

# 誘導電動機の予備励磁式Y-△始動時における突入電流の理論的解析

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 明治大学科学技術研究所 公開日: 2013-05-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 三木, 一郎, 西山, 栄枝 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10291/14660">http://hdl.handle.net/10291/14660</a>

# 誘導電動機の予備励磁式 Y- $\Delta$ 始動時における 突入電流の理論的解析

三 木 一 郎  
西 山 栄 枝

## Theoretical Analysis of Inrush Current in Induction Motor at Y- $\Delta$ Starting by Pre-excitation System

Ichiro MIKI  
Sakae NISHIYAMA

### Synopsis

Inrush current may sometimes be produced in the three phase induction motor at the time of Y- $\Delta$  starting. Authors have already proposed the new Y- $\Delta$  starting method which has been called three phase pre-excitation system. In this method, a control-resistance is interposed between the power supply and the stator winding of the induction motor.

In this paper, the inrush current of the motor has been analyzed by instantaneous symmetrical coordinate method in order to discuss the optimal control-resistance of the new Y- $\Delta$  starting unit. At the beginning of the analysis, saturation and other nonlinear effects are neglected, and an idealised induction motor is considered. A flow chart of the calculation method by computer is given for the numerical evaluation of the transient current and torque after the reconnection to the power supply.

Comparison of measured and analyzed results shows that the idealizing assumption is certainly justified by the 5.5 kW induction motor tested.

### 1. ま え が き

最近、数十 kW の電動機に Y- $\Delta$  始動が適用されたり、省エネルギー等の関係でインバータで大容量電動機を低周波始動し、定常運転時には商用電源に切替えるような運転方法がしばしば行われている。このような運転においては、電源の再投入や電源の切替えが伴うことになり、既に明らかにされているように突入電流や過大トルクの発生をみることになる<sup>1)2)</sup>。これらの突入電流や過大トルクは電動機の容量が増大するにつれて相当な大きさになるために、電動機および負荷の破損を引き起す原因にもなる。また、電源にも影響を及ぼすため、他の機器

にも電圧の低下などの障害を与えることになる。これらの対策として、筆者らは既に三相子備励磁方式の Y- $\Delta$  始動法を発表しており<sup>3)</sup>、試作装置によって突入電流や過大トルクの抑制効果を確認している<sup>4)</sup>。また、この方式は Y- $\Delta$  始動時のみならず、電源の切替え時にも容易に適用できることも明らかにしている。しかし、本方式に用いる抑制抵抗の最適値については、現在までに多数の実験結果よりある程度明らかになりつつあるが、理論的な決定はなされていない。

本論文では、主に、抑制抵抗の理論的な決定に必要な突入電流の解析を本方式による Y- $\Delta$  始動時に限って行う。解析は瞬時値対称座標法<sup>5)6)</sup>を用いて行い、試作装置による実測結果と比較することにより解析過程の妥当性を明らかにする。また、抑制抵抗を理論的に決定するために適した解析手法であることも同時に明らかにする。

## 2. 瞬時値対称座標法による突入電流の解析

### 2.1 解析の対象となる過渡領域および解析上の仮定

三相子備励磁方式の Y- $\Delta$  始動法を電動機の動作順に述べると以下のようになる。

- (1) 電動機の固定子巻線を Y 結線し、電源を投入し始動する。
- (2) 定常状態になったところで電源を電動機からいったん開放する。このとき固定子巻線は Y 結線のままである。
- (3) 電源開放中に固定子巻線を  $\Delta$  結線に切替える。
- (4) 電源を再び投入する。このとき、電動機の固定子巻線各相に抑制抵抗が直列に接続されている。
- (5) 抑制抵抗を短絡する。

本解析では、以上の過渡領域のうち抑制抵抗の有無に関係する(4)および(5)の領域を対象とする。ただし、(4)の領域について解析を行う上で電流の初期値などを設定するときに上記(3)の領域を考慮する必要がある。

次に電動機、負荷および電源に関する解析上の基本的な仮定および条件について述べる。まず、電動機および負荷に関しては、

- (1) 固定子には平衡三相巻線が巻かれており、回転子も等価的に巻線が平衡して巻かれているものとする。
- (2) 電動機の固定子巻線はある瞬時に Y 結線から  $\Delta$  結線に切替わるが、その後も回路は等価的に Y 結線されているものとして解析を進める。
- (3) 磁気飽和の影響を無視できる。
- (4) うず電流およびヒステリシスの影響は無視でき、空けきは一様とする。
- (5) 固定子巻線および回転子導体の表皮効果を無視できる。
- (6) 電動機は、慣性負荷として回転子の慣性モーメントの約 2 倍の慣性体を直結している。

次に電源に関しては、

- (7) 電源電圧は三相正弦波電圧であり、その実効値は 217[V] である。また、電源電圧の変

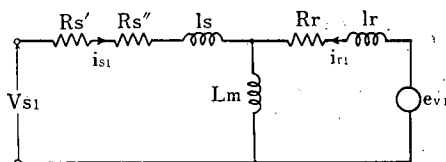


図 1 電源再投入時の瞬時値正相分等価回路

動を無視できる。

以上の仮定および条件を前提として解析を進める。

## 2.2 等価回路と電圧方程式

誘導電動機の電源再投入時における瞬時値正相分等価回路を図 1 に示す。

図 1 において、 $R_s'$  は電動機の外部に接続する抑制抵抗を示している。この等価回路を基にして電圧方程式およびトルク方程式をたてると次式となる。

$$V_{s1} = (R_s + PL_s)i_{s1} + PL_m i_r \quad (1)$$

$$0 = (R_r + PL_r)i_{r1} + PL_m i_{s1} - e_{v1} \quad (2)$$

$$e_{v1} = j\omega_m(L_r i_{r1} + L_m i_{s1}) \quad (3)$$

$$T = -2qI_m(L_m \bar{i}_{s1} i_{r1}) \quad (4)$$

ただし、

$$\begin{aligned} R_s &= R_s' + R_s'' [\Omega] & R_s' &: \text{抑制抵抗} [\Omega] \\ L_s &= l_s + L_m [\text{H}] & e_{v1} &: \text{速度起電力} [\text{V}] \\ L_r &= l_r + L_m [\text{H}] & q &: \text{極対数} \\ P &= d/dt & T &: \text{発生トルク} [\text{Nm}] \end{aligned}$$

$$\omega_m: \text{回転子の電気角速度} [\text{elec} \cdot \text{rad/s}]$$

$$\bar{i}_{s1}: i_{s1} \text{ の共役複素数}$$

なお、(1)式において  $R_s$  を  $R_s''$  におきかえることにより、(1)~(4)式は抑制抵抗短絡時の方程式にもなり得る。

## 2.3 突入電流の解析

前節(1)~(3)式の電圧方程式を整理し、 $i_{s1}$  および  $i_{r1}$  にラプラス変換を施すと、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[i_{s1}] = I_{s1} &= [(V_{s1} + L_m i_{r10} + L_s i_{s10}) \{R_r + (s - j\omega_m)L_r\} \\ &\quad - (L_r i_{r10} + L_m i_{s10})sL_m] / \Delta(s) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[i_{r1}] = I_{r1} &= [(L_m i_{r10} + L_r i_{r10})(R_s + sL_s) - (V_{s1} + L_s i_{s10} + L_m i_{r10}) \\ &\quad (s - j\omega_m)L_m] / \Delta(s) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、

$$\Delta(s) = (L_s L_r - L_m^2)(s - \lambda_1)(s - \lambda_2) \quad (7)$$

であり、

$$\lambda_1 = -\alpha_1 + j\beta_1, \quad \lambda_2 = -\alpha_2 + j\beta_2$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{L_s R_r + L_r R_s}{L_s L_r - L_m^2} \mp \sqrt{\frac{1}{4} (\sqrt{k_1^2 + k_2^2} + k_1)} \right]$$

$$\beta_1, \beta_2 = \frac{1}{2} \left[ \omega_m \mp \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{k_1^2 + k_2^2} - k_1)} \right]$$

$$k_1 = \left( \frac{L_s R_r + L_r R_s}{L_s L_r - L_m^2} \right)^2 - \frac{4R_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} - \omega_m^2$$

$$k_2 = \frac{2\omega_m (L_s R_r - L_r R_s)}{L_s L_r - L_m^2}$$

となる。また、(5)、(6) 式中の添字 0 はそれぞれの初期値であることを示し、 $V_{s1} = \mathcal{L}[v_{s1}]$  である。

前節で述べたように、(1) 式の  $R_s$  を  $R_s''$  におきかえれば(1)~(4)式は抑制抵抗短絡時の方程式になることから、(5)~(7)式においても  $R_s$  を  $R_s''$  にかえ、さらに初期値に抑制抵抗短絡時の適切な値を用いれば、これらの式はそのまま抑制抵抗短絡時にも適用できることになる。そこで、これから先の解析においては、(A)電源再投入時、(B)抑制抵抗短絡時の両方を一括して考慮する。

まずはじめに  $V_{s1}$  を求める。再投入時の電源の三相電圧を  $v_a, v_b, v_c$  とすると、瞬時値正相分で表わした電圧は、

$$V_{s1} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_a + a v_b + a^2 v_c)$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} V_1 e^{j\xi} e^{j\omega t} \quad (8)$$

となる。これをラプラス変換すれば、

$$V_{s1} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_1 e^{j\xi} \frac{1}{s - j\omega} \quad (9)$$

が得られる。ただし、

$$a = e^{j\frac{2}{3}\pi}$$

$\xi$  : 再投入相電圧の初期位相 [rad]

$V_1$  : 電源相電圧の実効値 [V]

$\omega$  : 電源電圧の角周波数 [rad/s]

次に、(A)の場合における  $i_{s10}$  および  $i_{r10}$  について検討する。電源再投入直前は残留電圧が電動機の端子に発生しているが、電源は開放されているので、

$$i_{s10} = 0 \quad (10)$$

である。電源開放時を基準の時刻として、電動機の固定子巻線が Y から  $\Delta$  結線に切替わった後の基準の相における残留電圧を  $e_a$  とすると、

$$e_a = \sqrt{\frac{2}{3}} V_1 (1-s) e^{-\frac{Rr}{Lr} t'} \cos \left\{ (1-s)\omega t' + \varphi' - \frac{\pi}{6} \right\} \quad (11)$$

と表わすことができる。 $\pi/6$  の位相の遅れが生ずるのは、実際には  $\Delta$  結線になっている固定子巻線を Y 変換して、等価的に Y 結線とみなすことによるものである。

ここで、回転子の基準の相における電流を  $i_{ra}$  とすると、

$$L_m \frac{di_{ra}}{dt} = e_a \quad (12)$$

が成り立つ。電源開放期間は短時間であり、電動機の回転速度はほとんど低下しないものと仮定して上式を  $i_{ra}$  について解くと、

$$i_{ra} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{E_0}{L_m \left\{ \left( \frac{R_r}{L_r} \right)^2 + \omega_n^2 \right\}} \left\{ \left( -\frac{R_r}{L_r} \right) \cos(\omega_n t' + \varphi_d') + \omega_n \sin(\omega_n t' + \varphi_d') \right\} \quad (13)$$

ただし、

$$E_0 = V_1 (1-s) e^{-\frac{R_r t'}{L_r}}$$

$$\omega_n = (1-s)\omega$$

$$\varphi_d' = \varphi' - \pi/6$$

これを正相分電流に変換すると、

$$i_{r1} = \frac{E_0}{\sqrt{2} L_m \left\{ \left( \frac{R_r}{L_r} \right)^2 + \omega_n^2 \right\}} \left[ \left( -\frac{R_r}{L_r} \right) e^{j(\omega_n t' + \varphi_d')} + \omega_n e^{j(\omega_n t' + \varphi_d' - \pi/2)} \right] \quad (14)$$

さらに、 $t'$  を再投入時を基準にした時間に置き換えて、その時間を 0 にすることで  $i_{r10}$  を求めることができる。すなわち、

$$i_{r10} = \frac{E_0}{\sqrt{2} L_m \left\{ \left( \frac{R_r}{L_r} \right)^2 + \omega_n^2 \right\}} \left[ \left( -\frac{R_r}{L_r} \right) e^{j\varphi} + \omega_n e^{j(\varphi - \pi/2)} \right] \quad (15)$$

ただし、 $\varphi$  は電源再投入時を基準にしたときの初期位相である。

(B) の場合における  $i_{s10}$ 、 $i_{r10}$  は両方共ある値をもつことになるが、これらの値は電源再投入後の  $i_{s1}$ 、 $i_{r1}$  が明らかになっていなければ求まらない。そこで本研究では、電源再投入以降の計算を進めた上で、抑制抵抗短絡の時刻における  $i_{r1}$ 、 $i_{s1}$  を新たに  $i_{s10}$ 、 $i_{r10}$  として (B) の場合における初期値を設定した。

ここで (A)、(B) の場合を一括して考慮するために、 $i_{s10}$ 、 $i_{r10}$  を次式のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} i_{s10} &= X_s + jY_s \\ i_{r10} &= X_r + jY_r \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

上式において、(A) の場合には、

$$\left. \begin{aligned} X_s &= Y_s = 0 \\ X_r &= \frac{E_0}{\sqrt{2} L_m \left\{ \left( \frac{R_r}{L_r} \right)^2 + \omega_n^2 \right\}} \left( \omega_n \sin \varphi - \frac{R_r}{L_r} \cos \varphi \right) \\ Y_r &= \frac{-E_0}{\sqrt{2} L_m \left\{ \left( \frac{R_r}{L_r} \right)^2 + \omega_n^2 \right\}} \left( \omega_n \cos \varphi + \frac{R_r}{L_r} \sin \varphi \right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

となる。また、(B) の場合には電源再投入以降の計算結果より求めた  $i_{s1}$ 、 $i_{r1}$  の実数部、虚数部をそれぞれ  $X_s$ 、 $X_r$  および  $Y_s$ 、 $Y_r$  に代入することになる。

以上の  $V_{s1}$ ,  $i_{s10}(=Y_s + jY_s)$ ,  $i_{r10}(=X_r + jY_r)$  を (5), (6) 式に代入して  $I_{s1}$ ,  $I_{r1}$  を求めると,

$$I_{s1} = \frac{1}{(L_s L_r - L_m^2)(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)} \left[ \sqrt{\frac{2}{3}} V_1 e^{j\xi} \frac{1}{s - j\omega} \{R_r + (s - j\omega_m)L_r\} \right. \\ \left. + L_m(X_r + jY_r)\{R_r + (s - j\omega_m)L_r\} + L_s(X_s + jY_s)\{R_r + (s - j\omega_m)L_r\} \right. \\ \left. - sL_r L_m(X_r + jY_r) - sL_m^2(X_s + jY_s) \right] \quad (18)$$

$$I_{r1} = \frac{1}{(L_s L_r - L_m^2)(s - \lambda_1)(s - \lambda_2)} \left[ L_m(X_s + jY_s)(R_s + sL_s) + L_r(X_r + jY_r) \right. \\ \left. (R_s + sL_s) - L_m^2(X_r + jY_r)(s - j\omega_m) - L_s L_m(X_s + jY_s)(s - j\omega_m) \right. \\ \left. - \sqrt{\frac{3}{2}} V_1 e^{j\xi} \frac{1}{s - j\omega} (s - j\omega_m)L_m \right] \quad (19)$$

さらに、上式をラプラス逆変換し、その実数部を  $2/\sqrt{3}$  倍するとそれぞれ固定子および回転子の基準の相における電流  $i_s$ ,  $i_r$  となる。すなわち、

$$i_s = \sigma_1 \left[ \sqrt{2} V_1 Z_1 \sin(\omega t + \xi + \phi_1) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \sqrt{\frac{3}{2}} V_1 Z_2 \sin(\beta_1 t + \xi + \phi_2) \right. \right. \\ \left. \left. + L_m Z_3 \sin(\beta_1 t + \phi_3) + L_s Z_4 \sin(\beta_1 t + \phi_4) - \frac{L_m^2}{L_r} Z_5 \sin(\beta_1 + \phi_5) \right\} e^{-\alpha_1 t} \right. \\ \left. + \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \sqrt{\frac{3}{2}} V_1 Z_6 \sin(\beta_2 t + \xi + \phi_6) + L_m Z_8 \sin(\beta_2 t + \phi_8) \right. \right. \\ \left. \left. + L_s Z_7 \sin(\beta_2 t + \phi_7) - \frac{L_m^2}{L_r} Z_9 \sin(\beta_2 t + \phi_9) \right\} e^{-\alpha_2 t} \right] \quad (20)$$

$$i_r = \delta_2 \left[ \sqrt{2} V_1 \frac{L_m}{L_s} V_1 (\omega_m - \omega) Z_9 \sin(\omega t + \xi + \phi_9) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ Z_{10} \sin(\beta_1 t + \phi_{10}) \right. \right. \\ \left. \left. - L_m Z_{11} \sin(\beta_1 t + \phi_{11}) - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L_m}{L_s} V_1 Z_{12} \sin(\beta_1 t + \xi + \phi_{12}) \right\} e^{-\alpha_1 t} \right. \\ \left. - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L_m}{L_s} V_1 Z_{12} \sin(\beta_1 t + \xi + \phi_{12}) \right\} e^{-\alpha_1 t} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ Z_{13} \sin(\beta_2 t + \phi_{13}) \right. \\ \left. - L_m Z_{14} \sin(\beta_2 t + \phi_{14}) + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L_m}{L_s} V_1 Z_{15} \sin(\beta_2 t + \xi + \phi_{15}) \right\} e^{-\alpha_2 t} \right] \quad (21)$$

ただし、

$$\delta_1 = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2}, \quad \delta_2 = \frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2}$$

であり、 $Z_1 \sim Z_{15}$ ,  $\phi_1 \sim \phi_{15}$  については表 1, 表 2 に示す。

以上で、三相予備励磁式 Y- $\Delta$  始動における電源再投入時および抑制抵抗短絡時の一次および二次電流の式が求まった。トルクは(4)式を計算すれば求めることができる。本研究では電氣的過渡状態のみならず、機械的過渡状態も同時に考慮するために次式の運動方程式を使用し、図 2 に示す計算方法のフローチャートにしたがって数値計算を行った。

$$T = \frac{J}{q} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{D}{q} \omega_m + T_L \quad (22)$$

ただし、

表 1  $Z_1 \sim Z_{15}$

$Z_1$	$\sqrt{\frac{(R_r/L)^2 + (\omega - \omega_m)^2}{A^2 + B^2}}$
$Z_2$	$\sqrt{\frac{(R_r/L_r - \alpha_1)^2 + (\beta_1 - \omega_m)^2}{C^2 + D^2}}$
$Z_3$	$\sqrt{\frac{(R_r X_r/L_r + \omega_m Y_r)^2 + (R_r Y_r/L_r - \omega_m X_r)^2}{G^2 + H^2}}$
$Z_4$	$\sqrt{\frac{(X_s^2 + Y_s^2)\{(R_r/L_r - \alpha_1)^2 + (\beta_1 - \omega_m)^2\}}{G^2 + H^2}}$
$Z_5$	$\sqrt{\frac{(\alpha_1^2 + \beta_1^2)(X_s^2 + Y_s^2)}{G^2 + H^2}}$
$Z_6$	$\sqrt{\frac{(R_r/L_r - \alpha_2)^2 + (\beta_2 - \omega_m)^2}{E^2 + F^2}}$
$Z_7$	$\sqrt{\frac{(X_s^2 + Y_s^2)\{R_r/L_r - \alpha_2\}^2 + (\beta_2 - \omega_m)^2}{G^2 + H^2}}$
$Z_8$	$\sqrt{\frac{(\alpha_2^2 + \beta_2^2)(X_s^2 + Y_s^2)}{G^2 + H^2}}$
$Z_9$	$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}}$
$Z_{10}$	$\sqrt{\frac{\{(R_s/L_s - \alpha_1)^2 + \beta_1^2\}\{(L_m X_s + L_r X_r)^2 + (L_m Y_s + L_r Y_r)^2\}}{G^2 + H^2}}$
$Z_{11}$	$\sqrt{\frac{\{(\omega_m - \beta_1)^2 + \alpha_1^2\}\{(L_m X_r/L_s + X_s)^2 + (L_m Y_r/L_s + Y_s)^2\}}{G^2 + H^2}}$
$Z_{12}$	$\sqrt{\frac{\alpha_1^2 + (\omega_m - \beta_1)^2}{C^2 + D^2}}$
$Z_{13}$	$\sqrt{\frac{\{(R_s/L_s - \alpha_2)^2 + \beta_2^2\}\{(L_m X_s + L_r X_r)^2 + (L_m Y_s + L_r Y_r)^2\}}{G^2 + H^2}}$
$Z_{14}$	$\sqrt{\frac{\{(\omega_m - \beta_2)^2\}\{(L_m X_r/L_s + X_s)^2 + (L_m Y_r/L_s + Y_s)^2\}}{G^2 + H^2}}$
$Z_{15}$	$\sqrt{\frac{\alpha_2^2 + (\omega_m - \beta_2)^2}{E^2 + F^2}}$

$$A = \alpha_1 \alpha_2 - (\omega - \beta_1)(\omega - \beta_2), \quad B = \alpha_2(\omega - \beta_1) + \alpha_1(\omega - \beta_2)$$

$$C = \alpha_1(\alpha_1 - \alpha_2) - (\beta_1 - \omega)(\beta_1 - \beta_2), \quad D = (\beta_1 - \omega)(\alpha_2 - \alpha_1) - \alpha_1(\beta_1 - \beta_2)$$

$$E = \alpha_2(\alpha_2 - \alpha_1) - (\beta_2 - \omega)(\beta_2 - \beta_1), \quad F = (\beta_2 - \omega)(\alpha_1 - \alpha_2) - \alpha_2(\beta_2 - \beta_1)$$

$$G = \alpha_2 - \alpha_1, \quad H = \beta_1 - \beta_2$$

$T_L$ : 負荷トルク

$J$ : 負荷をも含めた回転系の慣性モーメント

$D$ : 回転系の制動係数

### 3. 解析結果と実測結果の比較

#### 3.1 供 試 機

本研究に用いた供試機は表 3 に示す定格の三相かご形誘導電動機である。この供試機の等価回路定数および機械的定数は表 4 に示すとおりである。



表 2  $\phi^1 \sim \phi_{15}$

$\phi_1$	$\tan^{-1} \frac{R_r A / L_r + (\omega - \omega_m) B}{R_r B / L_r - (\omega - \omega_m) A}$
$\phi_2$	$\tan^{-1} \frac{(R_r / L_r - \alpha_1) C + (\beta_1 - \omega_m) D}{(R_r / L_r - \alpha_1) C - (\beta_1 - \omega_m) D}$
$\phi_3$	$\tan^{-1} \frac{(R_r X_r / L_r + \omega_m Y_r) G + (R_r Y_r / L_r - \omega_m X_r) H}{(R_r X_r / L_r + \omega_m Y_r) H - (R_r Y_r / L_r - \omega_m X_r) G}$
$\phi_4$	$\tan^{-1} \frac{(G Y_s - H X_s)(\beta_1 - \omega_m) - (G X_s + H Y_r)(R_r / L_r - \alpha_1)}{(G Y_s - H X_s)(R_r / L_r - \alpha_1) + (\beta_1 - \omega_m)(G X_s + H Y_s)}$
$\phi_5$	$\tan^{-1} \frac{\alpha_1(G X_s + H Y_s) + \beta_1(G Y_s - H X_s)}{\beta_1(G X_s + H Y_s) - \alpha_1(G Y_s - H X_s)}$
$\phi_6$	$\tan^{-1} \frac{(R_r / L_r - \alpha_2) E + (\beta_2 - \omega_m) F}{(R_r / L_r - \alpha_2) F - (\beta_2 - \omega_m) E}$
$\phi_7$	$\tan^{-1} \frac{(G Y_s - H X_s)(\beta_2 - \omega_m) - (G X_s + H Y_s)(R_r / L_r - \alpha_2)}{(G Y_s - H X_s)(R_r / L_r - \alpha_2) + (\beta_2 - \omega_m)(G X_s + H Y_s)}$
$\phi_8$	$\tan^{-1} \frac{\alpha_2(G X_s + H Y_s) + \beta_2(G Y_s - H X_s)}{\beta_2(G X_s + H Y_s) - \alpha_2(G Y_s - H X_s)}$
$\phi_9$	$\tan^{-1} (-B/A)$
$\phi_{10}$	$\tan^{-1} \frac{\{(L_m X_s + L_r X_r) G + (L_m Y_s + L_r Y_r) H\} (R_r / L_s - \alpha_1) - \beta_1 \{(L_m Y_s + L_r Y_r) G - (L_m X_s + L_r X_r) H\}}{\{(L_m X_s + L_r X_r) H - (L_m Y_s + L_r Y_r) G\} (R_r / L_s - \alpha_1) - \beta_1 \{(L_m X_s + L_r X_r) G + (L_m Y_s + L_r Y_r) H\}}$
$\phi_{11}$	$\tan^{-1} \frac{(\omega_m - \beta_1) \{(L_m Y_r / L_s + Y_s) G - (L_m X_r / L_s + X_s) H\} - \alpha_1 \{(L_m X_r / L_s + X_s) G + (L_m Y_r / L_s + Y_s) H\}}{(\omega_m - \beta_1) \{(L_m X_r / L_s + X_s) G + (L_m Y_r / L_s + Y_s) H\} + \alpha_1 \{(L_m Y_r / L_s + Y_s) G - (L_m X_r / L_s + X_s) H\}}$
$\phi_{12}$	$\tan^{-1} \frac{(\beta_1 - \omega_m) D - \alpha_1 C}{(\omega_m - \beta_1) C - \alpha_1 D}$
$\phi_{15}$	$\tan^{-1} \frac{(\beta_2 - \omega_m) F - \alpha_2 E}{(\omega_m - \beta_2) E - \alpha_2 F}$

$\phi_{13}, \phi_{14}$  はそれぞれ  $\phi_{10}, \phi_{11}$  式中の  $\alpha_1$  を  $\alpha_2$  に,  $\beta_1$  を  $\beta_2$  にかえたものである。

表 3 定 格

5.5kW	200V	23.2A
50Hz	1440rpm	4極

表 4 等価回路定数および機械的定数

$R_s'' = 0.289\Omega$	$R_r = 0.252\Omega$
$L_s = 0.0365H$	$L_r = 0.0365H$
$L_m = 0.0349H$	
$J^* = 0.0948\text{kgm}^2$	
$D = 0.00122\text{Nms/rad}$	

$J^*$  は回転子の慣性モーメントの約 2 倍の慣性モーメントを連結しているときの値である。

### 3.2 結果の比較および検討

図 3 は供試機を三相予備励磁式 Y- $\Delta$  始動装置<sup>4)</sup> で始動したときの過渡電流とトルクの実測

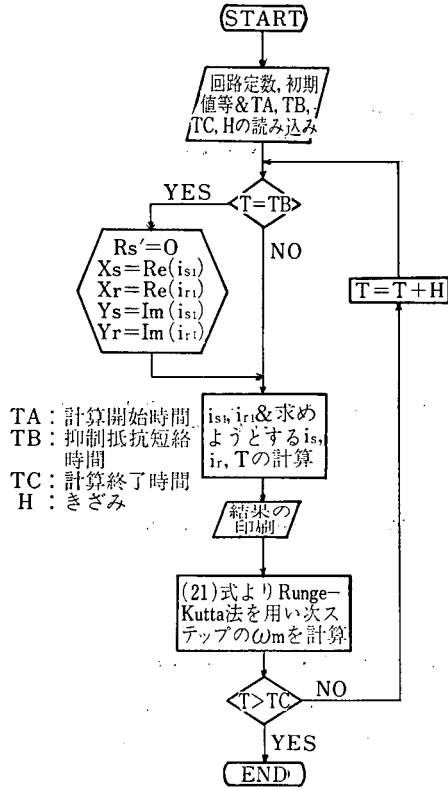


図 2 フローチャート

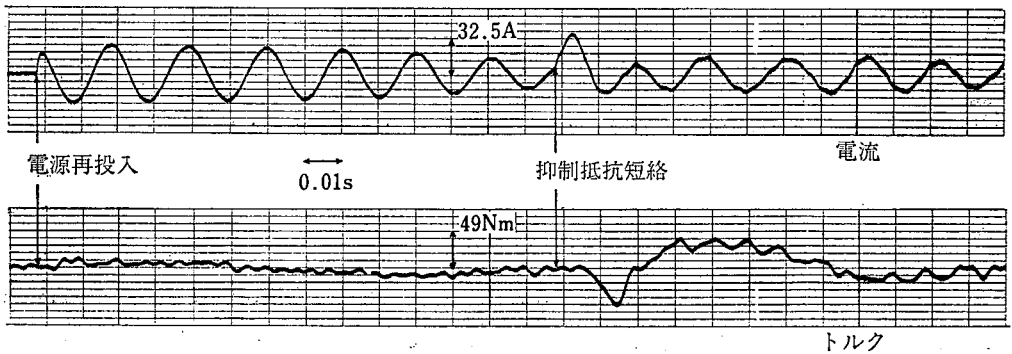


図 3  $R_s' = 3 \Omega$  のときの実測値

値である。トルクは磁わい式トルク計によって実測した。ここで、実測の時間的経過と電動機の状態について述べる。まず、電動機を Y 結線で始動し、約 1 秒後に電源を電動機から切り離す。そして 0.15 秒後に  $\Delta$  結線に切替え、さらに 0.1 秒後に電源を再投入している。同図はこの電源再投入の直前からの結果であり、使用した抑制抵抗値は  $3 \Omega$  である。また、抑制抵抗を挿入している時間は約 0.14 秒である。

図 4 は本論文で述べた手法によって求めた結果であり、縦軸、横軸とも実測結果と同一にと

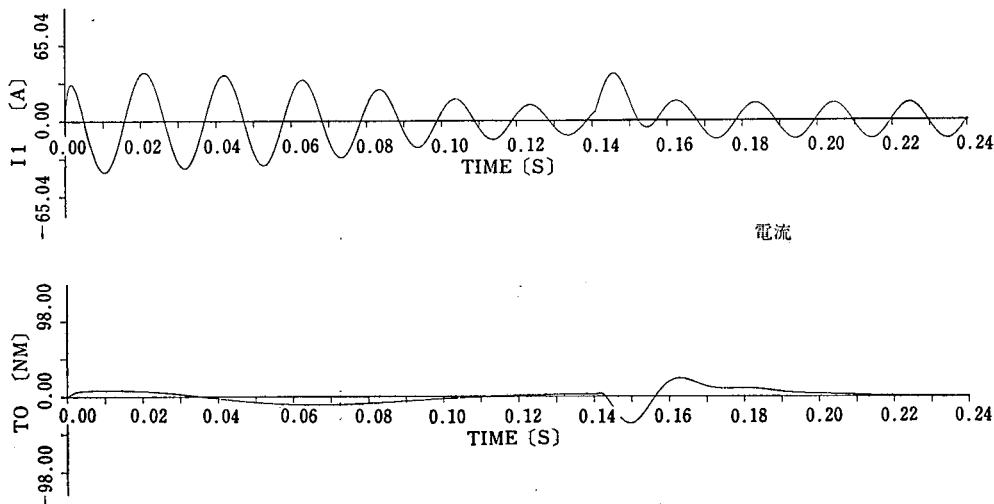


図4  $R_s'=3\Omega$  のときの解析結果

っている。

図3と図4を比較すれば明らかなように、波形は非常によく一致しており、本論文で行った理論的な解析が基本的に正しいことを示している。本解析の中心である過渡電流について詳細に比較すると、電源再投入直後の突入電流値は実測値よりも13A程度大きく、抑制抵抗短絡時においては約3A大きいことがわかる。この原因としては、2.1節に述べた解析上の仮定にあると考えられる。なかでも電動機の回路定数が磁気飽和等の無視により真値と多少異なると予想されること、および電源電圧の変動を無視していることがあげられる。電源再投入および抑制抵抗短絡の数サイクル後、実測と解析の両結果は数値的にほとんど一致してくることおよび誤差の顕著な部分では電圧変動、この場合には電源電圧の低下を無視した解析結果の方が数値的に大きくなっていることなどから、特に、電圧変動の無視が大きく影響していると考えられる。

#### 4. む す び

三相予備励磁式 Y- $\Delta$  始動法に用いる抑制抵抗を決定するために必要な突入電流の解析を瞬時値対称座標法によって行った。解析は電動機などに関していくつかの仮定を前提に進められたが、解析結果は実測値によく一致し、本解析過程が基本的に正しいものであることが明らかになった。また、本解析法では抑制抵抗の値を変えるのが簡単であるのはもちろんのこと、残留電圧や電源電圧の位相の変更も行えるので本研究の解析手段として非常に適していることも明らかになった。

最後に、日頃御指導賜わる本学工学部高木亀一教授、松瀬貢規教授に謝意を表します。また、計算機使用にあたって本学計算センターの皆様の御協力を得たことに深く感謝します。

文 献

- 1) 三木他：「運転中における誘導電動機の変周波電源への再投入による過渡トルク特性」電学論 100-B, 4, p. 213 (昭55-4)
- 2) C. F. Landy: "The prediction of transient torques produced in induction motors to rapid reconnection of the supply". SAIEE 63-7, pp. 178-185, (1972)
- 3) 三木他：「誘導電動機の子備励磁式 Y- $\Delta$  始動法における子備励磁の効果」昭和55年電気学会全国大会, No. 643.
- 4) 三木他：「子備励磁式 Y- $\Delta$  始動装置の試作」昭和57年電気学会全国大会, No. 729.
- 5) W. V. Lyon: "Transient analysis of alternating-current machinery". (1954) John Wiley & sons.
- 6) 猪狩：「電気機械理論」p. 144 (昭52-1)) コロナ社