フェライト磁石モータの低温拘束における特性変化

Influence of Armature Locking at Low Temperature
on the Properties of a Ferrite Magnet Motor

加藤哲男・大寄久史・井上道夫・水鳥勝己

大同工業大学, 名古屋市南区大同町 2-21 (〒457)

T. Kato, H. Ohsaki, M. Inoue, and K. Mizutori

Daido Institute of Technology, 2-21, Daido-cho, Minami-ku, Nagoya 457

A decline in properties of a ferrite magnet motor was studied in the case of a motor whose armature rotation was constricted at low temperature. The decline increased as the coercive force H_c of the field magnet decreased. This phenomenon corresponds to the decrease in the magnetic flux density caused by changes in the demagnetizing curve at low temperature and in the permeance coefficient of the demagnetizing field under armature locking. The measured results for the starting torque corresponded closely calculations based on the magnetic properties of the field magnets. When the ferrite magnet motor is used at low temperature, the choice of magnet is very important.

Key words: ferrite magnet, ferrite magnet motor, low-temperature demagnetizing, armature lock

1. はじめに

フェライト磁石モータは状況により、低温で特性が劣化するという現象が起こる場合がある。これは、フェライト磁石の磁気特性が温度によって変化しやすく、特にパーミアンズ係数が小さいところでは低温で不可逆の減磁を起こす^{1), 2)}という特性があることによっている。そのため、広く一般に使用されている小型直流フェライト磁石モータにおいて、特に低温で電機子が拘束された場合に予想されるモータ特性の変化について磁石特性との関連を調べ、その状態について明らかにすることとした。

2. 試料および実験方法

実験に使用したモータの構造、寸法を Fig. 1 に、その仕様を Table 1 に示す。このモータは実用されている自動車用ワイパーのモータを一部改造して使用した。界磁用磁石は異方性ストロンチウムフェライト磁石³⁾を使用した。その種類と磁気特性を Table 2 に示す。No. 1 から No. 4 の順に残留磁束密度は

Table 1 Specification of the motor

Armature resistance : R_a	1.3 [Ω]
Diameter of conductive wire	0.05 [mm]
Number of wire turns	29 [turns] $\times$ 12 [coils]
Number of armature conductors : z	696
Number of pair-poles : p	1
Number of parallel circuit : a	2

小さくなり、保磁力は高くなっている。これらの磁気特性は界磁用磁石から切り出した角形の磁石により測定した。界磁用磁石の着磁はモータに磁石を組み込んだ後、一体着磁を行った。初めに、常温 (20°C) において磁束計を用いて閉路磁束を測定し、その磁束密度よりパーミアンズ係数を求めた。また、電機子巻線のない電機子にサーチコイルを巻き有効磁束を測定し、閉路磁束との関係から漏洩係数を求めた。モータの冷却、拘束は温度をそれぞれ 0°C, -30°C, -50°C, -70°C の 4 段階とし、それぞれの温度で保持したまま電機子を拘束し、12 V もしくは 18 V の電圧を加えることにより行った。その後常温 (20°C) に戻し、拘束の時と同じ電圧においてモータ特性を測定することにより、その特性変化を調べた。さらに界磁用磁石の磁束測定を行って磁束変化を調べることにより、低温拘束によるモータ

Fig. 1 Structure of the motor.

Fig. 2 Relations between the torque and the number of rotations, and between the armature current and the output electric power (cooling temperature, -50 [°C]; applied voltage, 18 [V]).

タ特性への影響について調べ検討を行った。

3. 実験結果および考察

まず使用した磁石それぞれについて、各条件ごとにモータ特性を測定した。その一例を Fig. 2 に示す。この図は -50°C で 18V の電圧を印加し拘束を受けたモータの常温でのトルク特性である。トルクに対する回転数および電機子電流の関係は一般的な直流モータの特性として知られるようにどちらも直線的となっている。このうちモータ特性の変化の指針として起動トルクを取り上げ、以下の考察を行った。なお、起動トルクについてはトルクと回転数の関係より外挿して求めた値を取った。なお 12 V 印加の場合でも測定電圧の低下により全体的にトルクが減少するほかは同様の傾向となった。また常温におけるモータ特性については低温で拘束された電圧と同じ電圧において測定を行っている。

初めに低温での拘束により生ずるモータ特性の劣化について調べる測定を行った。Fig. 3 は常温 (30°C) において測定した冷却温度と起動トルクの関係を示している。起動トルクは測定電圧 18 V に比べ 12 V の方が全体的に低くなっているが、まず常温 (20°C) における起動トルクは界磁磁石の残留磁束密度が高いほど大きくなっている。また、いずれも、全体として冷却温度が下がるにつれ起動トルクは減少しており、18 V の場合

Table 2 Types of specimen and thier magnetic properties

Number	Name used by Daido Steel Co., Ltd.	Residual magnetic flux density Br [G]	B-coercive force bHc [Oe]	I-coercive force iHc [Oe]	Maximum energy product BHmax [MGoe]
1	F-29	4212	3024	3094	4.26
2	F-32	4008	3395	3514	3.87
3	F-33	3900	3556	3843	3.70
4	F-30	3556	3340	5180	3.15

Fig. 3 Relation between the temperature reduction and the starting torque.

の方が 12 V の場合よりもその変化は顕著に現れている。このうち 18 V の場合について見ると最も起動トルクの大きい No. 1 の界磁磁石において他のどの磁石を用いたものよりも 70°C での冷却、拘束をすることによる起動トルクの減少が大きくなった。Fig. 4 はこれより求めた冷却温度と常温時からの起動トルクの減少率を示す。最も保磁力の低い No. 1 の磁石において減少率が大きく、冷却温度 -70°C 、電圧 18 V の場合で最大 16% の減少率を示した。保磁力が高くなるに従って、ほぼ起動トルクの減少率も減少している。電圧 12 V と 18 V では電圧 18 V の方が比較的高い冷却温度で減少が起こっている。また電圧 18 V の方が減少率が大きくなっている。

これらの結果について各々の条件で冷却、拘束したモータの界磁用磁石の磁束を測定した結果から考察してみる。

Fig. 5 に低温で拘束された場合における磁石の動作点の変化についての概念図を示す。常温と低温の二つの減磁曲線が示してある。フェライト磁石は温度が下がることにより、このように残留磁束密度は上昇し、保磁力は低下する。これは温度に対してどちらもほぼ一定の割合で起こっている。通常のモータ

Fig. 4 Relation between the temperature reduction and the percentage decrease in the starting torque.

Fig. 5 Transferring the operating point by locking the armature at low temperature.

などの場合には、磁気回路は通常 O_1P 線のようなパーミアンス係数の高い値が取られているが常温では回転子の拘束による減磁界が加わっても P_1Q_1 を往復するのみでほとんど問題は起こらない。また図において磁石は冷却されると動作点が P_1 から P_2 に移るが、このまま常温に戻した場合には冷却時と逆の過程を通して P_2 から P_1 に戻るためこの場合も減磁はほとんど起こ

Fig. 6 Changes in the demagnetizing curves and permeance coefficient caused by reducing the temperature.

Fig. 7 Changes in the closed flux caused by reducing the temperature.

Fig. 8 Relation between the temperature reduction and the demagnetization percentage.

らない。これに対し冷却時にモータに通電したまま電機子が拘束されると、電機子による減磁界の影響を受けてパーミアンス係数が O_2Q のように変化するため状況が異なってくる。 P_2 にあった動作点は低温時の減磁曲線をたどって Q_2 に移る。その後モータへの通電をやめると動作点は P_3 に戻る。さらに低温から常温に戻すことにより、温度上昇に伴い、 P_1 から P_2 に移るのとはほぼ同じ割合で、 P_3 から P_4 に移る。このような一連の過程で B_1 から B_4 に至るような磁束密度の低下が起こることになる。

Fig. 6 は実験に使用したそれぞれの磁石の冷却温度による減磁曲線の変化について測定した結果を示す。併せて 12 [V] の電圧を印加したまま拘束された場合のパーミアンス係数の移行の状況を示した。どちらも冷却温度は $0 \sim 70^\circ\text{C}$ の各温度に対応している。モータを低温に曝することにより巻線の抵抗率が減少するため電機子電流が増加するので、結果として低温になるほど減磁界の強さが大きくなっている。18 V の電圧を印加した場合も相対的に減磁界の強さが大きくなり、ほぼ同様の傾向を示している。Fig. 6 において、No. 4 の磁石ではほとんど低温域磁が起こらないことを伺うことができる。この場合 H_c は No. 3 磁石に比べて必ずしも高くはないが H_c が高く、そのため減磁曲線の変曲点が下がり、低温における減磁曲線は直線的な部分だけの变化だけになっていることが利いている。No. 3, No. 2 となるに従い、逐次低温減磁が起こるようになり、最も残留磁束密度が高く保磁力の低い No. 1 の磁石において、最も低温減磁が起こりやすくなっていることが理解できる。

Fig. 7 は、このように低温で拘束された場合における閉路磁束について測定した結果である。図はそれぞれの温度で冷却し拘束して電圧を印加した後、常温に戻したときの変化を示し

Fig. 9 Relation between the effective magnetic flux and the starting torque.

ている。どの磁石においても低温になるほど、また拘束時印加電圧が高いほど磁束は低下しているが、減磁は保磁力 iH_c が低いほど大きくなっている。そのうち No. 1 磁石に注目すると、電圧 12 V では -30°C 付近から減少し始めるのに対し、電圧 18 V では 0°C ですでに減磁が始まっており、他の磁石においても拘束時印加電圧が高い方が磁束の減少量は大きい。最も保磁力 iH_c の高い No. 4 の磁石について注目してみると、拘束時印加電圧 12 V の場合、 -50°C までほとんど減磁が認められない。拘束時印加電圧 18 V においても -30°C までほとんど減磁は認められず、しかも -50°C において No. 2, No. 3 磁石の磁束を上回るようになっている。

なお有効磁束についても測定を行っている。その結果は閉路磁束の変化と良い対応を示した変化をしており、漏洩係数は材質ごとに多少の差は見られるが、1.115~1.177 となった。

Fig. 8 に、閉路磁束の測定結果から求めた各温度に対する常温時からの減磁率を示す。最も保磁力 iH_c の低い No. 1 磁石は他のどの材質よりも減磁の割合が大きく、拘束時印加電圧 12 V では -30°C あたりから減磁率が大きくなっていくが 18 V 時はほぼ一定の割合で減少し、その割合も 12 V 印加時の場合よりも大きくなっている。また No. 2, No. 3 磁石においてもほぼ同様の傾向を示しているが、減磁の始まる温度が低温側に移行し減磁の割合も減少している。No. 4 磁石においては他のどれよりも減磁の割合がかなり小さく、冷却温度 -70°C 拘束時印加電圧 18 V の場合においても 5% 程度の減少を示すにとどまっている。

このような永久磁石の拘束低温減磁によるモータ特性への影響について、有効磁束を用いて下記に示す理論式^{4), 5)}によって、トルクおよび回転数の計算を行った。

トルク T と電機子電流 I_a との関係

$$T = K_T I_a \quad [\text{kg} \cdot \text{cm}]$$

ただし、トルク定数

$$K_T = \frac{pz}{\pi a} \phi \cdot \frac{10^{-8} \times 10^2}{9.8} \quad [\text{kg} \cdot \text{cm/A}]$$

ここで

I_a : 電機子電流 [A]

p : 極対数

z : 電機子導体数

a : 並列回路数

ϕ : 有効磁束 [Maxwell]

このようにして有効磁束および起動トルクとの関係を求め、実験結果との比較を行った。

Fig. 9 は有効磁束と起動トルクの関係を示す。どの磁石においても計算値と実験値は比較的良好に一致する傾向を示した。保磁力 iH_c の最も低い No. 1 磁石では低温拘束による有効磁束の変化の割合が他に比べて大きいので起動トルクの変化幅も大きく低温拘束減磁による影響が大きいことを示している。No. 2 および No. 3 磁石では順にその変化の大きさが減少している。最も保磁力 iH_c の高い No. 4 磁石は低温拘束による有効磁束の変化が少なく、そのため起動トルクの変化量も少なく低温拘束

減磁の影響が最も少ないことを示している。

以上のようにフェライト磁石モータにおける低温拘束による特性の劣化は磁石の低温減磁によって生じており、磁石の保磁力に依存している現象が明らかになった。この場合磁石の保磁力は単に iH_c の大きさばかりでなく iH_c の高いことが低温拘束減磁を小さくする効果を及ぼしている。

4. 総括および結言

実用機を改造した小型フェライト磁石モータについて、界磁用磁石として 4 種の異なる異方性ストロンチウムフェライト磁石を使用し、その冷却、拘束によるモータ特性と、磁石特性の変化を測定し、両者の関係について調べる実験研究を行った。その結果をまとめると次のとおりである。

(1) モータが冷却された状態で電圧を印加し、電機子の回転が拘束されると、モータの起動トルクは減少し、特性の劣化が起こる現象がある。これは、界磁用磁石の減磁に起因している。

(2) 永久磁石の磁束密度は低温状態で電圧を印加し電機子が拘束されることにより減少する。これは減磁曲線およびパーミアンス係数の変化に対応しており、冷却温度が低くなるほど、また電動機の拘束時印加電圧が高いほど減磁量は大きくなる。そのうち最も保磁力 iH_c の低い No. 1 磁石は大きな減磁を示した。逆に保磁力の高い No. 4 磁石については減磁量が最も少なく、No. 2 および No. 3 磁石はその中間の変化の傾向を示した。

(3) モータのトルクの測定値は永久磁石の特性測定の結果から理論式により計算した結果と比較的良好に一致した。

(4) 以上のようにフェライト磁石モータの低温拘束による特性の劣化が磁石の低温減磁によって起こる状況を明らかにすることができた。

界磁用磁石はモータが曝される低温の状態に応じ、そのパーミアンス係数とともに磁石特性の選定をすることが重要である。

謝 辞 本研究に当たり実験用のモータの試作にご協力を頂いた的場電機(株)、および異方性ストロンチウムフェライト磁石の試作にご協力頂いた大同特殊鋼(株)磁材事業部の方々に深く感謝申し上げる。また実験にご協力頂いた大同特殊鋼(株)技術開発研究所、古谷嵩司主任研究員、ならびに大同工業大学電気工学科、尾畑智光氏に厚く感謝申し上げる。

文 献

- 1) 西, 名久井: 日特技報, 6, 60 (1970).
- 2) 加藤, 緒方, 小川, 大寄: 大同工業大学紀要, 29, 137 (1993).
- 3) 安保, 古谷: 電気製鋼, 56, 172 (1985).
- 4) 電気学会精密小形電動機調査専門委員会: 小形モータ (コロナ社, 1991).
- 5) 東芝小型モータ研究会: 制御用モータ技術活用マニュアル (総合電子出版社, 1987).

1994 年 10 月 12 日受理, 1995 年 1 月 20 日採録