

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	芝浦工業大学 工学部 電気工学科
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。

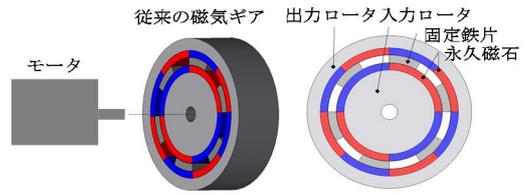
3. 研究内容及び成果

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。

本年度は、表 1 の仕様の MMSG 試作機についてギア効率及びギア損失の測定を行った。測定条件として MMSG をモータ 3 台により駆動し、最高回転速度 21000 回転/分、負荷 24Nm の駆動範囲においてギア効率およびギア損失のマップを取得した。モータには市販のラジコン飛行機用ブラシレスモータを使用した。図 3、図 4 にギア効率及びギア損失の測定結果を示す。図 3、図 4 より、高速領域においても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。これまでの従来の固定鉄片を用いた磁気ギアにおいて 20000 回転/分以上の駆動が可能であり、かつ 90%以上の高効率が得られるものは存在せず、今回の実験結果は磁気ギアの高速化に向けた重要な成果と言える。また、MMSG では負荷が大きくなるほど高出力が得られるため、高効率となる傾向を明らかとした。今後は図 5 に示す実験システムより、モータ 15 台で MMSG を駆動し、ギア効率およびギア損失を測定し、モータ及びインバータを含めたシステム効率を評価する予定である(目標性能:出力 25kW, 最高回転速度 50000 回転/分, ギアの最大伝達効率 95%)。

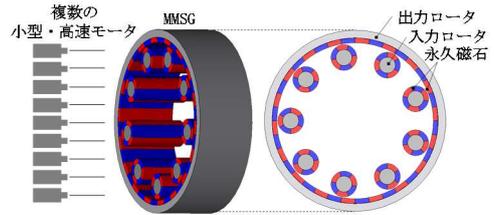
表 1 MMSG 試作機の仕様

Gear diameter [mm]	220
Diameter of high speed rotor[mm]	20.3
Gear stack length [mm]	26.5
Pole pairs of high speed rotor	3
Pole pairs of low speed rotor	30
Number of high speed rotor	15
Gear ratio	1:10
Gear maximum output power [kW]	25
Maximum input motor speed [rpm]	50000



$$\text{ギア比} = (\text{出力ロータの磁石極対数}) / (\text{入力ロータの磁石極対数})$$

図 1 従来の磁気ギア



$$\text{ギア比} = (\text{出力ロータの磁石極対数}) / (\text{入力ロータの磁石極対数})$$

図 2 提案する磁気ギア(MMSG)

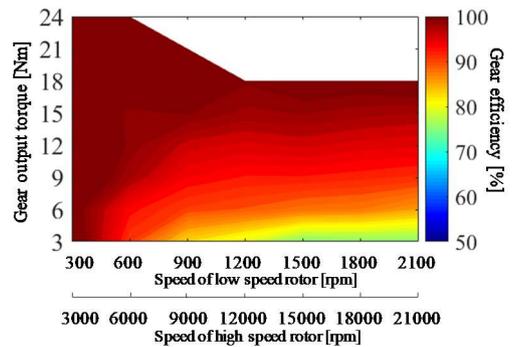


図 3 ギア効率

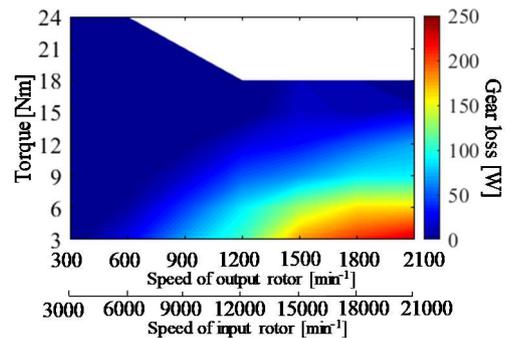


図 4 ギア損失

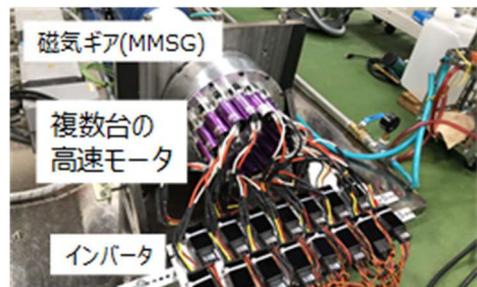


図 5 MMSG の実験システム

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

【国際会議(査読付)】

・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.

・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), Vancouver, Canada, October 2021.

【国内会議(査読なし)】

・相曾浩平, 赤津観, 青山康明, “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”, 2021 年春季大会(自動車技術会), 2021 年 5 月

・相曾浩平, 赤津観, 青山康明, “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”, モータドライブ/回転機/自動車合同研究会(電気学会), 2021 年 6 月