

# 小形直流モーターの回転制御に関する研究 (第1報)

## Tachogenerator による回転対電圧変換特性の考察

坂口博巳\*・松山 潔\*\*

(昭和45年5月30日受理)

### 1 ま え が き

D. C. Motor の回転制御にあたり、回転数を制御信号に変換する必要がある。電子制御系では Digital 方式, Analog 方式の変換器が考えられる。後者のなかでも簡便で比較的経費も少なくてすむ Tachogenerator が広く用いられている。これを用いた制御系は一見簡単にみえるが、制御対象である D. C. Motor, 負荷および Tachogenerator などすべて非線形特性を有しており、この系を実際に設計する場合に問題点が多い。これまでにも D. C. Motor を制御対象としての観点から研究している例<sup>1)2)</sup>,あるいはその伝達関数を求める試み<sup>3)</sup>はあるが、制御系全体の中での動作特性の考察はあまりなされていないようである。本稿では小形 D. C. Motor の回転制御系(計測用記録紙の時間送り機構などに用いるもので広範囲の回転制御を必要とする。)において、Tachogenerator (以下 T. Gen. と略記する。)を用いた帰還系について、次の2つの課題に主眼をおき考察した。

課題1 T. Gen. 単独および整流平滑回路、負荷を有する系において回転対検出電圧、回転対内部インピーダンスなどの非直線特性の考察。

課題2 上記帰還系全体の伝達関数表示化。

### 2 本 論

#### 2.1. 帰還系の準備解析

T. Gen. を用いた回転対電圧変換部分を図-1のブロックダイアグラムで示す。解析にあたり、図-1を電気回路的側面から、まず図-2のように書き表わす。その図において1-1'より左の部分を内部インピーダンス  $R_0$  ( $\omega$ ) [回転数  $\Omega$  と T. Gen. の極数で定まる角周波数  $\omega$  の関数で、ここでは実数として取扱う。], 起電力  $v_g(t) = E_m |\sin \omega t|$  (図-4 (a) 参照) とから成る信号源とみなし、さらに、

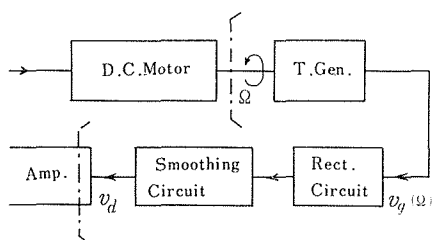


図-1 帰還系のブロックダイアグラム  
Fig.-1 Block diagram of the feedback system for the speed Control of a d. c. motor.

\* 精密工学教室 助手

\*\* 精密工学教室 教授

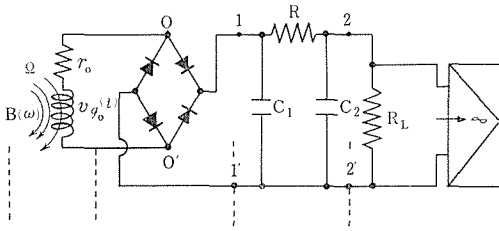


図-2 帰還系の等価回路

Fig.-2 Equivalent circuit of the feedback system.

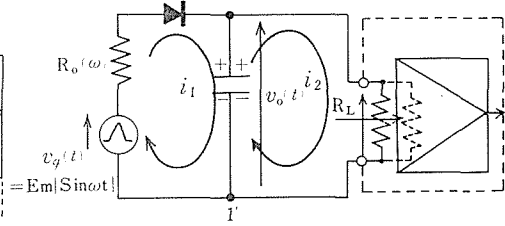


図-3 解析のため簡単化した等価回路

Fig.-3 Simplified equivalent circuit for analytical consideration.

平滑回路をコンデンサのみ\*とし、改めて図-3の系について解析する。

信号源の信号波形は全波整流波形で、その取扱いは、正弦波の半周期分を毎回、新たに印荷するものと考え、半周期毎の過渡現象の連続として取扱ってゆく。

図-3において、時刻  $t = 0$  でコンデンサの電荷  $q_0 = 0$ 、 $t = t_1 = \pi/\omega$ 、 $t = t_2 = 2 \cdot \pi/\omega$ 、 $\dots$ 、 $t = t_n = n \cdot \pi/\omega$  における電荷をそれぞれ  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $\dots$ 、 $q_n$  とする。任意の半周期期間  $[t_{n-1} \sim t_n]$  において、 $t = t_{n-1}$  を時刻の起算点としてそれより時間  $t$  秒経過した時点において次式が成立する。

$$i_1 R_0 + \frac{1}{C} \cdot q = v_g(t) = E_m |\sin \omega t|, \quad (1-1)$$

$$i_1 + i_2 = \frac{dq}{dt}, \quad (1-2)$$

$$i_2 R_L = \frac{q}{C} = v_D(t). \quad (1-3)$$

ただし上式は厳密には図-3のダイオードが導通状態のときのみ成立するのであるが、 $v_D(t)$  が  $E_m$  に比較して非常に小さいとき無視できる。 $v_D(t) = (1/2)E_m$  程度でも影響は少ない。この件に関する詳細は、平滑回路の形による影響、並びに以後の解析過程に表われる諸パラメーター ( $\tau_{eq}$ 、 $\rho(\omega)$ 、 $V_D$  など) の制御特性における感度、あるいは帰還系の特性根などと併せ考察しなければならないので、本論文では省略し、他日を期したい。

(1-1) ~ (1-3) 式より

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot q = \frac{v_g(t)}{R_0} = \frac{E_m}{R_0} |\sin \omega t|, \quad (1-4)$$

ここで、

\* 平滑回路はL形、 $\pi$ 形その他のタイプがあり一般的でないようであるが、厳密には各形で特性は多少異なっても類似の傾向を示す。 $\pi$ 形の計算例では2階の系となるがその根を調べると、一根は一階の系の根に近く、他は零に近い根となる(勿論平滑回路の機能をもつ回路定数のとき)。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_0} \right) = \frac{1}{(R_L // R_0) C} \tag{1-5}$$

(1-5) 式の解を  $q$  とすると  $v_D(t) = (1/C) \cdot q$  であるから,

$$v_D(t) = \frac{1}{C} \left[ \left( C \cdot V_{n-1} + \frac{E_m/R_0}{\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \right) \varepsilon^{-\frac{1}{\tau}t} + \frac{E_m/R_0}{\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \cdot \sin(\omega t - \theta) \right], \tag{1-6}$$

ここで,

$$\theta = \tan^{-1} \tau \omega, \quad \frac{(n-1)\pi}{\omega} \leq t \leq \frac{n\pi}{\omega}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{1-7}$$

(1-6), (1-7) の解の時間経過に対する模様を図-4 (b) に示す。

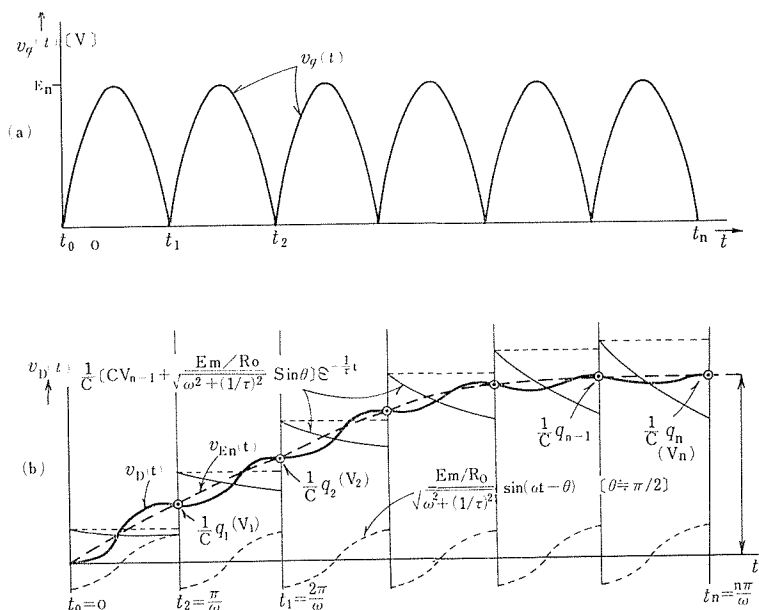


図-4 過渡現象解析の連続波形, 破線は  $t_n$  における値  $V_n$  の点を結んだ特性  
 Fig.-4 Resultant waveforms drawn by the transient analysis. Broken line shows the characteristic of  $V_n$  ( $V_n$  is the value of  $v_D$  at  $t_n$ )

ここでまず問題となるのは電圧  $v_D(t)$  の立上り特性と脈動である。後者については、制御対象が D. C. Motor であるため、その応答特性 (この件については次回報告の予定) から考えて  $\pi/\omega$  秒という短い周期の脈動分は、さ程問題にならない。そこで立上り特性を、 $t = n \cdot \pi/\omega$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) の時点の電圧  $V_n$  の特性から考察する。

式(1-6)[図-4 (b) 参照]より、 $t = t_1 (= \pi/\omega)$ ,  $t_2 (= 2 \cdot \pi/\omega) \dots t_n (= n\pi/\omega)$  にお

る電圧の瞬時値を  $V_1, V_2, \dots, V_n$  とすると,

$$V_n = \frac{1}{C} \left[ \left( C \cdot V_{n-1} + \frac{E_m/R_0}{\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \sin \theta \right) \varepsilon^{-T/\tau} + \frac{E_m/R_0}{\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \sin(\omega T - \theta) \right], \quad (1-8)$$

ここで

$$T = \pi/\omega. \quad (1-9)$$

図-4 (b) から明らかのように,  $V_n$  は最終的に飽和値に達する. その値を  $V_D$  とすると,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_n = V_D, \quad V_n \Big|_{n \rightarrow \infty} = V_{n-1} \Big|_{n \rightarrow \infty} = V_D. \quad (1-10)$$

よって, 最終値  $V_D$  は(1-8)式の  $V_n, V_{n-1}$  に  $V_D$  を代入することにより,

$$V_D = \frac{E_m/R_0}{C\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \cdot \frac{\sin \theta \cdot \varepsilon^{-(T/\tau)} + \sin(\omega T - \theta)}{1 - \varepsilon^{-(T/\tau)}}. \quad (1-11)$$

### 2.2. 帰還系の伝達関数表示について

図-1の帰還系において, T. Gen. と整流回路は非線形要素である. 前者は微小回転範囲を考えれば線形化する事は容易である. 後者は線形回路としての取扱いが困難であるがその前後, すなわち, T. Gen. および平滑回路を含めた特性を考えると線形的取扱いが可能であり, その解析過程については2.1節に示した通りである. 前節において, T. Gen. の部分を回転数に対応する起電力  $e(t)$ , 内部インピーダンスの大きさが  $R_0$  である信号源とみなしたが, 回転数と  $v_{g0}(t)$  (あるいは  $v_g(t)$ ),  $R_0$  の値の関係は実測により比較的容易に求められる. 一方, T. Gen. の内部機構まで立入って解析すると, 数式上は明確のようであるが, 最終的に実測あるいは実測値より算定せねばならないパラメーターが多く, その上インダクタンス, 逆起電力定数などを正確に求める事が困難である. 従って, 前述のように  $v_g(t), R_0$  の実測による方が直接的で, 実測容易で誤差も少ない.

#### ○ブロック線図

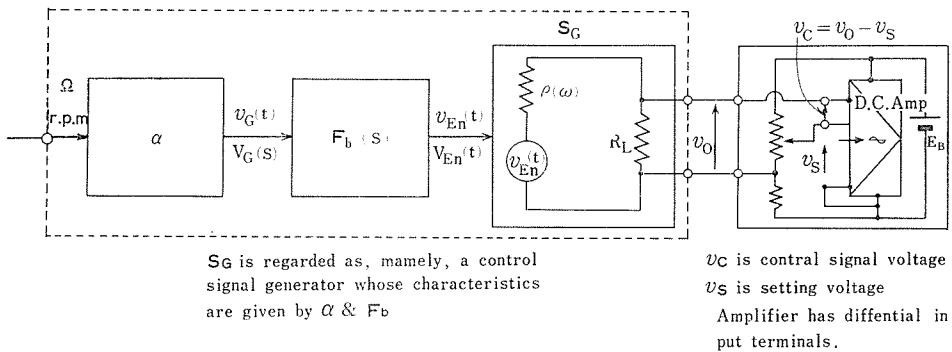


図-5 回転対信号電圧の変換特性を示すブロックダイアグラム

Fig.-5 Schematic diagrams which show the characteristics of the signal voltage vs. speed of a d.c. motor.

以上の考察により帰還系を図—5のようなブロック線図化が可能であろう。

ここで、 $\alpha$ で示した部分は T. Gen. の回転数  $\Omega$  と発生電圧  $v_g$  の特性曲線(図—6 (a))の傾斜から決定され、一定回転領域内では定数 [RPM/Volt] である。又、 $S_G$  と示されたブロック内は回転数と対応する新しい信号源を意味するもので、その特性は2.1節の解析結果から得られ、 $F_b(s)$ の考察とあわせて以下詳論する。

### ○伝達関数 $F_b(s)$ について

2.1節の解析結果を示す図—4を考える。時間の起点  $t_0$  ( $t_0 = 0$  とする)において同図(a)に示す入力  $v_g(t)$  を加えたとき平滑出力の過渡応答が同図(b)の実線で示す  $v_D(t)$  である。ここで入力  $v_g(t)$  の Envelope を考えると、これは大きさ  $E_m$  の Unitstep 電圧とみなす事が出来る\*。これを図—6 (b)に示すように  $v_G(t)$  とする。次に出力  $v_D(t)$  を、 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$  の時点における値  $V_0, V_1, V_2, \dots, V_n$  の点を結んで得られた曲線(破線で示す)を  $v_{En}(t)$  で置き換え、これを上記の  $v_G(t)$  に対する出力応答と考える。そこでこれを図—4 (b) (これを書き直した図—6 (c))の波形から、

$$v_{En}(t) = V_D \left\{ 1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_{eq}}} \right\}. \quad (2-1)$$

とおいてみる。

$t$  (時間) で微分すると、

$$\frac{dv_D(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{eq}} \cdot V_D \varepsilon^{-(1/\tau_{eq})t}. \quad (2-2)$$

今  $t$  を  $\pi/\omega$  の時間間隔で分割してゆき各時点を  $t_0, t_1, \dots, t_n, \dots$  とし、 $t_n$  における差分を考えると

$$\begin{aligned} \frac{dv_D(t)}{dt} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} V_D \left\{ \left( 1 - \varepsilon^{-\frac{1}{\tau_{eq}} \cdot t_{n+1}} \right) - \left( 1 - \varepsilon^{-\frac{1}{\tau_{eq}} \cdot t_{n-1}} \right) \right\} / 2\Delta t, \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\varepsilon^{\frac{1}{\tau_{eq}} \cdot \Delta t} - \varepsilon^{-\frac{1}{\tau_{eq}} \cdot \Delta t}}{2 \cdot \Delta t} \cdot V_D \varepsilon^{-\frac{1}{\tau_{eq}} \cdot n\Delta t} = \frac{1}{\tau_{eq}} \cdot V_D \cdot \varepsilon^{-\frac{1}{\tau_{eq}} n\Delta t}. \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} = \pi/\omega.$$

(1—8)式より、図—4 (b)の破線の  $t_n$  における傾斜は近似的に、

\*  $v_g(t)$  を実際の D. C. Motor の応答と考えると図—6 (b)のように回転出力が Unitstep 状になる事は考えられない。必然的に遅れが存在する。しかしここでは図—5の  $F_b(s)$ の特性を解析する事が目的であるので入力  $v_g$  は直接 Motor の回転と結びつけない。この件に関する実験については後述する。なお Envelope を考えているので通常の Unitstep とは多少異なり応答もなめらかな曲線ではなく脈動分が含まれる。しかしこの脈動分の影響は無視出来る事は既述した。

$$\frac{dV_n}{dt} = \frac{V_{n+1} - V_{n-1}}{2 \cdot \pi / \omega} = \frac{\omega}{2\pi} (V_n - V_{n-2}) \varepsilon^{-\frac{1}{\tau} \cdot \frac{\pi}{\omega}}, \quad (2-4)$$

とおける，ただし，上式で  $n$  は 2 以上とする．(2-4) 式は，さらに (1-8) 式より  $V_2 - V_0, V_4 - V_2, \dots$  を順次計算してゆく事により次式で表わす事が出来る．すなわち，

$$\frac{dV_n}{dt} = \frac{\omega}{2\pi} \cdot V_2 \cdot \varepsilon^{-\frac{1}{\tau} \cdot n dt} . \quad (2-5)$$

ここで(2-3)式と(2-5)式を比較すると両者類似した形をしている．そこで

$$\frac{\omega}{2\pi} \cdot V_2 = \frac{1}{\tau_{eq}} \cdot V_D, \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{eq}} . \quad (2-6)$$

のように対応させると，図-4 (b)の破線(あるいは図-6 (c))は一次遅れ系の Unitstep Response とみなす事が出来る．よって  $v_g(t)$  の Envelope をその入力  $V_{En}(t)$  をその出力とする伝達関数  $F_b(s)$  は次式によって表示する事が出来る．

$$F_b(s) = \frac{V_D}{1 + \tau \cdot s}, \quad (2-7)$$

ここで， $V_D$  は(2-6)式より，

$$V_D = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \tau_{eq} \cdot V_2 = \frac{\omega}{2\pi} \tau \cdot V_2 . \quad (2-8)$$

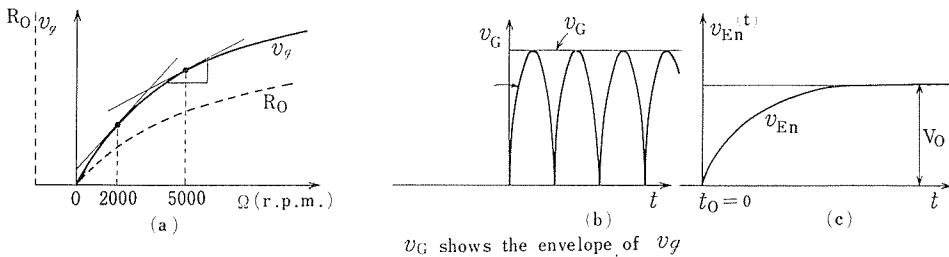


図-6 (a) T.Gen の  $v_g, R_0$  の特性例 (b)  $v_g$  の理想信号 (c)  $v_g$  に対する  $F_b$  の出力応答  
Fig.-6 (a) Characteristics of  $v_g$  and  $R_0$  (b) Ideal signal of  $v_g$  (c) Output response of  $F_b$  for  $v_g$

### ○内部インピーダンス $\rho(\omega)$ について

図-3における内部インピーダンス  $R_0(\omega)$  は T. Gen. 単独のもので，大きさは実測により求められるものである．図-5に示す  $\rho(\omega)$  は，図-3で 2-2' 端子より内部をみた直流信号に対する内部インピーダンスを意味する． $\rho$  の値は実測の結果あるいは解析の結果からもだいたい  $R_0$  の値の 3~4 倍である．この値も  $\omega$  (回転数  $\Omega$  と対応する角周波数) の値により変り，任意の回転領域で定数として用いる．実測あるいは解析の方法は図-3

で、 $R_L \rightarrow \infty$ のときの2-2'の端子電圧を $E_m$ (全波信号波形の最大値 $E_m$ と等しい)とし、つぎに、既知の抵抗負荷 $R$ を負荷して2-2'の端子電圧が $(1/2)E_m$ となる点の抵抗値を $R_m$ とすると、 $\rho = R_m$ の関係から求まる。 $R_m$ を負荷したときの端子電圧(定常値)は(1-11)式より与えられる。それを $(1/2)E_m$ とおくと、

$$\frac{1}{CR_0\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \cdot \frac{\sin\theta \cdot \varepsilon^{-(T/\tau)} + \sin(\omega T - \theta)}{1 - \varepsilon^{-(T/\tau)}} = \frac{1}{2}. \quad (2-9)$$

$1/\tau = (1/c)(1/R_0 + 1/R_m)$ であるから、(2-9)式により $R_m$ を、従って $\rho$ を求める事が可能であるが、解析的に求める事が困難であるので、表-1に数値計算で求めた一例を示す。実測のデータは後にグラフで示す。

表-1

|                            | 例 1  | 例 2       | 例 3  | 例 4       |
|----------------------------|------|-----------|------|-----------|
| $E_m$                      | 8.1  | 8.1       | 3.2  | 3.2       |
| $\Omega$ (RPM)             | 3000 | 3000      | 1000 | 1000      |
| $R_0$ (K $\Omega$ )        | 8.5  | 8.5       | 4.5  | 4.5       |
| $\rho = R_m$ (K $\Omega$ ) | 30   | 24 (22) * | 15   | 14 (12) * |
| $C$ ( $\mu F$ )            | 1    | 10        | 1    | 10        |

\* ( )内の数字は実測値を示す

### 2.3. 実験および検討

#### ○T. Gen. の特性の実測

T. Gen. の供試モデルとして、小形のシンクロンモーター(ヒステリシス形)を使用した。回転数に対する発生起電力、内部インピーダンスの大きさ、平滑出力等の特性を実測した結果を図-7に示す。このシンクロンモーターは回転の方向により特性が多少異なり、発生電圧波形の一方は正弦波形をしており、他方は三角波的な波形(この種の一般的傾向)をしており、本実験においてはこの事についての考察は省略し、前者の方を取扱う。その理由は、2.1および2.2節の解析過程からも分かるように、系全体の非線形性を線形化する際に断片的に線形回路の解析(過渡現象)を施しているため信号波として正弦波を用いた方が検証が容易であり、また単一正弦波を用いる事で、一般性を失なわないからである。歪波形のGenerator出力については、重畳の理を適用すればよい。ただし、ここで歪波出力であるための回転制御の精度への影響についてはまだ検討してないので、その意味でも歪波出力での実験についてはふれない。

図-7の特性から発生起電力 $v_g$ 、内部インピーダンスのいずれも非直線性を示している事が分かる。その線形化のためには、許容誤差範囲内で一定の幅の回転領域を設定する必要がある。本実験データでは全体として緩慢な飽和特性を示しており、500~3,000r. p. m, 3,000~5,000r. p. m, 5,000~10,000r. p. m. の領域を考えると、平均10%内外の線形化誤

差を含む.

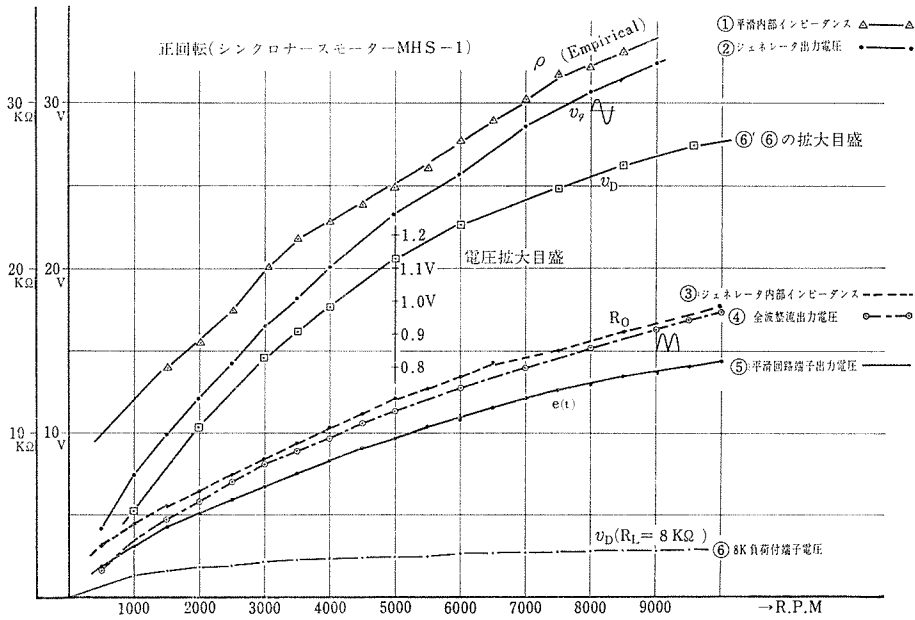


図-7 T.Gen の特性および帰還系の出力特性  
Fig.-7 Characteristic curves, of the speed vs.  $v_g$ ,  $R_0$ ,  $v_D$ ,  $\rho$ .

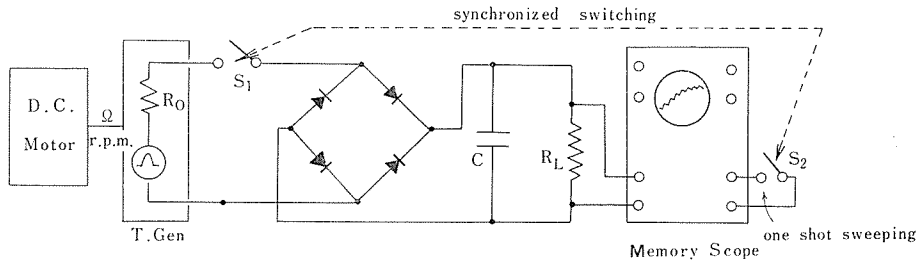


図-8 実験回路  
Fig.-8 The circuit for experiment.

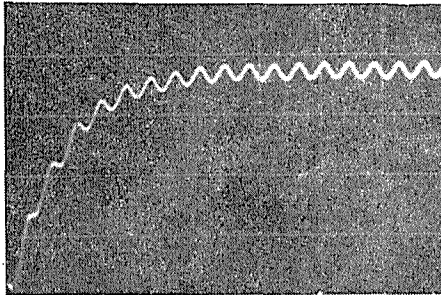
○伝達関数  $F_b(s)$  の検証について

実験回路は図-8に示す. D. C. Motor を任意の回転数近傍におさえ\*, One shot 掃引のスイッチ  $S_1$  と, スイッチ  $S_2$  とをサイリスターで構成し, 同期動作させて現象をとらえた.

\* 開回路の実験なので短時間(観察に要する時間は数秒)でも定回転におさえることはむづかしく厳密には理論通りの実験ではないが誤差は無視出来る程度である. 現象の開始を T.Gen. の発生電圧 0 のときにする事は更に困難であるが, これは時定数  $\tau_{eq}$  および  $v_D(t)$  の最終値  $V_D$  に影響はないので考慮しなかった.



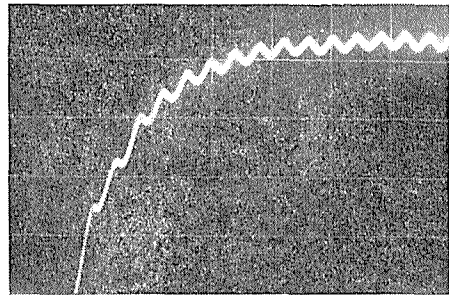
Ex.No. 1



|                |          |                |                  |
|----------------|----------|----------------|------------------|
| Time           | 10ms/Div | Volt.          | 0.5V/ Div        |
| R <sub>O</sub> | 4.5KΩ    | Time           | Th. (τ) 6.9ms    |
|                |          | Const.         | Em. (req) ≐ 7 ms |
| R <sub>L</sub> | 15KΩ     | Final<br>Volt. | Th. (V) 1.65V    |
| C              | 2 μF     |                | Em. ≐ 1.7 V      |

near 1000r.p.m.

Ex.No. 2

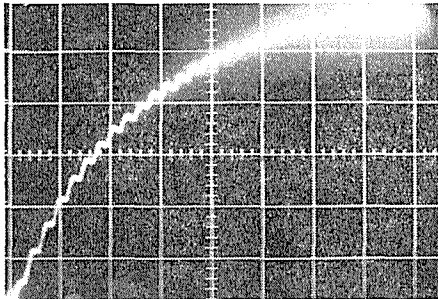


|                |          |                |                   |
|----------------|----------|----------------|-------------------|
| Time           | 10ms/Div | Volt.          | 0.5V / Div        |
| R <sub>O</sub> | 4.5KΩ    | Time           | Th. (τ) 7.6ms     |
|                |          | Const.         | Em. (req) ≐ 8.3ms |
| R <sub>L</sub> | 25KΩ     | Final<br>Volt. | Th. 2.0V          |
| C              | 2 μF     |                | Em. 2.2V          |

near 1000r.p.m.

(Th., Em. imply theoretical and empirical value respectively.)

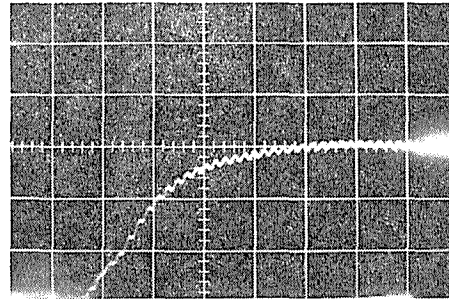
Ex.No. 3



|                |          |                |                |
|----------------|----------|----------------|----------------|
| Time           | 20ms/Div | Volt.          | 0.2V/Div       |
| R <sub>O</sub> | 4.5KΩ    | Time           | Th. (τ) 37ms   |
|                |          | Const.         | Em. (req) 40ms |
| R <sub>L</sub> | 20KΩ     | Final<br>Volt. | Th. (V) 1.25V  |
| C              | 10 μF    |                | Em. 1.2V       |

near 1000r.p.m.

Ex.No. 4



|                |         |                |               |
|----------------|---------|----------------|---------------|
| Time           | 5ms/Div | Volt.          | 0.5V/Div      |
| R <sub>O</sub> | 8.1KΩ   | Time           | Th. (τ) 4.1ms |
|                |         | Const.         | Em. (req) 5ms |
| R <sub>L</sub> | 8 KΩ    | Final<br>Volt. | Th. (V) ≐ 1.8 |
| C              | 1 μF    |                | Em. ≐ 1.5     |

near 3000r.p.m.

図-9 実験結果の写真撮影

Fig.-9 Some examples of photographs of the experimental results.

表一2

| 時 定 数 $\tau$   |           |         |
|--|-----------|---------|
| 回 転 数  | 理 論 値     | 実 験 値   |
| 1000r. p. m  | 43.6 m. s | 45m. s. |
| 2000   | 43.8      | 45      |
| 3000   | 44.7      | 45      |
| 4000   | 46.9      | 46      |
| 5000   | 48.3      | 50      |
| 7000   | 51.2      | 53      |
| 8000   | 52.4      | 53      |
| $C = 10\mu F$ $R_L = 8k\Omega$<br>$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_L} \right)$ , $R_0$ は図-7 |           |         |

この実験により得られた結果について2, 3の例を表一2および図-9の写真に示す. ここに用いられている各種パラメーター  $C, R_L$  等の選定は任意に決めたものである.

以上の結果は, 概ね解析結果と一致している.

### 3 結 言

(1) T. Gen. 単独の非直線性は, 通常一般の通り, 回転対発生起電力は飽和特性を有し, 任意の回転数近傍の一定回転数領域内で線形化を行なった. 供試モデルでは, 例えば,  $\alpha = 3/1000$  [V/r. p. m] (1000 r. p. m  $\pm$  500 r. p. m 領域で),  $\alpha = 2/1000$  [V/r. p. m] (3000r. p. m  $\pm$  500 r. p. m 領域で),  $\alpha = 1.5/1000$  [V/r. p. m] (5000 r. p. m  $\pm$  800 r. p. m 領域で),  $\alpha = 1.2/1000$  [V/r. p. m] (7000r. p. m  $\pm$  1500r. p. m 領域で)

などであった.

(2) 整流回路の非直線性に対しては, これを単独に処理しないで, T. Gen., 平滑回路を含めた帰還系全体として, つぎのように取扱った. T. Gen., 全波整流回路回路から得られる信号を, 内部抵抗  $R_0(\omega)$ , 起電力  $v_g(t) = Em|\sin \omega t|$  の信号源と見なし, 平滑回路の過渡応答出力  $v_D(t)$  は時間間隔  $\pi/\omega$  の区間の過渡現象の連続として, つぎの結果を得た.

$$v_D(t) = \frac{1}{C} \left[ \left( CV_{n-1} + \frac{E_m/R_0}{\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \right) \varepsilon^{-\frac{1}{\tau}t} + \frac{E_m/R_0}{\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \sin(\omega t - \theta) \right]. \quad (1-6)$$

(3) D. C. Motor の応答特性から考え, 脈動分を考慮の外にし, (1-6)式の  $t = n\pi/\omega$  の時点における  $v_D(t)$  の値  $V_n$  を結ぶ  $V_{En}(t)$  に着目し, 結局,  $v_g(t)$  の Envelope  $v_G(t)$  をその入力,  $v_{En}(t)$  をその出力とする伝達函数  $F_b(s)$  を次式で得た.

$$F_b(s) = \frac{V_D}{1 + \tau s} = \frac{\frac{\omega}{2\pi} \cdot V_2}{1 + \tau s}. \quad (2-7)$$

(4) 上記の  $v_{En}(t)$  を起電力, 内部抵抗  $\rho(\omega)$  なる新しい信号源を考え, (1-6)式から導かれる(1-11)式を利用して,  $\rho(\omega)$  を決定する次式を得た.

$$\frac{1}{CR_0\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \cdot \frac{\sin \theta \cdot \varepsilon^{-\frac{T}{\tau}} + \sin(\omega T - \theta)}{1 - \varepsilon^{-T/\tau}} = \frac{1}{2}. \quad (2-9)$$

(5) 前記(1)~(4)の諸結果は, 容易に実測出来る量および回路定数によって定まる. また, これら(1)~(4)によって本帰還系(線形化)のブロック線図を得た(図-5).

上記の結果は実験的(図-9参照)にもかなり良く一致し、本方式の帰還系の設計に有益な指針を与えるものと考えられる。

最後に本研究に多大の御協力をいただきました株式会社日本光電開発課の皆様、および当科の大学院生緑川利幸君(現在三菱重工業勤務)に感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) たとえば、水田，三浦：電気四学会東会支部連合大会論文集（昭44）P.96～98
- 2) 広津，清水：電気機器（I）（オーム社）
- 3) 仁田，沖津：直流電動機の動作解析の実測とその解析，電学誌 1968，3月

### Summary

**Study on the Speed Control of Smaller type D. C. Motor, First Report.**  
**“Electrical Signal vs. Speed Conversion Characteristics**  
**of the feedback system by using Tachogenerator”**

Hiromi SAKAGUCHI and Kiyoshi MATSUYAMA  
(Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering)

In order to design the speed control system of a d. c. motor, we at first, need to convert the speed into control signal by means of any transducer. Among other things, a tachogenerator has widely been used. By the way, we necessarily have to consider whether it's suitable or not to use the tachometer of this type in the case of the speed control which must be done accurately over wide range of speed. This control system seems to be simple at first sight, but even now has some problems which must be taken into account. And to set up the control circuit, we must grasp the characteristics of the d. c. motor (with the load) and those of the feed back system by using the tachogenerator. As to the latter, firstly, in this paper we were presented the results of analytical considerations with some empirical data. The problems that we considered are how to deal with the nonlinear characteristics of the tachometer and rectifier circuit and how to find the transfer functions of the feedback system. Here we concluded that in a certain required region of the speed, we could linearize the system and show the transfer function. The trend of the curves of e. m. f. voltages and input impedances is slightly saturated. And errors in the linearization of these characteristics are about ten percent in the ranges of 1500 r. p. m. on the lower part of the speed, and of 3000 r. p. m. on the higher part (over 5000 r. p. m.) respectively. The part of the rectifier and the smoothing circuit could be linearized from the result of the succession of transient analysis, also within ten percent error in comparison with the empirical data.