

動特性を考慮した小型直流 モータの有限要素解析

木 村 昭 穂*・松 坂 知 行**

Finite Element Analysis of Small-Sized DC-Motors Taking Account of Dynamic Characteristics

Akio KIMURA and Tomoyuki MATUZAKA

Abstract

Small-sized DC motors are used widely as electromagnetic actuators. However, it is difficult to analyze considering the dynamic characteristics of small-sized DC motors because its model is a combination of the electric, mechanical and magnetic systems.

In this paper, a method to analyze the characteristics of small-sized DC motors, taking account of the motor dynamics rotating with the pulsating torque, is described.

The usefulness of the method is clarified by comparing calculated and measured dynamic characteristics and motion of the small-sized DC motors.

1. はじめに

最近、情報処理の高速化に伴い FA 機器、OA 機器の高速化がなされている。FA、OA 機器の駆動源には回転機やリニアモータなどの電磁機器が利用されている。FA 機器、OA 機器に使われる回転機やリニアモータのなかに高速回転や高速移動をするものが多くなってきている。一般に導電物体が電磁場中を移動するとき、その速度に起因して速度起電力が導体中に発生して渦電流が流れる。電磁場中を高速で移動する導電物体の解析を精度よく行うためには、導電物体の運動を考慮に入れて解析することが必要である。また回転機、リニアモータが高速回転や高速移動する場合には、高性能化で回転むら、トルクむらが極めて小さく、応答の優れていることが要求される。このようなことから、数値シミュレーションを行う場合には、運動方程式を考慮

にいて解析する事が必要である。小型 DC モータの動特性を考慮に入れて解析する事は、モデルが電気、機械、磁気の系の組み合わせであるという理由で難しい。この論文は、脈動トルクによって回転しているモータの運動を考慮に入れて数値解析をする事によって、小型 DC モータの動特性を得るための方法を述べている。また本手法の有効性は、計算結果、動特性の測定とモータの運動を比較することによって明らかにされている。

2. 速度項を含む電磁場

導電物体が磁場中を移動する場合の支配方程式^{1)~5)}は次式のようにになる。

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \phi + (\sigma V \cdot \nabla) A - J_e - J_m = 0 \quad (1)$$

ただし、 J_e は励磁電流密度、 J_m は等価磁化電流密度、 A はベクトルポテンシャル、 ϕ はス

平成 4 年 12 月 15 日受理

* 八戸工業大学情報システム工学研究所講師

** 八戸工業大学情報システム工学研究所教授

カラーポテンシャル, ν は磁気抵抗率, σ は導電率, V は速度

解析は, (1) 式を二次元場として取扱い, 重み付き残差法を用いて離散化して行った。

3. モータの運動方程式

モータの同期化速度近傍における回転子の回転角 θ に対する運動方程式⁶⁾は, 次式のように表される。

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} \pm T_L = T_M \quad (2)$$

但し, J は慣性能率, D はモータの制動定数, T_L は負荷トルク, T_M はモータに発生するトルク $J = Gd^2/4$, d : 直径, G : 全質量。

トルク T_M は (1) 式を重み付き残差法によって離散化を行い解析し, 解析より得られた結果をもとにローレンツ力を用いて求める。導体には流れる電流密度を J_e , ギャップ中の平均磁束密度を B とすると電磁力 $F^{(7)}$ は, 次式のように表される。

$$F = \int J_e \times B dv \quad (3)$$

但し, dv は微小体積

トルク T は, (3) 式の電磁力 F と中心からの距離 R から,

$$T = 2RF \quad (4)$$

のように表される。

また (2) 式を角速度 ω , 角加速度 α を用いて表すと次のようになる。

$$J\alpha + D\omega \pm T_L = T_M \quad (5)$$

時刻 t のときモータの回転子の角加速度を α^t とすると (6) 式のように表される。

$$\alpha^t = T_M^t/J - (D\omega \pm T_L^t)/J \quad (6)$$

但し, T_M^t , T_L^t は時間 t における瞬時発生トルク及び負荷トルク

時刻 $t + \Delta t/2$ における角速度を, Δt 時間間隔

における回転子の平均角速度とみなして, 時刻 $t + \Delta t$ における回転子は, 時刻 $t + \Delta t/2$ における角速度を用いる。この平均角速度を時刻 $t + \Delta t$ における角速度として計算を行う。また微小時間 Δt の間に回転子が移動する回転角 $\Delta\theta$ は, 回転子の運動を等加速度運動とみなすと次式で近似できる。

$$\Delta\theta = \omega^t \Delta t + \frac{1}{2} \alpha^t \Delta t^2 \quad (7)$$

時刻 $t + \Delta t$ における回転子の角速度 $\omega^{t+\Delta t}$ が, 時刻 $t + \Delta t/2$ における平均角速度であるとすると次式のように表される。

$$\omega^{t+\Delta t} = \omega^t + \alpha^t \Delta t \quad (8)$$

以上をステップバイステップで時間を追って計算を行うと, 微小時間におけるトルクの値や回転子の角速度, 角加速度を求めることができる。

4. 測定及び解析結果

図1は, 解析に用いた直流マイクロモータの構造図を示したものである。回転子の位置が図のような状態のとき回転子の回転角度 $\theta = 0^\circ$ とした。モータの回転方向は, 反時計方向に回転するものとする。

図2は本解析の計算手順を示したものである。はじめにモータ端子電圧 V , 巻線抵抗 R_c , 慣性モーメント J , モータの制動定数 D , 磁気抵抗率 ν , 磁化 M , 刻み時間 Δt 初期値を代入する。初期値の代入が終了すると同時に有限要素解析を行う。ここでモータ内の磁束分布が計算される。有限要素解析を終えた後にローレンツ力より得られた結果を基にトルクの計算を行う。このトルクの値をもとに角加速度 α^t , 移動角度 $\Delta\theta$, 角速度 $\omega^{t+\Delta t}$ の計算を行う。指定時間以内の場合には, 有限要素解析に戻り同様の手順を繰り返す。指定時間になったならば終了する。

図3は無負荷時の角速度と電流の時間的变化

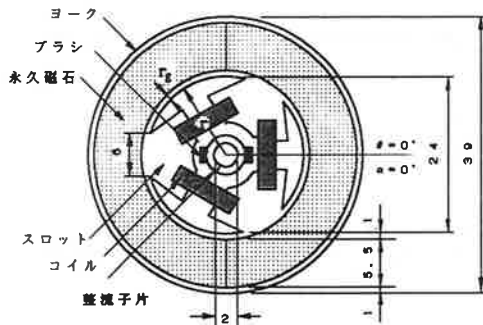


図1 直流マイクロモータの構成図
Fig.1 Cross-section of DC micromotor

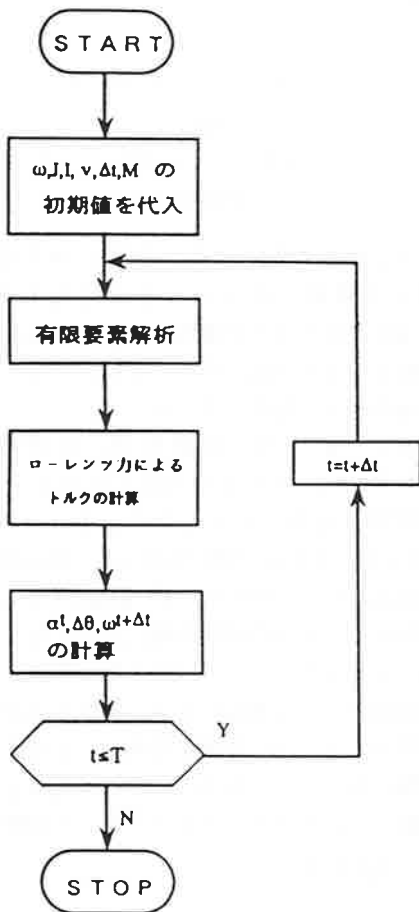


図2 計算手順
Fig.2 Flow chart

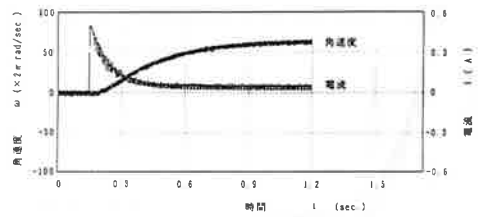


図3 モータの角速度及び電流の測定
Fig.3 measurements of angular velocity and current

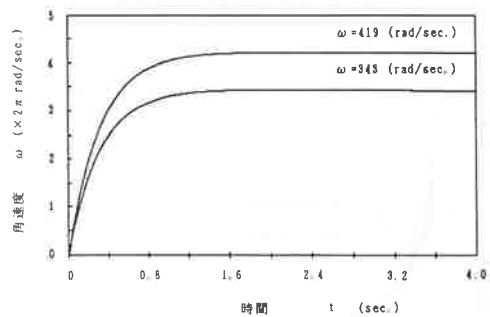


図4 角速度の時間的变化
Fig.4 Waveforms of angular velocity

の測定結果を示したものである。モータの電源がオンになると同時に、モータには瞬時的に大きな電流が流れ、そして指数関数的に減少し定常状態に達する事がいえる。また電流の流入と同時にモータの角速度が0.45(sec.)付近まで直線的に増加した後は、緩やかに増加しながら定常状態に達する事がいえる。

図4は無負荷、負荷時の角速度の時間的变化を示したものである。無負荷、負荷時とも0.45(sec.)付近まで直線的に増加し、後は緩やかに増加しながら定常状態に達する事がいえる。また図3と比較すると、図3の電流の流入から約0.45(sec.)経過後の角速度が、約300 (rad/sec.)とよく一致しており、本解析手法の妥当性がある。また(2)式に於いて負荷 $T_L = 1.9(10^{-3} N \cdot m)$ としたときの角速度の時間的变化を示したものである。解析に利用したモータの負荷トルク T_L が $1.9(10^{-3} N \cdot m)$ のときの角速度は340 (rad/sec.)である。計算より得

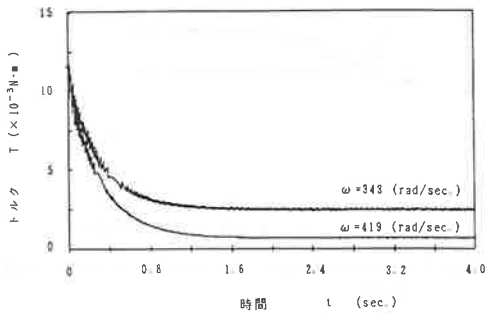


図5 トルクの時間的変化

Fig. 5 Waveforms of torque

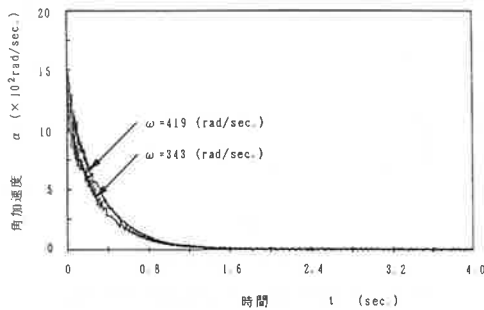


図6 角加速度の時間的変化

Fig. 6 Waveforms of angular acceleration

られた角速度が 343 (rad/sec.) であり、測定値と良く一致しているので、負荷時における解析についても妥当である事がいえる。

図5は無負荷、負荷時のトルクの時間的変化を示したものである。電流の流入と同時に無負荷、負荷時とも大きなトルクが発生し、0.4 (sec.) 付近まで直線的に減少した後、緩やかに減少して定常状態に達する。図よりモータの無負荷時のときのトルクは約 $0.5 (10^{-3} N \cdot m)$ であり、負荷時のトルクは約 $2.5 (10^{-3} N \cdot m)$ である。無負荷時に発生したトルクを無負荷損失トルクとすると、負荷時のトルクは無負荷損失トルクの値を差し引いた値であり、 $2.0 (10^{-3} N \cdot m)$ と、測定値 $T_L = 1.9 (10^{-3} N \cdot m)$ とほぼ一致している。

図6は無負荷、負荷時の角加速度の時間的変

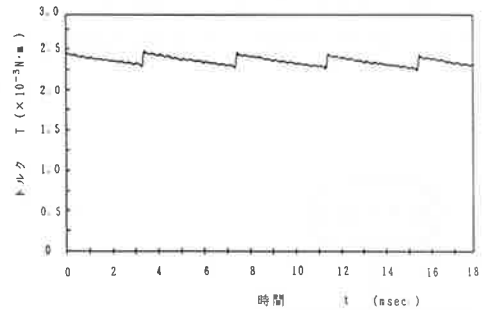
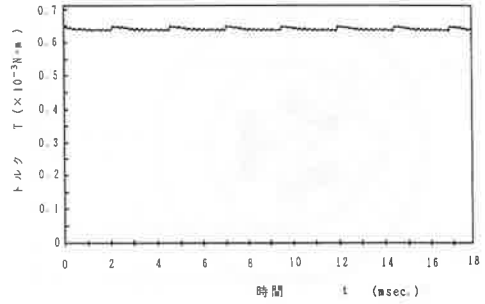


図7 トルクの変動

Fig. 7 Variation of torque

化を示したものである。角加速度は、無負荷、負荷時とも電流の流入のときが最大であり、0.4 (sec.) 付近まで直線的に減少した後、緩やかに減少し 1.6 (sec.) で殆ど零に近くなり、それ以後は微少に変動している。

図7の (a), (b) は無負荷、負荷 $T_L = 1.9 (10^{-3} N \cdot m)$ のときの状態に於けるトルクの時間的変化を示したものである。時刻 $t = 4 (sec.)$ のときを表示開始時刻とし、図に於いて $t = 0 (sec.)$ とし、それから 18 (msec.) までの時間に於けるトルクの時間的変化に示したものである。これよりモータが回転するに従ってトルクが変動している事がいえる。解析では定常状態に於けるモータの電機子電流が一定であるとして解析を行っているが、実際には電機子電流が脈動しているので、トルクはもっと変動するものと思われる。

5. む す び

有限要素法より得られた結果を基にトルクを求め運動方程式を考慮にいれて解析する事によって、モータの動特性を得る事が出来るようになった。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 回転時におけるモータ内のミクロ的な磁束分布を明らかにする事が出来るようになった。

(2) モータの過渡応答についてもミクロ的な立場から検討できるようになった。

(3) 定常状態におけるトルクの脈動を明らかにする事が出来るようになった。

参 考 文 献

1) 大坪, 加川, 村井: 有限要素法による AC パイ

アスを含む磁気記録-再生特性のシミュレーション, 日本シミュレーション学会, pp. 39, 1985

- 2) 織田村: 運動を伴う電磁界の風上有限要素解析, 電学論 B p.41, 昭 60
- 3) 村松, 中田, 高橋: 導体の運動を考慮した渦電流解析法の検討, 日本シミュレーション学会 p. 35, 1991
- 4) Y.KAGAWA AND T.MURAI: FINITE ELEMENT SIMULATI-ON OF MAGNETIC RECORDING-REPRODUCTION PROCESS WITH SPECIAL ATTENTION TO AC-BIASED RECORDING MECHANISM, IEEE, p. 987-990, 1990
- 5) 長田, 梅津, 榎園: 速度項を考慮した準定常磁界の境界要素解析, 日本シミュレーション学会, p. 59, 1990
- 6) 伊藤, 河瀬: 単相交流電磁石の定常吸引力特性の数値解析法, 電学論 B p.605, 平 2
- 7) 電気学会専門委員会: 回転機の電磁界数値解析法, 電気学会技術報告書, 第 375 号, 1991