Manufacturing Error Conditions Causing Cogging Torque Occurring in Stator in Permanent Magnet Motors

Akihiro Daikoku Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Masatsugu Nakano Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Shinichi Yamaguchi Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Yukari Toide Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Haruyuki Kometani Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Keywords: PM motor, cogging torque, manufacturing error, asymmetry, pole/slot ratio, permeance distribution

In this paper we study the condition that the cogging torque caused by manufacturing errors occurs in surface-mounted permanent magnet synchronous motors (SPMSM). Manufacturing errors mean the difference between the ideal condition at the motor design phase and the actual condition in mass production. In particular, errors can be classified into the distortion of the magnetic core, the degradation of magnetic properties, the lack of uniformity of the permanent magnets, etc. In this paper we examine manufacturing errors that occur in stator. They are expressed as the asymmetric spatial distribution of permeance, that is, the component of the spatial distribution function whose number of spatial pulsations N is not equal to the multiple of the stator slot number Z_{st} . In this case the cogging torque component, which has $k \cdot p$ times pulsations per revolution, has generation possibilities, where p is the number of poles and k is a positive integer. We derive the fulfillment requirements for the spatial pulsation number (= spatial mode) N of the asymmetric permeance distribution; that is, N should fulfill one of the three relational expressions as follows:

$$N = k \cdot p, \quad N = \pm 2k \cdot p - i_1 \cdot Z_{st}, \quad \text{or} \quad N = i_1 \cdot Z_{st} \pm 2k \cdot p,$$

where i_1 is a nonnegative integer.

From the relational expressions shown above, we presume that the relationship between the manufacturing errors and the cogging torque characteristics is ruled by the ratio of the number of poles and the number of slots (= pole/slot ratio). In this paper, we concretely show the relationship between the permeance spatial distribution and the cogging torque pulsation number to seven typical motor specifications, each of which has a different pole/slot ratio. The pole/slot ratios are 2 : 3, 4 : 3, 8 : 9, 10 : 9, 5 : 6, 1 : 3, and 2 : 9. Furthermore, we discuss the features of the cogging torque component generated for the seven kinds of motors mentioned above.

In order to validate the relational expressions shown above, we conducted a numerical simulation using finite element analysis. Fig. 1 shows the cross-section of two of the seven verification motors; one has 8 poles and 12 slots drawn as (a), and the other has 8 poles and 9 slots drawn as (b). The pole/slot ratios are 2 : 3 and 8 : 9 respectively. Distortions are added to the inner surface of the stator magnetic core cylinder as a manufacturing error factor. The spatial pulsation number of the distortion may be any of 1 to 15 and the distortion amplitude is set to 5% of the air-gap. Fig. 2 shows an example of FEM calculation results, which indicates the cogging torque components analyzed by DFT. Three cases are analyzed; the first is not distorted, the second has distortion of spatial mode $N = 4$, and the third has distortion of spatial mode $N = 8$.

Different cogging torque components can be observed according to the motor specifications or the spatial mode of distortion. The same kind of analysis was performed on each of seven motors and the results closely agreed with the results calculated by the relational expressions shown above.

Fig. 1. Cross section of the verification motor

(a) 8 pole 12 slot model

(b) 8 pole 9 slot model

Fig. 2. Analyzed results of cogging torque with/without distortion

PM モータの固定子製造誤差に起因する コギングトルクの発生条件

正員 大穀 晃裕* 正員 中野 正嗣*
正員 山口 信一* 正員 都出結花利*
正員 米谷 晴之*

Manufacturing Error Conditions Causing Cogging Torque Occurring in Stator in Permanent Magnet Motors

Akihiro Daikoku*, Member, Masatsugu Nakano*, Member, Shinichi Yamaguchi*, Member,
Yukari Toide*, Member, Haruyuki Kometani*, Member

In this paper we study the condition that the cogging torque occurs, that is caused by manufacturing errors in the stator of PM motors. Manufacturing errors can be classified into the distortion of the magnetic core, the degradation of magnetic properties etc. They are expressed as the asymmetric spatial distribution of permeance, that is, the component of the spatial distribution function whose number of spatial pulsations is not equal to the multiple of the stator slot number. The overviews of this paper are as follows. (1) We derive the relational expression between the spatial pulsation number of the asymmetric component of the permeance distribution function and the pulsation number of cogging torque per revolution. (2) Examples are shown for seven typical motor specifications, each of which has different pole/slot ratio. (3) We conduct finite element analysis for the seven typical motors. The stator cores were distorted and the spatial order of distortion was set to the parameter. The analyzed pulsation number of cogging torque agreed well with the theoretical solutions.

キーワード：PM モータ，コギングトルク，製造誤差，非対称，極数／スロット数比，パーミアンス分布

Keywords: PM motor, cogging torque, manufacturing error, asymmetry, pole/slot ratio, permeance distribution

1. はじめに

産業用や車載用などの分野でサーボ用途に使用される永久磁石モータ（以後、PM モータ）に対し、位置決め精度向上や騒音・振動低減の観点からコギングトルク低減への厳しい要求がある^{(1)~(3)}。コギングトルクはモータ内部の磁気エネルギーが回転子位置によって変化するために生じるものであり、磁気エネルギーの総和を回転子位置で偏微分することで求められる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。コギングトルクを低減するには極数とスロット数の適切な選定（多極化，分数スロット化，極数とスロット数の比の選定など）が有効であるほか，ティースや永久磁石の形状の工夫，さらにはスキューや補助溝などの手法も知られており^{(4)~(6)}，これらの設計手法により理想的にはほぼ零にまで低減できる。

ところが量産時のモータにおいては，形状誤差や磁石特

性のばらつき，鉄心磁気特性の不均一性といった，設計段階の理想状態にはない様々な製造誤差要因により想定と異なる脈動数成分のコギングトルクが発生することがある。設計諸元によっては誤差要因により生じたコギングトルク成分の脈動振幅が設計時に想定された成分の振幅よりも大きくなることもあり，設計や工程の見直しが必要となるなど，その影響も大きいものとなる。こういった誤差要因はモータ性能向上の面からは完全に排除するのが理想であるが，一般にコスト増大につながるため，量産時にはある範囲でこれを許容する必要がある。この際，誤差要因とコギングトルクとの相関を正しく評価し，影響度に応じて誤差を許容することが必要となる。

各種誤差要因に対する研究報告事例には，分割鉄心構造の影響も含め固定子の歪や偏心などの形状精度の影響を検討した報告^{(7)~(9)}や，回転子側の様々な誤差要因に関する影響度合いを評価した報告⁽¹⁰⁾，鉄心材料の磁気異方性や応力による磁気特性劣化の影響を検討した報告^{(11)~(14)}などがある。一方，モータ内部でのパーミアンス及び起磁力の分布を周方向位置及び回転子の回転角度の関数として表記し，

* 三菱電機（株）

〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

これを用いてモータ内部磁気エネルギーないしモータ特性を算出する報告がなされている⁽⁴⁾⁽¹⁵⁾。これを拡張し、誤差要因も含めた検討を行うことで、種々の設計仕様に対し誤差要因の空間分布状況とコギングトルク特性の関係を把握できれば、コギングトルクに対する量産時のロバスト性を含めたモータ設計が可能となり産業上有用である。

本論文ではまず、モータ内部の磁気エネルギー分布に基づいてコギングトルクにつながる製造誤差要因の空間分布条件を導く⁽¹⁶⁾。検討対象は表面磁石形永久磁石モータ (SPMSM) とする。誤差要因としては固定子側の因子を取り上げ、これをパーミアンス分布として扱う。次に、極数とスロット数の比 (以後、極数/スロット数比と呼ぶ) が異なる代表的な種々の設計仕様に対しコギングトルクが発生するための誤差要因の空間分布条件を具体的に示し、傾向の違いを論じる。さらに上述の各種仕様に対し固定子内径に与える歪の形状を種々変更して磁界解析を行い、歪形状と発生するコギングトルクの脈動数との関係から先に示した空間分布条件の妥当性を検証する。

2. モータ内部の磁気エネルギーとコギングトルク発生的一般条件⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾

この章では、PM モータに蓄えられた磁気エネルギーの分布関数から出発して、コギングトルクが発生する条件を示す。次に回転子磁極及び固定子鉄心のスロットが全周で対称に作られたモータにおいて、一般に知られるコギングトルク発生条件を導く。なお本論文では、種々の物理量に対し1周あたり n 回の脈動を示す成分をその物理量の空間 n 次成分と呼び、また極対数を p としてロータ1回転あたり $(k \cdot p)$ 回、即ち電気角 360 度あたり k 回の脈動を示すコギングトルクを“ k 次成分のコギングトルク”と呼ぶ。また、鉄心における磁気飽和の影響は無視する。

〈2・1〉 磁気エネルギーの分布関数表現とコギングトルク発生的一般的条件 PM モータのコギングトルク $T_C(\theta)$ は、回転子の回転角 θ と、そのときの空隙部磁気エネルギー $W_g(\theta)$ を用いて、仮想仕事の原理から次式で与えられる。

$$T_C(\theta) = -\frac{\partial W_g(\theta)}{\partial \theta} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、磁石内部の磁気エネルギーはほぼ一定であり、鉄心内部のエネルギーは非常に小さいので、それらの変化分は無視している。次に回転子位置が θ のときの空隙部の磁気エネルギー $W_g(\theta)$ を求める。位置 φ にある微小区間に蓄えられる磁気エネルギー密度 $\Delta w_g(\theta, \varphi)$ は、その位置の磁束密度 $B_g(\theta, \varphi)$ と真空の透磁率 μ_0 を用いて次式で表される。

$$\Delta w_g(\theta, \varphi) = \frac{B_g^2(\theta, \varphi)}{2\mu_0} \dots\dots\dots (2)$$

空隙部の全磁気エネルギーは、これに微小区間の体積を乗じ、位置 φ で積分することで算出される。

$$\begin{aligned} W_g(\theta) &= l_g l_s r_g \cdot \oint_C \Delta w_g(\theta, \varphi) d\varphi \\ &= \frac{l_g l_s r_g}{2\mu_0} \oint_C B_g^2(\theta, \varphi) d\varphi \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 l_g : 空隙長、 l_s : 軸長、 r_g : 空隙の半径。

回転機では、空隙磁束密度分布関数 $B_g(\theta, \varphi)$ は任意の θ に対し、位置 φ が機械角 2π だけ変動する毎に必ず周期性を持つ。よって空隙磁束密度を二乗した分布関数 $B_g^2(\theta, \varphi)$ も、位置 φ に対し機械角 2π ないしその整数倍の周期をもつ関数の和として表現できる。即ち、

$$B_g^2(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} (B_g^2)_n \cdot \cos\{n \cdot \varphi + f(n) \cdot \theta + \delta_n\} \dots\dots (4)$$

ここで、 $(B_g^2)_n$: $B_g^2(\theta, \varphi)$ を φ でフーリエ級数展開したときの第 n 次成分 (空間 n 次成分) の振幅、 $f(n)$: θ の係数、 δ_n : 第 n 次成分の初期位相。

(4) 式において、空間次数 n が 1 以上の成分は、(3) 式に従って位置 φ に対し機械角 2π の区間で積分すると零になる。よって、 $W_g(\theta)$ が零でない値を持つための条件は、(4) 式において空間零次成分が零の成分が存在することである。また、この空間零次成分が回転子位置 θ に対して変動するときにコギングトルクが発生する。つまり (4) 式において $(B_g^2)_0 \neq 0$ 、 $f(n) \neq 0$ であることがコギングトルク発生条件となる。

〈2・2〉 起磁力およびパーミアンス分布の満たすべき条件 次に、上で求めた条件から出発して、ある脈動数のコギングトルクが発生するための起磁力及びパーミアンス分布の満たすべき条件を導出する。ある位置での空隙磁束密度 $B_g(\theta, \varphi)$ は、その位置での起磁力分布関数 $F(\theta, \varphi)$ とパーミアンス分布関数 $\Lambda(\theta, \varphi)$ を用いて次式で表される。

$$B_g(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \cdot \Lambda(\theta, \varphi) \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式の両辺を二乗して、

$$B_g^2(\theta, \varphi) = F^2(\theta, \varphi) \cdot \Lambda^2(\theta, \varphi) \dots\dots\dots (6)$$

SPMSM の場合、回転子の作るパーミアンス分布は場所によらずほぼ一様である。よって空隙部のパーミアンス関数 $\Lambda(\theta, \varphi)$ の脈動成分は固定子のみにより規定され、回転子の回転角 θ には依存しないため、以降は $\Lambda(\varphi)$ と表記する。

(4) 式と同様にして、空隙部のパーミアンスを二乗した関数 $\Lambda^2(\varphi)$ も、位置 φ に対し機械角 2π ないしその整数倍の周期をもつ周期関数の和として表現できる。即ち

$$\Lambda^2(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} (\Lambda^2)_i \cdot \cos(i \cdot \varphi + \delta_i) \dots\dots\dots (7)$$

次に空隙部の起磁力分布関数 $F(\theta, \varphi)$ について記す。コギングトルクを検討する際には固定子は無通電状態であるので、起磁力は回転子のみに存在する。よって $F(\theta, \varphi)$ は回転子磁極のみによって規定される。起磁力を二乗した関数

$F^2(\theta, \varphi)$ についても, (4) 式と同様に位置 φ に対し機械角 2π ないしその整数倍の周期をもつ周期関数の和として表現できるが, ここで各成分が回転子と同期して回転することに注意して, 以下のようになる。

$$F^2(\theta, \varphi) = \sum_{j=0}^{\infty} (F^2)_j \cdot \cos\{j \cdot (\varphi - \theta) + \delta_j\} \cdots \cdots (8)$$

(7) 式, (8) 式を (6) 式に代入して

$$\begin{aligned} B_g^2(\theta, \varphi) &= \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(F^2)_j \cdot (\Lambda^2)_i}{2} \cdot \cos\{(j+i) \cdot \varphi - j \cdot \theta + (\delta_j + \delta_i)\} \\ &+ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(F^2)_j \cdot (\Lambda^2)_i}{2} \cdot \cos\{(j-i) \cdot \varphi - j \cdot \theta + (\delta_j - \delta_i)\} \\ &\cdots \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

前節の議論より, コギングトルク発生条件は, 「(9) 式の第 2 項において φ の係数が零となる自然数 i, j に対し, その振幅が零でないこと」である。即ち, ある自然数 κ に対して, 起磁力を二乗した関数 $F^2(\theta, \varphi)$, パーミアンスを二乗した関数 $\Lambda^2(\varphi)$ の空間第 κ 次成分の振幅が共に値を持つとき, 1 回転あたり κ 回の脈動をもつコギングトルクが発生する。

以上, ある脈動数のコギングトルクが発生するために起磁力分布関数とパーミアンス分布関数が満たすべき条件を導いた。これらの分布関数に含まれる空間次数成分は, 磁極とスロットの数及び形状により決定される。

〈2・3〉 対称なスロット付モータで発生するコギングトルク ここでは, 周方向の全周にわたり等間隔に回転子磁極と固定子スロットを配した, 対称形状を有する SPMSM において, 一般に知られているコギングトルク発生条件を導く。固定子に Z_{st} 個のスロットを有する場合のパーミアンス分布は, 平滑パーミアンスと呼ばれる一定成分とスロット有無による変動成分とが重畳されたものと考えられる。またティース部とスロット部では一般に対称性を持つとは限らない。これらを考慮し, パーミアンス関数 $\Lambda(\varphi)$ は, フーリエ級数展開して以下のように表現できる。

$$\Lambda(\varphi) = \sum_{i_1=0}^{\infty} \Lambda_{i_1} \cdot \cos(i_1 \cdot Z_{st} \cdot \varphi + \delta_{i_1}) \cdots \cdots (10)$$

ここで, i_1 : 零以上の整数, $(i_1 \cdot Z_{st})$: パーミアンス分布関数の空間次数, Λ_{i_1} , δ_{i_1} : 空間 $(i_1 \cdot Z_{st})$ 次成分の振幅と初期位相。

(10) 式の両辺を二乗し, 次数毎に係数を整理しなおすと, 以下のように表現できる。

$$\Lambda^2(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} (\Lambda^2)_i \cdot \cos(i \cdot Z_{st} \cdot \varphi + \delta_i) \cdots \cdots (11)$$

次に起磁力について求める。各磁極はすべて対称に作られていると仮定しているので, 起磁力分布関数は以下のよ

うに表現することができる。

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{j_1=0}^{\infty} F_{j_1} \cdot \cos\{(2 \cdot j_1 + 1) \cdot p \cdot (\varphi - \theta) + \delta_{j_1}\} \cdots \cdots (12)$$

ここで, p : 極対数, j_1 : 零以上の整数, $(2 \cdot j_1 + 1)p$: 起磁力分布関数の空間次数, F_{j_1} , δ_{j_1} : 空間 $(2 \cdot j_1 + 1)p$ 次成分の振幅と初期位相。

(12) 式の両辺を二乗し, 次数毎に係数を整理しなおすと, 以下のように表現できる。

$$F^2(\theta, \varphi) = \sum_{j=0}^{\infty} (F^2)_j \cdot \cos\{j \cdot 2p \cdot (\varphi - \theta) + \delta_j\} \cdots \cdots (13)$$

(11) 式と (13) 式を (6) 式に代入し, 次式を得る。

$$\begin{aligned} B_g^2(\theta, \varphi) &= \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{(F^2)_j \cdot (\Lambda^2)_i}{2} \cdot \cos\{(j \cdot 2p + i \cdot Z_{st}) \cdot \varphi - j \cdot 2p \cdot \theta + \delta_j + \delta_i\} \right] \\ &+ \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{(F^2)_j \cdot (\Lambda^2)_i}{2} \cdot \cos\{(j \cdot 2p - i \cdot Z_{st}) \cdot \varphi - j \cdot 2p \cdot \theta + \delta_j - \delta_i\} \right] \\ &\cdots \cdots \cdots (14) \end{aligned}$$

(14) 式に対し前節のコギングトルク発生条件を適用する。第 1 項は条件を満たさないで, 第 2 項から「 $j \cdot 2p - i \cdot Z_{st} = 0$ 」を満たす自然数 (j, i) の組が存在すること」がコギングトルク発生条件となる。このときの脈動数は 1 回転あたり $(j \cdot 2p)$ 回, 即ち $(i \cdot Z_{st})$ 回となる。以上より, 対称に作られたモータのコギングトルク脈動数は, 極数 $2p$ と固定子スロット数 Z_{st} の最小公倍数ないしその整数倍であることが導かれた。

3. 製造誤差に起因する成分とその発生条件

〈3・1〉 製造誤差に起因するコギングトルク成分 実機で発生する, 最小公倍数より脈動数の少ない代表的なコギングトルク成分は, 1 回転あたりスロット数 Z_{st} と同数ないしその整数倍の脈動数成分 (以後, スロット数次成分と呼ぶ) と, 極数 $2p$ と同数ないしその整数倍の脈動数成分 (同, 極数次成分) である。本節ではこれらの成分が生じた場合の製造誤差の発生部位について論じる。

まず, 極数次成分のコギングトルクが発生する条件, 即ち〈2・2〉節で述べた $\kappa = 2kp$ となる条件を求める。起磁力分布関数については, 対称性を仮定した場合の表現式 (13) において $j \cdot 2p = 2kp$ 即ち $j = k$ の条件が成り立てばよいので, 通常に対称な回転子でも成立し得る。一方, パーミアンス分布関数については, 対称性を仮定した場合, (11) 式において $i \cdot Z_{st} = 2kp$ を満たす自然数 i, k が存在する必要がある。これは言い換えると, 「 Z_{st} が $2kp$ の約数である」ことが条件となるが, この場合の発生次数は極数とスロット数の最小公倍数成分もしくはその整数倍となり今回の議論の対象外である。よって, 極数次成分のコギングト

ルクが発生するためには、固定子側にスロット数の整数倍以外の空間分布をもつパーミアンズ脈動成分、即ち、固定子側の製造誤差に起因する成分が含まれていることが必要となる。

同様の考察により、スロット数次成分のコギングトルクが発生するためには回転子側の起磁力分布に極対数の奇数倍以外の脈動成分、即ち、回転子側の製造誤差に起因する成分が含まれている必要がある。

〈3・2〉 極数次成分コギングトルクの発生条件 次に、上で述べた中で固定子側の製造誤差に起因する極数次成分のコギングトルクを取り上げ、これが発生するときの固定子パーミアンズ分布関数 $\Lambda(\varphi)$ の条件を求める。 $\Lambda(\varphi)$ において (14) 式で表現されたスロット数の整数倍の成分に加え、1 回転あたり N 回の脈動をもつ成分（ただし N はスロット数の整数倍でない整数；以後、非対称成分とよぶ）が重畳された場合を考えると、 $\Lambda(\varphi)$ は以下のように表現できる。

$$\Lambda(\varphi) = \sum_{i_1=0}^{\infty} \Lambda_{i_1} \cdot \cos(i_1 \cdot Z_{st} \cdot \varphi + \delta_{i_1}) + \Lambda_N \cdot \cos(N \cdot \varphi + \delta_N) \cdots \cdots (15)$$

ここで、 Λ_N ：重畳された N 次成分パーミアンズ分布の振幅、 δ_N ： N 次成分の初期位相。

(15) 式の第 1 項は (10) 式と同一であり、偶数を含む零～ ∞ までの空間次数成分を有する。(15) 式の両辺を二乗し、次数毎に係数を一部整理すると、以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} \Lambda^2(\varphi) &= \sum_{i_1=0}^{\infty} \cdot \sum_{i_2=0}^{\infty} \{ \Lambda_{i_1} \cdot \Lambda_{i_2} \cdot \cos(i_1 \cdot Z_{st} \cdot \varphi + \delta_{i_1}) \\ &\quad \cdot \cos(i_2 \cdot Z_{st} \cdot \varphi + \delta_{i_2}) \} + \Lambda_N^2 \cdot \cos^2(N \cdot \varphi + \delta_N) \\ &\quad + \sum_{i_1=0}^{\infty} 2 \cdot \Lambda_{i_1} \cdot \Lambda_N \cdot \cos(i_1 \cdot Z_{st} \cdot \varphi + \delta_{i_1}) \cos(N \cdot \varphi + \delta_N) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} (\Lambda^2)_i \cdot \cos(i \cdot Z_{st} \cdot \varphi + \delta_i) \\ &\quad + \frac{1}{2} \Lambda_N^2 \cdot \{ \cos(2N \cdot \varphi + 2\delta_N) + 1 \} \\ &\quad + \sum_{i_1=0}^{\infty} \Lambda_{i_1} \cdot \Lambda_N \cdot \cos\{(i_1 \cdot Z_{st} + N) \cdot \varphi + (\delta_{i_1} + \delta_N)\} \\ &\quad + \sum_{i_1=0}^{\infty} \Lambda_{i_1} \cdot \Lambda_N \cdot \cos\{(i_1 \cdot Z_{st} - N) \cdot \varphi + (\delta_{i_1} - \delta_N)\} \\ &\quad \cdots \cdots \cdots (16) \end{aligned}$$

極数次成分コギングトルクが発生する条件は、(16) 式で表されたパーミアンズの二乗の関数において、空間次数が $\pm 2kp$ のものが存在することである。(16) 式の第 1 項は (11) 式と同一であり、前章の議論から極数次成分の原因とはならない。よって、以下の場合が考えられる。

- [1] 第 2 項に $\pm 2kp$ が存在 $\cdots N = kp$
- [2] 第 3 項に $\pm 2kp$ が存在 $\cdots N = \pm 2kp - (i_1 \cdot Z_{st})$
- [3] 第 4 項に $\pm 2kp$ が存在 $\cdots N = (i_1 \cdot Z_{st}) \pm 2kp$

以上の検討結果から、固定子のパーミアンズ分布に上記 3 つの条件のいずれかを満たす非対称成分が付加された場合に極数次成分のコギングトルクが発生する。逆にこの条件を満たす非対称成分が固定子のパーミアンズ分布に付加されなければ極数次成分のコギングトルクは発生しない。

上記の条件を満たす i_1 は無数に存在する。そこで、影響度を検討すべく、各成分の振幅について検討する。条件 [1] は極対数の整数倍と同じ脈動回数を持つパーミアンズ脈動が付加された場合であり、このときコギングトルクの大きさは、付加された N 次パーミアンズ脈動の振幅 Λ_N の二乗に比例する。一方、上記の条件 [2], [3] が成立するときのコギングトルク振幅について考える。ある N 次パーミアンズ脈動が付加されることで上記条件 [2] ないし [3] が成立する時、発生する極数次成分コギングトルクの振幅は、 Λ_N と、上式を満たす i_1 に対応する Λ_{i_1} の双方に比例する。上式における係数 i_1 は、スロットの作るパーミアンズ脈動関数をフーリエ級数展開したときの次数であり、対応する Λ_{i_1} はパーミアンズ脈動の振幅を表す。一般にスロットパーミアンズ脈動が矩形状に分布しているとすれば、次数が低いほど振幅は大きくなる。よって、付加された N 次パーミアンズ脈動の振幅 Λ_N の振幅が同程度であれば、次数 i_1 が小さいほどコギングトルクの振幅は大きい。即ち、条件を満たす i_1 のうち、その値が小さいほど、極数次成分コギングトルクへの寄与度が大きい。

なお、実機においては上述の議論に加えて、鉄心の磁気飽和の影響によっても空隙磁束密度に高調波成分が重畳され、これがコギングトルクを引き起こす場合があることが知られている⁽²⁾。より詳細な検討を行う際にはこれの影響も併せて検討する必要がある。

4. 種々のモータ設計仕様に対するコギングトルクの発生条件

三相交流駆動の PM モータで代表的な極数/スロット数比を 7 つ選び、各々について非対称成分のパーミアンズの空間次数とコギングトルクの関係性を調べる。各モデルの仕様を表 1 に記す。Model 1 から Model 5 はいわゆる集中巻方式を想定しており、代表的な極数/スロット数比である 2:3, 4:3, 8:9, 10:9, 5:6 の 5 種（毎極毎相スロット数 q は各々 1/2, 1/4, 3/8, 3/10, 2/5）をとりあげた。Model 6 と Model 7 は分布巻を想定しており、それぞれ整数スロット（同 1）および分数スロット（同 3/2）とした。極数は 8 極ないし 10 極とし、全モデルでほぼ等しくなるよう配慮した。

まず、Model 3 ($2p = 8$, $Z_{st} = 9$) を例に、2 次成分のコギングトルクの発生条件を具体的に示す。条件 [1] からは、 $N = 4$ が該当する。条件 [2] からは、 $N = \pm 8 - i_1 \times 9$ であり、 $i_1 \geq 0$ かつ $N > 0$ となるのは $N = 8$ （このとき $i_1 = 0$ ）の場合のみである。条件 [3] からは、 $N = i_1 \times 9 \pm 8$ であり、複号が正のとき、 $i_1 = 0, 1, 2, 3, \cdots$ において $N = 8, 17, 26, 35, \cdots$ 、複号が負のとき、 $i_1 = 1, 2, 3,$

表 1 検証に用いた 7 種類のモータの極数—スロット数組合せ

Table 1. Combination of pole number and slot number for seven verification motors.

Model No.	Number of Poles ($2p$)	Number of Slots (Z_s)	Pole/slot ratio	L.C.M. of $2p$ and Z_s (LCM)	(LCM/p)	Number of Slot per Pole per Phase (q)	Typical Winding Pattern
Model 1	8	12	2:3	24	6	1/2 (Fractional)	Concentrated
Model 2	8	6	4:3	24	6	1/4 (Fractional)	Concentrated
Model 3	8	9	8:9	72	18	3/8 (Fractional)	Concentrated
Model 4	10	9	10:9	90	18	3/10 (Fractional)	Concentrated
Model 5	10	12	5:6	60	12	2/5 (Fractional)	Concentrated
Model 6	8	24	1:3	24	6	1 (Integral)	Distributed
Model 7	8	36	2:9	72	18	3/2 (Fractional)	Distributed

表 2 2 次成分コギングトルクが発生するためのパーミアンス分布関数の満たすべき空間次数条件

Table 2. Space order of permeance distribution function that 2nd order cogging torque will be generated.

	$N = p$	$N = 2p - i_l - Zst$			$N = 2p + i_l - Zst$					$N = -2p + i_l - Zst$				
		$i_l=0$	$i_l=1$	$i_l=2$	$i_l=0$	$i_l=1$	$i_l=2$	$i_l=3$	$i_l=4$	$i_l=0$	$i_l=1$	$i_l=2$	$i_l=3$	$i_l=4$
Model 1	4	8	...	...	8	20	32	44	56	...	4	16	28	40
Model 2	4	8	2	...	8	14	20	26	32	...	...	4	10	16
Model 3	4	8	...	...	8	17	26	35	44	...	1	10	19	28
Model 4	5	10	1	...	10	19	28	37	46	...	...	8	17	26
Model 5	5	10	...	...	10	22	34	46	58	...	2	14	26	38
Model 6	4	8	...	...	8	32	56	80	104	...	16	40	64	88
Model 7	4	8	...	...	8	44	80	116	152	...	28	64	100	136

表 3 $2k$ 次成分コギングトルクの原因となるパーミアンス分布関数の空間次数（理論式からの予測；15 次以下のもの）

Table 3. Space order of permeance distribution that generates “ $2k$ ”-th order cogging torque (calculated).

Model No.	Cogging torque components to be generated								
	2nd ($k=1$)	4th ($k=2$)	6th ($k=3$)	8th ($k=4$)	10th ($k=5$)	12th ($k=6$)	14th ($k=7$)	16th ($k=8$)	18th ($k=9$)
1	4,8	4,8	...	4,8	4,8	...	4,8	4,8	...
2	2,4,8,10,14	2,4,8,10,14	...	2,4,8,10,14	2,4,8,10,14	...	2,4,8,10,14	2,4,8,10,14	...
3	1,4,8,10	2,7,8,11	3,6,12,15	4,5,13,14	4,5,13,14	3,6,12,15	2,7,11	1,8,10	...
4	1,5,8,10	2,7,10,11	3,6,12,15	4,5,13,14	4,5,13,14	3,6,12,15	2,7,11	1,8,10	...
5	2,5,10,14	4,8,10	6,15	4,8	2,10,14	...	2,10,14	4,8	6
6	4,8	8	...	8	8	...	8	8	...
7	4,8	8	12	4	4	12	...	8	...

... において $N = 1, 10, 19, \dots$ となる。前述のように、条件 [2], [3] が成立するとき、 i_l が小さいほどコギングトルク振幅が大きいので、 $N = 1, 4, 8, 10, 17, \dots$ などのパーミアンス脈動が生じたときに 2 次成分のコギングトルクが発生すると予想される。

同様に、7 つのモデルに対し 2 次成分コギングトルクが発生するための条件を $i_l \leq 4$ の範囲で求めた。結果を表 2 に記す。表中、... で表した部分は、条件を満たす自然数 N が存在しないことを表す。表 2 から、いずれのモータも極対数 p ないし極数 $2p$ と一致する空間次数をもつパーミアンス脈動が付加された場合に 2 次成分コギングトルクが生じる。また、極数/スロット数比が 2:3 の場合 (Model 1) と分布巻の場合 (Model 6 と Model 7)、即ち q が 1/2

以上の場合には極対数成分以下の低次成分の影響を受けないのに対し、それ以外の場合には空間 1 次、2 次といった低次成分の影響によって 2 次成分のコギングトルクが発生する。

7 種のモータに対し 4 次～18 次成分のコギングトルクが発生する条件を同様に求めた。非対称成分の空間次数 N として今回は 15 次までの範囲に限定して記した。結果をまとめて表 3 に示す。前述の 2 次成分と同様、4 次以上の成分についても、 q が 1/2 以上の場合 (Model 1, Model 6, Model 7) には、極対数より低次の空間次数成分の影響を受けないのに対し、それ以外では低次成分の影響を受けることがわかる。また、上述の条件範囲において Model 1, Model 6, Model 7 のコギングトルク特性に影響を与えるのは空間 4

図 1 検証用モータの断面形状
Fig. 1. Cross section of the verification motor.

表 4 検証用モータの諸元

Table 4. Specifications of the verification motor.

Rotor outer Diameter [mm]	35
Rotor inner Diameter [mm]	8
Stator outer Diameter [mm]	80
Air Gap [mm]	0.6
Core Length [mm]	40
Slot Opening Ratio (slot opening width / teeth pitch)	1/2
Width of Stator core back [mm]	8.3
Material of Rotor Yoke and Stator Core	50A1000 (JIS C 4051)
Shape of Permanent Magnet	Ring
Thickness of Permanent Magnet [mm]	3.3
Residual Magnetic Flux Density of Permanent Magnet [T]	1.4
Magnetization Pattern	Radial

次成分, 8 次成分などの限られた歪成分のみであり, 他の空間次数成分の歪が加わっても影響がないと予想される。一方, Model 3, Model 4 では空間 9 次成分 (スロット数と同数の成分) 以外のいずれの歪成分を付加した場合でもコギングトルク特性に影響が現れており, 生じるコギングトルク次数も各々異なる傾向を示す。Model 2, Model 5 でも同様に, ほとんどの空間次数の歪成分を付加した場合でコギングトルク特性に影響が現れている。この結果から, q が 1/2 以上の場合 (Model 1, Model 6, Model 7) に比べ, それ以外のモデルでは歪の影響を受けやすいと考えられる。

図 2 コギングトルク波形 (解析結果: Model 1 = 8 極 12 スロット)

Fig. 2. Cogging torque waveform with/without distortion (analyzed; Model 1 = 8 poles 12 slots).

図3 コギングトルク波形（解析結果：Model 3 = 8 極 9 スロット）

Fig. 3. Cogging torque waveform with/without distortion (analyzed; Model 3 = 8 poles 9 slots).

5. 磁界解析による検証

前章で述べた関係式を確かめるべく、具体的なモータ仕様に対して特定の空間次数を持つパーミアンス分布を付加し、パーミアンス分布関数の空間次数とコギングトルク発生状況の関係を調べた。実機では複数の因子が加わることで多く因子の切り分けが難しいため、本論文では磁界解析を用いることで付加した誤差要因の影響のみを切り分けることとした。製造誤差因子としては、固定子の内径に歪を与えることで非対称性を付与した。

〈5・1〉 対象モータの諸元 対象とした7種のモータ各々の断面形状を図1(a)~(g)に、共通諸元を表4に示す。極数/スロット数比の異なる7種のモータに対し、固定子内径形状に特定の空間次数の歪を与えたコギングトルク解析を行い、歪の空間次数とコギングトルクの関係を検討した。付加する歪の空間次数は前章と同様に1~15とし、固定子内径を設計寸法に対し $\pm 30\mu\text{m}$ で変化させた。なお、極数/スロット数比以外のパラメータ、例えば鉄心や永久磁石材料の磁気特性、スロットやティース、永久磁石の詳細

図4 コギングトルク成分分析結果 (Model 1 = 8 極 12 スロット)

Fig. 4. Cogging torque components with/without distortion (Model 1 = 8 poles 12 slots).

図5 コギングトルク成分分析結果 (Model 3 = 8 極 9 スロット)

Fig. 5. Cogging torque components with/without distortion (Model 3 = 8 poles 9 slots).

形状、空隙長などは全て同一とし、付加した歪の空間次数とコギングトルクとの定性的関係のみを検討した。

〈5・2〉 解析結果と理論発生次数との比較 一例として、前章で歪の影響を受けにくいと予測した Model 1 と、逆に受けやすいと予測した Model 3 について、磁界解析結果をそれぞれ図2、図3に示す。両図において (a) は歪のない場合、(b) および (c) はそれぞれ空間4次および8次成分の歪を与えた場合である。横軸は回転角度を電気角で示す。これらの成分分析結果を図4、図5に示す。次数は18次までを示した。歪がないとき、Model 1 では6次およびその整数倍である12次、18次の成分が、Model 3 では18次成分のみが発生している。これに対し、Model 1 で空間4次ないし8次成分の歪を与えると、2次ないし4次成分のコギングトルクが重畳されるほか、値は小さいものの8次、10次、14次、16次などの成分も発生している。また、歪のない状態で元々発生していた6次、12次、18次成分にはほとんど変化がない。一方、Model 3 では空間4次成分の歪を与えると2次、8次、10次成分のコギングトルクが、空間8次成分の歪を与えると2次、16次成分のコギングトルクがそれぞれ重畳されている。

他の空間次数成分を持つ歪を与えた場合についても同様の計算を行い、成分分析して比較した。図6、図7に結果

図6 固定子内径変形モードとコギングトルク脈動数の関係（解析結果：Model 1 = 8 極 12 スロット）

Fig. 6. Relationship between stator distortion mode and cogging torque (Model 1 : 8poles 12slots).

図7 固定子内径変形モードとコギングトルク脈動数の関係（解析結果：Model 3 = 8 極 9 スロット）

Fig. 7. Relationship between stator distortion mode and cogging torque (Model 3 : 8poles 9slots).

表5 2k 次成分コギングトルクを発生させる空間次数 15 次以下の固定子内径歪成分
(解析結果; しきい値 = 0.5 mN・m 以上)

Table 5. Space order of stator distortion that caused “2k”-th order cogging torque
(analyzed results; threshold level is 0.5 mN・m).

Model No.	Cogging torque components								
	2nd (k=1)	4th (k=2)	6th (k=3)	8th (k=4)	10th (k=5)	12th (k=6)	14th (k=7)	16th (k=8)	18th (k=9)
1	4,8	4,8	---	4,8	4,8	---	4,8	4,8	---
2	2,4,8,10,14	2,4,8,10,14	---	2,4,8,10,14	2,4,8,10,14	---	2,4,8,10,14	2,4,8,10,14	---
3	1,4,8,10	2,7,11	3,6,12,15	4,5,13,14	4,5,13,14	3,6,12,15	2,7,11	1,8,10	---
4	1,5,8,10	2,7,11	3,6,12,15	4,5,13,14	4,5,13,14	3,6,12,15	2,7,11	8,10	---
5	2,5,10,14	4,8	6	4,8	2,10	---	2,14	8	6
6	4,8	8	---	8	8	---	8	8	---
7	4,8	---	12	4	4	12	---	8	---

図8 歪がないときの各モデルのコギングトルク振幅

Fig. 8. Amplitude of cogging torque for seven models (without distortion).

を示す。ただし、各成分の振幅に差があるため、付加した歪の次数が異なる 16 種類の解析を各々実施した後、2 次～18 次の 9 つのコギングトルク成分ごとにそれぞれ分離してグラフ化してある。各図において横軸は付加された内径歪の空間次数を、縦軸はコギングトルク振幅を表す。縦軸は、歪のない状態の各モデルのコギングトルク振幅値 (図 8) に対する百分率で表記した。図 6 から、上述の条件範囲において Model 1 のコギングトルク特性に影響を与えるのは空間 4 次、8 次成分の歪のみであり、他の空間次数成分の歪が加わっても影響がないことがわかる。一方、図 7 からわかるように Model 3 では空間 9 次成分以外のいずれの歪成分を付加した場合でもコギングトルク特性に影響が現れており、生じるコギングトルク次数も各々異なる傾向を示す。

同様の解析を各モデルに対して行い、各次数成分のコギングトルクの発生原因となる固定子内径歪の空間次数を調べた。結果を表 5 に示す。ただし解析誤差の影響を除くため、成分分析後の振幅が 0.5 mN・m 以下の成分、すなわち歪がないときにコギングトルクが最も小さい Model 5 の振幅値 6.8 mN・m の約 7% 以下の振幅値を持つ成分は、実用上も影響が小さく無視できるレベルであるとみなした。

表 5 の結果は、理論式による予測結果 (表 3) と全般的にはほぼ一致している。表 5 の網掛け部分は表 3 と一致していないが、いずれも、理論式でコギングトルクの発生が予測される歪を与えたにもかかわらず解析で当該成分が発生し

ない結果となっている。この結果から、振幅が大きいコギングトルク成分については、提案した理論式を用いて原因となる固定子歪の空間次数を正確に予測できたといえる。

次に、理論式からの予測結果と異なる成分について検討する。4 次及び 6 次成分コギングトルクの原因として予測と一致していないのは、条件 [1] から導かれた空間次数成分である。この成分のコギングトルク振幅は歪量の二乗に比例するため、与えられた歪の振幅が小さい場合には条件 [2], [3] から導かれた成分に比べ振幅が小さくなる。今回の解析で与えた歪の振幅 30 μ m は空隙長の高々 5% であり、解析誤差レベルの振幅でしか発生しなかったものと考えられる。一方、10 次、14 次及び 16 次成分については条件 [2], [3] から導かれた成分である。この成分はスロット開口部の幅に大きく依存し、今回設定したモータ形状において当該成分の振幅が小さくなったと考えられる。

以上の結果より、提案した理論式を用いることで、固定子内径に付加された歪の空間次数に対し発生するコギングトルクの次数成分をほぼ正確に予測できると考えられる。予測した成分の中には実際には発生しないものがある場合があるが、これについては歪の振幅やスロット開口部幅などの条件により決定される。

6. ま と め

表面磁石形永久磁石モータ (SPMSM) を対象に、鉄心の歪や磁気特性劣化などの製造誤差に起因して生じるコギングトルクの発生条件を検討した。製造誤差としては固定子側の因子を取り上げ、これを固定子パーミアンス分布の非対称成分 (固定子スロット数の整数倍以外の脈動成分) として扱った。本論文の概要を以下にまとめる。

- モータ空隙部の磁気エネルギー分布から出発して、極数次数成分 (1 回転あたり極数と同数ないしその整数倍の脈動数を示す成分) のコギングトルクが固定子パーミアンス分布の非対称成分に起因することを示した。さらにパーミアンス非対称成分の空間次数とコギングトルク次数の関係式を導いた。
- 極数/スロット数比が異なる三相モータの代表的な 7

種的设计仕様に対し、パーミアンス非対称成分の空間次数とコギングトルク次数の関係を具体的に示し、仕様ごとの傾向の違いを論じた。例えば8極12スロットのモータでは4次や8次などの空間次数をもつ誤差因子のみがコギングトルクの原因となる一方、8極9スロットのモータではほぼ全ての空間次数の誤差因子が各々異なる脈動数のコギングトルクを引き起こす。

- 導出した条件式の妥当性を検証するため、7種のモータ仕様に対し有限要素磁界解析を行った。固定子内径の歪形状を種々変更し、歪に起因するコギングトルク発生の有無を調べた結果、上述の導出結果と良く一致し、条件式の妥当性を確認できた。

本論文では固定子の内径歪を例に検討を行った。本稿では詳細に触れないが、これまでに応力や磁気異方性などの製造誤差因子により鉄心の磁気特性分布を不均一としたモータを試験的に製作した。先の理論式に従って誤差因子の分布を決定した結果、2次成分コギングトルクの発生を実機で確認した⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾。この結果から、パーミアンス分布としては内径歪に限定されることなく、鉄心の磁気特性分布に対しても先の理論式が適用可能であると考えられる。

本稿では固定子側の製造誤差因子を主に取り上げた。回転子側の製造誤差因子に起因する成分についても同様に条件の導出が可能である。これについては稿を改めたい。

(平成17年11月25日受付)

文 献

- (1) 電気学会:「小形モータの高性能化」, 電学技報, 744 (1999)
- (2) H. Kometani: "The Modeling Technologies for Highly Accurate Electromagnetic Analyses of Rotating Machines", The Papers of Tech. Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan, RM-05-120 (2005) (in Japanese)
米谷晴之:「回転機の高精度電磁界解析のためのモデリング技術」, 電学回転機研資, RM-05-120 (2005)
- (3) 田中俊則:「電動パワーステアリング用モータ」, 三菱電機技報, Vol.76, No.6, pp.387-390 (2002-6)
- (4) M. Gotou and K. Kobayashi: "An Analysis of the Cogging Torque of a DC Motor and a New Reducing Technique", *T. IEE Japan*, Vol.103-B, No.11, pp.711-718 (1983-11) (in Japanese)
後藤 誠・小林一二:「直流モータのコギングトルクの解明と新しい低減方法」, 電学論 B, Vol.103, No.11, pp.711-718 (1983-11)
- (5) K. Ohnishi: "Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Brushless Motors", *T. IEE Japan*, Vol. 122, No.4, pp.338-345 (2002-4) (in Japanese)
大西和夫:「永久磁石ブラシレスモータのコギングトルク低減」, 電学論 D, 122, 4, pp.338-345 (2002-4)
- (6) N. Bianchi and S. Bolognani: "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", *IEEE Trans. on IA*, Vol.38, No.5, pp.1259-1265 (2002-5)
- (7) A. Daikoku, N. Hashiguchi, N. Miyake, H. Ikejima, K. Inoue, M. Yasue, and T. Komatsu: "Development of Flat Type Permanent Magnet Motor For Machine-Room-Less Elevator", The Papers of Tech. Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan, RM-01-113 (2001) (in Japanese)
大穀晃裕・橋口直樹・三宅展明・池島宏行・井上健二・安江正徳・小松孝教:「機械室レス・エレベーター巻上機用永久磁石式薄形モータの開発」, 電学回転機研資, RM-01-113 (2001)
- (8) Y. Enomoto, M. Kitamura, T. Sakai, and K. Ohara: "Factor Analysis on Cogging Torque in Segment Core Motors", *IEEJ Trans. IA*, Vol.124, No.1, pp.85-90 (2004-1) (in Japanese)
榎本裕治・北村正司・酒井俊彦・大原光一郎:「分割コアモータのコギングトルク要因分析」, 電学論 D, 124, 1, pp.85-90 (2004-1)
- (9) M.S. Islam, S. Mir, and T. Sebastian: "Issues in Reducing the Cogging Torque of Mass-Produced Permanent-Magnet Brushless DC Motor", *IEEE Trans. on IA*, Vol.40, No.3, pp.813-820 (2004-3)
- (10) M. Natsumeda and H. Takabayashi: "The calculation method of cogging torque considered the variation of the magnet", 2004 National Convention Record, IEE Japan, No.5-094 (2004) (in Japanese)
森田充俊・高林博文:「磁石の製造ばらつきを考慮したコギングトルク推定法」, 平 16 年電学全大, No.5-094 (2004)
- (11) A. Daikoku, S. Yamaguchi, Y. Toide, and T. Yoshioka: "Measurement of Cogging Torque Resulting from Non-oriented Steel's Magnetic Anisotropy in Permanent Magnet Motors", 2003 National Convention Record, IEE Japan, No.5-016 (2003-3) (in Japanese)
大穀晃裕・山口信一・都出結花利・吉岡 孝:「無方向性電磁鋼板の磁気異方性に起因する永久磁石モータのコギングトルクの測定」, 平 15 電学全大, No.5-016 (2003)
- (12) S. Yamaguchi, A. Daikoku, and N. Takahashi: "Cogging torque calculation considering magnetic anisotropy for permanent magnet synchronous motors", *COMPEL*, Vol.23, No.3, pp.639-646 (2004)
- (13) A. Daikoku, M. Nakano, S. Yamaguchi, Y. Tani, Y. Toide, T. Yoshioka, H. Arita, and C. Fujino: "Cogging torque calculation considering stator core stress resulting from frame in permanent magnet motors", The Papers of Joint Tech. Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA-03-72, RM-03-74 (2003) (in Japanese)
大穀晃裕・中野正嗣・山口信一・谷 良 浩・都出結花利・吉岡 孝・有田秀哲・藤野千代:「フレームの応力の影響を考慮した PM モータのコギングトルク解析」, 電学静止器・回転機合同研資, SA-03-72, RM-03-74 (2003)
- (14) M. Nakano, A. Daikoku, S. Yamaguchi, Y. Tani, H. Arita, Y. Toide, T. Yoshioka, and C. Fujino: "Cogging Torque Calculation Considering Distribution of Principal Stress of Stator Core in Permanent Magnet Motors", The Papers of Joint Tech. Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA-04-16, RM-04-16 (2004) (in Japanese)
中野正嗣・大穀晃裕・山口信一・谷 良浩・有田秀哲・都出結花利・吉岡 孝・藤野千代:「固定子鉄心の主応力分布を考慮した PM モータのコギングトルク解析」, 電学静止器・回転機合同研資, SA-04-16, RM-04-16 (2004)
- (15) S.J. Yang, 斉藤文利訳:ロー・ノイズ・モータ, 総合電子出版社 (1983)
- (16) A. Daikoku, Y. Toide, T. Yoshioka, S. Yamaguchi, M. Nakano, H. Arita, Y. Tani, and C. Fujino: "Cogging Torque Examination in Permanent Magnet Motors with Stressed Stator Core", The Papers of Tech. Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan, RM-03-152 (2003) (in Japanese)
大穀晃裕・都出結花利・吉岡 孝・山口信一・中野正嗣・有田秀哲・谷 良浩・藤野千代:「外部応力印加時の PM モータのコギングトルクに関する実験検討」, 電学回転機研資, RM-03-152 (2003)

大 穀 晃 裕 (正員) 1965 年 11 月 8 日生。1989 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。1991 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。現在, 先端技術総合研究所にて, モータ, 発電機などの電磁機器の高性能化に関する研究開発に従事。IEEE 会員。

中 野 正 嗣 (正員) 1972 年 9 月 25 日生。1996 年 3 月京都大学工学部電気工学第二学科卒業。1998 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。現在, 先端技術総合研究所にて, モータ, 発電機などの電磁機器の高性能化に関する研究開発に従事。2004 年, 2005 年電気学会論文発表賞受賞。IEEE 会員。

山口 信一

(正員) 1974年11月19日生。1997年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。1999年3月同志社大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期修了。同年4月三菱電機(株)入社。現在、先端技術総合研究所にて、モータ等の電磁機器の高性能化に関する研究開発に従事。

米谷 晴之

(正員) 1964年3月3日生。1989年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。同年4月三菱電機(株)先端技術総合研究所入社。主として回転機、電磁機器、超電導機器の研究開発に従事。1998年電気学会論文発表賞A賞受賞。IEEE会員。工学博士。

都出 結花利

(正員) 1983年3月大阪大学理学部物理学科卒業。1985年3月大阪大学大学院工学研究科電磁エネルギー工学専攻修了。同年4月三菱電機(株)入社。1998年まで光磁気ディスク開発に従事。現在、先端技術総合研究所にて、モータなどの電磁機器の高性能化に関する研究開発に従事。