



Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた高トルク IPMSM に関する検討

Study on High Torque IPMSM Using Sm-Fe-N Bonded Magnet

武田一真^{a)}・吉田征弘^{a)†}・吉田理恵^{b)}・阿部将裕^{b)}・多田秀一^{b)}・山本宗生^{b)}・田島克文^{a)}

^{a)}秋田大学理工学研究科, 秋田県秋田市手形学園町 1-1 (〒010-8502)

^{b)}日亜化学工業株式会社, 徳島県阿南市上中町岡 491 (〒774-8601)

K. Takeda^{a)}, Y. Yoshida^{a)†}, R. Yoshida^{b)}, M. Abe^{b)}, S. Tada^{b)}, M. Yamamoto^{b)}, and K. Tajima^{a)}

^{a)} Graduate School of Science and Engineering, Akita Univ., 1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita, Akita 010-8502, Japan

^{b)} Nichia Corporation, 491 Kaminakamachioka, Tokushima, Anan 774-8601, Japan

Permanent magnet motors use powerful neodymium sintered magnets, which contain dysprosium (Dy), a heavy rare earth, to improve the coercive force in general. We have been studying heavy rare earth-free motors using bonded magnets. In this paper, the torque characteristics of a motor using Dy-free samarium-iron-nitrogen (Sm-Fe-N) bonded magnets were calculated using the finite element method, aiming for torque characteristics comparable to those of a motor using neodymium sintered magnets. This study shows that a motor using Sm-Fe-N bonded magnets can output torque close to that of a motor using neodymium sintered magnets by changing the magnet arrangement of the rotor from a V-shape to a U-shape to increase the magnet surface area and to eliminate leakage flux at the flux barrier.

Key words : Sm-Fe-N bonded magnet, permanent magnet motor, IPM motor, injection molding

1. はじめに

近年, 世界的に地球環境保護や省エネルギー化への関心が高まっており, 気候変動, 地球温暖化防止への取り組みが強く求められている. そのため日本では, 2050年までにカーボンニュートラル, 脱炭素社会の実現を目標としており, 電動化の動きが加速している. 電動化におけるキーデバイスの一つであるモータは, エネルギー問題への関心の高まりと相まって, 省エネルギー効果の高い高効率モータの開発が極めて重要な課題となっている. 高効率モータとして現在広く使われているモータは永久磁石モータであり, 我が国における2021年の70W以上の交流モータ生産台数割合のうち, 永久磁石モータは57%を占めている¹⁾. 高性能永久磁石モータの多くには現在最も強力な磁力を有するとされるネオジム焼結磁石が用いられている. しかしながら, ネオジム焼結磁石の原料のうちジスプロシウム (Dy) は重希土類であり, 特定の国からの供給に依存しているため高コスト, 供給が不安定, 採掘や精錬に環境破壊を伴うといった問題がある²⁾. したがって, コストや持続可能性の面から省レアアース, 脱レアアース化は極めて重要な課題であり, 筆者らは, 重希土類フリーモータの検討を進めている^{3)・4)}.

本稿では, 余剰資源でネオジムと比べて低価格であるサマリウムを使用した Dy フリーであるサマリウム鉄窒素 (Sm-Fe-N) ボンド磁石を用いて, ネオジム焼結磁石を用いたモータに匹敵するトルク特性を目指し, 有限要素法を用いてトルク特性を算定した. また, Sm-Fe-N ボンド磁石の特徴の一つである形状自由度を生かした磁石配置, およびモータ駆動時の減磁の可能性について検討した.

2. 使用する磁石の特徴とモータ初期形状

2.1 使用する磁石の特徴

本検討ではネオジム焼結磁石と Sm-Fe-N ボンド磁石の2種類の磁石を用いた. まず, ネオジム焼結磁石は, 流通している磁石の中で最高の磁気特性を持っており, 高い残留磁束密度を有し, 機械的強度に優れている. 短所として, さびやすいため表面処理をする必要がある. 温度特性は低く, 熱に弱い磁石である. なお, 本検討で用いる N40SH の残留磁束密度は 1.29 T である. 次いで, Sm-Fe-N ボンド磁石は, 近年注目を集めており, モータへの適用が期待されているサマリウム・鉄・窒素を原料としたボンド磁石である. 射出成型をすることが可能であり, 形状自由度が高い⁵⁾. また, 高い抵抗率を持ち, 渦電流を低減できる. なお, 本検討で用いる AL16C の残留磁束密度は 0.86 T である.

2.2 初期形状 IPMSM の諸元と解析条件

比較対象であるネオジム焼結磁石を用いた V 字型に磁石を配置した埋込型永久磁石同期モータ (IPMSM) の形状を Fig. 1 に, Table 1 に諸元と解析条件を示す. 固定子直径は 107 mm, 回転子直径は 60 mm, ギャップ長は 0.5 mm, 固定子および回転子の積厚は 50 mm で, 6 極 9 スロットのモデルとなっている. 解析条件は電流振幅および周波数がそれぞれ 20 A と 250 Hz, 回転速度は 5000 rpm とした. 実機での試作試験を想定し, 電流密度が 5 A/mm² 以下となるよう電流値を決定している. また, ネオジム焼結磁石を用いた場合と Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた場合のトルク特性を比較するために, 2種類の磁石でそれぞれ解析する.

2.3 初期形状 IPMSM の解析結果

本節では, 同形状のとき, 磁石材料がネオジム焼結磁石から Sm-Fe-N ボンド磁石に変更した場合のトルク特性を比較する.

Corresponding author: Y. Yoshida (e-mail: yoshida@gipc.akita-u.ac.jp).

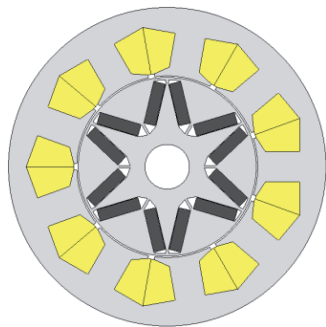


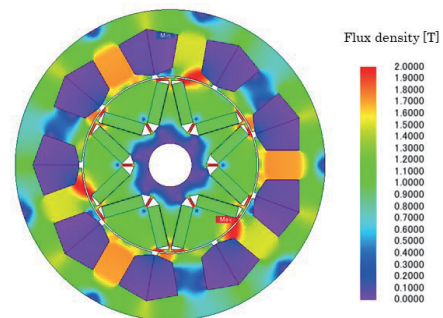
Fig. 1 V-shaped model.

Table 1 Motor Specifications and analysis conditions.

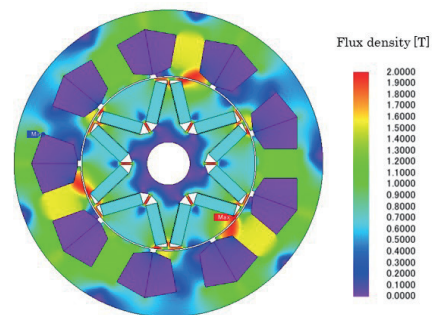
Parameters	Values
Core material	20JNEH1200
Permanent magnet material	Nd-Fe-B sintered $B_r = 1.29$ T $H_{cb} = 905$ kA/m, $H_{cj} = 1493$ kA/m
	Sm-Fe-N bonded $B_r = 0.86$ T $H_{cb} = 642$ kA/m, $H_{cj} = 1763$ kA/m
Coil	Copper
Winding diameter [mm]	1.1
Stator outer diameter [mm]	107
Stator inner diameter [mm]	61
Rotor outer diameter [mm]	60
Rotor inner diameter [mm]	15
Gap width [mm]	0.5
Stack length [mm]	50
Number of poles	6
Number of slots	9
Number of winding turns/slot	75
Power supply voltage V_{dc} [V]	270
Frequency [Hz]	250
Current amplitude [A]	20
Current density [A/mm^2]	4.96
Rotational speed [rpm]	5000

Fig. 2 (a) にネオジウム焼結磁石を用いた V 字型磁石配置の磁束密度分布図を、同図 (b) に Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた V 字型磁石配置の磁束密度分布図を示す。Fig. 2 (a) と Fig. 2 (b) を比較すると、Sm-Fe-N ボンド磁石の残留磁束密度がネオジウム焼結磁石の残留磁束密度よりも低いことから、磁束密度分布図でも Fig. 2 (b) の磁束密度が全体的に低いことがわかる。Fig. 3(a) にネオジウム焼結磁石を用いた V 字型磁石配置の電流毎トルク対電流位相角特性を、Fig. 3(b) に Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた V 字型磁石配置の電流毎トルク対電流位相角特性を示す。定格電流の 20 A では、いずれのモータも電流位相角 15° でトルクが最大となった。Fig. 4 にトルク波形を示す。ネオジウム焼結磁石を使用したモータの平均トルクは 6.36 N m、Sm-Fe-N ボンド磁石を使用したモータの平均トルクは 4.98 N m、となり、トルク差は 1.38 N m、 21.7% となった。ここで、解析に用いたネオジウム焼結磁石の無励磁時のコイル鎖交磁束は 0.05 Wb、Sm-Fe-N ボンド磁石のコイル鎖交磁束は 0.038 Wb で、コイル鎖交磁束の差は 0.012 T、 24% であることから、トルクの比とコイル鎖交磁束の比がほとんど等しいこと

がわかる。また、定格電流と回転数におけるネオジウム焼結磁石を使用したモータの定格出力は 3.3 kW となり、Sm-Fe-N ボンド磁石を使用したモータの定格出力は 2.61 kW となった。

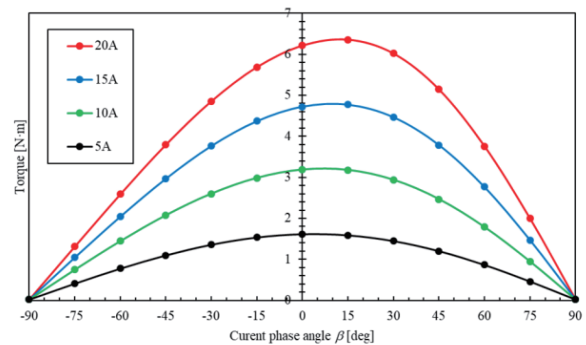


(a) V-shaped model using Nd-Fe-B sintered magnet

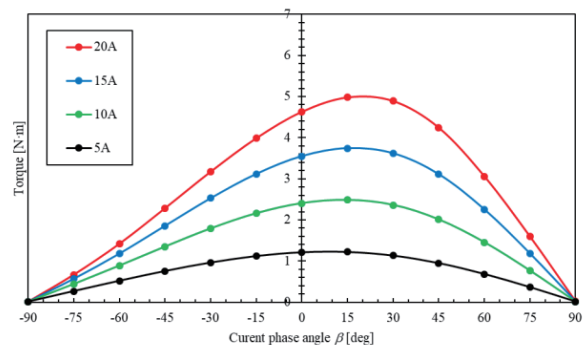


(b) V-shaped model using Sm-Fe-N bonded magnet

Fig. 2 Magnetic flux density distribution diagram.



(a) V-shaped model using Nd-Fe-B sintered magnet



(b) V-shaped model using Sm-Fe-N bonded magnet

Fig. 3 Torque versus current phase angle characteristics.

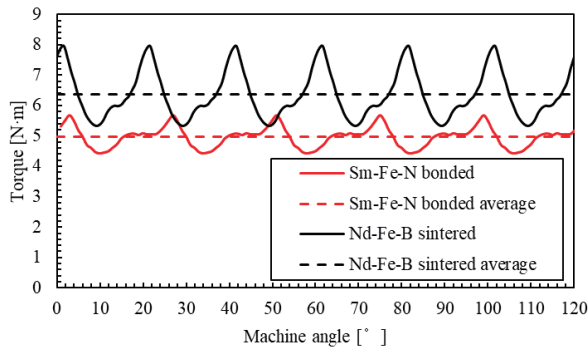


Fig. 4 Comparison of torque characteristics between Nd-Fe-B sintered magnet motor and Sm-Fe-N bonded magnet motor.

3. 磁石形状の変更によるトルク向上

前章の検討から確認された 1.38 N m のトルク差を縮めるために、Sm-Fe-N ボンド磁石をコアに直接射出成形し、磁石の形状を U 字型に成形することを想定し、磁石の形状を U 字型に変更した。Fig. 5 に示すように、V 字型配置ではフラックスバリア部に漏れ磁束が生じる。Sm-Fe-N ボンド磁石を U 字型に配置することでこの漏れ磁束を除去し、同時に磁石体積の向上を図る。これにより V 字型配置の体積は 5900 mm³、U 字型配置の体積は 7293 mm³ となり、体積は 1393 mm³、19.1%増加した。Fig. 6 (a) にこれまで解析してきた V 字型磁石配置を、Fig. 6 (b) に U 字型磁石配置を示す。

Fig. 7 に U 字型に Sm-Fe-N ボンド磁石を配置した IPMSM 形状を示す。諸元と解析条件は Table 1 と同様である。

Fig. 8 に Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた U 字型磁石配置の磁束密度分布図を示す。Fig. 2 (b) と Fig. 8 を比較すると、磁石配置を変えたことによって Fig. 8 の磁束密度分布図の方が固定子鉄心部分の磁束密度が高くなっていることがわかる。

Fig. 9 に U 字型 Sm-Fe-N ボンド磁石モデルの電流毎トルク対電流位相角特性を示す。V 字型モデルと同様に、定格電流である 20 A 通電時のトルクが最大になる電流位相角は 15° であった。最大トルク時のトルク波形の比較を Fig. 10 に示す。V 字型磁石配置（ネオジム焼結磁石）の平均トルクは 6.36 N m、U 字型磁石配置（Sm-Fe-N ボンド磁石）の平均トルクは 6.01 N m となり、トルク差は 0.35 N m、5.5 % となった。解析に用いたネオジム焼結磁石の残留磁束密度は 1.27 T、Sm-Fe-N ボンド磁石の残留磁束

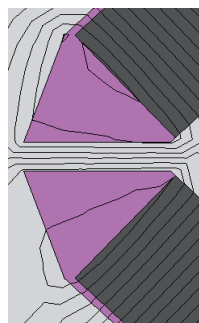
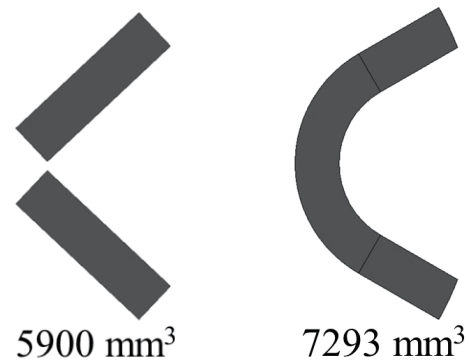


Fig. 5 Leakage flux at flux barrier.



(a) V-shaped model. (b) U-shaped model.

Fig. 6 Change of magnet shape.

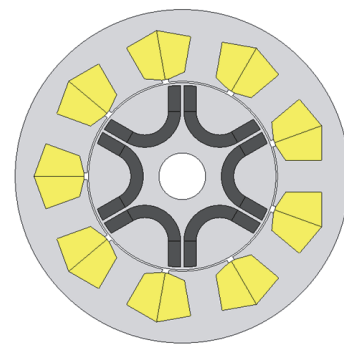


Fig. 7 Proposed U-shaped model.

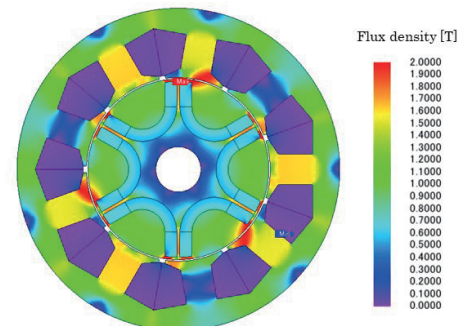


Fig. 8 Magnetic flux density distribution diagram of proposed model.

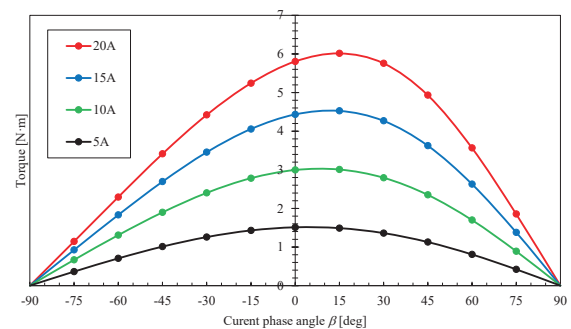


Fig. 9 Torque versus current phase angle characteristics of proposed U-shaped model.

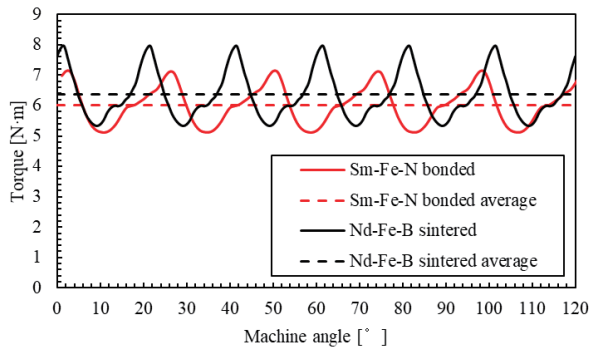


Fig. 10 Comparison of torque characteristics between Nd-Fe-B sintered magnet motor and proposed U-shaped Sm-Fe-N bonded magnet motor.

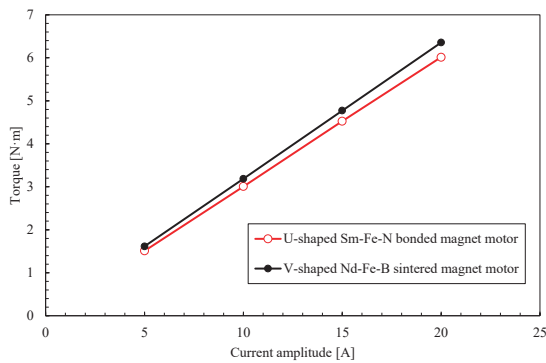


Fig. 11 Comparison of torque-current characteristics.

密度は0.86 Tで、残留磁束密度の差は0.41 T、32.3%である。U字型 Sm-Fe-N ボンド磁石モデルとV字型ネオジウム焼結モデルの電流対トルク特性を Fig. 11 に示す。各電流振幅において最大トルクとなる電流位相角のトルクを抽出してプロットした。両モデルのトルクは電流に対して比例して増加しており、いずれの電流値においてもトルク差は5~6%であった。これらの結果から、残留磁束密度が劣っている Sm-Fe-N ボンド磁石でもネオジウム焼結磁石と同等のトルクを出力できたといえる。

4. 減磁に関する検討

Fig. 12 に本検討で使用した磁石の $B-H$, $J-H$ 曲線を示す。ネオジウム焼結磁石と Sm-Fe-N ボンド磁石の保磁力 (H_0) を比較すると、1493 kA/m と 1763 kA/m であり、Sm-Fe-N ボンド磁石の H_0 が大きい。一方で、 $J-H$ 曲線が垂れ下がった曲線状であるため、 $J-H$ 曲線が直線状であるネオジウム焼結磁石よりも小さい外部磁界で磁石動作点が降下する恐れがある。そのため、モータ駆動時に磁石の不可逆減磁が生じていないか調べる必要がある。そこで本節では、Sm-Fe-N ボンド磁石の減磁特性について検討を行う⁶⁾⁷⁾。なお、上述の通り Sm-Fe-N ボンド磁石の減磁曲線は垂れ下がった曲線状となっており、クニック点が明確でない。したがって本検討では、クニック点より動作点が下がったことを判断指標とする不可逆減磁の検討とは異なり、外部磁界の影響でどれだけ磁束密度が低下したのかを評価する。ここで、定格電流である 20 A で検

討したときの検討方法を以下に述べる。まず、Fig. 13 に示すように、減磁が懸念される磁石端部の要素について、モータ駆動電流を流して外部磁界が発生したときの着磁方向磁束密度を算出し、磁石の動作点を求める。次いで、Fig. 14 に示す磁石温度が 24°C のときの Sm-Fe-N ボンド磁石の減磁曲線 (青太線) を用いて、減磁曲線上の $H=0$ における接線を引く (黒破線)。解析より得られた磁石の動作点は、減磁曲線上の点であるため、磁石が減磁すると、黒破線から離れた位置にプロットされる。最後に、通電時の磁石動作点を通り、黒破線と平行な直線を描き (赤細線)、 $H=0$ のときの黒破線と赤細線の差を残留磁束密度の低下と考え、着磁方向の減磁とみなす。なお、通電時の磁束密度ベクトルの向きは着磁方向以外の成分も含まれるため、磁石の減磁に関しては着磁方向のみの磁束密度を取り出して磁石の動作点とする。着磁方向の磁石の動作点は Fig. 15 に示す通電時の磁束密度ベクトルを用いて着磁方向成分の磁束密度を抽出する。

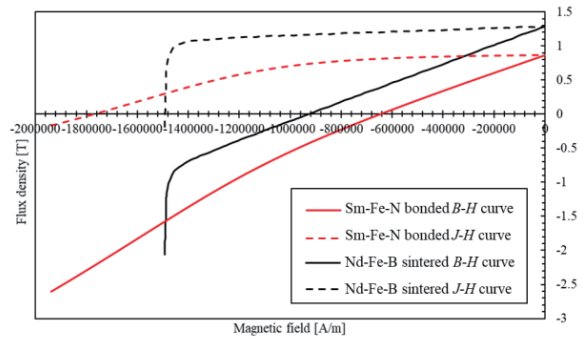


Fig. 12 demagnetization curve

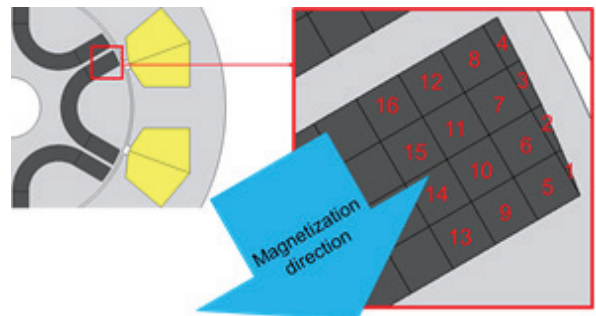


Fig. 13 Part analyzed for study on demagnetization.

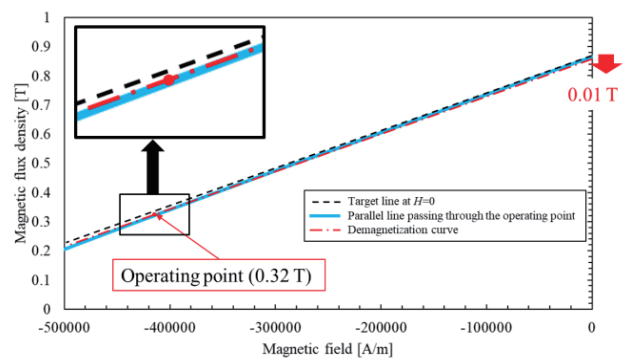


Fig. 14 Demagnetization characteristics in magnetization direction at 24 °C.

定格電流の 20 A 通電時に最も動作点磁束密度が減少した要素 5 では, Fig. 14 に示すように残留磁束密度の低下が約 0.01 T であることがわかる. この結果から定格電流を印加している場合, 減磁の影響はほとんどみられないと考えられる. 同様に, 定格電流の 3 倍である 60 A の大電流を印加した場合の減磁特性の検討結果を Fig. 16 に示す. この図より, 最も磁束密度が減少した要素 4 の残留磁束密度の低下が約 0.04 T であったことから, 大電流を印加した場合であっても, 減磁によるトルクの低下はごくわずかであると考えられる.

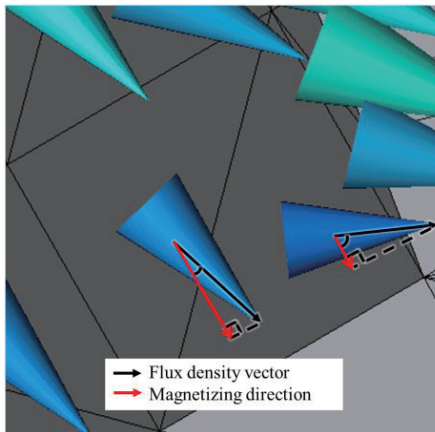


Fig. 15 Relation between two flux density vectors in magnetizing direction.

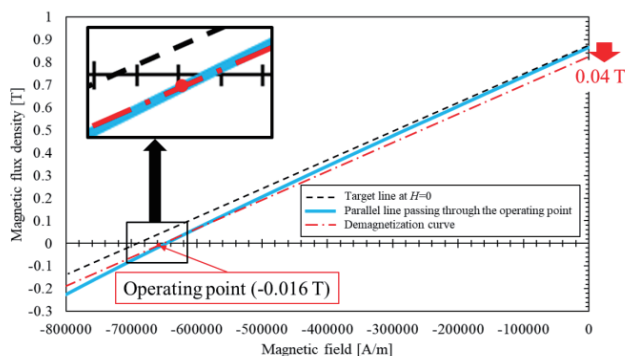


Fig. 16 Demagnetization characteristics when 60A was applied.

4. まとめ

本稿では, Dy フリーである Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたモータで, ネオジム焼結磁石を用いたモータに匹敵するトルク特性を目指し, 有限要素法を用いてトルク特性を算定した. 回転子の磁石配置を V 字型から U 字型に変更して磁石表面積の向上とフラックスバリア部の漏れ磁束を除去することで, Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたモータで, ネオジム焼結磁石を用いたモータに迫るトルクを出力できることが示された. また, 減磁に関する検討から, 使用した Sm-Fe-N ボンド磁石には, 減磁による影響はほとんどみられないことがわかった.

今後は, 現在製作途中の実機でのモータ特性を測定し, 本稿で得られた Sm-Fe-N ボンド磁石モータの効果を実証する予定である.

References

- 1) https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html
- 2) K. Machida et al: The Latest Technological Trend and Resource Strategy of Rare Earths, 13 (CMC Publishing Co., Ltd., Tokyo and Osaka, 2018)
- 3) Y. Tsukada, Y. Yoshida, N. Handa, and K. Tajima: *T. Magn. Soc. Jpn.*, **7**, 73 (2023).
- 4) T. Yanagisawa, Y. Yoshida and K. Tajima: *J. Magn. Soc. Jpn* **44**, 45 (2020).
- 5) M. Sagawa, M. Hamano, M. Hirabayashi: Eikyu Jisyaku Zairyo Kagaku to oyo (in Japanese), p.292 (Kabushikigaisha Agune Gijutu Center, Tokyo, 2007)
- 6) S. Morimoto, M.Sanada : Shoene Mortor No Genri to Sekkei (in Japanese), p.133, 134 (Kagaku Joho Syuppan Kabushikigaisha, Ibaraki, 2013)
- 7) D. Momma, Y. Yoshida and K. Tajima: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **40**, 115 (2016).

2023年10月31日受理, 2023年11月26日再受理, 2023年11月29日採録