

分布巻埋込磁石モータのリラクタンストルク向上のための フラックスバリア形状に関する検討

Flux Barrier Shape for Improving Reluctance Torque of Distributed Winding Interior Permanent Magnet Motor

田村一樹^{a)}・中村健二^{a)†}・成瀬賢哉^{b)}・萱野雅浩^{b)}

^{a)}東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579)

^{b)}愛知製鋼㈱, 愛知県東海市荒尾町ワノ割 1 番地 (〒476-8666)

K. Tamura^{a)}, K. Nakamura^{a)†}, K. Naruse^{b)}, and M. Kayano^{b)}

^{a)}Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

^{b)}Aichi Steel Co., Inc., 1 Wanowari Arao-cho Tokai Aichi 476-8666, Japan

As electrification progresses in various fields, permanent magnet (PM) machines have been attracting attention because of their compactness, high power, and high efficiency. Among them, interior permanent magnet (IPM) machines with a rotor core in which permanent magnets are embedded can achieve higher power and efficiency than conventional PM machines since they can utilize both magnetic and reluctance torque. This paper focuses on distributed-winding IPM machines, assuming the use of bonded magnets, and investigates various flux barrier shapes that can improve reluctance torque using the finite element method (FEM).

Keywords: Interior Permanent Magnet Motor, Reluctance torque, Flux barrier

1. はじめに

温暖化を始めとした地球環境問題の解決のため、世界各国で脱炭素社会の実現に向けた取り組みが加速している。我が国でも 2050 年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする、いわゆるカーボンニュートラルを目指すことを掲げている¹⁾。このような背景のもと、様々な分野で電動化が進んでいる。

電動化において、モータは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する唯一の装置として重要な役割を担う。特に回転子に永久磁石を有する永久磁石 (PM) モータは、小型高出力・高効率であることから、様々な分野で使用されている。また、PM モータの中でも、特に永久磁石を回転子鉄心に埋め込んだ埋込磁石 (IPM) モータは、永久磁石に由来するマグネットトルクに加えて、回転子の磁氣的突極性に起因するリラクタンストルクも併用できることから、従来の PM モータ以上の性能を実現でき、さらなる小型化・省資源化が期待されている。さらに、弱め磁束制御によって幅広い速度領域での使用が可能になるため、産業用機械や自動車などへの適用も可能である。

Fig. 1 に IPM モータの基本構成を示す。この図を見ると、フラックスバリアと呼ばれる回転子鉄心に設けた溝の中に永久磁石が収められていることがわかる。このフラックスバリアによって、回転子に磁氣的な突極性が生まれることから、IPM モータのリラクタンストルク向上には、フラックスバリア形状の最適化が重要である。しかし、現在、IPM モータで広く用いられているネオジム焼結磁石は、いわゆる金属系の磁石であり、製作コストの面から直方体にする必要がある。したがって、それを収めるフラックスバリア

も磁石形状に合わせる必要があることから、リラクタンストルク最大という観点でバリアの形状を最適化することは必ずしも容易ではない。そのため、一般に IPM モータの性能向上に関する検討では、ネオジム焼結磁石の使用を前提とした磁石配置に関する検討、トルクリプル低減に関する検討、磁石の不可逆減磁を抑制する検討などが多い^{2)~9)}。

上述の問題に対して、近年、ネオジムボンド磁石の利用が注目されている。ネオジムボンド磁石は樹脂系の磁石であり、形状自由度が高いことから、リラクタンストルク最大という観点からフラックスバリアの形状を最適化した後、そのバリアの中に磁石を配置することが可能であり¹⁰⁾、磁石使用量の削減と、それに伴うコスト低減が期待される。

そこで本論文では、電気自動車で広く一般に用いられている分布巻 IPM モータを考察対象として、ネオジムボンド磁石の使用を前提に、リラクタンストルク最大という観点から最適なフラックスバリア形状について、2次元有限要素法 (2D-FEM) を用いて種々検討を行ったので報告する。

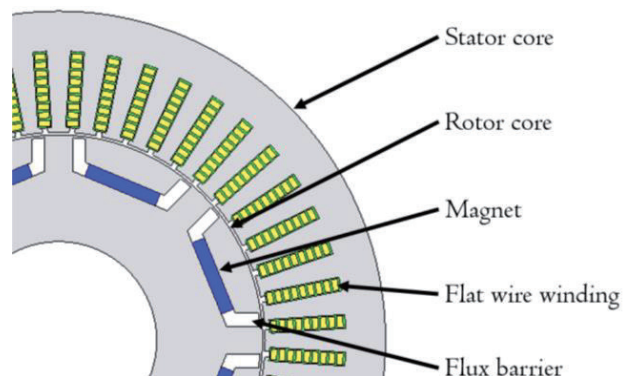


Fig. 1 Basic configuration of interior permanent magnet (IPM) motor.

Corresponding author: K. Nakamura (e-mail: kenji.nakamura@tohoku.ac.jp)

2. 各種フラックスバリアの比較検討

2.1 考察に用いた分布巻 IPM モータの諸元

Fig. 2 に、検討に用いた分布巻 IPM モータの諸元を示す。本モータは文献 10) の電動アクスル向け IPM モータをベースとしており、モータ外径が 150 mm、内径が 45 mm、軸長が 60 mm、固定子と回転子のギャップ長が 0.6 mm、スロット数が 48、回転子極数が 8 極である。鉄心材は無方向性ケイ素鋼板である。同図の回転子はすべて鉄心の状態になっているが、ここに様々なフラックスバリアを設け、寸法を最適化することで、リラクタンストルク最大という観点から最適なフラックスバリア形状の探索を行う。また、2D-FEM による検討の際は 1/4 モデルとして解析を実施している。なお、2D-FEM には、(株)JSOL 製の電磁界解析プログラムである JMAG Designer 21.0 を用いた。

2.2 最適なフラックスバリア形状の探索結果

Fig. 3 に、本稿での比較に用いたフラックスバリアの形状を示す。平板 1 層形 (Flat-shape, 1 layer)、V 字 1 層形 (V-shape, 1 layer)、円弧 1 層形 (Arc-shape, 1 layer)、円弧 2 層形 (Arc-shape, 2 layers)、円弧 3 層形 (Arc-shape, 3 layers) の 5 種類の異なるフラックスバリアを有する回転子について、最適寸法の探索を行った。具体的には 2D-FEM を用い、各フラックスバリアの角度や深さ、長さなどの寸法を種々変化させ、リラクタンストルクが最大となる組み合わせを探索した。なお、リラクタンストルクのみに着目するため、磁石は取り除き、代わりに磁気ブリッジを省くことで、磁石磁束による磁気ブリッジの磁気飽和を考慮した。また、固定子の形状・寸法、巻線仕様などは固定した。

解析条件は、ベースとした文献 10) の IPM モータを参考に回転数 34,000 rpm、電流振幅 128 A_{pk} とし、電流位相角 β は各形状において、リラクタンストルクが最大となる位相角とした。

Table 1 に、各フラックスバリアにおけるリラクタンストルクの最大値と、その時の d 軸インダクタンス L_d 、 q 軸インダクタンス L_q 、突極比 (L_q/L_d) を示す。同表より円弧 2 層形が最もリラクタンストルクが大きいことがわかる。一方、突極比は円弧 3 層形が最大となった。突極比は、IPM モータにおけるリラクタンストルクの大きさを表す一つの

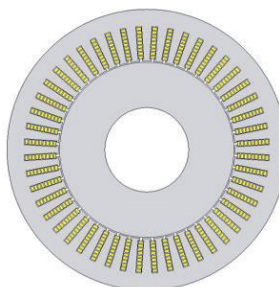
	Outside diameter (mm)	150
	Inside diameter (mm)	45
	Stack length (mm)	60
	Air gap length (mm)	0.6
	No. of stator pole	48
	No. of rotor pole	8
	No. of turns/slot	9
	Winding space factor (%)	60
	Core material	Non-oriented silicon steel

Fig. 2 Specifications of distributed-winding IPM motor used for examination.

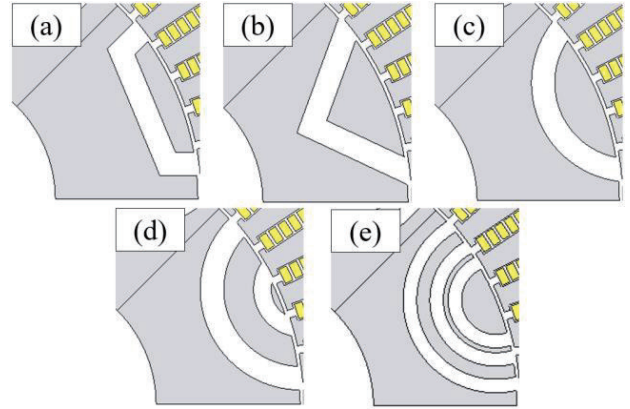


Fig. 3 Flux barrier shapes for comparison (a) flat shape, 1 layer, (b) V shape, 1 layer, (c) arc shape, 1 layer, (d) arc shape, 2 layers, (e) arc shape, 3 layers.

Table 1 Maximum value of reluctance torque, q -axis & d -axis inductance, and saliency ratio of each flux barrier shape.

Model	Maximum reluctance torque (N · m)	d -axis inductance (mH)	q -axis inductance (mH)	Saliency ratio
Flat shape, 1 layer	18.96	0.48	1.31	2.75
V shape, 1 layer	17.59	0.49	1.25	2.56
Arc shape, 1 layer	18.75	0.48	1.29	2.71
Arc shape, 2 layers	19.52	0.39	1.20	3.05
Arc shape, 3 layers	19.25	0.40	1.23	3.10

指標として広く用いられており¹¹⁾、同表からもおよそその傾向は捉えられていることがわかるが、磁気飽和の影響などは無視されているため、突極比の大小関係がトルクの大小関係と完全に一致するわけではない。そこで以降では、突極比に加えて磁束線図も用いて、最適なフラックスバリア形状について考察を行う。

2.3 結果の考察

前節の結果からリラクタンストルクを最大化できるフラックスバリアの形状について、円弧 1 層形、円弧 2 層形、円弧 3 層形を例に挙げて考察する。

まず Fig. 4(a)および(b)に、円弧 1 層形の q 軸と d 軸の磁束線図を示す。同図(a)の q 軸磁束の流れを見ると、磁束がフラックスバリアに妨げられることなく、バリアに沿って流れていることがわかる。すなわち、 q 軸の磁気抵抗は小さくなり、 q 軸インダクタンスが大きくなることがわかる。一方、同図(b)の d 軸磁束を見ると、フラックスバリアによって磁束の流れが妨げられており、多くの磁束がバリア、すなわちギャップを渡っていることがわかる。すなわち、 d 軸の磁気抵抗は大きくなり、 d 軸インダクタンスが小さくなることがわかる。

次いで、Fig. 5(a)および(b)に、円弧 2 層形の q 軸と d 軸の磁束線図を示す。同図(a)の q 軸磁束の流れを見ると、Fig. 4(a)と同様に、磁束が 2 層のフラックスバリアに沿って流れていることがわかる。ただし、磁路自体は狭くなっているため、Table 1 からわかるとおり q 軸インダクタンスは

1層形よりも若干小さくなっている。一方、同図(b)の d 軸磁束を見ると、2層のフラックスバリアによって磁束の流れがより妨げられていることがわかる。Table 1 に示した結果からも、円弧2層形の d 軸インダクタンスは1層形よりも小さくなっていることから、円弧2層形のリラクタンストルクが大きくなった理由は、円弧1層形よりも d 軸の磁気抵抗が大きくなって、 d 軸インダクタンスが小さくなり、その結果、突極比 (L_q/L_d) が大きくなったためであることがわかる。

続いて、Fig. 6(a)および(b)に、円弧3層形の q 軸と d 軸の磁束線図を示す。上述の2層形の考察から3層形にすることで、さらに d 軸インダクタンスが小さくなって、リラクタンストルクが大きくなることが期待されるが、Table 1 の結果は異なる。この要因に着目して以下考察を行う。まず同図(a)の q 軸磁束を見ると、これまでと同様に磁束がフラックスバリアに沿って流れているが、よく見ると1層目と2層目のバリアの間の鉄心は幅が狭く、ほとんど磁束が流れていないことがわかる。これはこの鉄心が固定子のスロット開口部に面しており、磁気回路がうまく形成されていないためである。また、同図(b)の d 軸磁束を見ると、この1層目と2層目の間の鉄心が固定子からの磁束を一部バイパスしていることがわかる。すなわち、フラックスバリアを3層に増やしても、実質2層分の効果しか得られなかったため、Table 1 に示したとおり、円弧3層形の d 軸インダクタンスと q 軸インダクタンスは、円弧2層形とほぼ同じ値になったと考えられる。

以上のことから、 d 軸インダクタンスを小さくするためにフラックスバリアの層数を増やすことは有効であるが、増やしすぎると固定子からの磁束がバイパスされて、その効果が薄れること、また固定子ティースから回転子鉄心につながる磁気回路がうまく形成されなくなることが明らかとなった。したがって、リラクタンストルクを最大化するためには、回転子のフラックスバリアの形状や層数だけに着目するのではなく、固定子側も含めた磁束全体の流れを考えて、 q 軸方向にはより流れやすく、 d 軸方向にはより流れにくくなるように、フラックスバリアを設ける必要があることが明らかとなった。

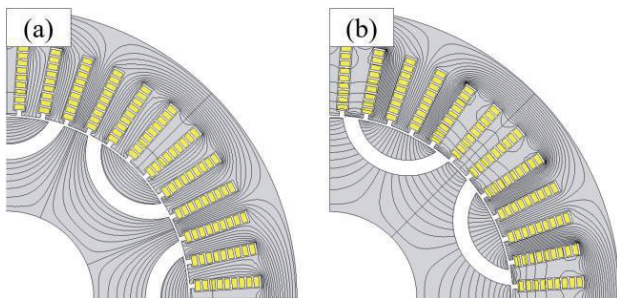


Fig. 4 Flux line diagrams (a) q -axis and (b) d -axis for arc shape, 1 layer.

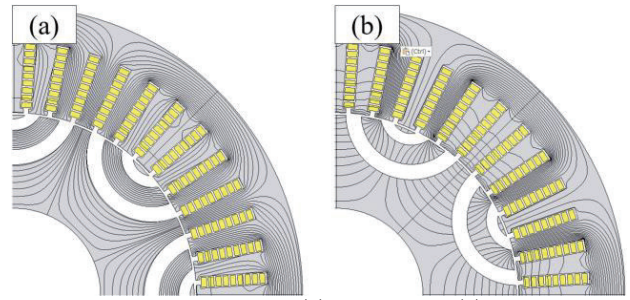


Fig. 5 Flux line diagrams (a) q -axis and (b) d -axis for arc shape, 2 layers.

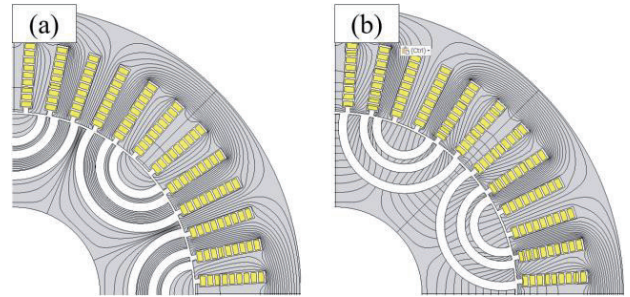


Fig. 6 Flux line diagrams (a) q -axis and (b) d -axis for arc shape, 3 layers.

3. 磁束線の特徴を捉えたフラックスバリア

3.1 磁束線の特徴を捉えたフラックスバリアの形状

前章までの考察により、リラクタンストルク最大という観点から見て望ましいフラックスバリアの形状は、磁束の流れ、すなわち磁束線図に基づいて決めるのが良いことが明らかとなった。そこで本章では、磁束線の特徴を明らかにするとともに、それに基づくフラックスバリア形状の最適化を試みる。

Fig. 7 に、回転子のフラックスバリアを無くし、円筒状鉄心とした場合の磁束線図の算定結果を示す。この図より、磁束線には以下の2つの特徴があることがわかる。

- (1) 固定子に近い回転子鉄心内では磁束線が等間隔
- (2) 固定子から離れるにつれて磁束線同士の間隔が徐々に広がり、楕円弧状になる

したがって、2層のフラックスバリアを設けるのであれば、1層目と2層目の形状は一般的な相似形では無く、同図の特徴を捉えて異なる形状にした方が良いことがわかる。

Fig. 8 に、上述の磁束線の特徴を捉えたフラックスバリアの一例を示す。このように1層目と2層目でバリアの幅を変え、楕円弧状とする一方で、1層目と2層目の間の鉄心の幅はほぼ等しくすることで、局所的な磁気飽和の発生を抑え、 q 軸方向の磁束を流れやすくする。文献 12)では、同図の磁束線の形状を関数で近似することで、フラックスバリアの形状を決定する方法が提案されているが、本論文では遺伝的アルゴリズム (GA) を用いてフラックスバリアの最適化を試みた。

Fig. 9 に、最適化を試みたパラメータとそれらの探索範囲を示す。リラクタンストルクの最大化を目的関数とし、

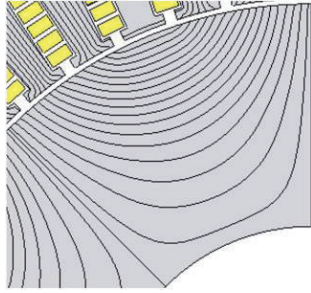


Fig. 7 Calculated flux lines when rotor has cylindrical iron core.

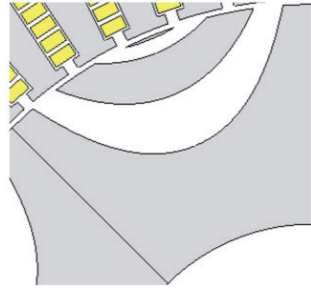


Fig. 8 Example of flux barriers based on magnetic flux lines shown in Fig. 7.

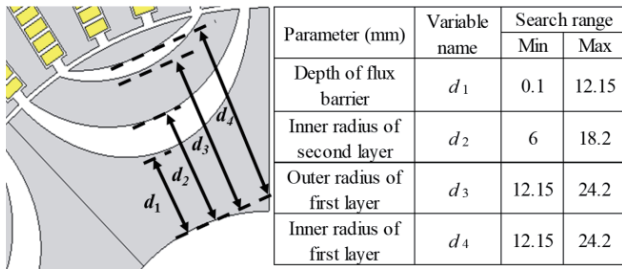


Fig. 9 Parameters to be optimized and their search ranges.

GA を用いて $d_1 \sim d_4$ の 4 つのパラメータの最適な組み合わせを探索した. なお, 第 2 章の考察に基づき, q 軸方向の磁束を流れやすくするため, 同図に示すようにフラックスバリアの端部は固定子のスロット開口部に合わせて固定した. なお, 探索を行う際の世代数は 30 とした.

3.2 最適化の結果

Fig. 10 に, 最適化後の回転子形状と最適寸法を示す. この図を見ると, 1 層目, 2 層目どちらのバリアも楕円弧状になったことがわかる. また, 2 層目のバリアが極端に厚くなったが, これはフラックスバリアの端部を固定子のスロット開口部に合わせて狭くしたことによる d 軸方向の磁気抵抗の低下, すなわち d 軸インダクタンスの増加を抑えるためであると考えられる. また, 1 層目と 2 層目の間の鉄心の幅がほぼ等しくなっており, 局所的な磁気飽和の発生を抑え, q 軸方向の磁束が流れやすくなっていることがわかる.

Fig. 11 に, 最適化後の q 軸と d 軸の磁束線図を示す. 同図(a)の q 軸磁束の流れを見ると, 固定子ティースから回転

子鉄心につながる磁気回路がうまく形成され, 磁束が弧を描くように流れていることがわかる. また, 同図(b)の d 軸磁束を見ると, フラックスバリアの端部を固定子のスロット開口部に合わせたことで, 固定子からの磁束がバイパスされることなく, バリアが有効に働いていることがわかる.

Table 2 に, 最適化後のリラクタンストルクの最大値と, その時の d 軸インダクタンス L_d , q 軸インダクタンス L_q , 突極比を示す. また, 前章までの結果も同表に示す. この表を見ると, 磁束線の特徴を捉え, GA を用いて最適化したものが最もリラクタンストルクが大きく, 円弧 2 層形よりも約 20% 向上したことがわかる. また, q 軸インダクタンスが大きく上昇し, 突極比が最大となっていることも確認できる. したがって, リラクタンストルクが増大したのは, 固定子のティースから回転子鉄心につながる磁気回路がうまく形成され, q 軸方向の磁気抵抗が低下したことが最大の要因であることが了解される.

一方, 最適化後の回転子は 2 層目のバリアが極端に厚く, IPM モータとして磁石を配置することや高速回転時の応力を考えると, 実用上の問題が懸念される. そこで, 2 層目のバリアを薄くした際の影響を追加で調べた.

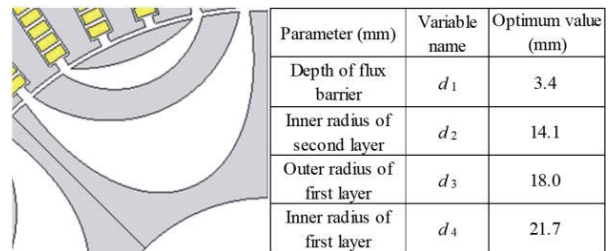


Fig. 10 Optimized rotor shape and its dimensions.

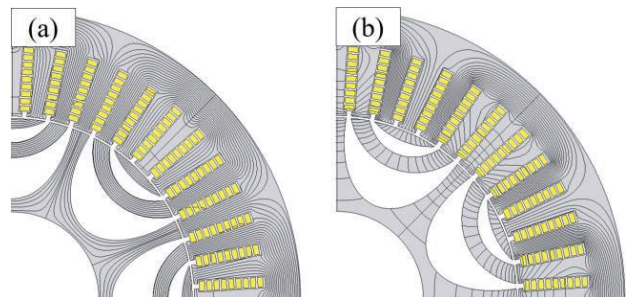


Fig. 11 Flux line diagrams (a) q -axis and (b) d -axis after optimization.

Table 2 Maximum value of reluctance torque, q -axis & d -axis inductance, and saliency ratio of each flux barrier shape.

Model	Maximum reluctance torque (N · m)	d -axis inductance (mH)	q -axis inductance (mH)	Saliency ratio
Flat shape, 1 layer	18.96	0.48	1.31	2.75
V shape, 1 layer	17.59	0.49	1.25	2.56
Arc shape, 1 layer	18.75	0.48	1.29	2.71
Arc shape, 2 layers	19.52	0.39	1.20	3.05
Arc shape, 3 layers	19.25	0.40	1.23	3.10
New shape	24.10	0.38	1.47	3.86

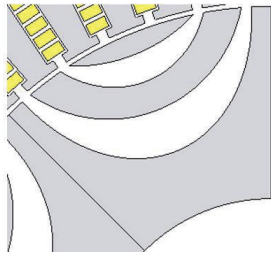


Fig. 12 Rotor shape with thinner flux barrier in the second layer of the optimized rotor shown in Fig. 10.

Table 3 Maximum value of reluctance torque, q -axis & d -axis inductance, and saliency ratio of each flux barrier shape shown in Fig. 10 and Fig. 12.

Model	Maximum reluctance torque (N·m)	d -axis inductance (mH)	q -axis inductance (mH)	Saliency ratio
New shape (Fig. 10)	24.10	0.38	1.47	3.86
New shape (Fig. 12)	23.60	0.41	1.46	3.57

Fig. 12 に、Fig. 10 に示した回転子の 2 層目のバリアのみを薄くした形状を示す。また、Table 3 には両者のリラクタンストルクの最大値と、その時の d 軸インダクタンス L_d 、 q 軸インダクタンス L_q 、突極比を示す。同表を見ると、2 層目バリアを薄くしたことで d 軸インダクタンスが上昇していることがわかるが、これはバリアが薄くなったことで d 軸の磁気抵抗が低下したためである。ただし、 d 軸インダクタンスの上昇はわずかであり、トルクの減少も約 2% と小さいことがわかる。したがって、実用上は Fig. 12 のフラックスバリア形状が望ましいといえる。

4. まとめ

以上、本論文では電気自動車でも広く用いられている分布巻 IPM モータを考察対象とし、形状自由度の高いネオジムボンド磁石の利用を前提に、リラクタンストルクを向上可能なフラックスバリア形状について、種々検討を行った。

まず平板 1 層形、V 字 1 層形、円弧 1 層形、円弧 2 層形、円弧 3 層形の 5 種類の異なるフラックスバリアを有する回転子について、2D-FEM を用いてリラクタンストルクの最大化を目的関数として最適寸法の探索を行い、各フラックスバリアにおけるリラクタンストルクの最大値と、その時の d 軸・ q 軸インダクタンス、突極比を算定するとともに、磁束線図の比較を行った。その結果、リラクタンストルクを最大化するためには、フラックスバリアの形状や層数だけに着目するのではなく、固定子も含めた磁束全体の流れを考えて、 q 軸方向にはより流れやすく、 d 軸方向にはより流れにくくなるように、フラックスバリアを設ける必要があることが明らかとなった。

次いで、上述の結果に基づき、磁束全体の流れを表す磁束線の特徴を分析したところ、固定子に近い回転子鉄心内では磁束線が等間隔になること、一方、固定子から離れるにつれて磁束線同士の間隔が徐々に広がり、楕円弧状になることが明らかとなった。したがって、フラックスバリア

の形状も楕円弧状の方が望ましい。

上述の考察に基づき、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いてフラックスバリアの最適化を試みたところ、 q 軸インダクタンスが大きく上昇して突極比が最大となり、リラクタンストルクは約 20% 向上した。

今後は、本論文で最適化した回転子のフラックスバリアに、ボンド磁石を配置し、埋込磁石 (IPM) モータとした際のモータ特性の算定を行う予定である。

References

- 1) Ministry of the Environment's Decarbonization Portal: https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/road-to-carbon-neutral (2023.5.9) (in Japanese).
- 2) R. Tsunata, M. Takemoto, S. Ogasawara, and K. Orikawa: *2020 IEEE Trans. Energy Convers. (ECCE)*, 53 (2020).
- 3) R.R. Moghaddam, F. Magnussen, and C. Sadarangani: *2012 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, 720 (2012).
- 4) P. Alotto, M. Barcaro, N. Bianchi, and M. Guarnieri: *Digests 14th Biennial IEEE Conf. Electromagn. Field Computation*, 958 (2010).
- 5) T.A. Huynh, M.F. Hsieh, K.J. Shih, and H.F. Kuo: *20th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. (ICEMS)* (2017).
- 6) M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **46**, 1950 (2010).
- 7) Y. Honda, H. Murakami, N. Kazushige, T. Higaki, S. Morimoto, and Y. Takeda: *IEEEJ Trans. Ind. Appl.*, **117**, 898 (1997) (in Japanese).
- 8) M. Kondo, K. Kondo, Y. Fujishima, and S. Wakao: *IEEEJ Trans. Ind. Appl.*, **124**, 124 (2004) (in Japanese).
- 9) T. Umeda, M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Inoue: *2018 Int. Conf. Power Electron.*, 2814 (2018).
- 10) K. Naruse, K. Choongsik, M. Kayano, A. Watarai, H. Mitarai, and K. Nakamura: *The papers of Technical Meeting on Rotating Machinery*, RM-23-93 (2023) (in Japanese).
- 11) Y. Takeda, N. Matsui, S. Morimoto, and Y. Honda: *Umekomi Jishaku Douki Mo-ta no Sekkei to Seigyo* (in Japanese), p. 62 (*Ohmsha, Tokyo, 2001*).
- 12) S. Kitamura, J. Kaneda, T. Kobayashi, M. Ito, and M. Komuro: "To improve the power factor of synchronous reluctance motors," Hitachi Ltd. Public License, Japan Patent Office (2002.7.12).

2023年10月10日受理, 2023年12月3日再受理, 2024年1月3日採録