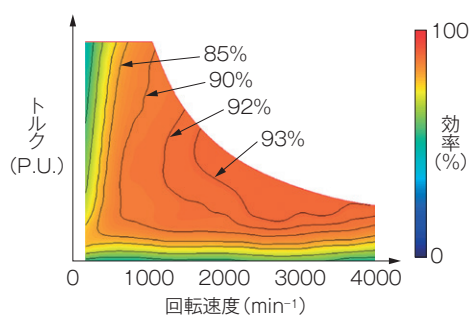


高性能フェライト磁石モータの実用化開発

松尾圭祐 Keisuke Matsuo
松橋大器 Daiki Matsuhashi
藤原侍士 Hitoshi Fujihara
武田 勇 Isamu Takeda

キーワード フェライト磁石モータ, 効率, 減磁解析, 後着磁

概要



フェライト磁石モータの効率マップ

希土類磁石はモータの小形・高効率化に必要な不可欠な部品であるが、レアアース材料の価格変動が大きいことや供給不安が払拭されないことから、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できるフェライト磁石を用いた埋込磁石同期電動機 (IPMモータ: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) を開発している。今回、フェライト磁石モータの効率測定並びに減磁解析、着磁解析を行って実用化検討を進め、生産性を考慮したフェライト磁石モータの性能評価を行い、実用化開発にめどをつけた。今後は更なるトルク性能・効率の向上を図るとともに、製造工程やアプリケーションへの適用検討を重ね、製品化を目指していく。

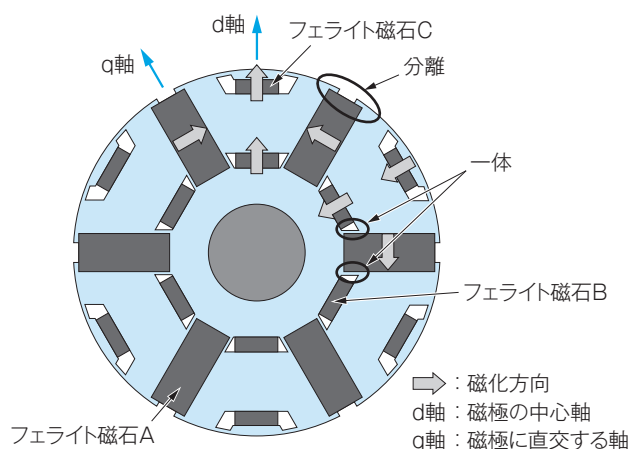
1 まえがき

近年、環境問題及び省エネルギー化への要求に伴い、小形・高効率を実現する永久磁石同期電動機 (PMモータ: Permanent Magnet Synchronous Motor) が様々な分野で用いられている。しかし、PMモータに使用する希土類磁石は、そ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、代替技術の開発が重要な課題となっている。当社では希土類磁石の代替として、安価で安定供給可能なフェライト磁石を適用した埋込磁石同期電動機 (IPMモータ: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) の開発を進め、希土類PMモータと同等の性能が得られる構造を見いだしてきた⁽¹⁾。

本稿では、フェライト磁石IPMモータの実用化を目指して実施した各種性能評価を紹介する。

2 基本モデル

第1図にこれまでに提案してきたフェライト磁



第1図 フェライト磁石IPMモータの構造

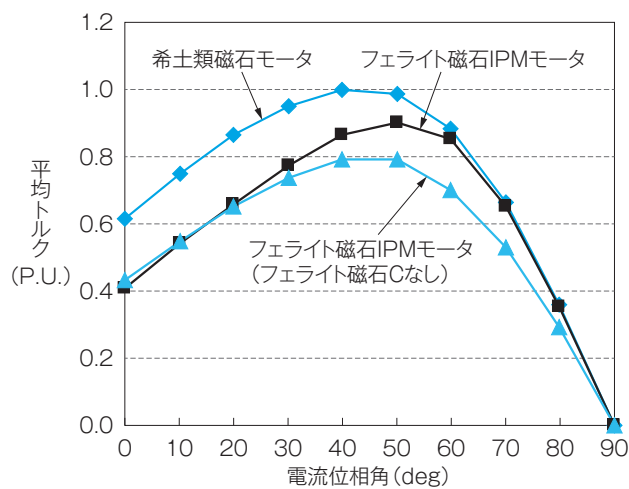
スポーク状にフェライト磁石Aを配置した構造を示す。漏れ磁束を低減するため、フェライト磁石Aの外周側鉄心は分離され、磁石A・B間は狭いブリッジで連結された鉄心構造である。

第 1 表 モータ緒元

今回の検討で用いたモータの緒元を示す。

項目	仕様
極数	6
スロット数	36
ステータ外径	φ220mm
コア積厚	108mm
基底速度	1000min ⁻¹
最高回転速度	4000min ⁻¹
最高回転速度 (ロータ強度限界)	7200min ⁻¹
モータ出力	10kW
残留磁束密度 (フェライト磁石)	0.45T

.....



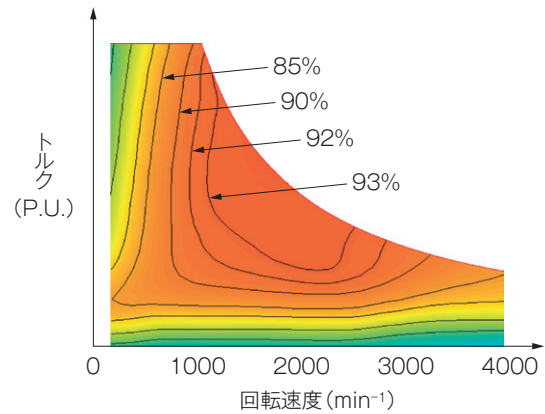
第 2 図 トルク特性 (解析結果)

リラクタンストルクを有効に活用することで、希土類磁石モータの約90%のトルク性能が得られる。フェライト磁石Cを配置しない場合、リラクタンストルクが減少し約80%のトルク性能となる。

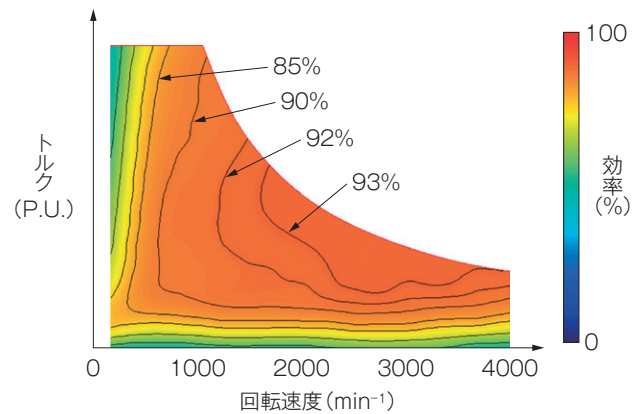
石IPMモータの構造を、第1表に諸元を示す。提案するフェライト磁石モータは、磁石の表面積を大きく取るためにスポーク状に配置したフェライト磁石Aと、漏れ磁束を低減するために配置したフェライト磁石B、さらにd軸インダクタンスを小さくして突極比を大きくするために配置したフェライト磁石Cから成る。このような構成としてリラクタンストルクを有効に活用することで、磁力が希土類磁石の1/3であるフェライト磁石モータで、第2図に示すように同じ電流・体格の条件で約90%のトルクを得ることができる。

2.1 効率評価

第3図に希土類磁石モータ及びフェライト磁石



(a) 希土類磁石IPMモータ



(b) フェライト磁石IPMモータ

第 3 図 効率マップ (測定結果)

フェライト磁石モータは、希土類磁石モータと同等の最高効率を得られ、高効率な領域は、高回転速度側にシフトする。

モータの効率マップを示す。図から、最高効率は両者ではほぼ同等の性能が得られていることが確認できる。前述のように、同じ電流条件ではフェライト磁石モータで得られるトルクは小さいことから、低速・大トルクの領域ではフェライト磁石モータの方が電流が増加し、銅損の増加によって効率は若干低下する傾向にある。しかし高速回転の領域では、弱め界磁電流が小さいことから、効率が向上していることが分かる。

2.2 減磁解析

フェライト磁石は希土類磁石に比べ、保磁力が約1/3程度と小さいため、不可逆減磁の評価が不可欠である。第4図に反磁界分布の解析結果を示す。図から、フェライト磁石Aの角部に大きな反磁界が生じていることが確認できる。ここで、減磁の影響は

(1)式に示すように誘起電圧の低下率で評価しており、その結果を第5図に示す。

$$\delta_e = \frac{E_a - E_b}{E_a} \times 100 \text{ [%]} \dots\dots\dots(1)$$

δ_e : 誘起電圧の低下率

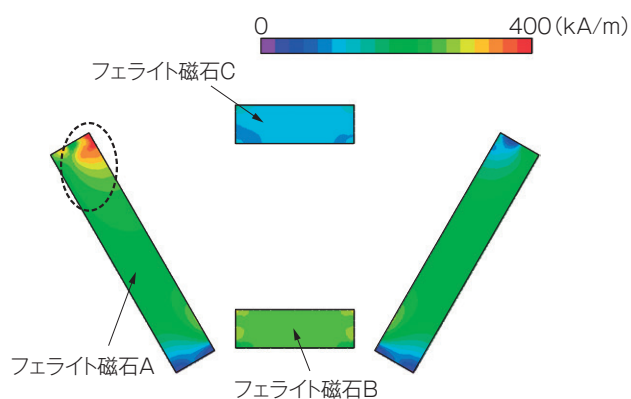
E_a : 通電前の誘起電圧

E_b : 通電後の誘起電圧

第5図から、短時間定格における電流条件では、減磁はほぼ無視できる程度であることが確認できる。しかし、モータの短時間定格以上の過電流（インバータ最大電流）を流した場合には、約0.5%の電圧低下（低温減磁）が生じることが分かる。

2.3 後着磁の検討

フェライト磁石モータの量産実用化には、後着磁

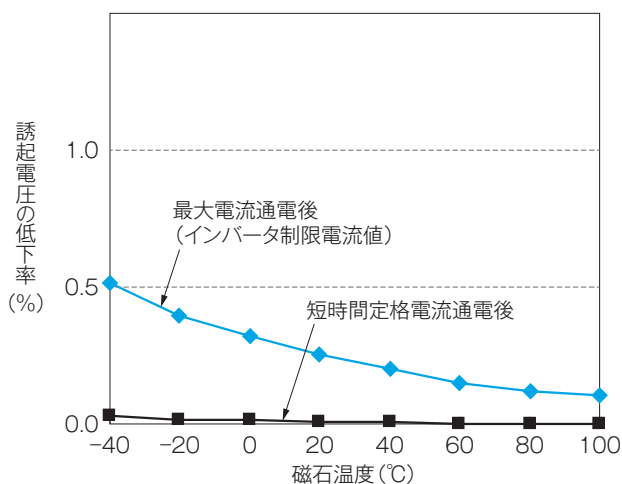


第4図 反磁界分布の解析結果

最大電流通電時に、フェライト磁石Aの外周側角部で過大な反磁界が生じる。

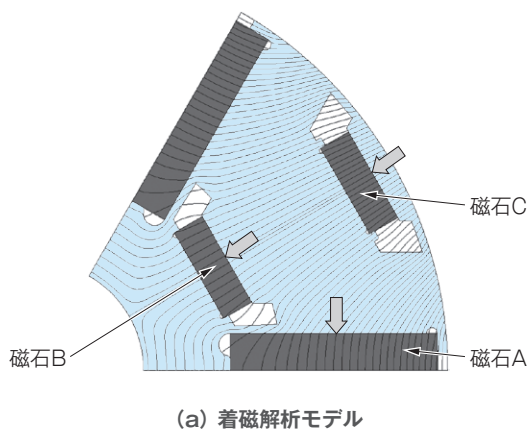
の生産工程が必須である。これまでに試作したモータは、単体で着磁済みの磁石をロータコアに挿入していた。磁石をロータコアに挿入した後に着磁を行う後着磁では、完全着磁できない場合に運転条件によっては不完全着磁領域が拡大する可能性があり、後着磁工程による完全着磁の検討が必要である。

第6図に現行モデルで後着磁を実施した際の解析結果を示す。それぞれの磁石の配向方向の発生磁界を算出し、後着磁の評価を実施した。完全着磁条件として、対象磁石の保磁力の3倍の磁界が印加される事を必要条件としたが、第6図(b)から、スポーク配置した磁石Aの内径側及び磁石Bの両端がこの条件を満足していないことが分かる。

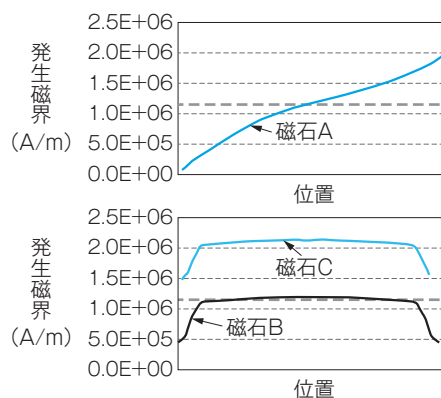


第5図 誘起電圧の低下率

モータの短時間定格電流通電後には、ほとんど減磁の影響は見られないが、過大な電流が流れた場合、低温減磁が発生する。



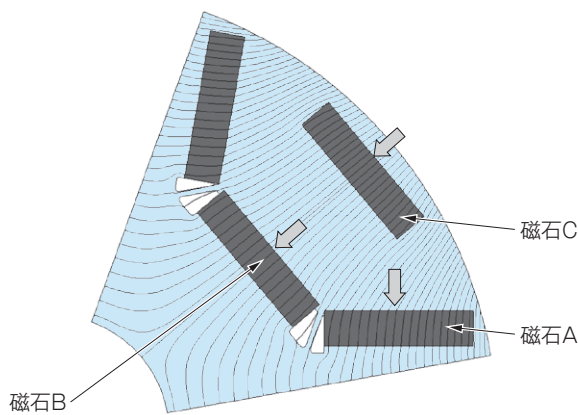
(a) 着磁解析モデル



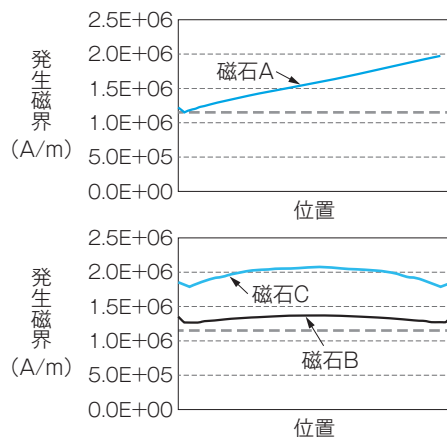
(b) 着磁解析結果

第6図 着磁解析結果（現行モデル）

矢印は磁石の配向方向を示し、発生磁界はこの配向方向の値を表す。破線は必要磁界を表し、磁石A・磁石Bはこれに満たない箇所があることが分かる。



(a) 着磁解析モデル



(b) 着磁解析結果

第7図 着磁解析結果 (改良モデル)

磁束が通りにくい回転子内径側にも着磁できている。全ての磁石で完全着磁が可能となった。

3 改良検討

磁石挿入後の完全着磁を実現するために、磁石配置を見直した。スポーク配置の磁石Aは回転子内径側まで磁束が通りにくいため、磁石を短くし、磁束が通りやすい角度の配置に変更した。さらに磁石Bの両端及び磁石Aの内径側には、磁石に磁束が通りやすくなるようなバリア（空気層）を設けることとした。ここで、量産実用化に向けた方策の一つとして、現在一極当たり4個を配置している磁石を全て同一サイズに統一することとした。

第7図に改良モデルで後着磁を実施した際の解析結果を示す。磁石A, B, C全ての発生磁界が完全着磁に必要な磁界を超えていることから、改良モデルによって後着磁が可能と判断できる。

4 むすび

フェライト磁石IPMモータの性能評価と実用化検討について紹介した。希土類磁石モータに近い性能を確保した上で、フェライト磁石の特長を生かしつつ生産性も考慮した安価なモータの開発にめどがあった。

今後は、更なるトルクアップと効率改善、及び製造工程の検討によって実用化を図るとともに、試作

評価と実際のアプリケーションへの適用検討を重ね、フェライト磁石IPMモータを実用化していく所存である。

・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) 太田・松橋・沖津・松尾：「高性能フェライト磁石モータの開発」, 明電時報341号, 2013/No.4, pp.61-64

《執筆者紹介》



松尾 圭祐
Keisuke Matsuo
システム技術研究所
電気機器設計・解析技術の研究開発に従事



松橋 大器
Daiki Matsuhashi
システム技術研究所
電気機器設計・解析技術の研究開発に従事



藤原 侍士
Hitoshi Fujihara
回転機技術部
電気機器の設計開発に従事



武田 勇
Isamu Takeda
回転機技術部
電気機器の設計開発に従事