

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18022

研究課題名(和文) 走行中に非接触充電可能な自動搬送車用非接触充電装置の開発

研究課題名(英文) Development of Wireless Power Transfer System Capable of Charging during Operation for Automatic Guided Vehicle.

研究代表者

今給黎 明大 (Akihiro, Imakiire)

九州工業大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：30710264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：提案した非接触給電回路とモータ駆動回路を組み合わせたシステムで、中継コイルの位置を常に一次コイルと二次コイル間の中心位置に制御した場合、中継コイルの共振コンデンサの電圧負担が最大になること、位置ずれが発生して出力電力が低下する場合でも高いシステム効率を維持できること、非接触給電の出力電圧の決定方法として無人搬送車のバッテリー電圧、充電電流をパラメータにしてグラフに表して決定できること、インバータの寄生インダクタンスの合計値を12 nH以下にすることでスイッチング時のリングがほとんど見られなくなり、高速スイッチングによりスイッチング損失を低減できることなどを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Proposed system combined wireless power transfer circuit and motor driving circuit has features as follows. (1) When a repeating coil position is always controlled to center position between primary coil and secondary coil, the voltage burden of resonance capacitor of the repeating coil is maximized. (2) It is possible to maintain high system efficiency even if the output power decreases due to misalignment of coil. (3) A method of decision of output voltage of the wireless power transfer system is represented by a graph using battery voltage and charging current of the automatic guided vehicle as parameters. (4) Designing the total value of the parasitic inductance of inverter to 12 nH less leads to switching waveforms without ringing and large surge voltage. It means high-speed switching realized by reducing the parasitic inductance can reduce the switching loss.

研究分野：電気機器・パワーエレクトロニクス

キーワード：非接触給電 走行中給電 無人搬送車 中継コイル 電流可逆チョッパ SiC 高効率化 電気機器工学

1. 研究開始当初の背景

- (1) 日本では電気自動車用の非接触給電システムが開発されており、工場の生産ラインに用いられる無人搬送車のためのバッテリー充電システムとして、非接触給電が使用され始めていた。
- (2) 研究開始当初の無人搬送車用の非接触給電システムは、無人搬送車が停止時に充電を行っており、生産ラインとして稼働する無人搬送車を停止させることなく充電できるシステムではなかった。また、非接触給電回路と充電対象のモータ駆動回路は個々に検討されており、両者を組み合わせた無人搬送車用に特化したシンプルな非接触給電システムの検討や設計方法に関する提案は行われていなかった。
- (3) 研究代表者は、これまでに一次コイル、中継コイル、二次コイルで構成される無人搬送車用の非接触給電システムについて検討を行ってきた。しかし、二次コイルが一次コイルに対して移動し、位置ずれが生じる場合に出力電力および伝送効率が著しく低下する問題があった。また、システム全体の伝送効率が高くなく、非接触給電システムを構成する各部について高効率化のための改善を行う必要があった。これらの背景と課題を踏まえ、無人搬送車の走行中給電を行うために、非接触給電回路とモータ駆動回路を組み合わせたシンプルな非接触給電システムを提案した。

2. 研究の目的

- (1) 研究代表者が提案した非接触給電回路とモータ駆動回路を組み合わせ、一次コイル、中継コイル、二次コイルで構成される非接触給電システムについて、シミュレーションおよび実験により動作の確認を行うこと。
- (2) 提案した非接触給電システム全体の伝送効率改善のために、非接触給電システムを構成するコイルおよび電力変換器に着目し、システム効率改善の方法と改善効果を明らかにすること。
- (3) 提案したシステムの設計方法について、非接触給電コイルや非接触給電の出力電圧の設計方法を提案すること。

3. 研究の方法

- (1) 提案システムの回路動作のシミュレーション 提案システムに関して非接触給電によってモータを駆動するモードとバッテリーを充電するモードについて、コイルの位置ずれをパラメータにして出力電力および伝送効率の特性をシミュレーションによって調べた。
- (2) 提案システムにおけるコイル設計 非接触給電コイルのフェライトコア形状およびリ

ッツ線で構成される巻線について、伝送効率を向上するための条件をシミュレーションと実験により検討した。

- (3) 他方式との比較 一次コイル、中継コイル、二次コイルで構成された非接触給電システムにおいて中継コイルの位置を一次コイルと二次コイルの中心位置に常に制御する方式と一次コイルと二次コイルで構成され一次側に直列、二次側に並列に共振コンデンサを接続する方式 (SP方式) の違いをシミュレーションおよび実験により比較・検討した。

- (4) 実験システムの試作・評価 ディスクリット (1アーム) のIGBTとSiC-MOSFETをそれぞれ選定し、提案したシステムを試作し、伝送効率を比較・評価した。

- (5) 実験システムの改良・評価 スイッチング波形改善のために寄生インダクタンスが小さいパワーモジュールおよびインバータを試作し、スイッチング波形と電力変換効率を検討した。

- (6) バッテリ電圧が異なる無人搬送車 (12 V, 24 V, 48 V等) に対して、提案システムを適用する場合を想定し、非接触給電の出力電圧を決定する方法をシミュレーションと実験により検討した。

- (7) 一次コイルを複数配置した場合の提案システムのシミュレーション 提案システムで中継コイルの位置を常に一次コイルと二次コイル間の中心位置に制御し、一次コイルを250 mm間隔で複数個配置した場合について、シミュレーションによる検討を行った

4. 研究成果

(1) 主な研究成果

提案システムを実際に試作し、シミュレーション同様に非接触給電によるモータ駆動およびバッテリーの充電が可能であることを確認した。

一次コイル、中継コイル、二次コイルの3つのコイルで構成される非接触給電システムのコイル形状に関し、フェライトコアの形状がフラット形、T形、E形の組み合わせを検討し、T形のフェライトコアを組み合わせると結合係数がわずかに高くなりフェライトコアの使用量も少なく済むことを確認した。ただし、走行中給電のように二次コイルが移動し、一次コイルに対して位置ずれを生じる場合はフェライトコアの形状に依存して出力電力と伝送効率も低下するため、この場合はフラット形のフェライトコアを用いる方が望ましい。

高周波におけるコイル効率向上のため、素線径が異なるリッツ線を用いたコイルを複数試作し、周波数25 kHzにおいて素線径が0.05 mm以下の場合にコイル効率が90%以上になることを実験により確認した。また、コイル

効率の等価回路式を導出し、コイル効率の計算結果と実験結果がほぼ一致することを確認した。

同じ外形で定格電圧、定格電流がほぼ同じとなるディスクリット（1アーム）のIGBTとSiC-MOSFETを選定し、IGBTで構成される提案システムとSiC-MOSFETで構成される提案システムについて、システム全体の伝送効率を比較した。SiC-MOSFET適用によるシステム全体の伝送効率の改善効果として3%以上期待でき、周波数が増加するほど顕著になることを明らかにした。ただし、試作したインバータの寄生インダクタンスが原因となってSiC-MOSFETのスイッチング波形にはリングング（振動）が生じており、スイッチング損失の増加の要因となっていた。

で挙げたインバータの寄生インダクタンスの課題に対して、寄生インダクタンスが小さいSiCパワーモジュール（1レグ）およびインバータを試作し、パワーモジュールと平滑用コンデンサとバスバーを含めた寄生インダクタンスの合計値を12 nH以下にすることで、スイッチング時のリングングがほとんど見られないこと、サージ電圧を低減できるため高速スイッチングによりスイッチング損失を低減できることを明らかにした。

提案システムを設計する上での非接触給電の最大出力電圧の決定方法として、バッテリー電流制御可能な非接触給電システムの出力電圧範囲を、無人搬送車のバッテリー電圧、充電電流をパラメータとしてグラフに表して決定する方法を提案した。

提案システムで中継コイルの位置を常に一次コイルと二次コイル間の中心位置に制御する場合、出力電力、伝送効率が位置ずれに対して強く、位置ずれに対してほぼ一定の特性となることを確認した。特徴として、一次コイルと中継コイルに設けられた共振コンデンサの電圧負担に関して、中継コイルの共振コンデンサの電圧負担が最大になること。位置ずれが発生して出力電力が低下する場合においても、コイル効率は高いため、高いシステム効率を維持できることが挙げられる。なお、二次コイルにも共振コンデンサを追加した場合、一次コイルと二次コイルで構成し一次コイルに直列、二次コイルに並列に共振コンデンサを備える方式（SP方式）の特性とほぼ同じになる。このとき二次コイルに追加した共振コンデンサ容量の増加に伴い徐々に特性がSP方式に近づいていく。

提案システムで中継コイルの位置を常に一次コイルと二次コイル間の中心位置に制御し、一次コイルを250 mmの間隔で複数個配置した場合について、シミュレーションによる検討を行った。シミュレーション結果より、一次コイルを直列接続することで一次コイ

ルを設置する全区間で、連続的に高効率で一定の電力伝送が可能であることを明らかにした。ただし、一次コイルの電流が増加するために一次コイルは並列接続することはできない。一方、他機関で検討されている中継コイルを固定する方式は、一次コイルを設置する全区間で連続的な電力伝送はできないが一次コイルを並列接続できることを確認した。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけ

中継コイルを用いた様々な非接触給電の回路方式は検討されているものの、提案システムの回路構成で中継コイルの位置を常に制御する方式に関して、コイル形状、寄生インダクタンスを低減したインバータ構成、システム電圧の設計法まで考慮した同様の研究は、現在のところ、国内外において行われておらず、得られた成果は有効な知見である。

(3) 今後の展望

提案システムの簡素化とシステム全体の高効率化を進めるためには、中継コイルの位置を制御する方法について、さらに検討を行う必要がある。また、今回提案した非接触給電システムで得られた知見は、バッテリーを電源とする無人搬送車だけでなく、バッテリーに対して寿命が長く、大電流での急速充放電が可能な電気二重層キャパシタを電源とする無人搬送車への応用も期待できる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計12件）

Akihiro Imakiire, Hideaki Tokunaga, Akihiro Kawagoe, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Simulation of Electrical Characteristics for Misalignment of Coil in Wireless Power Transfer System Using Repeating Coil, Proceedings of the 6th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2018, pp. 81-88, 2018, 査読あり

川越彬央、徳永英明、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、種々の中継コイル方式を用いた走行中非接触給電システムの比較、平成30年電気学会全国大会講演論文集、4巻、pp. 223-224、2018、査読なし

徳永英明、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、中継コイルを用いた非接触給電における共振方法の解析、平成29年電気学会産業応用部門大会講演論文集、pp. 453~454、2017、査読なし

Akihiro Imakiire, Masayuki Hikita, Kichiro Yamamoto, Proposal of PM Motor Driving System Consist of PWM Inverter with

Voltage Booster for Applying to Automated Guided Vehicle, 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 2052-2057, 2018, 査読あり

田邊隼翔、徳永英明、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、センタータップを用いた中継コイル付非接触給電の等価回路方程式によるコイル効率計算値と実験値の比較、平成 28 年電気学会産業応用部門大会講演論文集、p. Y-18、2016、査読なし

徳永英明、田邊隼翔、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、無人搬送車用非接触給電システムにおける直流リンク電圧がバッテリー電流制御時に与える影響、平成 28 年電気学会産業応用部門大会講演論文集、p. Y-22、2016、査読なし

Hideaki Tokunaga, Hayato Tanabe, Akihiro Imakiire, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Experimental Verification of Operation and Method of Decision of Maximum DC Link Voltage in Wireless Power Transfer System, 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp. 797-800, 2016, 査読あり

徳永英明、田邊隼翔、小島隆寛、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、非接触給電システムによる 750 W 級誘導電動機の駆動、平成 28 年電気学会全国大会講演論文集、4 巻、p. 290、2016、査読なし

田邊隼翔、小島隆寛、徳永英明、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、SiC パワーデバイス適用による非接触給電システムの効率改善、平成 28 年電気学会全国大会講演論文集、4 巻、p. 289、2016、査読なし

田邊隼翔、小島隆寛、今給黎明大、小迫雅裕、匹田政幸、SiC パワーモジュール適用による無人搬送車駆動用インバータの効率改善、平成 27 年電気学会産業応用部門大会講演論文集、Y-52、2015、査読なし

Takahiro Kojima, Hayato Tanabe, Akihiro Imakiire, Kiyotaka Fuji, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Yutaka Imoto, Keiichi Honda, Characterization of Contactless Power Transfer System and Investigation of Core Shape for AGV Application, 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. 703-706, 2015, 査読あり

Hayato Tanabe, Takahiro Kojima, Akihiro Imakiire, Kiyotaka Fuji, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Comparison Performance of Si-IGBT and SiC-MOSFET Used for High Efficiency Inverter of Contactless Power Transfer System, 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. 707-710, 2015, 査読あり

〔学会発表〕(計 12 件)

Akihiro Imakiire, Simulation of Electrical Characteristics for Misalignment of Coil in Wireless Power Transfer System Using Repeating Coil, The 6th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2018, March 28, 2018, Tiruru (Okinawa Gender Equality Center), Okinawa, Japan

今給黎明大(代表のみ)、種々の中継コイル方式を用いた走行中非接触給電システムの比較、平成 29 年電気学会産業応用部門大会、2018 年 3 月 16 日、九州大学伊都キャンパス

今給黎明大(代表のみ)、中継コイルを用いた非接触給電における共振方法の解析、平成 29 年電気学会産業応用部門大会、2017 年 8 月 31 日、函館アリーナ

Akihiro Imakiire, Proposal of PM Motor Driving System Consist of PWM Inverter with Voltage Booster for Applying to Automated Guided Vehicle, 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), October 28, 2015, Pattaya, Thailand

今給黎明大(代表のみ)、センタータップを用いた中継コイル付非接触給電の等価回路方程式によるコイル効率計算値と実験値の比較、平成 28 年電気学会産業応用部門大会、2018 年 8 月 30 日、群馬大学荒牧キャンパス

今給黎明大(代表のみ)、無人搬送車用非接触給電システムにおける直流リンク電圧がバッテリー電流制御時に与える影響、平成 28 年電気学会産業応用部門大会、2018 年 8 月 30 日、群馬大学荒牧キャンパス

Akihiro Imakiire, Experimental Verification of Operation and Method of Decision of Maximum DC Link Voltage in Wireless Power Transfer System, 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), November 23, 2016, Marina Bay Sands, Singapore

今給黎明大(代表のみ)、非接触給電システムによる 750 W 級誘導電動機の駆動、平成 28 年電気学会全国大会、2018 年 3 月 18 日、東北大学川内北キャンパス

今給黎明大(代表のみ)、SiC パワーデバイス適用による非接触給電システムの効率改善、平成 28 年電気学会全国大会、2018 年 3 月 18 日、東北大学川内北キャンパス
今給黎明大(代表のみ)、SiC パワーモジュール適用による無人搬送車駆動用インバータの効率改善、平成 27 年電気学会産業応用部門大会、2015 年 9 月 2 日、大分大学旦野原キャンパス

Akihiro Imakiire, Characterization of Contactless Power Transfer System and

Investigation of Core Shape for AGV Application, 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, June 11, 2015, Hilton Sydney Hotel, Sydney, Australia

Akihiro Imakiire, Comparison Performance of Si-IGBT and SiC-MOSFET Used for High Efficiency Inverter of Contactless Power Transfer System, 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, June 11, 2015, Hilton Sydney Hotel, Sydney, Australia

〔その他〕

今給黎明大、無人搬送車用走行中ワイヤレス給電に関する研究（招待講演）、キャパシタフォーラム九州、2017年10月20日、FIT セミナーハウス、大分

6．研究組織

(1)研究代表者

今給黎 明大（IMAKI IRE AKIHIRO）
九州工業大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：30710264

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし