

シリコン制御整流素子とその応用

Silicon Control Rectifier Elements and Its Application

浅 野 弘* 岩 田 幸 二** 守 田 啓 一*
Hiroshi Asano Kôji Iwata Keiichi Morita

内 容 梗 概

近年の半導体製作技術がいかに急速に開発されているかは改めて述べるまでもない。本文で述べるシリコン制御整流素子(以下SCR素子と呼ぶ)もその輝かしい成果の一つである。SCR素子の容量は日進月歩の観がある。日立製作所はすでに150 A 600 V級まで量産化し、その応用製品は数十kW級が運転されている。ここ数年以内に1,000 V級のSCR素子および数百kW級のSCR装置が運転にはいるものと予想される。いよいよ電力変換装置はSCR時代に突入せんとしている。本文では現状のSCR素子およびその応用製品につき簡単に紹介する。

1. 結 言

半導体整流器にて近年賞用されているのはシリコン整流素子(以下SR素子と呼ぶ)とその応用製品であるが、SCR素子はSR素子の有するすべてのすぐれた特性を保持するとともに、制御可能な半導体素子である。したがってSCR素子およびその応用製品は主として電力変換を対象としたものである。

従来制御可能な電力変換用機器としては、大形真空管、サイライトロン、水銀整流器および回転変流機があり、それぞれの用途に利用されてきた。しかし半導体技術の進歩はこの部門に一大変革をひき起こし、電力用トランジスタ、SR素子およびSCR素子が導入され、電力変換装置は根本より姿を変えつつある。電力変換用機器として要求される点は次の点に集約される。

- (1) 高能率であること
- (2) 高信頼度で保守が簡単であること
- (3) 寸法、重量が小さく、建設費が少ないこと

このいずれの条件も十分満足できるものは、現在の技術ではSRおよびSCRにおいてほかにはない。特にSCRは制御能力(制御電力はきわめて小さい)を有するので、電力変換機器としては最適である。SCRの出現が一つの技術革新として宣伝されるのも、当然なことである。

1.1 SCR素子の特長

SCR素子の特長として次の諸点が挙げられる。

- (i) シリコン単結晶を利用した半導体素子であるので、高温に耐えかつその電流量は結晶寸法増大により大幅に増加するものと予想される。
- (ii) 接合部構造より耐電圧向上は比較的容易で、耐圧1,000 VのSCR素子出現も目前にある。耐圧の向上はそのまま効率向上に直結することもその大きな特長である。
- (iii) 高能率静止機器であるので、SCR装置は小形軽量に作られ、素子量産化による価格低下と相まって、その製品価格も大幅に低減されることが予想される。

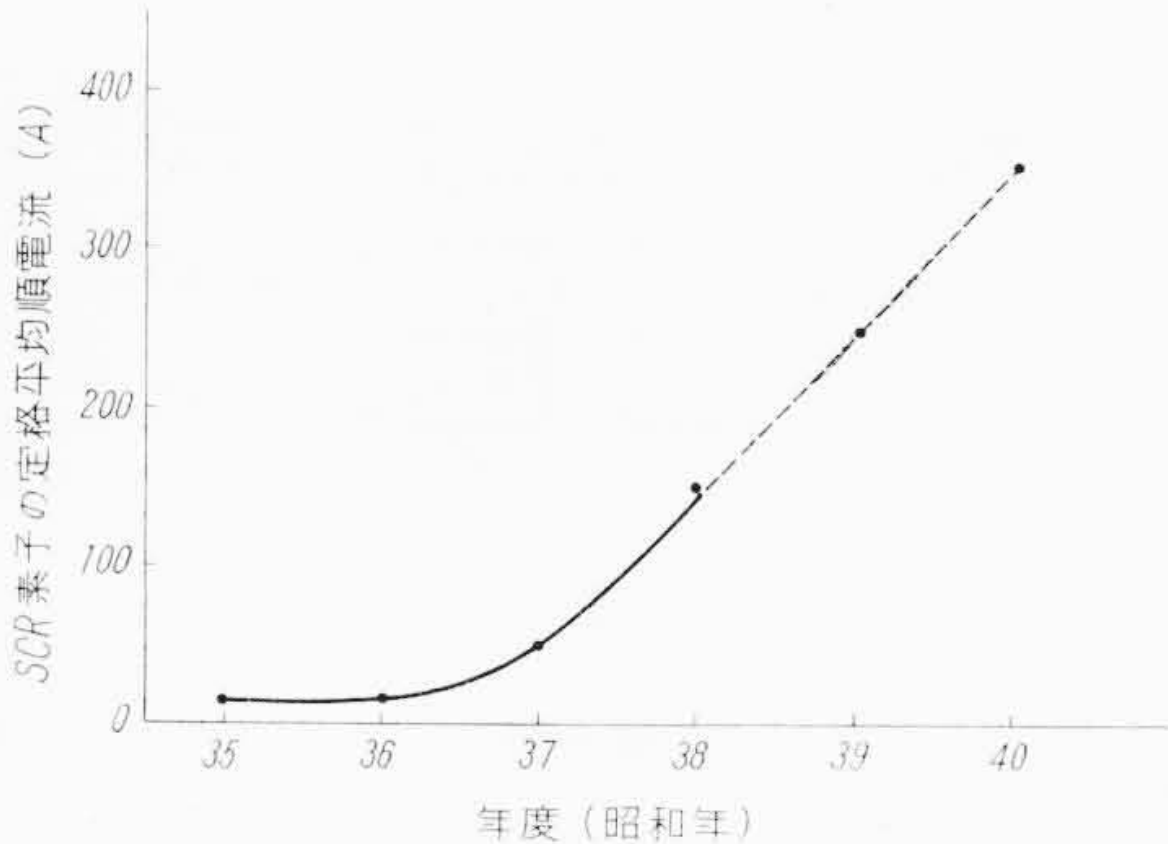
1.2 SCR素子の欠点

SCR素子は次の欠点があるので、使用上考慮しなければならない。

- (i) トランジスタと異なり、一般にはゲート制御によりカットオフすることができない(転流回路が必要となる)。
- (ii) 使用周波数の上限は約20 kcである。
- (iii) 定格以上の過電圧、過負荷は短時間といえども許容されな

第1表 日立SCR素子の系列

形 式	電 流 (A)	電 圧 (V)	接合部温度 (°C)	熱 抵 抗 (°C/W)	主 たる 用 途
C S U	3	50~600	125	4.0	スイッチング要素
C S R	16	50~600	125	1.6	{ スwitchング要素および小 形応用製品
C S N	50	50~600	125	0.5	{ スwitchング要素および中 形応用製品
C S M	150	200~600	125	0.2	大容量製品(主電動機用など)



第1図 量産SCR素子電流の発達

い。

しかしこの欠点は電力用器具として致命的な制約とはならない。

1.3 日立SCR素子の現状

日立製作所は電力用半導体素子の開発に異常な努力を傾倒し、数多くの電力用素子を開発した。その技術の頂点として

SR素子 200 A 1,500 V耐圧

SCR素子 150 A 600 V耐圧

を現在量産している。SR素子はSCR素子に先行して開発されたので、非常に多くの運転実績を持っている。日立製作所はシリコン整流器において、電鉄、化学、車両用を含めてわが国最大の納入実績を有し、輸出においても日本連合の形式にて車両用シリコン整流器(いずれも2,000 kW級)数十台を製作中である。

SCR素子の設計、製作技術はSR素子に比べて、一段と高度のレベルが必要である。日立製作所はSR素子開発、製作につちかった技術を駆使してSCR素子の研究、試作、量産のステップを踏み第1表に示す製品が目下量産態勢にはいっている。

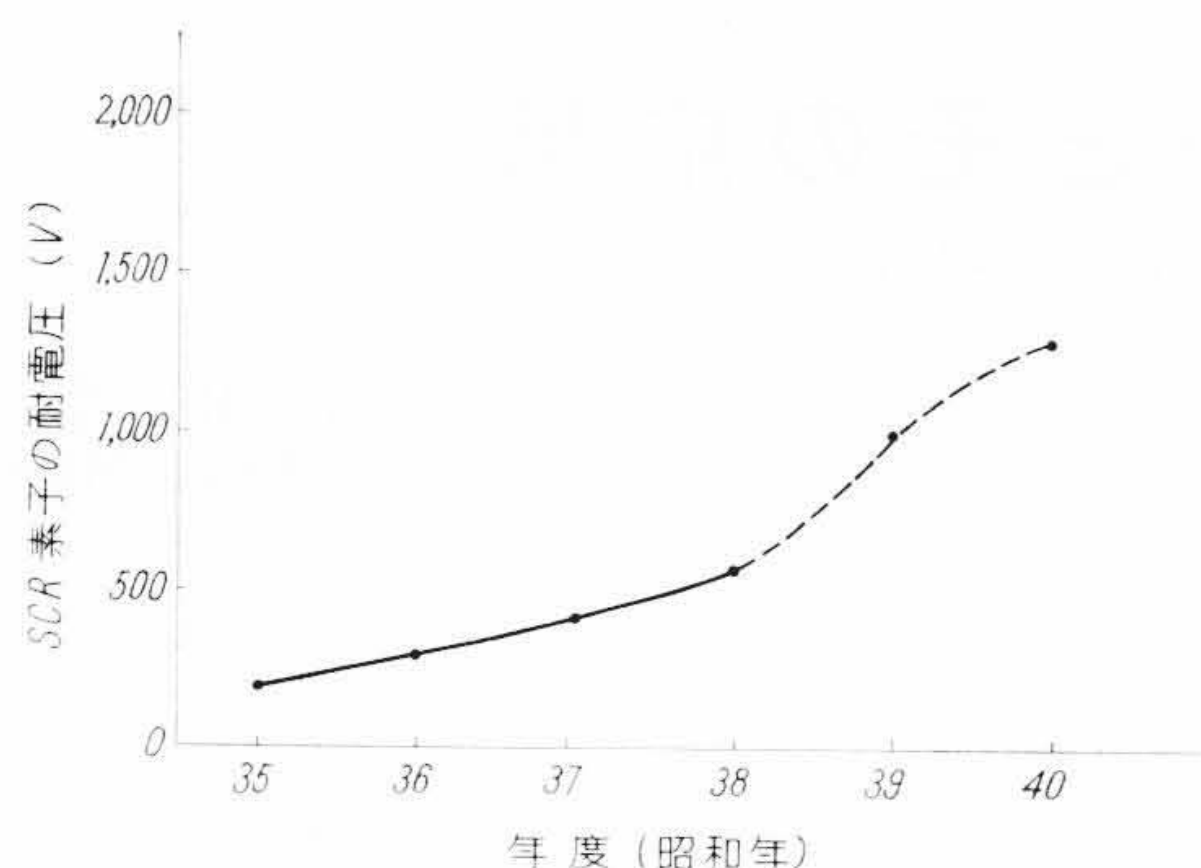
1.4 SCR素子の今後の見通し

SCR素子にとっては、その応用製品の高効率化、製品価格の低減を図るため、単位容量の向上が非常に大切な事らである。

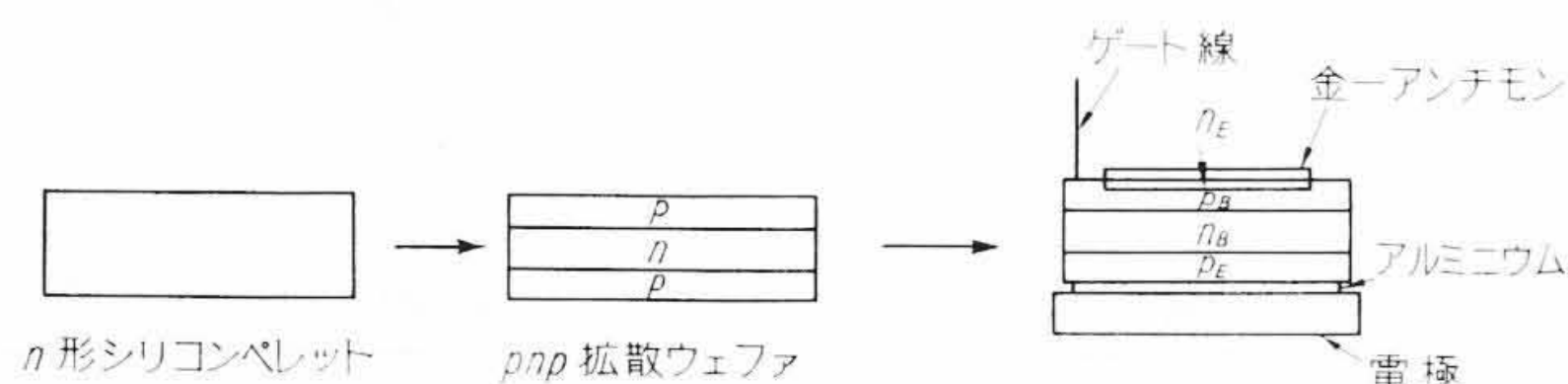
SCR素子に使用される材料で最も重要なものはもちろんシリコン単結晶である。最近シリコン単結晶製作技術の進歩は誠にめざましく、フローティングゾーン製法による大形寸法にして良好な品

* 日立製作所日立工場

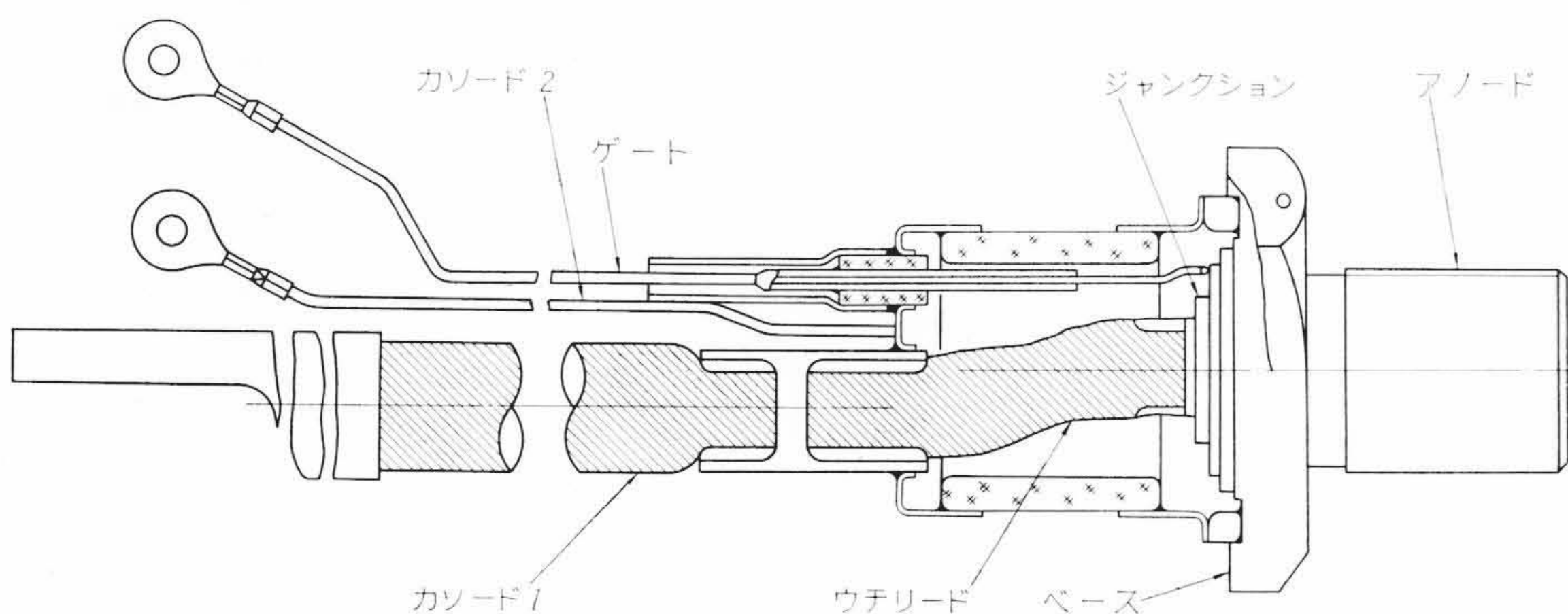
** 日立製作所日立研究所 工博



第2図 量産SCR素子耐電圧の発達



第3図 pnpn 接合部製作工程図



第4図 SCR 素子断面図

質のシリコン単結晶（ライフタイムが長く、比抵抗のバラツキも少なくかつ結晶欠陥のないもの）が得られ、将来さらに改善されるもようである。その結果SCR素子の電流容量は今後ますます増大するものと予想される。大形寸法になった場合の問題は接合部の均一性確保、内部応力の処理およびターンオン時のスイッチングパワーの処理がある。第1図には電流容量と量産開始年度およびその予想を示す。

次に電圧特性改善については、接合部の設計、製作上の問題进行处理せねばならない。耐電圧特性（特に V_{BO} ）改善については、2章に詳述するが、順電圧降下特性などある程度ぎせいにする必要があり、電流容量との関連で改善せねばならない。しかしSCR装置よりの要求を考えれば、耐電圧特性改良が優先せねばならない。第2図には耐電圧（最大電流容量を対象として）と量産開始年度およびその予想を示す。

2. SCR素子の特性

2.1 構造

現在製作しているSCR素子はpnpの4層から構成されている。第3図はその説明図である。

pnpn接合を作るにはn形シリコンにガリウム拡散を行ないpnp拡散ウェハをつくる。ついで金-アンチモンを合金化することにより、pnpn構造とする。このpnpn接合は銅ベースと膨張係数が異なるため電極板で裏打ちされ銅ベースおよび内部リード線と接合される。接合表面は入念に絶縁処理をされ、高電圧に耐えられる。

素子の特性上、安定な状態とするためにケース内部は不活性ガスで満たされる。機械的保護、気密性および絶縁耐力を確保するため、銅ベース上にセラミックシールを取り付け主リードおよびゲートリードが設けられる。第4図はSCR断面図の一例を示す。

2.2 動作原理

pnpn接合は陽極、陰極、ゲートの端子と J_1 , J_2 , J_3 接合を有する。その動作を考えるためpnp, npnトランジスタとして考える。 I_c , I_e はそれぞれpnp, npnトランジスタのエミッタ電流とするとnpnトランジスタのコレクタ電流 $\alpha_{32}I_e + I_c/2$ がpnpトランジスタのベースの入力となる。同様なことがnpnトランジスタのベース入力についてもいえるので次式が成立する。

$$(1 - \alpha_{12})I_c - \frac{I_{c0}}{2} = \alpha_{32}I_e + \frac{I_{c0}}{2} \quad (1)$$

$$\alpha_{12}I_c + \frac{I_{c0}}{2} - I_g = (1 - \alpha_{32})I_e - \frac{I_{c0}}{2} \quad (2)$$

これをといて

$$I_c = \frac{I_{c0} - \alpha_{32}I_g}{1 - \alpha_{12} - \alpha_{32}} \quad (3)$$

を得る。

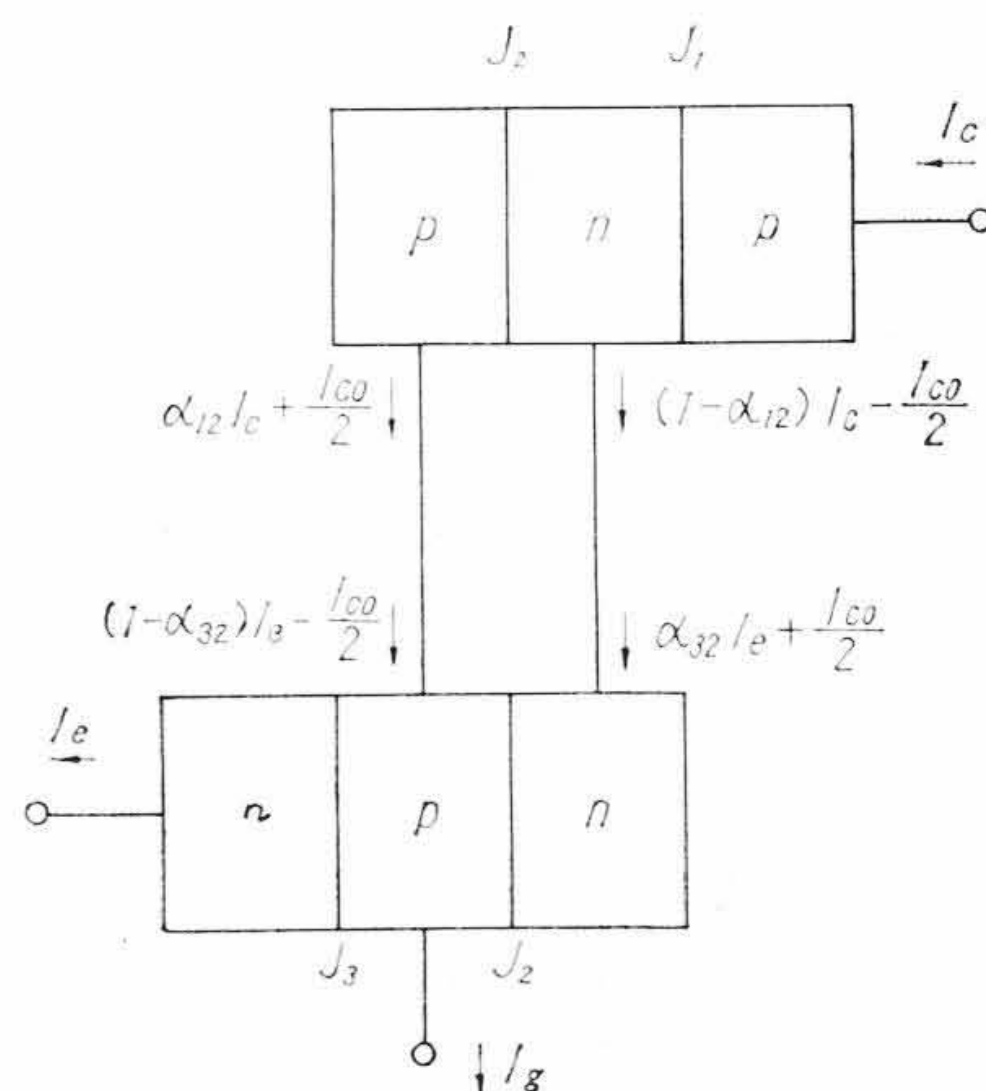
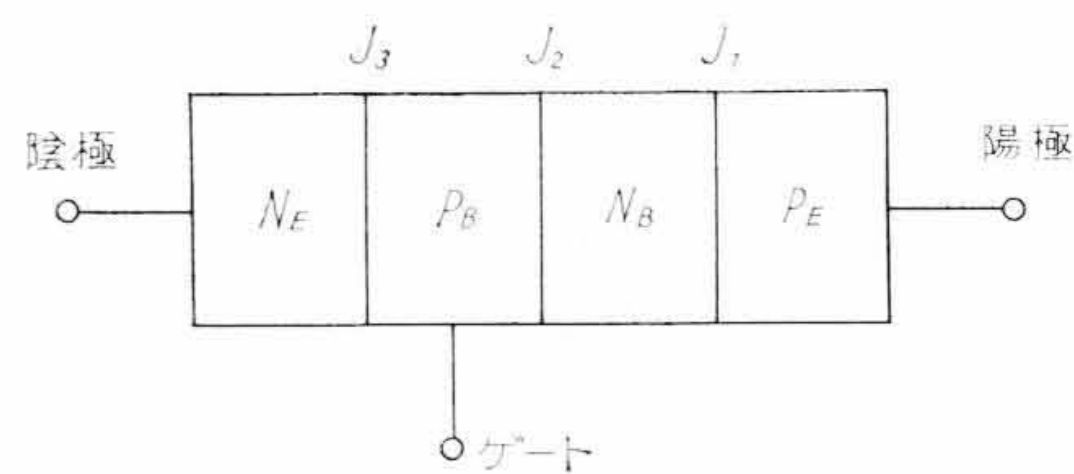
第5図にSCR動作基本原理を示す。

(1) ゲート電流零で正方向電圧印加の場合

正方向電圧を増してゆくと $\alpha_{12} + \alpha_{32}$ が増加し漏れ電流が増す。この電流によっても $\alpha_{12} + \alpha_{32}$ が増加し $1 = \alpha_{12} + \alpha_{32}$ で I_c は負荷によって制限される値まで増加する。すなわちブレイクオーバーして導通状態になる。

(2) ゲート電流を流し点弧させる場合

ゲート電流を流すと α_{32} により増幅され $\alpha_{32}I_g$ が I_{c0} よりも大きくなる。このため正方向漏れ電流が急速にふえることになり $1 = \alpha_{12} + \alpha_{32}$ の条件が満足され導通状



I_c : pnpトランジスタのエミッタ電流
 I_e : npnトランジスタのエミッタ電流
 I_{c0} : J_2 接合の漏れ電流
 α_{12} : J_1 接合をエミッタとし J_2 接合をコレクタとする電流ゲイン
 α_{32} : J_3 接合をエミッタとし J_2 接合をコレクタとする電流ゲイン

第5図 SCR動作原理説明図

第2表 SCR 特性と基本量の関係

特性 基本量	FVD	V_{BO}	PRV	τ_{on}	τ_{off}	R
W_{nB}	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
W_{pB}	↑↑	↑↑		↑↑	↑↑	↑↑
τ_{nB}	↑↓	↑↓		↑↓	↑↑	
接合面積	↑↓	↑↓	↑↓			↑↓

↑↑: 基本量とともに増減

↑↓: 基本量と逆に増減

FVD: 順電圧降下

 V_{BO} : ブレークオーバー電圧

PRV: 逆耐電圧

 τ_{on} : ターンオン時間 τ_{off} : ターンオフ時間

R: 熱抵抗

 W_{nB} : nB 層厚さ W_{pB} : pB 層厚さ τ_{nB} : 正孔のライフタイム

態となる。

(3) 逆方向電圧を印加する場合

逆方向に電圧を印加する場合は主として J_1 接合に電圧がかかり pn 接合に逆電圧を印加したことに相当する。

2.3 設計上の問題点

SCR 素子のおもな特性の間には第1表に示すような相反する要素があり用途に応じて必要とする特性を強調した設計製作を行なうことが必要になる。

電力用 SCR 素子としてまず正逆方向耐電圧の高いことが要求される。正方向ブレークオーバー電圧(V_{BO})は J_2 接合のなだれ破壊電圧(V_{BD})と電流ゲイン α_{12} , α_{32} に関係し次式で示される。

$$V_{BO} = (1 - \alpha_{12} - \alpha_{32}) \frac{1}{m} V_{BD} \quad (4)$$

 V_{BD} : J_2 接合のなだれ破壊電圧 $\alpha_{12}\alpha_{32}$: J_1 , J_3 をエミッタとして J_2 をコレクタとする電流ゲイン m : 常数

V_{BD} はベースシリコンの比抵抗を増すことによって大となる。それにもなつて電圧印加時空乏層の広がりが増すため α_{12} が大きくなり、 V_{BO} はそれによって押さえられることになる。したがって比抵抗ベース層厚みの最適値範囲が両者からきめられる。 V_{BO} の温度特性を向上させるためには $\alpha_{12} + \alpha_{32}$ を小さく押さえることが肝要で印加電圧が V_{BO} に近くなるとなだれ増倍係数が大きくなりブレークオーバーにいたるようによればよい。このように設計、製作された素子ではなだれ破壊電圧の温度特性から V_{BO} も温度とともに上がるようになる。前述の α の低減のためベース層の厚さを増すことがあるがそのために正方向電圧降下 (FVD) が増すのでこの面からの制約をうけることになる。

SCR 素子を電力用に使用する場合、直並列で使用するが多いのでターンオン特性、ターンオフ特性、ゲート特性が問題となる。ゲート電流を流すと α_{32} で増幅され正方向漏えい電流が増しブレークオーバー電流にいたってブレークオーバーするが、前述のように V_{BO} を増しかつ温度特性をよくするため、 α_{32} を低減すると点弧ゲート電流は大とならざるを得なくなる。低周波で使用する時、ターンオン特性、ターンオフ特性のバラツキは直列接続を行なう場合電圧分担の点から少ないことが必要であるが、主として製作上のバラツキが問題である。高周波回路に使用する場合ターンオン時間、ターンオフ時間が短くないとターンオン、ターンオフ時の電力損失が定常通電状態の正方向電圧降下による電力損失と同程度となり問題となる。

またインバータとして使用する場合ゲートの制御能回復が遅れ転流失敗をまねくのでターンオフ時間を低減しなければならない。ターンオン、ターンオフ時間を低減するにはベース層厚さを減らし少数キャリアのライフタイムを小さくせねばならないが前者は V_{BO} の低下を招き後者は正方向電圧降下の増加を招くことになるので注意

せねばならない。

2.4 製作上の問題点

2.3 項において述べた素子の V_{BO} , FVD, ターンオン時間およびターンオフ時間のバラツキは製作上のバラツキに起因することが多い。すなわち、不純物濃度分布、ベース層厚さ、ライフタイムなどのバラツキである。まず特性のそろった pnp 拡散ウェファを得ることが重要である。不純物拡散における不純物表面濃度、拡散温度、時間、拡散深さの関係は次式で示される。

$$N_B = N_s \operatorname{erfc} \frac{X_j}{2\sqrt{Dt}} \quad (5)$$

 N_s : 不純物表面濃度 (Atoms/cm³) N_B : ベース不純物濃度 (Atoms/cm³) X_j : 拡散深さ (cm) D : 拡散係数 (cm²/s) (拡散温度に関係) t : 拡散時間 (s)

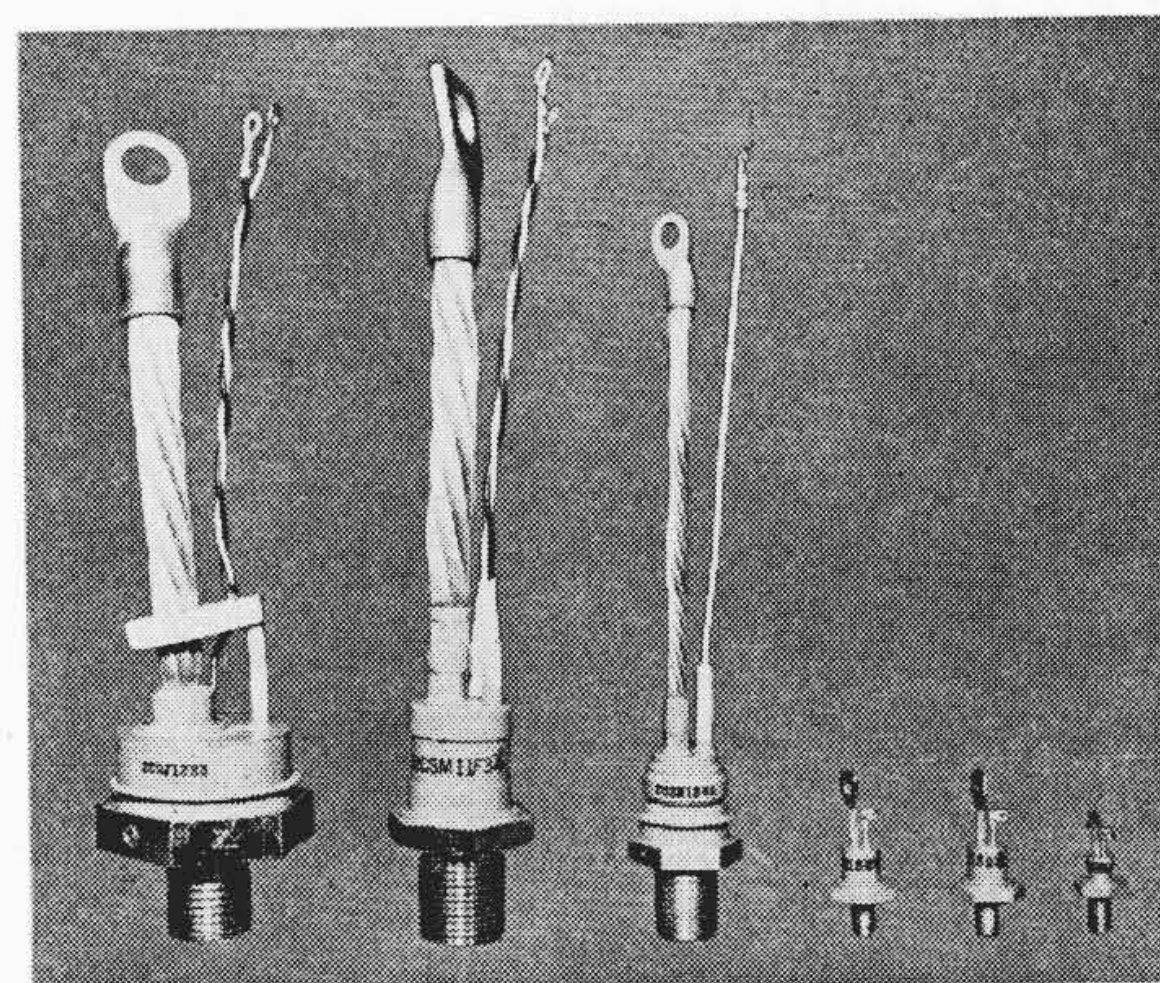
X_j のバラツキは主として N_s , D すなわち拡散温度のバラツキが問題となるわけである。 N_s のバラツキは不純物ソース部の温度のバラツキおよびシリコンウェファとの相対的配置方法によるバラツキを低減することが必要であり、拡散温度は $\pm 0.1\%$ 程度に制御することが必要である。このため拡散炉および制御装置が検討されねばならない。また 1,000°C 以上の高温であるので熱電対の較正管理、測温方法が重要となる。ベース層厚さのバラツキはシリコンウェファ厚みのバラツキも関係し厚み測定にも注意せねばならない。

ゲート特性を均一にするには不純物濃度分布が一定であることはもちろんであるが、 nE , P_B 層を作るための pnp 拡散ウェファと金-アンチモンとの合金の際 P_B 層の均一な厚みが得られねばならない。同時に J_3 接合の不純物濃度を考慮することにより点弧ゲート電流が制御できる。点弧ゲート電圧はゲートリード接着部の不純物濃度および P 層厚さに関係するので製作上考慮をはらうことが必要である。

V_{BO} , PRV の向上, 劣化防止のためシリコン接合部の表面処理が重要であり、シリコン表面の化学エッチングの方法および表面安定化絶縁処理は特に入念に行なわれる。この処理が正方向電圧印加時の漏えい電流をへらし V_{BO} 特性を安定かつ向上させることができる。

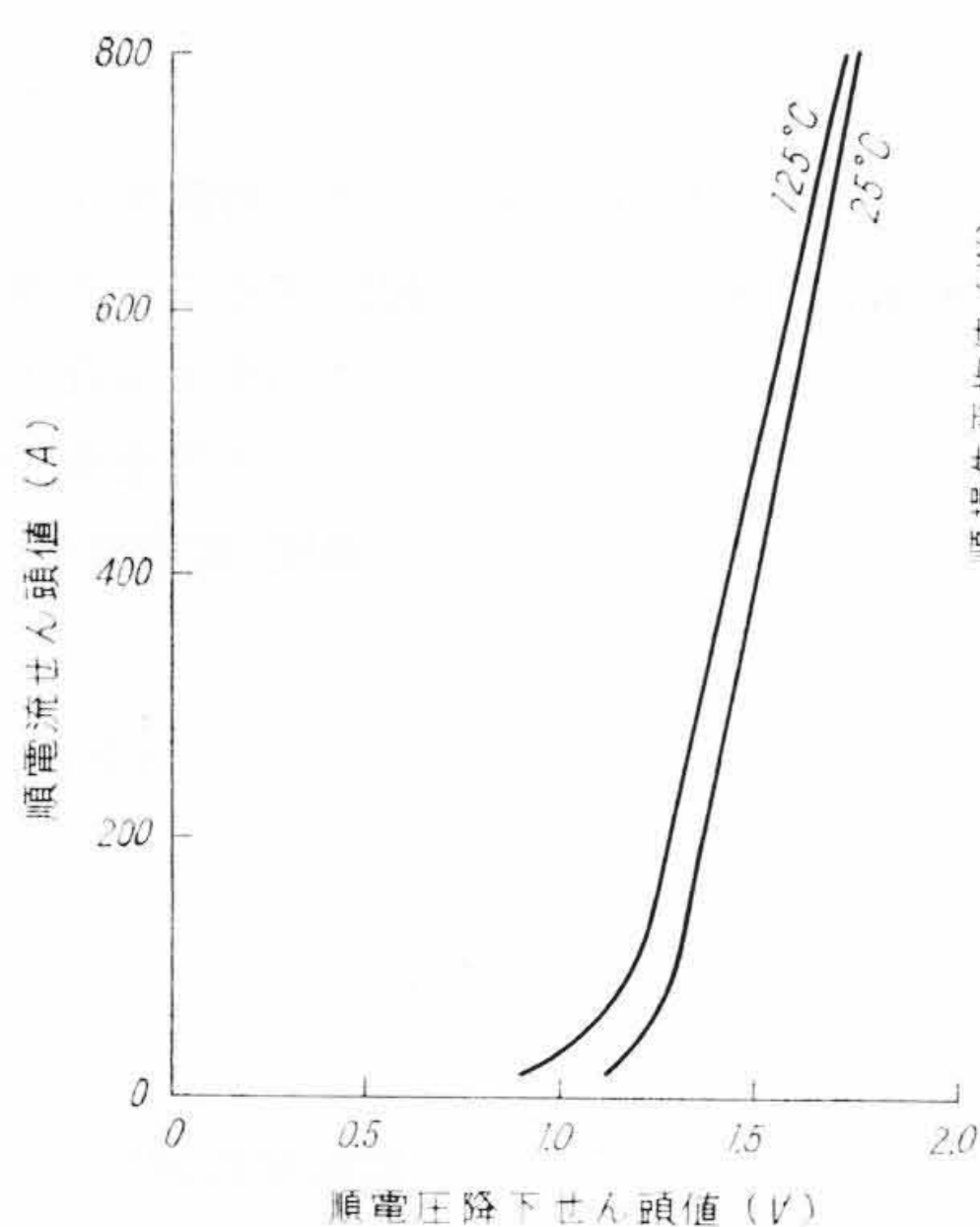
間欠負荷に使用される場合接合部に冷熱サイクルが加わる。接合片と銅ベースは膨張係数が異なるため接合片と銅ベースを接着するろう材に熱疲労が加わるのでろう材の材質、接着法、構造は十分検討し製作される。

大寸法単結晶を使用する場合の最大の問題としては、接合部の関係寸法の均一性確保がまず問題になる。すなわち第1拡散時の変形防止、スライジング、ラッピング時の寸法精度確保から解決せねばならない。この点日立製作所はすでに 500 A 級拡散形 SCR 素子を

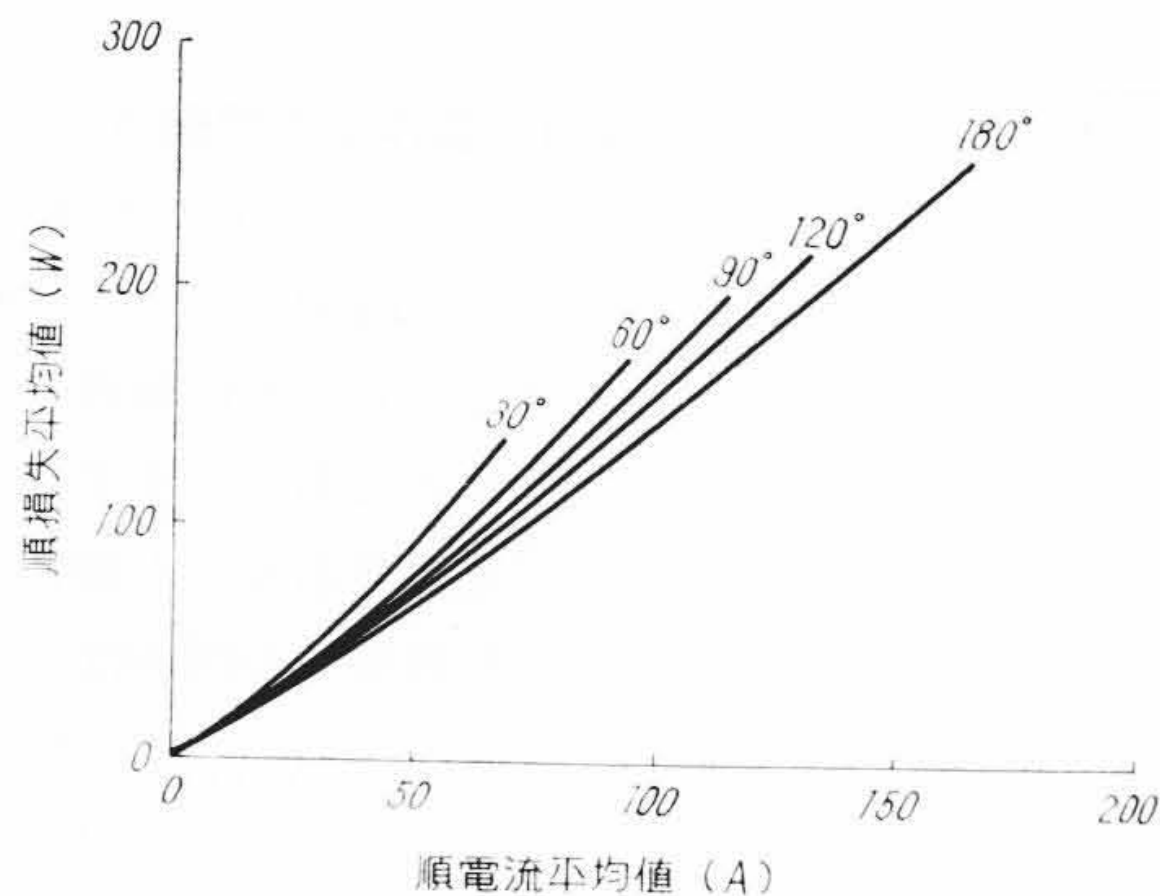


ZCDJ形 200A ZCSM形 150A ZCSN形 50A ZCSR形 16A ZCSS形 10A ZCSU形 3A

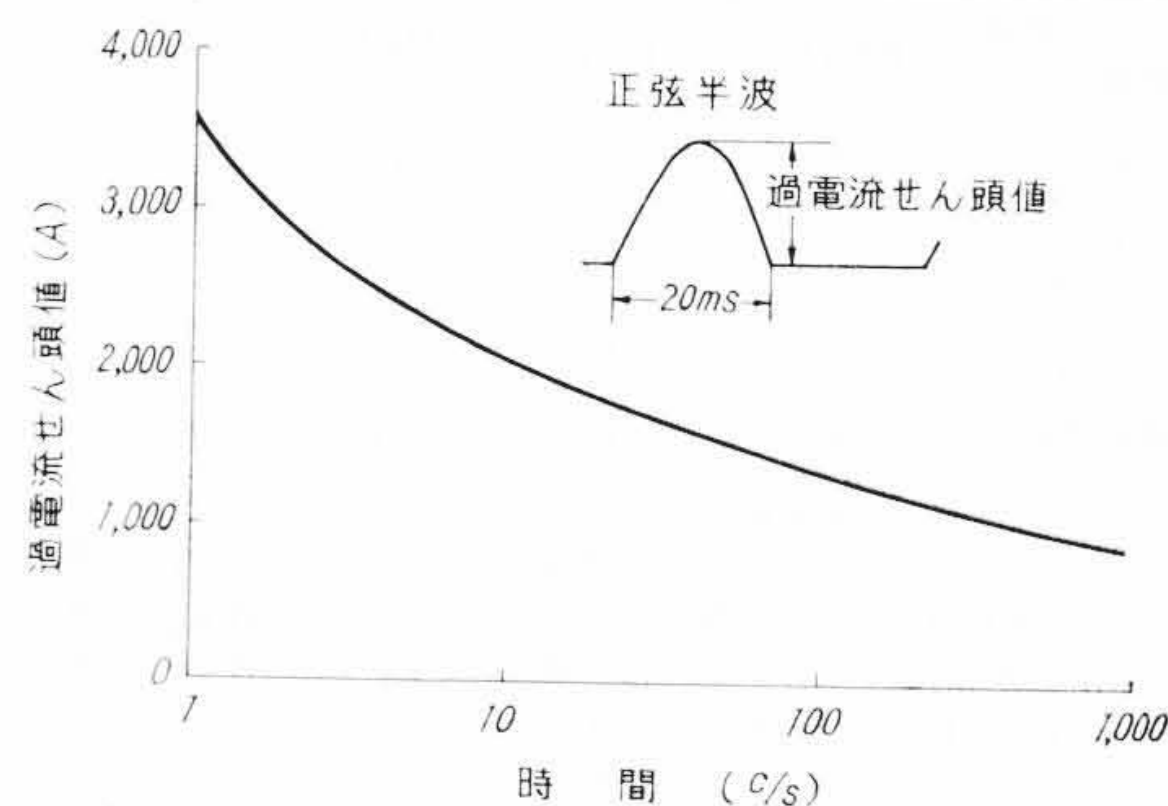
第6図 日立 SCR 素子系列



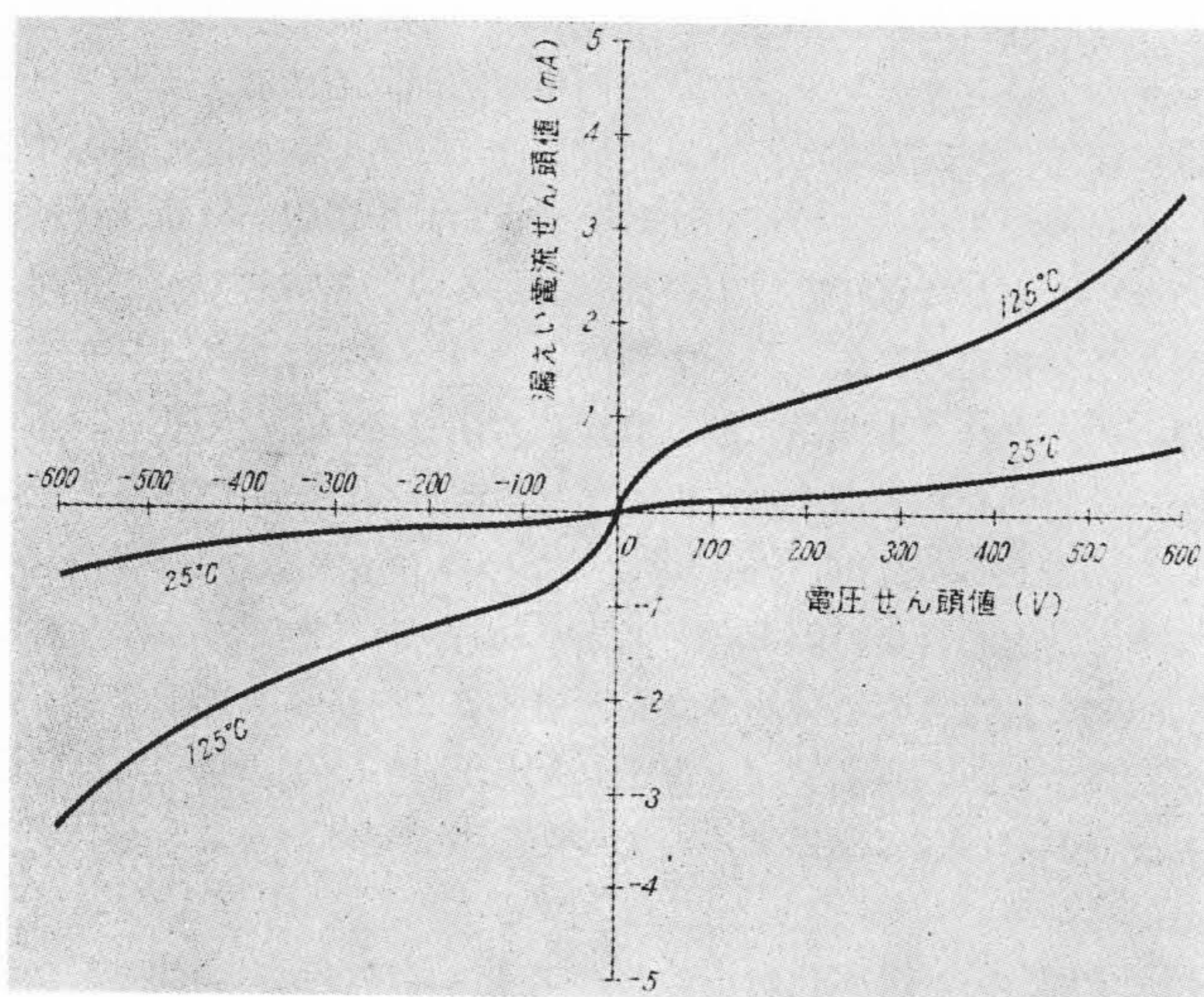
第7図 順電圧降下特性



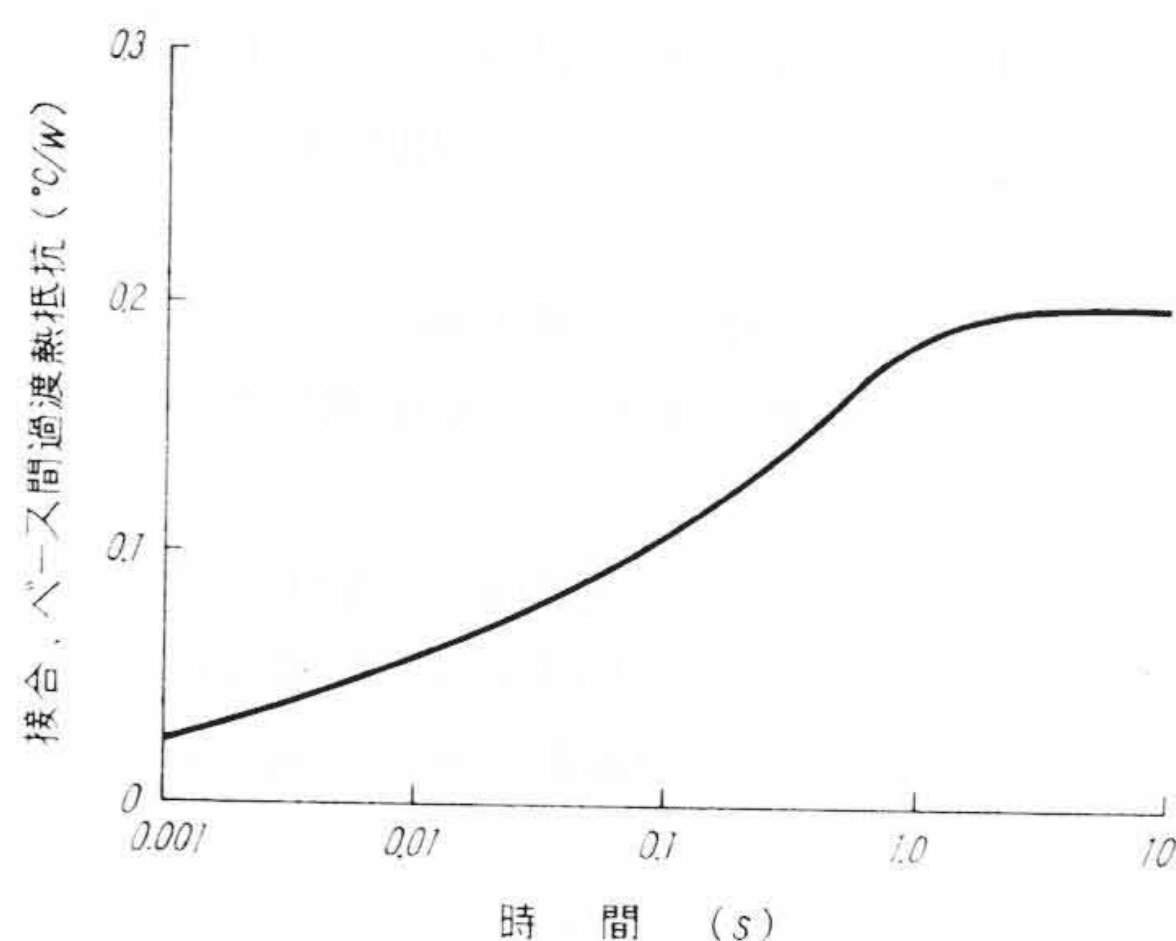
第8図 許容電流特性(方形波, 繰返し定格)



第9図 許容サージ電流特性(非繰返し定格)



第10図 漏えい電流特性(ゲート開放)



第11図 過渡熱抵抗特性(接合一下部銅ベース)

開発したのでその技術を大いに活用することができる。

3. 日立 SCR 素子の紹介

3.1 日立 SCR 素子の系列

現在日立製作所で量産中の電力用 SCR 素子を第1表に、その外観を第6図に示す。

用途および系列より明らかなように 3A 素子は大体単体としてスイッチング要素として使用されるので、素子に対する要求は価格が最重点となる。

16, 50A 素子は一般用として使用されるが、特に要求ある場合には高周波用として、特別の製法によりターンオフ時間を大幅に短縮したものを製作することもある。素子は常に電力用機器として考慮せねばならない。

150A は通常直並列接続されるので、SCR 諸特性に対する制約が最もきびしい。

現在標準量産品は 50~400 c/s 用を対象として製作され、特に高周波の要求あるときは、高周波用を適用しなければならない。

3.2 代表的 SCR 素子 (150A 600V) の特性

150A 600V SCR 素子は本格的電力変換装置用として最初に量産にはいった形式である。その特性は電力用機器として高信頼度を第一条件としている。以下各特性につき簡単に紹介する。

(1) 順電圧降下特性

第7図にその代表例を示す。各素子にはそれぞれ順電圧降下の

階級を設け、並列接続時の電流分担を容易ならしめるようにしてある。

(2) 許容順電流特性

相数、運転温度により許容値が決定される。第8図には繰返し許容電流値、第9図には非繰返し許容電流値を示す。前者は過負荷を含めた運転条件、後者は事故時の異常条件に許容される限界を示す。日立 SCR 素子は接合部寸法が大きく電流密度が低いので電流制限値が大きい。

(3) 電圧特性

SCR 素子はゲートに信号を入れないと順、逆両方向を阻止する。第10図はその代表的特性を示す。

(4) 熱特性

SCR 素子は熱時定数が短いので、短時間の過負荷にも十分注意せねばならない。第11図は接合部一下部銅ベース間(銅ベースには温度測定用小孔を設けてある)の過渡熱抵抗を示す。接合部寸法が大きいことと内部構造、特に特殊はんだの使用により、その過渡熱抵抗が低いことがわかる。

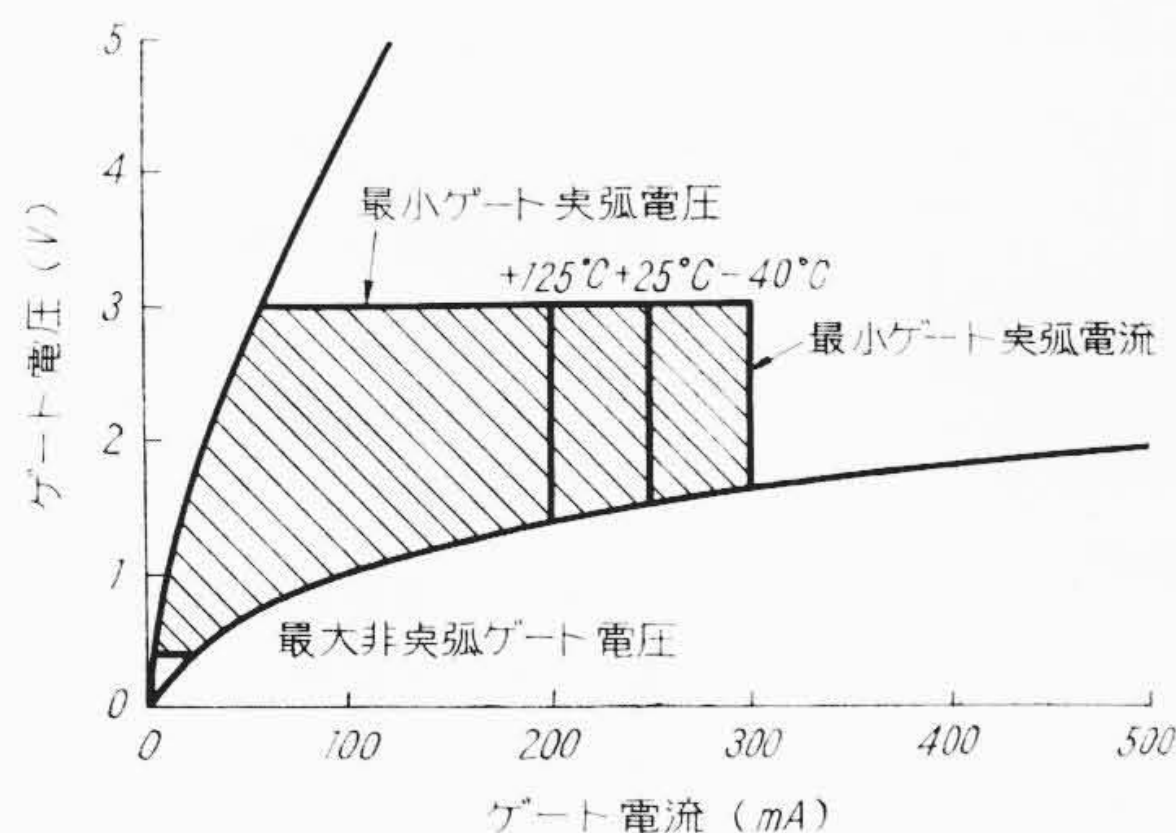
(5) ゲート特性

ゲート特性はパルス波形、接合部温度により左右される。第12図はその静特性を示し、第13図はパルス幅と必要ゲート電流の1例を示す。すなわちパルス印加の場合にはパルス電流を大にするとともにその幅を大きくすることが肝要である。

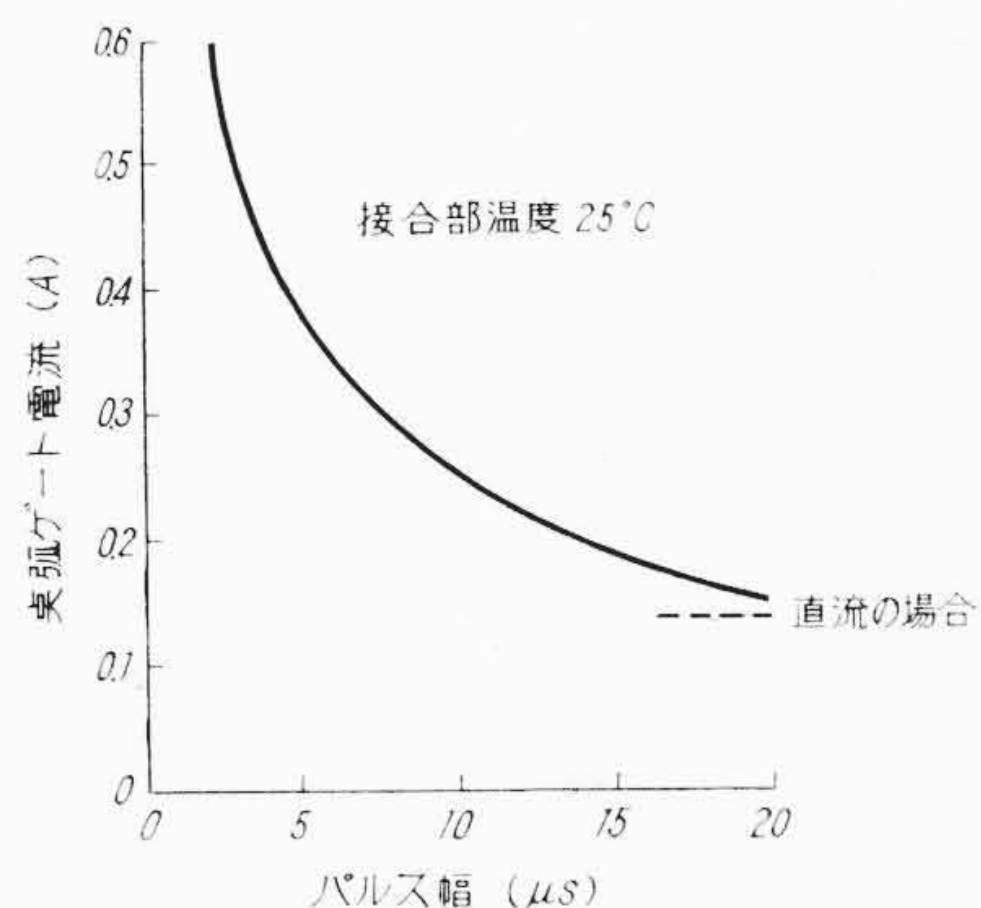
以上主要なものについて述べたがこれを整理して第3表に示す。

3.3 日立 SCR 素子の特長

第2表に示されるように SCR 素子の設計製作には相矛盾する基本量を巧みにマッチさせる必要がある。このことは取りも直さず、製作、品質管理にきわめて高度の半導体技術が必要なことを示している。なお4章に後述するような SCR 素子を利用する装置設計上よりの特別な仕様を満足しなければならない。この点日立製作所は素子および装置の研究、設計、製作、検査とも全く同一工場で遂行



第12図 ゲート点弧特性(静特性)



第13図 ゲート点弧特性(パルス幅の影響)

されており、素子と装置の協調が完全に行なわれている。すなわち日立SCR素子は電力用器具として最も適合した特性を保有するように設計製作されている。その特長は次の5点に集約される。

(1) 耐電圧特性

独特の表面処理および接合部寸法の厳格なる管理により耐電圧が非常に高く、 V_{B0} は温度によりほとんど変化せずきわめて高信頼性を有する。

(2) 過電流特性

接合部寸法が大きいので、電流密度、熱抵抗が低く、過負荷容量が大きいので保護協調が容易である。

(3) ターンオン特性

ゲート点弧特性と相まって、ターンオン特性の均一性に特に留意して製作され、直並列接続が容易に行なえる素子特性を有する。

(4) 気密構造

特殊耐熱磁器を使用しヘリウム試験に合格したもので、気密性の完ぺきを期し長寿命を保証する。

(5) 機械的強度

500gの形式衝撃試験結果によれば、機械的強度はきわめて大きい。

4. SCR素子応用上の問題

4.1 SCRの特長を利用した応用装置

従来水銀整流器や格子制御放電管が使用されていた回路に今後はSCRが広く用いられるのみならず、これらの素子使用のときは回路構成、取扱法、電圧、電流の大きさ、格子制御能回復時間などの理由で実用されなかった種々の応用が研究開発された。そして種々の装置が製品化され、大容量SCRの開発と相まって、その範囲はますます増大して行くようである。いま2, 3の例についてSCRの特長とその利用について述べる。

(1) 順電圧降下が小さい

放電管は高電圧、小電流でアークドロップが10~30Vである

第3表 SCR素子特性一覧表

定格および特性(使用周波数 50~400 c/s)

電圧階級	A	B	C	D	E	F
定格せん頭逆耐電圧	50V	100V	200V	300V	400V	500V
定格過渡せん頭逆耐電圧	75V	150V	300V	400V	500V	600V
最小ブレークオーバー電圧	50V	100V	200V	300V	400V	500V
最大許容平均順電流	150A (単相半波 180度通流)					
最大許容順方向阻止電圧	600V					
最大許容1サイクルサージ電流	3,500A					
最大許容瞬時ゲート電力	10W					
最大許容平均ゲート電力	2W					
最大許容せん頭ゲート電流	2A					
最大許容せん頭ゲート電圧	5V(逆方向) 10V(順方向)					
許容保管温度	-40°C~+125°C					
許容動作温度	-40°C~+125°C					
最大許容締付トルク	300 kg cm					
最大順電圧降下	1.7V (せん頭電流 450A)					
最大ゲート点弧電圧	3V					
最大ゲート点弧電流	250mA					
最小ゲート点弧電圧	0.3V					
最大熱抵抗	0.2°C/W					
保持電流	50mA					
ターンオン時間	10 μs (回路条件による)					
ターンオフ時間	30 μs (回路条件による)					

のに比しSCRは順電圧降下が小さく、低電圧、大電流を制御できる。構内電池を電源とするDC-DCコンバータでは電源、電圧、効率の点から放電管では実用されず、主としてM-Gが用いられていた。このような用途にSCRが適当となる。

(2) 制御能回復時間が短い

自励式逆変換装置は理論的取り扱いが古くから行なわれていたのに電圧変動率や消イオン時間のため負荷変動範囲が限定され、実用化された例はきわめて少ない。SCRのターンオフタイムの短いことを利用して転流改良形インバータが開発され、これを定電圧変圧器と組み合わせるなどの考察があり、安定なDC-AC変換装置として利用できるようになった。また10kc程度までの高周波電源の製作が可能となった。

(3) ヒータや点弧装置が不要である

このため、直列形インバータ、ブリッジ結線、直列接続などの変換回路の構成が容易になった。

(4) 小形、軽量で、取り付けが容易である

電車の床下に設置する制御装置や小形工作機に組み込むものではこの効果が大きい。

(5) 直並列接続が比較的容易である

これは4.4項で述べるように検討すべき点があり、注意を要するが、直並列接続により、一個の素子が故障しても運転を続け、装置の構成を適当にすることにより運転続行のまま取り替えも可能である。放電管などの場合でも原理的には可能であるが(3)(4)から実際は不可能である。

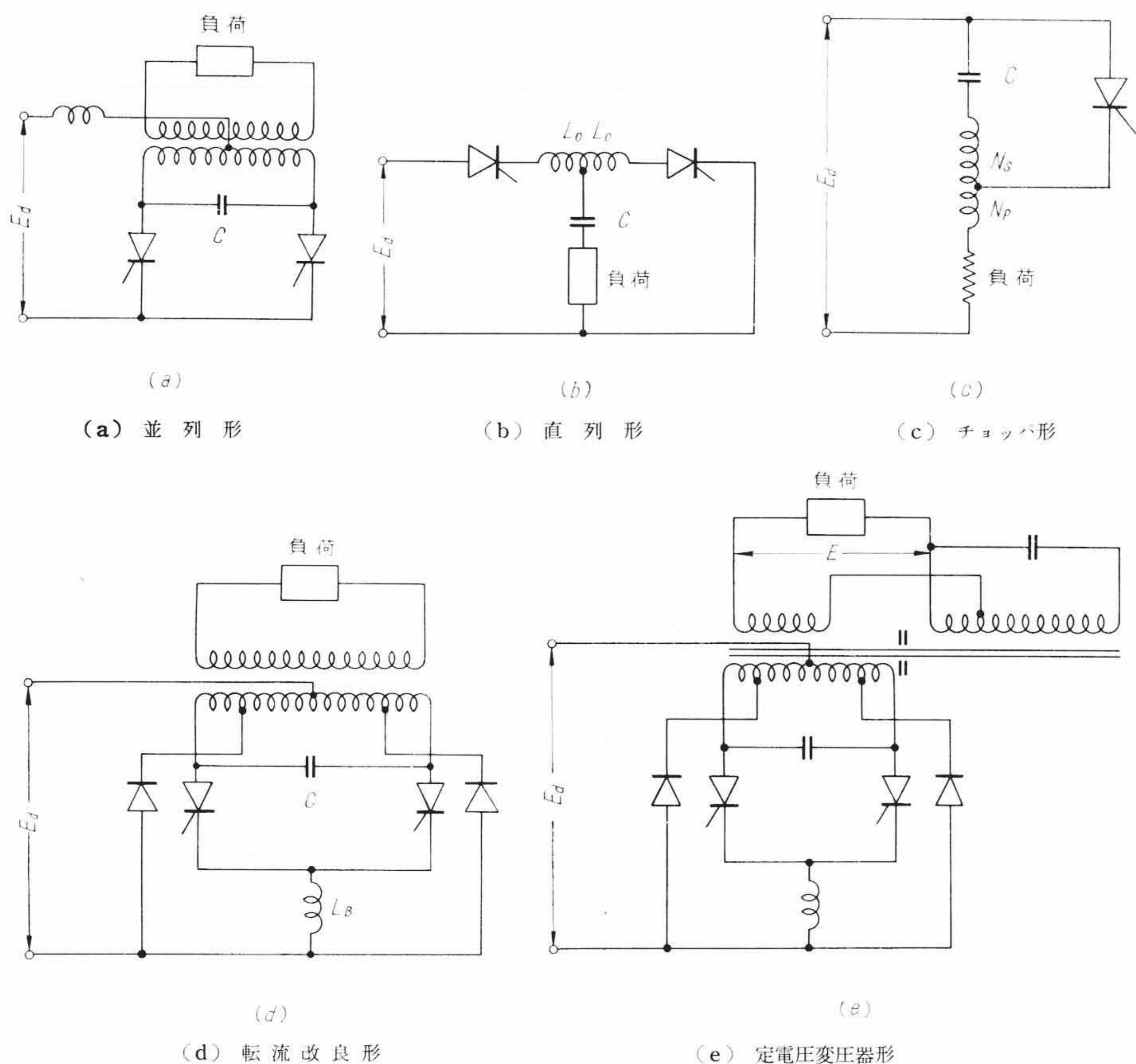
(6) 予熱が不要である

小形で簡単な装置ではこの利点は大きい。

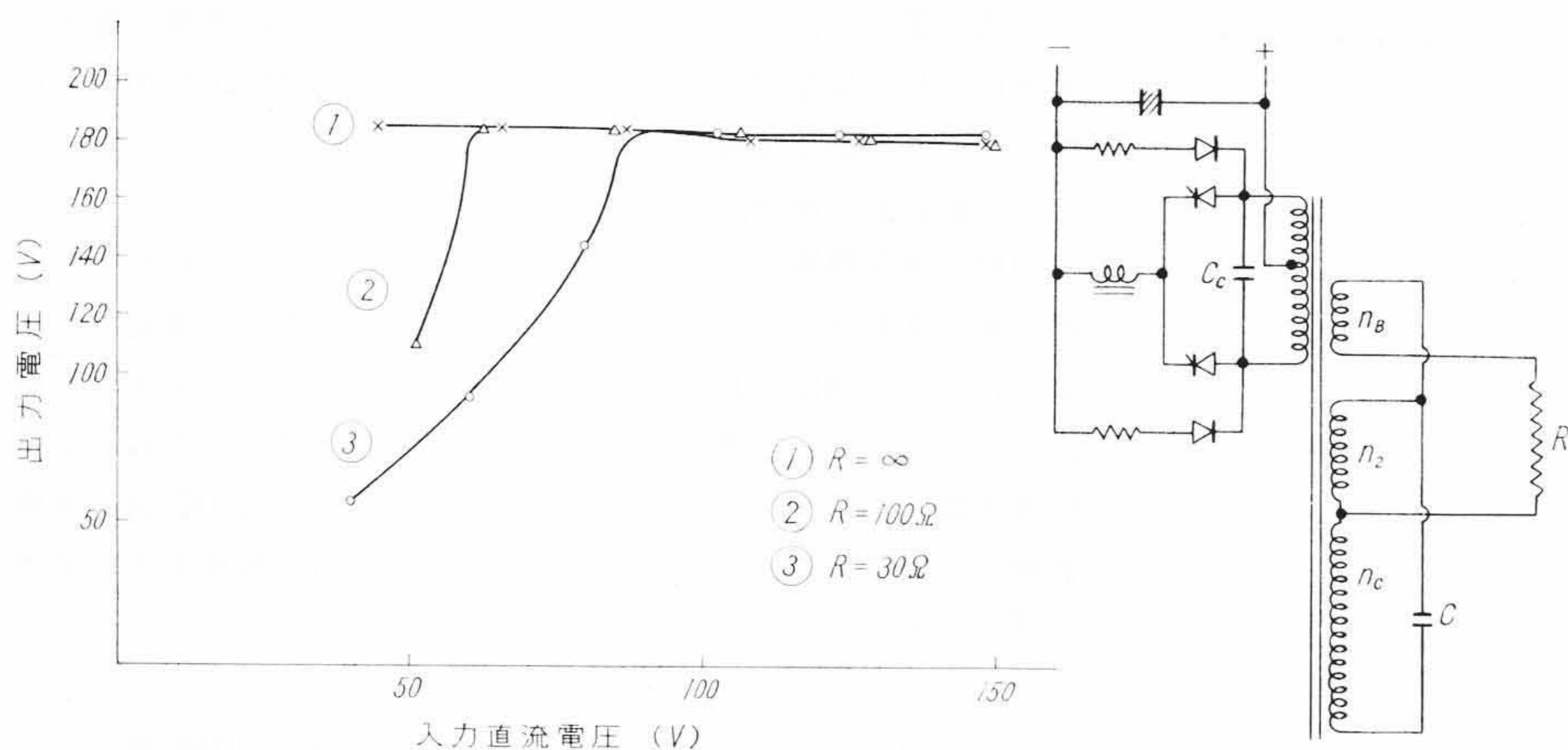
(7) ゲート制御装置が簡単である

ゲート信号にトランジスタの電力が使用可能であり、複雑な回路も小形にできる。定周波交流電源、非対称制御のような面倒な制御回路をもつ装置に適する。

以上は逆にいえばゲートパワーが小さく、FVDが低く、ターン



第14図 自励式インバータ回路



第15図 定電圧変圧器形インバータの入出力電圧特性

オフタイムの短いことがSCRの性能として具備すべき条件ともいえる。

4.2 応用回路

(1) 順変換装置

制御角 α により出力電圧を調整する。普通は出力電圧と基準電圧の差電圧を検出し、増幅して自動パルス移相器に加え α を制御する定電圧回路とする。

電池充電装置や一般電源用直流定電圧装置、交流発電機の励磁電源、自励式交流発電機などは負荷が抵抗またはそれに類するものである。これに対し、静止レオナード装置など電動機の手速度制御は負荷が直流電動機となった順変換装置である。自励式発電機を除けば水銀整流器や放電管でも多く実用化されたものでSCR応用としては比較的問題の少ないものである。

(2) 逆変換装置

(i) 他励式：直流電力を交換母線に送るものでその電力

は制御進み角 γ で調整される。静止セルビウス回路は誘導電導機の二次電圧を整流し、他励式インバータにより電源に送る。制御角 γ を変えて電動機の2次電力を調整し回転数を変化させる。

SCRを逆並列に接続し一方の組を順変換、逆変換、停止、他方を順変換にする順序にゲート制御を行なうことによる直流電動機の正逆転装置は電動機応用の基本形の一つとして広く用いられる。将来は交流電気車の電力回生制御ができる変換装置として、また50~60 c/sの連系用変換装置として用いられる日もくるであろう。

(3) 自励式逆変換装置

第14図(a)(b)(c)に示すように直列形、並列形、およびチョッパ形に分けられる。この原形に対しいろいろの改良が行なわれた。図(d)は転流改良形と呼ばれているもので、出力電圧は方形波でその波高値は負荷にほとんど無関係に直流電圧に比例する。図(c)は定電圧変圧器と組み合わせて波形を改善し、入力電圧が変動しても出力を一定に保った場合である。第15図は入力—出力電圧の特性を示す。瞬時変動も10%以内、回復時間は1サイクルである。大形のものでは変圧器の製作上と効率の点で問題のこしているが定電圧定周波インバータとして広く使用される。テレビジョン放送局の60 c/s定周波電源、高周波発振器などのようにAC-DC-AC変換を行なう周波数変換器、無停電交流電源装置、非常用電源、車両用の交流電源など電池を電源としDC-AC変換を行なうインバータ、DC-DCコンバータのようにDC-AC-DC変換を行なうものなどがその応用例である。これらの回路にお

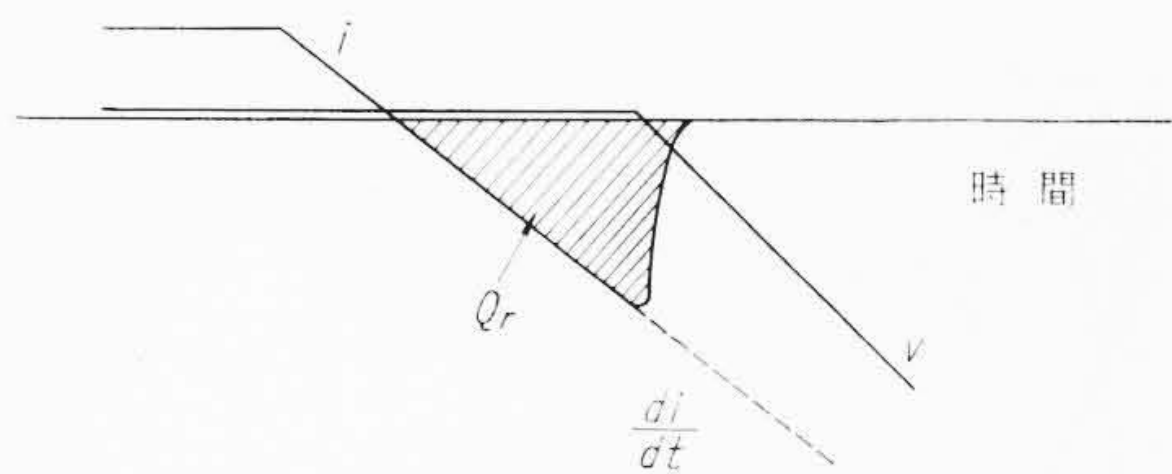
いてDC-AC変換部は第14図のうち装置の容量やその目的により適当なものを選ばれる。

(4) スイッチ

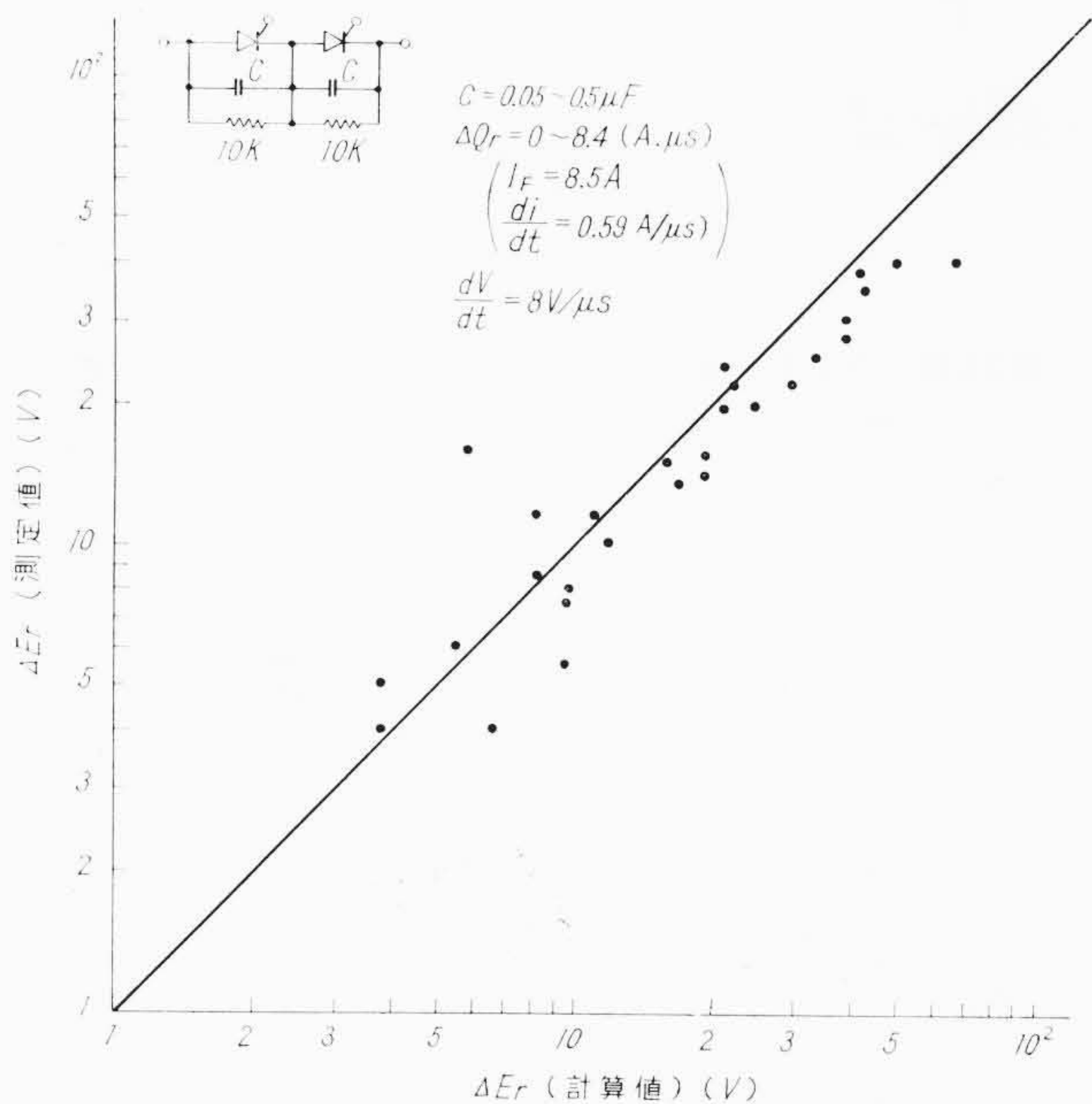
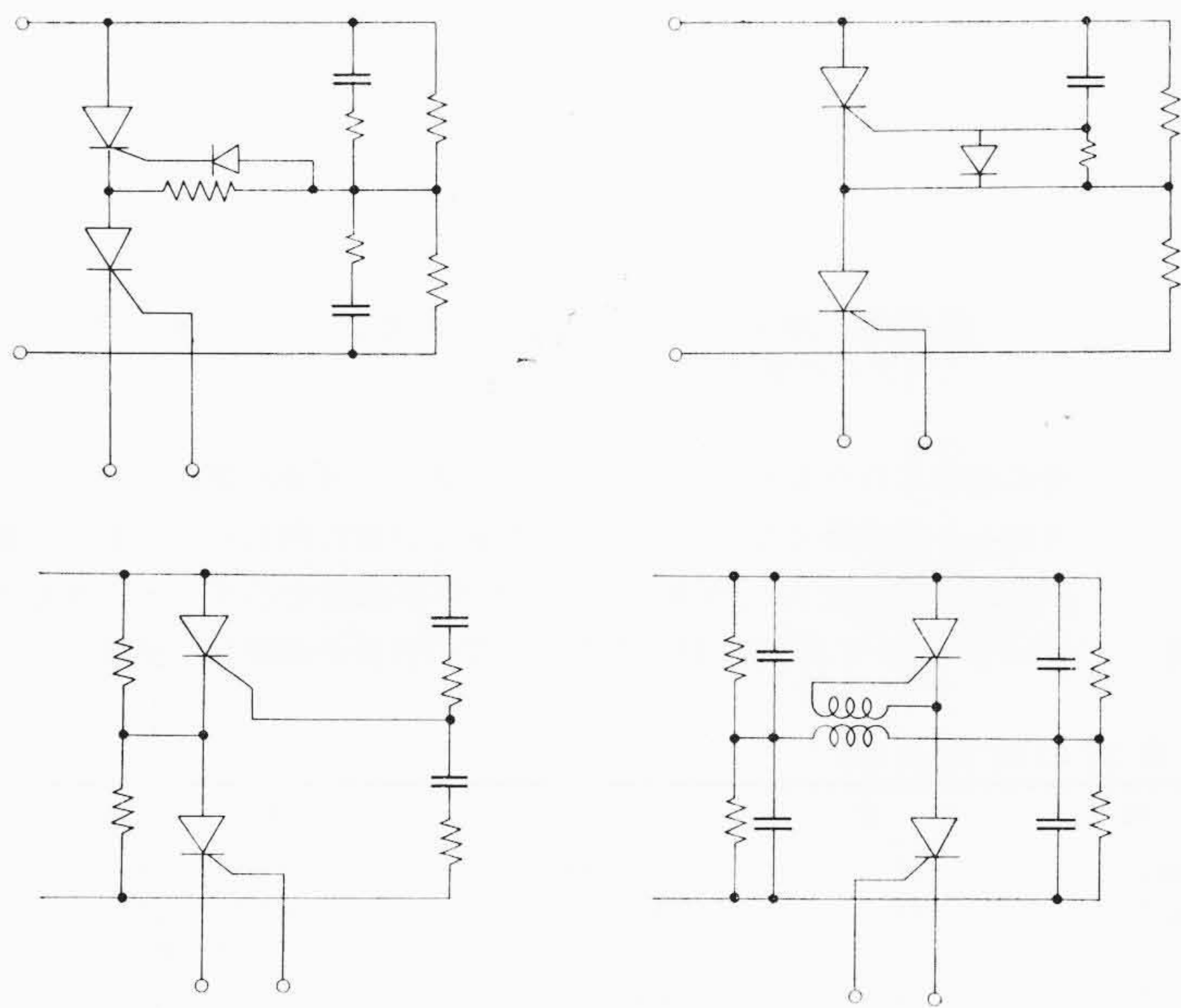
広い意味では(1)~(3)もスイッチであるが単純なスイッチ回路としては静止スイッチ(交流用は逆並接続とし、直流用は転流素子を付加する)、過電圧、過電流の保護回路、自動車用小形発電機の電圧調整器、小形電動機の正逆転装置などがある。またSCRフリップフロップ回路、同様の動作を行なうラッチングリレー、電灯点滅装置(フラッシュヤ)、SCRリングカウンタなどはインバータと同様の動作をするスイッチ回路である。

(5) その他

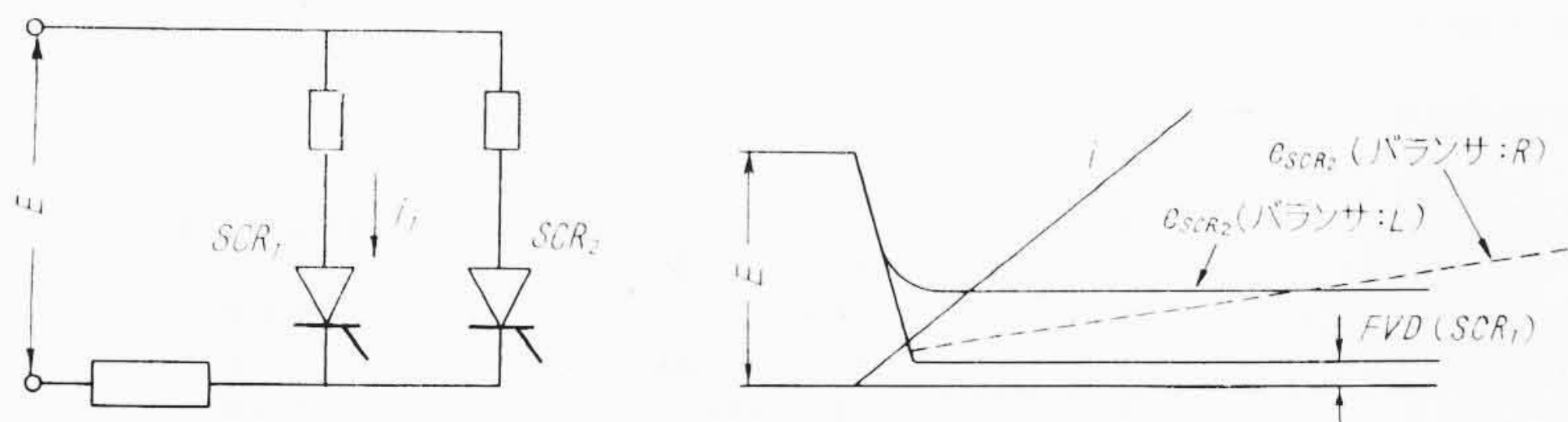
調光装置や簡易形交流電圧調整器は交流波形の一部を負荷に印加する形の装置。L-Cで構成したパルス波形成回路と組み合わせたパルス増幅成回路などが広く実用に供されている。



第16図 転流時の電流電圧の変化状態

第17図 2個直列接続のときの分担電圧の差 ΔE の実験値と(1)式による計算値の比較

第18図 SCR 直列追従点弧方式の例



第19図 並列点弧のときの陽極—陰極間電圧の説明図

4.3 直並列接続

SCRの電圧、電流は技術的の面から限界があり現状では一応1,000 V 150~250 Aが上限と考えられる。したがって大形の装置を製作するためには素子を直並列に接続する。

4.3.1 直列接続

この場合(1)定常時の順、逆電圧、(2)サージ電圧、(3)消弧時の逆電圧、(4)点弧時の順電圧などの分担を均一にすることを考える必要がある。

(1)、(2)については素子にその等価インピーダンスより小さい並列抵抗、コンデンサをそう入することにより分担は均一になる。転流の終期のように順電流の流れていた素子に逆電圧が印加されるときはSRの場合と同様、残留キャリアの影響で第16図のようになる。実際にはpnpn構造のため逆電圧は段のついた形となる。図の斜線部分 Q_r が残留キャリアを示し、この Q_r が素子によって違うため Q_r の小さい素子が最初に回復し、これに全電圧が印加される。他の素子の Q_r を並列コンデンサを通じて消費しなければその素子は逆電圧阻止能力を回復しない。直列素子中最大と最小の Q_r の差を ΔQ_r とし、許容される素子の分担逆電圧の差 ΔE 、全体に印加される逆電圧が上昇率 β で直線的に上昇するとすれば(この仮定は普通の転流時はほぼ満足する)並列にそう入すべきコンデンサ容量 C は

$$C = \beta \frac{\Delta Q_r}{\Delta E} \dots\dots\dots (6)$$

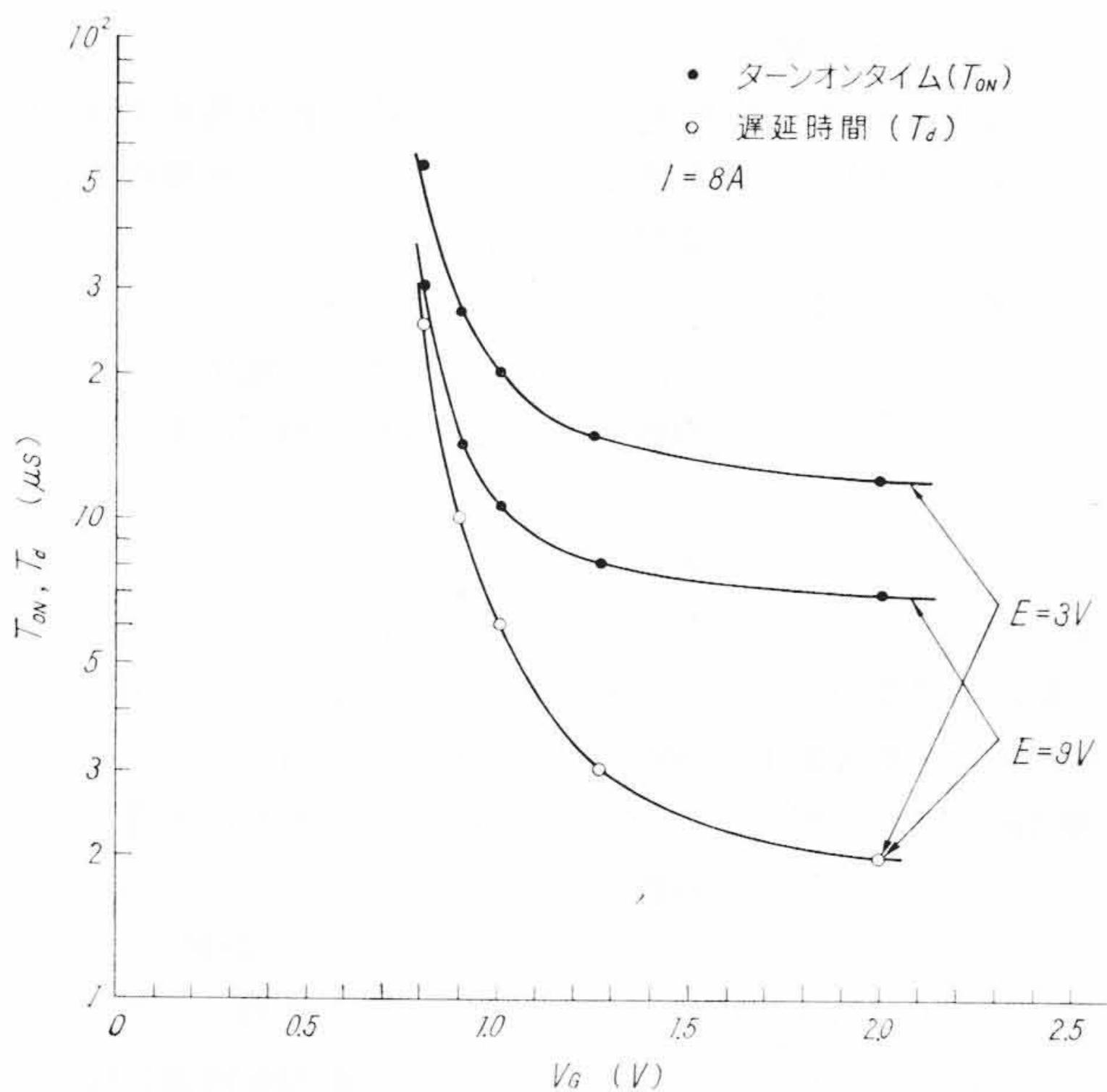
となる。第17図は2個直列の場合の ΔE と C の関係を示し ΔE の実験値と(6)式を用いた計算を比較した結果でほぼ(6)式と一致する。

この点から考えると各素子は ΔQ_r が小さいこと、またはバラツキが小さいことが望ましい。しかし前者はライフタイムの短いことを要求するのと同じでこれは順電圧降下を大きくすることになり大容量素子開発を阻害する。また後者は生産過程の管理値に余分の因子をもち、量産、原価低減上悪影響を及ぼす。そこで装置の設計にあたっては電圧上昇率 β を小さくするか、または転流点の di/dt を小さくして Q_r を小さくすることが望ましい。

次に点弧時の電圧点弧時点をそろえる。直列素子おのおのにパルスを加える場合と第18図のような追従点弧方式が用いられる。いずれの場合もゲートパルスのエネルギーを大きくすること、できる限りSCRのターンオン特性の同一なものを選ぶことなどが考えられる。実際の製品に対するターンオン特性の差と順電圧分担の差、これが素子の寿命にいかなる影響をもたらすかについては多くの素子に対する寿命試験と統計的処理が必要である。

4.3.2 並列接続

第19図は2個並列接続した場合、一方が先に点弧したときの陽極陰極間の電圧波形である。電流変化率が一定でバランスがインダクタンス L の場合は $L \frac{di}{dt}$ (一定) + $FVD(SCR_1)$ 、抵抗バランス (R) の場合は $iR + FVD$ となるがいずれにしても陽極陰極間の電圧は小さい。この領域では普通SCRの特性表に示されているターンオン特性とはことなる。第20図は低電圧領域におけるターンオン特性でありゲートパルスを十分大きくすれば点弧は可能である(パルス幅は図中のターンオンタイムだけでなくも遅延時間より長ければ点弧可能である。並列素子の一方が点弧して電圧が低くなる場合と低い電圧の所で点弧する場合とでは陽



第 20 図 SCR の点弧特性

極電圧の変化がゲート特性に影響してわずかではあるが相違する)。しかし多くの素子が並列になった場合、最初に点弧する素子の di/dt は非常に大きくなる。各素子にインダクタンスをそう入し装置の構成において di/dt を適量におさえるように考慮する。

4.3.4 スイッチングパワー

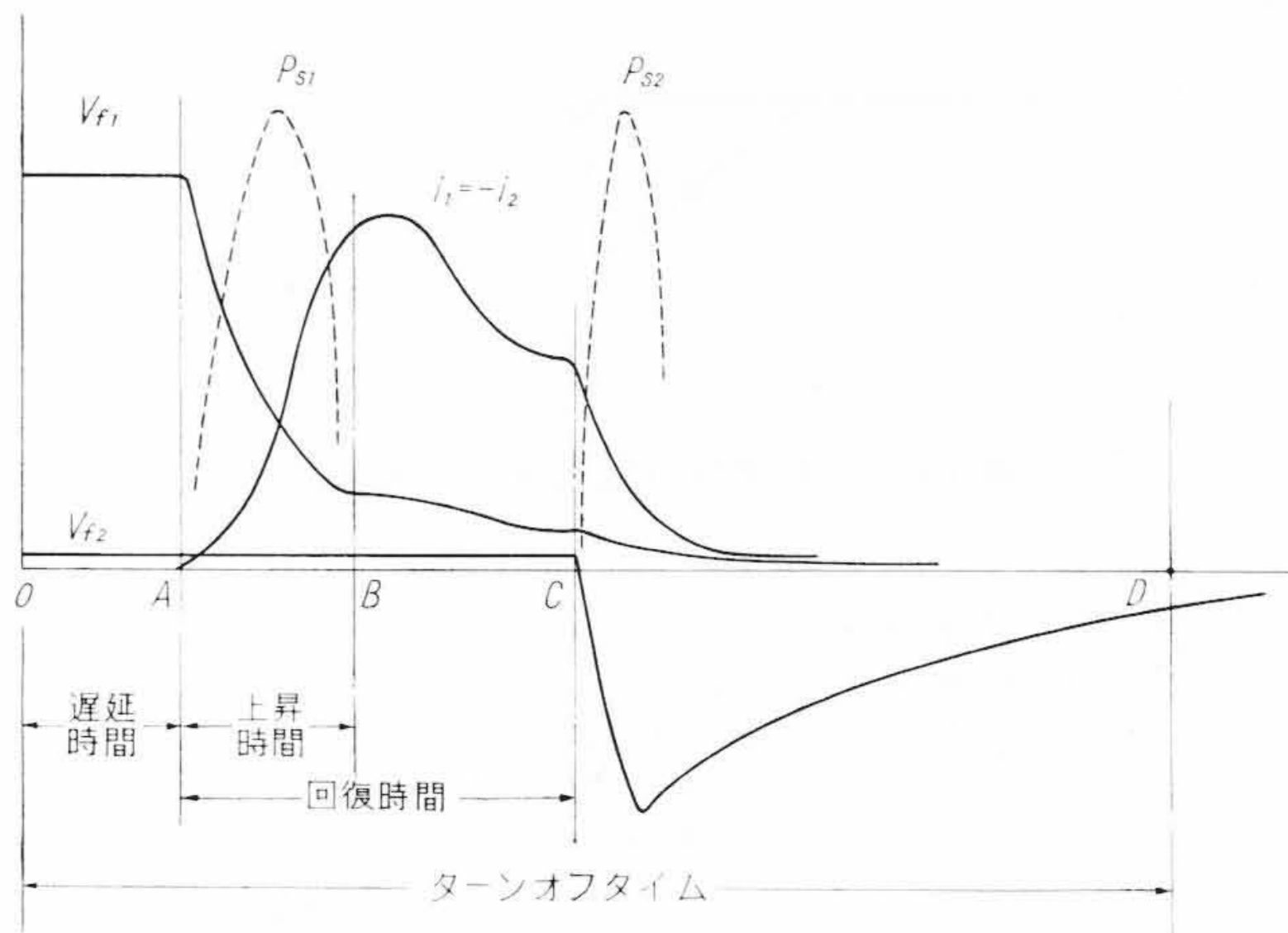
前項の直並列接続において述べたように電流、電圧の変化率が装置設計上重要である。とくに自励式インバータの場合の転流時は転流コンデンサを 2 個の SCR で短絡することになるので di/dt は非常に大きくなる。これは電圧変化率 dv/dt とともに前節の電圧、電流の分担を不均一にするとともにスイッチングパワーを増大させる。

第 21 図は単相並列形インバータにおける転流時の電圧電流波形で、点線で示すのが電力である。この電力の最大値は非常に大きい、時間は短く定常時の接合部の温度上昇にはほとんど影響ない。しかし接合部にひずみを与え、その寿命に影響する。とくに高周波インバータの場合にはスイッチングパワーは重要でその許容値を知っておく必要がある。第 22 図はインバータ運転時のスイッチングパワーの一例である。

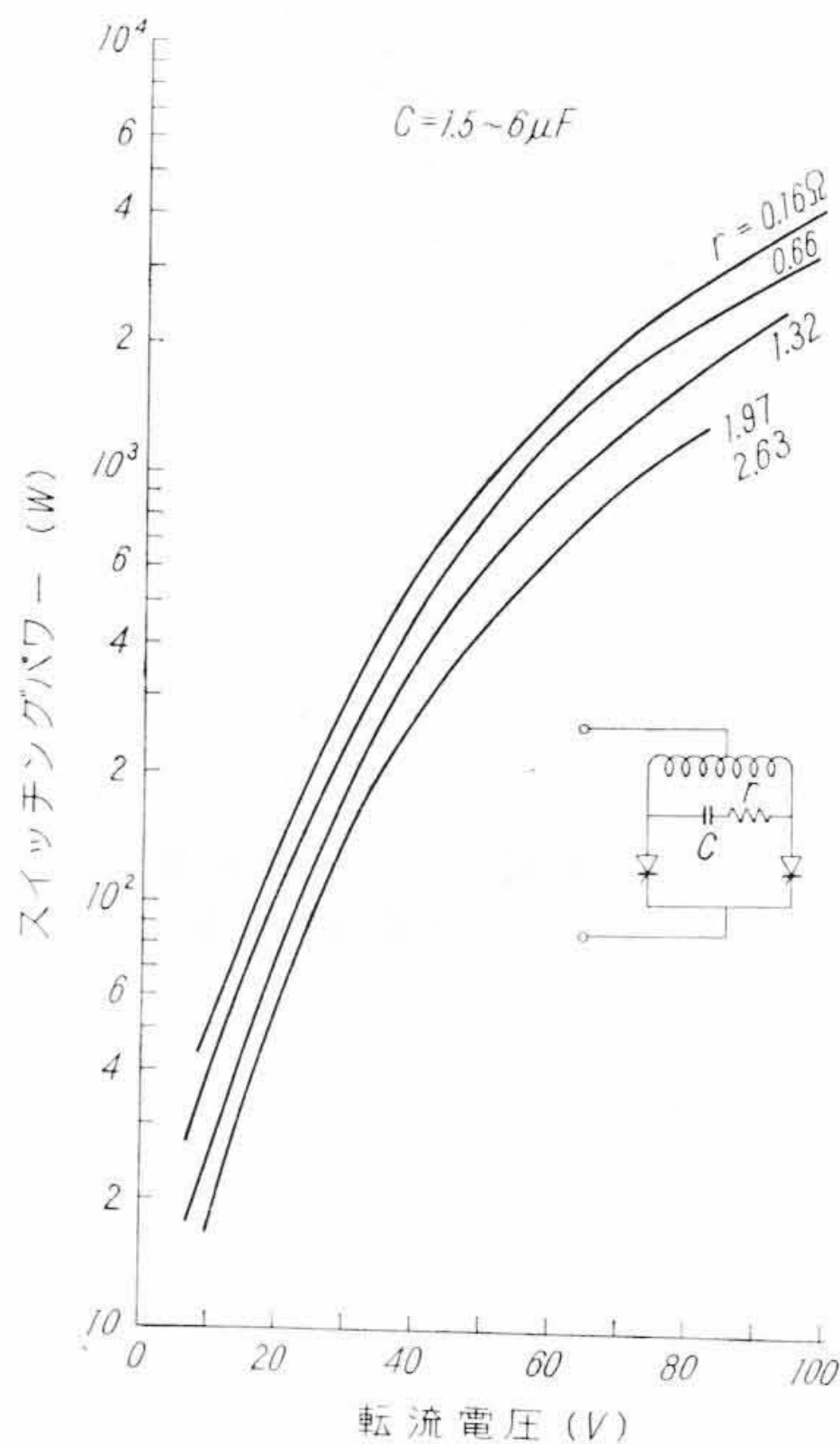
5. 日立 SCR 応用装置

5.1 SCR 装 置

SCR 素子は昭和 36 年に試作品完成後ただちにその応用製品の開



第 21 図 SCR 単相インバータの転流時のスイッチングパワー説明図

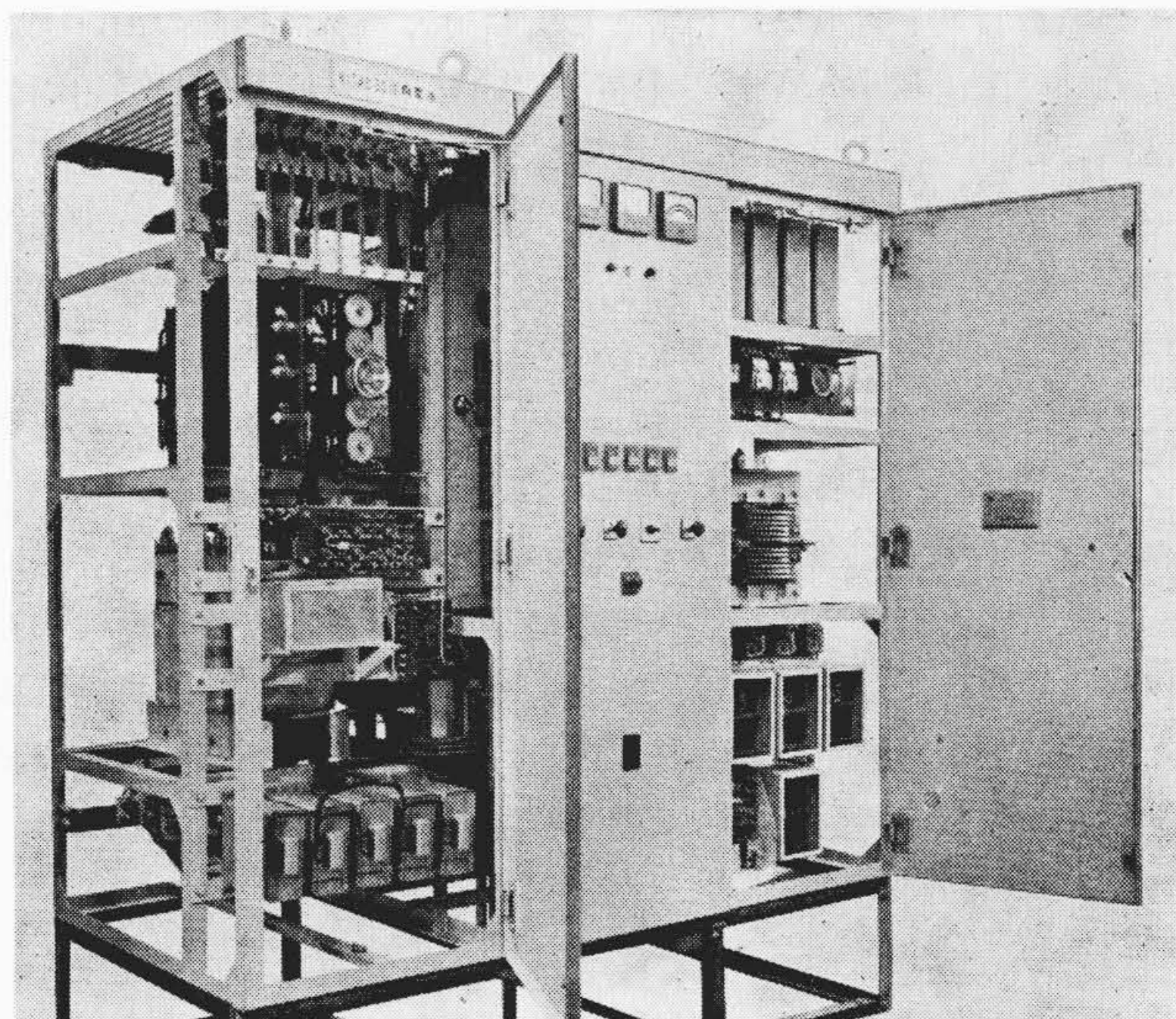


第 22 図 単相インバータ転流時の電圧とスイッチングパワーの関係

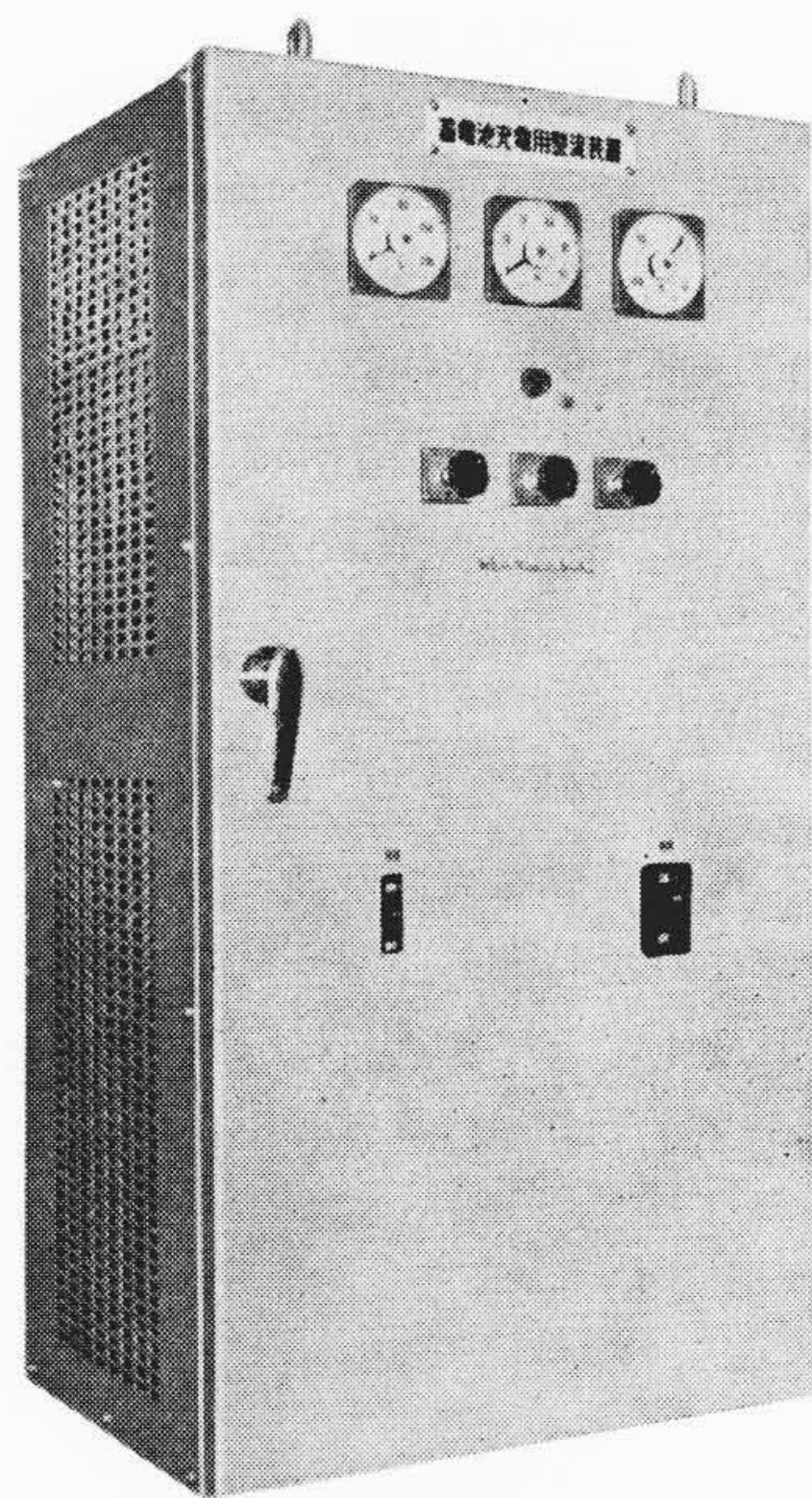
発に着手されたものであるが、その後素子の進歩に伴い、その応用方面も多種多様となり、かつその容量も急激に向上しつつあり、第 4 表は開発を完了し、運転にはいった SCR 装置を示す。その運転実績はきわめて好調で静止機器としての特長を遺憾なく発揮してい

第 4 表 SCR 装置の開発状況

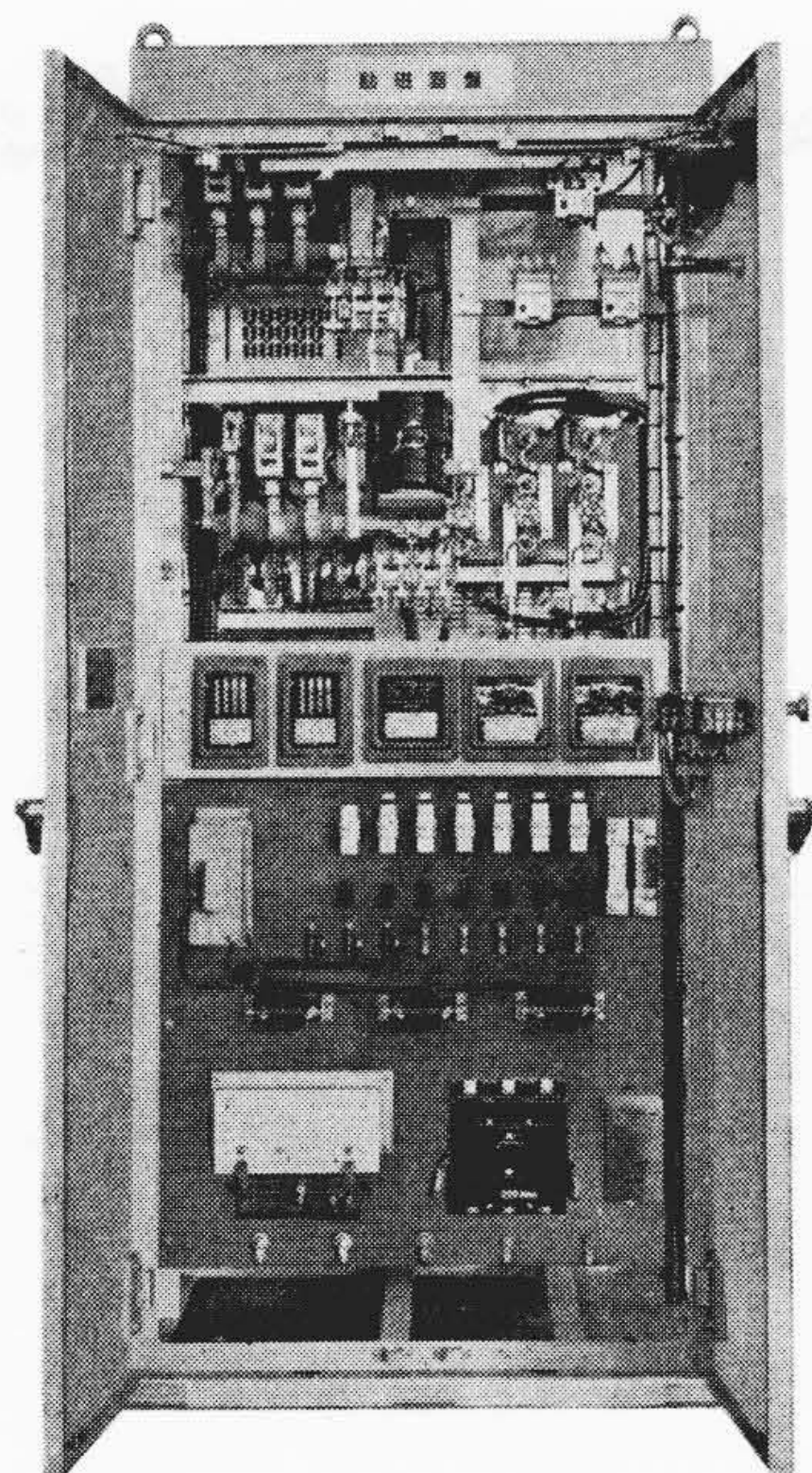
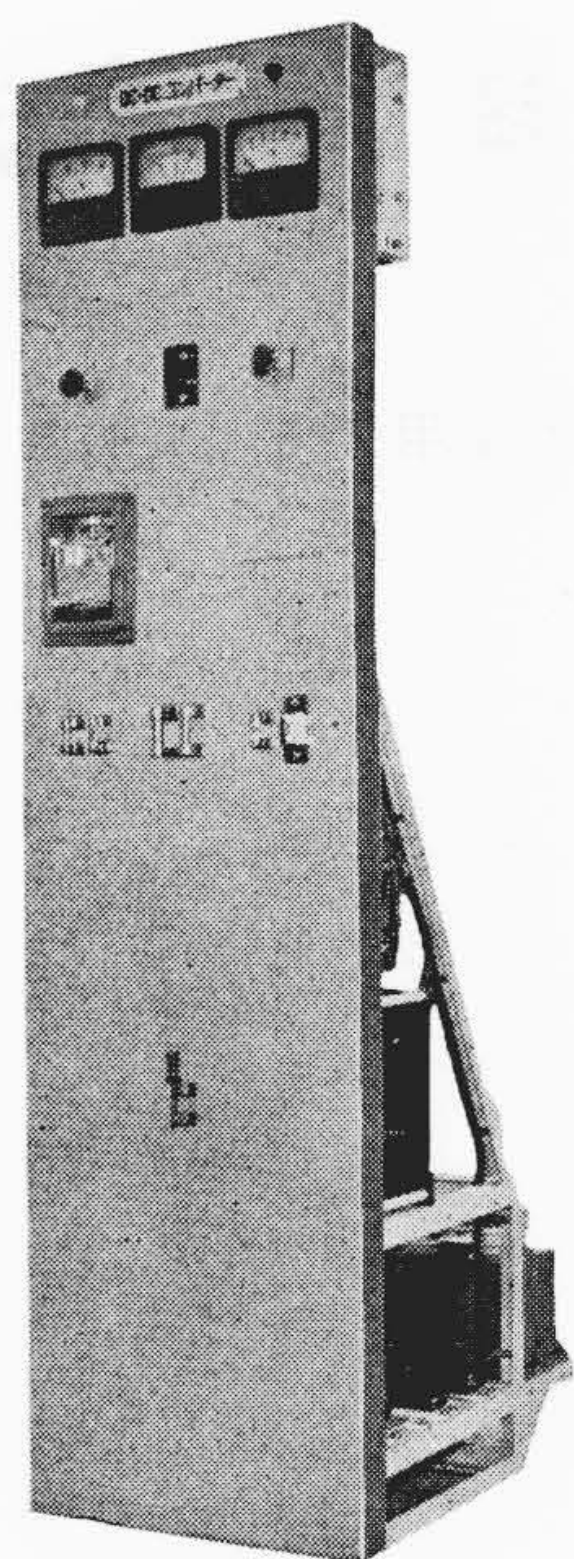
納入先 (敬称略)	用途	仕様	台数	パターン	備考
京 阪 電 鉄 ー は か	蓄 電 池 充 電 装 置	4.8 kW/160 V	15	AC→DC	AVR, C.L 付
日 本 石 油 化 学 ー は か	蓄 電 池 充 電 装 置	8 kW/160 V	18	AC→DC	AVR, C.L 付
日 立 製 作 所	励 磁 器	12 kW/110 V	1		AVR
東 京 ガ ス ー は か	励 磁 器	20 kW/110 V	1	DC→AC	AVR
鉄 道 研 究 所	定 電 圧 電 源	8 kW/110 V	1	AC→DC, DC→AC	AVR および C.L
福 岡 大 学	定 電 圧 電 源	24 kW/110 V	1	AC→DC	AVR
日 立 製 作 所	高 周 波 電 源	0.5 kW/110 V	2	AC→DC→AC	AVR
某	高 周 波 電 源	1 kW/3,000 V	12	AC→DC→AC	C.L
日 立 製 作 所	コ ン ピ ュ タ ー 電 源	40 kVA/200 V	1	B AC→DC→AC	AVR, C.L
日 網 石 油 ー は か	コ ン ピ ュ タ ー 電 源	15 kVA/200 V	2	B AC→DC→AC	AVR, C.L
関 西 電 力 ー は か	キ ャ リ ア 電 源	1 kVA/100 V	2	DC→AC	AVR
日 立 製 作 所	DC-DC コ ン バ ー タ	1 kW/48~51 V	2	AC→DC→AC	AVR
日 立 製 作 所	静 止 シ ル ビ ャ ス	19 kW/233 V	1	DC→AC	ASR
日 立 製 作 所 ー は か	静 止 レ オ ナ ー ド	2.8 kW/±160 V	3	AC→DC (DC→AC)	AVR, ASR



第23図 コンピュータ用SCRインバータ (40 kVA)



第24図 SCR式蓄電池充電装置 (4.8 kW)

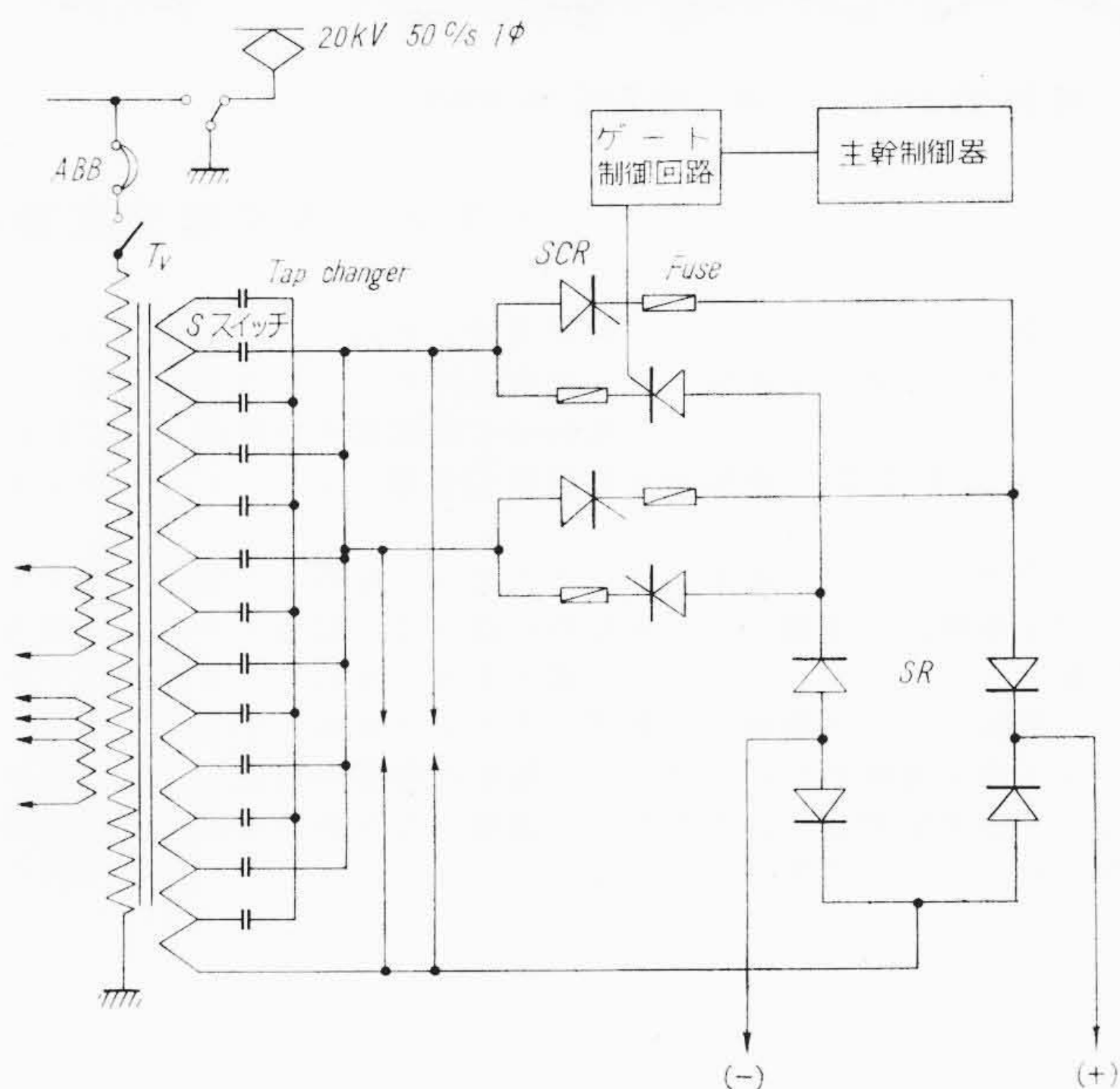
第25図 SCR式同期電動機用
励磁器 (20 kW)第26図 SCR式DC-DC
コンバータ (1 kW)

る。SCR素子の単位容量増大により今後続々と製作される大容量SCR装置と上記運転実績より、従来の電力変換装置に一大変革を与えることは疑う余地がない。今まで開発された装置により次の事が明らかとなった。

- (1) 直並列接続の技術的検討が入念に行なわれ、大容量化に十分対処できるようになった。技術的には直列接続についてはやや難点があるので慎重に処理せねばならない。並列接続は比較的容易である。
- (2) 高周波での使用については、十分な検討が必要で、今後数千サイクルの周波数帯における大容量製品の開発にはよりいっそうの努力が必要と思われる。
- (3) 制御性能のきわめてすぐれていることが立証された。制御要素としてトランジスタを数多く使用する場合、特に留意すべきことはその適用および他の電磁界よりの誘導防止である。電力機器に利用するので、絶縁、温度特性、高信頼度性などは特に重視される。

5.2 現在製作中の大容量SCR装置

150 A 600 V SCR素子の量産化成功により本格的な大容量SCR

第27図 交流電気機関車用SCR式無電弧タップ切替装置
結線図

装置の開発が開始された。

目下鋭意設計製作中のSCR装置としてその代表例を紹介する。

(1) 交流電気機関車用SCR式無電弧タップ切替装置

交流電気機関車の速度制御として主変圧器のタップ制御による電圧制御が行なわれる。この場合機関車の特性上、高粘着特性を発揮するためにはノッチレス制御の採用とともに低圧タップ切替方式は低タップにおける電圧変動率が改善されるので好ましい方式とされている。しかるに従来の接触器を使用する低圧タップ切替方式では取扱電流が大きく、接点の保守が容易でない。そこでSCR素子をスイッチング要素として利用したのが上述の無電弧タップ切替装置である。第27図はその概要説明図である。運転士の主幹制御器操作により、SCRのゲート制御が行なわれ、電圧を連続的に変化させるとともに無電流状態にてSスイッチ(タップ切替器)を切り替えることができる。SCR装置としては低電圧大電流回路となる。

SCR式無電弧タップ切替装置の仕様を下記すると

タップ間電圧 96 V

通過電流 2,040 A 連続
4,260 A 10秒過負荷
移相範囲 全レンジ
結線 1個直列20個並列4アーム
使用SCR素子仕様 150 A 500 V

SCR装置は本体SR装置と一体に組み込まれ、コンパクトな設計となっている。技術的問題は多数並列と異常時の電圧保護にある。

6. 結 言

SCR素子およびSCR装置は電力変換用として全く新しい器具、装置であり、そのすぐれた特性、経済性により1～2年の間に一大技術革新が行なわれるものと予想される。その根幹はSCR素子の開発にあることは申すまでもない。現在の技術では大容量化は主と

して周波数特性をぎせいにしてどしどし行なわれているので、きわめて近い将来、数千kW級の主電動機運転用SCR装置や商用周波数変換SCRインバータ装置が実用化されることが考えられる。

中小容量SCR素子は用途の拡大、量産技術の進歩により大幅な価格低下が期待されるので、スイッチング素子としての特性を特に利用する方面に大幅に進出するものと予想される。

なお今後光子で作動するライトアクティブSCRおよびゲートターンオフSCRも大いに活用されるであろう。

本稿を終了するに当たり素子装置の開発に多大のご指導、ご援助を賜った日本国有鉄道臨車設各位をはじめ各需要家各位に厚く御礼を申し上げる。工場内には、いつもご指導賜った高木、泉副工場長、毛利、中戸川、木村各部長、山口、持永、菱沼各課長および試作、量産に異常な努力を払った整流器部各位に厚く謝意を述べる。



特 許 の 紹 介



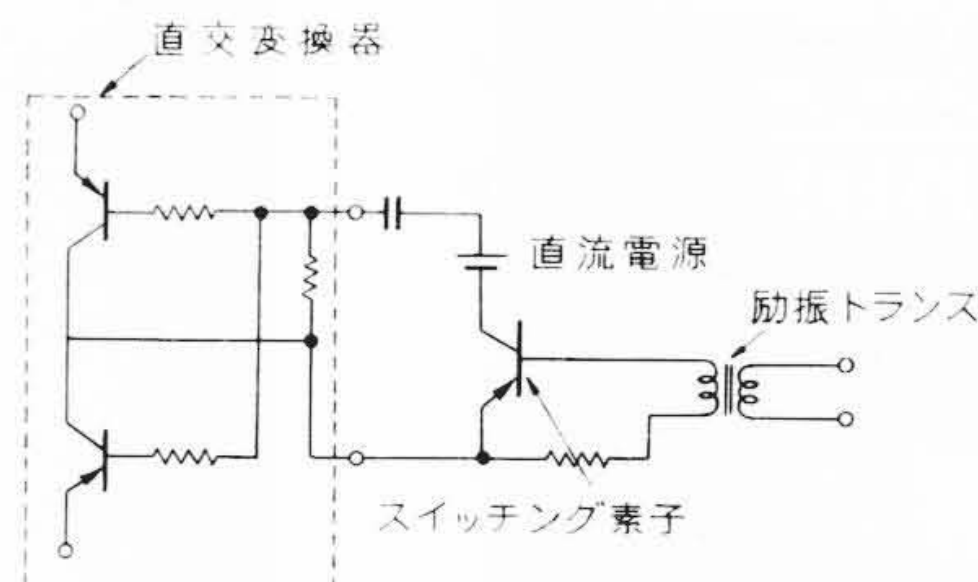
特許第286699号(特公昭36-8359)

猪瀬文之

トランジスタ直交変換器の励振用矩形波発生回路

この発明は図面に示すように直流電源と直列にトランジスタなどのスイッチング素子を接続し、この素子のスイッチ作用を励振トランスの出力電圧(V)によって行なわせて直流電圧を断続し、これによって直交変換器の励振用矩形波出力を得るようにしたものである。

この発明によれば、従来ゼナーダイオードを用いて励振トランスの出力を矩形波に変換していたものに比べて、励振トランスの出力電圧をゼナーダイオードのゼナー電圧より十分低くとることができるから励振トランス巻線が小形化できて分布容量も小さくなり、したがって直交変換器へのオフセット電圧の影響が軽減されるばかりでなく、出力矩形波の立ち上がりが急峻となり良好な直交変換特性が得られるという効果が得られることとなる。(買場)



第 25 巻

日 立

第 7 号

目 次

- ・ 静止リレーを使った無接点制御
- ・ 中電ビルに設けられた全自動群管理エレベータ
- ・ 用水問題解決のキメ手・日立クリーニングタワー
- ・ 水処理の実験プラント
- ・ 建設機械のオペレータづくり・日立建設機械技術員教習所をたずねる
- ・ 鉄筋工事の合理化をすすめる日立電気圧接機
- ・ 公社線との接続でますます便利になった農村電話・羽島市正木農協にみる
- ・ ホテル電話の特長100% 東京ヒルトンホテルの電話設備

- ・ 家具と塗料—日立化成の空乾性ポリセツト 203R と新しい塗装法
- ・ 海を渡る日立・AA 諸国の発展のために(下)
- ・ 電線百話第30話 ケーブルの冷房装置
- ・ 新しい照明施設 下田東急ホテル
- ・ 読者の声 <ベルソーナJ>
- ・ 明日への道標「NHK放送センター基礎工事に活躍するパワーショベル」
- ・ 日立ハイライト「真夏の水の夢を贈る日立ポンプ」
- ・ 日立だより

発行所 日立評論社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座東京71824番
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