<Paper>

リラクタンスネットワーク解析に基づく 巻線界磁型クローポールモータの特性算定

Performance Calculation of Field-Winding type Claw-Pole Motor based on Reluctance Network Analysis

市川 優太^{a)†}・中村 健二^{a)},鄭 浙化^{b)},栗本 直規^{b)} ^{a)}東北大学 大学院工学研究科,仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579) ^{b)} ㈱デンソー,愛知県刈谷市昭和町 1-1 (〒448-8661)

Y. Ichikawa ^{a) †}, K. Nakamura ^{a)}, J. Sukhwa ^{b)}, and N. Kurimoto ^{b)}

^{a)} Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980–8579, Japan

^{b)} DENSO CORPORATION., Inc., 1-1 Showacho, Kariya, Aichi 448–8661, Japan

A field-winding type claw-pole motor has a three-dimensional complicated structure. In addition, its characteristics depend on not only an armature current but also a field-current. Therefore, to estimate the characteristics of the field-winding type claw-pole motor, three-dimensional electromagnetic field analysis combined with its drive circuit is required. This paper presents a three-dimensional reluctance network analysis (RNA) model of the claw-pole motor coupled with the drive circuit. The validity of the proposed model is proved by comparing results obtained from a finite element method (FEM).

Keywords: Reluctance Network Analysis (RNA), Field-winding type claw-pole motor

1. はじめに

近年,モータの小型高出力化の要求に対し,構造を3次 元にすることで,鉄心と巻線の空間利用率を高め,トルク を向上させるアイデアがいくつか報告されている^{1),2)}.その 中の一つである界磁巻線型クローポールモータは,爪状の 極を上下でかみ合わせた特殊な構造の回転子鉄心の中に, 同心円状に巻いた界磁巻線を収めることができるため,巻 線占積率を高めることができる.また,界磁電流を調整す ることで,一般的な永久磁石界磁型のモータよりも速度制 御範囲が広い.しかしながら,クローポールモータの特性 算定には,3次元電磁界解析が必須であること,また電機子 電流に加え,界磁電流も制御パラメータとなるため,諸特 性を算定するためには,駆動回路も含めた高速・高精度な 解析が必要不可欠である.

これに対して筆者らは、トランスやモータなどの解析対 象を複数の要素に分割し、分割した要素を磁気抵抗に置き 換えることで、対象全体を一つの磁気抵抗回路網で表して 解析する、リラクタンスネットワーク解析(Reluctance Network Analysis: RNA)を提案している³⁾. RNA は、モ デルが簡便で計算が速く、外部の電気回路や運動系との連 成も容易などの特長を有する.これまでに、RNA における 回転子の回転運動の表現方法、並びにトルクの統一的算定 手法などを明らかにしてきた^{3)・7)}.

本稿では, RNA に基づく界磁巻線型クローポールモータ の特性算定法について検討を行う. クローポールモータは 回転子の構造が 3 次元で特殊であるのに対して, 固定子は 一般的な 2 次元構造であることから, 回転子では無く固定 子の磁気回路を回転子位置角の関数で表すことで、回転運動を表現する手法について提案するとともに、有限要素法 (FEM)との比較検討を行ったので報告する.

2. クローポールモータの基本構成

Fig. 1(a)に、考察対象としたクローポールモータを示す. 固定子は48スロットであり、固定子鉄心の材質は厚さ0.35 mmの無方向性ケイ素鋼板である.回転子は、上下8つず つの爪状の極がかみ合わさっており、内部に同心円状に巻 かれた界磁巻線が収められている.電機子巻線は正弦波イ ンバータによるベクトル制御、界磁巻線はスリップリング とブラシを介して直流で励磁を行う.



Fig. 1 Specifications of a claw-pole motor.





Fig. 2(a)に, FEM の 3 次元磁界解析で求めた,界磁磁束 のベクトルプロットを示す.なお,解析では磁界の対称性 から 1/8 モデルを用いた.界磁電流により発生した磁束は, 回転子極先端からギャップを介して固定子に流入した後, 隣接する回転子極に戻る.これにより,同図(b)に示すよう に回転子極表面は交互に NSNS…と磁化される.したがっ て,電機子電流によって,この磁化された回転子の極数と 同じ極数の回転磁界を生じさせれば,回転子は回転磁界に 同期して回転する.すなわち,界磁巻線型クローポールモ ータの回転原理は,一般的な同期機と等しい.また同図か ら明らかなように,クローポール形状の回転子内部の磁束 は,一般的なモータとは異なり,軸方向にも流れる.した がって,モータ特性の算定には 3 次元解析が必須となる.

3. RNA に基づくクローポールモータの特性算定

3.1 RNA モデルの導出

Fig. 3 (a)に, RNA に基づくクローポールモータの分割図, および分割数を示す. 電磁気的な対称性から 1/8 モデルを作 成した. 固定子については,軸方向(z軸方向)に一様な構 造であり, Fig. 2 (a)からも明らかなように軸方向には,磁束 はほとんど流れないため軸方向には分割しない. 一方,径 方向(r方向)はヨーク,ティース,つば部分を1,2,1の 計4分割とし,周方向(θ 方向)は 60 分割とした.回転子 については,爪形の回転子極の傾斜を考慮するため,同図 に示すように軸方向に 5 層に分割し,階段状に近似するこ とで爪の形状を模擬した.以降では,軸方向に分割した各 層を,同図の上から順に Layer-A~Layer-E と称する. 各 層とも径方向には 4 分割し,周方向にはギャップに一番近 い領域から順に 30, 15, 15, 15 分割とした. この径方向に



(a) Division of the motor based on RNA.



(b) Three-dimensional unit magnetic circuit.

Fig. 3 Motor division and unit magnetic circuit based on RNA.

4 分割した領域を,以降では Rotor-a~Rotor-d と称する. なお,爪状の回転子極以外の鉄心部については,磁束の流 れが単純で分布や漏れ磁束も無視できることから,界磁磁 束の流れに沿った磁気抵抗のみを配置した.最後に,ギャ ップ部は軸方向に5分割,径方向に1分割,周方向に60分 割した.

分割した各要素は同図(b)に示すような、3次元方向の6 つの磁気抵抗で表す.このとき、鉄心部の磁気抵抗は磁気 特性の非線形性を考慮する必要があるため、次のような関 数で材料のB-H曲線を近似する.

$$H = \alpha_1 B + \alpha_n B^n \tag{1}$$

Fig.4に,回転子鉄心および固定子鉄心の*B-H*曲線と上式 による近似曲線を示す. それぞれの係数については,回転 子 鉄 心 は $\alpha_1 = 230$, $\alpha_n = 9.5$, n = 11,固定子 鉄 心 は $\alpha_1 = 660$, $\alpha_n = 18.1$, n = 11である.

(1)式より,鉄心の非線形磁気抵抗は,次式で表される.

$$R = \frac{\alpha_1 \iota}{S} + \frac{\alpha_n \iota}{s^n} \phi^{n-1} \tag{2}$$

一方,周囲空間の磁気抵抗 R_{air} は,各要素の平均断面積を S,平均磁路長を l,真空の透磁率 μ_0 として,次式で与える.

$$R_{air} = \frac{l}{\mu_0 S} \tag{3}$$



(b) Rotor core

Fig. 4 *B*-*H* characteristics of stator and rotor cores and their approximated curves.



Fig. 5 Magnetic circuit of Layer-A.

Fig. 5に、上述のようにして導出した 3 次元 RNA モデル の Layer-A の磁気回路を示す. 図中の灰色背景部が鉄心で ある. 各層ごとに空気と鉄心の領域を変化させることで、 爪状の回転子極の傾斜を表現している.

3.2 回転運動の模擬

RNA において回転運動を模擬するには、回転子磁気回路 の起磁力や磁気抵抗を回転子位置角のの関数で表せばよい. しかしながら、クローポールモータのように、回転子の形 状が3次元で複雑になると、可変起磁力や可変磁気抵抗の 数が非常に多くなるため、計算時間の長大化や解の収束性 が悪化する可能性がある。そこで本稿では、回転子の代わ りに固定子磁気回路の起磁力と磁気抵抗を回転子位置角 の関数で表すことで、回転運動を模擬することを試みた。

具体的には、まず巻線電流起磁力については、回転運動 に伴い回転子側から見た固定子巻線の向き、すなわち起磁 力の向きが周期的に正負反転することから、Fig.6に示すよ うな周期関数 $F(\theta)$ を用いて、次式で表す.

$$f(\theta) = Ni \cdot F(\theta) \tag{4}$$

ここで、Nは巻数、iは巻線電流である.

次いで,固定子の磁気抵抗については,非線形磁気特性 に加えて回転運動に伴う変化を考慮する必要がある.(2)式 より,非線形磁気抵抗に生じる起磁力は,

$$f_{stator} = R \cdot \phi = \frac{\alpha_1 l}{S} \phi + \alpha_n l \left(\frac{\phi}{S}\right)^n \tag{5}$$

で表されることから、このうち、右辺第 1 項の係数 α_1 については、比透磁率 μ_r を次式のように回転子位置角 θ の関数で表すことで与える.

$$\alpha_1(\theta) = \frac{1}{\mu_r(\theta)\mu_0} \tag{6}$$

また,(5)式の第2項については, Fig.7に示すように係 数 α_n の値を回転子位置角 θ の関数で与えることにより,回転



Rotational angle θ (deg.)





Fig. 7 Coefficient α_n with respect to the rotor position angle θ .



Fig. 8 Magnetic circuit of the stator considering the rotational motion.

運動に伴う変化を表現する.なお、具体的な値は、空気領域の場合は $\alpha_n = 0$ 、鉄心領域の場合は $\alpha_n = 18.1$ である.

Fig. 8 に、上述のようにして構築した固定子磁気回路を

示す. 同図において,巻線電流起磁力はすべて(4)式で与え られる可変起磁力で表し,鉄心部はヨーク以外の磁気抵抗 を(5)式で与えられる可変磁気抵抗で表すことで,回転子の 回転運動を模擬する.

3.3 特性算定結果

前章で導出した3次元 RNA モデルを用いて,クローポー ルモータの特性算定を行った.計算には,汎用の回路シミ ュレータである PSpice を用いた.また,FEM による算定 結果と比較をするため,JMAG-Designer を用いて,Fig.2(a) に示した実際のモータ形状の3次元 FEM モデルを作成し, 特性の算定を行った.

まず始めに, Fig. 9 に外部から回転子を 450 rpm で回転 させたときの無負荷誘起電圧特性を示す. 界磁電流の増加 に伴う磁気飽和により,電圧の上昇が抑制されている様子 が RNA モデルで良く再現されていることがわかる.

次いで, Fig. 10 に, 3 相正弦波電流を入力とし, d 軸電流 が-150~150 A, q 軸電流が 0~150 A (各々50 A 刻み)の 全 28 条件について求めた FEM と RNA のトルクの平均値 を示す. なお, 界磁電流は 3 A 一定とし,回転数は 450 rpm 一定とした. これらの図を見ると両者はおおよそ一致して いることがわかる. 全 28 条件の RNA の FEM に対する平 均誤差率は 10.2%であった.

なお、両者の誤差の原因は、FEM モデルと RNA モデル の回転子極形状の差が主であると考えられる. なお、計算 時間については、FEM がおおよそ1条件当たり19時間で あったのに対し、RNA は8分程度であり、大幅な計算時間 の短縮が図れた.

4. まとめ

以上、本稿では、RNAに基づく界磁巻線型クローポール モータの特性算定について検討を行った。

クローポールモータは、回転子の構造が 3 次元であるの に対して、固定子は単純な 2 次元構造であることから、回 転子では無く固定子の磁気抵抗と巻線電流起磁力を回転子 位置角の関数で表すことで、回転運動を表現する手法を提 案するとともに、FEM との比較によって、導出した RNA モデルの妥当性を明らかにした.

今後は, RNA のさらなる精度の向上と回転子表面に生じ る渦電流の解析法について検討を進める予定である.

References

- Y. Enomoto, H. Tokoi, K. Kobayashi, H. Amano, C. Ishihara, and K. Abe, *IEEJ Trans. IA*, **129**, 1004 (2009) (in Japanese).
- M. Inoue : Motor technology Symp, 30, C5-3-1 (2010) (in Japanese).
- O. Ichinokura, K. Tajima, H. Tanaka, and Y. Yoshida, "Jikikairoho niyoru Mota no Kaisekigijutsu", Kagakugijutsu shuppan (2016) (in Japanese).



Fig. 9 No-load induced voltage characteristics.



Fig. 10 Torque estimation result of RNA and FEM.

- T. Mizuguchi, K. Nakamura, T. Koyama, and O. Ichinokura, *IEEJ Trans. IA*, **129**, 1048 (2009) (in Japanese).
- K. Suzuki, K. Nakamura, and O. Ichinokura, J. Magn. Soc. Jpn., 35, 281 (2011) (in Japanese).
- T. Miyashita, K. Nakamura, and O. Ichinokura, J. Magn. Soc. Jpn., 31, 127 (2009) (in Japanese).
- K. Nakamura and Osamu Ichinokura, *IEEJ Trans. IA*, 135, 1063 (2015) (in Japanese).

2017年10月10日受理, 2018年03月08日採録