U.D.C. 621.316.718 : 621.313.2 : 621.314.63.07 : 546.28

SCRによる小形直流電動機の速度制御

Speed Control of Small Capacity DC Motors Using SCR's

斉藤仁志* 岡島郁夫*
Hitoshi Saitô Ikuo Okajima

内 容 梗 概

小形直流電動機のSCRによる静止レオナード制御は，ワードレオナード式に比べて制御性がすぐれ，制御電力が小さく，保守が容易であり，したがって複雑な制御が経済的に行なわれるため，一般産業用に多く使用されるすう勢にある。特に工作機械の主軸，送り軸などの変速用として0.4～3.7 kW程度のものは，一般に超低速を必要とせず，変速範囲も実用上1対20程度で十分な場合が多いので，これらの用途に対しては小容量SCRを使用した汎用的な制御装置を供給することができる。また特に据付面積の縮小と経済性を重要視して，速度検出用発電機を使用せず電機子電圧と電機子抵抗降下分を帰還する方式が採用される。本稿はこのような汎用性を持たせた静止レオナード制御装置について，回路の解析と実施例を述べている。

1. 緒 言

SCRによる静止レオナード装置の設計に当たっては，次のようなことを特に注意する必要がある。

（1） SCRが電動機の突入電流に十分耐え得るように設計されること。

（2） 使用速度範囲内での負荷変動，電源変動に対して十分安定であること。

（3） 過負荷や回転子のロック状態に当たっても，部品の破損や焼損を生じないこと。

（4） 外部条件の影響を受けにくいこと。

（5） 装置全体がコンパクトにまとめられ，遠方操作が可能なこと。

これらの諸点を考慮するとともに経済性と汎用性を持たせた制御装置を製作し，すでに工作機械の制御などに使用して好評を得ている。

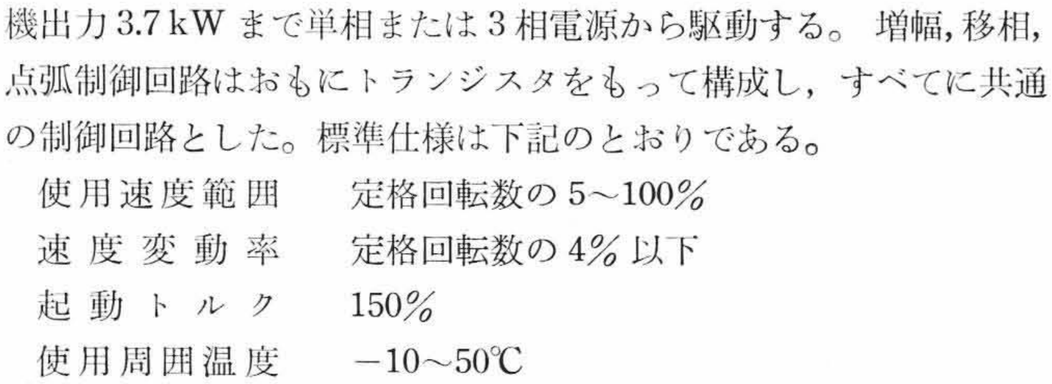
この装置ではSCRとして10 A形または16 A形を採用し，電動機出力3.7 kWまで単相または3相電源から駆動する。増幅，移相，点弧制御回路はおもにトランジスタをもって構成し，すべてに共通の制御回路とした。標準仕様は下記のとおりである。

使用速度範囲	定格回転数の5～100%
速度変動率	定格回転数の4%以下
起動トルク	150%
使用周囲温度	−10～50℃

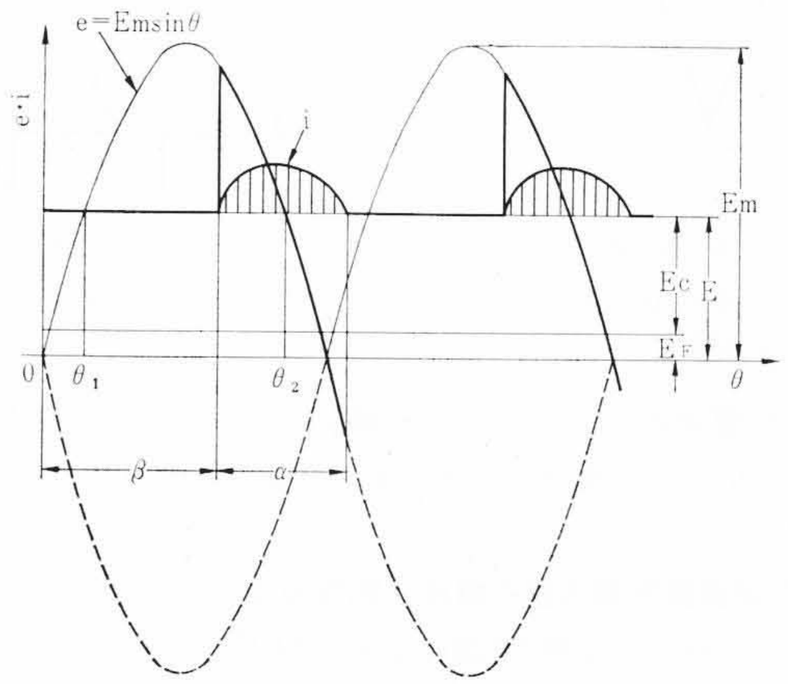
なお工作機械などに使用する場合は電源事情が必らずしも一定の条件におかれない場合が多く，電圧変動やサージに対しては特に注意が払われ，また過負荷や回転子がロックされるような事故に際しても，安全に電動機を停止せしめるように過電流制限回路による保障を与え，現場における過酷な使用条件に耐えるようにした。

2. 直流電動機駆動回路

静止レオナード装置の電動機回路は基本的には**第1図**のような半波整流等価回路で表わされ，(1)式および(2)式が成立する。



第1図 電動機回路の基本等価回路



第2図 単相全波駆動回路の波形

$$L\frac{di}{dt}+Ri=E_m\sin\omega t-E \quad \cdots\cdots(1)$$

$$i=-\frac{E}{R}+\frac{E_m}{\sqrt{R^2+\omega^2L^2}}\sin(\theta-\varphi)+Ce^{-\frac{\theta}{\Gamma}} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，

θ； ωt

E； E_C+E_F

Γ； $\dfrac{\omega L}{R}$

φ； $\tan^{-1}\Gamma$

C； 積分定数

この両式に適当な初期条件を与えることにより，整流方式の異なる回路についても解析することができる。以下，単相全波整流回路について考えてみると，電機子の電圧電流は**第2図**のようになる。つまり電機子回路のインダクタンスのために

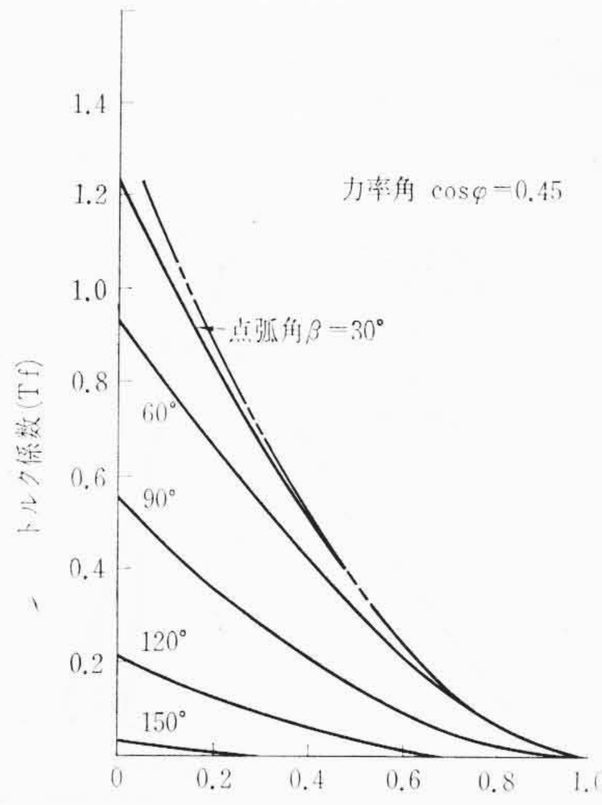
$$e<(E_C+E_F)$$

の範囲にはいってもなお電流が継続して流れることになる。大容量の電動機を駆動する場合などは，この電流が次サイクルの点弧まで継続することがあるが，ここで扱う程度の電動機においては，図の結線を施した部分で示される一定期間αだけ流れて停止する断続的な電流になる。αは電流流通角と呼ばれ，電動機定数，負荷トルク，回転数および点弧角βの関数である。したがって電動機定数がきまれば，パラメータを適当にとることによって相関関係を図示することができる(1)(2)。

(2)式に点弧角および整流器効果による初期条件

$$\begin{cases}\theta=\beta & i=0\\ \theta=\beta+\alpha & i=0\end{cases}$$

* 日立製作所習志野工場



第3図　駆動回路の特性（速度-トルク特性）

を与えることにより，（3），（4）式で表わされる係数が求められる。

$$T_f=\frac{I_aR}{E_m}\pi=\cos\beta-\cos(\beta+\alpha)-S_f\alpha \quad \cdots\cdots(3)$$

$$S_f=\frac{E}{E_m}=\frac{\cos\varphi\{\sin(\beta+\alpha-\varphi)-e^{-\frac{\alpha}{\Gamma}}\sin(\beta-\varphi)\}}{1-e^{-\frac{\alpha}{\Gamma}}} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで I_a は(5)式で示される電機子電流平均値である。

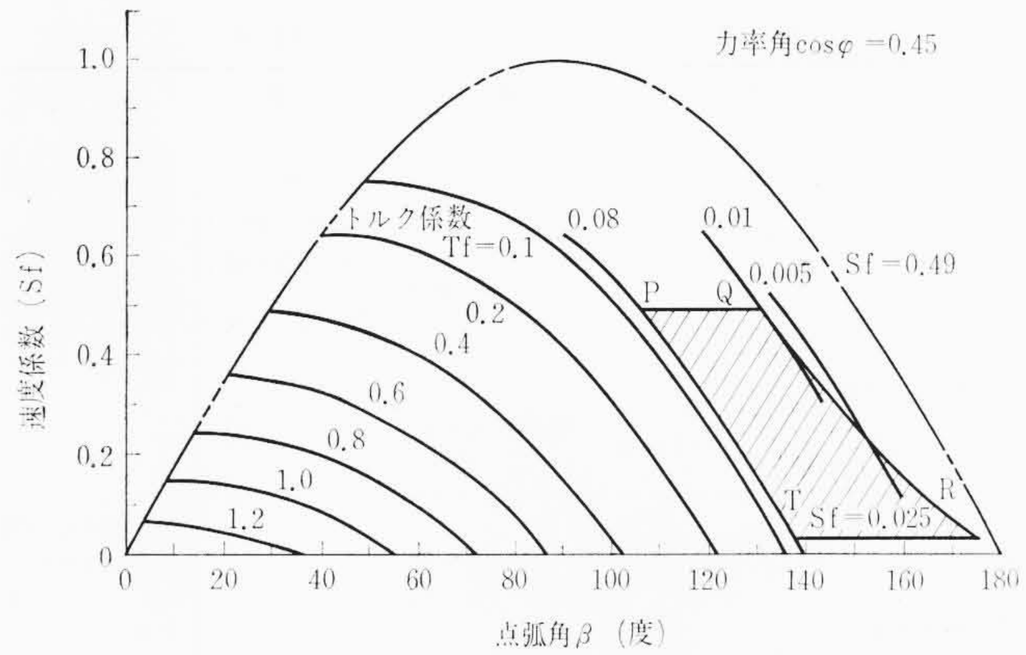
$$I_a=\frac{\omega}{\pi}\int_{\frac{\beta}{\omega}}^{\frac{\beta+\alpha}{\omega}} i\,dt \quad \cdots\cdots(5)$$

(3)式は，電機子抵抗降下分つまり負荷トルクを表わすトルク係数（Torque Factor）であり，（4）式の S_f は電動機の誘起電圧すなわち回転数を表わす速度係数（Speed Factor）である。したがって（3），（4）式は，ある点弧角に対して電動機の発生するトルクと速度の関係を示すもので，電動機回路の定数 L/R がきまればグラフ上で表わすことができる。一例として電機子力率角 $\varphi=0.45$ の直流電動機について，S_f と T_f 関係は**第3図**のようになる。すなわち交流電源で点弧制御される直流他励電動機は，点弧角を一定に保った場合には直巻特性を備えることになる。したがって一定トルクを要求される負荷に対しては，点弧角を移動させて速度制御を行なわなければならない。**第4図**はパラメータを変更して，点弧角に対する速度とトルクの変化状態つまり電動機回路のゲインがわかりやすいように表わされたものである。またこの図から定速度制御を行なうために自動移相器に要求される移相量が求められる。たとえば図の斜線を施した部分は，**第1表**の電動機に対して定速度運転を行なう場合の使用範囲であり，点弧移相の自動調整範囲は電気角で約75度である。

3.　自動移相回路および点弧回路

直流電動機を交流電源から点弧制御する場合には以上述べたSCR部分と，これを駆動する点弧回路，移相回路ならびに誤差信号の増幅回路が必要であるが，ここでは位相制御を行なう部分と点弧エネルギーを与える部分について述べ，その他は実施例で言及することにする。

移相回路としては電気角で180度以上に及び移相可能な広角度移相器など，種々発表されており[3][4]，またSCRの直並列運転の有



第4図　駆動回路の特性（点弧角-速度特性）

第1表　電動機仕様

形式	全閉形他励式
出力	0.8～0.04kW
回転数	5,000～250rpm
電圧	DC 110～10.7V
電機子 電流	DC 9A
電機子 抵抗（含補極刷子降下）	0.611Ω
電機子 インダクタンス（含補極刷子降下）	3.79mH
電機子 慣性能率	$I=0.000342\,kg\cdot m\cdot s^2$ $GD^2=0.0134\,kg\cdot m^2$
界磁 電圧	88V
界磁 電流	0.33A
界磁 抵抗	266Ω

無，負荷の様子によって，点弧回路に要求されるパルスの立ち上り，幅，パワーなどが異なる。整流方式によっては起動用パルスと副パルスなどパルスの組み合わせも考えなければならない。構成部品としては，トランジスタ，特殊な半導体（ユニジャンクショントランジスタ，エサキダイオード，小形SCRなど），磁心などがありそれぞれ特長を発揮しているが，ここでは小形直流電動機の制御を考え，次の条件に適する2，3の回路をとりあげて説明する。

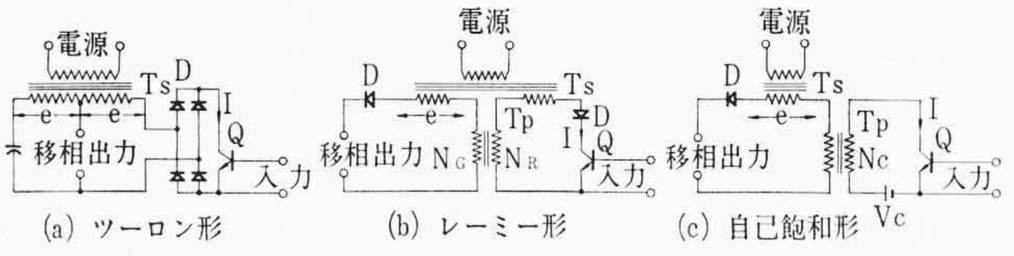
（1）　SCRの直並列運転は行なわない。

（2）　回生制動は行なわない。

（3）　構成はコンパクトで制御パワーの小さいもの。

3.1　移相回路

次に示す回路はいずれも単相半波の場合入力より1～3サイクル遅れて（多相整流回路では相対的に早くなる），入力の一種の積分量により移相信号を与える回路であり，雑音対信号判別比を大きくとれる。このことはSCRが本質的にトリガ動作素子であることを考えた場合，特に逆起電力を有する負荷を定電圧制御する場合に重要である。この遅れは制御系の中ではムダ時間として働くが，本題にとり上げた電動機制御においては，電動機および負荷の機械的時定数に比して通常問題にならない値である。**第5図**は半波整流回路に適用する基本回路，**第6図**はこれを3相または単相全波回路に用いた一例である。これらの回路は特殊な部品を必要とせず，構成が簡単で移相感度も良いが，回路の入力対移相角特性はすべて非線形であり，正確な解析ははなはだやっかいである。いくつかの近似を行なった場合，単相の移相回路について移相特性および時定数に相当するものを**第2表**に示す。これらの回路は制御素子としていずれも



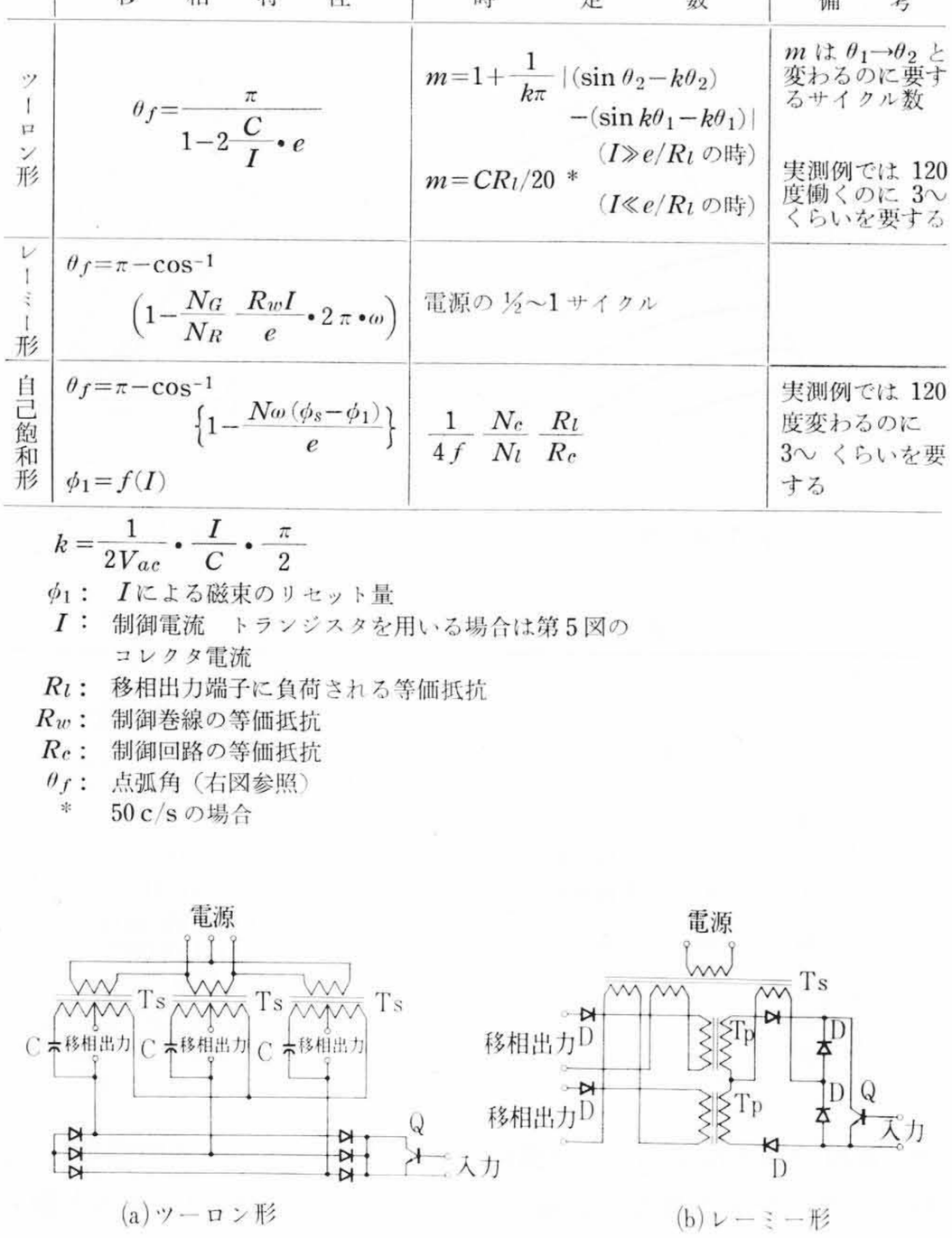
第5図　簡易移相回路の基本形

第2表　基本形移相回路の特性

	移相特性	時定数	備考
ツーロン形	$\theta_f=\dfrac{\pi}{1-2\dfrac{C}{I}\cdot e}$	$m=1+\dfrac{1}{k\pi}\lvert(\sin\theta_2-k\theta_2)-(\sin k\theta_1-k\theta_1)\rvert$ $(I\gg e/R_l$ の時$)$ $m=CR_l/20$ * $(I\ll e/R_l$ の時$)$	m は $\theta_1\to\theta_2$ と変わるのに要するサイクル数 実測例では 120 度働くのに 3へくらいを要する
レーミー形	$\theta_f=\pi-\cos^{-1}\left(1-\dfrac{N_G}{N_R}\dfrac{R_wI}{e}\cdot 2\pi\cdot\omega\right)$	電源の ½～1 サイクル	
自己飽和形	$\theta_f=\pi-\cos^{-1}\left\{1-\dfrac{N\omega(\phi_s-\phi_1)}{e}\right\}$ $\phi_1=f(I)$	$\dfrac{1}{4f}\dfrac{N_c}{N_l}\dfrac{R_l}{R_c}$	実測例では 120 度変わるのに 3へ くらいを要する

$k=\dfrac{1}{2V_{ac}}\cdot\dfrac{I}{C}\cdot\dfrac{\pi}{2}$

ϕ_1：　Iによる磁束のリセット量
I：　制御電流　トランジスタを用いる場合は第5図のコレクタ電流
R_l：　移相出力端子に負荷される等価抵抗
R_w：　制御巻線の等価抵抗
R_c：　制御回路の等価抵抗
θ_f：　点弧角（右図参照）
*　50 c/s の場合



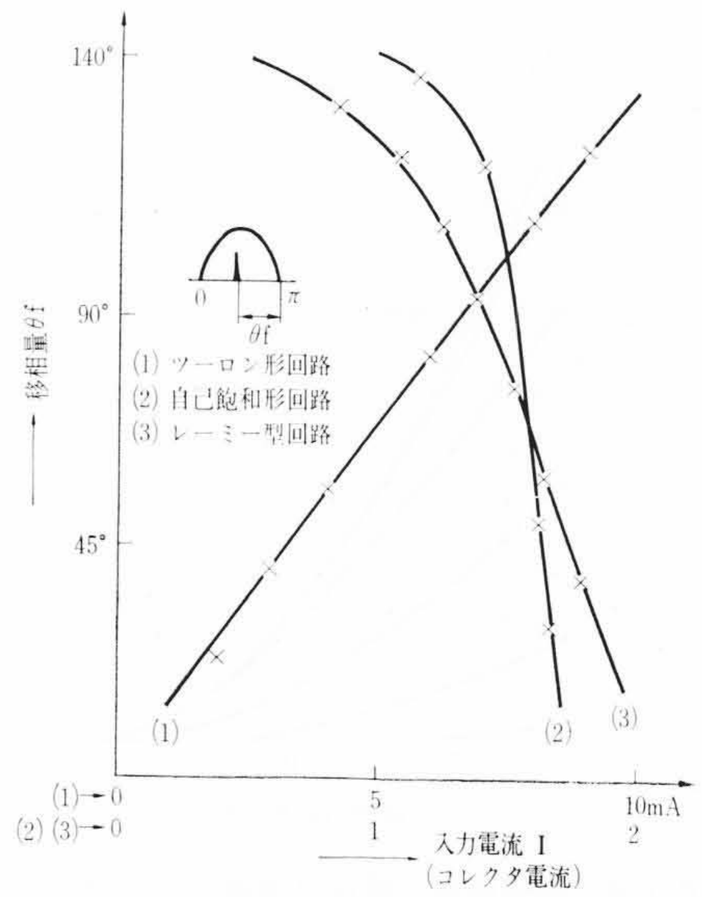
第6図　基本回路を多相回路に適用した例

第7図　基本回路に温度補償した例

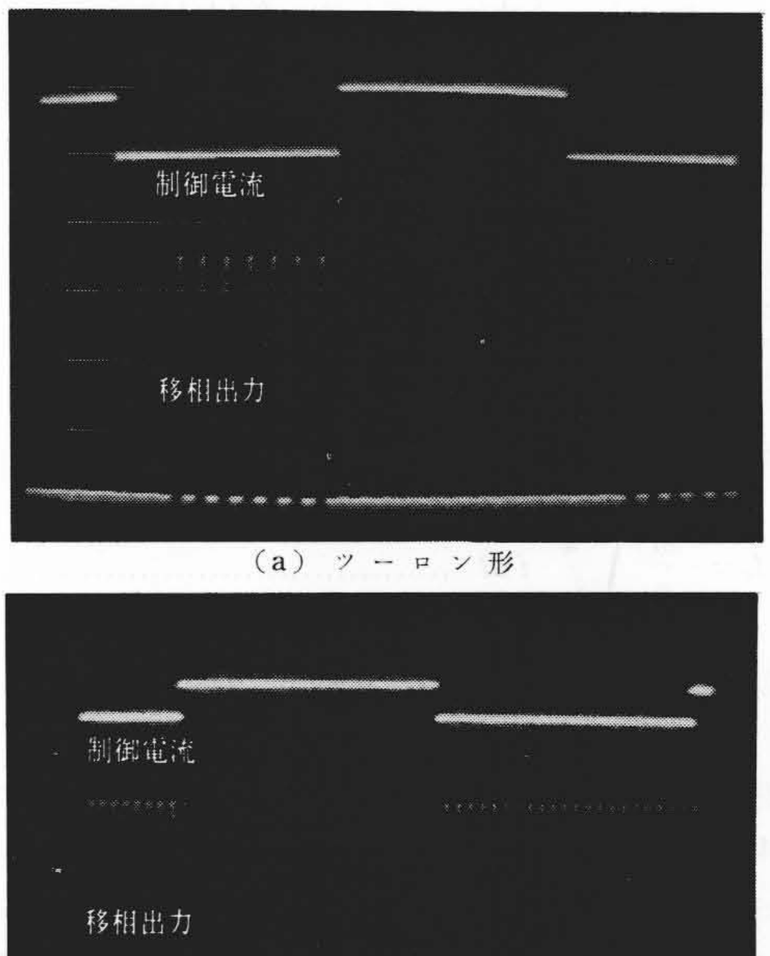
トランジスタを使用している。これは他の増幅素子でもよいが，利得を大きくとれること，小形にできることなどを考えるとトランジスタが最も一般的であろう。しかしトランジスタを用いるとき，たとえば**第5図**(a)，(b)の回路ではトランジスタの電源に正弦波を使用するので，コレクタ電流を平均値I上で表わすとベース電流との比，つまり見かけの増幅率が動作点により異なることに注意しなければならない。

次に問題となるのは温度による影響であり，シリコントランジスタを用いることも一方法であるが，広い温度範囲に使用するには各回路に適した補償回路を設けなければならない。**第7図**(a)は同一特性のトランジスタを2個またはtwin-transistorを用いて補償させたもので，入力インピーダンスを高めずにすみ，磁心を高インピーダンスで制御する場合に有効である。また同図(b)は，移相量をきめるコンデンサ充電電流を入力側に正確に帰還させて自己平衡させたもので，温度変化のみならず負荷抵抗の変化に対しても，安定な移相特性が得られる。これらの方法によりトランジスタや他の素子を含め，総合特性で −10～60℃ の温度変化に対し最大5% の誤差内に入れることができる。

第8図はこれらの回路の移相特性（実測値）である。入力電流Iは制御用トランジスタのコレクタ電流であり，ベースに必要な入力



第8図　各移相回路特性

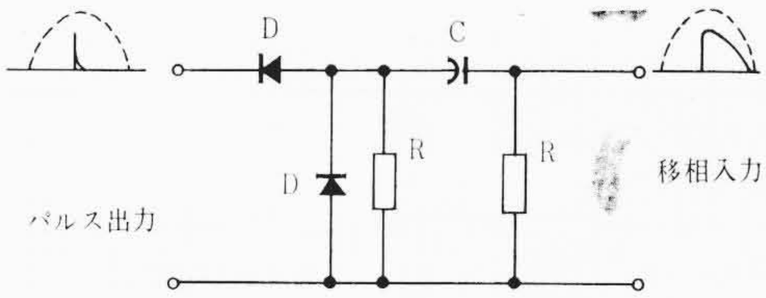


第9図　各移相回路の過渡応答

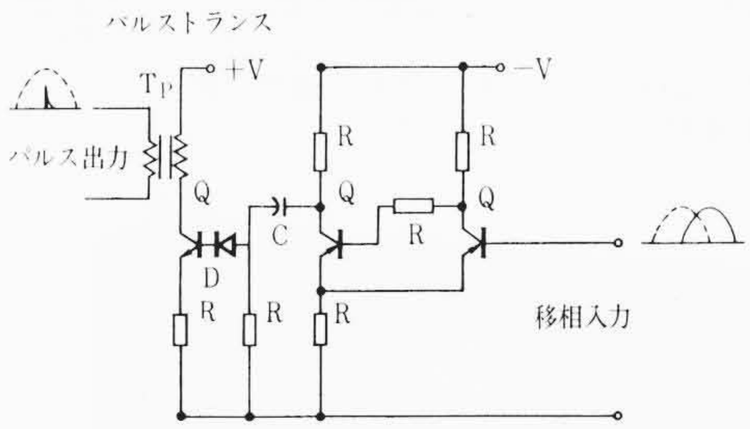
電流はごく微小な値ですむ。特に磁心を使用したものでは増幅器を省略することができる。また**第9図**は入力をステップ状に変えた場合の移相量の変化であり，いずれも良好な速応性を示している。

3.2 点弧回路

点弧回路については磁心を使用した自己飽和形，レーミー形では



第10図　パルス化回路



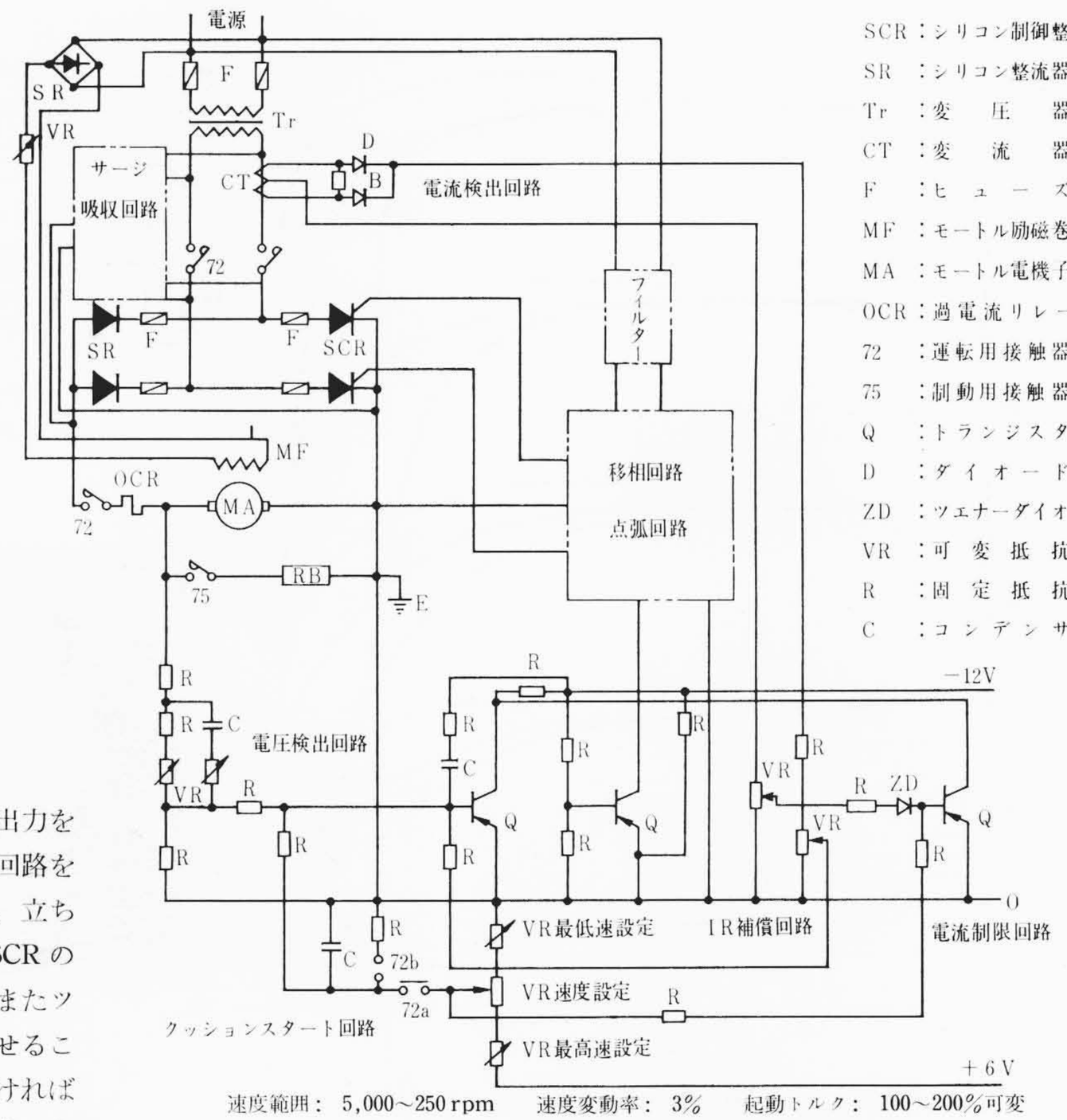
第11図　整形回路を含んだパルス化回路

移相出力インピーダンスが低くとれるので，移相出力をそのまま**第10図**のようなコンデンサによる微分回路を通してパルス化することができる。このパルスは，立ち上り時間をあまり小さくすることはできないが，SCR の直並列運転を行なわなければこれで十分である。またツーロン形移相回路の場合は，このままでは点弧させることができず，**第11図**のような整形回路を用いなければならない。この回路を通して得られたパルスは，立ち上り時間 0.5～1 μs，パルス幅 100 μs 程度の特性を示し，直並列接続した SCR を同時にトリガすることも可能である。

4. 実　施　例

いままで述べたような制御回路を工作機械など一般の産業用に使用する場合は，他の電気装置たとえば誘導電動機，ソレノイドバルブ，電磁クラッチ装置や，これらの制御用接触器類の電磁コイルなどが同一電源に接続されることが多く，その開閉時に発生する過度電圧と電源変動に対して十分な保護対策を構ずる必要がある。特に SCR 部分と点弧回路には，セレンアレスタや L. C などによるフィルタ回路をそう入して過電圧を防止し，S/N を大きくすることが望ましい。また電動機によっては起動時の突入電流によって SCR が破壊されないように，適当な遅延回路を設けるべきである。過電流制限回路は，SCR の熱的な破損に対して有効に防護し，起動ひん度の激しい過酷な運転にも耐えるような調整が行なわれていなければならない。**第12図**は**第1表**の 0.8 kW 直流他励電動機を，最も単純な単相全波整流回路とトランジスタ直流増幅回路を用いて制御した一例である。図中，電流制限回路は電機子電流つまり負荷トルクが設定値を越えた場合に安全に電動機速度を落とし，SCR や電動機を保護する。またクッションスタート回路と時間的な協調をとって起動時あるいは基準設定値の急激な変更時に SCR の過電流を制御し，負荷に与えるショックを軽減する。この電動機に負荷として回転子の約2倍のフライホイール効果を持たせた場合，回路の周波数特性は**第13図**のようになる。

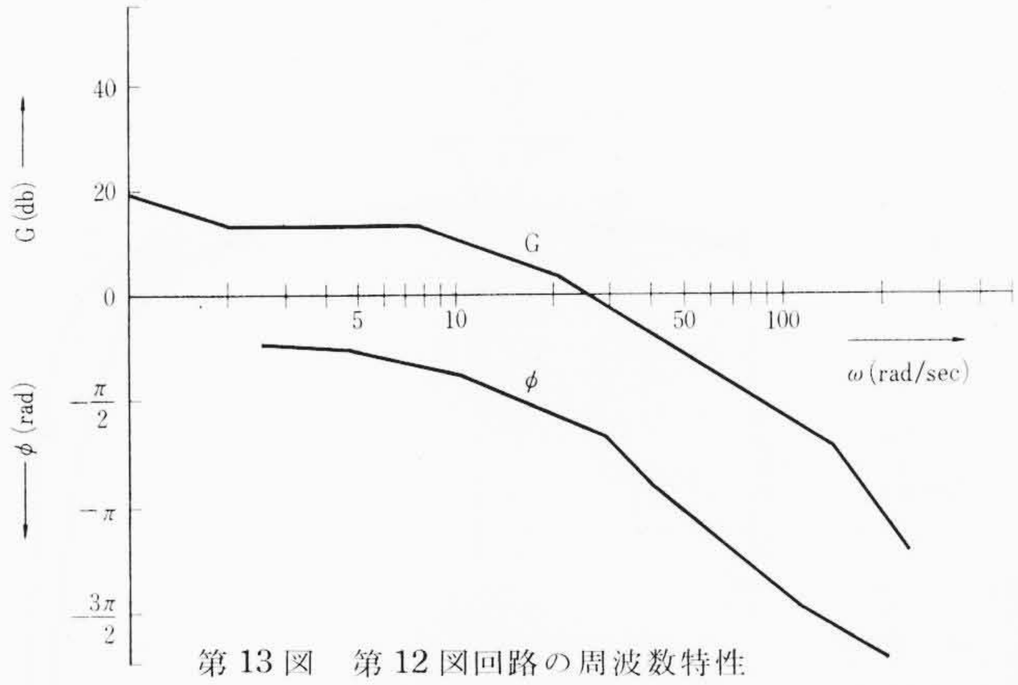
第14図は，この回路の駆動部のみの特性すなわち**第3図**で示した計算例に相当するもので，これに**第12図**の制御を施した場合には，**第15図**のような定速性が得られる。この図は IR 補償率および過電流制御率によって，ある範囲内で速度対トルク特性を自由に調整できることを示したもので，負荷の性質によって最高点を選ぶことができる。また電源電圧の ±10% 変動に対して回転数の変動は，



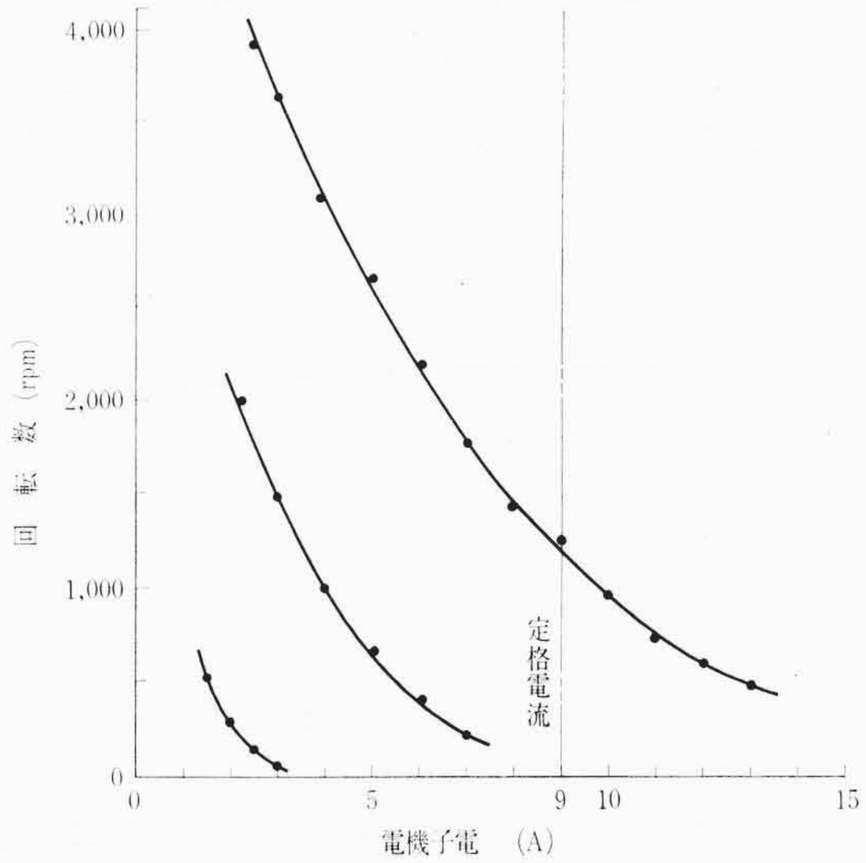
速度範囲：5,000～250 rpm　速度変動率：3%　起動トルク：100～200%可変

第12図　0.8 kW DCM 用制御回路例

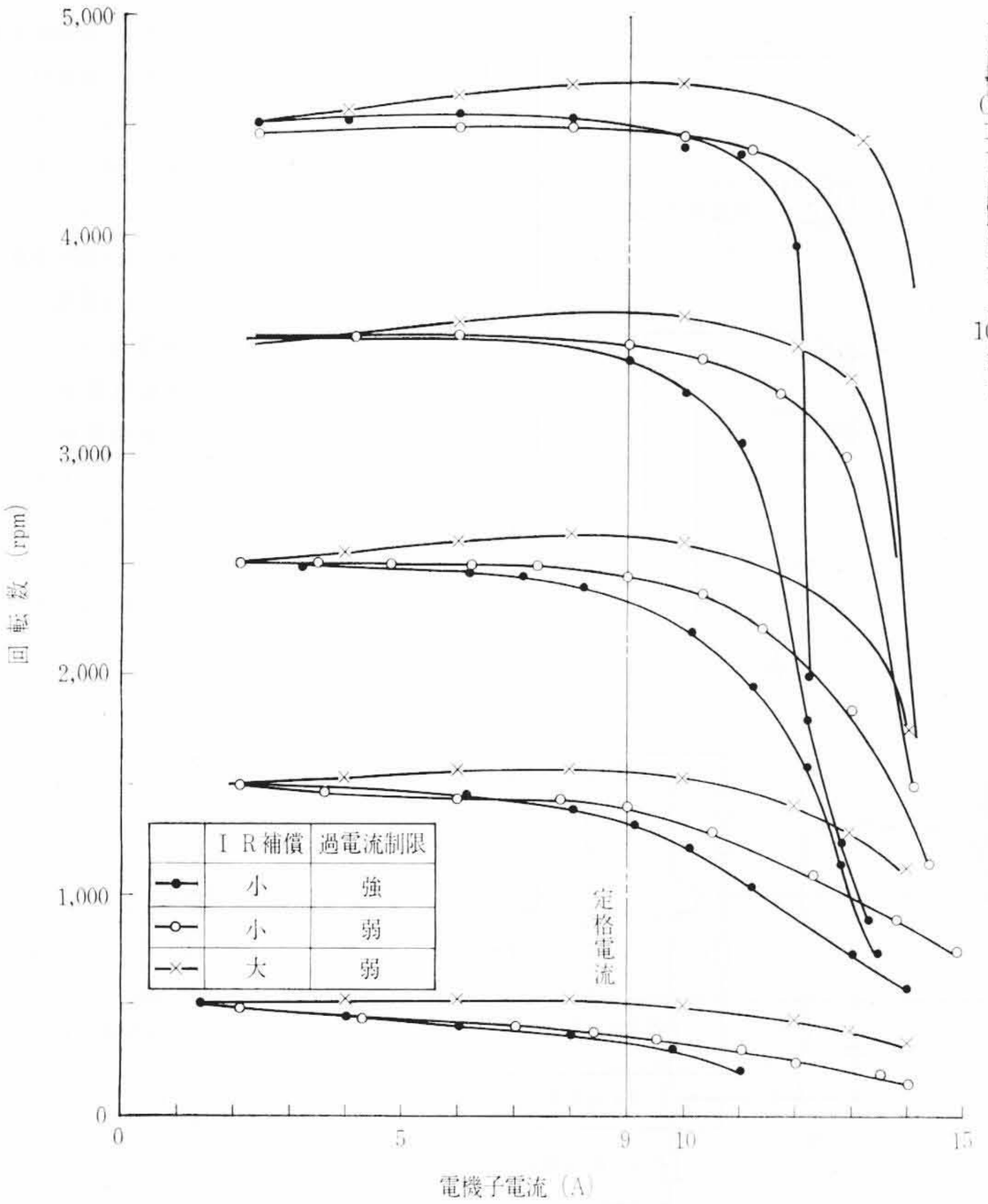
SCR：シリコン制御整流器
SR：シリコン整流器
Tr：変圧器
CT：変流器
F：ヒューズ
MF：モートル励磁巻線
MA：モートル電機子
OCR：過電流リレー
72：運転用接触器
75：制動用接触器
Q：トランジスタ
D：ダイオード
ZD：ツエナーダイオード
VR：可変抵抗
R：固定抵抗
C：コンデンサ



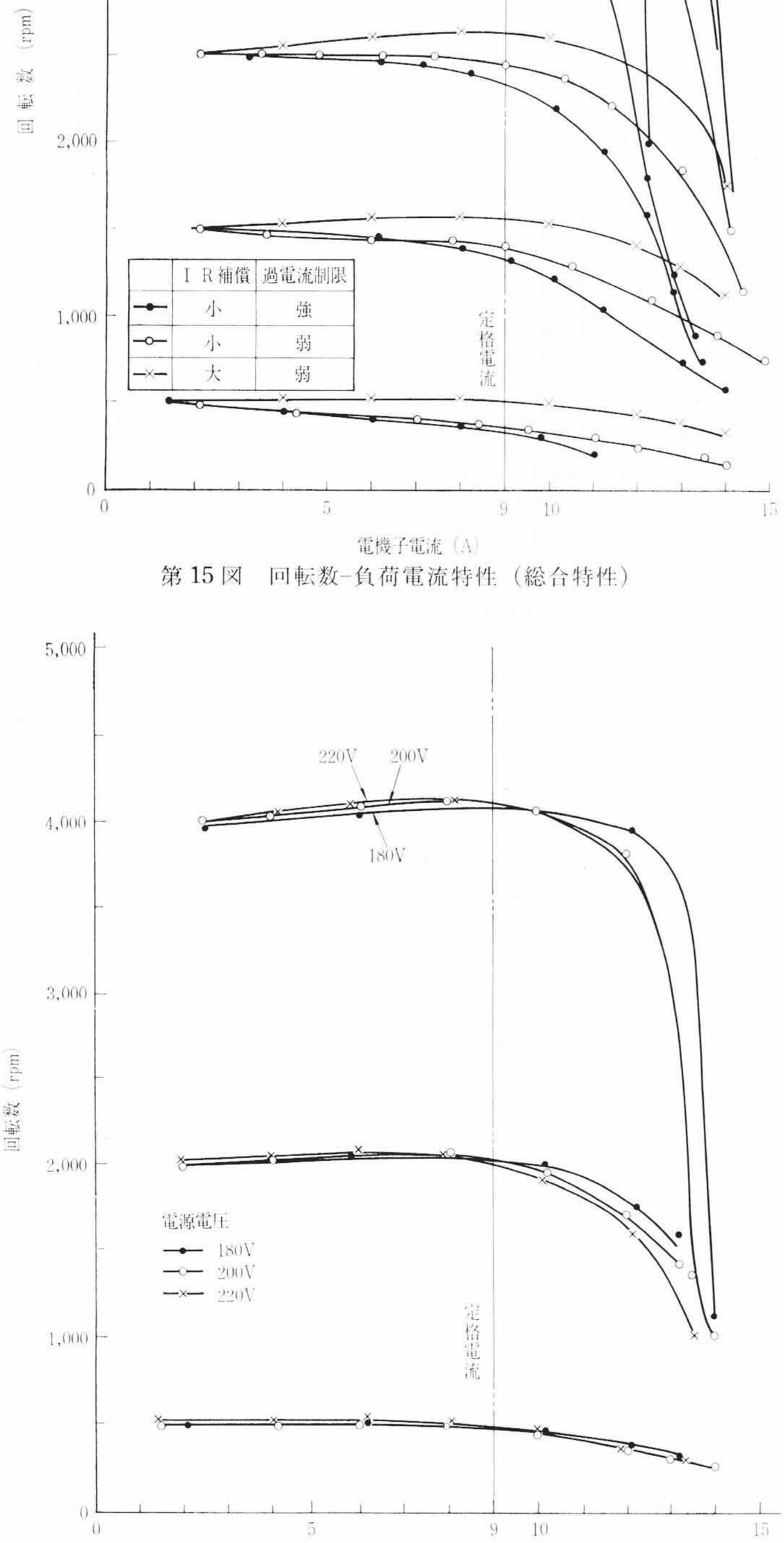
第13図　第12図回路の周波数特性



第14図　回転数−負荷電流特性(帰還回路のない場合)

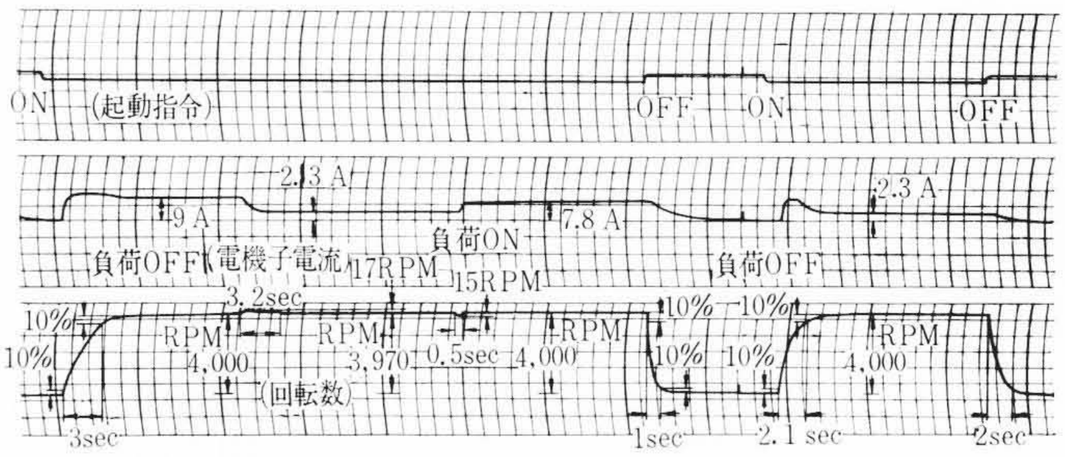


第15図　回転数-負荷電流特性（総合特性）

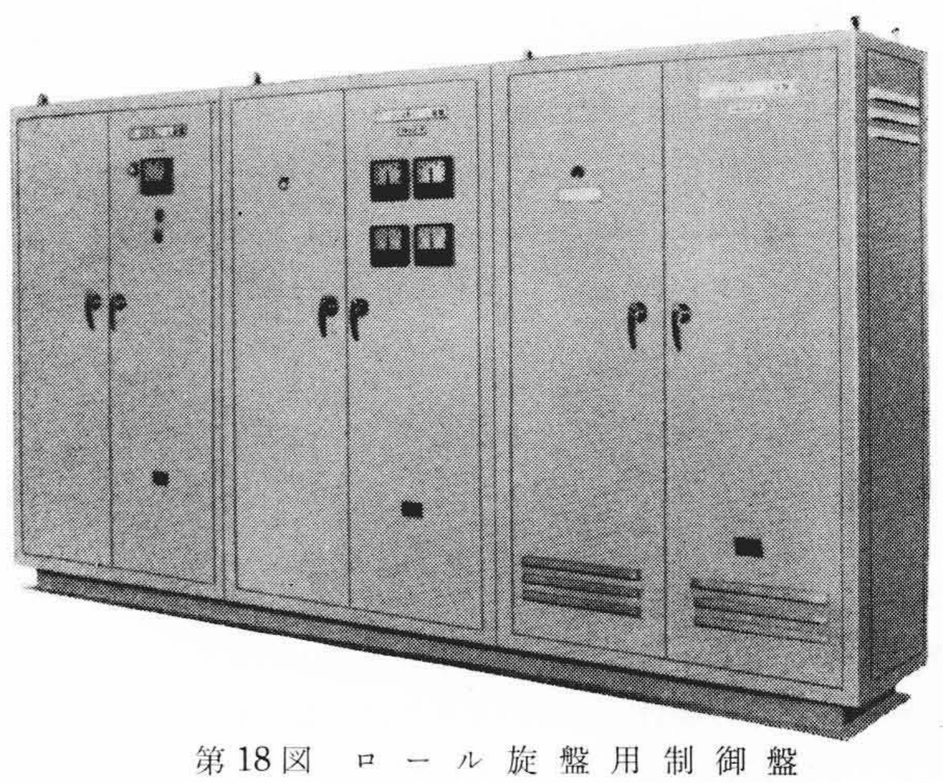


第16図　電源電圧変動の影響

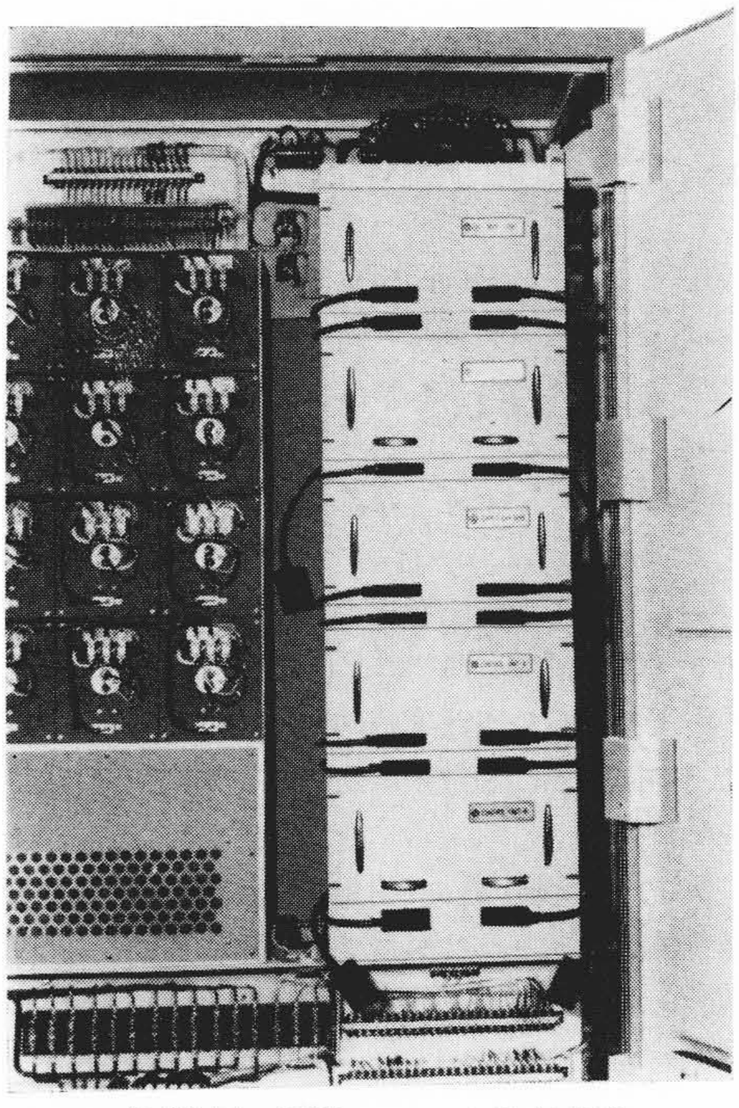
定格回転数の ±1.5% 程度内にはいる。**第16図**はその実測値であり，これ以上の変動に対しても実用上ほとんどさしつかえないものと思われる。**第17図**はダイナモメータを負荷として**第13図**と同一条件下においた場合の過渡応答を示すオシログラムである。



第17図　起動，負荷変動に対する過渡応答
（過電流制限率 110% のとき）

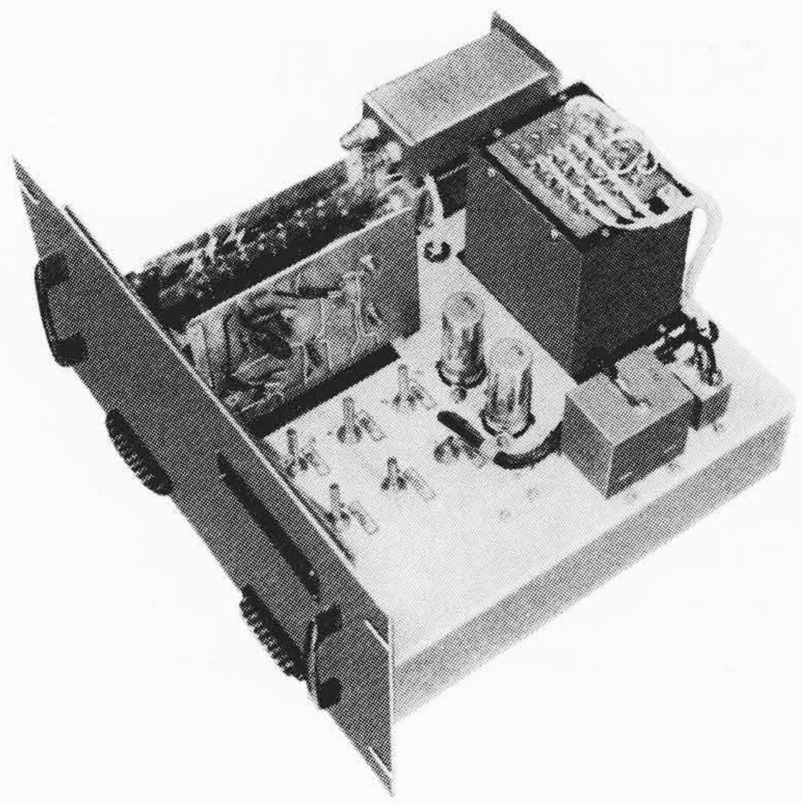


第18図　ロール旋盤用制御盤



第19図　SCR ユニット取付部分

以上おもに本装置の特性面について説明したが，前にも述べたように半導体部品を主たる構成要素とするこのような装置を，産業用として現場で使用する場合には，他の電気装置との関連上さまざまな操作上の融通性が要求されるが，反面他の回路からの悪影響を防ぐために電気的に完全な保護対策を構ずるとともに，機器部品の構成，配置，配線などにも特別な考慮が必要である。特に同一箱内に接触器などが多く使用される工作機械の制御装置においては，制御回路をユニット化し，適当なしゃへいを施すべきである。**第18図**は 3.7 kW 用 SCR 式静止レオナード装置2台と，他の接触器盤を列



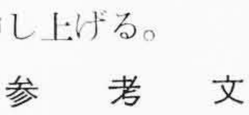
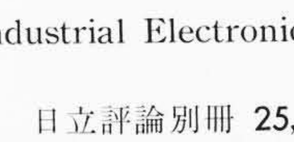
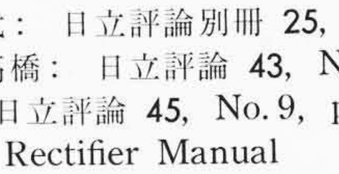
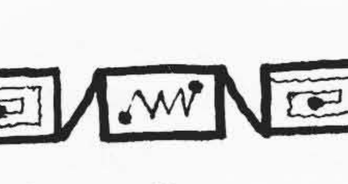
第20図　制御回路ユニット

盤構造にしたロール旋盤用制御で，そのSCR部分を**第19図**に，制御回路ユニットを**第20図**に示す。

5. 結　　言

SCRによる小形直流電動機の速度制御のうち，おもに単相全波駆動の例について述べた。電動機出力に応じて整流方式を**第3表**のように適用することによって，10Aないし16Aの小形SCRを使用して3.7 kWまで共通の制御回路で速度制御することができる。SCRの直並列運転による装置全体の経済性，部品や回路の互換性を向上させ，また可逆運転回路の採用などによって今後ますます実用面が開かれるものと考える。

第3表　SCRによる直流電動機の速度制御適用表

電動機出力 (kw)	電機子電圧 (V)	400 16A SCR数	整流方式		速度範囲	速度変動率 タコゼネレータ付	速度変動率 タコゼネレータなし
1	110 ～ 135	2	単相センタータップ		1：20 ～ 1：25	1～2 %	(E−IR) 方式 3～5 %
			単相全波				
2	110 ～ 135	3	三相センタータップ				
			三相全波				
3.7	110	6	相間リアクトル付二重星形(六相)				

終わりに本装置の製品化に際して，積極的に実用していただいた工作機械メーカーの関係者各位，ならびに日立製作所習志野工場の関係諸氏に厚くお礼申し上げる。

参　考　文　献

（1） Puchlowski: Industrial Electronics Reference Book, p. 554 (1948)
（2） 小林，林，田代：日立評論別冊 **25**, p. 93 (1958)
（3） 岩田，浅野，高橋：日立評論 **43**, No. 3, p. 386 (1961)
（4） 岩田，小西：日立評論 **45**, No. 9, p. 115 (1963)
（5） GE: Control Rectifier Manual

特許と新案

最近登録された日立製作所の実用新案（その3）

(111頁よりつづく)

登録番号	名称	氏名	登録年月日
724061	壷形磁心線輪装置	岡田義男 岩沢高五 草野行良 斉田貢	38. 9. 23
724062	横形主幹制御器	佐藤健昭 高橋造三	〃
724063	自動ドアー開閉装置	及川達男 高橋仟	〃
724064	遠心脱水機	益子三郎	〃
724065	鋳鍋の揺れ止め装置	小上田野次 誠	〃
724066	化粧用窓枠取付装置	松林功 岡部恭二	〃
724067	配電函の安全装置	近藤修博 金井好延	〃
724068	ジブクレーンのジブの転倒防止装置	山崎勇 宮崎真司	〃
724069	不透明防止装置	松林功 岡部恭二	〃
724070	換気扇	柏崎進 福地毅	〃
724071	運動体の位置制御装置	杼窪一郎 長崎博男	〃
724072	除湿機	小川洋幸	〃
724073	巻上機における荷重方向検出装置	今井利秀	〃
724074	無接点継電器	友藤睦夫 斉藤仁志	〃
724075	継電器	山路陽三	〃
724076	プラスチック熔接器	石橋英治 田中圧平	〃
724077	クーラーの風向板取付装置	持田稔也 古屋勇 斉藤博久	〃
724078	電動箍切り装置	萩谷隆一	〃
724079	半導体整流器保護用各溶遮断装置	掛札優	〃
724080	電気機器の梱包装置	立石貞夫	〃
724081	取付ねじ	斉田貢 備後允華 沼田捷郎	〃
724082	選択押釦スイッチの操作機構	白土忠治 鈴木隆一	〃
724083	洗濯槽泡流し装置	田沢阜 渡部博	38. 9. 23
725644	高周波増幅用真空管	村田良雄	38. 10. 26
725645	ダイヤル装置	折笠泰一	〃
725646	粉体中の異物除去装置	相沢武夫	〃
725647	陽極ソケット	井片泰史 佐藤勝男 秦野赤人	〃
725648	断熱導波管	小池康博 宮内圭治	〃
725649	断熱導波管	小池康博 宮内圭治 茂木朝雄	〃
725650	電池保持装置	山崎誠司	〃
725651	高温高圧蒸気タービンケーシングのフランジ接手部	石橋英一	〃
725652	電子顕微鏡観察室	海野義昌	〃
725653	ドラム形制御器の極間短絡防止装置	仲島久夫	〃
725654	パッケージ引抜き器	平出和美	〃
725655	圧油供給装置	細貝隆 大石朝男	〃
725656	メタルクラッド配電盤用遮断器の補助開閉器操作装置	広瀬五郎	〃
725657	冷蔵庫用棚網	三山和夫 秋田章	〃
725658	ガス圧接車に於けるレール引寄せ装置	水越正義 中尾彰一 奥村馨	〃
725659	メタルクラッド配電盤用遮断器の昇降装置	常盤健	〃
725660	冷蔵庫	関口忠郎 片柳登 小野実	〃
725661	低圧メタルクラッド配電盤用遮断器の二次断路装置	斉木昭夫	〃
725662	配電函用変成器の回転引出装置	滑川義三 柳田節雄	〃
725663	メタルクラッド配電盤用鎖錠装置	有坂健 斉木昭夫	〃
725664	自動車駐車用エレベータ	小山達夫	〃
725665	プラグインユニット引抜具	行友真一	〃

(134頁へつづく)