

フィルムモータの試作

Film Motor

石沢 整 早野誠治 斎藤兆古
O. Ishizawa, S. Hayano and Y. Saito

法政大学 工学部
College of Engineering, Hosei University

1. まえがき

最近のデジタル計算機の進歩はめざましいものがあり、従来の大型計算機やスーパー計算機と同等の処理能力を有する小型計算機、いわゆるEWSが普及し、比較的大規模の計算も手軽に行えるようになった。この進歩は半導体の高集積化技術によってだけでなく、計算機周辺機器の小型大容量化と高性能化によって支えられている。特に、超集積回路技術は、その微細加工技術を利用した超小型アクチュエータや電動機の開発につながり、マイクロマシンと呼ばれる新しい超小型機械の学術分野を切り開かんとしている。また、高速大容量の記録・記憶装置の開発の必要性は従来の電気機械分野のより精密・小型・軽量化技術の進展を促した。他方、現代文明を支える化石エネルギーの大量消費は、大気汚染問題を喚起し、新しいクリーンエネルギーの開発と利用を余儀なくされつつある。我々が日常の足として活用している内燃機関を利用した自動車もその排気ガス問題から変貌を遂げざるを得ない状況になりつつある。このような文明機器の進展と地球環境の保護の観点だけでなくその品質と制御性の良さから、自然界にさまざまな形態で存在するエネルギーは電気エネルギーの形で活用されることが促進されるであろう。

電気エネルギーは信号の形態で活用する場合、他のエネルギー形態に比較して追従ができない形態であることは、前述の計算機のみならず通信の分野が電気信号の独壇上であることから明らかである。しかし、エネルギー蓄積の観点から見た場合、大量の電気エネルギーを蓄積する技術は確立されてなく、超電導を利用した磁気エネルギーの形で蓄積するなどが検討されている段階であり、実用には未だ多くの問題を解決しなければならぬ。このため、従来から行われている揚水式発電所のような位置エネルギーや慣性モーメントを利用した運動エネルギーの形に頼らざるを得ないのが現状であり、化学エネルギー、いわゆる電池や燃料電池等も容量や効率の観点からより一層の改善が期待される場所である。さらに、電気エネルギーを動力として活用する場合、内燃機関に比較して効率は良いが、単位重量当りの出力が小さいことや多くの場合、磁気エネルギーを活用するために磁界と磁界を作る電流が互いに直交する必要性から形状がある程度限定され、必然的にマッシュ型にならざるを得ない。

本稿は以上のような現状に鑑み、

- 1) 単位重量当りの出力が大きい
- 2) 高周波運転で高効率
- 3) 構造が簡単で、頑丈
- 4) 形状が超薄型からマッシュ型まで可変
- 5) 大きさが大型から超小型
- 6) 集積回路技術の転用によるリソグラフの活用

を前提とする新形式の誘導電動機を提案する。1)の単位重量当りの出力の増加は電気自動車等の応用を提案すれば必要な条件であり、2)の高周波運転は電流が小さくても単位時間当りに多くのエネルギーを供給可能とし、大出力を得んとする目的、すなわちマイクロマシンへの適用性を提案すれば必要な条件である。3)の構造が簡単で頑丈であることはどのような機械でも望ましい条件であり、

特に超小型化や量産性を考慮すれば当然の条件である。4)の形状の問題であるが、従来の電動機が大部分個々の電動機で独立した完成品であるのに対し、小出力時は薄型であり、必要に応じて大出力に変更できる形式を意図したものである。5)の大きさであるが、大型機で大電流を通電可能な導線を活用しても作成できるが、6)のリソグラフ技術の活用によって同一原理に基づいて超小型化を可能とする形式を意図している。

2. フィルムモータ

2.1 原理と構造

まず、単位重量当りの出力の増加は、従来の電動機で磁束の流れを制御する珪素鋼板の使用を削減することが問題解決のキーポイントとなるであろう。つぎに高周波駆動で高効率運転を可能にするためには、固定子の継鉄を高周波特性が良く鉄損の少ない材料で構成するか、空心化するかである。構造が簡単で頑丈であることは、本質的に誘導機は二次電流が誘導で生ずるため、二次回路に直接に接触する必要がなく、頑丈で機械的信頼性は高い。問題は固定子の巻線を含めた構造が如何に単純化できるかである。この様な条件を満たすため、本稿で提案する誘導電動機は、図1(a)に示すように、固定子を多相コイルを積層した薄型コイルで作成する。この固定子コイルに多相交流を通電すると、コイルの両面上に回転磁界が発生するから、固定子両面に接して回転子を設ける。このため、固定子には継鉄の必要がなく、鉄損が存在せず高周波動作でも固定子損失は増加することなく軽量化される。

換言すれば、固定子磁束の流れを制御するために磁性体の高透磁率を用いず、幾何学的形状で磁束の流れを制御し鉄損をなくし軽量化せんとする方法である。また、二次回転子は単純な導電板または磁性体でよく、極めて単純な構造であるため、頑丈な構造が実現できる。さらに、図1(b)に示すように固定子と回転子を交互に配置すれば、薄型からマッシュ型まで必要出力に応じて作成できる。固定子各相のコイルを作成する場合、固定子の厚さが薄い程磁気抵抗が減るため、各相コイルをエッチングやリソグラフで作成すれば超小型化が可能である。

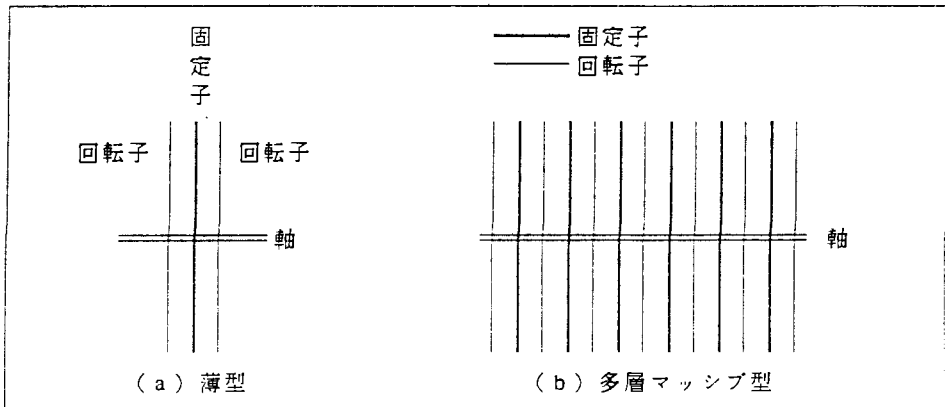


図1 フィルム型誘導電動機の基本構造(側面図)

2. 2 試作電動機

図2(a)～(b)に試作した電動機の外観を示す。図2(a)の電動機の固定子巻線は直径0.3mmホルマル線を使用して多相巻線を形成し、薄さ2mm、直径7cmである。回転子は約0.5mm厚の珪素鋼板で作成され、全体の薄さは5mmである。

図2(b)の電動機の固定子巻線は35 μ m厚の銅箔板をフォトエッチングして作成されており、全体の薄さは約1.0mm直径13cmである。また、回転子は約0.7mm厚の鉄板で作成され、電動機全体の薄さは約5mmである。

図2(c)の電動機は直径0.4mmのホルマル線で固定子コイルを作成し、固定子コイルの直径は13cmであり、回転子は厚さ0.8mmのSUS系ステンレス鋼板を3枚使って作成されている。

試作した電動機の特徴から、一般に回転子は非磁性体金属を用いるよりも磁性体系の材質で可能な限り薄い円盤を採用した方が好ましいことが判明した。これは、磁性体は渦電流によるトルク、すなわち誘導電動機本来のトルク以外に磁気ヒステリシスによるトルクも働くこと、さらに鉄板の厚さが薄いことは慣性モーメントが小さく、非同期時においては固定子の磁束が大部分回転子の渦電流による磁束に打ち消されるため回転子に磁路が必要無いためと考えられる。

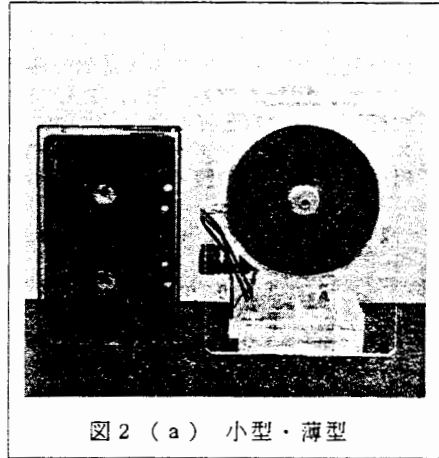


図2(a) 小型・薄型

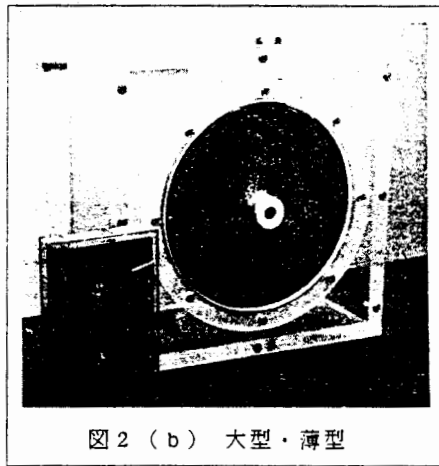


図2(b) 大型・薄型



図2(c) マッシュ型

2. 3 解析

< a > 仮定 実際の固定子磁界分布は正弦波状でなく、多くの空間高調波を含むが基本波で十分近似できるものとする [1]。また、回転子は磁性体で構成されているため磁気ヒステリシスを含むが、磁気ヒステリシスの影響は無視できるものとする。

< b > 解析モデル $R_1, R_2, L_1, L_2, l_1, l_2, M$ をそれぞれ、一次抵抗、二次抵抗、一次自己インダクタンス、二次自己インダクタンス、一次漏れインダクタンス、二次漏れインダクタンスおよび一次・二次間の相互インダクタンスとすれば、三相交流に対して過渡インピーダンス行列 Z は次式で与えられる。

$$Z = R + (d/dt)L + (d/dt)M \quad (1a)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & R_2 & 0 & 0 \\ \text{対称} & & & & R_2 & 0 \\ & & & & & R_2 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1+L_1 & L_1 \cos(2\pi/3) & L_1 \cos(4\pi/3) & 0 & 0 & 0 \\ & l_1+L_1 & L_1 \cos(2\pi/3) & 0 & 0 & 0 \\ & & l_1+L_1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & l_2+L_2 & L_2 \cos(2\pi/3) & L_2 \cos(4\pi/3) \\ \text{対称} & & & & l_2+L_2 & L_2 \cos(2\pi/3) \\ & & & & & l_2+L_2 \end{bmatrix} \quad (1b)$$

ここで、 ω_m は機械角速度である。いま、電圧、電流行列をそれぞれ V と I とすれば、システム方程式は

$$V = ZI \quad (2)$$

となる。(2)式は周期係数を持つ連立微分方程式であるから、定数係数を持つ連立微分方程式に変形するために、対称座標演算子を、 $j=\sqrt{-1}$ として、

$$a = \exp(2\pi/3) \quad (3)$$

と定義し、次の変換行列 C

$$C = 1/\sqrt{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sqrt{R_2} & 1/\sqrt{R_2} & 1/\sqrt{R_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sqrt{R_2} & a^2/\sqrt{R_2} & a/\sqrt{R_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1/\sqrt{R_2} & a/\sqrt{R_2} & a^2/\sqrt{R_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

を用いて、テンソル変換する [2]。すなわち、

$$[C^T] \cdot V = \{ [C^T] \cdot Z C \} [C^T] \cdot I \quad (5)$$

の演算を行う。但し、上添字 T と $*$ はそれぞれ、転置と複素共役を示す。

いま、一次電圧は平衡した三相交流とすれば、正相分のみ考慮すれば良いこととなる。よって、 $d/dt=j\omega$ 、 ω は一次電源角周波数として、正相分に対するシステム方程式は

$$\begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + jX_1 & jX_m/\sqrt{R_2} \\ jsX_m/\sqrt{R_2} & 1 + jsX_2/R_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (6a)$$

となる。但し、 E 、 I_1 、 I_2 はそれぞれ一次正相電圧、一次正相電流および二次正相電流であり、他のパラメータは、それぞれ

$$X_1 = \omega [l_1 + (3/2)L_1] \quad (6b)$$

$$X_2 = \omega [l_2 + (3/2)L_2] \quad (6c)$$

$$X_m = \omega [(3/2)M] \quad (6d)$$

$$s = (\omega - \omega_m)/\omega \quad (6d)$$

で与えられる。

<c>パラメータの決定　いま、同期速度で回転しているとすれば、 $\omega_m = \omega$ であるから、

$$s = 0 \quad (7a)$$

$$I_2 = 0 \quad (7b)$$

の条件が(6)式で成り立つから、このときの一次入力 P_a 、一次電圧 E および一次電流 I_1 を測定すれば、

$$R_1 = P_a / (3I_1^2) \quad (8a)$$

$$X_1 = (\sqrt{(E/I_1)^2 - R_1^2}) \quad (8b)$$

として、一次抵抗 R_1 と一次リアクタンス X_1 が求められる。

次に、回転子が回転しない拘束時の一次入力 P_1 と一次電流 I_1 を測定すれば、

$$\begin{aligned} a_1 &= P_1 / (3I_1^2) - R_1 \\ &= [X_m^2 / R_2] / [1 + (X_2 / R_2)^2] \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} a_2 &= X_1 - \sqrt{(E/I_1)^2 - (a_1 + R_1)^2} \\ &= [X_m^2 X_2 / R_2^2] / [1 + (X_2 / R_2)^2] \end{aligned} \quad (9b)$$

の関係が得られ、これらを用いて、

$$X_2/R_2 = a_2/a_1 \quad (9c)$$

$$X_m/\sqrt{R_2} = (\sqrt{a_1} [1+(a_2/a_1)^2]) \quad (9d)$$

として、残りのパラメータが実験的に求められる。

< d > 出力・トルク (8), (9)式で得られたパラメータを(6a)式に代入することで任意のすべり s における二次電流 I_{2s} が計算される。従って、出力 P_m とトルク T_m は、それぞれ次式で計算される。

$$P_m = 3[(1-s)/s]I_{2s}^2 \quad [W] \quad (10a)$$

$$T_m = 3[p/(s\omega)]I_{2s}^2 \quad [N\cdot m] \quad (10b)$$

ここで、 p は極対数を示す。

2. 4 実験

実験値のトルク T_m は、各回転数における一次入力 P_{in} から一次銅損 $R_1 I_1^2$ を除算し、二次入力を求めることで測定した。すなわち 次式

$$T_m = [P_{in} - 3R_1 I_1^2]/\omega_m \quad (11)$$

から得た値を実験値とした。

第1、2および3表に、それぞれ図2 (a)、(b)、(c)の供試電動機の仕様と実験で得られたパラメータを示す。

表1. 図2 (a) の供試電動機の仕様とパラメータ

固定子直径	D_1 0.070 [m]	一次抵抗	R_1	3.450 [Ω]
固定子幅	W_1 0.002 [m]	一次リアクタンス	X_1	0.450 [Ω]
回転子直径	D_2 0.072 [m]	等価相互リアクタンス	$X_m/\sqrt{R_2}$	0.495 [Ω]
回転子幅	W_2 0.005 [m]	二次等価リアクタンス	X_2/R_2	0.684 [Ω]
平均ギャップ長	G 0.001 [m]			
一次印加相電圧	V_1 4.60 [V]			
周波数 (正弦波)	f 50.0 [Hz]			

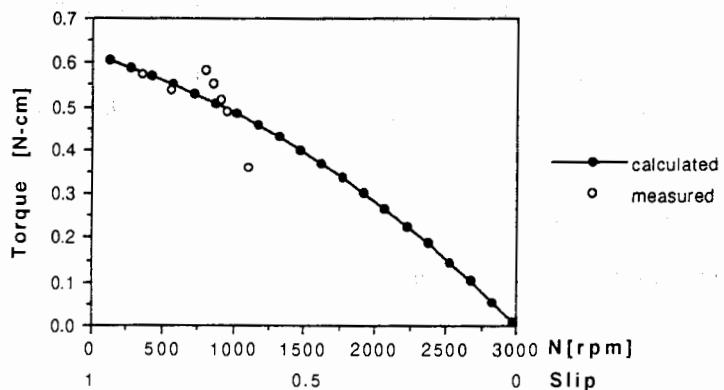


図3 図2 (a) の電動機に対するトルク-すべり特性

表2. 図2 (b) の供試電動機の仕様とパラメータ

固定子直径	D_1 0.130 [m]	一次抵抗	R_1 13.10 [Ω]
固定子幅	W_1 0.001 [m]	一次リアクタンス	X_1 2.70 [Ω]
回転子直径	D_2 0.130 [m]	等価相互リアクタンス	$X_m/\sqrt{R_2}$ 0.690 [Ω]
回転子幅	W_2 0.007 [m]	二次等価リアクタンス	X_2/R_2 1.670 [Ω]
平均ギャップ長	G 0.001 [m]		
一次印加相電圧 V_1 15.0 [V]			
周波数 (正弦波) f 50.0 [Hz]			

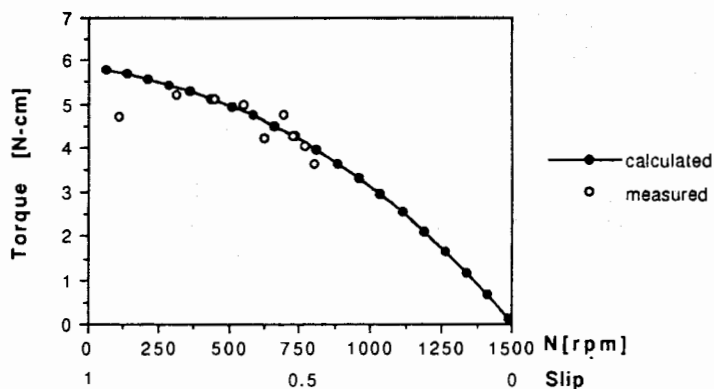


図4 図2 (b) の電動機に対するトルク-すべり特性

表3. 図2 (c) の供試電動機の仕様とパラメータ

固定子直径	D_1 0.130 [m]	一次抵抗	R_1 9.80 [Ω]
固定子幅	W_1 0.007 [m]	一次リアクタンス	X_1 1.10 [Ω]
回転子直径	D_2 0.015 [m]	等価相互リアクタンス	$X_m/\sqrt{R_2}$ 0.107 [Ω]
回転子幅	W_2 0.001 [m]	二次等価リアクタンス	X_2/R_2 -0.914 [Ω]
平均ギャップ長	G 0.003 [m]		
一次印加相電圧 V_1 12.50 [V]			
周波数 (正弦波) f 50.0 [Hz]			

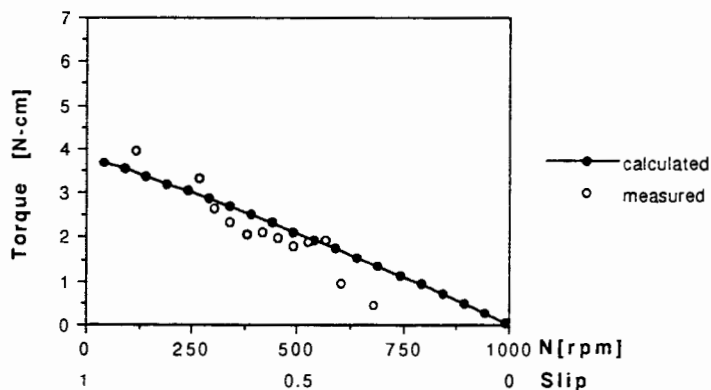


図5 図2 (c) の電動機に対するトルク-すべり特性

図3に、図2(a)の電動機に対するトルクすべり特性を示す。図4に、図2(b)の電動機に対するトルクすべり特性を示す。図5に、図2(c)の電動機に対するトルクすべり特性を示す。図3～5の結果から、本稿で述べた解析方法およびパラメータの決定法は今回の試作機に対し妥当であることが確認された。

3. まとめ

本稿では、単位重量当りの出力が大きく、高周波運転で高効率、構造が簡単で、頑丈、形状が超薄型からマッシュ型、大きさが大型から超小型、さらに集積回路技術の転用によるリンググラフの活用を前提とする新形式の誘導電動機を提案し、3台の試作を行い、実験結果を報告した。その結果、試作機は本稿で述べた方法で解析可能であることが確認された。

参考文献

- [1] Y. Saito, ETZ-A Vol. 95 (1975) pp. 526-530.
- [2] Y. Saito et al., Bulletin of the College of Engineering, Hosei University, No. 12, Jan. (1976) pp. 81-103.

原稿受付日	平成5年8月2日
-------	----------