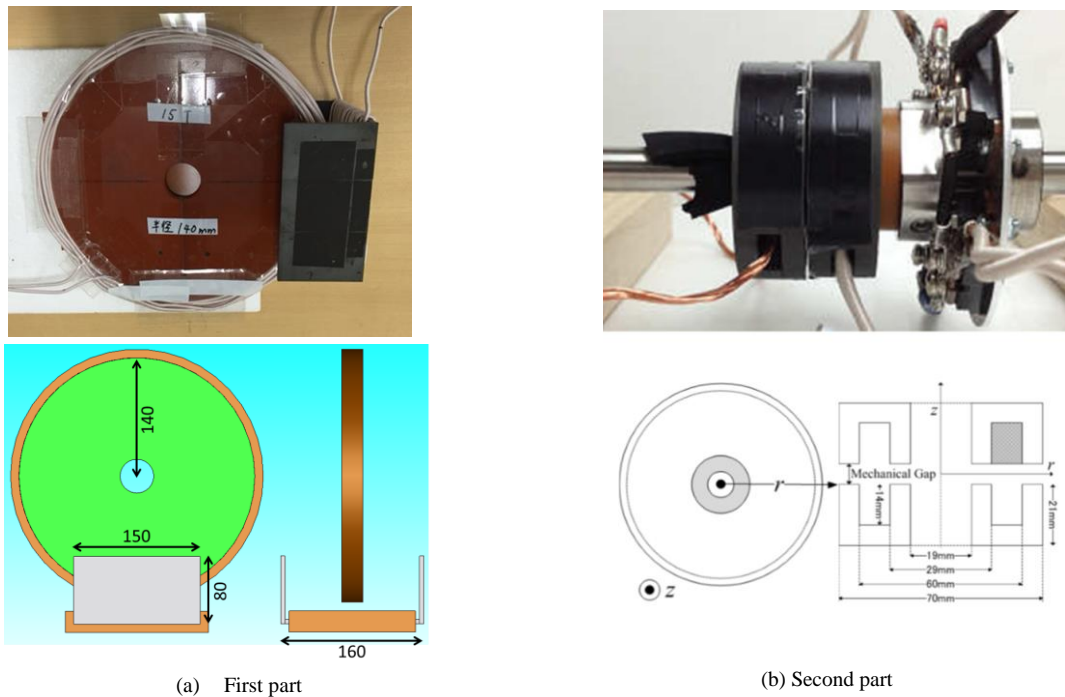


図 5 二段式非接触給電装置

Fig.5. Two-stage wireless power transfer equipment

表 2 回路定数 (二段式)

Table 2. Circuit parameters (Two-stage)

(a) First part

(b) Second part

frequency[kHz]	85	frequency[kHz]	85
L_1 [uH]	98.0	L_{21} [uH]	19.9
L_2 [uH]	138	L_{22} [uH]	19.7
M_1 [uH]	27.4	M_2 [uH]	13.9
r_{11} [mΩ]	54.2	r_{21}	24.17
r_{12} [mΩ]	133	r_{22}	21.75
k	0.235	k	0.705

$N_{11}:15T$ $N_{12}:15T$

$N_{21}:8T$ $N_{22}:8T$

表 3 シミュレーション結果 (二段式)

Table 3. Simulation result (Two-stage)

Circuit system	η_{TR} [%]	
	Sine wave	Square wave
SNS	95.0	92.8
SSS	98.0	96.8
SNP	94.9	91.2
SSP	97.9	96.7

ルの結合をすべて考慮しなければならない点がある。

〈4・2〉 給電シミュレーション結果 車輪を中継器とした給電シミュレーションを行った。磁界解析シミュレーションソフト JMAG により、二段式非接触給電システムの時と同じ寸法のモデルにより、インダクタンス L の解析を行い、解析結果を定数として用いた。抵抗値 r は、二段式非接触給電システムの前段部の実機の定数を用いた。車輪を中継器としたシステムのモデルを図 9 に、定数結果を表 5 に示す。

定数結果をもとに PSIM を用いた給電シミュレーションを行った。標準状態で整流器を用いなかった場合は、正弦波入力で 98.3%、矩形波入力で 96.9%の送電効率であった。これは、二段式非接触給電システムの SSS 方式と非常に近い値であり、標準状態において、二段式非接触給電システムの SSS 方式と車輪を中継器としたシステムの SSS 方式は

同等の特性を持つと言える。

〈4・3〉 位置ずれ特性 二段式非接触給電システムと同じように、位置ずれした場合のトランス効率を PSIM を用いてシミュレーションを行った。整流器を接続した場合の結果を図 10 に示す。二段式非接触給電システムの SSS 方式の場合と同様に整流器の影響を受けないことが分かった。

〈4・4〉 二段式非接触給電システムとの比較 整流器を接続した場合の二段式非接触給電システムと車輪を中継器としたシステムの位置ずれ特性の比較を行った。比較した結果を図 11 に示す。図 11 より、二段式非接触給電システムと車輪を中継器としたシステムの SSS 方式は、位置ずれ特性も同じ特性を持つことが分かった。

ここで、二段式非接触給電システムと車輪を中継器としたシステムにおいて、理論式に注目する。共振コンデンサは、二段式システムと中継器システムで異なるが、理論効

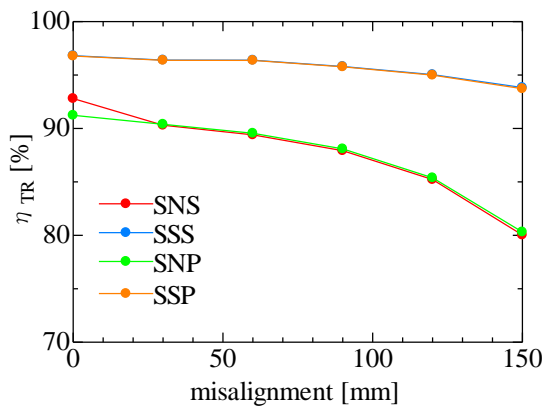


図 6 位置ずれ特性 (整流器なし)

Fig.6. Position misalignment characteristic (No rectifier)

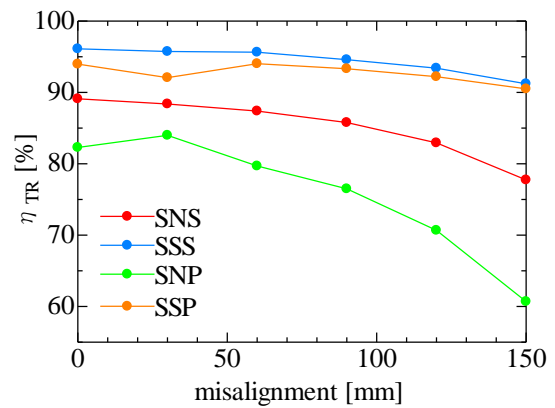


図 7 位置ずれ特性 (整流器あり)

Fig.7. Position misalignment characteristic (There rectifier)

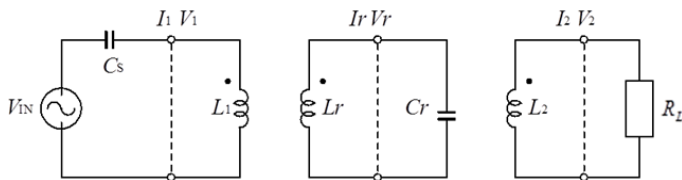


図 8 中継器システムの回路

Fig.8. Circuit of repeater system

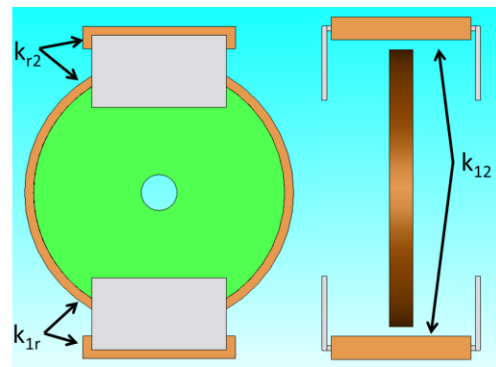


図 9 中継器システムのモデル

Fig.9. Model of repeater system

表 4 理論式(中継器システム)

Table 4. Theoretical formula (Repeater system)

S-S-S方式	
共振コンデンサ	$C_{S1} = \frac{1}{\omega^2 \left(L_1 + \frac{M_{1r} M_{12}}{M_{2r}} \right)}, C_{S2} = \frac{1}{\omega^2 \left(L_2 + \frac{M_{2r} M_{12}}{M_{1r}} \right)}$
入力インピーダンス	$Z_{IN} = \left(\frac{M_{1r}}{M_{2r}} \right)^2 R_L$
トランス効率	$\eta_r = \frac{1}{1 + r_r \frac{1}{(\omega M_{r2})^2} R_L + \left\{ r_{11} \left(\frac{M_{r2}}{M_{1r}} \right)^2 + r_{22} \right\} \frac{1}{R_L}}$
最適負荷	$R_{Lmax} = \frac{\omega M_{r2}}{M_{1r}} \sqrt{\frac{M_{r2}^2 r_{11} + M_{1r}^2 r_{22}}{r_r}}$

表 5 回路定数 (中継器システム)

Table 5. Circuit parameters (Repeater System)

freaquence[kHz]	85
L ₁₁ [uH]	95.3
L _r [uH]	134
L ₂₂ [uH]	35.4
M _{1r} [uH]	27.0
M _{r2} [uH]	27.0
M ₁₂ [uH]	3.6
k _{1r}	0.238
k _{r2}	0.239
k ₁₂	0.038
r ₁₁ , r ₂₂ [mΩ]	54.2
r _r [mΩ]	133

N₁₁:15T N_r:15T N₂₂:15T

率率が非常に似ている。そのため、二段式非接触給電システムと車輪を中継器としたシステムの特徴が同じになったと考えられる。しかし、二段式非接触給電システムの後段部の回転型トランスや中継器システムの車輪を中継した後

の給電トランスの形状を変更することにより、効率の向上が見込めるため、二段式非接触給電システムと中継器システムに優劣をつけることは本稿では難しい。

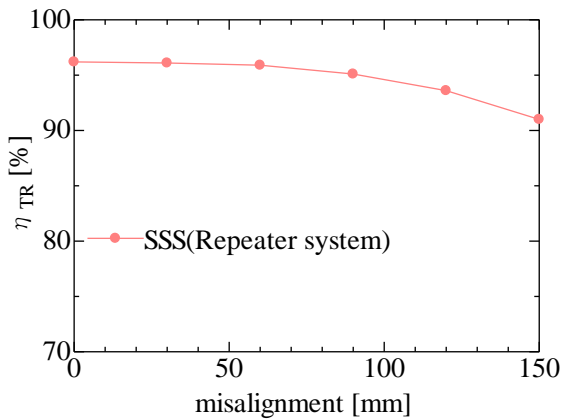


図 10 位置ずれ特性 (中継器システム)

Fig.10. Position misalignment characteristic (Repeater System)

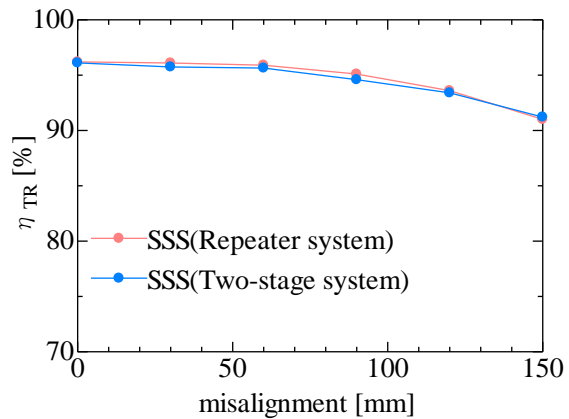


図 11 位置ずれ特性比較

Fig.11. Position misalignment characteristic comparison

5. まとめ

二輪車でも走行中給電が可能な新たな給電システムを提案し、評価を行った。提案した 2 つの手法はともに給電装置間のギャップを短くすることができることから、高効率で給電できることが確認できた。

二段式非接触給電システムにおいて、異なる 4 つの回路方式の比較を行ったところ、標準状態において SSS 方式と SSP 方式が優れることが分かった。さらに、位置ずれ特性の評価を行ったところ、SSS 方式と SSP 方式が位置ずれに強い。しかし、SSP 方式において、整流器を接続した場合は、整流器の影響を受けてしまう。以上のことから、二段式非接触給電システムでは SSS 方式が最も優れることが分かった。

中継器システムにおいては、SSS 方式を評価したところ、二段式非接触給電システムの SSS 方式と同等の特性を持つことが分かった。

文 献

- (1) 阿部茂・金子裕良:「非接触給電技術」, 電気学会誌, Vol128, No.12, pp.796-799(2008)
- (2) M.Budhia, G.A.Covic, and J.T.Boys: "A New Magnetic Coupler for Inductive Power Transfer Electric Vehicle Charging Systems", IEEEIECON 2010, pp.2481-2486(2010)
- (3) G.A. Covic, J.T. Boys, M.L.G. Kissin, H.G. Lu: "A Three-Phase Inductive Power Transfer System for Roadway-Powered Vehicles", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol.54, No.6, (2007)
- (4) J. Huh, S.W. Lee, W.Y. Lee, G.H. Cho, C.T. Rim, "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles", IEEE Trans. Power electronics, Vol.26, No.12 (2011)
- (5) Koh Kim Ean, Takehiro Imura, Hori Yoichi: "New Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling for Charging Moving Electric Vehicle", International Electric Vehicle Technology Conference & Automotive Power Electronics Japan 2014
- (6) 今野 純也, 津田 和真, 金子 裕良, 岸 洋之, 保田 富夫:「直列接続コイルを用いた非接触給電システムの共振コンデンサ方式・電源駆動方法の検討」, 平成 27 年電気学会 全国大会(2015.3.24)
- (7) 鈴木良輝, 鳥井俊宏, 水谷 豊, 杉浦貴光, 坂井尚貴, 上原秀幸, 大平 孝, "車両タイヤによるゼロギャップ無線電力伝送," ワイヤレス・テクノロジー・パーク, アカデミアプログラム, 横浜, 2012-07
- (8) 吉岡 直人, 工藤 貴広, 金子 裕良, 阿部 茂:「電動アシスト自転車用コの字型 50W 非接触給電トランス」, 平成 26 年電気学会全国大会, 4-091(2014.3.20)
- (9) 小林 涼太, 野沢 亨介, 金子 裕良:「一次直列コンデンサ方式を用いた非接触給電における負荷抵抗値」, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会, 1-82, pp.357-362