

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14137

研究課題名（和文）磁界共振結合型ワイヤレス電力伝送と可変磁力磁石を組み合わせた新たな駆動システム

研究課題名（英文）Drive system combined with variable magnetic force magnet and magnetic resonance coupled wireless power transfer

研究代表者

清水 修 (Shimizu, Osamu)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任講師

研究者番号：90606287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：モータの高トルク・低回転数、低トルク・高回転数領域双方での駆動高効率の向上にはロータの磁束を可変にすることが有効である。そこで、本研究ではロータ部に配置している可変磁束磁石の磁化コイルに非接触で電力を送り可変磁束磁石の磁力を変化させる駆動システムの基礎検討及び試作と評価を行った。原理検証として、ロータを模擬したC型増磁器と可変磁束磁石を用いた電力伝送による増減磁の検証を行っている。さらにロータに可変磁束磁石と磁化コイル、電力伝送システムを備えたモータの試作を行い、増減磁によるモータ特性の変化を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではモータの高トルク・低回転数、低トルク・高回転数領域双方での駆動高効率の向上を可能にする、可変磁力磁石と界磁巻線、さらにワイヤレス電力伝送を組み合わせた今までにないモータを提案し、実証することにより、当該システムの持つ利点や課題を明らかにした。また学術的には周波数制御によって過渡的にMOSFETに流れる大電流を抑制しつつ、定常的に負荷に流れる電流を増大することができることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Variable magnetic flux rotor is effective in improving the drive efficiency of motors in both the high-torque/low-speed and low-torque/high-speed areas. Therefore, I conducted a basic study, prototyping, and evaluation of a drive system that changes the magnetic force of the variable flux magnets by wireless power transfer to the exciting coils of the variable flux magnets located in the rotor. For verification of the principle, the increase/decrease of magnet flux by power transmission using a C shape core that simulates a rotor and a variable flux magnet is verified. Moreover, a prototype motor equipped with a variable flux magnet, a magnetizing coil, and a wireless power transmission system was implemented for the rotor, and changes in motor characteristics due to magnetization increase/decrease were verified on the motor bench.

研究分野：電気自動車

キーワード：モータ 無線電力伝送 電気自動車 高効率化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素排出量削減のためにモビリティの電動化が進められている。モビリティの電動化を実現するためにはエネルギー効率の向上と移動に係るエネルギーの低減のために小型・軽量化が求められている。自動車用途等、大トルク低回転、小トルク高回転の双方の領域を使用するモータの高効率化には永久磁石の磁束を可変にすることが重要である。高トルク領域の効率向上のために永久磁石の磁束を大きくすると低トルク領域での損失が増え、永久磁石の磁束を小さくすると高トルク領域の効率が悪化するためである。

永久磁石の磁束を可変するために、可変磁力磁石の活用がある。保磁力の低い永久磁石を永久磁石の一部もしくは全部に使用し、ステータ巻線により着磁と脱磁を繰り返すことにより低磁束密度磁石と高磁束密度磁石を使い分ける。しかし、着脱磁のタイミングが磁極位置によることや低保磁力磁石の耐熱性に課題があった。また界磁巻線を可変磁力磁石の代わりに利用する手法も提案されているが、ブラシの耐摩耗性については課題がある。

本研究ではこれらの課題解決のために可変磁力磁石と界磁巻線、さらにワイヤレス電力伝送を組み合わせた今までにないモータ(Wireless Power Transfer Integrated Variable Flux Motor : WVFM)を提案する。ステータを用いらずに磁界を作ることにより、磁極位置によらず着脱磁可能となる。着脱磁のみならず駆動用の界磁巻線としても利用可能であるため、可変磁力磁石の減磁対策や最大トルクの向上も期待できる。さらにワイヤレスになるため従来の界磁巻線のブラシの耐摩耗性も解決可能になる。

2. 研究の目的

本研究の目的はWVFMの原理検証と設計法の構築である。可変磁力磁石を用いることでモータを高効率化できることは既往研究により明らかであるため、ワイヤレス電力伝送による着脱磁と着磁用巻線の界磁巻線としての利用に主眼を置く。ワイヤレス電力伝送による着脱磁では可変磁力磁石としては従来のSm-Co系ではなく、より高磁束密度を実現できる革新的材料のNd-Fe-B系を採用する。

3. 研究の方法

本研究では自動車用モータをターゲットとし、シミュレーションと試作機を用いてWVFMの原理検証を行い、下記の方法にてその有用性を実証する。

ワイヤレス電力伝送システム設計・試作・評価

電磁界解析ソフトウェアを使用し、WVFMの着脱磁に必要な磁界を計算し、ワイヤレス電力伝送する電力を算出する。ワイヤレス電力伝送用コイル設計は応募者が開発したコイル設計アルゴリズムを用いるが、これは定常状態を前提としているため、過渡状態での設計に適用できるように熱容量を考慮できるモデルに改良する。モータの永久磁石は高保磁力磁石と可変磁力磁石で構成し、着脱磁に必要な電力を低減する。ここでは、従来の可変磁力磁石の課題であった着脱磁しやすい磁石の配置、形状についても検討する。また着磁制御についてもシミュレーション上にて検討を進める。

上記検討を基に着磁に必要な電力を送電できるワイヤレス電力伝送システムの設計を行う。位置ずれによる共振ずれは起きないため、完全共振時に効率、出力とも高くできるSeries-Series方式のワイヤレス電力伝送システムとする。送電制御にはFPGA(field-programmable gate array)を用いる。大出力が必要になるため、送電用のインバータのパワーデバイスにはSiC(silicon carbide)を第一候補として考える。同様に整流器もSiCのショットキーバリアダイオードを第一候補とする。着脱磁の際の電圧印加方法の切り替えは送電開始の電流方向と回路の構造にて実現することを前提とし、通信を使用しない方法を検討する。

そして、C型コアを用いて静的な状態での着磁を行うための着磁治具を設計・試作する。コア内部に可変磁力磁石と高保磁力磁石を配置する。可変磁力磁石の動作点は想定するモータと同等になるように設計を行い、上記ワイヤレス電力伝送システムによる着脱時を1年目の目標とする。

WVFMの試作と評価

WVFMの試作を行う。用途としての想定は自動車駆動用モータであるが、ここでは縦横高さそれぞれ1/2スケールにした容積1/8スケールモデルでの検証とし、現有設備での評価が可能な出力とする。原理検証と設計法の構築が目的であるため、本研究の目的は達成可能である。また可変磁力磁石の脱磁時の速度起電力定数は着磁時の50%となるように目標を設定する。これは自動車で常用する速度が最高速度の半分程度であるためである。速度起電力を電源電圧に近づけることでインバータのスイッチング損失を下げることができ、駆動に係る損失を低減できる。モータでの静的な状態での着脱磁を確認した後、WVFMが所望の性能を持つことを確認する。

4. 研究成果

本研究では、電磁界解析に基づいた WFM の設計を行った。また原理検証としてモータの代わりに C 型コアを用いた WPT を用いた着脱時を行った。さらに WFM の試作を行い、ベンチでの評価も行っている。

C 型コアを用いた評価

C 型コアを用いた着減磁の可否を確認した。C 型コアが搭載を想定するモータと同様の電流で増磁できるものとするために、C 型コアでの増磁電流とモータに必要な増磁電流は電磁界解析で求めた上で、C 型コアを設計した。C 型コアの構成を図.1 に示す。モータと同様に可変磁束磁石と永久磁石を組み合わせた構造となっている。ここでは C 型コアのギャップ磁束密度を増減磁の評価指標として使用する。

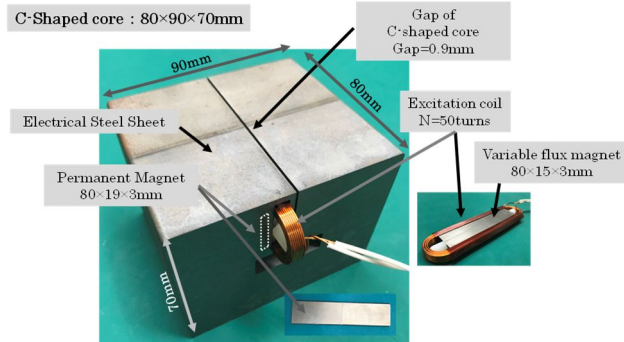


図1 増減磁実験に用いた C 型コア

そして本研究において開発した WPT システムについて述べる。本システムの要求仕様は、入力電圧 300V において負荷である磁化コイルに 120A 以上の電流を短時間で供給することである。今回開発した WPT システムの回路構成を図.2 に示す。本システムは、送電側と受電側に分かれ、送電側は、インバータ部、パルス発生部と送電コイルで構成され、受電側は受電コイルと整流部で構成される。送電コイルおよび受電コイルユニットは双方ともコイルと共振コンデンサを直列に接続した Series-Series 方式である。送電コイルおよび受電コイルの主要諸元を、表.1 に示す。

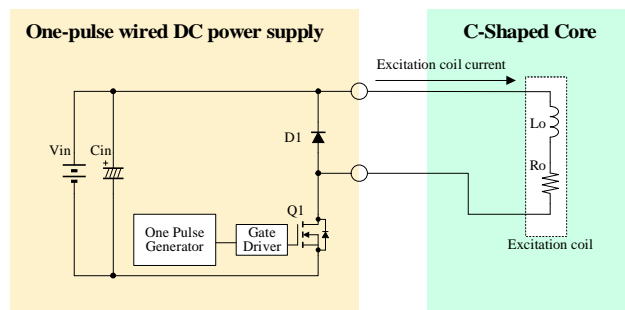
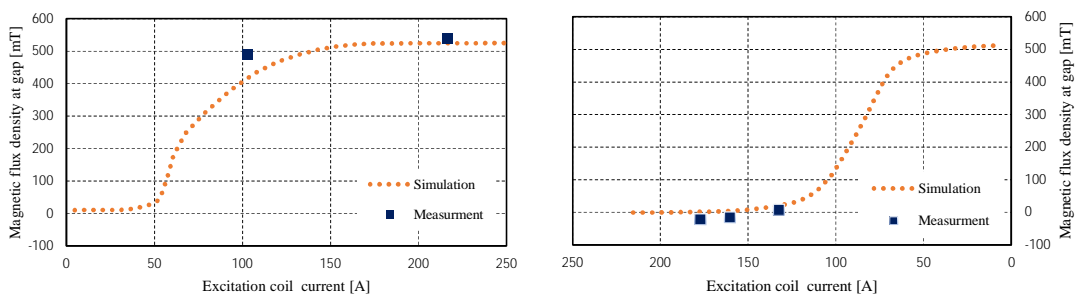


図2 WPT システム構成

受電側の整流部はダイオードによる全波整流回路で構成している。ここでは短い時間で磁化コイルに 120A 以上の電流を流すことが求められるので、平滑する必



(a) Magnetization

(b) Demagnetization

図3 Magnetic flux density

要はなく、平滑コンデンサは設けていない。送電側のインバータは、送電コイルに矩形波電圧を供給するための回路であり、フルブリッジ回路で構成した。瞬時に大電力を供給するため、スイッチ素子には、大電流が流れ、大きなノイズが発生しやすい。ノイズによる誤動作を防止することが重要となってくる。ここでは、誤動作防止対策のひとつとして、各 MOSFET のドレインとソース間にコンデンサを接続して、オフ時の電圧変動を小さくしている。

送電側のパルス発生部は、インバータ部のフルブリッジ部の各スイッチ素子の駆動信号を生成している。駆動信号は、周波数 85kHz で 8 パルスを出力することを基本としている。フルブリッジ回路での High-side および Low-side の MOSFET が同時にオンして貫通電流が発生することを防止するため駆動信号にはデッドタイムを設けている。それ以外に、パルスの High 出力時間をパルスごとに徐々に大きくするように工夫を加えている。周波数が高いと磁化コイルに供給する電流が小さくなり、一方、周波数を低くするとソフトスイッチングができなくなり、大きな電流が流れる。

電流実測値は、目標値の 120A の供給に成功している。実測値は解析値と比較すると磁化コイル 50A 付近で実測値の上昇傾きが小さくなっている。これは、自己インダクタンスの変化のためと考えられる。

次に減磁方向に WIHPT で磁化コイルに供給した電流の実測値と解析値を Fig.16 に示す．ここでの入力電圧は 250V で評価した．実測値は解析値とほぼ同じ傾きで磁化コイル電流が上昇しており，目標の 120A を達成している．

WVFM の評価

WVFM の評価として起電力の確認を行った。磁界解析により、増磁状態の起電力の振幅を 100%とした場合に減磁状態で振幅が 50%になることを想定していたが、それに対して大きな減磁ができていたことが分かった。より少ないエネルギーで着磁と減磁ができるため、システムとして想定より良い方向であるが、今後は解析と実測の差異について検証を進める。

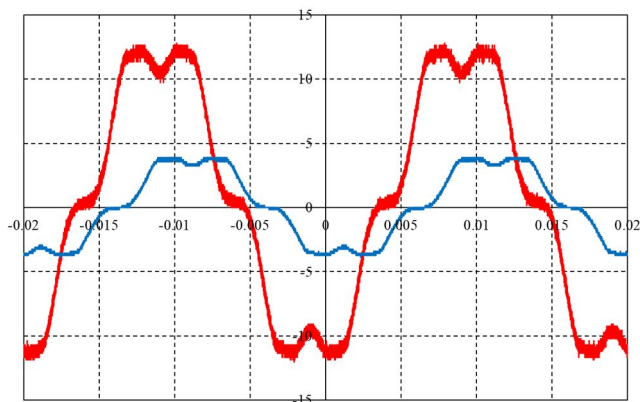


図 4 起電力波形(赤：増磁 青：減磁)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水 修
2. 発表標題 高効率モータを実現する無線電力伝送と可変磁束磁石を活用したシステムの基礎検討
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換技術委員会
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------