

# 直流直巻電動機 の速度一回転力特性測定に シュラーゲ電動機を応用する方法について

佐 藤 信\*

## ON THE APPLICATIONS OF THE SCHRAGE MOTOR TO THE DETERMINATION OF THE SPEED-TORQUE CHARACTERISTIC FOR A D.C. SERIES MOTOR

Makoto SATO

There are various methods which are actually used in conducting load test on D. C. Series motors. But these methods are accompanied more or less with some difficulties and dangers. Moreover they require many equipments.

Author devised the loading back method employing Schrage motor as induction generator. And it proved to be very convenient in testing D.C. series motor, having the following merits.

1. Simplicity of the equipments and treatments, that is to say the only other requirements is a Schrage motor.
2. Cheapness of the testing cost without dissipation of energy.

In this article, the writer briefly describes the above method, giving the results of some experiments in the following order.

- (1) Introduction.
- (2) General principles.
- (3) Equipment and treatment.
- (4) Example of experiment.
- (5) Conclusion.

Received May 31, 1961.

### 1. 緒 言

直流直巻電動機の負荷特性試験は、直流発電機を駆動するか、同一定格の機械 2 台ある場合は返還負荷方法が普通に採用されている。しかし、前者は発生直流電力が負荷抵抗器に於てジュール熱として無駄に消費される。後者は被試験機 1 台の場合は不可能である。著者は直流直巻電動機の速度一回転力特性測定に当たり、シュラーゲ電動機を使用する、返還負荷方法を試みて、好結果を得たので、実験記録を添えて簡単に記述する。

### 2. 一般理論

直流直巻電動機は変速度電動機にして、速度一回転力特性は第 1 図の如く、負荷変化に対し速度変化甚だしく、軽負荷に於ては逸走して危険である。

シュラーゲ電動機の原理は第 2 図の如くで、ブラシ

開き角  $2\rho$  を変えることにより、二次に加えられるすべり周波数電圧が変り、速度の変化する加減速度電動機である。

$S_0$  : 無負荷の場合のすべり

$W_2$  : 二次巻線の巻数

$W_3$  : 調整巻線の巻数 ( $\rho=90^\circ$  のときの)

$k_2$  : 二次巻線の巻線係数

$k_3$  : 調整巻線の巻線係数

$$\text{とすれば } S_0 = \frac{k_3 W_3}{k_2 W_2} \sin \rho$$

$$\rho > 0 \text{ のとき } S_0 > 0$$

$$\rho = 0 \text{ のとき } S_0 = 0$$

$$\rho < 0 \text{ のとき } S_0 < 0$$

なる関係があり、無負荷速度を同期速度の上下に調整できる。

特性曲線は第 3 図の如く分巻特性であり、無負荷速度より遅い速度で回転するときは電動機として働き、無負荷速度より早い速度で回転するときは発電機として働く。一次巻線を交流電源に接続しておいて、直流

\* 電気工学教室

直巻電動機で駆動して、無負荷速度以上に回転数を増せば誘導発電機となつて、電源に交流電力を返還することになる。即ち直巻直巻電動機に負荷することになる。

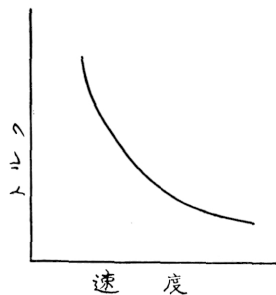
シュラーゲ電動機は無負荷速度を超過する程、返還電力が大即負荷回転力が大となる。一方直巻直巻電動機は、電動機回転力大なる程回転速度低下する。したがつて、負荷回転力と電動機回転力が平衡して安定運転を行ふ。

負荷の加減は、ブラシ開き角を加減して、無負荷速度を変へることにより、連続的に円滑に行なわれる。例えば第4図で、今ブラシ開き角  $\rho_1$ 、無負荷すべり  $S_{01}$ 、のとき負荷回転力と電動機回転力が  $T_1$  で平衡して、すべり  $S_1$  で運転している場合、ブラシ開き角を  $\rho_2$  と大にして無負荷速度を  $S_{02}$  と低下せしめれば、負荷回転力は  $T_1$  となり、 $T_1 > T_1$  であるから直巻電動機は減速して電動機回転力を増し、 $S_2$  速度に到つて回転力  $T_2$  に増大する。一方シュラーゲ電動機の負荷回転力は  $T_2$  に減少する。斯くてすべり  $S_2$  回転力  $T_2$  にて平衡運転を行う。

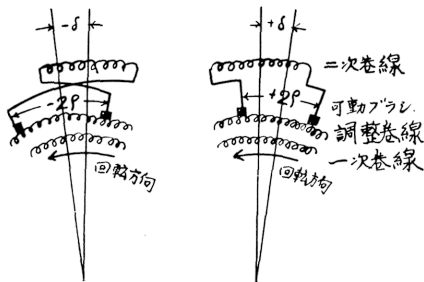
### 3. 装置及び取扱方法

#### 3.1 装置

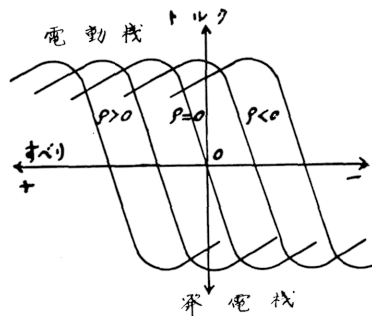
装置としては直巻直巻供試電動機とシュラーゲ電動



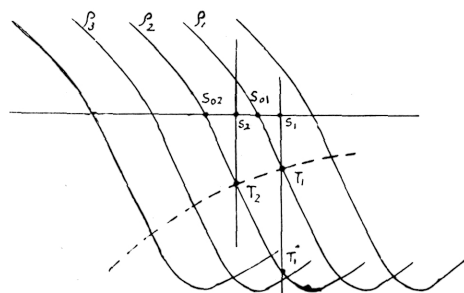
第1図 直巻電動機 の速度トルク曲線



第2図 シュラーゲ電動機の原理



第3図 シュラーゲ電動機 の速度トルク曲線



第4図 回転力の平衡説明

機を、両機の定格に応じた適当な減速比で連結し、夫々直流電源と交流電源に接続する。他には何の附属装置も必要としない。

#### 3.2 操作方法

先づ両機の回転方向を一致させる。シュラーゲ電動機側より始動する。この場合ブラシを最低速度位置に置くのみで、何の起動装置も不要である。ブラシ開き角を調整して適当な速度にする。これは負荷した場合の衝撃を避けるため直巻電動機の定格速度以上にすることが望ましい。然る後直巻直巻電動機に直流定格電圧を印加する。以後負荷の加減は、把手によりブラシ開き角を変へるのみにて連続的に簡単に行うことができる。

停止する場合は、直流電源を先きに開放し、然る後交流電源を開放する。

要するに、始動より停止まで常に直流電圧だけが印加されることのない様注意すれば、直巻直巻電動機の起動装置も不要且つ逸走の心配もない。

### 4. 実験例

#### 4.1 使用機械

供試直流直巻電動機の仕様

定格 連続定格  
 容量 2.2 [KW]  
 電圧 100 [V]  
 電流 29 [A]  
 回転数 1500 [r.p.m]  
 界磁 直巻

シュラーゲ電動機の仕様

定格 連続定格  
 容量 10.5 [HP]  
 電圧 440 [V]  
 電流 12.1 [A]  
 周波数 60 [c/s]

極数 4 極

回転数 1925~1595 [r.p.m]

二機の連結はVベルト連結とし、シュラーゲ電動機  
 の速度調整範囲が比較的狭いので、減速比は二種類使  
 用して、軽負荷の場合と重負荷の場合に使い分けた。

$$\text{即, 減速比} = n = \frac{\text{直流電動機速度}}{\text{シュラーゲ電動機速度}} = 0.87 \text{ (重)}$$

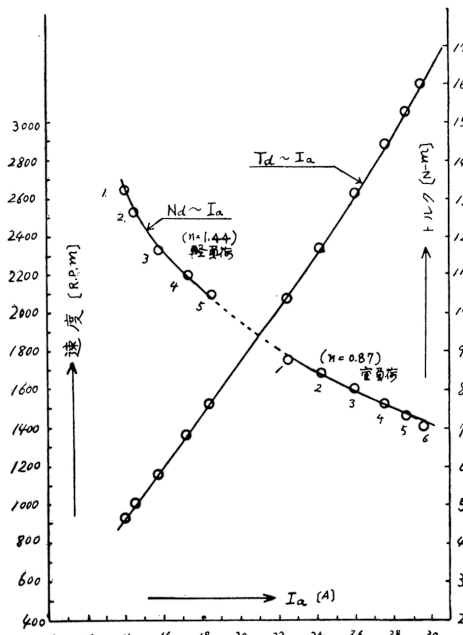
$$= 1.44 \text{ (軽)}$$

またシュラーゲ電動機は設備の都合で 220 [V] で使用  
 した。

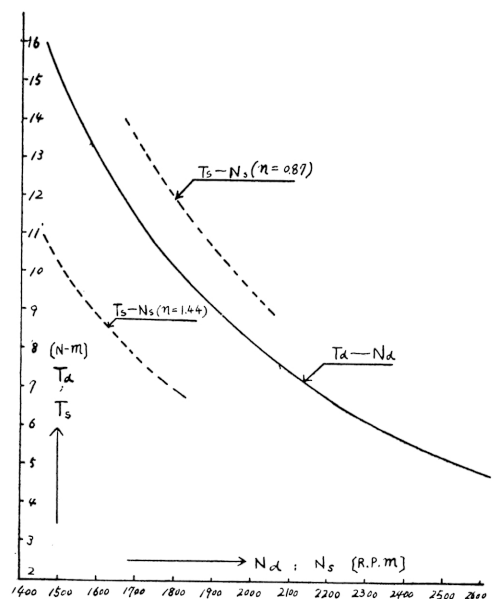
4.2 実験結果

第 1 表 負荷試験測定値及び計算値

| 減速比<br>$n$  | $\rho$ 別<br>No. | 直 流 直 巻 電 動 機        |                        |                          | シュ ラ ー ゲ 電 動 機         |   |
|-------------|-----------------|----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|---|
|             |                 | 負 荷 電 流<br>$I_a$ [A] | 速 度<br>$N_d$ [r. p. m] | 発 生 ト ル ク<br>$T_d$ [N-m] | 速 度<br>$N_s$ [r. p. m] | 換 算 ト ル ク<br>$T_s (=T_d \times 1.44)$ [N-m] |
| 1.44<br>(軽) | 1               | 14.0                 | 2640                   | 4.68                     | 1833                   | 6.74  |
|             | 2               | 14.5                 | 2520                   | 5.05                     | 1750                   | 7.27  |
|             | 3               | 15.7                 | 2340                   | 5.85                     | 1625                   | 8.42  |
|             | 4               | 17.2                 | 2180                   | 6.85                     | 1514                   | 9.86  |
|             | 5               | 18.5                 | 2080                   | 7.61                     | 1444                   | 10.96                                       |
| 0.87<br>(重) | 1               | 22.5                 | 1780                   | 10.55                    | 2045                   | 9.18  |
|             | 2               | 24.2                 | 1690                   | 11.83                    | 1940                   | 10.29                                       |
|             | 3               | 26.0                 | 1600                   | 13.25                    | 1840                   | 11.53                                       |
|             | 4               | 27.6                 | 1530                   | 14.56                    | 1760                   | 12.67                                       |
|             | 5               | 28.7                 | 1480                   | 15.54                    | 1700                   | 13.52                                       |
|             | 6               | 29.5                 | 1460                   | 16.10                    | 1670                   | 14.00                                       |



第 5 図 直巻電動機負荷特性曲線



第 6 図 トルク速度曲線



但し、 $1[A]=5[mm]$  として描いた（以下同様）  
次に各種  $\rho$  に対する円線図を描いてみる

$$u: \frac{\text{調整巻線の巻回数(星状電圧に対する)}}{\text{二次巻線の巻回数}}$$

$\sigma$ : 一次巻線二次巻線間の漏洩係数

$X_{a1}$ : 一次巻線と、調整巻線との相互リアクタンス

$X_{21}$ : 一次巻線と、二次巻線との相互リアクタンス

とすれば

$$\frac{u}{\sqrt{1-\sigma}} = \frac{X_{a1}}{X_{21}} = \frac{e_{a1} i_1}{i_1 e'_{21}} = 0.077$$

第7図より

$$\sigma = \frac{KO'}{KD} = \frac{7.25}{140} = 0.052 \quad \text{これを上式に代入し}$$

$$u = 0.077 \times \sqrt{1-0.052} = 0.075$$

$$\text{無負荷すべり } S_0 = \frac{2u \sin \rho}{\sqrt{1-\sigma}}$$

$$\rho=90^\circ \text{ に於けるすべり } S_{090} = \frac{2 \times 0.075}{0.970} = 0.154$$

$$\text{任意 } \rho \text{ に於けるすべり } S_{0\rho} = 0.154 \sin \rho$$

$$\left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho=0} = \frac{m+2 \frac{r_1}{X_1}}{1-m(1+\sigma) \left(\frac{r_1}{\sigma X_1}\right)} \quad \text{ここに } m = \frac{O'F}{QF}$$

$$\text{にて第7図より } m = \frac{O'F}{QF} = 3.47 \quad \text{これを上式に代入}$$

$$\text{して } \left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho=0} = \frac{3.47+2 \frac{0.9}{101}}{1-3.47(1+0.052) \times \frac{0.45}{0.052 \times 101}} = 4.84$$

任意  $\rho$  のときの値は

$$\left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho} = \left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho=0} \times \frac{r_2}{r_2+r_{ap}} \quad \text{として求められること}$$

に  $r_{ap} = r_a \times \frac{\rho}{90}$  にして、以下の計算に於ては二次回路全抵抗としては  $r_2' = r_2 + r_{ap}$  を用い、二次自己リアクタンスとして  $X_2 = \left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho=0} \times \frac{r_2}{\sigma}$  を用いる。

各種  $\rho$  に対する  $S_{0\rho} \cdot \left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho} \cdot r_2' \cdot X_2$  の計算値を第2表に示す。

以上のデータを用いて各種  $\rho$  に対する円線図を描くのであるが、まづ  $\rho$  が変化するときの  $S=1$  即ち、静止時の電流  $I_{1s}$  の軌跡は、ブラシ偏角  $\delta$  に無関係にて

$\alpha_s$ : 原点より円の中心までの距離

$\beta_s$ : 円中心が縦軸より反時計式に回る角度

$r_s$ : 円の半径

とすれば、近似的に次の関係がある。

$$\alpha_s = r_s = \frac{1}{2r_1} \sqrt{1 + \left(\frac{r_2}{\sigma X_2}\right)_{\rho=0}^2} \cdot E$$

$$= \frac{1}{2 \times 0.45} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{4.84}\right)^2} \times 127 = 144 [A]$$

$$\tan \beta_s = \frac{-r_2}{\sigma X_2} = -\frac{1}{4.84} = -0.2066$$

$$\therefore \beta_s = -11^\circ 40'$$

次に  $S=\infty$  に於ける電流  $I_{\infty}$  の軌跡は、

$\alpha_{\infty}$ : 原点より円の中心までの距離

$\beta_{\infty}$ : 円中心が原点縦軸となす角

$r_{\infty}$ : 円の半径

とすれば

$$\alpha_{\infty} = \frac{\sqrt{(\sigma X_1 \cos \delta - 2r_1 \sin \delta)^2 + (\sigma X_1)^2 \sin^2 \delta}}{2r_1 (\sigma X_1 \cos \delta - r_1 \sin \delta)} \cdot E$$

ブラシ偏角  $\delta=30^\circ$  であるから（以下同様）

$$= \frac{\sqrt{(3.83-0.45)^2 + 4.444^2 \times 0.25}}{0.9(3.83-0.45) \times 0.5} \times 127$$

第2表 各種  $\rho$  に対する定数

| $\rho[^\circ]$ | $S_{0\rho}=0.154 \sin \rho$ | $\left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho} = 4.84 \times \frac{r_2}{r_2+r_{ap}}$ | $r_2' = r_2 + r_{ap} (\Omega)$ | $X_2 = \left(\frac{\sigma X_2}{r_2}\right)_{\rho=0} \times \frac{r_2}{\sigma} [\Omega]$ |
|----------------|-----------------------------|---|--------------------------------|---|
| 5              | 0.013                       | 4.79  | 0.434                          | 40.02   |
| 10             | 0.027                       | 4.75  | 0.437                          | 40.02   |
| 15             | 0.040                       | 4.72  | 0.441                          | 40.02   |
| 20             | 0.053                       | 4.68  | 0.445                          | 40.02   |
| 25             | 0.506                       | 4.63  | 0.449                          | 40.02   |
| 30             | 0.077                       | 4.60  | 0.453                          | 40.02   |
| 40             | 0.099                       | 4.54  | 0.461                          | 40.02   |
| 50             | 0.118                       | 4.49  | 0.469                          | 40.02   |
| 60             | 0.133                       | 4.40  | 0.476                          | 40.02   |
| 70             | 0.145                       | 4.34  | 0.484                          | 40.02   |
| 80             | 0.152                       | 4.27  | 0.492                          | 40.02   |
| 90             | 0.154                       | 4.20  | 0.500                          | 40.02   |



第 3 表  $\rho = +20^\circ$  の 特 性

| 動作点      | す べ り                  |        | ト ル ク                |                          |  |
|----------|------------------------|--------|----------------------|--------------------------|--|
|          | $\overline{M'S'}$ [mm] | S [%]  | $\overline{PT}$ [mm] | 同期ワット $\overline{W}$ (W) | $T$ [N-m] = $\overline{W} \times 0.005805$ |
| $P_r$    | 48.0                   | 30.2   | 48.0                 | 3800                     | 20.2                                       |
| $P_1$    | 40.0                   | 26.0   | 47.0                 | 3720                     | 19.7                                       |
| $P_2$    | 36.0                   | 24.0   | 45.0                 | 3550                     | 18.9                                       |
| $P_3$    | 28.0                   | 19.8   | 41.7                 | 3300                     | 17.5                                       |
| $P_4$    | 23.5                   | 17.5   | 38.0                 | 3000                     | 16.0                                       |
| $P_5$    | 20.0                   | 15.5   | 35.0                 | 2760                     | 14.7                                       |
| $P_6$    | 18.0                   | 14.6   | 33.0                 | 2600                     | 13.8                                       |
| $P_7$    | 11.5                   | 11.2   | 23.0                 | 1820                     | 9.7  |
| $P_8$    | 9.0                    | 10.0   | 20.0                 | 1580                     | 8.4  |
| $P_9$    | 6.0                    | 8.4    | 12.5                 | 990                      | 5.3  |
| $P_{10}$ | 1.8                    | 6.2    | 3.6                  | 284                      | 1.5  |
| $P_{11}$ | - 2.0                  | 4.2    | - 6.1                | - 482                    | - 2.6                                      |
| $P_{12}$ | - 6.5                  | 1.8    | - 17.8               | - 1400                   | - 7.5                                      |
| $P_{13}$ | - 8.5                  | 0.8    | - 21.8               | - 1730                   | - 9.3                                      |
| $P_{14}$ | - 12.0                 | - 1.0  | - 32.9               | - 2600                   | - 13.8                                     |
| $P_{15}$ | - 14.0                 | - 2.0  | - 37.0               | - 2920                   | - 15.5                                     |
| $P_{16}$ | - 18.0                 | - 4.0  | - 46.5               | - 3700                   | - 19.7                                     |
| $P_{17}$ | - 21.8                 | - 6.0  | - 56.0               | - 4420                   | - 23.6                                     |
| $P_{18}$ | - 25.0                 | - 8.0  | - 63.0               | - 5000                   | - 26.6                                     |
| $P_{19}$ | - 28.8                 | - 10.0 | - 68.9               | - 5440                   | - 29.0                                     |
| $P_{20}$ | - 33.0                 | - 12.0 | - 73.7               | - 5820                   | - 31.0                                     |
| $P_{21}$ | - 35.8                 | - 13.5 | - 76.0               | - 6000                   | - 32.0                                     |
| $P_{22}$ | - 39.0                 | - 15.0 | - 78.2               | - 6200                   | - 33.0                                     |
| $P_{23}$ | - 42.3                 | - 17.0 | - 80.0               | - 6300                   | - 33.5                                     |
| $P_{2r}$ | - 46.0                 | - 19.0 | - 81.0               | - 6400                   | - 34.0                                     |
| $P_r'$   | - 48.0                 | - 20.0 | - 81.2               | - 6420                   | - 34.2                                     |

$P_r, P_1, P_2, \dots$  は第 8 図の動作点

$$A_0 B_0 = \sqrt{(1 - 0.053 \times 0.866)^2 + 0.053^2} \times 0.25$$

$$\times \sqrt{(0.4455 + 0.0535 \times 0.0518 \times 40.24 \times 0.5)^2 + (0.0523 \times 0.0518 \times 40.24 \times 0.866)^2}$$

$$= 0.481$$

従つて

$$W_r' (W) = \frac{\overline{PT}^{(mm)}}{5}$$

$$\times \frac{(0.4455 + 0.5 \times 0.053 \times 0.0518 \times 40.24) \times 3 \times 127}{0.481}$$

$$= \overline{PT}^{(mm)} \times 79.2$$

$$\text{回転力 } T [N-m] = \overline{PT}^{(mm)} \times 79.2 \times 0.00530515$$

$$= \overline{PT}^{(mm)} \times 0.4202$$

次にすべりの算定を行えば、無負荷速度よりのすべ

$$\text{り } S' \text{ は } S' = \frac{\overline{M'S'}^{(mm)}}{Q'S'^{(mm)}} = \frac{S - S_{0p}}{1 - S_{0p}}$$

同期速度よりのすべりは ( $M' \cdot S' \cdot Q'$  は第 8 図参照)

$$S = \overline{M'S'}^{(mm)} \times \frac{(1 - S_{0p})}{Q'S'^{(mm)}} + S_{0p}$$

$$\overline{Q'S'} = 182 \quad S_{0p} = 0.053 \text{ であるから}$$

$$S = \overline{M'S'}^{(mm)} \times \frac{1 - 0.053}{182} + 0.053$$

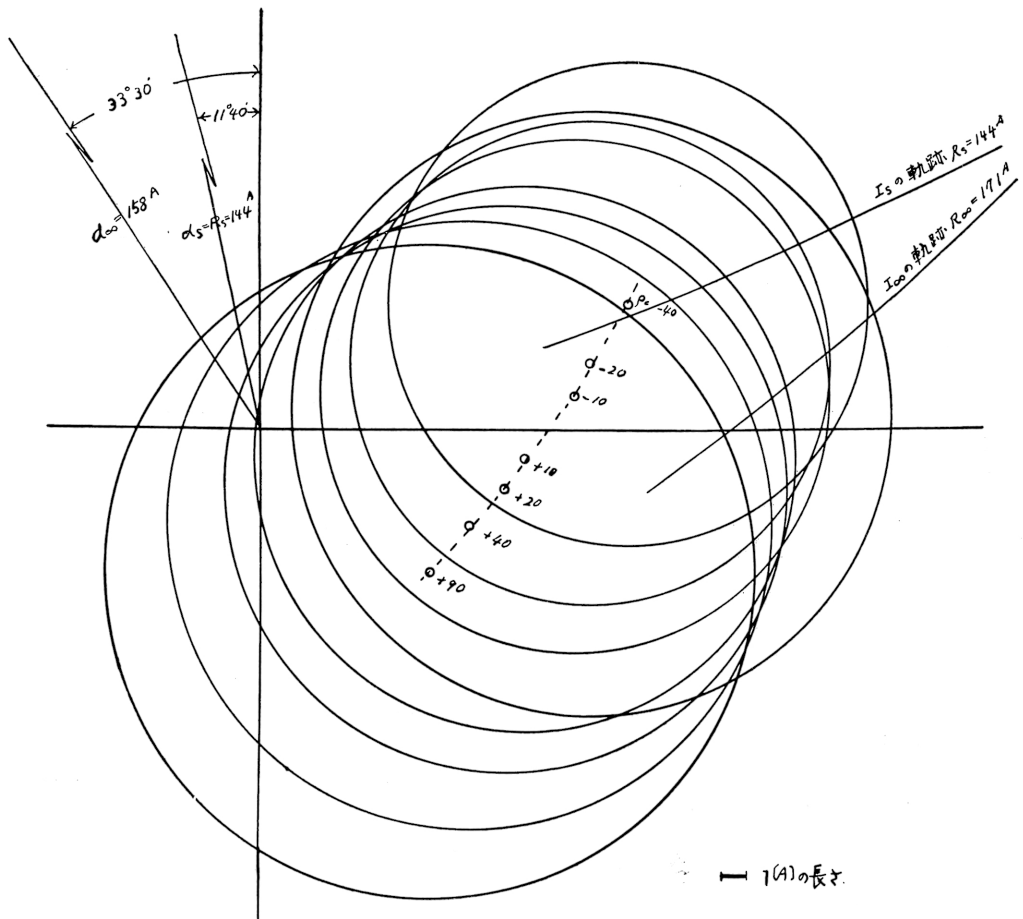
$$= \overline{M'S'}^{(mm)} \times 0.005203 + 0.053$$

斯くして第 8 図の各動作点に於ける回転力とすべりを求めたものを第 3 表に示す

同様にして各種  $\rho$  に対する円線図作図及び特性算定用データを計算したものが第 4 表であり、円線図及びこれより求めた特性曲線が第 9 図と第 10 図である。この第 10 図に直流直巻電動機 の速度一回転力曲線をプロットして、負荷回転力と電動機回転力を対応させて見た。

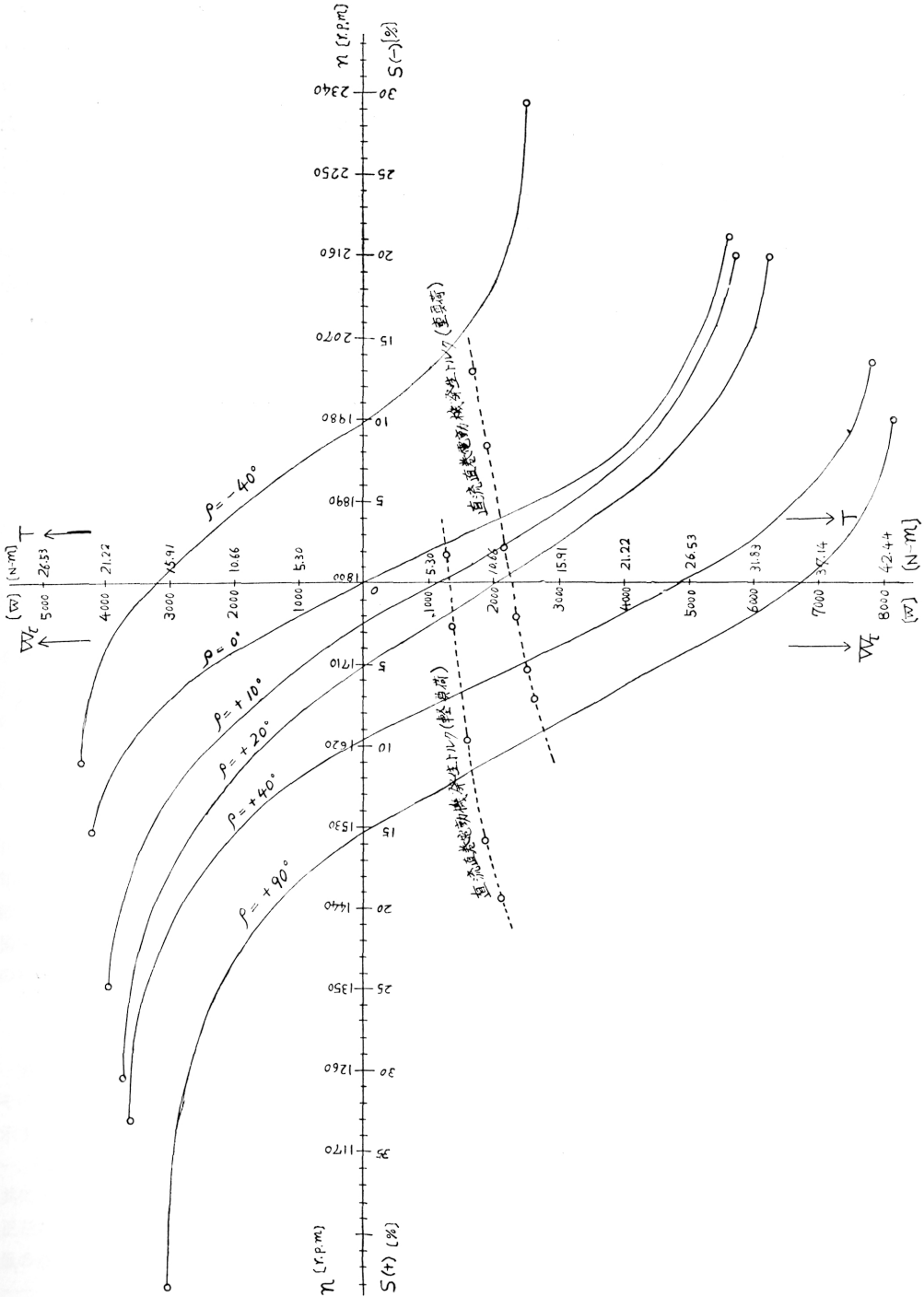
第4表 各種  $\rho$  に対する円線図及び特性計算数値

| $\rho$ | 円線図     |                         |                         |                          |                          | 特性計算      |                       |           |                     |
|--------|---------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|-----------|---------------------|
|        | 円の直径    | 円中心の座標                  |                         | 無負荷電流                    |                          | トルク       |                       | すべり       |                     |
|        | $r$ [A] | $\alpha \cos \beta$ [A] | $\alpha \sin \beta$ [A] | $I_n \sin \varphi_n$ [A] | $I_n \cos \varphi_n$ [A] | $A_0 B_0$ | $T$ [N-m] / $PT$ [mm] | $QS$ [mm] | $1 - S_0 / QS$ [mm] |
| +90    | 14.25   | -6.15                   | 7.48                    | -5.028                   | 0.560                    | 0.625     | 0.372                 | 103.0     | 0.0082              |
| +40    | 13.35   | -4.20                   | 9.11                    | -3.468                   | 1.250                    | 0.534     | 0.428                 | 95.8      | 0.0094              |
| +20    | 12.30   | -2.60                   | 10.76                   | -0.014                   | 0.074                    | 0.481     | 0.420                 | 182.0     | 0.0052              |
| +10    | 11.90   | -1.37                   | 11.70                   | -0.170                   | 0.019                    | 0.460     | 0.410                 | 87.0      | 0.0112              |
| -10    | 11.30   | 1.45                    | 13.70                   | 2.740                    | 0.019                    | 0.474     | 0.345                 | 78.0      | 0.0132              |
| -20    | 10.50   | 2.88                    | 14.62                   | 4.190                    | 0.074                    | 0.419     | 0.377                 | 78.5      | 0.0134              |
| -40    | 10.65   | 5.50                    | 16.20                   | 6.802                    | 0.252                    | 0.440     | 0.329                 | 78.0      | 0.0140              |



第9図 シュラーゲ電動機の円線図





第 10 図 シュラーゲ電動機 の特性曲線

## 5. 結 言

本方法ではシユラーゲ電動機の把手を進退操作するのみにて、極めて円滑に負荷加減が行えるので、装置も取扱いも簡単容易である。発生交流電力は交流電源に返還されるので経済的である。ブラシ開き角に相応する速度以上に逸走する心配がない。などの特長を持つておりはなはだ便利な方法であることが判かった。本実験例では、シユラーゲ電動機の色度調整範囲が比較的狭いため、減速比を二段に切り変えたのであるが、二次巻線に外部抵抗を挿入し、これを加減することによつても、速度調整範囲を広くすることができる。

シユラーゲ電動機に於ては、ブラシ偏角  $\delta$  があるときは、無負荷すべりは  $S_0 = \frac{2u \sin \rho}{\sqrt{1-\sigma}}$  の値より小さくなつて、速度制御の効果が鈍ることになるのであるが、特性算定には  $\delta$  の影響を無視して、 $S_0 = \frac{2u \sin \rho}{\sqrt{1-\sigma}}$  の値を使用した。又シユラーゲ電動機を使用するに当たつては、 $\rho$  の変化によつて、無負荷すべりが変化することのみならず、最大回転力も変化するものであることに留意せねばならない。

本方法を試みた動機は、限られた実験設備を以つて、同時に、多種類の実験を実施する方策の案出にあつたので、現在学生実験にこの方法を用いている。