

三相リラクタンスモータの非同期特性の解析

Analysis of Asynchronous Performance of 3-phase Reluctance Motor

園 部 武 雄*
Takeo Sonobe

要 旨

三相リラクタンスモータの同期特性、非同期特性を直軸、横軸に座標をおく回転する座標系に変換することによって理論的に解析しその特異な性質を定量的に明らかにし、電子計算機で数値計算を行なった結果と実測値が小形の三相リラクタンスモータではほぼ合うことを確かめた。

1. 緒 言

リラクタンスモータは自己起動する構造簡単で信頼性の高い同期電動機であるので、最近各種の電子機器、紡績機械などに大量に使用される傾向にある。その同期特性については Trickey 氏⁽¹⁾、Crouse 氏⁽²⁾、Lawrenson 氏⁽³⁾、園山氏⁽⁴⁾などの研究がある。非同期特性については三相对称座標法と構造対称軸という座標変換によって解析した加藤氏の文献⁽⁵⁾があるが、計算式が非常に複雑になり、加藤氏自身も簡略式のみしか計算を行なっていない。さらに Lin 氏⁽⁶⁾⁽⁷⁾は実回路的に計算を行なって等価回路を導いているがあまりにも複雑になり非同期特性の数値計算は行なわれていない。

本報告では Kron 氏⁽⁸⁾⁽⁹⁾によって始められたテンソル解析法を用い、2軸の Primitive Machine に変換し、トルク、電流を同期、非同期について解析し、小形の供試機について数値計算を行ない実測と計算がどの程度に一致するかを確かめようとするものである。

2. 構造と動作原理

リラクタンスモータはリアクションモータ(反作用電動機)とも呼ばれ、直流励磁を要しない、取り扱いが簡便な同期電動機として知られている。その構造は図1に示すようにかご形誘導電動機のロータ上に極数に応じて凹極部をつけた構造となっており、ステータ側は普通の誘導電動機と同様に三相、単相の巻線が施されている。

その動作原理は同期回転時は同期電動機の電機子に遅電流が流れると、電機子反作用により界磁を強める作用をするので、直流励磁はしなくとも界磁は励磁される。したがって励磁巻線がなくても電機子巻線が回転磁界を生ずれば、電流の有効分は界磁束を作り、これと電流の有効分との相互作用により回転子は回転する。回転子が凸極形であれば、電機子と凸極との関係位置により、磁気抵抗が変化し、電流と界磁束の間に相差を生ずる。この相差は負荷に応じて変化し、その負荷に必要なトルクを発生する。非同期時は大部分のトルクはかご形巻線により普通の誘導機と同様の誘導トルクにより回転する。

3. 電圧電流方程式と変換

図2に概念的に示されるような三相リラクタンスモータの電圧電流方程式を記すと(1)式のようなになる⁽⁵⁾⁽⁸⁾。ただし

- (1) 各相の巻線仕様は同一とする。
- (2) 各相の磁気回路も同一条件とする。
- (3) 起磁力は正弦波状に分布しており、基本波についてのみ考えられている。

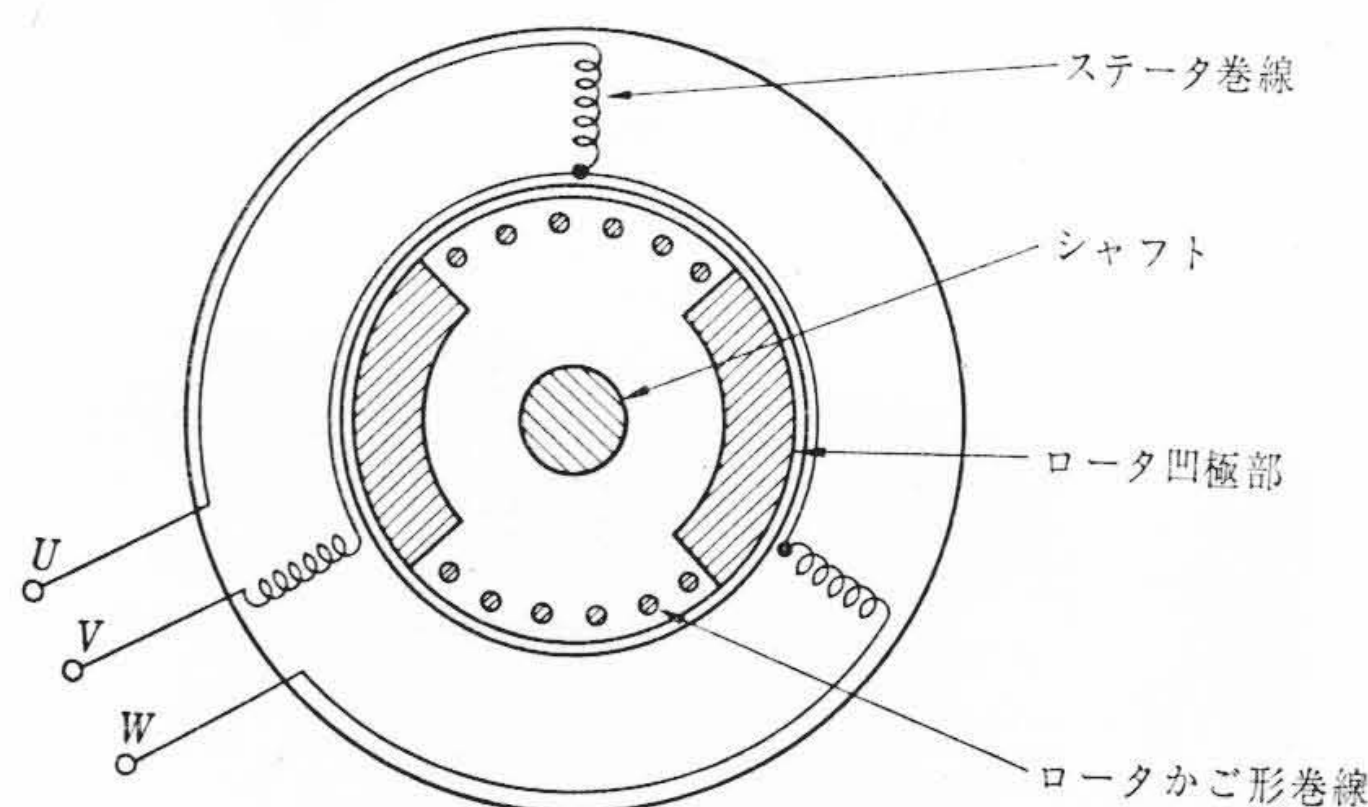


図1 三相リラクタンスモータの構造

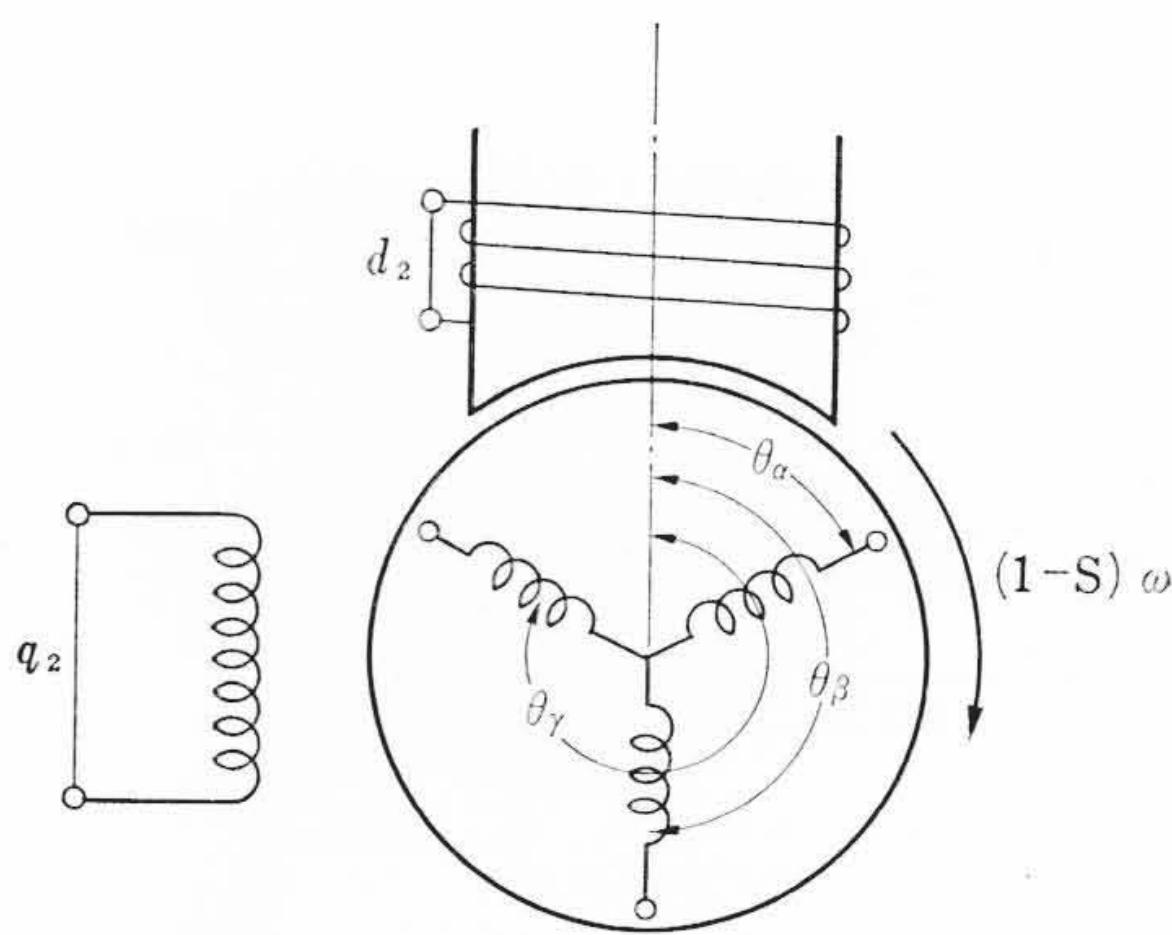


図2 三相リラクタンスモータの概念図

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ E_{a2} \\ E_{a2} \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_{a2} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

* 日立製作所多賀工場

ここで[Z]は

	a	b	c	d_2	q_2
a	$R_s + pl_a$ $+ pL_{da} \cos^2 \theta_\alpha$ $+ pL_{qa} \sin^2 \theta_\alpha$	$pL_{da} \cos \theta_\alpha \cos \theta_\beta$ $+ pL_{qa} \sin \theta_\alpha \sin \theta_\beta$	$pL_{da} \cos \theta_\alpha \cos \theta_\gamma$ $+ pL_{qa} \sin \theta_\alpha \sin \theta_\gamma$	$pM_{da} \cos \theta_\alpha$	$pM_{qa} \sin \theta_\alpha$
b	$pL_{da} \cos \theta_\alpha \cos \theta_\beta$ $+ pL_{qa} \sin \theta_\alpha \sin \theta_\beta$	$R_s + pl_a$ $+ pL_{da} \cos^2 \theta_\beta$ $+ pL_{qa} \sin^2 \theta_\beta$	$pL_{da} \cos \theta_\beta \cos \theta_\gamma$ $+ pL_{qa} \sin \theta_\beta \sin \theta_\gamma$	$pM_{da} \cos \theta_\beta$	$pM_{qa} \sin \theta_\beta$
$[Z] = c$	$pL_{da} \cos \theta_\alpha \cos \theta_\gamma$ $+ pL_{qa} \sin \theta_\alpha \sin \theta_\gamma$	$pL_{da} \cos \theta_\beta \cos \theta_\gamma$ $+ pL_{qa} \sin \theta_\beta \sin \theta_\gamma$	$R_s + pl_a$ $+ pL_{da} \cos^2 \theta_\gamma$ $+ pL_{qa} \sin^2 \theta_\gamma$	$pM_{da} \cos \theta_\gamma$	$pM_{qa} \sin \theta_\gamma$
d_2	$pM_{da} \cos \theta_\alpha$	$pM_{da} \cos \theta_\beta$	$pM_{da} \cos \theta_\gamma$	$R_{d2} + pL_{d2}$	0
q_2	$pM_{qa} \sin \theta_\alpha$	$pM_{qa} \sin \theta_\beta$	$pM_{qa} \sin \theta_\gamma$	0	$R_{q2} + pL_{q2}$

..... (2)

これを回転子側に座標をおいた場合に変換するには(3)式⁽³⁾を用いる。

$$\text{ただし, } \theta_\alpha = (1-S)\omega t - \gamma, \quad \theta_\beta = (1-S)\omega t - \gamma + \frac{2\pi}{3},$$

$$\theta_\gamma = (1-S)\omega t - \gamma - \frac{2\pi}{3}$$

この転置共役行列を $[C]_t^*$ とすれば

$$[C][C]_t^* = 1 \dots \dots \dots (4)$$

であるので $[C]$ は Unitary 行列であり、この変換による変換は絶対変換であり電力不変となる。よってテンソル解析法の手法⁽⁸⁾⁽⁹⁾により変換を行なうと

	a	b	c	d_2	q_2
a	$\cos \theta_\alpha$	$\sin \theta_\alpha$	$\sqrt{\frac{1}{2}}$	0	0
b	$\cos \theta_\beta$	$\sin \theta_\beta$	$\sqrt{\frac{1}{2}}$	0	0
$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} c$	$\cos \theta_\gamma$	$\sin \theta_\gamma$	$\sqrt{\frac{1}{2}}$	0	0
d_2	0	0	0	$\sqrt{\frac{3}{2}}$	0
q_2	0	0	0	0	$\sqrt{\frac{3}{2}}$

... (3)

	d	q	0	d_2	q_2
d	$R_s + p\left(l_a + \frac{3}{2}L_{da}\right)$	$(1-S)\omega\left(l_a + \frac{3}{2}L_{qa}\right)$	0	$\sqrt{\frac{3}{2}}pM_{da}$	$(1-S)\omega\sqrt{\frac{3}{2}}M_{qa}$
q	$-(1-S)\omega\left(l_a + \frac{3}{2}L_{da}\right)$	$R_s + p\left(l_a + \frac{3}{2}L_{qa}\right)$	0	$-(1-S)\omega\sqrt{\frac{3}{2}}M_{da}$	$\sqrt{\frac{3}{2}}pM_{qa}$
$[Z'] = [C]_t^*[Z][C] = 0$	0	0	$R_s + pl_a$	0	0
d_2	$\sqrt{\frac{3}{2}}pM_{da}$	0	0	$R_{d2} + pL_{d2}$	0
q_2	0	$\sqrt{\frac{3}{2}}pM_{qa}$	0	0	$R_{q2} + pL_{q2}$

... (5)

電源には三相平衡電圧を加えたとすれば、二次側には電源は印加されていないので $[E]$ は次のようになる。

電流については一次側には φ だけ位相の遅れた平衡三相電流が流れている場合、二次側には $S\omega$ という角速度の電流が流れるので、

a	E_a	a	$\sqrt{2} V_a \sin \omega t$
b	E_b	b	$\sqrt{2} V_a \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$
$[E] = c$	E_c	$= c$	$\sqrt{2} V_a \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$
d_2	E_{d2}	d_2	0
q_2	E_{q2}	q_2	0

..... (6)

a	I_a	a	$\sqrt{2} I_a' \sin(\omega t - \varphi)$
b	I_b	b	$\sqrt{2} I_a' \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$
$[I] = c$	I_c	$= c$	$\sqrt{2} I_a' \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$
d_2	I_{d2}	d_2	$\sqrt{2} I_{d2}' \sin(S\omega t - \varphi')$
q_2	I_{q2}	q_2	$\sqrt{2} I_{q2}' \sin(S\omega t - \varphi'')$

..... (8)

この変換を行なうと

使用している変換行列は Unitary 行列であり(4)式が成り立つので

d	$\sqrt{3} V_a \sin(S\omega t + \gamma)$
q	$\sqrt{3} V_a \cos(S\omega t + \gamma)$
$[E'] = [C]_t^*[E] = 0$	0
d_2	0
q_2	0

..... (7)

d	$\sqrt{3} I_a' \sin(S\omega t + \varphi + \gamma)$
q	$\sqrt{3} I_a' \cos(S\omega t + \varphi + \gamma)$
$[I'] = [C]^{-1}[I]$ $= [C]_t^*[I] = 0$	0
d_2	$\sqrt{2} I_{d2}' \sin(S\omega t - \varphi')$
q_2	$\sqrt{2} I_{q2}' \cos(S\omega t - \varphi'')$

..... (9)

		d	q	d_2	q_2	
E_d	d	$R_s + jSX_d$	$(1-S)X_q$	$\sqrt{\frac{3}{2}}jSX_{Mq}$	$(1-S)\sqrt{\frac{3}{2}}X_{Mq}$	I_d
E_q	q	$-(1-S)X_d$	$R_s + jSX_q$	$-(1-S)\sqrt{\frac{3}{2}}X_{Md}$	$\sqrt{\frac{3}{2}}jSX_{Mq}$	I_q
0	d_2	$\sqrt{\frac{3}{2}}jSX_{Md}$	0	$R_{d2} + jSX_{d2}$	0	I_{d2}
0	q_2	0	$\sqrt{\frac{3}{2}}jSX_{Mq}$	0	$R_{q2} + jSX_{q2}$	I_{q2}

..... (10)

過渡的な解を求めるときには前頁の方程式が必要であるが、一般的な解を求めるときには複素記号を用いるのが有利であるので複素記号で表現する。ただし平衡三相電流が流れている場合は零相軸には電流が流れないので零相軸を除き、計算の便利のように電圧、電流を E_d, I_d などと表わすと (10) 式のようになる。

4. 各特性の解析

(10) 式により三相リラクタンスモータの各場合の特性を各場合にわけて解析していく。

4.1 同期回転時の特性

同期回転時は $S=0$ であるので (10) 式により

	d	q	
E_d	R_s	X_q	I_d
E_q	$-X_d$	R_s	I_q

..... (11)

これを解き (7) 式を代入することにより

$$I_d = \frac{R_s E_d - X_q E_q}{R_s^2 + X_d X_q} = \frac{\sqrt{3} V_a (R_s \sin \gamma - X_q \cos \gamma)}{R_s^2 + X_d X_q} \quad \text{..... (12)}$$

$$I_q = \frac{R_s E_q + X_d E_d}{R_s^2 + X_d X_q} = \frac{\sqrt{3} V_a (R_s \cos \gamma + X_d \sin \gamma)}{R_s^2 + X_d X_q} \quad \text{..... (13)}$$

線電流 I_a は

$$[I] = [C][I'] \quad \text{..... (14)}$$

より

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} (I_d \cos \theta_a + I_q \sin \theta_a)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \{ (I_d \cos (\omega t - \gamma) + I_q \sin (\omega t - \gamma)) \} \quad \text{..... (15)}$$

実効値では

$$I_{a \text{ eff}} = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \quad \text{..... (16)}$$

トルクはシンクロナスワットで表わすと

$$\frac{\omega}{P} \cdot T = \omega [I]_t^* [G] [I]$$

$$= \begin{bmatrix} I_d^* & I_q^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d & q \\ 0 & X_q \\ -X_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = I_d I_q (X_q - X_d)$$

$$= \frac{3 V_a^2}{2} \cdot \frac{\{ (X_d X_q - R_s^2) \sin 2\gamma - (X_d - X_q) R_s + R_s (X_d + X_q) \cos 2\gamma \} (X_d - X_q)}{(R_s^2 + X_d X_q)^2} \quad \text{..... (17)}$$

テンソル解析法の場合には $(\omega/P) \cdot T$ は機械損を含んだ出力であるので機械損を M (ワット) とすれば、

$$\text{出力} = \frac{\omega}{P} \cdot T - M \quad \text{..... (18)}$$

(17) 式は文献で Trickey⁽¹⁾ が計算したものと同一となる。

4.2 非同期時特性

非同期回転時は凸極形の誘導電動機ということになり (10) 式を I_d, I_q, I_{d2}, I_{q2} について解くと、

$$I_d = \frac{\left\{ (R_s + jSX_q) \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Mq}^2 \right\} \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) E_d - (1-S) \left\{ X_q \frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right\} - \frac{3}{2} jX_{Md}^2 \right\} \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) E_q}{k}$$

$$= A + jB \quad \text{..... (19)}$$

$$I_q = \frac{\left\{ (1-S) X_d \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) - \frac{3}{2} jX_{Md}^2 \right\} \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) E_d + \left\{ (R_s + jSX_d) \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Md}^2 \right\} \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) E_q}{k}$$

$$= C + jD \quad \text{..... (20)}$$

ただし、ここで k は

$$k = \left\{ (R_s + jSX_d) \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Md}^2 \right\} \times \left\{ (R_s + jSX_q) \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Mq}^2 \right\} + (1-S)^2 \left\{ X_d \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) - \frac{3}{2} jX_{Md}^2 \right\} \times \left\{ X_q \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) - \frac{3}{2} jX_{Mq}^2 \right\} \quad \text{..... (21)}$$

$$I_{d2} = \frac{-\sqrt{\frac{3}{2}} jX_{Md} I_d}{\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2}} = A' + jB' \quad \text{..... (22)}$$

$$I_{q2} = \frac{-\sqrt{\frac{3}{2}} jX_{Mq} I_q}{\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2}} = C' + jD' \quad \text{..... (23)}$$

線電流 I_a は同時期と同様にして

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} (I_d \cos \theta_a + I_q \sin \theta_a)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} [I_d \cos \{(1-S)\omega t - \gamma\} + I_q \sin \{(1-S)\omega t - \gamma\}] \dots \quad \text{..... (24)}$$

で表わされる。しかるに I_d, I_q は (9) 式より明らかなように $S\omega$ という角速度で表わされる正弦波であるので、 I_a は三角関数の公式によって $\sin \omega t$ と $\sin \{(1-2S)\omega t + 2\gamma\}$ の和に分解される。その結果を E_d, E_q を代入して実効値で示すと ωt の成分では

$$\frac{V_a}{2k} \left[\left\{ (R_s + jSX_q) \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Mq}^2 \right\} \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) + \left\{ (R_s + jSX_d) \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Md}^2 \right\} \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) - j(1-S) \left\{ X_q \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) - \frac{3}{2} jX_{Mq}^2 \right\} \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) - j(1-S) \left\{ X_d \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) - \frac{3}{2} jX_{Md}^2 \right\} \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) \right] \quad \text{..... (25)}$$

(2S-1) ωt の成分では

$$\frac{V_a}{2k} \left[\left\{ (R_s + jSX_q) \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Mq}^2 \right\} \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) - \left\{ (R_s + jSX_d) \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) + \frac{3}{2} SX_{Md}^2 \right\} \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
 & +j(1-S) \left\{ X_d \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) - \frac{3}{2} jX_{Md}^2 \right\} \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) \\
 & -j(1-S) \left\{ X_q \left(\frac{R_{q2}}{S} + jX_{q2} \right) - \frac{3}{2} jX_{Mq}^2 \right\} \left(\frac{R_{d2}}{S} + jX_{d2} \right) \Bigg\} \\
 & \dots\dots\dots (26)
 \end{aligned}$$

ここで普通の誘導電動機の場合は

$$X_d = X_q, R_{d2} = R_{q2}, X_{d2} = X_{q2}, X_{Md} = X_{Mq}$$

となり $(1-2S)\omega t$ の項は 0 となり電源電圧と同一の周波数の電流のみ流れるが、凸極機の場合は $0 \leq S < 1/2$ では ωt の成分と同一方向に $1/2 \leq S \leq 1$ では反対方向に $(1-2S)\omega$ の角速度の電流が流れるという違いがあり、これが加速特性の谷や音、振動の原因になると思われる。

この場合の機械的出力はシンクロナスワットで表わすと同期回転時と同様にして

$$\frac{\omega}{P} T = \omega [I]_t^* [G] [I]$$

		d	q	d_2	q_2	
$A-jB$	d	0	X_q	0	$\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Mq}$	$A+jB$
$C-jD$	q	$-X_d$	0	$-\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Md}$	0	$C+jD$
$A'-jB'$	d_2	0	0	0	0	$A'+jB'$
$C'-jD'$	q_2	0	0	0	0	$C'+jD'$

$$\begin{aligned}
 & = (AC+BD)(X_q-X_d) + (AC'+BD')\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Mq} \\
 & - (CA'+DB')\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Md} + j \left\{ (AD-BC)(X_d+X_q) \right. \\
 & \left. + (AD'-BC')\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Mq} - (A'D-B'C)\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Md} \right\} \dots\dots (27)
 \end{aligned}$$

このうち虚数部は振動トルクを表わし実数部が平均トルクを表わすので

$$\begin{aligned}
 \frac{\omega}{P} T_{av} & = (AC+BD)(X_q-X_d) + (AC'+BD')\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Mq} \\
 & - (CA'+DB')\sqrt{\frac{3}{2}} X_{Md} \dots\dots\dots (28)
 \end{aligned}$$

となる。

4.3 ロータ拘束時の電流

4.2 の特別な場合としてロータ拘束時は(19), (20)式において $S=1$ とおくことにより

$$I_{d(S=1)} = \frac{E_d(R_{d2}+jX_{d2})}{\left\{ (R_s+jX_d)(R_{d2}+jX_{d2}) + \frac{3}{2} X_{Md}^2 \right\}} = a+jb \dots (29)$$

$$I_{q(S=1)} = \frac{E_q(R_{q2}+jX_{q2})}{\left\{ (R_s+jX_q)(R_{q2}+jX_{q2}) + \frac{3}{2} X_{Mq}^2 \right\}} = c+jd \dots (30)$$

これより

$$\begin{aligned}
 I_{a(S=1)} & = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{d(S=1)} \cos \theta_\alpha + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{q(S=1)} \sin \theta_\alpha \\
 & = \sqrt{\frac{2}{3}} \{ (a+jb) \cos \gamma - j(c+jd) \sin \gamma \} \dots\dots\dots (31)
 \end{aligned}$$

よって電流の大きさは

$$\begin{aligned}
 I_{a(S=1)}^2 & = \frac{2}{3} \{ (a \cos \gamma + d \sin \gamma)^2 + (b \cos \gamma - c \sin \gamma)^2 \} \\
 & = \frac{2}{3} \left\{ \frac{a^2+b^2+c^2+d^2}{2} \right. \\
 & \quad \left. + \sqrt{\left(\frac{a^2+b^2+c^2+d^2}{2} \right)^2 + (ad-bc)^2 \sin^2(2\gamma+\delta)} \right\} \\
 & \dots\dots\dots (32)
 \end{aligned}$$

表1 供試機の主要目

定格出力	50 W	エンドリング平均径	46 mm
定格電圧	220 V	ロータスキュー	ステータ1スロット
周波数	50 Hz	絶縁階級	A種
相数	3	R_s	22.8Ω
極数	4	X_d	250.4Ω
ステータコア積厚	60 mm	X_q	107.5Ω
ロータコア積厚	60 mm	X_{Md}	156.3Ω
ステータ巻線方法	対称重ね巻	X_{Mq}	60.5Ω
ステータ結線方法	星形結線	R_{d2}	17.7Ω
巻線径	0.40φ	R_{q2}	12.9Ω
毎相の巻数	664回	X_{d2}	173.6Ω
エンドリング断面積	21 mm ²	X_{q2}	68.1Ω

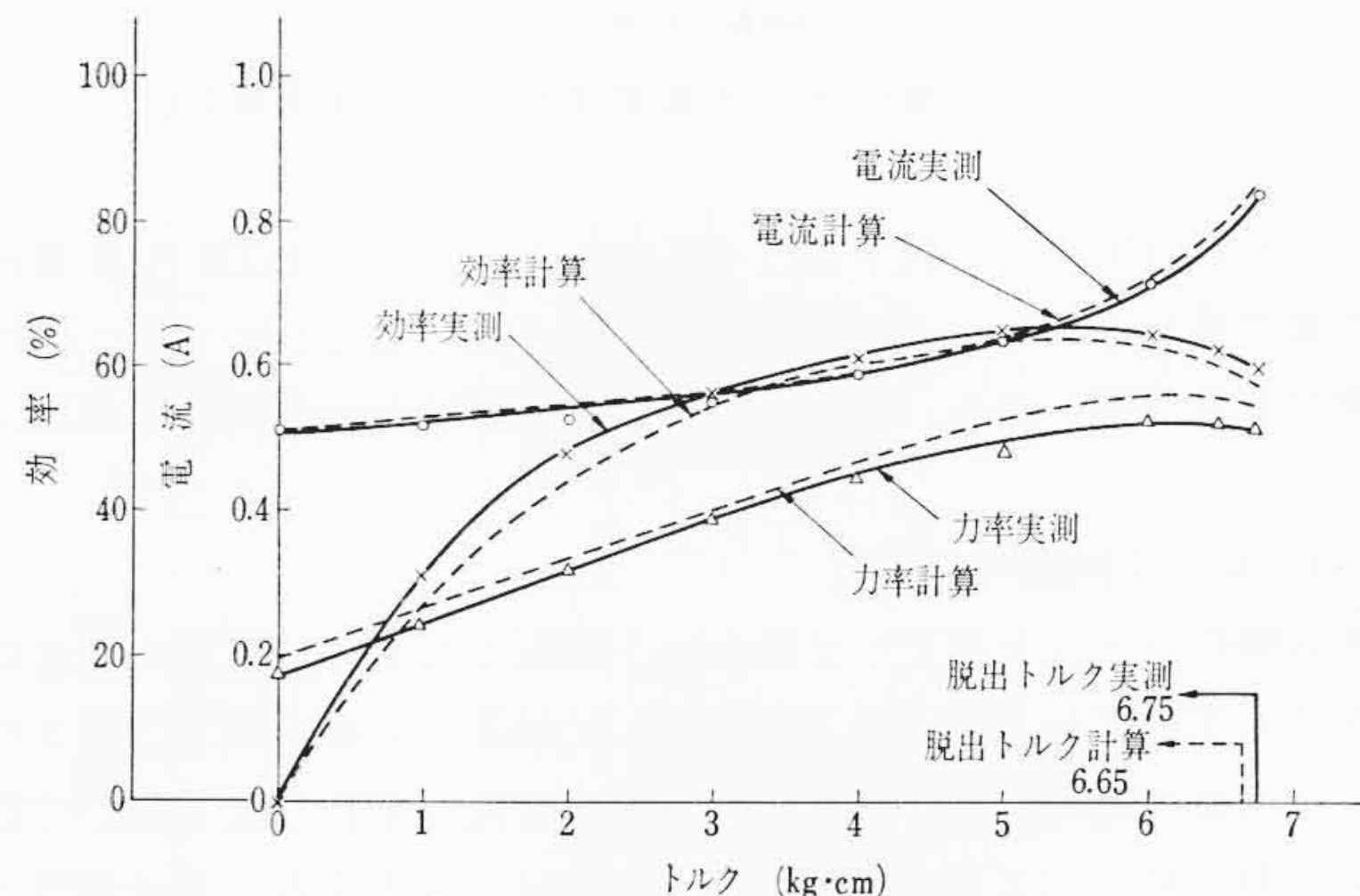


図3 供試機の同期特性

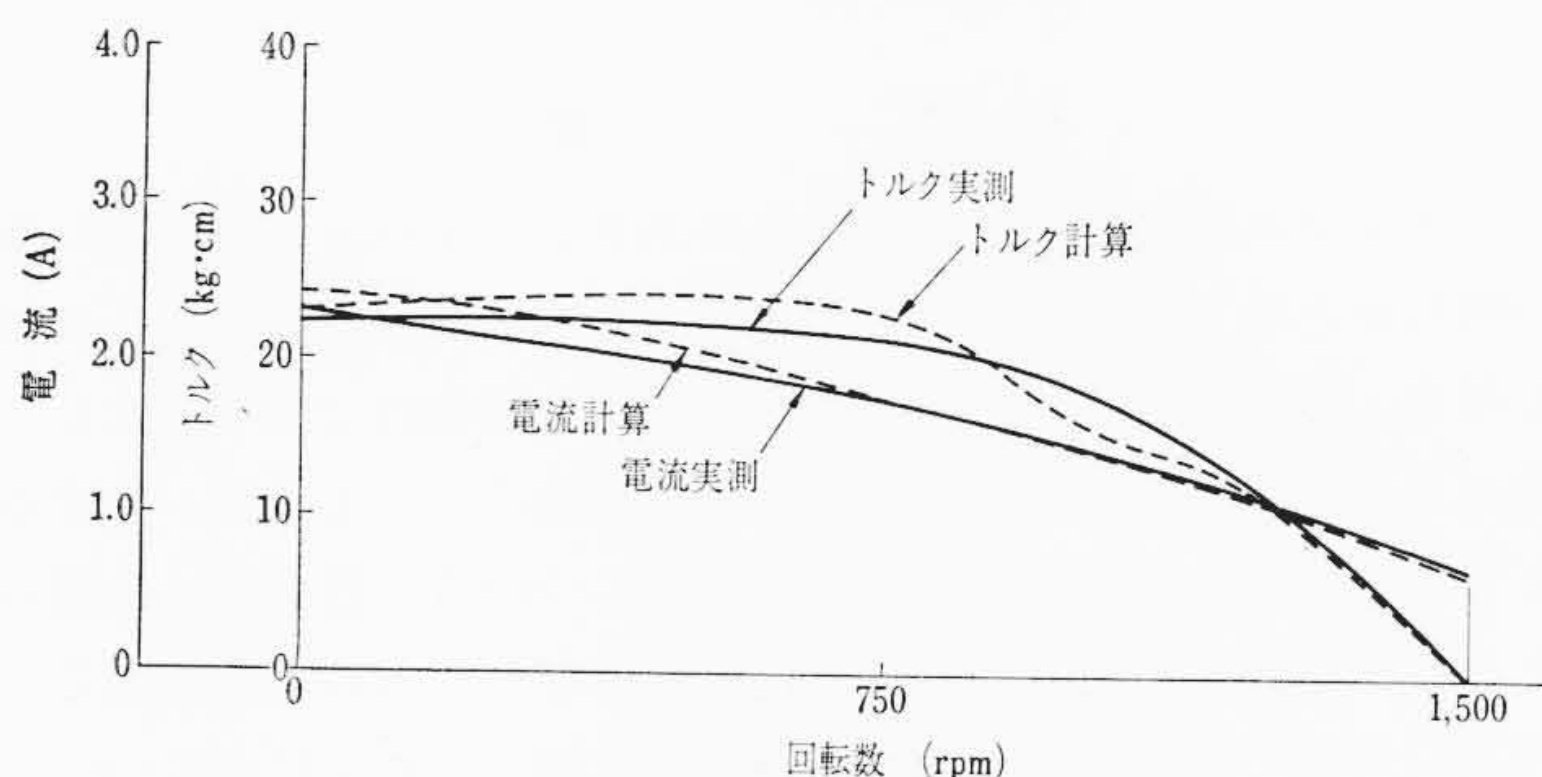


図4 供試機の非同期特性

となり、ロータとステータ巻線の位置が変わるとロータ拘束電流が脈動することがわかる。その最大または最小となる点が1回転に電気角の2倍、すなわち2極では2個、4極では4個表わされることを示しており三相リラクタンスモータの特長となっている。

5. 計算例

以上、誘導した理論式を実測値と比較するため日立製の50W三相リラクタンスモータを使用し、その特性解析を行なった。供試機の仕様は表1に示すとおりである。定数計算と特性計算に分けて計算し、電子計算機を使用した。定数計算は文献⁽¹¹⁾などを参考として行なわれたが、紙面の都合上割愛してその計算結果のみを表1に示す。

5.1 同期時特性

同期回転時の特性を(16), (17), (18)式により計算した結果を図3に示す。図3のように、ほぼ実測と計算が一致しており設計計算に使用可能なことがわかる。

5.2 非同期時特性

非同期時特性は誘導電動機と同様なトルクが発生するが、これを(25), (26), (28)式で計算しそれを図示したのが図4である。電流ト

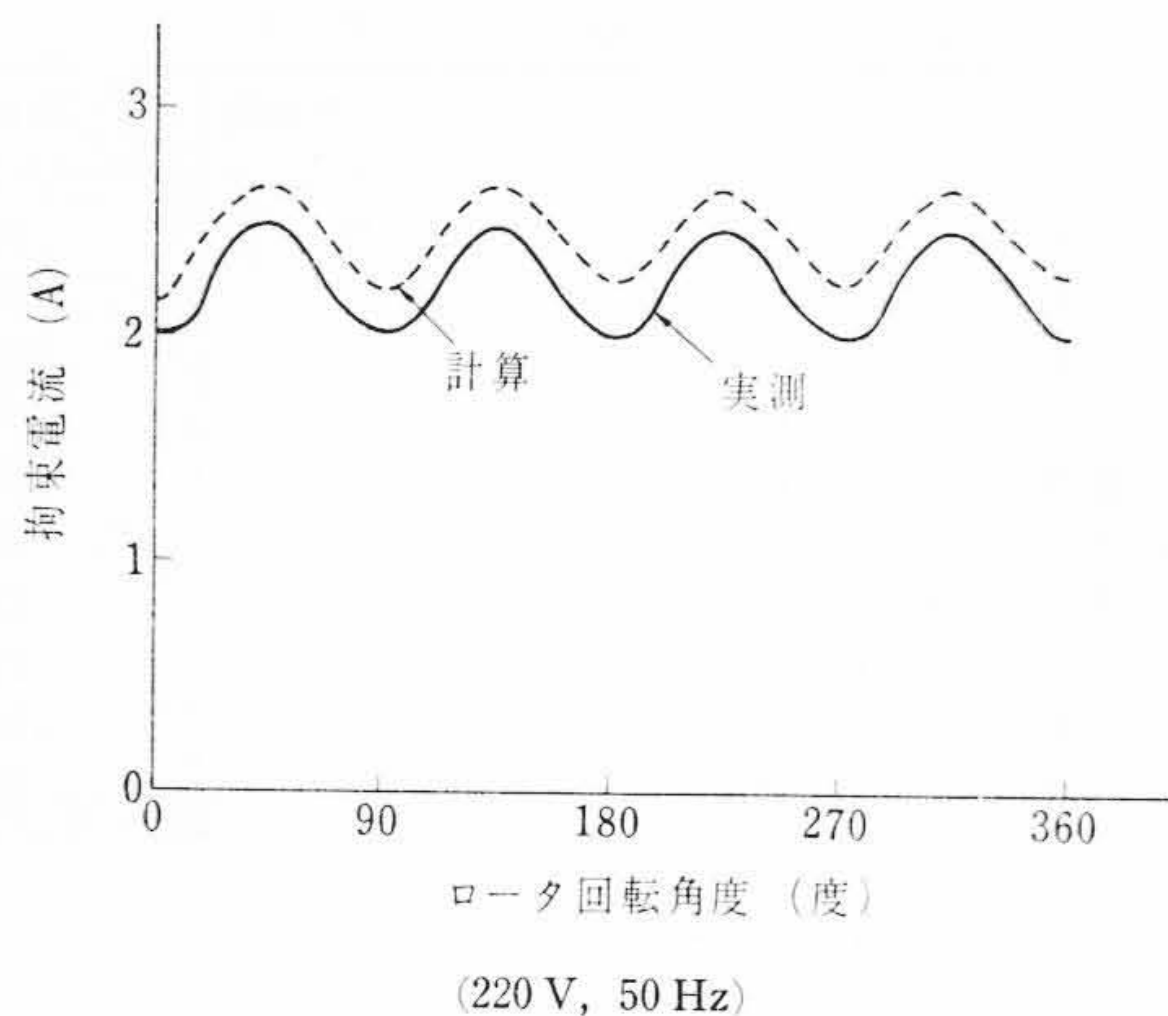


図 5 供試機のロータ位置変化時の拘束電流

ルクともほぼ実測と一致することがわかる。ただし 1,000 rpm 前後に計算で現われるトルクの凹部は実測では出てこないの、この点定数の計算が悪いのか、そのほかの影響によるのか検討する必要がある。

5.3 ロータ拘束時の電流

供試機のロータを拘束して静かに 1 回転したときの電流の変化を図 5 に示す。また(32)式により計算した結果を点線で示す。図 5 のように凸極の誘導機ではロータ拘束時の電流が極数と同じ値だけ最大値と最小値が出てその間はほぼ正弦波状に変化する。この原因は励磁リアクタンスがロータの位置により変わるのがおもな原因で、このため三相リラクタンスモータでは普通の誘導機よりも大きなロータ拘束電流の流れる場合がある。

6. 結 言

以上テンソル解析法により三相リラクタンスモータの理論的な性質が明らかとなり、同期特性については従来からの論文と同一の結果を得た。非同期特性についてはその性質を定量的に明らかにし、数値計算による結果と実測値が小形の供試機についてはほぼ一致することを確かめた。非同期時の振動トルクについては数式的には明らかとなったがさらに実際の場合と比較を行なってみる必要がある。非同期時特性の計算で 1,000 rpm 前後で実測と合わない点については定数の計算が悪いのかそれともほかの影響によるものか、さらに研究を続ける予定である。

参 考 文 献

- (1) P. H. Trickey: T. A. I. E. E. **65**, 191 (1946)
- (2) C. H. Crouse: T. A. I. E. E. **70**, 957 (1951)
- (3) P. J. Lawrenson: Proc. I. E. E. **111**, 1435 (1964)
- (4) 園山, 蓮池: 日立評論 **42**, 1314 (昭 35-12)
- (5) 加藤: 電工論 第 4 巻, 第 5 号 281 (昭 27-9)

- (6) Chi-Yung Lin: T. A. I. E. E. **70**, 1971 (1951)
- (7) Chi-Yung Lin: T. A. I. E. E. **71**, 1 (1952)
- (8) 宮入: エネルギー変換工学(下) 215~248 (1965)
- (9) G. Kron: Tensors for Circuit (1958)
- (10) 加藤: 電工論 第 4 巻, 第 4 号 224 (昭 27-6)
- (11) 大富: 電工論 第 5 巻, 第 2 号 57 (昭 19-2)

付 録

本論文に使用された記号と単位は下記による。

- E_a, E_b, E_c : 一次側巻線の各相の電圧 (V)
 E_d, E_q : 2 軸に変換された場合の一次側の直軸, 横軸電圧 (V)
 E_{d2}, E_{q2} : 二次直軸, 横軸巻線の電圧 (V)
 I_a, I_b, I_c : 一次側巻線の各相の相電流 (A)
 I_d, I_q : 2 軸に変換された場合の一次側の直軸, 横軸電流 (A)
 I_{d2}, I_{q2} : 二次直軸, 横軸巻線に流れる電流 (A)
 l_a : 一次側一相の漏えいリアクタンス (H)
 L_{da}, L_{aq} : 一相の直軸リアクタンス, 横軸リアクタンス (H)
 L_{d2}, L_{q2} : 直軸, 横軸二次巻線のリアクタンス (H)
 M_{da}, M_{qa} : 一相の一次側と二次側の直軸, 横軸相互リアクタンス (H)

p : 微分演算子

P : 極数

R_s : 一次側一相の抵抗 (Ω)

R_{d2}, R_{q2} : 直軸, 横軸二次巻線の抵抗 (Ω)

S : すべり

t : 秒

V_a : 相電圧(実効値) (V)

$$X_d = \omega \left(l_a + \frac{3}{2} L_{da} \right) \quad (\Omega)$$

$$X_q = \omega \left(l_a + \frac{3}{2} L_{qa} \right) \quad (\Omega)$$

$$X_{Md} = \omega M_{da} \quad (\Omega)$$

$$X_{Mq} = \omega M_{qa} \quad (\Omega)$$

$$X_{d2} = \omega L_{d2} \quad (\Omega)$$

$$X_{q2} = \omega L_{q2} \quad (\Omega)$$

$\theta_a, \theta_{\hat{s}}, \theta_r$: 電気角 (rad)

γ : 一次側の a 相巻線の中心と直軸の $t=0$ においてなす角 (rad)

$\delta, \varphi, \varphi', \varphi''$: 電気角 (rad)

T : トルク (Nm)

ω : 角速度 (rad/s)

M : 機械損(同期回転時) (W)