U. D. C. 621.375.4 : 621.314.63.07 : 546.28

# SCR アンプとその応用

## SCR Amplifier and its Application

小　西　務*
Tsutomu Konishi

内　容　梗　概

SCR 素子は 1W 以下の小電力で 50 kW 程度の電力が制御でき，かつ動作時間は数 μs 程度の短時間であるので，これを利用することによりきわめて性能係数の大きい増幅器を作ることができる。

SCR アンプはこの点に着眼し，SCR とさきに開発した磁気式自動パルス移相器とを組み合わせることにより，従来広く用いられている磁気増幅器と全く同様な入出力特性を有するすぐれた増幅器として使用できる。ここでは SCR アンプの性能の一例を明らかにし，二，三の応用例について紹介する。

## 1. 緒　　言

近年，主として電動力応用の自動制御に用いられる増幅器の一つに磁気増幅器がある。これは鉄心，銅線，整流器などからなり，変圧器に似て構造が簡単で堅ろうなため現在広く用いられている。ところが実用されている磁気増幅器は単体として電流利得，電力利得に限界があり，その限界を広くして使用しようとすると応答が遅くなる傾向をもっている。また利得を増大する目的で多段接続すると，自己帰還効果のため満足な特性が得られなかったり，動作が不安定になったり，あるいは種々の異常現象を発生したりする。これらの現象発生の要因は磁気増幅器の信号伝達が前向き方向のみではなく後向き方向にも存在し，また鉄心固有の特性を利用するという他の増幅器にあまりみられない特殊動作によると考えられよう。

最近の半導体の発達はめざましいものであるが，なかでも制御極付半導体整流器（以下 SCR と略称する）の高電圧化，大電流化の進歩は著しく発展の一途をたどりつつある。たとえば国外においては 800 V，250 A 程度，国内においては 500 V，200 A 程度の SCR 素子が実用されている現状である[1]。SCR 素子はよく知られているように，きわめて小さいゲート電力（3 V，0.25 A）で動作し，高出力が得られるので，これらを組み合わせて使用することにより高利得増幅器を製作することができる。また動作は瞬時的（数 μs 程度）であるので，増幅器の増幅度対応答比すなわち性能係数をきわめてすぐれたものとすることができる。

SCR を用いて増幅器を構成する場合の問題点は，主として SCR のゲート制御回路と整流回路の構成の二つに大別できる。SCR を用いた増幅器（以下 SCR アンプと略称する）を電動力応用回路の制御素子として用いる場合，ゲート制御回路の入力側では信号の突き合わせに問題の生ずることが多い。すなわち信号相互間の直流的絶縁，信号の極性，あるいは突き合わせによる動作時間遅れなどがそれである。また出力側では SCR 素子の組合せ使用に対して十分なゲート電力が供給でき，急しゅんな立上り波形をもつパルスを発生することが必要である。一方整流回路の構成は負荷に応じて SCR を直並列運転する必要があり，特に電動機の正逆運転などの場合，SCR 群の接続方式，制御方式が問題となる。これに応じてまたゲート制御回路を構成する必要がある。

整流回路の構成の問題は対象とする負荷に応じて具体的に考える必要があるので省略し，ここでは SCR のゲート制御回路の問題を磁気式自動パルス移相器を用いて解決したので[2]，主としてこれについて説明し，これを用いて試作した SCR アンプの動作原理，実験結果を明らかにする。次いで SCR アンプを電動力応用の自動制御に利用した[3][4]二，三の例について報告する。

* 日立製作所日立研究所　工博

## 2. 磁気式自動パルス移相器

SCR アンプは磁気式自動パルス移相器（以下 MAPPS と略称する）と SCR の組合せ回路よりなる一種の電力増幅器である。このうち動作原理はほとんど MAPPS により定まる。

### 2.1 方式および動作原理

#### 2.1.1 MAPPS の問題点および回路方式

SCR アンプを閉回路の自動制御系に使用する場合，SCR のゲート駆動回路には次の事項が要求される。

（1） 極性の異なる多くの制御信号（基準信号，帰還信号，ダンピング信号など）が突き合わせできること。

（2） 制御回路相互間を直流的に絶縁すること。

（3） 突合せ回路の動作時間遅れはできるだけ小さいこと。

一方，SCR を直並列接続し使用する場合には，それらの SCR ゲートに加えるパルスに次のようなことが要求される。

（4） パルス波形の立ち上りが急しゅんであること（立上り時間＝1 μs 以内）。

（5） 必要個数のゲートを駆動するのに十分な電圧，電流値を有すること。

上記のうち（1）～（3）は自動パルス移相器の入力側における問題であり，また（4）～（5）は出力側における問題である。

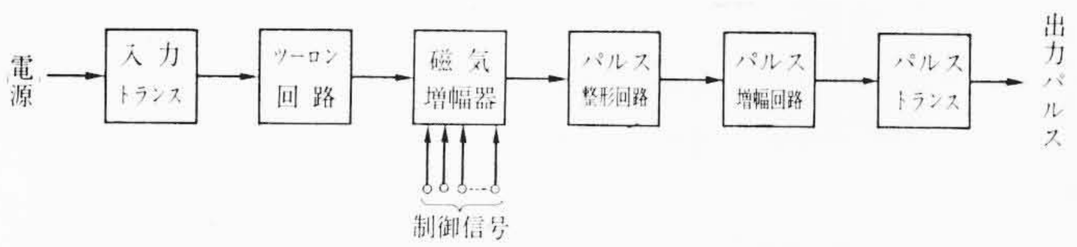
入力側における問題は，SCR を閉回路の自動制御系に使用する場合に常に生ずるものであるから根本的な解決が必要である。自動パルス移相器には使用する回路素子により第 1 表のような種々の回路方式がある。しかるにここにあげた例は構成素子が半導体よりなっていて，自動パルス移相器自体において上記入力側の問題を解決していない。したがって必要に応じた方法によりそれらを外部回路的に解決しようとしている。しかしながら突合せ数が少なかったり，直流絶縁を行なうことにより動作速度が小さくなったりしているのが実情のようである。

これらの問題をすべて解決するため単相半波自己飽和形磁気増幅器を利用した速応性の大きい回路方式を考案した。その構成図を第 1 図に示す。

出力側における問題は常に生ずるものではないかも知れないが，現在製作可能な SCR 素子の最大容量に限界のあるところから，当然考慮されなければならない問題といえよう。普通 SCR

第 1 表　各種の自動パルス移相器

| | |
|---|---|
| A | ユニジャンクション・トランジスタ |
| B | トンネルダイオード＋トランジスタ |
| C | pnpn 接合半導体＋トランジスタ |
| D | トランジスタ |




第1図　磁気式自動パルス移相器の構成図

の電源周波数は50 c/s あるいは400 c/s で使用されることが多く，この動作速度に比べ(4)の要求は一面過酷であるけれども，直並列運転の場合には必要条件の一つとなる。これを回路的に解決している例もあるが，トランジスタ回路によれば比較的簡単に解決できる。トランジスタ回路によれば(5)の問題に対しても，必要な電圧，電流値に応じて回路が構成できる。

**第1表**の各方式のうちトランジスタ方式以外の方式は半導体自身の負特性を利用してパルスを発生させているので，回路が簡単化できる特長があるが価格が高いのが普通である。またこれらの各方式においてもパルス電力増幅にトランジスタを使用することが多い。結局(4)，(5)の問題に対し，トランジスタのみにより回路を構成しようとする場合には負特性を得る回路の部分だけがやや複雑になる可能性がある。そこで筆者は負特性をうるためパルス整形回路にトランジスタを2石使用し，パルス増幅回路に1石使用し，(4)，(5)の問題に十分応ずることのできる回路を考案した。

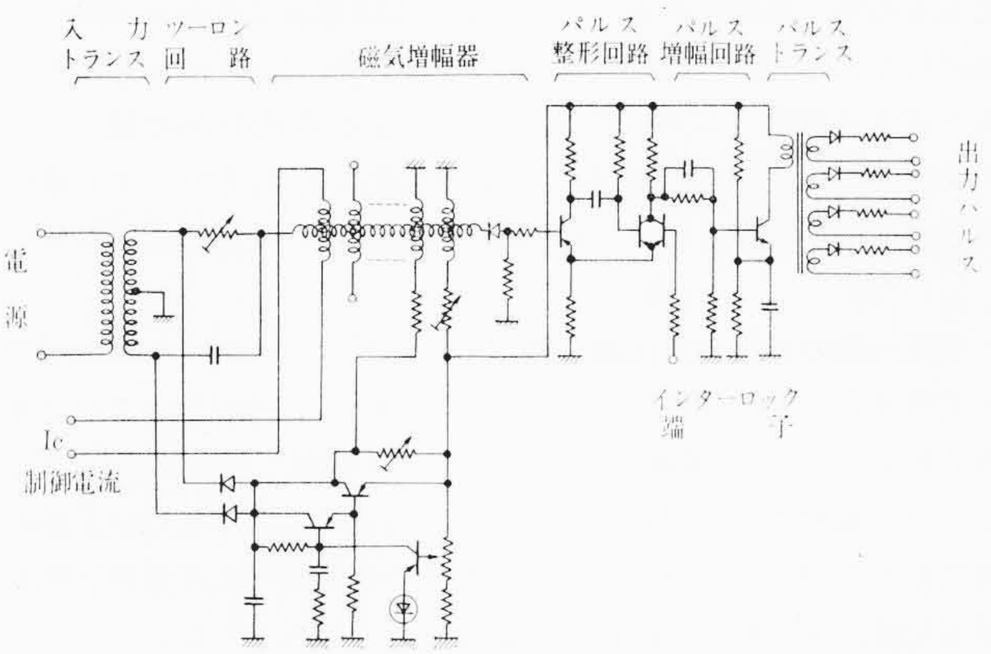
**第1図**の回路において，単相半波自己帰還形磁気増幅器は入力制御信号の代数和に応じて決まる電源電圧の位相でゲートされた出力電圧を生ずる。この電圧をパルス整形回路に入れ，ゲートされた位相に，定められた高さと幅をもつ急しゅんな立上り波形のパルス電圧を発生する。これをパルス増幅回路により電力増幅し，パルス・トランスを介して取り出す。パルス・トランスは回路を絶縁し，発生したパルス波形の形状をくずすことなく，また減衰少なく一次から二次に変換する必要がある。このようにして得られたパルスは電源の半周期内のある範囲に移相することができるが，この移相原点を任意の値に選びたい場合が生ずる。このためツーロン回路を使用する。

### 2.1.2 回路構成

**第1図**に対応したMAPPSの接続図を**第2図**に示す。同図では磁気増幅器の励振電源は正弦波になっているが，これに方形波定電圧電源を用いると移相角が増大し，移相特性の直線性がよくなる。

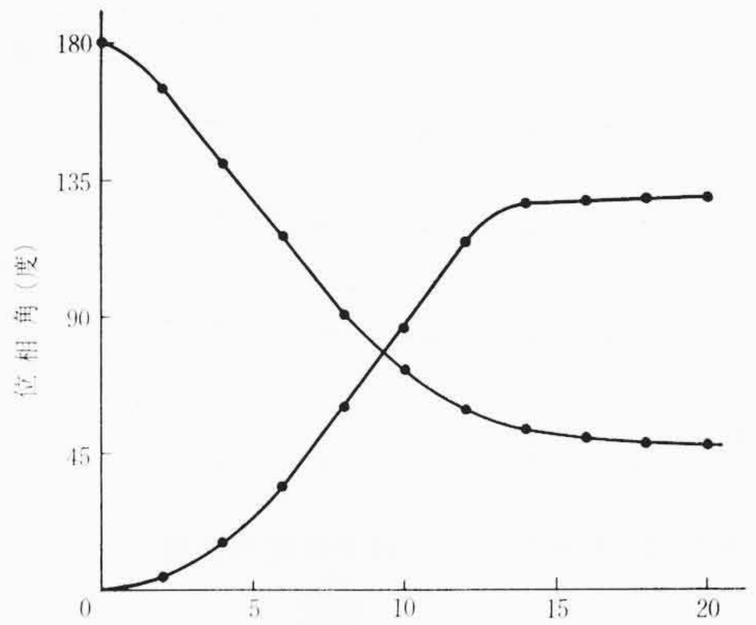
### 2.2 正弦波電源の場合の実験結果

磁気増幅器電源として正弦波電源を用いた場合の実験結果について述べる。

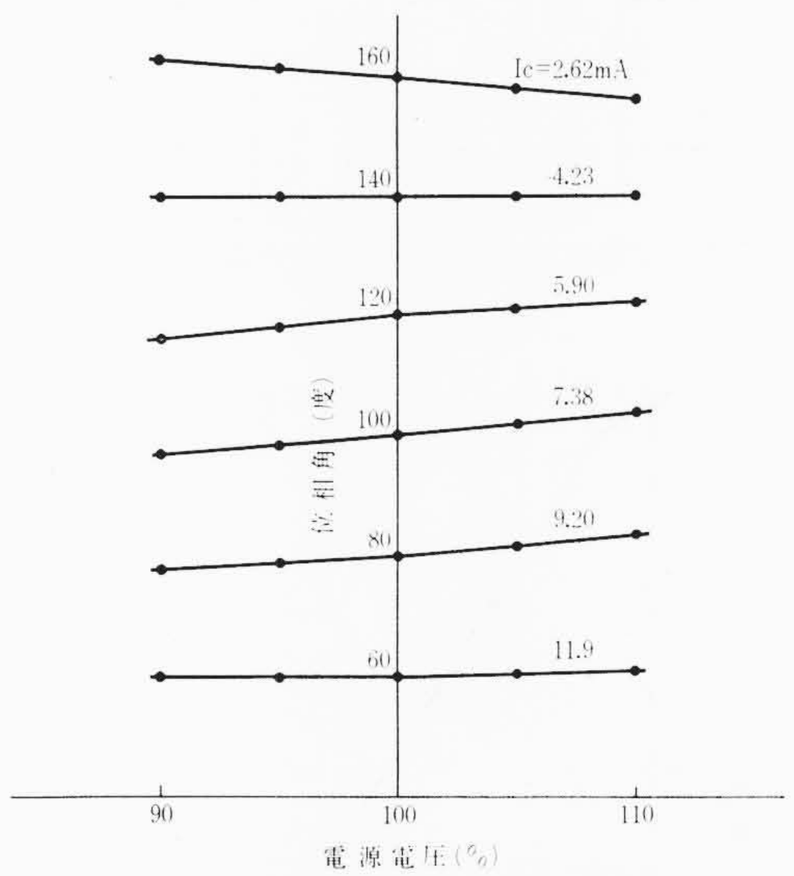



第2図　磁気式自動パルス移相器の接続図

(直流定電圧電源以外は一相分のみ示す)




第3図　移相特性の平行移動例




第4図　移相特性に及ぼす電源電圧の影響

### 2.2.1 移相特性およびその移動

移相特性は制御電流の方向，バイアス条件ならびにツーロン回路の条件などにより，特性平面上の任意の位置に平行移動ができる。その実験結果の一例を**第3図**に示す。

### 2.2.2 移相特性の交流電源電圧変動

**第2図**の回路よりわかるように普通位相角は交流電源電圧変動の影響を受けるので，それを補償する必要がある。それには次の二つの方法が考えられる。

(1)　電圧補償コイルによる方法

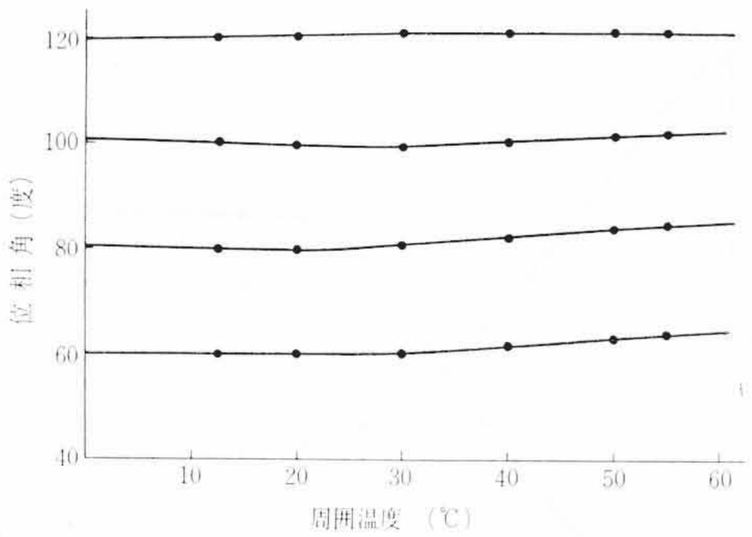
(2)　直流バイアス電源による補償

上記(1)の方法は交流電圧を整流し，その整流電圧に比例した電流を独立した制御巻線（補償コイルという）に流し位相変化を補償しようとするものである。また(2)の方法は位相角の直流バイアス電圧による変化が交流電圧による変化と逆方向にあることに着目し，交流電圧の変化に応じて直流電源の基準電圧を変化させこれにより制御バイアス電流を変えて位相補償しようとするものである。

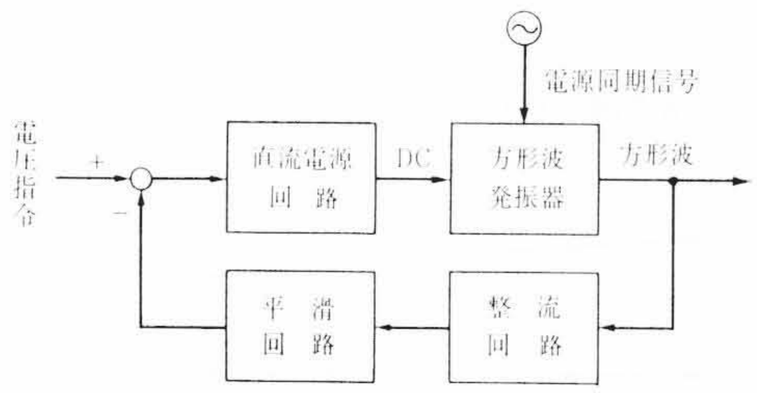
(1)の方法を用いた補償結果を**第4図**に示す。

### 2.2.3 移相特性の温度変動

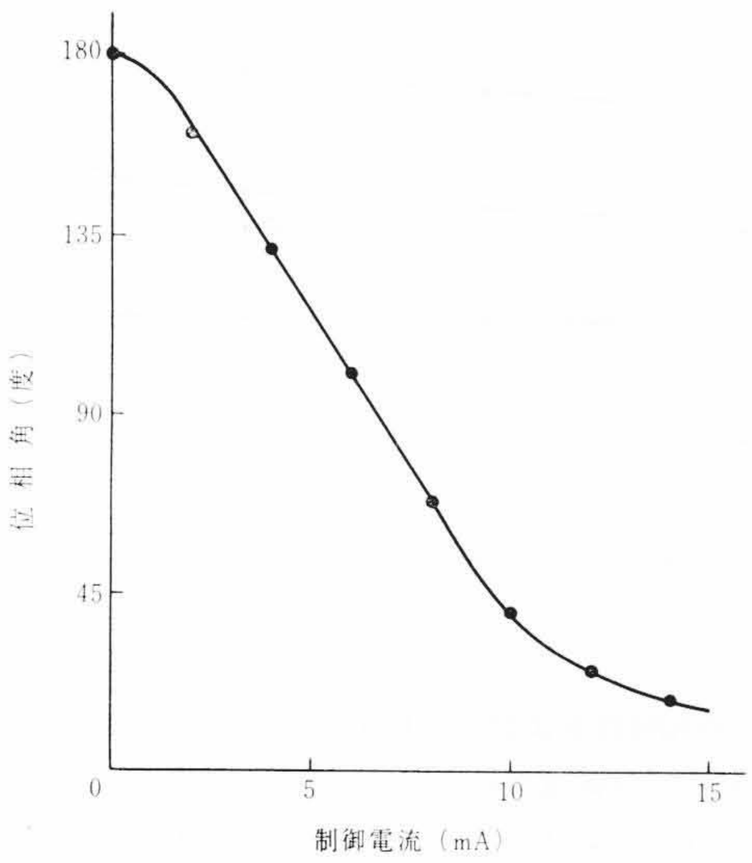
移相特性の温度変動を**第5図**に示す。この特性は直流基準電圧を温度により変化させて補償しているが，その程度は過補償にも，不足補償にも調整できる。SCR 回路と組み合わせて最終的に調整される。



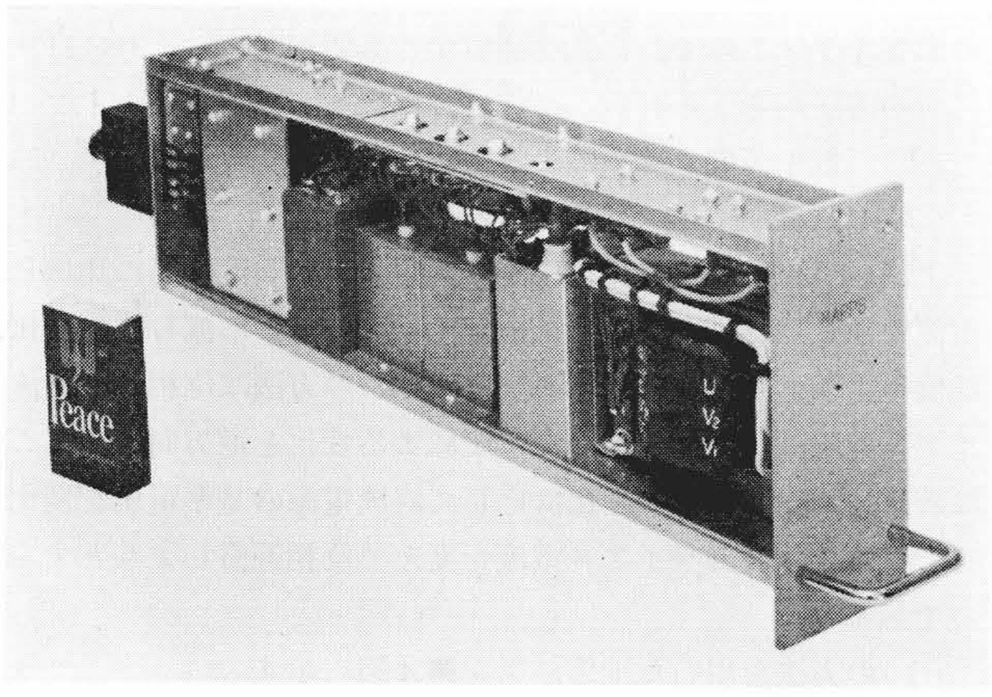

第5図　移相特性に及ぼす温度の影響




第6図　定電圧制御方形波発振器の構成図




第7図　方形波励振による磁気式
自動パルス移相器の移相特性

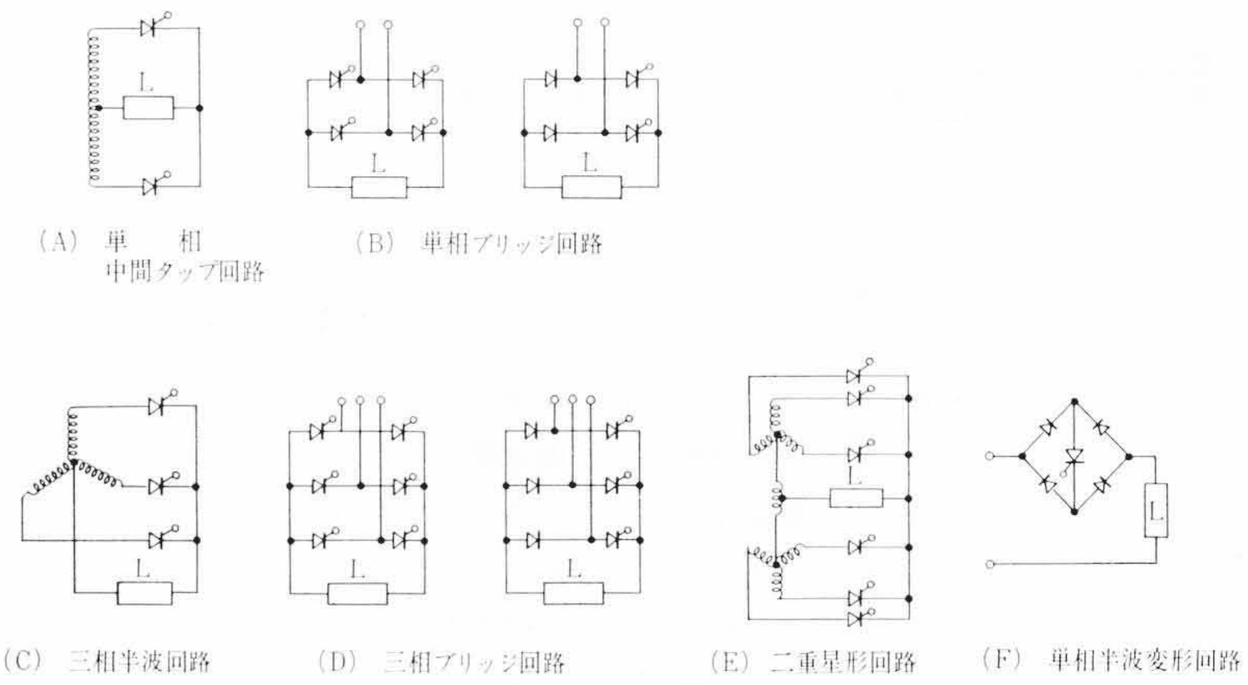



第8図　磁気式自動パルス移相器（MAPPS）

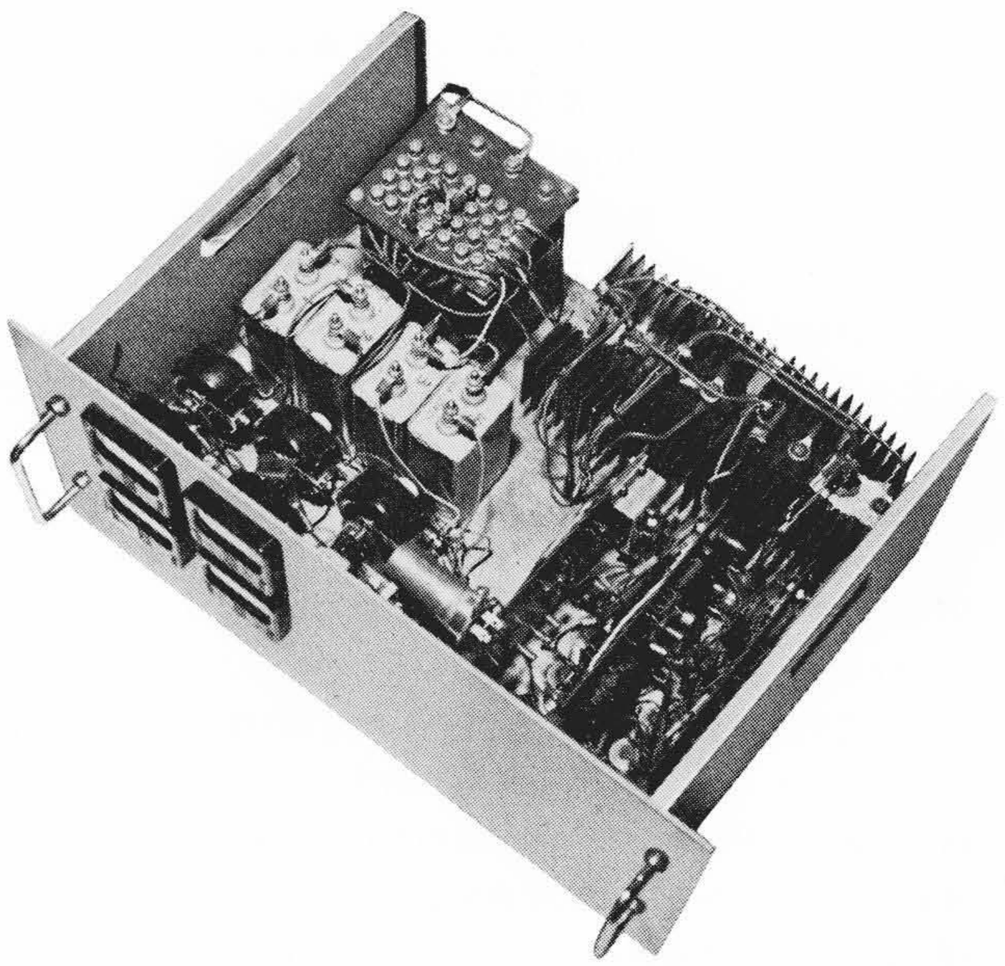
### 2.3　定電圧制御方形波発振器電源の場合の実験結果

この場合原理的には移相角が180度となり直線性がすぐれたものとなる。**第6図**のような定電圧制御方形波発振器を電源とした場合の移相特性を**第7図**に示す。移相角変化範囲が160度以上あるので，インバータ運転の場合にもMAPPSを用いることができる。

磁気式自動パルス移相器の外観を**第8図**に示す。




第9図　整流回路の結線方式例



第10図　SCR　ア　ン　プ

## 3. SCR　ア　ン　プ

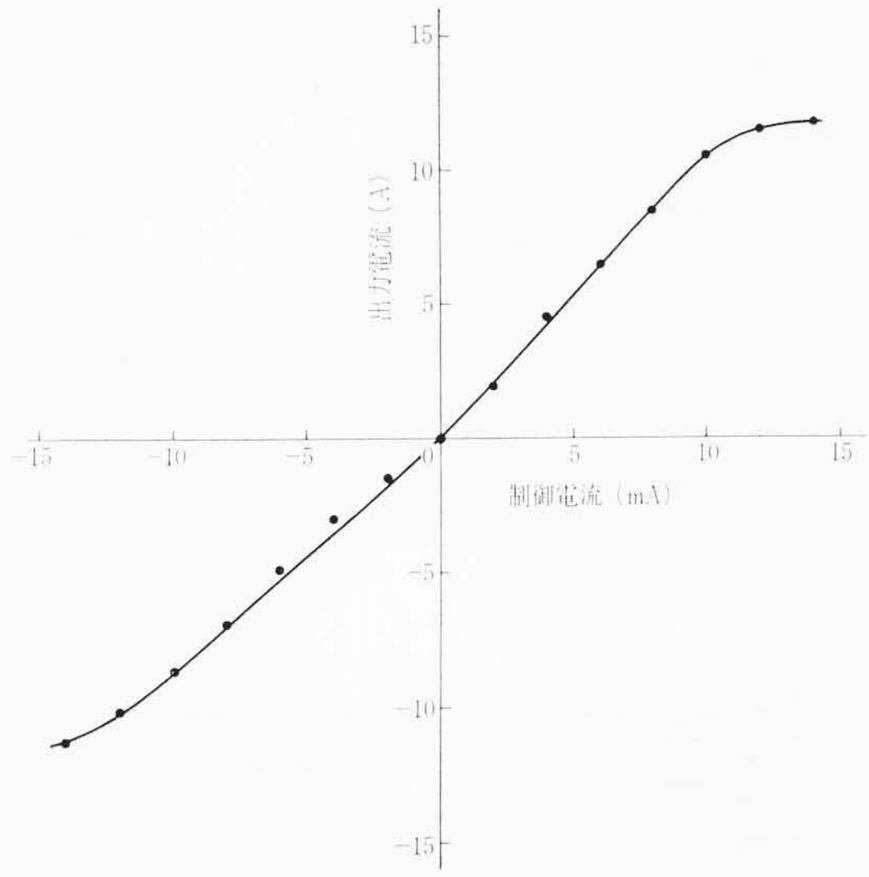
従来磁気増幅器は信頼性の高い制御素子，演算素子として広く用いられている。しかしながら，磁気増幅器は30～50倍以上の電流利得を得るには動作の安定性に問題を生じ，応答速度も数c/s程度であるので，高速性が要求される場合には電源周波数を400 c/s程度にして使用されている。これに対しSCRアンプはさきに開発された磁気式自動パルス移相器とSCRによる整流回路の組み合わせで構成されていて，磁気増幅器と同様に使用でき，そのうえに動作が安定で，速応性がよいので高利得の増幅器として応用範囲が広い。

### 3.1　構　　成

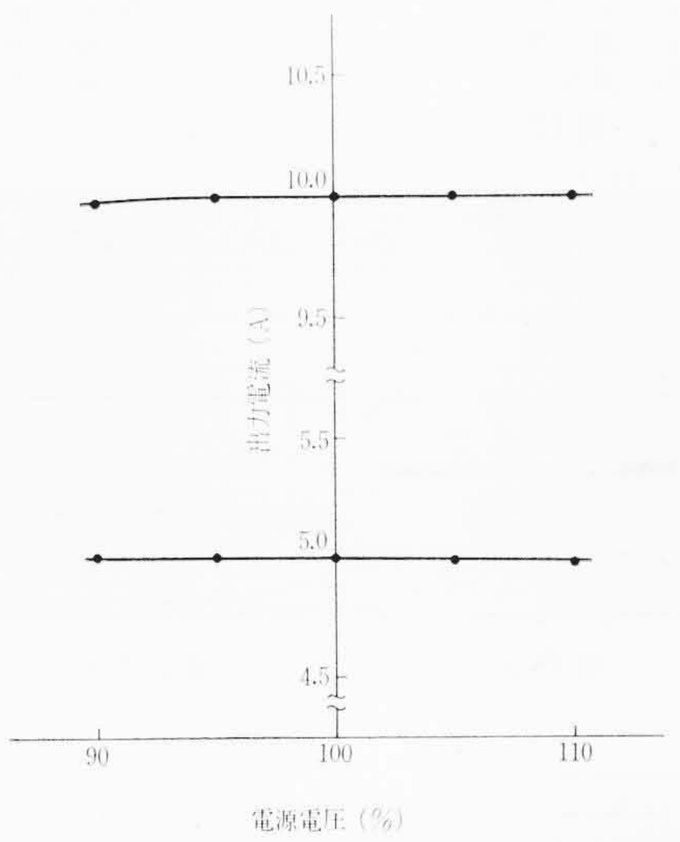
整流回路の結線方式は**第9図**に示すとおりで，いずれの結線方式を使用するかは，電源，SCR素子の容量，負荷容量などにより決められる。一方，SCRアンプをシングル接続で用いるか，プッシュ・プル接続として用いるかにより正方向のみの，または正逆両方向の出力を得ることができる。電動機の正逆運転には整流回路群を単基切替，交さ接続，逆並列接続などして使用される。

### 3.2　実　験　結　果

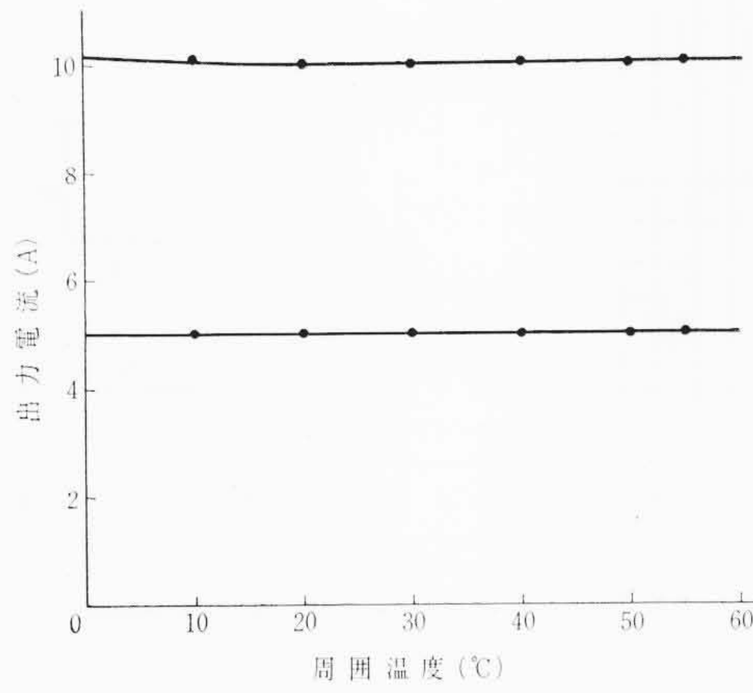
中間タップ付変圧器を用いた単相全波整流回路について，逆並列




第11図　SCR アンプの入出力特性の一例
（プッシュプル接続の場合）



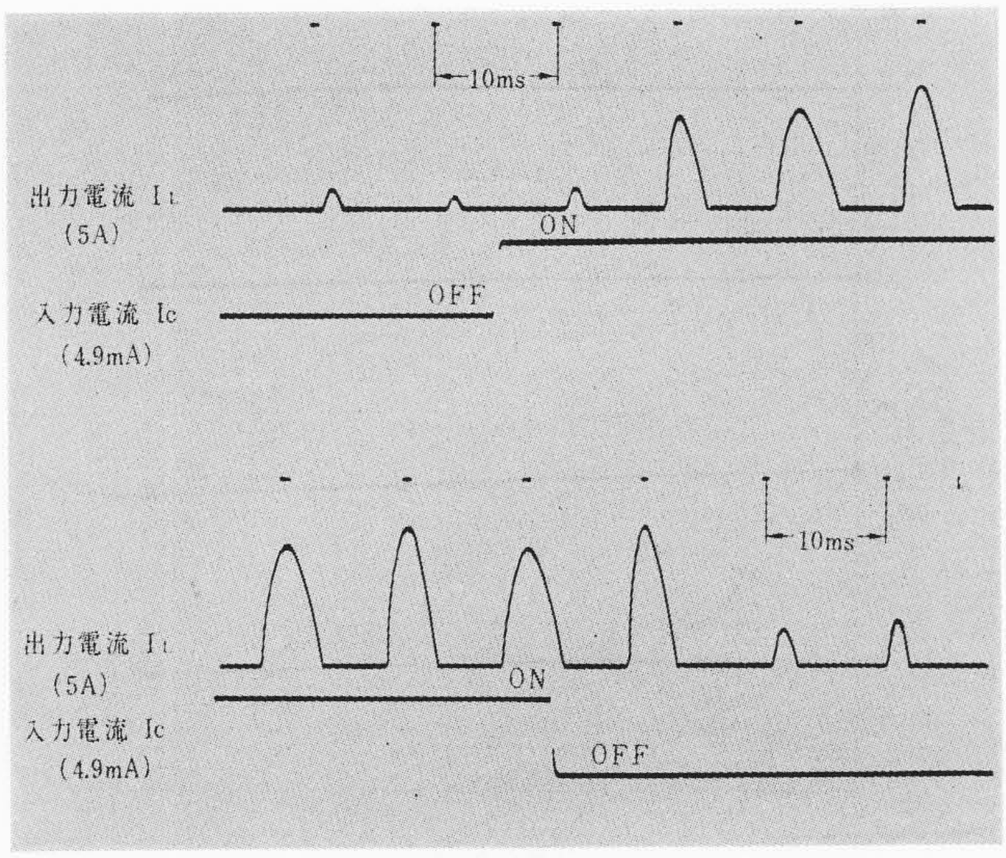

第12図　出力電流に及ぼす電源電圧の影響



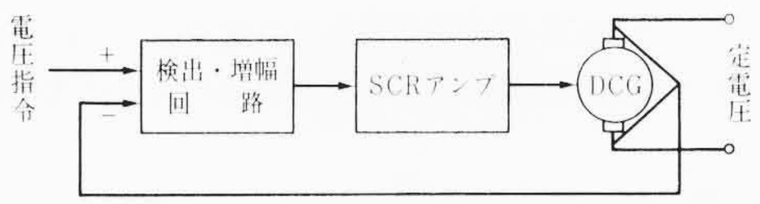

第13図　出力電流に及ぼす周囲温度の影響

接続方式により実験した。試作装置の写真を**第10図**に示す。**第11図**は SCR アンプの入出力特性の一例を示したものである。同図よりわかるように，入力の正，負に応じて出力に増幅された正，負の電流が得られる。

この増幅特性の電源電圧変動および温度変動を示すと**第12図**および**第13図**となる。この結果，電源電圧および温度に基因する変




第14図　SCR アンプの応答




第15図　直流発電機の定電圧制御構成図

動は非常に小さいことがわかる。

次に，SCR アンプの過渡特性を**第14図**に示す。同図でわかるように，インディシャル応答は入力 ON の場合，OFF の場合ともに 1 c/s 以内である。

以上性能をまとめて記すと次のようになる。

（1）　電　流　利　得　　約 15 A/10 mA＝1,500

（2）　同上電源電圧影響（±10% 電源変動に対し）：　±0.5%

（3）　同上温度影響（周囲温度 0～55℃ に対し）：　≒0

（4）　応答速度（電源周波数 50 c/s）：　1 c/s 以内

以上のうち電流利得は SCR 素子の容量により変わる。

## 4.　SCR アンプを用いた直流発電機の定電圧制御

大容量発電機の電圧制御は従来多段の磁気増幅器，HTD，励磁機の構成により行なわれることが普通である。ところが最近，5,000 HP（ツイン・ドライブ）の圧延機のワード・レオナード系の直流発電機界磁を直接 SCR アンプで駆動することが可能になりつつある。もちろんこれの実現には MAPPS の高出力化と SCR の直並列運転が必要となる。

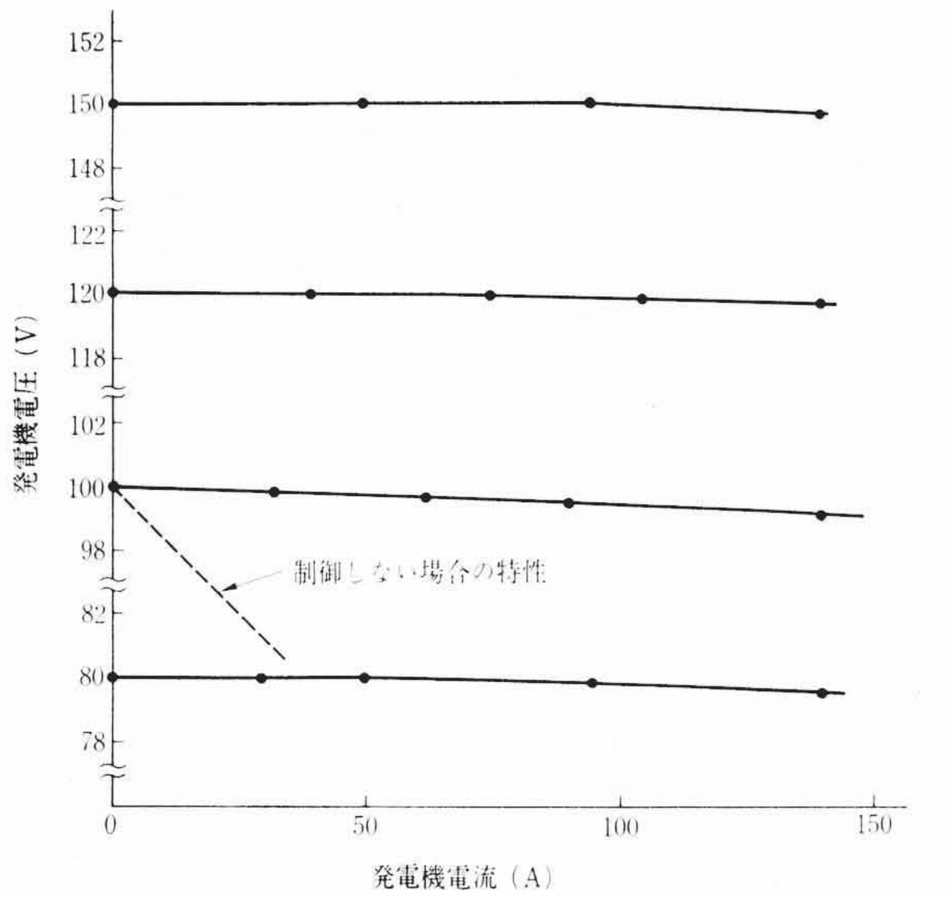
SCR を用いた制御では応答速度がきわめて大となるので，電圧指令変化による速応性および負荷急変時のインパクト変化の復元性のすぐれた特性が期待できる。

ここでは 125 kW の直流発電機を用いて行なった定電圧制御の実験についてとりまとめることにする。

### 4.1　回路構成と動作原理

回路構成は**第15図**に示すように一般の電圧制御系と変わるところはない。検出，増幅回路には高速応性の磁気増幅器あるいはトランジスタの差動増幅器が用いられる。したがって動作原理も従来と変わるところがない。

特に問題となるのは発電機の界磁制御において SCR がインダクタンス負荷となるので，界磁回路の時定数が比較的大きくなり，そのため SCR の点弧にさいして SCR を流れる電流がゲートパルス期間に保持電流以上の十分な値になりにくい。そのため点弧不能の状




第16図　発電機電圧の負荷特性

態に陥る。そこでSCR電流が急速に保持電流値以上になることを助勢するための回路が必要となる。普通界磁の両端にRC回路を接続する。

### 4.2 実験結果

無負荷端子電圧をパラメータにしたとき，発電機電圧の負荷特性を**第16図**に示す。本実験は制御の効果を見る目的で，同図上に示すように制御を行なわない場合の負荷特性をかなり悪化させてある。負荷電流60Aにおける電圧変動率は制御しない場合10%のものが，制御することにより0.4%以内に改善されている。

また過渡特性はインディシャル応答約0.8秒，インパクト変化は約2.5%，回復時間は約0.2秒（負荷時）である。ただし界磁時定数は約2秒である。

## 5. 単基切替方式による直流電動機の速度制御

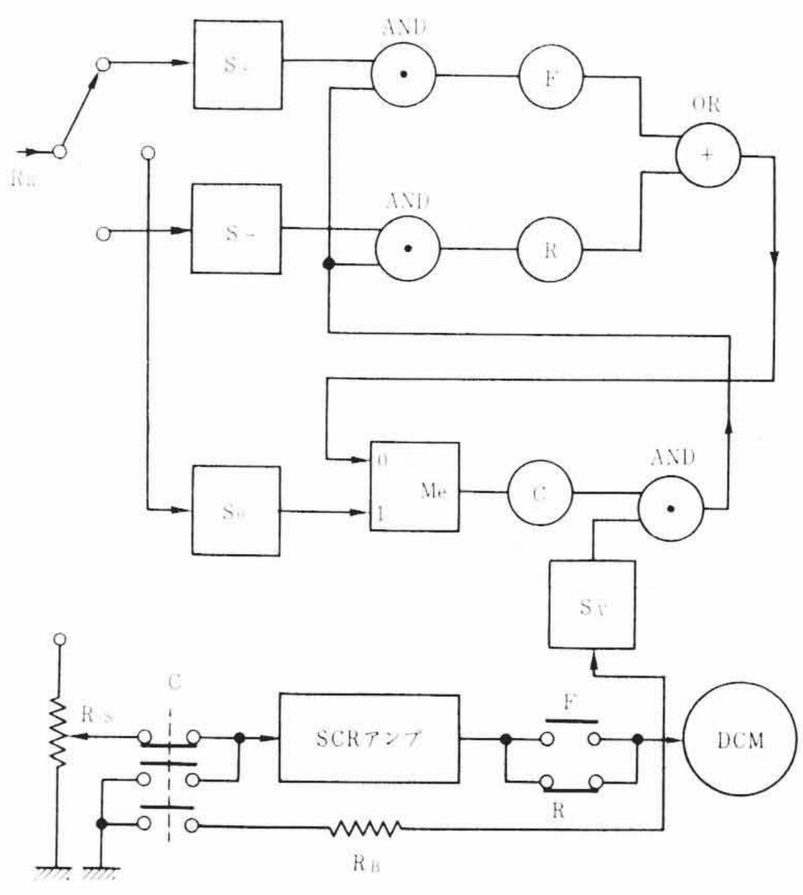
直流電動機を正逆運転する場合，制動に抵抗制動が用いられることがある。この場合，速度指令の正逆に応じて減速時にのみ抵抗制動を行なうことを判断し，電動機が停止した後，逆転指令が出るようにする必要がある。この判断回路はひん繁に動作するので従来の電磁継電器では寿命，保守の点に問題がある。そこで無接点継電器「トランジログ」を用いて正逆判断回路を試作したので，それについて述べる。

### 5.1 正逆転制御の動作原理[3]

正逆転制御回路の構成図を**第17図**に示す。正転指令が出され，電動機がある速度で運転されているとする。いま急に逆転指令が出されたとすると，まず零指令検出回路の信号が発生し記憶要素$M_e$をセットする。ところが電動機はまだ速度をもっているので零電圧検出回路の出力がないためゲート$A_0$が閉じている。同時に継電器Cが励磁され，速度指令が切断されるとともに制動抵抗が接続されるので電動機は減速する。減速とともに電動機逆起電力が減少するが，ほぼ零付近になると零電圧検出回路に出力を生ずる。それによりゲート$A_0$が開き，逆転指令が出され，主コンタクタRを励磁する。その後$M_e$がリセットされ，ゲート$A_0$が閉じると同時に，継電器Cの励磁が解けるので，制動抵抗がはずされ，速度制御系が動作する。これにより電動機は逆転する。

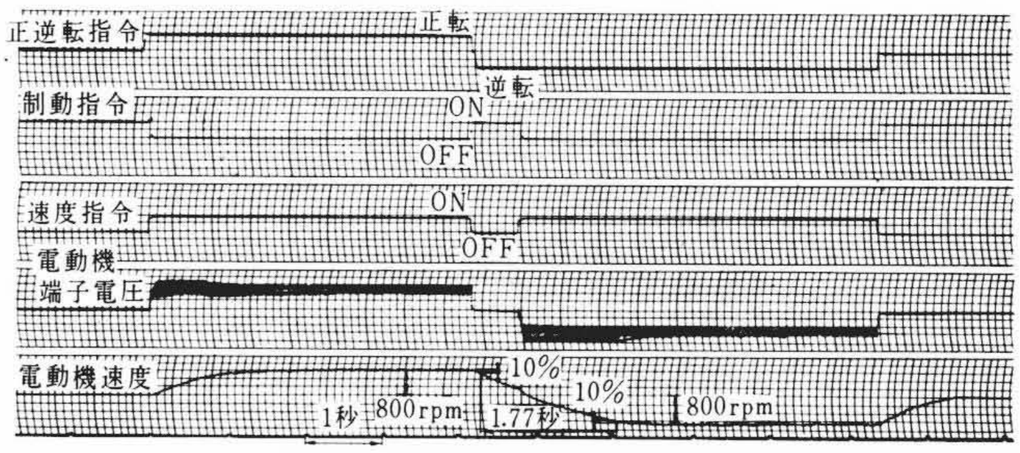
### 5.2 実験結果

制御装置を試作し，上記動作の確実性を検討する目的で実験した。その結果の一例を**第18図**に示す。これにより所望の動作をし，円滑に正逆運転できることが確かめられた。

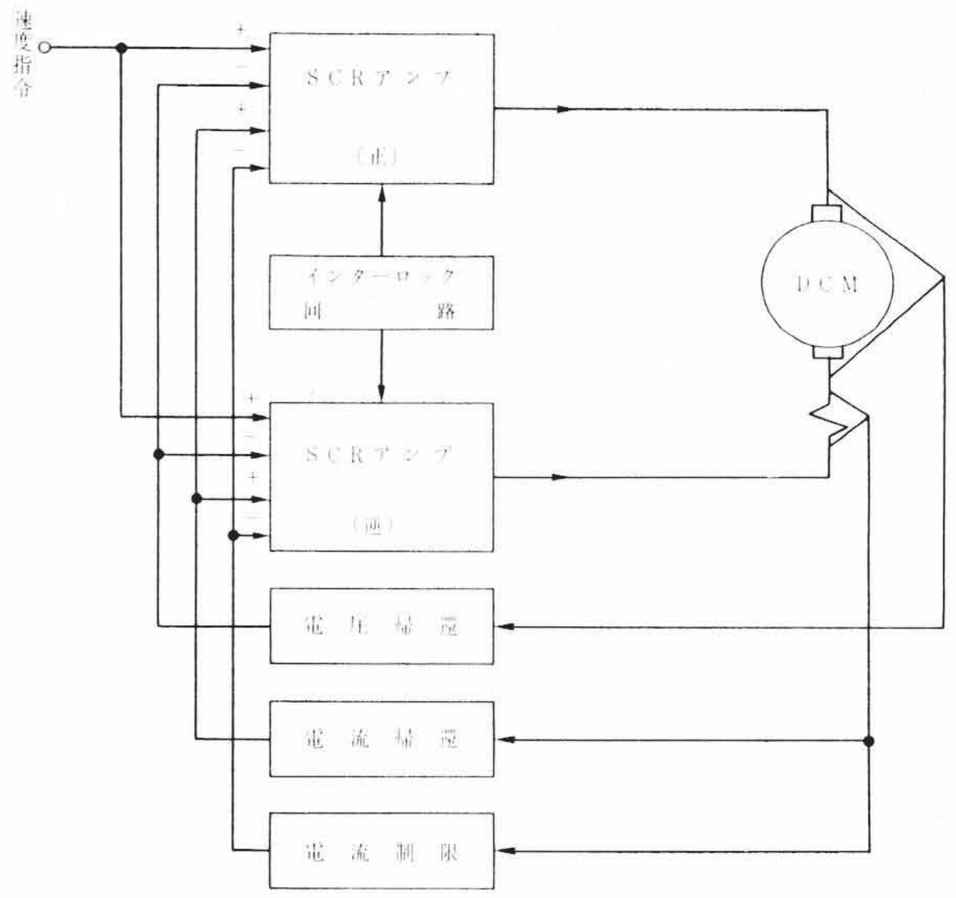



$S_+$：正転指令検出　　R：逆転用リレー
$S_-$：逆転指令検出　　C：正逆切替リレー
$S_0$：零指令検出　　DCM：直流電動機
$S_V$：零電圧検出　　OR：OR要素
$R_R$：正逆転指令　　AND：AND要素
$R_S$：速度指令　　$M_e$：記憶要素
F：正転用リレー　　$R_B$：制動抵抗

第17図　正逆転制御構成図



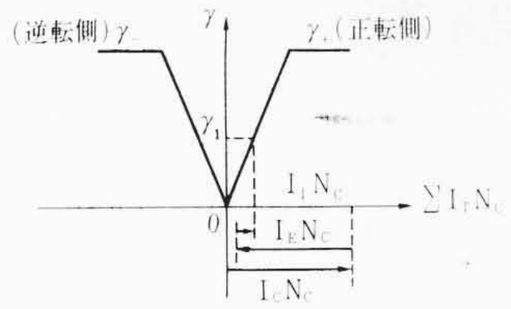

第18図　正逆転制御の実験結果例



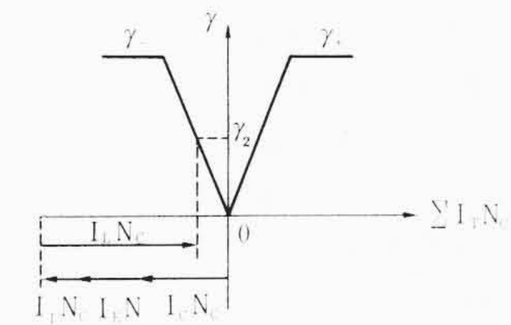

第19図　可逆速度制御の構成図

## 6. 逆変換制動による可逆速度制御

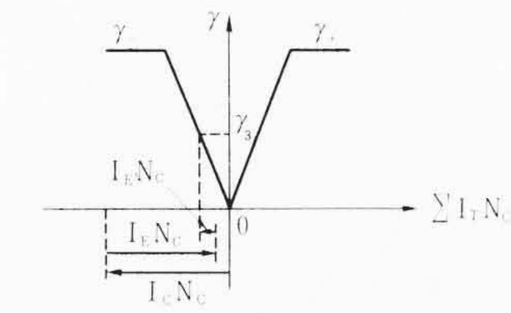
比較的小形の直流電動機を短時間に正逆転したり，定速度制御したりすることの必要な場合が多い。たとえば工作機械の工具あるいは作業台駆動用電動機などでは定められた切削条件を満たすため任意の速度に調整でき，かつ負荷のいかんにかかわらず一定速度で運転することが要求される。なお作業能率を上げるため正逆転時間の



(A) 正転 (順変換)

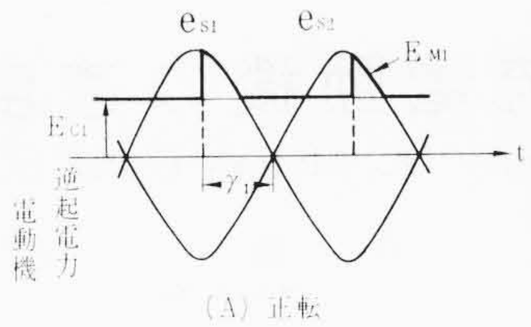


(B) 制動 (逆変換)

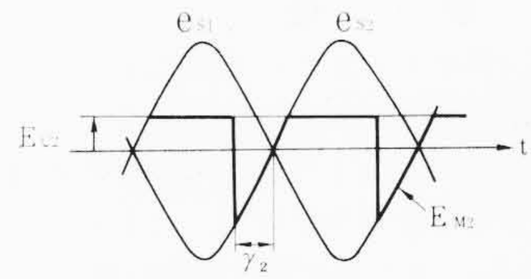


(C) 逆転 (順変換)

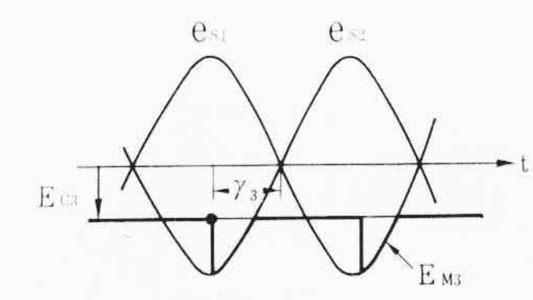
第 20 図　突合せ信号とゲート位相角の関係



(A) 正転

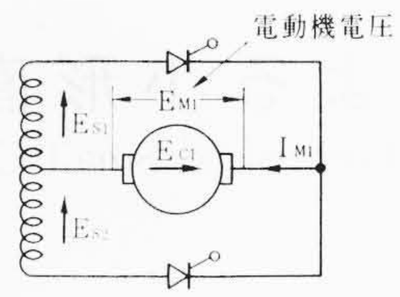


(B) 制動

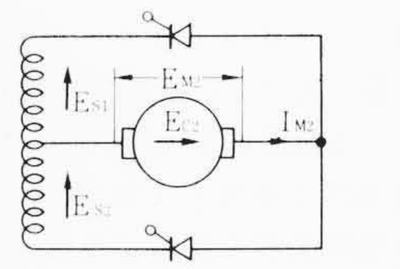


(C) 逆転

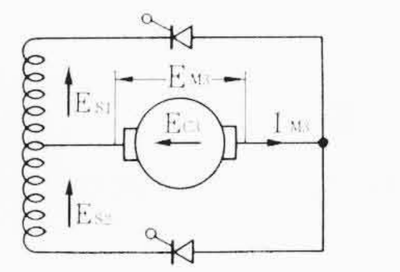
第 21 図　駆動回路の波形



(A) 正転

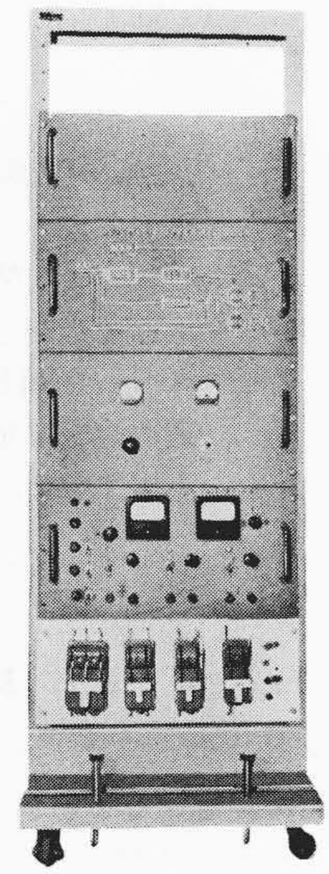


(B) 制動



(C) 逆転

第 22 図　駆動回路の動作



第 23 図　可逆速度制御装置

短いことが要求される。これらの要求に応ずるため，SCR の逆並列接続を用いた逆変換制動方式による直流電動機の可逆速度制御について以下に述べる。

### 6.1　可逆速度制御装置の構成と動作原理

制御装置の構成図を**第 19 図**に示す。SCR アンプの入力信号として，速度指令信号，電動機電圧帰還信号，電動機電流帰還信号，電流制限帰還信号が突き合わされる。これら各信号のアンペア回数の代数和によって定まる SCR のゲート角と電動機の運転状態について説明する。

まず正転の場合には**第 20 図**(A) に示すように速度指令アンペア回数 $I_CN_C$，電圧帰還アンペア回数 $I_EN_C$，電流帰還アンペア回数 $I_IN_C$ (ただし $N_C$＝制御巻線回数) の総合アンペア回数 $\sum I_TN_C$ によって決まるゲート角 $\gamma_1$ によって，順方向 SCR が点弧する。したがって，この場合の駆動回路の動作波形は**第 21 図**(A)のようになり，また駆動回路の動作状態は**第 22 図**のようになる。この図よりわかるように電動機トルクは正，すなわちモータリングの動作をする。電動機速度が与えられ，電動機トルクが決まればそれに応じて適当な位相で SCR が点弧する。

次に上記の状態から速度指令が急に逆転方向に変化すると，SCR アンプの入力アンペア回数は**第 20 図**(B) のようになり，逆接続側の SCR が $\gamma_2$ の位相で点弧されるようになるので，駆動回路の波形は**第 21 図**(B) のようになる。当然電動機電流は正転の場合とは逆になるので，電動機はジェネレータリング状態となり，電力は電源に逆変換される。したがって，電動機に回生制動がかかり，いったん短時間に停止に至る。この期間の駆動回路の状態は**第 22 図** (B) のようになる。その後，逆転方向に電動機が加速し，次に述べる逆転状態に落ち着く。

逆転状態においては最初述べた正転状態と動作はまったく同じである。ただし逆方向の速度指令により逆接続側の SCR が動作する。この場合の SCR アンプの入力信号を**第 20 図**(C)に，駆動回路の動作波形を**第 21 図**(C)に，また駆動回路を**第 22 図**(C)に示す。

以上の説明において SCR の動作上問題となるのは，順接続側 SCR と逆接続側 SCR はともに順方向電圧がかかった状態で同時に点弧すると短絡電流のため SCR が破損するので，SCR アンプ間にインターロックをする必要がある。また SCR が過電流にならないように使用するために電流制限制御を有効に使うことである。

### 6.2　実　験　結　果

制御装置を試作し実験した。**第 23 図**は制御装置の外観を示したものである。実験の結果制御をしない場合の速度変動率が 55% であったのが，速度制御を行なうことにより約 3% 程度に減少することができた。また定格速度の 5～130% の範囲において線形性よく速度調整ができる。過渡特性を要約すると次のようになる。

| | |
|---|---|
| 加速時間 | 0.78 秒 |
| 減速時間 | 0.33 秒 |
| 正逆転時間 | 1.08 秒 |
| インパクト降下 | 1.25% |
| インパクト降下回復時間 | 0.320 秒 |
| インパクト上昇 | 1.87% |
| インパクト上昇回復時間 | 0.345 秒 |

## 7.　結　　言

以上まず SCR アンプの重要な構成素子である磁気式自動パルス移相器について述べた（ここでは述べなかったが高出力用のものも検討ずみである)。次いで SCR アンプの応用例として直流発電機の電圧制御および直流電動機の可逆速度制御について説明した。紙面の都合で各章とも細部の検討事項を省略した。またここで記したほかに直流低電圧大電流定電圧電源なども検討したが割愛した。今後需要の面から大容量機器の制御装置が要望されるにつけ SCR 素子の大容量化や磁気式自動パルス移相器の大容量化や電流制限回路など付属制御素子の開発が必要であり，これらについてもすでに検討が続けられているので，機会をみて報告したいと考えている。

### 参　考　文　献

(1)　浅野他：日立評論 **45**, 1177 (昭 38-7)
(2)　小西：昭 38 電気学会東京支部大会 No. 58 (昭 38-11)
(3)　小西：第 5 回自動制御連合講演会 No. 261 (昭 37-11)
(4)　岩田，小西：日立評論 **45**, 1525 (昭 38-9)