

令和 2 年 4 月 16 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14649

研究課題名(和文) 移動体に高効率送電可能な三相非接触給電システムの研究

研究課題名(英文) High-efficient three-phase contactless power transformer for moving vehicles

研究代表者

松本 洋和 (MATSUMOTO, HIROKAZU)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：40526406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では移動する無人搬送車(AGV)へワイヤレスで送電するシステムとして、以下の二つについて開発を行った。(1)三相平面形ワイヤレス送電システム(2)トラックコイル+ブーストコイル構成の直列送電コイルシステム。いずれにおいても、移動するAGVに対して、その駆動に必要な電力を安定して送電できることを確認し、その有効性を立証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工場や物流センターなどではオートメーション化が進み、その中で無人搬送車(AGV)は物品の搬送に使用されている。AGVはバッテリーで駆動しているため定期的に充電が必要であり、そのために稼働効率が低下している。そこで走行中にもワイヤレスで送電を行えるシステムを開発することで、稼働効率を向上し、またバッテリーで圧迫されている積載を改善できる。さらに将来このシステムを大容量化することで、電気自動車へのワイヤレス送電へも実現できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：This research develops the following two wireless power transfer systems to automated guided vehicle (AGV). (1) Three-phase planar wireless power transfer system and (2) Wireless power transfer system with passive-boost topology. It has been proved that these two systems can transfer enough power to drive AGV, stably.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス送電 無人搬送車

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

工場や物流センター等でオートメーション化が進んでいる。これら現場の中では溶接/組立ロボットなどが稼働し、また物品の集配、移動に無人搬送車(AGV)が使用されている。AGVはバッテリーで駆動されており、定期的にバッテリー充電を行う必要がある。そのためにAGVを一時稼働停止させる必要があり稼働効率の低下は避けられない。

### 2. 研究の目的

移動するAGVに対して送電を行えるワイヤレス送電システムを開発することで、AGVの稼働効率を改善する。重ねてその現場のすべての電動装置に対してワイヤレス送電を行うことで、レイアウトフリーな製造/物流システムの実現を容易にする。これにより効率的に多品種・少量生産を行うことが可能となり、海外との価格競争で低迷している日本の製造業復活に大きく貢献できると考えられる。具体的には次の送電システムの提案及び開発を行った。

#### (1) 三相平面形ワイヤレス送電システム

平面状に送電コイルを展開し、その上に散在もしくはその上を移動するAGVやその他電動装置に、その位置に関係なく均一な電力を供給するためのものである。三相システムとすることで隣接するコイル間で磁界を強め、均一な電力の送電を可能にできると期待される。

#### (2) トラックコイル+ブーストコイル構成の直列送電コイルシステム

より大きな電力を必要とする場所(例えばAGV用の傾斜した走行路)ではこの直列送電コイルシステムを設置する。従来のトラックコイルのみ or ソレノイドコイルのみの送電コイルとはことなり、この提案するシステムはより多くの電力を高効率で送電できると期待される。

### 3. 研究の方法

#### (1) 三相平面形ワイヤレス送電システムの開発

図1に三相平面形ワイヤレス送電システムを示す。送電用の三相ケーブル(U,V,W)を平面上に配置したもので、その上を受電コイルを有するAGV等が移動する。この平面上の位置に関わらず均一な電力を送電できることが期待される。以下の方法で研究を進め、その有効性を立証した。

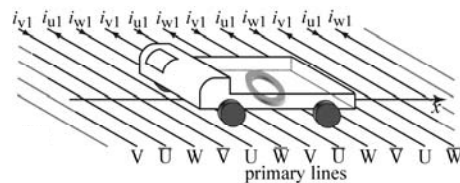


図1 三相平面形ワイヤレス送電システム

#### ① 磁界解析による送電-受電間の相互インダクタンスの評価

特にシステムを製作する際に重要なケーブル間の距離について、解析結果を基に評価を行った。

#### ② 回路構成の検討と等価回路方程式の導出

本システムに適用する送電側回路及び受電側回路の検証を行った。また理論的に実証を行うために回路毎にモデル化し、送電電力の解析式を導出した。

#### ③ 実機製作および送電実験による定常時(静止時)及び過渡時(走行時)の特性測定

以上を基に送電システムを製作し、走行中のAGVに対する送電実験を含む各種実験を行い、動作確認を行うと共にその特性を測定した。

#### (2) トラックコイル+ブーストコイル構成の直列送電コイルシステムの開発

図2にトラックコイル+ブーストコイル構成の直列送電コイルシステムを示す。送電部はトラックコイルとbコイルブーストコイル(ソレノイドコイル)からなる。トラックコイルはAGVの走行路に沿って展開され、その内側にブーストコイルがフェライトヨークを共有する形で設置される。両者は電氣的に絶縁される。ブーストコイルに流れる電流は受電コイルの位置によってパッシブにオン/オフが切り替わる。つまり受電コイルが近傍にある時は電流が流れ、それ以外は電流は流れない。これによって高出力・高効率さらには抵漏れ磁束の動作が期待される。以下の方法で研究を進め、性能改善を図ると共にその有効性を立証した。

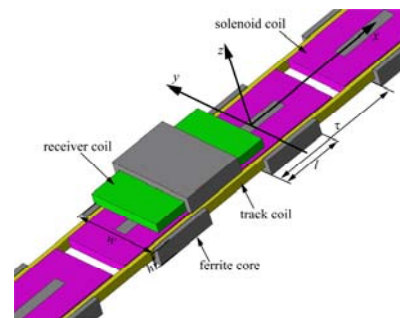


図2 トラックコイル+ブーストコイル構成の直列送電コイルシステム

#### ① 数値解析による動作確認

磁界解析及び回路解析によりパッシブ電流切り換え動作の確認を行った。

#### ② 実機製作および送電実験による定常特性の測定

実機を作成し、送電実験を行い定常時(静止時)の特性を測定した。

#### ③ 回路構成の検討と改善

定常特性を基に回路構成を検討し改善することで、送電の均一性を高めた。

#### ④ 走行中のAGVに対する送電実験

走行するAGVに対して送電実験を行い、動作確認を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 三相平面形ワイヤレス送電システムの開発

##### ① 磁界解析による送電-受電間の相互インダクタンスの評価

図3は送電-受電間の相互インダクタンスである。横軸は受電コイルの位置である。受電コイルの位置 $\theta$ に関わらず一様な電力を送電するためには、これが正弦波特性を示す必要がある。ケーブル間隔 $\tau$ を長くすると単位面積当たりのケーブル本数が減るため設置コストを低減できるが、図のように歪むことが分った。また短くしすぎても、インダクタンスの最大値が減少するため、送電電力が減少してしまうことが分った。以上から120mm~180mmの間隔が良いことを明らかにした。

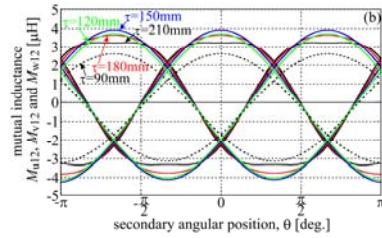


図3 送電-受電間相互インダクタンス

##### ② 回路構成の検討と等価回路方程式の導出

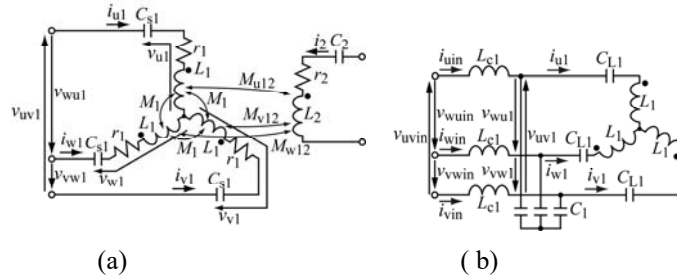


図4 送電部回路(a)直列共振回路と(b)LCL共振回路

図4に検討した二つの送電回路を示す。ワイヤレス送電システムではコイルの自己インダクタンスによる遅れ力率を保証するために、一般的にコンデンサを電源とコイルの間に挿入する。(a)は単純に直列に接続したものである。一方(b)はLCL回路構成となっており、コイルに流れる電流を負荷のインピーダンスに関わらず一定としている。

等価回路方程式は以下で表され、

$$\begin{bmatrix} V_{u1} \\ V_{v1} \\ V_{w1} \end{bmatrix} = r_1 \begin{bmatrix} I_{u1} \\ I_{v1} \\ I_{w1} \end{bmatrix} + j\omega L_1 \begin{bmatrix} I_{u1} \\ I_{v1} \\ I_{w1} \end{bmatrix} + \frac{1}{j\omega C_{s1}} \begin{bmatrix} I_{u1} \\ I_{v1} \\ I_{w1} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} 0 & M_1 & M_1 \\ M_1 & 0 & M_1 \\ M_1 & M_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{u1} \\ I_{v1} \\ I_{w1} \end{bmatrix} + \frac{\omega^2}{R + r_2} \begin{bmatrix} M_{u12}^2 & M_{u12}M_{v12} & M_{w12}M_{u12} \\ M_{u12}M_{v12} & M_{v12}^2 & M_{v12}M_{w12} \\ M_{w12}M_{u12} & M_{v12}M_{w12} & M_{w12}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{u1} \\ I_{v1} \\ I_{w1} \end{bmatrix}$$

これを変形しそれぞれで送電電力 $P_R$ を求めると、

$$\text{直列共振回路: } P_R = 12R \left( \frac{\omega M_{12} r_1}{6\omega^2 M_{12}^2 r_1 + 4r_1^2 (R + r_2)} \right)^2 |V_{p1}|^2$$

$$\text{LCL共振回路: } P_R = \frac{3R}{4} \left( \frac{\omega M_{12}}{r_2 + R} \right)^2 |I_{p1}|^2$$

となることを明らかにした。いずれも入力電圧 $V_{p1}$ または入力電流 $I_{p1}$ が一定であれば、受電コイルの位置に依存しない均一な電力を送電可能であることが理論的に証明した。

また受電部回路についても検証を行い、相互インダクタンスが小さい本システムでは単相倍電圧が有効であることを確認した。

##### ③ 実機製作および送電実験による定常時(静止時)及び過渡時(走行時)の特性測定

図5に製作した実験機を使った測定結果を示す。理論式で証明したようにどちらの回路構成でも送電電力 $P_o$ はほぼ一定となることを確認できた。一方、LCL共振回路を用いた方が高出力・

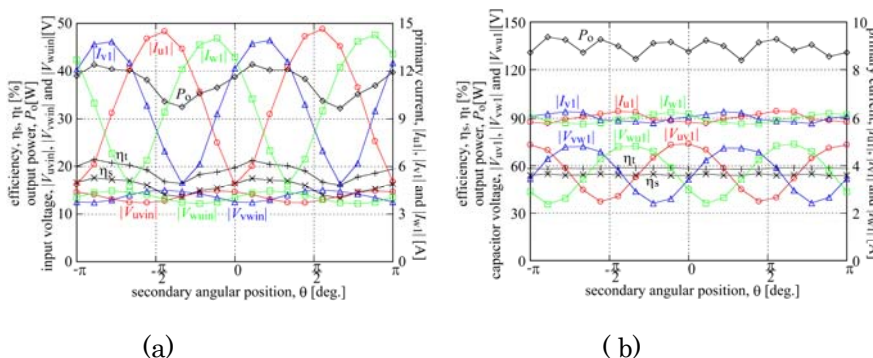


図5 (a)直列共振回路と(b)LCL共振回路における送電結果

高効率 (図中の $\eta_t$  及び $\eta_s$ ) 動作することを確認した。これは  $LCL$  共振回路では電流 (図中の  $I_{u1}, I_{v1}$  として  $I_{w1}$ ) の値が小さいため、インバータやコイル内での損失を低減できるからである。

図 6 は走行中の AGV に対する送電実験時の測定結果である。AGV は静止時から加速 (0.5s から) →一定速 (2s から) →減速 (4.5s から) そして停止させている。送電回路は  $LCL$  共振回路を採用している。送電電力  $P_o$  はほぼ一定の値を示している。また AGV の駆動電力  $P_d$  に対して送電電力  $P_o$  が常時上回っていることが確認できた。

以上より、三相平面形ワイヤレス送電システムの有効性を確認できた。

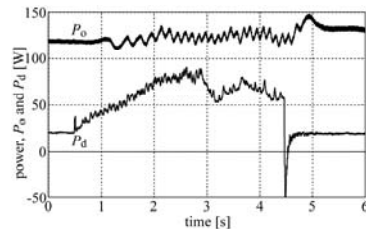


図 6 走行中の AGV への送電実験

## (2)トラックコイル+ブーストコイル構成の直列送電コイルシステムの開発

### ①数値解析による動作確認

ブーストコイルのパッシブ電流切り換え動作は、受電コイルの位置 $\theta_2$ によって図 7 のようにブーストコイルの自己インダクタンス  $L_{s2}, L_{s3}$  が変化する特性を利用する。受電コイルが直上にある時 ( $\theta_2=0$  or  $\theta_2=360$ deg.) のインダクタンスに合わせて共振コンデンサを設定すると、受電コイルが近傍にある時、ブースト閉回路のインピーダンスが小さくなるため電流が流れる。一方、離れた位置にある時、そのインピーダンスは大きくなり、電流は流れない。数値解析によって、期待した動作が得られることを確認した。

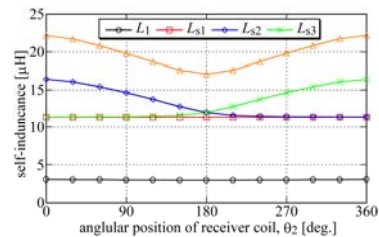


図 7 自己インダクタンス

### ②実機製作および送電実験による定常特性の測定

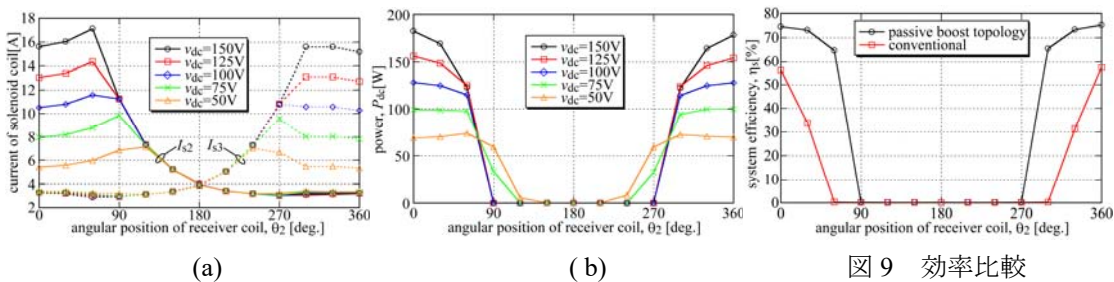


図 9 効率比較

図 8 静止時送電実験(a)ブーストコイルの電流と(b)送電電力

図 8 は送電実験の測定結果を示す。図 8(a)より、受電コイルの位置によってブーストコイルの電流がオン/オフしていること確認された。また図 9 はソレノイドコイルを単純に並べたシステム (conventional) との効率比較を示している。本提案システム (passive boost topology) はこのように高い効率を有しているだけでなく、受電コイルの位置に対する送電レンジが広く、また漏れ磁束も低減できることを確認した。

### ③回路構成の検討と改善

図 8(b) で示すように、ブーストコイルの間に受電コイルがある時 ( $\theta_2=90\sim 270$ deg.), 有意の電力を送電できないことが確認された。そこで AGV に搭載する受電コイルを二つとし、その設置間隔をブーストコイルの間隔の 1.5 倍とするシステムを提案した。これにより一つがブーストコイル間にある時、他方はブーストコイル上にあることができる。この改善結果が図 10 である。またこの図から整流後の電圧  $v_{dc}$  によって、送電電力が受電コイルの位置だけでなく、受電回路の直流電力に依存することが明らかになった。そこで受電回路において、整流器の直後にバッテリーを接続するのではなく、コンバータを介して接続することで、整流後の電圧を受電コイル位置によって変動させる事ができる回路構成を提案した。

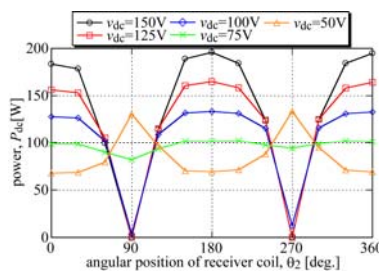


図 10 改善結果

### ④走行時送電実験

図 11 に走行時の送電実験の結果である。期待したように、ブーストコイルの電流 CH2, CH3 がパッシブにオン/オフしていること、また 100W 以上の電力 (CH7) を常に送電できることを確認した。

以上より本システムの有効性が確認できた。

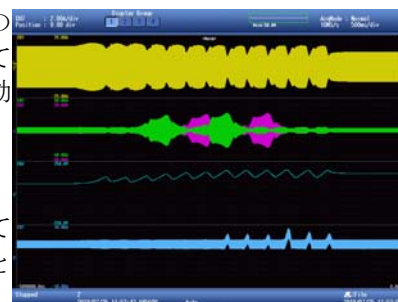


図 11 走行時送電実験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Matsumoto, Y. Shibako, Y. Shiihara, R. Nagata, Y. Neba	4. 巻 65
2. 論文標題 Three-Phase Lines to Single-Phase Coil Planar Contactless Power Transformer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 2904-2914
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2017.2748049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Matsumoto, Y. Shibako and Y. Neba	4. 巻 65
2. 論文標題 Contactless Power Transfer System for AGVs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 251-260
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2017.2721913	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 登川涼平・財津徹平・柴戸洋次郎・松本洋和
2. 発表標題 Wireless Power Transfer Simulation With Linearly Arrayed Coils
3. 学会等名 平成31年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 登川涼平・財津徹平・鶴林大樹・松本峻央・柴戸洋次郎・松本洋和・根葉保彦
2. 発表標題 ブーストコイルを使ったAGV用非接触給電システム
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松永大平・岡部和磨・椎原悠太・永田竜馬・井川裕介・松本洋和・柴戸洋次郎・根葉保彦
2. 発表標題 AGV 用三相 - 单相平面形非接触給電システムの走行実験
3. 学会等名 平成29年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 椎原悠太・永田竜馬・岡部和磨・井川裕介・松永大平・松本洋和・柴戸洋次郎・根葉保彦
2. 発表標題 三相非接触給電システムにおける効率最適化制御のシミュレーション
3. 学会等名 平成29年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永田竜馬・椎原悠太・岡部和磨・井川裕介・松永大平・松本洋和・柴戸洋次郎・根葉保彦
2. 発表標題 AGV用单相非接触給電システムにおける複数台運用の検討
3. 学会等名 平成29年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松永大平・岡部和磨・椎原悠太・永田竜馬・井川裕介・松本洋和・柴戸洋次郎・根葉保彦
2. 発表標題 AGV用三相-单相平面形非接触給電システムの人体曝露に関する磁界測定
3. 学会等名 平成29年度電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松永大平・岡部和磨・椎原悠太・井川祐介・永田竜馬・柴戸洋次郎・松本洋和・根葉保彦
2. 発表標題 格子状三相-单相平面形非接触給電システムのシミュレーション
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----