高エネルギー磁石のヒステリシス電動機への応用†

山 田 博

航空宇宙技術研究所 東京都調布市深大寺町 1880

(昭和 45 年 11 月 13 日 受付)

Application to a Hysteresis Motor of a High Energy Magnet

Hiroshi YAMADA

(National Aerospace Laboratory, Chofu)

(Received November 13, 1970)

A conventional hysteresis motor has a small ratio of the output power to the motor volume as compared with conventional induction motors, because the hysteresis material has a small hysteresis loop.

The author has proposed a new rotor structure in which anisotropic magnetic material Alnico 5 is utilized, which has a large hysteresis loop. The proposed hysteresis motor has a large ratio of the output power to the motor volume and a large starting torque as compared with conventional hysteresis motors.

This paper presents the principle, the structure, the voltage characteristics and the equivalent circuit of the proposed motor. The comparison of the theoretical and experimental values of the slip-torque characteristics is also given.

1. ま え が き

近年ヒステリシス電動機はその長所としての、(i) 騒音が非常に小さいこと、(ii) 起動時突入電流が小さいこと、(iii) 負荷の急変に対して過渡振動が小さいこと、(iv) 非同期時におけるトルク特に起動トルクが比較的大であることなどが買われ需用が伸びている。しかし出力の割には形状が大きくなることが欠点であった。このことは、従来の回転子構造でのヒステリシス材料としては永久磁石として使用するものに比し保磁力が小さくしなければならないことに起因している¹⁾。最近同期電動機を1つの制御要素として使用する分野も出現し²⁾、その同期特性のみならず起動特性、小形化などの要求が高まりつつある。そのため著者はその構造を変えることによって保磁力、残留磁束密度ともに大きく、しかも $(BH)_{\max}$ の大きな異方性材料としてのアルニコ5系統のものをを使うことを可能にし、出力を増し同時に起動トルクも高め小形化とともに起動特性を改善した³⁾。ここではその原理・構造を明ら

かにし、同期および起動特性を決める等価回路を導出し、その値を実測により求めた。また試作電動機の起動特性を決めるすべり特性および同期特性を決める負荷特性などを始めとする基本特性を示し従来のヒステリシス電動機と比較するとともに計算値との比較を試みた。

2. 原理および構造

2.1 ヒステリシストルク

ヒステリシストルクが発生するためには使用するヒステリシス材料の $B-H$ 曲線がヒステリシスループを描くことであり、そのループが包む面積がトルク発生 の根源になる。それを説明すると次のようになる。いま簡単のため回転磁界は理想的な正弦波であるとし、回転子は静止の状態にあるものとする。また回転子のヒステリシス材料は微小な磁区の集合として考えられ、それぞれの磁区が向きを変えるためには非線形的な摩擦力が働くものとする。ここで固定子によって生ずる回転磁界が保磁力の十分高い永久磁石による機械的な回転によって与えられるものとすれば、この固定子磁

† 第8回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭44・8)

石を定常状態で $d\theta$ だけ回転させた場合、固定子磁石がなす仕事 dW は次式によって与えられる。

$$dW = T d\theta = \int_v \mathbf{H} d\mathbf{B} dv \quad (1)$$

ここに、 T ：ヒステリシストルク、 v ：ヒステリシス材料がしめる体積、 H ：ヒステリシス材料内の任意点に加わる磁界、 B ：ヒステリシス材料内の H に対応した任意点における磁束密度。

ここで、単位面積当たりの磁荷 $\mathbf{B}$ が外部磁界 $\mathbf{H}$ 中に存在している場合そこに力が発生し、電動機としてながめた場合はトルクが生じている。そのトルクの大きさは次の仮想仕事の原理から導かれる。それは、固定子磁石を $d\theta$ だけ回転させたため磁区が移動し、磁束密度としては $d\mathbf{B}$ だけ変化したことになる。そのとき、磁区の移動にともなう単位体積当たりの仕事 $\mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}$ がヒステリシス材料内で熱エネルギーに変化したことになる。同時に、これは固定子磁石を $d\theta$ だけ回転させたときになした仕事 $Td\theta$ から与えられる。(1)式を変形し次式を得る。

$$\begin{aligned} dW &= Td\theta = \int_v (\mathbf{H} d\mathbf{B}) dv = \int_l \left\{ \int_S (\mathbf{H} d\mathbf{B}) d\mathbf{l} \right\} dS \\ &= \int_S \left\{ \left(\int_l \mathbf{H} d\mathbf{l} \right) d\mathbf{B} \right\} dS \\ &= \int_S (U d\mathbf{B}) dS = p \oint_B (U d\mathbf{B}) d\mathbf{B} \\ &= p \left(\oint_B U d\mathbf{B} \right) dS \quad (2) \end{aligned}$$

ここに、 S ：磁束通路と直角な断面積、 l ：磁束通路にそった距離、 $U = \int_l \mathbf{H} d\mathbf{l}$ 、 p ：対極数、 $\oint_B U d\mathbf{B}$ ：ヒステリシス材料に与えられた回転磁界のもとでの単位面積、長さ l 当たりのヒステリシスループの一巡にわたる積分。

ただし、ヒステリシス材料は円周角いわゆる θ に関して均一な材料からなっているものとし、また磁束の通過方向は後に述べるように半径方向に限られるものとする。したがって $\theta = 2\pi$ だけ固定子磁石を回転させた場合の仕事 W として次式を得る。

$$\begin{aligned} W &= \int_0^W dW = \int_0^{2\pi} T d\theta = 2\pi T = p \int_S \left(\oint_B U d\mathbf{B} \right) dS \\ &= p \oint_B U d\mathbf{B} \cdot S = p \oint_B U d\Phi \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 $d\Phi = S d\mathbf{B}$ 。ゆえにヒステリシストルクとして次式を得る。

$$T = \frac{p}{2\pi} \oint_B U d\Phi \quad (4)$$

以上では磁界分布が正弦波として考えたが、これはループ積分にマイナーループをも含めて考えれば(4)式は

固定子磁石による磁界分布が正弦波でない場合にも拡張できる。また以上では一様な回転磁界とするため固定子磁石の回転を使用した。これは固定子電流がつくる回転磁界が一様であるならば、それに対しても(4)式は成立する。この場合ヒステリシス材料で消費されるエネルギーは電源が供給することになる。さらに以上では回転子が静止しているとして考えたが、(4)式からわかるようにヒステリシスループの包む面積が回転子と回転磁界との相対速度に無関係に等しければ(4)式は相対速度の関数とはならない。したがって静止から同期直前までのヒステリシストルクはこの場合一定となる。また(4)式からわかるようにヒステリシストルクは回転子のヒステリシス材料で消費される全起磁力 U と、その材料を通過する全磁束 Φ とで定まることになる。この U 、 Φ の値を大きくするには、どのような電動機の構造にするかが要点となり、これを次に検討する。

2.2 構造

従来のヒステリシス電動機は Fig. 1 に示されるよ

Fig. 1 A sectional diagram showing the flux path of a conventional hysteresis rotor

うに磁束を回転子ヒステリシス材料の円周方向にそって通過させていた。これは内部が非磁性体であるためにそれよりも透磁率が何十倍か高いヒステリシス材料内を主として磁束は通過するためである。Fig. 1 でわかるように、この構造は磁束の通過断面積が小さく通過距離が長い特徴がある。全起磁力の大きさは電動機の温度上昇で制限されるため通過距離の長いことはヒステリシス材料の透磁率をあまり小さくできないことになる。そのため保磁力の比較的小さな材料を使用せざるをえないことになる。しかし許される限り保磁力を高めるため全磁束の低いことを利用してみぞの断面積を大きくとり銅損を少なく、できるだけ全起磁力 U を高めるように設計してある。限られた体積でより高いトルクを発生させるためには、保磁力に比較してヒステリシスループの包む面積のより大きな材料を使用する必要がある。このような材料を生産性のよい現存

Fig. 2 Major hysteresis loops (hys. mag. : utilized a conventional hysteresis motor)

のものから求めると、異方性で保磁力も割合に高くヒステリシスループの角ばりの強いアルニコ 5 系統のものが考えられる。このアルニコ 5 と従来のヒステリシス材料の特性を比較すると Fig. 2 のようになる。このアルニコ 5 をヒステリシス材料として使用することを著者は考え、電動機の温度上昇の観点から磁束通過距離を短くする必要上 Fig. 3 に示すように高透磁率

Fig. 3 A sectional diagram showing the flux path of hysteresis rotor proposed by the author

材料をヒステリシスリング内にそう入することによって磁束を回転子の半径方向に通過させ、その磁石における通過距離を短縮させた。この場合、全磁束 Φ はその通過断面積が大となるため大きくなり、それに合った固定子を使用する必要がある。以上からわかるように Fig. 1 の従来の低磁束で高励磁の銅機械的なものに対し、Fig. 3 のアルニコ 5 を使ったものは高磁束で低励磁の鉄機械的なものに高励磁性を加味したものと見なすことができる。なお、このとき使用するヒステリシス材料としてのアルニコ 5 の異方性方向は半径方向であり、この異方性をつくるには Fig. 4 のよう

Fig. 4 A semi-sectional diagram of a equipment for making the radial anisotropic Alnico 5

な磁場冷却装置を使用する必要がある。すなわち赤熱したリング状のヒステリシス材料を継鉄内にそう入し、励磁コイルに直流電流を流し、徐々に冷却するのである。この場合、前もって磁場冷却装置を温めておかないとヒステリシス材料の冷却が早くなり過ぎて所定の特性が得られない。事実、この注意を払うことによって一般の磁場冷却装置で得られる特性に近い値が得られている。また、外周を真円にする加工法としてはセンタレス研削盤で行なうのが一般的な方法となろう。

Fig. 3 のような構造にした場合、空間高調波磁界が増す傾向にあるが、これによるトルクの減少は主として表面部分において生ずるためヒステリシスループの包む面積が大きな材料を使用すること、励磁強さを調整することによって補ってあまりあるものである。なおトルクの減少の原因の 1 つとしてのマイナーループの包む面積は、アルニコ 5 系統のものの方が従来のヒステリシス材料のそれよりも小さくなる傾向にある。そのため、その点でも有利となる。

2.3 誘導トルク

ヒステリシス材料の固有抵抗が約 $50 \mu\Omega\text{-cm}$ であるため、そこには誘導電動機におけるような誘導トルクが生ずる。また Fig. 3 に示すものでは内部の高透磁率材料としてむくの軟鋼を用いることができ、そこにも誘導トルクが発生する。このため起動トルクが大きくなる。

2.4 同期トルクと起動トルクの関係

従来のヒステリシス電動機に使われるヒステリシス材料の代表的なものはアルニコ系統のものであり、その成分の配合を調整して保磁力を $100\sim 200 \text{ Oe}$ 程度にした等方性のものを使用している。そのため同期トルクと起動トルクは密接な関係がある。これはヒステリシス材料そのものの性質からくる問題である。たとえば同期トルクいわゆる出力を高めようとすれば比較的に保磁力を高くする必要がある。かような材料をつくろうとすれば成分の配合によって現技術では必然的にその固有抵抗も高くなり起動トルクが低下する。また起動トルクを高めようとすれば、いきおい低い保磁力の材料を使うことになりヒステリシストルクが減少するとともにヒステリシスループの形の変化のためマイナーループの包む面積が増すことと固有抵抗の減少によって空間高調波によるトルクの減少も増し同期トルクが減少する。しかし Fig. 3 に示したものでは同期トルクの発生部分はヒステリシス材料としてのアルニコ 5 の部分であり、起動トルクの発生部分は内側の高透磁率材料の部分である。そのため同期トルクと起動トルクをおのおの独立に高めることが可能となり、形

の大きさに比し起動時間が小さく出力の大きい同期電動機を設計することが可能となる。

2.5 試作電動機の仕様

試作した電動機に実際に使用した材料および仕様を次に示す。

- (1) 回転子ヒステリシス材料：NFW-7，外径 54.4 mmφ，内径 45 mmφ，厚さ 5 mm のものを 6 個重ね 5 mm×6=30 mm の軸方向の長さとして使用，
- (2) 回転子鉄心：炭素鋼 S 10 C，外径 45 mmφ，内径 10 mmφ，長さ 30 mm，
- (3) 軸：炭素鋼 S 45 C，外径 10 mmφ のもの，
- (4) 固定子成層鉄心：珪素鋼板 H₁₈，外径 100 mmφ，内径 55 mmφ，厚さ 0.5 mm のものを 60 枚成層し長さ 30 mm として使用，溝数 24，半開口溝，
- (5) 固定子巻線：50 Hz，190 V，0.8 A，E 種絶縁，3 相，2 極，星形結線，8 ピッチ重ね巻，毎相毎極 0.45 mmφ で 65 巻数の 4 コイル，
- (6) 空けき：0.3 mm，
- (7) 最高出力：70 W，
- (8) 力率：46 %，
- (9) 最高出力時の効率：58 %，
- (10) 回転子慣性能率：1.9 kg-cm²，
- (11) 初期加速度 (T/J)： 2.4×10^3 [rad/s²]。

3. 電圧特性および等価回路

一般にヒステリシス電動機はヒステリシスループの包む面積を利用している。そのヒステリシスループそのものが非線形性に基づくものなのでその解析は複雑となり実用性を欠くうれいがある。また固定子溝に基づく空間高調波の影響も大きく表われるため，それらをも含めた解析となると更に複雑となり実用性も失なわれる。

事実メーカでは基本設計に関する若干の論文が発表されている⁴⁾にもかかわらず定性的な概念と実験に基づいて設計を行ないカットアンドトライ方式を採用しているのが実状である。これは著者が試作した種のヒステリシス電動機にもいえることで，この非直線性がどの程度のものであるかを実測によって以下明らかにしておく。

3.1 電圧特性

試作電動機の電圧特性としてのトルクおよび電流対電圧特性を Fig. 5 に示す。この特性にも現われるように主としてヒステリシストルクを含む同期トルクの非直線性が目立っている。これはとうぜん予期されることでヒステリシスループの包む面積の飽和とみぞによる空間高調波によるものであるが，果たしてヒステリシスループの包む面積の何割程度のヒステリシストルクが失なわれているかを調べて見るため次式の η を定義する。

Fig. 5 Voltage characteristic of the trial production hysteresis motor

$$\eta = \frac{(\text{使用状態における最大同期トルク})}{(\text{ヒステリシスループの包む最大面積から計算したトルク})} \quad (5)$$

これを求めると次式のようなになる。

$$\eta = \frac{3.5 \text{ kg-cm}}{7 \text{ kg-cm}} = 0.5 \quad (6)$$

これは従来の形のものとは大差はない。したがって，ヒステリシス材料を実際の電動機に組み込んで動作させた場合には，理想的な回転磁界として計算で求めたトルクの約半分が失なわれることになる。これからわかるように定量的な解析を実際と一致させるためには，いかに複雑となるかが想像される。しかし，ある一定の周波数とある一定の電圧における起動から同期にわたる解析は，近似的に線形化して等価回路として表わした場合，定性的な概念のはあくに大いに役立ち，また実測によってその定数を定めれば定量的にもトルク，効率，力率，電流，インピーダンスなどの大体の値のはあくに役だつものと思われる。

また Fig. 5 の電圧特性において，起動電流と同期電流の比が誘導電動機に比し小さい割に起動トルクが大きいのは，回転子抵抗が比較的大きく最大トルクのすべりの位置が起動時のそれに近づいていることと起動時においてもヒステリシストルクが存在しているためである。また従来のヒステリシス電動機と比較すると起動電流の値が同期電流の値に比し大きくなっているのは回転子抵抗が従来のものに比し小さいためで，これは回転子内部の鉄心にむく軟鋼が存在しているためであり，これは同時に起動トルクも大きくしている。

3.2 等価回路の導出

一般に誘導電動機の 1 相に対する等価回路は Fig. 6

Fig. 6 Equivalent circuit of a conventional induction motor

のである。ここに $r_0 + jx_0$ は励磁アドミッタンスの逆数である。ヒステリシス電動機においてはこの x_0 の部分がヒステリシストルクの発生源となる。ここで試作電動機の等価回路を導出するにあたり、文献⁹⁾の等価回路に比し、トルク対すべり特性を求めるための計算の簡潔性を考慮して次のように求める。また、従来示されなかった固定子みぞの高調波磁界に基づく損失がすべり s によって異なることを考慮した等価抵抗とか、同期状態においての負荷変化によるインピーダンス変化を表わす等価回路も同時に求める。

いま試作電動機の、ある 1 相の巻線に流れる励磁電流 I_0 (励磁インピーダンスを通る電流) を次式で示す。

$$I_0 = I_m e^{j\omega t} \quad (7)$$

この電流と他の 2 相の励磁電流によって回転子のヒステリシス材料内に理想的な回転磁界 H が生じているものとし、それを次式で示す。

$$H = H_m e^{j(\omega t - p\theta)} \quad (8)$$

ここに、 ω : 電源角周波数、 θ : 考えている固定子巻線のある磁極の中心を基準にした円周角、 p : 対極数。ここで回転子材料の透磁率 μ を磁界 H に乗じた値が磁束密度である。この場合、回転子材料がヒステリシス損失をもたない材料であればその透磁率 μ は実数であるが、ヒステリシス電動機ではそのヒステリシス損失を利用する関係上、回転子材料がヒステリシス材料であるがため透磁率 μ は複素数となる。すなわちヒステリシス材料の複素透磁率 μ を $\mu_r - j\mu_i$ の形に表わして解析する。

なお、ここではヒステリシス材料の、ある一定の励磁電流のもとでのヒステリシスループをそれと等価な円と見なしている。したがって、回転子が同期速度に達する以前では磁束密度 B として次式を得る。

$$\begin{aligned} B = \mu H &= (\mu_r - j\mu_i) H_m e^{j(\omega t - p\theta)} = |\mu| H_m e^{-j\phi} e^{j(\omega t - p\theta)} \\ &= |\mu| H_m e^{j(\omega t - \phi - p\theta)} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $|\mu| = \sqrt{\mu_r^2 + \mu_i^2}$, $\phi = \tan^{-1} \frac{\mu_i}{\mu_r}$

要するに磁界が加えられて磁束密度が生ずるまでには磁区の回転にともなう非線形摩擦力のためいくぶんかの時間的遅れが生ずる。その程度を示すのが(9)式の ϕ である。次に、考えている巻線に鎖交する全鎖交磁

束 Ψ として次式を得る。

$$\begin{aligned} \Psi &\propto 2np \int_{-\pi/2p}^{\pi/2p} B d\theta \\ &= 2np (\mu_r - j\mu_i) H_m \int_{-\pi/2p}^{\pi/2p} e^{j(\omega t - p\theta)} d\theta \\ &= 2np (\mu_r - j\mu_i) H_m \left[\frac{e^{j(\omega t - p\theta)}}{-jp} \right]_{-\pi/2p}^{\pi/2p} \\ &= 2np (\mu_r - j\mu_i) H_m \frac{2}{p} e^{j\omega t} \\ &= 4n (\mu_r - j\mu_i) H_m e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 $n:1$ 相 1 極当たりの巻数。

したがって 1 相巻線に誘起する電圧 E は次式となる。

$$\begin{aligned} E &\propto -\frac{d\Psi}{dt} \propto -\frac{d}{dt} (\mu_r - j\mu_i) H_m e^{j\omega t} \\ &= -j\omega (\mu_r - j\mu_i) H_m e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (11)$$

ゆえに両端子間の端子電圧は符号を逆にし $H_m e^{j\omega t} \propto I_0 = I_m e^{j\omega t}$ を考慮して次式を得る。

$$\begin{aligned} V &\propto j\omega (\mu_r - j\mu_i) H_m e^{j\omega t} = (\omega\mu_i + j\omega\mu_r) H_m e^{j\omega t} \\ &\propto (\omega\mu_i + j\omega\mu_r) I_0 \end{aligned} \quad (12)$$

端子電圧 V と電流 I_0 の比がその端子間のインピーダンスであり、そのインピーダンス Z_0 は次式で与えられる。

$$Z_0 = \frac{V}{I_0} = R_0 + jX_0 \propto \omega\mu_i + j\omega\mu_r \quad (13)$$

(13)式からわかるように回転子にヒステリシスループを有しない材料を使った場合は(13)式の $\omega\mu_i$ の項は生じない。 μ_i の存在いわゆる磁束が磁界に対して遅れることによってその巻線には抵抗分が生じたと同様な作用を呈するのである。商用周波数帯まではヒステリシスループの包囲面積が ω に無関係でほとんど一定であることを考えると $\mu_i \propto 1/\omega$ となり抵抗分は ω と無関係に一定な値となる。この R_0 を誘導導機におけると同様に出力を示す成分と熱エネルギーに変わる成分とに分けると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{出力に対応する抵抗 } R_{01} &\propto (1-s)R_0 \propto (1-s)\omega\mu_i \\ \text{回転子損失に対応する抵抗 } R_{02} &\propto sR_0 \propto s\omega\mu_i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ただし、 $R_{01} + R_{02} = R_0 \propto \omega\mu_i$

なお回転子のみぞによる空間高調波の影響は渦電流損によるものとヒステリシス損によるものとがあり、それぞれすべり s に関する複雑な関数となるが、ここでは簡単化のためそれらの合成損失に対応する損失抵抗として励磁回路と回転子回路にそれぞれ直列にはいる抵抗 r_0, r_2 で近似的に対応させることにする。さらに同期状態においては近似的には回転子に永久磁石を使用した永久磁石電動機のような動作となり、負荷の増減によって回転子に加わる磁界と残留磁束密度の

ずれの円周角いわゆる内部相差角の増減となって現われる。それを近似的に線形とみなし次式によって定義する。

$$k = \frac{(\text{任意負荷における内部相差角})}{(\text{非同期時における内部相差角})} = \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad (15)$$

この場合、永久磁石回転子と異なることは回転子の磁束密度が内部相差角によってある程度変化する点である。また永久磁石電動機と考えればとうぜん励磁回路に起電力をそう入した解析法が考えられるが、ここでは簡単化のためそれと等価なインピーダンスとして考えることにする。以上のことと $s > 0$ のときは $k=1$ なることを考慮して試作電動機の 1 相あたりの等価回路として Fig. 7 を得る。ここに X_k は内部相差角の変

Fig. 7 Equivalent circuit of the hysteresis motor proposed by the author

化によって励磁リアクタンスが変わるため、その変化を示すために導入したリアクタンスである。

3.3 等価回路の定数の実測

(1) 1 次抵抗 r_1 回転子を除去し定格電流 I を流した状態での 1 相あたりの入力電力を P とすれば次式から求まる。

$$r_1 = \frac{P}{I^2} \quad (16)$$

(2) 1 次漏えいリアクタンス x_1 回転子を除去し定格電流 I を流した状態での 1 相あたりの無効電力を Q とすれば近似的に次式から求まる。

$$x_1 = \frac{Q}{I^2} \quad (17)$$

この場合、回転子のかわりに銅で充満しても大差ない結果が得られた。

(3) 励磁損失抵抗 r_0 定格電圧の同期運転状態 ($s=0$) では 2 次回路は開放状態となり、さらに無負荷 ($k=0$) にすることによって R_0 の項が消え、そのときの 1 相あたりの入力電力より 1 次銅損を差引くことによって励磁損失を求めそれを P とすれば、そのときの線電流を I として次式から求まる。

$$r_0 = \frac{P}{I^2} \quad (18)$$

(4) ヒステリシス抵抗 R_0 定格電圧での同期運転 ($s=0$) の同期脱出寸前の負荷状態 ($k=1$) における入力電力を P とし、そのときの線電流を I として次式で求まる。

$$R_0 = \frac{P}{I^2} - r_0 - r_0 \quad (19)$$

(5) 励磁リアクタンス X_0 定格電圧での同期脱出寸前 ($k=1$) の同期運転状態 ($s=0$) における 1 相あたりの無効電力と線電流を Q , I とすれば次式で求まる。

$$X_0 = \frac{Q}{I^2} - x_1 \quad (20)$$

(6) 内部相差角に関係するリアクタンス X_k 定格電圧での無負荷 ($k=0$) 同期運転 ($s=0$) 状態で、1 相あたりの無効電力と線電流を Q , I とすれば次式で求まる。

$$X_k = \frac{Q}{I^2} - x_1 - X_0 \quad (21)$$

(7) 2 次インピーダンス $Z_2 = R_2 + r_2 + jx_2$ 定格電圧で回転子を拘束した状態 ($s=1$, $k=1$) での 1 相あたりの電力、無効電力、線電流およびインピーダンスを P , Q , I および Z とすればインピーダンス Z として次式を得る。

$$Z = \frac{P + jQ}{I^2} \quad (22)$$

また、 $Z = Z_1 + \frac{1}{Y_0 + Y_2}$ ゆえに Z_2 として次式を得る。

$$Z_2 = \frac{Z - Z_1}{1 - Y_0(Z - Z_1)} \quad (23)$$

ここに、

$$Z_1 = r_1 + jx_1, \quad Y_0 = \frac{1}{r_0 + R_0 + jX_0}, \quad Z_2 = R_2 + r_2 + jx_2$$

この場合、回転子を拘束して定格電圧を印加してもそれほど電流増加はなく短時間では焼損の心配はない。

(8) 2 次損失抵抗 r_2 定格電圧で回転子を拘束した状態 ($s=1$, $k=1$) での 1 相あたりの入力電力、同期ワット、線電流、励磁電流および 2 次電流を P_i , P_0 , I_1 , I_0 および I_2 とすれば次式で求まる。

$$r_2 = \frac{P_i - P_0 - r_1 I_1^2 - r_0 I_0^2}{I_2^2} \quad (24)$$

ここに同期ワットとはこの場合のトルクいわゆる起動トルク T に同期角速度 ω_0 を乗じたものである。

以上の方法で試作電動機について各定数を求めると Fig. 8 のようになる。Fig. 8 でわかるように、この種の電動機は従来のヒステリシス電動機に比し高インピ

Fig. 8 Constants in the equivalent circuit of the trial production hysteresis motor

ーダンスであることがわかる。これはヒステリシス材料のヒステリシスループの包む面積が大きいことによって生ずる等価抵抗 R_0 の増大と、全磁束 Φ が大きいことによる等価リアクタンス X_0 の増大によるためである。このため、この試作電動機は効率の点でまさるが力率の点では劣ることになる。

4. 起動および同期特性

4.1 起動特性

電圧を印加して同期速度に達するまでの時間を τ とし、過渡電流の影響を無視して次式を得る。

$$\begin{aligned} \tau &= \int_0^\tau dt = \int_0^{\omega_0} \frac{d\omega_m}{\alpha} = (J + J_L) \int_0^{\omega_0} \frac{1}{T - T_L} d\omega_m \\ &= -\omega_0 (J + J_L) \int_1^0 \frac{1}{T - T_L} ds \quad (25) \\ \therefore \alpha &= \frac{d\omega_m}{dt}, (J + J_L) \alpha = T - T_L \end{aligned}$$

ここに、 ω_m : 任意時間 t における回転子の角速度、 ω_0 : 回転子の同期角速度、 α : 回転子の角加速度、 J : 回転子の慣性能率、 J_L : 回転子軸に換算した負荷の慣性能率、 T : 電動機の発生トルク、 T_L : 負荷トルク、 s : すべり $\left(\frac{\omega_0 - \omega_m}{\omega_0}\right)$ 。

(25)式からわかるように $\int_1^0 \frac{J}{T} ds$ でもって電動機の起動特性の目安となる。したがって T 対 s の特性いわゆるすべり特性および慣性能率 J の比較で、それぞれの電動機の起動特性を比較することができる。Fig. 9 に同一固定子および同じ外径寸法をもつ回転子を使用した場合の従来のヒステリシス電動機と試作電動機の比較がなされている。この場合、ともに E 種絶縁のため電動機損失電力がだいたい等しいとみることができ、試作電動機の入力電力は従来のものに比し約 1.6 倍となる。Fig. 9 で試作電動機のトルクは従来のものの約 3 倍となっている。しかし慣性能率は内部鉄心が高透磁率材料であるためアルミ合金より重くな

Fig. 9 Slip-torque characteristic of the conventional and the trial production hysteresis motors (rating conditions)

るので従来のものの約 1.5 倍となる。したがって、起動時間 τ としてはおよそ従来のものに比し半分となり起動特性は 2 倍とよくなっている。また、Fig. 8 の等価回路から計算で求めたトルク T 対すべり s の特性が Fig. 9 に示され実測値との比較がなされている。同時にヒステリシストルクと誘導トルクを分けて示してもある。なお、この計算値は Fig. 7, Fig. 8 を参照し $k=1$ を考慮した次式による。

$$\omega T = \omega T_0 + \omega T_2 = 3 \left\{ |I_0|^2 (1-s) R_0 + |I_2|^2 \frac{(1-s)}{s} R_2 \right\} \quad (26)$$

ゆえに、

$$T = 3 \frac{|I_0|^2 (1-s) R_0 + |I_2|^2 \frac{1-s}{s} R_2}{(1-s) \omega_0} = 3 \frac{|I_0|^2 R_0 + |I_2|^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_0} \quad (27)$$

ここに、 T_0 : ヒステリシストルク、 T_2 : 誘導トルク、

$$I_0 = \frac{\frac{R_2 + r_2}{s} + jx_2}{\frac{R_2 + r_2}{s} + r_0 + R_0 + j(x_2 + X_0)} I_1 = f(s)$$

$$I_2 = \frac{r_0 + R_0 + jX_0}{\frac{R_2 + r_2}{s} + r_0 + R_0 + j(x_2 + X_0)} I_1 = g(s)$$

ただし、

$$I_1 = \frac{E}{r_1 + jx_1 + \frac{\left(\frac{R_2 + r_2}{s} + jx_2\right)(r_0 + R_0 + jX_0)}{\frac{R_2 + r_2}{s} + r_0 + R_0 + j(x_2 + X_0)}}$$

E : 相電圧

以上の式に実測で求めた実数 (Fig. 8 の値) を代入し、すべり s に対するトルク T の関係を計算したのが Fig. 9 に示した計算値である。この計算値は $s=0.3$ 近辺を除いてよく一致している。実測値はいくぶ

んか深みぞ形の特徴が加味された ($s \approx 0.3$ 近辺で凸部をもっている) 2次抵抗の大きい誘動電動機の特徴がヒステリシストルクの特徴に加わったものとなっている。しかし深みぞ形の等価回路とすると複雑さを増し実用的でないおそれが生ずる。しかし Fig. 7 の等価回路で実用上は十分利用できるものである。したがってこの等価回路で実用的な定量性を加味した傾向を求めることができる。ただしこれは周波数と供給電圧を一定とした状態でのものであることを忘れてはならない。

4.2 同期特性

同期運転状態において負荷が急変した場合、新しい内部相差角 φ_0 になるまでに一般に過渡振動が発生する。その様子は次式によって表わされる。

$$(J+J_L) \frac{d^2\varphi}{dt^2} + R \frac{d\varphi}{dt} + K\varphi = T_L \quad (28)$$

ここに、 J ：電動機回転子の慣性性能率、 J_L ：電動機軸に換算した負荷の慣性性能率、 $R = \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_{s=+0} + R_L$ 、 R_L ：負荷の制動係数、

$$K = \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=\varphi_0} \quad (\text{これを同期化力という}).$$

Fig. 10 に、同じ固定子を使用した場合の従来のも

Fig. 10 Loading characteristics of the conventional and the trial production hysteresis motors (rating conditions)

のと試作電動機の負荷に対する内部相差角の関係の実測値が示してある。いま、 $J_L = R_L = 0$ とした場合の固有角振動数 ω_n とダンピング係数 $\zeta = \delta/\omega_n$ (δ : 減衰定数 $= R/2J$) は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{K}{J}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=\varphi_0}} / J \\ \zeta &= \frac{\delta}{\omega_n} = \sqrt{\frac{J}{K}} \cdot \frac{R}{2J} = \frac{R}{2\sqrt{KJ}} \\ &= \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_{s=+0} / 2 \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=\varphi_0}} \cdot J \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Fig. 9, 10 の実測値よりこれらを比較すると、従来のヒステリシス電動機に比し試作電動機は k がだいたい2倍に、 J がだいたい1.5倍に、そして R がだいたい3倍になる。したがって ω_n が1.15倍に、そして ζ が1.73倍となり安定度も従来のものに比し向上する。これはとくに R の増加による影響が働いているためである。また、同期脱出時あるいは非同期時における内部相差角 $\varphi = \varphi_m$ を実測で求めると 25° となる。それ以下の任意の φ における負荷トルクを Fig. 8 から計算で求めると Fig. 10 のようにほとんど直線となる。なおこの計算式は次式による。

$$T = 3 \frac{|I_0|^2 k R_0}{\omega_0} = \frac{3 |I_0|^2 R_0}{\omega_0} \frac{\varphi}{\phi} = f(\varphi) \quad (30)$$

ここに、

$$I_0 = \frac{E}{r_1 + r_0 + k R_0 + j(x_1 + X_0 + X_k - k X_k)}, \quad k = \frac{\varphi}{\phi}$$

内部相差角と負荷トルクの関係は同期脱出まではほとんど計算値、実測値とも直線的である。したがって(15)式の仮定は実際にかかなり近いとみてよい。また線電流および入力電力対負荷トルクとの関係も Fig. 10に示してあり、線電流の変化はかなり小さい。これは励磁リアクタンスが大きいためである。

5. む す び

ヒステリシス材料としてアルニコ5を使うことによって、電動機の大きさに比較して大きな出力が得られた。同時に、起動トルクも大きく、安定度もよく、また起動および同期特性のよい同期電動機が得られた。しかし、この種電動機では固定子として珪素鋼板からなる成層鉄心を用いることとヒステリシス材料においても透磁率の実数部分 μ_r が存在することによって回路にインダクタンスを有し、それと抵抗とで定まる時定数に關係する過渡現象が発生する。その場合の過渡電流としての直流電流によって生ずる制動トルクのため、それが影響する程度になると、もはやそれ以上の起動時間の短縮は望めなくなる。これはヒステリシス電動機である限り常に付随する問題である。しかし普通のACサーボモータに匹敵する程度の初期加速速度の値が得られる可能性は十分にある。またヒステリシス電動機では定速度を得るためのフィードバック系はその電動機自体の機能に包含されていると考えることができ、段階的な定速度とある程度の起動時間の短縮を目指すものではフィードバック系を必要とせず、経済的に有力な制御要素とみることが出来る。なお、起動時間の問題は起動時間のみならず、ある向きの同期速

度より他の向きの同期速度に移る時間とか、同期速度から停止にいたる時間の問題にも容易に発展させることができる。

本報告の目的は、ここで述べたような形の起動特性および同期特性に富んだヒステリシス形同期電動機を提案すると同時に、その特性を示し、さらにその設計に必要なある程度の定量性を加味した概念を得るための等価回路を誘導し、実用化への発端となさしめることでありこの点は提供できたと思っている。

終わりに、本研究にさいし種々ご援助をたまわった日本特殊鋼(株)技術係長の吉野泰文氏、(株)大東製作所専務取締役の田村正四郎氏ならびにコロナモータ

(株)常務取締役工場長の板谷秀夫氏をはじめとする多くのかたがたに深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Parker, Studders : Permanent Magnets and Their Application, John Wiley and Sons, Inc. (1962)
- 2) Kraver : Position Control with a Synchronous Motor, Control Engineering, 17-5, 66/71 (1970)
- 3) 山田 : アルニコ 5 を使ったヒステリシス電動機, 第 8 回計測自動制御学会学術講演会論文集, 643, 497/498 (1969)
- 4) 中村・大川・加藤 : ヒステリシス電動機の基本設計, 電気学会誌, 88-6-957, 112/120 (1968)
- 5) 宮入・片岡 : ヒステリシス電動機の基本等価回路, 電気学会誌, 85-10-925, 118/126 (1965)

論 文 集 論 文 に 対 す る 討 論 の 募 集

- ◇ 会員相互の知識の交換のため、論文集には寄書欄を設けてあります。
- ◇ 新しい着想や学術上の所見はもとより、実験結果または論文集の論文に対する質問・討論・意見などなるべく短くまとめて (0.5~2 ページ以内) 御投稿ください。
- ◇ 昭和 47 年 5 月 25 日までの投稿は次号に掲載されるよう努力します。