U. D. C. 621.314.63 : 621.315.59

半導体整流器の回路と保護方式

The Protective Method for Semiconductor Rectifier and Its Circuits

曽根田瑞夫* 森田和夫**
Mitsuo Soneda Kazuo Morita

内容梗概

ゲルマニウム整流器およびシリコン整流器は電力用として各方面に使用されつつあるが，その応用においては従来の各種整流機器と異なった技術的問題が存在する。

ここでは主として整流素子の直列，並列接続と電圧，電流の平衡化および過負荷，過電圧に対する保護装置，整流素子の故障検出装置，半導体整流器と他種整流機器との並列運転などについて論じた。

1. 緒言

ゲルマニウム整流器およびシリコン整流器の著しい発展は，従来のセレン，亜酸化銅などの金属整流器に対する概念をまったく一変し，直流発電機，回転変流機，水銀整流器などに比肩する電力用整流器として半導体整流器を位置づけることになった。このことは半導体整流器に対して従来の金属整流器には見られなかった応用上の複雑な問題を生ぜしめるとともに，他方各種変流機器とは著しく異なった特長を発揮させている。特に回路および保護の点ではまったく新しいいくつかの問題を呈示しており，実用にあたってはこれらに対する特別な考慮が必要である。

ゲルマニウム，シリコンなどの半導体整流器は，そのすぐれた特長により広く各方面に進出し，すでに揺籃期を脱して着実にその地歩を固めつつある。なかんづく電解用電源としてはすでに他種機器に完全にとって代り，その偉力を遺憾なく発揮している。また電鉄用としてもその実用化の時期は早くも到来しつつあり，その他あらゆる直流電源の分野において利用のみちを見出している。

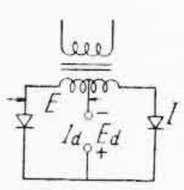
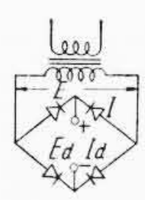
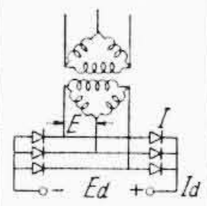
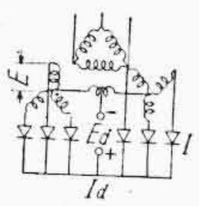
これらの各種応用において遭遇し，かつ克服された問題について振り返って整理し，また今後の問題について考察検討を加えることは今日きわめて有意義なことと思われる。以下に回路および保護上のいくつかの問題について述べる。

2. 整流回路の構成

2.1 整流回路

半導体整流器の整流方式はセレン整流器と同様であるが，電力用として通常用いられる結線方式を第1表に示す。また整流素子の各種電圧，電流の関係式を併記する。実際には電圧および電流は電源電圧変動，リアクタンス電圧降下負荷変動，冷却条件などを考慮して余裕をとる必要がある。

第1表 整流方式一覧

		(a)	(b)	(c)	(d)
整流方式		単相全波	単相ブリッジ	三相ブリッジ	六相二重星形
一次 二次					
E/E_d		1.11	1.11	0.740	0.855
E_p/E_d		3.14	1.57	1.05	2.42
I/I_d	抵抗負荷	0.785	0.785	0.579	0.293
	誘導負荷	0.707	0.707	0.577	0.289
I_p/I_d	抵抗負荷	1.57	1.57	1.05	0.525
	誘導負荷	1.00	1.00	1.00	0.500
変圧器交流側容量		1.11	1.11	1.05	1.05
変圧器直流側容量		1.57	1.11	1.05	1.48
E_R/E_d		48%	48%	4.2%	4.2%

E_p： 尖頭逆電圧　　E_R： 脈動電圧実効値
I_p： 尖頭順方向電流　　変圧器容量は $E_d \cdot I_d$ に対する比で示す

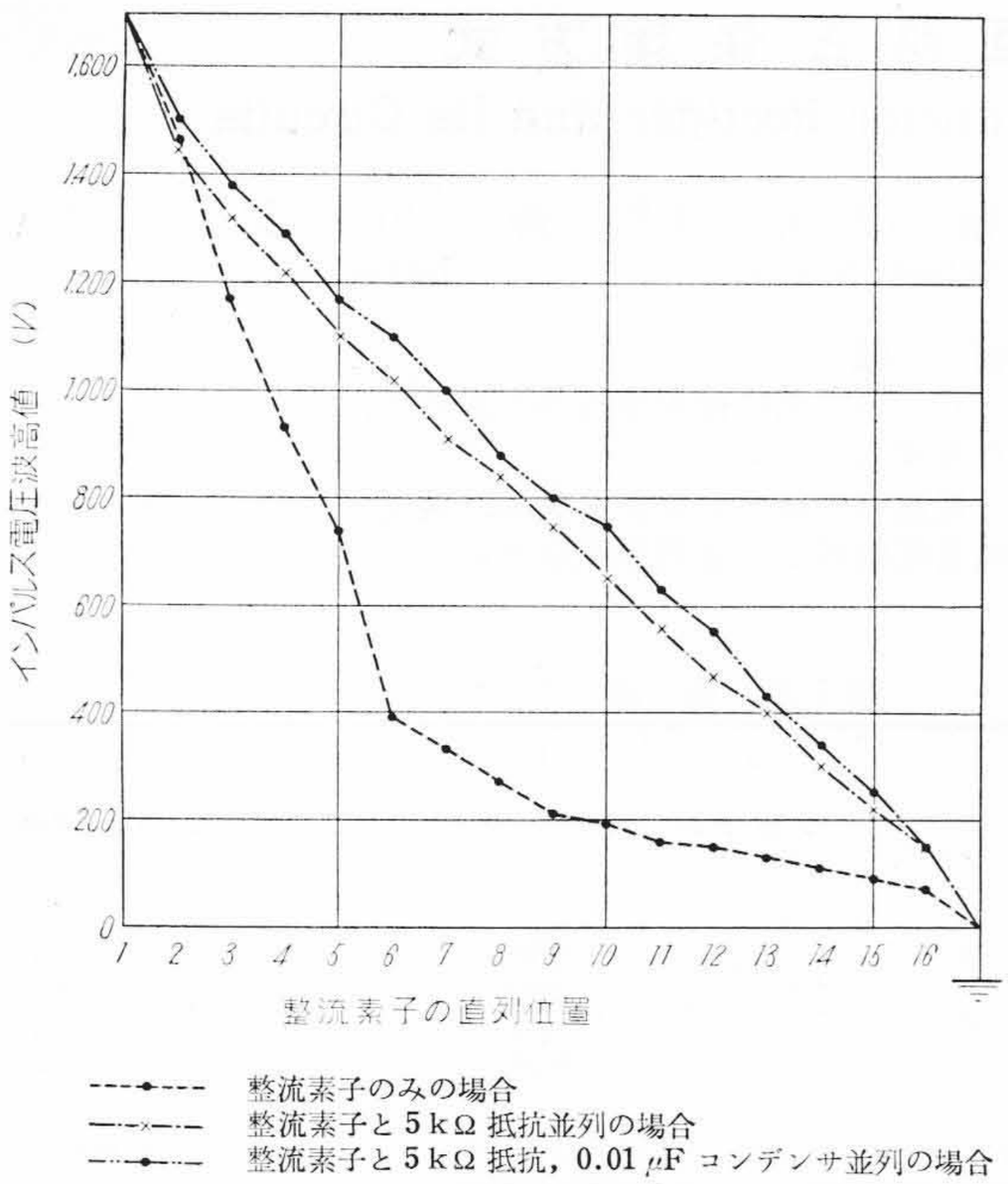
第1表において通常最も広く利用される方式は(c)三相ブリッジ結線であるが，低電圧，大電流整流器においては能率の点から(d)相間リアクトル付六相二重星形結線が用いられることもある。また電車搭載用のように受電が単相の場合には(b)単相ブリッジ結線が用いられる。

大電流あるいは高電圧の場合には当然整流素子をいくつか並列あるいは直列にすることが必要になるが，半導体整流器を2台以上直流側で並列あるいは直列にすることも行われ，このさい位相をずらして12相または18相整流回路として波形および力率を改善することもある。これらの場合には単一素子より成る場合に比して種々考慮を払わねばならないが，それについて以下に述べる。

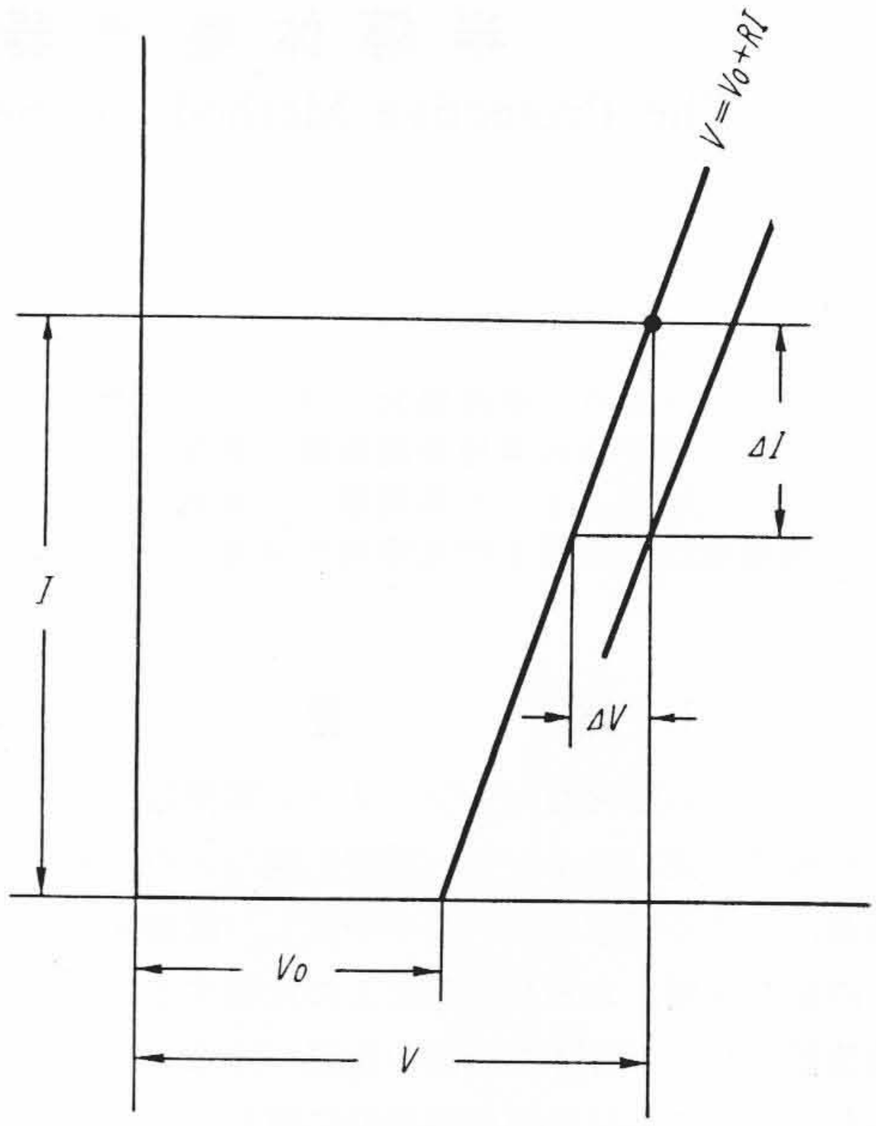
2.2 整流素子の電圧平衡

半導体整流素子の逆特性にはある程度のばらつきがあり，これをいくつか直列に接続して使用する場合には分担電圧に不平衡を生ずる。したがって素子によっては許

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所国分工場



第1図　直列シリコン整流素子インパルス電圧分布



第2図　整流素子の電流不平衡説明図

容電圧以上の逆電圧がかかる危険があるため，各素子の分担電圧を均一にすることが必要になる。その方法としては補助変圧器を用いて逆電圧を強制的に均等化させることが発表されているが[1]，通常は整流素子と並列に抵抗を接続しそれに流れる電流を整流素子の逆電流の数倍以上にする方法が用いられている。

いま，n 個の整流素子の電圧 V における逆流の平均値を $\bar{I}$，ばらつき(偏差)を ΔI とし，電圧 V のとき分圧抵抗に流れる電流を I_0 とすれば，整流素子と分圧抵抗の合成抵抗は

$$R=\frac{V}{I_0+\bar{I}+\Delta I}\doteqdot\frac{V}{I_0+\bar{I}}\left(1-\frac{\Delta I}{I_0+\bar{I}}\right)$$

$$(I_0+\bar{I}\gg\Delta I)\quad\cdots\cdots(1)$$

これらの素子を n 個直列に接続して電圧 nV を印加した時の分担電圧は R に比例するゆえ，その不平衡率は(1)式より次式のように表わされる。

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{\Delta R}{R}=-\frac{\Delta I}{I_0+\bar{I}}\quad\cdots\cdots(2)$$

(2)式より電圧の不平衡を小さくするには分圧抵抗の値を小さくとるほど良いことがわかるが，これは損失の増大となるゆえ不平衡率の許容値に応じてきめることが必要である。

以上述べた電圧不平衡はインパルス電圧が印加される場合についても同様の考慮が必要であるが，さらに整流素子内部のキャパシタンスおよび外部大地に対するストレイキャパシタンスの影響も考えねばならぬ。第1図はシリコン整流素子を16個直列に接続し，1×50 μs, 1,600 Vインパルスを印加した場合の電圧分布を示す。これより整流素子のみでは高電位側の素子に大きな電圧が加わることがわかるが，分圧抵抗を挿入すると均一分布に近くなり，また整流素子と並列にコンデンサも挿入すればさらに電圧分布が改善されることが示されている。

2.3　整流素子の電流平衡

半導体整流素子の順方向電圧降下はばらつきが少ないが，多数の素子を並列に接続した場合には順方向抵抗が小なるため電流の不平衡が無視できない値となる。すなわち整流素子の順方向電圧降下を

$$V=V_0+RI\quad\cdots\cdots(3)$$

で表わし，n 個の素子に対し電流 I を通じた時の正方向電圧降下の平均値を $\bar{V}$，偏差を ΔV，また抵抗分 R の平均値を $\bar{R}$ とすると，これらの素子 n 個を並列にして平均 I の電流を通じた時の電流偏差 ΔI は第2図より明らかなとおり近似的に次式で表わされる。

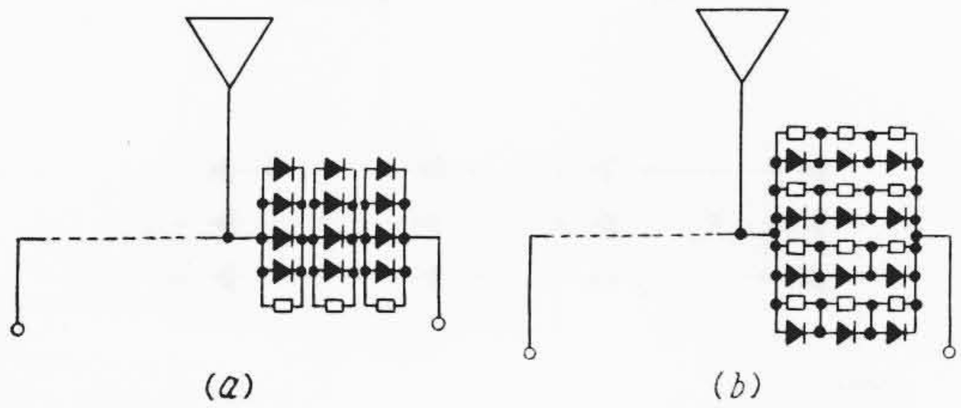
$$\Delta I=-\frac{\Delta V}{\bar{R}}\quad\cdots\cdots(4)$$

したがって電流不平衡率としては次のとおりとなる。

$$\frac{\Delta I}{I}=-\frac{\Delta V}{I\bar{R}}\quad\cdots\cdots(5)$$

抵抗 R は電流が増加するにつれて小さくなるゆえ，電流が大なるほど電流不平衡率は大きくなる傾向にある。

電流平衡化の方法としては電流平衡用リアクトルが用いられ，整流素子の並列数が少ない時には比較的簡単で確実であるが，並列数が多くなると装置が複雑になると



第3図　整流素子の直並列接続

ともに，技術的にも困難が伴う。いずれにせよ平衡用リアクトルを用いるか，あるいは使用せずに整流素子の電流に余裕をとるかは経済的見地より決定すべきである。

電流平衡化の方法としてはほかに順方向特性のよくそろった整流素子をえらんで並列に接続することが行われる。この場合順方向電圧降下を何階級かに区分し，同一階級の整流素子を並列に接続するが，その階級の範囲は(5)式から容易に求められる。

一般に多数の整流素子を直列および並列に接続する構成法には**第3図**に示した二通りがある。(a)図の方法は分圧抵抗が少なくて済むが整流素子が1個破壊した時に過電圧のかかる素子数が多くあまり用いられない。(b)図の方法は素子が1個破壊しても過電圧になる素子はそれと直列に接続されたもののみであり，また電流の平衡化が容易である利点を有している。

いま順方向電圧降下の母平均 μ, 母分散 σ^2 の正規母集団より m 個の整流素子を取り出して直列にした群を n 組作り，各群について直列素子の順方向電圧降下の和を V_S ($S=1, 2, \ldots\ldots, n$) とすると，V_S は平均 $m\mu$，分散 $m\sigma^2$ の正規分布に従うゆえ n 組の V_S に対する標本平均 $\bar{V}$ および標本標準偏差 s の期望値はそれぞれ次のようになる。

$$E(\bar{V})=m\mu \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

$$E(s)=\sqrt{\frac{2m}{n}}\,\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)\sigma/\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \quad \ldots\ldots (7)$$

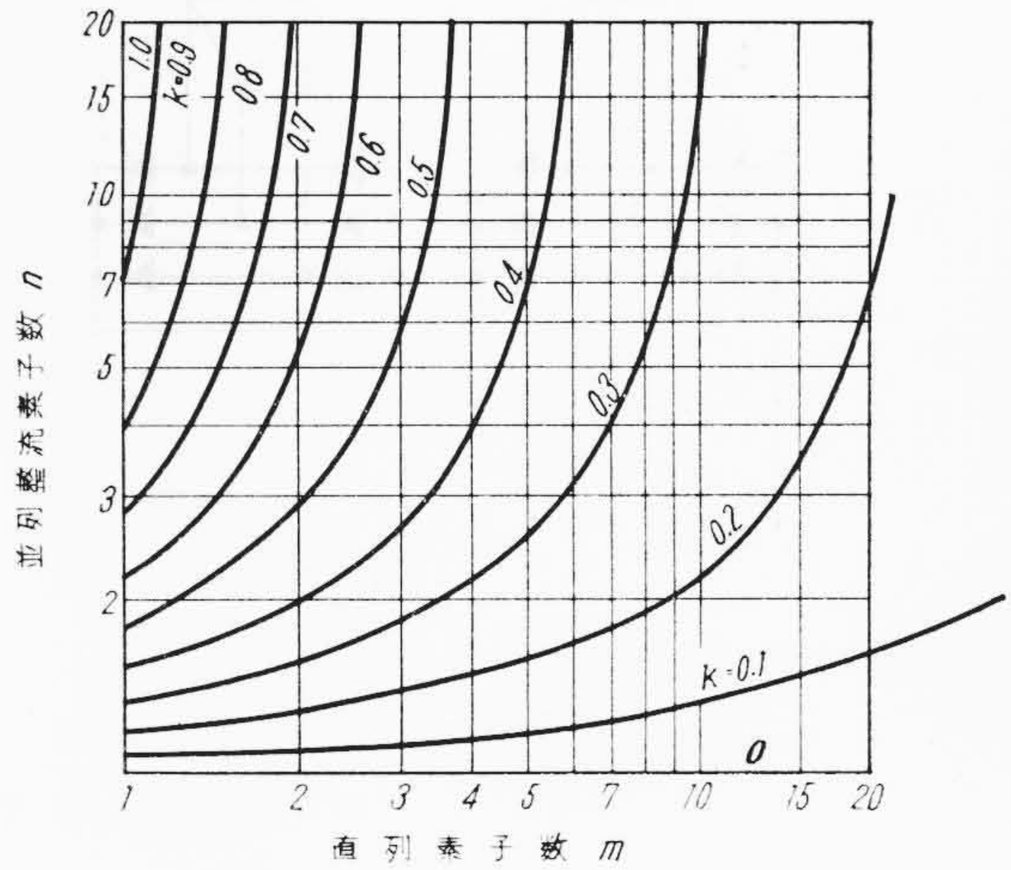
したがって各群の正方向電圧降下のばらつきに相応したものとして次式を考えることができる。

$$\frac{E(s)}{E(V)}=\sqrt{\frac{2}{mn}}\,\frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}\cdot\frac{\sigma}{\mu} \quad \ldots\ldots (8)$$

ここに

$$K=\sqrt{\frac{2}{mn}}\,\frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

とおくと，m 個直列の整流素子列を n 組並列に接続した場合の順方向電圧降下のばらつきは，母集団のそれの K 倍になる。K の値を**第4図**に示す。



第4図　K と m, n の関係

2.4　半導体整流器の直並列接続

半導体整流器が大容量器の場合にはこれをいくつかに分割し，**第5図**のように直流側で並列に接続することも行われる。

(1)　並列接続

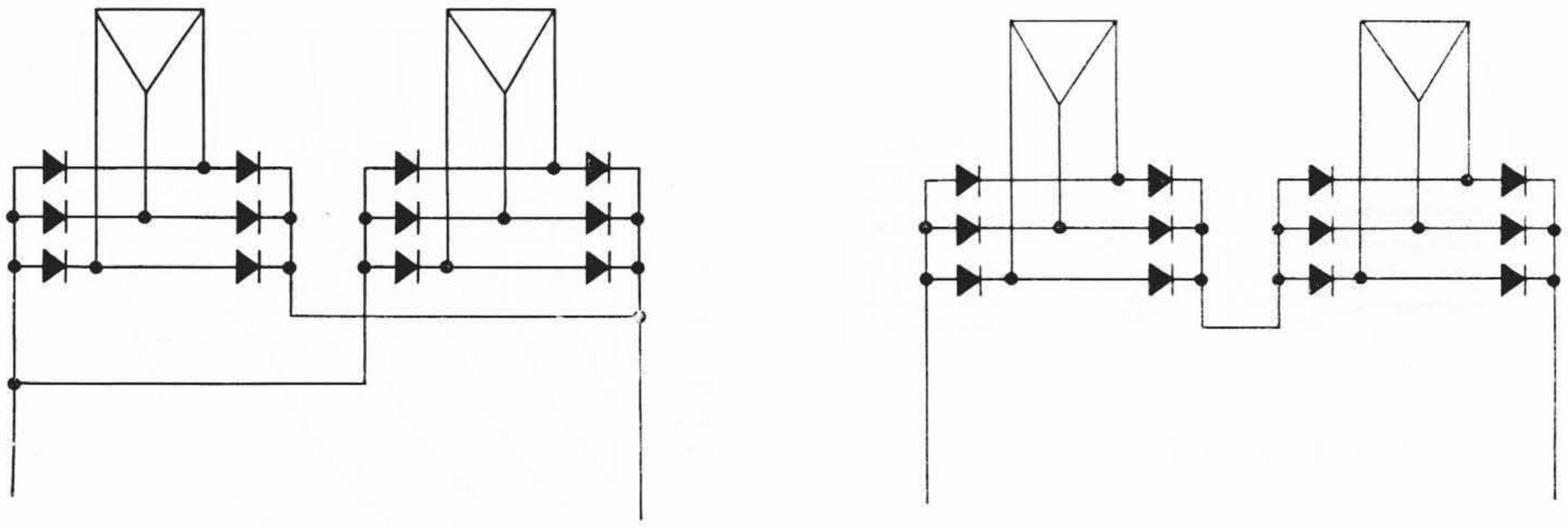
大電流の半導体整流器において，いたずらに整流素子の並列数を増加させることは，導体の長さの相違などにより整流素子の電流不平衡を増大させるゆえ，あまり得策ではない。この場合は整流器を2台以上並列に接続して運転するが，この際注意せねばならぬことは，各整流器の電圧変動率を合わせて整流器間の電流を平衡させることである。このためには各変圧器の特性が合致しているのみでなく，変圧器より整流器に至る導体の長さ，配置条件をできるだけ等しくせねばならない。

整流器の位相をずらして12相整流あるいは18相整流とする場合には，整流器間に循環交流電流が流れ，整流素子の実効電流を増すゆえ，これを抑制するため平滑リアクトルあるいは相間リアクトルが設けられる[2]。

並列接続中の1台の整流器が事故の場合には，必要に応じてその1台を切り離して出力を減じ，そのまま運転を続行することができる。また計画的に出力を減じて運転する場合には出力に応じて並列台数を減ずることにより，高効率を維持することも可能である。

(2)　直列接続

高電圧の整流器においては，2台以上に分割して直列接続が行われることもある。この場合は各整流器の回路電圧が低くなり，整流素子保護用の限流ヒューズ



(a) 並列接続　　(b) 直列接続

第5図 半導体整流器の直並列接続

の動作責務を低減させる。また計画的に低電圧で運転することが必要な場合には，整流器の直列台数を減ずることにより高効率を維持することができる。

3. 過負荷保護

電力用半導体整流器の過負荷耐量は一般にほかの電力機器に比べて小さいが，このため機器設計上，電圧変動率，保護継電器，ヒューズ類の選定などには十分な検討をする必要がある。

すなわち

（1） 直流側短絡

（2） 整流器事故時の設備運転の確保の要否

（3） 一般過負荷

（4） 事故電流の大きさ，増加率

（5） 整流器としての経済性

などである。以下保護の面からそれらの考え方について述べる。

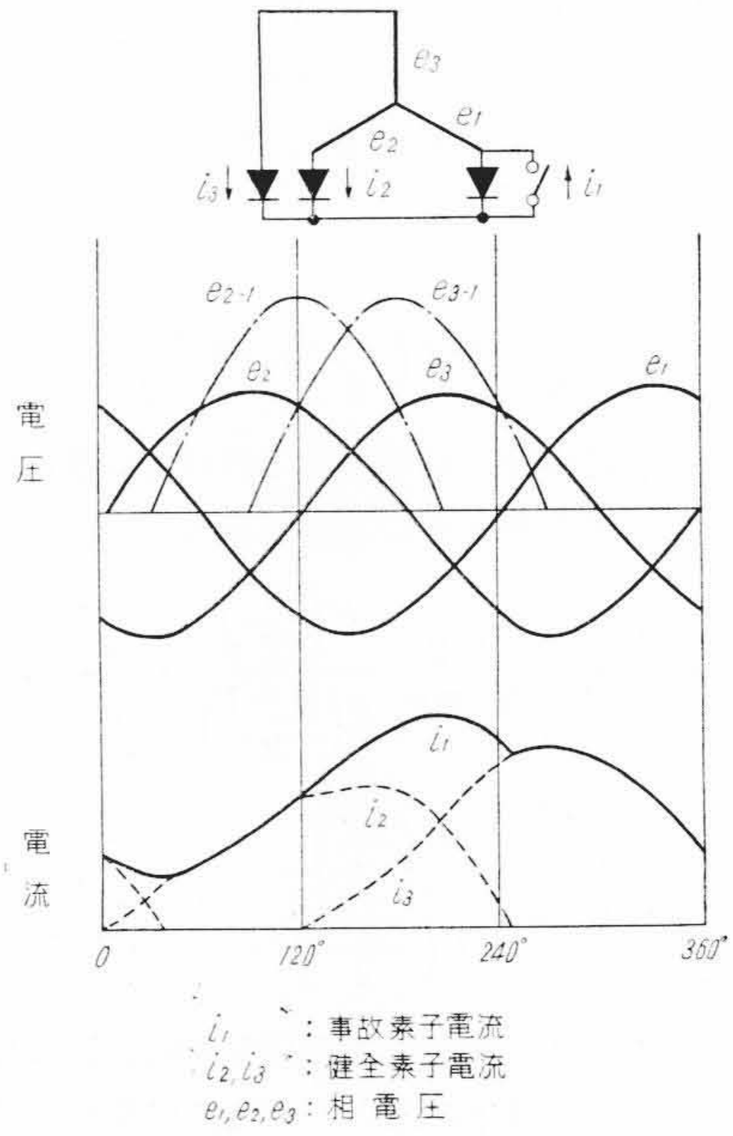
3.1 直流側短絡

直流側短絡時短絡インピーダンスが大きければ，素子の通流期間は，三相整流の場合ほぼ120度であるが，短絡インピーダンスが小さく，電源側インピーダンスに比し無視できる程度の場合，通流期間は120度より180度に変化し，単に波高値が大きくなるばかりでなく，通流期間が大きくなるということで素子にはきびしい条件となる。一般の電解工業などでは，直流母線の適当な機械的強度の選定，配置，絶縁が取られるので，直流短絡はほとんど起らないが，電鉄用の変電所，アーク炉用電源の場合には短絡の可能性がある。また一般電源用でも半導体整流器がブリッジ結線でない場合（SINGLE WAY CONNECTION）の直列素子の事故，また並列水銀整流器の逆弧，接触変流器の短絡器動作時などは，健全整流器側からは直流短絡と等価である。

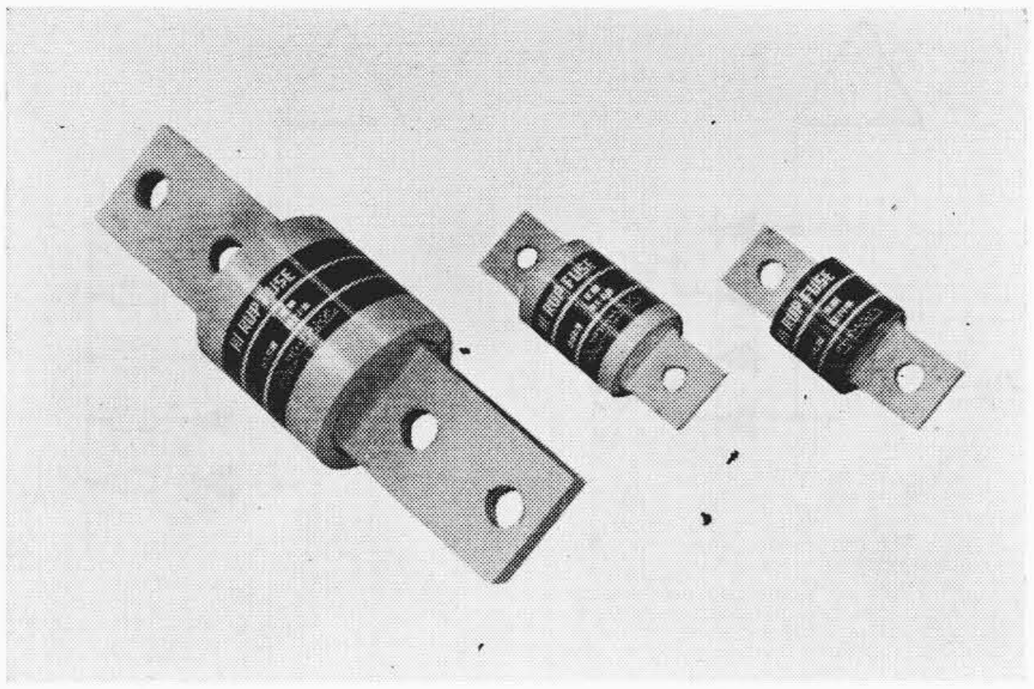
半導体整流器回路の短絡保護には限流ヒューズを使用するが，直流短絡時の過電流によってヒューズが熔断するようでは，運転に支障をきたすので，直流リアクトルを回路にそう入して回路のインダクタンスを増し，短絡電流の増加率をおさえ高速度遮断器によって事故電流をしゃだんさせる。この際ヒューズは直流短絡電流では熔断しないが素子短絡時には熔断し，確実に保護機能を果すように素子を構成すること，および電源インピーダンスの選定が必要である。

3.2 素子短絡

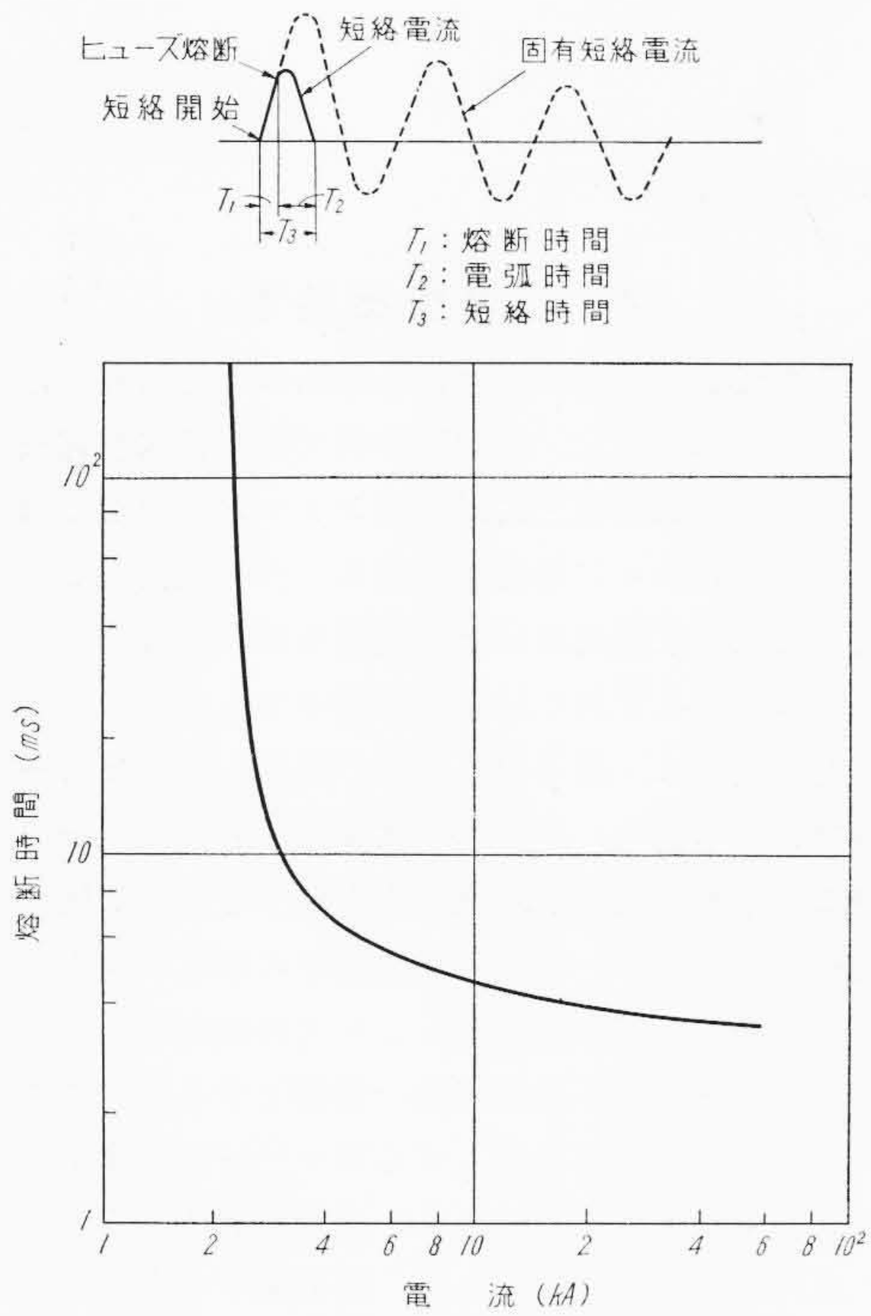
直列に構成された整流素子が万が一，全数破壊すればその整流機能はなくなり，整流器用変圧器二次側の線間短絡となる。この場合第6図に示すように健全相素子に



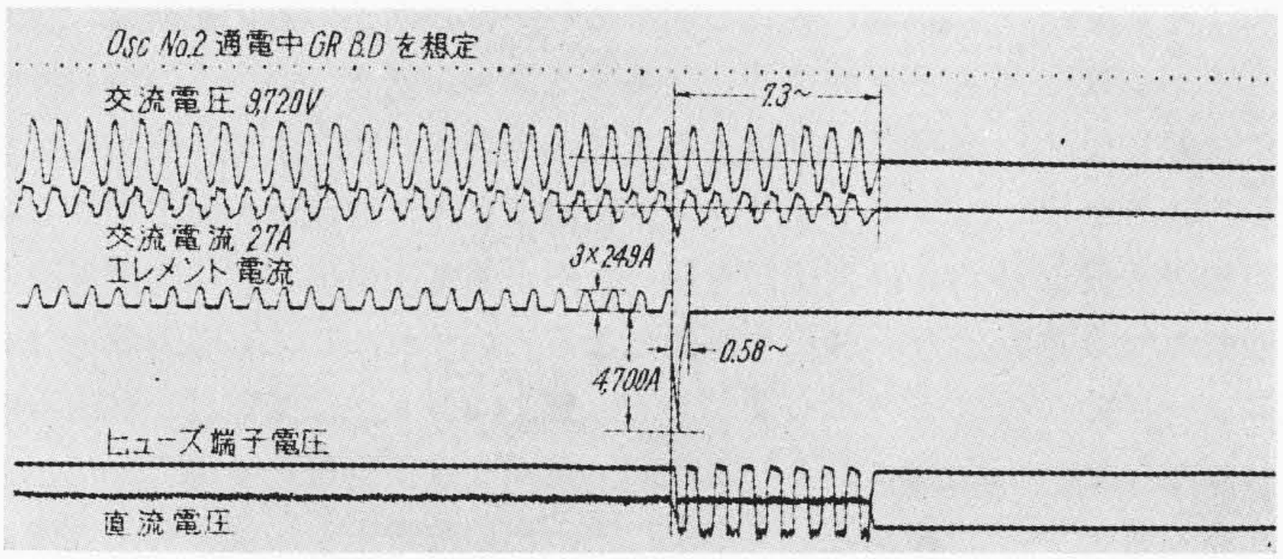
第6図 素子短絡電流の一例



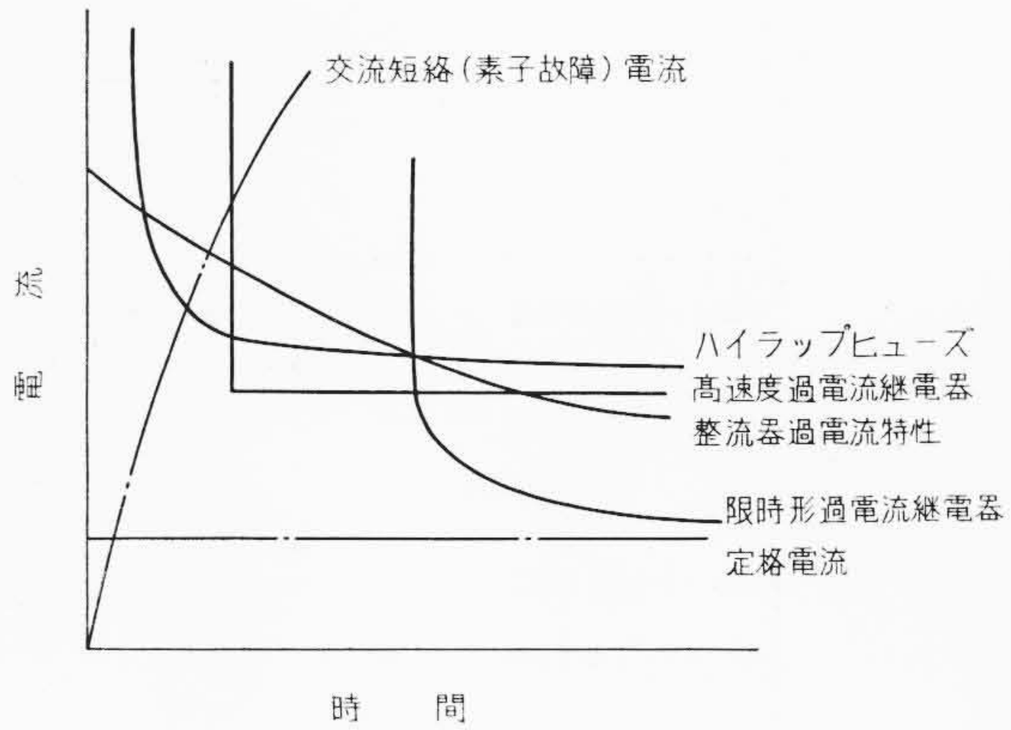
左より 350V 1,500A, 400A, 150V 1,000A を示す
第7図 ハイラップヒューズ



150V 1,000A
第8図 ハイラップヒューズ熔断特性



第9図 実回路におけるヒューズ遮断試験



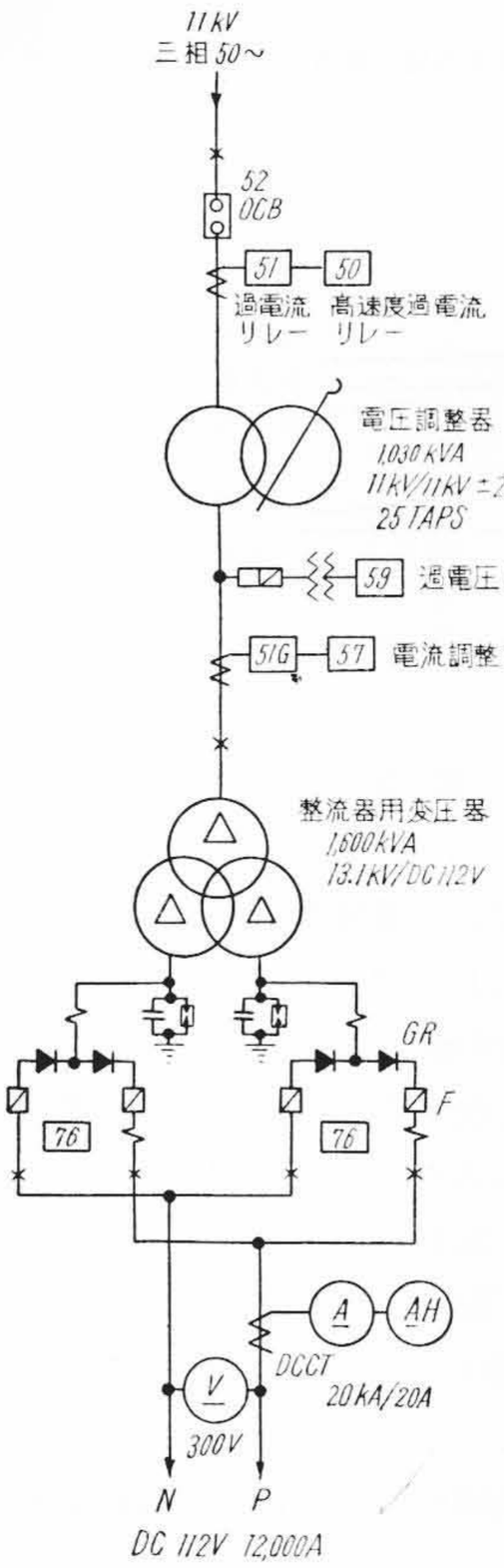
第10図 過電流協調曲線

流れる電流は三相整流の場合，通流期間が120度より回路定数によっては180度以上に増加することがある。またブリッジ結線でない場合の直列素子の全数破壊は，並列機器側からは直流短絡となり整流器自身の短絡電流以外に直流側から電流が流れ込み，いっそうひどくなる。このような急激に上昇する短絡電流を1サイクル以内にすみやかに遮断するには，限流特性を有する高速度ヒューズが要求される。**第7図**は日立製作所で開発されたハイラップヒューズでこのような目的を十分満足している。**第8，9図**にその熔断特性および遮断試験結果を示す。

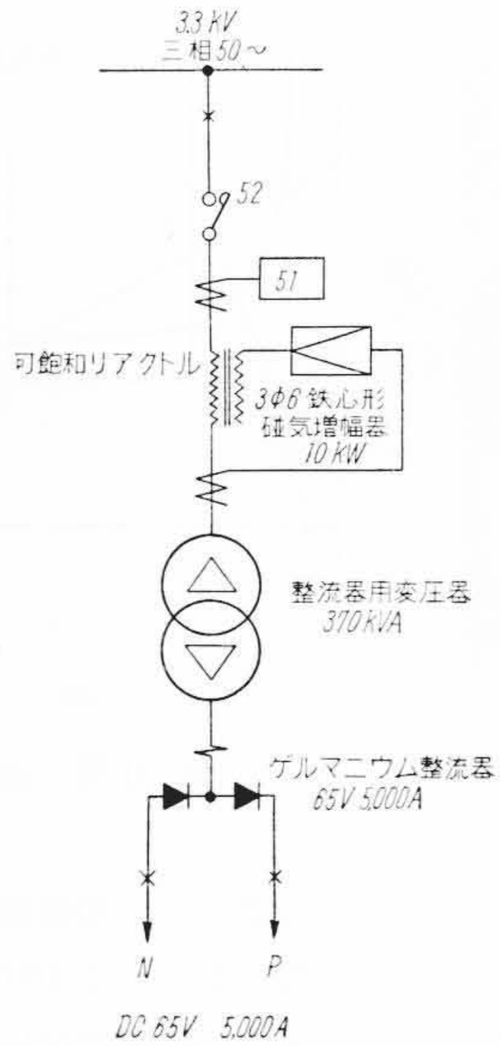
3.3 一般過負荷保護と定電流調整

電源電圧変動あるいは負荷条件の変化によって，整流器の過負荷許容限度をこすことがある。たとえば分解電圧の電槽電圧に対する比が比較的大きい電解槽では交流電圧が上昇すれば直流出力電流は電圧変化分のほぼ2倍以上に達することがある。一般に電解工業では生産管理の面からも定電流装置をもつものが多いが，これらの設備がないときには，上記のような過負荷を生ずる可能性がある。このような過電流にたいしては限時過電流継電器，あるいは高速度過電流継電器によって保護をする。上記の関係を図示すると理想的には**第10図**のような過電流協調曲線となる。

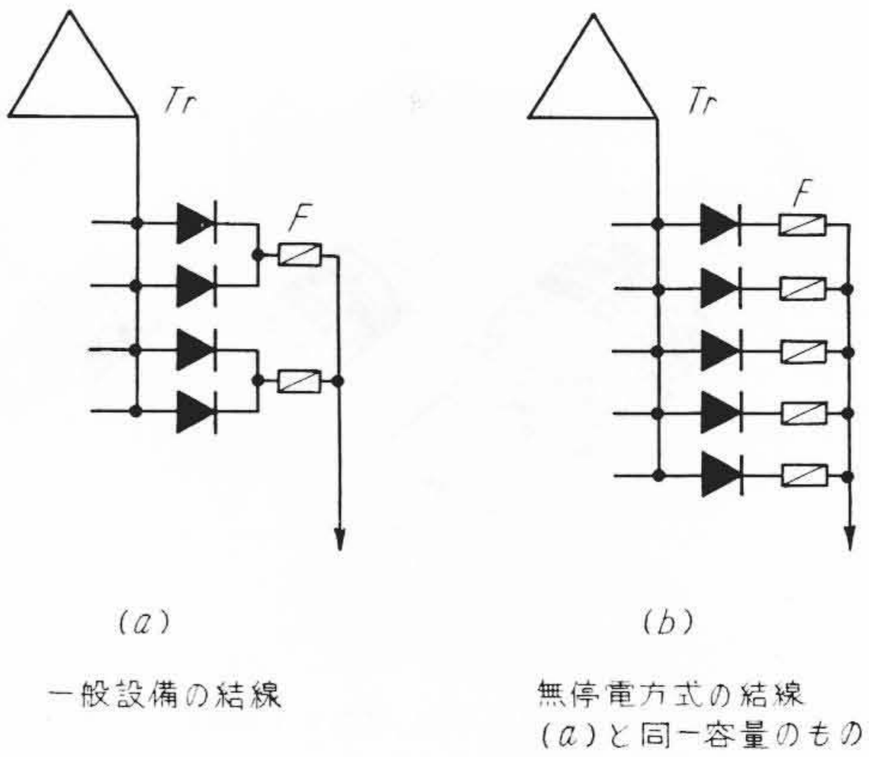
なお定電流装置の調整器としては3kV以下の回路には誘導電圧調整器，10kV回路以上では負荷時電圧調整器が多く用いられ，10kV回路以上で細密調整の必要な場合には負荷時電圧調整器の直列巻線一次側を誘導電圧調整器で励磁する方式が用いられる。また電圧あるいは電流の調整に速応性を必要とするときには調整器の代りに可飽和リアクトルが用いられる。電気炉用電源などのように電圧電流



（負荷時電圧調整器使用の場合）
第11図　単線結線図



（可飽和リアクトル使用の場合）
第12図　単線結線図



第13図　連続運転方式の場合の素子とヒューズの組合せ例

特性が垂下特性を必要とする場合にきわめて有効である。なおこの場合，検出要素として変圧器一次電流をとれば，素子が短絡事故を起した場合に短絡電流を抑制して健全素子が破壊するのを防止する利点がある。またこのとき直列素子の短絡は交流入力と直流出力が不平衡になるため，差動継電器で容易に直列素子短絡と負荷側の短絡を区別することができる[3]。直流出力電流を検出要素とする場合には，素子短絡時には出力電流が減少し，短絡電流を増大する方向に調整器が動作するため，限流ヒューズを用いて保護をしなければならない。

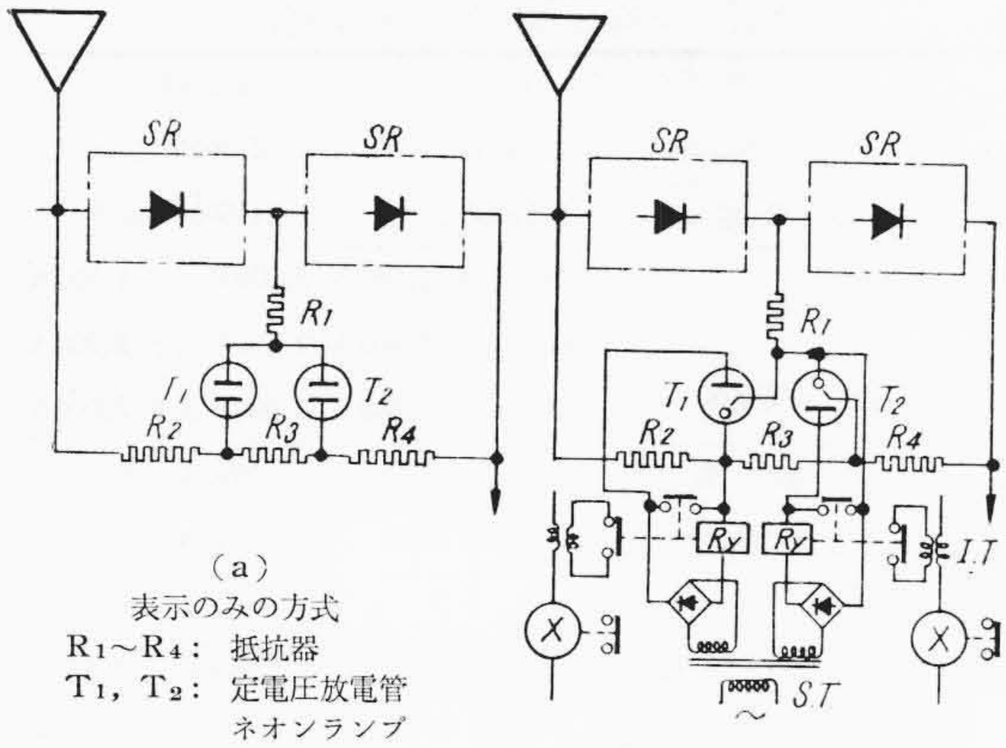
第11, 12図は定電流調整回路の一例を示す。

3.4　連続運転方式

アルミ精練などのように負荷の性質によっては停電をなくするため，多くの直並列構成中，一直列素子が全数破壊して，限流ヒューズが熔断してもただちに全停しないで警報のみを行い，残り素子で運転を継続し，適当な時に素子の入れかえを行う方式，あるいは，運転中活線のままで交換を行う方式が採用されている。連続運転方式を採用するときには，**第13図**のように限流ヒューズを細分化し，かつ並列構成数の余裕をとらなければならない。また大容量器で，整流器ユニットが数多く並列運転する設備では，予備器を1ユニット持つことも無停電方式では有利な方法である。

4.　故障検出装置

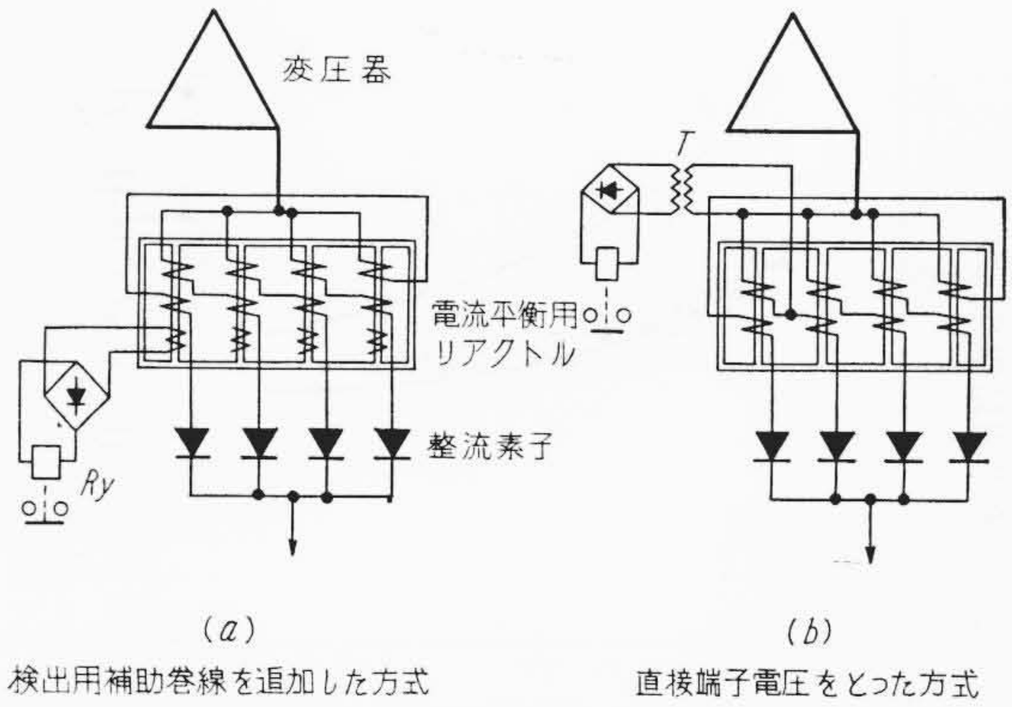
半導体整流器は電鉄用など高電圧の電力用電源としても使用されはじめた。日立製作所では，日本国有鉄道大井町変電所に電鉄地上変電所用シリコン整流器設備を，また電車用シリコン整流器を納入，各種試験を実施中であり，また東京都交通局下谷変電所納入の設備は現在営業運転にはいっており好調に稼動中である。これら高電圧出力の設備は，素子の直列数の限界，限流ヒューズの定格などから従来，変圧器二次巻線を分割してそのおのおのに整流器を接続し，直流出力端子で直列に接続される方式がとられていたが，整流素子の耐圧の向上，素子直列数の低減，高圧用限流ヒューズの開発など技術的進歩によって変圧器二次巻線を一巻線とする傾向にある。なお変圧器一次側より侵入する雷サージ移行率も一巻線のほうが多巻線に比べて小さいので有利である。このように直列素子数が増大すれば，直列素子の全数破壊ははなはだまれとなり，たとえ直列中の一素子が劣化，あるいは短絡に至っても残り素子で十分運転を継続できる設計とすることができる。このような設備では全直列素子の破壊にいたる前にあらかじめ素子の劣化を検出，設備の停止時に適宜交換することが望ましい。この種の検出装置は従来種々の方式が発表され[4]，すでに実用化されているがシリコン整流器のように逆流値が僅小である場合には変圧器を用いた不平衡電圧検出方式は励磁電流の点から検出も困難となる。いずれにしても極力簡易なものとする必要がある。**第14図**(a)は保守員が整流器の近傍におり一日数回，見回り点検を行える場合，たとえば電車などで車庫に入，出の際電圧を印加すれば故障素子があるときには検出用ランプが点灯し故障グループを



(a)
表示のみの方式
R1～R4： 抵抗器
T1，T2： 定電圧放電管
ネオンランプ

(b)
継電器動作方式
R1～R4： 抵抗器
T1，T2： 冷陰極三極放電管
Ry： 検出継電器
X： 同上用補助継電器
I.T.： 絶縁変圧器
S.T.： Ry付勢用電源変圧器

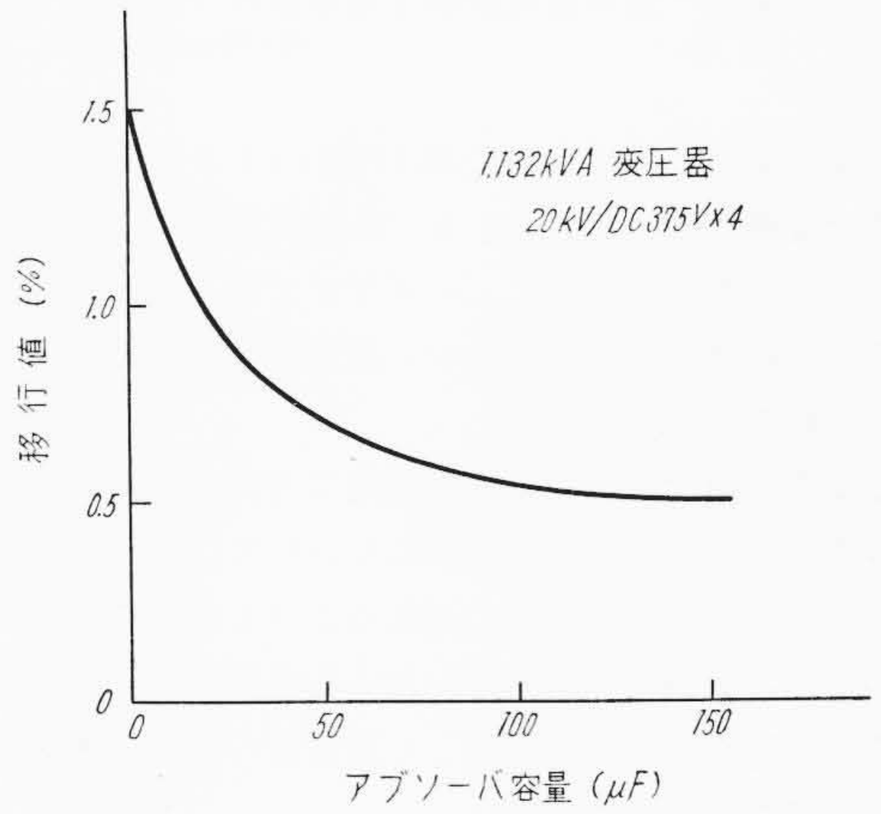
第14図　素子故障検出回路の一例



(a)
検出用補助巻線を追加した方式

(b)
直接端子電圧をとった方式

第15図　正方向電流不平衡検出装置



第16図　アブソーバ(コンデンサ)による低減効果

示すようになっている[5]。**第14図**(b)は無人変電所を対象として遠方に警報を行わせるようにしたもので制御所では軽故障として扱い運転停止時に不良素子の交換を行う。

また並列数の多いときには正方向特性の差による電流の不平衡を是正するため電流平衡用リアクトルを用いているが，不平衡の度合が大きくなった場合に**第15図**のように平衡リアクトルに補助巻線を設けるかあるいはその端子電圧を利用，不平衡の検出をすることがある。

5. 異常電圧保護

異常電圧で考えられるのは外雷による衝撃波と回路の投入遮断に伴う開閉サージであるが，開閉サージは回路の条件，遮断器の選択によって，整波器の耐圧以下におさえるように設計する必要がある。

5.1 コンデンサ

急しゅんかつ短波尾波形の衝撃波は変圧器二次側に挿入されたコンデンサにより波頭しゅん度の軽減とともに波高値も十分小さくなる。**第16図**はその一例を示した。ただしコンデンサは一定容量以上になるとそれ以上を挿入しても低減効果は飽和する。またコンデンサによって転流時に変圧器巻線，回路のインダクタンス分と共振を起し振動電圧を発生するのでこれを抑制するために通常コンデンサと直列に無誘導抵抗をそう入している。

5.2 非直線抵抗体と放電器

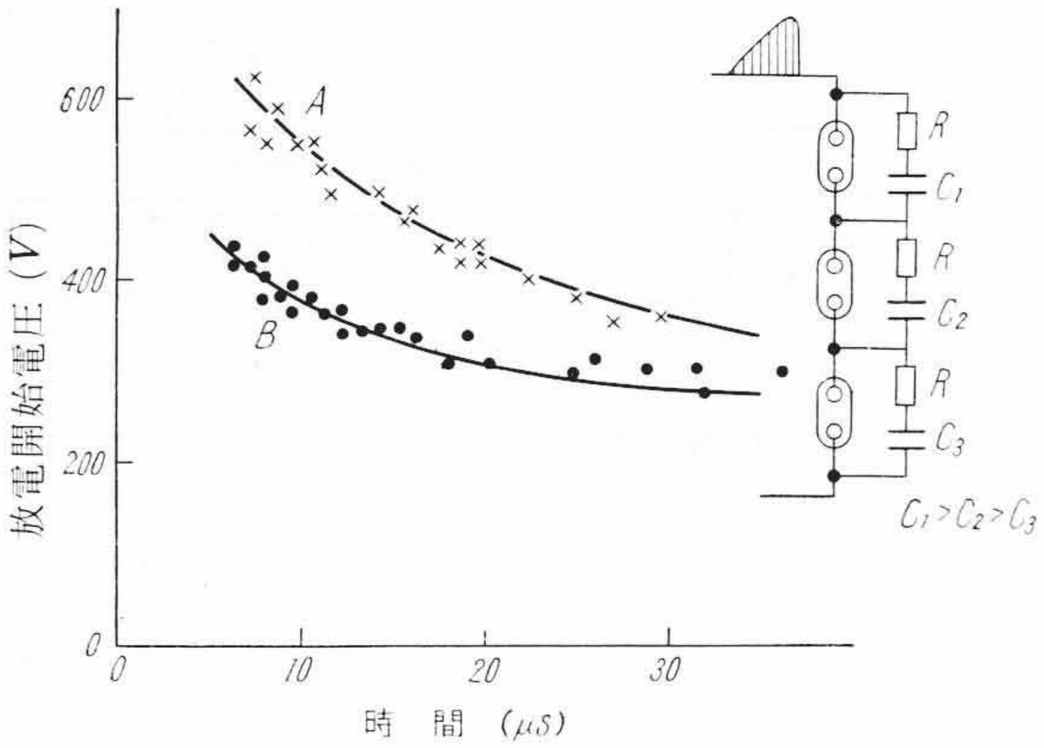
コンデンサは衝撃波にたいしては有効であるけれども開閉サージなど低周波領域の異常電圧にたいしては効果は認められない。また素子構成の経済性からも素子の直列数を増加させずに異常電圧に対処するためにはコンデンサのみでは不十分である。

半導体整流器の逆特性はゼナー電圧以上では

$$V = CI^{\beta}$$

ただし　V： 逆電圧
　　I： 逆電流
　　β： 非直線性を示す係数
　　C： 定　数　　と近似される。

したがって過電圧に対して，これよりも下回る電圧電流特性を有するものを使用すれば，十分保護ができる。日立製作所ではこのような目的を満足するものとして，セレン整流器の逆特性を利用，好結果を得ている。これらのセレン整流器は放電電流の小さな部分では非直線抵抗体として動作し，印加電圧が高く，放電電流が大きい時には整流堰層部が破壊され，放電後は放電孔が絶縁物化して優秀な続流遮断性能をもっている。また高圧回路用には真空避雷器も有効な手段であり，これを直列使用する場合には，衝撃電圧にたいして強制的に電圧分布を



A：一般の場合
B：放電管と並列にCR挿入の場合

第17図　強制放電形真空避雷器の V-t 特性
(5×60 μs 波による)

不平衡にすることによって**第17図**のように電圧—時間特性を改善することができる。なお放電管には続流遮断性能がないため続流をヒューズなどで切ってやる必要がある。されば多くの場合セレン避雷器などの後備保護に使用される。

また電鉄用変電所のように直流出力側から衝撃波電圧の侵入するおそれのある設備にたいしては単に交流側のみならず直流側にも在来の避雷器よりも放電開始電圧，制限電圧の低い特殊避雷器を用いる必要がある。大井町変電所，下谷変電所に納入した避雷器の仕様は**第2表**のとおりである。

6. 他機器との並列運転

半導体整流器のすぐれた特長は新設設備としてのみならず，既設機器の一部老朽化に伴う代替あるいは負荷増加に伴う直流電源増強としてもその応用を促がすに至っている。これらの場合には他機器との並列運転が必要になり，特に電鉄変電所用の場合には同一変電所または隣接変電所の他機器との並列運転を行うのが大部分である。並列機器としては通常回転変流機，接触変流機，水銀整流器があるが，半導体整流器に対しては単独運転の場合に比し，慎重な考慮が払われねばならない。以下それらの問題点について述べる。

6.1 負荷分担

半導体整流器の過負荷耐量が小さいことは先に述べたとおりで，したがって他機器との並列運転に際しては半導体整流器の過負荷をできるだけさけることが望ましい。しかしながらこれは並列機器の過負荷特性および負荷の条件を考慮して検討されねばならない。

(1)　化学工業用

電解用の場合には通常負荷が一定であり，過負荷が問題になるのは主として電源電圧変動の場合である。特に電解槽の逆起電力が大きい場合には電圧上昇による負荷電流の増加が大である。多くの場合電解用電源は定電流制御あるいは定電圧制御を行っているゆえ，その制御時間の過負荷が問題になる。これに対してはある程度半導体整流器の電圧変動率を大きくとり，過負荷分担を並列機器より小さくとることが望ましい。これは並列機器の過負荷耐量とにらみ合わせて決定されるべきである。

第2表　半導体整流器用直流避雷器

仕様 ＼ 電圧		600V 用	1,500V 用
放電開始電圧	交流(波高値)	2,500V 以下	4,500V 以下
	衝撃電圧	2,500V 以下	4,500V 以下
制限電圧		1,500V以下/1,000A	2,000V以下/1,000A
		2,000V以下/3,000A	2,500V以下/3,000A
制限電圧/放電電流		2,500V以下/5,000A	3,200V以下/5,000A
放電耐量		10kA　3回	10kA　3回
続流遮断能力		1kA　10回	1kA　10回

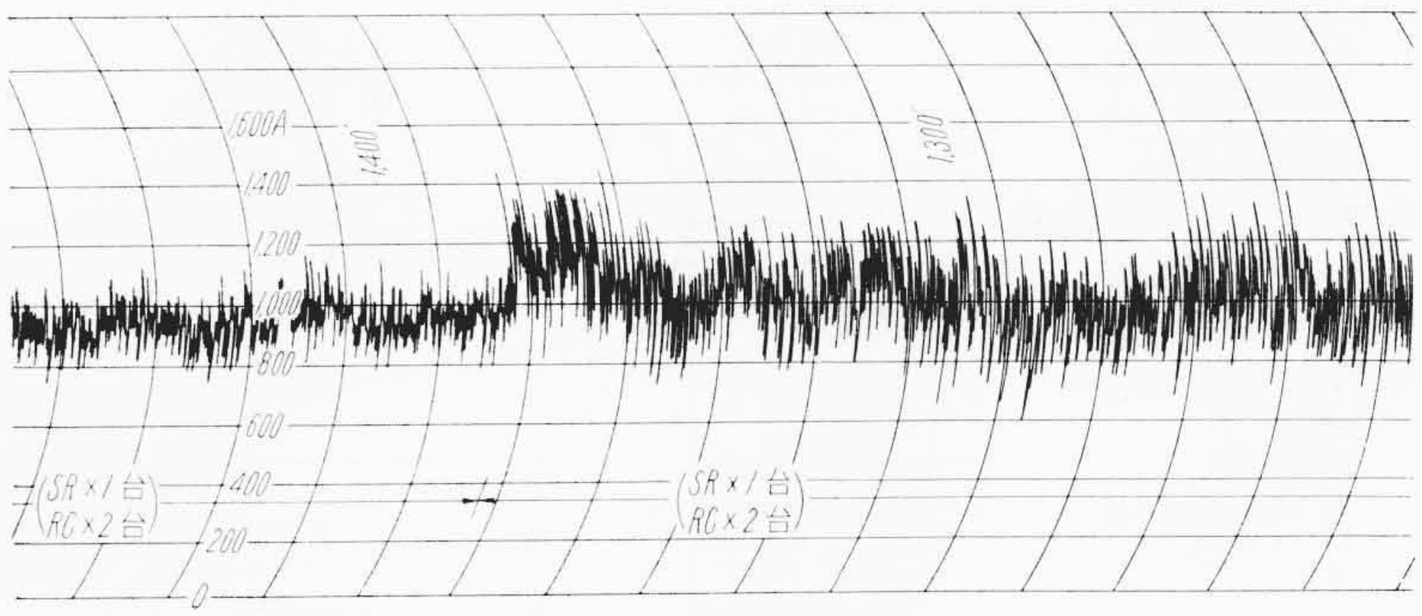
アルミ製錬用電源においては陽極効果の現象があり，その発生時に電流が減少する。したがって定電流制御を行っている場合には陽極効果消滅時に過渡的に過負荷を生ずるゆえ，半導体整流器がこれに十分耐えるよう考慮せねばならない。

(2)　電鉄変電所用

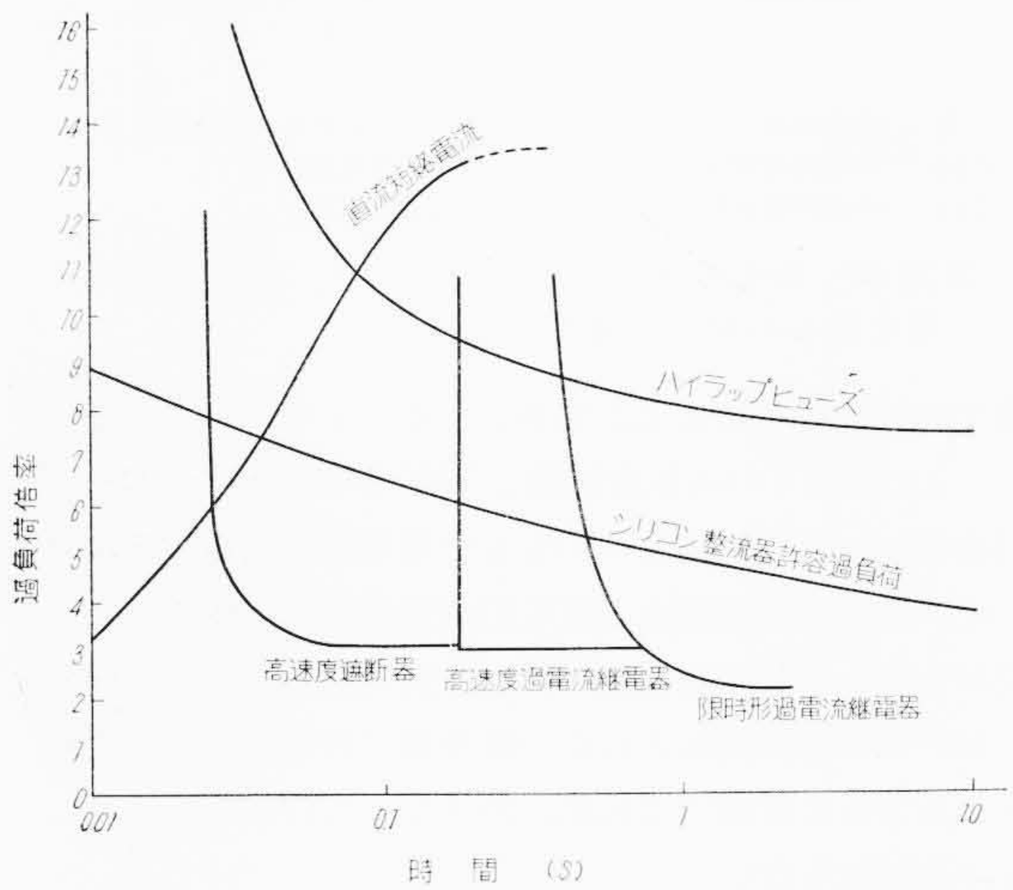
電鉄変電所用整流器の負荷は尖頭的変動負荷で，整流器には一般に過負荷定格が課される。水銀整流器ではC種定格として 200% 1分間，D種およびE種定格として 300% 1分間の過負荷条件が定められているが，半導体整流器にこの過負荷定格をそのまま適用することは得策ではない。たとえば半導体整流器に 300% 1分間の過負荷条件を与えると，整流素子の数はほとんどこの条件により決定され，実際には約260%連続の容量をそなえたものになる。したがって半導体整流器としてはできれば過負荷分担を減じて一定に近い負荷をとることが経済的に有利であり，そのために並列機器より電圧変動率を大きくすることが望ましい。しかし並列機が回転変流器の場合には軽負荷において半導体整流器より逆流を生ずることがあるゆえ注意しなければならない。

第18図は並列運転の実例を示す負荷曲線である。これは 750 kW，600 V シリコン整流器で 今年6月中旬より東京都交通局下谷変電所において 750 kW 回転変流機3台と並列運転を行っている。

半導体整流器の過負荷をさける方法としては上記のほかに限流用リアクトルを用いて出力に垂下特性を持たせる方法がある。すなわちある一定以上の過負荷を



第18図　シリコン整流器出力電流曲線



第19図　750 kW 600V シリコン整流器過負荷協調曲線

制限するとともにそれ以下の負荷においては並列機器と適当な負荷分担をとるもので，可飽和リアクトルを交流側に設けるが，整流器の容量は小さくてすみ，きわめて有用である。

6.2　並列機器の事故

回転変流機の閃絡，水銀整流器の消弧，接触変流機の接点焼損など並列機器の事故は，半導体整流器にとって出力側短絡に相当し過大な電流が流れる。したがって事故電流をすみやかに遮断するとともにその間半導体整流器が過負荷に耐えることが必要であるが，このさい半導体整流器を遮断する場合と遮断せずに運転を続ける場合について考えよう。なお以下に述べることは各種並列機器に対して共通であるが，実際にはその種類により考え方も多少異なってくる。特に半導体整流器にとっては並列機器の事故が少ないほど望ましいことはもちろんであり，その発生ひん度が多い場合には余裕のとり方も大きくしなければならない。

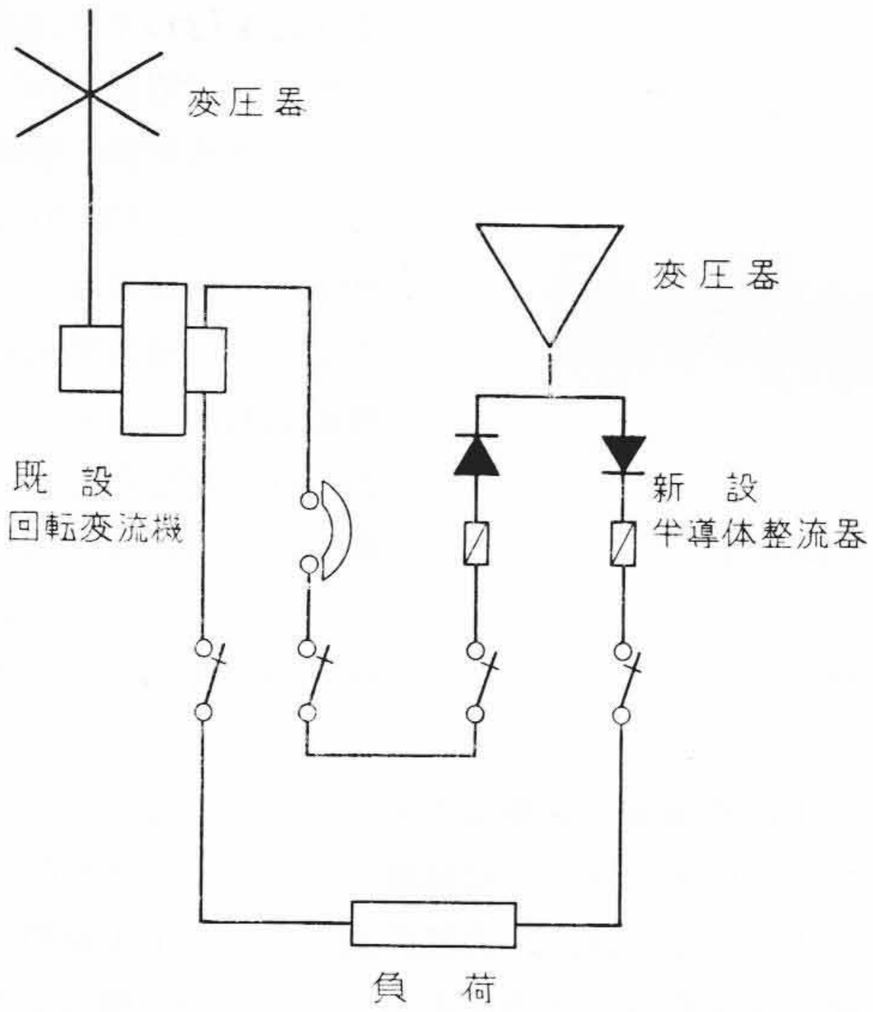
（1）　一般に並列機器の短絡に対してはヒューズによる保護を行わず直流高速度遮断器（過電流動作）により半導体整流器を遮断するが，その遮断時間 20 ないし 40 ms の間短絡電流に耐えるよう，半導体整流器の許容過負荷耐量をもたせておかなければならない。短絡電流は半導体整流器の電圧変動率によるが，一般に定格電流の数倍以上であり，これに耐えさせるには必要以上に整流素子を増加させることになる。これを緩和するには先に述べた交流側リアクトルにより限流特性をもたせる方法，出力側に直流リアクトルを設けて短絡電流を抑制する方法あるいは接触変流機のように短絡器を設けて整流器の交流母線および直流母線を短絡する方法がある。後者の場合は短絡器の動作後直流高速度遮断器（逆流動作）および交流遮断器により整流器をすみやかに遮断する。

以上のいずれの方法を用いるかは負荷および並列機器の条件により経済的見地より決定されるが，半導体整流器と保護装置の過負荷協調が完全にとられなければならない。**第19図**に大阪市交通局納 750 kW 600V シリコン整流器の過負荷協調曲線を示す。これは同容量の水銀整流器と同一変電所内で並列運転を行っており，直流側にはリアクトルを設けて短絡電流を抑制している。**第10図**と異なりハイラップヒューズの熔断特性が，整流器の許容過負荷特性を上回っているのは，直流短絡にさいし，ヒューズが熔断しないことおよび整流素子の並列数が多いことによるものである。

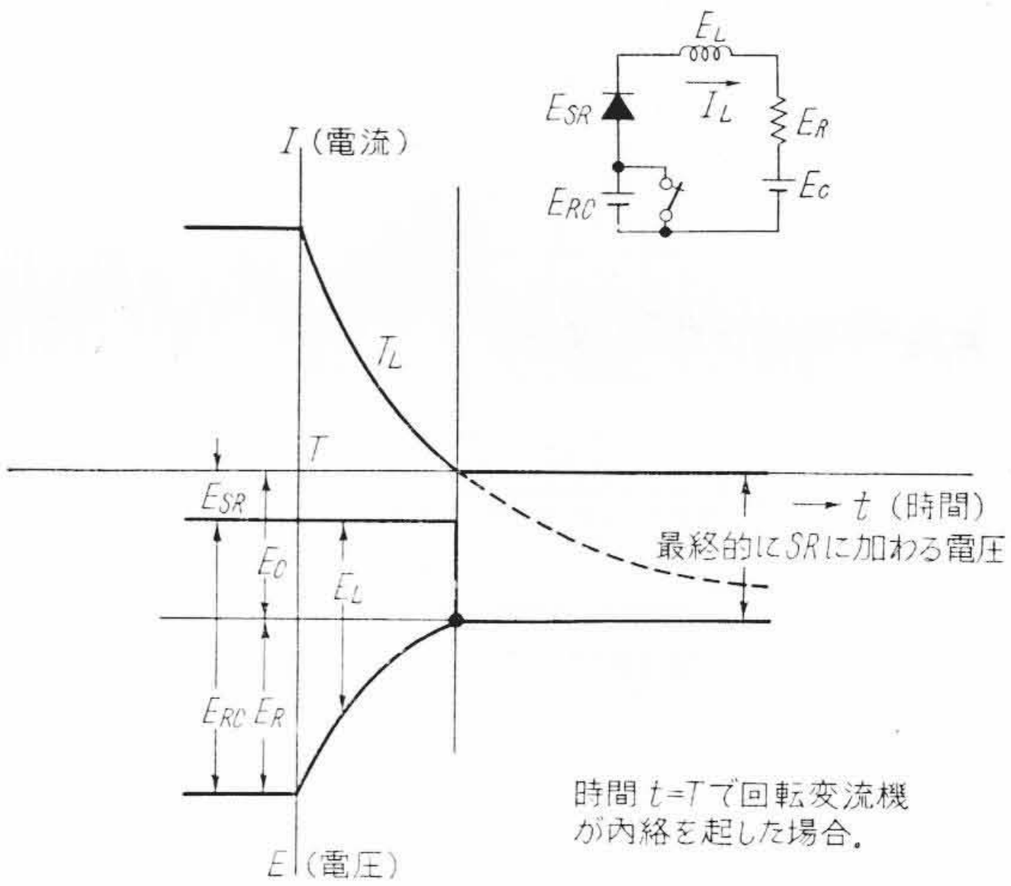
（2）　電解用半導体整流器においては特に無停電方式を採用し，並列機器の事故発生に際しても遮断せずに直流電圧を下げ，運転の継続を要求されることがある。この場合は上記（1）に比して条件がひどくて，したがって半導体整流器の実質的容量は大きくなる。すなわち半導体整流器は並列機器が遮断されたのちその分まで負荷をとることになり，これを定格負荷まで減ずるために誘導電圧調整器により直流電圧を下げねばならぬが，その間の過負荷に耐えるよう十分な容量を持たせねばならない。したがって並列機器の容量が相対的に大きい時は半導体整流器はきわめて不経済なものとなる。

6.3　半導体整流器の事故

整流素子の事故発生に対する保護方式は先に述べたとおりであるが，これが並列機器に及ぼす影響を述べる。直列に接続された整流素子が全部破壊すると半導体整流



第20図　半導体整流器と他機器との直列運転例



I_L：負荷電流　　E_L：回路インダクタンス電圧降下
E_{RC}：回転変流機電圧　　E_R：回路抵抗電圧降下
E_{SR}：半導体整流器電圧　　E_C：電槽逆起電力

第21図　回転変流機との直列運転で，変流機が閃絡を起した場合の過渡現象

器は相間短絡となり直流電圧は0に近くまで低下する。これは限流ヒューズが熔断するまで続くが，この間(約10 ms) 並列機器は直流短絡に近い状態となり過電流が流れる。これにより並列機器が事故を誘発するかいなかはその過負荷特性によりきまるゆえ，それに対して十分検討されねばならない。またヒューズ溶断後半導体整流器を遮断すると，その負荷を並列機器が余分にとることになるゆえ，その出力電圧を下げねばならぬことはもちろんである。通常半導体整流器はブリッジ接続であるゆえ，整流素子の事故の場合もそれと直列の反極性側相の整流素子は逆方向に電流を通じない。したがって半導体整流器の出力電流は0に減じたのち負荷側から逆流することはなく，この点並列機器にとって完全な直流短絡とはならずに半導体整流器の負荷を余分に負うにすぎないことになる。

7. 他機器との直列運転

半導体整流器と他機器との運転は並列運転ばかりでなくさらに既設備の容量増加の一手段として直列運転を行い電圧を高くすることがある。

この場合既設機器が短絡事故を起すと，並列運転ではその電流が問題となったが，直列接続では電圧が問題になる。第20図は直列接続の一例で既設備は回転変流器，負荷は逆電圧をもった電解槽の場合である。この図について回転変流機が閃絡した事故現象について考えてみる。第21図はその等価回路および事故時の電圧電流の時間変化を示したものである。変流機の閃絡は変流機出力電圧 E_{RC} を短絡したときの過渡現象で回路のインダクタンスによって正方向電流は暫時持続され，電流零に達すれば電解槽逆電圧が印加されることを示している。たとえば400Vの回転変流機と50Vの半導体整流器を直列接続し，逆起電力150Vをもつ電解槽に給電する場合には，半導体整流器は150Vの直流側電圧に耐えるよう設計されなければならない。また既設機器，新設整流器がおのおの並列運転されかつ直流側で両者が直列に接続されるような設備では起動，停止など操作順序に注意しなければならない。

8. 結　　言

以上電力用半導体整流器について，その回路方式と保護方式について概要を述べた。これら整流器はすでに発展の初期段階を過ぎ，その応用分野も蓄電池の充電装置から数万キロワットに達する化学工業電源あるいは出力1,500Vの電鉄変電所まであらゆる分野に進出し，次第に旧整流器群とその位置をとって代る傾向にある。またゲルマニウム整流器に一歩おくれて世に出たシリコン整流器もその国産化が軌道にのり，一部低電圧電源を除いては，漸時ゲルマニウム整流器の分野に進出しつつある。日立製作所では豊富な半導体整流器製作，応用の技術，経験を生かしてより良き素子の国産化，低廉化，保護方式の確立などに不断の研究努力を重ねている。

参考文献

(1) I. K. Dortort: Communication and Electronics, No. 31, 356 (1957)
(2) 近藤，森田，森山：日立評論 40, 929 (昭 33-8)
(3) 実用新案申請中
(4) 近藤，池田：日立評論 39, 1237 (昭 32-11)
(5) 実用新案申請中