

# 制御系シミュレータを用いた電動機加速制御に関する研究<sup>†</sup>

小 西 務\*

**ABSTRACT** In a case of motor application such that acceleration and deceleration is frequently repeated, one of main technical problems is to decrease this acceleration and deceleration time. An equation of motion is showing that the rate of increase of motor speed proportions to a difference of motor torque and load torque. Therefore, when motor torque in an acceleration decreases, the rate of increase of motor speed decreases and acceleration time increases. On the other hand, acceleration time increases when a motor load increase during an acceleration of a motor. On the assumption that moment of inertia of a motor is constant, acceleration time is decided by the values of motor torque and load torque. Relationship that exists between these values was able to determine quantity by analyzing the control characteristics systematically. The relation between motor torque, load torque and acceleration time is being calculated by using a digital dynamics simulator. As a result, the graphs of relation between the reduction value of motor torque and the decreased acceleration time are presented.

## 1. 緒 言

加減速あるいは可逆運転を繰り返す電動機応用、例えばエレベータ、ロボット、人工心臓等においては、電動機の加減速時間を短縮することが、主たる技術的課題の1つとなっている。このような場合、電動機定格あるいは電力用半導体換器容量を限界状態で使用するため、電動機は定トルク制御あるいは定電流制御して加減速運転される<sup>1)~4)</sup>。ところが、速度変化すなわち速度の増加および減少期間に、トルクあるいは電流が一定値に保持されないと、その変化量の時間積分値に比例して加減速時間が延長され、その延長時間は負荷の種類にも関係している。そこで、これらの間の関係を明らかにするため、定トルク負荷、粘性負荷およびそれらの複合負荷の各場合について、トルク—速度特性、すなわち静特性と加減速時間の関係を系統的に解析し、定量化している<sup>5),6)</sup>。次いで、電機子降下補償電圧制御方式静止レオナード速度制御系を例にとり、ブロック線図を基本とし、すでに開発済みのデジタル・ダイナミクス・シミュレータ<sup>7),8)</sup>を用いて、上記の各負荷について、静特性と加速時間の関係を計算し、グラフ化している。その結果、静特性の改

善の程度と、加速時間短縮の関係を明らかにすることができたので、これらについて取りまとめる。

## 2. トルク—速度特性と応答の関係

急速加減速を必要とする機械、例えばロボット等では、電動機の定格およびサイリスタ変換機容量の有効利用等の観点から、種々の研究が進められているが<sup>9)~13)</sup>、マイナーループのトルク制御系により定トルク加速をし、メジャーループの速度制御系により定速運転するのが一般的である<sup>14)</sup>。このような制御系では、図1に示すトルク—速度特性曲線②—③—④に対し、

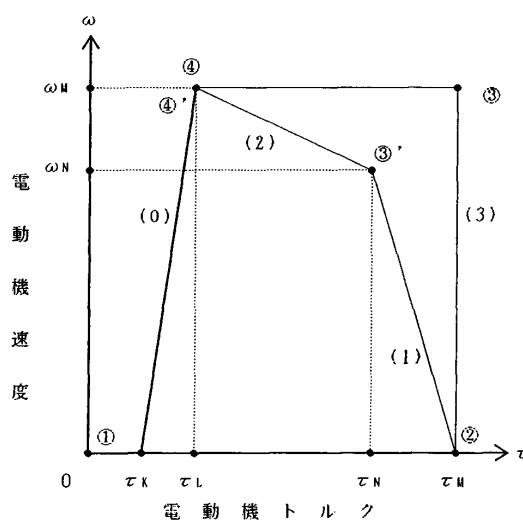


図1 トルク—速度特性

A Study of Motor Acceleration Control Using Digital Dynamics Simulator. By Tsutomu Konishi (Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University).

\*大阪電気通信大学工学部

<sup>†</sup>1990年11月30日受付・1991年8月21日再受付

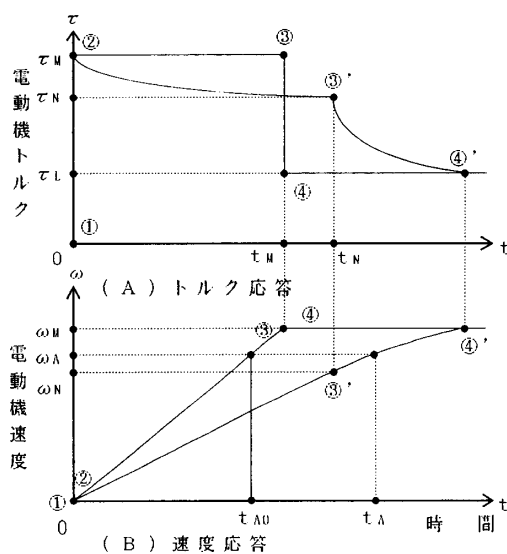


図2 インディシャル応答

②—③'のようなトルク変動および③'—④'のような速度変動がある場合には、加速時間が増加する。その理由を、図2を用いて説明する。

いま、電動機のトルク—速度特性が、図1に示す②—③—④のように、定トルク特性および定速度特性の場合、トルク応答は図2(A)の①—②—③—④のようになり、速度応答は図2(B)の①—②—③—④のようになる。この場合を、定トルク加速という。

これに対し、電動機のトルク—速度特性が、図1に示す②—③'のように変動トルク特性、および③'—④'のように変動速度特性の場合、トルク応答は図2(A)の①—②—③'—④'のようになり、また速度応答は図2(B)の①—②—③'—④'のようになる。この場合を、変動トルク加速という。

以上の理由により、比較速度を $\omega_A$ とした場合、定トルク加速の場合の加速時間 $t_{A0}$ に比し、変動トルク加速の場合の加速時間 $t_A$ が大きくなる。

両加速時間を比較する場合、図2のトルク応答①—②および速度応答①—②の期間は、両者の加速時間に差がなく、かつトルク制御系がマイナーループで比較的高速応答するため、加速時間 $t_{A0}$ に比し省略できる程度の短時間であるので、この時間を零と仮定する。したがって、両加速の加速時間の差は、大部分トルク制御期間②—③と②—③'の差異に起因すると考えられる。そこで、この差異を定量化するために、特性解析する。

### 3. 加速特性解析

急速加減速を必要とする電動機負荷は、定トルク負

荷、粘性トルク負荷あるいはそれらの複合負荷が多いので、これらを対象とする。電動機のトルク—速度特性と運動方程式から、時間に関する速度式およびトルク式を求める。この場合、変動トルク加速と定トルク加速に大別して解析を進める。さらに、変動トルク加速を、トルク変動区間と速度変動区間に分ける。

#### 3.1 変動トルク加速に関する解析

##### (1) トルク変動区間

図1のトルク変動特性(1)において、2点の座標 $(\tau_N, \omega_N)$ ,  $(\tau_M, 0)$ を通る、トルク $\tau_1$ と速度 $\omega_1$ の間の直線の方程式は、次式となる。

$$\omega_1 = \omega_N(\tau_M - \tau_1) / (\tau_M - \tau_N) \quad (1)$$

上式をトルク $\tau_1$ について解くと、次式となる。

$$\tau_1 = \tau_M - (\tau_M - \tau_N)\omega_1 / \omega_N \quad (2)$$

図1の負荷特性(0)において、2点の座標 $(\tau_K, 0)$ ,  $(\tau_L, \omega_M)$ を通る直線の方程式は、次式となる。

$$\tau_0 = (\tau_L - \tau_K)\omega_0 / \omega_M + \tau_K \quad (3)$$

したがって、運動方程式は、次式のようになる。

$$\omega_1 = (1/J) \int (\tau_1 - \tau_0) dt, \quad (0 \leq t \leq t_N) \quad (4)$$

ここに、 $J$  = 慣性係数、 $t$  = 時間。

式(2)および式(3)を式(4)に代入した後、微分して等式を整理すると、次式を得る。

$$J \frac{d\omega_1}{dt} + \left\{ \frac{\tau_M - \tau_N}{\omega_N} + \frac{\tau_L - \tau_K}{\omega_M} \right\} \omega_1 = \tau_M - \tau_K \quad (5)$$

上式をラプラス変換した後、 $\omega_1$ について解くと、次式となる。

$$\omega_1(s) = K_1 / (1 + T_1 s) \quad (6)$$

ここに、

$$K_1 = (\tau_M - \tau_K) / \tau_1$$

$$T_1 = J / \tau_1$$

$$\tau_1 = (\tau_M - \tau_N) / \omega_N + (\tau_L - \tau_K) / \omega_M$$

上式を逆ラプラス変換すると、次式を得る。

$$\omega_1 = K_1 [1 - \exp(-t/T_1)] \quad (7)$$

上式を式(2)に代入して整理すると、次式を得る。

$$\tau_1 = \tau_M - [(\tau_M - \tau_L)K_1 / \omega_N] \times [1 - \exp(-t/T_1)] \quad (8)$$

式(7)において、 $t = t_N$ のとき、 $\omega_1 = \omega_N$ とすると、加速時間 $t_N$ は次式となる。

$$t_N = T_1 \log(1 - \omega_N / K_1)^{-1} \quad (9)$$

##### (2) 速度変動区間

図1の速度変動特性(2)よりトルク $\tau_2$ と速度 $\omega_2$ の間の関係式は次式となる。

$$\omega_2 = (\omega_M - \omega_N)(\tau_N - \tau_2) / (\tau_N - \tau_L) + \omega_N \quad (10)$$

上式を $\tau_2$ について解くと、次式となる。

$$\tau_2 = (\tau_N - \tau_L)(\omega_N - \omega_2) / (\omega_M - \omega_N) + \tau_N \quad (11)$$

この場合の運動方程式は、次式のようになる。

$$\omega_2 = (1/J) \int (\tau_2 - \tau_0) dt + \omega_N, \quad (t \geq t_N) \quad (12)$$

式(6)～式(9)を求めた場合と同様の手法により、式(10)～式(12)から、次の式(13)および式(14)を得る。

$$\omega_2 = K_2 [1 - \exp\{- (t - t_N) / T_2\}] + \omega_N \quad (13)$$

$$\tau_2 = (\tau_L - \tau_N) / (\omega_M - \omega_N) \times K_2 [1 - \exp\{- (t - t_N) / T_2\}] + \tau_N \quad (14)$$

ここに、

$$K_2 = [\tau_N - \tau_K - (\tau_L - \tau_K)\omega_N / \omega_M] / \tau_2$$

$$T_2 = J / \tau_2$$

$$\tau_2 = (\tau_N - \tau_K) / (\omega_M - \omega_N) + (\tau_L - \tau_K) / \omega_M$$

式(13)では、電動機速度  $\omega_2$  が一定値となるのに、無限大の時間を必要とするので、比較速度  $\omega_A (< \omega_M)$  を導入する。すなわち、式(13)において、 $\omega_2 = \omega_A$  のとき、 $t = t_A$  とすると、加速時間  $t_A$  は次式となる。

$$t_A = t_N + T_2 \log [1 - (\omega_A - \omega_N) / K_2]^{-1} \quad (15)$$

### 3.2 定トルク加速に関する解析

図1の定トルク特性(3)よりトルク  $\tau_3$  と速度  $\omega_3$  の関係式および運動方程式は次式となる。

$$\tau_3 = \tau_M, \quad (\omega_3 \text{ に対し独立}) \quad (16)$$

$$\omega_3 = (1/J) \int [\tau_M - \{(\tau_L - \tau_K)\omega_3 / \omega_M + \tau_K\}] dt \quad (0 \leq t \leq t_M) \quad (17)$$

前節と同様の方法により、上式を解いて、次式を得る。

$$\omega_3 = K_3 [1 - \exp(-t / T_3)] \quad (18)$$

ここに、

$$K_3 = \omega_M (\tau_M - \tau_K) / (\tau_L - \tau_K)$$

$$T_3 = J \omega_M / (\tau_L - \tau_K)$$

上式において、 $\omega_3 = \omega_A$  のとき、 $t = t_{A0}$  とすると、加速時間  $t_{A0}$  は次式のようになる。

$$t_{A0} = T_3 \log (1 - \omega_A K_3)^{-1} \quad (19)$$

### 3.3 加速時間差比率

変動トルク加速の場合の加速時間  $t_A$  と、定トルク加速の場合の加速時間  $t_{A0}$  の時間差と、トルク加速時間  $t_{A0}$  との比率、すなわち加速時間差比率  $r$  は、式(9)、式(15)および式(19)から、次式のようになる。

$$r = (t_A - t_{A0}) / t_{A0} = \frac{k}{\delta_N / (1 - \varepsilon_N) + \delta_K - \delta_L} \times \log \left[ 1 - \frac{\delta_N + (\delta_K - \delta_L)(1 - \varepsilon_N)}{\delta_K} \right]^{-1}$$

$$+ \frac{k}{(\delta_L - \delta_N) / \varepsilon_N + \delta_K - \delta_L} \times \log \left[ 1 - \frac{(\delta_L - \delta_N) / \varepsilon_N + \delta_K - \delta_L}{\delta_K - \delta_L - (\delta_K - \delta_L)(1 - \varepsilon_N)} \times (1 - \varepsilon_A / \varepsilon_N) \right]^{-1} - 1 \quad (20)$$

ここに、

$$k = \frac{\delta_K - \delta_L}{\log [1 - (\delta_K - \delta_L)(1 - \varepsilon_A) / \delta_K]^{-1}}$$

トルク変動率  $\delta_N = 1 - \tau_N / \tau_M$ 、速度変動率  $\varepsilon_N = 1 - \omega_N / \omega_M$ 、定加速トルク率  $\delta_L = 1 - \tau_L / \tau_M$ 、粘性加速トルク率  $\delta_K = 1 - \tau_K / \tau_M$ 、比較速度率  $\varepsilon_A = 1 - \omega_A / \omega_M$ 。

### 3.4 単一トルク負荷の加速時間差比率

#### (1) 粘性トルク負荷

粘性トルク負荷の場合の加速時間差比率  $r_B$  は、式(20)において、 $\tau_K = 0$  すなわち  $\delta_K = 1$  と置くことにより、次式のようになる。

$$r_B = \frac{k_B}{\delta_N / (1 - \varepsilon_N) + 1 - \delta_L} \times \log [1 - \{\delta_N + (1 - \delta_L)(1 - \varepsilon_N)\}^{-1}] + \frac{k_B}{(\delta_L - \delta_N) / \varepsilon_N + 1 - \delta_L} \times \log \left[ 1 - \frac{\delta_L - \delta_N + (1 - \delta_L)\varepsilon_N}{1 - \delta_L - (1 - \delta_L)(1 - \varepsilon_N)} \times (1 - \varepsilon_A / \varepsilon_N) \right]^{-1} - 1 \quad (21)$$

ここに、

$$k_B = \frac{1 - \delta_L}{\log [1 - (1 - \delta_L)(1 - \varepsilon_A)]^{-1}}$$

#### (2) 定トルク負荷

定トルク負荷の場合の加速時間差比率  $r_C$  は、3.1節および3.2節において、 $\tau_K \rightarrow \tau_L$  とすることにより、次式のようになる。

$$r_C = \frac{1 - \varepsilon_N}{1 - \varepsilon_A} \frac{\delta_L}{\delta_N} \log \left( 1 - \frac{\delta_N}{\delta_L} \right)^{-1} + \frac{\varepsilon_N}{1 - \varepsilon_A} \left( 1 - \frac{\delta_N}{\delta_L} \right)^{-1} \log \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_A} - 1 \quad (22)$$

### 3.5 加速時間差比率のグラフ表示

#### (1) 定トルク負荷

式(22)において、定加速トルク率  $\delta_L = 0.5$ 、比較速度率  $\varepsilon_A = 0.1$  とし、速度変動率  $\varepsilon_N$  を助変数としたとき、トルク変動率  $\delta_N$  と加速時間差比率  $r_C$  との関係を図3に書くと、図3のようになる。

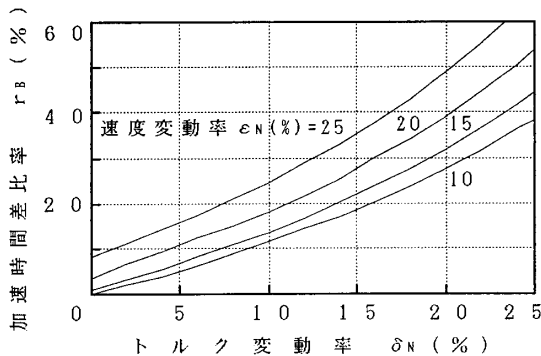
#### (2) 粘性トルク負荷

式(21)において、定加速トルク率  $\delta_B = 0.5$ 、比較速

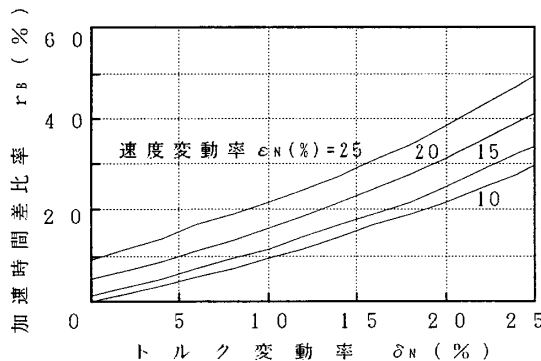
度率  $\varepsilon_A=0.1$ とし、速度変動率  $\varepsilon_N$ を助変数としたとき、トルク変動率  $\delta_N$ と加速時間差比率  $r_K$ との関係をグラフに書くと、**図4**のようになる。

(3) 粘性トルク負荷および定トルク負荷

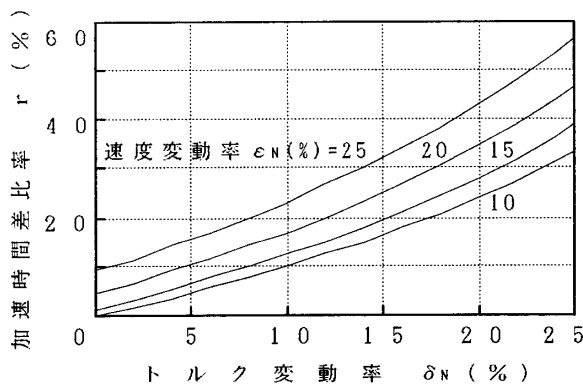
式(20)において、定加速トルク率  $\delta_L=0.5$ 、粘性加速トルク率  $\delta_K=0.75$ 、比較速度率  $\varepsilon_A=0.1$ とし、速度変動率  $\varepsilon_N$ を助変数としたとき、トルク変動率  $\delta_N$ と加速時間差比率  $r$ との関係をグラフに書くと、**図5**のようになる。



**図3** トルク変動率と加速時間差比率 (定トルクの場合)



**図4** トルク変動率と加速時間差比率 (粘性トルクの場合)

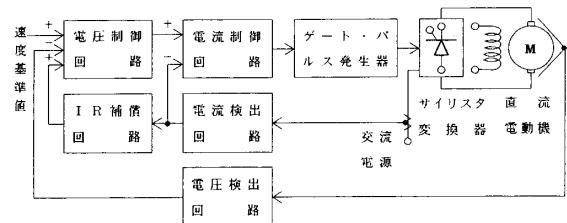


**図5** トルク変動率と加速時間差比率 (定トルク+粘性トルクの場合)

以上の結果、速度変動率  $\varepsilon_N=0.25$ 、トルク変動率  $\delta_N=0.20$ における、各加速時間差比率を比較すると、 $r_C=0.488$ 、 $r_B=0.384$ および  $r=0.429$ となる。すなわち、その大小関係は、 $r_C > r > r_B$ となっている。

4. 制御系の構成<sup>15)</sup>

電機子降下を補償した電圧制御方式により、直流電動機を速度制御する場合の、速度制御系の回路構成を**図6**に示す。同図において、制御系は大別すると、主回路および制御回路から構成されている。主回路は直流電動機、サイリスタ変換器から構成されている。制御回路は主として電流制御回路、ゲートパルス発生器、電流検出回路等からなる電流制御系（以下ACR略称する）をマイナ・ループとし、電圧制御回路、電圧検出回路等をメジャ・ループとする電圧制御系（以下AVRと略称する）からなる。さらに、電機子電流を正帰還することにより、電機子電圧降下（以下電機子降下あるいはIRと略称する）を補償するIR補償系から構成されている。ただし、同図にはサイリスタ変換器、制御回路は正転側だけ示してある。可逆運転、すなわち四象限運転する場合には逆転側の回路が必要であるが、同図にはそれが省略されている。



**図6** 速度制御系の構成

5. 制御系のブロック線図<sup>10),17)</sup>

本制御系のブロック線図構築に関係式は、すでに発表済みである。そのため、ここではそれらの関係式をまとめ、状態方程式で表現することにする。

図6の速度制御系において、ラプラス変換された直流電動機を速度を  $\omega(s)$ 、電機子電流を  $I_a(s)$ 、電機子電圧を  $V_a(s)$ 、電流基準値を  $E_{CR}(s)$ 、電圧基準値を  $\omega_R(s)$ 、負荷電流を  $I_L(s)$ とすると、次の状態方程式が成立つ。

$$sX(s) - x_0 = AX(s) + BU(s) \tag{23}$$

ここに、

$$sX(s) = [sE_R(s) sE_{CR}(s) sVa(s) sIa(s) s\omega(s)]^T$$

$$X(s) = [E_R(s) E_{CR}(s) Va(s) Ia(s) \omega(s)]^T$$

$$U(s) = [\omega_R(s) I_L(s)]^T$$

$s$  = ラプラス演算子,  $T$  = 転置マトリックス,

$A = [a_{ij}]$ , ( $a_{ij} = i$  行  $j$  列の行列要素)

$$a_{11} = -1/Tv, a_{14} = H_D T_D,$$

$$a_{21} = Kv/Tv, a_{22} = -1/Tv,$$

$$a_{23} = -KvHv/Tv,$$

$$a_{33} = T_{C2} T_C / T_E,$$

$$a_{34} = (T_{C2} / T_E - 1) H_C K_{GT} / T_{C1},$$

$$a_{35} = Ke T_{C2} T_C / T_E,$$

$$a_{43} = K_E / T_E, a_{44} = -1 / T_E,$$

$$a_{45} = -Ke K_E / T_E,$$

$$a_{54} = -K / J,$$

$$T_C = K_{GT} Ke H_C / T_{C1}.$$

上記以外は  $a_{ij} = 0$

ここに,  $K_t$  = トルク定数,  $J$  = 慣性能率,  $R_a$  = 電機子回路抵抗,  $L_a$  = 電機子回路インダクタンス,  $K_E = 1/R_a$ ,  $T_E = L_a/R_a$ ,  $Ke$  = 逆起電力定数,  $T_{C1}$ ,  $T_{C2}$  = 電流制御回路の時定数,  $H_C$  = 電流帰還定数,  $K_{GT}$  = ゲートパルス発生器入力電圧とサイリスタ変換器出力電圧間の利得,  $K_V$  および  $T_V$  = 電圧制御回路の利得および時定数,  $H_V$  = 電圧帰還定数,  $H_D = IR$  補償定数,  $T_D$  = 安定化時定数.

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & (1+T_D s)/T_D \\ -K_t/J & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

ただし, 電機子電流制御回路および電圧制御回路の伝達関数は, 次式に示すように比例積分および一次遅れに選定している.

$$G_c(s) = (1 + T_{C2}s) / T_{C1}s \quad (24)$$

$$G_v(s) = Kv / (1 + Tv s) \quad (25)$$

電圧制御系の基準電圧と, 電動機電機子電圧の帰還値の差が大きい場合, すなわち加減速期間に電流を制限し, 電動機定格, 電力用半導体変換器容量等を最大限に利用するため, 電圧制御回路に飽和要素を設け, 次式に示すような飽和特性を付与する.

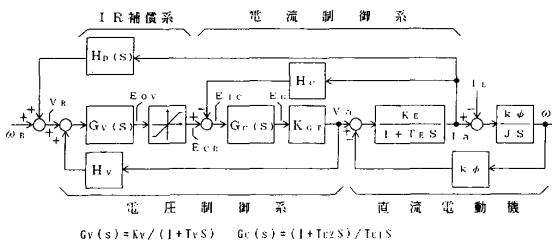


図7 制御系のブロック線図

$$E_{CR} = |IaHc|, (Ia < Ias) \quad (26)$$

$$E_{CR} = |IaGs - (1/Gs - 1)IasHc|, (Ia \geq Ias) \quad (27)$$

ただし,  $Ias$  = 加減速電機子電流,  $G_s$  = 飽和部分の利得.

以上, 式(23)において, 初期値  $X_0 = 0$  とし, 式(23) ~ 式(27)を用いると, ブロック線図は図7に示すように表される.

## 6. 速度制御系の特性解析<sup>18)</sup>

「3. 加速特性解析」で解析した加速時間差比率の計算に必要な座標を, 図7の速度制御系について求める. トルク  $\tau_M$  は, 電動機電流  $Ia$  に比例するので, トルクの代わりに計測の容易な電機子電流を用いる. ここで, トルク-速度特性, すなわち図8に示す電機子電流-速度特性を用いて解析する. ただし, 電機子反作用は無視する.

### 6.1 トルク変動および速度変動のある場合

定常状態のブロック線図は, 図7のブロック線図において,  $s \rightarrow 0$  と置くことにより図9のようになる. 同図において, 電機子電流帰還量  $Ia H_C$  と, 飽和要素の折れ点の飽和電圧  $E_S$  に対する相対関係より, 電動機の電機子電流-速度特性は次のようにして求めることができる.

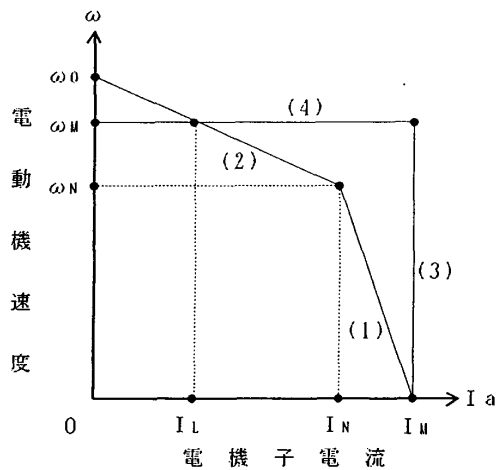


図8 電機子電流-速度特性

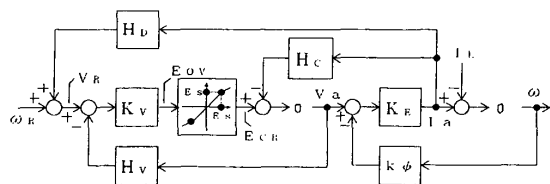


図9 定常状態のブロック線図

(1)  $IaH_C \geq E_S$  (電流変動区間)

図9のブロック線図において、飽和要素の動作点が飽和部分にある場合、電機子電流  $Ia$  に対する電動機速度  $\omega_1$  の関係式を求める。この関係式は、図9のブロック線図において、電機子電流  $Ia$  を起点とし、伝達関数  $H_C - K_V - H_V - k\phi$  を通過し、 $\omega$  を終点とする演算により、電機子電流  $Ia$  と電動機速度  $\omega_1$  の関係式は次のようになる。

$$\omega_1 = [\omega_R - R_1 Ia + R_N I_N] / k\phi H_V \quad (28)$$

ここに、

$$R_1 = H_V / K_E + H_C / G_S K_V$$

$$R_N = (1 / G_S - 1) H_C / K_V$$

上式の概形を、図8上(1)に示す。上式において、 $Ia = I_M$  のとき、 $\omega_1 = 0$  とすると、次式を得る。

$$I_M = (\omega_R - R_N I_N) / R_1 \quad (29)$$

さらに、 $Ia = I_N$  のとき、 $\omega_1 / \omega_N$  とすると、次式を得る。

$$\omega_N = (\omega_R - R_2 I_N) / k\phi H_V \quad (30)$$

ここに、 $R_2 = H_V / K_E + H_C / K_V$

以上、式(29)および式(30)より、電機子電流—電動機速度特性上の座標  $(I_M, 0)$   $(I_N, \omega_N)$  が決定する。

(2)  $IaH_C \leq E_S$  (速度変動区間)

図9のブロック線図において、飽和要素の動作点が線形部分にある場合、前述の(1)電流変動区間の方法と同様に解析する。電機子電流  $Ia$  に対する電動機速度  $\omega_2$  の関係式は、次のようになる。

$$\omega_2 = (\omega_R - R_2 Ia) / k\phi H_V \quad (31)$$

ここに、 $\omega_R = k\phi H_V \omega_0$ 、 $\omega_0$  = 零電流速度。

上式のグラフの概形を、図8上(2)に示す。上式において、 $Ia = I_L$  のとき、 $\omega_2 = \omega_M$  とすると、次式を得る。

$$\omega_M = (\omega_R - R_2 I_L) / k\phi H_V \quad (32)$$

さらに、式(31)において、 $Ia = I_N$  のとき、 $\omega_2 = \omega_N$  とすると、式(30)を満足する。

以上、式(32)より、電機子電流—電動機速度特性上の座標  $(I_L, \omega_M)$  が決定する。

6.2 トルク変動および速度変動のない場合

(1)  $IaH_C \geq E_S$  (定電流区間)

飽和要素の飽和部分の出力が電流基準値となるので、飽和要素の利得  $G_S = 0$  とすると、電機子電流—電動機速度特性が、図8(3)の特性となる。このとき、次式が成り立つ。

$$Ia = I_M \quad (33)$$

すなわち、電動機速度の変化に対し、定電流性が保持される。

(2)  $IaH_C \leq E_S$  (定速度区間)

IR補償により、速度変動率を改善し、式(31)において  $R_2 Ia = 0$  とする。この場合、図8(4)の特性となり、次式が成り立つ。

$$\omega_1 = \omega_M \quad (34)$$

このときの速度基準値  $\omega'_R$  (キ $\omega_R$ ) は、次式に示す。

$$\omega'_R = \omega_M \omega_R / \omega_0 = k\phi H_V \omega_M \quad (35)$$

以上、式(33)および式(34)より、図8の特性上の座標  $(I_M, 0)$ 、 $(I_M, \omega_M)$  および  $(0, \omega_M)$  が決定される。したがって、6.1および6.2で得られる各座標を式(20)~式(22)に代入することにより、加速時間差比率が計算できる。

7. 加速時間差比率の計算

7.1 シミュレータによる計算

パーソナル・コンピュータを用いて、ブロック線図に表現された制御系の過度応答を計算できる、デジタル・ダイナミックス・シミュレータをすでに開発した<sup>19)~21)</sup>。このシミュレータを用いて、具体的な制御系を対象に、加速時間を計算する。

図7のブロック線図において、特性計算に用いる各伝達関数の利得および時定数を表1に示す。ただし、同表の数値は、変動トルク加速の場合を示す。定トルク加速の場合には、 $G_S = 0$  および式(31)で  $R_2 = 0$  とする。

各定常負荷電流に対するインディシャル応答を、シ

表1 制御系の定数

分類	制御定数	
主回路 定数	界磁定数 $k\phi = 0.275$ (V/rad·sec <sup>-1</sup> )	
	慣性能率 $J = 0.00420$ (Nm)	
	電機子抵抗 $Ra = Ke^{-1} = 2.36$ ( $\Omega$ )	
	電氣的時定数 $Te = 0.00557$ (s) サイリスタ変換器定数 $Kcr = 10.6$ (V/V)	
電流制御系 定数	$Gc(s) = (1 + Tczs) / Tc1s$ 時定数 $Tc1 = 0.0298$ (s), $Tcz = 0.00557$ (s) 電流帰還定数 $Hc = 0.642$ (V/A)	
	電圧制御系 定数	$Gv(s) = Kv / (1 + TvS)$ 電圧利得 $Kv = 30.0$ (V/V) 時定数 $Tv = 0.121$ (s) 電圧帰還定数 $Hv = 0.138$ (V/V) 飽和特性利得 $Gs = 0.00256$ (V/V)
		IR補償系 定数
フットバック 回路あり $Hd(s) = Hd / (1 + TdS)$ IR補償定数 $Hd = 0.336$ (V/A) 時定数 $Td = 1.13$ (s)		

ミュレータを用いて計算し、変動トルク加速時間と定トルク加速時間から、加速時間差比率を計算している。ただし、比較速度比率  $\varepsilon_d = 0.1$  とする。この結果、定トルク負荷、粘性トルク負荷および両者の複合トルク負荷の場合の加速時間比率を、それぞれ図10、図11および図12に示す。ただし、複合トルク負荷の場合、定常状態のとき、定トルク負荷と粘性トルク負荷は同値とする。

## 7.2 解析式による計算

前章の解析において得られた諸式(29)、(30)(32)～式(34)から得られた数値を、式(22)に代入し、加速時間差比率を計算する。その結果、定トルク負荷、粘性トルク負荷および両者の複合トルク負荷の場合の加速時間差比率を、それぞれ図10、図11および図12に理論値として示す。

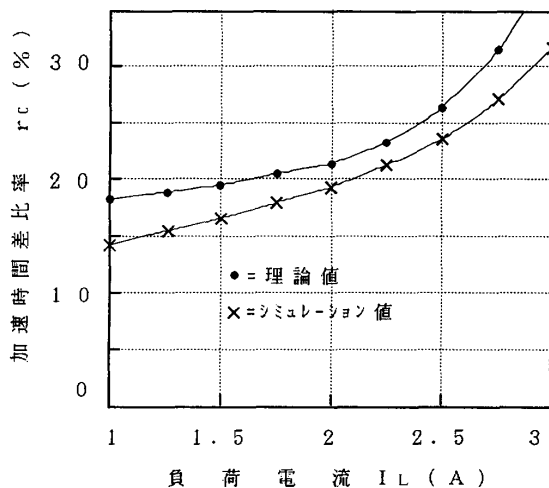


図10 負荷電流と加速時間差比率 (定トルクの場合)

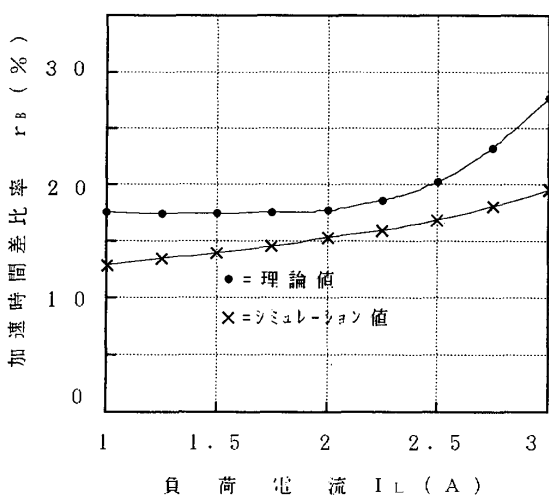


図11 負荷電流と加速時間差比率 (粘性トルクの場合)

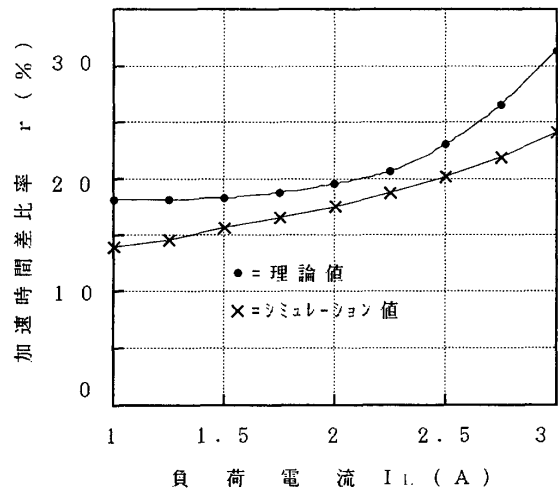


図12 負荷電流と加速時間差比率 (定トルク+粘性トルクの場合)

以上の結果、いずれの場合も負荷電流が2A近傍で、シミュレーション値と理論値は比較的近似しており、相対誤差は各負荷トルクにおいて約1.94～2.47%程度で、ほぼ最小値を示す。負荷電流が小さくなるほど誤差が増加するのは、加速時間が短くなるため、変動負荷の場合の加速電流波形の非線形性に基づく計算誤差の増加が影響するためと考えられる。また、負荷電流が大きくなるほど誤差が増加するのは、加速電流が小さくなるため、変動負荷時の加速時間に基づく計算誤差が、影響するためと考えられる。

## 8. 結 言

以上の検討事項をまとめると次のようになる。

- (1) 加速特性を解析し、電動機のトルク-速度特性と運動方程式から、時間に関する速度式およびトルク式を求め、定トルク負荷、粘性トルク負荷およびそれらの組合せ負荷のおおのについて、トルク変動率と加速時間差比率のグラフを求め、図3～図5に示した。
- (2) 具体例として、電機子降下補償電圧制御方式静止レオナードを対象として、各負荷トルクについて、負荷電流に対する加速時間差比率のグラフを、デジタル・ダイナミクス・シミュレータを用いて計算し、図10～図12に示した。
- (3) 一方、同一条件において、解析により得られた諸計算式を用いて、加速時間差比率を計算し、図10～図12のグラフ上に同時に示した。
- (4) この結果、負荷電流の全範囲において、加速時間差比率は、シミュレーション結果の方が解析式

による理論値より小さく、負荷電流が2A近傍で約-2.0~-2.5%程度の相対誤差であった。

- (5) 以上により、制御系を含めた電動機のトルク-速度特性すなわち静特性が与えられると、それを用いて、動特性として加速時間差比率が推定できることが解った。

#### 参考文献

- 1) 佐藤・鮎川他：圧延機用 AC ドライブシステム，日立評論，68-8，619 (1986)
- 2) 坂井・高橋他：インバータ制御超高速エレベータの開発，日立評論，70-10，993 (1988)
- 3) H. Inaba et al: "A New Speed-Control System for DC Motors and its Application to Elevators", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-16-2, 179 (1980-5/6)
- 4) K. S. Fn, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee: Robotics, McGraw-Hill (1987)
- 5) 小西：電動機の制御特性と加速時間に関する解析，第32回自動制御連合講演会，1031 (1989-10)
- 6) 小西：電圧制御方式静止レオナード直流電動機の加速特性の改善，平成2電気学会全大，601 (1990)
- 7) 小西：電圧制御方式静止レオナード速度制御系のシミュレーション，シミュレーション，7-3-172 (1988)
- 8) 小西・宮崎：汎用大規模制御系シミュレータの開発，第28回 SICE 学術講演会，JS30-5 (1989-7)
- 9) T. Ohmae et al: "A Microprocessor-Controlled Fast-Response Speed Regulator with Dual Mode Current Loop for DCM Drives", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-16-3, 388 (1980-5/6)
- 10) P. Famouri, J. T. Cathey: "Loss Minimization Control of an Induction Motor Drive", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-27-32 (1991-1/2)
- 11) 長瀬，武藤，菅井：誘導電動機ベクトル制御における電流制御系の一設計法，電気学会論文誌 D，107-12，1491 (1987)
- 12) 浅野，常松，岡田：DC ブラシレスモータの電流制御系の特性評価とその改善法について，電気学会論文誌 D，108-1，1033 (1988)
- 13) 牟田，井口：モデル追従形サーボコントローラによる直流電動機の制御，電気学会論文誌 B，106-B，3-217 (1986)
- 14) T. Konishi・T. Ohmae・K. Kamiyama: "A Performance Analysis of Microprocessor-Based Control Systems Applied to Adjustable Speed Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Applications, IA-16-3, 378 (1980-5/6)
- 15) T. Konishi: "Full Armature Voltage Drop Compensated and Automatic Voltage Regulated Static Leonard Control System", Electrical Engineering in Japan, 107-107 (1987-11/12)
- 16) 小西：全電機子電圧降下補償電圧制御方式静止レオナード制御，電気学会論文誌 D，107-10，1280 (1987)
- 17) 小西：電機子降下補償付き電圧制御方式静止レオナード速度制御，システムと制御，31-12，902 (1987)
- 18) 小西：全電機子降下補償電圧制御方式静止レオナード制御系の特性解析，第29回自動制御連合講演会，3060 (1986-11)
- 19) 堀，茅：他励直流電動機による慣性シミュレーション，シミュレーション，7-1，25 (1988)
- 20) 小西：静止レオナード速度制御系の差分法による特性計算，日本シミュレーション学会第8回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス，13-3 (1989)
- 21) 小西：電機子降下補償付電圧制御方式静止レオナード速度制御系の CAD，日本シミュレーション学会第6回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス，3-3 (1987-6)