



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



無段変速同期電動機の定常特性並びに実験報告

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-06-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 図所, 忠則, 近藤, 修, 伊達, 隆三, 藤田, 義弘 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3259

無段変速同期電動機の定常特性並びに実験報告

図所忠則・近藤 修
伊達隆三・藤田義弘

A Study on the Continuous Variable Speed Synchronous Motor

Tadanori Zusho, Osamu Kondō, Ryuzō Date
and Yoshihiro Fujita

Abstract

In the previous paper, the authors have presented the new results of study on "Continuous Variable Speed Synchronous Motor", what is called "Z·K motor and system".

The motor is composed of three parts of electrical mechanism. The first is a main synchronous motor, and the second is a auxiliary generator which is driven by the revolving kinetic energy of the main synchronous motor's stator, and the third is a auxiliary motor coupled mechanically with the main motor's rotor shaft and driven by the electrical energy which is produced by the auxiliary second generator. As a consecution of the above the writers carried out the various theoretical analysis on "Z·K motor and system" and their experiment successively.

These experimental results comparably agree with those of the theoretical analysis. The results show many excellency not only on $p \cdot f$, as well as the efficiency, but also on several characteristics, as follows,

- a) Constant speed under constant torque however $V \cdot E \cdot \delta$ are variable.
- b) V-curve characteristic under constant load and variable main motor's exciting current.
- c) Series D·C motor's characteristic under any variable speed.
- d) Shunt D·C motor's characteristic under the variable load.
- e) Very fit for the purpose of Krämer system, Scherbius system, S·S·M, Brown Boveri system and phase advancer, etc.

1. 緒 言

著者等は前報¹⁾において同期電動機の固定子を回転型にし、これと連動する発電機構、その電力を主機に直結した電動機に正或いは負帰還する新方式 Z·K motor and system について発表した。その中でこの方式の諸特性が従来の各種電動機に比較して如何に改善向上されるかの理論解析をした。引続き著者等は更に多くの考察を積み重ねながら試作機による実験証明を行ない、更にこの系の応用面の検討を行なったのでここに発表した。

2. 無段変速同期電動機の構造機構と理論概要

図-1 は無段変速同期電動機 (Z·K motor), 図-2 は (Z·K system) を示し、両機共に系の

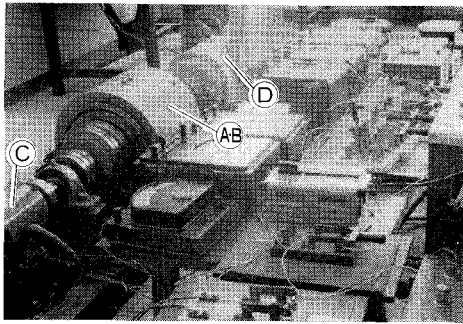


図-1 Z-K モータ

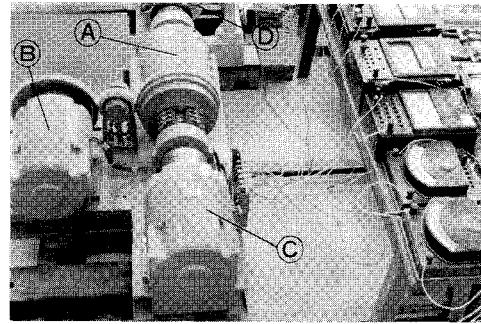


図-2 Z-K システム(系)

表-1 実験に使用した電動機の仕様書

	主 機 ④				補 助 機 ⑤				補助機⑥	⑦ 負 荷
	容量 (W)	極数	機 種	励 磁	容量 (W)	極数	機 種	励磁		
Z-K motor	AC 100 V 1200	4	同期電動機 固定子回転型	他 励 100 V	300	4	分 巻 直流機	100 V	⑤に同じ	直流動力計式 3 kW
Z-K system	AC 100 V 700	4	同期電動機 固定子回転型	他 励 100 V	500	4	複 巻 直流機	100 V	⑤に同じ	直流動力計式 3 kW

特性解明と各種実験に使用した。その仕様概要を表-1に示す。

なおそのブロック図を図-3、図-4に示す。今この系の理論の概要を記せば主機④に交流電源を継いで同期させると、固定子・回転子は互に反対方向のトルクを発生して、相対的に同期角速度 ω_0 で反対方向に回転するから、その角速度をそれぞれ ω_s, ω_r とすれば

$$\omega_r = (1-s) \omega_0 \tag{1}$$

$$\omega_s = s \omega_0 \tag{2}$$

で表わされる。

固定子の発生トルクと出力を τ_s, P_s 、回転子のそれを τ_r, P_r とし、合成出力を P_0 とすれば

$$P_0 = P_s + P_r \tag{3}$$

$$P_s = sP_0 \tag{4}$$

$$P_r = (1-s) P_0 \tag{5}$$

となる。ここで s とはこの系において静止軸より見て回転体が回転磁界と反対方向に同期角速

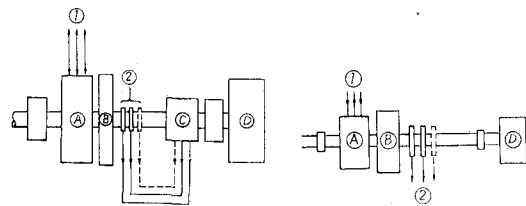


図-3 ブロック図 その1 図-4 ブロック図 その2

度で回転するときの角速度を $s=1$ とし、静止を $s=0$ 、磁界と同方向に同期角速度で回転するときを $s=-1$ とする静止軸に対するすべりを表わすことにする。

従って補助機 ③ が主機 ④ の固定子機械出力を吸収して電気エネルギーに変換するときその電動部 ⑤ に帰還される効率を η とすれば、負荷 ⑥ に利用される系のトルクと出力は

$$\tau_i = \left(1 + \frac{s\eta}{1-s}\right) \tau_r \tag{6}$$

$$P_i = \{(1-s) + s\eta\} P_0 \tag{7}$$

で表わされる。

3. 系のトルク特性 (負荷トルク正の場合)

(i) 起動トルク特性²⁾

合成起動トルクは (6) 式で $s=1$ の極限を考えればよい。その値を τ_{20} とすれば

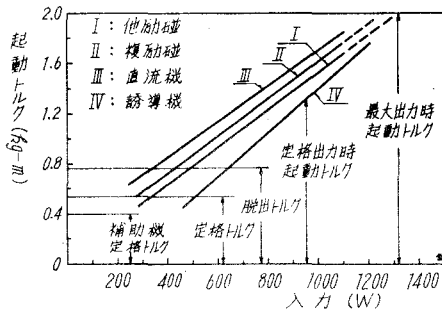


図-5 起動トルク曲線

$$\begin{aligned} \tau_{20} &= \left\{1 + \frac{ds\eta}{d(1-s)}\right\}_{s=1} \tau_r \\ &= \tau_r + \frac{d\eta}{d(1-s)_{s=1}} \tau_r \end{aligned} \tag{8}$$

従って系の起動トルクは、主機回転子の発生トルク τ_r と補助機 ③ 電動機の起動トルクの和となる。図-5 は系の起動トルクの実測値 (system について) で、その値を同容量の直巻直流電動機について測定したものを III に、同様に巻線型誘導電動機の測定値を IV に示す。最大値は主機脱出トルクに加える補助電動機最大起動トルクになる。また最大出力時の起動トルクは主機定格トルクの約 3.6 倍となっている。

(ii) 速度トルク特性

(a) $1 > s \geq 0.15$

このときは (6) 式が適用されその計算値と実験値を図-6 に示す。主機のトルク τ_r は従来 ① 点に示される $s=0$ 速度でだけ発生したが、この系においては $s=1$ 即ち回転子角速度零の起動時に発生し s の値の如何にかかわらず 1 定値を保つ。これに P_s から帰還される τ_m が加わって定出力特性を示すことになる。

$$\tau_m = \frac{\eta P_s}{(1-s)\omega_0} = \frac{\eta \tau_r s \omega_0}{(1-s)\omega_0} = \frac{\eta s \tau_r}{1-s} \tag{9}$$

(b) $s < 0$

回転子が同期速度を超えると補助両機を還流する電気エネルギーが逆転し、固定子が回転磁界と同方向に追隨するに要する電動トルクを ③ 機を通じて供給してやる関係で (6) 式の s

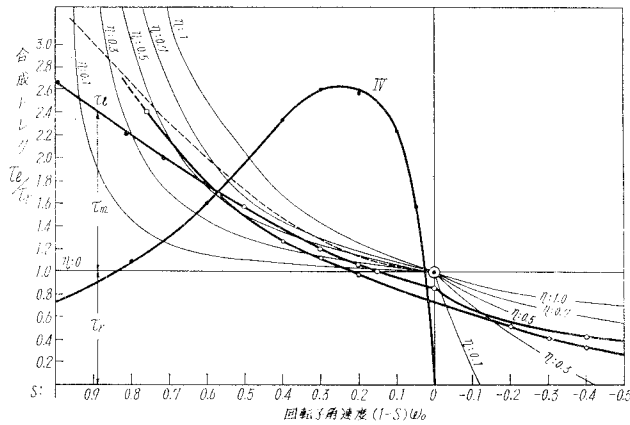


図-6 速度トルク特性曲線

は負として

$$\tau_z = \left(1 - \frac{|s|\eta}{1+|s|}\right) \tau_r \quad (10)$$

となる。図-6 にその計算値と実験値とを示す。 $\eta=1$ の場合は $s=-1$ 即ち 2 倍同期速度で $\tau_r/2$ になる。

(c) $0.15 \geq s > 0$

回転子角速度がこの範囲で合成トルクの実験値は (6) 式が示す値よりやや低下している。それは固定子角速度の減少に伴い、発電効率も低下しブレーキ・トルクが不足になるので電動作用をする © 機を発電機として作用させ、(B), © 両機共発電機として速度調整作用に必要な補助回路電流を生じさせるためである。従って補助系の発生電力は全部熱損失となり、その分だけ合成トルクは主回転子トルク τ_r より少くなる。III, IV 曲線は同容量の直巻直流電動機と誘導電動機のトルク曲線である。

4. 速度—出力 (効率) 特性³⁾

(a) $1 > s > 0.15$, (b) $0 > s$, (c) $0.15 \geq s > 0$ の 3 速度段階で合成出力は (7) が用いられる。またその実験値を図-7 に示す。(a) 範囲で補助機 © の出力 P_m は $P_m > 0$ となり、その各速度における値は主回転子の出力線 $P_r = \tau_r (1-s) \omega_0$ と合成出力線間の部分で示され

$$P_m = \eta s P_0 \quad (11)$$

になる。

(c) の範囲は上記 3 (ii) (c) に指摘したトルク線と同様に P_z 線は P_r 線より下になるが、その理由は補助発電機 (B) だけでは必要ブレーキ・トルクが不足するので © 機の励磁を逆にして発電させ、補助回路電流を増加させるために両補機出力は全部損失となる。

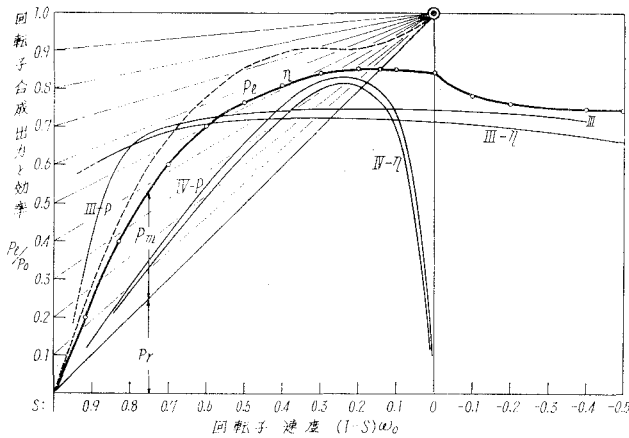


図-7 速度—出力 (効率) 特性曲線

(b) の範囲では実測値が示す通り、トルクの低下程 P_i は大きな減少がなく緩やかである。

これ等 (a), (b), (c) 範囲全域でこの系は同容量の直巻直流電動機 (III), 誘導電動機 (IV) の実験値に比較して良好であることがわかる。従来同期機が唯一の同期速度点 \odot (相差角一定の場合) であるのに比し、この系が他種電動機の特質を完全に採り入れているのは数多くの優れた特徴の一つと言える。

系の総合効率 η は入力を P_i , 出力を P_o , 主機出力を P_m , その効率を η_0 とすれば

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_m}{P_o} \frac{P_o}{P_i} = \eta_0 \frac{P_m}{P_o} \\ &= \eta_0 \{(1-s) + s\eta\} \end{aligned} \tag{12}$$

(12) 式は (7) 式と同形で $\eta_0=1$ としたときの総合効率は図-7の P_i 線で表わされる。なお同容量の直巻直流機、誘導機の出力線をそれぞれ III, IV に、又効率線を III- η , IV- η 曲線に示す。

5. 補助機の容量⁴⁾

系の補助機構は外部負荷トルクが正負を問わず発電機構及びその電気エネルギーを帰還制御する電動機構との2要素を備えることによって、主機である同期電動機に多種多様な性能と特質を持たせることができる。前項でも説明されたように補助機の容量は固定子発生最大出力によって決まり、それは負荷の速度—トルク特性が因子となる。

今固定子出力を P_s とすれば

$$\begin{aligned} P_s &= \tau_s s \omega_0 = s \omega_0 \frac{1-s}{(1-s) + s\eta} \tau_i \\ &= \frac{s(1-s)}{(1-s) + s\eta} P_{i0} \end{aligned} \tag{13}$$

但し $P_{i0} = \tau_i \omega_0$ とする。 P_s の最大値における s を求めるため

$$\frac{dP_s}{ds} = \frac{(1-2s)\{(1-s)+s\eta\} + s(1-s)(1-\eta)}{\{(1-s)+s\eta\}^2} P_{i0}$$

の分子を 0 とするには $P_{i0} \neq 0$ であるから

$$(1-2s)\{(1-s)+s\eta\} + s(1-s)(1-\eta) = 0$$

これを解いて P_s の最大値の s は

$$s = \frac{1 \pm \sqrt{\eta}}{1 - \eta}$$

これは $s < 1$ において成立するから負符号を採り

$$s = \frac{1}{1 + \sqrt{\eta}} \tag{14}$$

(14) 式を (13) 式に代入して

$$[P_s]_{\max} = \frac{1}{(1 + \sqrt{\eta})^2} P_{i0} \tag{15}$$

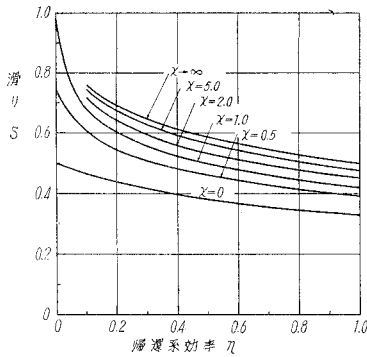


図-8 固定子出力理想曲線 ($S-\eta$ について)

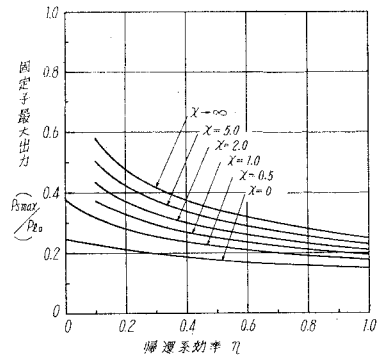


図-9 固定最大出力理想曲線

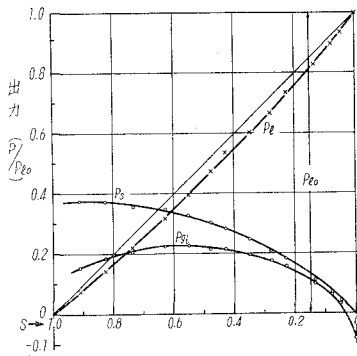


図-10 固定子出力実験曲線 ($x \rightarrow \infty$)

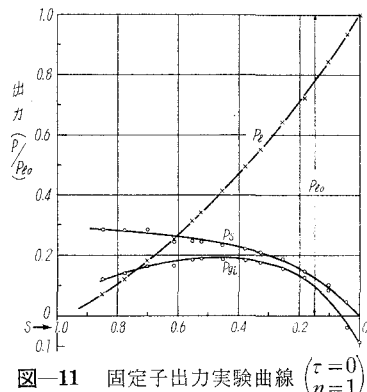


図-11 固定子出力実験曲線 ($\tau=0$, $n=1$)

幾つかの η の値に対し (13) 式から補助機の最大出力の主機に対する容量比が得られ、又任意の s における P_s を求められる。ここに仮定した負荷はどの速度にも無関係な定トルク分だけの場合で、補助機容量は最大である。

実際に想定される負荷の速度トルク特性は

$$\tau_L = \tau + k|1-s|^n \quad (16)$$

で示される。但し τ は定トルク分であり第2項は速度の n 乗に比例する分である。

系の補助機容量は (16) 式中 τ の τ_L に占める割合の減少及び n の増加に応じて P_s の最大値は減少し、同時にその生ずる $(1-s)$ 点が同期速度に近づいてくる。今負荷トルク特性が

$$\frac{\tau}{k} = x \quad (17)$$

$$\tau_L = \tau + k(1-s) \quad (18)$$

の場合、前記 (18) 式を得た方法と同様に求めたものを 図-8、図-9 に示す。 x 、 η が $(1-s)$ 及び $P_{s \max}$ に対する影響が明らかである。

これ等の速度トルク特性を系の負荷 ④ に与えて補助機の容量を実測し 図-10、図-11、図-12 に示す。図-10 は $x \rightarrow \infty$ で固定子出力が P_{i0} に対し 38%、補助発電機出力が 22%、図-11 は $x=1$ つまり定トルク分が零でトルクが速度に比例する負荷の場合で P_s が 27%、 P_{gs} が 17%、同じく定トルク分が零でトルクが速度の 2 乗に比例するときは、図-12 で固定子出力は 14%、発電機容量 10% であることを実測は示している。最大値発生個所は何れの場合も $s \approx 1$ の附近で生ずるが、これは固定子機械損が固定子最大速度の時に生ずることを意味している。補助発電機入力 P_{gi} 、その最大値を生ずる $(1-s)$ 点及び P_{i0} に対する比が 図-8、図-9 の推論に一致している。

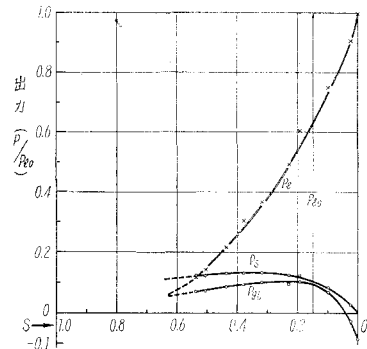


図-12 固定子出力実験曲線
($\tau=0$ $n=2$)

6. 系の同期機特性と非同期機特性⁵⁾

この系は固定子回転型同期機と補助機として同期機又は非同期機を合体して出来上がる一つの回転機であるが、この総合電動機は同期電動機の優れた特性を維持しながら直巻、分巻、誘導各電動機の特徴を備えている。これ等の点につき解析と実験を進めていく。

(i) 負荷トルク一定ならば同期機特性

系の運動方程式は固定子、回転子及び同期角速度を ω_s 、 ω_r 、 ω_0 とすれば

$$I_s \frac{d\omega_s}{dt} - f(VE\delta) + \tau_g = 0 \quad (19)$$

$$I_r \frac{d\omega_r}{dt} - f(VE\delta) - \tau_m = -\tau_l \quad (20)$$

ここで

$I_s d\omega_s/dt$: 固定子側慣性トルク

$I_r d\omega_r/dt$: 回転子側慣性トルク

$f(VE\delta)$: 入力により与えられるトルクで電源電圧, 誘起電圧, 相差角の関数

τ_g : $k_g \phi_g i_a$ で表わされ, 固定子に生ずるブレーキ・トルク。 ϕ_g は固定子側補助発電機の磁束数, i_a は補助両機を通る負荷電流, k_g は比例定数

τ_m : $k_m \phi_m i_a$ で表わされ, 主軸に直結された補助電動機の発生トルク。 ϕ_m はその磁束数, k_m は比例定数

τ_l : 主軸にかかる負荷トルク

(19) 式は回転固定子のトルク和であるから零と置く。(20) 式は同じく回転子発生トルクと負荷トルクの関係を表わす。定常状態では

$$I_s \frac{d\omega_s}{dt} = 0, \quad I_r \frac{d\omega_r}{dt} = 0$$

である。今 τ_l が一定で V, E, δ が変化してその諸量が $\omega_s + \Delta\omega_s, \omega_r + \Delta\omega_r, \tau_g + \Delta\tau_g, \tau_m + \Delta\tau_m, \tau_r + \Delta\tau_r, \tau_l, i_a + \Delta i_a, f(V'E'\delta')$ になったとすれば, 定常状態では

$$\begin{aligned} \omega_s + \omega_r &= \omega_s + \Delta\omega_s + \omega_r + \Delta\omega_r \\ &= \omega_0 \end{aligned}$$

従って

$$\Delta\omega_s + \Delta\omega_r = 0$$

又

$$\begin{aligned} \tau_l &= \tau_r + \tau_m \\ &= \tau_r + \Delta\tau_r + \tau_m + \Delta\tau_m \end{aligned}$$

τ_l は不変であるから

$$\Delta\tau_g + \Delta\tau_m = 0$$

補助機の励磁特性不変とすれば

$$\Delta\tau_g = k_g \phi_g \Delta i_a^{(6)}$$

$$\Delta\tau_m = k_m \phi_m \Delta i_a$$

$$\therefore \Delta i_a (k_g \phi_g + k_m \phi_m) = 0 \quad k_g \phi_g + k_m \phi_m \neq 0 \quad \text{が運転上必要条件故}$$

$$\Delta i_a = 0$$

$$\therefore \Delta \tau_g = \Delta \tau_m = 0$$

なお補助機回路起電力は $k_g \phi_g \omega_s - k_m \phi_m \omega_r$ であり、流れる電流は回路インピーダンスで除して(ただ今の系は直流回路でその抵抗を R とする)

$$\Delta i_a = (k_g \phi_g \Delta \omega_s - k_m \phi_m \Delta \omega_r) / R$$

$$\therefore k_g \phi_g \Delta \omega_s - k_m \phi_m \Delta \omega_r = 0$$

$$\therefore \Delta \omega_s = \Delta \omega_r = 0$$

即ち $f(VE\delta)$ が $f(V'E'\delta')$ と電源状況が変化しても負荷トルク τ_l が不変である限り ω_r, ω_s は共に変化しないで定速度運転をする。これは系の重要な特性の一つであるが、実験の結果は図-13 に示されている。system で τ_l は 0.625, 0.41, 0.325, 0.475 kg-m の不変負荷トルクを与え、任意に補助系起磁力を調整して希望の速度で運転すれば(希望速度において補助系起磁力を固定さえすれば)、電源電圧を変化することにより速度は変わらず、負荷電流が変化して図の如き電圧-電流特性曲線を描き、入力一定条件を満足させていることがわかる。

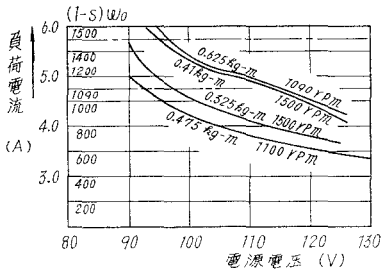


図-13 電圧-電流特性曲線 (i_f 一定)

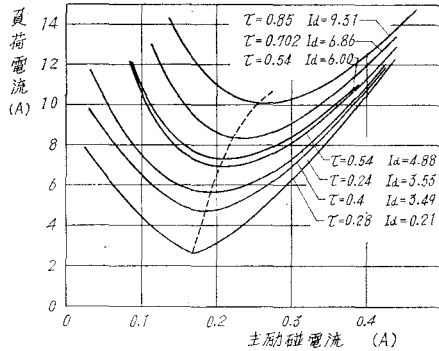


図-14 V 特性曲線 (V 一定)

又 図-14 に示す如く主機の電圧を一定にし励磁 E を最小より最大へと調整していけば(励磁電流を 0.05→0.5 A) 負荷電流は最大の遅れ電流より次第に力率 1 の最小電流になり、更に最小より増大すると共に進み負荷電流へと変化する V 特性曲線を描く。つまり V, E の減少増大に対し δ の増減作用が並行して行なわれ、出力、トルクを一定させていることが推定される。なお外部一定負荷に対し電圧の減少は 90~95 V でブロンデル図で示すように脱調している。

系は任意の希望速度で定速運転をし V, E の変化の影響を受けないという特質は、他機の誘導機、直流機と比較して優れた点と言える。

(ii) 系の方巻特性について

一般に電動機は速度特性とは電源電圧、界磁電流その他の因子を一定としたときの負荷ト

ルク対速度特性であるが、この系の速度を変える因子は既述 (i) に触れたように両補助機の ϕ_g , ϕ_m である。また

$$\tau_l = \tau_r + \tau_m \doteq \tau_g + \tau_m$$

であるから、 τ_g 又は τ_m を変えることにより τ_l が変化し、従って速度調整が可能になる。

今任意速度 ω_r で回転している系の両補助機の電機子回路電圧平衡式は

$$e_g - e_m = i_a R$$

で

$$e_g = k_g \phi_g \omega_s \quad e_m = k_m \phi_m \omega_r$$

であるから

$$\begin{aligned} i_a R &= k_g \phi_g \omega_s - k_m \phi_m \omega_r \\ &= k_g \phi_g (\omega_0 - \omega_r) - k_m \phi_m \omega_r \end{aligned}$$

これから

$$\omega_r = \frac{k_g \phi_g \omega_0 - i_a R}{k_g \phi_g + k_m \phi_m} \quad (21)$$

又

$$\tau_g = k_g \phi_g i_a \quad \tau_m = k_m \phi_m i_a$$

であるから無負荷のときは

$$\tau_r = \tau_s = \tau_m = \tau_g \doteq 0$$

よって

$$i_a \doteq 0$$

無負荷角速度を ω_{r0} とすれば

$$\omega_{r0} = \frac{k_g \phi_g \omega_0}{k_g \phi_g + k_m \phi_m} \quad (22)$$

無負荷角速度変化は

$$\omega_{r0} - \omega_r = \frac{i_a R}{k_g \phi_g + k_m \phi_m} \quad (23)$$

よって速度変動率 ϵ は

$$\epsilon = \frac{i_a R}{k_g \phi_g \omega_0 - i_a R} \quad (24)$$

但し

$k_g \phi_g \omega_0$: 図-15 補助機無負荷飽和特性曲線より得られる値で、任意励磁電流で誘起される無負荷端子電圧 E_a である。

i_a : 固定子ブレーキ・トルクと補助電動機回転トルクとして作用する。相差角 δ 一定時回転子速度に無関係に一定である。

R : この系は直流機 2 台が直列になって補助系を作り、1 台の電機子抵抗 0.86Ω 、ブラシ 1 個の電圧降下 1 V であるから系の抵抗は $2 \times 0.86 \Omega + 4 \times \text{ブラシ降下}/i_a \Omega$

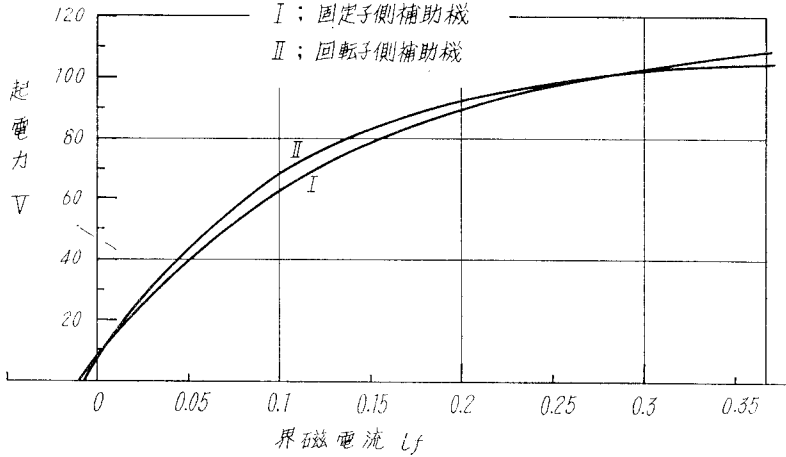


図-15 補助機無負荷飽和特性曲線

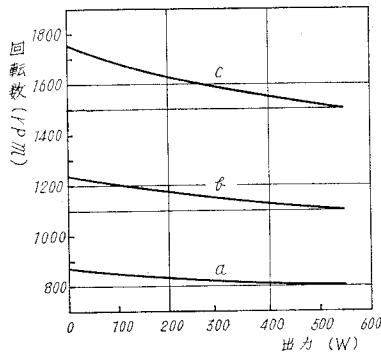


図-16 負荷速度特性曲線

よって (24) 式の分母第 2 項は E_d に比し 15~16% であるから略算のときはこの項を省いて

$$\epsilon \approx \frac{i_a R}{k_g \phi_g \omega_0} = \frac{i_a R}{E_d} \quad (25)$$

とすることもできる。

速度変動率を実験によって求めれば図-16 である。これに用いた数字を表-2 に示す。

a, b, c の 3 つの実験において負荷を 0.79 kg-m, 0.615 kg-m, 0.405 kg-m と与えながら補助機の i_{gf} をなるべく変えないで i_{mf} を調整すると、それぞれ 0.144

表-2 負荷速度特性実験値表

負荷時

試験番号	n (rpm)	P_0 (W)	τ_l (kg-m)	i_{gf} (A)	E_d (V)	i_{mf} (A)	E_m (V)	i_a (A)
a	790	512	0.790	0.338	106.0	0.1404	83.0	6.80
b	1100	557	0.615	0.340	106.1	0.0282	29.5	6.99
c	1500	498	0.405	0.340	106.1	0.01	31.2	7.25

軽負荷時

試験番号	n (rpm)	P_0 (W)	τ_l (kg-m)	i_{gf} (A)	E_d (V)	i_{mf} (A)	E_m (V)	i_a (A)
a	865	35.6	0.050	0.338	106.0	0.1440	83.0	0.47
b	1225	52.7	0.052	0.340	106.1	0.0282	29.5	0.75
c	1770	96.5	0.056	0.340	106.1	0.0310	31.2	3.20

A, 0.0282 A, 0.031 A で希望速度 790 rpm, 1100 rpm, 1500 rpm が得られる。次に主機と補助機の諸因子をそのままに固定して負荷トルクを減少して行けば、駆動負荷トルクとそのときの角速度で定まる補助回路電流 i_a の大きさのみに比例した速度上昇を示すことがわかる。図-16 に示される速度変動は (24), (25) 式の正しいことを証明している。

(iii) 系の定出力特性について

この系に任意の負荷トルク τ_l が与えられ、起動して任意の速度に制御すれば、既に (6) 式に示すように

$$\tau_l = \left(1 + \frac{s\eta}{1-s}\right) \tau_r$$

が成立する。これは

$$\tau_m (1-s) \omega_0 = \eta \tau_s s \omega_0, \quad \tau_s = \tau_r$$

を考慮して

$$\begin{aligned} \tau_l &= \tau_m + \tau_r = \tau_s \frac{s\eta}{1-s} + \tau_r \\ &= \left(1 + \frac{s\eta}{1-s}\right) \tau_r \end{aligned}$$

となる。この式の第1項は主機回転子の発生トルクであるから s に無関係に一定である (δ は一定)。第2項は帰還系が主軸に伝達する回転固定子のエネルギーで s と η の関数であり、 η 一定に対して直巻特性 (定出力特性) を示す項でその実験結果が図-6 に示されている。理論的に又実験結果より系が定出力特性であることがわかる。

7. 系の速度特性及びその制御 その1

(21) 式より

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{k_g \phi_g \omega_0 - i_a R}{k_g \phi_g + k_m \phi_m} = \frac{k_g \phi_g \omega_0 - i_a R}{k_g \phi_g \omega_0 + k_m \phi_m \omega_0} \omega_0 \\ &= \frac{k_g \phi_g \omega_0}{k_g \phi_g \omega_0 + k_m \phi_m \omega_0} \omega_0 - \frac{i_a R}{k_g \phi_g \omega_0 + k_m \phi_m \omega_0} \omega_0 \end{aligned} \quad (26)$$

$$= \frac{E_d}{E_d + E_m} \omega_0 - \frac{i R}{E_d + E_m} \omega_0 \quad (27)$$

(27) 式の2つの項を別々に

$$\omega_{r0} = \frac{E_d}{E_d + E_m} \omega_0 \tag{28}$$

$$\omega_{rd} = \omega_{r0} - \omega_r = \frac{i_a R}{E_d + E_m} \omega_0 \tag{29}$$

とすれば任意の負荷と速度、補助機諸定数が定まったときの負荷速度は

$$\omega_r = \omega_{r0} - \omega_{rd} \tag{30}$$

で示される。 ω_{r0} は任意の負荷で一定速度にある状態から負荷を軽減して無負荷にするときの速度で(28)式で表わされ、 ω_{rd} はその負荷をかけることにより無負荷速度より低減する値で(29)式に示される。これと相似の式は既に(23)式に示されている。

上記各式に用いられた

$k_a \phi_a \omega_0$: 補助発電機定格速度における任意励磁電流の無負荷端子電圧で E_d で表わすことは既に述べた。

$k_m \phi_m \omega_0$: 補助電動機定格速度における任意励磁電流の無負荷端子電圧で E_m で表わす。

は何れも 図-15 にその値が算定されている。

(26), (27) 式は負荷時角速度を, (28) 式はこれを無負荷にしたときの角速度で, (29) 式に両者の差角速度を示す。よって (28), (29) 式に示される角速度が判明すれば任意の負荷角速度がグラフ (図表) 又は計算により求められる。

図-17 は上記の方法で計算したグラフ (ω_{r0} , ω_{r1} , ω_{r2} , ω_{rd1} , ω_{rd2}) と実験で得られた点

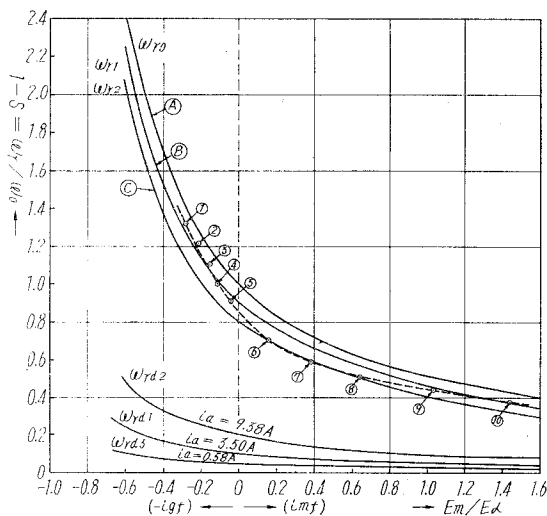


図-17 無負荷と差の角速度曲線

(① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩) を画いたものである。

ω_{r0} は E_d/E_d+E_m において E_d は一定, E_m は正より減少して零, 次いで負になるに随って等辺双曲線をたどって速度上昇する。この曲線は例えば ④ 線について言えば無負荷 2 倍同期速度運転にするには $(i_a \neq 0) -E_m = 1/2 E_d$ となるように回転子補助機の i_{mf} を調整すればよい。

ω_{rd1} の求め方: (29) 式にある R は補助機電機子回路合成抵抗で

$$i_a R = i_a \times 2 \times 0.86 + 4 \times 1 \quad (\text{V})$$

である。よって差角速度を速度変動率 ε の式で表わせば

$$\begin{aligned} \omega_{rd} &= \varepsilon \omega_r \\ &= \frac{i_a R}{E_d + i_a R} \omega_r \end{aligned} \quad (29)$$

E_d を 100 V, i_a を 3.5 A としたときの差速度を ω_r の各点について求めたものが 図-17 の ω_{rd1} 曲線であり, 同じく i_a が 9.38 A について求めれば ω_{rd2} が画かれる。

ω_{r1} の求め方: 無負荷速度 ω_{r0} より, その速度と負荷により定まるトルク電流 i_a によって差速度 ω_{rd1-2} が求められるからその値を差引いたものが実負荷運転速度になる。例えば, ω_{r1} 上の ⑧ は補助回路電流 3.5 A に相当する負荷トルクを駆動して 2250 rpm を得るには $E_m = -0.4 E_d$ になるように i_{mf} を逆転調整 (発電機になる) するとよいことがわかる。 ω_{r1} , ω_{r2} の負荷速度線は, τ_l の値から定まる i_a の値の大小により ω_{r0} の無負荷速度線と ω_{r2} の最大負荷速度線 (9.38 A がこの系の限界最大値) との間に無数に画かれる。実際には無負荷と負荷の両曲線は図の如く非常に接近しているので, 実用上には図に示す (9.38 A, 3.5 A, 0.58 A の制御トルク電流) 程度で充分間に合うことがわかる。

なお表-3 の ① ② …… ⑨ ⑩迄の実験数値により 図-17 にその点を求めて記入しておいた。以上述べた理論曲線の上の点と実験数値とが近接していることがわかる。

表-3 負荷-速度関係数値表

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
n (rpm)	1950	1822	1698	1500	1342	1030	899	848	700	576
τ_l (kg-m)	0.170	0.090	0.1125	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
P_0 (W)	320	168.5	196.5	386	345	265	231	218	180	148
i_{gf} (A)	0.348	0.357	0.357	0.358	0.359	0.345	0.339	0.347	0.250	0.125
i_{mf} (A)	-0.090	-0.071	-0.06	-0.05	-0.0105	0.044	0.090	0.124	0.299	0.292
i_a (A)	6.46	4.82	4.75	5.8	4.4	3.13	2.7	2.52	2.18	2.69

8. 系の速度特性及びその制御 その2

負荷トルク τ_l と補助機電機子回路電流 i_a との関係を次に調べる。 τ_l と主回転子及び主軸

補助機との間には

$$\tau_l = \tau_r + \tau_m = k_g \phi_g i_a + k_m \phi_m i_a = \frac{1}{\omega_0} (E_d + E_m) i_a$$

$$\therefore \tau_l = 0.00065 (E_d + E_m) i_a \quad (\text{kg-m}) \quad (31)$$

(31) 式は一定負荷に対する i_a と両補助機の誘起電圧和とは又直角双曲線関係が成立していることを示す。よって負荷トルク 1.3 kg-m, 0.65 kg-m, 0.425 kg-m, 0.325 kg-m, 0.25 kg-m, 0.1625 kg-m, 0.0813 kg-m, 0.041 kg-m に対する $(E_d + E_m)$ V を x 軸に, そのときの所要ブレーキ電流を y 軸にとれば 図-18 の各曲線が得られる。 E_d, E_m は両補助機の無負荷飽和曲線から求められるから, 所要の負荷トルクに対する補助機電機子電流が幾らであればよいかの根拠が与えられる。今一連の実験値から 図-18 の正確さを調べてみよう。

表-4 に示される実験番号 ① ② …… ⑩ を 図 18-A に, 同じく表-5 に示される実験番号 ①' ②' …… ⑧' ⑨' を 図-18 B に描いた。

A, B 両実験軌跡が計算から求められた理想負荷トルク曲線に近接相似しているが, 僅かに実験値は i_a の増加方向に移動している。定格負荷に近い B トルク曲線の電流有効トルク発生量は 95%, 軽負荷トルクを荷重した A 試験は i_a の約 80% が有効トルクになっていることが図示されている。

ω_r と τ_l 一定時の E_d と i_a 相互の関係について今帰還系効率 1 の理想的な場合を考慮す

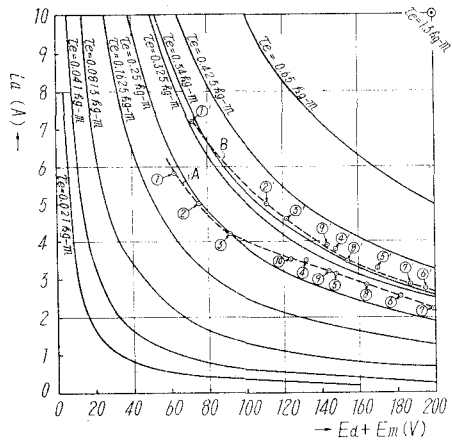


図-18 補助機の電圧和と電流関係曲線

表-4 τ_l 0.25 kg-m の制御電流その他関係実験値表

実験番号	τ_l (kg-m)	i_a (A)	i_{gf} (A)	i_{mf} (A)	E_d (V)	E_m (V)	$E_d + E_m$ (V)	n (rpm)
①	0.25	5.80	0.358	-0.050	107.0	-45.0	62.0	1500
②	0.25	5.00	0.350	-0.027	106.5	-29.0	77.5	1428
③	0.25	4.40	0.358	-0.0105	107.0	-14.0	93.0	1342
④	0.25	3.40	0.350	0.026	106.5	27.0	133.5	1120
⑤	0.25	3.13	0.345	0.044	106.0	42.0	148.0	1030
⑥	0.25	2.52	0.347	0.124	106.2	75.0	181.2	848
⑦	0.25	2.18	0.295	0.300	103.0	101.0	203.0	720
⑧	0.25	2.81	0.100	0.294	62.0	102.0	164.0	522
⑨	0.25	3.13	0.060	0.299	43.0	102.5	145.5	378
⑩	0.25	3.50	0.025	0.298	22.0	102.5	124.4	186

表-6 τ_l 0.34 kg-m の制御電流その他関係実験値表

実験番号	τ_l (kg-m)	i_a (A)	i_{gf} (A)	i_{mf} (A)	E_d (V)	E_m (V)	$E_d + E_m$ (V)	n (rpm)
①'	0.34	7.21	0.320	-0.030	104.0	-31.0	73.0	1500
②'	0.34	5.45	0.320	0	104.0	7.0	111.0	1360
③'	0.34	4.65	0.318	0.020	103.5	17.0	120.5	1210
④'	0.34	3.88	0.315	0.050	103.0	45.0	148.0	1050
⑤'	0.34	3.32	0.315	0.090	103.0	63.0	166.0	900
⑥'	0.34	2.74	0.315	0.210	103.0	92.0	195.0	750
⑦'	0.34	2.85	0.160	0.350	82.0	105.0	187.0	605
⑧'	0.34	3.42	0.075	0.350	48.0	105.0	153.0	440
⑨'	0.34	3.82	0.050	0.430	38.0	106.0	144.0	300
⑩'	0.34	4.12	0.012	0.410	13.0	105.4	118.4	105

れば

$$\begin{aligned} \tau_l &\doteq \tau_m + \tau_g \\ &= \tau_g \frac{s}{1-s} + \tau_g = \frac{1}{1-s} \tau_g \\ \tau_l \text{ (kg-m)} &= \frac{E_d}{(1-s)\omega_0} i_a \\ &= 0.00065 \frac{E_d}{1-s} i_a \end{aligned} \tag{32}$$

であるから τ_l は固定子補助機磁束数 (誘起電圧) とブレーキ電流の積に比例し、速度に逆比例する。

(32) 式を E_d , i_a について $(1-s)$ をパラメータとして画けば 図-19 が得られる。既に提出した表-4, 表-5 の各実験値 ① ② …… ①' ②' …… を i_a と E_d について 図-19 のグラフにその位置を記入すれば図示の通りである。

これを調べてみると全体として i_a と E_d の積によってトルクが定まり、同時に回転角速度が定まる事実が明らかに示されている。又 τ_l 一定で速度を上昇させるためには $i_a \cdot E_d$ を増加させるとよいし、逆に速度を下降させるにはその積を減少させればよいことがわかる。実験値はこのグラフで一般に実験速度より 10% 程度高速度点にくる。その差速度分が回路負荷損失に消費されていることがわかる。

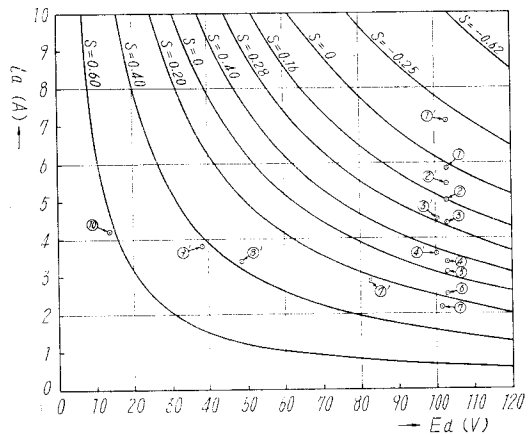


図-19 固定子側発電電圧—電流関係曲線

又この理想図に効率を加味して実運転推定位置に書き改めれば実験数値が一致することが明らかにされる。

7, 8 両章において系の速度特性とその制御について基本式を立て、その結論と実験値とを比較対照して論じた。ここに総括的に操作運転の場よりみてその主要な点を指摘すれば

(1) 無負荷速度は $E_d/E_a + E_m$ の比から決定する。 E_a を一定にすれば E_m の加減調整によって速度は等辺双曲線に沿って増減する。

(2) E_m を E_a と反対極性にすれば、同期速度以上に幾らでも加速することが可能である。

(3) 軽負荷の場合はブレーキ・トルク用の i_a 電流が僅少で済むから E_a も少なくて済み、従って E_m の僅かの変化による速度感度は鋭敏になる。

(4) 負荷速度の調整は (1), (2), (3) に記したことと総て同様である。但し無負荷で示される速度より (29), (29)' 式で表わされる差速度だけ減速するから、その負荷トルクにより決定するブレーキ電流 i_a から定まる差速度の減少を見込まねばならない。

(5) 差速度及び速度変動率は 図-17 に示す値を用いるとよい。 i_{gf}/i_{mf} の値、速度・ブレーキ・トルク電流が判明すれば直ちに速度変動率、負荷速度、無負荷速度が図表よりあるいは計算により求められる。

(6) i_{mf} が零ならば理想的には同期速度であるべきであるが、系には当然各種の損失があるのでそのための無負荷損に打ち勝って回転させる i_a が入用であるから、図-17 に示す如く約 10% 以上速度減少している。

(7) i_{mf} を増加して ω_r を減少させる代りに i_{gf} を減少しても低速分野の速度調整は容易であり、実際にこの方法が用いられる。

(8) 以上は補助系発電機と電動機の磁束変化と速度について述べたが更に重要なことは (21), (27) 式における $i_a R$ 項を用いる速度制御である。この系の補助系電気回路に別に起電力を設けて $i_a R$ を調整すれば、式が示す如く速度変動率の正負増減が可能になってくる。いわゆる抵抗調整による速度制御の新しい方法が生まれるが、その詳細な実験報告は別の機会にする。

9. 系の特質と応用例

系の主機は同期電動機であるから諸特性、性能が同期機と類似であることは既に報告した。使用電力に対して効率・力率が良く、系の総合効率は補助系構成機械の効率 (直流機、誘導機等であるから 70% 以上) と主機の同期電動機の効率 (85% 以上) の中間にあることがわかる。この系は補助機に各種の電動機を組合わせて必要な特性を生み出すことができるが、これ迄の実験結果から以下の応用分野が有ることがわかった。

(i) 新クレーマー方式

(a) 直流機を補助機とする場合

補助発電機 ② に発生する電力を電動機 ③ に帰還して、主機回転子発生トルクを助ける新クレーマー方式を実験し、その結果を本文及び 図-6、図-7 に示した。

(b) 同期発電機・誘導電動機を補助機とする場合

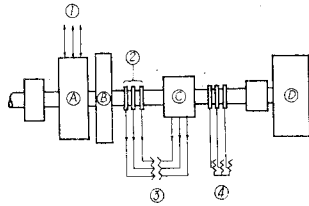


図-20 同期非同期直列縦統法 (1)

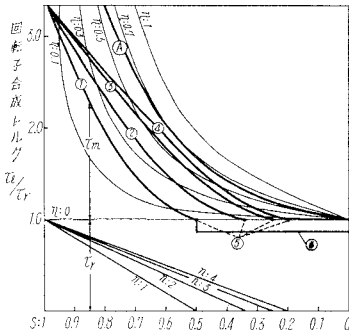


図-21 速度-トルク特性曲線

固定子側に同期発電機、回転軸側に誘導電動機を夫々補助機として用い、主機・発電機の極数を等しくし誘導機のそれは $1/n$ 極としてその結線を 図-20 に示す。今この系が $(1-s)\omega_0$ で操作すれば、発電機 ② の発生電圧 sE_0 (E_0 は補助発電機定格速度時電圧)、発生周波数 sf (f : 電源周波数) によって誘導機 ③ の固定子に生ずる回転磁界速度は $sn\omega_0$ である。それで

$$sn > 1-s \tag{33}$$

を満足する間補助機 ③ の電動作用が可能である。つまり $n=1$ では ①, ②, ③ は同極数であるから $s=0.5$ で ③ 機の電動作用が終る。同様に $n=2$ では $s=1/3$, $n=3$ では $s=1/4$ が補助誘導電動機に対する補助発電機の正帰還作用終点を表わす。よって系の任意速度のトルク τ は ③ 機の 1 次、2 次抵抗及びリアクタンス (1 次換算)

を夫々 r_1, x_1, r_2, x_2 , 誘導機のすべりを s_1 とすれば

$$\tau = \tau_r + \frac{s_1 r_2 E_0^2}{\omega_0 \left\{ \left(\frac{s_1 r_1 + r_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right\}} \frac{sn + s - 1}{n} \tag{34}$$

$(sn + s - 1)/n$ は (33) 式に説明した周波数効果の項である。(34) 式をこの系に適用すれば 図-21 が得られる。図中 ① は周波数効果の無い場合即ち $n \rightarrow \infty$ の場合の固定子エネルギーの ③ 機に帰還するトルク-速度特性を表わし、これに周波数効果を考えた誘導機のトルク化曲線は夫々 $n=1$ で ① 曲線をたどり、系の発生トルクは主同期機回転子トルク τ_r と ① 曲線で示される τ_m との和になる。②, ③, ④ についても同様に $n=2, n=3, n=4$ についての合成トルク曲線を示す。

系が n の値によって定まる ⑤ に示す点で補助機の電動正帰還作用が終るが、それより s が小さい範囲 (速度上昇) では ③ 機は発電機となり、主固定子ブレーキ電流を減少させるため系のトルクは幾分減少して図の実線 ⑥ をたどる。固定子出力はブレーキ電流に消費される他に誘導機 2 次巻線損失となる。このとき 2 次巻線抵抗加減による速度トルクの調整制御ができる。

系の出力は主機出力 P_r と誘導機出力 P_m の和であるから

$$P_l = P_r + P_m = \tau_r (1-s) \omega_0 + \frac{s_1 r_2 E_0^2 (1-s)}{\left(\frac{s_1 r_1 + r_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \left(\frac{sn + s - 1}{n}\right) \quad (35)$$

で表わされ 図-22 になる。固定子エネルギー回収の主目的からみると P_{ls} で示される誘導機 ㉔ の 2 次損失が多いので、速度制御は $n=1, n=2, \dots$ の何れの場合も正帰還限界を超えた点での運転は、系の効率の点からみて満足とは言えない。

(i) (b) のクレーマー方式はあくまでも極数比 n により定まる電動作用範囲で使用すべき系であると言える。

図-20 に可変比変圧器 ㉓ を挿入して速度制御を行ない、㉔ をかご型誘導機とすることができる。同様に 図-20 の結線を 図-23 に示すように内部直列縦続法として使用しても系の主目的を果たすことができる。この系は大容量化と速度制御範囲の拡大に伴い誘導機 ㉔ の 2 次出力の回生あるいは帰還方式について考慮しなければならない。

(c) その他の方式として ㉕ 同期機、㉖ 直流機の組合せで帰還回路の途中 ㉓ に整流機器あるいは変換器を挿入すれば、(b) において考慮した周波数特性が解消できるので、効率向上と速度調整範囲の拡大が可能になり利用度が広がる。

同期機と整流子電動機の組合せは応用範囲が広い。

(ii) 新セルビウス方式

従来行なわれているセルビウス方式は誘導電動機の 2 次出力を電源へ回生するもので、その変換方法に整流子電動機、差動歯車方式、静止セルビウス方式等がある。この系の主機回転子発生トルクは相差角に關係する一定値 (δ : 一定ならば) であるから、重起動を要しない負荷に対して、補助機 ㉕ の発生電力を ㉖ に帰還しなくても負荷運転に支障ない場合がある。そのときには ㉕ の電力を電源に返還することができる。固定子出力 P_s は

$$P_s = sP_0$$

であるから、起動・停止繰返し負荷あるいは s の大きな部分で長時間運転の必要を生ずる場合新セルビウス方式が有利である。

今この系の補助機 ㉖ を回路より外し、発電機 ㉕ の出力を定トルク負荷、速度比負荷 (定トルク分零) 及び速度 2 乗負荷の 3 種について実験した結果を 図-10, 図-11, 図-12 に示して

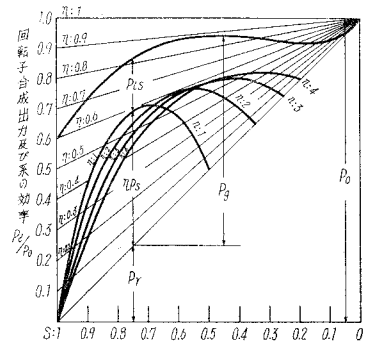


図-22 速度—出力特性曲線

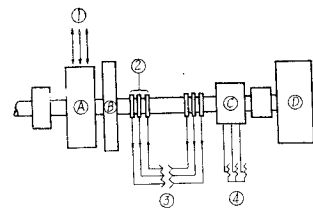


図-23 同期非同期直列縦続法 (2)

ある。この実験記録は共に固定子出力 P_s を実測し、補助電動機に流入した電力 P_{gi} をメーターで読んだものである。従って P_{gi} は固定子の生ずる回生可能電力である。これよりセルビウス方式の場合を考察してみると、図-10 において定トルク負荷に対し、電力変換効率は非常に高く、凡そ 50~80% の回生ができることを示している。速度比トルクには同様に高能率を示すが、図-12 の速度 2 乗負荷に対しては $(1-s)$ が 0.4 以内ではやや効率の低下が見られる。これは変換方法が直流機であるためで、始動特性と負荷特性から発電機の種類を吟味すべきであることを示している。始動特性の高い同期発電機を用い又定トルク負荷に近い荷重に対して新セルビウス方式が大きな効率を示すことがわかる。

(iii) 新回生制動方式⁷⁾

以上に発表した理論とその実験は総て負荷 \textcircled{D} が正である場合を論じた。今負荷トルクが負の場合、既ち外部負荷がこの系に仕事をするのできるトルクであれば図-3 の $\textcircled{1}$ に示すように負荷がこの系に仕事をし、そのエネルギーは電力に変換されて $\textcircled{1}$ より電源に返還される。この新しい回生制動方式についてその理論並びに実験結果を本誌に題名を改めて寄稿する。

(iv) 新しい超同期電動機方式⁸⁾

図-4 は固定子回転エネルギーを有効電力に変換して回生し、あわせて起動特性の改善を計り速度制御をするものである。この方式と超同期電動機の起動を比較してみると、両者共に回転子トルク τ_r を負荷に与える点は同じであるが、前者は固定子の逆回転トルク制御を電磁ブレーキ作用によって行なうものであり、後者はバンド・ブレーキで行なう点が相異している。同期電動機固定子のもつトルクは $\tau_s = \tau_r$ でこれは電動機容量の増大に比例するからバンド・ブレーキによる回転固定子停動作用は自ずから経済的限界点があり、この点について考察する。

今出力 P kW, 回転数 n rpm とすれば同期機発生トルク τ_s は

$$\tau_s = \frac{P \times 10^3}{2\pi n \times 9.8} \text{ kg-m} \quad (38)$$

脱出トルク τ'_m は負荷の種類によって異なるが、普通重負荷のボール・ミル、ロッド・ミルで夫々 150%, 175% としている。よって

$$\tau'_m = (1.75 \sim 1.50) \tau_s \quad (39)$$

従ってバンドのブレーキ・トルク τ_B は次の条件を満足しなければならない。

$$\tau_B > \tau'_m$$

図-30 はドラムに二重バンドを施した説明図である。今バンド巻込みドラム径と同期電動機の固定子内径を等しいものと考え、 $T_1 - T_2$ を第 1 バンド、 $T_3 - T_4$ を第 2 バンドとする。

なおここで以下の式中に用いる記号は次の通りとする。

- | | |
|-------------------|------------------------------|
| T_1 : 第1バンド巻出張力 | θ_1 : 第1バンド接触角(ラジアン) |
| T_2 : 第1バンド巻込張力 | θ_2 : 第2バンド接触角(ラジアン) |
| T_3 : 第2バンド巻出張力 | μ : バンドとドラム間摩擦係数(通常0.35) |
| T_4 : 第2バンド巻込張力 | L_1 : 第1バンドレバー長 |
| D : ブレーキ・ドラム外径 | L_2 : 第2バンドレバー長 |

各ブレーキ・バンドの巻出側張力 T_1, T_3 と巻込側張力 T_2, T_4 との間に次の関係が成立する。

$$T_2 = T_1 e^{\mu \theta_1} \quad T_4 = T_3 e^{\mu \theta_2} \quad (40)$$

又ドラムの円周切線方向に働く力、即ち制動される力を夫々第1バンドは P_1 、第2バンドは P_2 とすれば

$$P_1 = T_2 - T_1$$

$$P_2 = T_4 - T_3$$

よって各バンドの制動トルク τ_{B1}, τ_{B2} は

$$\tau_{B1} = (T_2 - T_1) \frac{D}{2} \quad (\text{kg-m})$$

$$\tau_{B2} = (T_4 - T_3) \frac{D}{2} \quad (\text{kg-m})$$

全制動トルク τ_B は

$$\tau_B = \tau_{B1} + \tau_{B2}$$

今 図-30 のドラム上の2点 A, B において面圧力の状態を調べる。図-31 にこの箇所を改めて図示する。点 A の張力 T' が微小面積変化 ds により δT だけ増して B 点の張力が $T' + \delta T$ になれば、面間圧力 $T(\theta) ds$ は 図-30 の面間圧力分布線をたどる。その理論は 図-31 でバンド幅を w とすれば、面圧分布式は次のように θ の関数として表わせる。

$$T(\theta) ds = T'(\theta) \sin \frac{d\theta}{2} + \{T'(\theta) + \delta T(\theta)\} \sin \frac{d\theta}{2}$$

或いは

$$\mu T(\theta) d\theta = \{T'(\theta) + \delta T(\theta)\} \cos \frac{d\theta}{2} - T(\theta) \cos \frac{d\theta}{2}$$

T_4 の巻込部より θ だけ離れた箇所の面圧は (40) と同様に

$$T_4(\theta) = \frac{T_4}{e^{\mu \theta}}$$

$$\delta T(\theta) = T_4 - T_4(\theta) \quad (41)$$

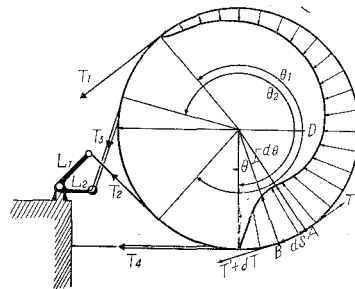


図-30 2重バンドの張力図

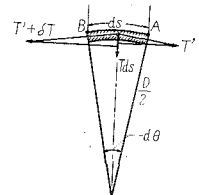


図-31 バンドによる面圧図

$$T(\theta) \times \frac{D}{2} \times d\theta \times w = \{2T_4(\theta) + \delta T(\theta)\} \sin \frac{d\theta}{2}$$

$$\therefore T(\theta) = \frac{\{2T_4(\theta) + \delta T(\theta)\} \sin \frac{d\theta}{2}}{\frac{D}{2} \times d\theta \times w} \quad (42)$$

$d\theta$ を微小とすれば $\delta T \doteq 0$, $\sin \frac{d\theta}{2} \doteq \frac{d\theta}{2}$ として

$$T(\theta) \doteq \frac{2T_4 \times \frac{d\theta}{2}}{\frac{D}{2} \times d\theta \times w}$$

$$= \frac{2T_4}{Dw} \quad (43)$$

任意容量の超同期電動機のバンド・ブレーキ張力 T_1, T_2, T_3, T_4 を計算式によって算出すると, $\theta_1 \doteq 281^\circ = 4.9$ ラジアン, $\theta_2 \doteq 289^\circ = 5.04$ ラジアン, $L_2 = 12$ cm, $L_3 = 15$ cm として (40) 式より

$$T_2 = e^{\mu\theta_1} T_1 = 2.7180^{0.35 \times 4.9} T_1 = 5.55 T_1$$

$$T_4 = e^{\mu\theta_2} T_3 = 2.7180^{0.35 \times 5.04} T_3 = 5.82 T_2 = 32.3 T_1$$

$$T_3 = \frac{L_2}{L_3} T_2 = \frac{12}{15} \times 5.55 T_1 = 4.44 T_1$$

(42) 式, (43) 式を用いて面圧最大値は

$$T_{\max} = \frac{64.6 T_1}{Dw}$$

(41) 式より δT を求めると, $d\theta = 30^\circ$ の場合 T_{\max} より 30° ずれた点の圧力差は, $e^{\mu\theta_2} = 5.82$, $e^{\mu(\theta_2 - 30^\circ)} = 4.85$ として

$$\delta T = T_{\max} - T_{\max(30^\circ)} = \frac{64.6 T_1}{Dw} \left(1 - \frac{e^{\mu(\theta_2 - 30^\circ)}}{e^{\mu\theta_2}} \right)$$

$$\doteq \frac{5.4 T_1}{Dw}$$

T_4 巻込部について $d\theta = 30^\circ$ の範囲の面圧を計算すると, (42) 式によって

$$T_{\theta(\max)} = \frac{64.6 T_1 + 5.4 T_1}{Dw}$$

$$= \frac{70 T_1}{Dw} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (44)$$

T_1 は巻出バンド張力で 200~300 kg が工作上の使用限界であり, D は S.S.M 容量, 回転数, 周辺速度, 負荷トルクによって定まる値で, 例えば 1200 kW で 3.0~3.4 m と算出される。よって $T_{\theta(\max)}$ はドラム幅 w に反比例するが, w は工作上と S.S.M の安全運転と経済性

より定まり、1200 kW で 30 cm が妥当とされている。よって面圧最大値 $T_{\theta(\max)}$ は 2~3 kg/cm² となる。次に面圧，ドラム周速，摩擦係数の積 $Tv\mu$ は冷却条件を良好にし，摩擦面材料（ポプラ材）を吟味して次式の範囲にあることが発表されている。

$$\left. \begin{array}{ll} v < 5 \text{ m/s} & Tv\mu < 10 \\ 5 < v < 10 \text{ m/s} & Tv\mu < 15 \\ 10 < v < 20 \text{ m/s} & Tv\mu < 25 \end{array} \right\} \quad (45)$$

実際には冷却条件，摩擦面圧の不均一等により (45) 式における数字の 30% 減を設計限界値としているから，バンド・ブレイキ式同期電動機の容量限界は現段階で 3000 kW 前後にとどまる。しかし重負荷起動トルクの最大容量は数万 kW を超す現状であるから，バンド・ブレイキ式重起動は唯今の負荷需要を解決できない状態である。ここに改めてクレーマー式或いはセルビウス式同期電動機の S.S.M への応用が検討されてきた。

クレーマー方式，セルビウス方式は何れも起動時の固定子エネルギーを電氣的に或いは機械的に帰還するから工場のせん頭負荷を和らげる点で大いに注目される。この方式の実施例は既に述べた実験結果から良好であることがわかるが，重負荷起動して速度制御し，回転速度が (1-s) $\omega_0 = \omega_0$ になってから固定子を電磁ブレイキする際の補助機電流 i_a は幾分系の効率を低下させるから， ω_0 に調整後は（速度の微調整を必要としないならば）従来のバンド・ブレイキの代りに回転固定子と基礎間にロック・ピンを設備し，固定子速度調整時だけピンを外し，回転子速度が ω_0 になればロックする方式を実施し好結果を得ている。

(v) 同期非同期並列縦続 2 次励磁方式

(a) 系の 2 次励磁方式概要

図-24 はこの方式のブロック図である。④，③ 両機共主機となって同じ電源 ① より電力を受ける。④，② は回転固定子型同期電動機，③ は巻線型誘導電動機で ③ の速度制御と起動トルク増大を ④，② によって行なう目的の新しい系である。

④ の発生トルク τ_r は一定で ② の出力は ④ 固定子のエネルギーを調整しながら ④ 回転子の速度制御をし，他方誘導機 ③ の 2 次励磁作用をして力率改善と逆起電力加減をする。②，④ 両発電端子の電圧位相調整は ② に組込む同期発電機構に 図-25 に示す位相調整装置を設け

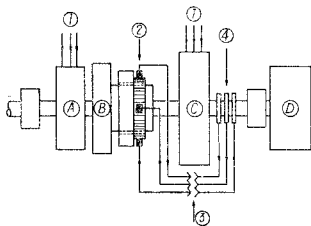


図-24 同期非同期並列縦続新組合せ方式

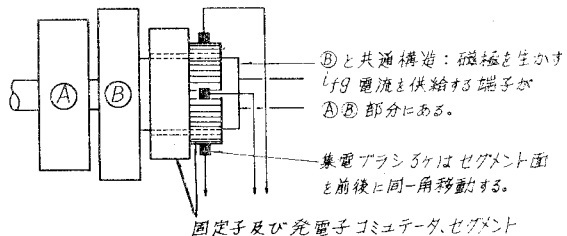


図-25 位相調整同期発電機

位相調整同期発電機により処理する。これは従来巻線型誘導電動機の世界速度制御、力率改善のために開発されたブラウン・ボベリ式の複雑さを改善し、あわせて重負荷起動と系の総合効率向上に役立つことから注目に値する方法である。

(b) 位相調整同期発電機

図-25 にその構造の概略を示す。回転子は ③ 固定子と同一回転をし i_{f0} で直流励磁する。固定子に分布巻する発電子は 3 相巻線とその巻線均等割端子をコミュテーター・セグメントに直結する。セグメントを 3 分割する位置に 3 個の集電ブラシを設け、ハンドル又は自動操作でコミュテーター・セグメント周辺を前後に任意角度同時に移動できるように工作すれば、誘導機 ④ の 2 次誘起電圧に対し同期発電機 ③ の端子 ② より起電力は進み遅れを自由に、且つ任意微調整できる。

(c) 系の速度調整制御

① は固定子回転型同期電動機、② は位相調整同期発電機、③ は巻線型誘導電動機で共に同一極数とする。①、③ が回転軸を共通にして ④ 負荷で電源 ① を活かせば、回転子角速度 ω_r は

$$\omega_r = (1-s)\omega_0 \quad (46)$$

固定子 ② の角速度 ω_s は

$$\omega_s = s\omega_0$$

誘導機 ③ 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

$$\omega_0 - (1-s)\omega_0 = s\omega_0 \quad (47)$$

よって (47) 式から ③ については

$$2 \text{ 次誘起起電力周波数} = sf \quad (48)$$

となり、② の起電力周波数と等しいことがわかる。このことは s の総ての値に対して成立するから ② の ②、③ の ④ 両補助電気回路には何時も同じ周波数の起電力が生じている。

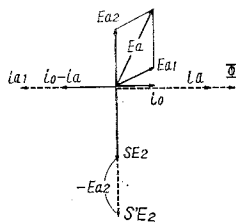


図-26 位相調整発電機によるベクトル図

② 機発生電圧 E_a は ③ 機 2 次起電力 sE_2 に対し任意位相に合成できるが、一例として図-26 のような 2 次励磁をすれば、図において E_a の分力 E_{a1} により i_a が ③ の 2 次に、従って ③ の 1 次に i_{01} 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電源の力率低下を改善させる。一方 2 次誘起電圧の 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 E_{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 $s'E_2$ に E_{a2} と反対方向に増大されて平衡を保つ。

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

E_{a2} を増せば $s' > s$ で増加して回転速度が下がり, E_{a2} を小にすれば ω_r は上昇する。当然のことであるが, E_{a2} が sE_2 と同方向になれば s' は負になって同期速度の限界を越して加速する。以上の如く位相調整発電機は位相調整ブラシの位置の移動調整と ㊸ 機の励磁電流 i_{af} の加減及び極性 (N・S) 変化等の広範囲にわたる機能をもっている。なお ㊸ の発生電圧 E_a の ㊹ の 2 次誘起電圧と同相或いは 180° 位相分は速度調整機として作用し 90° 位相進みの E_a は進相機として, 逆に 90° 遅れのものは遅相機作用をする。

(d) 系のトルクと出力

系のトルクは ㊸ 機のトルク τ_r と誘導電動機の ㊹ トルク τ_m の和で

$$\begin{aligned} \tau_m &= k i_a \cos \theta \\ &= \frac{k (sE_2 - E_{a2}) r_2}{r_2^2 + s^2 x_2^2} \end{aligned}$$

誘導機の回転力は補助回路電流 i_a と界磁束の同位相分 ($k \cos \theta$) との相乗積になるから上の関係が成立する。ここで E_{a2} は ㊸ の発生電圧, r_2, x_2 は夫々 ㊹ の 2 次抵抗, リアクタンスとする。従って合成トルクは

$$\tau_t = \tau_r + \frac{k (sE_2 - E_{a2}) r_2}{r_2^2 + s^2 r_2^2} \tag{49}$$

第 1 項は同期機 ㊸ が発生する速度に無関係な定トルクであり, 第 2 項は 2 次励磁された誘導機の発生トルクである。㊸, ㊹ 両機により求められた合成円線図を図-27 の ㊹ に示せば, 誘導機のトルク線は ㊹ に表わされる。周知のように任意の負荷トルクにおいて

$$sE_2 - E_{a2} = \text{一定}$$

であるから E_{a2} を変化することにより s が変化するので ㊹ 曲線の最大値は変わらないで, 図形全体が $s=1$ 或いは零の方に移動する。T 点は r_1, r_2 の内分点で, NT を結んでその上に別に求めたすべり線目盛を円周上 ㊹ に投影したすべりを記入すれば, この NT すべり目盛線と ㊹

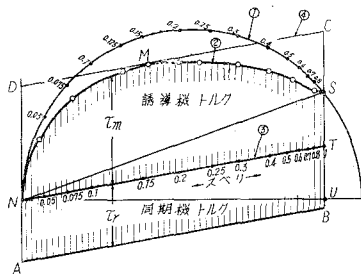


図-27 2次励磁方式の総合トルク線図

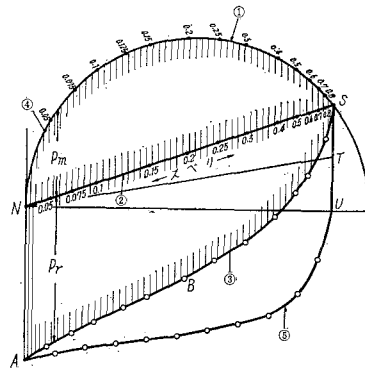


図-28 2次励磁方式の総合出力線図

線にはさまれた高さが誘導機 ㉓ の夫々の s の値における発生トルクを表わす。又 \square NABT の高さが各速度における ㉑ 機のトルクであるから、系の総合トルクは ANMSB に囲まれた図形の高さで表わされる。実際の運転では誘導機の最大トルク点 M を $s=1$ の点に移動して (㉑ 機の発生電圧で) 起動トルクを BC とし、逐次速度調整しながら希望速度とトルクが得られる。従って合計トルクは CD 線をたどり得る。なお ㉑ 機の発生トルク τ_r は相差角により増大できるからその調整における ㉑ の制御電流 i_a の量が決定する。

系の総合出力について考察すると、トルクの場合と同様に ㉑、㉓ 両機の合成円線図を求めて図-28 の ① に示す。別に求めたすべり目盛をの円周上に記し、その値を NS 線に下す。㉑ の出力を P_r 、㉓ の出力を P_m とすれば出力 P_l は

$$\begin{aligned} P_l &= P_r + P_m \\ &= \tau_r (1-s) \omega_0 + \frac{k(sE_2 - E_{a2})r_2}{r_2^2 + s^2 x_2^2} (1-s) \omega_0 \end{aligned} \quad (50)$$

で示され、第 2 項は ㉓ 機の出力である。円線図上 NS 線と円周にはさまれる半円で表わされる。同期機 ㉑ のトルク τ_r は一定であるから $(1-s) \omega_0$ を乗じた値は NS 線より下 ABS で示す ③ 線迄の高さになる。よって系の総合出力は ABS 線より ① 円周迄の高さであり、夫々の出力を得るすべりは NS 線に記されている。

系の運転は ㉑、㉓ 何れの容量が大であるかにより 2 通りに別けられる。㉑ 容量の大きいときは ㉑ の出力を ㉓ の 2 次励磁としてその出力を ㉑ に加えることが主な目的となる。逆に ㉓ 容量が大であれば ㉑、㉑ は専ら ㉓ の 2 次励磁機として作用し、そのとき発生する ㉑ 回転子トルクと出力をも有効に取出して系の総合効率を高めるといことになる。

(e) その他

前に考察した系は ㉓ の 2 次電圧に対し ㉑ の位相調整発電機の誘起電圧 E_a を速度制御並びに力率改善に役立てたのであるが、実際には

㉑ の発生電力を新クレーマー方式に適用し、図-29 の分巻型整流子電動機 ㉑ (機種は色々選べる) に与えることにより、㉑ ㉑ ㉑ 系で定出力特性を持たせながら ㉑ 点の電圧加減により誘導機 ㉓ の速度調整、力率改善等の諸作用を行なわせることにより系の特性を向上させる方法がある。これは系の負荷速度特性 (低速・高速) により ㉑ 機種の変更が変ってくることは勿論である。その他この系に属する組合せは数多いが本稿には割愛する。

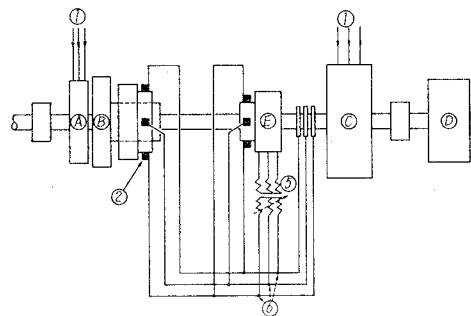


図-29 整流子電動機と位相機を系に加える一方式

10. 補助系機種組合せ別により生ずる新しい電動機分類^{9),10)}

主機回転型固定子に発電機構を内包した系を Z.K モータと云い、回転型固定子の発生エネルギーが歯車その他の連動装置を介して別の発電機に伝達される系を Z.K システムと呼称している。両者共 9 章応用例で記したように発電機構として直流・交流各種類を選択することが可能であり、又主軸に直結する電動機も同様に ㊸ 発電部の機構・種類に応じて或いは想定する負荷特性によって、直流機(直巻, 分巻, 複巻)・誘導機(かご型, 巻線型)・交流整流子機・変流機等が合理的に組合って特殊な優れた性能を発揮する多くの系の分類が生まれる。その他に負荷特性に応じて ㊸ の電動機を省略してセルビウス式にする方式もできる。更に ㊸, ㊸ 両補助機の電気回路に変圧器, 整流機器を挿入することにより系の性能を高め性質を変えることもできる。なおこの分類と一線を描すべきであるが従来誘導電動機の数速度制御並びに力率改善

表-6 系の電動機分類表

機種番号	本体 ㊸	補助機		出力特性	速度制御範囲	起動特性	用途				
		㊸	㊸				㊸	㊸	㊸	㊸	㊸
I	固定子回転型	直流分巻	直流分巻	直流分巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	○重負荷	○	○	○	速度微細調整可
				直流直巻	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_0$	重負荷	○			
				直流複巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	○重負荷	○	○	速度微細調整可	
				直流分巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	重負荷	○			
				直流直巻	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_0$	○重負荷	○		低速度向	
				直流複巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	重負荷	○	○		
				直流分巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	○重負荷	○	○	速度微細制御可	
				直流直巻	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_0$	重負荷	○			
				直流複巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	○重負荷	○	○	速度微細制御可	
				直流分巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	○重負荷	○	○	速度微細制御可, 高能率 マイクロ向	
				直流直巻	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_0$	重負荷	○			
II	同期機	同期機	誘導機	$(n=1)$	㊸	$0 \sim 0.5 \omega_0$	○重負荷	○		低速大容量向, 保安易, 効率稍劣	
				$(n=2)$	㊸	$0 \sim 2/3 \omega_0$	○重負荷	○		低速大容量向, 保安易, 効率稍劣	
				$(n=3)$	㊸	$0 \sim 3/4 \omega_0$	○重負荷	○		低速大容量向, 保安易, 効率稍劣	
				$(n>3)$	㊸	$0 \sim \frac{n}{n+1} \omega_0$	○重負荷	○		低速大容量向, 保安易, 効率稍劣	
III	同期機	同期機	直流機	分巻	㊸	$0 \sim 2 \omega_0$	○重負荷	○	○	速度微細制御可, 高能率 低速大容量向 変換要	
				複巻	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_0$	○重負荷	○			
				直巻	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_0$	○重負荷	○			
IV	同期機	同期機	分巻整流子	㊸	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_c$	○重負荷	○		高能率, 大容量向	
				直巻整流子	㊸	$0 \sim 0.9 \omega_0$	○重負荷	○		低速度, 大容量向	

機 種 番 号	本 体 Ⓐ	補 助 機		出 力 特 性	速 度 制 御 範 囲	起 動 特 性	用 途						
		Ⓑ	Ⓒ				Ⓓ	Ⓔ	Ⓕ	摘 要			
VI {(a) (b) (c)}	固定子回転同期機	誘導機	直流機	分巻	Ⓐ	0~2 ω ₀	○重負荷	○	○	保安稍易, 大容量向	変器換要		
直巻				Ⓐ		0~0.9 ω ₀	○重負荷	○	低速度大容量向				
VII				分巻整流子	直巻整流子	欠	Ⓐ	0~0.9 ω ₀	○重負荷	○	低速度大容量向	変換器を通じ電源に回生, 或いは電源より入力して ω ₀ 以上の速度制御可能	
VIII								0~0.9 ω ₀	○重負荷	○			
IX {(a) (b) (c)}								直流機	分巻直巻	欠			
X	同期機	欠	欠	Ⓐ	0~0.9 ω ₀	○重負荷	○						
XI	誘導機	欠	欠	Ⓐ	0~0.9 ω ₀	○重負荷	○						
XII	I (a) (c) (d) (f) (g) (i) (j) (l), III, IV, V, VI, VII									新ワード・レオナード方式 低速反復起動 はずみ車, すべり調整器併用			
XIII	I~XI									各機種共にS.S.M 起動方式簡易化負荷容量増大化 バンドブレーキ取止め, ロック・ピン併用			
XIV	同期機	位相調整同期発電機	誘導機	Ⓐ	0~2 ω ₀	○重負荷	○	○		誘導機新2次励磁方式 重負荷起動, 大容量向, 効率稍劣, 保安易			

注 表中 n は Ⓐ, Ⓑ の磁極数 P の Ⓒ, 磁極数 P' に対する比を示す。

のための2次励磁機作用にこの系が用いられる。従って組合せ機種の相違や発揮する性質機能により新しい各種の方式が生まれたわけであるが、その中実験或いは理論解析の結果優れたものを選び表-6に示す。但し表中の用途欄の記号は、Ⓐ：定出力特性、Ⓑ：定トルク特性、Ⓒ：新クレーマー法に適する、Ⓓ：新セルビウス法に適する、Ⓔ：回生制動方式に適するの意味を夫々表わしている。

III (a) (b) (c), VI (a) (b) (c), IX (a) (b) (c) の細分化した系の特性、及び XII におけるはずみ車・すべり調整器併用に関する理論解析等は別に発表する。

補助系電気回路に挿入する変換機器、可変比変圧器（誘導電圧調整器）の使用方法により、或いは補助帰還回路に別に起電力を加える方法により更に多くの分類が生まれ、夫々について特殊な性能をその系に与えることが可能である。表-6に掲載しなかったが小型或いはマイクロ・モータの分野で独特な機種合成とその速度制御法が本方式の理論応用から生まれてくる。

11. 結 言

以上において固定子回転同期電動機の固定子に発電・電動機構を連動することにより全く新規の電動機 (Z-K motor and system) が生まれるが、その理論解析を前報¹⁾に引継いでこ

こに論述し、その実験成績を発表した。その結果この方式が多くの優秀な性能を備えていることについて述べた。この系の主な特徴は

- (1) 一定負荷トルクであれば電源電圧、磁束密度変化にかかわらず同期電動機特性を備えている。この場合主機の電圧と励磁電流との間には V 特性曲線が画かれる。
- (2) 負荷が変化すれば速度が変わるが、定出力(直巻)特性を表わす。起動トルクは主機のトルクと帰還トルクとの和であるから大となり直巻直流電動機と類似している。
- (3) 負荷トルク運転から軽負荷に移行すれば、速度はその時の帰還系電流と負荷トルクによって定まる速度変動率を示す。この点は誘導機乃至分巻(複巻)直流電動機に類似である。
- (4) 同期電動機の高効率・高力率を生かし、且つ起動特性を改良したこの系は補助機の種類により 14 種類に大別し、31 種類に小分類できる。
- (5) この系は誘導電動機のクレーマー法に匹敵する。
- (6) この系は誘導電動機のセルピウス法に匹敵する。
- (7) この系はワード・レオナード法或いはイルグナー法と同様の運転が可能である。
- (8) S.S.M の起動方法改良と大容量化に役立つ。
- (9) 起動及び同期速度附近で帰還系効率が低下するが、これに対しては補助系電気回路に随時起電力挿入が考えられる。或いは目的、作用に応じ別電源による場合もあり得る。
- (10) 系各部の損失は夫々の回転速度のパラメータでその影響を無視できない。一般解析では主機効率を η_0 、帰還系のそれを η としたが実験結果、既に発表した¹⁾ η 線は正確に実験値に近似している。
- (11) 試作機は 2 台だけであるが逐次都合の許す限り早く各機種方式につき多くの実用的試作機を実現したい。

終りに本研究並びに実験のために御指導と御力添を下された故北大教授林邦雄先生を初め北大教授坂本三郎先生、小池東一郎先生、内藤正本先生、藤原一先生及び本学大坪学長、山上先生、沢先生、永田伸一先生、なお北大と本学両電気教室各位、試作機製造に御協力下された大洋電機工作所内川社長、貴重な文献資料並びに御助言を提示下された安川電機株式会社和田技師、田原技師各位に深甚の謝意を表します。

(昭和 41 年 4 月 30 日受理)

文 献

- 1) 図所忠則・近藤 修：同期電動機の世界制御について、室蘭工業大学研究報告. 5, 119 (1965).
- 2) 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世界調整、昭和 40 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・近藤 修：固定子回転型可変速度同期電動機の定常特性 その 1、昭和 40 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・近藤 修：固定子回転型可変速度同期電動機の定常特性 その 2、昭和 40 年度電気四学会

北海道支部連合大会講演論文集.

- 5) 関所忠則・近藤 修: 可変速度同期電動機の定常特性, 昭和 41 年度 電気四学会連合大会講演論文集.
- 6) 関所忠則・藤田義弘: 固定子回転型可変速度同期電動機の安定性, 昭和 40 年度 電気四学会北海道支部連合大会講演論文集.
- 7) 関所忠則・近藤 修: 可変速度同期電動機の再生制動方式, 昭和 41 年度 電気四学会連合大会講演論文集.
- 8) 佐藤・甲斐: ネオスーパーシンクロモータについて, 安川電機, 第 15 巻, 第 55 号 (昭和 26 年).
- 9) 関所・伊達・近藤・藤田: 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.
- 10) 関所忠則・近藤 修・藤田義弘: 可変速度同期電動機.
特許出願番号 40.035780 1 号, 40.065780 2 号, 40.065780 3 号.