

SCR による高周波電源装置

High-Frequency Electric Power Source with Silicon Controlled Rectifiers

岩 田 幸 二*
Kôji Iwata前 島 和 二**
Katsuji Maeshima

内 容 梗 概

SCR 素子の高周波適応性を利用して数 kc 程度の静止インバータを製作し、蛍光灯、磁気増幅器などの電源として種々の試験を実施し優秀な試験結果を得た。本論文では SCR 素子による高周波インバータの問題点、特長および試験結果について報告する。

1. 緒 言

SCR(シリコン制御整流器)の特長の一つとして順耐圧回復時間の短いことがあげられる。順耐圧回復時間は順方向に電流を流していた SCR が、いったん順方向の電流が止ってから再び順方向電圧を阻止する能力を回復するまでの時間で、水銀整流器やサイラトロンの耐電圧回復時間に相当する。その値は水銀整流器やサイラトロンの 100~数 1,000 μ s に対し 10~20 μ s でありインバータ用として用いれば、上限周波数は 10 kc 程度となる。さらに半導体整流器特有の小形軽量、高効率、半永久寿命というすぐれた性能特性を有するため可聴および超音波領域用としての将来性が期待される。

ここでは SCR を利用した自励式インバータの製作・試験の結果について述べ、将来の課題について考察する。

2. 特 長

SCR 高周波インバータは完全静止器であること、大容量素子まで製作可能であることなどの SCR 特長をすべて生かしたもので、従来用いられてきた電動発電機やサイラトロンと比較すれば第 1 表のようになる。

3. 他制自励式並列インバータの動作原理

並列インバータの基本回路は第 1 図のように示され、SCR₁ および SCR₂ にはおのおの電気角 180 度異なる制御パルスが与えられ転流コンデンサの充放電とあいまって点弧、消弧を繰返し変圧器の 2 次側に交番電圧を発生する。変圧器および回路のインピーダンス、損失を無視すれば等価回路は第 2 図のようになる。各部の電圧、電流を図に示すとおりであるとし、半サイクルについて考えれば

$$\left. \begin{aligned} i &= C \frac{d}{dt} e_1 + \frac{e_1}{R} \\ E_d &= L \frac{d}{dt} i + e_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

これより

$$E_d = L \cdot C \frac{d^2}{dt^2} e_1 + \frac{L}{R} \frac{d}{dt} e_1 + e_1 \dots\dots\dots (2)$$

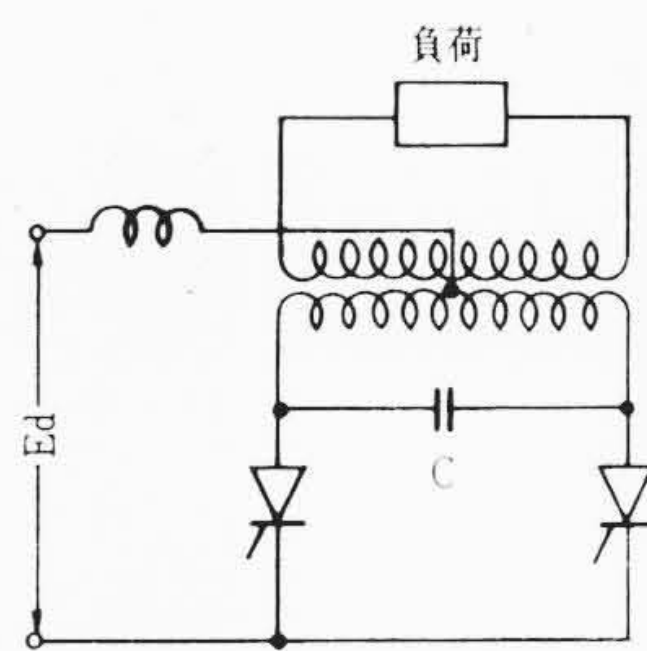
なる方程式が成立し、半サイクル前後における電圧、電流が等しいという条件を入れて、交流電圧 e_1 の解を求めることができるが、

第 1 表 高周波発生方式比較

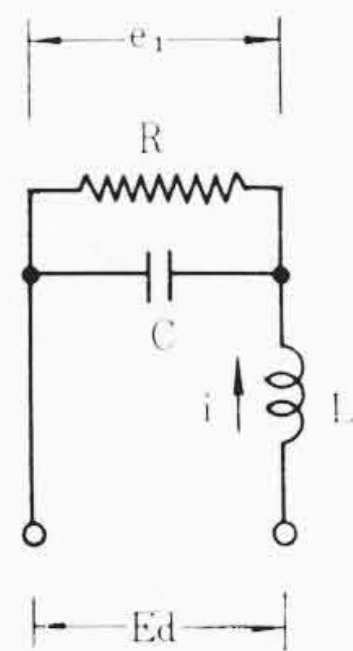
	電動発電機	SCR	サイラトロン	
周波数上限	20 kc	10 kc	1 kc	SCR, サイラトロンは水晶発振器使用とした場合
周波数精度	1 %	0.02 %	0.02 %	
構造	回転機	静止器	静止器	

* 日立製作所日立研究所 工博

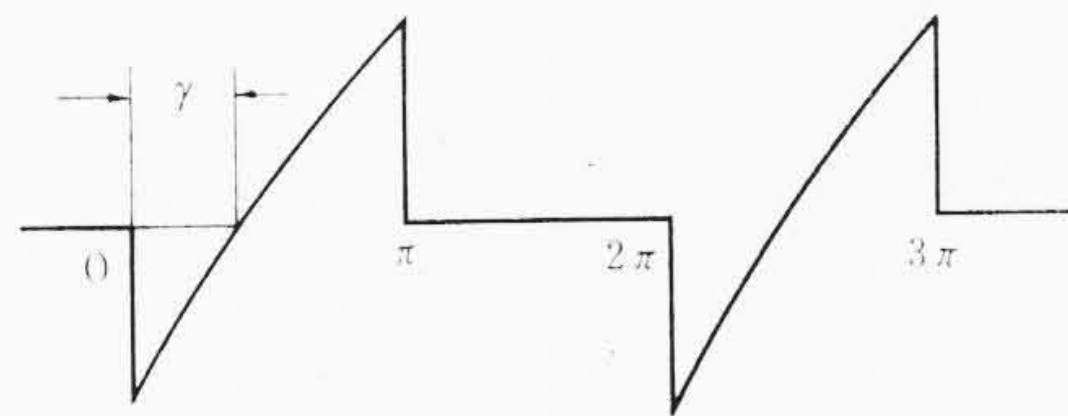
** 日立製作所日立工場



第 1 図 並列インバータ基本回路



第 2 図 並列インバータ等価回路



第 3 図 A-K 間電圧波形

一般にその解は複雑となるので実用的でない。そこで簡単のため $L = \infty$ の場合について考えれば

$$i = I_d \quad (\text{一定})$$

となる。したがって

$$C \frac{d}{dt} e_1 + \frac{e_1}{R} = I_d \dots\dots\dots (3)$$

これに境界条件を入れて

$$e_1 = R \cdot I_d \left\{ 1 - \frac{2 \exp\left(-\frac{1}{2fRC}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{1}{2fRC}\right)} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

また

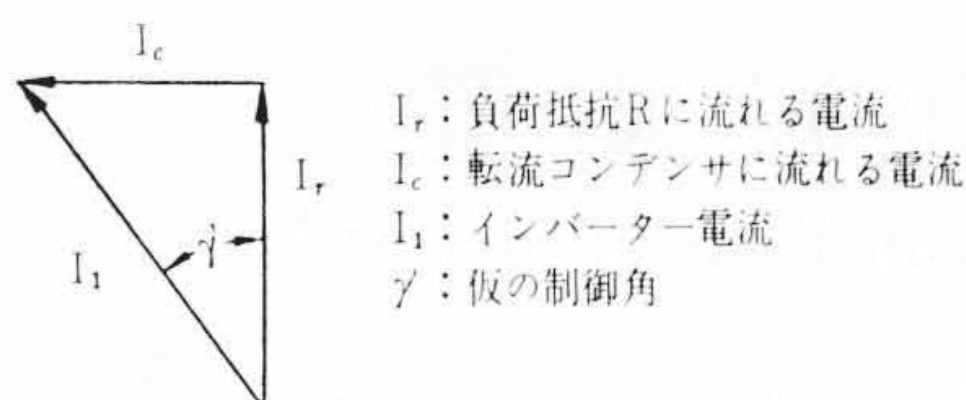
$$E_d = 2f \int_0^{\frac{1}{2f}} e_1 dt = R I_d \left\{ 1 - 4fRC \frac{1 - \exp\left(-\frac{1}{2fRC}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{1}{2fRC}\right)} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となるから、交流電圧実効値 E_a は次のようになる。

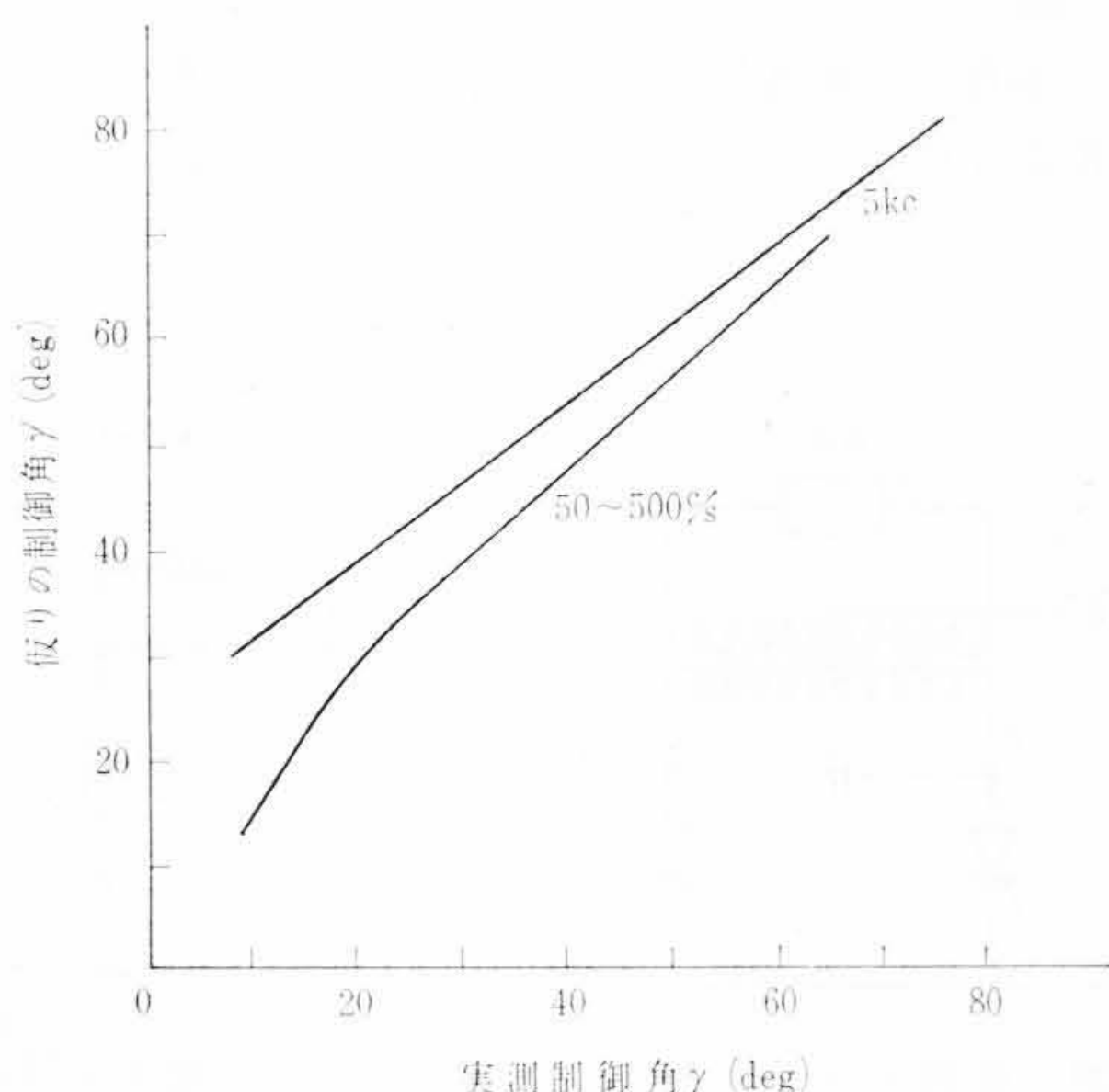
$$E_a = \frac{E_d}{\sqrt{1 - 4fRC \tanh \frac{1}{2fRC}}} \dots\dots\dots (6)$$

またインバータの安定運転を決定する因子たる制御進み角 γ を求めるには (4) 式の $e_1 = 0$ とおいて

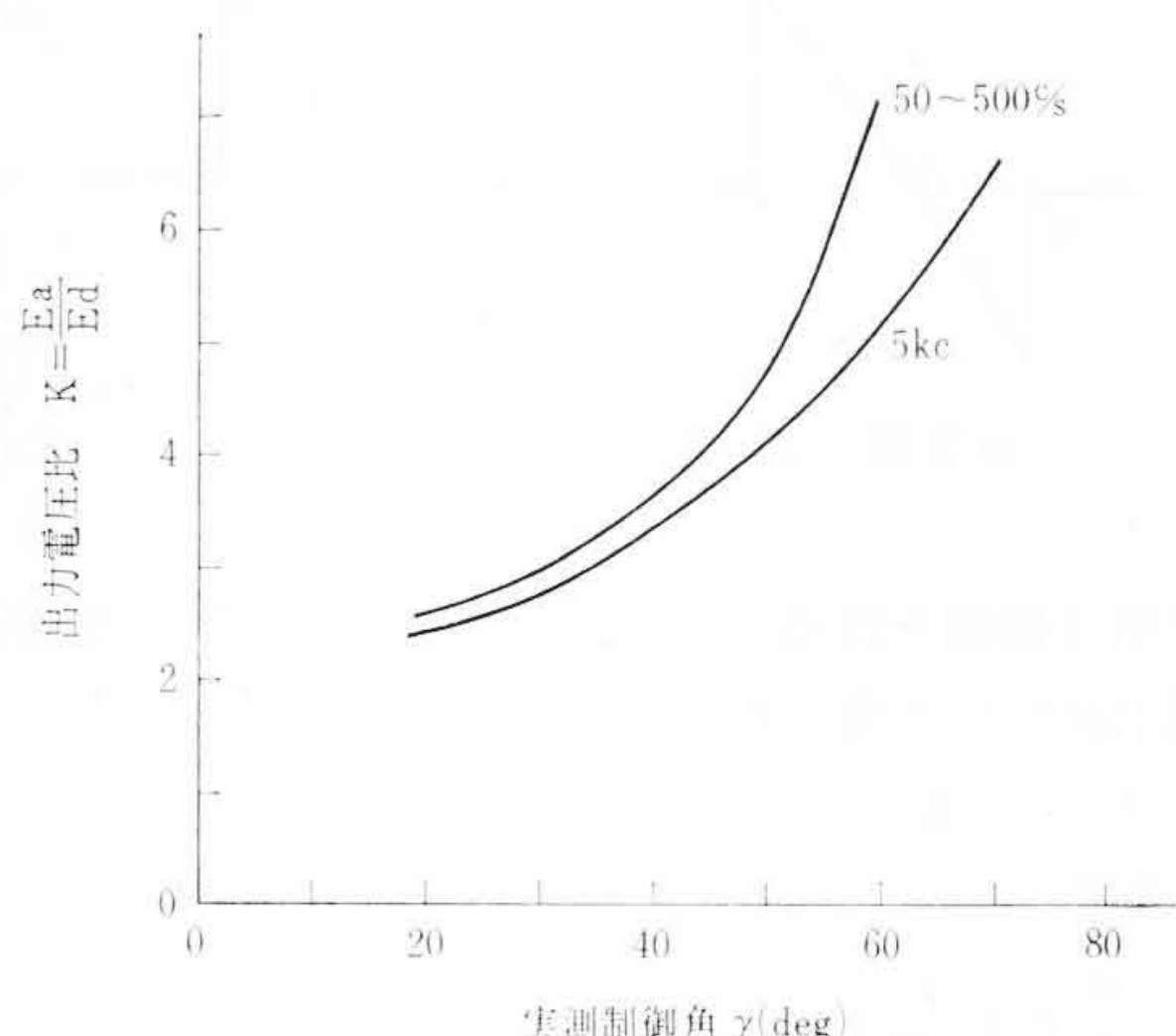
$$\gamma = 360fRC \log \frac{2}{1 + \exp\left(-\frac{1}{2fRC}\right)} \dots\dots\dots (7)$$



第4図 ベクトル図



第5図 γ, γ' の関係



第6図 γ, K の関係

となる。負荷抵抗の変化によって γ および E_a は変化し、ほぼ下記の特性を有することが解る。

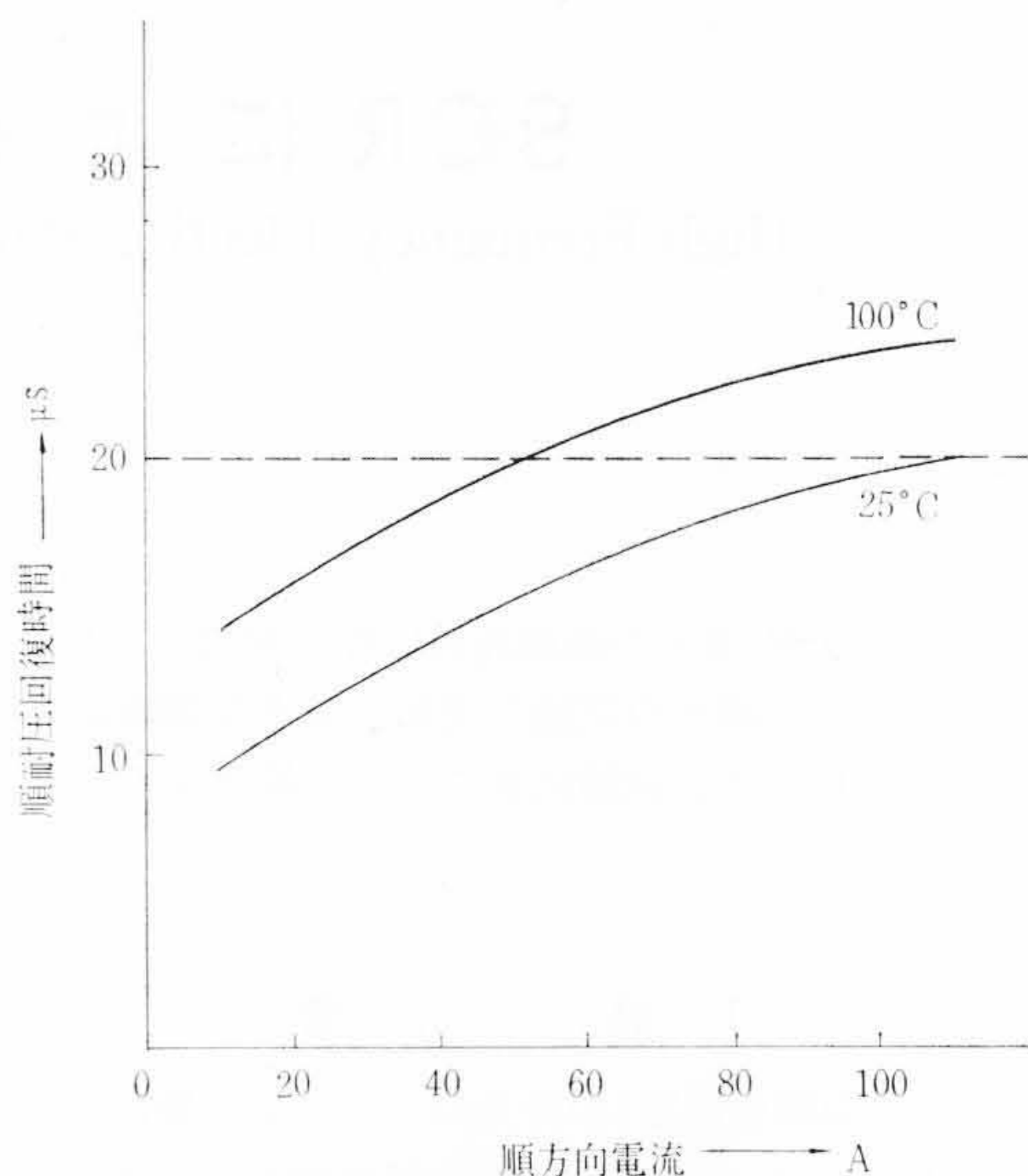
R 短絡 $\rightarrow \gamma$ 減少 $\rightarrow$ 電圧降下 $\rightarrow$ 転流失敗

R 開放 $\rightarrow \gamma$ 増大 $\rightarrow$ 電圧上昇

実際の装置ではリアクトル L は有限値に選ばれるので前述したように理論的に解明することは煩雑であり、実際の設計にはあまり役立たない。そこでインバータの出力波形を正弦波と仮定して、ベクトル的に制御進み角を求める方法が簡便で実用的な方法である。出力電圧を正弦波と考えた場合のベクトル図は第4図となるから仮の制御進み角 γ' は次式で計算される。

$$\gamma' = \tan^{-1} \frac{I_c}{I_r} = \tan^{-1} 2\pi f C R \dots \dots \dots (8)$$

商用周波数から 5kc の範囲で仮の制御進み角 γ' と真の制御進み角の関係を実験的に求めると、第5図のように周波数に関係なく測定誤差範囲内において略一定である。本実験は重なり角を無視しているため制御進み角小の部分においては周波数の開きは大きい。同様実測制御角 γ と出力電圧比 K は第6図のように周波数に関係なくほぼ一定していることが認められる。かくして SCR 高周波インバ



第7図 順耐圧回復時間と順方向電流

ータは SCR の最大順耐圧回復時間の最大値と負荷インピーダンスを知ることによって簡便かつ確実に設計することができる。

4. 高周波インバータの問題点

4.1 SCR の順耐圧回復時間

インバータの安定運転のためには、回路常数より決まる制御進み角 γ が SCR 順耐圧回復時間より大きくなければならない。すなわち γ が順耐圧回復時間より小さければ SCR が順方向電圧阻止能力を回復する前に順電圧が印加されてゲートに制御パルスがなくとも点弧し、インバータは転流失敗に至る。高周波インバータは制御進み角と順耐圧回復時間の差が少ないので、運転の最悪条件における順耐圧回復時間の値を正確に知る必要がある。

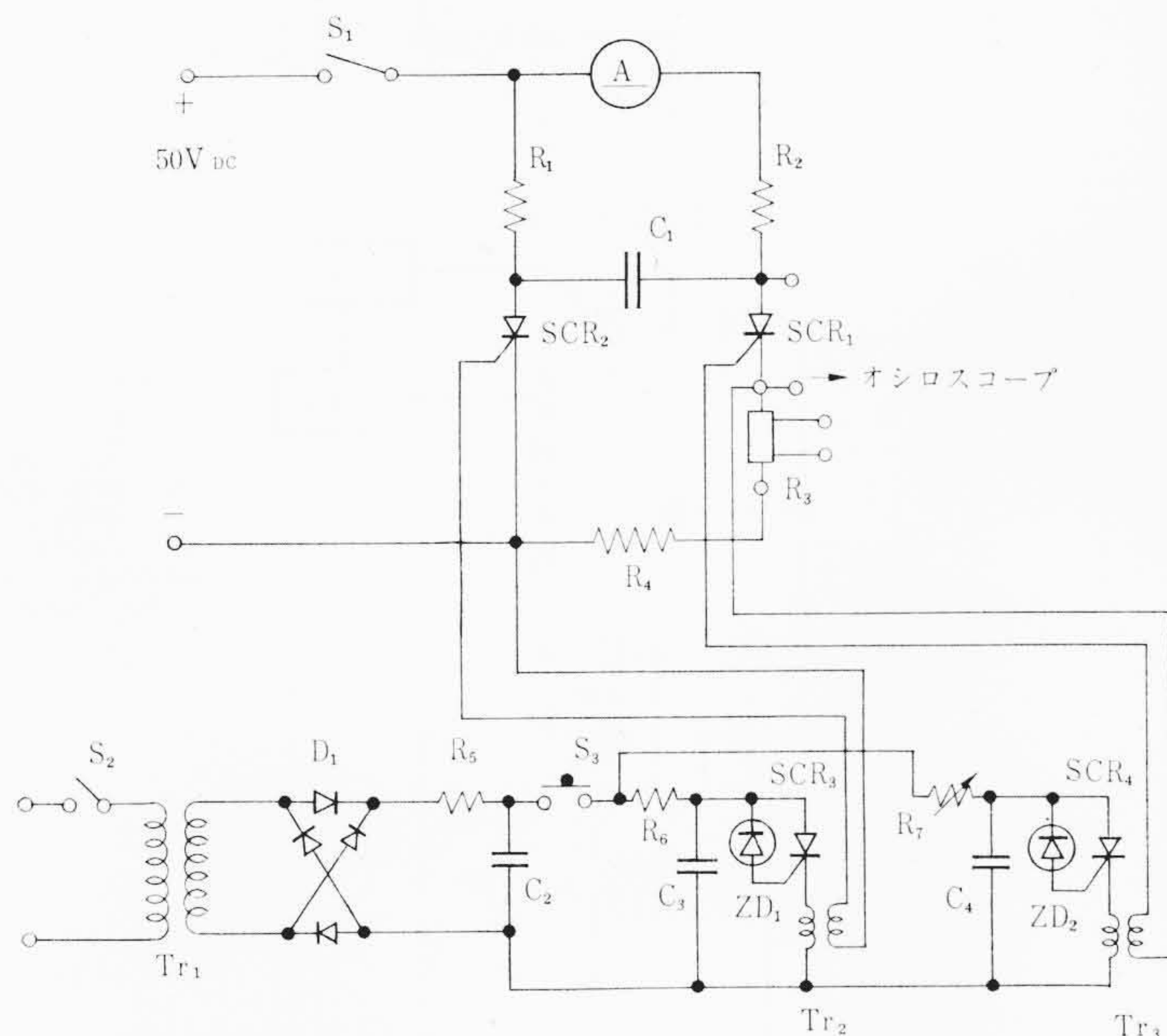
SCR の順耐圧回復時間はおのこの固有の値を有するばかりでなく、次の諸因子に依存する。

- (i) 接合部の温度
- (ii) 負荷電流の大きさおよびその減衰速度
- (iii) 転流後印加される逆電圧の大きさおよび立上りしゅん度
- (iv) 逆電圧印加回路のインピーダンス
- (v) 再び印加される順方向電圧の大きさおよびその立上りしゅん度

第7図に最も依存性の強い接合部温度、負荷電流に対する順耐圧回復時間の変化の模様を示す。測定は実際の使用状態に近似させるため抵抗インバータ方式を使用している。その回路は第8図に示すとおりである。

4.2 SCR のスイッチングパワー

順方向電圧が印加されて阻止状態にある SCR にゲート制御パルスを与えると阻止状態より通流状態に移る過渡状態が数 μs の間存在する。この期間順方向電圧は漸次減少し、電流は増加する。一方通流状態から阻止状態に移る SCR は過渡時に逆電圧阻止能力を回復しない期間を有するので転流回路は短絡状態になり大きな過渡電流が流れる。この各瞬時に電圧と電流の積が開閉時の電力損失となる。この値が過大であれば回路の損失を増すばかりでなく SCR を破損させるに至るので適当に抑制する必要がある。抑制策としては転流回路に抵抗またはリアクトルを設置する必要があるが、損失を増加させないため SCR おのこの陽極または陰極に空心のリアクトルを設ける。点弧の際の電流立ち上りは、第9図(b)のとおりで LC の放電振動回路となるので

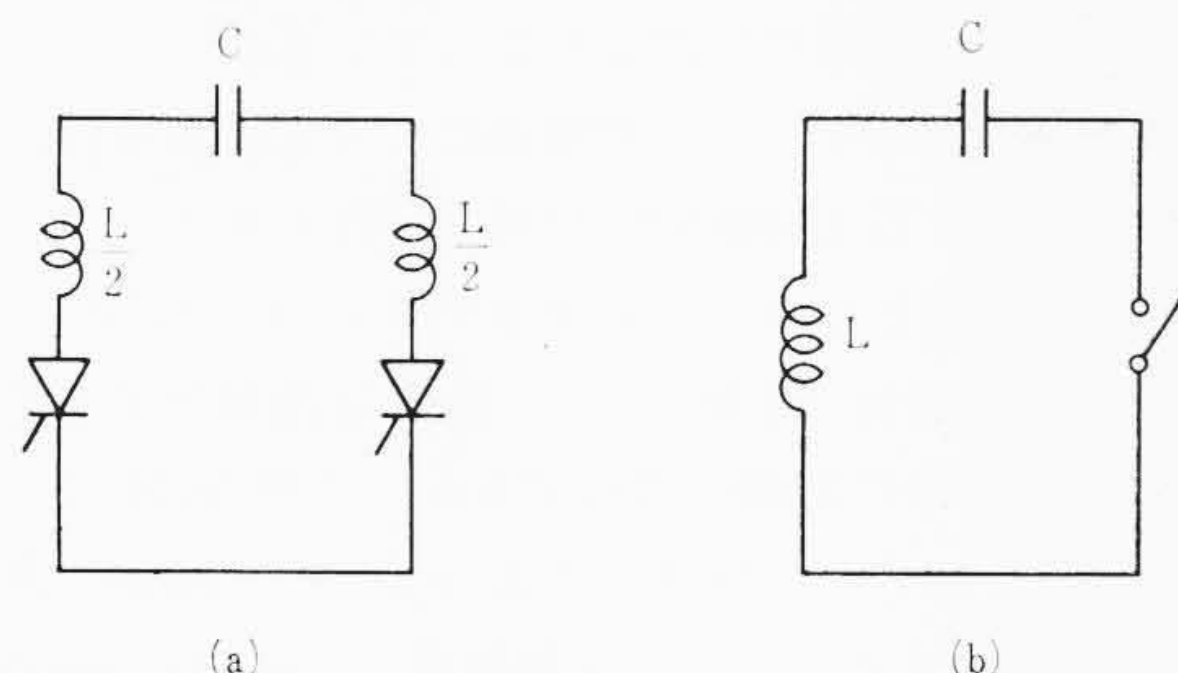


- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| R_1 : 10 Ω , 1kW | D_1 : ZW-51G |
| R_2 : 1 Ω , 1kW | ZD_1, ZD_2 : RD-9 |
| R_3 : 無誘導シャント | SCR_3, SCR_4 : ZCSU12 |
| R_4 : 0.1 Ω , 1kW | S_1 : スイッチ |
| R_5 : 10 Ω , 4W | S_3 : スイッチ |
| R_6 : 1k Ω , 2W | S_4 : 押ボタンスイッチ |
| R_7 : 1k Ω , 5W | Tr_1 : トランス100/300V 200VA |
| C_1 : 0.01~130 μ F | Tr_2, Tr_3 : パルス・トランス |
| C_2 : 100 μ F 300V | SCR_1 : 供試SCR |
| C_3, C_4 : 40 μ F 300V | SCR_2 : ZCS |

測定順序

- | | |
|---------------|--------------|
| 1: S_2 を閉じる | 4: S_3 を開く |
| 2: S_1 を閉じる | 5: S_1 を開く |
| 3: S_3 を閉じる | 6: S_2 を開く |

第8図 順耐圧回復時間測定回路



第9図 転流時等価回路

$$i = V_c \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \frac{1}{\sqrt{LC}} t \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表わされ、点弧時の di/dt は

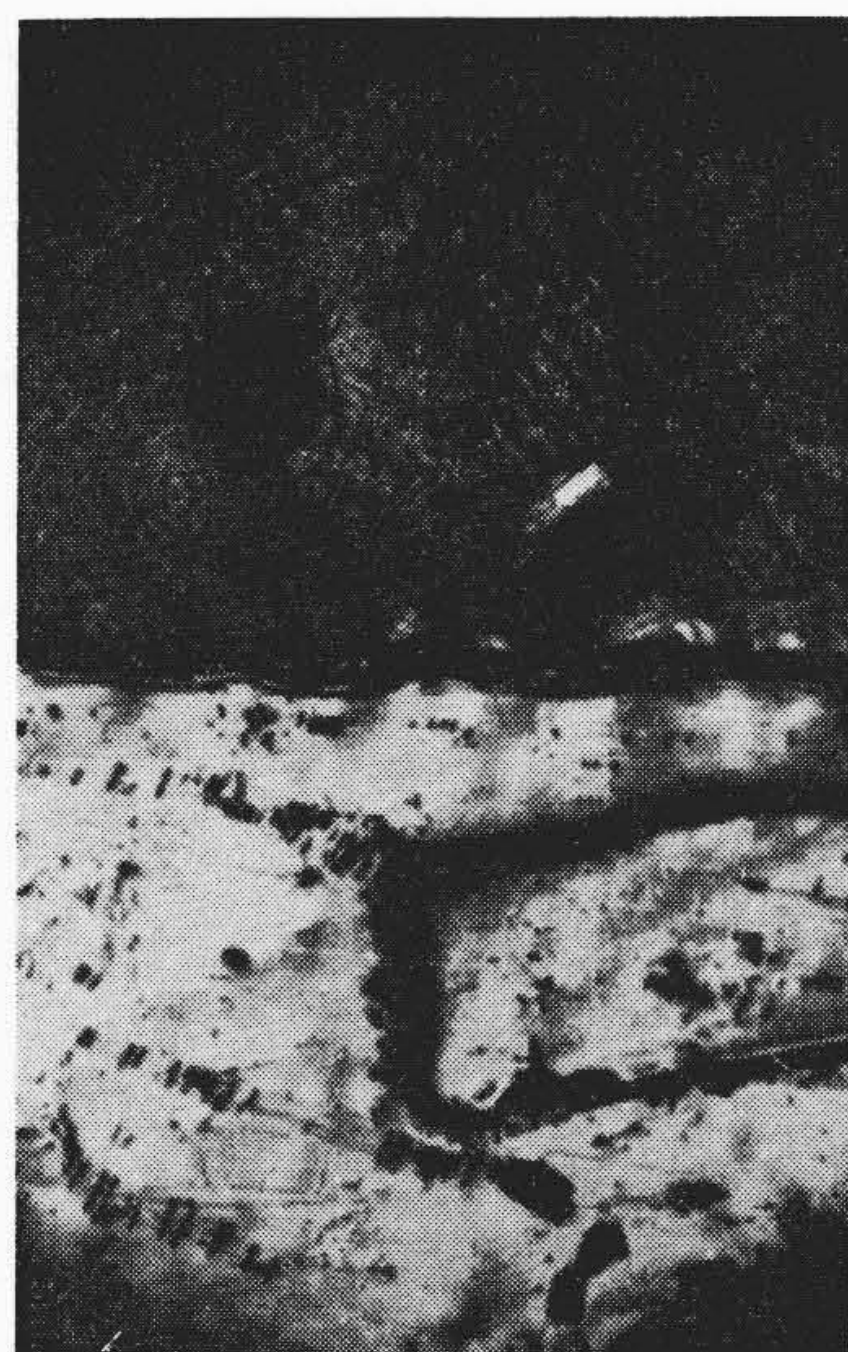
$$\frac{di}{dt} = \frac{V_c}{L}$$

となり、リアクトルを適当に選ぶことにより過渡電流を抑制してスイッチングパワーを十分余裕ある値にすることができる。

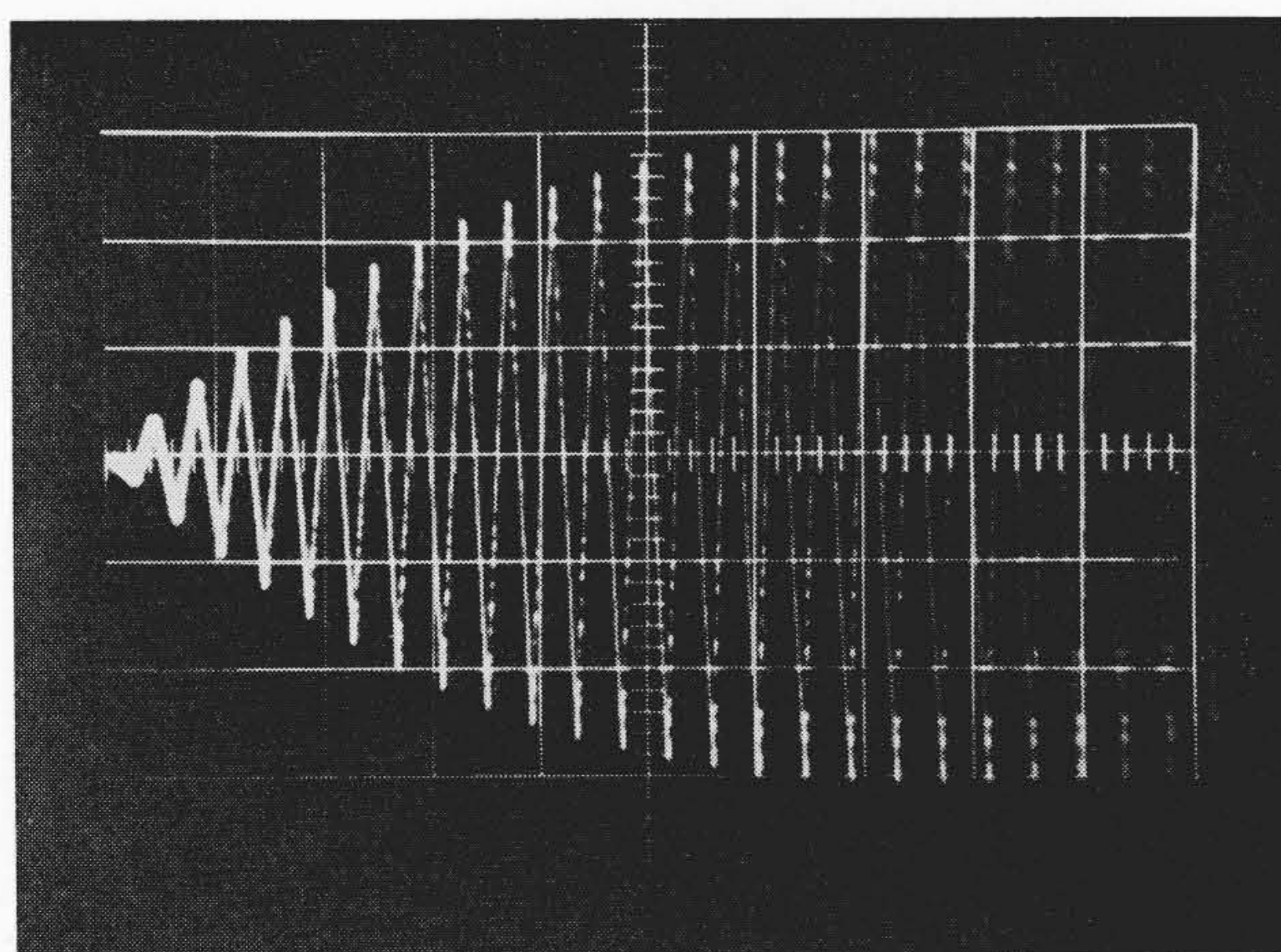
スイッチングパワーはSCRのゲート周囲の局部に発生するのでスイッチングパワーによって破損されたSCRには接合部ゲート周辺に欠陥が生じている様子が認められる。第10図に過大なスイッチングパワーによって破損したSCR接合部の拡大写真を示す。

4.3 起動の安定性

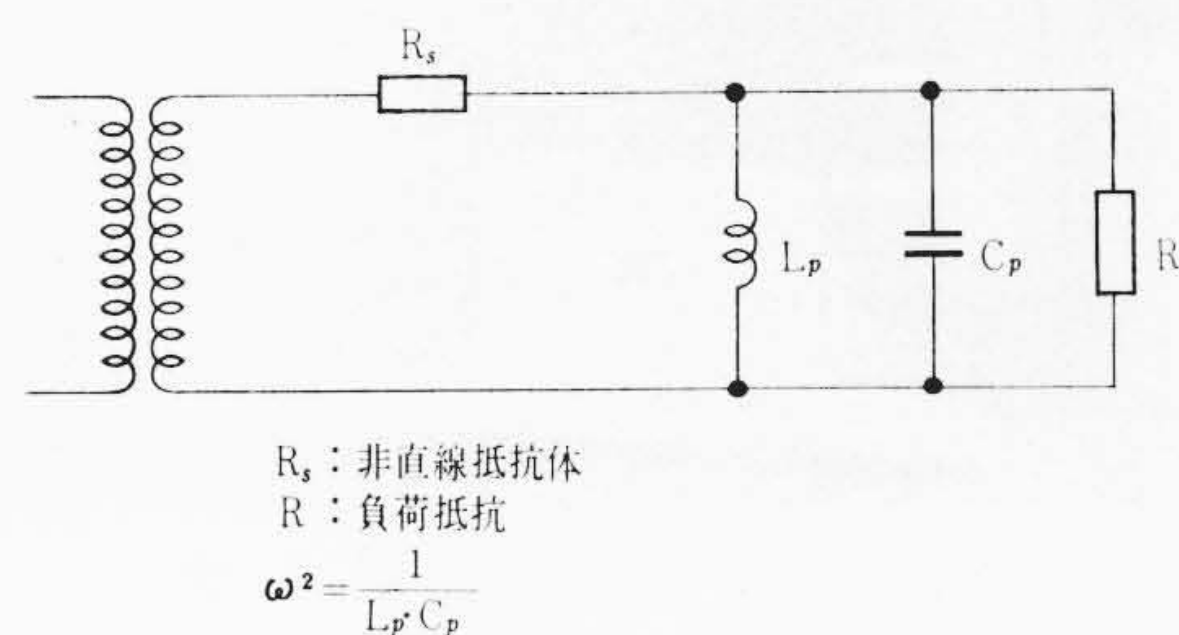
SCRインバータは非常に安定性の高いもので、転流失敗を起こす可能性は非常に少なく皆無といってよい。しかし高周波インバータを誘導電気炉などの誘導性負荷または容量性負荷の電源として用いる場合は次の点に特に注意しなければならない。一般に誘導電気炉では、並列共振するコンデンサを取り付け、定常時は抵抗負荷と等価と考えられる。インバータ起動時には並列リアクトル電流は無視



第10図 開閉時損失によって破損したSCRの接合部



第11図 起動時の交流電圧

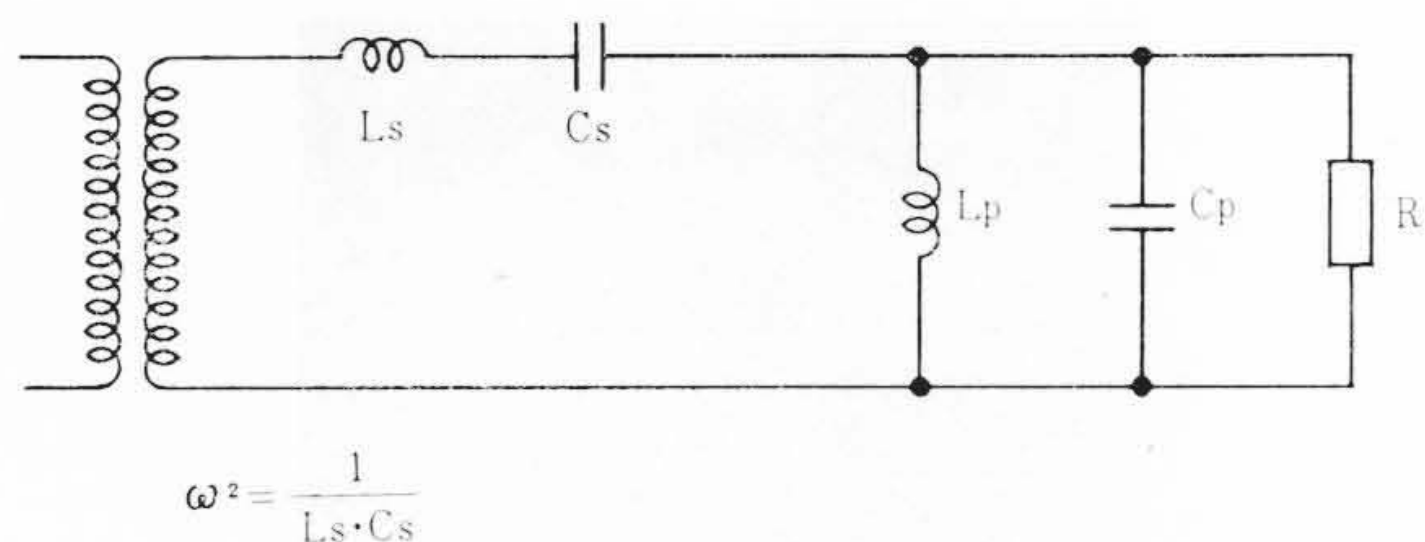


R_s : 非直線抵抗体
 R : 負荷抵抗
 $\omega^2 = \frac{1}{L_p C_p}$

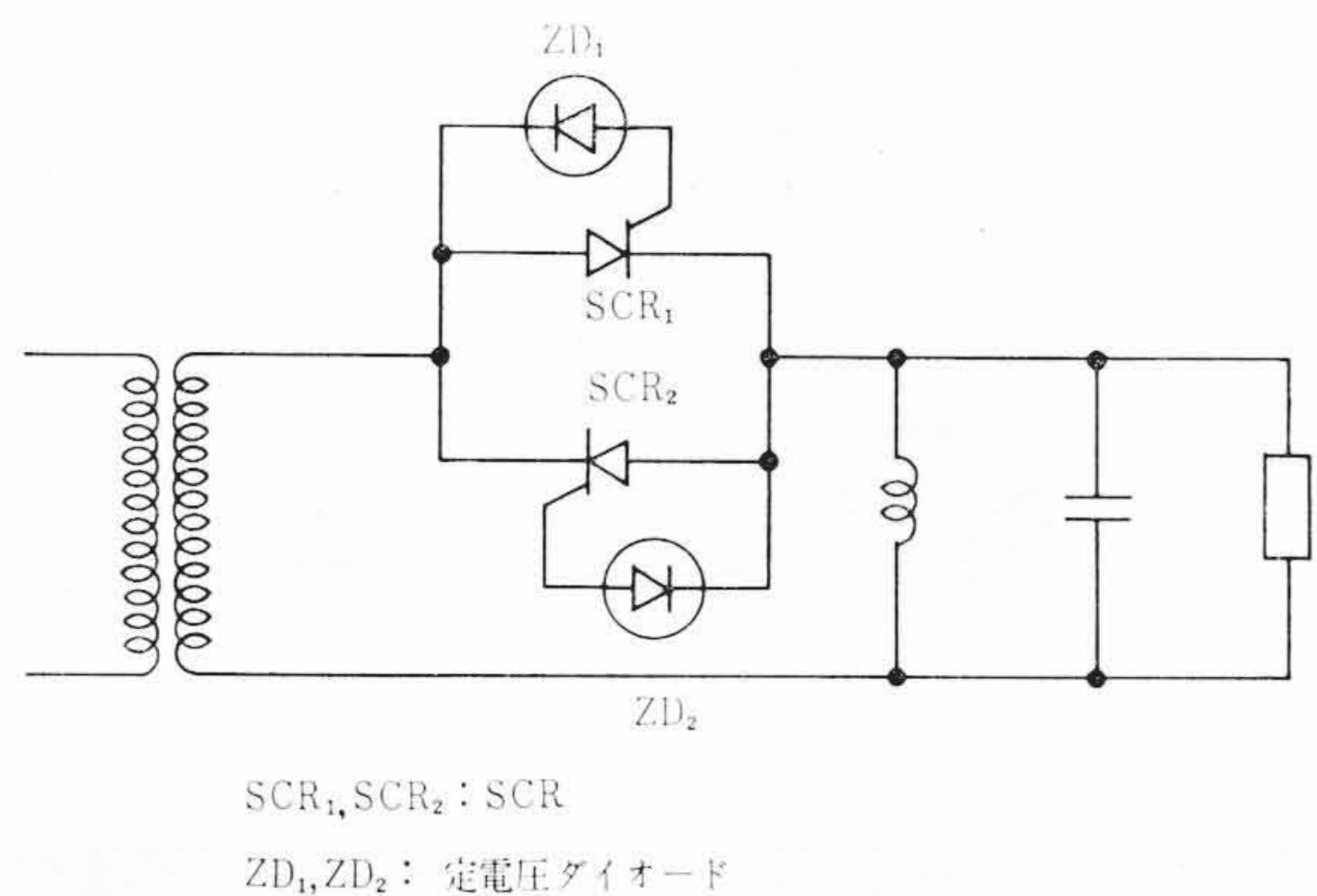
第12図 非直線抵抗による起動促進回路

できるので、等価的に $C \cdot R$ 並列負荷となり、巨大な転流コンデンサを有しているようになり起動時の転流コンデンサ電圧の立ち上がりは悪くなる。その模様を第11図に示す。これは起動時転流条件が悪くなることを意味し、負荷の無効電力が実効電力の数倍以上になる場合は起動困難になることがわかる。この対策としては次の方法が考えられる。

- (i) 低電圧で順耐圧回復時間の短いSCRを選択して使用する。ただし、これには限界値があるので万能ではない。
- (ii) 負荷と直列に非直線抵抗をそう入し、起動瞬時の低電圧期間には直列抵抗が大で等価的に負荷を切り離し、電圧上昇とともに低抵抗となって負荷が結ばれたと等価にする(第12図)。

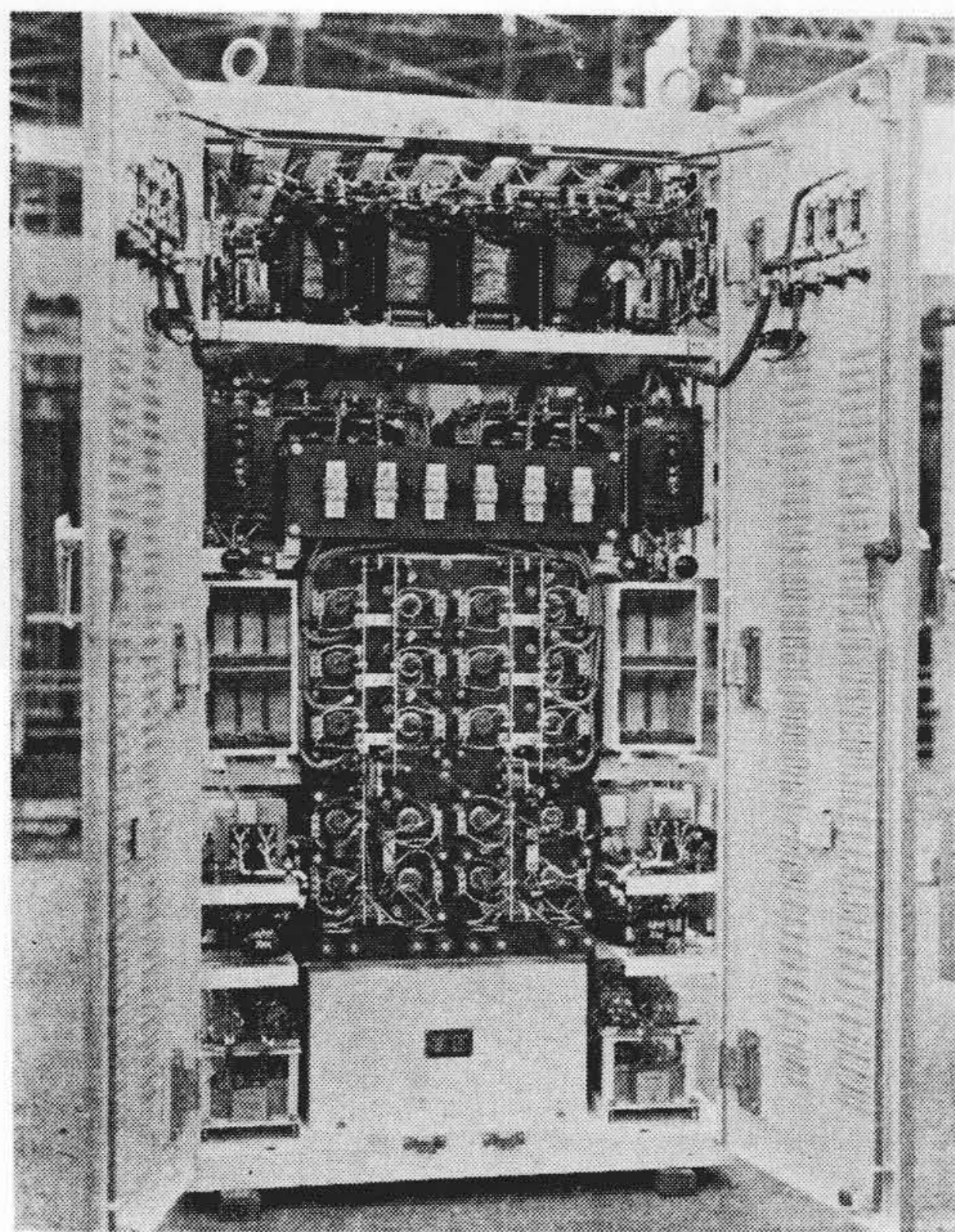


第 13 図 直列共振回路による起動促進回路



SCR₁, SCR₂: SCR
ZD₁, ZD₂: 定電圧ダイオード

第 14 図 静止スイッチによる起動促進回路



第 15 図 高周波電源装置

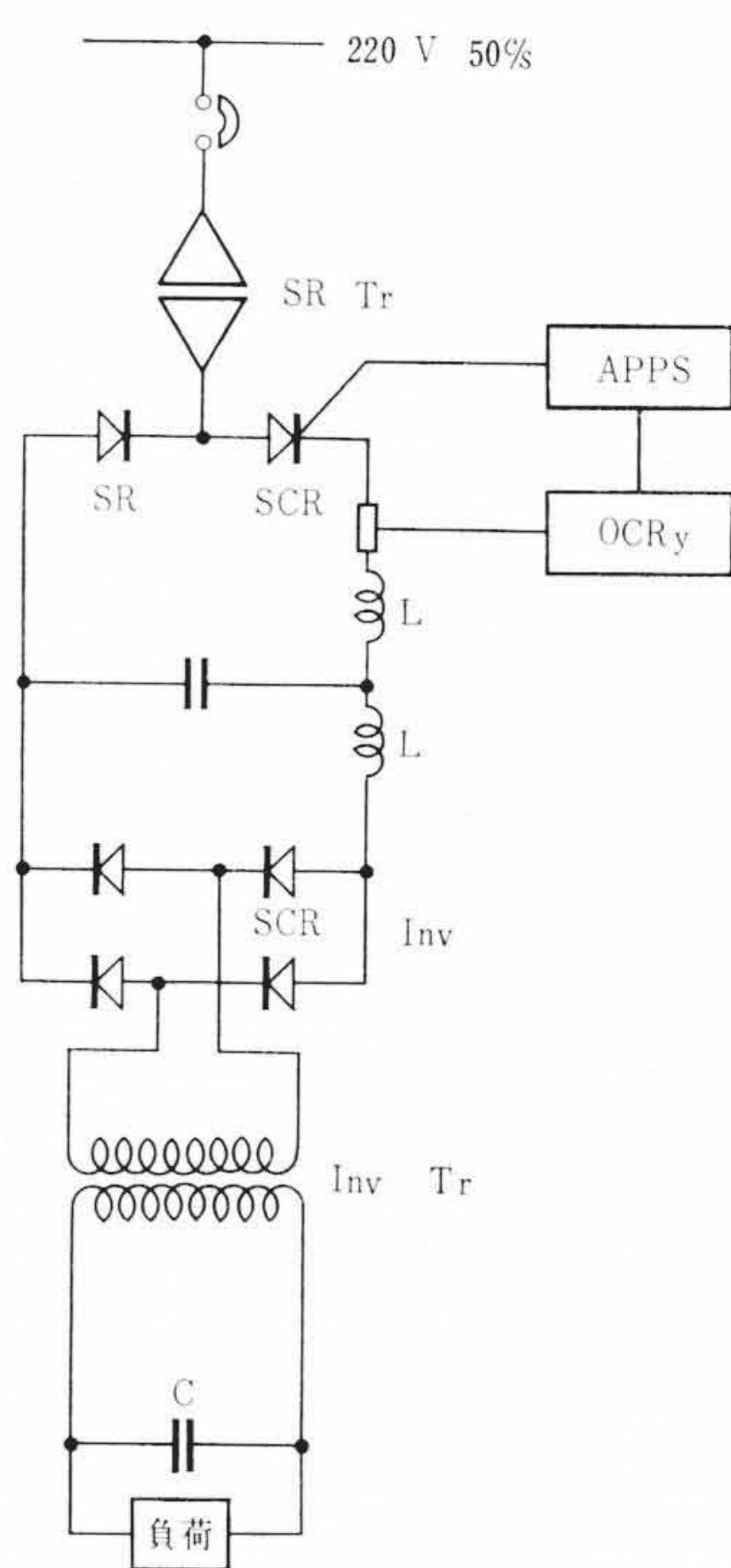
- (iii) 直列に直列共振回路を設け、起動時は直列の L を通して接続されるようにすることにより転流電圧の立ち上りを促進し安定起動させる。定常時は直列共振しているの直接負荷を接続したとき等価になる。本案は損失少なく波形も大幅に改善されるので非常に有効な方法である(第 13 図)。
- (iv) SCR などの静止スイッチを使用し、電圧の上昇にしたがい負荷を投入する(第 14 図)。

これらの方策は負荷の特性および周波数を考慮して適当に採用する必要がある。

5. 高周波インバータ応用製品

5.1 一般用高周波電源装置

可聴および超音波領域電源として従来真空管式・電動発電機が用いられてきたが、半導体化を目的として SCR インバータ装置を製



第 16 図 高周波電源接続図

作したものである。

本器のおもな仕様は次のとおりである。

- 交流入力 120V 三相 50 c/s
- 直流電圧 40V
- 交流出力 1kW 200V 単相 5,000 c/s

第 16 図は本器の概略結線図で、整流および開閉回路、過電流保護回路、インバータ回路の三部よりなっている。

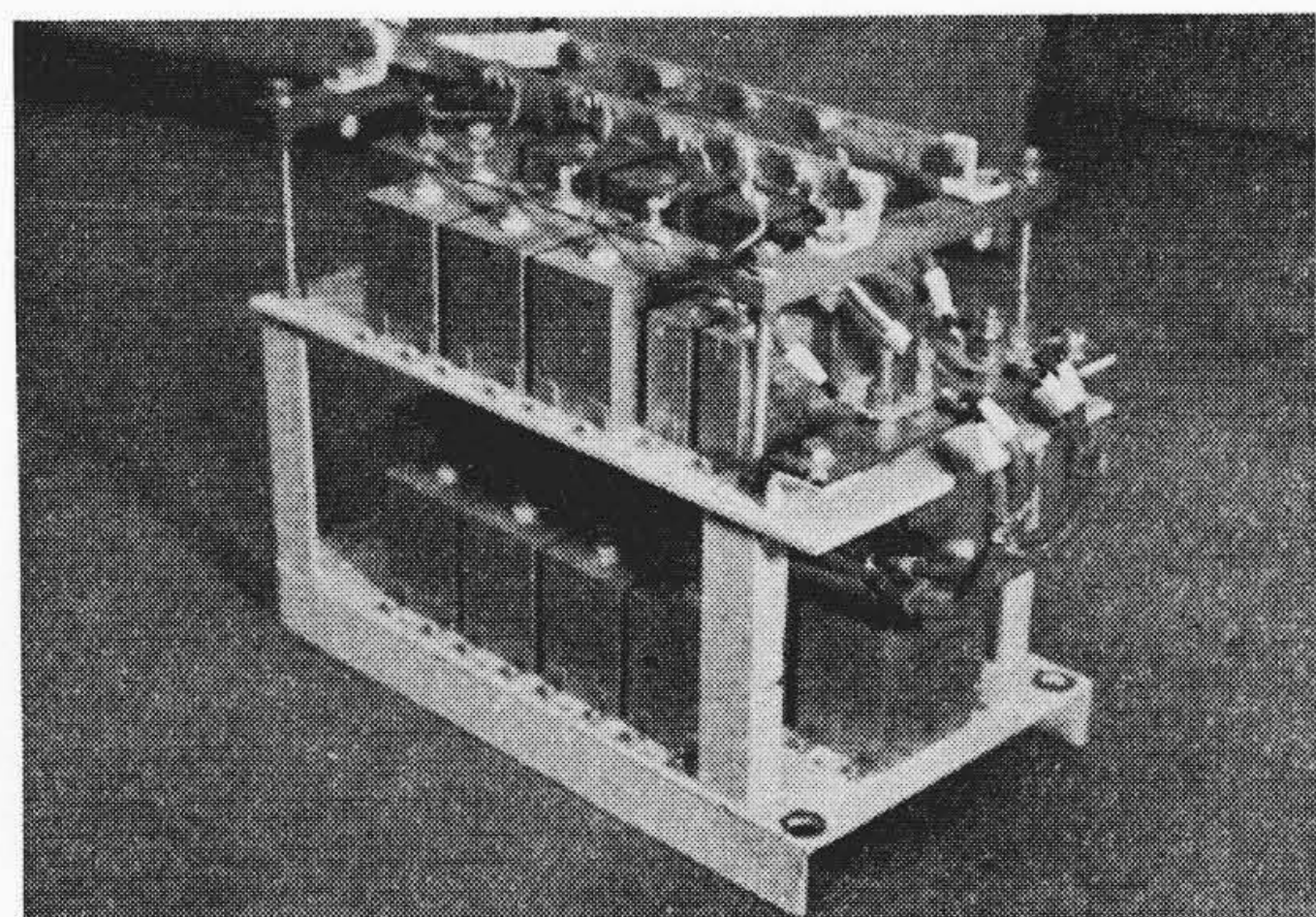
整流器は SCR を使用し、位相制御による電圧調整作用、ゲート信号の on, off による主回路開閉作用を行なわせている。整流回路は三相ブリッジ接続とし 6 アーム中 3 アームのみ SCR とし、軽合金製冷却片に取り付け、軽量にして有効な冷却効果を得ている。SCR の点弧制御回路の詳細は省略するが、小形 SCR による静止スイッチを設けて、ステップ状信号によってパルス回路で発生したパルスを SCR に印加することにより無接点で主回路の on-off を行なうことができる。

SCR は半導体共通の欠点として、熱的時定数がきわめて短く、短時間過負荷耐量が比較的小さい。そのため回路短絡などの過電流に対しては、前述した SCR 整流器のパルス回路を off することによって運転を停止し SCR を保護する。直流回路に設けられた低抵抗によって直流電流を検出し、増幅する。過電流が流れこの値が設定値以上となると、定電圧ダイオードのツェナー電圧を越えスイッチングトランジスタ ST₁ を動作させ、その信号によって瞬時にパルスを消去し、整流器の運転を停止する。

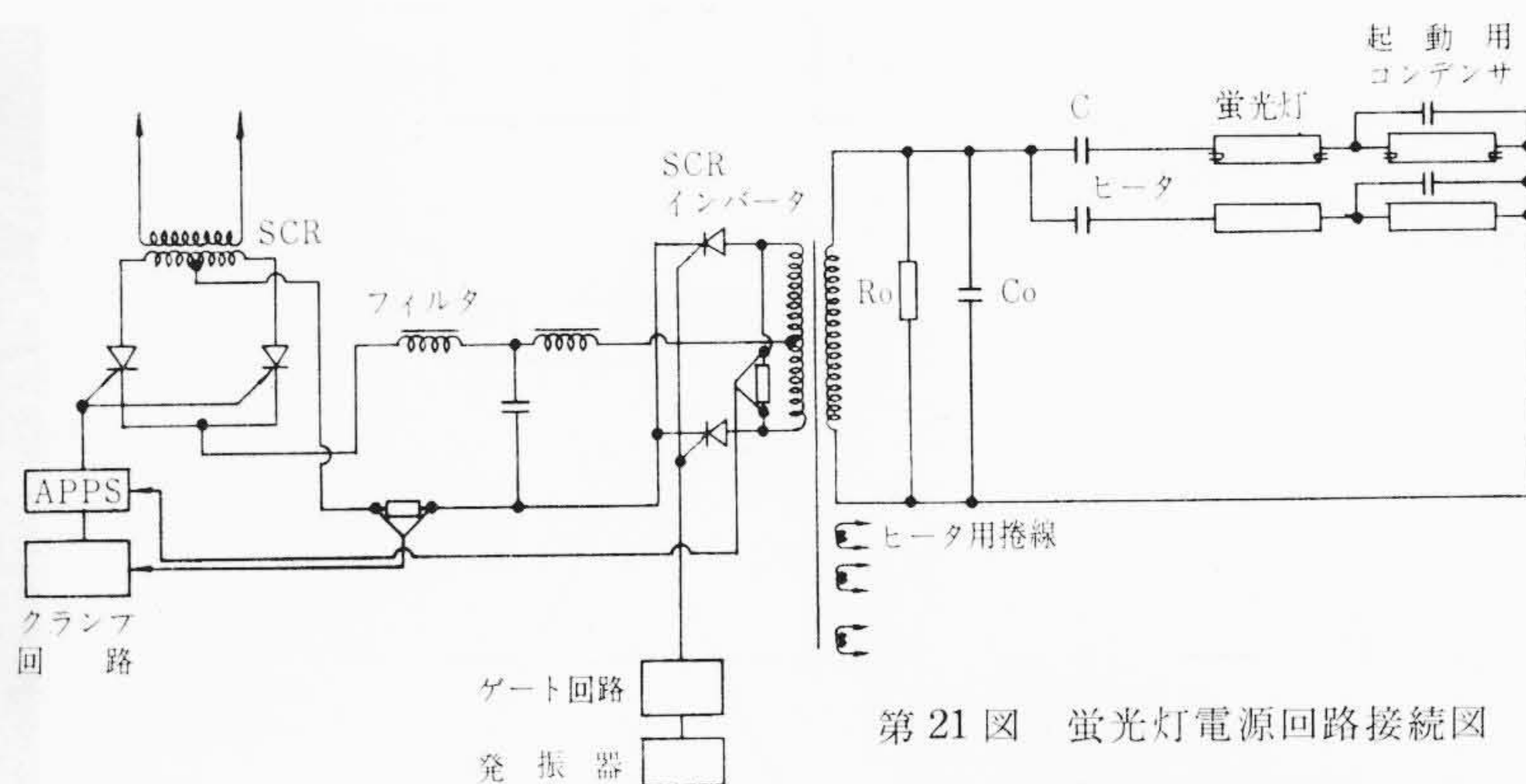
インバータのゲート回路に音波発振器、パルス成形回路を用いたが、一般的な回路であるので省略する。外部雑音に対して十分意を用い配線にはできるだけ同軸ケーブルを使用した。その結果インバータとパルス回路の配線長さを 15 m として試験したが、パルスの変形および誘導などに対する誤動作は皆無であった。

転流コンデンサとしてはマイカコンデンサを使用し、第 17 図のように網目状に配線して配線のインダクタンスによる寄生振動を防止した。また主回路の配線にはシールド配線を使用し漏えい雑音を極力小さくした。

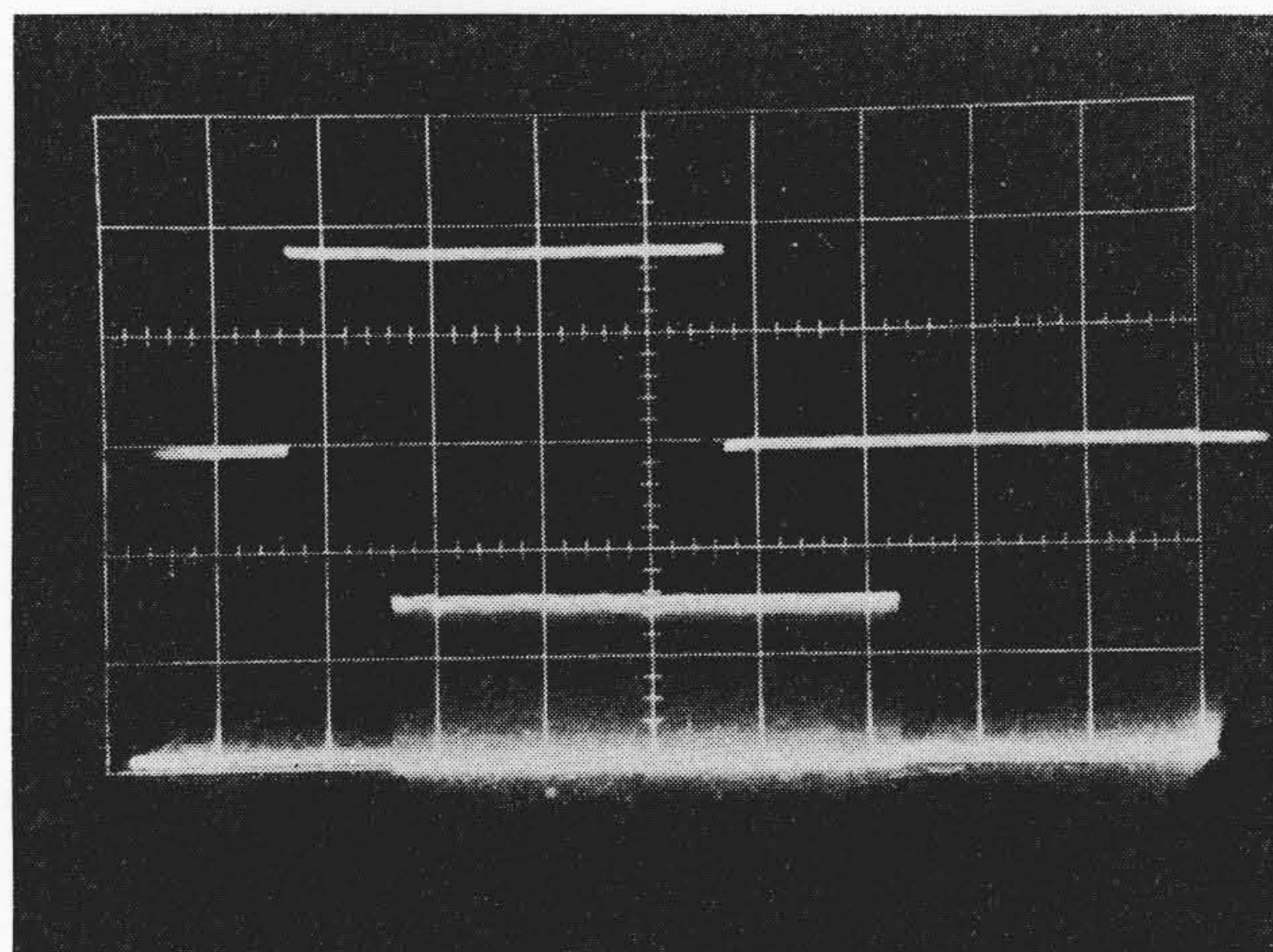
等価負荷試験の結果、波形ひずみ率も 5% 以下であった。また起動時の安定性も非常に高く 10 万回以上の起動試験に対して全然起



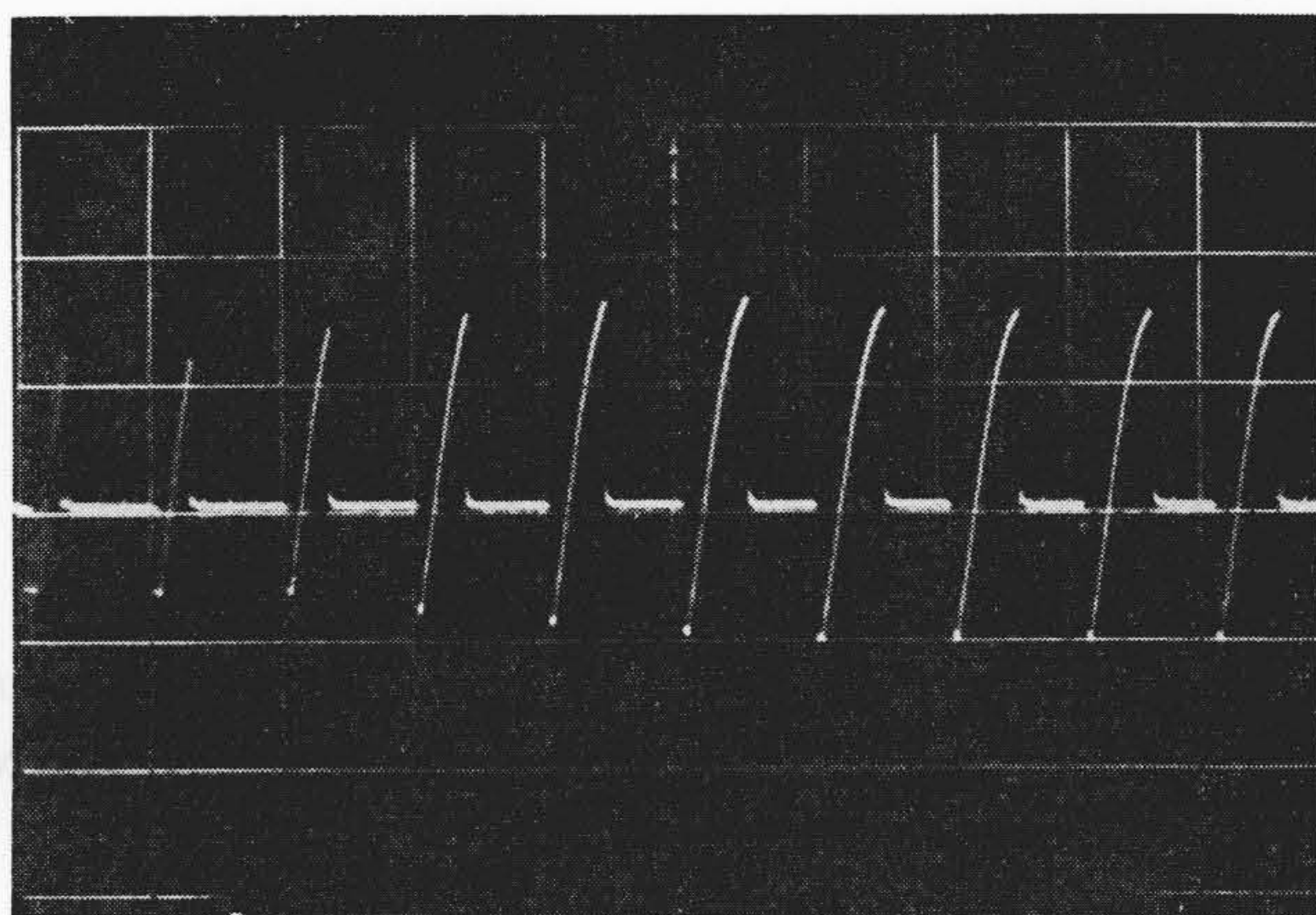
第17図 転流コンデンサ群



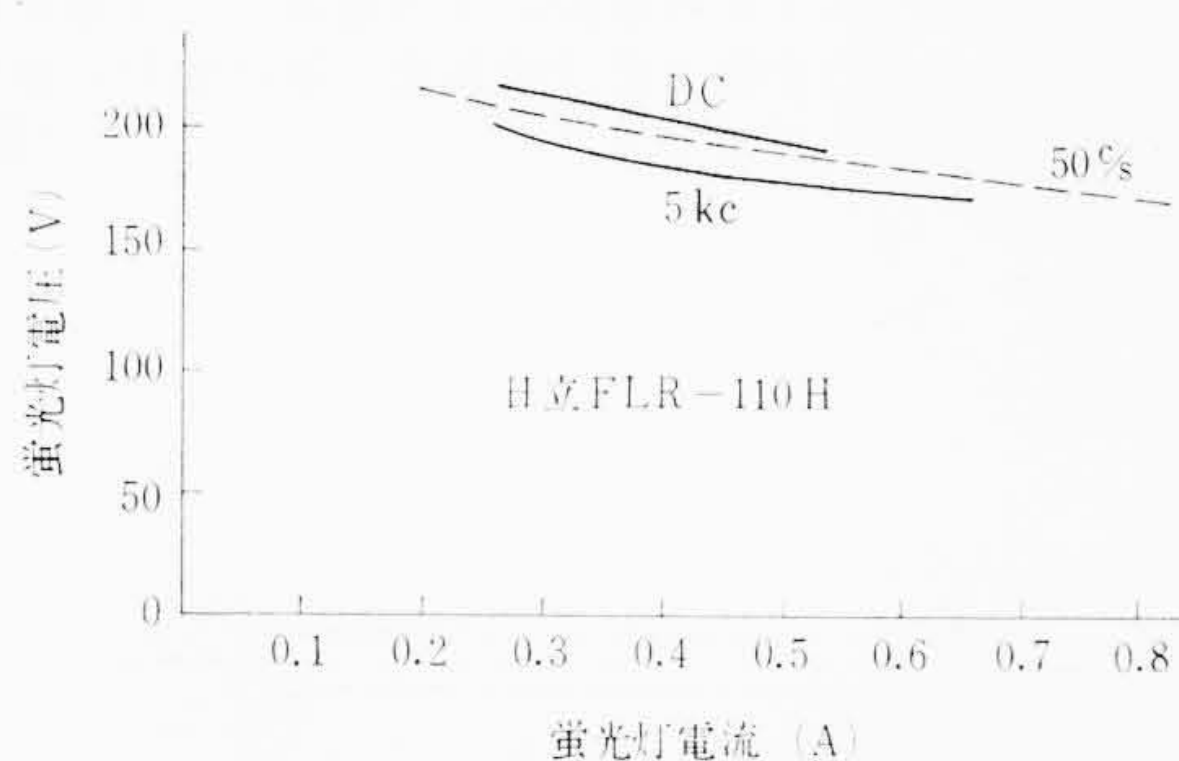
第21図 蛍光灯電源回路接続図



第18図 断続運転時の制御信号



第19図 突発移相時のA-K間電圧波形
(6サイクルで120度遅相)



第20図 蛍光灯の電圧電流特性

動失敗は発生しなかった。

なお特殊試験として下記の試験を行なった。

(a) 起動の安定性が確認されたので、SCRの無接点開閉作用を利用したパルス状出力の繰返し運転で、起動停止は次の順序によった。

- (i) SCRに制御パルス印加→直流電圧発生
- (ii) SCRインバータに制御パルス印加→交流電圧発生
- (iii) SCR制御パルス停止→直流電圧減少→交流電圧減少→交流電圧停止
- (iv) SCRインバータ制御パルス停止→再起動準備

(b) SCRインバータ制御パルスの移相により正常に運転を継続することが確認された。第19図に移相した場合のSCR両極間電圧波形を示す。このように

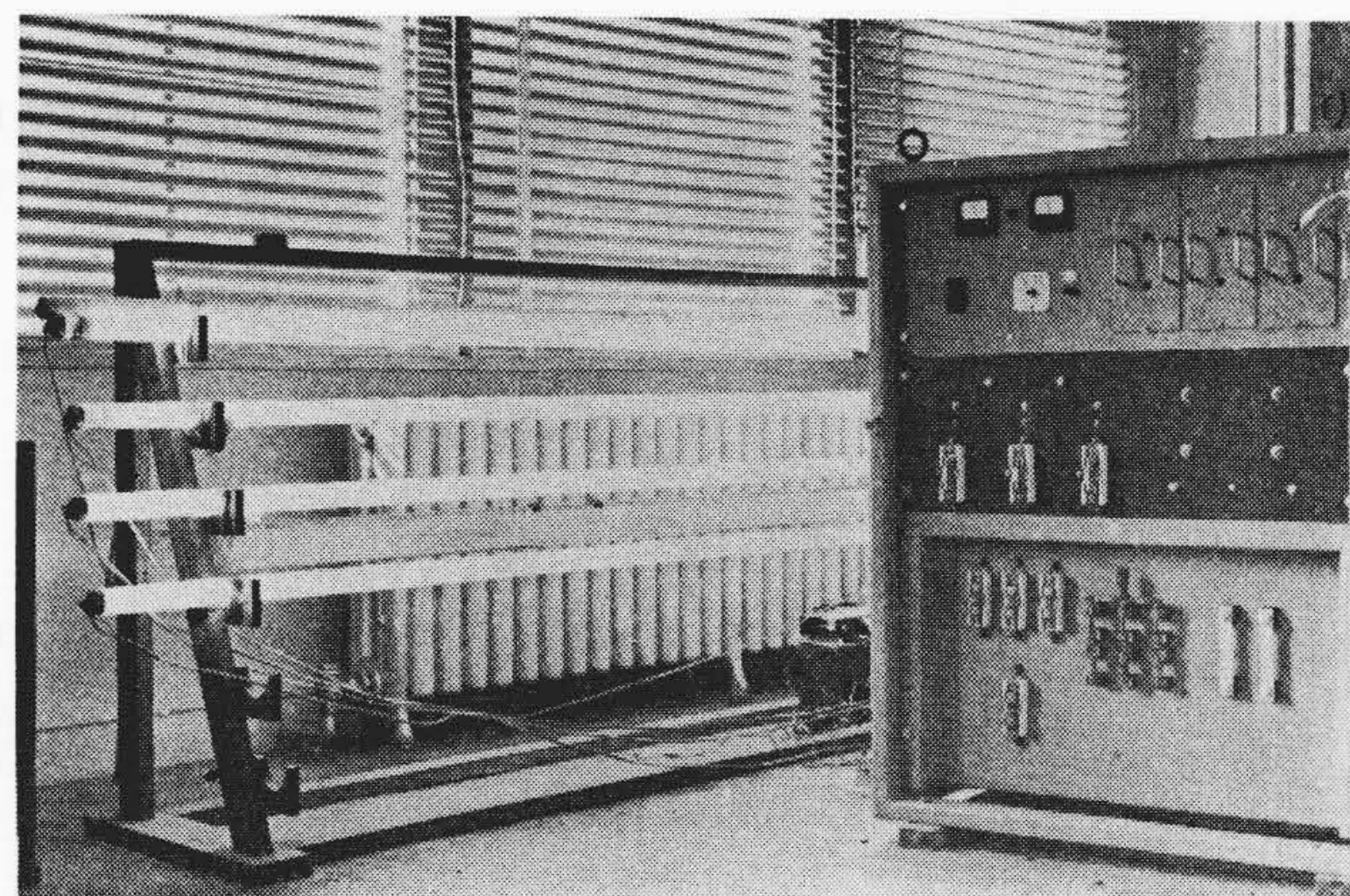
相当広範囲に位相変化を行なうことができる。したがって、高周波インバータにおいても他機との同期を取ることが可能である。

5.2 蛍光灯点灯用電源

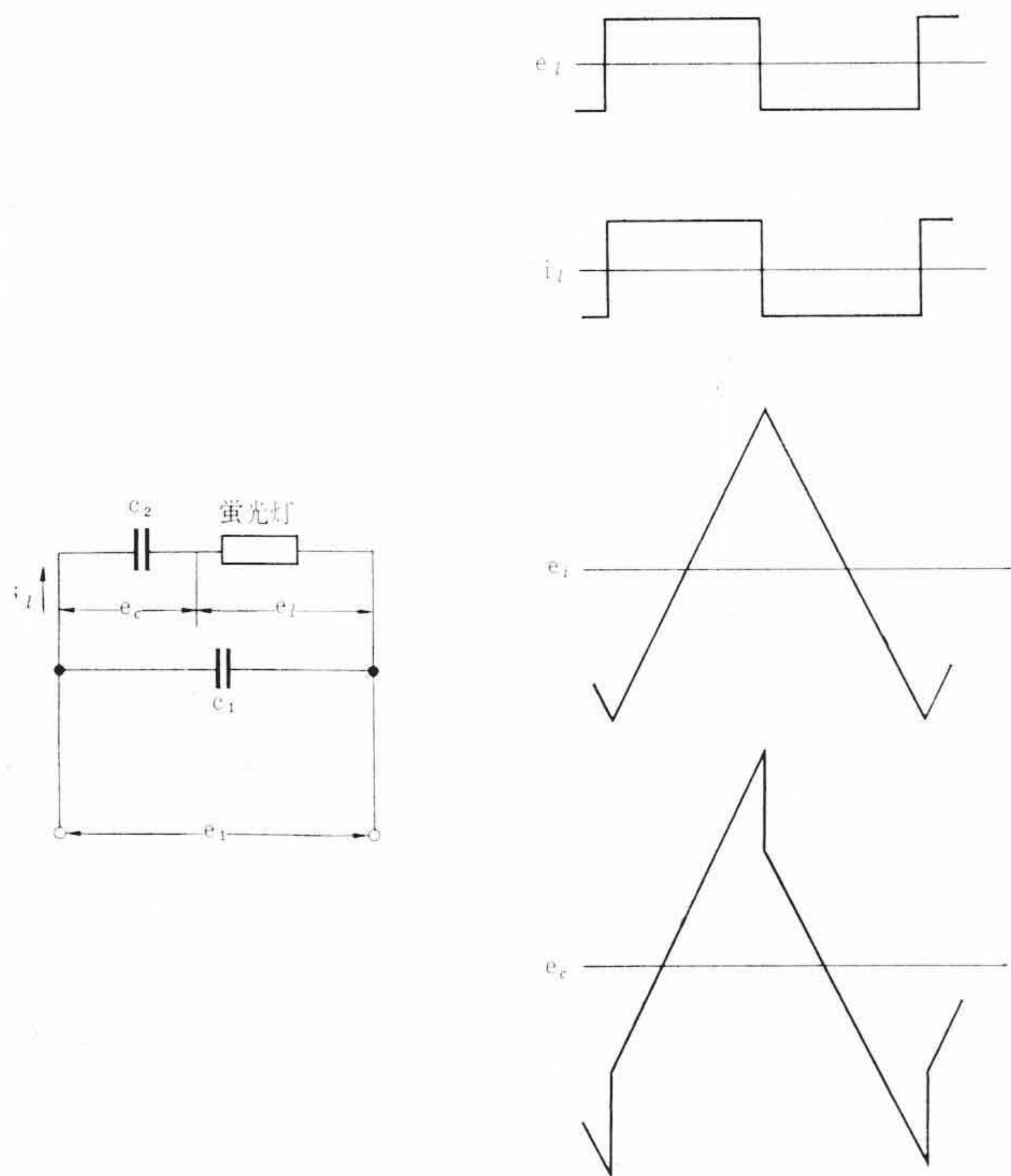
蛍光灯は高周波で点灯すると種々の利点がある。すなわち
効率が上昇する
フリッカが減少する
バラストが小形になる

効率は、高周波点灯の場合直流の場合とほぼ同一で商用周波の場合に比較して約20%高い。なおその効率は2kc以上となっても特に向上しないことが確認されている。蛍光灯の電圧-電流特性は第20図のように定格電圧付近ではほぼ定電圧特性を示し、いくぶん負特性である。しかも周波数によってその特性は若干変化する。

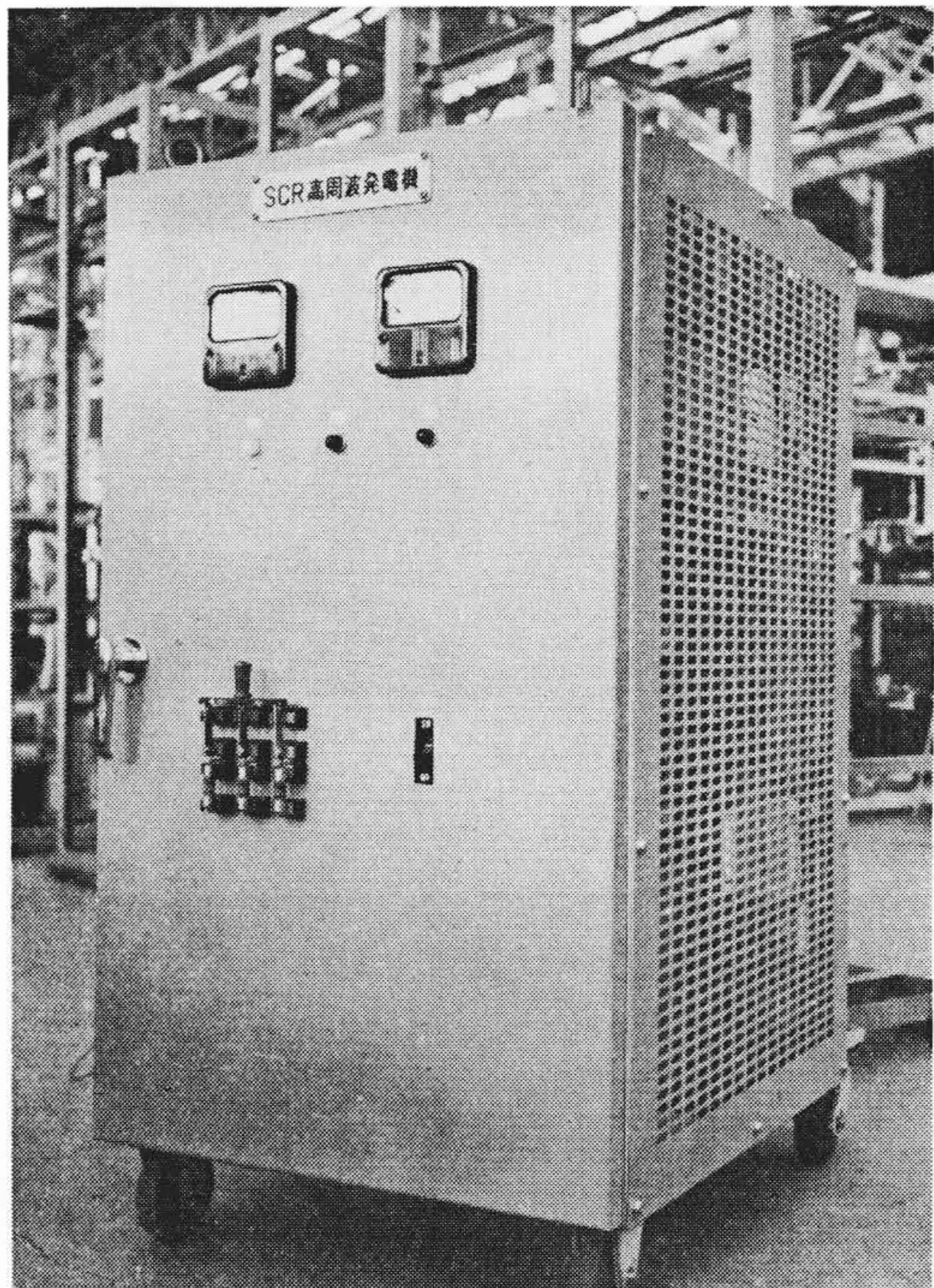
第21図は日立FLR-110H 4個点灯用電源装置の概略接続である。本器のおもな仕様は次のとおりである。



第22図 試験中の蛍光灯電源装置



第 23 図 蛍光灯電源装置各部波形



第 24 図 磁気増幅器電源装置

交 流 入 力 200V 三相 50 c/s
 蛍 光 灯 日立 FLR-110 H 4 灯
 交 流 出 力 500W 500V 单相

各部の電圧，電流波形は第 23 図に示すとおりで，蛍光灯の電圧，電流はほぼ方形波で位相差はほとんど認められない。蛍光灯連続試験の結果，光束がいくぶん減少した以外特に変化は認められなかった。

5.3 磁気増幅器用電源

磁気増幅器の応答速度の向上を目的として，より高周波の電源が要求されている。第 24 図はこの要求を満たす SCR インバータ装置の外観を示す。

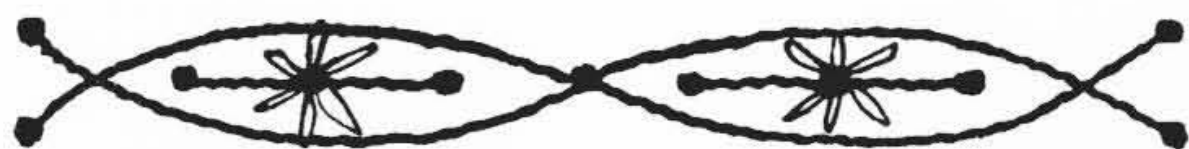
交 流 入 力 200V 50 c/s 三相

直 流 電 圧 40V
 交 流 出 力 625 VA 100V 单相 5,000 c/s 力率 80%

6. 結 言

SCR を用いた高周波インバータの問題点や試作装置の試験結果に基づきその特性を説明した。SCR 高周波電源装置は利点の多い機器であり将来電動発電機にとってかわるであろう。

しかしスイッチングパワー，インバータ変圧器設計上の問題，電動変動率の軽減，波形の改善など研究すべきことが多い段階である。これらの点の究明により SCR の高周波領域における応用はますます発展するものと考ええる。



特許第408960号

特 許 の 紹 介



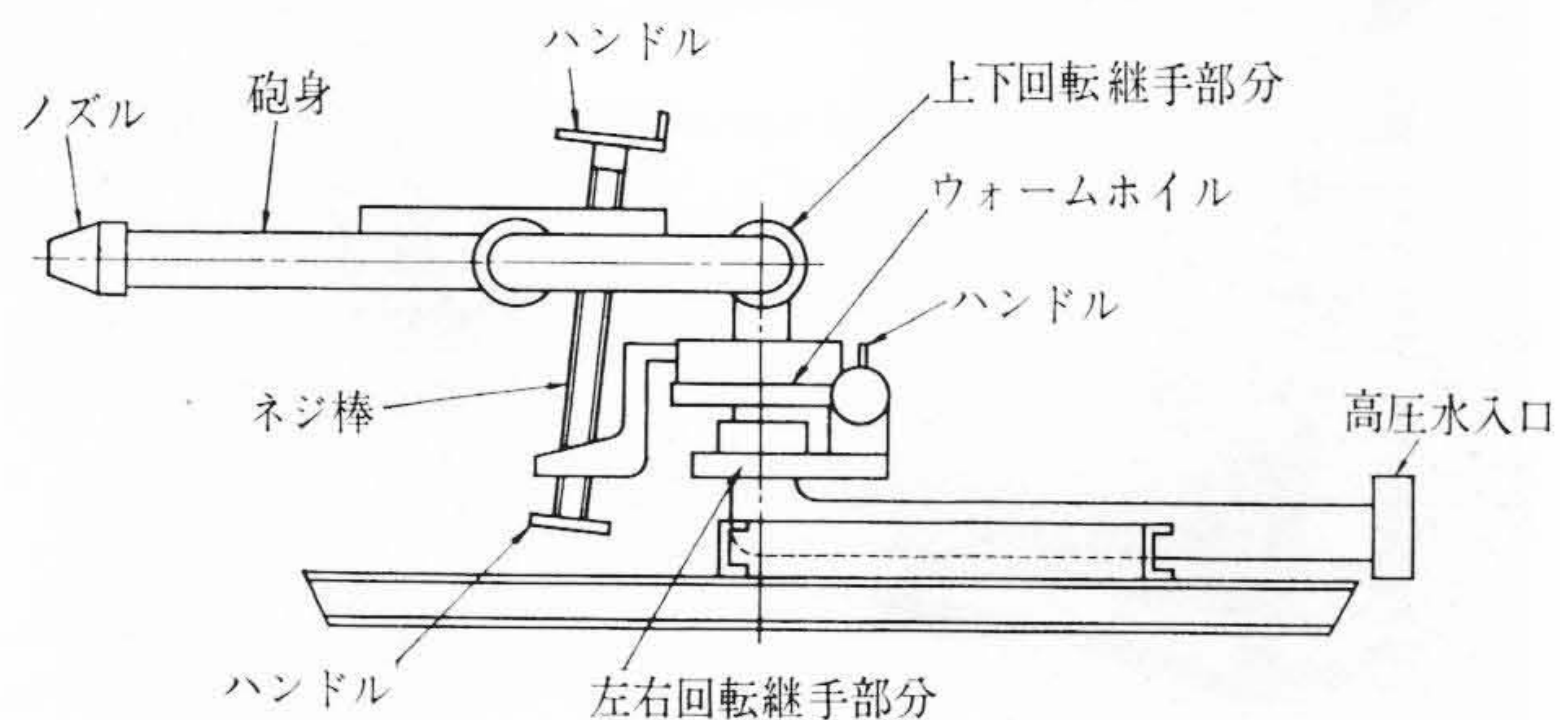
坂 本 正 克

ハ イ ド ロ カ ッ タ

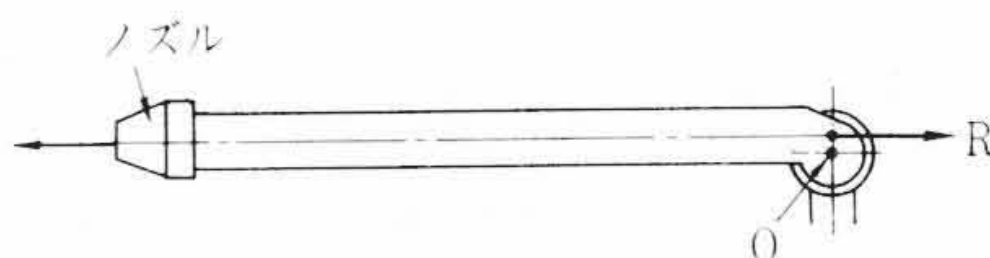
この発明のハイドロカッタは，砲身の上下駆動回転の中心軸 O を，ノズルから噴射する高圧水によって生ずるスラストの方向 R と

直交せずわずかに下にずらして構成したことを特徴とするものである。

この発明によれば，高圧水の噴射により砲身の上下駆動に要するモーメントが増大するのを防ぐだけでなく，逆に駆動に要するモーメントを減少させることができる。（富 田）



第 1 図



第 2 図