UDC 621.313.323.01: 621.318.26

論文

53-B19

磁石式同期電動機の解析

正 員 高 橋 琢 二 (日本工大)

正 員 小 林 正 紀 (千葉工大)

1. ま え が き

磁石式同期電動機の磁石材として廉価なフェライト磁石が使用されているが、その高保磁性性によって動作も安定しており小容量の機械に好適である。構造は回転界磁形で回転子磁石はリング状のものが多く、磁化は半径方向で多極のものも容易に得られ、低速機としての用途もその一つの特長になる。

この形の同期電動機に関する報告はあまり見受けられないが、これはその動作が一般同期機に類似すると考えられているためでもあろう。しかし、回転子磁石をリング状に構成した機械では動作機構は一般同期機と大きく相違し、動作はむしろヒステリシス電動機のそれに近く設計面からもその機構の解明が望まれる。

フェライト磁石を使用した上述の電動機に関しては無負荷量を解析の手掛りとする大川氏の報告⁽¹⁾があるが、ここでは同じ電動機を対象として動作機構の解明や最大出力の算定などを目的として純理論的な立場から解析を試みる。本電動機では負荷時に磁極中心軸とギャップ磁束中心軸の間に生ずる空間相差は磁石の磁化状態を変えて磁化力と磁束密度の間に空間相差を発生させる。そこでまず、この相差によって生ずる磁石リングの磁気諸量の状態変化を調べて関係式を誘導し、各量をベクトル表示して動作の考察に資する。ここに、リング状は磁路ではその内部における磁束減衰の効果を考慮しなければならず、この効果を磁石リングの厚さに考慮して実効的な厚さを考える。次に、出力特性を調べて回転子インピーダンスの内容を検討し、次いで最大出力の算定法について考察する。そして、試作機について、負荷に対する磁気諸量推移の模様や実効的な厚さの値並びに上述の空間相差の特性などを検討したが、目的の多くを達し得たように考える。

なお、実用上の便宜から磁化力を Oe、長さを mm

で表わした箇所がある。文中単位を記していない箇所はすべて MKS 単位になっている。

2. 動作の考察

〈2・1〉 磁化特性 第1図に、実験に使用したフェライト磁性材の磁化特性曲線を示した。磁石での動作は通常はマイナーループに沿って行なわれるが、この磁石材では図示の範囲内でマイナーループは主ループにほとんど一致するので、特性の考察は主ループについて行なえる。この曲線は直線であって残留磁束密度を B_r 、可逆透磁率を μ_d とおくと磁化特性は次のように表わされる。

$$B = B_r + \mu_d H \dots\dots\dots (1)$$

以下はリング状の磁石を対象として、磁化力や磁束密度はその接線方向成分を扱う。また、電動機特性の考察にこれらは、その基本波で分布する成分を考えればよく、各量の基本波成分を電気角を θ とおいてそれぞれに (θ) および添字 1 を付して表わすと、

$$B_1(\theta) = B_{r1}(\theta) + \mu_d H_1(\theta) \dots\dots\dots (2)$$

残留磁束密度の分布は磁石リングに固定され、磁極の位置を角度の原点にとると、その基本波成分は第2図、第3図に示されるよう分布する。ここに残留磁束密度の分布波形は着磁の方法によって異なり、与えられた材料について波形を推定しておく。そして、その波高値を B_r 、波形に関する係数を K とおいて、 $B_{r1}(\theta)$ を次のように表わす。

$$B_{r1}(\theta) = K B_r \sin \theta \dots\dots\dots (3)$$

第1図 バリウムフェライトの B - H 特性Fig. 1. B - H curve of Ba-Ferrite.

An Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors. By Takuji Takahashi, Member (Nihon Institute of Technology) & Masanori Kobayashi, Member (Chiba Institute of Technology).

高橋琢二: 正員, 日本工業大学電気工学科
小林正紀: 正員, 千葉工業大学電気工学科

第 2 図 無負荷時の磁束分布

Fig. 2. Flux distribution under non-loaded condition.

第 3 図 負荷時の磁束分布

Fig. 3. Flux distribution under loaded condition.

ここに $K = (\text{含まれる基本波成分の波高値}) / (\text{原波形の波高値})$, $B_1(\theta)$ と $H_1(\theta)$ の分布特性はギャップ磁束の基本波成分と磁石リングの相対位置によって決められ、その分布位置は無負荷時に第 2 図 (a), (b), 負荷時に第 3 図 (a), (b) のようになる。図中の $B_g(\theta)$ はギャップ磁束密度の基本波成分であって、磁石リングの接線方向磁束はギャップ磁束を集積して得られ、 $B_1(\theta)$ は常に $B_g(\theta)$ より 90° 遅れて分布する。

ここで、まず無負荷時について考察する。この場合に、ギャップ磁束の最大値を生ずる位置は磁極の位置に一致し、 $B_g(\theta)$ は原点で最大値をとる。そして、 $B_1(\theta)$ はその最大値を B_1 とおいて $B_1 \sin \theta$ とおかれるが、これは $B_{r1}(\theta)$ と同相である。磁化力は巻線電流の発生する起磁力の大小によって $B_1(\theta)$ と同相ま

たは逆位相となり $H_1(\theta)$ はその最大値を H_1 とおいて $H_1 \sin \theta$, または $H_1 \sin(\theta + 180^\circ)$ とおかれるが、この位相の関係については次節で考察する。以上より (2) 式は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} B_1 \sin \theta &= K B_r \sin \theta + \mu_d H_1 \sin \theta \\ \text{または} \\ B_1 \sin \theta &= K B_r \sin \theta + \mu_d H_1 \sin(\theta + 180^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

いま、磁化力と磁束密度各々の基本波成分に関する磁化特性曲線を想定すると、上段の式はその第 1 象限で、下段の式は第 2 象限で動作する場合の式となり、磁化力と磁束密度の相差は前者で零、後者で 180° である。第 2 図 (a) は前者に、(b) 図は後者に対応し、以下これらの動作の状態をそれぞれモード I、およびモード II と呼ぶ。

其次に、負荷時はギャップ磁束は磁極に対して回転方向に分布位置を移し、 $B_g(\theta)$ の分布位置は第 3 図 (a), (b) のようになる。図において回転方向は θ の負の方向であって、 β は移動した角度である。この結果として $B_1(\theta)$ も同じ方向に同じ角度移動するが、 $B_{r1}(\theta)$ の分布位置は無負荷時と変わらない。そして $H_1(\theta)$ は (2) 式に従って図示のように分布し、相差 α を生ずる。なお、上述のように α は残留磁束の存在に起因して生じ、その発生は本電動機に固有の現象により該当する用語は従来存在しない。これは、ヒステリシス電動機におけるヒステリシス進角に対応するもので残留進角なる表現が考えられるが、用語として理解し難い面もあり、また、現象として一般性もないので本報告では相差 α について別に用語を設けない。

第 3 図 (a) はモード I の場合で $H_1(\theta)$ は無負荷時の分布位置より $\alpha + \beta$ 進む。(b) 図はモード II の場合であって $H_1(\theta)$ は $180^\circ - (\alpha + \beta)$ 遅れる。よって (3) 式はモード I, II の両者に対して

$$\begin{aligned} B_1 \sin(\theta + \beta) &= K B_r \sin \theta + \mu_d H_1 \sin(\theta + \alpha + \beta) \\ &= \{K B_r + \mu_d H_1 \cos(\alpha + \beta)\} \sin \theta \\ &\quad + \mu_d H_1 \sin(\alpha + \beta) \cos \theta \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

とおかれる。ここで

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= B_1 / H_1 \\ \mu_r &= K(B_r / H_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

とおくと (5), (6) 式より

$$\mu_1 = \sqrt{\mu_r^2 + \mu_d^2 + 2 \mu_r \mu_d \cos(\alpha + \beta)} \dots\dots\dots (7)$$

および

$$\tan \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{(\mu_r / \mu_d) + \cos(\alpha + \beta)} \dots\dots\dots (8)$$

磁石リングの磁化特性は動作モードのいかんによら

ず (6)~(8) 式によって表わされる。第4図は(8)式より算出した α に対する β の特性であって $C = \mu_r / \mu_d = K B_r / \mu_d H_1$ をパラメータとして描いてある。

図示のように β はかなり小さく、本電動機では磁極とギャップ磁束のわずかな相対位置の移動によって大きな相違 α を生ずることが分る。

上述のようにして磁石リングの磁化特性が判明するが、実在する磁化力や磁束密度の分布波形は不明である。それにもかかわらず、基本波成分に関する特性を知り得るのは磁化特性曲線が直線で表わされ、基本波成分の抽出に高調波成分の特性が関与しないことによる。

〈2・2〉ベクトル表示 本節では諸量をベクトル表示して動作の考察、あるいは特性の解析に資する。この場合に磁石リングを通過する磁束のうち、巻線に鎖交しない漏れ磁束はこれを省略してあるが、電動機特性の考察には差支えない。但し、相差 α と磁石リングの透磁率は真値と若干異なってくるが、その模様は後述する。

ベクトル図は第5図のようで、 $\dot{B}_{r1}$ 、 $\dot{B}_g$ 、 $\dot{B}_1$ 、 $\dot{H}_1$ はそれぞれ前述の各量に対応する。残留磁束密度の分布は磁石リングに固定され、その最大値は磁極間中央の位置に生じ $\dot{B}_{r1}$ と直角をなす軸が磁極中心軸になる。そして無負荷時に $\dot{B}_g$ は磁極中心軸上に、 $\dot{B}_1$ 、 $\dot{H}_1$ は軸 $\dot{B}_{r1}$ 上に位置する。但し、モード II では $\dot{H}_1$ は $\dot{B}_{r1}$ と逆位相である。負荷が加わると前述した機構によって、それぞれ図示の位置を占めるが、 $\dot{H}_1$ の無負荷位置からの角移動量はモード I で $\alpha + \beta$ 、モード II で $180^\circ - (\alpha + \beta)$ である。

次に、 $\dot{F}_r$ 、 $\dot{F}_g$ および $\dot{F}$ はそれぞれ磁石リングとギャップに加えられる起磁力および巻線電流の発生する起磁力であって、 $\dot{F}_r$ と $\dot{F}_g$ のベクトル和が $\dot{F}$ になる。以下はこれらをそれぞれ回転起磁力、ギャップ起磁力、および巻線起磁力と呼ぶが、 $\dot{F}_r$ は $\dot{H}_1$ より 90° 進み⁽²⁾、 $\dot{F}_g$ は $\dot{B}_g$ と同相であって、 $\dot{F}_r$ と $\dot{F}_g$ の相差は α に一致する。破線で描いたベクトルは巻線誘起電圧と電流の時間ベクトルであって、電圧 $\dot{E}$ はギャップ磁束より 90° 進み、電流 $\dot{I}$ は巻線起磁力と同相になる。第5図は遅れ電流の場合を示すが、進み電流の状態は図からも推察できるように $\alpha > 90^\circ$ なる範囲で回転起磁力の大きい場合に生ずる。

ここで、動作モードについて考察する。いずれのモードに属するかは、無負荷時における巻線起磁力とギャップ起磁力の大小関係によって決められる。第6図は無負荷時のベクトル図であって、(a)、(b)図はそ

第4図 相差 α に対する相差 β の特性

Fig. 4. Characteristics of phase angle β vs. phase angle α .

第5図 負荷時のベクトル図

Fig. 5. Vector diagram under loaded condition.

第6図 無負荷時のベクトル図

Fig. 6. Vector diagram under non-loaded condition.

れぞれモード I および II に対応する。(a)図のように巻線起磁力 F がギャップ起磁力 F_g より大きい場合に回転起磁力 $\dot{F}_r$ はギャップ磁束密度 $\dot{B}_g$ と同相であって、磁化力 $\dot{H}_1$ は磁束密度 $\dot{B}_1$ と同相になる。これに対して (b) 図のように F が F_g より小なるときは $\dot{H}_1$ は $\dot{B}_1$ と逆位相になる。以上のようにして動作モードは無負荷時における巻線起磁力の大小に関し、一極の起磁力の振幅の大きい小数極の機械ではモード I で動作する場合が多い。

次に、磁石リングの漏れ磁束の影響については、この磁束の存在を考慮するとベクトル図は第7図のよう

第 7 図 漏れ磁束を考慮したベクトル図

Fig. 7. Vector diagram taking account of leakage flux.

になる。但し、漏れ磁束と有効磁束は磁石リングの外部で磁路が異なるので、磁束密度の代りに磁束を使用して表わしてある。図において破線で描いた磁束、 ϕ_{11} , ϕ_{11}' , ϕ_{21} , ϕ_{21}' はそれぞれ磁石リングの漏れ磁束と全磁束、各々の接線方向成分、および外部磁路を通過する漏れ磁束と全磁束であって、いずれも基本波で分布する成分を表わす。有効磁束は実線によって示されるが、そのベクトル関係は第 5 図と同じである。但し、図中の ϕ_{21} は第 5 図の $\mu_a H_1$ に対応する。ここに、漏れ磁束 ϕ_{11} は磁化力 H_1 と逆位相であってその大きさは漏れ磁気回路に存在する起磁力の総和を零ならしめる大きさとなる。そして全磁束 ϕ_{11}' , ϕ_{21}' は有効磁束と漏れ磁束のベクトル和として与えられ、磁化力と磁束密度の相差は図示の α' になるが、これがその真値である。磁路の透磁率についてもその真値は ϕ_{11}' に対する透磁率になるが電動機特性の検討はこれらの真値によらずに行なえる。

〈2・3〉 磁束減衰に関する考察 本節では磁石リングの内部における磁束減衰現象の与える影響について考察する。リング状の磁路では極数の多い場合に磁束はその内部まで浸透しにくく、内部へ入るに従って次第に減衰する。ここに、本電動機では接線方向磁束は (2) 式に示されるように磁化力に比例する項と残留磁束の項より成るが、前者に対しては磁石リングの透磁率は一定 (μ_a) であって、内部における減衰の模様は一定透磁率の場合の特性⁽²⁾に従う。この場合に、フェライト磁石材では可逆透磁率 μ_a は空気の透磁率に近く、磁石リングを保持する非磁性体も磁路に含まれ、減衰特性の吟味には厳密にはこの磁路をも考えなければならない。後者は、フェライトでつくられた磁石リングは機械的強度を考慮して厚く形成されるの

で、極数の多い場合は内部まで十分に磁化できず残留磁束密度は内部で減衰するが、一般に、前者の磁束と減衰の特性を異にするとしてよい。この場合に深さの異なった点で上述の両磁束の比、従って B_r/H_1 は異なり、(6)~(8)式に明らかなように、透磁率や磁化力と磁束密度の相差が相違し現象はかなり複雑となる。

磁石リングの特性を表示する場合に、その表面における量で諸量を代表するのも一つの方法⁽²⁾であって、有利な点が多い。そこで、本報告においてもこの方法によるが、接線方向磁束密度の振幅を表面における値で代表すると、磁束が内部で減衰する場合は磁石リングの厚さには実際より薄い厚さを適用しなければならない。このような厚さを以下では実効的な厚さと呼ぶが、磁束減衰の問題はこの実効的な厚さの問題に帰着する。この厚さは電動機の実測して判明するが、簡単のために上の両磁束が同じような特性で減衰するとして、すなわち、全磁束が一定透磁率の場合の減衰特性に近い特性で分布するとして厚さの近似式を用意する。ここで、上述した非磁性体の形成する磁路の影響を省略して、磁路の内径に磁石リングの内径を適用すると、実効的な厚さを b_e とおいて

$$b_e = (\mu_a/\mu_1)(2r_1/P)(r_1^P - r_2^P/r_1^P + r_2^P) \dots (9)^{(2)}$$

ここに、 r_1 , r_2 : 磁石リングの外半径と内半径、 P : 極数、 μ_1 : 磁石リングの表面における透磁率、 μ_a : 磁石リング断面の平均透磁率 μ_a/μ_1 は深さによる透磁率の若干の相違を考慮して付した係数で、その値は実験的に決定する。なお、深さによる相差 α の差異はこの効果を取入れる適切な方法もないので、その影響は考慮していない。

3. 出力特性

(1) 第 8 図 (a) は一般同期機の起磁力のベクトル図で界磁起磁力を $\vec{F}_0$ とおく。ほかの記号の内容は前掲に同じであって、 $\vec{F}_0$ と巻線起磁力 $\vec{F}$ のベクトル

第 8 図 起磁力のベクトル図

Fig. 8. Vector diagram of mmf.

ル和がギャップ起磁力 $\vec{F}_g$ になる。(b) 図は本電動機のベクトル図で、 $\vec{F}_0$ は回転子起磁力を界磁起磁力の形で表わしたものである。これは $\vec{F}_r$ の符号を変えて得られるが、図示のように負荷時にはその軸は磁極中心軸に一致しない。また、一般同期機における図示の相差 β に対応する角度は本電動機では $180^\circ - \alpha$ である。このように、起磁力の位相関係についても本電動機は一般同期機とその様相を異にし、出力式も異なったものになる。

一般同期機の場合、起磁力 $\vec{F}_0$, $\vec{F}_g$, および $\vec{F}$ が、それぞれギャップに生ずる磁束の一相の巻線に誘起する電圧を $\vec{E}_0$, $\vec{E}_g$, および $\vec{E}$ とおくと円筒機では

$$\vec{E}_0 = \vec{E}_g + \vec{E} \dots\dots\dots (10)$$

本電動機の場合、ギャップ磁束を $\vec{F}_0$ と $\vec{F}_r$ の成分に分解して、これらを、それぞれ一般同期機における上述の磁束に対応させれば、巻線誘起電圧について (10) 式と同じ式を得る。 $\vec{E}$ は電機子反作用による電圧降下で、同期リアクタンスの反作用分を x_a 、電機子電流を $\vec{I}$ とおくと、 $\vec{E} = j x_a \vec{I}$ より

$$\vec{I} = (1/j x_a)(\vec{E}_g - \vec{E}_0) \dots\dots\dots (11)$$

回転子入力は相数を m とおいて、 $W_r = m[\vec{E}_r \cdot \vec{I}]_{\text{real}}$ として求められるが、 $\vec{E}_g$ と $\vec{E}_0$ の相差は一般同期機で β 、本電動機で $\pi - \alpha$ なることにより、 W_r はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} W_r &= (m/x_a) E_g E_0 \sin \beta \\ W_r &= (m/x_a) E_g E_0 \sin \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式に示されるように、一般同期機では相差 β が出力特性を支配するのに対して、本電動機では相差 α が特性に関与する。また、電圧 E_0 については本電動機ではその調整は不可能であって、そのうえ負荷によって変化し、このために脱出の判定は一般同期機におけるほど容易ではない。上の回転子入力は磁石リングに関する量によって次式のようにも表わせる⁽²⁾。

$$W_r = (f/4) V_e B_1 H_1 \sin \alpha \times 10^3 \dots\dots\dots (13)$$

但し、 f : 電源周波数、 V_e : 磁石リングの実効的な体積、 H_1 : Oe

磁石をトルクの発生に利用する交流電動機の回転子入力はすべて上式によって示される。なお、本電動機では磁束数は負荷によらず、ほぼ一定に保たれるので (13) 式によれば出力はだいたい $H_1 \sin \alpha$ に比例するとしてよい。そして、磁化力は負荷の大きい場合に負荷の増加に伴って増大する傾向にあり、 α が 90° を越えても出力は増大を続け、脱出時の α は 90° より大きくなる。

(2) 回転子インピーダンス 本項では回転子回

路のインピーダンスと磁気諸量の間の関係を表示して計算の資料とする。本電動機におけるように回転子磁路で多量の起磁力が消費され、そしてトルクの発生に磁化力と磁束密度の相差を利用する機械ではその回転子インピーダンスはこの起磁力に関する量と相差 α によって次のように表わされる⁽²⁾。いま

$$\left. \begin{aligned} n &= \text{回転子起磁力/ギャップ起磁力} = F_r/F_g \\ h &= \text{巻線起磁力/ギャップ起磁力} = F/F_g \end{aligned} \right\} (14)$$

なる起磁力の比を考えると、回転子一相のインピーダンスを Z 、その抵抗分を r 、リアクタンス分を x とおいて

$$\left. \begin{aligned} x &= x_m/h \\ r &= x_m(n/h^2) \sin \alpha \\ x &= x_m(1/h^2)(1+n \cos \alpha) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

但し、 x_m は固定子を誘導電動機に使用したときの巻線の励磁リアクタンスで、前節の x_a に等しい。

起磁力比の内容は次のようになる。まず、 n については、極節を τ 、空けき係数と飽和係数を乗じた等価的なギャップの長さを g 、ギャップ磁束密度の最大値を B_g とおき、起磁力の大きさを一極の最大値で表わすと

$$F_g = (g/\mu_0) B_g \dots\dots\dots (16)$$

$$F_r = (\tau/\pi) H_1 \dots\dots\dots (17)$$

および

$$B_g = (\pi/\tau) b_e B_1 \dots\dots\dots (18)$$

(16)~(18) 式を (14) 式に代入すると

$$n = (\tau/\pi)^2 (1/b_e g) (\mu_0/\mu_1) \dots\dots\dots (19)$$

起磁力比 n は磁気回路の寸法と磁石リングの透磁率によって上式のように表わされる。 h については第5図に示される起磁力間の関係と (14) 式より

$$h = \sqrt{1 + 2n \cos \alpha + n^2} \dots\dots\dots (20)$$

(3) 最大出力の算定 ここで、磁石リングより得られる出力の限度を明らかにする方法について考察するが、本報告では小容量の機械を対象としているので主たる損失として巻線の銅損を考えればよく、算定は巻線起磁力をその許容値に保つ場合について行なう。なお、巻線起磁力の負荷に対する特性は一次インピーダンスの特性にも依存するが、実験に使用した機械は起動巻線を持たず、またかなりの小容量であることから、一次インピーダンスは抵抗分が多くを占め、この場合に電流は後記の実験結果にも示されるように負荷時にかえて減少する(付録)。しかし、巻線の一部で起動用のかご形回転子を励磁する場合は、その大きな励磁リアクタンスが一次インピーダンスに加わり電流は負荷時に増大する傾向を示すので(付録)、実用

される機械では許容値として重負荷時の起磁力に着目してよい。

前述のように、本電動機では脱出の判定は一般同期機に比べて難しく、最大出力の算定は磁石リングの磁化力や相差 α などを仮定して出力と巻線起磁力を求め、起磁力の許容値における出力を比較して最大出力を知る試行的な方法によらざるを得ない。上述の仮定量としていろいろの組合せが考えられるが、ここでは空間相差 (β) と磁化力を仮定する場合について計算の順序を略述する。

まず、空間相差を数度の角度に選び、これに対して磁化力を適当に仮定して (8) 式あるいは第 4 図より相差 α を、(7) 式より透磁率を求める。この透磁率より磁石リングの磁束密度が算出され、この磁束密度と別に求めている実効的な厚さを (18) 式に代入してギャップ磁束密度を得る。そして、ギャップ磁束密度よりギャップ起磁力が、磁化力より回転子起磁力が、それぞれ (16) 式および (17) 式より算出され、これらを α を相差としてベクトル的に加えて巻線起磁力が判明する。このようにして、いろいろの値の空間相差についてそれぞれに磁化力に対する巻線起磁力の特性を求め、許容起磁力を生ずる空間相差と磁化力の組合せを知り、その各々について (13) 式より出力を算出して、最大出力を見いだす。

4. 実測による検討

〈4・1〉 特性の算出 実測による検討は負荷に対する磁化力と磁束密度および相差 α 、それぞれの推移の模様の調査と磁石リングの実効的な厚さの吟味、並びに負荷時に生ずる磁極中心軸とギャップ磁束中心軸の空間相差の特性の確認を主な目的とする。

試作機は 4 極機と 8 極機の二機種で、起動巻線は持たない。磁石材は半径方向磁化の等方性バリウムフェライトで、その特性は第 1 図のようである。なお、 $\mu_d/\mu_0=1.2$ 、 B_r は温度によるその変化を考慮する。残留磁束密度の分布波形はサーチコイルを設けてその誘起電圧波形より推定するが、試料では正弦波に近く、波形に関する係数 K は 1 とおく。磁石リングの寸法は両機で共に外径 29.5 mm、厚さ 7.75 mm、軸方向長 15 mm、ギャップの長さは 0.25 mm である。電源は二相、50 Hz で種々の電圧のもとに負荷に対する電流、入力、巻線抵抗を測定し、併せて内部相差角の無負荷時の値からの変化量をストロボ照射して観測する。

定数のうち、励磁リアクタンスは別に算出しておくが、巻線の漏れリアクタンスは本電動機の場合ギャッ

プ漏れ磁束による成分が推定し難いので、サーチコイルの誘起電圧より巻線誘起電圧を求め、この電圧を与える漏れリアクタンスを算出してその概数を求めた。

その結果によれば、本電動機ではギャップ漏れリアクタンスは省略できるようなのである。

上述の測定量と定数より回転子インピーダンスが判明し、これより磁石リングの磁化特性と実効的な厚さが次の順序で求められる。巻線誘起電圧よりギャップ磁束密度が、回転子インピーダンスとその抵抗分とリアクタンス分を (15) 式に代入して、起磁力比 n と相差 α が判明する。これらよりギャップ起磁力、回転子起磁力および磁化力がこの順序で求められるが、算出はそれぞれ (16)、(14) 式および (17) 式による。上述のようにして判明した相差 α と磁化力を (6)～(8) 式に代入して磁路の透磁率と空間相差が与えられ、透磁率より磁石リングの磁束密度が、この磁束密度とギャップ磁束密度より実効的な厚さが (18) 式より算出される。

上述の空間相差は、別に内部相差角の変化量を観測して次記のように算出される。内部相差角は相差 β と印加電圧と巻線誘起電圧間の相差の和、または差として与えられ、第 9 図の場合は内部相差角を δ 、印加電圧 $\dot{V}$ と巻線誘起電圧 $\dot{E}_g$ の相差を ϕ とおくと

$$\delta = \phi - \beta \dots\dots\dots (21)$$

但し、図中の $\dot{B}_{gv}$ は $\dot{V}$ に対応して想定したギャップ磁束密度である。そして、無負荷時に $\beta \approx 0$ であって、無負荷時の電圧間の相差を ϕ_0 とおくと、無負荷時と負荷時の内部相差角の差は

$$\Delta\delta = \phi_0 - \phi + \beta \dots\dots\dots (22)$$

$\phi_0 - \phi$ は上述した計算の過程で求められており、(22) 式より β が判明する。

第 9 図 内部相差角説明図

Fig. 9. Explanatory figure for internal angle.

第 10 図 出力に対する磁気諸量の特性
Fig. 10. Characteristics of magnetic quantities vs. output.

〈4・2〉 検討 動作モードの吟味もあって、種々の電圧のもとで特性を測定する。電圧変化の範囲は 4 極機で 35~55 V, 8 極機で 55~75 V で、これ以下の電圧では負荷運転が難しくなる。上記の電圧範囲で 4 極機はすべてモード I で動作, 8 極機はおよそ 63 V を境として、これ以上の電圧ではモード I, これ以下の電圧ではモード II で動作する。第 10 図は出力に対する磁気諸量の特性であって、(a) 図は 4 極機、(b) 図は 8 極機でモード II の場合である。図示のように磁化力は出力の大きい範囲で、出力増加に伴って増大するが、磁束密度はあまり変わらない。相差 α は出力増加に伴って図示のように増大、あるいは減少し、脱出時に 130° 前後になる。図には巻線起磁力の特性をも示したが、モード I で起磁力の大きいことが分る。

第 11 図はモードの境界の近傍で動作する場合の相差 α の特性であって、負荷が加わると急激に増大、あるいは減少してすみやかに一樣な値に近づく。この

第 11 図 モードの境界近傍における相差 α の特性
Fig. 11. Characteristics of phase angle α at the adjacency of boundary condition of mode.

場合に両モードで電動機特性は近接するはずで、図中 α の大きく異なる領域においても近接した特性となるが、これは次のように説明される。すなわち、この領域では負荷は無負荷に近く、回転子インピーダンスの抵抗分は両モードでほとんど零とおける。また、モードの境界付近で動作するので無負荷に近い状態で回転子起磁力は非常に小さく、起磁力比は $n=0, h=1$ とおかれる。そして、(15)式に明らかのようにリアクタンス分は両モードで x_m に近くなり、回転子インピーダンスは両者でほとんど相等しくなる。

実効的な厚さは、特性の実測値と近似式 (9) 式の各々より算出した値を第 1 表にまとめた。前者は各電圧で求めたその平均の値で、出力は最大出力近傍の出力を 100% としてある。後者は (9) 式の μ_a/μ_i を 4 極機で 1.1, 8 極機で 1.2 とおいてある。表に示されるように実効的な厚さは真の厚さより薄く、8 極機で著しく薄いのが、実測 (鉄粉付着) によれば、磁化は 8 極機で厚さの 1/2, 4 極機では内部まで十分に行なわれている。なお、8 極機では出力によらず一樣な値となっているが 4 極機では出力によって異なり、無負荷時と重負荷時で数 % の差がある。4 極機でこのような理由は明らかではないが、4 極の磁石リングでは磁束はその内部に深く浸透し、前述した非磁性体

第 1 表 実効厚さの計算値

Table 1. Calculated value of effective thickness.

出力 (%)	実効厚さ (mm)		出力 (%)	実効厚さ (mm)		出力 (%)	実効厚さ (mm)	
	4 極機	8 極機		4 極機	8 極機		4 極機	8 極機
0	7.38	4.54	75	7.52	4.54	近似式	7.33	4.40
25	7.39	4.54	100	7.71	4.56			
50	7.49	4.56	平均値	7.50	4.55

第 12 図相差 β の理論値と実験値の比較

Fig. 12. Comparison of theoretical phase angle β with experimental one.

の磁束分布の特性に及ぼす影響が大きく、8 極機に比べて現象は複雑であるといえる。近似式は μ_a/μ_l を上記の値に選んで、実測量より算出した値に近い値を与えるが、これより磁石リングの内部で透磁率は増大する傾向にあることが分る。そして、 μ_a/μ_l をこのように実験的に決定して実効的な厚さの数式による表示が可能となり、出力計算に寄与できる。但し、試料の数も少なく、(9)式を実用するにはなお吟味を要する。

第 12 図は出力に対する空間相差の特性であって、理論値は (8) 式より、実験値は (22) 式より求めた値である。相差 β の小さいことが分る。

5. むすび

回転子磁路をリング状のフェライト磁石で構成した同期電動機を対象として解析を試みたが、判明した事柄を要約すると、

(1) 本電動機におけるトルクの発生は磁石リングに分布する磁化力と磁束密度両者の相差に基づき、一般同期機とは動作機構を異にする。本電動機の場合は負荷時に生ずる磁極中心軸とギャップ磁束中心軸の空間相差は微少である。

(2) 動作は無負荷における巻線起磁力の大きさによって、無負荷時に磁化力と磁束密度の相差が零および 180° なる二つのモードに分けられるが、重負荷時にこの相差は両モードで近接した値に近づく。脱出時にこの相差は 90° を越え、試作機では 130° 前後に達する。

(3) 磁石リングの内部における磁束減衰の効果は無視できず、この効果を磁石リングの厚さに考慮して実効的な厚さを考えるが、この厚さは実験による更正を経て数式による表示が可能である。

付第 1 図 電流の負荷特性のベクトル図
app. Fig. 1. Vector diagrams of load characteristic of current.

上述の解析によって本電動機の動作機構と磁気諸量推移の標模並びに出力の限度の算定法などを明らかにし得たと考える。(昭和 51 年 11 月 25 日受付)

文 献

- (1) 大川・中村: 電学誌 90, 253 (昭 45-11)
- (2) 高橋: 電学誌 89, 231 (昭 44-7)

付 録

(1) 電流の負荷特性に及ぼす一次インピーダンスの影響 本電動機ではギャップ磁束数は磁石材の残留磁束によって大きく支配され、巻線誘起電圧は負荷によらずおよそ一定とおける。このような誘起電圧の特性に対して、負荷変化に伴う電流変化の模様は一次インピーダンスの内容によってそれぞれ次記のようになる。

考察の便宜上、一次インピーダンスが抵抗分のみ、およびリアクタンス分のみで構成される場合をあげる。印加電圧を $\dot{V}$ (一定)、無負荷量に添字 0 を付して巻線誘起電圧を $\dot{E}$ および $\dot{E}_0$ 、一次インピーダンス降下を ΔV および ΔV_0 、電流を $\dot{I}$ および $\dot{I}_0$ とおくと、一次インピーダンスが抵抗分の場合の電圧、電流のベクトル図は付第 1 図 (a) のようになる。 $E \approx E_0$ なる条件に対して、図示のように力率の良い負荷時にインピーダンス降下は小さく ($V < V_0$)、 $I < I_0$ となり負荷時に電流は減少する。(b) 図は一次インピーダンスがリアクタンス分の場合であって、力率の良好なる場合にインピーダンス降下は大きく ($V > V_0$)、 $I > I_0$ となり負荷時に電流は増大する。