

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 電気・情報生命工学科
職位または役職	助教
氏名	相曾 浩平

1. 研究題目

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

2. 研究目的

産業界ではモータシステムの小型軽量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、固定鉄片を利用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ことが欠点となり、低速度領域(3000回転/分以下)に駆動範囲が制限されてきた(図 1)。

そこで本研究では、磁気ギアの高速化に向けた問題に着眼し、高速領域で駆動可能な磁気ギア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。

3. 研究内容及び成果

本研究では、複数の小型・高速モータとMagnetic Multiple Spur Gear (MMSG)の駆動システムを提案した(図 2)。提案する MMSG は、一つの入力ロータと複数の出力ロータから構成されており、全ての出力ロータに小型・高速モータが取り付けられている。MMSG は下記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。

本年度の研究成果として、提案する MMSG の 25kW の実験機(図 3)を製作し、(1)最大伝達トルク、(2)複数の入力ロータの同期性、(3)高速領域のギア効率について実験により明らかとした。今回の実験ではモータ 3 台の入力として検証を行った。

(1) 最大伝達トルク

拘束試験より、ギアの最大伝達トルク(脱調トルク)の測定を行った。拘束試験では出力ロータをヒステリシスブレーキによって固定し、入力ロータの磁極位置を手動で変えたときの入力ロータ一つあたりに働く最大伝達トルクを測定した。測定結果として、入力ロータ1つあたりに働く最大伝達トルクは 12.8Nm であり、全ての入力ロータ 15 個に働く最大伝達トルクは 192Nm(=12.8Nm×15)となった(図 4)。以上から MMSG 実機のトルク密度は 191kNm/m³(=192Nm/1.007×10⁻³m³)となり、従来の磁気ギア(約 100kNm/m³前後)に比べて高トルク密度が得られることを明らかにした。

(2) 複数の入力ロータの同期性の検証

MMSG の複数の入力ロータは出力ロータの磁極位置に対して対称に配置されるため、理想的には入力ロータと出力ロータ間に均一の負荷トルクが生じる。よって、モータを並列運転した場合には全ての入力ロータは同期して回転すると考えられる。複数の入力ロータの同期性を検証するため、図 3(b)に示すように3つの入力ロータの内側の空間にホール IC を取り付け電圧信号の測定を行った。測定結果として、3つのホール IC の電圧信号は一致しており、複数の入力ロータは一定の回転速度で同期して回転できることを明らかにした(図 5)。

(3) 高速領域におけるギア効率

負荷 24Nm, 最高回転速度 21000 回転/分までの速度範囲においてギアの効率マップを測定し、広いトルク-速度領域において 90%後半の高効率を得られることを確認した。以上の結果より、MMSG はギャップの高調波磁束が少なく、磁石渦電流損、コア損が低減できることから高速領域の高効率化に有効であることを明らかにした。

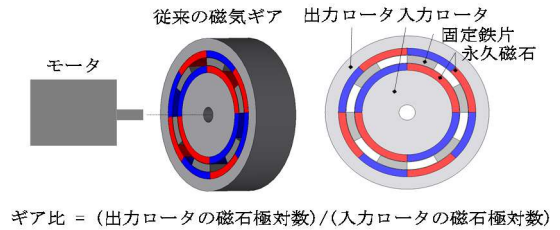


図 1 従来の磁気ギア

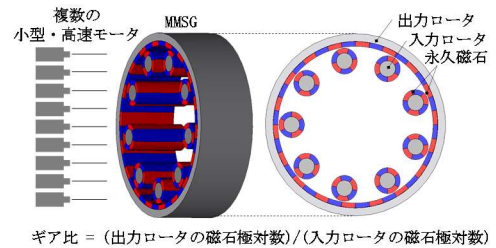
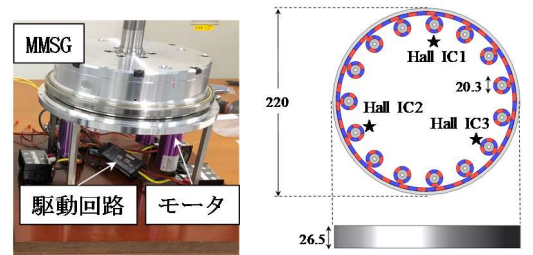


図 2 提案する磁気ギア(MMSG)



(a)MMSG 概観 (b) ホール IC 位置
図 3 MMSG 実験機

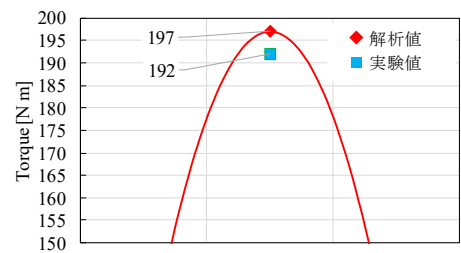


図 4 MMSG の最大伝達トルク

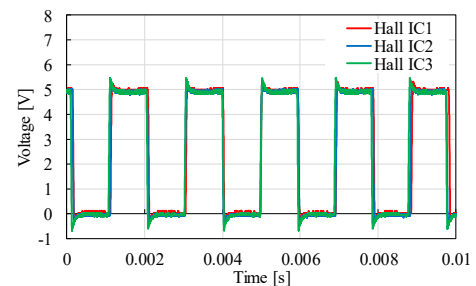


図 5 MMSG の最大伝達トルク

4. 今後の研究の見通し

本研究では最終的に電気自動車のインホイールモータシステムを対象に MMSG と複数の小型・高速モータを一体化したモータシステムを構築することを目標とする(図 6)。

提案システムの実現に向けた今後の研究課題を下記に示す。

(1) 最高出力時のギア特性の評価

MMSG 実験機をモータ 15 台で駆動し、最高出力 25kW, 最高回転速度 50000 回転/分までの動作領域におけるギアの損失及び効率特性を明らかにする。

(2) 複数台のモータの高効率制御方法の検討

(3) 機電一体構造のための冷却方法の検討

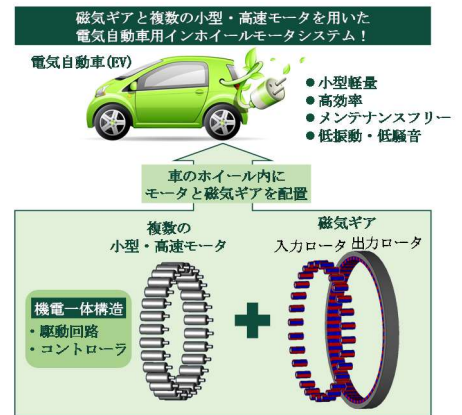


図 6 MMSG と高速モータを用いた EV 用インホイールモータシステム

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

国際学会 (査読付き)

・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.