

制御極付シリコン整流器の応用

Application of Controlled Silicon Rectifier

岩田幸二* 浅野弘** 高橋徹也**
 Kōji Iwata Hiroshi Asano Tetsuya Takahashi

内 容 梗 概

シリコン整流器が、電力整流器の大半を占めるようになったのが、わずか1~2年の間であることはご承知のとおりであるが、半導体製作技術は次に制御可能な制御極付シリコン整流器を産出した。この整流器はシリコン整流器のすべての特長を有するとともに、後述のとおり、制御性能の優秀性、使用周波数の高いこと、などを利用して、従来使用されていた水銀整流器、サイラトロン、磁気増幅器などにとって替って各方面に大量に使用されることは必定である。それとともに従来考えられなかった新しい分野にも、その用途が見出されるものと確信される。かかる意味で、本論文では、制御極付シリコン整流器の応用に関する技術的解説、応用に当たっての問題点の処理、日立製作所で開発した応用の諸例について述べる。

1. 緒 言

近年半導体整流器の技術的進歩は目ざましく、特にシリコン整流器の開発はほかにその数例が無いほどの速度で、わずか1~2年の間に従来使用されていたすべての整流器にとって替って、大々的に進出した。その技術的開発はさらにスイッチング作用を有する pnpn 形電力用シリコン整流器、いわゆる制御極付シリコン整流器(Silicon Controlled Rectifier)を産み出した。(以下 SCR と略記する) SCR はシリコン整流器の有する多くの特長のほかに、スイッチング作用もあわせ有するもので、これを利用した種々の応用が考えられる。本報告は、かかる SCR の応用についての技術的解説、問題点の処理、実施諸例について述べ、関係各位のご参考の一助に資する次第である。

2. SCR の 諸 特 性

SCR の構造、特性については本誌でも別に述べられているので、SCR を使用するに当り、特に必要とする特性に限定して述べる。

2.1 V-I 特性

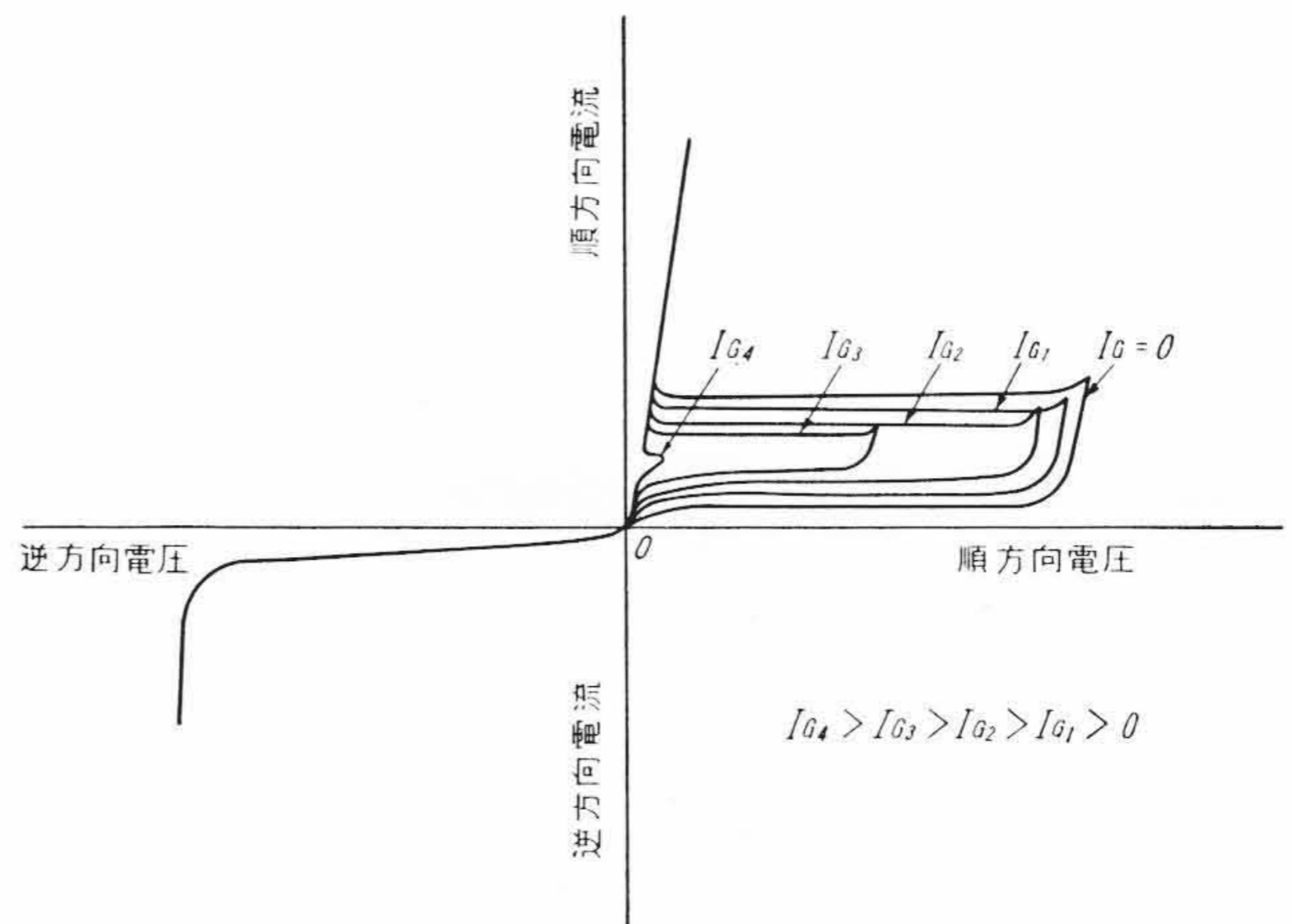
第1図に SCR の V-I 特性を示す。ここで注目すべきは、従来のシリコン整流器(以下 SR と略記する)と著しく異なり、制御極(ゲート)に規定電流を流さなければ、順方向に電圧を加えても高インピーダンス状態を保持し、SCR は「OFF」の状態にある。さらに順電圧を高めると、SCR は「ON」の状態になる。この電圧値を $V_{B.O.}$ (ブレイク・オーバ電圧) と称する。他方第1図の $I_{G1} \dots I_{G4}$ 曲線に示されるとおり、制御極に電流を流すことにより、SCR は「ON」状態となる。ゲートに流れる電流がある値に達すると、1乃至数ボルトの低い順電圧でも SCR を「ON」の状態になしうる。この後者の特性を利用して、外部信号により任意の位相で SCR を「ON」の状態とすることができる。

一度 SCR が「ON」となれば、負荷インピーダンスにて決った電流が流れる。この値が保持電流 I_H より大であれば、ゲートの信号を取り除いても SCR は「ON」の状態を持続し、順電流が I_H 以下となって「OFF」になる。順電流が I_H 以下で「ON」状態を持続するためにはゲートに必要電流を供給しなければならない。

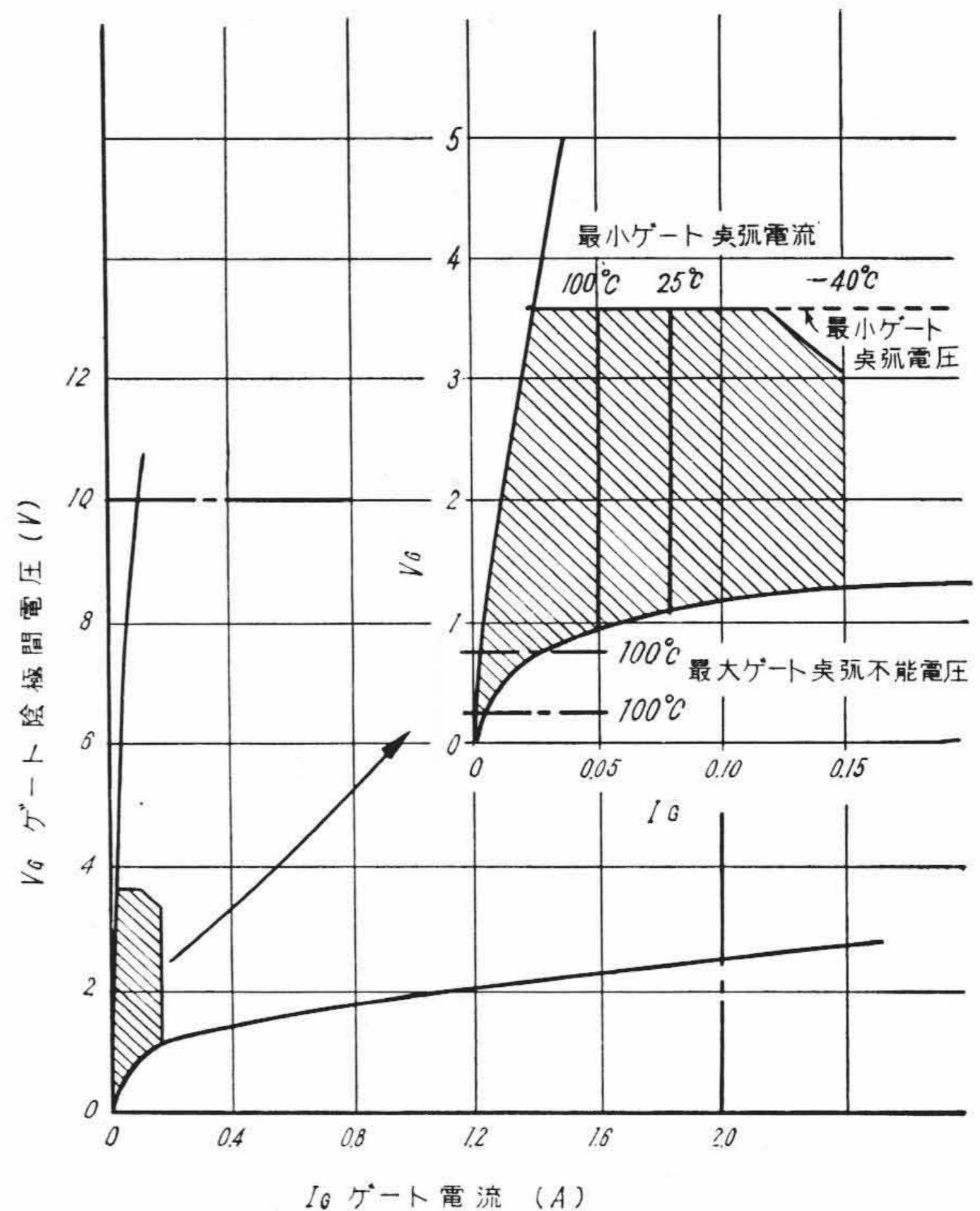
逆電圧領域では、普通のダイオードと同様であるが、注意すべきは、逆電圧期間中にゲートに通電すると逆電流が急増して、SCR の熱平衡を破り破壊に至ることがある。

2.2 制御極の特性

SCR はゲート-陰極間に通電することにより SCR を「ON」とな



第1図 SCR の V-I 特性

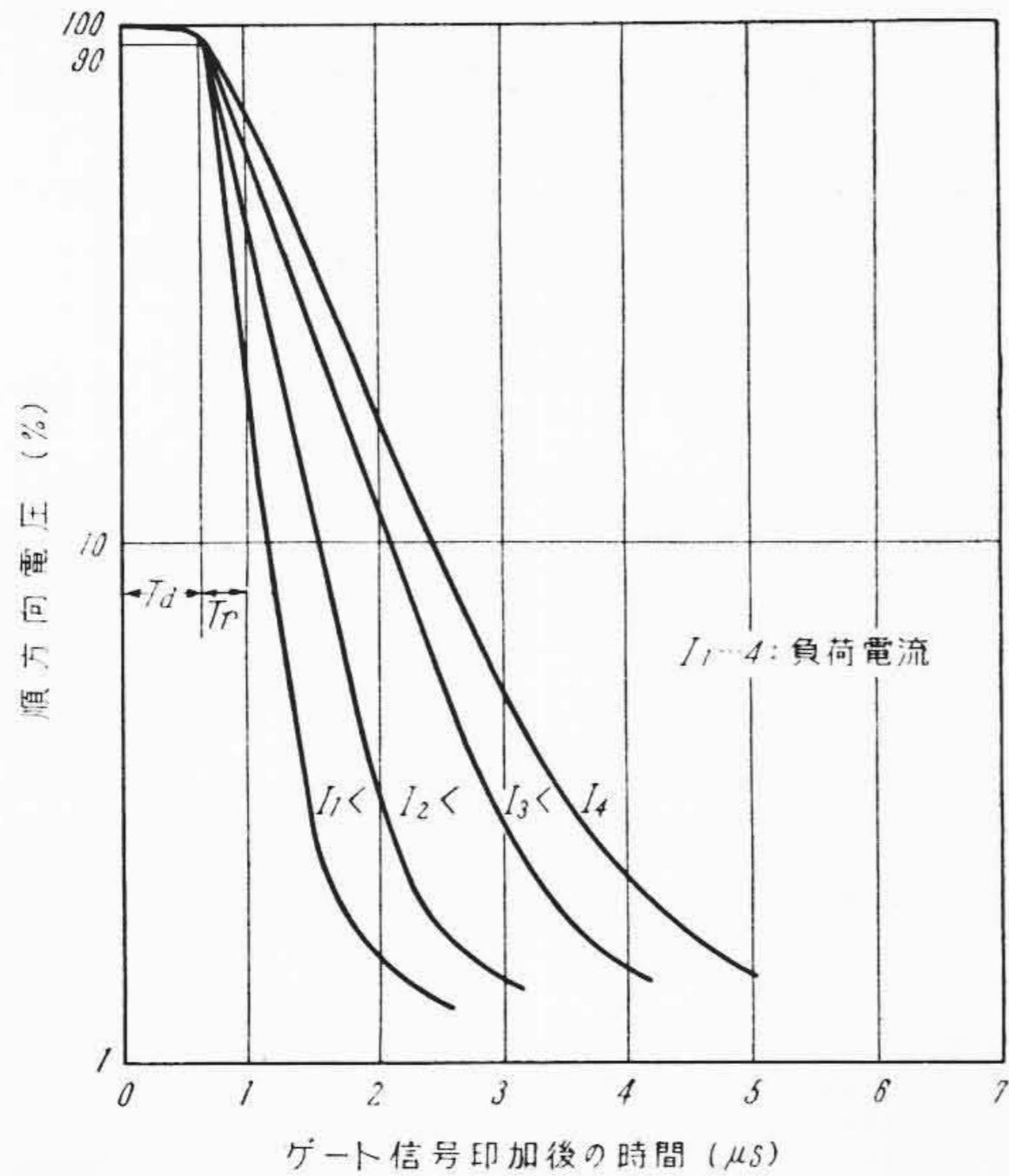


第2図 SCR のゲート点弧特性

しうる。第2図はゲート陰極間の点弧特性を示す。ここで斜線部はジャンクション温度が $-40^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ の範囲で SCR が点弧しうるゲートの電圧電流のばらつき範囲を示すととも、電圧電流の制限

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立工場



第3図 SCR点弧-時間特性

値を示す。すなわちSCRの点弧特性は、ジャンクション温度により左右されるとともに各エレメントにも、ばらつきがあるので、所要の位相で確実に点弧させるためには、ゲートに印加する電圧をパルス状として使用することが必要である。SCRを直列接続および並列接続として使用する時に留意することが必要である。またゲート陰極間は一種のp-n接合体であるので、電圧、電流、電力損失について制約があるので、ゲート回路の整定に十分検討する必要がある、特に高周波で利用する場合には留意しなければならない。

2.3 点弧 (TURN-ON) および消弧 (TURN-OFF) 特性

SCRの点弧における時間的变化状態を第3図に示す。順方向に電圧が印加されていて、ゲートに信号電流を流すと、SCRはただちに低インピーダンス領域に移行せず、ある死時間を経て、傾斜をなして順電圧は降下する。制御極に電流を流してのち、陽極-陰極間電圧が10%まで降下する時間(「遅れ時間」 T_d +「上昇時間」 T_r)は普通2~5 μs であるが、制御電流パルスの幅、高さ、負荷電流の大きさ、回路条件により異なる。SCRエレメントは熱時定数がきわめて短いので、点弧時において回路条件を考慮して、順方向電圧の降下速度に留意することが必要な場合も生じてくる。

一度点弧させれば、順電流が I_H 以下とならなければ、通電を休止することはできない。またいったん消弧すれば、エレメント内部の正孔の移動により順方向阻止能力が回復するまで、ある時間が必要である。この時間は通常10~20 μs であり、その外部的パラメータとしては、ジャンクション温度、順電流、回路常数、逆方向および順方向阻止電圧などである。

3. SCRと水銀整流器との比較

SCRが今後利用される各部門には、従来主として水銀整流器(MR)およびサイラトロンが使用されていたが、その大部分はMRであった。ここにSCRとMRの比較を行い両者の相違を検討したものが第1表である。

SCRとMRが本質的に相違していることが一見して認められるかにかにSCRが有利な特長を有しているかわかる。

SCRの特長を列挙すれば次のとおりである。

- (a) 単位容量が小さく、寸法は容量に比例するので、小容量より大容量器まで、また出力電圧も自由に選定できる。
- (b) 低電圧でも好能率である。
- (c) 寸法、重量とも著しく小形、軽量となしうる。

第1表 SCRとMRの比較表

	SCR	MR
1 エレメントの許容電流 (連続)	10, 16, 50(各クラス)	単極風冷形400A/タンク
許容逆電圧	200, 400(各クラス)	6,000 V
寸法重量	* 100×50×100 0.6 kg	450 ϕ ×1,000 200 kg
制御電力/素子	8×10 ⁻⁵ W	10W
**出力(2重星形とする)	18 kW/90 V	3,100 kW/1,300または 1,800 kW/750 V
制御能力(出力/制御電力)	3.9×10 ⁷	5.2×10 ⁴
過負荷容量(電流)	少ない	大きい
***使用可能周波数	7~10 kc	200~300 c/s (特殊形 1~2 kc)
電圧降下(1素子当り)	0.8~1.5 V	18~23 V
効 率	低電圧でも良好	低電圧で不良
最高許容温度	150°C	80°C
寸 法	出力容量に比例	出力電流に比例
付 属 装 置	ゲート制御回路 (トランジスタ) サージアブソーバ	格子制御回路 点弧装置 温度制御装置
温度制御	簡単 小形	複雑 大形
取付制限	不要 なし	必要 水平に据付けること

* SCRは50Aエレメントを示す(標準冷却片を含む)

** 2重星形結線にて使用電圧の裕度200%とす。6エレメントおよび6タンク構成

*** インバータとして使用する場合の許容最高周波数

(d) 保守は付属装置が完全に静止器であるとともに、温度制御不要のため、非常に簡単となる。

(e) 使用周波数がかなり高く取れ、かつ容量の選択が自由なので、高周波電源として大幅な利用が期待される。

(f) エレメントの量産に伴い、半導体整流器と同様大幅なコスト低減が可能である。

ゆえに制御各機器の無接点、静止化の傾向と相まって、電力用変換器から小は静止スイッチに至るまでSCRの大々的な使用が予想される。

4. SCR応用の諸例

SCR応用については、その制御性能、および特性よりいろいろな方式が考えられる。その主たるものを列挙すれば次のとおりである。

4.1 AC→DC(AC→DC)

交流電力を直流電力に変換して、かつその出力電圧を制御する応用部門である。その主たるものを第2表に示す。まず最初に使用されるものとして定電圧電源(電池充電装置を含む)および励磁機と思われる。電動機運転用としては最初、小形モートル(たとえば工作機用)より開始され、大容量エレメントの完成を待って、主電動機運転用に利用されるであろう。

4.2 AC→DC→ACの利用

この方式はいずれもSCRをインバータとして利用するところに特長がある。SCRは、制御電力小さいこと、許容周波数高いこと、容量の選定が自由なことを活用して、インバータとしての使用が非常に各方面多岐にわたるものと判断される。運転周波数を上げることによりトランス、リアクトルの寸法の切詰りが可能となるので、比較的周波数を高くとる応用が多いであろう。その代表例を第3表に示した。まず最初に使われるものとして蛍光灯電源などであり、次に中容量のDC-DCコンバータであろう。

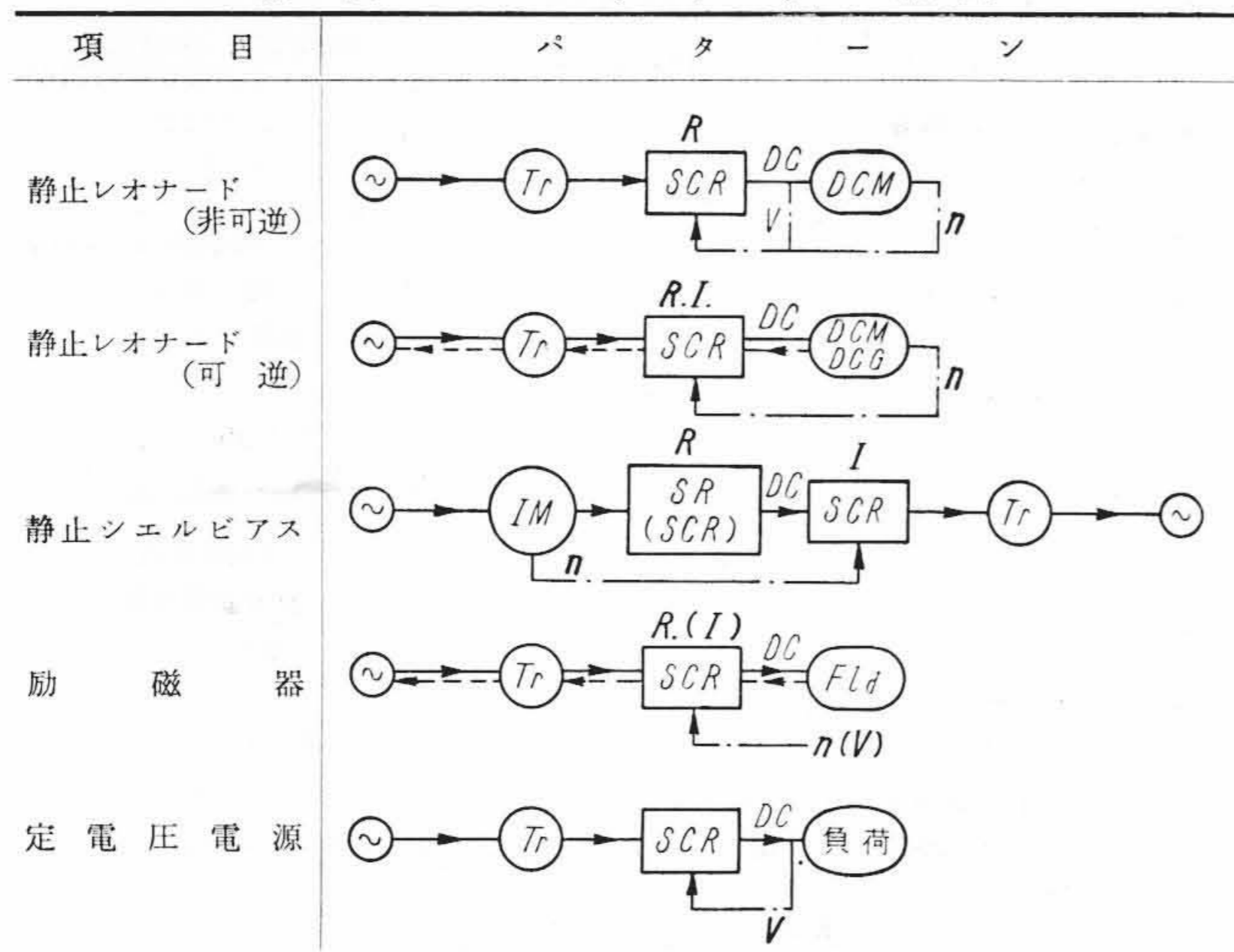
4.3 スイッチ作用の利用

SCRのスイッチ作用を主体とした応用については、目下無接点化の傾向にかんがみ、静止スイッチを主体に小形SCR(あるいはSiトランジスタ)が多く使用されるであろう。その代表例としては次のものがある。

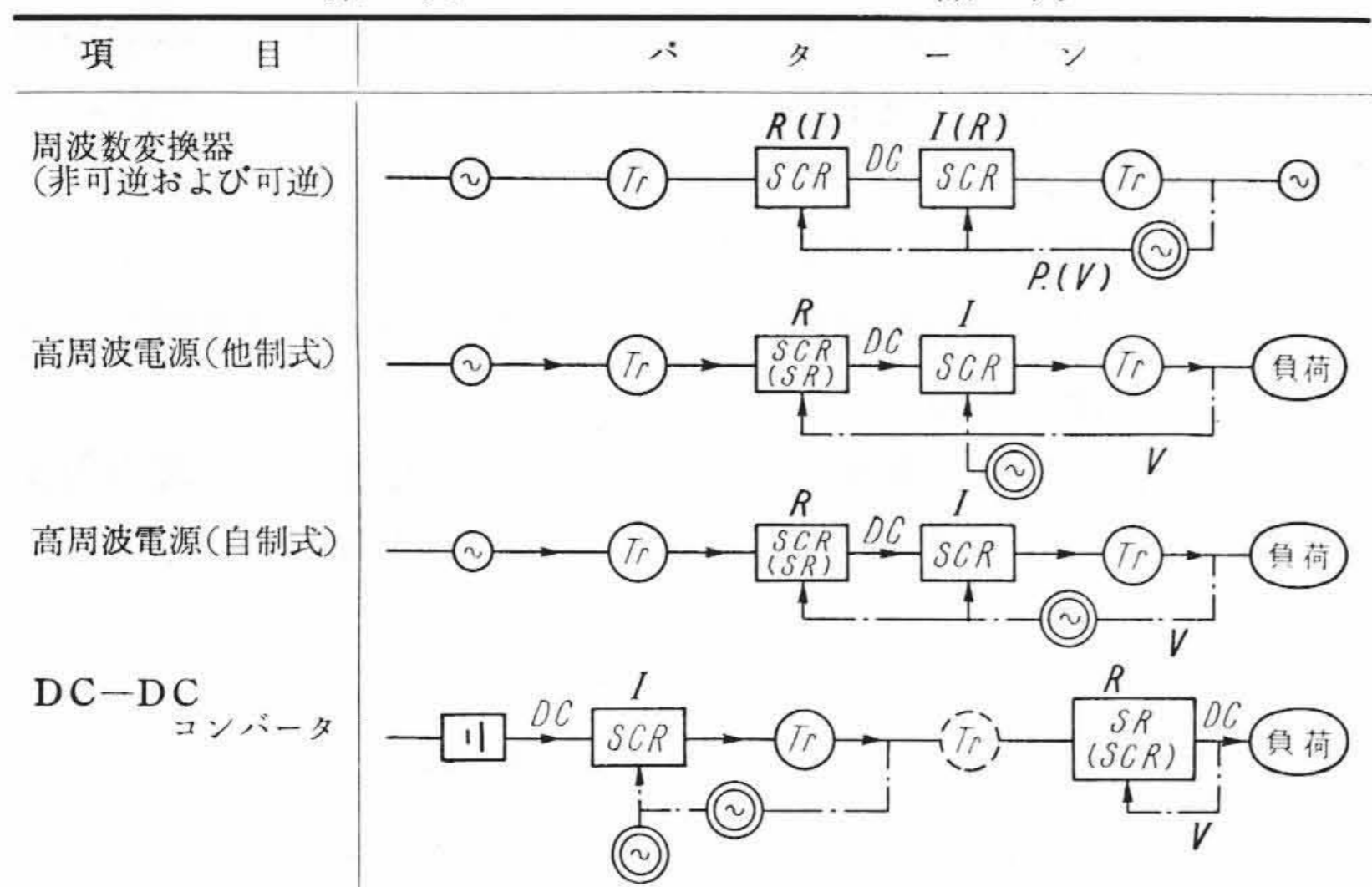
- (i) 逆並列接続にて電圧制御による調光装置、熔接機回路

- (ii) スイッチ作用を利用した無接点接触器, およびサージアブソーバ
- (iii) 増幅作用を利用した磁気増幅器の代用

第2表 AC→DC (AC⇄DC) の諸例



第3表 AC→DC→AC の諸例



第2表, 第3表の記号表

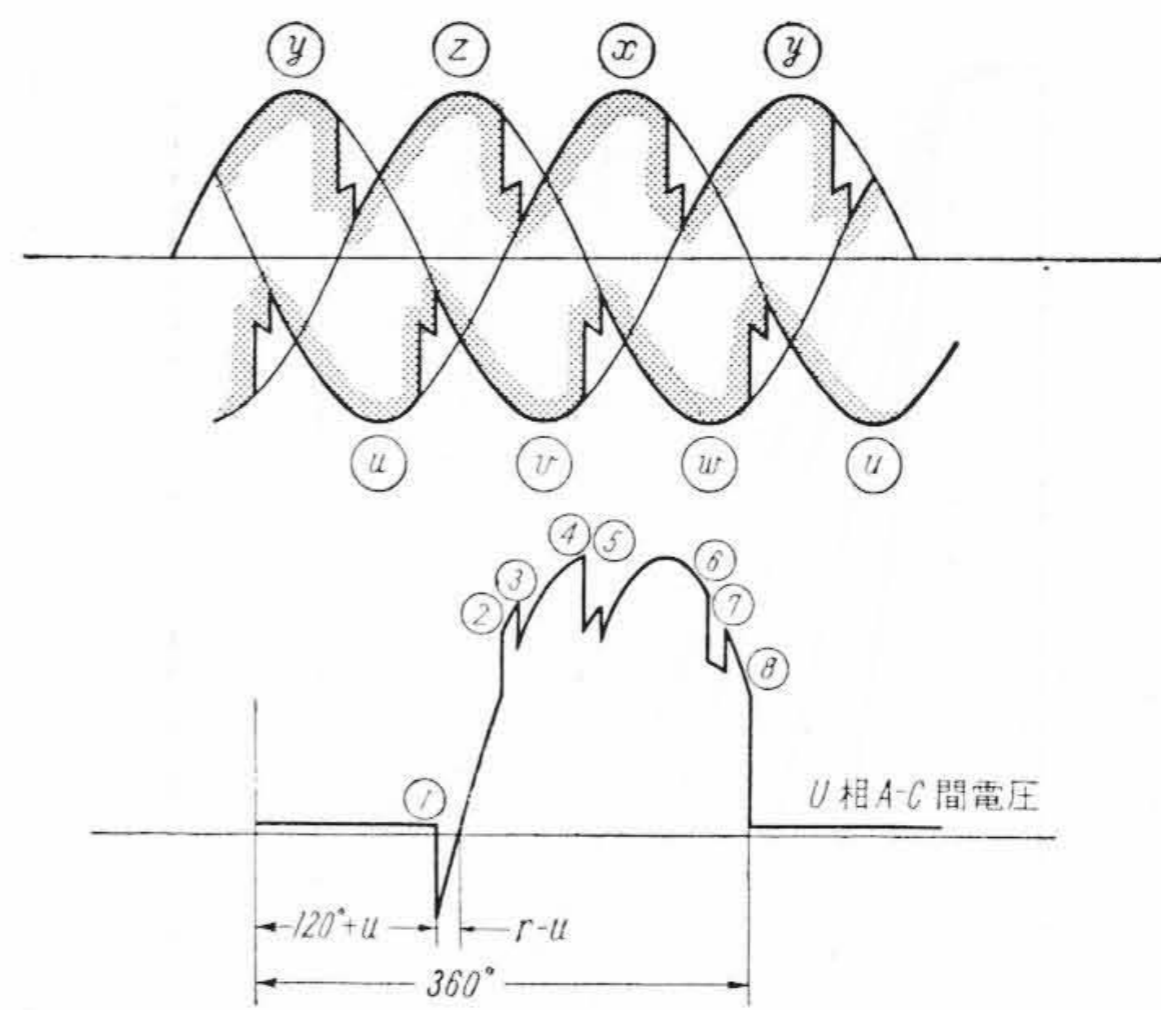
- | | | | |
|--|-----------------------|--|--------------|
| | 交流電源 | | 電力の方向 |
| | 制御極用電源 | | 可逆運転時電力の方向 |
| | 変圧器 | | 回御系(フィードバック) |
| | 制御極付シリコン整流器 | | 回転数検出 |
| | シリコン整流器または制御極付シリコン整流器 | | V 電圧検出 |
| | 直流電動機(Gは発電機) | | P 電力検出 |
| | 界磁コイル | | R 順変換装置として運転 |
| | | | I 逆変換装置として運転 |

5. SCR応用についての問題点および解決方法

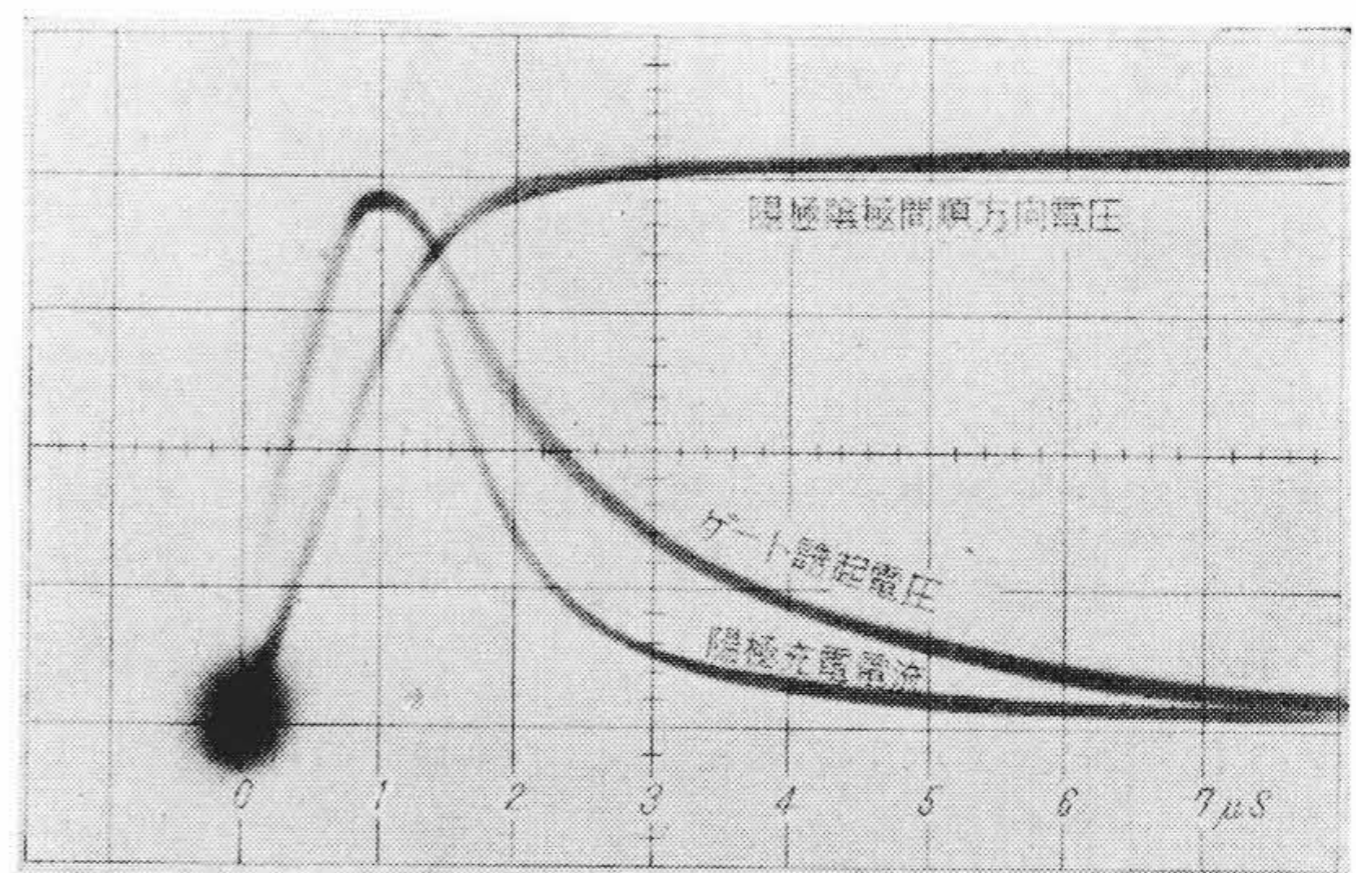
SCRを応用する場合, エレメントの諸特性を考慮して主回路の計画, 制御回路の構成を検討しなければならない。日立製作所ではこの問題につき, 逐一検討してその問題点を解決した。

5.1 ブレークオーバー電圧

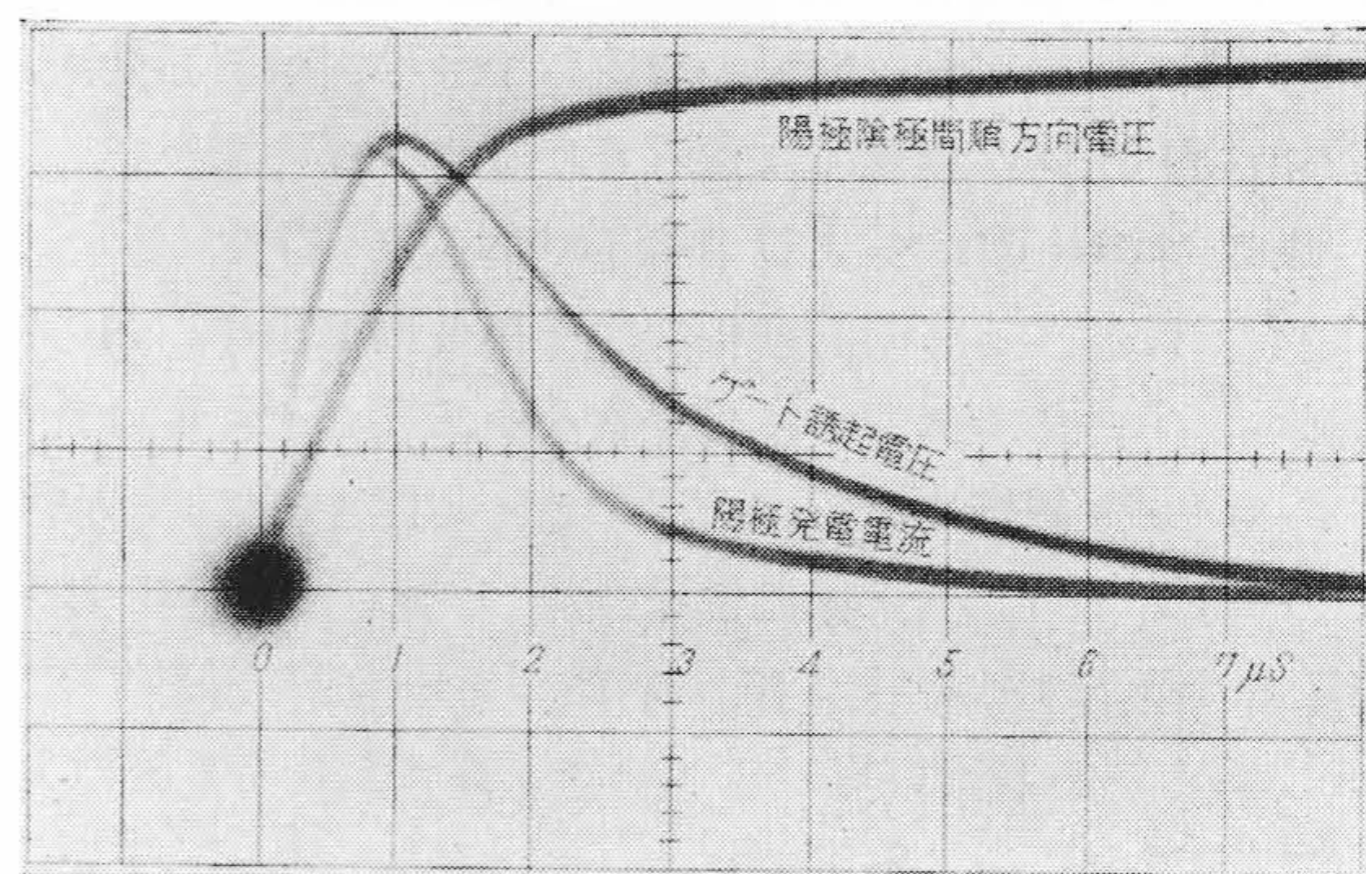
ゲートに電流を流さなくとも, 順方向電圧が V_{BO} をこえると阻止状態より「ON」の状態となることは前述した。しかしこの場合では, 逆電圧の場合と異なり, 印加電圧がある値以内でしかも順電流を定格値以内におさえれば素子が破壊する心配はない。ただしゲートにより点弧遅れ角を制御する場合はゲート電流零でブレークオーバーさ



第4図 3相インバータにおける陽極-陰極間電圧波形



(a)



(b)

1目盛 陽極陰極間電圧 50V
ゲート誘起電圧 0.1V
陽極充電電流 2.5mA

第5図 他相転流時に誘起される充電電流およびゲート電圧

れることは制御不能を意味し, インバータ応用では転流不能となるから, 回路条件を十分考慮して適当な V_{BO} 定格の素子を選択する必要がある。また素子を数個直列にして使用する場合は定常時過渡時ともに順電圧を平均して分担するように適当な並列抵抗およびCRダンピング回路を挿入する。

なお V_{BO} は温度によって変化するが, さらに順電圧の変化率 dV/dt によっても変化する。これについては次項に詳しく述べる。

またあまり大きな制御角範囲を必要としない順変換装置では電圧定格の低い SCR と SR とを直列にして逆電圧耐量を上げる方式も使用される。

5.2 転流時の問題

点弧位相を制御する SCR にとって, SR 以上に転流時の異常電圧が逆方向ばかりでなく順方向に対しても重要な問題となる。

通流期間を終わって逆電圧を受ける際, SCR はホール蓄積効果のため, ただちに逆電圧を阻止することができず数 μ 秒の間相間短絡状態となり大きな逆流が流れ蓄積されたホールが拡散されるに従い逆電圧阻止能力を回復していく。この回復時間はきわめて短いため逆

流の di/dt および電源の漏えいリアクタンスで決まる大きな電圧を発生する。ことに SCR では点弧位相を制御するため本来の飛躍逆電圧にこれが重畳されるのできわめて過酷となる場合が多い。

次にたとえば3相ブリッジ方式の他励インバータでは SCR の順方向阻止電圧波形は第4図のとおりになり②③および⑥⑦は他極群の転流時に現われる部分である。②および⑦で順方向電圧が急激に立ち上るためその時の dV/dt が非常に大きいと、 dV/dt による充電電流が SCR をブレイクオーバさせるに十分な値となる。第5図(a)(b)に他相転流時に誘起される充電電流およびゲート電圧の実験結果を示す。この充電電流は第5図(a)(b)にみられるとおりほぼ順方向電圧の立ち上り dV/dt に比例するのでこの dV/dt によるブレイクオーバの防止ため SCR の陽極陰極間に C と R から成るダンピング回路を設けてやればよい。またこの dV/dt によって SCR のゲートにも電圧が誘起されるがこれも dV/dt に比例するので上述の CR でおさえることができた。

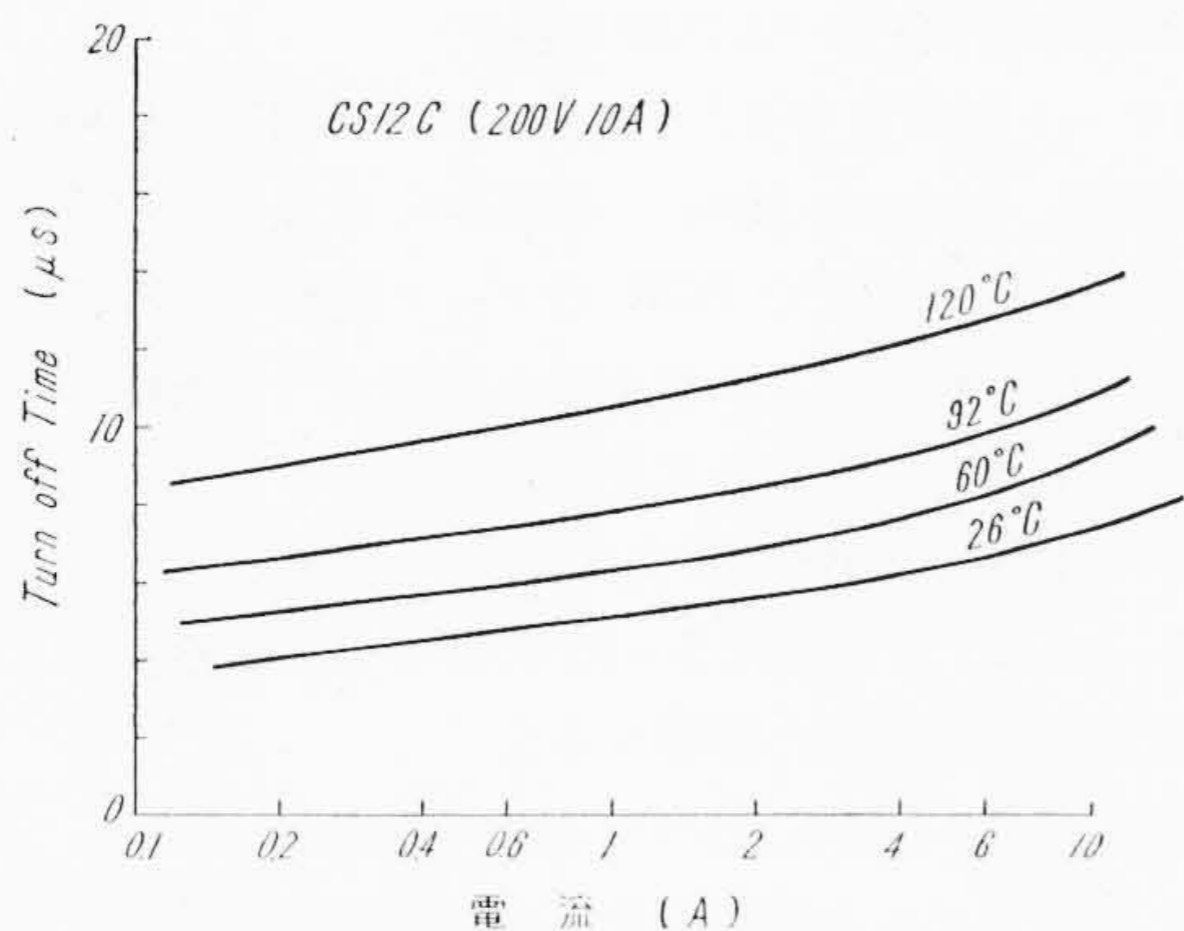
5.3 周波数の上限

SCR をインバータ回路に用いる場合、第4図からわかるように、通電していた SCR が転流作用により他の相の SCR に電流が流れるようになって後、その回路定数または制御角によって定まる一定時間、すなわち第4図の電気角 $(\gamma-u)^\circ$ だけ経過するとこの SCR に順電圧が印加される。このとき SCR は blocking の状態になければならない。SCR が通電終了後からふたたび順方向電圧を阻止しうる状態にもどるまでの時間を turn-off time と称する。(これは水銀整流器の場合の消イオン時間に担当する) 一般に数 $\mu s \sim 20 \mu s$ 程度であり、温度が高いほど、いままで通電していた順電流が大きいほど長くなる。この時間は比較的短いので高い周波数のインバータ回路に用いうる。しかし第4図の $\gamma-u$ は turn-off time より大きくしなければならない。ここに SCR インバータの周波数限界がある。turn-off time は上記の説明からわかるとおり、SCR の一つの特長である高周波インバータに用いる場合に特に問題となる。

そこで turn-off タイムを測定した。測定法としては1サイクルだけ単相自励式抵抗インバータの動作を行わせて、その転流が可能であるか否かによって、周波数と制御角 γ から (これは実験回路により定まり SCR には無関係である) turn-off タイムを求める方法を採用した。第6図は測定結果の一例を示す。この図におけるパラメータとして用いた温度は実験のとき SCR を恒温槽中で十分な時間保って平衡状態にしたときの温度で、turn-off タイム測定のために通電することによってもたらされるジャンクション部の温度上昇は、計算の結果電流の大きいところで $2^\circ C$ 程度であるから省略した。

5.4 増幅器および検出回路の問題

SCRの整流回路はその性能からほとんどの場合自動制御系に使用される。この場合 SCR のゲート制御用として6.1でのべるような



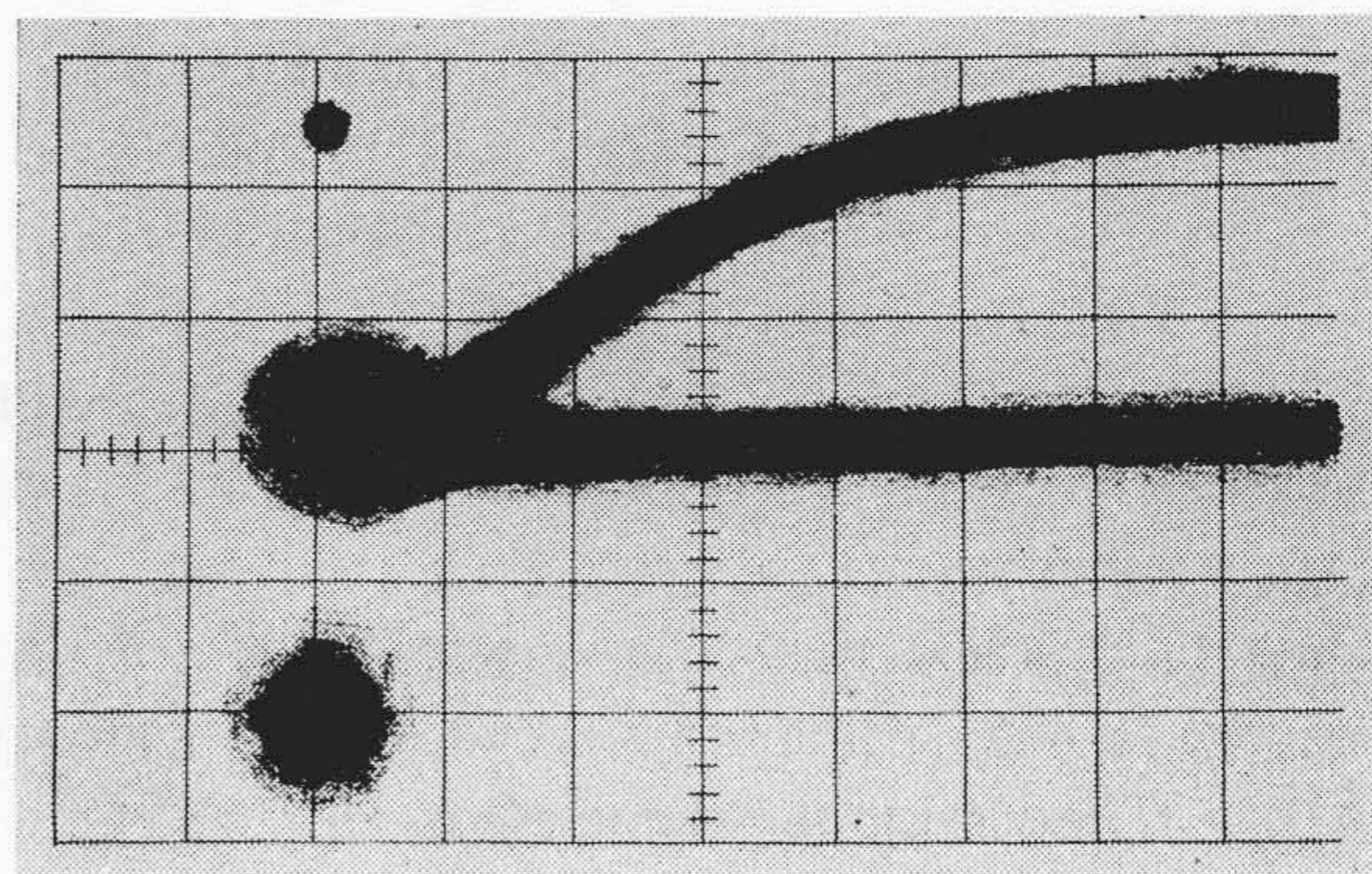
第6図 turn-off タイムの測定結果

自働パルス移相器 (以下 APPS と称す) またはこれと同種のものを使用することが多い。これらの移相器へ信号を送るため、通常検出回路との間に増幅器を設ける。水銀整流器などの場合は磁気増幅器がもっぱら使用されたのであるが、SCR では制御電力がきわめて小さいのと、セット全体を小形軽量とするため SCR 回路ではトランジスタ増幅器 (TRS 増幅器) を用いることが多い。6.1 でのべる APPS を使用した場合この増幅器は直流増幅器でなければならない。そのため温度特性が重要となる。ここでは TRS 増幅器について言及することは省略する。この増幅器と APPS を組合わせた位相制御回路は、検出回路の電圧によって、移相動作をする。しかるに SCR 出力電圧は、その動作特性から明らかのように、大きなリップル電圧を含む。そのためこの ripple を吸収する回路、すなわち低減波器を検出回路と増幅器の間に挿入する必要を生ずる。特に増幅器が電圧増幅形である TRS を利用する場合特に必要である。リップル吸収のため、蓄電器を並列に結べば簡単であるが、この場合、応答速度が悪くなり本来の性能を犠牲にする結果となってくる。

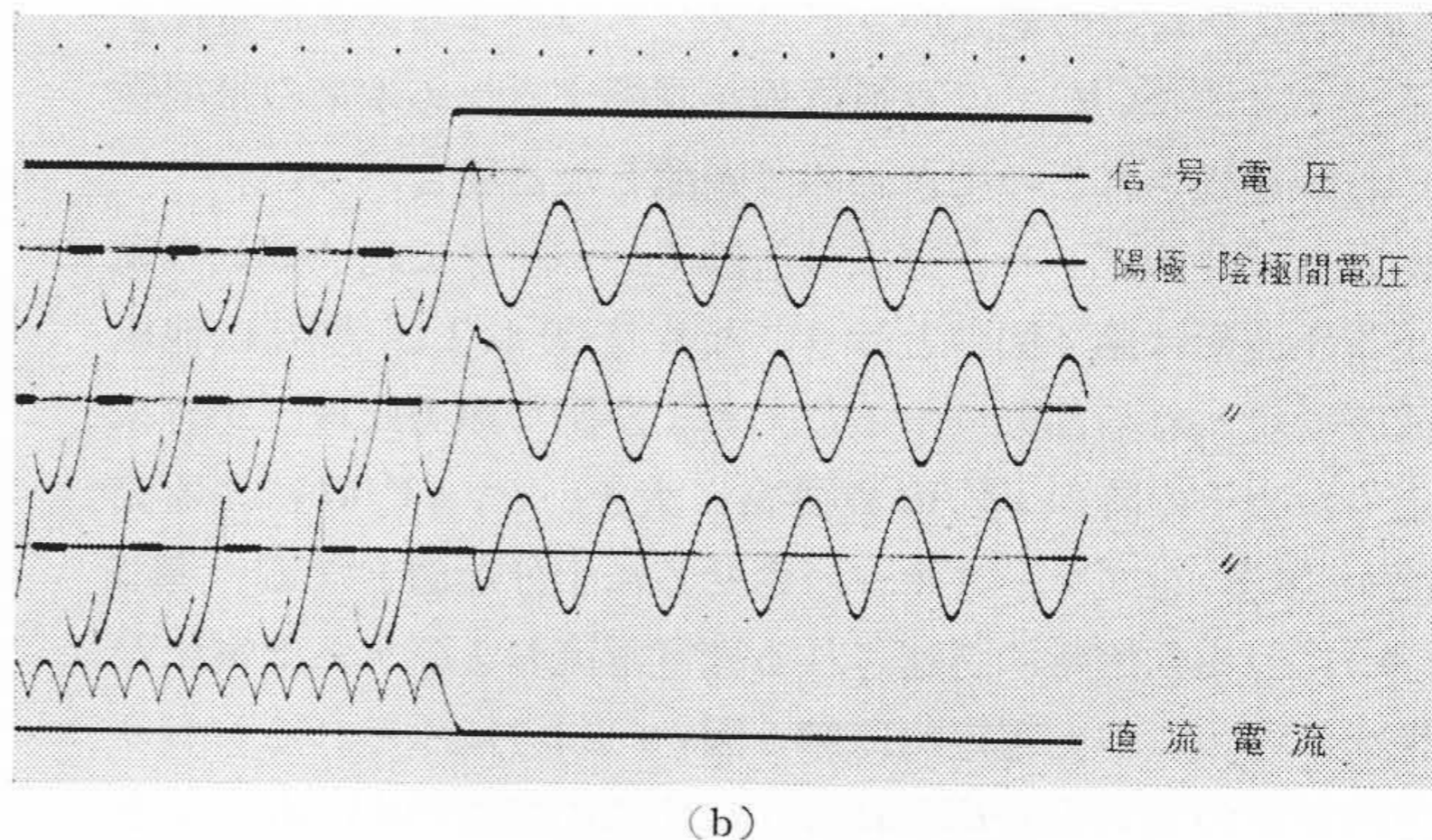
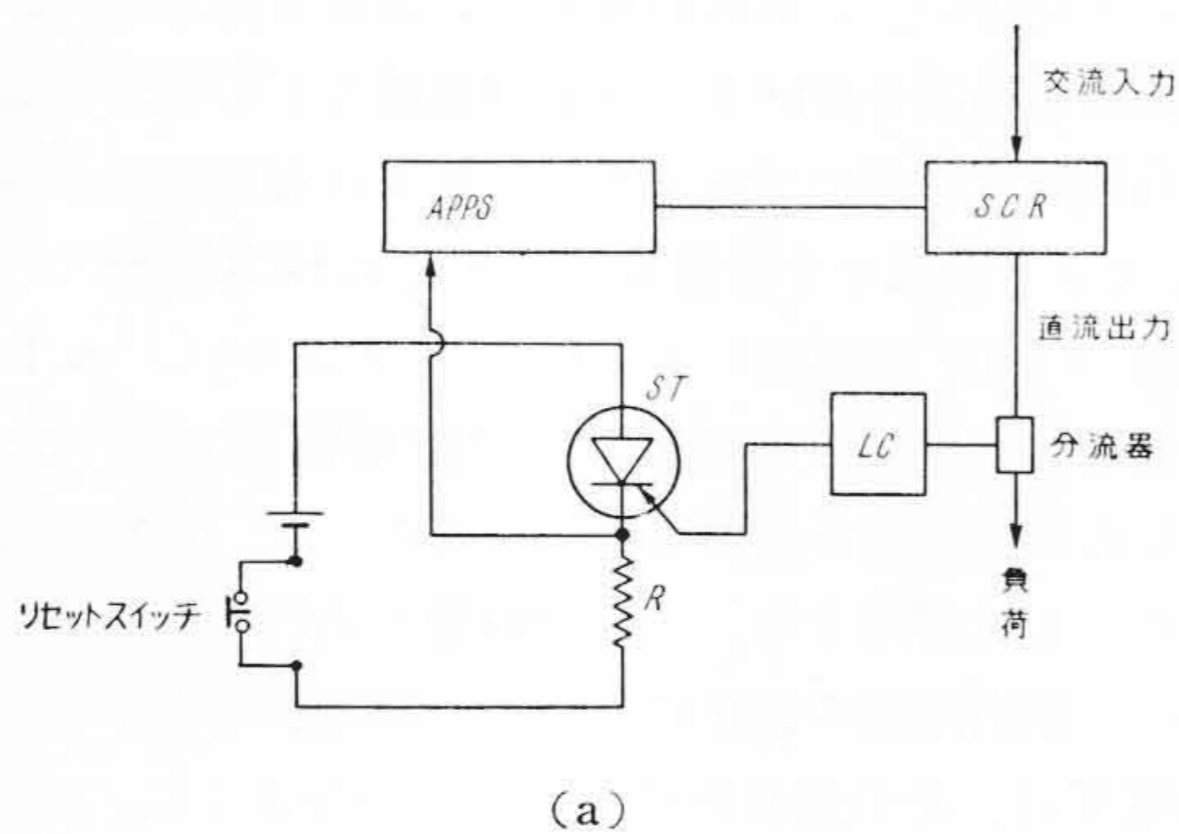
たとえば6.5でのべる ED-71 交流電気機関車の水銀整流器を SCR を用いて制御する場合、単相回路であるため、特にリップルは大きく、かつ処理すべきリップル周波数は 100 c/s にてその処理が最も困難であった。直流電圧(信号電圧)20~30Vの時、リップル電圧の波高値は $\pm 300V$ 以上になる。このような電圧を低減波器によりしかも時間遅れ少なく伝達しなければならない。この点を考慮して回路を設計した結果50~に対する第二高調波(単相整流回路のリップルの基本波)の減衰量 50~60 db, rise time(90%) 30~40 μs の回路を試作し後述のED-71ロコの制御の実験を行った。第7図には検出回路についての実験結果を示す。多相整流回路ではリップルは比較的小さくなり、かつ基本リップル周波数は高くなるので、その処理は比較的簡単である。(単相回路に比較して、3相ブリッジ結線ではリップル電圧 25% リップル周波数 3倍となる)。

5.5 ジャンクション温度の制限

普通のSRと同様にジャンクション温度に制限がある。正規の運転時はいかなる条件のもとにもこの温度限界を絶対にこえてはならない。したがって装置設計に当っては負荷の性質、過負荷の有無、その時間、周囲温度、冷却方式、欠相運転の可能性、および並列接続した場合の負荷分担の不均衡などを考慮し SCR のジャンクションスタッド、およびスタッド周囲(冷却片が含まれる)の熱抵抗と SCR 内部の発生熱とからジャンクション一周の温度上昇を推定しこれに十分余裕を取りジャンクション温度を最大許容温度定格内におさえる。SCR 発生熱には通流時の順方向電圧降下によるもの、逆電圧期間中の電力損失、turn-on 時の開閉損失およびゲート電流による損失などがあるが、通常商用周波数での応用では順方向電圧降下による損失のみ考えれば十分である。運転周波数が高くなると



第7図 フィルタ回路の応答度オシログラム



第8図 事故電流遮断のオシログラム

turn-on 時の開閉損失も問題となる。また一般に半導体整流器は他の電気機器に比べて過電流耐量の低いことは、一にジャンクションの熱時定数が短いことに基因する。そこで過負荷容量については1サイクル、場合によれば1サイクル以内の過負荷で全容量が決定される場合が少なくない。ご参考までに大略の熱的数値を示す。

(a) 熱時定数

ジャンクション	数ミリ秒
冷却片 (自然通風)	10~15分
冷却片 (強制通風)	2~3分

(b) 熱抵抗の割合 周温 40°C 定格点

自然通風	ジャンクション-スタッド=1 スタッド冷却片-空気=3~4
強制通風	ジャンクション-スタッド=1 スタッド冷却片-空気=1~2

5.6 耐衝撃性

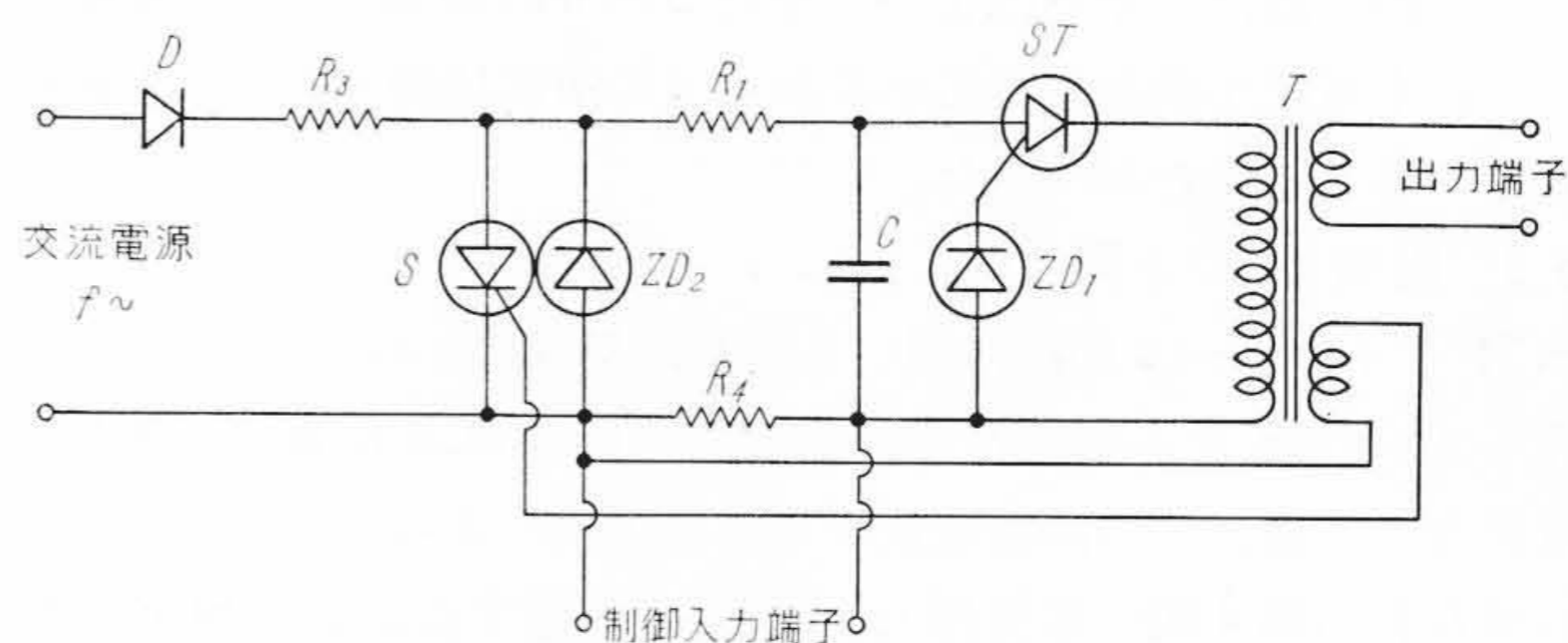
一般に半導体整流素子は機械的衝撃振動にもきわめてがんじょうであり、取付角度の制限がないので車両、クレーンほか過酷な使用条件を要求する用途に使われている。日立製作所では6.1で述べる自働移相器を含めたSCRセットにて1,000gの衝撃試験を行い、なんらの特性劣化をもみず完全に耐えることが確認した。今後こういう用途にも信頼して使用されるものと思う。

5.7 SCRの保護回路

普通のSRでも経験しているように、SCRを用いた整流回路において、SCRの性質上、熱的時定数がきわめて短いので、短時間過負荷耐量が比較的小さい。そのため過電流保護に対しては、十分な考慮を払わねばならない。

(a) フェーズによる保護：高速溶断特性をもつフェーズを使用する方法であり、これはSRやGRにおいて論ぜられ、多くの実験結果が報ぜられているので省略する。

(b) ゲート回路を利用する方法：第8図は後記のAPPSによってSCRのゲート制御を行っている整流回路の過電流保護方式の例を示す。直流側にて過電流を検出し、増幅して設定値以上の値になるとパルスが発生する回路LCを設け、このパルス電圧によってスイッチングトランジスタSTが働き、これが導電状態になる。したがってSTに直列に入った抵抗Rの両端に電圧を生ずる。この電圧をAPPS、第9図のSのゲートに印加すれば、後述のAPPSの働作機構からわかるようにAPPSのパルスが消滅する。この動作は過電流通電の時点ではほとんど時間遅れなく完了する。そのため現在通電中のSCRからほかの相への転流が不能となり、負荷の回路定数により定まる状態で電流は減少してゆく。6相整流回路では1/6サイクルの時間の後には略電流は0になるであろう。第9図は実験結果の一例を示すオシログラムであり、インダクタンス負荷のため電流0になる時間が多少延びているが、抵抗負荷の



第9図 自働パルス移相器の結線図

場合は1/6サイクル以内で0になっている。

この状態はスイッチングトランジスタSTの主回路を断にしないかぎりつづくから、図のリセットスイッチでこの回路を断とし、再出発せしめる。この回路を種々の応用に使用しSCRの過電流保護に利用し、良好な結果を得ている。

一方、電圧の保護には本体およびゲート回路がある。本体については、外雷および開閉サージが問題であるが、その方式はシリコン整流器と同様である。すなわち

(c) 外雷 アレスタによる保護を主体とするが、実質上大した問題はない。

(d) 開閉サージ CRよりなるサージアブソーバを利用することにより開閉サージを低減する。通常200%以内におさえられる。

ゲート回路については、第9図に示されるとおり、過電圧に対してはpnpnトランジスタ回路、逆電圧に関してはゲート回路に挿入されたダイオードにより完全に防止される。

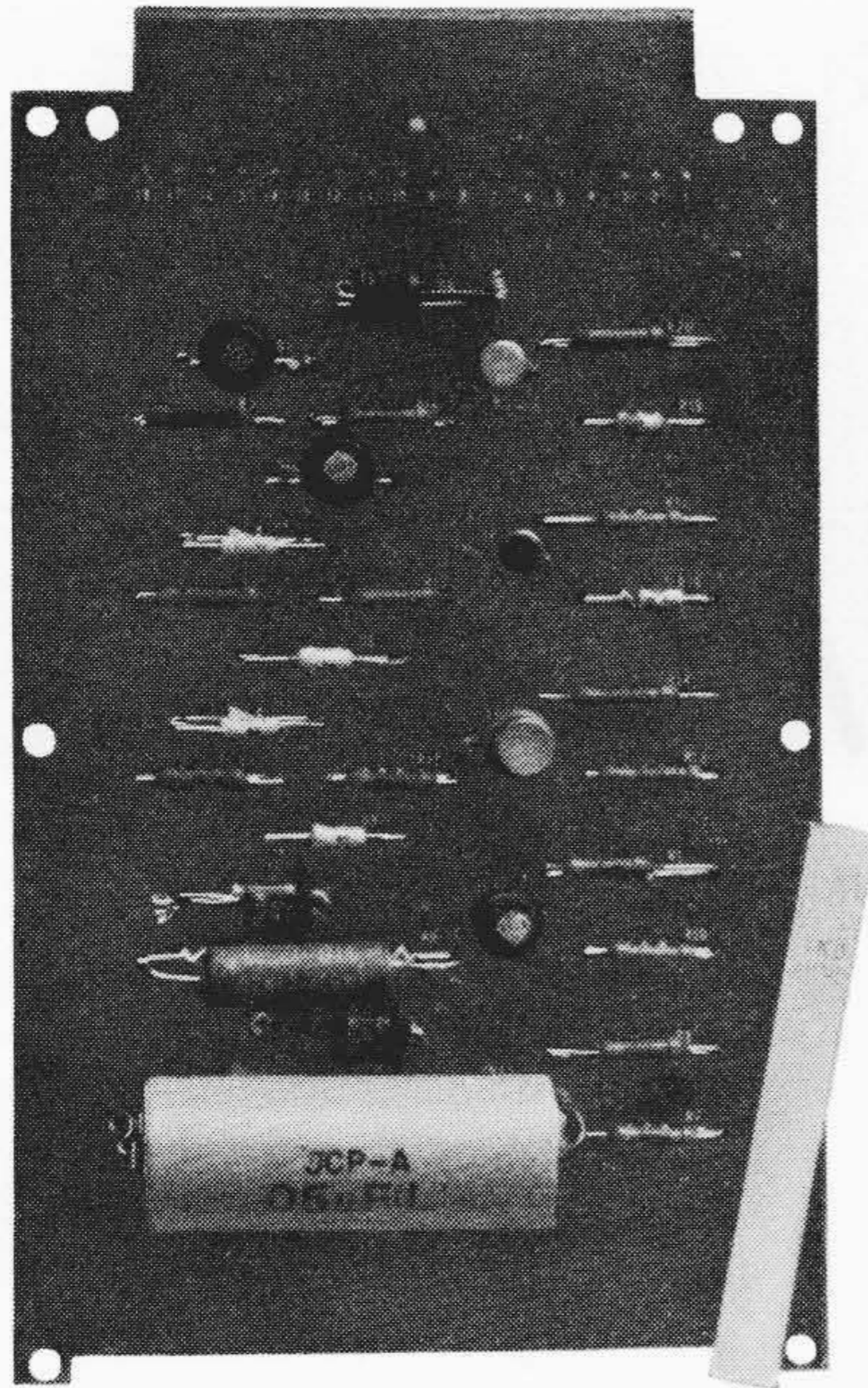
6. SCRの応用実施例

日立製作所では5.で述べる基礎実験をもとにして種々のSCR応用機器を開発した。以下そのおもなものを述べる。

6.1 APPS回路 (自働パルス移相器)

SCRのゲート制御をするためには、ゲート電流とV_{B.O.} (ブレイクオーバー電圧)、turn-on timeの関係から立ち上りの急なパルスにするのが望ましい。そこでSCRのゲート制御のためには自働パルス移相器が使用される。この移相器が具備すべき条件は

- (a) 立ち上りの早いパルスが発生すること
- (b) ゲート特性とBreakover特性からわかるようにパルス幅は5~10 μs、波高値は5~10 Vで十分である。
- (c) 温度や電源電圧の影響が少ない
- (d) 交流電源に同期したパルスができること
- (e) 小信号でパルス位相の変化が可能であること、移相範囲が十分大きいこと



第10図 自働パルス移相器

(f) 小形軽量であり、高信頼度であること

これらの諸条件を考慮して二、三の自働パルス移相器を試作し、実験した。そのうち磁気飽和を利用したものについてはその特性および計算法についてすでに述べたので⁽¹⁾、ここでは半導体素子を使用したAPPSの概要をのべる。第9図はその結線図を示し、第10図はAPPSの一相分を示すもので、使用に便利にするため、プリント配線を用い、ジャック式になっている。第9図でSは小形SCRを示しているが、実用の回路において信号入力や必要な電流容量を考慮した結果、PNPとNPN、TRSを組合わせたスイッチング回路を使用しているが、動作説明上は差つかえないので図によりそのパルス発生機構をのべる。交流電圧をダイオードDにより整流し、ゼナーダイオードZD₂と抵抗R₂によって梯形波とする。この電圧でR₂を介してCを充電する。Cの電圧V_cが上昇し、V_c>V_{Z1}(V_{Z1}:ゼナーダイオードZD₁のゼナー電圧)STのエミッタ→ベース→ZD₁に電流が流れる。この電流によりSTはoff→onにスイッチング作用を行い、Cの電荷はST→パルストランスを経て放電される。したがって、出力端子にはCと負荷により定まるパルス波が発生する。このままではまた、R₁からCに充電されることになるので同時に3次巻線からSのゲートにパルスを加えSをon状態にする。かくしてパルス発生と同時にZD₂間は短絡される。そしてSはその電流が0になるまでon状態をつづける。電源電圧の負の期間において電流が0になり、自動的にon→offとなり次のサイクルのはじめにはoffの状態でありまったく同様の動作をくり返す。第11図にその動作説明図を示す。ここでR₃、ZD₂、ZD₁、Sなどの諸特性間には一定の許容範囲があることはいうまでもない。

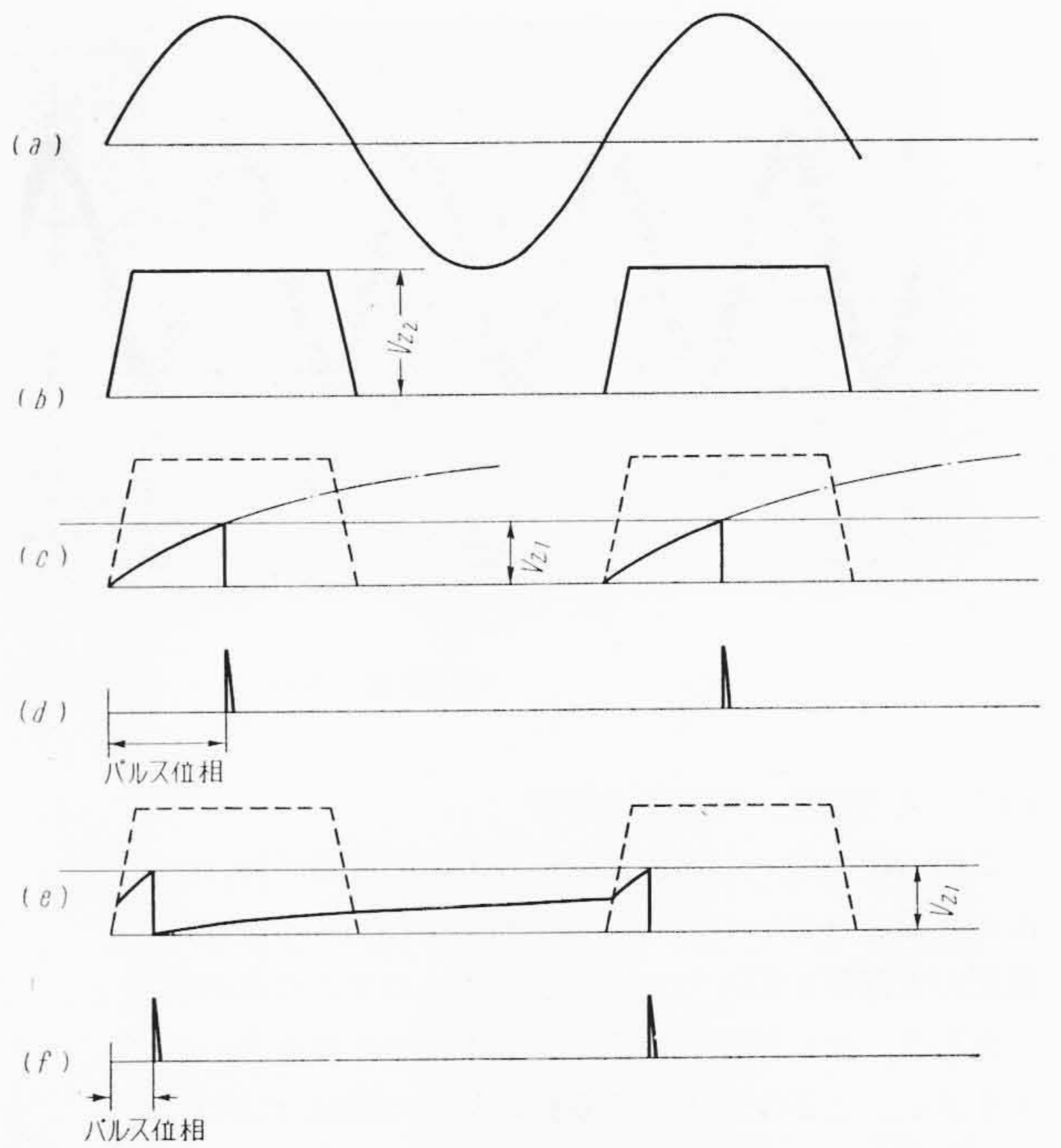
(a) 移相特性

パルス発生位相を変えるためにはC、R、V_{Z2}、V_{Z1}などいずれを変化してもよいのであるが、本例ではR₄の両端に制御電圧を加える方法を採用した。R₄の端子電圧E₄と梯形波電圧の和により充電されることになるから、V_cが一定の電圧V_{Z1}になるまでの時間、したがってパルス発生位相が変化する。

パルス発生位相をαとし、梯形波電圧を矩形波で近似して計算すると

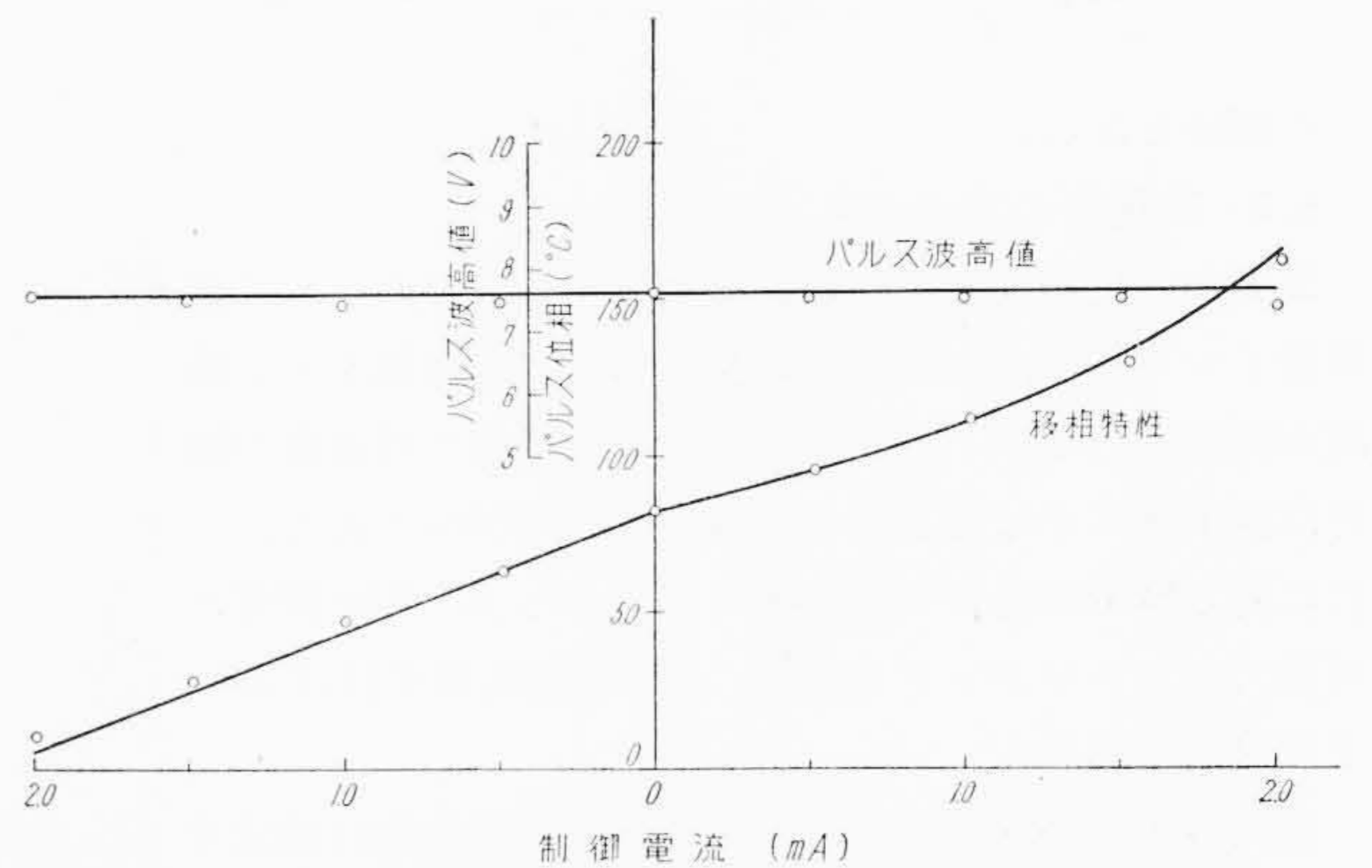
E₄とV_{Z2}が逆極性の場合

$$\alpha = 360 f C R_1 \log \frac{V_{Z2} - E_4}{V_{Z2} - E_4 - V_{Z1}} \dots \dots \dots (1)$$



(a): 電源電圧 (b): 第9図のZD₂端子電圧
(c), (e): 第9図Cの電圧 (d), (f): 出力パルス
(c), (d)は制御電流とV_{Z2}が逆極性の場合
(e), (f)は制御電流とV_{Z2}が同極性の場合

第11図 自働パルス移相器の動作説明図



第12図 自働パルス移相器の移相特性

これに対しE₄とV_{Z2}が同極性の場合ZD₂の電圧が0の場合でもCはE₄によりZD₂、Rを経て充電されることになり、前記の場合とはZD₂に電圧があらわれ充電を開始するときの条件が相異なるため

$$\alpha = 360 f C R_1 \log \frac{V_{Z2}}{V_{Z2} - V_{Z1} - E_4} (1 - e^{-1/RCR_1}) \dots (2)$$

となる。

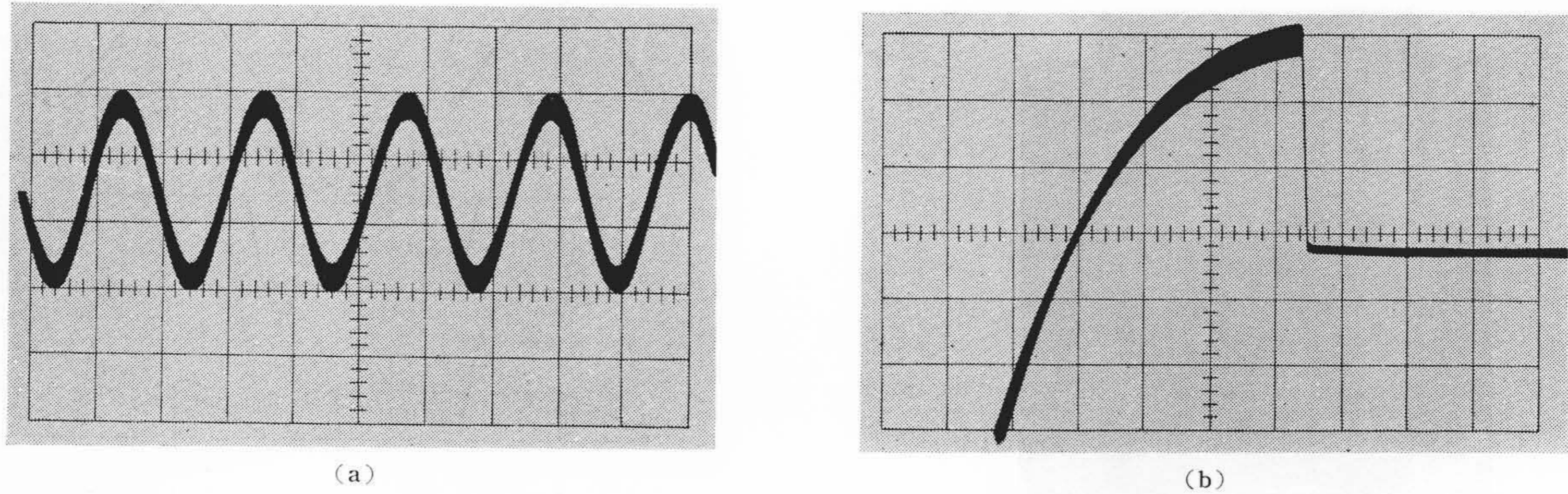
第12図はこの計算結果と実験値とを比較するものである。

(b) 温度特性

このような半導体素子を用いた回路では温度特性が問題となる。これを検討しよう。温度変化dθを与えたとき(1)式から

$$\frac{d\alpha}{d\theta} = \frac{\partial \alpha}{\partial C} \cdot \frac{dC}{d\theta} + \frac{\partial \alpha}{\partial R_1} \cdot \frac{dR_1}{d\theta} + \frac{\partial \alpha}{\partial V_{ZD}} \cdot \frac{dV_{ZD}}{d\theta} \dots (3)$$

である。コンデンサC、抵抗R₁、ゼナーダイオードZD₂、ZD₁の温度特性から計算すると0°Cから50°Cの温度変化において約3.8%となる。これに対し実験結果は約4.2%でほぼ一致する。このようにして温度特性が計算できることは、抵抗、ゼナーダイオードを適当に利用することにより温度特性はさらに改善できることを物語っている。



(a) (b)
第13図 5kcインバータの出力電圧波形および陽極陰極間電圧波形

(c) 入力電圧、周波数の影響

このAPPSの一つの特長は電源電圧の波形にはほとんど影響されないことである。動作からわかるように電圧の大部分をZD₂でカットしているの点自明であろう。また同様の理由で電源電圧の影響もきわめて小さい。±20%電源電圧変動に対し、実験した結果、位相の差は認められなかった。

またこのAPPSは電圧波位相の0からパルス発生点までの時間を定めるものであるから、周波数の変動はそのまま現われ、(1)式からわかるように

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{df}{f} \dots\dots\dots(4)$$

の関係となる。

6.2 高周波インバータ

SCRの応用のうちその特長を発揮するものの一つに高周波インバータがある。水銀整流器の場合は消イオン時間の関係からインバータとして用いる場合の周波数の限界は第1表に示したとおり、通常200~300Hz程度である。これに対しSCRの場合 turn-off タイムから 5~7 kc程度が可能でありエレメントを選び、かつ容量低減すれば20kcまで可能である。

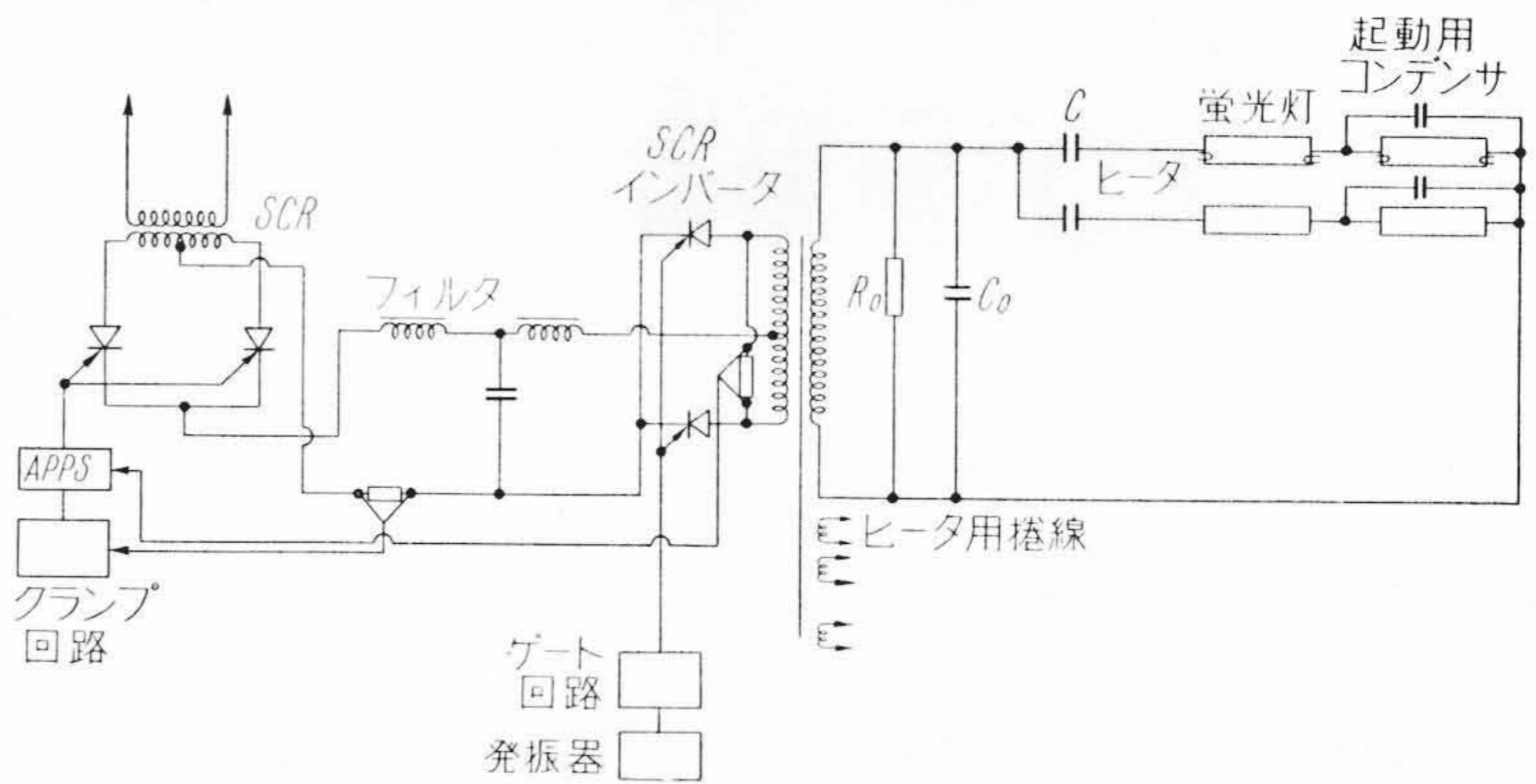
高周波インバータの一例として5kc単相他制自励式インバータを試作し種々検討を加えた。結線図は次に示す第14図と同様である。このインバータの回路定数の決定には商用周波数のときと同様に行い、ほぼ実測結果を満足した。細部については検討を要する点もあるがここでは省略する。

この回路で直流側に転流コンデンサを入れないで交流側に入れているが、この場合、一般に高周波用の変圧器は転流リアクタンスが大きくなるので、特に重り角について検討が必要となる。またコンデンサを直流側に入れる場合は、転流時にコンデンサの放電電流が大きくなるので、この尖頭値をその許容値以内にするよう回路定数を選定する必要がある。

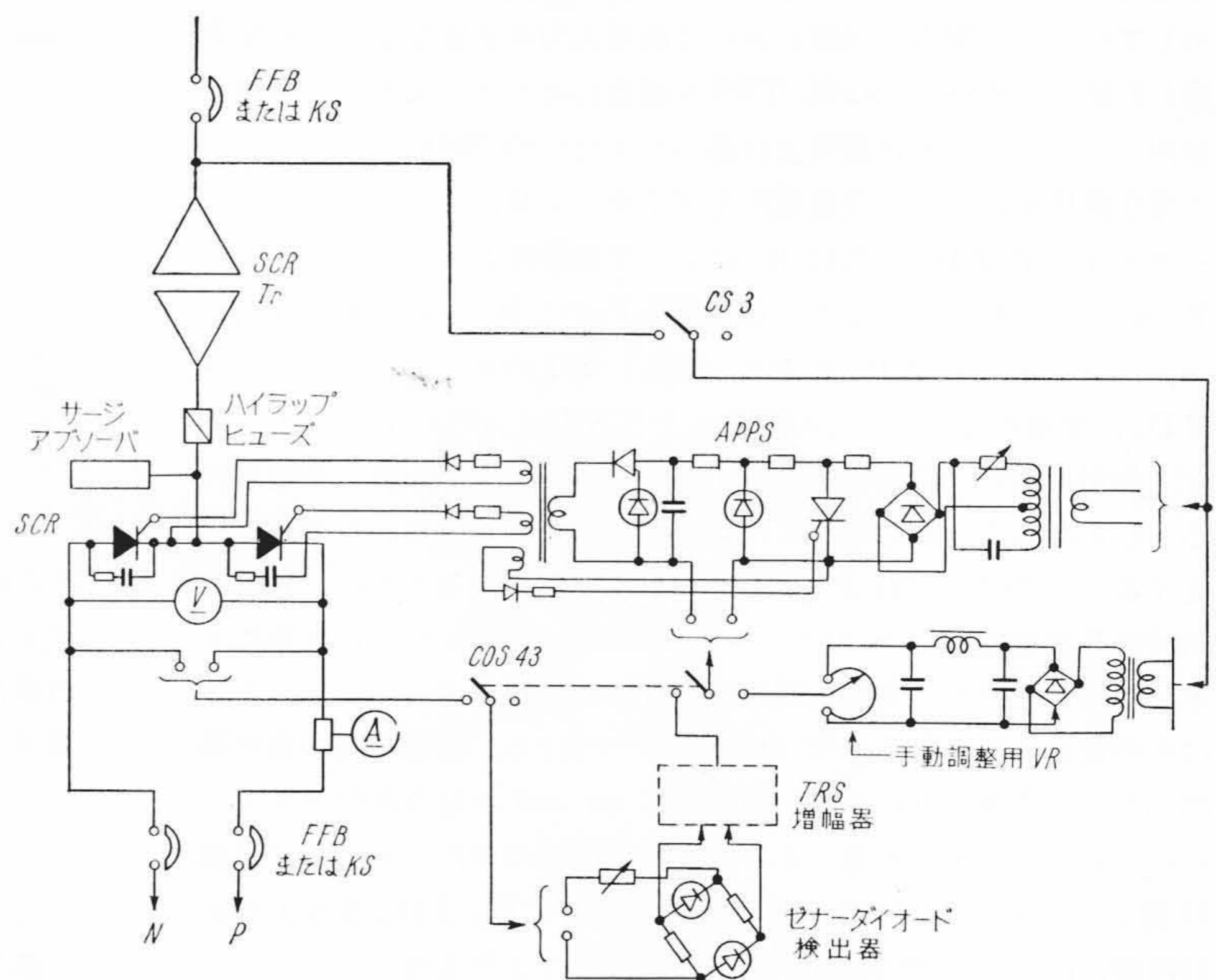
また負荷がキャパシティブであったり、交流側にCを入れた場合には、転流時にC、変圧器のリアクタンス、SCRによる閉回路に振動電流が流れることになる。回路定数の選定にはこの点を十分考慮しなければならない。第13図は試作5kc、1kWインバータにおける出力電圧および陽極陰極間電圧波形を示す。

6.3 蛍光灯用電源

高周波インバータとしての利用として、蛍光灯用電源がある。蛍光灯電源に高周波を利用すれば、ランプ効率が約20%向上する。インバータの方式としては他制自励式となる。その回路を第14図



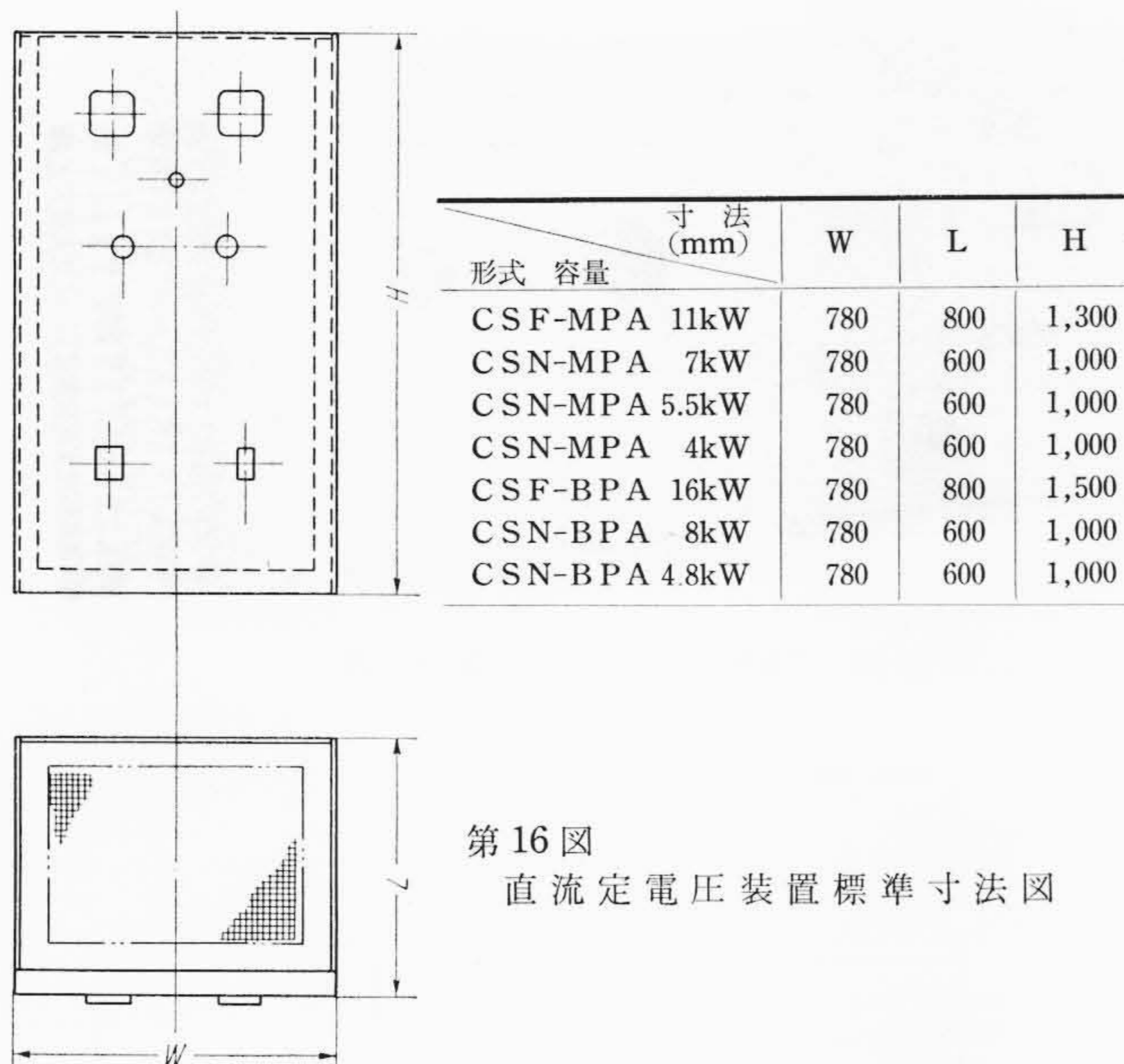
第14図 蛍光灯用電源回路接続図



第15図 直流定電圧装置回路接続図

に示す。転流コンデンサとして利用されるコンデンサは同時に蛍光灯のバラストとして使用される。並列インバータとしての問題点は、起動および負荷変動と直流側リップルの処理(出力波形がリップルで変調される)である。

回路構成上、蛍光灯のヒータ回路および固定抵抗器(R₀)と起動用コンデンサ(C₀)を利用することにより安定な起動を計るとともに、負荷変動(入力電圧変動)を入力側SCRの電圧制御により、出力側の定電圧特性を確保する。また事故時にはクランプ回路を利用して1~で事故電流を遮断する(5.7の方式第8図)。



第16図 直流定電圧装置標準寸法図

第4表 直流定電圧装置標準仕様

形式	直流側出力	定格	用途	備考
CSF-MPA	11kW 110V 100A	100% 連続	小形直流電動機、電源	直流電動機のレオナード起動が可能
CSN-MPA	7kW 110V 63A	100% 連続	その他一般定電圧電源	55V~110Vの任意の電圧でAVR
CSN-MPA	5.5kW 110V 50A	200% 1min		
CSN-MPA	4kW 110V 36A			
CSF-BPA	16kW 160V 100A	100% 連続	蓄電池充電用	110VでAVR. 90V~160Vまで手動調整可能
CSN-BPA	8kW 160V 50A			
CSN-BPA	4.8kW 160V 30A			

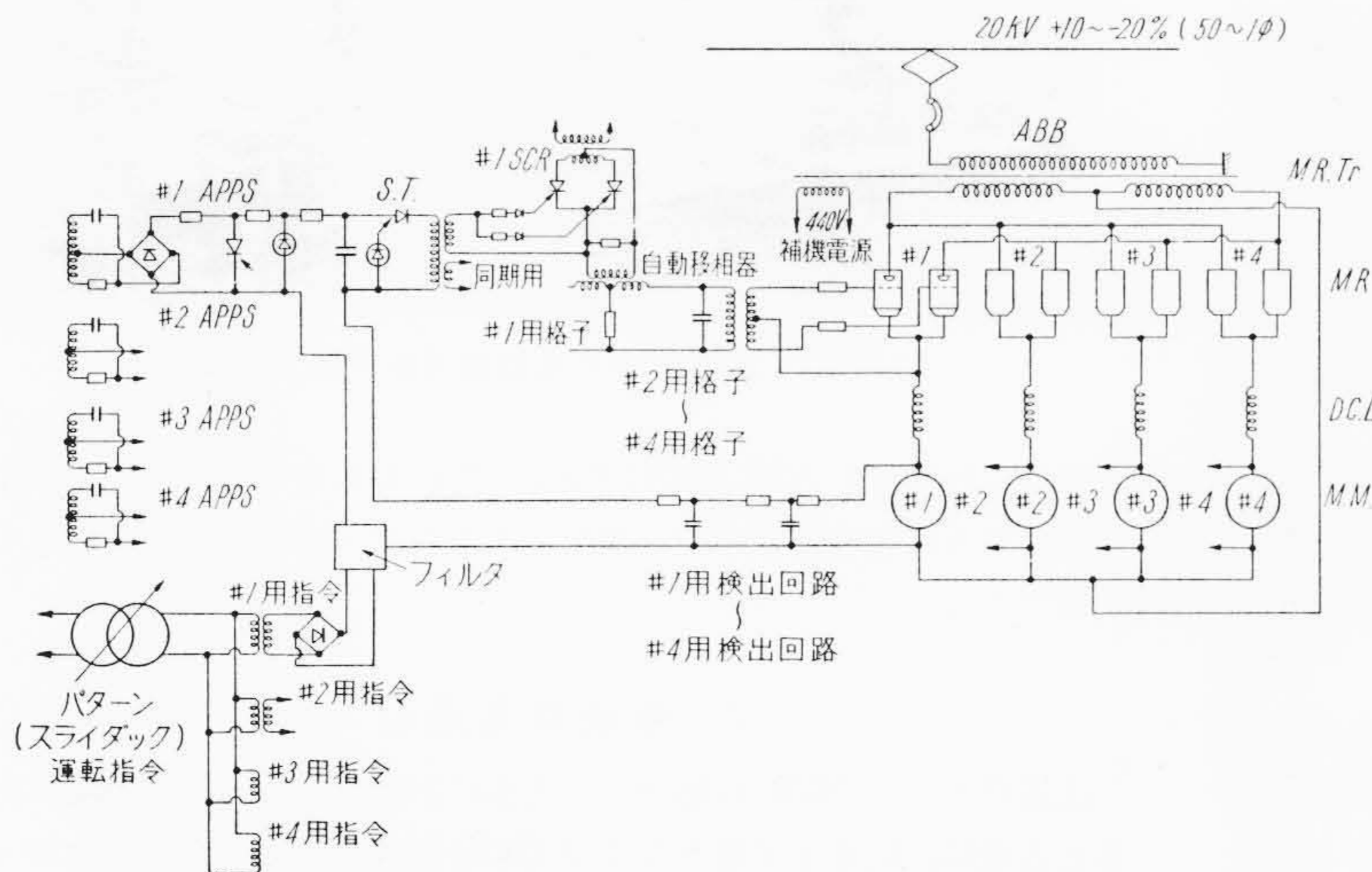
リップルの処理に関しては、負荷電流の変動および入力SCR側の制御率により、広範囲にわたって考慮する必要がある。この対策としては、フィルタ回路に非直線性を利用することにより解決した(本方式は特許出願中)。

本装置は日立製作所製CR12C(16A 200V)を利用し、出力500W, 5kcである。

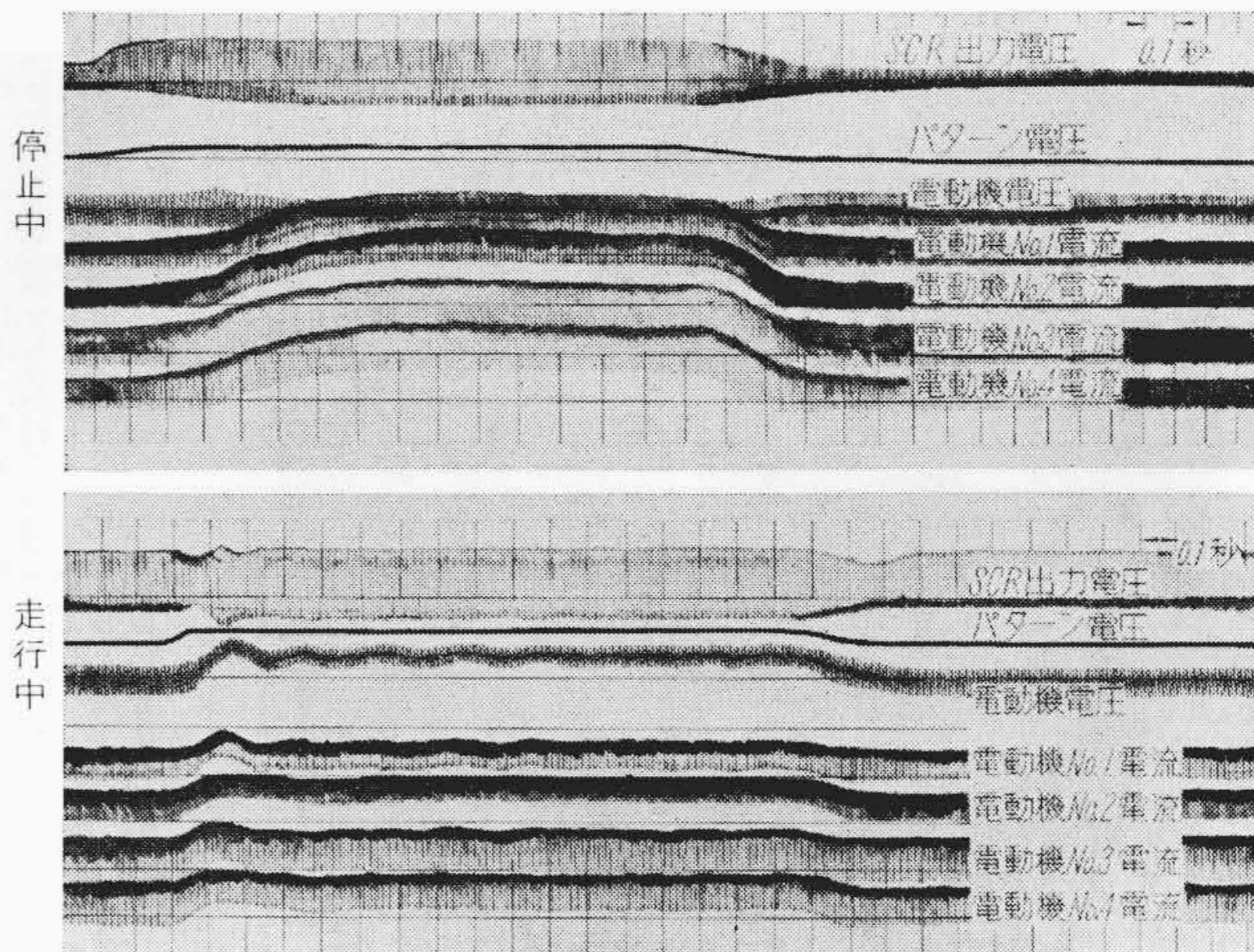
6.4 直流定電圧装置

第15図は前述のAPPSと、ゼナーダイオードを用いた検出回路を組み合わせて作った直流定電圧装置の概略結線図を示し、第16図はその寸法図、第4表はその仕様を示す。

主回路はSCRと普通のSRを直列に接続したアームを6個三相ブリッジ回路に組み、制御系のループ利得を大きくするため正極側負極側ともに移相制御できるようにした。



第17図 ED-71 ACロコにおけるAVR接続図(SCR方式)



第18図 制御系応答度のオシログラム

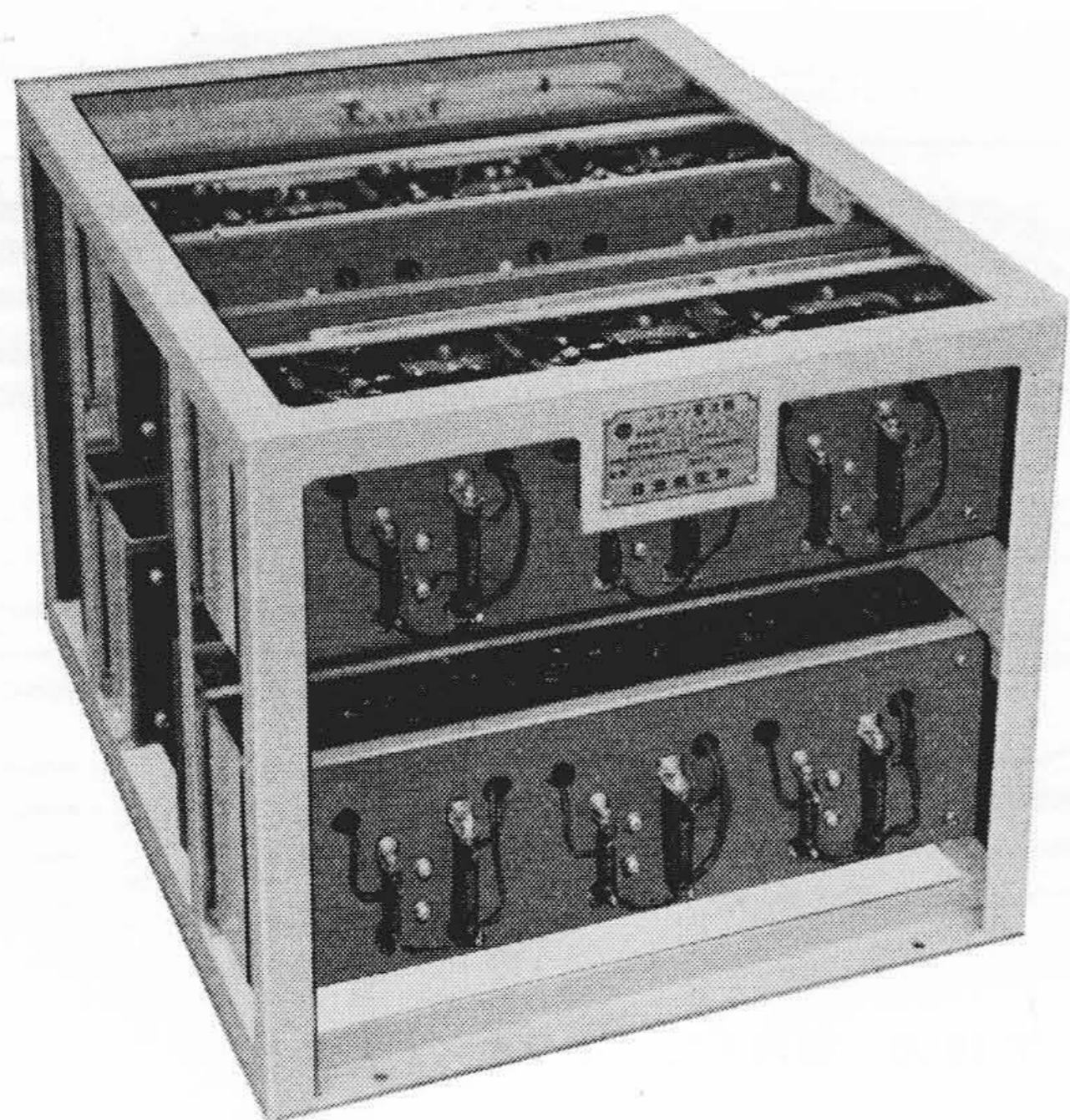
次に操作方法を述べる。まず交流電源側の双形開閉器を投入して操作開閉器3を運転側に回すとAPPS回路が生き直流側に電圧が発生する。切換開閉器43を手動側に回してVRにより指令電圧を零より徐々に上げてゆくとAPPS出力パルスの位相が進み直流出力電圧は指令通りに零より110Vまで連続的に変化することができる。したがって小形直流電動機のレオナード起動も可能である。また切換開閉器43を自動側に回すと55Vより110Vの範囲の任意の電圧で定電圧制御を行うこともできる。この場合は直流出力電圧を直線抵抗とゼナーダイオードで構成されたブリッジ検出回路により整定電圧からの偏差を検出し、これをAPPSの入力端子に入れるかまたは要求される精度が高い場合は1度この偏差をTRS直流増幅器により増幅してAPPSに入れる。APPSはその入力電圧に応じた位相でSCRゲートにパルス信号を送りSCRの出力電圧を整定値に維持する。TRS増幅器がない場合でも交流入力電圧変動±10%、負荷変動100%の外乱に対し直流出力電圧110V±2%の精度を持ち、またこの制御系には時間遅れ要素としてはSCRのみであるからその制御応答時間はきわめて速い。

次に従来のSRを用いた定電圧装置と比較すると、従来の方式での誘導電圧調整器あるいは可飽和リアクトル、磁気増幅器およびランプ検出器がそれぞれAPPS, TRS増幅器, ゼナーダイオード検出器に代るため寸法, 重量ともに小形軽量となり、また回路方式も著しく簡素化されているので取扱い保守ともにより便利である。

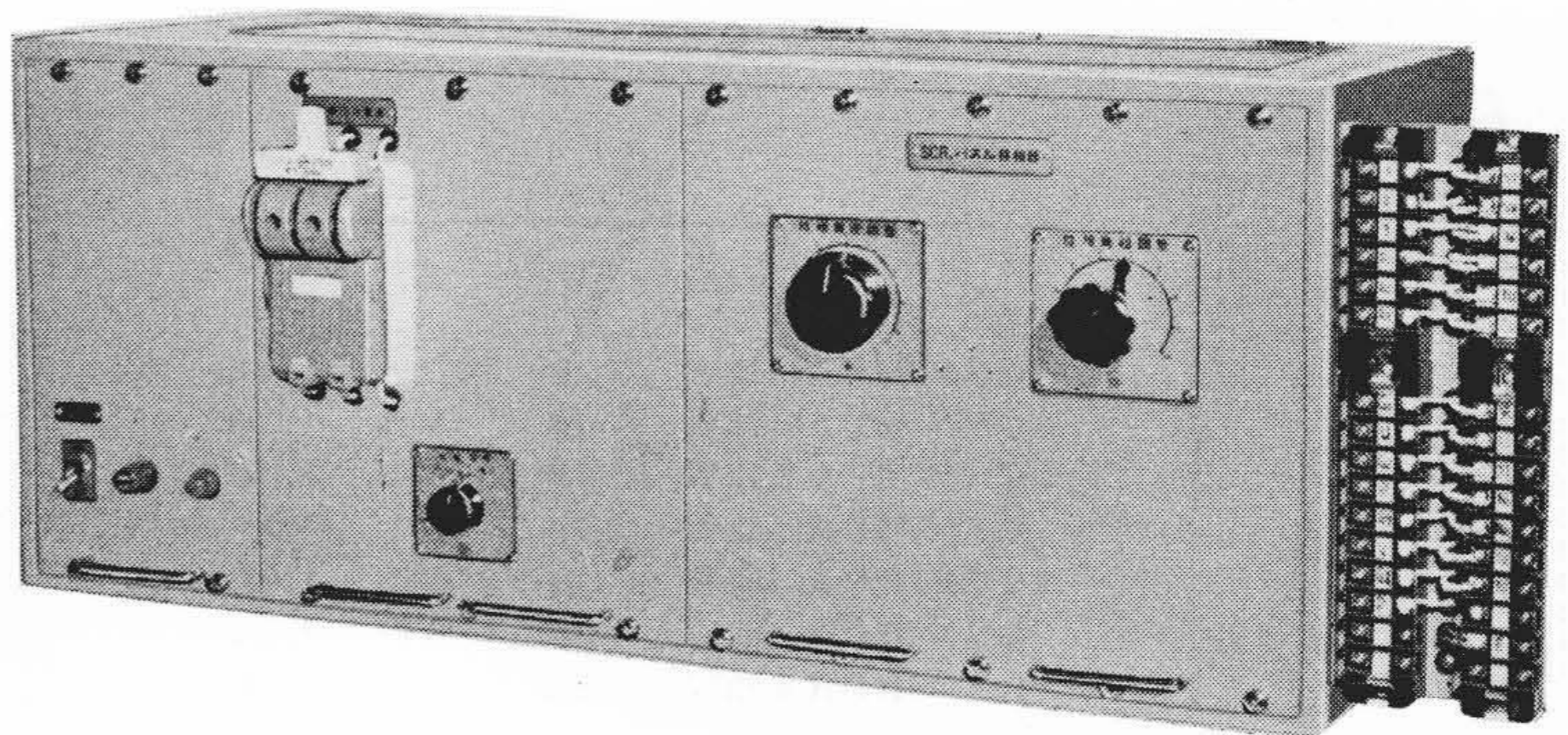
6.5 ED-71 交流電気機関車整流器格子用SCR

国鉄東北本線に使用されている整流器はすべて日立製作所で製作したエクサイترون形風冷封切り水銀整流器であるが、本整流器は機関車起動特性改善のため、水銀整流器の格子制御による定電圧制御(磁気増幅器)を採用している。この方式の特性改善として、速応度を早くすることが、昭和35年8月に大々的に現地で試験が行われ、この試験の一環としてSCRを利用した格子制御装置が使用され好成績を示した。その概略スケルトンを第17図に示す。SCRとしては磁気増幅器の代用として使用されているので、特に目新しい応用ではないが、回路構成上次の特長を有する。

(a) 単相回路にて大幅な格子制御を行うので、リップル電圧(雑音電圧)と直流電圧(信号電圧)の比が約10~15倍となるので、この処理が問題である。すなわちループ利得を損ずることなく、応答度を高めるとともに、リップル電圧を大幅に低減しなければならない。この件については5.4に述べたとおり、フィルタ回路



第19図 励磁器用SCR外観図



第20図 TRS定電圧制御装置

を適当に構成することにより第18図に示すように、きわめて応答度の早い制御系を構成することができた。

(b) 主回路はD. C. 600~700Vにて3,000~5,000Aの電流(脈流30~40%を含む)が流れるので、ゲート回路に対する電磁誘導について十分検討して、適当な振動防止回路他の採用により、なら異常なかった。

6.6 IBM用交流発電機励磁装置

次にSCRは回転機の界磁励磁電源としての用途もある。その一例として最近IBM用定電圧定周波数三相交流発電機の励磁電源として製作したSCR励磁装置の外観を第19図、定電圧自動制御装置を第20図に示す。交流発電機および励磁器の仕様は次のとおりである。

交流発電機	70 kVA	208V	三相	60 c/s
SCR励磁器	1.35 kW	54V	25A 連続	

第21図は定電圧制御系の概略結線図を示すもので、三相交流発電機出力電圧を三相ブリッジ整流器で直流に変換し、平滑器で脈流分を取除かれた直流電圧をゼナーダイオードと直線抵抗器で構成されたブリッジ検出回路に入れ、ここで交流発電機出力電圧の現在値と整定値との偏差を検出し、この偏差をTRS直流増幅器で増幅してAPPSの入力端子に送る。APPSはその入力電圧に応じた位相でその出力パルスSCR励磁器に送り、SCRの出力電圧を変化させて励磁電流を調整し交流発電機出力電圧を規定値の208Vに保持する。

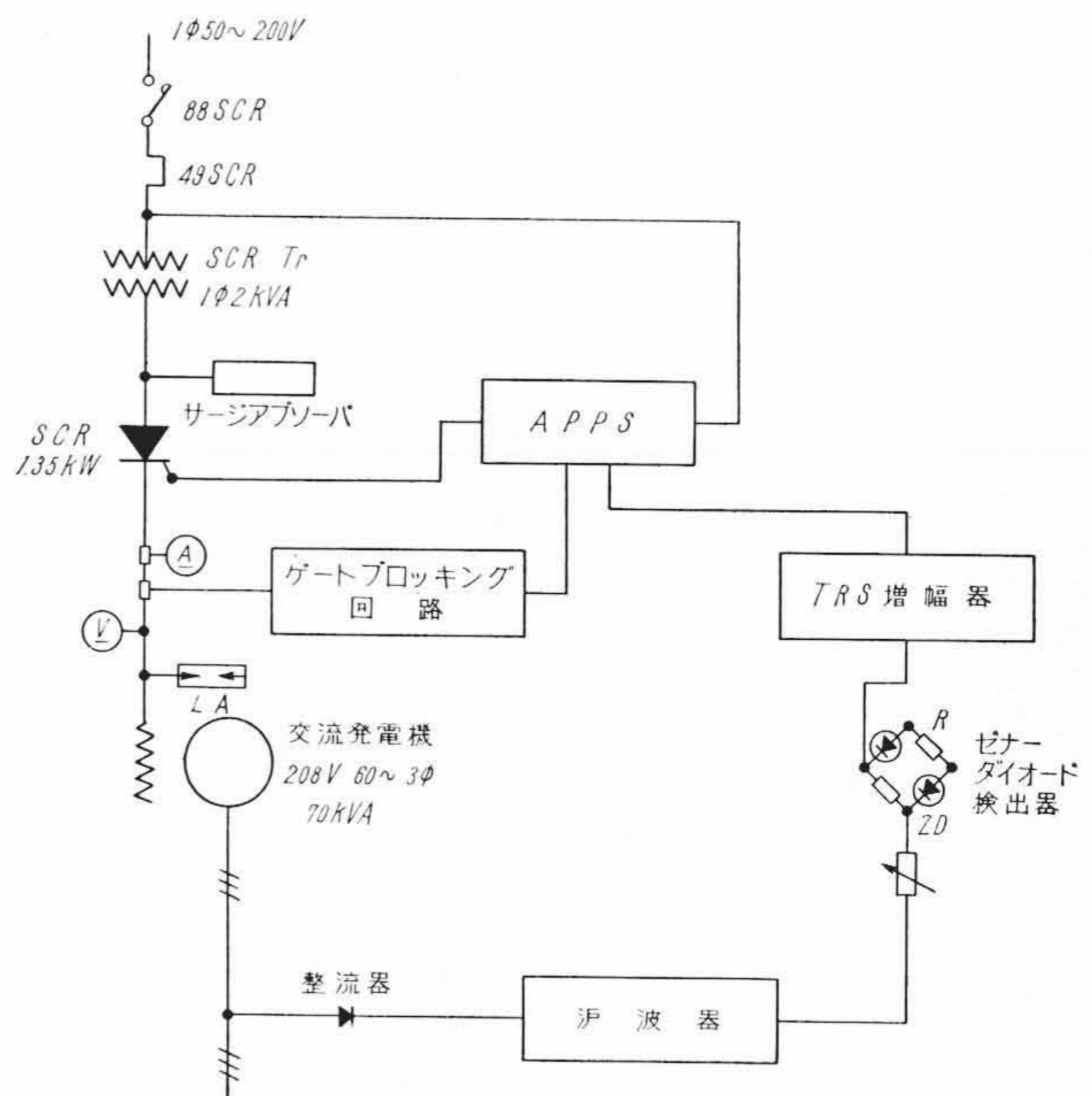
なお本器では交流発電機の三相短絡事故あるいは単相短絡事故時に励磁回路に発生する過電流保護として励磁回路の電流を検出してSCRのゲートで信号を除きSCRをBlockingすると同時にSCR用変圧器1次側を遮断する方式を採用した。

6.7 静止レオナード

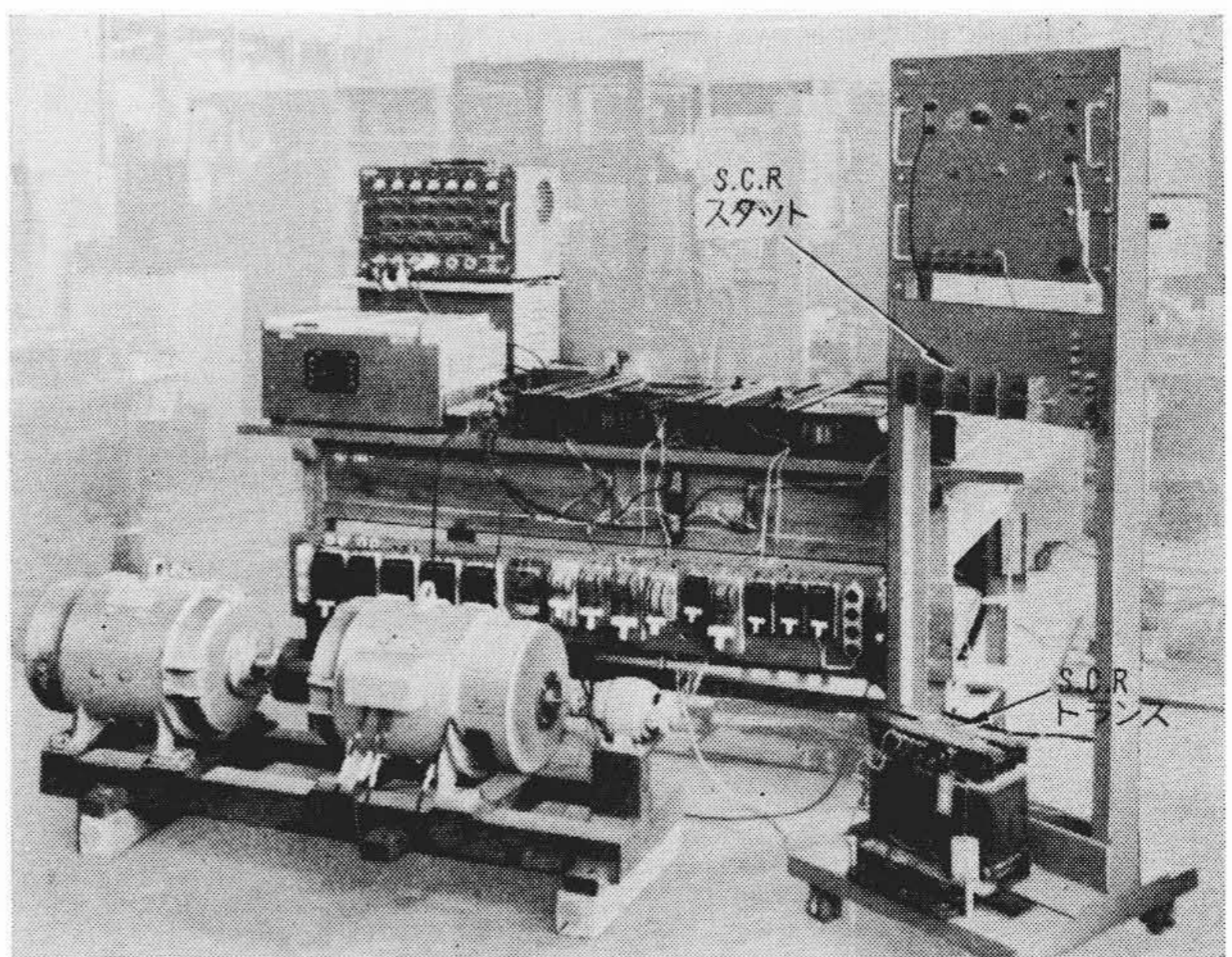
直流モータの速度制御にSCRを用いる場合

- (a) 励磁電流=一定、電機子電圧をSCRで制御する
 - (b) 励磁電流をSCRで制御し、電機子電圧は一定とする
- の二方式およびその組合が考えられるが、(a)の方が広く用いられるので、(a)の方式についても小形実験用セットによる実験結果をのべる。

第22図は速度制御実験中の写真を示し、第23図がこのときのオシログラムの一例である。図にみるとおり軽負荷から定格負荷に変化せしめる回路じょうらんを与えたとき、インパクトドロップ1%回復時間0.15sであった。この回路の固有の速度変動率は約20%で



第21図 制御回路図(励磁器用SCR)

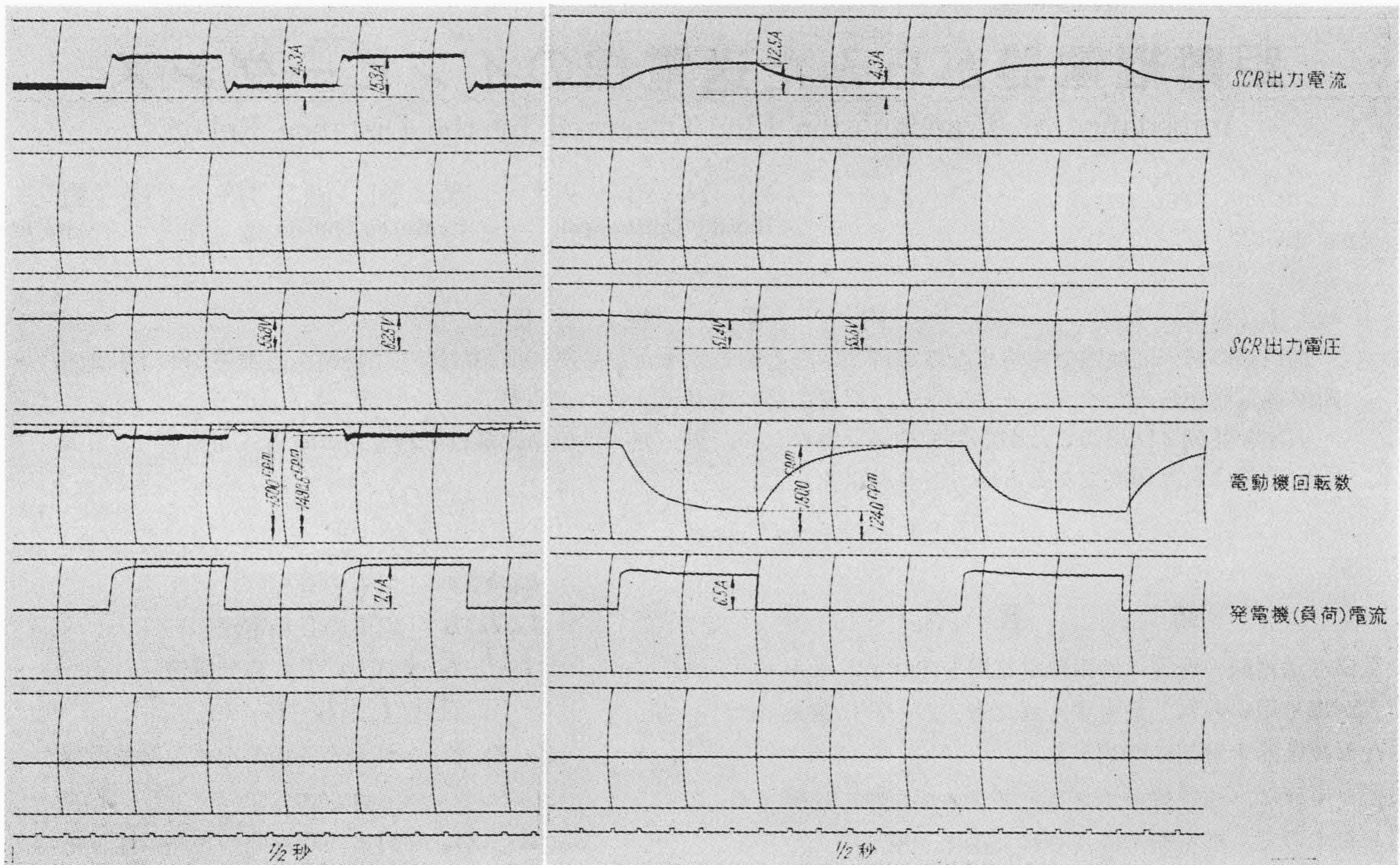


第22図 SCRによる電動機運転実験セット

あり、これに対しASR系では0.5%以内におさまっている。このオシログラムは連続運転中の一部を示すもので、この動作はきわめて安定である。

7. 今後の見通し

上述のとおりSCRの応用は各方面にわたり、きわめて多岐であるとともに、いままで適当な部品(SCRに相当するもの)がなかったため、未開発の部門にも今後は数多くの応用、進出が期待される。



(a) ASR を行った場合

(b) ASR を行わない場合

第23図 定速度制御の実験結果オシログラム

SCRは、最初は小容量設備ないし高周波用、取付け関係の特殊なものを中心に発展するが、エレメントの開発によるエレメントの定格の向上と量産化による価格低減により、急速に中、大容量の部門に進出するであろう。

終りに当り、試作に多大のご指導を賜った日立製作所日立工場高

木副工場長、泉部長、毛利部長、日立研究所三浦所長、木村部長および実験を担当した天野氏に厚くお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 日立評論 別冊 32, p51 1959

Vol. 23	日 立	No. 3
◎電気産業の驚異.....大宅 壮一	◎ハイライト「店開きした日立サルーン」	
◎インスタント時代の照明	◎躍進する人工頭脳	
◎最近の大容量私設交換機	◎電気機器のドクター「日立メガー」	
◎整流器の進歩	◎新しい照明施設	
◎電線百話 その(3)「クラーク数と銀・銅・アルミ」	◎ヒタレックスフィルム	
◎明日への道標「20t 成品積込機」	◎日立だよ	
◎フライアッシュの回収装置		
発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地	振替口座東京 71824 番	
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丁目1番地	振替口座東京 20018 番	

日立評論	鉄道電子機器特集号	別冊第39号
◎列車無線電話装置	◎外交換装置	
◎列車無線電話用無線装置	◎連接集線装置	
◎列車無線電話用伝送装置	◎座席予約用電子計算装置MARS-1について	
◎日本国有鉄道列車無線電話用交換制御方式	◎SLS-13形運転基本性能曲線計算機	
◎札幌—函館極超短波多重無線通信装置	◎電車自動運転装置	
◎日本国有鉄道札幌鉄道管理局納RX-8形クロスバ市	◎電車定位置自動停止装置	
発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地	振替口座東京 71824 番	
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丁目1番地	振替口座東京 20018 番	