

電気鉄道用シリコン整流器

Silicon Rectifier for Electric Railway Service

高橋 英一* 地福 順人**
Eiichi Takahashi Yorito Jifuku

内 容 梗 概

各種直流電源の花形として登場したシリコン整流器は、最も責務の重い用途の一つとされた電鉄地上直流変電所用としても試作段階において好成績を示した。その後国産整流素子の高性能化と相まって早くも従来の水銀整流器にとって代り完全な実用化の段階にはいった。その先がけとして完成した 1,500 kW, 600 V および 3,000 kW, 1,500 V のシリコン整流器は良好な性能および運転実績を示している。

1. 緒 言

シリコン整流器は登場した頭初、電鉄変電所用として使用するに当って次の点が問題となった。

- (1) シリコン整流器は熱時定数が小で電鉄用のような短時間尖頭負荷の高い用途では負荷率が低下し経済的に不利ではないか。
- (2) シリコン整流素子は間欠負荷に弱いのではないか。
- (3) 整流素子の PIV (Peak Inverse Voltage) が低く電鉄用のような高電圧用途では多数の整流素子を直列に接続せねばならず電圧分担などに問題はないか。
- (4) 外来サージ特に直流側雷サージに対して耐えるか。
- (5) 直流側短絡に対していかに対処するか。

しかるに近時におけるシリコン整流器の進歩は目ざましく、整流素子はすでに PIV 1,000V を越え定格平均順電流が 500A のものも出現している。また(2)の問題も解明され電鉄用としてもなんら支障なく使用されることが実証されている。

一方昭和33年に試作された 1,000 kW, 1,500 V シリコン整流器は好成績のうちに試運転を終え、(3), (4), (5)の問題をほぼ解決した⁽¹⁾。そして現在シリコン整流器は経済的にも他の変流機器と打ち合えるようになり、(1)の問題も解決したといえる。

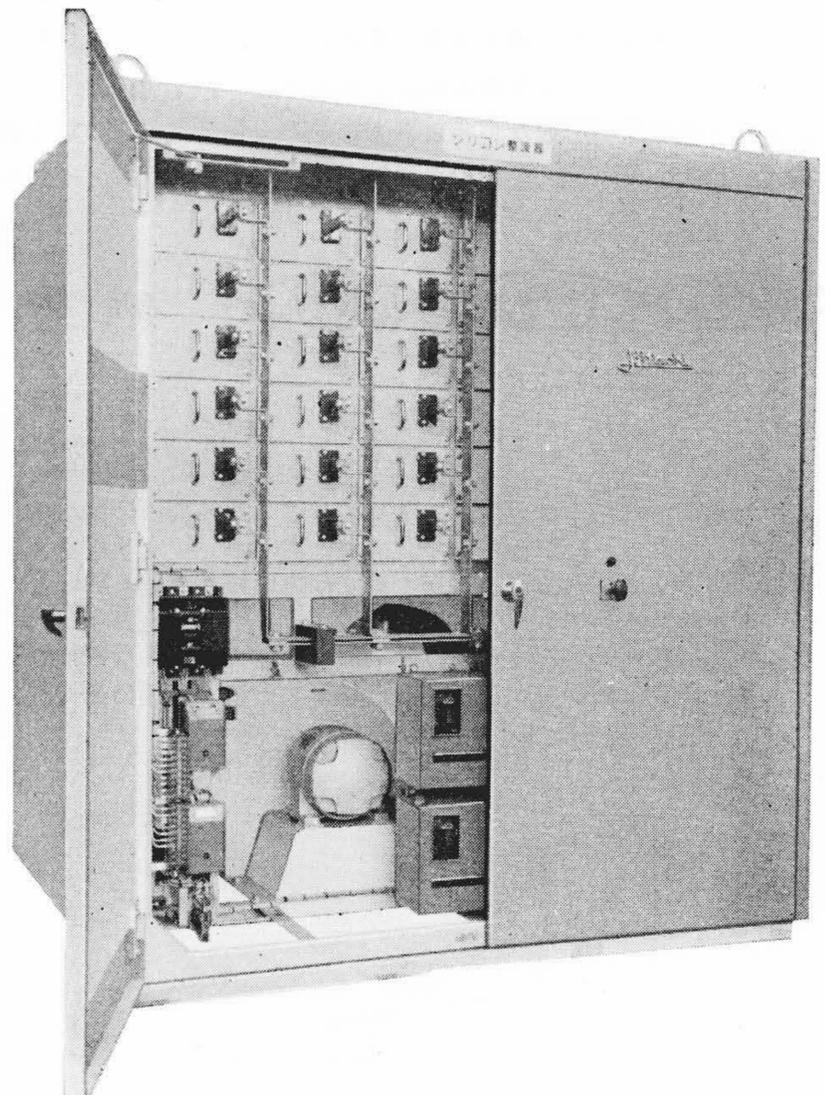
昭和36年3月までの電鉄用シリコン整流器の製作実績を示すと第1表のとおりになる。また昭和33年度の試作電鉄用シリコン整流器と昭和35年度の新製品を比較すると kW 当りの重量は 20% 以下、容量比は 15% 以下となり著しい進歩の跡がうかがえる。

なお整流素子については別論文に譲る。

2. 定格出力に関する問題

現在日本における直流電化区間の、き電電圧は 1,500V, 600V が大半を占めており、変流機器の単位出力としては、1,500V 区間では 1,000, 1,500, 2,000, 3,000 kW, 600V 区間では 750, 1,000, 1,500, 2,000 kW が標準とされている。電鉄用変流機器の標準定格出力の決定には負荷される電車容量および運行ダイヤはもちろんのこと、変電所として使用される付属機器の単位容量も考慮されねばならないが、変流機器としてシリコン整流器を使用する場合はさらに次の条件も考慮されるべきである。すなわちシリコン整流器はほかの機器と異なり、整流素子という小単位体を直列および並列に接続構成したものであるため、整流素子の容量を考慮におきその並列枚数に応じた標準定格が定められることが望ましい。

ただ整流素子はいまなお発展段階にあり、また製作者により SR 素子の定格容量がまちまちであるため 1 素子当りの定格電流および



第1図 3,000 kW 1,500 V シリコン整流器

第1表 日立製作所製電鉄用シリコン整流器

納入先	変電所名	納入年度	台数	定格出力 (kW)	定格直流電圧 (V)	定格直流電流 (A)
日本国有鉄道	大井町	33	1	1,000	1,500	667
東京都交通局	下谷	34	1	750	600	1,250
大阪市交通局	大宮	34	1	750	600	1,250
帝都高速度交通営団	後楽園	35	1	1,500	600	2,500
日本国有鉄道	陸前原の町	35	1	3,000	1,500	2,000
京阪電鉄	新守口	36	2	2,000	600	3,333
土佐電鉄	知寄	36	1	500	600	833
日立電鉄	岡田	36	1	500	600	833
能勢電鉄	山下	36	1	300	600	500
日本セメント	上磯	36	1	500	600	833
奈良電鉄	興戸	36	1	1,000	600	1,667
日本国有鉄道	高崎	36	2	3,000	1,500	2,000
日本国有鉄道	三原	36	1	3,000	1,500	2,000

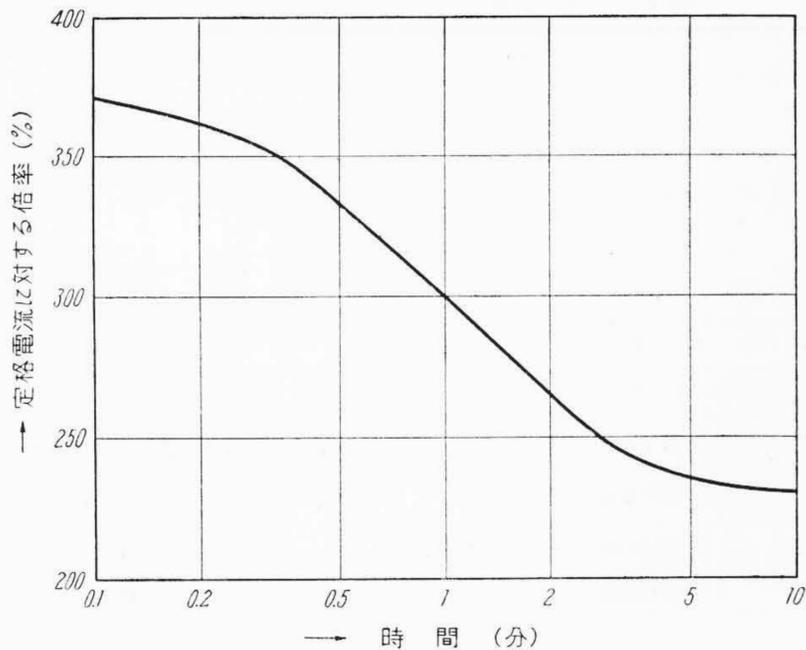
並列数はまだ標準を決定することは困難である。

3. 定格に関する問題

電鉄用水銀変換装置の定格としては JEC-133 による C 種, D 種, E 種定格が標準とされており, C 種で 200% 1 分間, D 種および E

* 日立製作所本社

** 日立製作所日立工場



第2図 電鉄用シリコン整流器の短時間過負荷

第2表 結線方式比較

結線方式	3相ブリッジ	相間リアクトル付二重星形
動作尖頭逆電圧比	1	2
交流側異常電圧比	1	2.31
直流側異常電圧比	1	1.36
整流素子直列数比	1	1.64
整流素子並列数比	1	0.5
整流素子全数比	1	0.82
変圧器容量比	1	1.29
1アーム短絡時のき電線からの逆流電圧上昇防止抵抗	なし 不要	あり 場合により必要

種で300%1分間の過負荷容量をもっているが、現在電車一編成の容量が増大し加速度を上げる傾向にあるためますます短時間過負荷が要求される傾向にある。一方シリコン整流器は周知のとおりほかの機器に比べ熱時定数がきわめて小でその実質容量は1分間程度の過負荷でほとんど決定される。

いま T_1 時間の過負荷容量を有するシリコン整流器の定格電流における整流素子の内部損失を P_1 、過負荷電流における内部損失を P_2 とすると、整流素子接合部温度上昇を一定におさえた場合その整流器に定格電流より続いてかけられる T 時間の過負荷は(1)式に示す整流素子内部 P に相当する値となる。

$$P = \frac{P_1 \alpha \left(e^{-\frac{T_1}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) + P_2 \left\{ 1 + \alpha \left(1 - e^{-\frac{T_1}{\tau}} \right) \right\}}{1 + \alpha \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)} \dots\dots (1)$$

ここに α : 整流素子接合部の熱抵抗に対する冷却片部の熱抵抗の比

τ : 冷却片部の熱時定数

また整流素子の順電流 I に対する内部損失 P は(2)式で近似される。

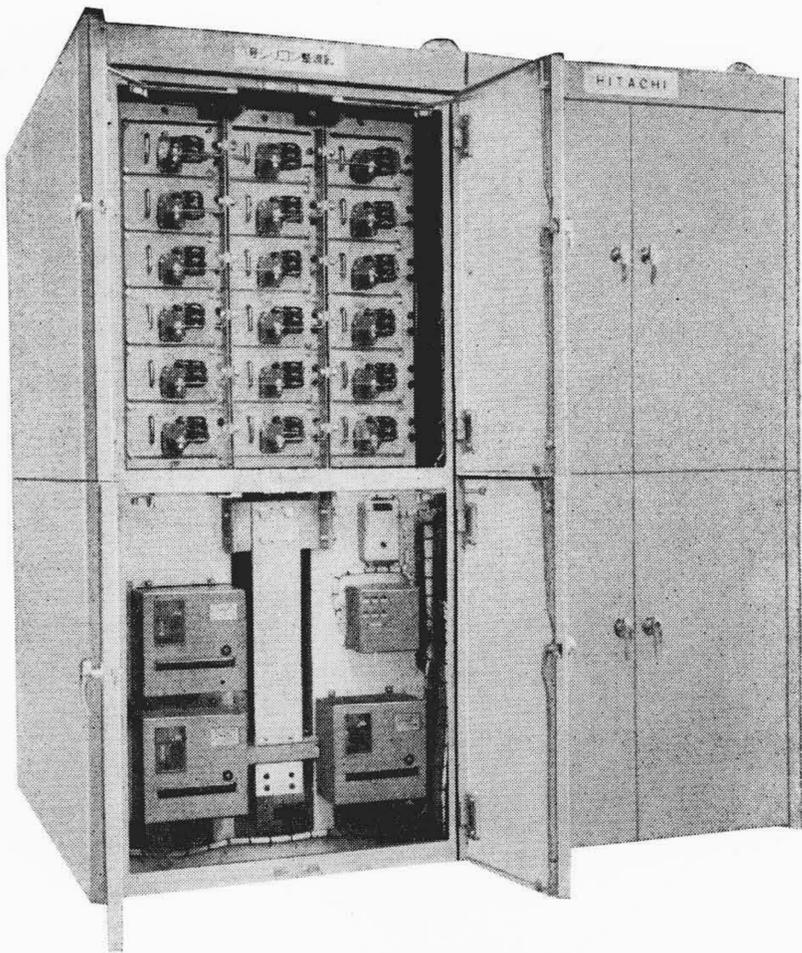
$$P = I \left(K_1 - K_2 \ln \frac{K_3}{I} + K_4 I \right) \dots\dots (2)$$

ここに K_1, K_2, K_3, K_4 : 整流素子により定まる定数

ここで300%1分間の過負荷容量をもつシリコン整流器のほかの時間の過負荷の一例を示すと第2図のとおりになる。すなわち本整流器は連続定格の場合2.3倍の容量のものに匹敵する。

かかる意味においてシリコン整流器としての定格としてはある特有のものが存在する。

しかし上記はシリコン整流器のみを対象とした場合であって整流装置としての定格はこのほかに整流器用変圧器その他の条件をも考慮すべきことは論を待たない。



(整流素子定格平均順電流 500A)

第3図 2,000 kW, 600 V シリコン整流器

4. 結線方式

シリコン整流素子の内部損失は同一平均順電流に対して波高値が大なるほど増大するため結線方式としては整流素子を通流する電流の平均値に対する最大値の比が小なるほど好ましい。ここで経済的の面も考慮すると3相ブリッジ結線および相間リアクトル付二重星形結線があげられる。この両結線方式にも一長一短がありその比較を示すと第3表のようになる。本表から考えられることは整流器としては相間リアクトル付二重星形結線が有利であるが、整流器用変圧器その他付属機器の面からみると3相ブリッジ結線が有利となる。3相ブリッジ結線の最大の欠点は直流側インパルスが1アームにて受持つことであるが、整流素子の逆耐電圧の向上、直流アレスタの制限電圧の低下が計られるならば変圧器容量が小さい特長を生ずことができる。現在は両方式とも用いられている。

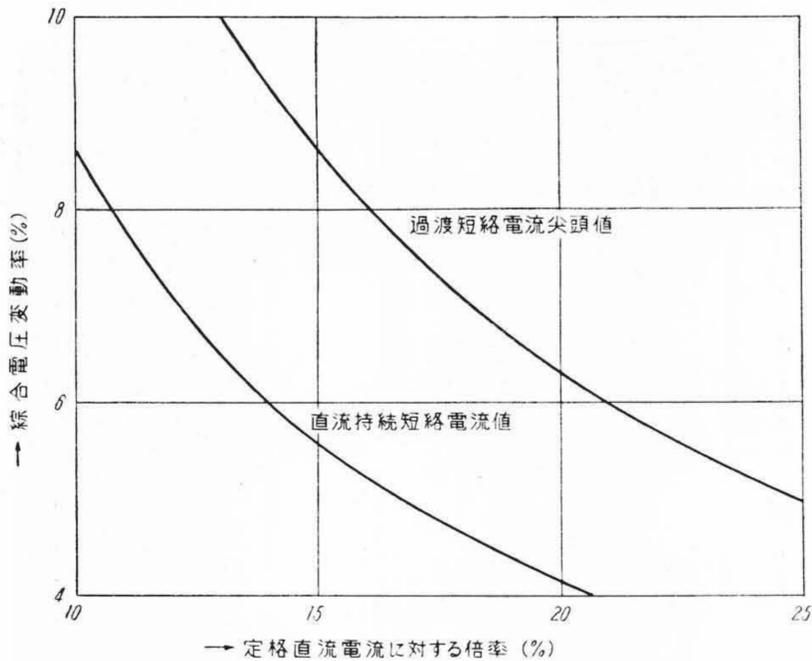
また当然のことながら既設水銀整流器の老朽化に伴う置換えには整流器用変圧器の適用の点から相間リアクトル付二重星形結線方式が、回転変流機との置換えには変圧器を改造して3相ブリッジ結線方式が採用されることが多い。さらにシリコン整流器では小形軽量で付属機器が少ないという利点から予備器としての移動が容易でありその場合上記両結線方式を簡単な接続変更により兼ね備えることが可能である。また相間リアクトル付二重星形結線の場合はキュービクルよりの直流出力端子が大地電位となる逆結線方式もとられることがある。

5. 電圧変動率

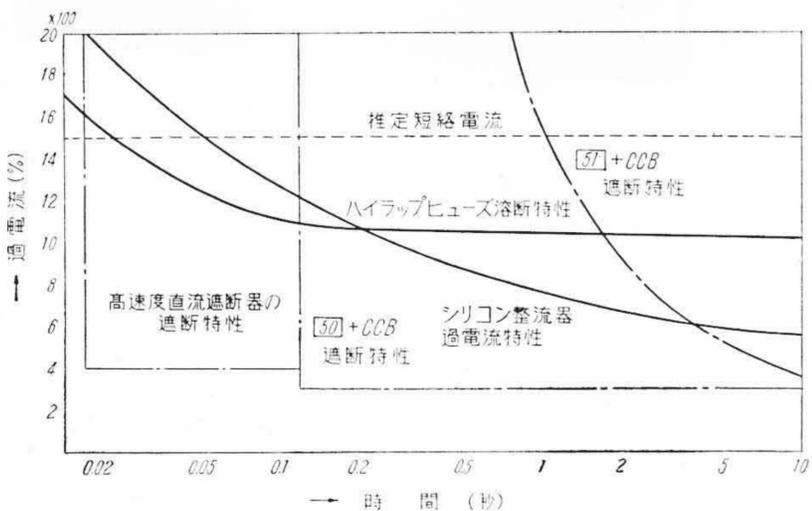
電鉄用シリコン整流装置の電圧変動率は次の3点において問題となる。

- (i) き電線電圧の確保
- (ii) 他機器との並列運転
- (iii) 直流側短絡および内部短絡電流の大きさ

以上3点のうちシリコン整流器より考えて最も問題となるのは短絡電流である。シリコン整流器は許容過電流耐量が比較的明確であ



第4図 電圧変動率と推定短絡電流



第5図 電鉄用シリコン整流器の過電流保護協調曲線

り、それ以上の電流は決して許されない。そのためシリコン整流器の設計に当っては短絡電流の推定が重要な問題となる。

まず直流側短絡について考えると、この場合も種々の短絡が考えられるがシリコン整流器としては変電所出口におけるき電線とレールの直接短絡を考えねばならない。この場合短絡電流はシリコン整流器より電源側のインピーダンスのみにより規制され短絡後サイクルの1アーム電流の最大値は(3)式で考えれば十分である。

$$i = K \frac{\sqrt{2} E_2}{Z_c} \dots \dots \dots (3)$$

ここに E_2 : 整流器用変圧器二次側相電圧
 Z_c : 電源を含めた転流インピーダンス
 K : 定数

いま電圧変動率のリアクタンス降下と抵抗降下の比を一定とした場合の電圧変動率に対する推定直流短絡電流の一例を示すと第4図のようになる。一方シリコン整流器の過電流耐量が第5図で示されたとする。ここで直流短絡が発生した場合、高速度遮断器で1サイクル以内に遮断するとすれば第4図および第5図より必要な電圧変動率の値が求められる。また短絡後2~3サイクルまでは通流角がのびることに注意を要する。

次に1アーム短絡の場合を考えると、健全整流素子の相を流れる電流は直流側短絡と同様(1)式で考えればよいが短絡電流の遮断は交流側遮断器の動作まで待たねばならず、通常の遮断器の動作時間8サイクル、高速度過電流リレーの動作時間1サイクルを入れて9サイクルの短絡電流に耐えねばならない。この場合の電圧変動率はさらに大きな値が必要となる。

第3表 整流素子の直並列接続法比較

		(i) の接続法	(ii) の接続法
1アーム接続図			
分圧器数		m n 個	m 個
電流不平衡		小	大
整流素子故障時の影響	1個短絡	(m-1)個が $\frac{m}{m-1}$ 倍の過電圧	(m-1) n 個が $\frac{m}{m-1}$ 倍の過電圧
	1個不導通	m(n-1)個が $\frac{n}{n-1}$ 倍の過電流	(n-1)個が $\frac{n}{n-1}$ 倍の過電流
整流素子の故障検出	1個短絡	やや複雑	容易
	1個不導通	容易	困難

第4表 電鉄用シリコン整流器の保護装置

事故	保護装置	表示
交流側過電流	51: 限時過電流継電器 50: 高速度過電流継電器	遮断 遮断
直流側過電流	54P: 高速度直流遮断器(正方向遮断) 50	遮断 遮断
1アーム短絡	71F: ハイラップヒューズ 50	遮断 遮断
き電線よりの逆流	32: 逆流継電器	遮断
整流素子故障	71E: 逆方向故障検出装置 71S: 不導通検出装置	警報 遮断
冷却装置異常	63A: 気流閉閉器 88B: 送風機故障	遮断 遮断
交流側異常電圧	変圧器1次側アレスタ 変圧器1次側サージアブソーバ 変圧器2次側サージアブソーバ	
直流側異常電圧	直流側アレスタ 直流側サージアブソーバ	

一方き電線の電圧を確保するためには電圧変動率はできるだけ小なるほうがよく、また他機器と並列運転を行う場合には電圧変動率を合わせる必要がある。かかる関係において電圧変動率を増し得ない場合には直流側短絡電流に対しては直流リアクトル(短絡電流に対しては空心でなければならない。)をそう入して短絡電流の過渡立上り電流を押え、内部短絡電流に対しては遮断時間5サイクルあるいは3サイクルの遮断器を使用するか、高速度限流ヒューズ(ハイラップ・ヒューズ)を使用すればよい。

6. 整流素子の接続法

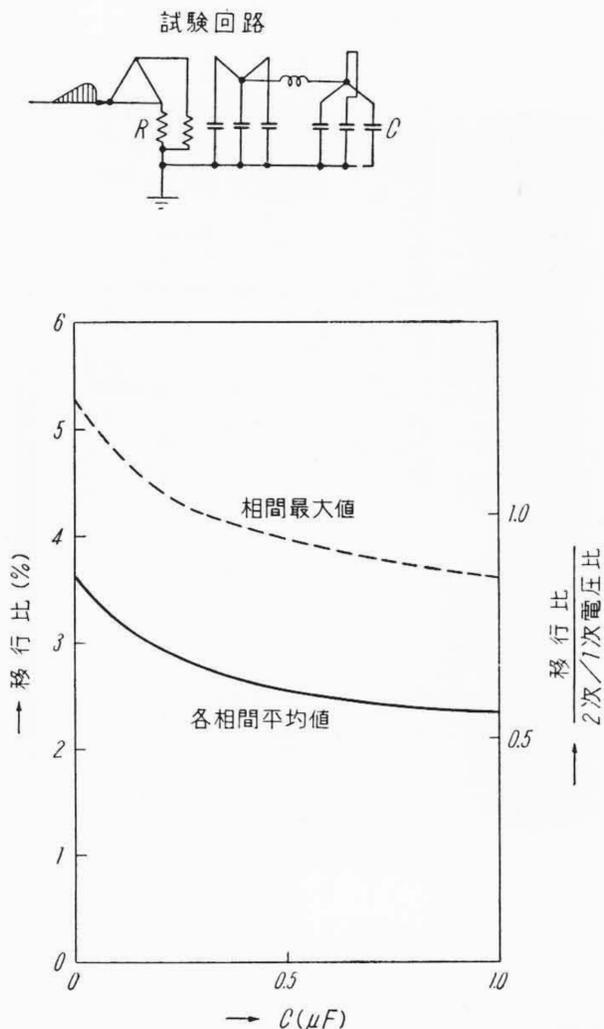
シリコン整流器は相当数の整流素子を直列および並列に接続したものであるが、その接続法には次の2種類がある。

- (i) 直列に接続した整流素子を並列に接続する方法
- (ii) 並列に接続した整流素子を直列に接続する方法

この2方法はそれぞれ一長一短がありその比較を第3表に示す。本表より(i)の方式は電圧分担平衡化において経済的に多少不利となるが電流分担は容易である。(ii)の方式は電流分担平衡化において整流素子定格電流以下の電流では整流素子順特性の整合を行う必要がある。また事故時、過電流時の順特性をも整合することは困難である。日立では電流分担において信頼度のまさる(i)の方式を採用している。

7. 保護方式

電鉄用シリコン整流器の保護器具としては第4表に示すものがあげられる。



第6図 整流器用変圧器インパルス移行電圧

7.1 過電流保護

電圧変動率の項で述べたような電鉄用シリコン整流器の事故電流については第5図に示すような保護協調がとられている。過電流保護器具としての50, 51, 54Pは不可欠のものとして今後とも使用されるであろう。32は半波整流回路でハイラップヒューズのない整流器には必要であるが、両波整流回路またはハイラップヒューズをついた整流器では必ずしも必要でない。

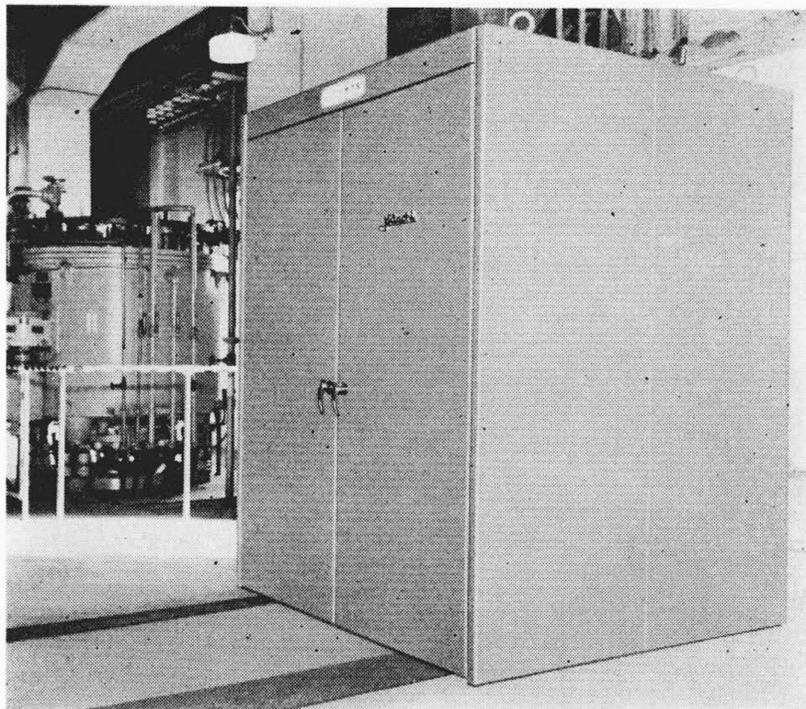
7.2 異常電圧および吸収装置

シリコン整流器で最も重要な問題は回路に発生する異常電圧を推定し、それを低減せしめて過電圧がシリコン整流素子の逆耐電圧以下になるようにすることである。電鉄用シリコン整流器の場合予想される異常電圧は次の4種類である。

- (i) 交流側開閉サージ
- (ii) 交流側雷サージ
- (iii) 直流側開閉サージ
- (iv) 直流側雷サージ

(i)および(ii)はシリコン整流器一般についていえるもので交流側開閉サージは普通の遮断器で2~3倍程度、空気遮断器のように電流を切りうるものでは7~8倍程度に達することがある。この値は電源の諸定数によっても異なるが整流器用変圧器2次側に適度なC-Rをそう入することにより2倍以下におさえる。

交流側雷サージはアレスタの制限電圧の整流器用変圧器直流側への移行により定まる。第6図は3,450 kVA, 60kV/D.C. 1,500V相当の相間リアクトル付二重星形結線の整流器用変圧器のインパルス移行試験結果の一例であり、コンデンサのそう入により、相当の低減効果が得られていることがわかる。また種々の試験結果より静電シールド板付変圧器でもなお巻数比に比例した移行電圧が残ることが経験されている。そう入すべきCの値は交流側開閉サージの低減にさらに大きな値を必要とするが、あまり大きくした場合投入時のサージ電圧が大となることは注意すべきである。また振動防止用抵抗器の抵抗値Rとともに整流器の定格出力kWおよび定格直流電圧Ed



第7図 1,500 kW, 600 V シリコン整流器現地写真

に対し次の関係にあるといえる。

$$C \propto kW/Ed^2 \dots \dots \dots (4)$$

$$R \propto Ed^2/kW \dots \dots \dots (5)$$

直流側開閉サージは高速度直流遮断器の遮断に伴うもので整流器にかかる電圧としては直流電圧の2倍以下と考えて十分といえる⁽³⁾。

直流側雷サージは主として直流アレスタの制限電圧にかかっており、現在1,500V回路では衝撃放電開始電圧5,500V、600V回路では3,500Vのアレスタが開発されている。また直流側電サージの吸収にはアレスタと並列にコンデンサをそう入することが有効である。

7.3 整流素子の故障検出

運転中における整流素子の故障には逆方向の劣化および短絡と順方向不導通が考えられる。前者の71Eは1個の整流素子の劣化を検出しているものであるが、整流素子1個の劣化のために整流器の運転を停止することは実際運転上好ましくないという考えから、必要整流素子数にさらに1個を加え71E動作時には軽故障にて運転を続行し適時不良整流素子を交換するという方式をとっている。ただし直列枚数の少ないものでは71Eを重故障にするかあるいは71Eをやめ直列整流素子全破壊後ハイラップヒューズで保護する方式も考えられている。後者は研究および工場内の経験では整流素子によってはほとんど起り得ないと考えられるので省略されることが多い。

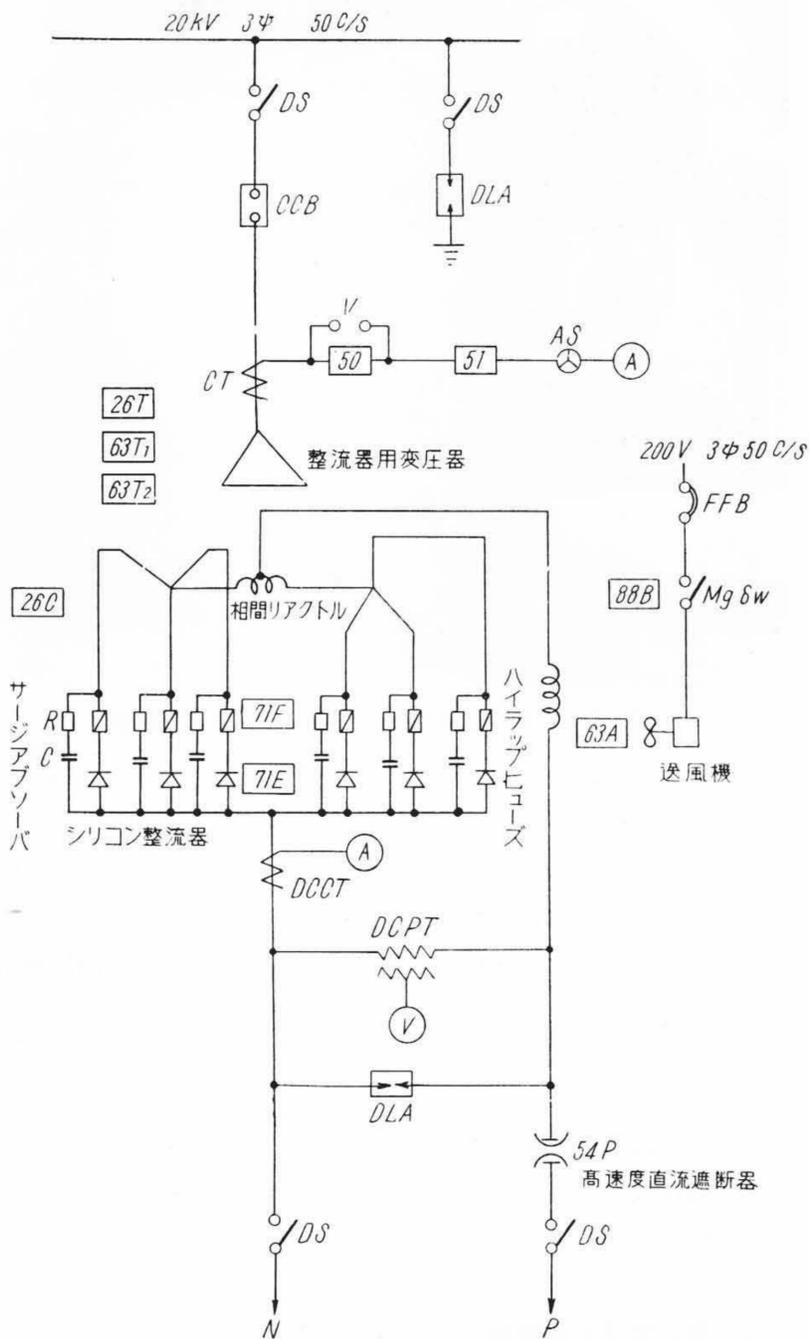
7.4 冷却装置の故障検出

冷却装置の異常に対してはシリコン整流器のすみやかな運転停止が必要である。風冷式の場合は、送風機用電動機の故障および風回路のふさがりである。現在、前者は電磁開閉器の自動遮断を検出し後者は気流開閉器により風量を監視している。ただ前者は最終的には気流開閉器の動作となるところから、気流開閉器の動作のみで冷却装置の故障を検出する方式も採用している。

8. 日立製電鉄用シリコン整流器

第1表に示した日立製作所製シリコン整流器は以上の観点に立脚して計画、製作されたものでいずれも好調な運転を続けている。

国鉄大井町SS納1,000 kW, 1,500Vシリコン整流器は、わが国最初の電鉄用シリコン整流器である。東京都交通局下谷変電所納750 kW, 600Vシリコン整流器は回転変流機と並列運転を行っており、大阪市交通局納750 kW, 600Vシリコン整流器は水銀整流器と並列運転を行っている。



第8図 1,500 kW, 600 V シリコン整流装置単線結線図

以上三整流器には PIV 300~400V, 定格平均順電流 50A の整流素子を使用しているが、その後の整流器には PIV 1,000V, 定格平均順電流 200, 300, 500A の日立製整流素子を使用しており、運転中の整流素子に関する事故は皆無である。今後の電鉄用シリコン整流器に使用される整流素子としては当分の間定格平均順電流 200A のものが最適と考えられる。

8.1 帝都高速度交通営団後樂園変電所納

1,500 kW, 600 V シリコン整流器

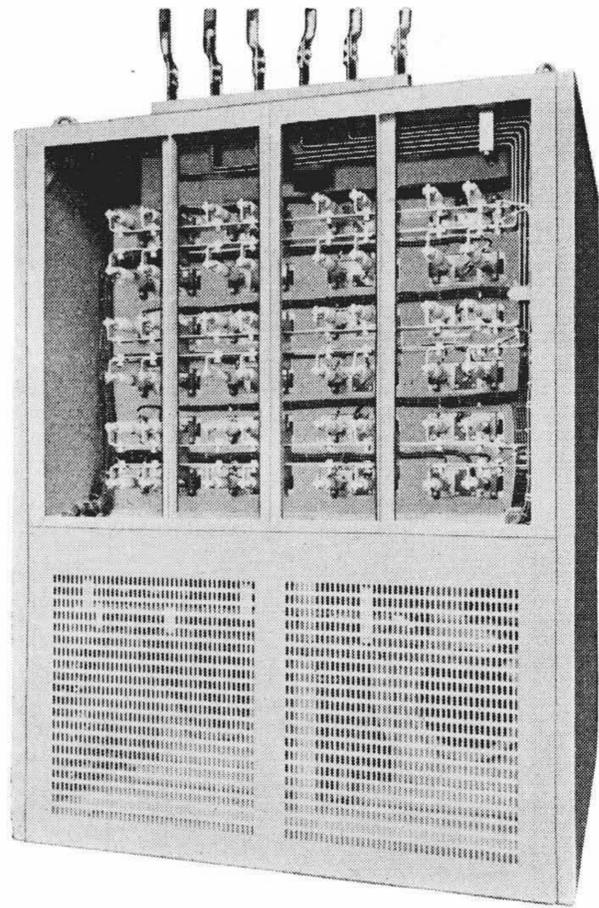
本器は国産整流素子を使用した最初の電鉄SS用シリコン整流器であり完全な実用器として使用されている。現在水銀整流器と並列運転を行っており負荷分担の不平衡は50A程度である。第7図は現地における本器である。

仕様は下記となっている。

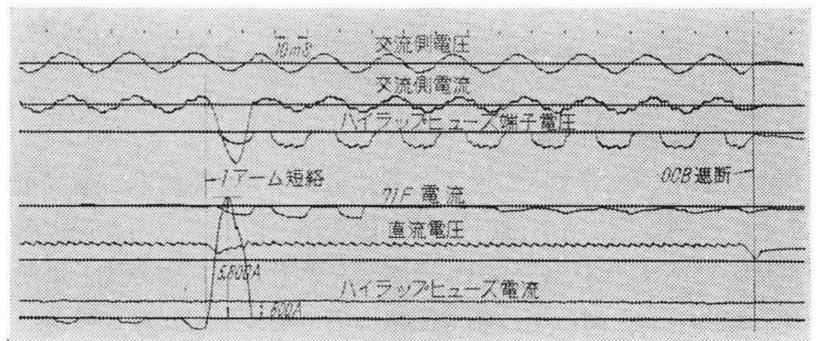
形式	F-6 X
定格出力	1,500 kW
定格直流電圧	600 V
定格直流電流	2,500 A
定格	100%連続, 150% 2時間, 300% 1分間
結線方式	相間リアクトル付二重星形逆結線
冷却方式	風冷式

また使用された整流素子は下記のものである。

形式	D J 13L
最大許容逆電圧 PIV	1,000 V
最大許容瞬時逆電圧 PIV	1,300 V



第9図 電鉄用シリコン整流器裏面図



第10図 1アーム短絡試験オシログラム

定格平均順電流 200 A

1 サイクル許容過電流 6,000 A

第8図に本器の主回路接続図を示す。

キュービクルはトレイ方式を採用し保守の簡便を計っており、送風機は騒音の少ない多翼送風機を使用し、下部より冷却風を吹上げる構造をとっている。またシリコン整流器の保護器具としては下記のものを使用している。

交流側過電流	50, 51, (重故障)
直流側過電流	54P, 50 (重故障)
1アーム短絡	ハイラップヒューズ-71F, 50 (重故障)
整流素子故障	71E (軽故障)
送風機故障	88B (重故障)
風量低下	63A (重故障)
冷却風温度過上昇	26C (軽故障)
異常電圧	整流器用変圧器 1次側アレスタ 整流器用変圧器 1次側サージアブソーバ 整流器用変圧器 2次側サージアブソーバ 整流素子陽陰極間サージアブソーバ 直流側アレスタ 直流側サージアブソーバ

さらに本器は水銀整流器と並列運転を行っているため電圧変動率が小さく、一方水銀整流器の逆弧が予想されるため直流リアクトルをそう入し短絡時の過渡電流をおさえている。

本器の完成に当っては、送風機試験、順電圧降下測定、温度上昇

試験、定格負荷試験、人工故障試験(1アーム短絡)、保護および警報回路連動試験、耐圧試験がなされたが、いずれの試験も問題なく通過した。第11図は1アーム短絡試験のオシログラムである。

8.2 日本国有鉄道陸前原の町変電所納 3,000 kW 1,500 V シリコン整流器

本器は1,500 V 用としてわが国最初の本格的のもので容量的にも記録品であり、昭和35年10月に完成し東南アジア鉄道首脳者会議に出品された。構造方式は上記1,500 kW シリコン整流器とほぼ同一であるが、整流素子への信頼を強め、ハイラップヒューズをやめている。

なお仕様は下記のとおりである。

形 式	F-6X
定 格 出 力	3,000 kW
定 格 直 流 電 圧	1,500 V
定 格 直 流 電 流	2,000 A
定 格	100%連続, 150% 2時間, 300% 1分間
結 線 方 式	相間リアクトル付二重星形逆結線
冷 却 方 式	風冷式

9. 結 言

電鉄用シリコン整流器はすでに本格的実用化の段階にはいり実用器として完成の域に達したが、現在さらに進歩を続けておりここに最終的な姿を示すことは困難である。日立では本文に示したとおり電鉄用としては電流、電圧ともに十分の領域まで経験を積んでいるがそのほか3,000 kW 1,500 V の移動変電所、同じく多数の60 kV直落し方式の3,000 kW 1,500 V 屋外変電所をも製作中であり、わが国はもちろん、世界有数の電鉄用シリコン整流器製造経験を積みつつある。今後はこれらシリコン整流装置の標準規定制定につとめ経済的な整流装置を供給できるようにしたい。

最後に、このような新製品が急速に実績を出しうるに至ったのはまったく需要家各位の理解ある御考慮によるもので、ここに日本国有鉄道、帝都高速度交通営団その他の各位に厚くお礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 曾根田, 金原, 森田: 日立評論 41, 353 (昭 34-3)
- (2) C. C. Herskind, A. Schmidt, C. E. Rettig: T.A.I.E.E. 68, 248
- (3) 鉄道技術研究所: 金属整流器委資料 No. 70 (昭 34-9)



新 案 の 紹 介



実用新案第512346号

石 川 晃

屋 外 用 制 御 箱

この考案は耐雨構造の屋外用制御箱に関するもので、本体1の前面開口部の全周にわたって外側に向いたL形樋溝3を形成し、本体上部には樋溝3の先端4より前方に突出したひさし5を設け、両側部には本体側壁を延長した位置に遮蔽板6を取付けてあり、とびら2には全周にわたって内側に向いたL形樋溝7を設け、とびらを閉じたとき樋溝3と7が向い合い、樋溝7の先端8と本体1の間および樋溝7の外側面とひさし5、遮蔽板6の間に小間隙Gが作られるようにしてある。ちょうつがい10は樋溝3と7の向い合った内側に設ける。

この考案によれば上または横からくる雨はひさし5および遮蔽板6でさえぎられ、正面から吹付ける雨もL形に屈折した間隙Gによ

り勢を弱められ、樋溝3に達した雨水は溝に沿って流れ落ち下の孔9から排出されるので、面倒な合わせ作業やパッキングを省略でき安価で確実な耐雨構造が得られる。またパッキングの締付装置がないからとびらの開閉も容易である。(坂本)

