

リラクタンスネットワーク解析に基づく 可変磁束メモリモータの動特性算定

Calculation of Dynamic Characteristics of Variable Flux Memory Motors based on Reluctance Network Analysis

深田敏希^{a)}・羽根吉紀^{b)}・中村健二^{a)†}

^{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)}東洋大学 理工学部, 埼玉県川越市鯨井 2100 (〒350-8585)

T. Fukata^{a)}, Y. Hane^{b)}, K. Nakamura^{a)†}

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

^{b)} Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama 350-8585, Japan

Variable flux memory motors achieve a wider operating speed range without the need for flux weakening control by regulating the magnetization of permanent magnets. To design these motors to have higher performance, a fast and accurate analysis method is required. Reluctance network analysis (RNA) can be applied to characteristic calculations of various electric machines, due to advantages such as a simple model, fast calculation, and easy coupling with external electric circuits and motion equations. This paper presents the results of calculating the dynamic characteristics of a variable flux memory motor using RNA.

Key words: Variable flux memory motor, Reluctance network analysis (RNA), Dynamic characteristics

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けて、電気自動車に代表されるように、動力の電化が国内外で推進されている。これに伴い、界磁に永久磁石を用いた高効率なモータが、電気自動車や家電機器に広く適用されている。しかし、一般的な永久磁石モータは磁石磁束が一定であるため、回転速度に比例して巻線に誘起される逆起電力が上昇する。したがって、中・高速回転域では弱め界磁制御が必須となり、効率が低下するという課題がある。これに対して、可変磁束メモリモータは永久磁石の磁力を能動的に調整することで、弱め界磁制御無しに高速運転が可能であり、幅広い速度領域で高効率な運転を実現できることから、電気自動車への応用が期待されている¹⁾。

より高性能な可変磁束メモリモータの研究開発には、高速かつ高精度な解析法の確立が望まれるが、有限要素法 (Finite Element Method: FEM) による解析は本質的に計算量が多く、計算時間の長大化が懸念される。これに対して筆者らは、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²⁾。RNA は、解析対象を複数の要素に分割して各々を磁気抵抗で表し、対象全体を一つの磁気抵抗回路網として扱う。RNA は解析モデルがシンプル、計算時間が短く算定精度が比較的高い、電気回路や熱回路、運動方程式などとの連成解析が容易などの長を有し、モータをはじめとした、種々の電気機器の特性算定に適用できる³⁻⁵⁾。また、汎用の電気・電子回路シミュレータをソルバとして利用できるため、実用性も高い。しかしながら、可変磁束メモリモータの解析に RNA が適用された例は無い。特に、外部からの印加磁界に応じて、磁石の磁力が動的に変化することまで表現可能な RNA モデルの確立が望まれる。

そこで本論文では、可変磁束メモリモータの動特性算定が可能な RNA モデルを導出し、特性算定結果を FEM と比較することで、その妥当性を検討したので報告する。

2. 可変磁束メモリモータの RNA モデルの導出

2.1 可変磁束メモリモータの諸元と RNA モデル

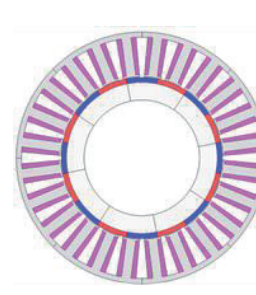
Fig. 1 に、検討に用いた 3 相 16 極 24 スロットの可変磁束メモリモータの諸元を示す⁶⁾。Fig. 2 に、構築した同モータの 1 スロット分の RNA モデルの簡略図を示す。径方向には、固定子ヨーク、固定子極上部、固定子極下部、固定子極先端、ギャップ、永久磁石、回転子ヨークの 7 つに分割した。ここで、固定子極上部の径方向長 l_{su} と固定子極下部の径方向長 l_{sd} は等しく、各要素の長さに応じた巻線起磁力を分散して配置している。一方、ギャップ周辺の周方向分割数については、同図では 1 スロット当たり 12 であるが、実際には複雑な磁束分布を表現するため、周方向に 0.5 度刻みで 30 分割している。また、構築した RNA モデルは、磁界の周期性から 1/8 モデルとしている。

2.2 非線形磁気抵抗のモデル化

磁気回路において鉄心の非線形磁気特性を考慮する場合には、鉄心材料の $B-H$ 曲線を次式のような非線形関数で近似することが多い。

$$H = \alpha_1 B + \alpha_n B^n \quad (1)$$

一方、可変磁束メモリモータは、永久磁石の磁化制御時に大電流を流すため、通常のモータに比べて大きな磁界が鉄心に印加され



Motor diameter	261.1 mm
Axial length	61 mm
Air gap	0.8 mm
Magnet length	5 mm
Core material	35A300
Number of windings/pole	100
Winding resistance/phase	1 Ω

Fig. 1 Specifications of variable flux memory motor.

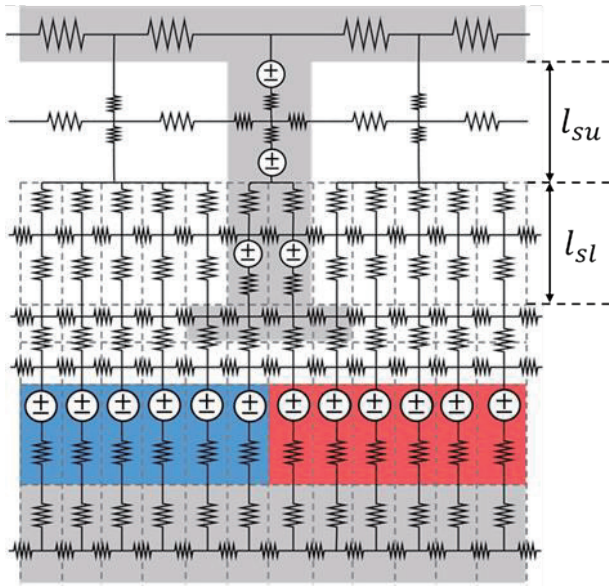


Fig. 2 Schematic diagram of RNA model for one slot of variable flux memory motor ($l_{su} : l_{sl} = 5 : 5$).

る。これに対して、(1)式は磁界強度 H が大きい領域において、比透磁率が 1 を下回るため、磁化制御時の計算精度が著しく悪化する恐れがある。そこで、(1)式に対して次のような補正項 $h_{sat}(B)$ を加えることで、比透磁率が 1 を下回らないようにする。

$$H = \alpha_1 B + \alpha_n B^n - h_{sat}(B) \quad (2)$$

$$\begin{cases} h_{sat}(B) = 0 & (B \leq B_{sat}) \\ h_{sat}(B) = \alpha_1 B + \alpha_n B^n - \left(\frac{B - B_{sat}}{\mu_0} + H_{sat} \right) & (B > B_{sat}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 H_{sat} は $B = B_{sat}$ のときの磁界強度であり、本論文では B_{sat} は 2.0 T とした。Fig. 3 に、(1)式および(2)式の B - H 曲線を示す。なお、 $\alpha_1 = 51$ 、 $\alpha_{15} = 2.5$ 、 $n = 15$ である。この図を見ると、(2)式の B - H 曲線は 2.0 T 以降は傾きが一定 (比透磁率 1.0) になっていることがわかる。

(2)式について、RNA に基づく各分割要素の長さを l 、断面積を S とすると、鉄心の非線形磁気抵抗 R_m は次式で与えられる。

$$R_m = \frac{\alpha_1 l}{S} + \frac{\alpha_n l}{S^n} \phi^{n-1} - \frac{h_{sat}(B)l}{\phi} \quad (4)$$

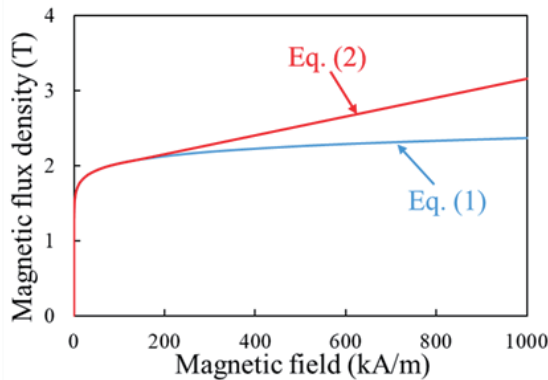


Fig. 3 Comparison of approximated B - H curves obtained from Eqs. (1) and (2).

2.3 可変磁力磁石のモデル化

磁気回路において、永久磁石は次式の磁石起磁力 f_{pm} と内部磁気抵抗 R_{pm} の直列回路で表される。

$$f_{pm} = H_c l_{pm} \quad (5)$$

$$R_{pm} = \frac{l_{pm}}{\mu_r \mu_0 S_{pm}} \quad (6)$$

ここで、 H_c は磁石の保磁力、 μ_r はリコイル比透磁率、 l_{pm} と S_{pm} は磁石厚と磁石断面積である。

Fig. 4 に、磁石材料の B - H ループの模式図を示す。通常の永久磁石モータでは、Nd-Fe-B 磁石のような高保磁力材が用いられる。その保磁力は 1000 kA/m 以上であり、モータの電機子巻線から印加可能な磁界によって、磁石磁力を変化させることは困難である。そこで、可変磁束メモリモータでは、Al-Ni-Co 磁石や Sm-Co 磁石のような、保磁力の小さい磁石が用いられる。ただし、保磁力が小さすぎると通常の負荷電流で不可逆減磁が起きてしまうため、可変磁束メモリモータに適する可変磁力磁石の保磁力は 100~500 kA/m が適当であると言われている⁶⁾。

可変磁束メモリモータの特性算定においては、可変磁力磁石の B - H ループの表現および動作点の同定が重要になる。Fig. 4 より、磁石材料の B - H ループは急激に透磁率が変化する箇所(クニック点)を有しており、その他の領域では線形に近い動作をすることがわかる。そこで本論文では、Fig. 5 に示すような線形ヒステリシスモデルを用いて、可変磁力磁石の B - H ループを近似的に表現し、磁石の挙動を模擬する⁷⁾。

Fig. 5 に示すように、線形ヒステリシスモデルにおいて、永久磁石の磁化曲線は次のような 3 つの直線により表現される。

$$\text{Line 1: } H_{m1} = \frac{B_m - B_{rk}}{\mu_r \mu_0} \quad (7)$$

$$\text{Line 2: } H_{m2} = \frac{B_m}{\mu_g \mu_0} + H_{c1} \quad (8)$$

$$\text{Line 3: } H_{m3} = \frac{B_m}{\mu_g \mu_0} - H_{c1} \quad (9)$$

ここで、 B_{rk} は 1 つ前の解析ステップにおける残留磁束密度、 μ_g は最大比透磁率、 H_{c1} は永久磁石の最大磁化時の保磁力である。入力動作磁束密度 B_m から H_{m1} 、 H_{m2} 、 H_{m3} を計算し、次式に基づいて残留磁束密度 B_r を更新する。

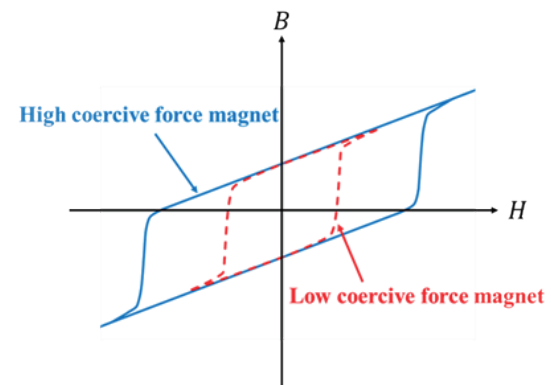


Fig. 4 Schematic diagram of B - H loops of permanent magnets with high and low coercive forces.

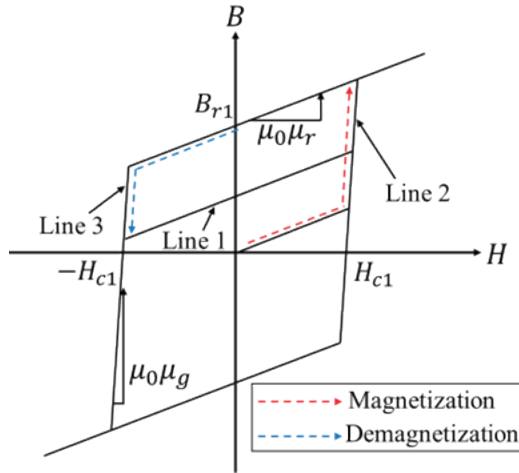


Fig. 5 Linear hysteresis model of variable flux magnet.

$$\begin{cases} B_r = B_{rk} & (H_{m3} \leq H_{m1} \leq H_{m2}) \\ B_r = B_m - \mu_r \mu_0 H_{m2} & (H_{m2} < H_{m1}) \\ B_r = B_m + \mu_r \mu_0 H_{m3} & (H_{m1} < H_{m3}) \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 B_r は最大磁化時の残留磁束密度 B_{r1} を用いて、次のように制限される。

$$\begin{cases} B_r = B_{r1} & (B_r > B_{r1}) \\ B_r = -B_{r1} & (B_r < -B_{r1}) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、検討に用いた可変磁力磁石のメジャーロープの測定結果より、 $B_{r1}=1.24\text{ T}$ 、 $H_{c1}=444\text{ kA/m}$ とした。また、メジャーロープの B 軸切片および H 軸切片の傾きより、 $\mu_r=1.05$ 、 $\mu_g=24.7$ とした。

Fig. 6 に、RNA モデルの回転子磁石部の拡大図を示す。可変磁力磁石を表現するには、RNA モデルの各磁石要素に流入する磁束から、線形ヒステリシスモデルに基づいて残留磁束密度 B_r を解析ステップごとに計算し、逐次更新する必要がある。さらに、回転運動を表現するため、回転子が 0.5 度回転することにより、 B_r を隣り合う磁石要素間で受け渡す必要がある。なお、各磁石要素の B_r から、次式により保磁力 H_{cj} が計算される。

$$H_{cj} = \frac{B_{rj}}{\mu_r \mu_0} \quad (12)$$

よって、RNA モデルの各磁石要素の起磁力 f_{mj} は、上式の H_{cj} を (5) 式に代入することで求まる。

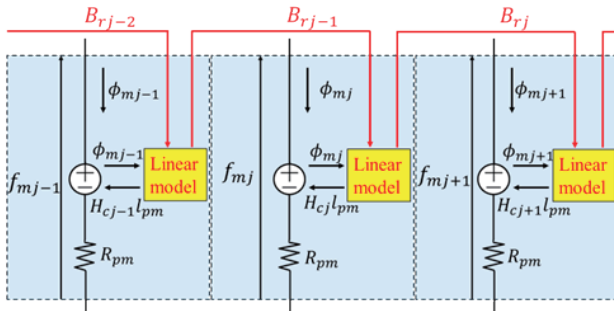


Fig. 6 Enlarged view of rotor magnet part of RNA model.

3. RNA による可変磁束メモリモータの動特性算定

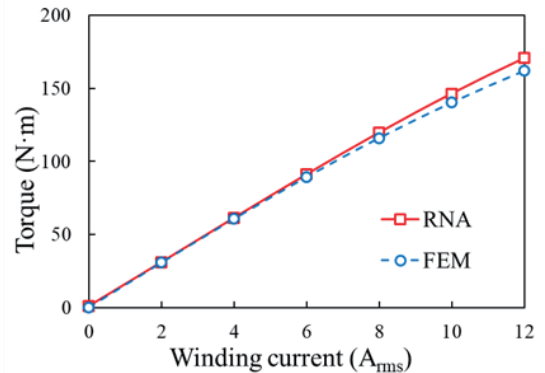
3.1 磁力を固定した場合の特性算定結果

RNA において、永久磁石モータのトルクは次式で計算することができる。

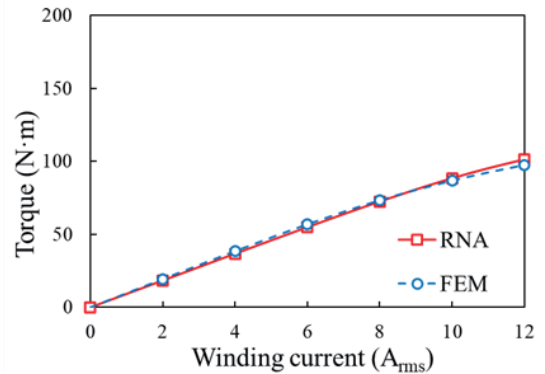
$$\tau_m = \frac{n_\theta}{4\pi} \left\{ \phi_{m1} (f_{m2} - f_{mn_\theta}) + \dots + \phi_{mn_\theta} (f_{m1} - f_{mn_\theta-1}) \right\} \quad (13)$$

ここで、 n_θ は周方向の要素分割数であり、本論文の RNA モデルでは $n_\theta=720$ である。 f_{mj} および ϕ_{mj} は、Fig. 6 に示すように、RNA モデルにおける回転子磁石部の j 番目の要素の起磁力と磁束の径方向成分である。すなわち、RNA において永久磁石モータの発生トルクは、磁石部の要素に流れる磁束 ϕ_{mj} と、これと隣接する2つの要素の起磁力の差 ($f_{mj+1} - f_{mj-1}$) の積を、すべての要素について計算し、これらの和として与えられる。

Fig. 7 に、磁石磁力を一定とした際の電流対トルク特性の計算値を示す。同図(a)は、可変磁力磁石の磁化状態を100% ($B_r=1.24\text{ T}$)としたときの結果であり、同図(b)は50% ($B_r=0.62\text{ T}$)としたときの結果である。なお、RNA の計算には汎用の電気・電子回路シミュレータである Ansys Twin Builder 2021 R1 を使用し、FEM には有限要素法解析ソフト JMAG-Designer ver. 23.1 を使用した。これらの図を見ると、いずれの磁化状態においても RNA と FEM の結果は良好に一致しており、構築した RNA モデルの妥当性が了解される。



(a) $B_r = 1.24\text{ T}$



(b) $B_r = 0.62\text{ T}$

Fig. 7 Calculated current versus torque characteristics with fixed magnetization of variable flux magnets.

3.2 磁力を変化させた場合の特性算定結果

Fig. 8 に、磁石磁力を動的に変化させた際のトルク波形の計算結果を示す。初期の磁石は無着磁状態であり、 d 軸に正負のパルス電流を印加することで、磁石を着減磁させた (+300 A@17 ms → -45 A@54 ms → +500 A@92 ms → -25 A@130 ms)。ここで、パルス電流の大きさは、事前に FEM を用いてパルス電流値ごとのトルク平均値を計算し、最大トルクを 1 として、無負荷状態から順に、おおよそ 2/3, 1/3, 1, 2/3 となるように決定した。また、一般的に、可変磁束メモリモータにおいて、可変磁力磁石の着磁・減磁動作は 1~10 ms 程度で行われていることから⁶⁾、本論文ではパルス電流の印加時間を 2 ms とした。なお、 q 軸電流は 5 A で一定、回転速度は 600 rpm で一定とした。Fig. 8 を見ると、RNA と FEM の結果は定性的に一致しており、RNA により可変磁束メモリモータの動特性が算定可能であることが了解される。

一方、Table 1 に、パルス電流を印加して磁石を着減磁させた後の各磁化状態におけるトルクの平均値の算定結果を示す。同表の誤差率 ε は、次式で計算した。

$$\varepsilon = \frac{\tau_{\text{RNA}} - \tau_{\text{FEM}}}{\tau_{\text{FEM(max)}}} \times 100(\%) \quad (14)$$

ここで、 τ_{FEM} と τ_{RNA} は各々 FEM と RNA で算定したトルク、また、 $\tau_{\text{FEM(max)}}$ は FEM で算定した最大磁化時のトルクであり、同表より、 $\tau_{\text{FEM(max)}} = 38.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ である。この表を見ると、各磁化状態におけるトルクの平均値には定量的な差異が認められる。また、着磁後の誤差の符号が正、減磁後は負であることから、RNA モデルの方が電機子側からの着減磁の磁界がより強く磁石に印加されていると推察される。

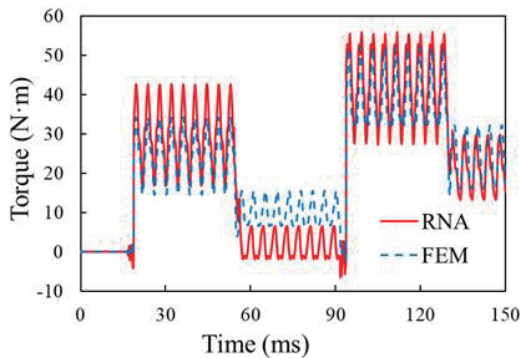


Fig. 8 Calculated torque waveforms with dynamically changing magnetization of variable flux magnets.

Table 1 Average torque for each magnetization of variable flux magnets.

Current pulse (A)	RNA (N·m)	FEM (N·m)	ε (%)
+300	30.0	24.6	13.8
-45	1.45	10.0	-22.0
+500	42.9	38.9	10.4
-25	21.0	23.5	-6.61

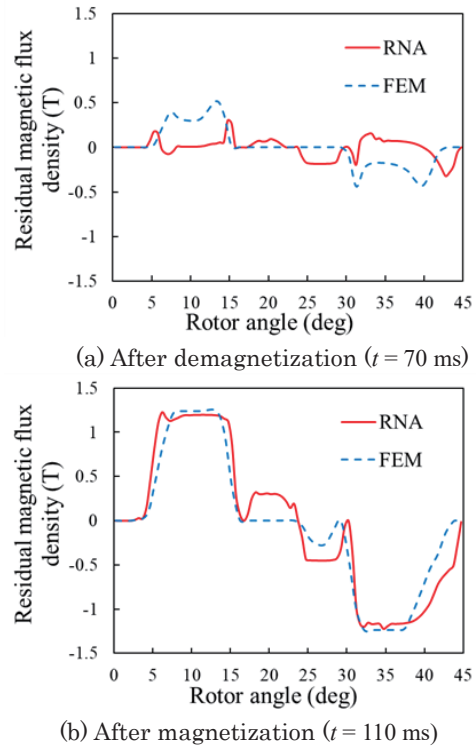


Fig. 9 Calculated residual magnetic flux density distributions after demagnetization and magnetization.

Fig. 9 に、着減磁後の可変磁力磁石の残留磁束密度分布の計算結果を示す。グラフの横軸は q 軸を $\theta = 0 \text{ deg}$ として、反時計周りの方向を θ の正方向としている。同図(a)は-45 A の d 軸パルス電流による減磁後 ($t = 70 \text{ ms}$) の計算結果であり、同図(b)は 500 A の d 軸パルス電流による着磁後 ($t = 110 \text{ ms}$) の計算結果である。同図より、RNA と FEM の残留磁束密度分布の計算結果に差異が生じていることがわかる。また、先述の考察のとおり、減磁後の残留磁束密度分布は RNA モデルの方が小さく、一方、着磁後は RNA モデルの方が大きいことがわかる。

以上の結果から、磁化制御後の磁石動作点が両モデルで一致していないことが、トルクの平均値に差異が生じた原因であると結論付けることができる。

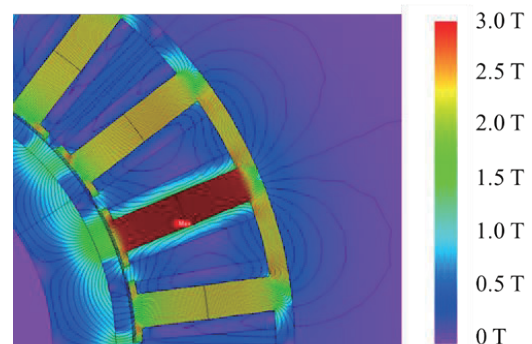


Fig. 10 Contour diagram of flux density and flux lines while magnetization of variable flux magnets is changing.

Fig. 10 に、FEM で求めた磁化制御時の磁束密度コンター図および磁束線図を示す。この図を見ると、磁化制御時は固定子極が極めて強く飽和し、固定子極周辺から外部への漏れ磁束が多くなっていることが了解される。特に、固定子極先端では隣接極に直接流れ込んでいる磁束が多い。したがって、構築した RNA モデルは FEM に比べて固定子極周辺の分割数が粗いことで漏れ磁束が十分に模擬できておらず、動作点に差異が生じたと考えられる。

4. 分割方法の変更による計算精度の向上

前章より、RNA の精度改善のためには、要素分割を細かくすることが有効であると考えられる。しかしながら、要素数の増加は計算時間の長大化につながる。そこで本章では、要素数は変えずに固定子極の径方向の分割比を変化させ、分割に粗密をつけることで、計算精度の向上を試みた。分割方法の例として、Fig. 11 に固定子極を 8 : 2 に分割した場合の RNA モデルの簡略図を示す。

Table 2 に、固定子極の径方向の分割比 $l_{su} : l_{sl}$ を、5 : 5 から 7 : 3, 8 : 2, 9 : 1 に変化させた際の、磁化状態ごとのトルクの平均値の算定結果を示す。同表より、分割比を 8 : 2 とした際に最も FEM との差異が小さいことがわかる。また、その誤差率は 6%未満であり、高精度に特性算定が可能であることが了解される。

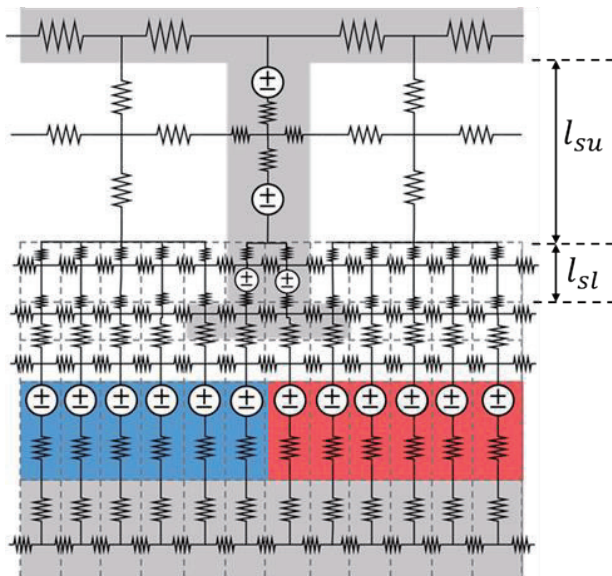


Fig. 11 Schematic diagram of RNA model for one slot of variable flux memory motor ($l_{su} : l_{sl} = 8 : 2$).

Table 2 Average torque for each division ratio of stator pole.

Current pulse (A)	5 : 5 (N·m)	7 : 3 (N·m)	8 : 2 (N·m)	9 : 1 (N·m)	FEM (N·m)
+300	30.0	26.8	24.3	20.2	24.6
-45	1.45	5.19	7.74	10.1	10.0
+500	42.9	40.9	38.2	33.3	38.9
-25	21.0	22.2	22.6	23.1	23.5

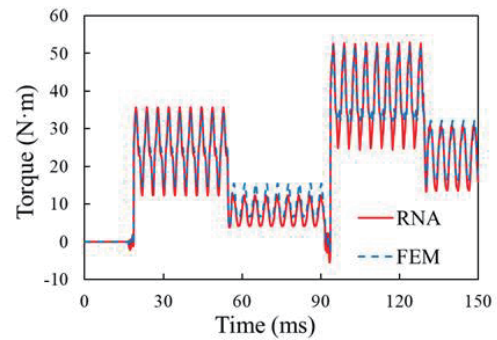
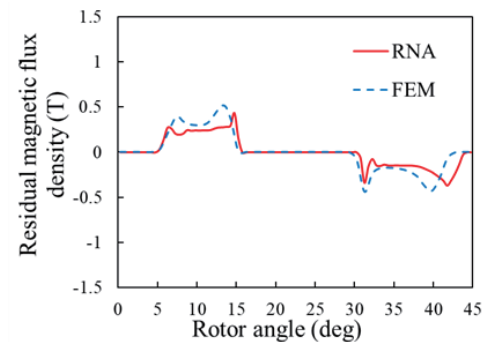
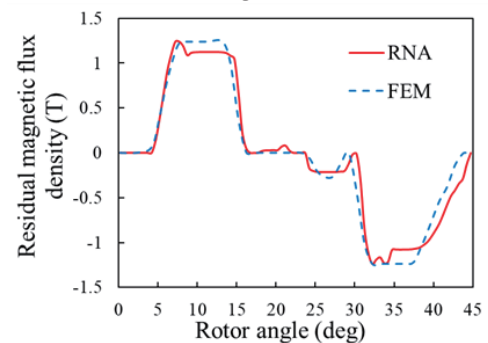


Fig. 12 Calculated torque waveforms with modified RNA model.



(a) After demagnetization ($t = 70$ ms)



(b) After magnetization ($t = 110$ ms)

Fig. 13 Calculated residual magnetic flux density distributions after demagnetization and magnetization with modified RNA model.

Fig. 12 と Fig. 13 に、固定子極の分割比を 8 : 2 とした場合のトルク波形と残留磁束密度分布の計算結果を示す。これらの図を見ると、Fig. 8 と Fig. 9 に示した分割比の変更前と比べて、両モデルの計算波形が良好に一致していることがわかる。

5. まとめ

以上、本論文では可変磁束メモリモータの動特性算定が可能な RNA モデルを導出するとともに、FEM と比較することで、その妥当性を検討した。まず始めに、可変磁束メモリモータの RNA モデルの導出方法について述べた。RNA モデルの各磁石要素に流入する磁束から、線形ヒステリシスモデルに基づいて、可変磁力磁石の残留磁束密度を解析ステップごとに計

算し、逐次更新するとともに、回転子が 0.5 度回転するごとに、残留磁束密度を隣接する磁石要素間で受け渡すことで、回転運動まで考慮可能な可変磁束メモリモータの RNA モデルが導出可能であることを明らかにした。

次いで、導出した RNA モデルを用いて、磁石磁力を固定した場合の電流対トルク特性を算定した。その結果、RNA と FEM による計算結果が良好に一致することが明らかとなった。さらに、磁石磁力を動的に変化させた場合のトルク波形を算出し、RNA により可変磁束メモリモータの動特性が算定可能であることを示した。

さらに、RNA の算定精度向上のため、要素数は変えずに、代わりに固定子極の径方向の分割比を変化させることで、計算精度の向上を試みた。その結果、固定子極の分割比を 8 : 2 とし、固定子極先端周辺の分割を相対的に細かくすることで、計算精度が大きく向上することを明らかにした。

References

- 1) K. Sakai and S. Kuramochi: *IEEEJ Trans. IA.*, **131**, 1112 (2011).
- 2) O. Ichinokura, K. Tajima, K. Nakamura, Y. Yoshida: Dynamic analysis of electric motor using magnetic circuit model, Kagakujo Shuppan (2016) (in Japanese).
- 3) K. Nakamura, K. Saito, T. Watanabe, and O. Ichinokura: *J. Magn. Magn. Mater.*, **290-291**, 1313 (2005).
- 4) K. Nakamura, K. Kimura, and O. Ichinokura: *J. Magn. Magn. Mater.*, **290-291**, 1309 (2005).
- 5) K. Nakamura and O. Ichinokura: *IEEEJ Trans. IA.*, **135**, 1063 (2015).
- 6) K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, K. Yasui, and L. Kovudhikulrungsri: *IEEEJ Trans. IA.*, **131**, 53 (2011).
- 7) X. Zhu, L. Quan, D. Chen, M. Cheng, W. Hua, and X. Sun: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 3220 (2011).

2024年10月13日受理, 2024年11月18日採録