

誘導電動機の回転子の RNA モデルについて

RNA model for rotor of induction motor

○松田裕土 田島克文 谷口敏幸

○Hironori Matsuda, Katsufumi Tajima, Toshiyuki Taniguchi

秋田大学

Akita University

キーワード : Reluctance network analysis, パラメトリック誘導電動機, 直交磁心, 回路シミュレーション,

連絡先 〒010-0852 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部 電気電子工学科
松田裕土, TEL:018-889-2338, FAX:018-889-2338, E-mail:matuda@tani6.ee.akita-u.ac.jp

1. はじめに

Reluctance network analysis (以下 RNA 法) は解析対象とする磁気デバイスを磁気回路に置き換えて表現する解析手法である。

一般的に磁気デバイスの解析には有限要素法などの磁界解析が適用されることが多い。しかし、解析対象の磁束分布が立体的である場合や強い非線形磁気特性を持つ場合は大規模な三次元非線形解析となり計算機容量の制約などから有限要素法の適用は必ずしも容易ではない。

これに対し、RNA 法はその特徴を列挙すると、①任意の磁心寸法、材質に対して特性算定が可能である。②比較的解析のための要素分割数が少なくモデル導出が簡便である③解析対象デバイスを磁気回路に置き換え

ることにより、SPICE 等、汎用の回路シミュレータにより高速、かつ比較的高精度な三次元非線形解析が可能である。④磁気デバイスと接続された電源等の半導体素子を含む外部電気回路とを回路的に結合することにより回路-磁場連成解析が簡単に行うことが可能である。など、有限要素法にはない特徴を有し、有限要素法の適用が困難な場合の解析に有用であると考えられる。^{2),3)}

RNA 法の適用が必要とされる解析対象にはパラメトリック誘導電動機¹⁾がある。パラメトリック誘導電動機は、固定子の磁気飽和に伴うパラメトリック発振を利用した誘導電動機であり、固定子磁心の磁心動作が局所的な磁気飽和により複雑となること、また磁束分布が立体的になること等から以前より

RNA法の適用が試みられている。既に固定子磁心については解析が行われ、その解析結果の妥当性が確認されている。³⁾しかし、回転子も含めた解析については回転子部における磁束の振る舞いが複雑で動的となるため固定子同様の解析モデルが構築されていない。そこで本研究ではRNA法を用いた解析におけるパラメトリック誘導電動機の回転子の解析モデルについて検討を行った。

2. パラメトリック誘導電動機の基本構成及び動作原理

パラメトリック誘導電動機の形状を図1に示す。同一形状のカットコア2台 A_1 、 A_2 が環状磁心 B を介して空間的に90度転移接続され固定子を形成している。 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 は励磁用巻線、及び共振側巻線を示し、 C はパラメトリック発振のための同調用コンデンサである。 A_1 、 A_2 の励磁用磁路の断面積に比較し、 B の円周方向磁路断面積が小となる構成であるため、励磁用巻線 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 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。従って、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、巻線 N_2 に電源周波数と同一周波数、位相差がほぼ90度の正弦波電圧 e_2 が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、これにより回転子が駆動する。

パラメトリック誘導電動機はこのように単相駆動であるが、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するため、動作原理上、二相誘導電動機といえる。

また、磁心の形状の違いにより、パラメト

リック発振の安定性が変化するため、磁心形状がモータ特性に与える影響は通常の電動機よりも大きい。

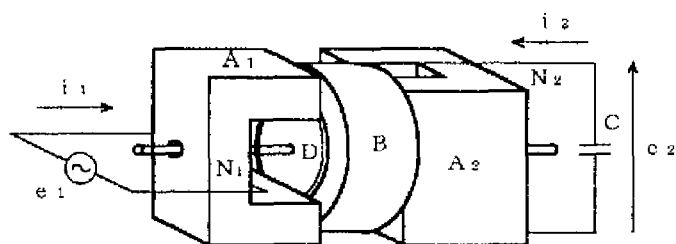


図1. パラメトリック誘導電動機の基本構成

3. 固定子磁心のRNAモデル⁽³⁾

ここではパラメトリック誘導電動機の固定子磁心のRNAモデル導出過程について述べる。

図2に固定子磁心の寸法を示す。まず図3のように固定子磁心を磁心外空間も含め、いくつかの直方体要素に分割をする。磁心外空間も含めるのは本電動機が磁気飽和に伴う漏れ磁束を無視できないことによる。また、計算の高速化のため、その分割要素数が最小となるように分割する。このとき、環状磁心が円筒形状であることにより図4のように分割するため、カットコアは環状磁心との接合の兼ね合いから、前出、図3のように分割している。

各分割要素の単位磁気回路は図5に示すよう三次元的な磁束の流れに対応しており、各磁路はそれぞれ隣接する分割要素の磁路と結合される。

単位磁気回路における磁気抵抗 R 及びインダクタンス R' は磁心材質の飽和特性、及びを表現するものである。磁心材質の磁気特性の非線形性を考慮して(1)式で表す。これら R 、 R' の特性は、各要素の寸法より得

られる磁路長 l , 断面積 S , 及びその部分の材質の $B-H$ 特性, 鉄損特性より (2), (3), 式により決定される。

$$H = \alpha_1 B + \alpha_m B^m + \beta_1 \frac{dB}{dt} + \beta_n \left(\frac{dB}{dt} \right)^n \quad (1)$$

(m, n : 3以上の奇数)

$$Ni_m = l \left\{ \alpha_1 \frac{\phi}{S} + \alpha_m \left(\frac{\phi}{S} \right)^m \right\} \quad (2)$$

$$Ni_g = l \left\{ \beta_1 \frac{1}{S} \frac{d\phi}{dt} + \beta_n \left(\frac{1}{S} \frac{d\phi}{dt} \right)^n \right\} \quad (3)$$

固定子磁心材料が異方性を有する場合, α_1 , α_m , 及び β_1 , β_n は各方向別に与えられる。

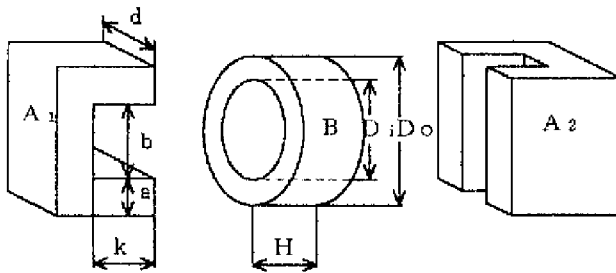


図2. 固定子磁心の寸法

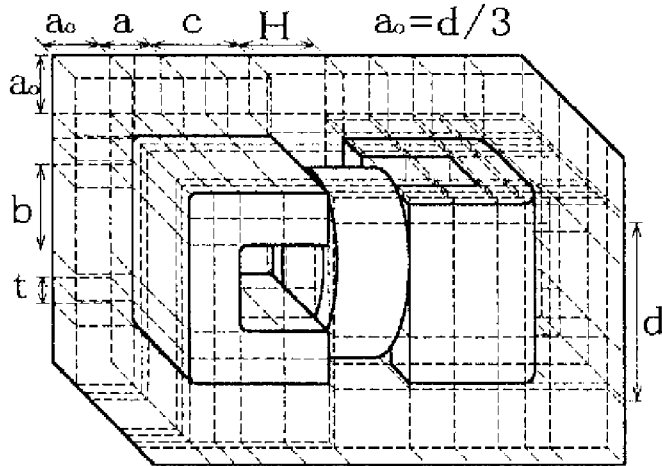


図3. 固定子の分割図

磁心外空間の要素に関しては線形の磁気抵抗で磁路を構成しており, 磁気抵抗値は真空の透磁率 μ_0 を用い, $R = l/\mu_0 S$ により決定している。

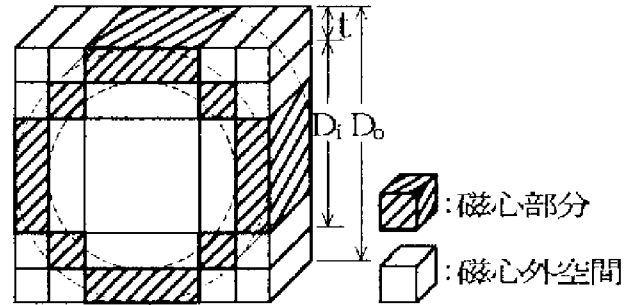


図4. 環状磁心の分割図

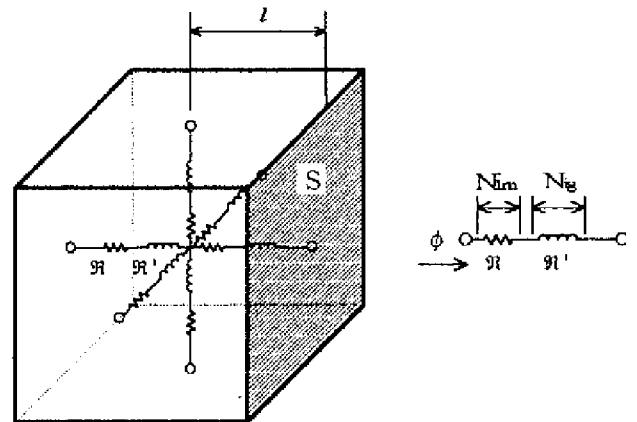


図5. 各分割要素の単位磁気回路

なお, 本 RNA モデルでは環状磁心も図5に示したように直方体要素で分割したが, 環状磁心は円筒形状であり, 直方体要素の組み合わせのみで表現するのは困難であるため, 文献(3)における取り決めに従ってモデリングを行っている。

また, 巻線電流による起磁力は図6に示すように, 空間的な分布は無視し, カットコアの脚部を2分した中央に集中して配置するものとする。

以上のように固定子の RNA モデルは導出される。

本モデルに対し, 励磁及び共振側巻線電流 i_1, i_2 を与えれば励磁及び共振側磁束 ϕ_1, ϕ_2 を求めることができる。実際の解析時に

を求めることができる。実際の解析時には図8に示すようにRNAモデルと励磁及び共振側電気回路とを回路的に結合した回路を用いており、パラメトリック発振時における電気回路-磁気回路の連成解析も可能としている。両回路は、市販の回路シミュレータを用いれば容易に計算できる。³⁾

図中の R_1 , R_2 は励磁、及び共振側巻線抵抗である。また、解析を行う場合、パラメトリック発振を安定化させるため、発振用コンデンサと並列に負荷抵抗を接続する。なお、負荷抵抗は本電動機運転時には通常、用いられない。表1に固定子磁心の諸元を示す。

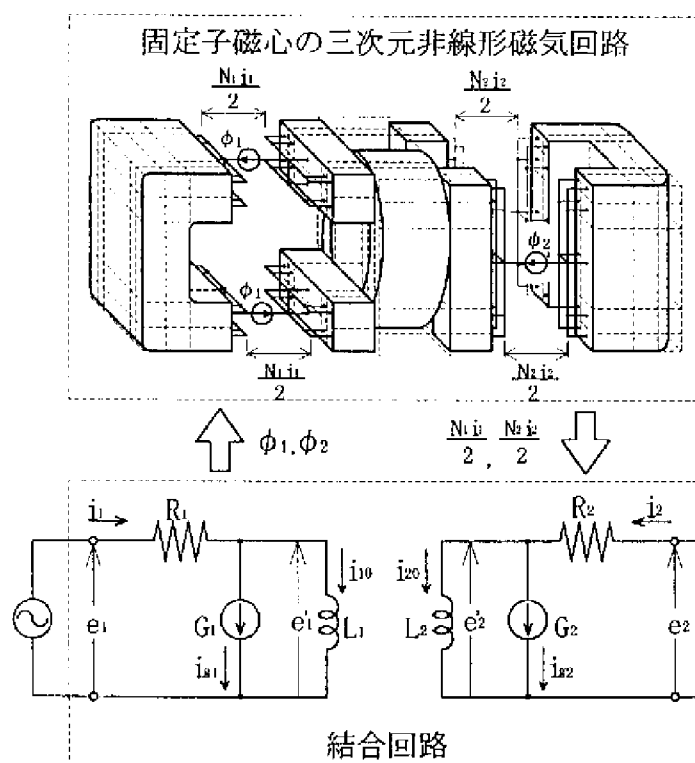


図6. 解析のための回路

表1 固定子の諸元

固定子の仕様		
カットコア A ₁ , A ₂	寸法 [mm]	a=24.8, b=40.4, c=25.6, d=85.4
	材質	0.18mm厚方向性ケイ素鋼板
環状磁心 B	寸法 [mm]	Do=100.4, Di=70.0, H=28.8
	材質	0.18mm厚方向性ケイ素鋼板
	スリット数	1
巻線数	[turns]	N ₁ =210, N ₂ =210

BH 特性の係数値		
圧延方向	α_1 [Am/Wb]	0
	α_{19} [Am ³⁷ /Wb ¹⁹]	1.6×10^{-2}
圧延と直角方向	α_1' [Am/Wb]	2.99×10^2
	α_{19}' [Am ³⁷ /Wb ¹⁹]	3.75×10

使用した鉄損特性の係数値		
圧延方向	β_{11} [Ams/Wb]	3.0×10^{-2}
	β_7 [Am ^{13s7} /Wb ⁷]	8.54×10^{-19}
圧延と直角方向	β_{11}' [Ams/Wb]	2.8×10^{-1}
	β_7' [Am ^{13s7} /Wb ⁷]	1.0×10^{-21}

4. かご形回転子の解析モデル

ここではパラメトリック誘導電動機に用いられるかご形回転子について、その諸元より導出可能、かつ固定子のRNAモデルと同時解析が可能な解析モデルについて述べる。

図7にかご形回転子の形状、表2にその諸元を示す。実機では斜めスロットが採用されているが、解析モデルではバーは軸と平行に配置されるものとする。

RNA法では回転子に流入する磁束は図8に示すようになる。この流入する磁束に対応する磁路は、共通磁路-回転子間のギャップ部分に対応する磁気抵抗 R_{gap} と、その磁路に流入する磁束に反抗して生じる回転子導体電流に起因する起磁力 F を直列に接続したものになると考えられ、これをスロットバーの数だけ構成すれば磁路を表現できる。 R_{gap} は回転子の寸法より

で与える。実際は磁心部分の磁気抵抗も存在するが、 R_{gap} と比較して十分に小さいものとしてこれを無視する。

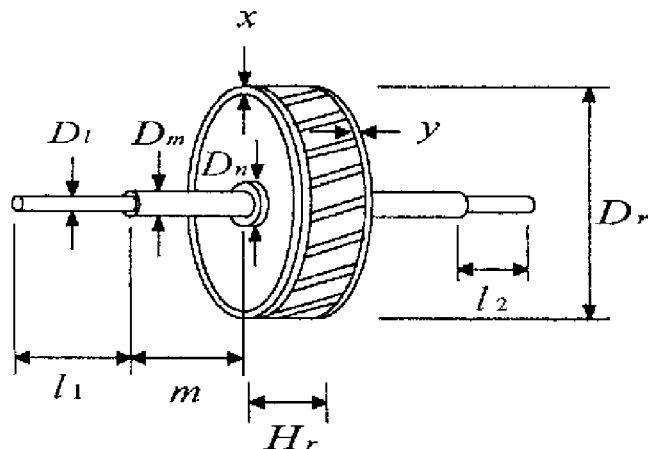


図7 回転子の形状

表2 回転子の諸元

寸法(mm)	$D_r = 69.35$ $H_r = 26.0$ $D_l = 10$ $D_m = 14$ $D_n = 20$ $l_1 = 60$ $l_2 = 40$ $m = 60$ $x = 12$ $y = 4$
重量(g)	740
導体材質	アルミニウム
導体バーの数	32本

また、各磁路に流入する磁束同士が互いに影響を及ぼすことを考慮して、各々の磁路を円周方向に導体バーの数中心で接続する。スロットバーが8本の場合を例に取り、この回転子に流入する磁束に対する磁路で構成された回転子の磁気回路モデルを図9に示す。

ここで、回転子に流入する磁束に反抗して生じる起磁力を求めなければならない。この反抗起磁力を求めるには次のように考える。

今、図10に示すように、かご形回転子の隣り合う2本のスロットバーとこれらスロットバーをつなぐ短絡環とで1ターンのコイルを形成するものとする。図において、 r はスロットバー、 r' は短絡環の導体抵抗である。この1ターンコイルへ磁束が流入することにより回転子導体に起電力 $d\phi_n/dt$ が発生し、コイル内で円状の電流 i_n が流れる。こ

の電流と、巻数をかけた分だけ流入した磁束に反抗するように働く起磁力が発生するが、実際には1ターンのコイルと見なしているため、コイルに流れた電流の値と同じだけの反抗起磁力が発生する。これにより求めた起磁力を対応する磁路に与える。

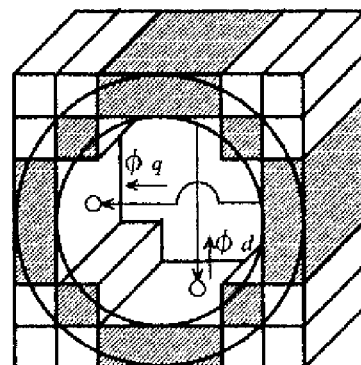


図8. 回転子に流入する磁束

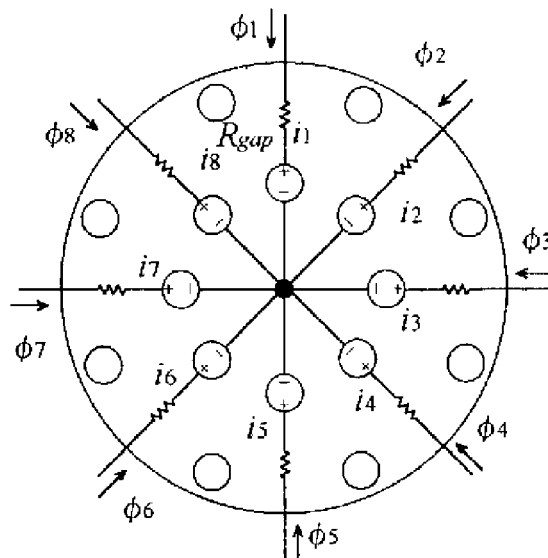


図9. 回転子の磁気回路モデル

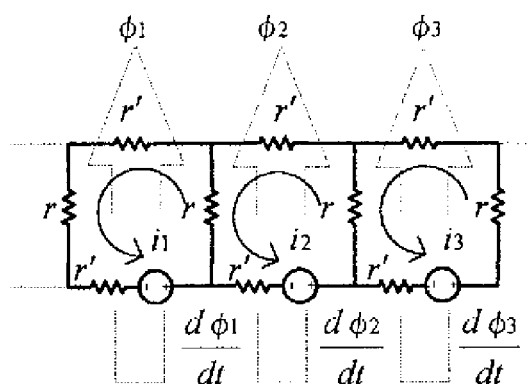


図10. 回転子の電気回路モデル

次に回転子の磁束分布について考える。図8に示したように、固定子のRNAモデルにおいては、固定子から回転子に流入する磁束は互いに直交する2磁束 ϕ_d 、 ϕ_q となる。このため、回転子に流入する磁束は図11に示すように回転子を円周方向にA、B、C、Dの4領域に分割し、加えて各領域内で磁束分布が一様であるものとして、それぞれの領域に流入する磁束を ϕ_d 、 ϕ_q の和、および差によって表すことにする。各領域内で磁束分布が一様としているので、回転子上の1ターンコイルに流入する磁束は、コイルが位置する領域の1/2（これはスロットバーが8本の場合、スロットバーが32本の場合は1/8となる。）

以上の考えに基づき、回転子の導体電流が最も大となる回転子拘束時における動作解析を行った結果を以下に示す。固定子、回転子の諸元は表1、2に準ずる。また、回転子の諸元より求まる磁気抵抗、導体抵抗の値を表3に示す。図12、図13はそれぞれ回転子拘束時における各部の電圧電流波形及び励磁電圧実効値に対する発振電圧実効値の変化を示す。計算結果は実験値と良好な対応を示し、本解析モデルの妥当性が了解される。

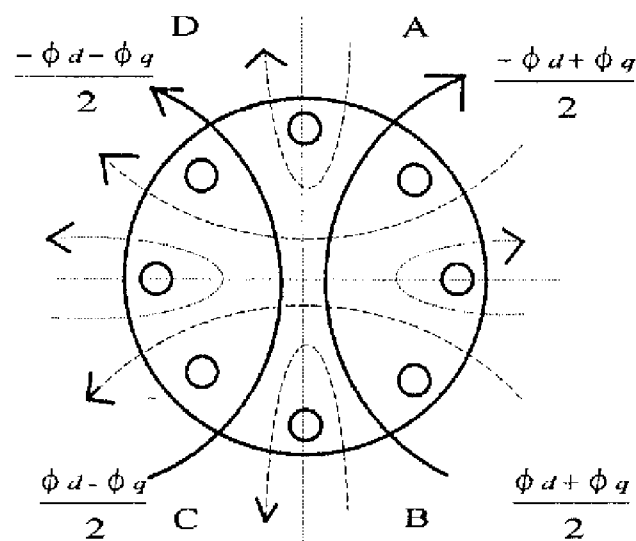
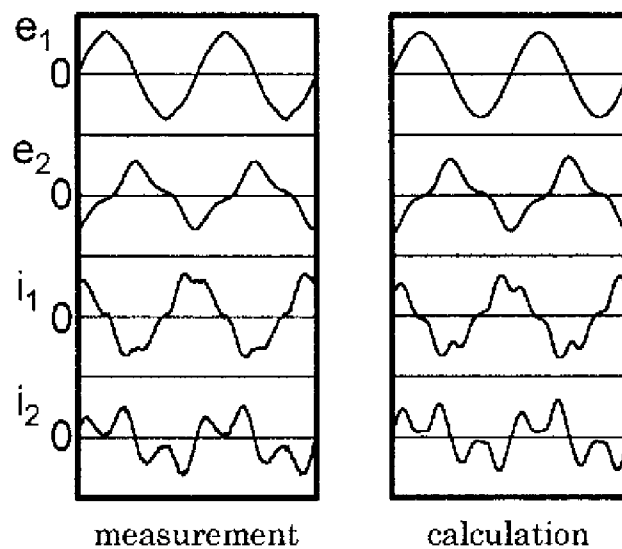


図11. 回転子の磁束分布

表1 諸元より求めた磁気抵抗、導体抵抗の値

エアギャップの磁気抵抗	$R_{gap} = 12.823825$ (A/Wb)
短絡間の導体抵抗	$r = 4.59 \times 10^{-5}$ (Ω)
スロットバーの導体抵抗	$r' = 8.57 \times 10^{-6}$ (Ω)



$$e_1, e_2 : 200V/div.$$

$$i_1, i_2 : 10A/div.$$

$$C = 107.7 \mu F, \quad E1 = 100V, \quad r_L = 400 \Omega, \\ S = 1, \quad f = 50Hz$$

図12. 回転子拘束時の電圧電流波形

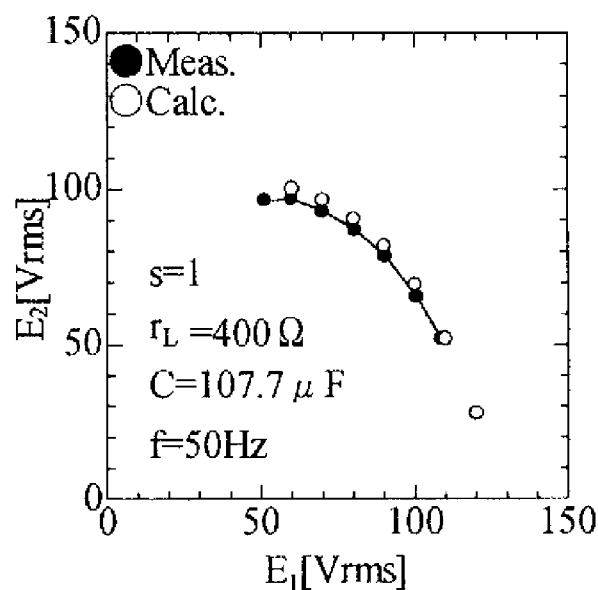


図13. 回転子拘束時の入出力電圧特性

次に回転子駆動時における解析モデルについて検討する。

今、回転子の電気回路モデルにおいて、ある1ターンコイルに磁束 ϕ_n が流入し、電流 i_n が流れたとする。このときスロットバーには電磁力が働き、トルクが発生する。 l をスロットバーの長さ、 S を磁束の通る面積とすれば、ある1本のスロットバーに働く電磁力 F_n は、

$$F_n = i_n \times \frac{\phi_n}{S} \times l \quad (5)$$

となる。寸法より、 $l = H_r$ 、 $S = \pi D_r / 32$ で与えるものとした。このスロットバーに発生するトルク τ_n は、

$$\tau_n = F_n \times \frac{D_r}{2} \quad (6)$$

となる。回転子全体のトルクは、全てのスロットバーに発生するトルクを合計することによって求まる。回転子全体のトルクを求めするには、図14のようなサブサーキットを用いる。 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 、 τ_{32} はそれぞれのスロットバーに発生するトルクであり、これらを並列接続することにより回転子全体の合成トルクを求めている。

次に、得られた回転子全体のトルクより回転子の回転角 θ を求める。 ω を回転子の回転角速度、 J を慣性モーメントとすれば、

$$\tau = J \frac{d\omega}{dt} + \tau_L \quad (7)$$

の関係が成り立つ。⁴⁾ただし、 τ_L は負荷トルクである。また、 $\omega = d\theta/dt$ の関係が成り立つのでこれを(7)式に代入すると、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\tau}{J} - \tau_L \quad (8)$$

となる。これらより(8)式の右辺を2度、時間積分してやれば θ を求められることがわかる。

図15に回転子の回転角を求めるための

サブサーキットを示す。⁵⁾図15(a)の回路における電流源は(8)式の右辺を表現したものである。この電流源によりコンデンサ C_1 の両端にかかる電圧は $d\theta/dt$ となるので、得られた $d\theta/dt$ の値を図15(b)の回路に電流源として与えてやれば、コンデンサ C_2 の両端にかかる電圧は θ となる。よって、回転子回転角 θ を求めることができる。

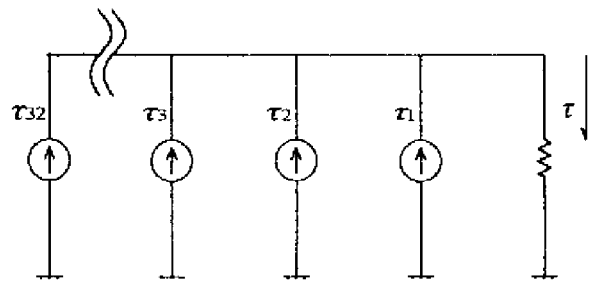


図14. トルクサブサーキット

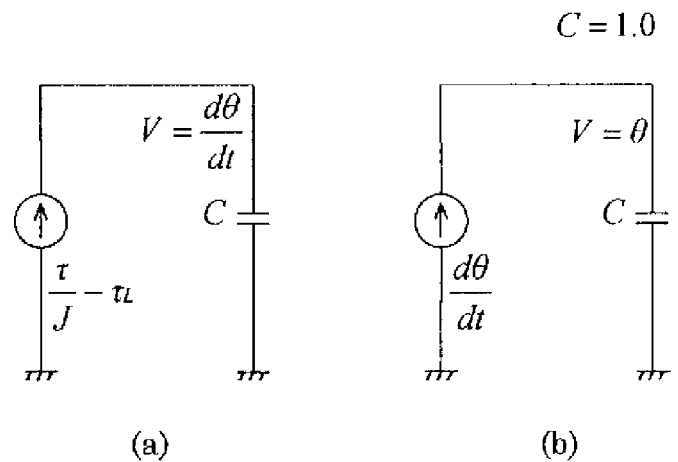


図15. θ を求めるためのサブサーキット

回転子の回転は回転子磁気回路モデルの回転として表現される。

今、磁気回路モデルの磁路の一つが、ある瞬間に、図11における領域AとDの境界との間に $2n\pi/32$ の角を為す位置へ来たとする。この磁路が図に向かい時計回りに θ だけ回転した場合、図16の様に磁路は領域A、Dの境界と $\theta + 2n\pi/32$ の角をなす位置へと移動する。このとき、 $\theta + 2n\pi/32 > \pi/2$ なら

ば、磁路の位置する領域は回転子回転方向の次の領域、すなわち、図16の場合ではBの領域になり、磁路に流入する磁束量が図11の磁束分布に従って変化する。このように、磁路に流入する磁束は $\theta + 2n\pi/32 = \pi/2$ ごとに切り替わる。このため、図17(a)のように磁気回路モデルの各磁路の端子に4つのスイッチを接続し、これを切り替えることによって流入する磁束の変化を表現する。 d_{in} , d_{out} , q_{in} , q_{out} の端子は図17(b)の固定子の端子に対応している。これらスイッチをどのような条件により切り替えるかについて述べる。

まず、 d_{in} , d_{out} の接続を切り替えるスイッチについて考える。 d_{in} から d_{out} へと流れる磁束 ϕ_d はB, Cの領域においては正、A, Dの領域においては負となるので、 m を整数とすると、

$$\pi/2 + 2m\pi < \theta + 2n\pi/32 \leq 3\pi/2 + 2m\pi \quad (9)$$

では d_{in} がON, d_{out} がOFFとなる。また、

$$0 + 2m\pi < \theta + 2n\pi/32 \leq \pi/2 + 2m\pi, \\ 3\pi/2 + 2m\pi < \theta + 2n\pi/32 \leq 0 + 2m\pi \quad (10)$$

では、 d_{in} がOFF, d_{out} がONとなる。

q_{in} , q_{out} のスイッチについても考えてみる。 ϕ_q はA, Bの領域で正、C, Dの領域では負であるので、

$$0 + 2m\pi < \theta + 2n\pi/32 \leq \pi + 2m\pi \quad (12)$$

では q_{in} がON, q_{out} がOFF,

$$\pi + 2m\pi < \theta + 2n\pi/32 \leq 0 + 2m\pi \quad (13)$$

では q_{in} がOFF, q_{out} がONとなる。これらの表現は、スイッチは電圧制御スイッチとし、

図18に示すサブキットの電圧源の電圧によって制御する。

以上、このような方法で磁路に流入する磁束を切り替え、回転子の回転を表現する。

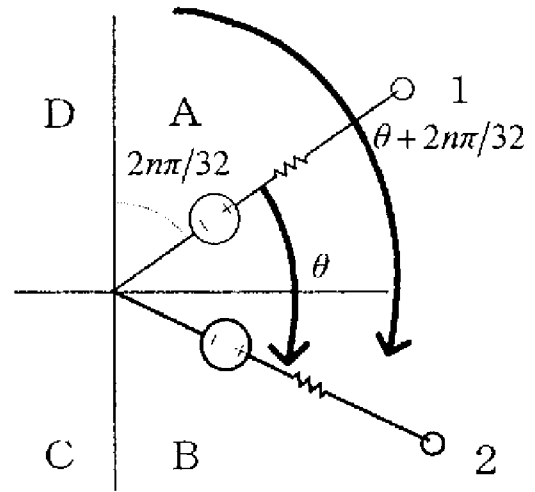
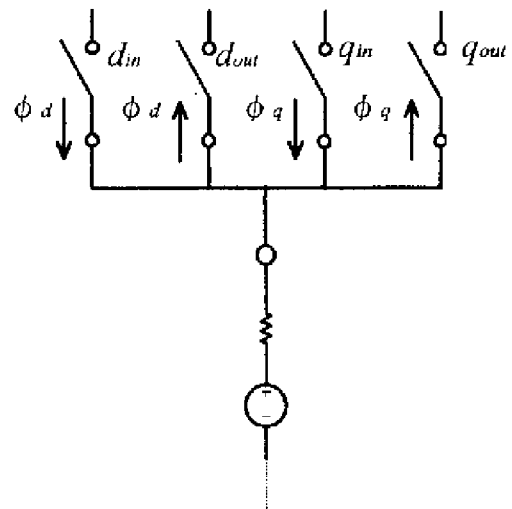
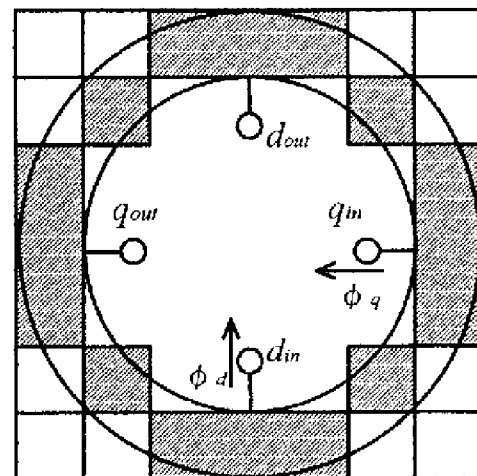


図16. 磁路が回転した場合

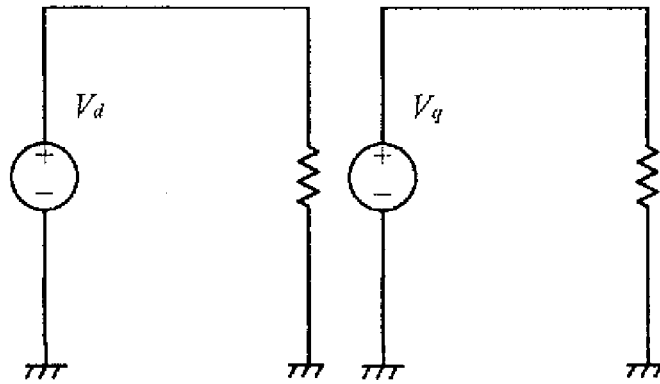


(a) 各磁路に接続するスイッチ



(b) スイッチに対応する固定子の端子
図17. スイッチに対応する固定子の端子

$$V_d = \frac{\cos(\theta + 2n\pi/32)}{|\cos(\theta + 2n\pi/32)|} \quad \dot{V}_q = \frac{\sin(\theta + 2n\pi/32)}{|\sin(\theta + 2n\pi/32)|}$$



(a) d_{in}, d_{out} を制御 (b) q_m, q_{out} を制御

図18. スイッチを制御するためのサブサーキット

5. むすび

以上, RNA 法に基づく誘導電動機の回転子の解析モデルについて検討を行った。回転子拘束時には実測値と計算値は良く対応し, 導体電流を考慮した, 回転子の磁気回路モデル, 電気回路モデルを用いた解析の妥当性が了解される。回転子駆動時における解析モデルの妥当性については現在検討中である。

<参考文献>

- 1) 村上孝一: パラメトリックモータ, 2/12, オーム社(1989)
- 2) 田島克文・一ノ倉: 「RNA 法を用いたパラメトリック誘導電動機の解析」 電気学会マグネティックス研究会, MAG-99-147(1999)
- 3) 佐藤孝平・田島克文・穴澤義久・小向敏彦・坂本禎智・一ノ倉理: 「三次元非線形磁気回路モデルに基づくパラメトリック誘導電動機の解析法」 電気学会回転機研

究会 RM-98-136(1998)

- 4) 石川裕記・村井由宏: 「低周波領域における三相かご形誘導電動機の特性格解析」 電気学会回転機研究会 RM-98-105
- 5) 家名田敏昭・木村守・渡辺忠昭・一ノ倉理: 「磁気飽和を考慮したスイッチドリラクタンスモータの特性算定」 電気学会マグネティックス研究会 MAG-98-230(1998)