UDC 621.313.39.025.1: 621.3.045.53

論文

51-B 24

固定子に非対称三相巻線をもつモノサイクリック電動機について

大阪市立大学 森 下 昂
 大阪市立大学 渡 辺 博 己
 大阪市立大学 奥 田 滋

1. ま え が き

単相電源に移相器として外部インピーダンスを用いて三相電圧に変換し、三相誘導電動機を運転する方式はモノサイクリック電動機と呼ばれ古くから用いられている。この場合、変換される三相電圧は一般に不平衡三相電圧であるため、くま取りコイル電動機やコンデンサモータなどの他の単相誘導電動機と同様に交番トルクを発生し振動や騒音の原因となる⁽¹⁾。

モノサイクリック電動機の外部インピーダンスとしては、コンデンサリアクタンスコイルなどが用いられている。電動機として対称巻線を施した通常の三相誘導電動機を用いる場合には、インピーダンス1個のみを用いると移相器の構成は簡単であるが、平衡三相電圧を得ることが困難で、一般には平衡運転を行なうことができない⁽²⁾。インピーダンスを2個用いて移相器を構成し、希望のすべりに応じてそれらの大きさを定めると、そのすべりで平衡運転を行なうことができるが、インピーダンスを2個必要とするため移相器の構成が複雑になる^{(3)~(5)}。

本文は移相器を1個のコンデンサのみで構成し、インピーダンスを2個用いた場合と同じ効果をもたせるために固定子巻線を非対称にして、希望のすべりに応じて平衡運転を行なうようにした振動や騒音の少ないモノサイクリック電動機について述べたものである。

すなわち、三相誘導電動機の1相の巻数を他の2相の巻数と異なる巻数にし、その巻数比とコンデンサ容量とを希望のすべりに応じて定められる値に選ぶと、そのすべりに応じて平衡運転を行なうことができる。非対称巻線をもつ三相誘導電動機の実験結果について報告はあるが^{(6),(7)}、平衡運転の詳しい解析はまだ十分に行なわれていない。このような電動機の取り扱いはその算式が極めて複雑なため、本文では諸特性の計算に適当な近似式を用いた。また、始動特性について検討し、平衡運転の場合とあわせて実験によって確かめた。なお、本文で対象とする電動機は広く用いられている極数2~6、定格出力0.2k~15kWの低圧カゴ形誘導電動機である。

2. 移相器の構成

第1図はモノサイクリック電動機の固定子側接続図を示したもので、 $\dot{Z}_a, \dot{Z}_b$ は外部インピーダンスを表わしている。 $\dot{Z}_a, \dot{Z}_b$ にはコンデンサ、リアクタンスコイル、抵抗などを用いることができるが、抵抗を用いる場合には電力損失を生じる欠点がある。したがって、

第1図 モノサイクリック電動機の固定子側接続図

Fig. 1. Primary connection of a monocyclic motor.

Analysis of Monocyclic Motors with Asymmetrical 3-phase Stator Windings. By Takashi Morishita, Member, Hiroshi Watanabe, Member & Shigeru Okuda, Member (Department of Electrical Engineering of Osaka City University)

森下 昂: 正員, 大阪市立大学工学部電気工学科
 渡辺博己: 正員, 大阪市立大学工学部電気工学科
 奥田 滋: 正員, 大阪市立大学工学部電気工学科

実用上コンデンサリアクタンスコイルを用いることが望ましく、本文もこのような場合を考察の対象とする。

単相誘導電動機では変換される電圧が平衡電圧となる条件、すなわち、電動機が平衡運転を行なう条件（本論文では平衡条件と呼ぶ）を電動機の運転特性の良否を判断する一つの目安と考えることができる。固定子を通常の三相対称巻線とした電動機を用いる従来の方式のモノサイクリック電動機では、電動機の正相インピーダンスの位相角 φ_1 が 60° の時にのみ、コンデンサ 1 個による平衡運転が可能になる⁽¹⁾⁽²⁾。 $\varphi_1 \neq 60^\circ$ の場合は $\dot{Z}_a$ にコンデンサを用いると、 $\dot{Z}_b$ としてリアクタンスコイルまたはコンデンサを新たに接続しなければ平衡条件が得られない^{(3)~(5)}。 φ_1 は電動機の種類によって変わるが、通常の三相誘導電動機では定格運転時には $\varphi_1 < 60^\circ$ であるので、移相器にコンデンサとリアクタンスコイルが必要になる⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし本文で述べるように電動機に非対称三相誘導電動機を用いると $\varphi_1 \neq 60^\circ$ の場合においてもコンデンサ 1 個による平衡運転が行なえる。すなわち、第 1 図に示す結線で A 相巻線、B 相巻線、C 相巻線の実効巻数比をそれぞれ W_A, W_B, W_C とし、 $\beta = W_A/W_C$ ($W_A = W_B$) として β の値を電動機のすべりによって定まる φ_1 の値に応じて適当な値に選ぶと、 $\dot{Z}_b$ にコンデンサを用いるだけで対称巻線の場合と同様の平衡条件が得られる⁽¹²⁾。

3. モノサイクリック電動機の一般式

電動機の電圧・電流および外部インピーダンス $\dot{Z}_a, \dot{Z}_b$ の電流を第 1 図のようにとり、電源電圧を $\dot{V}$ とすると次式が導びける。

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C &= 0 \\ \dot{V}_A - \dot{V}_B &= \dot{V} \\ \dot{V}_A - \dot{V}_C + \dot{Y}_a/\dot{Y}_a \cdot (\dot{V}_B - \dot{V}_C) - \dot{I}_C/\dot{Y}_b &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\dot{Y}_a, \dot{Y}_b$ は $\dot{Z}_a, \dot{Z}_b$ のアドミッタンスである。電動機の固定子が非対称巻線である場合には電動機の相電流、相電圧の対称分を実効巻数比を考慮した巻線対称軸で定義すると算式が簡単になる⁽⁶⁾。第 1 図の電動機の相電圧、相電流を対称分で表わすとそれぞれ次のようになる。

$$\left(\begin{array}{c} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{array} \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ \beta & \alpha\beta & \alpha^2\beta \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{array} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\left(\begin{array}{c} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{array} \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1/\beta & \alpha/\beta & \alpha^2/\beta \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{array} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$: $\dot{I}_A$ の零相、正相、逆相分電流、 $\dot{V}_0, \dot{V}_1, \dot{V}_2$: $\dot{V}_A$ の零相、正相、逆相分電圧、 $\alpha = e^{j120^\circ}$

である。

固定子各相の導体の断面積が実効巻数比に逆比例している電動機を用いると、電圧と電流の対称分の間に次の関係が成立する。

$$\left(\begin{array}{c} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc} \dot{Y}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Y}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Y}_2 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{array} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\dot{Y}_0, \dot{Y}_1, \dot{Y}_2$: それぞれ電動機の零相、

正相、逆相分アドミッタンス

である。

(2)~(4) 式を (1) 式に代入して、対称分電圧 $\dot{V}_0, \dot{V}_1, \dot{V}_2$ を求めると、

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \varepsilon^{j30^\circ}/\Delta \cdot \dot{V} \{ (\beta-1) \{ [\alpha(\beta-\alpha)\dot{Y}_a \\ &\quad + \alpha^2(\beta\alpha-1)\dot{Y}_b]\dot{Y}_2 - [(\beta-\alpha^2)\dot{Y}_a \\ &\quad + \alpha(\beta-\alpha)\dot{Y}_b]\dot{Y}_1 \} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \varepsilon^{j150^\circ}/\Delta \cdot \dot{V} \{ (\beta+2)[(\beta\alpha-1)\dot{Y}_a \\ &\quad + (\beta\alpha^2-1)\dot{Y}_b]\dot{Y}_0 - [(\beta-1)^2(\dot{Y}_a \\ &\quad + \dot{Y}_b) + 3\beta^2\dot{Y}_0]\dot{Y}_2 \} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \varepsilon^{j30^\circ}/\Delta \cdot \dot{V} \{ (\beta+2)[(1-\beta\alpha^2)\dot{Y}_a \\ &\quad + (\beta\alpha-1)\dot{Y}_b]\dot{Y}_0 + [(\beta-1)^2(\dot{Y}_a \\ &\quad + \dot{Y}_b) + 3\beta^2\dot{Y}_0]\dot{Y}_1 \} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Delta &= (\beta+2)^2\dot{Y}_0(\dot{Y}_a + \dot{Y}_b) + [3\beta^2\dot{Y}_0 \\ &\quad + (\beta-1)^2(\dot{Y}_a + \dot{Y}_b)](\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2) \end{aligned}$$

である。(4) 式より電動機の対称分電流 $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ が求まる。なお、本文では電動機の電圧・電流式の算出およびトルクの計算に際して鉄損や磁気飽和の影響を無視し、空けき中の磁束分布は正弦波状であると仮定した。

零相分電流 $\dot{I}_0$ は (5) 式より $\beta \neq 1$ 、すなわち、固定子が非対称巻線の場合にのみ生じることがわかる。起磁力の空間高調波を考慮に入れないかぎり零相分電流は電動機の発生トルクに寄与しないので⁽⁸⁾⁽⁹⁾、第 2 図 (a) のように零相分回路を表わすことができる⁽¹⁰⁾。同図 (b), (c) はそれぞれ正相、逆相分回路である。ここで、 $\dot{Z}_0 = 1/\dot{Y}_0, \dot{Z}_1 = 1/\dot{Y}_1, \dot{Z}_2 = 1/\dot{Y}_2$ である。

第 3 図は実験に用いたモノサイクリック電動機の 3 種類の結線方式を表わしたもので、(a) 図は固定子が非対称三相巻線である場合、(b), (c) 図は対称三相巻線である場合を示す。すでに求めた諸式で $\beta = 1$ とおくと、(b), (c) 図の結線方式の電圧・電流式が導ける。対称分電圧は (5)~(7) 式より、

(a) 零相分回路

(b) 正相分回路

(c) 逆相分回路

第 2 図 零相、正相、逆相分に対する等価回路
Fig. 2. Equivalent circuits of a 3-phase induction motor for zero-, positive and negative sequence components.

(a) 非対称巻線

(b) 対称巻線

(c) 対称巻線

第 3 図 モノサイクリック電動機の結線方式
Fig. 3. Various primary connections of a monocyclic-motor.

$$\dot{V}_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V} \varepsilon^{-j30^\circ} \frac{\sqrt{3}(\dot{Y}_a \varepsilon^{-j30^\circ} + \dot{Y}_b \varepsilon^{j30^\circ}) + \dot{Y}_2}{3(\dot{Y}_a + \dot{Y}_b) + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{V} \varepsilon^{j30^\circ} \frac{\sqrt{3}(\dot{Y}_a \varepsilon^{j30^\circ} + \dot{Y}_b \varepsilon^{-j30^\circ}) + \dot{Y}_1}{3(\dot{Y}_a + \dot{Y}_b) + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

移相器に $\dot{Z}_0$ のみを用いる第 3 図(b)の結線では $\dot{Y}_b = 0$ とすればよい。(8)~(10)式を用いると非対称巻線の場合と同様にして電流、トルク等が計算できる。

非対称三相誘導電動機を用いたモノサイクリック電動機の発生トルクは(6),(7)式を基にして求めることができる。しかし、その算式は複雑であり、適当な近似式を用いないと、平衡条件や起動特性等の解析的検討は難しい。本章では次に非対称電動機を用いた第 3 図(a)の結線の場合について対称分電圧の近似式を導びく。

(5)~(7)式で $\dot{Y}_b = 0$ とし、零相分アドミタンス $\dot{Y}_0$ と外部アドミッタンス $\dot{Y}_a$ との間に

$$3\beta^2 |\dot{Y}_0| \gg (\beta - 1)^2 |\dot{Y}_a| \quad \dots\dots\dots (11)$$

成立するとすると、対称分電圧は次に示す近似式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \dot{V}_0' &= \varepsilon^{j30^\circ} \dot{V} \frac{(\beta - 1) \dot{Y}_a}{\dot{Y}_0} \\ &\times \frac{\alpha(\beta - \alpha) \dot{Y}_2 - (\beta - \alpha^2) \dot{Y}_1}{(\beta + 2)^2 \dot{Y}_a + 3\beta^2 (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2)} \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1' &= \varepsilon^{j150^\circ} \dot{V} \frac{(\beta + 2)(\beta\alpha - 1) \dot{Y}_a - 3\beta^2 \dot{Y}_2}{(\beta + 2)^2 \dot{Y}_a + 3\beta^2 (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2)} \\ &\dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2' &= \varepsilon^{j30^\circ} \dot{V} \frac{(\beta + 2)(1 - \beta\alpha^2) \dot{Y}_a + 3\beta^2 \dot{Y}_1}{(\beta + 2)^2 \dot{Y}_a + 3\beta^2 (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2)} \\ &\dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

電動機の平衡運転や良好な始動特性が得られる外部アドミッタンスの大きさは一般に β の関数となるが、(11)式が成立する β の範囲について第 4 章と第 5 章で $|\dot{V}_a'|$ と β との関係を明らかにした後検討する。

次に(12)~(14)式の近似式について考察する。(11)式の不等式を考慮すると、実験でも確めたが $|\dot{V}_0'|$ は $|\dot{V}_1'|$, $|\dot{V}_2'|$ に比べてかなり小さくなるので、ここでは簡単のため $\dot{V}_0' \approx 0$ とする。この時 $\dot{V}_2' = 0$ であると電動機が平衡運転を行なうと考えることができる。(14)式より $\dot{V}_2' = 0$ になる条件を(13)式に代入すると $\dot{V}_1' = \dot{V} \varepsilon^{-j30^\circ}$ となる(第 4 章参照)。この関係は三相誘導電動機に線間電圧がちやうど電源電圧 $\dot{V}$ である三相対称電圧を印加した時と同一のものである。また、

$\beta=1$ の時 $\dot{V}_0'=0$ で, $\dot{V}_1', \dot{V}_2'$ は (9), (10) 式で $\dot{Y}_0=0$ とした式と等しくなる。

4. 平衡運転条件

第3図(a)の結線で運転される非対称三相誘導電動機を用いたモノサイクリック電動機は(14)式の $\dot{V}_2'=0$ の時はほぼ完全な平衡運転を行なう。(14)式の $\dot{V}_2'=0$ より

$$(\beta+2)(1-\beta\alpha^2)\dot{Y}_a+3\beta^2\dot{Y}_1=0 \quad (15)$$

$\dot{Z}_a$ の位相角を γ_a , $\dot{Z}_1$ の位相角を φ_1 , 平衡条件を満足する $|\dot{Y}_a|$ と $|\dot{Y}_1|$ との比を x_b とすると, 平衡条件は

$$\left. \begin{aligned} x_b &= \frac{1}{\sqrt{1+\beta+\beta^2}} \cdot \frac{3\beta^2}{\beta+2} \\ \varphi_1 &= 180^\circ + \gamma_a - \delta \\ \text{ただし,} \\ \delta &= \tan^{-1}[\sqrt{3}\beta/(2+\beta)] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

となる。

なお, (15) 式より $3\beta^2\dot{Y}_1$ を求め, (13) 式に代入すると

$$\dot{V}_1' = \varepsilon^{j150^\circ} \dot{V} \frac{(\beta+2)(\beta\alpha-1)\dot{Y}_a - 3\beta^2\dot{Y}_2}{(\beta+2)(\beta+1+\beta\alpha^2)\dot{Y}_a + 3\beta^2\dot{Y}_2}$$

上式の分母に $1+\alpha+\alpha^2=0$ なる関係を用いると

$$\dot{V}_1' = -\varepsilon^{j150^\circ} \dot{V} = \varepsilon^{-j30^\circ} \dot{V} \quad (17)$$

第4図は $\dot{Y}_a$ にコンデンサ ($\gamma_a = -90^\circ$) を用いた場合の平衡条件を満足する φ_1 と x_b, β との関係を示したものである。(16) 式より $\delta=60^\circ$ で $\beta \rightarrow \infty$ となり, かつ $\delta > 60^\circ$ では必要な β の値は負となるのでこの結線法の場合 $\varphi_1 \leq 30^\circ$ の範囲では理論上平衡運転が行えない。しかし, 三相かご形誘導電動機の定格速度付近の力率 $\cos \varphi_1$ は多くの場合 $0.5 < \cos \varphi_1 < 0.8$, すなわち, $37^\circ < \varphi_1 < 60^\circ$ であるので⁽¹¹⁾, $\beta > 1$ とすれば外部インピーダンスにコンデンサを1個用いるのみで平衡運転が行なえる。

第4図 平衡条件を満足する φ_1 と β, x_b の関係

Fig. 4. Relations between φ_1 , and β, x_b , which satisfy balanced operating condition at a monocyclic motor.

次に $\dot{Y}_a$ に平衡条件を満足するコンデンサを用いた場合, (11) 式が適用できる β の範囲について検討する。 $K_b = 3\beta^2|\dot{Y}_0|/(\beta-1)^2|\dot{Y}_a|$ とすると, $K_b \gg 1$ なる時(11)式が成立する。 $|\dot{Y}_a| = x_b|\dot{Y}_1| = x_b|\dot{Z}_1|$ なる関係を用いると, K_b は次式で表わされる。

$$K_b = \frac{3\beta^2|\dot{Y}_0|}{(\beta-1)^2|\dot{Y}_a|} = \frac{3\beta^2}{(\beta-1)^2 x_b} \cdot \frac{|\dot{Z}_1|}{|\dot{Z}_0|} \quad (18)$$

$|\dot{Z}_1|$ を電動機の始動時のインピーダンスとすると, 一般に1次側に換算した2次インピーダンスが1次インピーダンスにほぼ等しいので, $|\dot{Z}_0| \approx 1/2|\dot{Z}_1|$ と仮定できる。この関係と(16)式の x_b を(18)式に代入すると,

$$K_b = \frac{2(\beta+2) \cdot \sqrt{1+\beta+\beta^2}}{(\beta-1)^2} \cdot \frac{|\dot{Z}_1|}{|\dot{Z}_s|} \quad (19)$$

K_b は $\beta=1$ で無限大となるが, $\beta < 1$ および $\beta > 1$ の領域では, それぞれ β の単調増加, 単調減少関数となる。すでに述べたように $37^\circ < \varphi_1 < 60^\circ$ であるので, 電動機に平衡運転を行なわせるのに必要な β は(16)式より $1 < \beta < 6.5$ となり, K_b が最も小さな値となる $\beta = 6.5$ に対して, (19) 式より $K_b \approx 4|\dot{Z}_1|/|\dot{Z}_s|$ となる。定格速度付近での $|\dot{Z}_1|$ の値はかご形回転子では $|\dot{Z}_s|$ の4~7倍程度であるので, $1 < \beta < 6.5$ の範囲で $K_b > 16$ となる。なお, 第6章で述べる実験に用いた電動機 ($\beta=2$) では $0 < s < 1$ の範囲で $28 < K_b < 120$ となり, 近似を行なわない対称分電圧 $\dot{V}_1, \dot{V}_2$ と近似を行なって求めた $\dot{V}_1', \dot{V}_2'$ との差は V_1, V_2 の1%以下になる(第7図参照)。以上より平衡条件を満足する β と, コンデンサ容量とを用いる場合には電動機の特性和平衡運転条件などを(12)~(15)式を用いて十分な精度で計算できることがわかる。

固定子が対称巻線である第3図(b), (c)の結線法の平衡条件について詳しい研究があるので⁽²⁾⁽³⁾, ここではその結果だけを要約して示す。(b)図の結線では(16)式で $\beta=1$ とすればよい。このとき $\delta=30^\circ$ となる。したがって

$$x_b = 1/\sqrt{3}, \quad \varphi_1 = 150^\circ + \gamma_a \quad (20)$$

次に, (c) 図の結線の平衡条件は(10) 式の $\dot{V}_2=0$ より定まり

$$\left. \begin{aligned} x_b &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+y+y^2}}, \quad \varphi_1 = 60^\circ \mp \theta \\ \theta &= \tan^{-1}[\sqrt{3}y/(2+y)] \quad (\text{複号同順}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

ここで, $y = |\dot{Y}_b|/|\dot{Y}_a|$, +符号は $\varphi_1 \geq 60^\circ$ の場合($\dot{Y}_a, \dot{Y}_b$ ともコンデンサを用いる), -符号は $\varphi_1 \leq 60^\circ$ の場

合 ($\dot{Y}_a$ にコンデンサ, $\dot{Y}_b$ にリアクタンスコイルを用いる) に相当する。

以上は固定子が対称巻線である電動機を用いた場合の平衡条件である。電動機に非対称三相電動機を用いる場合はその巻数比 β とコンデンサ容量を φ_1 の値に応じて適当に定めると, $\varphi_1 \neq 60^\circ$ の時でも平衡運転が行なえる。しかし, 電動機に対称三相電動機を用いると, 一般に $\varphi_1 < 60^\circ$ であるので, (c) 図の結線では実際上 $\dot{Y}_b$ にリアクタンスコイルが必要になり, 移相器の構成が複雑になる。また, (b) 図は他の結線法に比べ巻線構造や移相器の構成が簡単であり実用的な方法であるが, この結線で電動機を運転すると $\varphi_1 < 60^\circ$ である通常の誘導電動機に対してはどのようなコンデンサを用いても平衡条件は満足されず電動機は不平衡な運転を行なう。したがって, この場合には運転用のコンデンサの選択に際して, 何等かの別の設計基準が必要になる。

単相誘導電動機においては, 定格速度付近における電動機の振動トルクの振幅 T_P と平均トルク T_A との比 T_P/T_A を電動機の運転特性の良否を判断する一つの基準と考えることができる。したがって, この場合には運転用のコンデンサとして T_P/T_A を最小にするコンデンサを用いる。このコンデンサ容量の計算法についてこはれまで報告例がないので, ここではその計算法について少し詳しく述べる。

第2図(b), (c)の励磁リアクタンスを含む回転子回路の等価抵抗を R_f, R_b とすると T_A, T_P は

$$\left. \begin{aligned} T_A &= |\dot{Y}_1 \dot{V}_1|^2 R_f - |\dot{Y}_2 \dot{V}_2|^2 R_b \\ T_P &= |\dot{Y}_1 \dot{V}_1| \cdot |\dot{Y}_2 \dot{V}_2| \cdot |\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2| \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

で表わされる⁽¹⁵⁾。電流の不平衡率を U とすると, $U = |\dot{Y}_2 \dot{V}_2| / |\dot{Y}_1 \dot{V}_1|$ であるので, (22) 式に U を代入すると T_P/T_A は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{T_P}{T_A} &= \frac{|\dot{Y}_1 \dot{V}_1| \cdot |\dot{Y}_2 \dot{V}_2| \cdot |\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2|}{|\dot{Y}_1 \dot{V}_1|^2 R_f - |\dot{Y}_2 \dot{V}_2|^2 R_b} \\ &= \frac{|\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2|}{R_f} \cdot \frac{U}{1 - U^2 R_b/R_f} \dots (23) \end{aligned}$$

(23) 式で U 以外は電動機によって定まる定数であるので, T_P/T_A は U のみの関数となり, その値は U の増加につれて大きくなる。(9), (10) 式より $\dot{Y}_b = 0$ として U^2 を求めると,

$$\begin{aligned} U^2 &= \frac{|\dot{Y}_2|^2}{|\dot{Y}_1|^2} \cdot \frac{x_u^2}{|\dot{Y}_2|^2 |\dot{Y}_1|^2 x_u^2} \\ &\quad \cdot \frac{-a x_u + 3}{+b \cdot |\dot{Y}_2| / |\dot{Y}_1| x_u + 3} \dots (24) \end{aligned}$$

ここで, $x_u = |\dot{Y}_a| / |\dot{Y}_1|$, $a = 2\sqrt{3} \sin(\varphi_1 + 30^\circ)$, $b = 2\sqrt{3} \sin(\varphi_2 + 150^\circ)$, φ_2 は $\dot{Z}_2$ の位相角である。電動機

の運転速度に応じて $|\dot{Y}_2| / |\dot{Y}_1|$, a, b の値が定まるので, (24) 式より U を最小にする x_u の値, すなわちある速度において T_P/T_A を最小にするコンデンサ容量が求まる。この詳細な計算式については紙面の都合上省略する。

5. 始動トルク特性

本章では始動トルクを最大にする β と, コンデンサ容量の関係について述べる。第3図の結線で電動機を運転する場合, 一般に始動特性を良好にするように定めた移相器や巻数比 β (たとえば始動時に平衡条件を満足するように選んだ値) では運転時の平衡条件は満足されない。第3図(a)の結線で電動機を運転する場合には, 運転時の効率を考慮すると β の値は電動機の定格速度付近のすべりで平衡運転が行なえるように定めることが望ましい。したがって, 始動特性の検討に際しては, β の値は第4章で述べた電動機の運転時の平衡条件よりすでに定まっていると考え, 本章では与えられた β の値に対してどのような容量のコンデンサを用いるかについて検討する。

起動時においては $\dot{Y}_1 = \dot{Y}_2 = \dot{Y}$ である。この関係を (13), (14) 式に代入すると

$$\dot{V}_1' = e^{j150^\circ} \dot{V} \frac{(\beta+2)(\beta\alpha-1)\dot{Y}_a - 3\beta^2\dot{Y}_s}{(\beta+2)^2\dot{Y}_a + 6\beta^2\dot{Y}_s} \dots (25)$$

$$\dot{V}_2' = e^{j30^\circ} \dot{V} \frac{(\beta+2)(1-\beta\alpha^2)\dot{Y}_a + 3\beta^2\dot{Y}_s}{(\beta+2)^2\dot{Y}_a + 6\beta^2\dot{Y}_s} \dots (26)$$

固定子に非対称巻線を施したモノサイクリック電動機の始動トルク T_s を, 同じ電動機に三相対称巻線を施して三相平衡電圧を印加した時の始動トルク T_b との比で表わすと

$$\begin{aligned} T_s/T_b &= (|\dot{V}_1|^2 - |\dot{V}_2|^2) / |\dot{V}|^2 \\ &\simeq (|\dot{V}_1|^2 - |\dot{V}_2|^2) / |\dot{V}|^2 \dots (27) \end{aligned}$$

(25), (26) 式を (27) 式に代入し, $x_s = |\dot{Y}_a| / |\dot{Y}_s|$, $\theta = \varphi_s - \gamma_a$ とおくと T_s/T_b は

$$\begin{aligned} \frac{T_s}{T_b} &\simeq \frac{6\sqrt{3}\beta^3(\beta+2)x_s \sin \theta}{(\beta+2)^4 x_s^2 + 12\beta^2(\beta+2)^2 x_s \cos \theta + 36\beta^4} \\ &\dots (28) \end{aligned}$$

ここで, φ_s は φ_1 の始動時の値である。 $\dot{Y}_a$ にコンデンサを用いる場合は $\gamma_a = -90^\circ$ とすればよい。 β, φ_s を一定とし, 始動トルクを最大にする x_s を x_{sM} とすると, x_{sM} は (28) 式を x_s について偏微分することにより求まる。コンデンサを用いる $\gamma_a = -90^\circ$ の場合は $\sin \theta > 0$ であるので, $x_{sM} = 6\beta^2 / (\beta+2)^2$ の時 T_s/T_b は最大値をとる。この x_{sM} を (28) 式に代入する

と T_s/T_{bs} の最大値 $\langle T_s/T_{bs} \rangle_{\max}$ は

$$\langle T_s/T_{bs} \rangle_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\beta}{\beta+2} \cdot \frac{\cos \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \dots (29)$$

となる。

最大始動トルクの値は β, φ_s が増加するにつれて大きくなるのがわかる。電動機の固定子が対称巻線である第3図(b)の結線方式の場合は前記の関係で $\beta=1$ とすればよい。第3図(a)と(b)の方式の最大始動トルクを与えるコンデンサ容量の比は $9\beta^2/(\beta+2)^2$ 、始動トルクの比は $3\beta/(\beta+2)$ となる。したがって、 $\beta>1$ とすると $\beta=1$ の場合より始動トルクは大きくなるが、必要なコンデンサ容量も大きくなる。

以上より β の値に応じて始動トルクを最大にするコンデンサ容量および最大始動トルクを計算することができる。ただし、トルクの計算に近似式を用いているので、電動機が実際に発生するトルクは $\beta \neq 1$ のとき(28)式で示される値よりいくぶん小さくなる。

次に、第4章と同様の方法により、最大始動トルクを与えるコンデンサを用いた場合の(11)式が成立する β の範囲について考察する。(18)式の K_b の式で x_b を x_{sM} で置き代えた値を K_s とすると、 K_s は

$$K_s = \frac{3\beta^2 |\dot{Y}_0|}{(\beta-1)^2 |\dot{Y}_a|} = \frac{3\beta^2}{(\beta-1)^2 x_{sM}} \cdot \frac{|\dot{Z}_s|}{|\dot{Z}_0|} \quad (31)$$

$|\dot{Z}_0| \approx 1/2 |\dot{Z}_s|$, $x_{sM} = 6\beta^2/(\beta+2)^2$ を代入すると、

第5図は K_s と β との関係(31)式より計算して示したもので、点線は(19)式より $K_b = K_b' \cdot |\dot{Z}_1|/|\dot{Z}_s|$ として求めた K_b' を表わしている。 K_s, K_b' は β のみによって定まるが、 K_b は K_b' と $|\dot{Z}_1|/|\dot{Z}_s|$ の積であるので、すべりの減少とともに大きくなり、定格速度付近のすべりでは $K_b = 4K_b' \sim 7K_b'$ となる。図より $K_s < K_b'$ であるので、最大始動トルクを生じるコンデンサを用いる場合は平衡条件を満足するコンデンサを

第5図 K_s, K_b' と β との関係

Fig. 5. Relations between K_s, K_b' and β .

用いる場合より近似式の精度が悪くなる。

6. 実験結果

実験に用いた電動機は 200W, 100/200V, 2.5/1.25A の標準的な設計がなされた三相かご形誘導電動機である。各相コイルの巻き始め、巻き終わり端子をすべて外部に取り出しているので、 $\beta=0.5, 1, 2$ の三種類の運転が行なえる。A 相巻線または B 相巻線一相あたりの等価回路常数の値を第1表に示す。

まず、第4章、第5章で導いた結果を供試電動機に実際に適用して移相用外部インピーダンスを決定し電動機のトルク特性の実測により本文で述べた計算法の妥当性を実験によって確認した。次に同一の電動機を固定子が三相対称巻線である従来のモノサイクリック電動機の結線とし、その外部インピーダンスを非対称巻線の場合と同じ条件で設計し、これらの速度-トルク特性を非対称巻線電動機の場合と比較検討した。

なお、便宜上電動機を第3図(a)の結線で運転した場合を方式-I (非対称巻線)、(b)図の場合を方式-II (c)図の場合を方式-II' (II, II' と対称巻線)と称することにする。

第6図は電動機を方式-I で運転し、 $\beta=2$ として、供試電動機の定格速度である $s=0.05$ で平衡条件を満足するようにコンデンサ容量を選んだ場合のトルク-

第1表 供試電動機の仕様と等価回路定数

Table 1. Specification and equivalent-circuit constants of the tested motor.

一次抵抗	r_1	4.41 Ω	定格電圧	100/200V
一次漏れリアクタンス	X_1	1.72	定格電流	2.5/1.25A
励磁リアクタンス	X_m	26.3	定格出力	200W
二次抵抗	r_2	1.73	定格回転数	1,710 rpm
二次漏れリアクタンス	X_2	1.72		

定数は 100V 結線時の値、二次側諸量は一次換算値
周波数: 60 Hz

第6図 トルク-速度特性

Fig. 6. Torque-speed characteristic curves for the tested motor.

速度特性を示したもので、近似計算の他に(5)~(7)式を用いて正確に計算(厳密計算値)したが、その両者がほとんど一致するので、一本の実線で表わしている。この場合の対称分電圧を第7図に示した。 $s=0.05$ では逆相電圧は0となり、零相電圧はすべりの全範囲で正相電圧の5%以下の大きさとなる。

第8図に $\beta=0.5, 1, 2$ の場合の始動トルクと三相平衡電圧を印加した時の始動トルクとの比の計算値と実測値を示した。始動トルクを最大にする x_s の値 x_{sM} は $6\beta^2/(\beta+2)^2$ であるので、 $\beta=0.5, 1, 2$ に対する x_{sM} の計算値はそれぞれ 0.24, 0.67, 1.5 となり実測結果とよく一致している。なお供試機の場合(29)式の φ_s は 30 度である。第9図に対称分電圧の厳密計算値と近似計算値を示した。

次に三種類の運転法に対する外部インピーダンスを決めるための計算手順を述べる。

方式-I: 供試機ではすべり $s=0.05$ において正相インピーダンスを計算すると $\dot{Z}_1=24.2\angle 49^\circ$ となる。第4図より $\beta=2$, $x_b=1.13$ とすると、前記のすべりでこの電動機はほぼ平衡運転を行なうことがわかる。次に $\beta=2$ に対して最大始動トルクを与える x_s , すなわち x_{sM} は 1.5 となる。このとき始動トルクは方式-

第7図 対称分電圧の計算値

Fig. 7. Approximatly and precisely calculated values for sequence components of voltage.

第8図 始動トルクとコンデンサ容量との関係

Fig. 8. Relations between starting torque and capacity of phase convertor.

第9図 対称分電圧とコンデンサ容量の関係

Fig. 9. Relations between sequence components of voltage and capacity of phase converter.

IIの最大始動トルクの1.5倍となる。なお、供試機の始動インピーダンスは $\dot{Z}_s=6.85\angle 30^\circ$ である。始動コンデンサ、運転コンデンサの容量をそれぞれ C_s, C_r とすると、供試機では前記 x_{sM}, x_b の値に応じて $C_s=580\mu\text{F}$, $C_r=124\mu\text{F}$ となる。

方式-II: この結線法では $s=0.05$ で平衡条件を満たすコンデンサ容量は存在しない。したがって、ここでは T_F/T_A を最小にするコンデンサを運転コンデンサとして用いる。供試機について(24)式を計算すると T_F/T_A を最小にするコンデンサ容量は $C_r=63\mu\text{F}$, この時 $U=0.2$, $T_F/T_A=0.31$ となる。次に始動時の x_{sM} は $2/3$ となり、 $C_s=258\mu\text{F}$ である。

方式-II': $s=0.05$ で $\varphi_1<60^\circ$ もあるので、コンデンサおよびリアクタンスコイルを用いないと、平衡条件が実現できない。(21)式で $\varphi_1=49^\circ$ とすると、 $y=0.73$, $x_b=0.64$ となる。したがって、運転用のコンデンサは $C_r=70\mu\text{F}$, インダクタンス $L=0.5H$ となる。始動時にもこのリアクタンスをそのまま用いるとすると、始動トルクを最大にするコンデンサ容量が、 $y, |\dot{Z}_s|$ および電動機の平衡運転時のインピーダンス $|\dot{Z}_1|$ より定まる⁽¹³⁾。供試機では $C_s=258\mu\text{F}$ となった。なお、始動コンデンサを種々変えて始動トルクを実測したが、やはり $C_s=258\mu\text{F}$ で始動トルクが最大となった。

このようにして決定した移相器を用いて供試機を運転し、そのトルク-速度特性を実測した。第10図は、X-Yレコーダを用いて測定したトルク-速度特性を表わしたもので、 $s=0.3$ でコンデンサが起動用から運転用に切り換る。また、運転用コンデンサを用いた場合の振動トルク-速度特性を伝達形トルク計で測定し、その結果を第11図に示した。測定値はトルク計の定

第 10 図 各方式のトルク-速度特性

Fig. 10. Torque-speed characteristic curves for the monocyclic-motors with various primary connections.

第 11 図 振動トルクの特 性

Fig. 11. Pulsating torque-speed characteristic curves for the monocyclic-motors with various primary connections.

数や負荷の慣性モーメントの大きさによって変化するが⁽¹⁴⁾、この場合はいずれも同一のトルク計と負荷を用いているのでその結果を単位法で表わした。第 10 図、第 11 図に示した単相運転の実測結果は第 3 図(b)の結線で $\dot{Z}_a \rightarrow \infty$, すなわち $\dot{Y}_a = 0$ として供試電動機を A 相巻線, B 相巻線だけの純単相の結線で運転して測定したものである。

7. あとがき

以上の結果を要約すると

(1) 固定子を非対称巻線とし(方式-I), その巻数比 β とコンデンサ容量を運転速度に応じて平衡条件

を満足する値に選び, さらに始動コンデンサを適当な値に選ぶと, 対称巻線の運転方式(方式-II)に比べて始動時・運転時ともトルク特性が改善できる。

(2) 運転時においては, 方式-I と方式-II' とはほぼ類似のトルク特性となる。しかし, 方式-II' の場合電動機の励磁インダクタンスの約 7 倍の大きさインダクタンスをもつリアクタンスコイルがコンデンサの他に必要になる。

(3) 方式-II では $s=0.05$ において電動機の平衡運転が行えない。しかし, 第 4 章で述べた計算法より求めた容量のコンデンサを用いると, 純単相運転に比べて振動トルクは小さくなり, トルク特性が改善できる。

(4) 振動トルク-速度特性においても方式-I と方式-II' とはほぼ類似の特性となり, $s=0.05$ で振動トルクの大きさはほとんど 0 になる。したがって, このすべりで平衡条件が満足され, 電動機が平衡運転を行っていることがわかる。

移相用外部インピーダンスにコンデンサのみを用いる運転方式においては, 固定子巻線を非対称巻線とし(方式-I), その巻数比 β とコンデンサ容量を本論文で述べた方法で適当な値に選ぶと, 通常の三相誘導電動機を用いる従来の方法(方式-II)に比べて, 始動時・運転時ともに電動機のトルク特性が改善できることを示した。

本文では Y 結線の電動機について述べたが, 対称巻線をもつ電動機で Δ 結線の場合は外部アドミタンスを $\dot{Y}_{\Delta a} = 3\dot{Y}_a, \dot{Y}_{\Delta b} = 3\dot{Y}_b$ とすれば Y 結線の電動機と同じ結果が得られる⁽²⁾。しかし $\beta \neq 1$ の非対称巻線の場合はこのような簡単な関係は得られず, この結線方式についての詳細は別の機会に報告したい。

(昭和 50 年 1 月 6 日受付, 同 50 年 10 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 西山: 電学誌 84, 89 (昭 39-1)
- (2) J.E. Brown & C.S. Jha: Proc Inst. Elect. Engrs 106, 26, 183 (1959)
- (3) F. Sauerland & P. Vaske: Elektrotech. Z.(ETZ-A), 80, 133 (1959)
- (4) 西山: 電学誌 90, 1970 (昭 45-10)
- (5) 入佐: 電学誌 84, 1930 (昭 39-12)
- (6) 尾本・天池: 電学誌 70, 45 (昭 25-1)
- (7) 林: 電学誌 80, 147 (昭 35-2)
- (8) 林: 電学誌 92-B, 29 (昭 47-1)
- (9) 近藤: 電学誌 1, 112 (昭 15-4)
- (10) たとえば, 竹内: 電気機器テンスル解析 56(昭 38) オーム社
- (11) たとえば, 電気工学ハンドブック(電気学会) 607 (昭 42)
- (12) 森下・渡辺・奥田: 昭 48 電気学会全国大会 No. 605
- (13) 森下・渡辺・奥田: 昭 47 電気学会関西支部連大 No. G-326
- (14) 渡辺, 他: 計自学会論文集 9, 9 (昭 48-1)
- (15) たとえば, 横塚: 電学誌 9, 115 (昭 46-3)