

無段変速同期電動機の電気制動特性

その他（別言語等） のタイトル	On the Electrical Braking of the Continuous Variable Speed Synchronous Motor
著者	関所 忠則, 近藤 修, 藤田 義弘
雑誌名	室蘭工業大学研究報告
巻	5
号	2
ページ	577-594
発行年	1966-08-25
URL	http://hdl.handle.net/10258/3260

無段変速同期電動機の電気制動特性

図所忠則・近藤 修・藤田義弘

On the Electrical Braking of the Continuous Variable Speed Synchronous Motor.

Tadanori Zusho, Osamu Kondo and Yoshihiro Fujita

Abstract

The paper deals with the property on the electrical braking of the continuous variable speed synchronous motor, especially in the case of the operated brake for the load with constant negative torque independent of its speed.

The theoretical and experimental investigation lead to the results that the prescribing motor and system produces better characteristics on several points, that is, on the regenerative braking of the system about efficiency, on the process of speed control, the effective area of the adjustable speed, and the capacity of the auxiliary machines, etc. for $s < 1$.

The authors extend the discussion to the case when $s > 1$, and conclude that the device is expected of work in spite of some difficulty.

I. ま え が き

慣性の大きな負荷を制動停止させる、或いはエレベーター、巻揚機、クレーン等で重量物を降下させる時の様に、負荷の負トルクに逆って一様な速度で制動運転する場合等、制動を必要とする負荷に使用される電動機では、電気的制動、特に回生制動の可否、並びにその諸特性がエネルギー経済上、又は電気、機械両系統の設備上重要な意義を持っていることは論ずる迄もない。

この論文は、筆者等が開発した無段変速同期電動機^{1,2)}の電気制動特性、特に負荷の負トルクがその速度に無関係で一定な場合の運転制動特性について、回生特性に重点をおきながら、その定常時のトルク、出力、効率、補助機容量、運転の安定性等を考察する。初めに $s < 1$ の領域、次いで $s > 1$ の領域について理論的に取扱い、前者ではその有効性を示し、後者では実現についての問題点を述べた。又 $s < 1$ 領域での実験結果について考察した。

II. 定常特性 その1 ($s < 1$)

電動機として作動している系の主電動機回転子に、その発生トルクと同方向にトルクが加る、即ち、負荷トルクが減少して、負の大きを持つ様になると、主電動機の内部相差角の符号

が変る。このとき、主電動機は発電作用をし、負荷軸より機械的エネルギーを吸収して、電源へ電気的エネルギーを返還し、エネルギーの逆変換、回生制動作用をしている。

主電動機は、その回転子角速度に無関係に同期状態にあり、同期発電機としての諸特性はそのまま保存されている。

II-1 $0 < s < 1, k > 0$ 領域

主回転子角速度 ω_r が、主固定子に対する回転磁界の角速度 ω_0 より小さいとき、各部のトルク関係は図-1のようになる。ここで電動作用の時と同様に

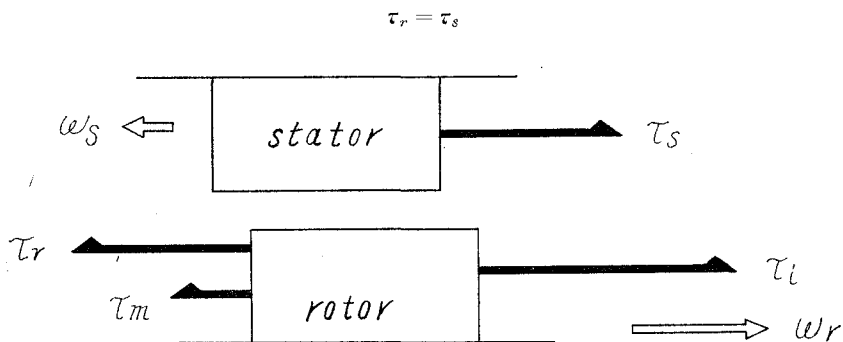


図-1 トルク配分 ($0 < s < 1, k > 0$)

図-1に於て(負荷の)負トルク τ_i によって主回転子はその方向に ω_r で回転し、且つ主電動機が回生制動をしているとすると、主回転子発生(制動)トルクは τ_i と逆方向に τ_r である。固定子には τ_r と方向反対に、 τ_s が図の様に働いているが、 $0 < s < 1$ 領域では固定子は回転子と反対方向に、 $\omega_0 = \omega_r + \omega_s$ の同期条件を満足する様に、 ω_s の角速度で回転しなければならない。従って、固定子側補助機は電動機として動作する必要がある、その入力電力は回転子側補助機から供給されるので、回転子側補助機は発電機として動作する。その入力トルク τ_m は図の様に τ_r に加り、有効な制動トルクとなる。

以上のことより

$$\tau_r + \tau_m = \tau_i \quad (1)$$

となり、更に

$$k = P_s/P_m = \omega_s \tau_s / \tau_m \omega_r = s \tau_r / (1-s) \tau_m \quad (2)$$

と定義するパラメーター k を導入する。ここで

P_s ; 固定子入力 P_m ; 回転子側補助機入力

又、 P_s の符号と P_m の符号は何れも、その回転方向とトルクの向きが反対の場合を正とする。

従って、図-1から明らかに $k > 0$

さて(2)式より

$$\tau_m = s\tau_r/(1-s)k \quad (3)$$

よって

$$\tau = \{k+s(1-k)\}\tau_r/(1-s)k \quad (4)$$

逆に

$$\tau_r = (1-s)k\tau_i/\{k+s(1-k)\} \quad (5)$$

$$\tau_m = s\tau_i/\{k+s(1-k)\} \quad (6)$$

等になる。又、出力については

$$P_r = \omega_r/\omega_0 \cdot P_0 = (1-s)P_0 \quad \text{同様に} \quad P_s = sP_0$$

であるから、トルク、出力、角速度間の関係より

$$P_i = \{k+s(1-k)\}P_0/k \quad (7)$$

$$P_0 = kP_i/\{k+s(1-k)\} \quad (8)$$

$$P_r = (1-s)kP_i/\{k+s(1-k)\} \quad (9)$$

$$P_m = sP_i/\{k+s(1-k)\} \quad (10)$$

$$P_s = skP_i/\{k+s(1-k)\} \quad (11)$$

等になる。

巻揚機、エレベーター等の運転制動時、負荷の負トルク対速度特性は、定常状態では、速度に無関係に略一定と考えられる。従って(5)式等の τ_i は s に対して独立であり、(8)式等の P_i は $(1-s)$ に比例する。(8)式に於いて $s=0$ ($\omega_r=\omega_0$)の P_i を P_{i0} とおけば、任意の滑り s に於いて P_0 は

$$P_0 = (1-s)kP_{i0}/\{k+s(1-k)\} \quad (12)$$

となる。

図-2で正領域に引かれた細線群は、 k をパラメーターとした P_0/P_{i0} を示している。尚図では正領域を ω_r について第1象限にしているが、電動作用も同時に表現するためには、電動作用が第1象限に、回生制動領域は第4象限になるのが妥当である。然し、今は制動作用だけを扱っているのだから、負荷からの入力 P_i を正とする。さて(5)式は(12)式の P_0 を τ_r に、 P_{i0} を τ_i におきかへたものに全く等しいから、図-2の曲線群は又 τ_r/τ_i 線を表している。尚(5)及び(12)式で $s=0$ のとき、 $k=0$ となるので、 τ_r 、 P_0 は数式上不定になるが(2)式を用いれば

$$\{\tau_i\}_{s=0} = \{\tau_r + \tau_m\}_{s=0}$$

$$\{P_0\}_{s=0} = \{\tau_r\}_{s=0}\omega_0$$

等になり、ある一定値になることが判る。

次に回生効率 η は (8) 式より

$$\eta = P_0/P_i = k/\{k+s(1-k)\} \quad (13)$$

となり, 更に (2) 式を用いて変形すれば

$$\eta = \tau_r/(1-s)(\tau_r + \tau_m) \quad (14)$$

となる。(14) 式はある任意の滑り s で, 回転子側補助機の吸収トルク分が小さい程効率大, 従って一定 P_{20} に対して P_0 が大きくなることを示している。図-2 でトルク, 出力の s に対する変化を, k をパラメーターとして計算図示したが, k の値は, P_i, P_m, P_s 及び s の関数であり, 与へられた条件下で帰還系の損失を計算予測するか, 若しくは実測する必要がある。然し, 一応 s の関数と見て, k をパラメーターとする曲線群と $k(s)$ の交点を求めて行くと, それが実際の特徴を代表するものとなることは, 電動作用の場合と同様である¹⁾。図-2 の太線及点線は試作機による実験値であるが, その詳細は後章で述べる。

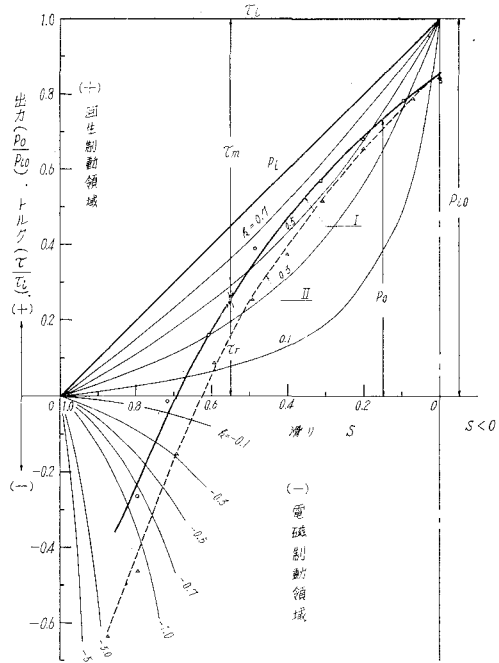


図-2 出力, トルク特性 ($0 < s < 1, k > 0$; $0 < s < 1, k < 0$)

II-2 $0 < s < 1, k < 0$ 領域

主回転子の角速度が十分小さくなると, τ_i が一定の条件では, P_i が $(1-s)$ に比例して減少するので, P_i が帰還系の損失より小さくなる領域が存在する。此のとき主電動機内部相差角の符号が変り, 電動作用の場合と同じになる。換言すれば, 回生電力は負になり, 主電動機には電源より電力が流入し, その発生トルクの向きが逆になる。図-3 は此の領域でのトルク関係を示す。明らかに

$$\tau_m - \tau_r = \tau_i \quad (15)$$

となり, 更に固定子側では τ_i と ω_s の向きが一致するので $P_s < 0$

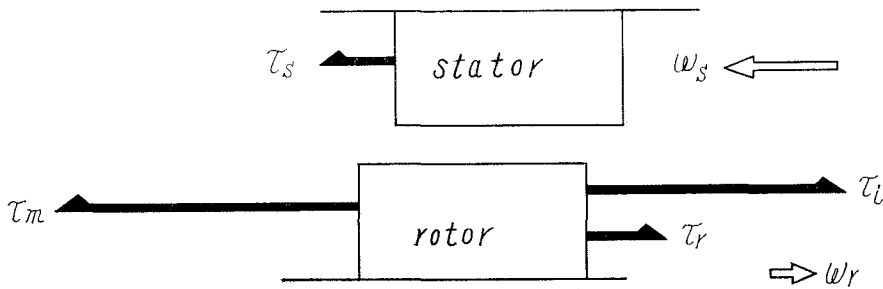


図-3 トルク配分 ($0 < s < 1, k < 0$)

$$k = -s\tau_r / (1-s)\tau_m < 0 \tag{16}$$

となる。此の領域では補助両機は共に発電機として動作し、負荷からのエネルギーと主電動機への流入電気エネルギーの合計は全て系内で失われる。従って、此の領域では系は一種の電磁ブレーキとして動作している。此の領域でのトルク、出力等の式は前(5)~(12)式の k の符号を変へればよい。主要なものをあげると

$$\tau_r = -(1-s)k\tau_i / \{s(1+k)-k\} \tag{17}$$

$$\tau_m = s\tau_i / \{s(1+k)-k\} \tag{18}$$

$$P_m = sP_i / \{s(1+k)-k\} \tag{19}$$

$$P_0 = -k(1-s)P_{i0} / \{s(1+k)-k\} \tag{20}$$

等になる。

k をパラメーターとして、 τ_r/τ_i 、 P_0/P_{i0} を示せば図-2 負領域の曲線群になる。此の領域は、回転子速度が小さくなると急激に τ_m が増大し、連続的な制動運転は困難であり、只停止制動時の過渡時だけ短時間、補助機の過負荷特性を利用することが可能である。尚 $s=1$ では $P_m=0$ なので $k \rightarrow -\infty$ となるが(16)式を用いれば

$$\{\tau_i\}_{s=1} = \{\tau_m - \tau_r\}_{s=1} \quad \{P_0\}_{s=1} = \{\tau_r\}_{s=1} \omega_0$$

等になり一定値に落ち着く。

II-3 $s < 0, k < 0$ 領域

回生制動を行ないつつ、主回転子速度を同期速度以上に上昇させることが可能である。此の場合、 τ_r 、 τ_s 、 τ_m の方向は II-1 領域と同様であるが、固定子の回転方向が変り、 τ_s と ω_s の向きが一致する。従って固定子側補助発電機は当然発電作用をし、主固定子に対して制動作用をするのであるが、固定子角速度が十分小さい間は、その界磁束を最大にしても発生電圧が低く、自身の発生電圧だけでは、所要の制動トルクを発生するのに必要な補助機電流を流すことが出来ない。そのため回転子側補助機も発電作用をし、両者の電圧を加えて所要の電機子電流を通ずる必要がある。此の領域でのトルク関係は図-4に示す。

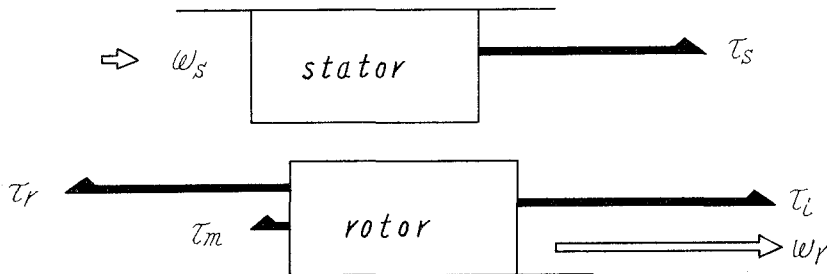


図-4 トルク配分 ($s < 0, k < 0$)

$$\tau_i = \tau_r + \tau_m$$

で

$$k = -P_s/P_m = -s\tau_r/(1+s)\tau_m < 0 \quad (21)$$

なることも明らかであろう。トルク、出力、効率等の各式は(5)~(12)式の s と k の符号を変へたものに等しい。主なものは

$$\tau_r = (1+s)k\tau_i/\{k+s(1+k)\} \quad (22)$$

$$\tau_m = s\tau_i/\{k+s(1+k)\} \quad (23)$$

$$P_m = sP_i/\{k+s(1+k)\} \quad (24)$$

$$P_0 = k(1+s)P_{20}/\{k+s(1+k)\} \quad (25)$$

$$\eta = k/\{k+s(1+k)\} \quad (26)$$

等になる。

k をパラメーターとする τ_r/τ_i , P_0/P_{20} を図-5 に示す。此の領域で回転子速度を上昇するには、回転子側補助機の界磁束を減少させるが、界磁束が 0 になると、 $\tau_m=0$ よって $P_m=0$, $k \rightarrow -\infty$ となる。然し此のとき(22)式等は若干の変形によって

$$\tau_r = \tau_i \quad P_0 = P_{20}$$

になることが判り、当然ではあるが回転子側補助機は何等役割を果さず(実際には機械的損失がある)、制動トルクは全部主回転子が受持っている。又此の領域は実質的に $0 < s < 1$, $k > 0$ の領域と変わりなく、 $\tau_m=0$ となる滑りから、II-1 領域での $\tau_r=0$ となる滑りの点まで、此の系の最も有効な領域となるであろう。

II-4 $s < 0$, $k > 0$ 領域

主回転子を $\tau_m=0$ の滑りより更に上昇させると、固定子側補助機の発生電圧で所要の制動

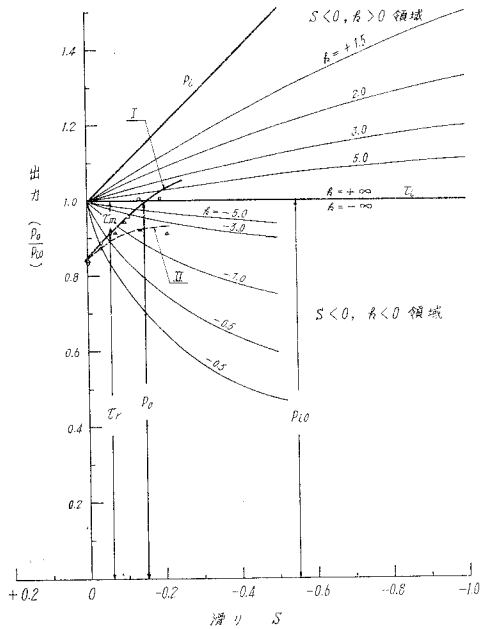


図-5 出力、トルク特性 ($0 > s, k < 0$; $0 > s, k > 0$)

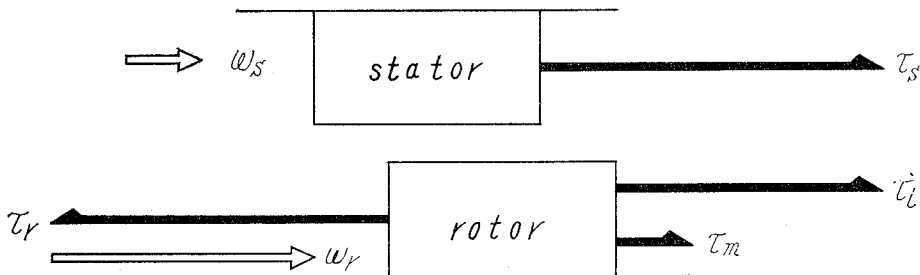


図-6 トルク配分 ($s < 0, k > 0$)

トルクを発生することが出来る。此の領域では回転子側補助機は電動機として動作し、その発生トルクは τ_i に加る。図-6 は此の領域のトルク関係を示す。

$$\tau_i = \tau_r - \tau_m$$

又 τ_m と ω_r の方向が一致するので

$$k = -P_s / -P_m = s\tau_r / (1+s)\tau_m > 0 \quad (27)$$

此の領域でのトルク、出力、回生効率等の各式は (5)~(12) 式で s の符号を変へるだけでよい。

$$\tau_r = (1+s)k\tau_i / \{k-s(1-k)\} \quad (28)$$

$$\tau_m = -s\tau_r / \{k-s(1-k)\} \quad (29)$$

$$P_m = -sP_i / \{k-s(1-k)\} \quad (30)$$

$$P_0 = (1+s)kP_{i0} / \{k-s(1-k)\} \quad (31)$$

$$\eta = k / \{k-s(1-k)\} \quad (32)$$

等を得る。 k をパラメーターとする $\tau_r/\tau_i, P_0/P_{i0}$ は図-5 に示す。此の領域では主回転子トルク τ_r は負荷の負トルクに加えて回転子側補助機のトルクも吸収しなければならない。従って、系として吸収出来る負トルクの連続最大値は、主電動機の定格トルクよりも小になり、軽荷重を高速度で降下させる時に用いられよう。

II-5 補助機界磁束と速度制御

運転制動時に於いても、負荷の要求によって、運転速度を調整変化させる必要が生ずる。 τ_i の速度トルク特性が定まっているとき、速度を調整制御するためには、両補助機の界磁束を調整することによってだけ可能であることは電動作用の場合と同様である²⁾。此のとき補助機界磁束の変化の方向と、負荷速度の変化の向きについて考察する。電動作用時と同様の考えで²⁾、補助機電機子回路の電圧平衡式を書けば

$$e_m - e_g = i_a R \quad (0 < s < 1)$$

ここで e_m ; 回転子側補助発電機誘起電圧 e_g ; 固定子側補助電動機誘起電圧

i_a ; 補助機電機子電流 R ; 補助機電機子回路合成抵抗

とする。更に

k_m ; 回転子側補助機誘起電圧係数 k_g ; 固定子側補助機誘起電圧係数

ϕ_m ; 回転子側補助機界磁束 ϕ_g ; 固定子側補助機界磁束

とすれば

$$e_m = k_m \phi_m (1-s) \omega_0 \quad e_g = k_g \phi_g s \omega_0$$

であるから

$$k_m \phi_m (1-s) \omega_0 - k_g \phi_g s \omega_0 = i_a R$$

(77)

よって

$$s = (k_m \phi_m \omega_0 - i_a R) / (k_g \phi_g + k_m \phi_m) \omega_0$$

更に

$$\tau_i = \tau_r + \tau_m = (k_g \phi_g + k_m \phi_m) i_a \quad (\text{但し, M.K.S. 単位を用いる})$$

であるから (但し損失トルクを無視する) 結局

$$s = \{k_m \phi_m (k_g \phi_g + k_m \phi_m) \omega_0 - \tau_i R\} / (k_g \phi_g + k_m \phi_m)^2 \omega_0 \quad (33)$$

を得る。上式は τ_i が定ったときの s を ϕ_m , ϕ_g の関数として表現したものであるが、通常の運転条件に於いては、 ϕ_g の増加は s を減少し、 ϕ_m の増加は s を増加させることを示している。 ϕ_m , ϕ_g は両補助機の夫々の界磁電流を調節することにより自由に変わられ、且つ、その絶対値も一般的には非常に小さく調節も容易であるので、最終的な系の速度制御が簡単であることが容易に理解される。又 ϕ_g , ϕ_m をどの様に変化させるかは自由であるが、制限を受ける実際的な問題としては、共に最大値があること、並びに補助系の損失と密接な関係にあるので、常に系の総合効率を最大にする様変化させるべきである。尚この節の推論は ($0 < s < 1$, $k > 0$) の領域について行なわれたが、他の領域についても e_g , e_m の符号を考慮するだけで、簡単に拡張することが出来る。

II-6 運転の安定性³⁾

電気制動時にある系が安定に運転できるためには、負荷の負トルク τ_i と系の合成制動トルク τ との速度に対する特性の間に次の関係式が成立しなければならない。

$$\frac{\partial \tau}{\partial \omega_r} > \frac{\partial \tau_i}{\partial \omega_r} \quad (34)$$

ここで τ は両補助機の界磁束を一定に保持した場合のトルクである。運転制動時は前述の通り τ_i は略一定であるから

$$\frac{\partial \tau_i}{\partial \omega_r} \doteq 0$$

よって

$$\frac{\partial \tau}{\partial \omega_r} > 0$$

がゆるい意味での必要条件を与へる。さて

$$\tau = \tau_r + \tau_m = \tau_s + \tau_m \quad (0 < s < 1, k > 0)$$

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

又

$$i_a = \{k_m \phi_m \omega_r - k_g \phi_g \omega_s\} / R$$

故に

$$\tau = (k_m \phi_m + k_g \phi_g) \{k_m \phi_m + k_g \phi_g\} \omega_r - k_s \phi_g \omega_0 / R$$

即ち

$$\partial \tau / \partial \omega_r = (k_m \phi_m + k_g \phi_g)^2 / R > 0$$

となり安定運転できることが判った。上例では $0 < s < 1, k > 0$ の領域についての検証であるが、他の領域についても同様な手続きにより安定性が容易に証明できる。

III. 補助機容量

以上主として、運転動時の系の定常特性について論じて来たが、パラメーター k が非常に大きな役割を果している。パラメーター k は、換言すれば、両補助機の抽象的な特性の表現であり、補助機的设计、製作と密接に結びついている。従って、設計条件中最も大きな因子である容量について考究する。さて上述した所により、補助機の動作条件は4領域で夫々異なっているが、通常最も使用されるところの領域は $0 < s < 1, k > 0; 0 > s, 0 > k$ の2領域である。残りの2領域中 $0 < s < 1, k < 0$ 領域は、回転子側補助機の分担トルク分が過大になり、軽トルクの場合以外は連続的な運転制動は不可能に近く、又 $s < 0, k > 0$ 領域では、軽トルクの特殊な時に適用されるだけで、一応考慮の外において差支えない。 $0 > s, k < 0$ 領域では P_s に着目すると、 ω_r は一般的に十分小さいので問題にならず、又 P_m では実際的には ϕ_m は零に近く、従って τ_m が十分小さい。よって $0 < s < 1, k > 0$ 領域での補助機容量が重要になる。此の領域での P_m, P_s を P_{i0} で書き改めると

$$P_m = s(1-s)P_{i0} / \{k + s(1-k)\} \quad (35)$$

$$P_s = s(1-s)kP_{i0} / \{k + s(1-k)\} \quad (36)$$

となり、更に此の領域では $k < 1$ であるから $P_m > P_s$ 従って P_m についてその最大値、及びそれが生ずるときの s の値を求めればよい。

$$\partial P_m / \partial s = 0 \quad \text{より} \quad \{s\}_{P_{m \max}} = (-k + \sqrt{k}) / (1 - k) \cdot \omega_0 \quad (37)$$

となり、最大 P_m の値は

$$\{P_m\}_{\max} = P_{i0} / (1 + \sqrt{k})^2 \quad (38)$$

表-1 $\{P_m\}_{\max}, \{s\}_{P_{m \max}}$ の計算値

k	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0
$\frac{\{P_m\}_{\max}}{P_{i0}}$	0.578	0.417	0.345	0.345	0.281	0.26	0.25
$\{s\}_{P_{m \max}}$	0.255	0.338	0.414	0.454	0.47	0.49	0.5

($\tau = \text{一定}$)

となり、電動作用時の最大固定子出力を求める式と同様になる。 k をパラメーターとし $\{s\}P_{m\max}$ と $\{P_s\}_{\max}$ の値を計算したものが表-1である。又 k をパラメーターとした P_m/P_{i0} 曲線群を図-7に示す。

実際の $\{P_m\}_{\max}$ と $\{s\}P_{m\max}$ の値は図-7の曲線群と $k(s)$ の交点であるが、 $\{P_m\}_{\max}$ の値は P_{i0} の大体35%前後であろう。但し、 P_m は回転子側補助機の入力であるから、その出力は更に損失分だけ小さくてよい。一定トルクを駆動する際の $\{P_s\}_{\max}$ と一定負トルク負荷を制動する場合の $\{P_m\}_{\max}$ の値が略等しい⁴⁾(一般には系内の損失量の分布が違ってくるので両者の値は一致しない)ので制動を必要とする定トルク負荷の場合、両補助機共同定格で設計すればよく、特に容量決定に当っては制動条件について考慮する必要はない。

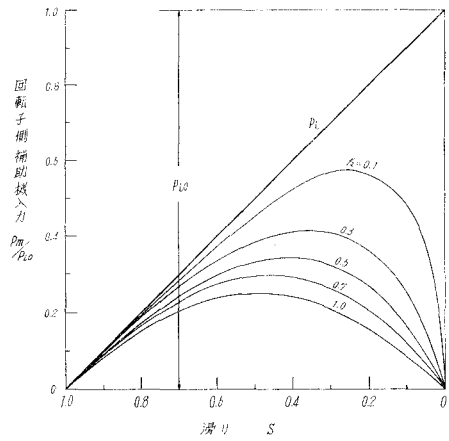


図-7 回転子側補助機入力特性
($0 < s < 1, k > 0$)

IV. 定常特性 その2 ($s > 1$)

巻揚機、エレベーター等の負荷の様にその荷重、従ってトルクの向きが常に一定な場合に、 $s < 1$ 領域の回生制動を適用させるとき、上昇運転と下降運転の切換の際、一旦主電動機を電源から開放し、その2端子を切換へて再投入、固定子を逆転、同期投入の手続きを操返さなければならぬ。従って、運転サイクルの高い場合には此の切換の際のエネルギー、時間の損失に加えて技術的、設備的に無視することが出来ない問題が生じよう。此の様な際、電源を切換ることなく、固定子を同期速度以上、 $\omega_r > \omega_0$ ($s > 1$)にし、且つ回生制動が可能であれば問題は一挙に解決される。此の章では、以上の見地から $s > 1$ 領域の電気制動特性を考察し、その問題点をあげる。

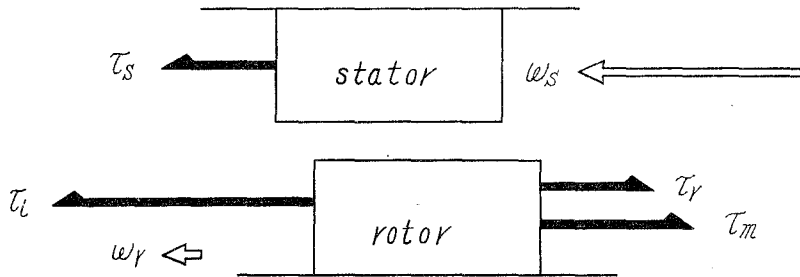
IV-1 $s > 1, k < 0$ 領域

$s > 1$ で ω_r の値が十分小さい範囲では、 P_i は帰還系の損失より小さく、電源から主電動機に電力が流入する。此の領域でのトルク関係は図-8に示す。即ち、固定子は τ_r と同方向に ω_r で回転するから、固定子側補助機は発電機として動作する。よって、主電動機入力と負荷からの入力の凡ては系内で失れ、此の領域は電磁制動領域となる。

図より

$$\tau_i = \tau_r + \tau_m$$

$$k = -P_s/P_m = -(2-s)\tau_r/(1-s)\tau_m < 0 \quad (39)$$

図-8 トルク配分 ($s > 1, k < 0$)

但し、 s は回転子角速度 ω_r で正回転するときの滑りとする。各部のトルク，出力は (5)~(12) 式で k の符号を変へ、且つ滑り s を $(2-s)$ でおきかへればよい。

以下

$$\tau_r = (1-s)k\tau_i / \{(2-s)(1+k)-k\} \quad (40)$$

$$\tau_m = (2-s)\tau_i / \{(2-s)(1+k)-k\} \quad (41)$$

$$P_m = (2-s)P_i / \{(2-s)(1+k)-k\} \quad (42)$$

$$P_0 = (1-s)kP_{i0} / \{(2-s)(1+k)-k\} \quad (43)$$

等になる。図-10 は k をパラメーターとする $\tau_r/\tau_i, P_0/P_{i0}$ の変化を示す。ここで $s=1$ で $k \rightarrow -\infty$ となるが (39) 式を使へば

$$\{\tau_i\}_{s=1} = \{\tau_r + \tau_m\}_{s=1} \quad \{P_0\}_{s=1} = -\{\tau_r\}_{s=1}\omega_0$$

等になり、電動作用時の起動条件に連続する。又 ω_r が増加し P_i が帰還系の損失に等しくなると主電動機の入出力は 0 となるので $k=0$ ，このときは

$$\tau_r = \tau_s = 0 \quad \tau_m = \tau_i$$

$$P_0 = 0 \quad P_m = P_i$$

となって回転子側補助機が単独で制動トルクを発生している。

IV-2 $s > 1, k > 0$ 領域

回転子速度が $k=0$ 点を超過して行くと、主電動機内部相差角の符号が変り、エネルギーを逆変換して、電源へ返還する。従って見掛上再生制動特性を示すが、此の領域では τ_r の方向が τ_i の向きと一致するため、制動トルクは回転子側補助機単独で受持っている。

即ち、一旦回転子側補助機が発電機として負荷からエネルギーを吸収し、その 1 部を主固定子を経て、電源に回生している。図-9 は此の領域でのトルク関係を示している。この領域では ω_s と τ_s の向きが逆であるから、回定子側補助機は電動機として動作する。回転子側補助機は負荷及び主回転子からの機械的エネルギーを全部吸収しなければならないから、その容量、トルクは速度の上昇と共に著しく大きくなり、速度制御の有効な範囲を狭くする。さて

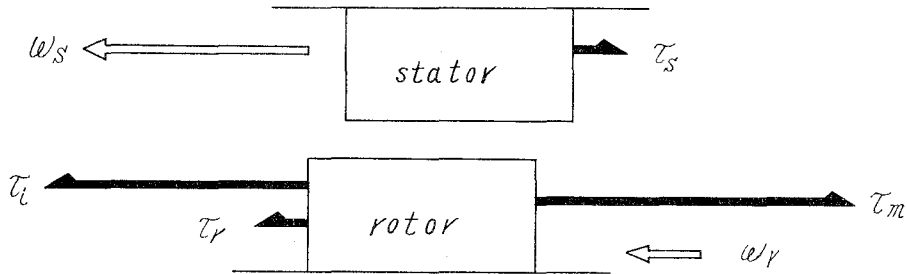


図-9 トルク配分 ($s > 1, k > 0$)

$$\tau_i = \tau_m - \tau_r$$

$$k = P_0/P_m = (2-s)\tau_r/(1-s)\tau_m > 0 \tag{44}$$

であるからトルク，出力等は (40)~(43) 式の k の符号を変へる丈でよい。

$$\tau_r = -(1-s)k\tau_i/\{(2-s)(1-k)+k\} \tag{45}$$

$$\tau_m = (2-s)\tau_i/\{(2-s)(1-k)+k\} \tag{46}$$

$$P_m = (2-s)P_0/\{(2-s)(1-k)+k\} \tag{47}$$

$$P_0 = -(1-s)kP_{i0}/\{(2-s)(1-k)+k\} \tag{48}$$

等になり，回生効率は

$$\eta = k/\{(2-s)(1-k)+k\} \tag{49}$$

になる。 k をパラメータとする $\tau_r/\tau_i, P_0/P_{i0}$ は 図-10 の負領域に示されるが，これは負荷のトルクの符号を II 章のそれと同じくした為である。然し， ω_r についての象限のとり方は電動作用の場合と同様になる。図-10 で $k=0.5$ のときのトルク配分を示しているが，回転子側補助機の入力トルクの増加は II-2 の領域程著しくない。此の場合は速度の増加と，トルクの増加が一致している点が問題となる。さて P_m を P_{i0} で表せば

$$P_m = (2-s)(1-s)P_{i0}/\{(2-s)(1-k)+k\} \tag{50}$$

となるが，図-11 は P_m/P_{i0} を示す， k が大きくなり，回生電力が増加すると P_m も増加し，回生効率の向上と，補助機容量の低減が相矛盾する関係にある。負荷が定トルク特性の場合，前述の通り，両補

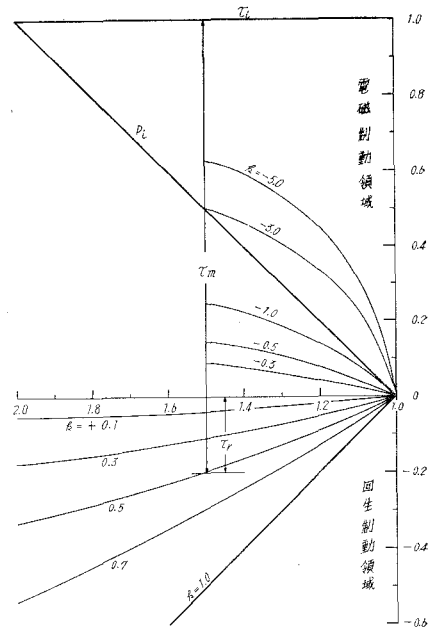


図-10 出力，トルク特性 ($s > 1, k < 0$;
 $s > 1, k > 0$)

助機の容量は主機の 30% 程度に設計されるから、短時間の過負荷運転を許す時、又は極く軽トルクの場合を除いて、低速運転の場合の方が有効であろう。此の領域を高トルク、高速運転迄広げるためには補助機容量を増加しなければならず不経済になる。然し、運転サイクルの高い負荷では $s < 1$ 領域での障害も大きいので、どの領域を適用するかは負荷条件、経済性、設備上、技術上総合的な判断が必要となる。又固定子は同期速度以上で回転しなければならないから、高速機、大容量機ではその機械的強度が問題になる。

IV-3 運転の安定性

$s > 1$ 領域での運転の安定性は、前述 II-6 の場合と同様にして

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_m - \tau_r \quad (s > 1, k > 0) \\ &= (k_m \phi_m - k_g \phi_g) \{ (k_m \phi_m - k_g \phi_g) \omega_r - k_g \phi_g \omega_0 \} / R \end{aligned}$$

よって

$$\partial \tau / \partial \omega_r = (k_m \phi_m - k_g \phi_g)^2 / R > 0$$

となり、一定負トルクの場合安定であることが判る。

V. 実験結果

電気制動特性について考究して来たが、以下試作機²⁾による実験結果について述べる。尚試作機は主電動機出力 700 ワット、補助機は共に 500 ワットである。 $s > 1$ 及び $s < -0.13$ の領域は設備上の問題で実験は行なかつた。

V-1 トルク、出力特性

τ_e が一定のときのトルク、出力特性は k をパラメーターとする、 τ_r / τ_e , P_0 / P_{20} 曲線群と実際の $k(s)$ との交点になるが、図-2、図-5 の I, II 線は実測値である。I の場合は τ_e が主機定格トルクの約 80%、II では約 35% である。I 線での系の回生領域は、約 $s < 0.7$ で、 $s > 0.7$ は電磁制動領域となっている、II 線では $s = 0.65$ を境界としており、 τ_e の低下と共に電磁制動領域が広がる傾向を示している。これは帰還系の損失特性と関係し、機械損の大きい程 τ_e の影響が著しい。電磁制動領域でのトルク配分は図から明らかであるが、 τ_m の分担が急激に大きくな

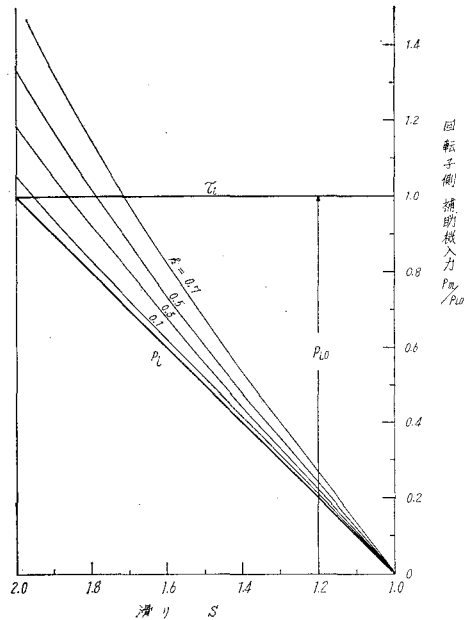


図-11 回転子側補助機入力特性 ($s > 1, k > 0$)

ることは前述の推論に一致しており、これが有効な速度制御領域の下限を示していることも明らかである。 $\tau_i \geq \tau_c$ を満足する領域は、I 線では $s \leq -0.15$ 以上の滑りの部分であり、II 線の場合は更に s の小さな領域に広がっているが、これは回転子角速度の上昇による P_i の増加より、帰還系の損失増加が大きい為と思われる。図-12 は滑りをパラメーターとしたトルク対出力特性を示しているが、 $s=0$ では入力トルクに殆んど無関係に様な P_o/P_{20} 特性が得られた。又 s が大きくなる程 τ_i の影響が大きくなり、軽トルク時の出力低下が目立ってくる。以上のことから、負荷の要求する制動条件にもよるが、 $s=0$ 付近で定常回生運転をすると、重トルクから軽トルク迄、入力に無関係に回生効率も高く有利である。 $s < 0$ の領域も、出力 P_o/P_{20} の値は大きく変化せず有利であるが、入力トルクが大になると、 $s < 0, k > 0$ 領域での適用は困難になる (I 線)。

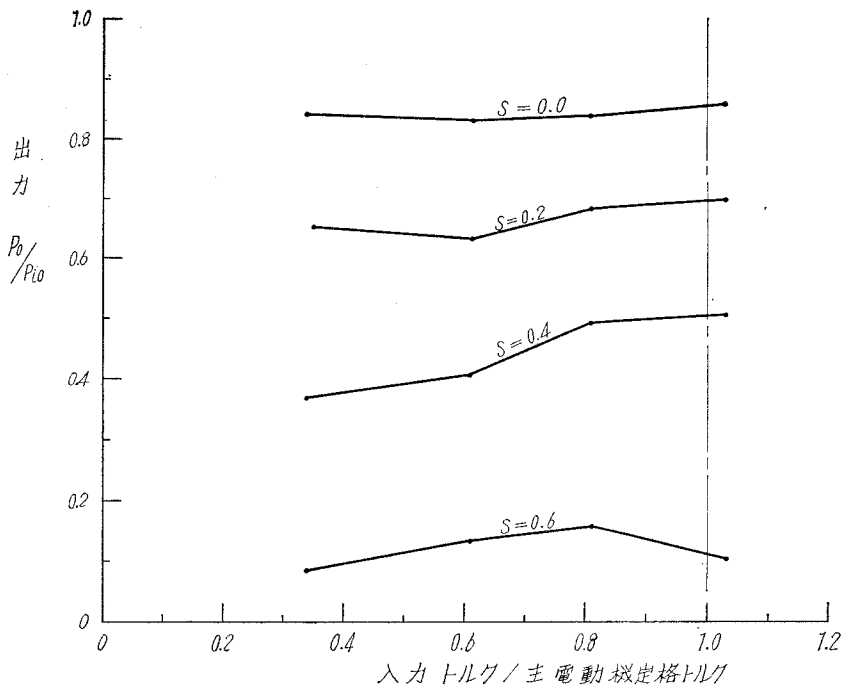


図-12 入力トルク対出力特性

V-2 回生効率

図-13 は回生効率の実測値である。 $s=0$ 付近での効率が最も高く約 0.87 で I, II 共に差はないが、 s の増加と共に軽トルク時の効率低下が目立ってき、前節の結果と一致する。尚これ等、実測値として取扱っている量は、理論式との対応を明らかにするため、主電動機固有の損失を考慮して、その値を実入出力に増減している。従って例えば、効率については、図-13 の値に主電動機固有の効率を乗じなければならない。こうしたとき、I の場合 $s=0$ で効率は約

60%になっている。然し此の主電動機の容量が700ワットであることを考慮すれば、必ずしも悪い値でなく、他機種に比べて劣らないと云へる。

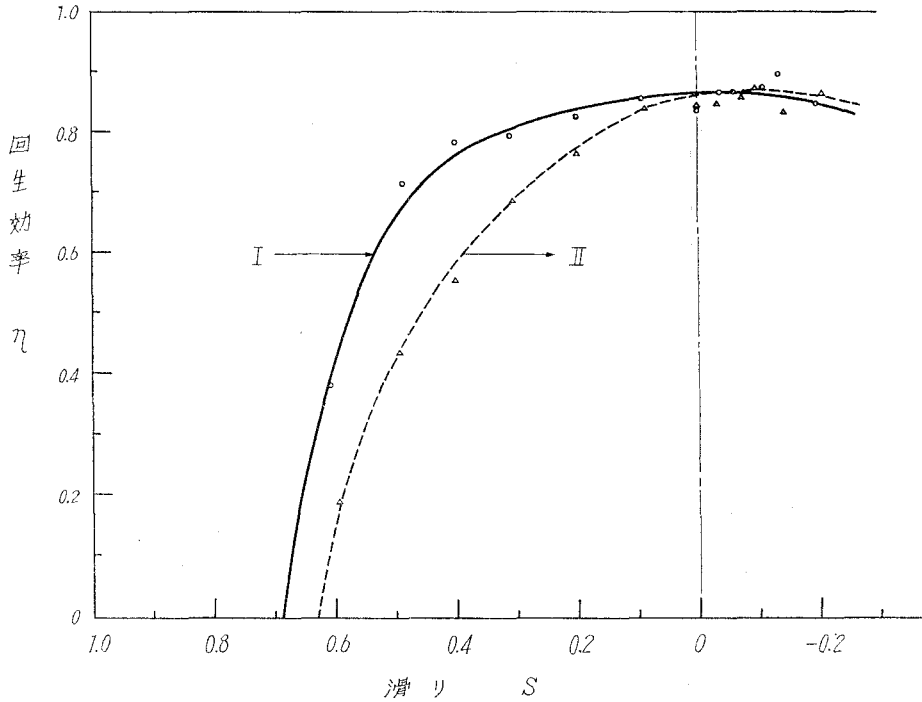


図-13 回生効率 ($s < 1$)

V-3 補助機容量

$s < 1$ 領域の P_m , P_s 及び補助機電機子を流出入する電力 P_a の実測値を図-14に示す。但し、 τ_e は前節 I 線の場合と同様である。 $\{P_m\}_{max}$ は $s \doteq 0.55$ で生じ、その値は約 $0.365 P_{20}$ となつて、前述の推論に一致している。又 $\{P_s\}_{max}$ は $s \doteq 0.4$ で約 $0.195 P_{20}$ となっているが、 $k < 0$ の領域では急速にその絶対値が増加している。これは、 s が十分大き領域での固定子機械損が影響している為と思われる。 P_a は最終的な回転子側補助機の容量を決定する値であるが、その最大値は約 $0.3 P_{20}$ で $s \doteq 0.48$ である。 P_{20} を主電動機定格出力に等しいとおくとき、回転子側補助機の容量 (電氣的出力) は約 30% でよいことが実証できた。このとき k の値は約 0.515 であるが、最適に設計製作された系はこの値はもっと大になり、補助機容量も若干小さくすることが出来よう。

V-4 k 及び ϕ_g , ϕ_m の変化

$s < 1$ 領域でのパラメーター k は前述の通り、4 領域で夫々異なつた値、符号をとり、同時に補助機の作用も変化する。図-15 実線は k の変化を示している。又各領域での両補助機の作用を図示したが、前述の通り $k < 0$ 領域では両機共発電機として動作し、その発生電力は電機

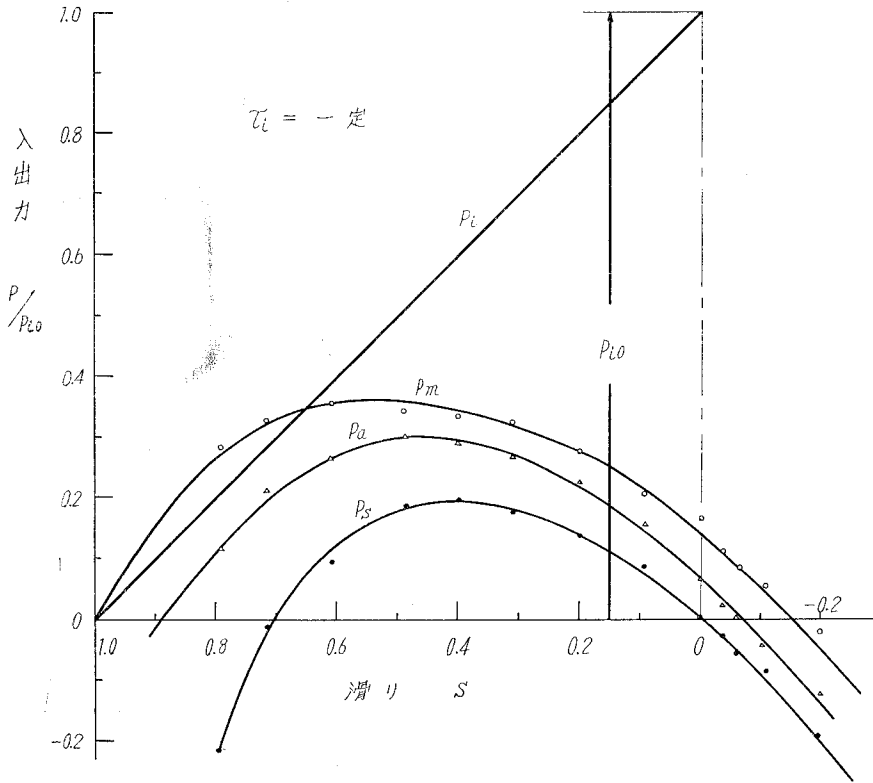


図-14 補助機入出力特性 ($s < 1$)

子回路中で消費されている。 $s < 0, k > 0$ 領域での k の物理的意義は、回転子側補助機から固定子側補助機へ向ってのエネルギー伝達効率になり、 $s < 0, k > 0$ 領域ではその逆数が固定子側より回転子側へ補助機を通ずるエネルギー伝達効率になる。図-15 の点線は、 τ_i が一定のときの両補助機の滑り一界磁電流 (i_f) 線を示している。即ち、 $s < 0.49$ の領域では、 i_{mf} を最大に保ち i_{sf} を変化し、 $s > 0.49$ の領域では、 i_{mf} を最大にして i_{sf} を変化し速度を制御している。これは試作機の両補助機の損失特性を考慮し、その損失を最小にするためと、制御操作が簡単なためである。 $\phi-i_f$ 特性は周知の通り非線型であるから、 i_f の変化が直ちに ϕ の変化に結びつかないが、図の $s-i_f$ 線は $s-\phi$ 線と大体一致している。又 i_f の符号と k の符号は密接な関係にあり、これは又両補助機の動作条件とも関係する。尚 k の符号の変化点と i_f のそれとが完全に一致しないのは、磁気回路のヒステリシス及び固定子側機械損の関係があろう。

VI. あとがき

以上 I~V 章において制動運転時の定常諸特性を理論的に解析し、実験結果について述べた、要約すると

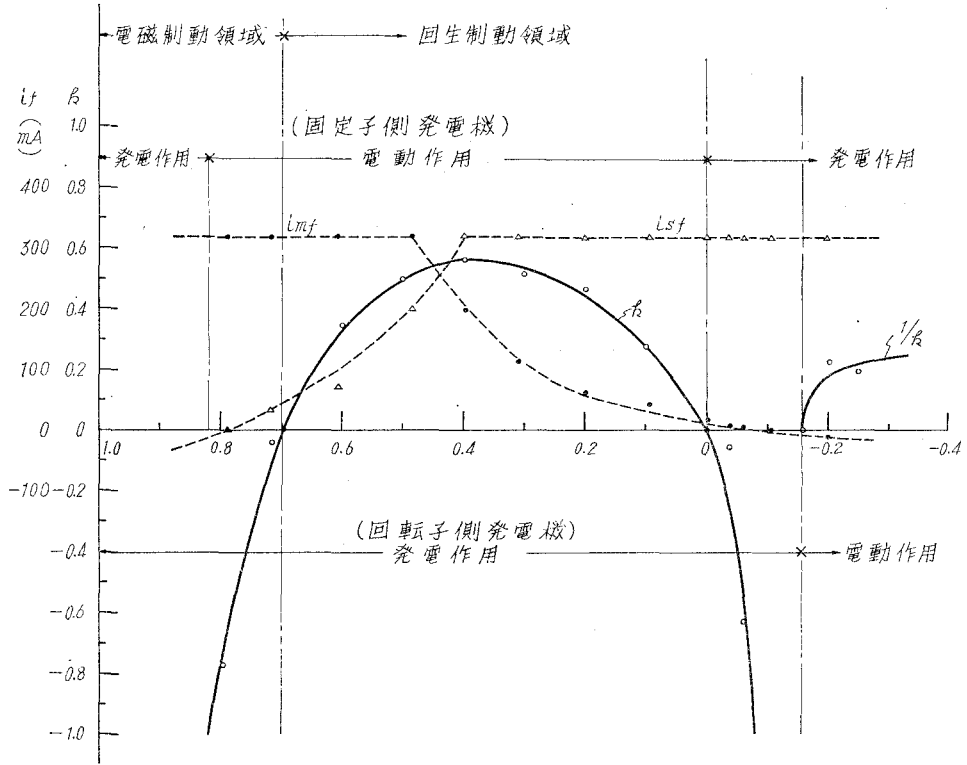


図-15 k 及び補助機界磁電流変化 ($s < 1$)

1. $s < 1$ 領域で回生制動運転は可能であり、 $0 < s < 1, k > 0$; $s < 0, k < 0$ の2領域が有効、且つ諸特性も優れている。

2. 補助機容量は運転制動を要求する定トルク負荷の場合、電動作用を考慮し、両補助機を同定格に設計製作すれば制動運転には十分である。

3. $s > 1$ 領域の電気制動は可能であるが、極く低速運転を除いては補助機の容量が過大になるので、高速領域迄適用するためには詳細な検討が必要である。

等である。又この系の制動時の特長は、同期機としての特性を大部分保持し、然も補助機の容量も考慮するならば、制御領域の広さ、制御の容易さ等ワード・レオナード方式に比肩する特性を持っていること等である。

此の論文では、制動停止について特に考慮を払わなかった、慣性の大きな負荷を比較的速やかに制動停止させる場合には、準定常状態と考えられ、近似的に上述の理論を拡大適用できよう。然し本質的には過渡状態の連続であり、詳細には電気、機械両系の Dynamic な解析を必要とする、稿を改め後日発表したい。最後に本実験に協力下さった敦賀昭夫、菊地潤一(昭和41年本学電気工学科卒業)の両君に感謝の意を表する。(昭和41年4月30日受理)

参 考 文 献

- 1) 図所・近藤：室工大研報, 5, 121 (1965).
- 2) 図所・近藤・藤田・伊達：室工大研報, 5, 547 (1966).
- 3) 例えば広瀬・猪狩：電動力応用, 93 頁, コロナ社 (1964).
- 4) 図所・近藤：昭和 40 年電気四学会支部連合大会講演論文集, 6.
- 5) 図所・近藤：昭和 41 年電気四学会連合大会講演論文集.