

格子制御放電管による直流電動機速度制御装置

Electronic Control Devices for DC Motors

小林正巳* 林 順 雄* 田代浩毅*
 Masami Kobayashi Nobuo Hayashi Hiroki Tashiro

内 容 梗 概

工作機械技術の各分野における急速な発展は、付属電気品に対しても必然的にその性能の高度化、精密化を要求しているが、反面、制御装置としての付属電気品の進歩によつて、工作機械全体の性能向上が期待できる。

日立製作所ではこの状況にかんがみ、格子制御放電管を使用した直流電動機高性能速度制御装置について研究開発を行つてきた。本文では、これらのうち基本的な装置につき、その特性ならびに実験結果の概要を報告する。

1. 緒 言

可変速度原動機として従来から広く使用されてきたものでは、電動発電機によつて直流電動機を制御するいわゆるワードレオナード方式が第一であろう。その後、水銀整流器の発達により静止レオナード方式が開発されたが、これは特殊な大容量の直流電動機に適用されたにすぎなかつた。ところが十数年前、格子制御放電管の完成以来、米国において小容量直流電動機の静止レオナード方式による制御装置が開発されて、第二次大戦後実用期に入り、工作機械関係そのほかに広く使用されるようになった。

この方式による制御装置は、その後欧州および日本でも研究開発され、日立製作所にあつても研究試作が行われてきたものである。今回この誌上を利用してその概要を述べる。

2. 格子制御放電管制御方式による直流電動機の特性と計算式

ここでは、この方式によつて運転される直流電動機の原理、および特性について述べる。計算式および記号については、後述のブロック線図を理解するのに必要な最小限度のものを示すにとどめる。

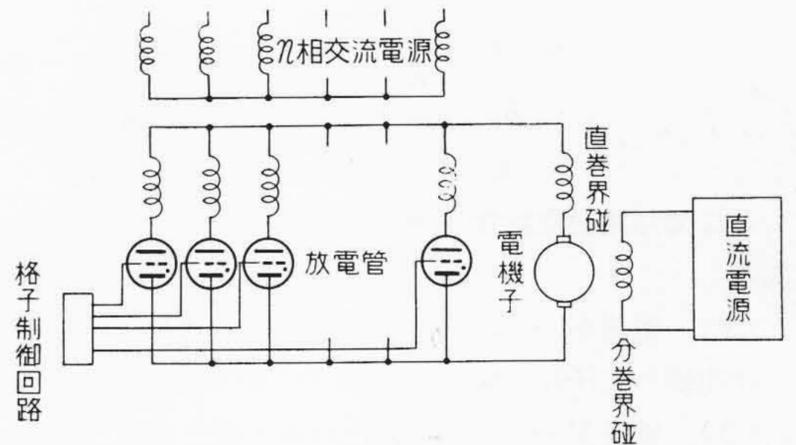
なお、この方式による直流電動機制御の理論ないし計算式については、すでにいくつかの文献^{(1)~(4)}に記述されている。ここではそれを補足して、取扱容易な形にまとめておく。

2.1 静止レオナード制御方式の特性

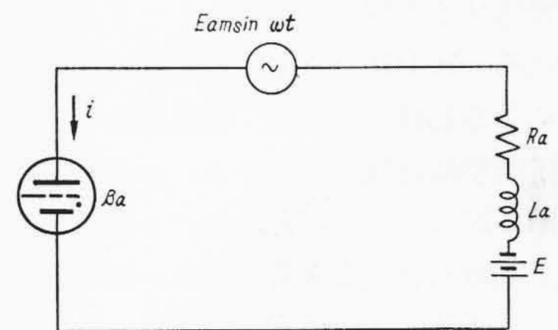
第1図に静止レオナード方式の原理を示す。なお、時によつては可変直流電源で励磁して、分巻界磁制御を行うこともある。

さて第1図の等価回路は第2図で示され、第2図主回路電流は(1)式で与えられる。

* 日立製作所亀戸工場



第1図 静止レオナード方式の原理図



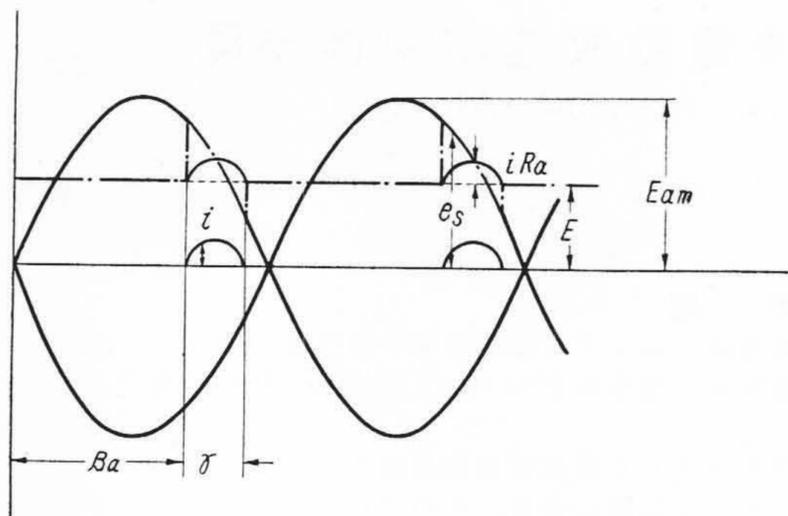
第2図 静止レオナード方式の等価回路

$$L_a \frac{di}{dt} + R_a i = E_{am} \sin \omega t - E \dots \dots \dots (1)$$

- ここで R_a : 回路の全抵抗
- L_a : 回路の全インダクタンス
- E : 回路の全逆起電力
- E_{am} : 電源交流電圧波高値
- ω : 電源角周波数

(1)式の一般解は周知のように(2)式で与えられる。

$$i = -\frac{E}{R_a} + \frac{E_{am}}{\sqrt{R_a^2 + \omega^2 L_a^2}} \sin(\omega t - \theta_a) + C e^{-\frac{t}{T}} \dots (2)$$



e_s : 負荷端子電圧
 iRa : 電機子電圧降下
 i : 負荷電流

第3図 電流断続時の状況概念図

ここで $T = \frac{L_a}{R_a}$ で回路の時定数
 $\theta_a = \tan^{-1}\omega T$ で回路の位相おくれ角
 C : 初期条件で定まる積分常数

ここで回路動作状態を質的にみて、次の二つの場合がある。

- (1) 電流が一つの相から次の相へと移行し、負荷には連続して流れる場合
- (2) 電流が一つの相ごとにパルス状に流れ、負荷には断続して流れる場合

(1)の場合は、電源の相数が多いとき、または負荷のインダクタンスが大きいときに現われる。すなわち、多相電源を使用する大容量静止レオナード方式などにおける場合である。30 HP 以下の直流電動機に用いる格子制御放電管による制御方式では、電源相数も三相以下で、かつ電機子回路時定数 $\frac{L_a}{R_a}$ も小さいので上記(2)の状態になる。第3図に(2)の場合における電機子電圧波形および電機子電流波形を模型的に示す。図を観察すれば、一つの相が点弧して電機子電流が流れ、しばらくして電機子の逆起電力以下に電圧が下り、結局次の相で点弧する前に電機子電流がなくなるのが明瞭となる。

2.2 小容量直流電動機制御の計算式

前節(2)の場合の基本的な計算式を必要な記号とともにまとめてここに述べる。これらは初期条件により C を定めれば、(2)式より簡単に得られるものである。さてこの場合の電流平均値 i_a 、および電流実効値 i_e は、形式的には次の(3)、(4)式で与えられる。

$$i_a = \frac{n}{2\pi} \cdot T_f \cdot \frac{E_{am}}{R_a} \left(\text{または } T_f = \frac{2\pi R_a i_a}{n E_{am}} \right) \dots (3)$$

$$i_e = \frac{\sqrt{n}}{2\pi} \cdot L_{sf} \cdot \frac{E_{am}}{R_a} \left(\text{または } L_{sf} = \frac{2\pi R_a i_e}{\sqrt{n} E_{am}} \right) \dots (4)$$

ただし n は電源相数である。

また T_f および L_{sf} は、ともに点弧角 β_a 、電流流通角 γ 、および電機子回路位相おくれ角 θ_a によつて定まる量である。物理的には L_{sf} は巻線の発熱を示す係数であり、 T_f は回転力を間接的に表示するので、トルク係数と呼ばれる。また同様にして(5)式で速度係数 S_f が定義される。

$$S_f = \frac{K_s S + E_{at}}{E_{am}} \dots (5)$$

ただしここで

S : 回転速度

K_s : 単位回転速度あたり電機子の発生する逆起電力

E_{at} : 電機子回路格子制御放電管電圧降下

なお、 S_f と T_f とは(6)式の関係にある。

$$T_f = \cos \beta_a - \cos(\beta_a + \gamma) - S_f \gamma \dots (6)$$

さて電機子電流断続状態で運転される直流電動機は、格子点弧角 β_a を一定に保つとき、一般に直巻持性を示すものである。これはトルク係数と、速度を間接に示す速度係数との関係を、 γ をパラメータにとり計算してグラフにかいてみれば、数式的にも了解される。

なお、ここで後述するブロック線図に必要な記号を、まとめて書いておくと、これは本文にはあまり関係ない記号と計算式である。

i_f : 分巻界磁電流

T_g : 電機子の発生する回転力

K_t : $T_g = K_s \cdot K_t \cdot i_a$ で定義される比例係数

N_1, N_2 : 電機子電流検出用変流器の一次一相巻数 N_1 、二次全巻数 $2N_2$ 、

T_{LD} : 電機子が(負荷も含めて)ある回転速度を保つに必要な回転力

J_{LD} : 負荷も含めた電動機の慣性能率

T_L : $T_L = J_{LD} \left(\frac{dT_{LD}}{ds} \right)$ で定義される量

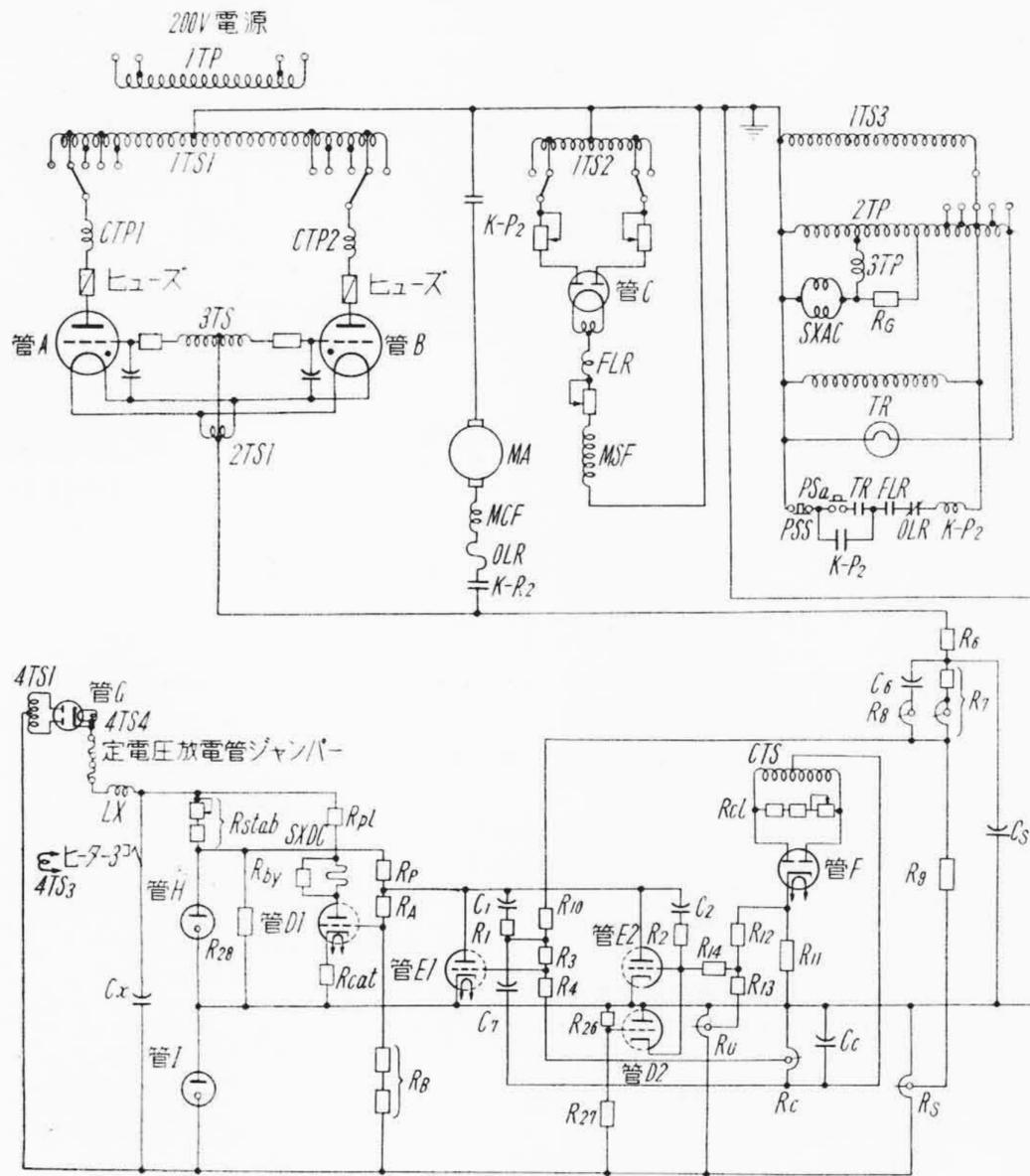
K_L : $K_L = 1 \left(\frac{dT_{LD}}{ds} \right)$ で定義される量

T_M : $T_M = T_L / (1 + K_s^2 \cdot K_t \cdot K_L \cdot \frac{n}{2\pi R_a} \left(-\frac{\partial T_f}{\partial S_f} \right))$ で定義される量

3. 試作品の回路とブロック線図

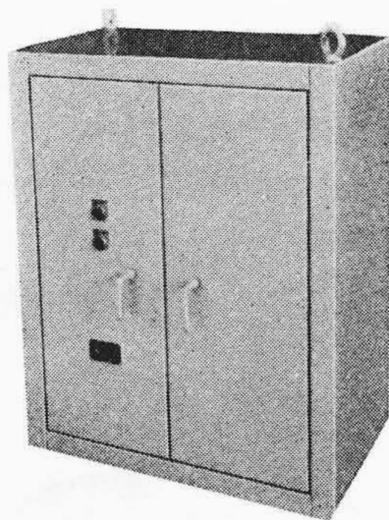
試作品の回路を第4図に、また制御装置の制御函の外観を第5図に示す。回路各部分の機能動作については以下説明するが、この回路は、実用運転に際し最小限必要な次の諸回路、(i)速度調整回路、(ii)電機子電圧降下補償回路、(iii)過電流制限回路を含んでいる。以下主回路および付加回路について、その具体的動作機能を簡単に説明する。

格子制御放電管による直流電動機速度制御装置



- MA : 直流電動機電機子
- MSF : 直流電動機分巻界磁
- MCF : 直流電動機補極
- K-P₂ : 電磁接触器
- OLR : 電磁接触器付属過負荷継電器
- FLR : 無界磁継電器
- PS_a : 起動用押ボタンスイッチ
- PSS : 停止用押ボタンスイッチ
- TR : サイラトロン ヒータ予熱用継電器
Amperite 115 No.60
- 管A, B : 電機子電源用サイラトロン, 6G 45
- 管C : 分巻界磁電源用整流管, KO-522-A
- 管D1 : 移相回路制御用真空管, 6SN7-GT×1/2
- 管D2 : 過電流制限用管 E2 格子電圧降下防止用真空管, 6SN7-GT×1/2
- 管E1 : 速度制御用真空管, 6SL7-GT×1/2
- 管E2 : 過電流制限用真空管, 6SL7-GT×1/2
- 管F : 電機子電流検出用整流管, 6X5-GT
- 管G : 制御回路電源用整流管, 6X5-GT
- 管H, I : 制御回路電源用定電圧放電管, VR150-GT×2
- 1T : 電源変圧器
- 1TP : 電源変圧器用一次巻線
- 1TS1 }
1TS2 } 電源変圧器用二次巻線
1TS3 }
- 2T : フィラメント変圧器
- 3T : 格子変圧器
- 4T : 制御回路電源変圧器
- SX : 移相回路可飽和リアクタ
- SXAC : 移相回路可飽和リアクタ交流巻線
- SXDC : 移相回路可飽和リアクタ直流巻線
- CT : 電機子電流検出用変流器
- CTP : 電機子電流検出用変流器一次巻線
- CTS : 電機子電流検出用変流器二次巻線
- R_s : 速度調整用可変抵抗器
- R_u : 過電流制限調整用可変抵抗器
- R_c : 電機子電圧降下補償調整用可変抵抗器
- R₇ : 速度信号調整用可変抵抗器
- R₈ : 安定度調整用可変抵抗器

第4図 試作装置回路図



第5図 試作装置制御函の外観

3.1 電動機回路

管A, Bは格子制御放電管であつて、電源変圧器 1Tの発生する交流電圧を整流して、電機子に電流を供給する。TRは格子制御放電管予熱用の時限継電器である。

管Cは分巻界磁 MSF を励磁する整流管、FLRは分巻界磁が無励磁のとき、電機子回路を開路する継電器である。

3.2 速度調整回路および電機子電圧 (IR) 降下補償回路

この方式では、電動機回転速度を検出するのに電機子端子電圧によつている。その根拠は(7)式であるが、ここで e_s は電機子電圧を示す。

$$e_s = K_s \cdot S + i_a R_a \dots\dots\dots (7)$$

さて、速度信号である電機子端子電圧は、可変抵抗器 R_s により設定された速度電圧と比較され、さらに変流器 CT により検出された電機子電流信号を、可変抵抗 R_c を通して差引かれて管 E₁ の格子に加えられる。管 E₁ により増幅された速度誤差信号は、管 D₁ の格子に加えて可飽和リアクタの直流側電流を変化させる。これにより可飽和リアクタ交流巻線インダクタンスが変り、ために格子変圧器 3T の一次側の位相が変化する。要するに、回転速度偏差を電機子電圧で検出増幅し、位相偏差

に変換させるのである。これにより格子制御放電管の点弧角が変り、閉回路の饋還作用によつて速度は自動的に調整される。

3.3 過電流制限回路

起動時および過負荷時の場合のように、もし、電機子電流が過大になる場合には、格子制御放電管や電動機巻線の保護を行わねばならない。電機子電流が大きいとき、変流器CTは大きな電流を流す。このため、管E₂の格子電圧は上昇して陽極電流を流し、管D₁の格子電圧を下げて、点弧角β_aを大にし、電機子電流を抑制する。負荷が平常なときに管E₂はカットオフ以下の状態にある。負荷が急増したときは、管E₂付属コンデンサC₂の作用で格子電圧上昇がおくれる。このおくれは、管E₂の格子電圧をカットオフ近傍におけば動作上問題ないわけで、管D₂を格子に接続しこの条件を満足させてある。

3.4 移相回路

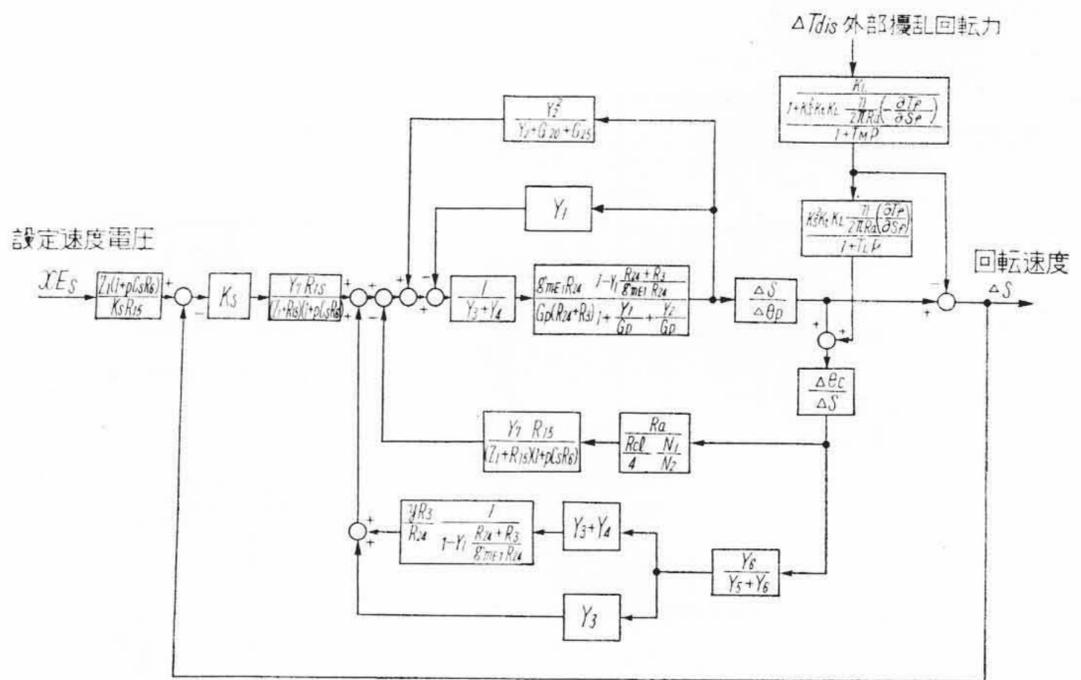
可飽和リアクタ交流巻線SXAC, 固定抵抗R_G, 変圧器2Tよりなるブリッジ回路は、移相回路を形成する。この回路により可飽和リアクタ直流巻線SXDCの電流を変えて交流側インダクタンスを変え、格子変圧器3Tの一次電圧位相を制御しうる。

3.5 電機子電流検出回路

CTP1・CTP2は変流器の一次巻線であり、CTSは

第1表 直流電動機の仕様および実測値

形式名称		VTO-SP 直流分巻電動機
定格出力		450W, 60分定格
定格回転数		5,000 ~ 500 rpm
定格回転力		0.088 m·kg
電機子	電圧	直流 240V~35V
	電流	2.4 A
	抵抗 (含刷子補極)	4.97Ω (75°C)
	慣性能率	0.00129m ² -kg
分巻界磁	電圧	直流 110V
	電流	0.229 A
	抵抗	480Ω (75°C)



記号の説明と意味

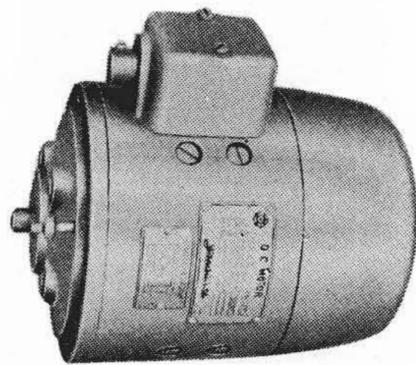
- g_{mE1} : 管 E₁ の相互コンダクタンス
- xR_s : 可変抵抗器 R_s の設定値 ただし $0 \leq x \leq 1$
- yR_c : 可変抵抗器 R_c の設定値 ただし $0 \leq y \leq 1$
- E_s : 定電圧放電管電圧
- Y_1, Y_2, \dots, Y_n : 電子管各回路部分の逆伝達函数
- e_c : 電機子電流信号
- e_p : 管 E₁ (すなわち管 E₂) の陽極電圧
- G_p, G_{18}, \dots : 回路各部の抵抗値の逆数すなわちコンダクタンス
- $\frac{\Delta e_c}{\Delta S}$: $\frac{R_{c1} \cdot N_1}{4 \cdot N_2} (1 + T_L p)$
- $\frac{\Delta S}{\Delta e_p}$: $\frac{R_8 \mu_{D1} K_1}{R_A + R_B} \left(-\frac{d\beta_a}{d\mu} \right) Y_{sx} \cdot \frac{K_M}{1 + T_M p}$
- K_M : $\frac{E_{am} \left(-\frac{\partial T_f}{\partial \beta_a} \right) K_s K_t K_L \frac{n}{2\pi R_a}}{1 + K_s^2 K_t K_L \frac{n}{2\pi R_a} \left(-\frac{\partial T_f}{\partial S_f} \right)}$
- Z_1 : $\frac{(R_6 + R_7) \left[1 + p \left\{ \frac{R_6 R_7}{R_6 + R_7} (C_s + C_6) + C_6 R_8 \right\} + p^2 C_s C_6 R_8 \frac{R_6 R_7}{R_6 + R_7} \right]}{(1 + p C_s R_6) \{ 1 + p C_6 (R_7 + R_8) \}}$
- p : ラプラス演算子

第6図 速度制御回路の整理されたブロック線図

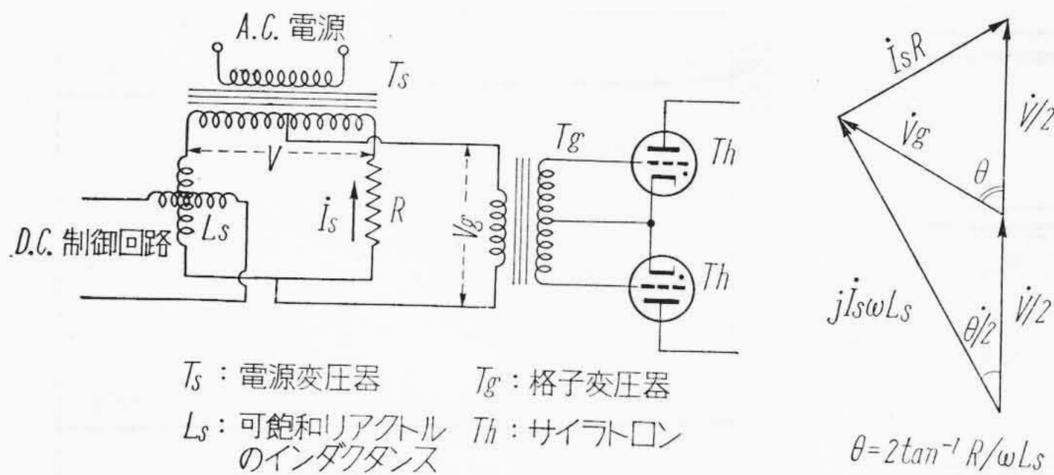
その二次巻線である。この出力を管Fで整流して電機子電流信号を得、この大きさをIR降下分を補償する。

3.6 試作した装置のブロック線図

回路の各部分、各要素の伝達函数を求め、それらを結合すれば本装置のブロック線図を得る。しかし、そのままでは複雑すぎるので、これに等価変換を施して簡略化



第7図 被制御直流電動機 VTO-SP 形 450W 外観

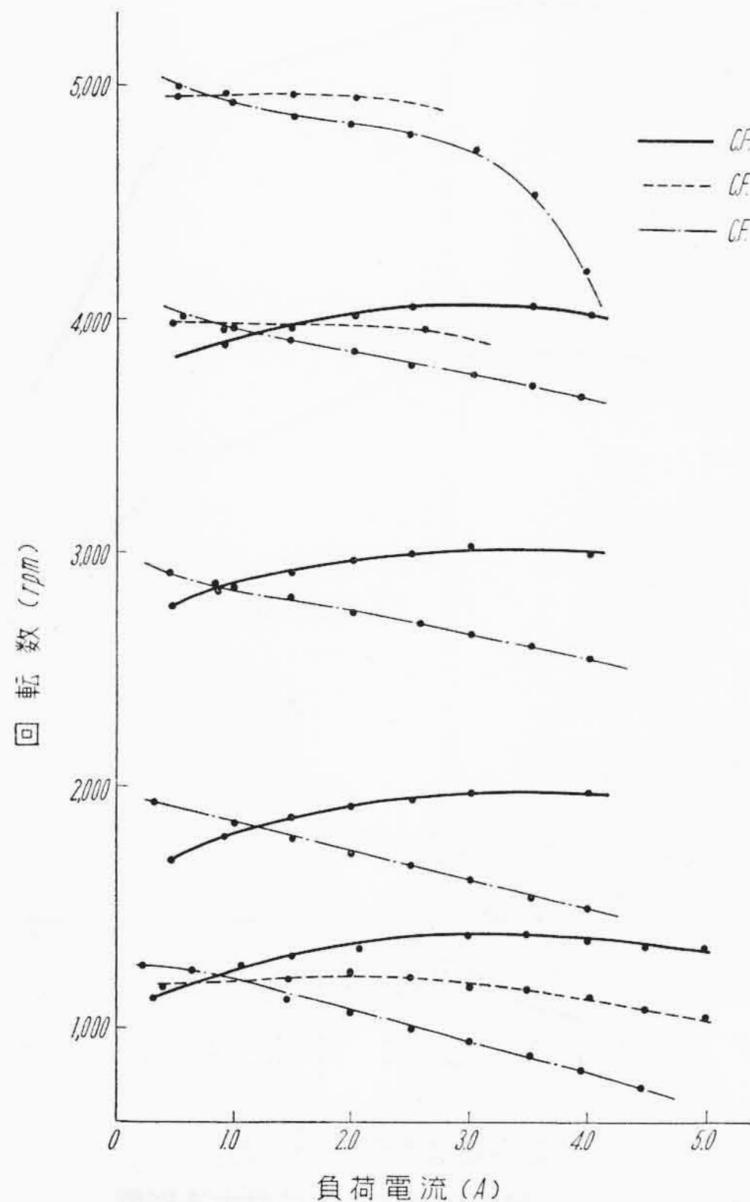


第8図 移相回路原理図とそのベクトル図

し、第6図のブロック線図を得る。ただし移相回路や被制御直流電動機のように、動作点により伝達函数の変化する非直線的要素が含まれているのに注意する必要がある。

3.7 本装置の乱調防止回路

一般に本装置のように饋還回路を有する閉ループ制御系は、乱調(自己発振作用)を起こす可能性がある。第4図回路中のコンデンサ C_1, C_6, C_7 などは、このような乱調を防止するためのものである。なお前述のブロック線図に基いて、種々の動作点における制御系の安定判別を行い、安定性を確めた。



第9図 IR 降下補償特性曲線 (b)

4. 本装置の実験結果の概要

本装置については実用上および制御特性上の見地から種々の試験を行つた。以下この結果を要約して報告する。

4.1 被制御直流電動機の仕様

ここで使用した直流電動機の仕様の概略を第1表に示し、その外観を第7図に示す。

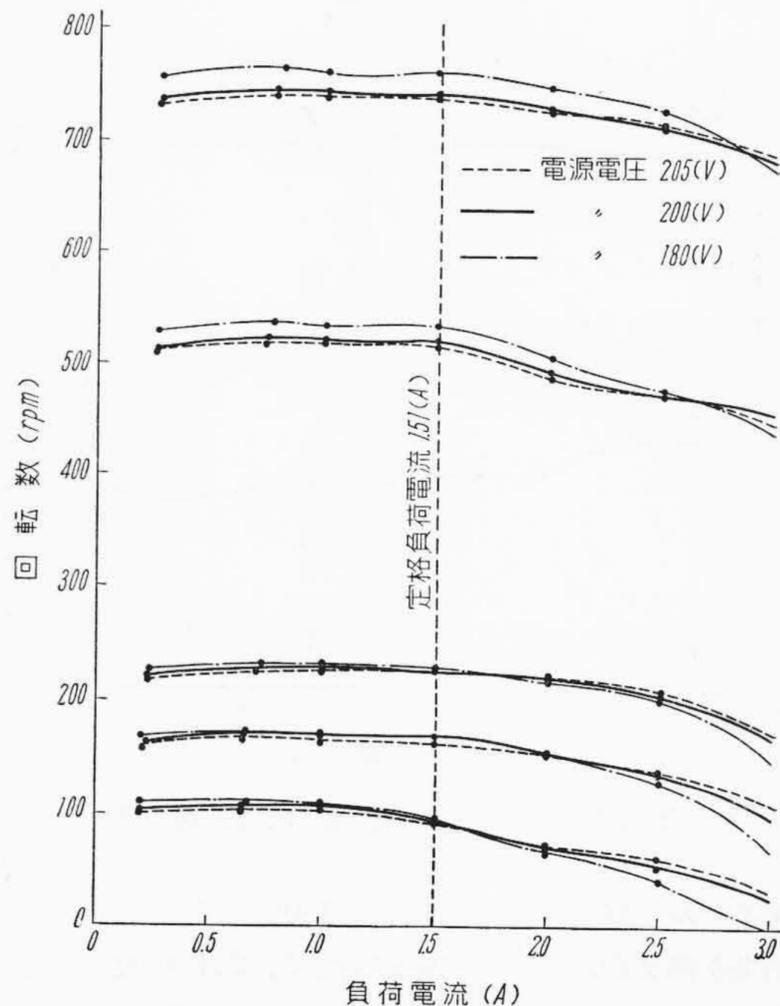
4.2 移相回路の特性試験結果

ここで使用した移相回路は、前述したとおり第8図の回路である。図に示すように、ブリッジの一辺に可飽和リアクタを挿入し、直流電流、すなわち真空管増幅器出力電流で位相を制御する。この移相回路の出力を、格子変圧器 T_g を介して、放電管の制御グリッドに加えるのである。

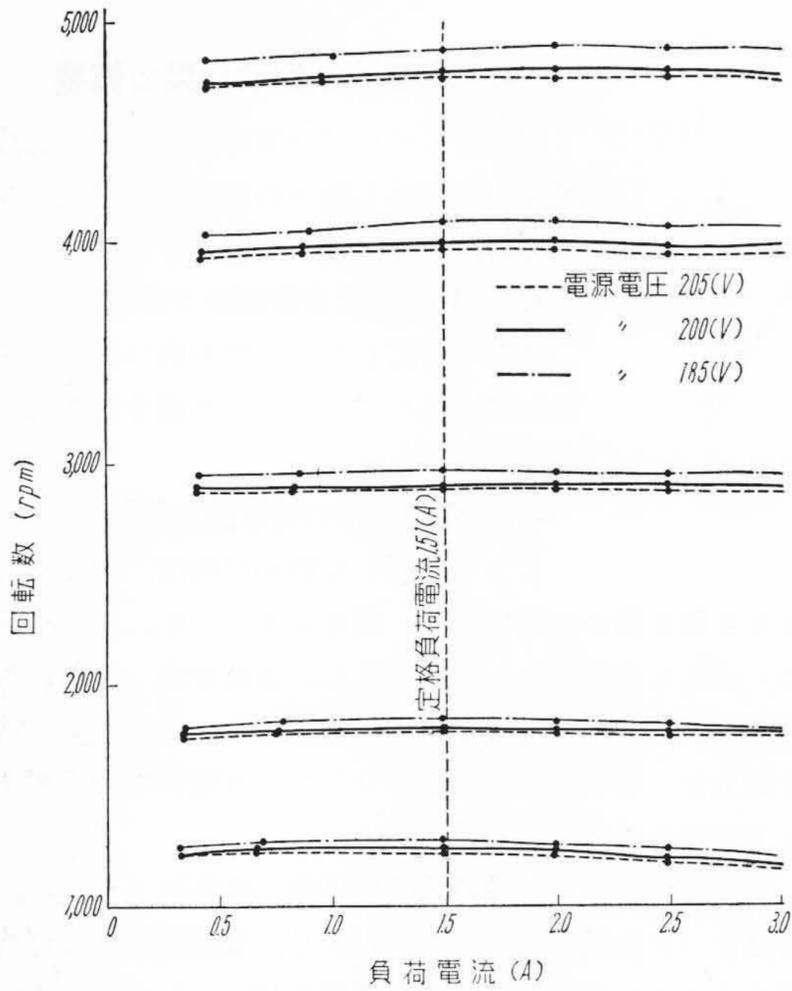
この回路の移相特性の試験結果は、設計値と一致し、満足すべき結果を得ている。しかし、本試作品では可飽和リアクトル用鉄心材料に中級品を使用したもので、この回路特性にはなお十分改善の余地がある。この部分の特性の改善により以後に述べる総合諸特性も向上される。

4.3 電機子電圧 (IR) 降下補償設定回路の速度変動率に及ぼす影響

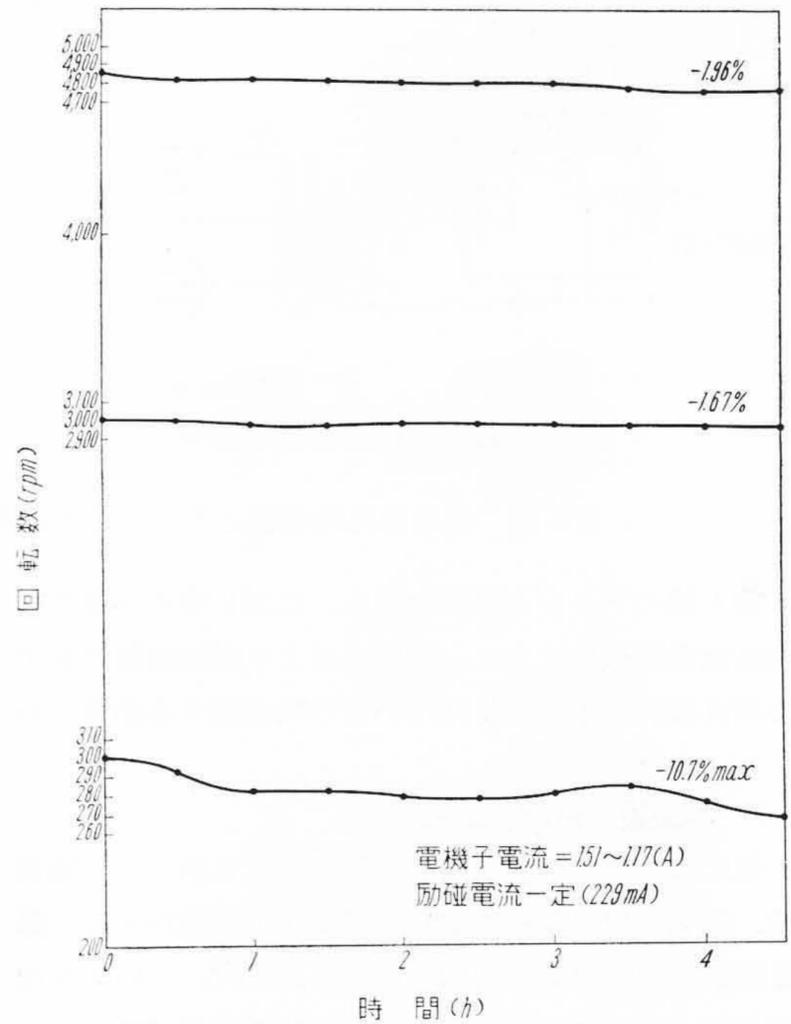
速度変動率が、IR 降下分補償 (C.F と呼ぶ) の大きさにより影響を受けるのは自明のことである。C.F 設定値



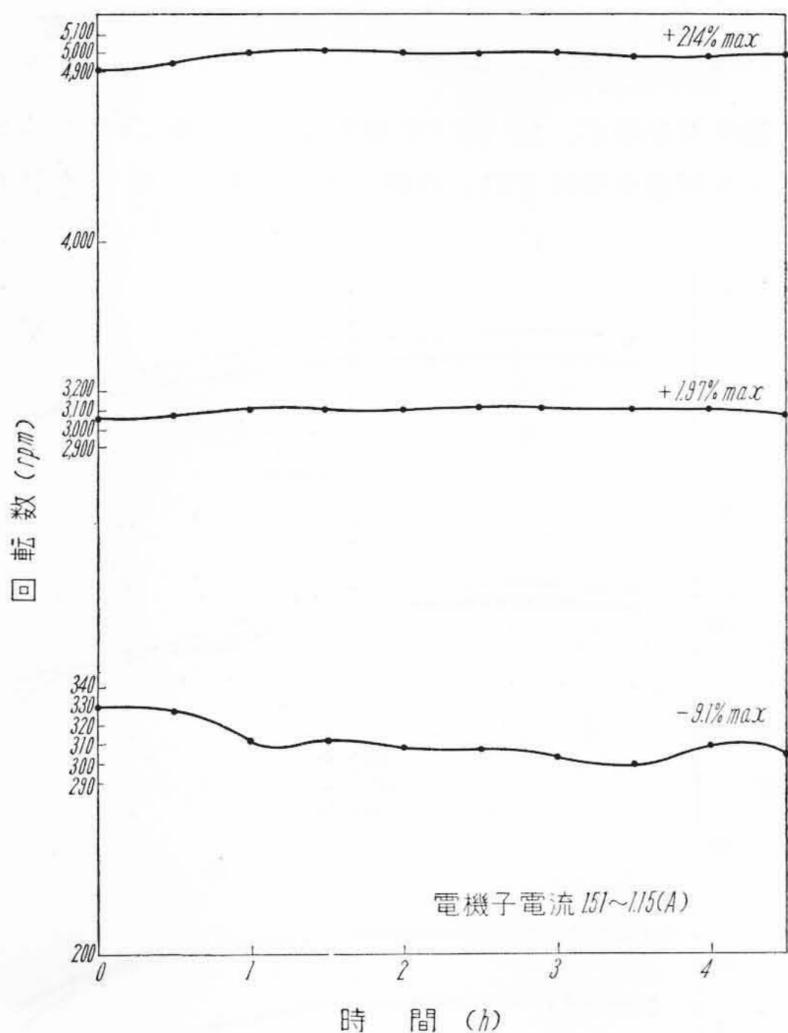
第10図 速度変動曲線 (0~1,000 rpm)



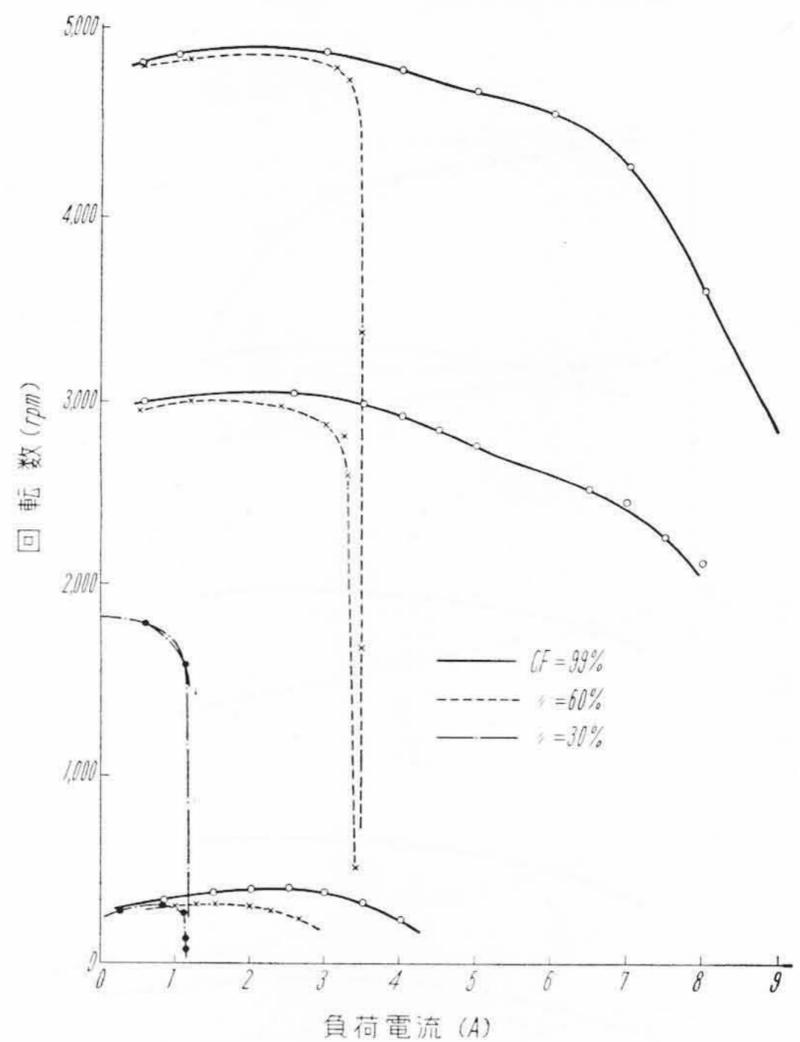
第11図 速度変動曲線 (1,000~5,000 rpm)



第13図 速度経時変化曲線 (2)



第12図 速度経時変化曲線 (1)



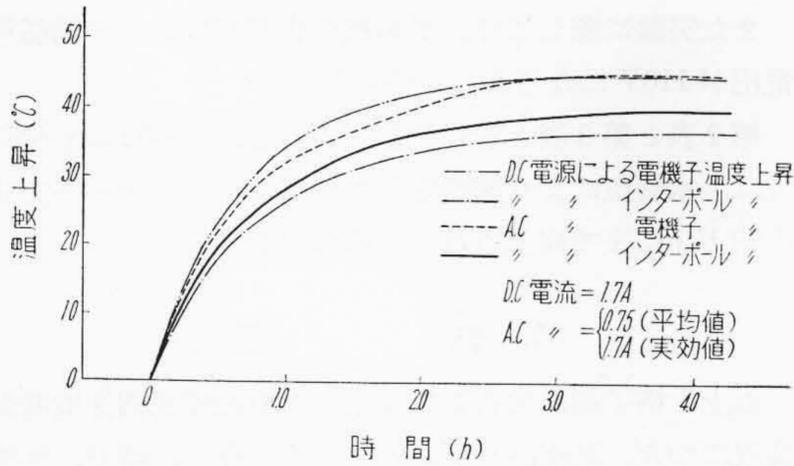
第14図 過電流制限特性

ダイヤルを0%, 50%, および100%にした場合の試験結果を第9図に示す。実験結果でも, C.Fを大にすることによる乱調は認められなかつた。また, C.Fを最初適当に設定すれば, どの速度設定値においても, 速度変動

率を一様に小さくしうることがわかつた。

4.4 電源電圧変動の速度変動率に対する影響

電源電圧 200 V(定格値), 205 V, および 185 V の各



第15図 温度上昇曲線

場合につき、電機子平均電流対回転速度の特性をとり、その結果をグラフにまとめて第10図および第11図に示す。要約すれば、電動機の定格負荷範囲内では、電源電圧10%の変動に際し、高速では2.5%、低速では10%以内の回転数変化を生ずる。

4.5 制御系の安定性について

本制御系設計の際、乱調防止回路を付加して、どの動作状態にあつても安定であるよう対策した。実験の結果でも、実用上あり得る負荷状況、使用条件においては、安定であることが認められた。

4.6 回転速度経時変化

負荷の種類によつては、電動機回転速度の経時変化をある程度以下におさえることが望ましい。本装置についての実験結果を第12,13図に示す。ただし、第12図では測定に際して、電源電圧を一定に保ち、負荷のダイナモメータを最初に設定して以後どの部分も再調整せず実験した。

第13図については界磁電流も一定にしてある。当然

のことであるが実験結果の示すように、負荷が小さくなれば経時変化も小さくなる。本装置の経時変化は、定格速度(5,000 rpm)では3%以下である。

4.7 過電流制限特性試験結果

過電流制限機構の必要性と動作については前述したとおりである。

実験結果を第14図に示す。この制限特性は、実用上の要求を十分満足するものと認められる。なお文献⁽⁵⁾によれば、電流制限機構性能の目安として、制限動作のSharpnessなる概念がある。これは次式により定義される。

$$s = \frac{I_{max}}{I_{max} - I_c} \dots\dots\dots (8)$$

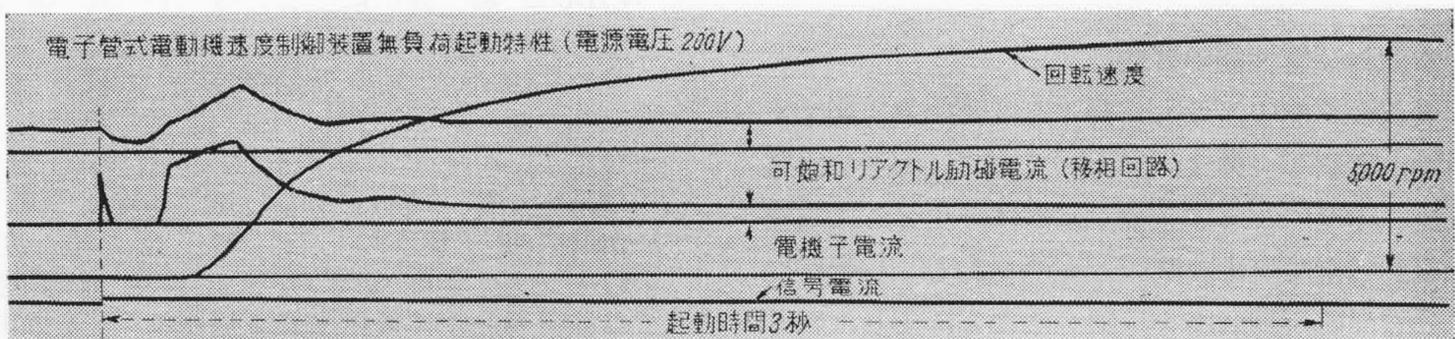
ここで s: Sharpness

I_{max} : 回転数が零になつた場合の電流値
 I_c : 電流制限動作開始時の電流値

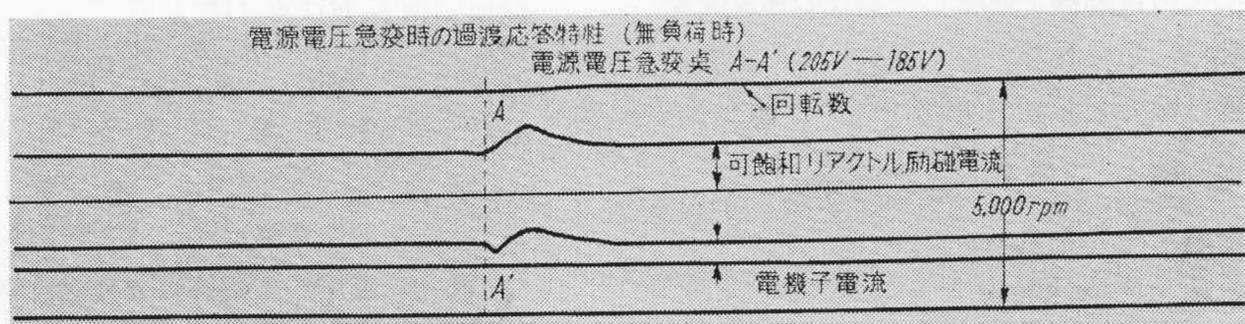
さて、理想的な制限回路にあつては、 $I_{max} = I_c$ であるのでsは無量大となるが、実際の場合sは4以上であれば十分とされている。本装置のsは4以上であり満足しうる。

4.8 温度上昇試験

格子制御放電管により電動機を運転する場合、電機子回路電流には相当の交流分が含まれる。このため波形率(実効電流値を平均電流値で除したものは当然1より大きい値をとる。したがつてこの制御方式による場合には純直流電源で電動機を運転する場合よりも、電動機出力を低減して使用することになる。付言すれば出力低減の度合は実効電流で定まる温度上昇の程度により決定される。



第16図 本装置起動特性オシログラム



第17図 電源電圧急変時の速度変化オシログラム

第2表 試作装置性能の要約

回転数 (rpm)	速度変動率(%)	電源電圧変化時(205→185V)の速度変化率(%)
100~200	12~3.0	7~3
200~1,000	3.0~1.5	4~3
1,000~5,000	1.5~1.0	3.5~2.5

第3表 同一型式電動機をワードレオナード制御で運転した場合の速度変動率の一例

回転数 (rpm)	速度変動率 (%)
500~750	-15~-5
750~1,500	-5~-4
1,500~3,000	4~10
3,000~5,000	10~13

本装置における実験結果では、第15図にみられるようにこの制御方式による場合の温度上昇は、同一実効値の純直流電流で運転された場合よりも、部分によつてはなおかつ2~6°C程度高くなつている。これは鉄損の増大に基くものである。

4.9 本装置の起動特性

第16図に本装置の起動時のオシログラムを示す。この場合一定速度に落ち着くのに、3秒の時間を要している。過電流制限機構の動作により、電動機は起動時の衝撃を緩和されて設定回転速度までほぼ一様に加速されているのがわかる。また回転数が設定値に落ち着くまでにゆきすぎを生ずるようなこともない。

4.10 本装置の電源電圧急変に対する過渡応答

上記項目試験のオシログラムの一例を第17図に示す。電源電圧205Vより185Vに急変した場合であるが、速度にふらつきは生じない。すなわち、前述4.4で得られた微少速度偏差を生ずるだけで、その変化行程は一様である。

4.11 本試作装置性能の要約

さて本装置の性能中、最も重要な速度変動率に関するデータを、要約して第2表に示しておく。ただし、電源電圧変動の速度に及ぼす影響の原因は、主として電動機分巻界磁励磁電圧変化に基づくものである。したがってこれは分巻界磁制御回路を付加することにより、容易に向上せしめ得るものである。

ここで参考のため、従来のワードレオナード制御方式によつて、同一型式の電動機を運転した場合の速度変動率の一例を第3表に示しておく。ただしワードレオナード系各部分の仕様は次のとおりである。

三相誘導電動機2.2kW	(50~200V) (60~220V)
励磁用発電機	0.12kW	
直流発電機	0.53kW	
直流電動機	{0.05~0.45kW {500~5,000rpm	

また実験に際しては、電動機全負荷時において励磁機電圧が110Vになるよう調整した。

第2表と第3表とを比較してみると、5,000rpm付近では、本装置により速度変動率がワードレオナード方式の約 $1/10$ にまで向上されているのがわかる。

5. 結 言

以上、格子制御放電管を使用した直流電動機速度制御装置につき、試作品を例にとり、その原理、特長、性能の概要を述べた。またその試験結果は、各種の負荷に対して実用上満足すべきものと考えられる。

今後も使用者側の御要求にそうよう、各種の製品を開発していく所存である。

終りに、これまで御指導御協力いただいた日立製作所自動制御関係各位、亀戸工場関係各位にお礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) Vedder, Puchlowski: Trans. A.I.E.E. Vol. 62 (1943)
- (2) Siegfried: Trans. A.I.E.E. Vol. 63 (1944)
- (3) Puchlowski: Trans. A.I.E.E. Vol. 64 (1945)
- (4) Harris: Trans. A.I.E.E. Vol. 70 (1951)
- (5) Puchlowski: Industrial. Electronics Reference Book, 554~555(1948)

日 立 評 論

別冊 No. 26 自動制御特集号 目次
(9月30日発行予定)

- ◎近似非線形最適制御
- ◎自動制御系の図式による安定判別法
- ◎Bode線図による近似解析法
- ◎自動制御用素子としての磁氣的計数器
- ◎動力用原子炉の自動制御系に関する考察
- ◎計測における自動制御の応用
- ◎電力系統における周波数の自動制御
- ◎調速機の速度制御
- ◎同期機の自動励磁調整
- ◎火力発電所における自動制御の問題点
- ◎強磁場発生装置用水銀整流器の精密定電流制御
- ◎線材圧延装置用静止レオナード自動制御
- ◎堅坑巻上機の低周波制御
- ◎ポンプの自動制御
- ◎輪転機における自動制御の二、三について
- ◎小型サーボ動特性試験装置
- ◎プロセス制御の二、三の例
- ◎最近の工業用調節計について

発行所 日立評論社
東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地
取次店 株式会社オーム社書店
東京都千代田区神田錦町3の1