

修士学位論文要約（令和4年3月）

クローポール構造を有する回転機に関する研究

栗原 清太

指導教員：中村 健二

A Study of Rotating Machines with Claw-Pole Structure

Seita KURIBARA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

In recent years, the demand for motors has been increasing due to the shift to electric power in various fields. As a result, research and development of new materials is being conducted to replace the electromagnetic steel sheets that have been used for iron cores. Among them, powder magnetic core is attracting attention. Compared to electromagnetic steel sheets, the three-dimensional structure of a magnetic powder core can be created more easily. As an example of a motor whose characteristics have been improved by adopting a three-dimensional structure, there is a motor that has been downsized by adopting a claw pole structure for the stator of a three-phase synchronous motor. In this paper, I report on a finite element method (FEM) study of the improvement in performance and function of a rotating machine using a claw pole structure.

1. はじめに

近年、あらゆる分野で電動化が進められており、モータの需要が増大している。それに伴って、従来鉄心に利用されてきた電磁鋼板に代わる新しい材料の研究開発が行われている。中でも、圧粉磁心に注目が集まっている。圧粉磁心は、絶縁被膜処理した鉄粉を圧縮して成形した磁性材料であり、電磁鋼板に比べて、3次元構造の作成が容易であるという特長を持つ。圧粉磁心を鉄心材料に用いるとモータ構造の自由度が向上することから、3次元構造のモータが注目を集めている。3次元構造を採用することで特性を向上させたモータの一例として、永久磁石同期モータの固定子にクローポール構造を採用することで、小型化を図ったモータがある¹⁾。クローポール構造は、トロイダルコイルを爪状鉄心で挟み込む構造であることから、コイルエンドレスという特長がある。これにより空間を有効活用できるため、大トルク化が見込める。

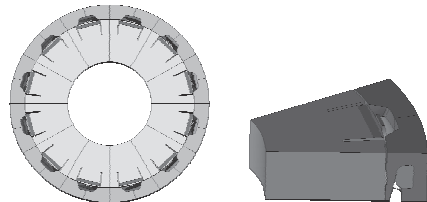
本研究では、クローポール構造によるモータ並びに磁気ギャの性能および機能の向上について、有限要素法(FEM)を用いて検討を行った。

2. クローポール構造を利用したモータのトルク向上

本章では、電動コンプレッサ用モータの固定子にクローポール構造の採用を試みた。設計目標は、トルク7.87 N・m、力率0.9とした。目標トルクを超えるように、クローポール構造の固定子の各部形状・寸法の最適化を行った。設計したクローポールモータの特性を3D-FEMを用いて計算すると、トルクは目標値を超えたが、力率は約0.4と低いことが明らかになった。力率

が低いと、電源容量が過大に必要になり、装置の大型化する。そこで力率改善策について種々検討を行ったところ、1. 磁石厚を増やす、2. 電流を減らす、3. 回転子径を大きくする、4. 固定子ヨークを厚くするが効果的であることが明らかとなった。

図1に、上述の検討結果に基づき最適化したクローポールモータの諸元を示す。3D-FEMを用いてモータ特性を算定したところ、目標トルク時の力率が約0.85となり、力率を改善することができた。しかし、目標とした力率0.9には届かなかった。



Number of pole (stator)	24
Number of pole (magnet)	24
Diameter	124 mm
Stator length	51 mm
Stator core material	ML28D-WDWL 1176MPa
Rotor core material	35JN270
Magnet core material	N50
Rotor speed	6500 rpm
Winding space factor	43%
Gap length	0.5 mm
Amount of magnet	20000 mm ³

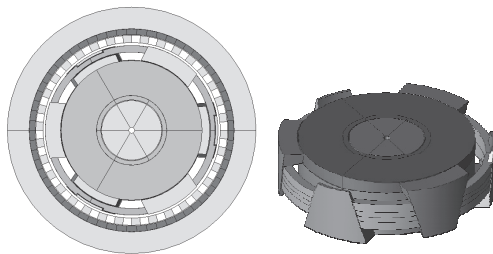
図1 クローポールモータの諸元(最適設計後)

次いで、力率が目標値を達成できなかった原因の解明を行った。具体的には、力率を決める回路パラメータの一つであるコイルインダクタンスに注目した。3D-FEMと簡易磁気回路からクローポール構造と集中巻構造の1相あたりの磁気抵抗を算出すると、クローポール構造は、集中巻に比べて磁気抵抗が小さくなる傾向にあることがわかった。ここで、コイルインダクタンス L は、巻数 N と磁気抵抗 R_m を用いて、 $L = N^2/R_m$ で与えられることから、インダクタンス L が大きくなり、力率が低くなることが明らかとなった。すなわち、低力率はクローポール構造に由来していることが明らかになった。

3. クラッチ機能を有するクローポール型磁気ギヤ

モータと共に利用される機械機構として、ギヤとクラッチが挙げられる。ギヤは2つ以上の歯車で構成され、歯数の比により、増速や減速を行うことができる。一方、クラッチは回転動力を軸の一方から他方に伝えたり、遮断したりすることができる、スイッチのような役割を有する。これらの機構は動力伝達に欠かすことができないが、機械的な接触部を有するため、振動や騒音、摩擦や発熱の問題が指摘される。

そこで本章では、磁束変調型磁気ギヤ²⁾に着目した。磁気ギヤは非接触で動力伝達が行えるため、摩擦や発塵がなく、メンテナンスフリーという特長を持つ。ここでは、本磁気ギヤに一方の回転子にクローポール構造を採用することで、ギヤに加えてクラッチの機能も具備する新しい磁気ギヤについて検討を行った。



Inner magnet pole-pair	3
Stator pole-pair	31
Pole pieces	34
Gear ratio	11.333...
Rotor core material	35H300
Pole-pieces material	EU67
Stator core material	ML28D- WDWL1176MPa
Magnet material	S41EH
Inner rotational speed	3000 rpm
Winding space factor	60%

図2 クローポール構造の内側回転子を有するブラシレス型磁気ギヤ

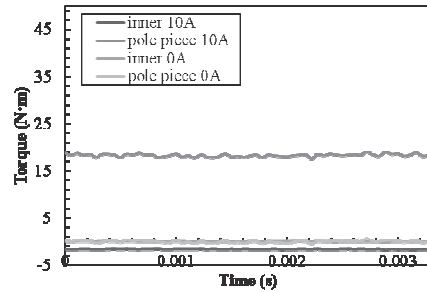


図3 通電時と無通電時のトルク波形

まず始めに、磁気ギヤの外側固定子をクローポール構造に置き換えた場合と、内側回転子をクローポール構造に置き換えた場合について、3D-FEMを用いて伝達トルクを算定した。その結果、外側クローポール構造では12.1 N·m、内側クローポール構造では23.7 N·mとなったことから、内側クローポール構造の方が高トルクになることが明らかとなった。ただし、内側クローポール構造は回転子に巻線が存在することから、ブラシやスリップリングが必要となり、メンテナンスの問題が発生する。そこで、ブラシやスリップリングを必要としない、いわゆるブラシレス構造について検討した。

図2に、考案したブラシレス型磁気ギヤを示す。ブラシレス型磁気ギヤの回転子は、回転しない固定部と、非磁性リングで保持された回転部に分けることができる。固定部と回転部の間には微小なギャップが存在し、回転部は固定部に干渉せずに回転できるように設計されている。コイルは固定部に存在するため、ブラシやスリップリングが不要となる。

図3に、3D-FEMで計算したトルク波形を示す。通電時のトルク波形を見ると、入力と出力のトルク比が1:11.333となっていることが確認でき、磁気ギヤとして動作していることが確認できる。また、無通電時のトルク波形を見ると、入力と出力ともにトルクが0になっていることが確認できる。すなわち、無通電時には動力が遮断されており、クラッチ機能を電氣的に実現できることが明らかとなった。

4. まとめ

以上、本研究では、クローポール構造によるモータ並びに磁気ギヤの性能および機能の向上について、種々の検討を行った。今後は、実機検証による詳細な検討が必要であると考えられる。

文献

- 1) 榎本, 床井, 小林, 天野, 石原, 安部: “高密度圧粉磁心を適用したクローティースモータの開発”, 電学論 D, 129 巻 10 号, pp. 1004-1010 (2009).
- 2) T. B. Martin, Jr.: “Magnetic transmission”, U.S. Patent 3378710 (1968).