

永久磁石の界面形状最適化およびその配置による同期モータの特性改善技術

名古屋工業大学大学院 工学研究科 工学専攻 准教授
北川 亘

1. テーマ設定の背景

モータは産業用機械や電気自動車などといった多岐にわたる分野において必要不可欠な電気機器である。このモータの中でも、エネルギー効率が良く制御性能の良い永久磁石同期モータが広く用いられるが、コギングトルクと呼ばれるトルク脈動の原因となる成分が発生する。この脈動は、速度制御の精度悪化の原因となり、振動や騒音の問題だけでなく、効率悪化にまで影響する。この脈動対策の既存技術として、磁石に「スキュー」と呼ばれるひねりを加える方法や、磁極数とスロット数を調整する「分数スロット」と呼ばれる方法があるが、平均トルクの減少やトルクに寄与しない推力の発生および高コストなどのデメリットがある。本研究は、磁石界面形状最適化により、平均トルクの減少を抑え、トルクに寄与しない成分を発生させる事なく、低コストにトルク脈動の減少が可能な技術の確立を目標としている。

2. 素形材分野との関連性

本研究は、素形材の成形・加工により、モータの振動騒音抑制、制御性能向上、エネルギー効率などの特性を改善する技術に関連する。具体的には、同期モータに用いられる永久磁石の界面の形状をトルクに寄与しない高調波成分を打ち消すように加工および配置することで、従来手法での平均トルクの減少や無駄な推力の発生などのデメリットを克服できるだけでなく、従来手法より低コストかつトルク密度を上昇させることが可能となる技術である。

3. 研究開発の成果

永久磁石同期モータの中で、主流であるラジアルギャップ形のモータでは、スキュー設計をする

ことに対して背景で述べたようなデメリットがある。従って、本研究では、目的を達成するために、薄型化と高トルク密度を実現できる図1のようなアキシシャルギャップ形のモータに着目した。このアキシシャルギャップモータでは、磁石形状の自由度がラジアルギャップ形より高いため、トルクを維持し、コギングトルクが最小で、ギャップ間磁束が最大になるよう目的関数を取り遺伝的アルゴリズムを用いて磁石形状を求めた。また、ロータの上下の磁石形状を反転させて配置させることができれば、ダブルギャップ構造によりトルクは倍となり、コギングトルクは上下反転配置によって相殺が可能となる¹⁾。図2に解析結果を示す。

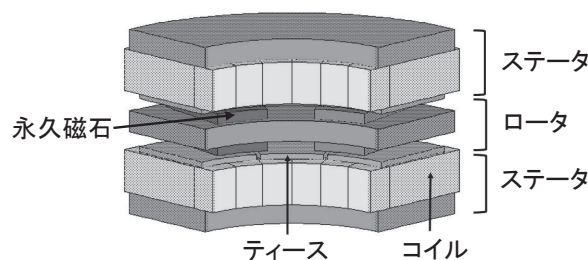
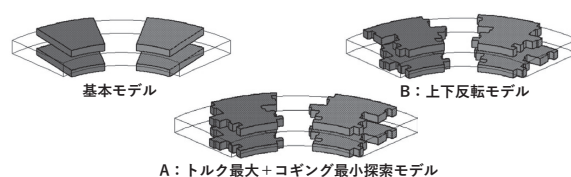


図1 アキシシャルギャップモータ (1/4モデル)



モデル	平均トルク [Nm]	トルクリプル	コギングトルク	鉄損 [W]
基本	2.980	0.824	0.751	101.44
A	2.987 (+0.2%)	0.274 (-66.7%)	0.330 (-56.1%)	101.47 (+0.03%)
B	2.950 (-1.0%)	0.091 (-89.0%)	0.045 (-94.0%)	99.80 (-1.62%)

図2 最適化形状と反転配置による解析結果

4. 訴求点

本研究は、ダブルアキシシャルギャップモータの対称性に着目して、永久磁石の上下反転配置をさせることで高調波次数でのコギングトルクを相殺させることに独創性がある。発想に至った経緯と

しては、図3に示すように、アキシアルギャップモータでのコギングトルク相殺を目的とした解析を行う上で、その相殺条件の理論をまとめてみると、永久磁石の上下反転配置は各高調波成分を相殺できる関係にあった²⁾。アキシアルギャップモータは、ラジアルギャップモータに比べ、扁平形ではあるが、トルク密度を高くできることに優位性があるため、近年、注目されつつあり、今後電気自動車や産業応用機器においても実用化が進められることが予想される。そこでこの技術を適用することによって、従来のラジアルギャップモータで行っていた、デメリットの多いスキューや分数スロット法を取り入れることなく、永久磁石の成形・加工・配置のみで平均トルクの減少を抑え、トルクに寄与しない成分を打ち消し、トルク脈動の減少が可能となる。これは、平均トルク向上とコギングトルク低減のトレードオフを解決する革新的技術であり、新たな理論体系を構築することとなる。また、永久磁石は分割磁石や複雑な界面形状でなくとも、図4の正弦波のような通倍波形状でも、平均トルクをほぼ維持し、コギングトルクを劇的に低減できることがわかった³⁾。これにより、製造コストの3割減かつ実用的に永久磁石を作成でき、簡単にトルク脈動の低減を行うことが可能である。また、申請者が行った予備実験により、ダブルアキシアルギャップモータだけでなくシングルアキシアルギャップモータでも周期境界毎に最適化形状の磁石形状を反転させて配置することを行えば、コギングトルクの周波数分解した高調波次数成分に対して、位相反転した高調波次数成分が加わり、相殺することで、コギングトルクの低減が可能となることが既にわかっており、本技術のモータ設計における貢献度および波及効果は大きい。

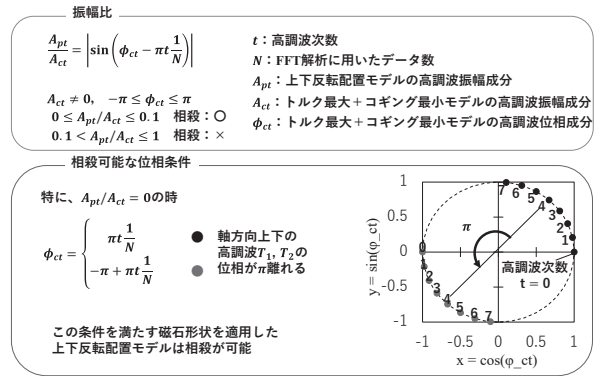


図3 アキシアルギャップモータでのコギングトルク相殺条件

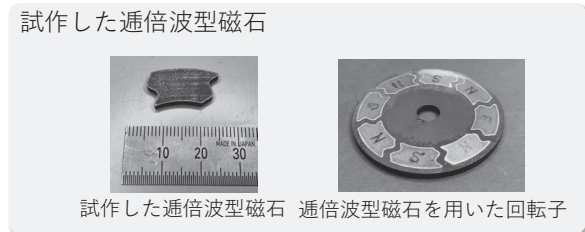


図4 通倍波磁石の製作

参考文献

- 1) D.Sato, W.Kitagawa and T.Takeshita Torque ripple reduction by optimizing magnet shape using GA in axial gap motor International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. Vol.76, No.1-2, pp.171-179 (2024)
- 2) A.Mizuno, W.Kitagawa and T.Takeshita Proceedings of 2024 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference, pp.1-6 (2024)
- 3) 杉田智紀, 朝間淳一, 角貴則, 北川亘 アキシアルギャップ永久磁石モータの分布巻による低トルク脈動化 第33回MAGDAコンファレンス (MAGDA2024) (2024)