

高性能フェライト磁石モータの開発

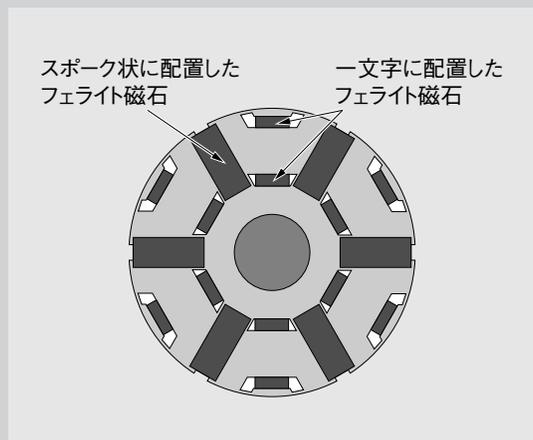
🔊 モータ, フェライト磁石, スポーク

- * 太田 智 Satoru Ota
- * 松橋大器 Daiki Matsushashi
- * 沖津隆志 Takashi Okitsu
- * 松尾圭祐 Keisuke Matsuo

概要

希土類磁石はモータの小形・高効率化に必要な部品であるが、近年のレアアース材料の価格高騰や供給不安を背景に、省・脱レアアースモータの研究開発が盛んに行われている。

当社は省レアアースモータの候補の一つとして、比較的安価で安定供給が可能なフェライト磁石を用いた埋め込み磁石同期電動機（IPMモータ：Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）を開発している。今回、フェライト磁石をスポーク状に配置しつつリラクタンストルクを有効に活用できる磁石配置のIPMモータを開発し、磁界解析及び試作評価を行って、従来の希土類磁石を用いたIPMSMと同じ体格・質量で同等のトルク特性が得られることを確認した。



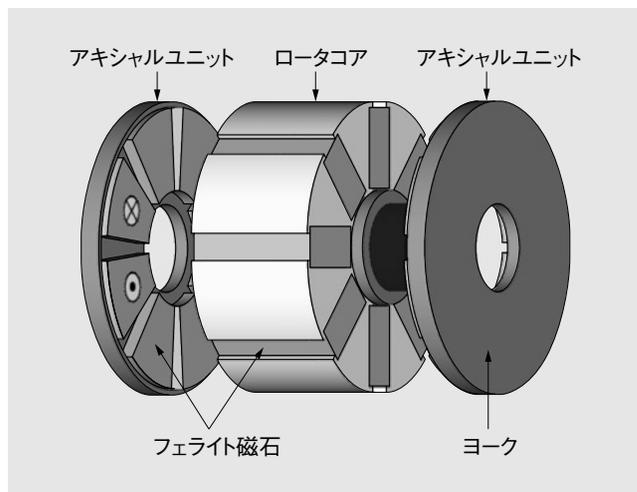
フェライト磁石を用いたIPMモータのロータ構造

1. ま え が き

近年、地球環境問題に対する対策から、省エネルギー化への要求が高まり、小形・高効率化を実現した永久磁石同期電動機（PMモータ：Permanent Magnet Synchronous Motor）が様々な分野のモータに適用されるようになってきている⁽¹⁾。しかし、PMモータの小形・高効率・高出力の要となる希土類磁石の価格変動が大きいことや、将来の原材料の供給不安が払拭されないことから、その使用量の削減や代替技術の開発が重要な課題となっている。

そこで当社は、希土類磁石の代替として、磁石の性能は劣るが安価で安定供給可能なフェライト磁石を適用した埋め込み磁石同期モータ（IPMモータ：Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）を開発している。

一次試作では、分割したロータコアにフェライ

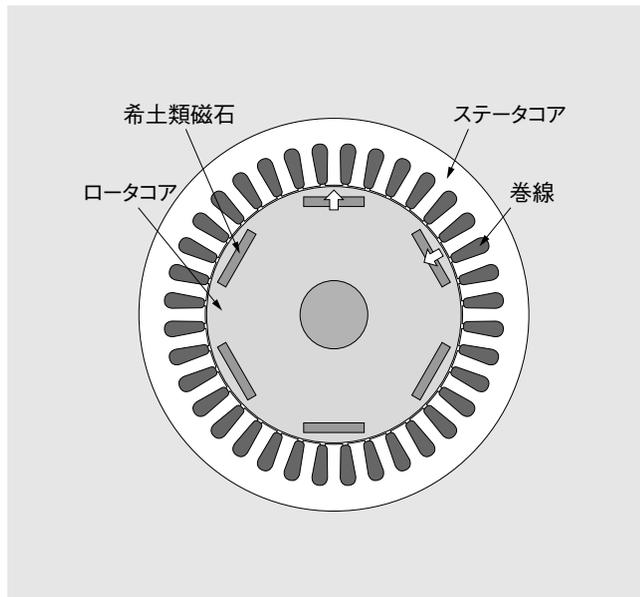


第1図 1次試作機のロータ構造

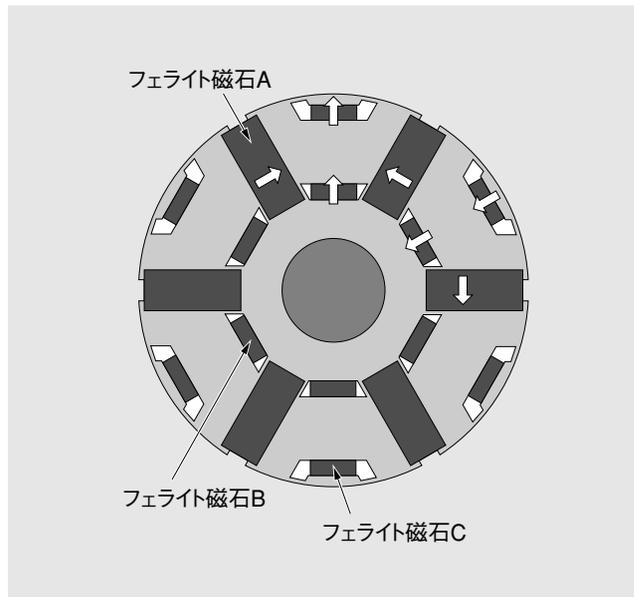
分割コアにフェライト磁石をスポーク状に配置したロータの両端に、アキシャルユニットを配置し、フェライト磁石の磁束量を増大させる構造である。

ト磁石をスポーク状に配置⁽²⁾し、さらに第1図に示すようにロータコアの両端面にアキシャル方向

*システム技術研究所



第2図 基本モデルのモータ断面形状
比較対象とする希土類磁石を用いたIPMモータのステータ及びロータ断面形状を示す。



第3図 提案モデルのロータ断面形状
今回開発したフェライト磁石を用いたIPMモータのロータ断面形状を示す。

第1表 モータの諸元
今回検討したモータの諸元を示す。

極数	6
スロット数	36
ステータコア外径	220mm
コア積厚	108mm
回転速度	1000min ⁻¹
残留磁束密度	1.30T (希土類磁石) 0.45T (フェライト磁石)

に着磁したフェライト磁石を付加することで、希土類磁石を用いたIPMモータと同体格で同等のトルクを実現した³⁾。しかしながら、このロータ構造は部品点数が多いため生産性が悪く、さらにはマグネットトルクが主体であるため、定出力での可変速範囲が狭いという課題があった。そこで、本稿ではこれらの課題を解決し、部品点数を減らしながら、リラクタンストルクを有効に利用する磁石配置のロータ⁴⁾を提案する。そして、希土類磁石を用いたIPMモータとフェライト磁石を用いたIPMモータの試作機を製作し、実測で比較検証したので紹介する。

2. 比較するモータ形状

2.1 基本モデル

第2図に比較対象である希土類磁石を用いたIPMモータ基本モデル(ステータ及びロータ)の断面形状を、第1表にモータの諸元を示す。第2図

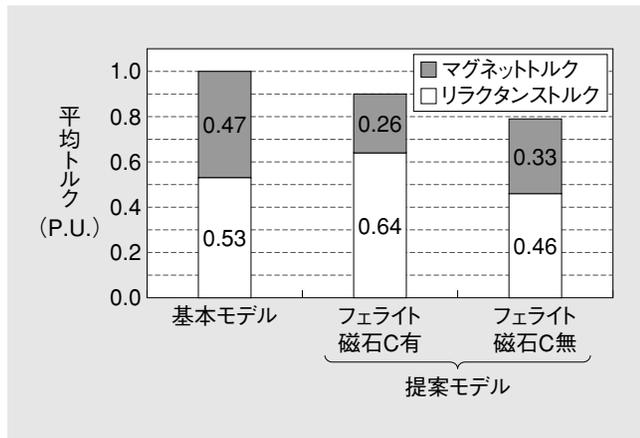
に示すように、基本モデルのロータは永久磁石を一文字形に配置した構造である。

2.2 提案モデル

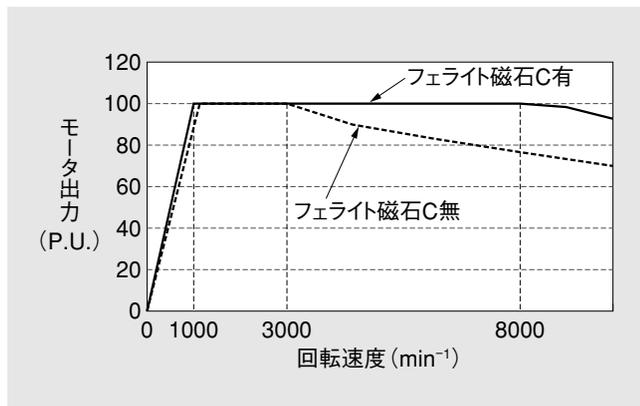
第3図にフェライト磁石を用いたIPMモータ提案モデルのロータ断面形状を示す。提案モデルと基本モデルは同じ仕様であり、ロータ以外の部品は全て同じ条件とした。提案モデルは、磁石表面積を大きくするために、フェライト磁石Aをスポーク状に配置している。また、フェライト磁石Aの磁石間に、フェライト磁石B及びCを配置する構造とした。フェライト磁石Bは、フェライト磁石Aの磁束漏れを低減することを目的として配置している。フェライト磁石Cは、d軸インダクタンスを小さくし、突極比を大きくすることで、リラクタンストルクを大きくすることを目的に配置している。また、フェライト磁石A側面のロータ外径側のコア鉄心部は、ブリッジ部分での漏れ磁束を低減するために分離している。

3. 磁界解析によるモータ特性の比較

基本モデルと提案モデルに対して有限要素法による磁界解析を行い、トルク・出力特性を比較した。なお、今回はフェライト磁石Cの有無によるリラクタンストルクを比較するため、提案するロータのフェライト磁石Cを除き、その空隙部を全てロータコアとした構造についても検討した。



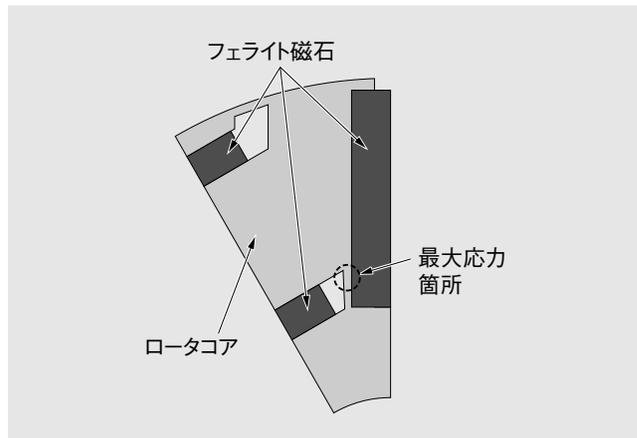
第4図 同一電流値での平均トルク比較
提案モデルは、フェライト磁石Cを設けることでリラクタンストルクが増加し、基本モデルの90%のトルクが得られる。



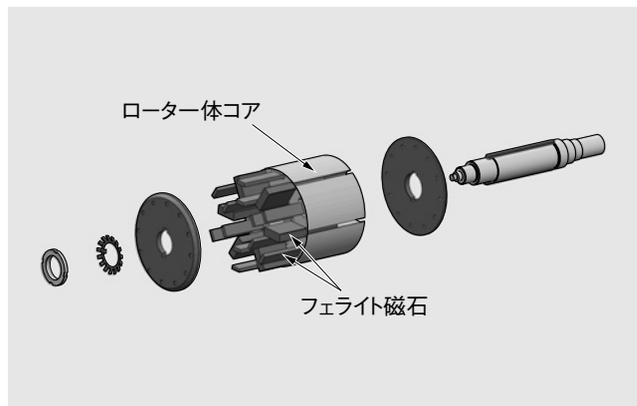
第5図 定出力範囲の比較結果
フェライト磁石Cを設けることで、定出力範囲は大幅に広がる。

第4図に同一電流条件で各モデルにおける最大トルクが得られる電流位相角の平均トルクを、マグネットトルク及びリラクタンストルクに分離して示す。ここで、平均トルクは基本モデルの平均トルクで正規化している。フェライト磁石Cを設けることで、リラクタンストルクは約39%大きくなり、平均トルクが約14%増加していることが分かる。またフェライト磁石Cを設けたモデルは、基本モデルの約90%の平均トルクが得られることが分かる。

第5図に電圧一定の条件での提案モデルの定出力範囲の比較結果を示す。この結果が示すように、フェライト磁石Cを除いたモデルの定出力範囲は、 1100min^{-1} から 3000min^{-1} までの範囲に限られることが分かる。しかし、フェライト磁石Cを設けることで、リラクタンストルクが増加するため、 1000min^{-1} から 8000min^{-1} の広い範囲で一定の出力を得られることができる。



第6図 ロータの1/12解析モデル
ロータの1/12解析モデルを示す。



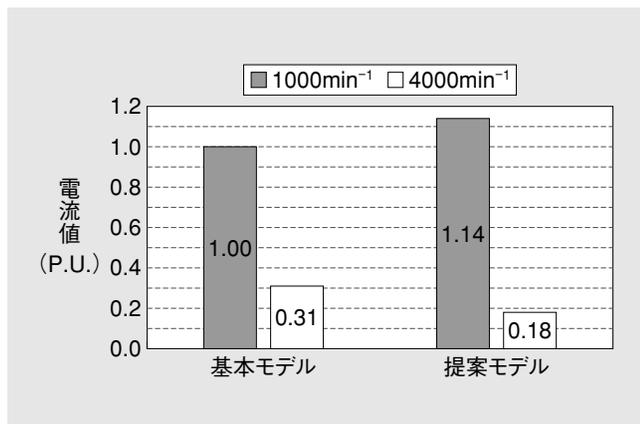
第7図 提案モデルの試作ロータ
試作した提案モデルのロータを示す。

4. 応力解析による強度確認

最高回転速度時の提案モデルの応力解析を行い、ロータ強度を確認した。第6図にロータの1/12解析モデルを示す。解析結果では、第6図中のフェライト磁石B側面のロータコアブリッジ部分の応力が最も高くなることが分かる。このブリッジ部分の幅は、磁気抵抗を大きくしてできるだけ磁束の漏れを低減する必要があるため、ロータの許容応力値を満たしていることを確認しつつ、詳細に検討している。

5. 試作機の試験結果

第7図に提案モデルの試作ロータを示す。試作機のロータは、希土類磁石を用いた従来のIPMモータのロータと体積・質量は同等である。またロータ以外は、全て希土類磁石を用いたIPMモータと同じものを使用した。



第8図 同一出力での実測電流値の比較
 提案モデルは、低速域では14%電流が増加するが、高速域では42%減少する。

第8図に回転速度1000min⁻¹及び4000min⁻¹における既定のトルクでの電流値の比較結果を示す。ここで電流値は、1000min⁻¹の基本モデルの電流値で正規化している。提案モデルは低速の1000min⁻¹に、約14%電流が増加するが、誘起電圧が基本モデルと比べて約25%小さいため、高速の4000min⁻¹は電圧を抑えるための無効電流が少なくなり、約42%電流が減少することが分かる。

今回の試作では、ステータ寸法並びに巻き線は基本モデルと全く同じ条件としているが、今後、ステータコアの形状や巻線を提案モデルに合わせて見直すことで、低速域の電流値を抑えた設計とすることができる。

6. む す び

本稿では、フェライト磁石のみを用いて、希土類磁石を用いたIPMモータと同じ体格、同じ質量で同等のトルク特性が得られるIPMモータのロータ形状及び試作結果について紹介した。

今後、EV/HEV用モータなどへの適用を目指し、更に性能向上した省・脱レアアースモータの開発を進めていく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) PMモータの産業応用に向けた新技術調査専門委員会編：「PMモータの適用拡大に向けた新技術と新分野への応用動向」, 電気学会技術報告, 第1207号, 2010
- (2) 長谷川・三木・松橋・沖津：「希土類磁石の使用量を低減した埋込磁石同期モータの開発」, 平成23年電気学会全国大会, Vol.5, pp.38-39, 2011
- (3) 松尾・沖津・松橋・三木：「フェライト磁石を用いた高トルクIPMSMの開発」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, pp.175-178, 2012
- (4) 柿原・竹本・小笠原：「フェライト磁石を用いた自動車駆動用スポーク型IPMSMの回転子形状の検討」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, pp.179-184, 2012

《執筆者紹介》



太田 智 Satoru Ota
 電気機器の構造設計に従事



松橋大器 Daiki Matsuhashi
 電気機器解析技術の研究開発に従事



沖津隆志 Takashi Okitsu
 電気機器解析技術の研究開発に従事



松尾圭祐 Keisuke Matsuo
 電気機器解析技術の研究開発に従事