

RNAによる平面磁路形パラメトリックモータの回転子駆動時の動作解析

Reluctance Network Analysis of a Laminated Core Parametric Motor While the Rotor is Driving

田島 克文・服部 正俊・宮路 剛・佐藤 忠・坂本 禎智*

秋田大学工学資源学部電気電子工学科, 秋田県秋田市手形学園町 1-1 (〒010-8502)

*八戸工業大学感性デザイン学部感性デザイン学科, 青森県八戸市大字妙字大開 88-1 (〒031-8501)

K. Tajima, M. Hattori, T. Miyaji, T. Sato, and Y. Sakamoto*

Department of Electrical and Electronic Engineering, Akita University, 1-1 Tegata-Gakuen Machi, Akita, Akita 010-8502, Japan

*Department of Kansei Design, Hachinohe Institute of Technology, 88-1, Myo Ohbiraki, Hachinohe, Aomori 031-8501, Japan

Since a laminated core parametric induction motor has a planar structure, there is a possibility of using mass production to reduce costs. In past work, we calculated the behavior characteristics of an orthogonal-core-type parametric induction motor in a locked rotor, using the reluctance network analytical model, and the analytical results showed good agreement with the experimental ones. In this paper, we examine the validity of applying the reluctance network method to the analysis of a laminated-core parametric induction motor while the rotor is driving.

Key words: laminated-core parametric induction motor, reluctance network analysis, orthogonal-core, SPICE

1. まえがき

パラメトリック誘導電動機は、固定子磁心の磁気飽和に基づくパラメトリック発振現象を利用した、単相電源で駆動可能な誘導電動機である。本電動機は動作原理上固定子スロットが不要であるため低騒音であるほか、高信頼性、過負荷保護機能を有することが知られている¹⁾⁴⁾。

本電動機は開発当初、直交磁路形パラメトリック誘導電動機と呼ばれる、固定子磁心が立体磁路構造となる方式が用いられてきたが、量産化に適した構造では無く、製造コストが実用上の問題となっていた²⁾⁴⁾。これに対し坂本らは、量産化が可能な、固定子磁心を平面磁路積層構造とした平面磁路形パラメトリックモータを提案し、実用化に向け、その改良を進めている⁴⁾⁶⁾。

しかし本電動機は(1)固定子磁心を局所的に磁気飽和させて使用するため磁心磁束分布が複雑となること、(2)非線形振動現象であるパラメトリック発振を利用していること、(3)誘導電動機であるため回転子導体と回転磁界の相互作用を考慮する必要があることから回転子駆動時の定量的な動作解析は容易ではなく、本電動機の最適設計法は未だ確立されていない²⁾⁶⁾。

これに対し先に筆者らは、直交磁路形パラメトリック誘導電動機の解析に Reluctance Network Analysis (RNA)⁷⁾を適用し、回転子拘束時の解析では良好な結果を得た⁷⁾⁹⁾。磁気回路法のひとつである RNA は、ソルバー部分に SPICE 等の市販の回路シミュレーションプログラムを使用できるため、計算は簡便、高速かつ比較的高精度である。また、磁心の磁気回路とインバータ等の外部電気回路および運動方程式などを回路的に結合することで回路-磁界-運動の連成解析を簡単に行えるなど、他の解析法に無い優れた特長を有し、スイッチトリラクタンスモータや永久磁石モータ

の動特性解析に適用されている¹⁰⁾。

本論文では平面磁路形パラメトリック誘導電動機の解析に RNA を適用するものとし、回転子駆動時の解析モデルを提案するとともにその妥当性について検討を行ったので報告する。

2. パラメトリックモータの基本構成及び動作原理

本論文で解析対象とした平面磁路形パラメトリック誘導電動機は、Fig. 1 に示すように外側環状部 B_1 と内側環状部 B_2 が励磁側磁路 A_{11} , A_{12} および共振側磁路 A_{21} , A_{22} を挟み込むような平面形の固定子構造となっている。D は回転子であり、通常かご形回転子を使用する。 N_1 , N_2 は励磁側および共振側巻線であり、C はパラメトリック発振を生じさせるための同調用コンデンサである。 i_1 , i_2 は励磁および共振電流である。 A_{11} ~ A_{22} の断面積に比較し、内側環状部 B_2 の円周方向断面積が小となる構成であるため、巻線 N_1 に印加される交番電圧 e_1 の増加により、励磁側と共振側の共通磁路である B_2 が周期的に磁気飽和し、巻線 N_2 のインダクタンスは周期的に変化する。

したがって、同調用コンデンサを適当な値にするとパラメトリック発振が生じ、電源周波数と同じ周波数で位相差がほぼ 90 度の交流電圧 e_2 が巻線 N_2 に誘起されるため、共通磁路-回転子間に回転磁界が形成され、回転子が駆動される。

本電動機はこのように単相駆動ではあるが、パラメトリック発振により生じる共振側電圧と電源電圧により回転子が駆動されるため、いわゆる二相誘導電動機(二極)として動作する。回転子には Fig. 2 に示す通常のかご形回転子が使用可能である。

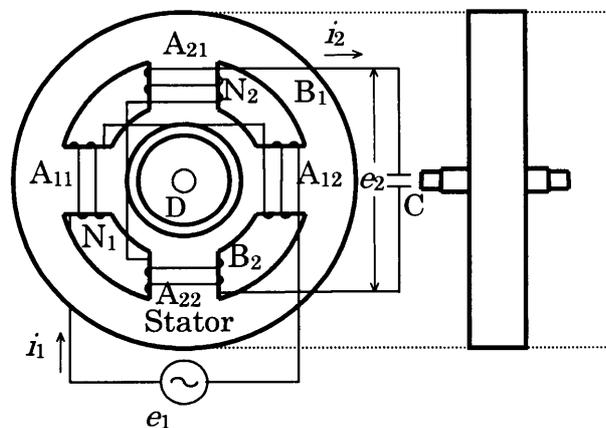


Fig. 1 Schematic of a laminated-core parametric induction motor.

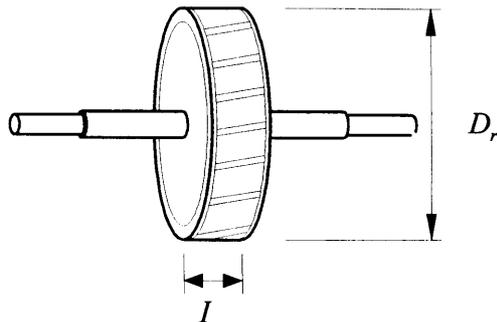


Fig. 2 Schematic of the rotor.

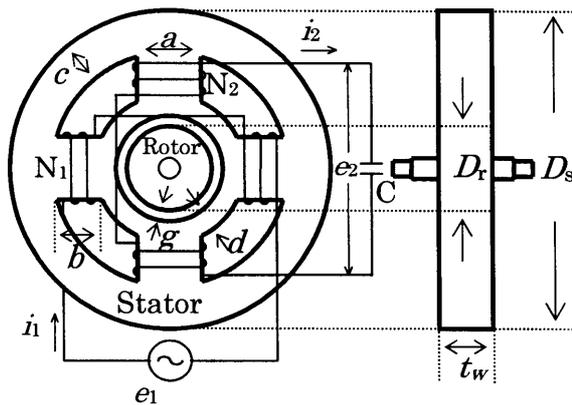


Fig. 3 Dimensions of the stator.

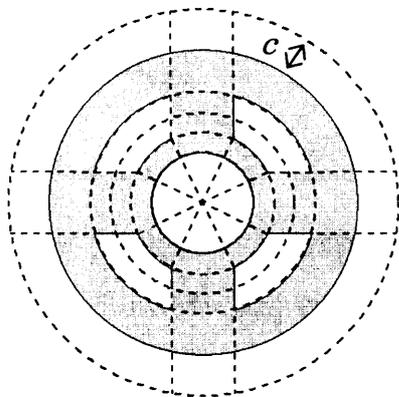


Fig. 4 Division of the stator.

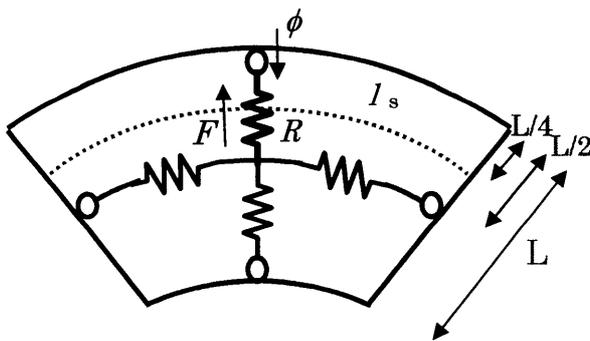


Fig. 5 Magnetic circuit of the element.

図中の D_r は直径, I は回転子の長さを示す.

本電動機では試作機に対する実験的検討より, 磁極配置を非対称とする, 内側共通磁路の厚み d を変えるなどの固定子磁心形状の変更によりモータ特性が向上することが知られている⁴⁶⁾. しかし, 磁心寸法・材質からモータ特性を定量的に算定する手法は未だ提案されておらず, 最適設計法の確立には至っていない.

本電動機の解析手法としては, 定常運転時におけるモータ特性の算定のほか, 低速回転時の不安定発振現象の解析等が可能であることが必要となる⁴⁶⁾. そのためには, 内側共通磁路における磁気飽和およびそれに伴う複雑な磁束分布を計算する磁界解析的な手法と, パラメトリック発振現象を計算可能な回路解析法を組み合わせた解析手法が要求される. 筆者らの提案による Reluctance Network Analysis はこのような要求に応えた手法である.

3. 平面磁路形パラメトリックモータのRNAモデル

3.1 固定子のRNAモデル

RNA の詳細については文献 7-13 を参照していただきたい. ここでは簡単のため以下の仮定に基づいて RNA における本電動機の解析モデルを導出する¹⁰⁻¹³⁾. すなわち,

- (1) 平面構造であるため, 厚み t_w 方向の磁束は小さいと考え, 単位磁気回路には二次元磁気回路を用いる.
- (2) 鉄損は考慮しない.
- (3) 解析領域に, 外側共通磁路の外部空間も考慮する.

以上を考慮し, Fig. 3 に示す寸法の固定子を, Fig. 4 に示すように外側共通磁路幅 c と同じ厚みの磁心外領域を考慮して分割した. この際, 巻線電流による起磁力を挿入するため, 励磁側および共振側磁路は半径方向に二等分している. 各分割要素は Fig. 5 に示す 2 次元の単位磁気回路で表現し, これより全固定子の磁気回路モデルを導出した.

ここで図中の磁気抵抗 R における磁束 ϕ と起磁力 F の関係は材質の磁気特性, 分割要素の寸法を考慮して次のように与えた.

空間領域では,

$$F = I / (\mu_0 S) \phi \tag{1}$$

磁性材料の場合は磁気飽和を考慮して

$$F = I \{ \alpha_n (\phi/S) + \alpha_m (\phi/S)^m \} \quad (m \text{ は } 3 \text{ 以上の奇数}) \tag{2}$$

ここで, S , I は磁路断面積および磁路長であり, μ_0 は真空中の透磁率, α_1 , α_m は材質の BH 特性を近似して得られる定数である. 分割要素が扇形となるため, 磁路断面積は Fig. 5 に示すように, 磁路の中央 (図中破線で表示) 部分で定めるものとし, $S = L \times t_w$ とした.

以上より得られた固定子の解析モデルを Fig. 6 に示す.

巻線電流 i_1, i_2 による起磁力 $H_{x11}, H_{x12}, H_{x21}, H_{x22}$ は励磁側磁路および共振側磁路を 2 分した中央に集中して配置するものとした. これより, 巻線電流を与えれば, 励磁側磁束 ϕ_1 および共振側磁束 ϕ_2 を求めることができる. したがって, Fig. 6 に示すように, 電動機の励磁および共振側電気回路から巻線電流 i_1, i_2 を固定子の磁気回路に与え, 計算された磁束 ϕ_1, ϕ_2 を時間微分して励磁電圧 e_1', e_2' として電気回路に戻せば, 磁気飽和を考慮した磁界解析と, パラメトリック発振を解析するための回路解析を連成して行うこ

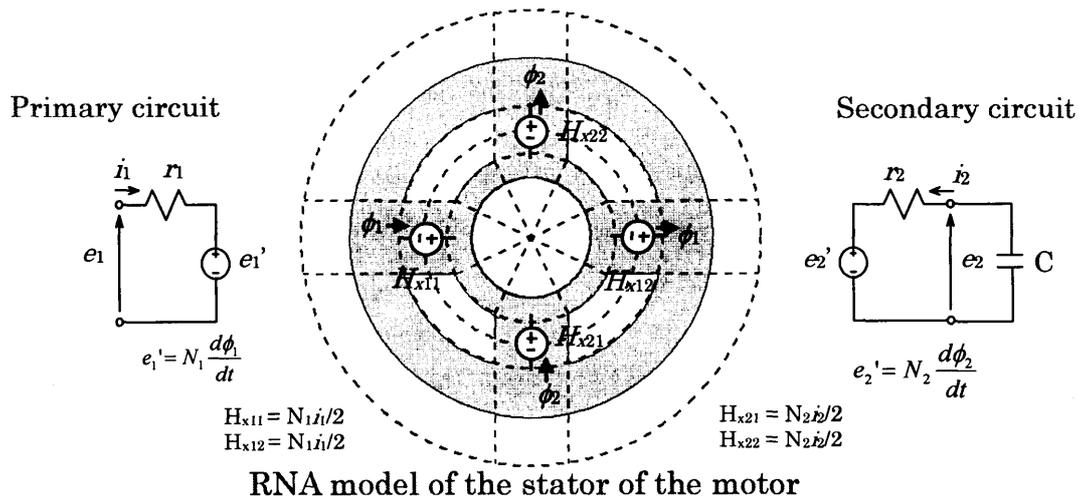


Fig. 6 Analytical circuit model of the stator

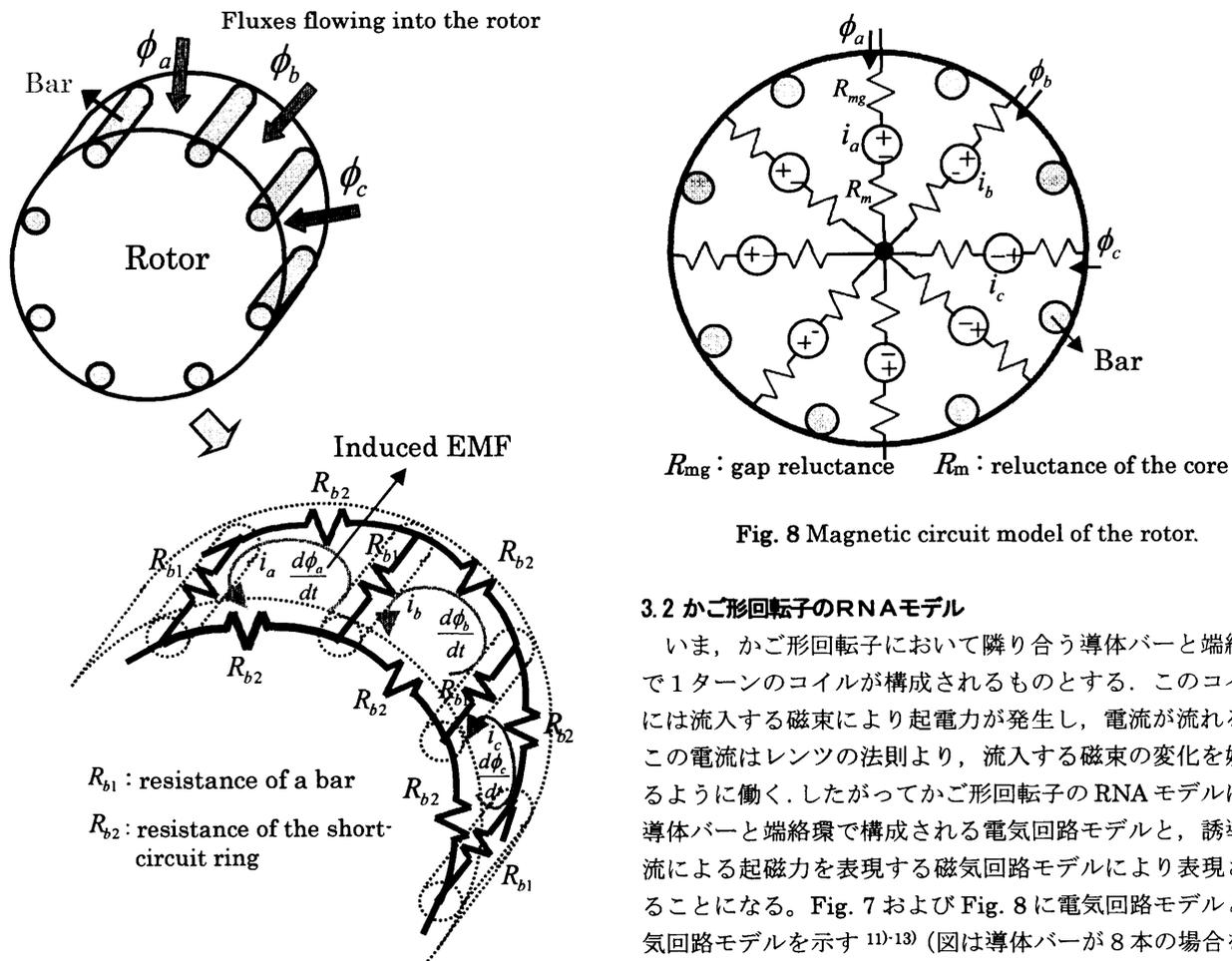


Fig. 8 Magnetic circuit model of the rotor.

3.2 かご形回転子のRNAモデル

いま、かご形回転子において隣り合う導体バーと端絡環で1ターンのコイルが構成されるものとする。このコイルには流入する磁束により起電力が発生し、電流が流れる。この電流はレンツの法則より、流入する磁束の変化を妨げるように働く。したがってかご形回転子のRNAモデルは、導体バーと端絡環で構成される電気回路モデルと、誘導電流による起磁力を表現する磁気回路モデルにより表現されることになる。Fig. 7およびFig. 8に電気回路モデルと磁気回路モデルを示す^{11)・13)}(図は導体バーが8本の場合を示している)。Fig. 7中の電気抵抗 R_{b1} 、 R_{b2} は各々導体バーと端絡環に対応するものであり、Fig. 8中の磁気抵抗 R_{mg} 、 R_m はギャップおよび回転子磁心の磁気抵抗である。

この回転子のRNAモデルと固定子のRNAモデルを組み合わせれば、

- (1) 固定子のRNAモデルと回転子の磁気回路を接続し、これより回転子流入磁束を計算する、

とができる。このような電流-起磁力、磁束-励磁電圧の変換はSPICEにおいては従属電圧源、従属電流源と呼ばれる回路要素を用いることで簡単に実現できる。

図中の r_1 、 r_2 は励磁側および共振側巻線抵抗であり、本解析モデルにより銅損を考慮することができる。

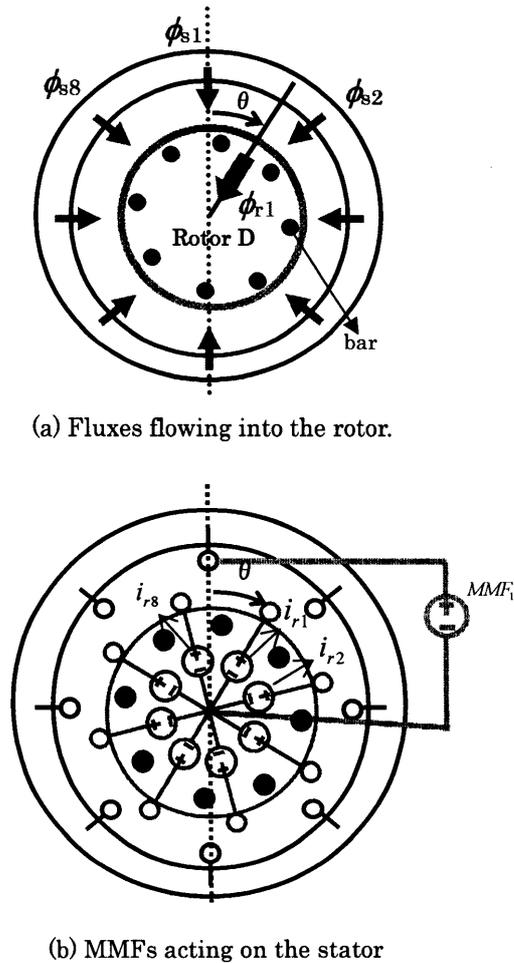


Fig. 9 Expression of coupling between the rotor and stator.

- (2) (1)の磁束より回転子の電気回路モデルを用いて導体バーの電流を計算する,
 - (3) 導体バーの電流より回転子の磁気回路モデルにおける起磁力が与えられ,これが固定子の磁気回路に作用する,
- 以上の過程により電動機全体の特性算定が可能となる。

このときの磁束,電流より電動機のトルク T が計算できるため,次式に示す回転子の運動方程式も含めて上記モデルを解析すれば回転子の運動を考慮した動作解析が可能となる^{14),15)}。

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + T_L \quad (3)$$

ここで, T_L は負荷トルク, J は回転子の慣性モーメント, ω は回転角速度, t は時間であり,機械損は考慮していない。

ただし,回転子駆動時には回転子と固定子のRNAモデル間の結合を回転角に応じて変更する必要がある。

いま, Fig. 9 に示すように,回転子位置角 θ を隣り合う導体バーの中心を基準に時計方向に定義する。このとき,回転子流入磁束 ϕ_{r1} は直近の固定子からの流入磁束 ϕ_{s8} , ϕ_{s1} を θ で直線補間することにより(4)式で,固定子の磁気回路に生じる起磁力 MMF_1 は同様に回転子で生じる起磁力 i_{r1} , i_{r2} を θ で直線補間することにより(5)式で与えるものとした。ただし, Fig. 9 および(4), (5)式は,固定子の内側共通磁路を円周方向に8分割,導体バーは8本とした場合を説明したものである。

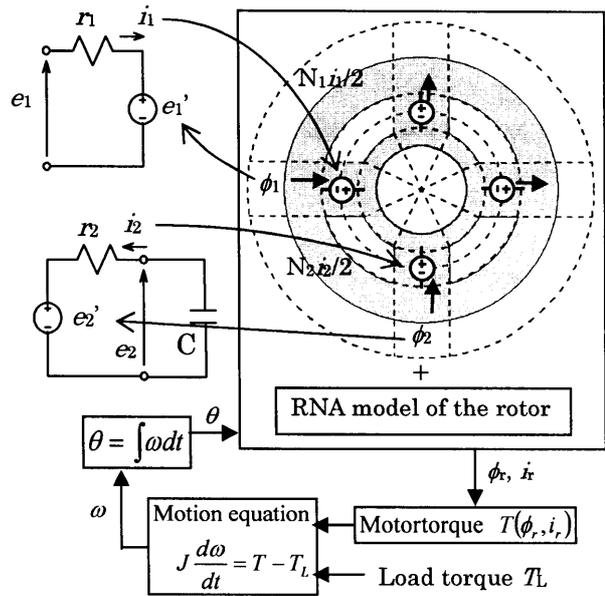


Fig. 10 Electromagnetic and motion-coupled analysis model of the parametric motor.

Table 1 Parameters of the motor.

Dimensions [mm]	$a = 20.0, b = 12.5, c = 11.5, d = 5.0, g = 0.3$ $t_w = 20.5, D_s = 100.0, D_r = 41.4, l = 19.0$
Material	50H600 (Nippon Steel Corporation) Non-oriented silicon steel strip with a thickness of 0.5 mm
Windings [turns]	$N_1 = 700, N_2 = 700$
Winding resistances [Ω]	Primary: 5.165, Secondary: 5.185

$$\phi_{r1} = \frac{4}{\pi} \cdot \left\{ \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right) \phi_{s1} + \theta \cdot \phi_{s2} \right\} \quad \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4} \right) \quad (4)$$

$$MMF_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \left\{ \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right) i_{r1} + \theta \cdot i_{r2} \right\} \quad \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{4} \right) \quad (5)$$

以上より得られる平面磁路形パラメトリックモータの電気-磁気-運動連成解析モデルを Fig. 10 に示す。この連成解析モデルにおいて回転子位置角 θ の初期値と入力電圧 e_1 を与えれば,固定子および回転子のRNAモデルより,本モータの巻線電流 i_1, i_2 と励磁電圧 e_1', e_2' ならびに回転子流入磁束 $\phi_{r1} \sim \phi_{r8}$, 導体バーに流れる電流 $i_{r1} \sim i_{r8}$ が計算できる。 $\phi_{r1} \sim \phi_{r8}$ と $i_{r1} \sim i_{r8}$ からトルクを計算できるので,負荷トルクが与えられれば運動方程式より回転角速度 ω , さらにこれを積分すれば回転子位置角が求められることになる。

本モデルを用いれば,寸法・材質から本モータの定常状態のみならず過渡時の特性を計算可能である。

以下,本モデルの妥当性を検証する。Table 1 に解析および実験に使用した電動機の諸元を, Fig. 11 に磁心材質のBH特性を示す。固定子磁心は無方向性ケイ素鋼板を厚み t_w 方向に積層して構成され,磁心材質のBH特性にはカタログ¹⁶⁾に掲載されたデータを使用している。

実験及び考察に用いた回転子は,導体バーの材質がアルミニウムであり,解析時にスキューの影響は無視している。計算に用い

た電気回路モデルの抵抗は回転子寸法とアルミニウムの抵抗率より $R_{b1}=3.08 \times 10^5 \Omega$, $R_{b2}=1.78 \times 10^5 \Omega$ として与え, 磁気回路中の磁気抵抗は $R_{mg}=(D_s \cdot D_r)/2\mu_0(\pi D_r/18)$ で計算した. R_m は R_{mg} と比較して十分小さいものとして無視している¹⁰⁾¹³⁾.

また, 回転子の導体バーは18本であるため, Fig. 12 に示すように, 固定子の内側共通磁路をさらに9分割して全体で72分割(8と18の最小公倍数)とし, これらを4本ずつまとめて18の磁路を再構成している.

以下, 本電動機の定常状態における特性算定を行い, 本解析モデルの妥当性を検証する. 先ず, 回転子拘束時すなわち回転角速度が0におけるパラメトリック発振特性を検証する. Fig. 13 に入力電圧とパラメトリック発振により確立した電圧の関係を示す.

図中の電圧波形は計算例である. 同図より, 発振電圧は印加電圧と同一周波数で位相がおおよそ 90° 異なっており, パラメトリック発振が生じていることがわかる. また, 入力電圧を増加させる

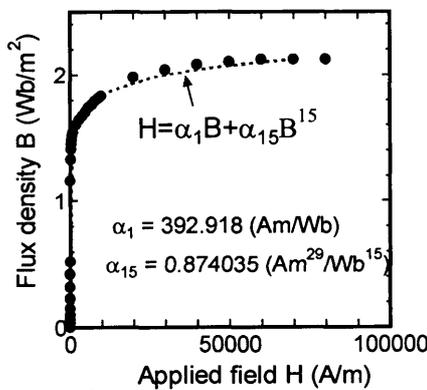


Fig. 11 B-H characteristics of the core material.

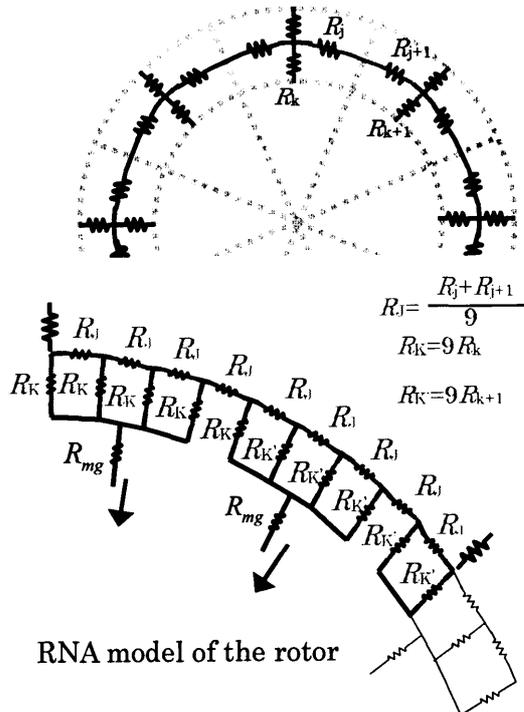


Fig. 12 Linkage of the analytical models of stator and rotor.

とある値で発振が生じて発振電圧が跳躍的に生じ, さらに増加させると発振電圧が低下するパラメトリック発振特有の特性を示すことが了解される. 計算値は実験値よりやや低い値となるが良好な対応を示しており, 本解析モデルにおける, 回転子の運動を表現する部分を除いた, 固定子および回転子のRNAモデルの妥当性が認められる.

次に回転子駆動時の解析例として, 無負荷時における入力電圧と発振電圧の関係を Fig. 14 に示す. 図中の電圧波形は計算例である. 計算結果は回転角速度が同期速度一定になるものとして得ている. 同図より, 回転子拘束時と同様, パラメトリック発振が生じていること, 計算結果は実験値と差異は認められるが良好な対応を示していることがわかる.

これより本解析モデルを用いた回転子駆動時の解析が可能であり, 本論文で提案した回転子の運動表現法の妥当性が了解される.

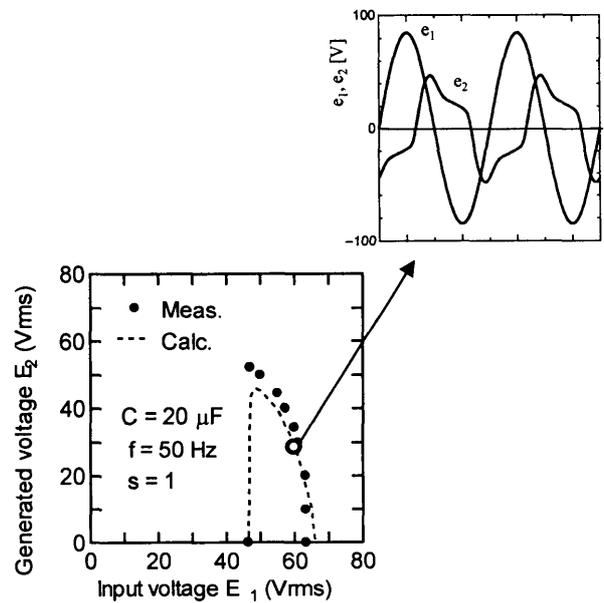


Fig. 13 E_1 - E_2 characteristics of the motor in the locked rotor.

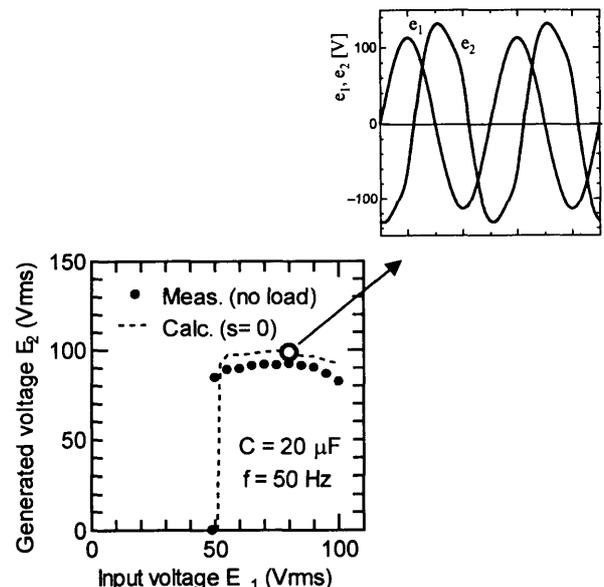


Fig. 14 E_1 - E_2 characteristics of the motor with no load.

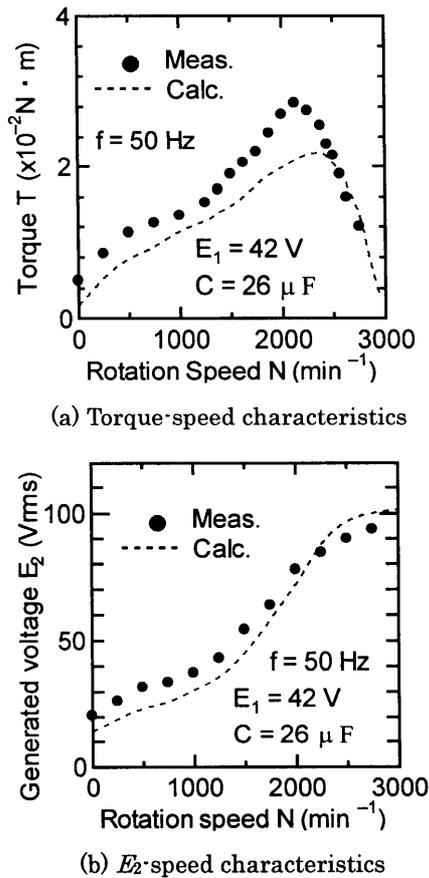


Fig. 15 Load characteristics of the motor.

さらに、回転角速度を種々変えたときの発生トルクおよび発振電圧の変化を Fig. 15 に示す。最大トルク、最大トルクとなるすべりなどで差異が認められるが計算値は実験値と良好な対応を示し、本解析モデルによりモータ設計上重要な負荷特性の算定が可能であることがわかる。

計算値と実験値の差異の原因としては(1)固定子の解析に2次元RNAモデルを用いていること、(2)鉄損・機械損を考慮していないこと、(3)回転子の解析モデルが簡単な仮定に基づくものであることなどが挙げられる。(1)に関しては、本モータと同様な平板構造の非線形磁気素子においてRNAモデルを3次元化することにより計算精度が向上したとの報告⁷⁾があり、(2)に関しては鉄損などの損失がパラメトリック発振特性に影響を及ぼすことが知られている⁸⁾。また、小形モータにおいては機械損が回転角速度に及ぼす影響は小さくない。(3)に関しては、モータの発生トルク計算に必要な回転子流入磁束量を決定する部分であるため、より詳細な検討が必要と考えられる。

4. まとめ

以上、回転子駆動時における平面磁路形パラメトリックモータの動作解析について述べた。計算結果は実験値と良好な対応を示し、本稿で提案した回転子の運動の表現法および連成解析モデルの妥当性が了解される。

今後、筆者らが先に提案した手法^{7),9),10)}を用いた、鉄損を考慮し

た固定子の3次元RNAモデルの構築と、機械損の考慮、回転子の解析モデルに対する検討などにより提案手法の計算精度の向上を図るとともに、本手法を用いて固定子の磁心形状・材質による特性変化について考察を行う予定である。

謝辞 最後に、日ごろ貴重なご助言をいただいている東北大学大学院教授一ノ倉理先生に謝意を表す。

References

- 1) K. Murakami: Parametric Motor (in Japanese), p.1 (Ohmsha, Tokyo, 1989).
- 2) K. Ide, O. Ichinokura, and K. Murakami: The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-87-99 (1987)(in Japanese).
- 3) K. Ide, O. Ichinokura, S. Kikuchi, and K. Murakami: The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-87-139(1987)(in Japanese).
- 4) Y. Sakamoto, M. Natsusaka, and K. Murakami: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20**, 641(1996) (in Japanese).
- 5) Y. Tosa, M. Ohkubo, M. Natsusaka, and Y. Sakamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 522(2003) (in Japanese).
- 6) M. Kousaka, M. Imai, M. Ohta, and Y. Sakamoto: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 530(2003) (in Japanese).
- 7) K. Tajima, A. Kaga, and O. Ichinokura: The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-96-54(1996) (in Japanese).
- 8) K. Tajima, K. Sato, T. Komukai, and O. Ichinokura: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3706 (1999).
- 9) Y. Sakamoto, and K. Tajima: The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-03-56(2003) (in Japanese).
- 10) K. Nakamura, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **28**, 1089(2004)
- 11) K. Tajima, O. Ichinokura, Y. Sakamoto: The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, RM-02-97(2002) (in Japanese).
- 12) M. Hattori, K. Tajima, Y. Sakamoto, and T. Sato: The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-03-126(2003)(in Japanese).
- 13) M. Hattori, K. Tajima, T. Miyaji, T. Sato, and Y. Sakamoto: The Papers of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-04-175(2004)(in Japanese).
- 14) H. Nagao, G. Kimura, K. Nakamura, and O. Ichinokura: The Papers of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan, RM-01-109(2001)(in Japanese).
- 15) S. Matsushita, K. Nakamura, and O. Ichinokura: The Papers of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan, RM-02-99(2002)(in Japanese).
- 16) Nippon Steel Corporation: Cat. No. SC502(1988).
- 17) S. Hayakawa, K. Nakamura, S. Akatsuka, T. Aoki, M. Kawakami, T. Ohinata, K. Minakawa, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **28**, 425(2004) (in Japanese).

2005年2月3日受理、2005年4月15日採録