

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420243

研究課題名(和文) 鉄道の間欠形非接触給電の提案とシステム設計論

研究課題名(英文) Study on periodical power feedings system for electric railway vehicles.

研究代表者

近藤 圭一郎 (Kondo, Keiichiro)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10425895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：車上蓄電媒体を搭載した車両に定点での電力供給を行うことで、電化コストをかけずにエネルギー効率の高い鉄道輸送システムの実現するための、車両運行方法、電力伝送制御方法、およびコイルの位置ずれを正方法を明らかとした。その結果、同じ設備でも省エネルギーになる車両の運行方法と給電位置を明らかとするとともに、電力伝送効率の高い非接触給電を実現することが可能となり、電気エネルギー利用の高度化に寄与する研究成果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, a method to provide a energy saving and less cost electric railway system is revealed. Key technologies for this reserch are wireless power transmisson, energy saving vehicle operation. The results are expected to cotribute to provide more effeicient electrical energy utilization method.

研究分野：電気機器，パワーエレクトロニクス，鉄道応用

キーワード：非接触給電 鉄道車両 蓄電装置 電力変換器制御 給電コイル 位置ずれ

1. 研究開始当初の背景

車上蓄電媒体を搭載した車両に定点での電力供給を行うことで、電化コストをかけずにエネルギー効率の高い鉄道輸送システムの実現が可能になる。定点での給電を架線・パンタシステムのような接触式とすると、給電開始・終了時の動作およびその確実を期すための保護装置などが必要となり、システムが複雑となる。これらの課題を解決する技術として、図1に示すように空間の電磁氣的結合によりエネルギーを伝送し、車上の蓄電装置に電力を供給する非接触給電方式の採用が考えられる。

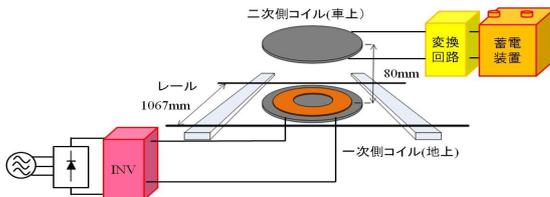


図1 非接触給電システムと蓄電式鉄道車両

大電力が必要とされる鉄道車両への給電を想定した場合、以下のような課題が生じる。

・電力変換回路の損失の増加

伝送電力が大きいことから、送受電用の電力変換回路のパワー半導体デバイスの損失が大きく、特にスイッチング周波数が制約を受け、コイル設計にも影響が生じる。全体の損失や機器の寸法などに考慮して動作周波数や回路方式および位置ずれも考慮した制御方式の設計手法の確立が必要とされた。

・長ギャップによる無効電力の増加

ギャップが長いため、無効電力が増える。その結果、無効電力補償用コンデンサの電圧、電流の増大や、もしくは電力変換装置から供給する無効電力の増大を防ぐ工夫が必要であった。

・適切な充電箇所と充電電力の決定法

非接触給電電力を抑制するため、少ない車上蓄電装置搭載量で長距離の運転を可能とする所謂ランカーブの生成を行う。その上で、蓄電素子搭載量の決定法についても検討が求められていた。

2. 研究の目的

以上のような課題に対して、各研究者は分担して以下を明らかにすることを目的とした。

(1)ランカーブを考慮した非接触給電システムの必要容量及び全体システム設計の検討

最も根本的な設計指針として、非接触給電装置の設置間隔を考える必要があり、それには給電装置の必要電力や給電時間、さらには蓄電装置の必要搭載量にも関係する。

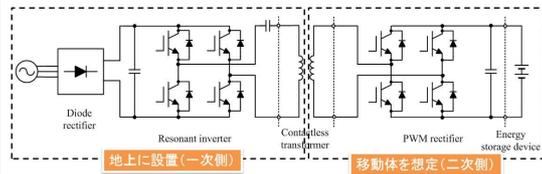


図2 検討する電力変換回路方式の例

まず、車上蓄電装置の充電状態を考慮して消費エネルギーを抑え、少ない車上蓄電装置搭載量で長距離の運転を実現する速度指令（所謂ランカーブ）の生成を行う方法論を明らかにする。

次に、ある路線条件下で、開発状況に応じた非接触給電装置容量や効率を仮定し、各駅間の所要時間に加え駅での停車時間と給電時間とを列車ダイヤとして適切に定め、輸送サービスと消費エネルギーとを高い次元でバランスさせる方法論を確立する。本システムのようにエネルギー供給に制限を伴う場合、車両性能とダイヤの統合的設定法が必要となる。究極的には、給電以外の性能、例えば起動加速度等の車両性能の望ましい設定をも明らかにする。

(2)非接触給電システムの電力変換回路構成と制御方式の検討必要容量に対する適切な電力変換回路方式討

前記検討で得られた、の提案や制御の提案を行う。具体的には、(方式 A)補償用コンデンサ+ダイオード整流回路、(方式 B)2次側PWM整流方式(図2参照)について、位置ずれ時も考慮し各方式毎に有効電力伝送能力および無効電力補償能力の面から適切な方式を明らかにする。さらには具体的な電力制御系の設計法を明らかにする。

(3)地上・車上コイル間のギャップ制御による無効電力の低減法の検討

地上、車上コイルの電磁氣的な結合は、その水平及び鉛直位置によって変化する。本研究における車上コイルは、電気鉄道の応用のため、基本的に左右方向の変位は起こらず、電磁氣的結合の変化に伴う電気回路としての特性の変化、無効電力の調整は、従来電気回路的の制御で行われてきた。一方、車上コイルを可動にすることは、システムの複雑さを増すため実用的技術としての問題は想定されるが、電力伝達の効率・力率良い動作点を狙うために、動的な結合特性の変化に適応し力率・効率の良い伝送を実現する本質的解となりうる。そこで、上記の方法による力率・効率の良い伝送技術への貢献の可能性と、実際の問題点を理論的、実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1)研究の体制

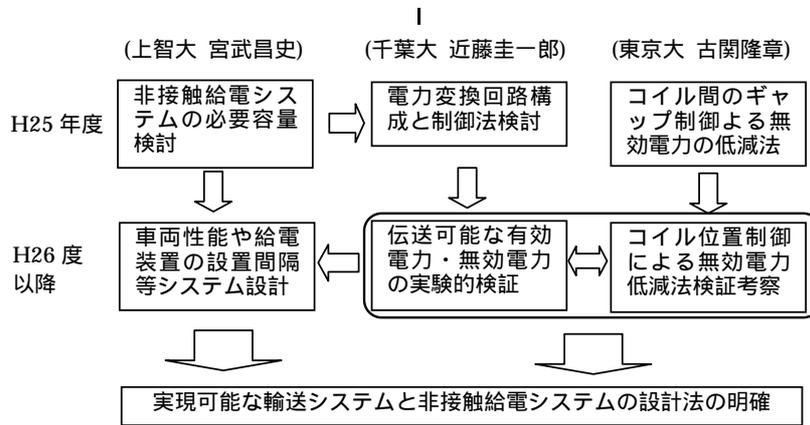


図3 研究体制と各検討項目の関係

研究の体制としては、図3に示すような体制で実施した。各機関間は定期的に会合をもち、進捗の確認と技術的なすり合わせを行い進めた。

(2)具体的な進め方

非接触給電システムの必要容量検討と給電装置設置間隔等システム設計

非接触給電装置想定時の輸送サービス消費エネルギーのトレードオフ関係についても明確化を行った。輸送サービス、即ち利用者の旅行時間を同等に保つと、停車中の給電時間を長く取り給電電流を下げることは損失抑制につながるが、運転時間が短くなって運転に必要なエネルギーが増えてしまう。運転時間と消費エネルギーの関係は、例えば図4のようになることから、運転時間と停車時間を最適に配分し、消費エネルギーを削減できる最適な条件とその効果を明らかにした。

給電装置性能を前提とした実現可能な運転パターンと消費電力量の再評価を行った。具体的には、本システムのようにエネルギー供給にある程度の制限を伴う場合、給電以外の性能である車両性能(起動加速度や最高速度等)と列車ダイヤを統合的に設定する方法を明らかとした。

非接触給電システムの電力変換回路構成と伝送可能な有効電力・無効電力の検証
(方式 A)補償用コンデンサ+ダイオード整流回路、(方式 B)2次側 PWM 整流方式(図2参照)について、概ね 50kW ~ 300kW の範囲で、出力

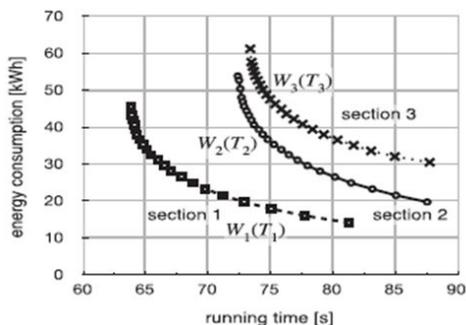


図4 運転時間と消費エネルギーの例

に応じて適切な電力変換回路の仕様を検討し、素子等の動作周波数の限界、および各部の補償電力について検討を行った。

また併せて、制御方式の検討も行った。具体的には、図2の回路の場合であれば、2次コイル電流と電圧を制御して、一定の有効電力をとりつつ、無効電力は適応的に補償する方法等が考えられる。基礎検証をシミュレーションおよび実験等により行う。

また、図2に示すシステムの 1kW クラスの実験システムを用いて、主としてコイル位置ずれ時に増加する無効電力の補償方法と電力変換回路の容量の関係性を明らかにするとともに、その抑制法について検討を実施した。

地上・車上コイル間のギャップ制御による無効電力の低減法の検討

初年度は研究チーム内での議論と文献での関連先行研究の調査、電磁界解析を通じ、非接触給電システムのコイル形状、周波数などの基本設計を行い、対象システムのコイルの鉛直位置の調整が集電特性に与える影響と感度などの物理的な基本特性を、理論的、数値的に明らかにした。併せて、コイルシステム設計とアクチュエータおよびセンサの検討を行い、研究チーム内での議論を通じ具体的検討対象となるコイルシステムの設計をすすめた。それと並行し、車上コイルの位置調整のストローク、周波数帯域など制御系設計の前提となる仕様を具体化し、アクチュエータやセンサ要求仕様の具体化、選定作業を行った。上記の基礎検討に基づき、コイル位置制御の実験装置を設計・製作し、無効電力低減のためのコイル位置制御系に必要な、コイル位置をコイル電流から推定するための方法を明らかとした。

4. 研究成果

(1)ランカーブを考慮した非接触給電システムの必要容量検討

運転時間調整が有効になる給電電力の検討

A 駅から I 駅まで走行する各駅停車列車において、全区間の走行時間は一定に保ったまま、各駅間での運転時間を調整し、列車の消費エネルギーを最適化した場合の結果を

表 1 駅間の運転時間と消費エネルギー

Local	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F	F-G	G-H	H-I	Sum
ΔT [s]	-4	-1	-1	-2	-4	4	0	8	0.00
ΔW [kWh]	1.1	0.5	0.5	1.0	1.2	-2.9	0.0	-5.9	-4.58

表 1 検討した架線レス車両の諸元

Composition	A train of 2 cars
Weight	80.0 [ton]
Speed control	Variable voltage variable frequency control
Type of motor	3 phases induction motor
Braking	Regenerative braking
Voltage of main circuit	633.6 [V]
Capacity of battery	300 [Ah]
Acceleration	2.0 [km/h/s]
Deceleration (Speed holding breaking)	2.0 [km/h/s]
Deceleration (Maximum Breaking)	3.6 [km/h/s]

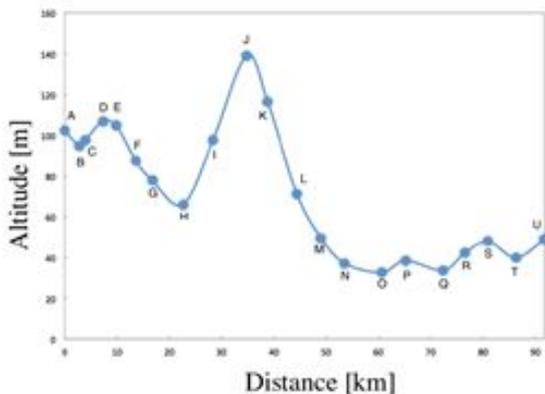


図 5 路線条件

表 1 に示す。ここで T は最適化前のランカーブから最適化のために調整した運転時間(秒)を、 W はその結果として変化した列車の消費エネルギーをそれぞれ示す。表 1 の結果より、1 秒の短縮で 0.5kWh の消費エネルギー削減効果があることがわかる。

給電設備の最適配置による消費エネルギー削減効果

表 1 に諸元を示した架線レス車両を、図 5 に示す路線条件で走行させる前提において、途中駅に 2 か所の充電装置を設置する駅と列車の消費エネルギーの関係について計算を行った。その結果、充電装置は J 駅と P 駅

の「頂上駅」に配置した場合に、省エネルギー効果が最大となり、その削減割合は最も消費エネルギーが大きいケースに比べて 0.2 ~ 0.3% であることがわかった。

(2) 非接触給電システムの電力変換回路構成と制御法検討

電力変換回路方式は、図 2 に示すような、車上側の変換器を自動式とする方式と、図 5 に示すような、ダイオード整流回路と DC チョップ回路を組み合わせた方式の 2 つが考えられる。

本研究では、車上回路がよりシンプルに構成できる、ダイオード整流回路 + DC チョップ回路方式を対象に検討を行った。

この回路方式では、コイルの位置ずれ時に 1 次側からみたインピーダンスが小さくなり、電流、電力とも大きくなってしまう。そこで、DC チョップ回路で整流器出力電圧を制御をすることで、2 次側の電流や電力が過大になることを防止する制御系を考案し、図 6 の概念図に示すような特性を期した。100W クラスのシステムで実証を行った結果、所定の性能が発揮できていることを確認した。

(3) コイル位置制御による無効電力低減法の検証と考察

コイル位置ずれ時には、一次側からみたインダクタンスが変化する。このことを利用して、位置ずれを検出し、コイル位置の補正を行う方法を提案した。この方法では、可動式コイルとして、車両停止位置がずれた場合に補正を行い、無効電力の抑制をはかるものである。

コイル位置をセンサレスで検出するため、図 8 に示す様に、地上・車上のコイルの間隔を不均等に設置する。このとき、F 2 コイルおよび R 2 コイルに誘起される電圧 $V_f\text{-oc}$ および $V_r\text{-oc}$ と車両中心位置と地上コイル間中点との変位 (secondary position) の関係は図 9 のように示されるため図 8 に示すように地上コイルと車上。 $V_f\text{-oc}$ と $V_r\text{-oc}$ の相乗平均を 2 の平方根で除した値を V_b とする 2 次コイルの位置ずれ D_{mm} の関係は図 9 のように求めることができる。このような方法で、コイル位置ずれを検出し、位置補正を行うことが可能となる。

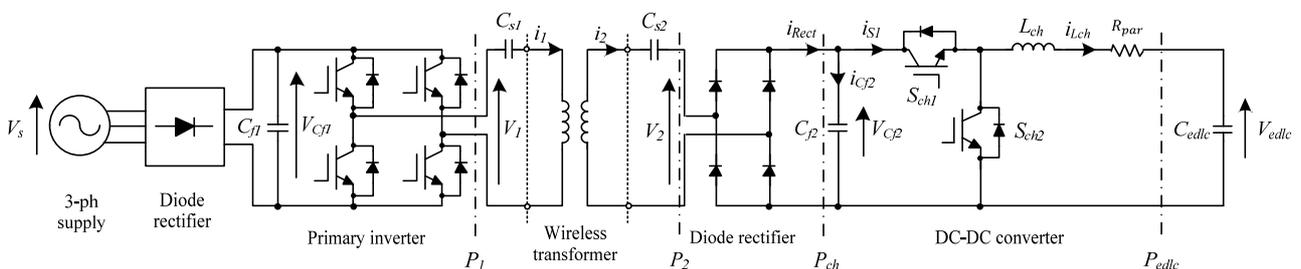


図 6 ダイオード整流器を用いた非接触給電回路構成

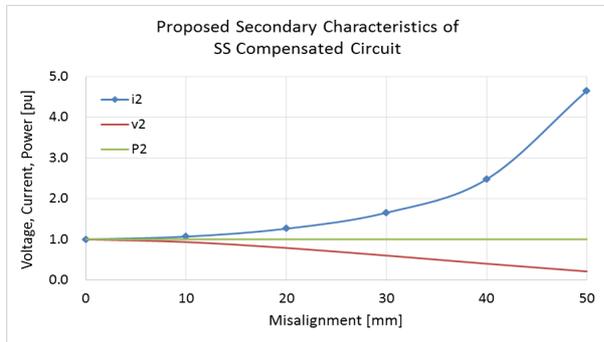


図 7 整流器出力定電圧制御によるコイル位置ずれ時の定電力伝送制御実験結果(概念図)

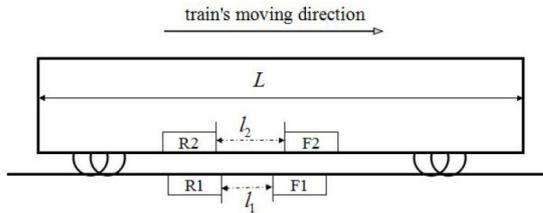


図 8 コイル取り付け位置

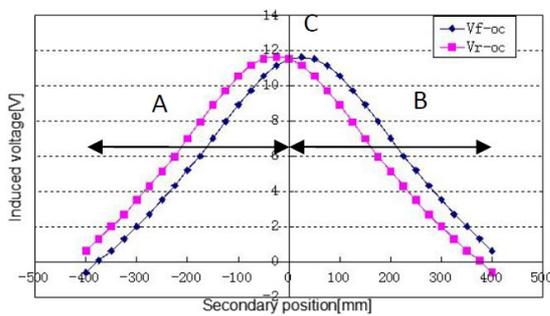


図 9 コイル位置と起電力の実験結果

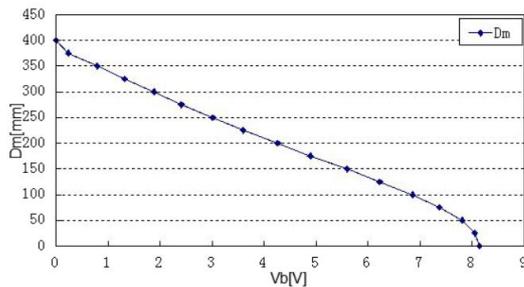


図 10 電圧とコイル変位の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計7件)

1. Febry Pandu Wijaya, Keiichiro Kondo "Charging Power Limitation Method of a Wireless Power Transmission System for Railway Vehicle" Proceedings on the 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Conference(IECON2015), Yokohama, Japan. 2015.11.9-11, Pacifico Yokohama.

2. 野田慶親、宮武昌史, "蓄電池駆動電車における充電設備駅の違いによる消費電力の影響"平成 27 年電気学会産業応用部門大会講演論文集 No.5-42, 2015.09.02-04, 大分県大分市, 大分大学炭田の原キャンパス
3. Singang Luo, Yasuhiro Takada, Takafumi Koseki, Tatsuhito Saito, Febry Pnadu Wijaya, Keiichiro Kondo, "Experimental Velification of Sensorless Coil Position Control System and its Gap Deviation Tolerance Improvement Method in Wireless Power Transmission System of Electrical Trains" 電気学会交通電気鉄道・フィジカルセンサー合同研究会, VT-15-022/TER-15-035, 2015.03.18, 愛知県豊橋市, 豊橋技術科学大学
4. Pinion Pereira, Masafumi Miyatake, "Improved core shape of contactless transformer for LRT system," Proceedings on the 3rd International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship propulsion and Road Vehicles (ESARS2015), 2015.03.03-05, ドイツ, アーヘン
5. Febry Pandu Wijaya, Shogo Shibata, Takuya Shimotsu, Tatsuhito Saito, Keiichiro Kondo, "Basic Study on a Charging Control Method of a Wireless Power Transmission System" 電気学会交通電気鉄道・フィジカルセンサー合同研究会, TER-15-005, PHS-15-005, 2014.03.07, 静岡県浜松市, 時忘れ開華亭会議室
6. 遠藤直人, 宮武昌史, "間欠形給電技術を用いた架線レス LRT の省エネ運行法の検討" 鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2013 講演論文集, pp.307-310, 2013.12.03-05, 東京都渋谷区, 国立オリンピック記念青少年総合センター
7. 松岡秀樹, 古関隆章, "鉄道用電磁誘導式非接触給電装置の位置ずれおよびギャップ長変化による性能変化の評価" 鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2013 講演論文集, pp.317-320, 2013.12.03-05, 東京都渋谷区, 国立オリンピック記念青少年総合センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 圭一郎

(千葉大学・大学院工学研究科・教授)

研究者番号: 10425895

(2) 研究分担者

古関 隆章

(東京大学・大学院工学研究科・教授)

研究者番号: 20211899

宮武 昌史

(上智大学・理工学部・教授)

研究者番号: 30318216