室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

固定子回転型同期電動機と巻線型誘導電動機の並列縦続結合法について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-06-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 伊達，隆三, 近藤，修, 藤田，義弘, 図所，忠則 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3420

固定子回転型同期電動機と巻線型誘導電動機の並列縦続結合法について

伊達隆三・近藤　修
藤田義弘・図所忠則

On the Parallel-Concatenated Connection between the Continuous Variable Speed Synchronous Motor and the Wound Rotor Type Induction Motor

Ryūzō Date, Osamu Kondō, Yoshihiro Fujita
and Tadanori Zusho

Abstract

The authors have presented several times the characteristics of the continuous variable speed synchronous motor. In this paper, they deal with the speed control of the system which is associated together the previous motor i. e. A, and a wound rotor type induction motor i. e. C, a special originated synchronous generator i. e. B for the phase control coupled to the stator of A mechanically, and a feed back motor i. e. E.

The output of B and of the secondary of C are composed electrically, and drives E. In this system the three machines i. e. A, C, and E drive the load through the common shaft, and by controlling the field current or phase shifting of B, the speed of the system or the power factor of the source of C is controlled. The output of the system is the total sum of the rotor of A, C and E.

By the theoretical analysis and the experimental results, it is shown as follows.

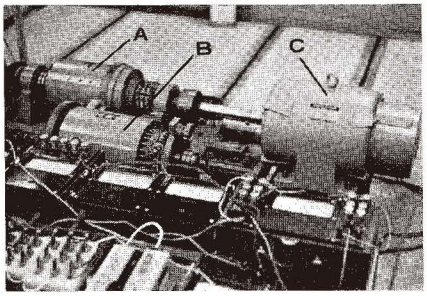
a. The speed control is capable under the heavy load operation.
b. Under the high speed operation, the characteristic of C is remarkable, and under the low speed range of the system, the effect of B for the phase control, is sensible.
c. Controlling of the field current of B for the phase control changes the speed of the system linearly.
d. The share of A to the total load changes by controlling the field current or by the phase controlling of B.

1. 緒　　言

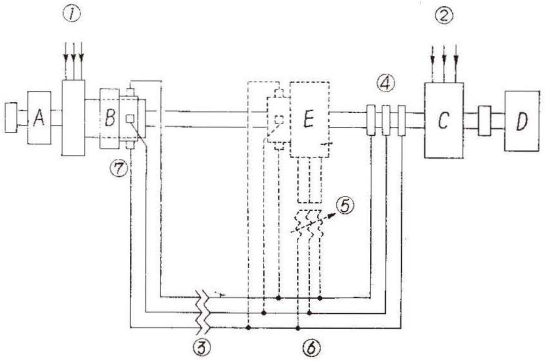
固定子回転型同期電動機の諸特性については筆者等は既に発表を重ねているが，本報告ではその補助機に位相調整用同期発電機を使用し，巻線型誘導機と並列縦続結合した系について，その補助系の発生電力を帰還しながら速度制御を行なう方法について等価回路から理論的解析を行ない，また試作機による実験結果より考察検討を行なったのでここに発表する。

2. 結合方法概要

図-1はこの組合せ機を示し，図-2はその結線図を示す。A機は固定子回転型同期電動機であるから電源①よりの入力により駆動されてトルクを発生する。また回転固定子は回転子方向と逆方向にトルクを生じ，この回転を制御するために設けた位相調整用同期発電機Bの端子に，その回転速度に比例する周波数と電圧を誘起する。この発生電力を別に主機主軸と直結され，A, B両機と同極数の巻線型誘導電動機Cの2次端子に結線する。この回路に③に印す可変比変圧器を挿入することもある。C機をA機と同一電源（場合によっては周波数を異にする別系統より受電することもある）に結べばA, C両機共に負荷Dを駆動する電動機となり，C機の2次発生電力はB機の電力と合流してEに示す電動機に帰還される。



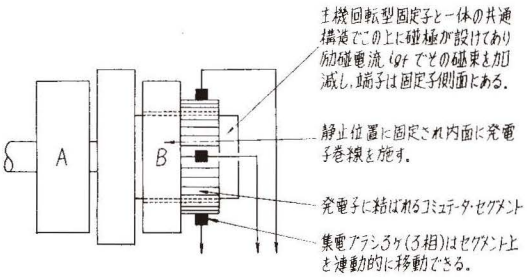
図—1　実験用回転機系



図—2　並列縦続結合法

3. 位相調整用同期発電機

図-3はその略図である。図に於いて主機Aの固定子は回転型でそれと一体に構成された部分に位相調整用同期発電機の回転子がある。この上に磁極が設けてあり，その磁束調整用電流 i_{of} の端子は主機固定子側面にある。この回転磁極と電気的に結合する発電子は回転磁極と同心に構成されて静止軸に固定する固定子で，その内面に分布巻する3相発電子巻線端子は整流子片に直結され，整流子面上を前後に任意角度同時に微移動可能なように工作してある。従って系が駆動されるとB機のブラシ端子より取り出される電圧と位相はその位置の移動と励磁の調整により自由に加減できる。



図—3　位相調整用同期発電機

4. 系の速度制御と発生トルク及び出力

A, B, C 機共に同一極数であり，A, C 機が直接共通電源（その周波数を f とする）で駆動されるならば，同期速度を ω_0，すべりを s として系の回転子角速度 ω_r は

$$\omega_r = (1-s)\,\omega_0$$

B 機の回転子角速度 ω_s は

$$\omega_s = s\omega_0$$

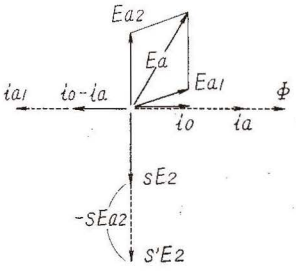
となり，B 機の発生電圧及びその周波数は sE_a 及び sf となる。ここで E_a は $s=1$ における B 機の発生電圧とする。さて C 機の回転子角速度も ω_r であるから，固定子上の回転磁界角速度よりの遅れ即ちすべりは

$$\omega_0-(1-s)\,\omega_0 = s\omega_0 \qquad (1)$$

よって(1)式から C 機の

$$2\text{次誘起起電力周波数} = sf \qquad (2)$$

となり，B 機の起電力周波数と等しいことがわかる。このことは s の総ての領域に対して成立するから B 機の ②，C 機の ④ 両補助電機子回路には何時も同じ周波数の起電力が生じている。sE_a は C 機の 2 次起電力 sE_2 に対し任意の位相に合成できるが，一例として図-4 の様な 2 次励磁をすれば，sE_a の分力 sE_{a1} により i_a が C 機の 2 次に，従ってその 1 次に i_{a1} が流れ，回転磁界に消費される 1 次励磁電流 i_0 を減少させることになり，C 機の電源の力率低下を改善させる。一方 2 次誘起電圧 sE_2 は負荷トルクによりその大きさが定まるから，補助回路に新たに電圧 sE_{a2} が加わるとこれによって流れる電流 i_{a2} は回転を妨げる方向のトルクを生ずるのですべりを生じ，sE_2 が sE_{a2} と反対方向に $s'E_2$ に増大されて平衡を保つので次式が成立する。



図—4　位相調整用同期発電機によるベクトル図

$$s'E_2 - sE_2 = sE_{a2}$$

或いは

$$s'E_2 = s(E_2+E_{a2}) \qquad (3)$$

これより E_{a2} を増せば $s'>s$ となって C 機即ち系の回転速度は下がり，E_{a2} を小に調整すれば ω_r は上昇する。また E_{a2} が E_2 と同方向になれば s' は負になり同期速度の限界を越して加速する。以上の如く位相調整用同期発電機は位相調整ブラシの位置の移動調整と励磁電流の加減及び極性 (N, S) の変化等の広範囲にわたる機能を持っている。なお B 機の発生電圧 sE_a の C

機の2次誘起電圧 sE_2 に対する同相或いは 180° 位相分は速度調整機として作用し，90° 位相進みの成分は進相機として，逆に 90° 遅れのものは遅相機作用をする。

5. 系の速度制御と2次励磁方式との類似性

系の補助回路における電力の流れは $s>0$ 領域において sE_{a2} 及び sE_2 は何れも発電電圧であり，その電圧と同方向に発生電流を流出することにより，B機はブレーキトルクをC機は電動トルクを発生することができる。然るに両起電力はこれを合成する時その合成点において互に反対方向であり，従ってこの両起電力によってその向きに流れる電流を消費する負荷を設けなければ系の速度制御の領域拡大は期せられない。その負荷をEで表わすことにする。図-2の結合法に記される⑥点は両起電力の合成点であり，B機の出力及びC機の2次出力は⑥点を通って可変比変圧器⑤（省略することもある）を経て例えば分巻整流子電動機等に吸収させる。さてE機を便宜上インピーダンス Z と考えると，Z がB, C両機の発生電力を吸収すれば⑥点に生ずる逆起電力はB, C両機の誘起電圧と反対方向にある。今この系を始動するに当たり，先ずA機を始動すればB機の励磁電流を調整することによりB機の発生電圧は sE_a となり，E機の電流 i_a は

$$i_a = \frac{sE_a}{Z}$$

となる。この状態で Z の端子⑥には i_aZ の逆起電力が存在している。次にC機の電源を活かせば駆動してその2次巻線に2次電圧を誘起するが，既に端子⑥には電圧 i_aZ があり，それに反抗しながら負荷 Z にB機の場合と同方向の電流を流し込み，その結果端子⑥の電圧は更に上昇して i_a を減じ，A機はブレーキトルクが弱まるため速度降下してすべりが増し，C機は

$$s'E_2 = i_aZ \tag{4}$$

に相当するすべり s' になろうとする。今B機の定格とC機の2次定格を等しいものとすれば，両機のすべり $s=1$ における誘起電圧 E_a と E_2 との間には

$$E_a = E_2$$

が成立する。よってA機とB機を一体に考えたB機の最終すべり s によるE機の電力供給による⑥点の電位は

$$sE_a = i_aZ = s'E_2$$

より

$$s = s' \tag{5}$$

となる。さてB, C両機よりE機に流入する電流を夫々 i_a, i_m とし，その合成電流を i_t（そのベクトル表示を夫々 $\dot{I}_a, \dot{I}_m$ 及び $\dot{I}_t$）とすれば

$$\dot{I}_t = \dot{I}_a + \dot{I}_m$$

であり，⑥ 点の電位は

$$\dot{I}_t \dot{Z} = \dot{Z}(\dot{I}_a + \dot{I}_m) = \dot{I}_a \dot{Z} + \dot{I}_m \dot{Z} \qquad (6)$$

これから次の結論が導かれる。系をすべり s で運転しようとすれば先ず A 機を始動して同期に引き入れ，その任意速度に C 機を同調させるため並列駆動すると i_a を減少させ，その減少分だけ C 機が 2 次側から供給し，両者のすべり及び起電力が等しくなって即ち $s'=s$ で並列運転を行なう。B 機の励磁を調整して s を変化すれば常に C 機はそのすべりに追随して，新しいすべりによって生ずる 2 次電力は B 機の電力と等しい分担で E 機に送り込む。

なお (6) 式で示される $\dot{I}_a$ は B 機よりその位相を自由に調整して供給されるから E 機が要求する分以外は $\dot{I}_m$ を制御することになり，C 機の電源の力率改善等の目的を果たすことになる。また同式の $\dot{I}_a \dot{Z}$ の 2 次電圧と同相分が速度制御成分である。

(5) 式以下は B 機及び C 機の容量，規格を等しいものとして論じてきたが，これは必ずしも等しくなくても良い。B 機の容量と C の 2 次電気出力比が $1/m$ であり，電流容量を等しくすれば速度の有効制御は前述に比し $1/m$ になる。なおこの時は ⑥ 点を可変比変圧器で結線しなければならない。

6. 系のブロック線図表示

系の補助回路において B 機の発生電圧は磁極磁束を ϕ_g とすれば

$$sE_a = k_g \phi_g \omega_s \qquad (k_g \text{ は比例定数})$$

であり，また C 機の 2 次発生電圧は 1 次側回転磁界の強さを $k\cos\theta$ とすれば

$$sE_2 = ksi_m \cos\theta \qquad (k \text{ は比例定数})$$

で表わされる。今 ⑥ 点に負荷インピーダンス Z の例えば整流子電動機等を接続すれば，負荷に流入するエネルギー P_c は

$$P_c = sE_a i_a + sE_2 i_m = sE_a i_t = sE_2 i_t$$

となる。また，B, C 両機の発生トルクを τ_g, τ_m とすれば

$$\tau_g = k_g \phi_g i_a$$

$$\tau_m = k i_m \cos\theta$$

系の発生トルク τ_l は

$$\tau_l = \tau_r + \tau_m = \tau_s + \tau_m$$

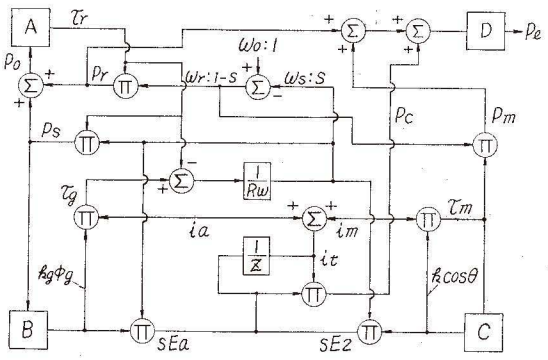
$$\fallingdotseq \tau_g + \tau_m$$

等が成立する。また A 機の回転子出力，C, E 各機の出力を夫々 P_r, P_m, P_c とすれば系の合成

出力 P_t は

$$P_t = P_r + P_m + P_c$$

となる。これ等の関係から系の内部におけるエネルギー変換関係並びにその流れを示すブロック線図は 図-5 の様になる。図において A 機の回転子出力 $P_r = \tau_r \omega_r$ と C 機の回転子出力 $P_m = \tau_m \omega_r$ との和が D を駆動させ，一方補助回路においては A 機の固定子出力 $P_s = \tau_s \omega_s$ が B 機に流入して電気出力 $sE_a i_a$ を生じ，これと C 機の 2 次電気出力 $sE_2 i_m$ との和が E 機に流入して機械出力 P_e を軸に帰還し，P_r, P_m, P_c の総和 P_t により D を駆動することを示している。

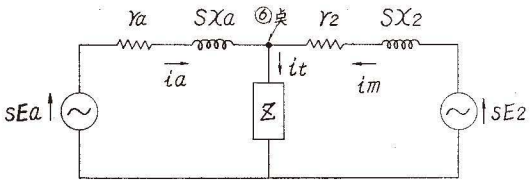


図—5　系のブロック線図

7. 等価回路からの解析

B 機及び C 機の相回転の方向が等しければ両機は同期化され，B 機の電圧を変えることによって C 機の 2 次側に加わる電圧を変えることになるので速度制御が可能となる。この系のエネルギーの流れを考えてみると，A 機の入力のうち B 機から出力として出る P_a と C 機の 2 次出力 P_{2m} とを何等かの方法（例えば整流器等を通して）で電源に返還させるか，或いは軸に機械的出力として帰還させて方向性を持たせることになる。従ってこの系の速度制御においては 2 次側の等価回路から相互のエネルギー変換関係を解析することができる。図-6 はこの等価回路を示し，記号は夫々下記の通りとする。

$sE_a(s\dot{E}_a)$：B 機の 2 次側電圧
$sE_2(s\dot{E}_2)$：C 機の 2 次側電圧
r_a, sx_a：B 機の抵抗，リアクタンス
r_2, sx_2：C 機の抵抗，リアクタンス
$i_a(\dot{I}_a)$：B 機の出力電流
$i_m(\dot{I}_m)$：C 機の出力電流
$i_t(\dot{I}_t)$：合成電流
$Z(\dot{Z})$：両機の間に入るインピーダンス [( ) 内は夫々ベクトル表示]



図—6　系の 2 次側 1 相等価回路

とすれば次の関係が成立する。

$$\left.\begin{aligned} s\dot{E}_a &= (r_a + jsx_a)\,\dot{I}_a + \dot{Z}\dot{I}_t \\ s\dot{E}_2 &= (r_2 + jsx_2)\,\dot{I}_m + \dot{Z}\dot{I}_t \\ \dot{I}_t &= \dot{I}_a + \dot{I}_m \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

これから

$$\dot{I}_a = \frac{s\{\dot{E}_a(r_2+\dot{Z}+jsx_2)-\dot{E}_2\dot{Z}\}}{r_a r_2-s^2 x_a x_2+(r_a+r_2)\dot{Z}+js\{x_a(r_2+\dot{Z})+x_2(r_a+\dot{Z})\}} \tag{8}$$

$$\dot{I}_m = \frac{s\{-\dot{E}_a\dot{Z}+\dot{E}_2(r_a+\dot{Z}+jsx_a)\}}{r_a r_2-s^2 x_a x_2+(r_a+r_2)\dot{Z}+js\{x_a(r_2+\dot{Z})+x_2(r_a+\dot{Z})\}} \tag{9}$$

$$\dot{I}_t = \frac{s\{\dot{E}_a(r_2+jsx_2)+\dot{E}_2(r_a+jsx_a)\}}{r_a r_2-s^2 x_a x_2+(r_a+r_2)\dot{Z}+js\{x_a(r_2+\dot{Z})+x_2(r_a+\dot{Z})\}} \tag{10}$$

上記の電流式において

$$\dot{E}_a = E_a(\cos\varphi+j\sin\varphi)$$
$$\dot{E}_2 = -jE_2$$
$$\dot{Z} = R+jX$$

と置けば

$$\dot{I}_a = \frac{c+jd}{a+jb} \tag{11}$$

$$\dot{I}_m = \frac{e-jf}{a+jb} \tag{12}$$

ここで

$$a = r_a r_2-s^2 x_a x_2+R(r_a+r_2)-sX(x_a+x_2)$$
$$b = s(r_a x_2+r_2 x_a)+sR(x_a+x_2)+X(r_a+r_2)$$
$$c = E_a\{(r_2+R)\cos\varphi-(sx_2+X)\sin\varphi\}-E_2 X$$
$$d = E_a\{(sx_2+X)\cos\varphi+(r_2+R)\sin\varphi\}+E_2 R$$
$$e = E_a(X\sin\varphi-R\cos\varphi)+E_2(sx_a+X)$$
$$f = E_a(R\sin\varphi+X\cos\varphi)+E_2(r_a+R)$$

となる。またB機の出力 P_a 及びC機の2次出力 P_{2m} は上記の関係を使用して

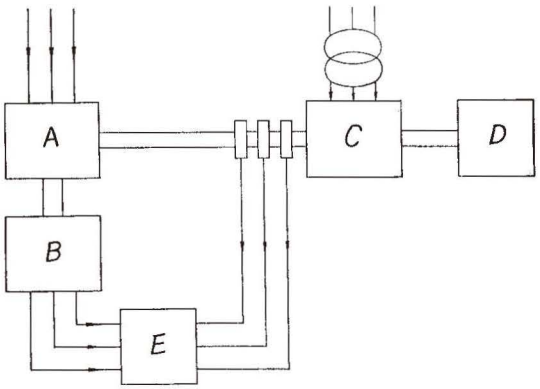
$$P_a = \frac{s}{2}(\bar{E}_a\dot{I}_a+\dot{E}_a\bar{I}_a)$$
$$= \frac{s^2 E_a\{a(c\cos\varphi+d\sin\varphi)+b(d\cos\varphi-c\sin\varphi)\}}{a^2+b^2} \tag{13}$$

$$P_{2m} = \frac{s}{2}(\bar{E}_2\dot{I}_m+\dot{E}_2\bar{I}_m)$$
$$= \frac{s^2 E_2(af+bc)}{a^2+b^2} \tag{14}$$

となる。従って(11)～(14)式より任意の電圧及び位相で運転する時のB, C両機の電流並びに出力間の関係が得られる。

8. 実験回路

実験は図-7に示す回路で行なったが，Eに用いる機器は本来整流器等を用いて電源に電力を辺還させるか或いは整流子電動機等を用いて軸出力として帰還させるのであるが，機器の都合により抵抗 R で電力を消費させた。実験に使用した機器の仕様を表-1に示す。



図—7　実験回路のブロック線図

表—1　系の機種と仕様

記号	機種	極数	容量	励磁
A	無段変速同期電動機	4	AC 100 V 0.7 kW	他励 110 V
B	位相調整用同期発電機	4	20/27 V 0.7/0.9 kW	他励 110 V
C	三相巻線型誘導電動機	4	AC 200 V 3.7 kW	—
D	動力計式直流発電機	2	DC 100 V 2 kW	他励 100 V

9. 実験方法及び結果

A機の入力電圧 V_1 を 100 V 一定にしてC機の入力電圧 V_2，B機の界磁電流 i_{gf} またはその位相 A_n，Eの抵抗 R を下記の a)～j) の様に変化させ，夫々の場合について負荷の変化に対する入力，出力，トルク，速度，補助回路電流を測定した。それ等の実験数値表を表-2～表-11に，また実験曲線を図-8～図-25に示す。

a) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 100$ V　$i_{gf} = 0.4$ A　R 可変　(表-2に示す)
b) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 100$ V　$i_{gf} = 0.3$ A　R 可変　(表-3に示す)
c) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 100$ V　$i_{gf} = 0.2$ A　R 可変　(表-4に示す)
d) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 150$ V　$i_{gf} = 0.4$ A　$R = R_4$　(表-5に示す)
e) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 150$ V　$i_{gf} = 0.3$ A　$R = R_4$　(表-6に示す)
f) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 70$ V　$i_{gf} = 0.4$ A　R 可変　(表-7に示す)
g) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 150$ V　$\tau_l = 0.6$ kg-m　$R = R_4$　i_{gf} 可変　(表-8に示す)
h) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 70$ V　$\tau_l = 0.3$ kg-m　$R = R_3$　i_{gf} 可変　(表-9に示す)
i) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 100$ V　$i_{gf} = 0.4$ A　$R = R_4$　A_n 可変　(表-10に示す)
j) $V_1 = 100$ V　$V_2 = 70$ V　$i_{gf} = 0.4$ A　$R = R_4$　A_n 可変　(表-11に示す)

ここで抵抗 R は R_1～R_6 の6段階に変化させたが消費電力による温度上昇をともない，抵抗値

が変動したがその値は夫々次の通りである。

R_1: 0.36～0.41 Ω　　R_2: 0.51～0.69 Ω　　R_3: 0.98～1.1 Ω

R_4: 0.86～2.4 Ω　　R_5: 1.2 ～3.3 Ω　　R_6: 1.8～4.5 Ω

表—2　負荷特性実験値 (V_2=100 V, i_{gf}=0.4 A) (図-8, 17～23 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
R_1	333	90	423	52	—	—	0.034	1477	0.5	—	—	—
	448	220	668	305	10	315	0.208	1425	1.5	2.6	1.7	4.1
	465	330	795	456	22	478	0.312	1420	2.1	3.1	3.1	6.0
	492	500	992	637	42	679	0.450	1380	2.9	3.6	4.9	8.0
	518	660	1178	828	75	903	0.600	1340	4.0	4.3	7.2	10.9
	518	810	1328	944	102	1046	0.700	1310	4.7	4.5	8.7	12.6
	545	910	1445	1045	122	1167	0.786	1293	5.1	5.0	9.8	13.8
	576	1060	1636	1155	174	1329	0.900	1250	6.2	5.4	11.8	16.2
	594	1220	1814	1250	234	1484	1.016	1195	7.2	5.9	14.0	18.7
	605	1330	1935	1305	261	1566	1.086	1170	7.9	6.2	15.0	19.2
R_3	270	120	390	51	3	53	0.034	1450	1.5	0.8	0.3	1.0
	310	300	610	292	30	322	0.210	1355	4.2	1.6	2.6	4.1
	320	410	730	390	53	443	0.290	1310	5.6	1.9	3.8	5.5
	346	490	836	478	83	561	0.370	1260	7.0	2.1	4.8	6.9
	395	640	1035	608	160	768	0.508	1165	9.9	2.6	6.7	9.4
	410	760	1170	685	222	907	0.600	1110	11.4	2.8	8.3	11.2
	473	960	1433	784	377	1161	0.770	990	14.7	3.8	11.0	14.8
	495	1070	1565	800	455	1255	0.850	915	16.3	3.7	12.6	16.1
	522	1240	1762	814	622	1436	0.980	810	19.2	3.8	15.0	18.7
	550	1360	1910	804	764	1568	1.070	730	21.4	3.8	16.5	20.7
	573	1500	2073	764	945	1709	1.180	630	23.8	4.2	18.2	22.9
	610	1600	2210	687	1120	1807	1.260	530	26.0	4.4	20.1	24.9
R_4	345	100	445	51	—	—	0.034	1470	0.7	0.7	0.5	—
	373	270	643	297	22	319	0.208	1390	3.1	1.7	2.3	4.1
	372	—	—	491	86	577	0.382	1250	7.2	2.4	4.9	6.9
	380	610	990	549	163	712	0.476	1120	11.3	2.6	6.5	8.3
	404	700	1104	525	269	794	0.546	935	16.5	2.8	7.9	9.4
	404	720	1124	527	291	818	0.566	905	17.5	2.8	8.2	9.6
	410	790	1200	465	407	872	0.610	740	22.5	2.8	9·1	10.4
	425	830	1255	422	492	914	0.652	629	25.9	3.0	9.6	10.9
	452	910	1362	363	587	950	0.692	510	29.6	2.8	10.9	11.4
R_6	330	100	430	57	2	59	0.038	1450	1.4	0.5	0.5	1.0
	320	300	620	289	39	328	0.216	1300	6.4	2.0	3.6	3.5

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
R_6	340	420	760	360	95	455	0.310	1130	11.5	3.0	5.7	4.8
	345	490	835	381	138	519	0.370	1000	14.9	3.4	6.6	5.4
	367	540	907	362	196	558	0.410	860	19.3	4.5	6.8	5.9
	375	570	945	336	238	574	0.430	760	22.5	5.2	6.7	6.1
	380	620	1000	296	302	598	0.472	610	26.7	5.5	7.8	6.5
	420	700	1120	256	359	615	0.500	500	30.5	5.4	9.1	6.8

表—3　負荷特性実験値 ($V_2=100$ V, $i_{qf}=0.3$ A) (図-9, 20 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
R_2	235	150	385	45	3	48	0.030	1465	1.0	0.8	0.5	1.7
	240	370	610	307	17	324	0.210	1420	2.3	1.3	3.7	4.5
	240	670	910	592	62	654	0.430	1340	4.2	2.3	7.3	8.5
	290	890	1180	793	134	927	0.612	1260	6.4	3.1	10.0	12.1
	335	1000	1335	870	193	1063	0.710	1195	7.8	3.5	11.6	14.3
	370	1260	1630	975	349	1324	0.890	1065	10.8	4.2	15.5	18.6
	410	1380	1790	1022	467	1489	1.010	985	12.7	4.8	17.5	21.2
	450	1490	1940	1023	570	1593	1.090	915	14.3	5.0	19.1	23.0
	485	1580	2065	1028	678	1706	1.170	855	15.8	5.3	21.3	24.8
	505	1640	2145	1008	779	1787	1.234	795	17.2	5.3	22.0	26.2
	520	1670	2190	964	857	1821	1.270	740	18.2	5.3	22.5	27.2
	550	1740	2290	903	1010	1913	1.330	660	20.0	5.6	23.7	29.2
R_3	225	180	405	51	4	55	0.034	1440	1.6	0.5	0.8	1.4
	205	410	615	285	31	316	0.204	1355	4.4	2.1	4.5	4.1
	205	510	715	390	57	447	0.294	1290	5.8	2.8	6.1	5.6
	230	600	830	471	89	560	0.370	1240	7.3	3.4	7.4	7.1
	255	660	915	520	106	626	0.424	1190	8.4	3.8	8.1	8.4
	310	780	1090	595	202	797	0.544	1095	10.8	4.2	7.8	10.8
	340	860	1200	629	269	898	0.600	1015	12.4	4.4	11.0	12.5
	365	920	1285	622	324	946	0.626	965	13.7	4.6	11.6	13.7
	390	980	1370	640	394	1034	0.690	900	15.2	4.7	12.7	15.0
	405	1030	1435	650	461	1111	0.746	845	16.5	4.7	13.8	16.2
	425	1100	1525	641	561	1202	0.810	770	18.2	4.6	14.9	17.8
	435	1140	1575	622	626	1248	0.840	720	19.2	4.7	15.6	18.8
	430	1280	1710	684	686	1370	0.926	718	20.2	4.9	16.9	19.6
	450	1310	1760	648	756	1404	0.950	665	21.2	5.0	17.7	20.6
	450	1420	1870	634	880	1514	1.032	600	22.9	5.0	18.8	22.2
	465	1480	1945	591	970	1561	1.064	540	24.1	5.0	19.6	23.3

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
	245	170	415	48	4	52	0.032	1455	1.3	0.5	0.8	1.7
	225	400	625	279	28	307	0.208	1380	3.7	1.5	4.2	4.3
	215	510	725	403	56	459	0.300	1305	5.5	2.6	6.2	5.9
	210	550	760	460	86	546	0.360	1240	7.2	3.2	7.3	6.9
	260	620	880	485	123	608	0.406	1160	9.2	3.9	8.0	7.8
	275	660	935	487	168	655	0.440	1080	11.4	4.4	8.8	8.5
	290	686	976	475	200	675	0.460	1005	13.0	4.7	9.2	8.9
R_4	270	760	1030	489	239	728	0.500	955	14.9	5.3	10.3	9.3
	285	790	1075	479	285	764	0.532	875	17.0	5.8	10.7	9.7
	295	800	1095	461	326	787	0.550	815	18.6	5.9	10.9	10.1
	305	820	1125	434	421	855	0.564	750	22.5	5.9	11.1	10.8
	315	840	1155	408	419	827	0.952	670	22.5	6.0	11.6	10.7
	320	850	1170	364	465	829	0.600	590	24.4	6.1	11.8	11.0
	330	860	1190	338	505	843	0.610	540	26.1	6.2	12.0	11.2
	345	880	1225	318	529	847	0.612	505	27.0	6.2	12.1	11.3
	235	176	411	48	4	52	0.032	1445	1.5	0.5	1.0	1.6
	155	440	595	292	31	323	0.210	1345	4.6	2.3	4.5	3.9
	170	500	670	345	49	394	0.260	1290	6.0	3.1	6.0	4.7
	195	560	755	388	74	462	0.310	1215	7.9	3.8	7.2	5.4
	200	590	790	407	93	500	0.340	1165	9.2	4.3	7.9	5.8
	225	600	825	414	118	532	0.360	1115	11.0	4.8	8.4	6.2
	235	620	855	410	154	564	0.380	1045	13.5	5.1	8.7	6.6
R_5	245	630	875	396	180	576	0.400	965	14.9	5.5	9.0	6.9
	260	640	900	380	202	582	0.410	900	16.2	5.9	9.1	7.2
	250	660	910	375	236	611	0.424	860	17.9	6.1	9.6	7.6
	265	680	945	360	260	620	0.440	795	19.7	6.3	9.7	7.6
	280	700	980	330	303	633	0.460	700	22.0	6.4	10.1	8.0
	282	710	992	314	337	651	0.480	635	23.9	6.5	10.4	8.2
	300	730	1030	275	390	665	0.490	545	26.7	6.6	10.7	8.5
	330	760	1090	257	415	672	0.500	500	28.0	6.6	10.8	8.6
	193	220	413	50	5	55	0.034	1420	2.6	1.1	2.0	1.2
	161	420	581	255	41	296	0.199	1250	7.6	4.0	6.2	3.1
	205	490	695	286	90	376	0.260	1070	12.5	5.4	7.7	4.2
	234	510	744	277	137	414	0.300	900	16.8	6.2	8.3	4.7
R_6	245	530	775	256	178	434	0.320	780	20.3	6.7	8.6	5.1
	260	540	800	240	220	460	0.348	670	23.8	6.9	9.2	5.4
	271	560	811	222	246	468	0.360	600	25.7	6.9	9.3	5.5
	300	580	880	198	276	474	0.370	520	28.1	6.9	9.5	5.7

表—4 負荷特性実験値 ($V_2=100$ V, $i_{gf}=0.2$ A) (図-10, 20 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
R_2	275	230	505	51	3	54	0.034	1455	1.0	0.5	0.8	1.8
	230	550	780	332	19	351	0.230	1405	2.2	1.5	5.5	4.8
	195	764	959	543	42	585	0.390	1355	3.4	2.7	8.8	7.2
	195	910	1105	669	70	739	0.496	1310	4.4	2.8	11.0	9.1
	180	1060	1240	790	109	899	0.610	1260	5.6	4.8	13.3	11.3
	195	1120	1315	842	149	991	0.680	1205	6.7	5.3	14.7	12.9
	225	1220	1445	879	204	1083	0.744	1150	7.9	6.0	16.2	14.9
	250	1310	1560	915	274	1189	0.810	1100	9.4	6.4	17.7	16.8
	280	1370	1650	901	342	1243	0.850	1030	10.6	6.7	18.8	18.6
	305	1440	1745	932	437	1369	0.940	965	12.2	7.1	20.0	20.7
	325	1500	1825	931	507	1438	0.990	915	13.2	7.8	21.0	22.0
	335	1560	1895	920	575	1495	1.040	860	14.3	7.3	22.3	23.2
	355	1610	1965	903	652	1555	1.084	810	15.4	7.3	23.3	24.4
	360	1670	2030	882	731	1613	1.130	760	16.5	7.4	24.0	25.6
	360	1680	2040	865	765	1630	1.142	735	16.9	7.6	24.5	26.1
	375	1730	2105	831	842	1673	1.180	685	17.9	7.6	25.5	27.2
	395	1780	2175	800	943	1743	1.236	630	19.2	7.8	26.5	28.4
	430	1848	2278	715	1043	1758	1.244	560	20.3	7.2	27.5	29.7
R_3	235	230	465	57	2	59	0.038	1455	1.1	1.3	0.8	1.0
	245	470	715	317	10	327	0.220	1400	2.7	3.9	6.0	2.4
	210	580	790	452	24	476	0.324	1360	3.9	5.7	8.8	3.6
	280	650	930	547	48	595	0.410	1300	5.4	7.1	10.3	5.1
	320	700	1020	602	73	675	0.470	1245	6.6	8.0	12.0	6.4
	380	730	1110	637	107	744	0.520	1190	7.9	8.9	12.8	7.8
	425	770	1195	661	152	813	0.570	1130	9.4	9.6	13.8	9.3
	465	810	1275	678	224	902	0.620	1065	11.0	11.0	14.0	11.8
	500	860	1360	675	274	949	0.660	995	12.6	11.2	14.5	12.5
	530	910	1440	675	339	1014	0.710	925	14.0	11.5	15.6	14.0
	590	920	1510	675	421	1096	0.760	865	15.8	12.0	15.3	15.4
	610	970	1580	675	479	1154	0.810	810	16.9	12.1	15.6	16.4
	620	1020	1640	665	545	1210	0.840	770	17.9	12.0	15.8	17.6
	640	1060	1700	650	642	1292	0.904	700	19.4	12.0	16.0	19.1
	645	1110	1755	625	700	1325	0.930	655	20.2	12.0	16.2	20.0
	660	1200	1860	560	835	1395	0.990	560	22.2	12.1	16.7	21.7
	680	1290	1970	550	941	1491	1.050	510	23.6	11.7	20.1	23.0
R_4	245	230	475	60	2	62	0.040	1460	1.0	0.3	1.0	1.3
	230	450	680	321	13	334	0.220	1415	2.4	3.6	5.1	3.1

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
R_4	240	600	840	490	28	518	0.350	1360	3.6	6.0	8.0	4.5
	295	660	955	564	52	616	0.422	1300	5.2	7.8	10.2	5.8
	355	680	1035	592	81	673	0.470	1225	6.9	8.9	11.3	6.8
	375	700	1075	—	106	—	—	1180	8.2	10.0	12.0	7.5
	410	700	1110	584	136	720	0.506	1120	9.8	11.0	12.7	8.0
	450	700	1150	560	170	730	0.524	1040	11.5	11.1	13.0	8.6
	480	680	1160	545	212	757	0.530	1000	13.6	11.4	13.5	9.0
	510	670	1180	508	240	748	0.540	915	14.8	11.9	13.8	9.4
	530	670	1200	472	286	758	0.546	840	16.9	12.4	13.8	9.8
	550	690	1240	450	343	793	0.576	760	19.4	12.8	14.1	10.2
	550	670	1220	417	370	787	0.580	700	20.6	12.6	14.2	10.4
	565	690	1255	399	400	799	0.594	655	21.8	12.9	14.6	10.6
	580	700	1280	370	441	811	0.600	600	23.6	13.0	14.7	10.8
	595	710	1305	314	505	819	0.610	500	26.0	13.0	14.9	11.2

表—5　負荷特性実験値 ($V_2=150$ V, $i_{gf}=0.4$ A) (図-11, 17, 21, 23 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
R_4	300	230	530	52	2	54	0.034	1480	0.9	0.5	0.3	1.0
	195	580	775	333	10	343	0.224	1445	2.2	1.0	3.5	2.6
	35	1030	1065	694	38	732	0.484	1395	4.3	3.0	7.3	5.1
	−30	1450	1420	975	92	1067	0.726	1305	7.5	6.5	12.3	7.1
	−25	1600	1575	1020	154	1174	0.824	1205	10.7	8.6	15.0	8.3
	−50	1760	1710	1100	186	1286	0.914	1170	12.3	10.1	16.8	8.7
	−30	1860	1830	1102	266	1368	0.990	1080	15.9	11.9	19.0	9.6
	−35	2000	1965	1090	377	1467	1.110	960	20.7	14.5	21.5	10.4
	−20	2040	2020	982	463	1445	1.124	850	24.3	15.5	22.3	11.0
	−10	2060	2050	889	555	1444	1.150	750	27.9	15.5	22.5	11.5
	−10	2080	2070	827	640	1467	1.170	687	31.0	15.7	22.7	11.9
	0	2100	2100	741	703	1444	1.172	615	33.3	15.4	23.3	12.2
	15	2100	2115	667	789	1456	1.200	540	36.2	15.6	23.5	12.6

表—6　負荷特性実験値 ($V_2=150$ V, $i_{gf}=0.3$ A) (図-11 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
R_4	170	360	530	62	1	63	0.044	1480	0.8	0.4	0.3	0.8
	95	690	785	336	4	340	0.224	1460	1.3	1.4	1.5	1.9

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
	−135	1520	1395	990	37	1027	0.690	1395	4.2	5.7	10.3	5.0
	−110	1800	1690	1158	126	1284	0.906	1240	9.3	10.4	17.0	7.8
	−105	1944	1839	1160	200	1360	0.990	1140	13.0	12.9	19.8	8.9
	− 80	1980	1900	1158	244	1402	1.034	1090	15.1	14.3	21.3	9.4
R_4	− 80	2060	1980	1128	305	1433	1.104	995	17.8	16.2	23.2	9.9
	− 75	2100	2025	1050	392	1442	1.140	895	21.5	17.4	24.0	10.5
	− 55	2100	2045	905	503	1408	1.130	780	25.9	17.9	24.5	11.2
	− 70	2160	2090	867	553	1420	1.164	723	27.8	18.3	25.0	11.5
	− 60	2170	2110	800	634	1434	1.180	660	31.0	18.6	25.5	11.8

表—7 負荷特性実験値 ($V_2=70$ V, $i_{gf}=0.4$ A) (図-12, 17, 18, 21, 23 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
	595	60	655	317	18	335	0.220	1410	2.1	4.4	0.5	4.9
	673	90	763	440	32	472	0.310	1380	2.9	5.5	0.9	6.5
	765	160	926	557	62	619	0.412	1315	4.1	6.5	2.0	8.8
	815	250	1065	640	92	732	0.490	1270	5.1	7.4	3.6	10.4
	865	310	1175	721	143	864	0.570	1230	6.6	8.4	4.6	12.6
	885	380	1265	735	194	929	0.620	1150	8.0	9.0	5.8	14.0
	910	480	1390	780	265	1045	0.700	1085	9.3	9.8	7.4	16.5
	925	560	1485	800	342	1142	0.770	1010	10.8	10.6	9.2	18.4
R_2	930	630	1560	800	392	1192	0.810	960	11.8	11.0	10.2	19.7
	940	700	1640	778	491	1269	0.850	890	13.2	11.7	11.8	21.5
	970	760	1730	770	573	1343	0.912	820	14.5	12.1	12.7	22.8
	975	800	1775	750	645	1395	0.946	770	15.6	12.2	13.5	23.9
	990	860	1850	692	754	1446	0.990	680	17.0	12.6	14.4	25.6
	1000	920	1920	657	857	1514	1.030	620	18.3	12.9	15.4	27.1
	1015	980	1995	627	965	1592	1.070	565	19.5	13.1	16.4	28.5
	1025	1020	2045	512	1063	1575	1.090	500	20.6	13.2	17.4	29.8
	370	60	430	60	3	63	0.040	1460	1.0	0.6	0.2	1.4
	595	60	655	315	24	339	0.220	1390	3.4	4.4	1.2	4.0
	724	60	784	390	52	442	0.290	1305	5.3	5.9	1.0	5.7
	775	60	835	415	78	493	0.324	1245	6.8	6.6	0.8	6.6
	810	76	886	422	110	532	0.354	1160	8.6	6.9	0.6	7.4
	820	100	920	422	143	565	0.374	1095	10.2	7.3	1.3	8.1
R_4	985	30	1015	448	209	657	0.440	990	13.4	9.2	1.0	9.0
	995	30	1025	417	235	652	0.446	910	14.7	9.4	0.9	9.2
	1020	40	1060	398	274	672	0.460	840	16.5	9.8	0.9	9.6
	1030	40	1070	370	318	688	0.474	760	18.4	11.0	0.8	10.0
	1040	50	1090	338	357	695	0.480	685	20.2	12.0	0.8	10.2
	1055	60	1115	311	405	716	0.500	605	22.2	13.0	1.4	10.5
	1060	70	1130	285	444	729	0.508	545	23.7	13.0	1.5	10.8

表—8　負荷特性実験値 ($V_2=150$ V, $\tau_l=0.6$ kg-m) (図-13 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	励磁電流 i_{gf} (A)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
	125	1120	1245	892	3	895	0.001	1445	0.9	5.8	7.5	1.9
	40	1170	1210	886	5	891	0.050	1435	1.3	5.9	8.5	2.4
	− 7	1220	1213	883	8	891	0.100	1430	1.6	5.9	8.8	2.9
	−65	1300	1235	876	14	890	0.152	1420	2.3	6.1	9.5	3.6
R_4	−80	1310	1230	870	18	888	0.198	1410	2.6	6.0	9.6	4.1
	−80	1300	1220	860	26	886	0.251	1393	3.3	5.6	9.6	4.7
	−60	1290	1230	855	34	889	0.308	1383	3.9	5.0	9.6	5.2
	−43	1250	1207	850	40	890	0.351	1378	4.3	4.5	9.4	5.5
	−15	1220	1215	845	50	895	0.400	1368	4.9	4.2	9.2	5.9

表—9　負荷特性実験値 ($V_2=70$ V, $\tau_l=0.3$ kg-m) (図-14 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	励磁電流 i_{gf} (A)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
	190	600	790	254	155	409	0.001	825	9.5	12.0	16.0	9.5
	230	520	750	267	158	425	0.045	867	9.6	10.3	13.9	9.5
	273	480	753	277	168	445	0.095	898	9.9	8.6	11.6	9.8
	335	420	755	291	170	461	0.153	945	10.0	6.8	8.8	9.8
	380	360	740	306	163	469	0.195	993	9.8	6.2	7.0	9.6
R_3	451	280	731	321	149	470	0.250	1040	9.3	5.8	4.3	9.2
	530	220	750	339	131	470	0.298	1100	8.8	5.8	2.5	8.6
	628	120	748	364	95	459	0.348	1180	7.6	5.8	0.8	7.2
	653	100	753	385	73	458	0.390	1250	6.7	5.8	2.1	6.3
	720	50	770	400	53	453	0.440	1300	5.8	5.8	2.4	5.3

表—10　負荷特性実験値 ($V_2=100$ V, $i_{gf}=0.4$ A, $R=R_4$)
(図-15, 24, 25 に示す)

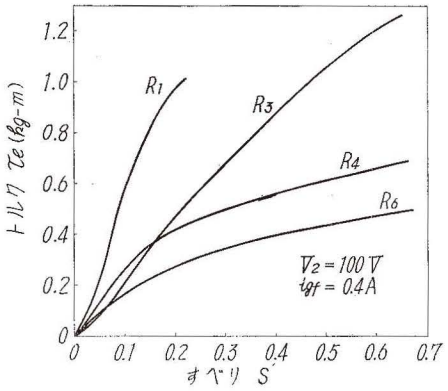
抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
	290	120	410	51	3	54	0.034	1465	1.0	1.0	0.8	1.5
	500	300	800	336	38	374	0.240	1360	4.3	4.1	4.5	5.2
	645	390	1035	602	115	717	0.480	1220	8.8	5.7	6.0	7.5
	720	420	1140	605	183	788	0.536	1095	12.2	6.4	6.1	8.6
A_1	750	450	1200	587	252	839	0.576	990	15.4	6.6	6.1	9.4
	785	470	1255	550	319	869	0.604	885	18.4	7.1	6.2	10.0
	835	480	1315	520	387	907	0.636	795	21.3	7.4	6.4	10.5
	840	500	1340	467	450	917	0.654	695	23.8	7.3	6.8	10.9

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
A_1	840	520	1360	430	525	955	0.692	605	26.8	7.3	7.1	11.3
	875	550	1425	388	595	983	0.714	530	29.3	7.2	7.5	11.7
A_2	275	110	385	52	1	53	0.034	1480	0.7	1.0	0.5	0.8
	670	320	990	625	29	654	0.440	1380	3.8	5.8	6.6	4.4
	1070	230	1300	745	122	867	0.604	1200	9.2	10.5	8.4	7.7
	1140	230	1370	719	179	898	0.634	1110	12.0	11.4	8.3	8.6
	1185	200	1385	667	242	909	0.646	1005	15.0	11.5	8.0	9.3
	1200	230	1430	625	319	944	0.688	885	18.5	11.3	7.3	10.0
	1220	250	1470	554	384	938	0.682	790	21.3	11.4	7.2	10.4
	1210	270	1480	496	460	956	0.700	690	24.4	11.1	7.1	10.9
	1170	300	1470	450	530	980	0.730	600	27.1	11.0	6.9	11.3
	1240	340	1580	394	603	997	0.744	515	30.0	10.7	6.8	11.6
A_3	260	120	380	52	1	53	0.034	1485	0.5	1.0	0.5	0.5
	630	420	1050	742	8	750	0.510	1413	1.9	6.7	6.8	2.3
	1085	500	1585	1061	37	1098	0.760	1360	4.3	10.8	10.6	4.9
	1130	250	1380	750	161	911	0.640	1140	11.1	11.9	9.6	8.4
	1170	260	1430	618	279	897	0.636	945	16.7	10.0	7.0	9.7
	1135	330	1465	532	383	915	0.646	800	21.2	9.3	6.7	10.4
	1100	400	1500	482	454	936	0.670	700	24.0	8.6	6.4	10.9
	1075	460	1535	430	535	965	0.708	590	27.3	8.2	6.5	11.3
	1050	510	1560	372	608	980	0.714	510	30.0	7.7	6.8	11.7
A_4	250	130	380	52	0	52	0.034	1490	0.4	0.5	0.2	0.2
	1015	620	1635	1182	12	1194	0.810	1420	2.4	9.7	2.8	2.8
								脱調				

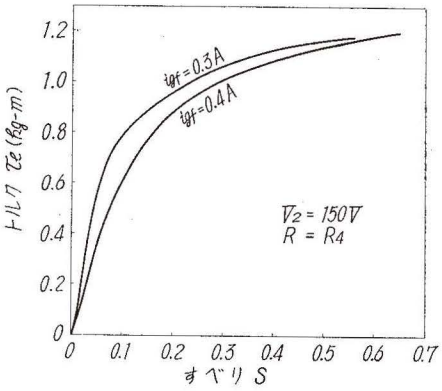
表—11 負荷特性実験値 ($V_2=70$ V, $i_{gf}=0.4$ A, $R=R_4$) (図-16 に示す)

抵抗 R	入力 A (W)	入力 C (W)	入力 $A+C$ (W)	出力 P (W)	出力 E (W)	出力 $P+E$ (W)	トルク τ_l (kg-m)	速度 n (r.p.m.)	2次回路 E (V)	2次回路 i_a (A)	2次回路 i_m (A)	2次回路 i_t (A)
A_1	320	50	370	51	3	54	0.034	1460	1.0	1.0	0.01	1.5
	605	60	665	302	30	332	0.216	1360	3.8	4.2	0.5	4.5
	690	100	790	421	78	499	0.330	1240	6.9	6.0	2.2	6.6
	735	140	875	430	98	528	0.370	1130	7.3	6.6	3.0	7.7
	720	190	910	438	163	601	0.410	1040	11.4	6.8	3.4	8.4
	770	200	970	400	217	617	0.420	925	13.8	7.4	4.1	9.1
	742	220	962	375	267	642	0.438	835	16.2	7.6	4.3	9.5
	760	240	1000	351	315	666	0.450	760	18.5	7.7	4.6	9.9

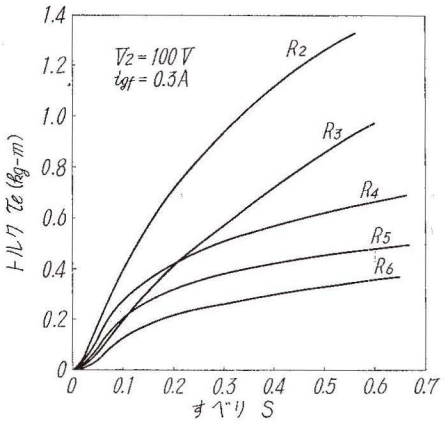
抵抗	入力			出力			トルク	速度	2次回路			
R	A (W)	C (W)	$A+C$ (W)	P (W)	E (W)	$P+E$ (W)	τ_l (kg-m)	n (r.p.m.)	E (V)	i_a (A)	i_m (A)	i_t (A)
	740	260	1000	327	360	687	0.468	680	20.5	7.7	4.7	10.1
	765	270	1035	298	401	699	0.480	605	22.0	7.7	4.8	10.5
A_1	750	280	1030	293	406	699	0.484	590	22.4	7.6	4.7	10.7
	755	290	1045	276	444	720	0.498	540	23.7	7.6	5.0	10.7
	795	320	1115	246	472	718	0.510	470	25.0	7.6	5.7	10.9
	345	60	405	52	2	54	0.034	1470	1.0	0.5	0.01	1.0
	590	60	650	303	20	323	0.210	1400	3.2	4.2	2.1	3.6
	700	60	760	395	44	439	0.290	1325	4.8	5.8	2.0	5.2
	825	30	855	451	77	528	0.350	1250	6.8	6.9	1.7	6.5
	910	30	940	472	103	575	0.388	1185	8.3	7.7	1.5	7.2
	977	30	1007	485	152	637	0.430	1095	10.8	8.7	1.3	8.1
A_2	1010	20	1030	465	190	655	0.450	1005	12.7	9.1	1.2	8.7
	1040	20	1060	449	222	671	0.462	945	14.1	9.3	1.2	9.1
	1055	30	1085	426	266	692	0.482	860	16.2	9.8	1.2	9.5
	1055	40	1095	388	318	706	0.496	760	18.4	10.1	1.1	10.0
	1065	50	1115	344	374	718	0.508	660	20.9	10.2	1.3	10.3
	1050	60	1110	308	405	713	0.506	595	22.2	10.2	1.5	10.5
	1070	90	1160	269	465	734	0.522	500	24.6	10.1	2.1	10.9
	290	80	370	52	1	53	0.034	1480	0.6	0.5	0.7	0.8
	670	140	810	468	15	483	0.322	1415	2.7	6.0	4.5	3.1
	930	60	990	569	42	611	0.424	1307	4.7	8.5	5.8	5.1
	1145	−80	1065	562	99	611	0.456	1200	8.0	10.8	5.0	7.1
	1160	−70	1090	525	151	676	0.462	1105	10.9	10.5	5.6	8.0
	1120	−60	1060	497	179	676	0.470	1030	12.1	10.4	3.1	8.6
A_3	1165	−50	1115	458	230	688	0.480	927	14.6	10.7	2.2	9.1
	1165	−40	1125	429	270	699	0.486	857	16.4	10.8	1.7	9.5
	1155	−20	1135	404	314	718	0.492	798	18.3	10.7	1.3	9.9
	1160	20	1180	361	361	722	0.506	695	20.4	10.7	0.9	10.2
	1140	50	1190	318	419	737	0.520	595	22.8	10.5	0.9	10.6
	1080	110	1190	269	469	738	0.524	500	24.8	9.8	2.2	10.9
	290	80	370	52	1	53	0.034	1482	0.6	0.5	0.7	0.8
A_4	1042	150	1192	803	223	1026	0.568	1375 脱調	3.3	9.5	2.2	3.9



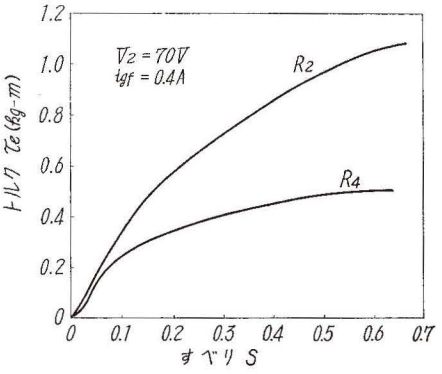
図—8　速度—トルク特性
(表-2 より)



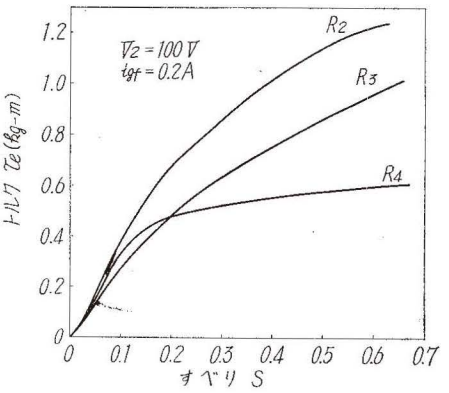
図—11　速度—トルク特性
(表-5, 6 より)



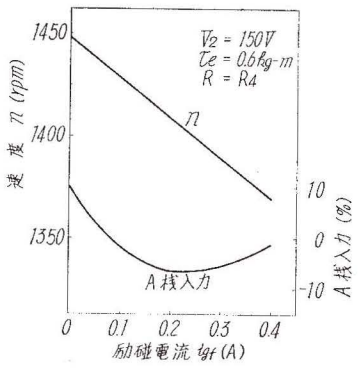
図—9　速度—トルク特性
(表-3 より)



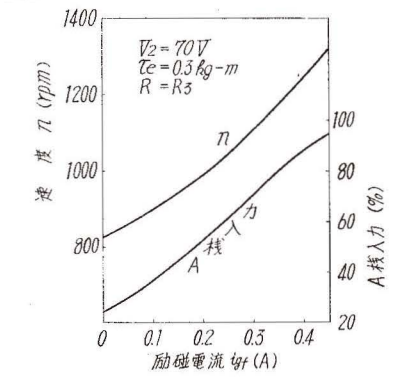
図—12　速度—トルク特性
(表-7 より)



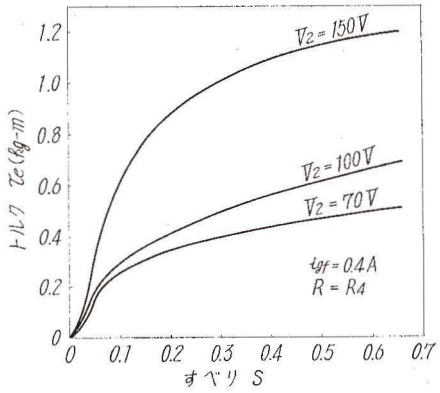
図—10　速度—トルク特性
(表-4 より)



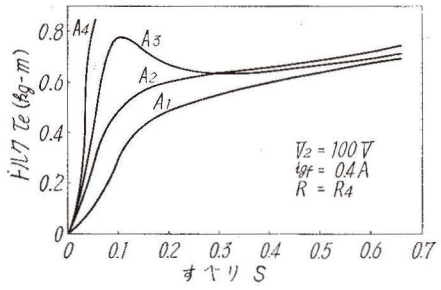
図—13　励磁電流—速度，A 機入力特性
(表-8 より)



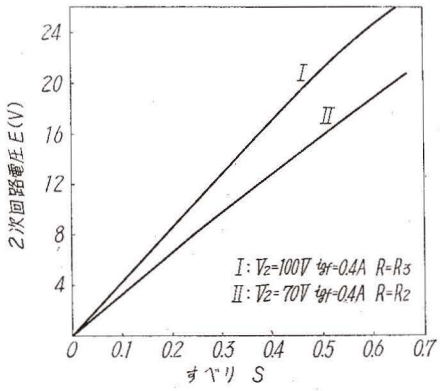
図—14　励磁電流—速度，A 機入力特性
(表-9 より)



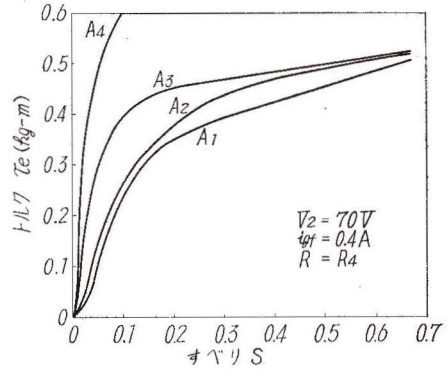
図—17　速度—トルク特性
(表-2, 5, 7 より)



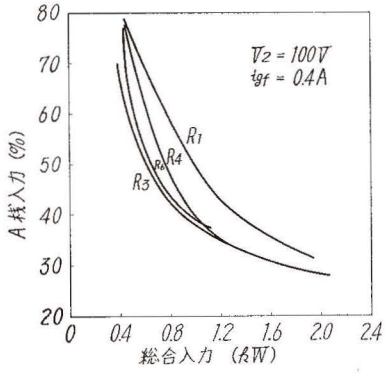
図—15　速度—トルク特性
(表-10 より)



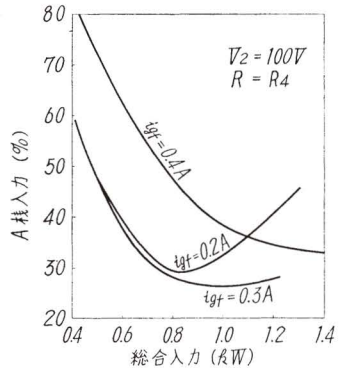
図—18　速度—2 次回路電圧特性
(表-2, 7 より)



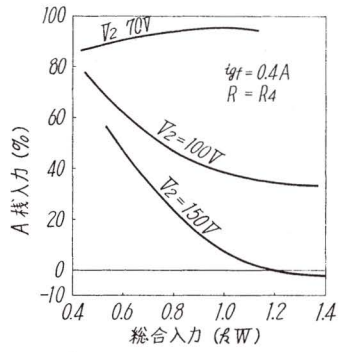
図—16　速度—トルク特性
(表-11 より)



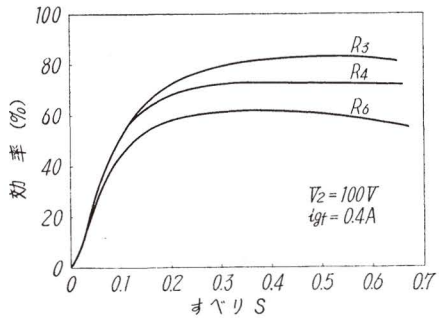
図—19　総合入力—A 機入力特性
(表-2 より)



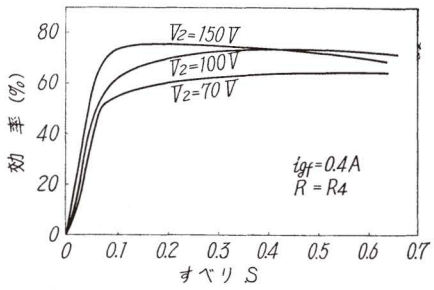
図—20　総合入力—A 機入力特性
(表-2, 3, 4 より)



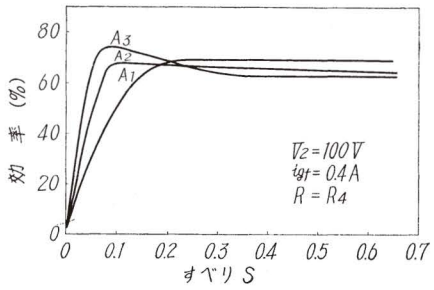
図—21　総合入力—A 機入力特性
(表-2, 5, 7 より)



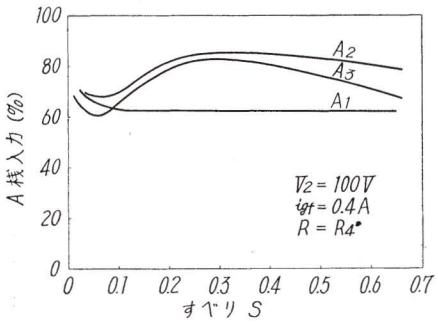
図—22　速度—効率特性 (抵抗変化)
(表-2 より)



図—23　速度—効率特性 (入力電圧変化)
(表-2, 5, 7 より)



図—24　速度—効率特性 (位相変化)
(表-10 より)



図—25　速度—A 機入力特性 (位相変化)
(表-10 より)

10. 実験結果の考察

1. 速度制御の要素

実験結果とグラフから速度制御の要素として次の事が考えられる。

a) すべり電力を消費する抵抗によるもの

b) 位相調整発電機の位相調整によるもの

c) 位相調整発電機の界磁電流によるもの

d) 巻線型誘導電動機と無段変速同期電動機との容量比によるもの

a) すべり電力を消費する抵抗による影響

実験では抵抗にすべり電力を消費させたが，本来はこの電力は適当なインバータとコンバータを使用して電源に帰還させるか，或いは交流整流子機等を使用して機械出力として帰還することを目的としている。図-8, 図-9 において抵抗を大にしていくと速度—トルク特性は同一トルクに対する速度が次第に低下していく。しかも高速よりも低速における変化が大きく，この事は2次抵抗法に見られる現象である。一般に2次励磁法ではこの低速におけるトルクの減少が少ない。位相調整機の励磁電流を増していくと，2次抵抗法より2次励磁法に類似したトルクの増加が見られる。つまり抵抗による影響は，この同期機の影響を受けてある程度失っているという現象が生じてくる。しかもこの励磁電流による影響は低速の時の方が大きい。つまり抵抗による変化の大きい部分に励磁電流の影響が大きい。このことは抵抗に代って帰還系を付属させるならば，両方の調節によって微細な速度制御が可能である事を意味している。またトルクの低下の割合が少ないということは重負荷に使用する事が可能な事を表わしている。図-12 から無段変速同期電動機の容量を誘導機の容量より大きくとると抵抗による速度変化の領域は少なくなる。

b) 位相調整機の位相調整による影響

理論的には位相を変えることによって抵抗にかかる誘導機の2次電圧と位相調整発電機の出力電圧とのベクトル和が変化することになるので，丁度2次励磁による速度制御法の根本理論と同一結果になる。図-15, 図-16 において実験曲線をたどれば高速においては位相の変化による影響が緩慢となる。このことは誘導機の機械的出力は高速の所では直線的に比例していること，中速以下では緩やかにトルクが低下していく事を考えてみると，位相調整機は主機が高速の時は逆に低速である事から，その発生電圧が小さいので誘導機の2次電流が増してトルクが増加する。すなわち位相を変化していくと，誘導機の速度—トルク特性の性格が大きく出てくる。また低速の所では位相調整機の発生電圧が高くなるのでその起電が大きいため，しかもベクトル的に位相が変わっているので抵抗の両端に加わる電圧は少なくなる。それで逆起電力が小さくなり，誘導機の2次側に流れる電流が少なくなり，従ってトルクは増加しない。その結果，同相の所から 45° 近く変化すると脱調してしまう。また位相を変えていくと同期電動機の入力が増加していく。このことは位相の変化によって誘導機のトルクが少なくなり，同期電動機の機械的出力が次第に増加していくことを意味している。従ってこの位相調整機の位相を変えて行なう速度速御は主機が高速で運転される場合はその範囲を限定する必要がある。

c) 位相調整機の界磁電流による影響

この方法は b) の位相調整と同様に界磁電流を変化させる事によって行なうものである。図-13, 図-14 においてこの方法は非常に無理のない直線性を持った速度の変化が得られる事がわかる。図-13 では界磁電流を増加させると速度が次第に低下してくる。また A 機の入力百分率曲線は総合入力の 10~7% 位である。このことは誘導電動機の入力電圧が 150 V でその機械出力がほとんど負荷分担しており，同期電動機の機械出力は小さくて，また発電作用を起こしている所も見られる。図-14 では界磁電流を増加させると速度は次第に増加していき，A 機の入力百分率も増加している。これは誘動機の入力電圧が 70 V で図-13 の時の半分以下の出力しか出していないので，同期電動機がほとんどその機械出力を分担していることを意味している。すなわちこの一定トルクで速度を増加させているのは同期電動機であり，位相調整機の界磁電流を増せば同期電動機の入力が増加して抵抗の両端に加わる電圧が増加し，また電流も増加するので誘導機のトルクの増加が抑えられる。以上の実験を対比してみると誘導機と同期電動機との容量に大きな違いがあると全く逆な事が見られる。それは界磁電流を増加することによって速度が増加したり，また逆に減少したりする現象である。

d) 巻線型誘導電動機と同期電動機との容量比による影響

誘導電動機の容量を同期電動機の容量より大きくとるならば，同期電動機による位相の変化，位相調整機の界磁電流の影響等は次第に少なくなり，抵抗を変化させる 2 次抵抗法或いはセルビウス法，クレーマー法に近似の速度—トルク特性が得られる。しかし両機の容量を近くとるならばその相乗効果が表われてくる。図-13, 図-14 はその代表的な結果である。図-17 の速度—トルク特性は誘導機の入力電圧（即ち容量）に対する変化である。この図から誘導機の入力電圧を少なくしていくと，速度の変化に対するトルクの作用が次第に減少してくることがわかる。また速度—トルク特性は次第にその抵抗の影響及び位相調整機の位相変化による影響が少なくなってくる。

2. 負 荷 分 担

a) 誘導電動機の入力電圧による影響

図-21 において誘導電動機の容量が小さいと同期電動機の負荷分担率は増加する。これは理論的にも当然の結果である。

b) すべり電力を消費する抵抗による影響

図-19 において総合入力が増加するに従って A 機の入力百分率（即ち負荷分担率）は低下している。しかし抵抗による A 機の負荷分担の変化は小さい。

c) 位相調整機の界磁電流による影響

図-20 において界磁電流が増加すれば同期電動機の入力百分率は増加していくが，ある点から逆に減少していく現象が見られる。これは実験結果から総合入力が増加していくと速度が

低下して機械出力が増し，位相調整機の出力が増加して同期電動機の入力も増加してくるものと考えられる。

d) 位相調整機の位相調整による影響

図-25 において高速では位相調整機の出力は少ないので同期電動機の負荷分担率への影響はほとんどないと見てよい。しかし低速になると位相調整機の出力は増大するので負荷分担率は増加する。

3. 効　　率

a) すべり電力を消費する抵抗による影響

抵抗中には位相調整機の出力電流と誘導電動機の 2 次電流が流れている。図-22 においてこの抵抗を増大していくと効率は次第に低下していく。この原因としては抵抗が変化すると各各の電流の位相角が変化するためと推定される。即ち位相角 φ は $\varphi=\tan^{-1}L/R$ によって与えられるから，両機のインダクタンス L が異なる場合には抵抗 R によって両電流の位相角が大きくなってくると抵抗中を流れる実効電流 i_t は減少し，これが効率の低下をまねくものと考えられる。

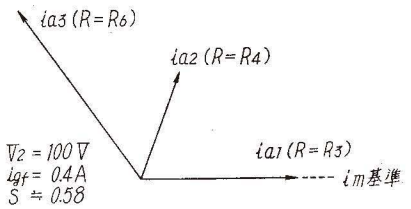
b) 誘導電動機の入力電圧による影響

図-23 において誘導電動機の入力電圧を低下していくと総合効率の低下が見られる。これは入力電圧が低下しても機械損は変わらないで，出力に対して機械損の割合が大きくなることに原因している。低速においては $V_2=150$ V と $V_2=100$ V との効率が入れ代っている部分があるが，$V_2=70$ V においては速度領域の変化に対して効率の低下は見られない。

c) 位相調整機の位相調整による影響

図-24 においてすべり $s=0.15\sim0.7$ では位相角が小さい程効率が良いが，これは a) で説明したことから明らかであろう。しかし $s=0.15$ 以下では全く反対の結果が出ている。これは同期電動機と誘導電動機の負荷分担の割合の変化によるものか，また他の原因によるものかは更に精密実験の必要がある。この実験において i_a-i_m の位相を一定に保つことは前述のように抵抗が常に変化していること等から無理なことであるが実験値の i_a, i_m, i_t からその変化の傾向を推定することは出来る。

一例として 図-26 は $V_2=100$ V，$i_{gf}=0.4$ A，$s=0.58$ 附近において抵抗 R による i_a-i_m の位相角の変化を i_a, i_m, i_t の実験値より求めたものであるが，この図からも抵抗を増していくと位相角が大きくなっている様子が見られる。



図—26　抵抗 R による i_a-i_m 位相角の変化

11. 結 言

固定子回転型同期電動機と巻線型誘導電動機に位相調整用同期発電機を組み合わせた系の速度制御法について理論的考察及び実験結果の検討を行なったが，この系の性能と特徴は次のように要約することができる。

(1) 重負荷運転時の速度制御が可能である。

(2) 高速運転時には誘導電動機の特性が大きく表われ，低速運転時には位相調整用同期発電機の位相変化による効果が大きい。

(3) 位相調整用同期発電機の界磁電流の変化による速度制御は略直線的関係になるが，同期電動機の容量が誘導電動機の容量よりも大きい場合は界磁電流の増加によって速度は上昇し，逆の場合は下降する。

(4) 位相調整用同期発電機の界磁電流または位相を調整することにより，総合負荷に対する同期電動機の負荷分担率は変化する。

終りに本研究並びに実験のために御力添下された本学電気教室各位と，終始実験等において協力下された本学15回生平岡岱示君，伊藤正弘君に謝意を表します。

(昭和42年4月28日受理)

文 献

1) 図所忠則・伊達隆三・近藤 修・藤田義弘： 固定子回転型可変速度同期電動機の諸特性より生ずる新組立て分類とその応用分野. 昭和40年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集.
2) 図所忠則・近藤 修・伊達隆三・藤田義弘・山崎永一： 無段変速同期機の補助機種の組合せにより生ずる特性と系の分類. 昭和41年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集.
3) 図所忠則・伊達隆三・近藤 修・藤田義弘： 無段変速同期電動機の諸特性と速度制御機構に関する研究報告. 昭和41年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集.
4) 図所忠則・伊達隆三・近藤 修・山崎永一： 補助系に位相調整用発電機を用いる誘導電動機の二次励磁方式理論，その1. 昭和41年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集.
5) 図所忠則・伊達隆三・近藤 修・山崎永一： 補助系に位相調整用発電機を用いる誘導電動機の二次励磁方式理論，その2. 昭和41年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集.
6) 宮入庄太： エネルギー変換工学入門 (上). 90, 丸善 (昭和38年).
7) 電気学会編： 誘導機. 95, 電気学会 (昭和37年).
8) 藤 了念： 誘導機 II. 67, オーム社 (昭和37年).
9) 片山仁八郎： 誘導機. 161, 日刊工業新聞社 (昭和40年).