Effect of Core Magnetic Saturation on Cogging Torque of Motor

S. Iwasa and C. Kaido

Kitakyushu National College of Technology, 5-20-1 Shii, Kokuraminami-ku, Kitakyushu 802-0985, Japan

This paper discusses what effects of magnetization saturation has on the cogging torques of 12-pole motors with 9-slot cores, using Nd-Fe-B ring magnets. The core flux density is changed with sintered, bonded and thermally demagnetized magnets. Cogging torques especially 36th harmonics, increase with the higher flux densities of the core at the teeth, and then magnetic saturation makes cogging torques larger. However, the harmonics of core flux densities are low although 36th cogging torques are related to the harmonics of core flux. Therefore, increasing cogging torques with magnetization saturations may be affected by the reduction in permeabilities due to magnetic saturations and the generation of core-flux density harmonics.

Key words: motor, cogging torque, core, magnetic saturation

モータのコギングトルクに及ぼす鉄心磁気飽和の影響

岩佐 心平・開道 力

北九州工業高等専門学校, 北九州市小倉南区 5-20-1 (〒802-0985)

1. 緒言

最近, 小型モータの用途が増え, モータの性能向上, 特に, 鉄損やコギングトルクの低減が求められている. 高トルク化のため, 希土類磁石が多くなり, 鉄心磁束密度の上昇で鉄損やコギングトルクが増加してきている¹⁾.

コギングトルクはトルク品質向上のため, 定格トルクの1%以下への低減要求は高く, 永久磁石の着磁分布や鉄心形状の最適化により, 低コギングトルク化が進められてきている.

このような背景において, モータの鉄損やコギングトルクの低減が数値解析などで検討されている²⁾. また, 実際のモータ鉄心には, 希土類磁石使用により鉄心が磁気飽和し, また鉄心加工により鉄心は劣化し, 鉄損やコギングトルクの増加を引き起こすことが報告されている³⁾.

しかし, 磁気飽和などによるコギングトルク増加について, 更に詳しい実測などの定量的な解析が必要であり, 実際のモータにおける低コギングトルク設計に結びつけるためには磁気飽和状態のモデリングの確立が必要である.

本報告では, モータの高性能化とモータ性能予測技術確立のために, 低磁束密度ではコギング低減対策が成されている12極9スロットモータを用いて, 界磁磁石を高エネルギー積の磁石に変えて鉄心を磁気飽和させることにより, コギングトルクの発生状況を定量的に調べたので報告する.

2. 実測

2.1 コギングトルクの測定

実験では, Fig.1 に示す12極9スロットのブラシレスDCモータを用いた.

回転子にはNd-Fe-Bリング磁石(内径20.7 mm, 厚さ1 mm, 幅6.2 mm)と1mm厚継鉄を用いた.

Nd-Fe-Bリング磁石は着磁磁束密度の高い焼結磁石と着磁磁束密度が低いボンド磁石の二種類用い, 鉄心の磁気飽

和状態から低磁束密度までの範囲でコギングトルクに及ぼす磁束密度の影響を調べた.

使用したボンド磁石は, Fig.1 のモータ状態でコギングトルクの低減が検討され, 着磁分布が最適化されている. 一方, 焼結磁石は保磁力が大きいので, サイズと極数により着磁分布の最適化が難しく着磁分布の最適化は成されていない.

更に, 鉄心の磁束密度の影響を詳細に調べるため, 焼結磁石とボンド磁石共に熱減磁させて着磁磁束密度を変化させ, 鉄心磁束密度を細かく変化させた. 鉄心磁束密度を磁石ごとに歯部における磁束密度最大値で示したものがTable 1 である.

固定子には無方向性電磁鋼板(0.35 mm厚, 3 wt%Si, 歪取焼鈍なし)の打抜加工鉄心(外径20.2 mm, 内径8.2 mm, 積厚4.9 mm 継鉄幅約1.5 mm, 歯幅1.6 mm, スロット閉口角10°, 丸平カシメ3個, ピン溝1個)35A250⁴⁾を用いた.

コギングトルク, 誘起起電力の両測定を行う際は Fig.2 のようにモータ状態にして行った.

モータ(駆動電流なし)の回転子を外部5相ステッピングモータのマイクロステップ駆動で一回転200秒と非常に低い速度で回転させながら, 軸受け部分から出ているアームとひずみゲージのアームを垂直に設置することで回転子に誘起されるトルクを測定した. コギングトルクはこの誘起トルクの波形変化より求めた.

今回使った回転子の中で, 最大の着磁磁束密度である焼結磁石S1と最小の着磁磁束密度であるボンド磁石B10の場合についてコギングトルクを比較したものが Fig.3 である. 非常に大きい差があり全体的に焼結磁石はボンド磁石よりもコギングトルクが大きくなっていた. この理由としてボンド磁石を用いたモータはコギングトルク低減が既になされた量産品であると共に, 着磁磁束密度が低く磁気飽和の影響が小さいためと考えられる.

(1) Torque measuring system

(2) Rotor

(3) Core

(4) How to measure induced torque.

Fig. 1 Configuration of rotor and stator core in evaluated motor.

Table 1 Flux density of core at teeth.

Bonded magnetic rotor			
No.	$B_{MAX}[T]$	No.	$B_{MAX}[T]$
B1	1.03	B6	0.95
B2	0.99	B7	0.93
B3	0.98	B8	0.84
B4	0.96	B9	0.77
B5	0.96	B10	0.68
Sintered magnetic rotor			
No.	$B_{MAX}[T]$	No.	$B_{MAX}[T]$
S1	1.63	S5	0.98
S2	1.60	S6	0.95
S3	1.60	S7	0.87
S4	1.29	S8	0.87

Fig. 2 Setup for torque measurements of evaluated motor.

2.2 誘起起電力の測定

誘起起電力波形をコギングトルクと磁気飽和の関係を検討するため測定した。2.1 で使用した Fig.1 に示す 12 極 9 スロットのブラシレス DC モータにおいて, Table.1 に示した各焼結磁石の回転子と各ボンド磁石の回転子について, 固定子鉄心に 3 wt%Si 無方向性電磁鋼板を用い, その鉄心歯部の誘起起電力波形を測定した。この誘起起電力誘波形より, 鉄心の最大磁束密度と磁気飽和で生じる磁束密度の高調波成分を求めた。

誘起起電力は, 外部からスピンドルモータで回路スピードを調整し 6684 r/min の速度で回転させ, 固定子鉄心の歯, 3 箇所 (3 スロットごとに 10 回巻き) に巻いたサーチコイルを用いて測定した。このようにして回転子磁石別誘起起電力を実測した。誘起起電力から鉄心磁束密度を求めた。

鉄心磁束密度に関しては Table.1 に示しているように磁束密度最大の磁石と磁束密度最小の磁石では Fig.4 のように差があった。

Fig. 3 Cogging torques compared with maximum and minimum flux densities.

Fig. 4 Flux density waveform compared with maximum and minimum flux densities.

3. コギングトルクの高調波解析

本実験の目的としては回転子磁石別コギングトルクと誘起電力を実測し、基本波や高調波を求めることで各々の次数に関連した規則性をみだし、それらを数値化しグラフ化することでコギングトルクと誘起起電力の関係性を把握することにある。

3.1 コギングトルクの高調波次数

ここでは Fig.3 に示したコギングトルクから高調波次数ごとの振幅を示した。基本波周波数は固定子回転数に対応した周波数とし、使用した永久磁石は 12 極なので、着磁磁束密度の基本波は 6 次となる。Fig.5, Fig.6 には回転子磁石別にまとめグラフ化したものである。

グラフの縦軸はボンド磁石が 0.25 mNm に対し、焼結磁石はコギングトルクが大きかったため、ボンド磁石の 10 倍の 2.5 mNm になっている。

次数分析結果より、ボンド磁石は 12th, 18th, 24th, 27th, 36th が大きく発生しており、焼結磁石でも同じ次数が現れている。

Fig. 5 Analysis of order number of induced torque in bonded magnet.

Fig. 6 Analysis of order number of induced torque in sintered magnet.

しかし、焼結磁石に比べボンド磁石ではコギングトルクがあまり出していない。ボンド磁石は磁束密度が低いいためコギングトルクは小さいことが予想されるが、このボンド磁石を用いたモータは実際に製品モータに使用されコギングトルク低減がなされているためコギングトルクが小さい。

また、焼結磁石は磁束密度が高く、コギングトルクが大きくなっている。

3.2 誘起起電力の高調波次数

Fig.5, Fig.6 よりコギングトルクが出ていた次数について磁束密度高調波次数の振幅を調べた。

Fig.7, Fig.8 から回転子磁石別での高調波次数分析結果によって、ボンド磁石、焼結磁石ともに 12th, 18th, 24th, 27th, 36th での振幅が出ていることが分かる。

このことから次の章では各次数について回転子磁石とコギングトルクの関係性についての検討を行う。

Fig. 7 Analysis of order number of flux density. (bonded magnet)

Fig. 8 Analysis of order number of flux density.
(sintered magnet)

4. 次数の関連性

誘起起電力の次数分析結果 (Fig.7, Fig8) で分かったように次数ごとの振幅とコギングトルクの関係性を把握するためグラフ化してみる。

4.1 回転子磁石別コギングトルクの分析

ボンド磁石でのコギングトルク分析を Fig.9, 焼結磁石でのコギングトルク分析を Fig.10 に示す。

グラフの縦軸はボンド磁石が 0.25 mNm に対し、焼結磁石はボンド磁石の 10 倍の 2.5 mNm になっている。

ボンド磁石では Fig.9 を見るとわかるように 12th がコギングトルクの振幅が大きくなっていることが分かる。これは鉄心におけるかしめ部歪の影響であることが既に示されている³⁾。

焼結磁石では Fig.10 より 36th でのコギングトルクが他の次数に比べ非常に大きくなっていることがわかる。これは鉄心磁束密度が高く、着磁次数(12 極)とスロット数(9 スロット)から生じるコギングトルクの最小公倍数次数である基本次数が現れている。

4.2 コギングトルクと磁束密度の関係性

このように、鉄心磁束密度が高くなると 36th のコギングトルクが大きくなっているのので、36th コギングトルクに關係する鉄心磁束密度次数 36th 成分とコギングトルク 36th 成分の關係について調べてみた。その結果を Fig.11, Fig.12 に示す。

ボンド磁石では Fig.11 より、36th コギングトルクと磁束密度高調波成分 36th との相関は殆どない。これは磁束密度の 36th 成分も 0.01T 以下であり、鉄心が磁気飽和していないためであり、更に、実機モータで前述のように鉄心形状調整や着磁分布調整などのコギング低減対策がなされているためと考えられる。

焼結磁石では Fig.12 より磁気飽和で 0.01T 以上の磁束密度 36th 成分が発生し、コギングトルク 36th と磁束密度 36th 成分には強い相関があることが明らかであり、鉄心の磁気飽和により、磁束密度高調波成分 36th が発生しコギングトルクが大きくなったことがわかる。

以上より、モータの回転子磁石に希土類焼結磁石を用いると、コギングトルクが大きくなった。これは固定子鉄心の磁気飽和の影響と推察される。しかし、鉄心磁束密度に含まれる磁気飽和による磁束密度歪み、すなわち高調波成分は多少大きくなったが、予想ほど大きくなかった。これは鉄心が磁気飽和に近づいても、回転子と固定子間の空隙や永久磁石の影響が強く、磁石のパーミアンス係数にあまり影響しなかったため、予想ほど高調波は発生しなかったと考えられる。従って、コギングトルクの発生原因は鉄心の磁気飽和による鉄心の非線形特性の影響だけでは説明出来ない。

Fig. 9 Harmonics of cogging torque (bonded magnet).

Fig. 10 Harmonics of cogging torque.
(sintered magnet)

Fig. 11 Relationship between 36th harmonics of cogging torque and harmonics 36th harmonics of core flux density in bonded magnet motors.

Fig. 12 Relationship between 36th harmonics of cogging torque and harmonics 36th harmonics of core flux density in sintered magnet motors.

Fig. 13 Relationship between 36th harmonics of cogging torque and maximum flux density in bonded magnet and sintered magnet motors.

そこで、他のコギングトルク発生原因を考えてみた。
36th コギングトルクの発生は鉄心磁気飽和による磁束高調波発生だけではなく、鉄心磁気飽和による鉄心透磁率の低減も原因の一つと推察される。

そこで、コギングトルクと鉄心の最大磁束密度の関係について調べてみた。その結果を Fig.13 に示した。この結果により、鉄心の最大磁束密度の影響が明確に現れていることがわかる。従って、1 T 以下でコギングトルク低減の鉄心形状調整されていても、磁気飽和により透磁率が低下し、磁気回路的に調整されていたコギング低減条件から外れたためコギングトルクが大きくなったと考えられる。

実際に、鉄心磁気飽和による透磁率変化を調べてみた。Fig.14 より鉄心素材 35A250 の比透磁率は 1 T で 10000 程度であるのに対して、1.6 T では 500 以下であり、一桁以上の低下になる。使用したモータにおいて、磁石厚さ 1 mm に対して、空隙 0.25 mm になっている。一方、磁石厚さ 1 mm に対して、鉄心磁路長約 5 mm であり、空隙換算の実効磁路長は 1 T では約 $1 \mu\text{m}$ 以下になり、パーミアンス係数 4 に殆ど影響しないが、1.6 T では空隙換算の実効磁路長は 0.01 mm となり、パーミアンス係数に約 4 % 影響をあたえるので、コギングトルクに鉄心が影響する。

今回、モータのコギングトルクと鉄心磁気飽和の関係を鉄心歯部の磁束密度で検討してみた。モータ内の磁束の流れとして Fig.15 のように今回検討した $\Phi 1$ 以外に鉄心歯先を流れる $\Phi 2$ も考慮する必要がある。今後は回転子と固定子間の空隙が狭いため困難である $\Phi 2$ の測定を検討し、鉄心外形を変えて $\Phi 2$ を変化させ、 $\Phi 2$ の影響を調べることも必要と考える。また、鉄心素材に、電磁鋼板より飽和磁化が高い材料(FeCo 材など)を用いて、 $\Phi 1$ の影響についても検討する必要がある。

Fig. 14 Effect of flux density on permeability [35A250].

Fig. 15 Flow of flux in magnetic induction.

5. 結論

今回、着磁磁束密度の異なる永久磁石と着磁磁束を変えてコギングトルクを測定し、鉄心磁気飽和によるコギングトルク増大の原因を調べた。焼結磁石のように着磁磁束密度が高いと、コギングが大きく特に 36th が大きかった。着磁方法による影響も出ているようであるが、鉄心磁気飽和の影響が強いと考えられる。

そこで、鉄心磁束密度の高周波成分と 36th コギングの高周波成分を調べたところ、磁気飽和により磁束密度高調波は大きくなり、コギングトルク 36th 成分の増加と相関が見られた。しかし、磁気飽和によるコギングトルクの増大現象を十分に説明できるほど、高調波の発生は小さくなかった。従って、コギングトルク発生の他の要因として、鉄心磁気飽和による透磁率の低下がもう一つの要因と考えられる。また、鉄心歯先のみを流れる磁束 $\Phi 2$ の影響も考

えられるので、これらの要因についても検討する予定である。

今後は希土類磁石により鉄心が磁気飽和しコギングトルクは増大し、モータの高出力化とコギングトルクの低減を合わせ行うことが求められる。磁気飽和は非線形挙動であり、磁石により発生する磁束密度に加えて、電機子電流による磁束密度も加わると、鉄心透磁率も変化するので、モータ駆動状態でコギングトルクも増大することが考えられ、モータの高出力化とコギングトルクの低減を両立する為には今後の詳細な研究が必要となると予想する。

謝辞 本研究を推進するにあたり、ソニー株式会社の宍戸祐司氏、金子祥子氏、橋本寿雄氏、木村徹氏および日立金属株式会社の谷川茂樹氏にご協力を賜りましたことを深く感謝致します。

References

- 1) C. Kaido, J. Yamasaki, K. Hanzawa, S. Kaneko, T. Hashimoto, T. Kimura, and Y. Shishido : "Core Material Parameter Analysis of Torque Characteristics of Small Motor", *IEEE Trans. IA*, Vol.126-D, No.12, (2006) pp.1708 -1711.
- 2) IEEJ Technical Report No.855(2001), pp.31-37.
- 3) C. Kaido, J. Yamasaki, H. Mogi, T. Kubota, S. Kaneko, Y. Shishido, and S. Kitagawa: "Discussion on Core Dependence of Motor Cogging Torque", *The Papers of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan*, RM-07-58(2007)
- 4) Japanese Industrial Standard JIS C 2552:2000, "Non-oriented Magnetic Steel Sheet and Strip", (2000).
- 5) Nippon Steel Corporation Catalog Cat. No.DE 106, "HILITECORE, HOMECORE, Non-oriented Electrical Steel Sheets", (1999) p.27.

2010年10月20日受理, 2011年1月31日再受理, 2011年3月3日採録