

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：32619

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14724

研究課題名（和文）磁気ギアと高速モータを用いたEV用インホイールモータシステムの構築

研究課題名（英文）In-Wheel Motor System of Multiple High Speed Motors Integrated with Magnetic Gear for Electric Vehicle

研究代表者

相曾 浩平 (Aiso, Kohei)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60844206

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、EV用モータシステムの小型軽量化と高効率化のために、磁気ギア（Magnetic Multiple Spur Gear:MMSG）と複数台の高速モータを一体化したインホイールモータシステムを提案した。研究成果として、MMSGを用いた駆動システムは42,000rpmまでの高速領域において、ギア効率90%以上、ギアトルク密度158kNm/m³が得られることを実機実験により明らかにした。これにより、これまで成し得なかった磁気ギアの高速化、高効率化、高トルク密度化を達成した。また、複数台の高速モータを簡単かつ安価なシステムにより高効率に駆動するための制御方法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気ギアは非接触での動力伝達が可能であり、メンテナンスフリー、低振動、低騒音、伝達効率が高い利点がある。しかし、従来の磁気ギアの多くは動作原理が磁束変調方式に基づいているため、高速回転時には高調波磁束に起因した損失増大や入力ロータの機械強度の課題があり、自動車のように入力モータの回転速度が10,000rpm以上の用途に適用することは困難であった。本研究により新しい磁気ギア(MMSG)が提案され、実機実験により高速駆動、高トルク密度、高効率が達成されたことは、磁気ギアの高速化に向けた有用な成果であり、EV用モータシステムの小型軽量化と高効率化に貢献できる成果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, an in-wheel motor system integrating magnetic multiple spur gears (MMSG) and multiple high-speed motors was proposed to reduce the size and weight of motor systems and to achieve higher efficiency for electric vehicles. As a result of the research, it was clarified through experiments that prototype machine can achieve the gear efficiency of more than 90 % and the gear torque density of 158 kNm/m³ in the high-speed range up to 42,000 rpm. This achievement shows that magnetic gears can achieve high speed drive, high efficiency, and high torque density. In addition, a control method for driving multiple high-speed motors with high efficiency by a simple and inexpensive system was clarified.

研究分野：電力工学関連

キーワード：磁気ギア 高速モータ 電気自動車

1. 研究開始当初の背景

産業界ではモータシステムの小型軽量化と高効率化が要求されており、高速モータとギアを組み合わせた駆動システムの開発が進められている。モータを高速化することで高出力密度を満たし、所望のトルクと回転速度はギアを用いて得ることでシステム全体を小型軽量化できる。しかしながら、現在多く用いられている機械式ギアは歯同士の接触により動力を伝達するため高速回転時には歯の機械的疲労や磨耗から伝達効率の低下、振動及び騒音の増大といった問題が生じる。これらの問題に対し、磁気ギアは永久磁石の磁力を利用することで入力ロータと出力ロータの磁石極対数の比でギア比を得ることができ、非接触の動力伝達を可能とするため低振動・低騒音、潤滑油が不要であることから保守性が高い特徴を有している。一方で、これまで先行研究で検討されてきた磁気ギアは高速回転時には入力ロータの磁石部分に高い応力が生じるため機械強度が低いことに加え、入力ロータの磁束を固定鉄片により磁束変調して出力ロータに伝達する動作原理から高調波磁束が多く発生し、コア損と磁石渦電流損が増大する課題があった。そのため、磁気ギアは低速度領域(3,000rpm 以下)の用途に用いられる場合が多く、自動車のように入力モータの回転速度が 10,000rpm 以上の用途に適用することは困難であった。そこで本研究では、磁気ギアの高速化に向けた課題に対して、高速領域で駆動可能な磁気ギア(Magnetic Multiple Spur Gear: MMSG)を提案することにより、高速モータと磁気ギアを一体化したモータシステムを構築することで小型軽量化かつ高効率化、さらにはギアの摩擦を無くすことによる高付加価値化の実現を目的とする。具体的には電気自動車のホイール内にモータとギアを配置したインホイールモータシステムを対象に、非接触の動力伝達を可能とする磁気ギアと複数の小型・高速モータを一体化したモータシステムにより、小型軽量化と高効率化を達成する。

2. 研究の目的

(1) MMSG 試作機の実験による特性評価

出力 25kW の MMSG システムの実機実験により磁気ギア及びモータの特性評価を行い、提案システムにおいて高速駆動、高効率、高トルク密度が得られることを明らかにする。

(2) 複数の高速モータの高効率制御方法の提案と検証

MMSG を駆動するための複数の高速モータの高効率駆動方法を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)電磁界解析および実機実験により、磁気ギアの伝達トルク、磁気ギア及びモータの効率を評価する。

(2)回路シミュレータ及び実機実験により、複数の高速モータの制御方法を理論構築し、提案制御の効果を検証する。

4. 研究成果

本研究では、磁気ギア(MMSG)と複数の小型・高速モータを一体化した駆動システムを提案した(図 1)。提案する MMSG は、一つの出力ロータと複数の入力ロータから構成されており、全ての入力ロータに小型・高速モータが取り付けられている。MMSG は以下の利点を有している。①入力ロータを複数に分散することで一つあたりの入力ロータ径を小さく設計できるのでロータに生じる遠心力が低減され、高速回転に有利な構造となる。②固定鉄片を用いずに、入力ロータの磁束が直接的に出力ロータに伝達されるため高調波磁束の発生が少なく、高速回転時の損失を低減できる。

(1) MMSG 試作機の実験による特性評価

最高出力 25kW の MMSG と複数モータの実験機(図 2)についてギアの最大伝達トルク、ギア効率、モータ効率、システム効率の測定を行った。測定条件として、MMSG をモータ 15 台により駆動し、回転速度 21,000rpm、負荷 120Nm(負荷率 75%)の駆動範囲において効率マップを取得した。モータには市販のラジコン飛行機用ブラシレスモータとインバータを使用した。図 3 に磁気ギアの最大伝達トルクを示す。図 3 より、磁気ギアの最大伝達トルクの測

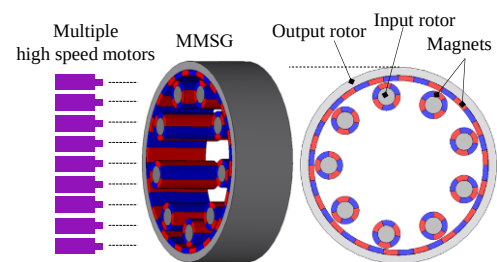


図 1 MMSG と複数の小型・高速モータを用いた駆動システム

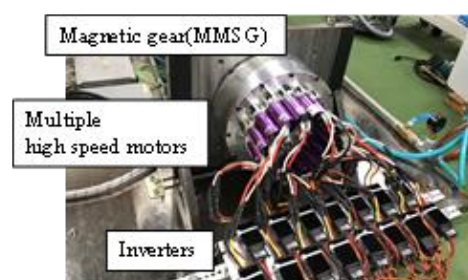


図 2 MMSG の実験機

定値は 158Nm となり、 158 kNm/m^3 の高トルク密度が得られることがわかる。図 4、図 5、図 6 にギア効率、モータ効率、システム効率の測定結果を示す。図 4 より、高速領域においてもギアの損失増加の影響は小さく、95%以上の高効率が得られることがわかる。図 5、図 6 より、システム効率は低負荷・高速領域において 85%~90%の効率が得られたが、高負荷・低速領域ではモータの損失が増大するためシステム効率が低下する傾向となった。したがって、モータの効率向上やギア比の調節によりモータを高効率範囲で動作させることでシステム効率が改善できると考えられる。また、最高出力 25kW 、回転速度 $42,000\text{ rpm}$ までの駆動範囲においてギア効率とシステム効率を測定した。図 7 より、 $42,000\text{ rpm}$ までの駆動範囲においてギア効率 95%以上、システム効率 85%以上が得られることが確認された。実機実験により、提案機が $42,000\text{ rpm}$ までの高速駆動が可能であり、高速領域において 90%以上の高効率が得られたことは、磁気ギアの高速化に向けた重要な成果と言える。以上の研究成果について文献[1][2][3]に示す国際学会で研究発表した。

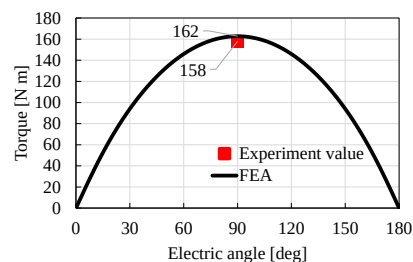


図 3 磁気ギアの最大伝達トル

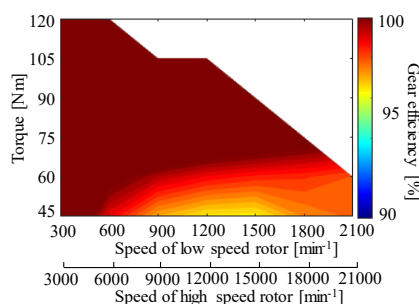


図 4 磁気ギアの効率

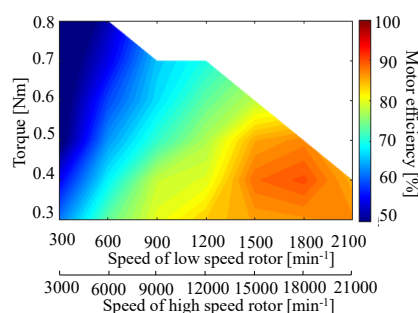


図 5 モータ効率

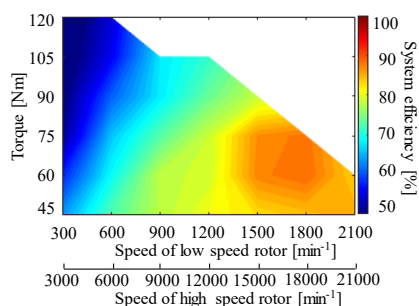


図 6 システム効率(モータ+ギア)

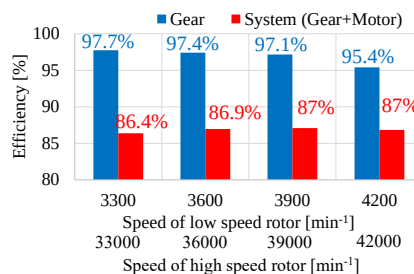


図 7 出力 25kW のギア効率、システム効率

(2) 複数の高速モータの高効率制御方法の提案と検証

複数の高速モータは、図 2 に示すように各モータにインバータが取り付けられ、センサレス 120 度通電で並列運転される。複数の高速モータを並列運転する際にモータのパラメータ(巻線抵抗、インダクタンス、磁石磁束)の個体差により、複数のモータ間でトルクアンバランスが生じ、負荷の偏りがモータの効率低下に影響する問題があった。そこで、複数のモータのトルクアンバランスを補償する制御方法を提案し、その効果を検証した。提案制御ではモータのトルクアンバランスが磁気ギアの各高速ロータと低速ロータ間の負荷角に現れることに着目し、各負荷角を検出・フィードバックして全ての負荷角が一定となるようモータを制御することでモータ間のトルクアンバランスが補償できることを明らかにした。以上の研究成果について文献[4]に示す国際学会で研究発表した。

【文献】

- [1] K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama, “Motor Drive System Integrated Magnetic Gear and Multiple High Speed Motors for Electric Vehicle”, 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 2020.
- [2] K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama, “Characteristics Evaluation of Magnetic Multiple Spur Gear for High Speed Motor Drive System”, *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, October 2021.
- [3] K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama, “A Novel In-Wheel Motor Drive System of Multiple High-Speed Motors Integrated with Magnetic Gear for Electric Vehicle”, IPEC-2022, May 2022.
- [4] K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama, “Cooperative Control for Motor Drive System Integrated of Multiple High-Speed Motors and Magnetic gear”, *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, October 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 相曽浩平
2. 発表標題 磁気ギアと複数台の高速モータを用いたEV用インホイールモータシステムの開発
3. 学会等名 TECHNO-FRONTIER 2022 第43回モータ技術シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Aiso
2. 発表標題 A Novel In-Wheel Motor Drive System of Multiple High-Speed Motors Integrated with Magnetic Gear for Electric Vehicle
3. 学会等名 2022 International Power Electronics Conference, IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Aiso, Kan Akatsu, Yasuaki Aoyama
2. 発表標題 Characteristics Evaluation of Magnetic Multiple Spur Gear for High Speed Motor Drive System
3. 学会等名 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Aiso, Kan Akatsu, Yasuaki Aoyama
2. 発表標題 Motor Drive System Integrated Magnetic Gear and Multiple High Speed Motors for Electric Vehicle
3. 学会等名 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Aiso, Kan Akatsu, Yasuaki Aoyama
2. 発表標題 Characteristics Evaluation of Magnetic Multiple Spur Gear for High Speed Motor Drive System
3. 学会等名 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Aiso, Kan Akatsu, Yasuaki Aoyama
2. 発表標題 Cooperative Control for Motor Drive System Integrated of Multiple High-Speed Motors and Magnetic gear
3. 学会等名 2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
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
---------	---------