

昭和電工株式会社 納

## 直流電源昇圧用 3,500kW シリコン整流器

3,500 kW Silicon Rectifier for Boosting D. C. Source Voltage

近藤 喜久雄\*  
Kikuo Kondō

## 内 容 梗 概

シリコン整流器はすぐれた特長をもっているため、電力用整流器として各方面にわたり種々の用途に使用され、着実な発展を続けている。ここでは既設回転変流機にシリコン整流器を縦続接続して、直流電圧を昇圧した実例について述べ、設計上の要点、保護・制御、運転実績について概説した。

## 1. 緒 言

電気化学工業製品の需要増加に伴い、直流電源の合理的容量増加が要望されるようになった。一般に電源の容量増加の方法としては、単独直流電源を増設する方法と既設の電源に並列あるいは直列に新設備を増強する方法などがある。特に生産量向上のため電解槽数を増す場合には直流電圧を上げることが必要となる。この方法は種々考えられるが既設直流電源の機種、容量、構成法と増設すべき直流電圧、電流などにより大体方式は決定される。中でも回転変流機自身の昇圧は、過励磁による損失増加が著しいので、一般には定格値以上とすることは困難である。これ以上直流電圧を昇圧するには他機器を新設し縦続接続して運転する必要がある。

新設の変流機器としては種々考えられるが、最近急速に発展し、実用期にはいったシリコン整流器を使用することが可能である。シリコン整流器に関しては周知のように、ほぼ理想的な整流器といわれ、その用途も電気化学、電鉄用をはじめ各方面にわたっている。

今回日立製作所ではアルミニウム製錬用直流電源として 3,500 kW、50 V シリコン整流器を完成し、既設 3,300 kW、330 V 回転変流機 8 台との縦続運転に成功した。このようなシリコン整流器の運転法はわが国でも最初の試みであるばかりでなく、欧米の文献にもまだ発表をみないものである。

シリコン整流器の特長の一つである任意の容量を経済的に製作でき、床面積も大きな自由度で選定し小さくすることが、今回のような既設回転変流機室の余剰面積を利用して設置するのに、大いに役立つ好例といえることができる。

回転変流機との縦続運転には、回転変流機が火花閃絡した場合に整流器に与える影響の問題をはじめ、保護制御上技術的に検討を要する点が多い。特に負荷が、アルミニウム製錬という停電を極度に避けねばならない性質のため、回路構成、運転方式もこれに適合するよう設計されねばならない。

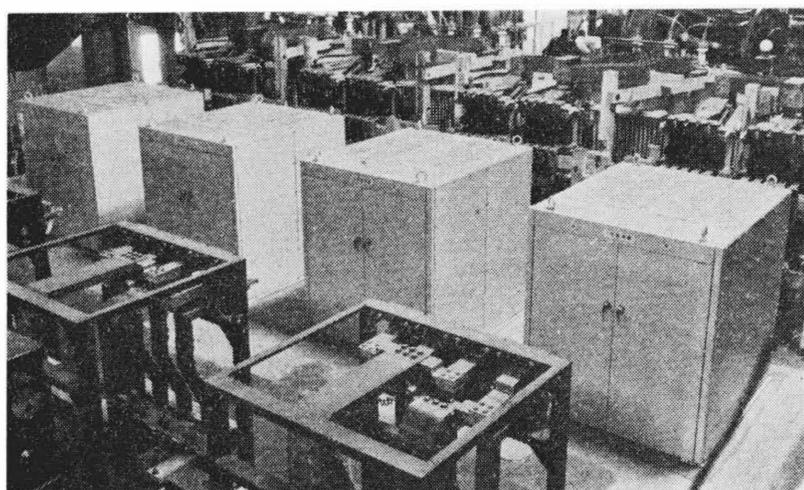
以下縦続運転時の問題点を中心に、3,500 kW シリコン整流器の概要を紹介する。第 1 図は運転中のシリコン整流器を示す。

## 2. 直流昇圧用シリコン整流器の特長と問題点

既設の回転変流機設備 330 V 10 kA 8 台の昇圧用にシリコン整流器を使用すると次の特長をあげることができる。

- (1) 70 kA を構成する並列台数を自由に選択できるので、据付配置に適した台数とすることができる。また経済的な予備器の容量も選ぶことが可能である。
- (2) 構造がコンパクトで小形軽量であり、キュービクル寸法の選択に自由度が大きいので、既設建屋の余剰床面に適するよう設計ができる。

\* 日立製作所日立工場



第 1 図 3,500 kW 50 V シリコン整流器

(3) 機械的強度が大きいので回転変流機の振動があっても問題はない。

(4) 最高許容温度が高いので、回転変流機、変圧器などの熱を発生する機器の近傍に設置することができる。

(5) 付属機器が少なく、制御回路が簡単である。シリコン整流器の直流側に遮断器を使用しない簡単な回路構成とすることができる。

(6) 運転が簡単で、保守点検が容易である。

(7) 効率が低い。

上記の特長のうち(2)(7)項は将来さらに改善される見透しである。すなわち、現在シリコン整流素子は急速に発展しているため、シリコン整流器の利点はさらに顕著なものとなろう。特に大電流、高耐圧整流素子の出現はキュービクルの床面積を大幅に低減することができる。一方欠点としては次の点があげられるが、これらに対しては後記のような対策がとられているので運転上の信頼性は十分である。

(1) 過負荷耐量が小さい。

(2) 過電圧に弱い。

次にシリコン整流器と回転変流機との縦続運転するに当たって、特に問題となる点をあげると

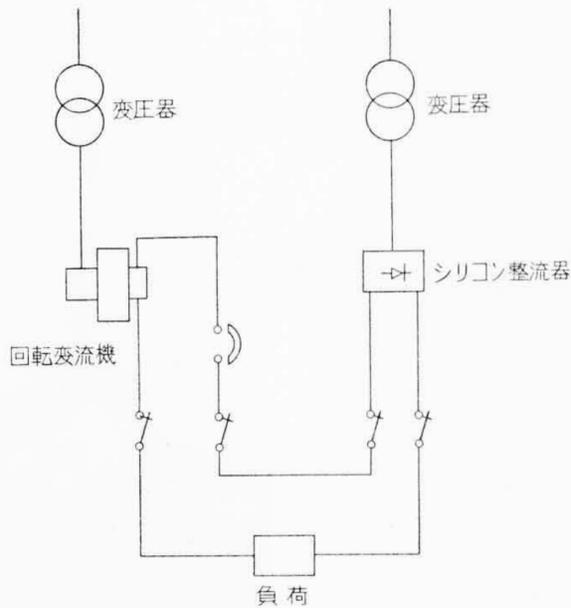
(1) 回路電圧の上昇に伴い、既設回転変流機の絶縁が十分でなければならぬ。

(2) 回転変流機の整流に悪影響を与えないようにせねばならない。

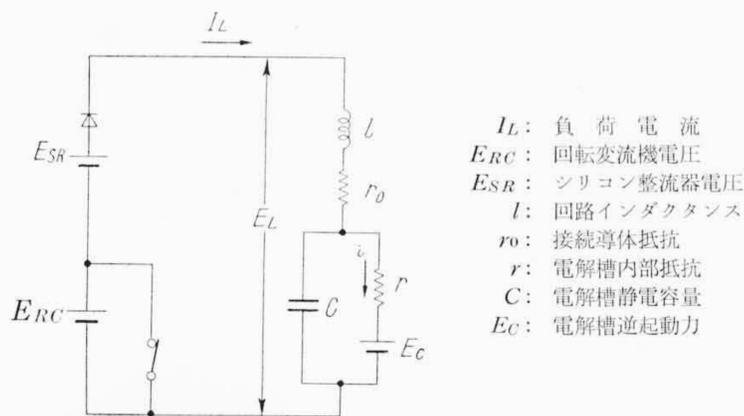
(3) 回転変流機が火花閃絡あるいは短絡した場合に、シリコン整流器に印加される逆電圧に耐えねばならない。

(4) 万一シリコン整流素子に事故が発生しても、アルミニウムの電解製錬は停電を避けねばならぬため、継続して電流を流すようにせねばならない。

(5) シリコン整流器の各並列セットの電流はある一定値内で平



第2図 シリコン整流器と回轉變流機との縦続接続



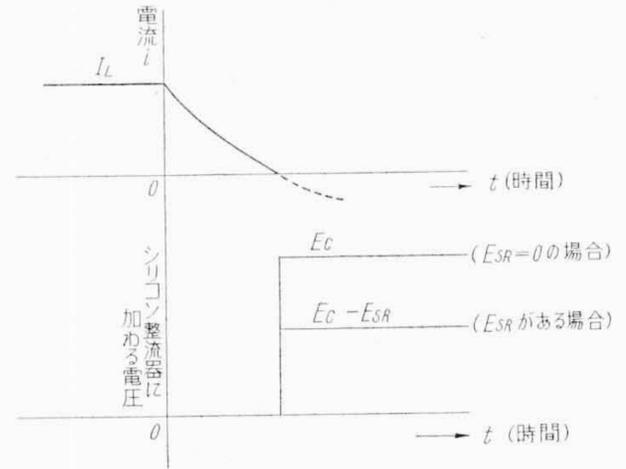
第3図 アルミニウム電解槽負荷の等価回路

衡していなければならない。特に 50 V 70 kA という低圧大電流のため接続導体による不平衡を生じないように、配置を選ぶ必要がある。シリコン整流器の交流電源が切れた場合、回轉變流機による直流電流がシリコン整流器を貫流するが、この直流電流の不平衡も極力小さくするように直流側接続導体を設計することが大切である。

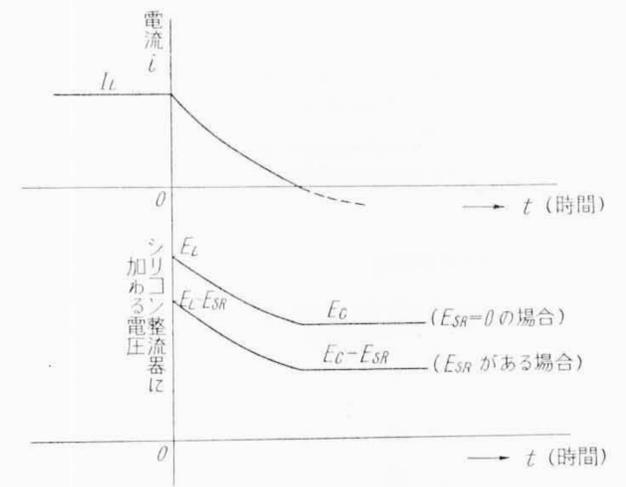
- (6) アルミニウム電解槽は逆電圧をもった負荷であるため、これに適した起動、停止の運転操作を行わねばならない。
- (7) 既設回轉變流機室の狭小な一部に設置するため、保守、点検が容易な構造で、各機器の配置も保守、点検に便利でなければならない。
- (8) 回轉變流機と新設シリコン整流器との縦続接続の導体接続作業は停電となるので、短時間で済むような導体構造とせねばならない。

以上のうち、回轉變流機側で短絡事故を起した場合の電圧が重要で、使用すべきシリコン整流素子の構成を決定するのに問題になるので、かかる事故時の現象について考えてみる。第2図は縦続接続の基本を示す。負荷はアルミニウム電解槽でその等価回路は第3図のように表わされる。したがって変流機の火花閃絡あるいは短絡時の現象は、変流機出力電圧  $E_{RC}$  をアークを通して短絡するか直接短絡したときの過渡現象で回路の諸定数により電圧、電流の時間変化は定まることになる。

今回路のインダクタンス  $l$  に対し電解槽の静電容量  $C$  が無視できる場合の電圧、電流の時間変化は第4図のように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、電流が零に達すれば、電解槽の逆電圧が印加されることになる。すなわちシリコン整流器には電解槽の逆電圧が最終的には印加されることになる。したがってかかる電解槽負荷においては、正方向電流の持続時間と回轉變流機短絡より変流機の直流遮断器開放までの時間との関係により、シ



第4図 回轉變流機との縦続運転で、変流機が短絡したときの過渡現象 ( $C$ が無視できる場合)



第5図 回轉變流機との縦続運転で、変流機が短絡したときの過渡現象 ( $l$ が無視できる場合)

リコン整流器に印加する逆電圧の状態が決定される。

一方、回路のインダクタンスが電解槽の静電容量に比べ無視できる場合は、第5図のような経過をとることになる。すなわち、短絡により電解槽の静電容量に充電されていた電圧がシリコン整流器に印加することになり、時間とともに放電して遂には電解槽の逆電圧まで低下する。したがって、かかる電解槽負荷においては、シリコン整流器に印加する逆電圧は、電解槽の静電容量と逆電圧により電圧値が決まり、印加時間は正方向電流の持続時間と変流機短絡より変流機の直流遮断器開放時までの時間により決定されることになる。

第4図と第5図の比較で明らかなように、電解槽の回路定数によりシリコン整流器に印加する逆電圧が異なるため、負荷である電解槽回路の電氣的性質をよく検討しておく必要がある。

### 3. 3,500 kW シリコン整流器の概要

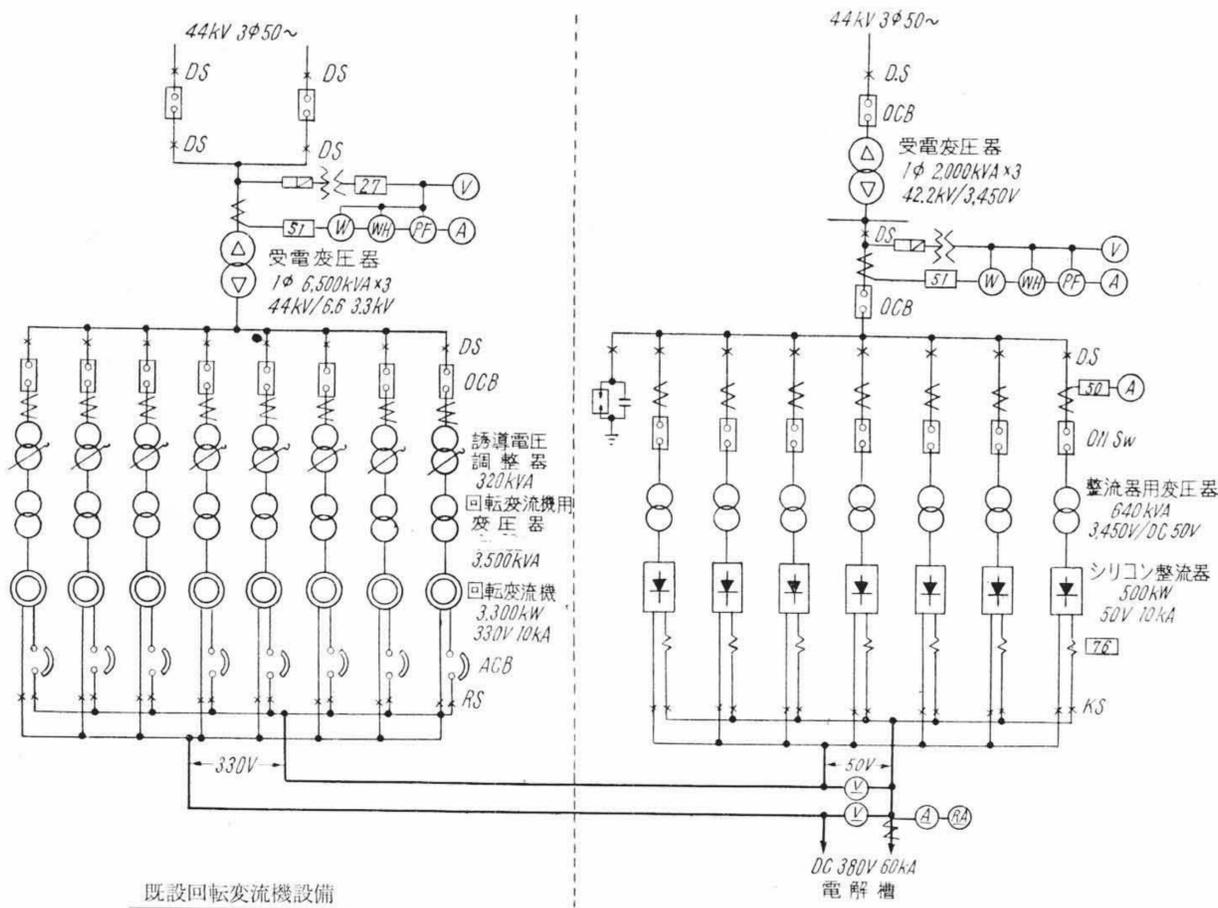
今回製作した直流昇圧用シリコン整流器は、上述の技術的問題点の検討と、記録的大容量器である 140 V 10,000 A ゲルマニウム整流器のアルミニウム電解運転より得られた資料に基づき最適の設計を行って製作された。

#### 3.1 装置の概要

電気設備は第6図単線結線図のように、新設のシリコン整流器設備は受電装置、整流装置、保護制御装置の各部よりなっている。

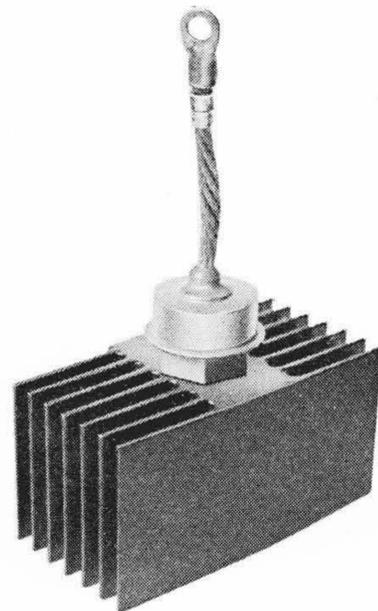
主要機器の仕様は次のとおりである。

受電変圧器	2,000 kVA 単相 50~ 3台
	42.2 kV-40.4 kV-38.1 kV/3,450 V
整流器用変圧器	形式 屋内油入自冷式
	容量 640 kVA
	電圧 一次 3,450 V
	二次 直流 50V 相当



既設回轉變流機設備

第 6 図 3,500 kW シリコン整流器単線結線図



第 7 図 シリコン整流素子と冷却体

シリコン整流器	定 格	連続
	台 数	7
	形 式	F-6B
	容 量	500 kW
	電 圧	50V
	電 流	10,000 A
	冷 却	強制通風式
	定 格	連続
	台 数	7

なお、既設回轉變流機 3,300 kW 8 台の回路構成は全然変更せず、器具類の追加も行わず既設そのままの設備に、新設のシリコン整流器設備を縦続接続した。

### 3.2 シリコン整流素子

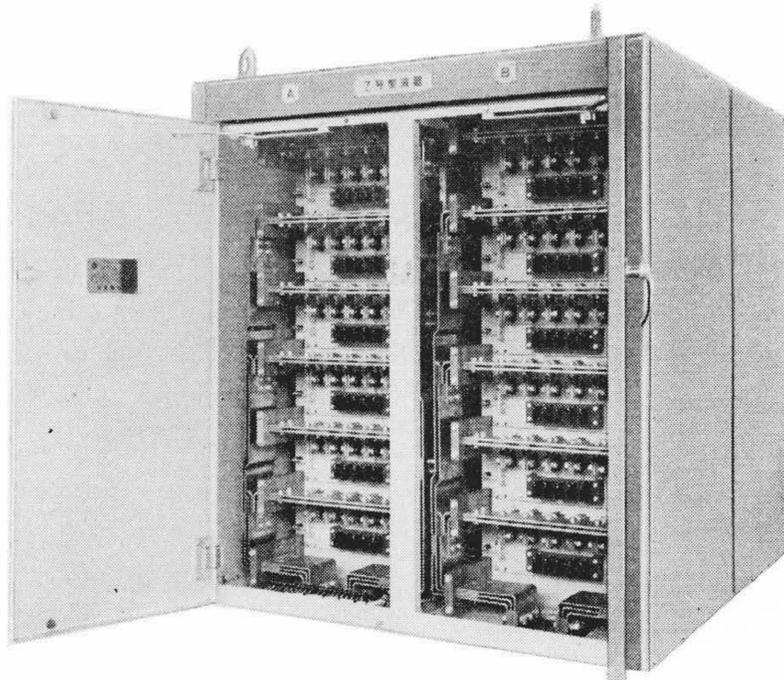
本整流器に使用した 50A 形シリコン整流素子のおもな特長は次のとおりである。

- (1) 電気的性能は外国一流メーカーの製品に比べてまったくそんな色のない優秀なものである。これは各種の厳密な試験と長期間にわたる寿命試験により実証されている。
- (2) ハーメチックシールは完全で、気密度のすぐれた特殊構造を採用しており、整流素子の保存中あるいは運転中における特性の変化がない。
- (3) 特殊構造の採用により、外部から加えられる機械的衝撃に対しきわめて堅ろうな構造となっているので、1,000 g の加速度試験にもなら特性の変化を認めず、振動衝撃に対し強いことは、すでに電車搭載用シリコン整流器で試験済である。
- (4) シリコン整流素子の冷却体は第 7 図に示すような構造の軽合金を使用しており、軽量でかつ冷却効果がきわめてすぐれている。

### 3.3 シリコン整流器の構造と冷却

第 8 図は 500 kW シリコン整流器の外観を示す。本整流器および整流器用変圧器は既設回轉變流機室の余剰床面に設置されるよう占有床面積を極力小さくして所定の面積内に納まるよう製作された。

シリコン整流素子は、非磁性材のトレイ(収納箱)に冷却体とともに



第 8 図 500 kW シリコン整流器

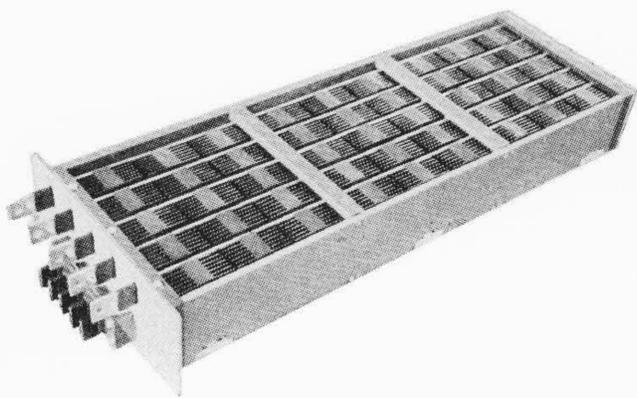
に納められており、第 9 図にその外観を示す。トレイ内の接続導体および整流器キュービクル内の導体が最短となるよう、整流素子の空間的配置を決定し、接続導体による損失の低減をはかった結果、キュービクルの外形寸法は従来に比べ大幅に縮小された。

トレイは第 9 図のとおり、車輪付となっており、容易に取付け、取はずしができる構造で、組立て、内部点検、掃除などに便利である。またトレイの前面には、整流素子の故障標示を行う警報ヒューズが取付けられており、このヒューズはキュービクルのとびらをあけるとすぐわかるようになっている。

冷却装置としては多翼送風機が用いられ、吸込まれた冷却空気は下部よりトレイに送り込まれて冷却体を通過し上部へ排気する方式である。シリコン整流器キュービクルは回轉變流機と同一床面に設置されているので、送風機はその床面下部に置いて、極力冷たいじんあいの少ない空気が導入されるようにしてある。

### 3.5 保護方式

直流昇圧用シリコン整流器における保護方式のおもなる点を説明



第 9 図 ト レ イ



第 10 図 1,000A ハイラップヒューズ

する。

(1) 異常電圧

前述のように、シリコン整流素子は、直流側の異常電圧として生ずる回転変流機火花閃絡あるいは短絡時の逆電圧に耐える必要がある。したがって交流側の異常電圧である開閉サージと雷サージにも十分低減効果のあるサージアブソーバを設けて異常電圧の低減をはかり、交直両側に対し、整流素子に印加する逆電圧が素子の許容耐圧以下になるよう協調をはかった。

(2) 過電流保護

負荷側の短絡などによる過電流に対しては、直流過電流継電器を設けることにより保護を行った。なお、整流器用変圧器一次側に高速度短絡継電器を設け、整流器用変圧器およびその二次回路の短絡保護を行うと同時にハイラップヒューズ（日立高速ヒューズ）の後備保護とした。

(3) 整流素子の事故

シリコン整流素子はセレン整流素子のような経年変化がなく、適正な使用条件のもとでは寿命は著しく長いことが予想されるが、外部の条件により万一整流素子が破壊した場合には短絡状態となるので、ハイラップヒューズにより破壊した素子を开路してほかの健全素子の保護を行った。第 10 図にハイラップヒューズを示す。

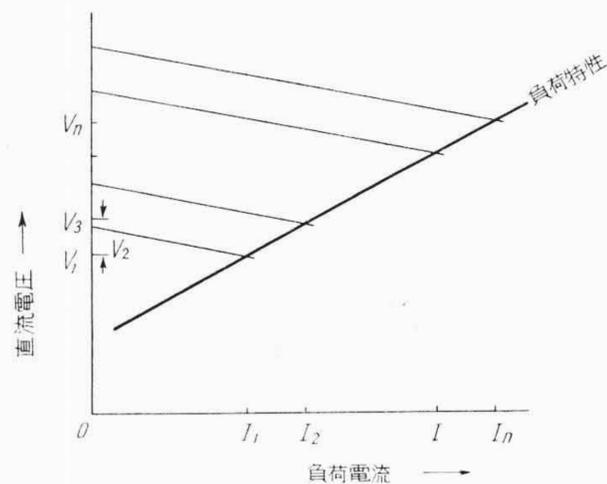
(4) 冷却装置の事故

運転中、じんあいなどにより冷却風量が減少した場合にはシリコン整流素子の温度過大をもたらすことになる。このため、気流開閉器により冷却風量の減少を検出して警報表示を行い運転の安全を期した。

3.6 運転制御方式

本整流器の運転、制御は既設回転変流機とアルミニウム電解槽の運転との密接な連係のもとに行わなければならない。シリコン整流器の運転についていえば、従来の回転変流機、水銀整流器、接触変流機などに比較して、きわめて簡単である。すなわち補機としては送風機だけであるため、送風機を運転してから、交流遮断器を投入すればシリコン整流器は運転にはいり、停止の場合はこの逆操作でよい。

330V 回転変流機と 50V シリコン整流器との従続運転方法としては、まず回転変流機群を電圧最低の位置で起動し、直流側高速遮断器を投入する。このときの直流電圧と負荷に応じて第 11 図に示すように電流  $I_1$  が流れる。次にシリコン整流器用変圧器の交流側遮



第 11 図 運転電圧と負荷電流

断器を投入すれば、シリコン整流器に直流電圧  $V_2$  を生じ、回転変流機の電圧  $V_1$  との和  $V_3$  が負荷にかかる。負荷電流は、シリコン整流器の電圧発生に伴い増加し、 $I_2$  となる。次に回転変流機用の誘導電圧調整器により、変流機の電圧を漸増して規定の電圧  $V_n$ 、電流  $I_n$  にする。運転中の電源電圧の変動および負荷側の変動に伴う電流の増減は変流機用誘導電圧調整器により調整を行い、シリコン整流器には電圧調整装置を設けない方式とした。

運転を停止する場合は、上述の逆操作で行えばよいが、シリコン整流器の交流側遮断器を開いて無電圧としたのち、誘導電圧調整器により最低電圧にして、回転変流機の交流側遮断器を開放後、直流側遮断器を開いて停止する方法も行うことができる。

運転中万一シリコン整流器が事故を生ずれば、整流器側の交流遮断器は自動遮断し、シリコン整流器は無電圧となるが、回転変流機はそのまま運転するので負荷電流は第 11 図に示すように  $I$  に減少するが運転は継続できる。

事故の発生したシリコン整流器 1 台はただちに、交流側、直流側の開閉器を開いて、ほかの 6 台でふたたび運転に入れ負荷電流は  $I_n$  にもどる。事故発生の整流器は、点検して正常に整備し万一の事故に予備器として備えておく。

3.7 試験結果および運転成績

3.7.1 工場試験結果

500 kW シリコン整流器の定格負荷試験、過負荷試験、絶縁試験、一整流素子短絡時の保護連動試験を行い、いずれも良好な結果が得られた。現地における負荷電流は、アルミニウム製錬に特有な陽極効果に基く変動負荷であるため、整流素子内に発生する損失は変動を繰返し、熱ひずみを生ずる。したがってこの熱ひずみによる特性変化の無いことを確認することが必要である。この目的に対し、実際に想定される変動負荷より過酷な変動負荷により間欠負荷試験を行った。

第 12 図に示すように、100% 30秒、65% 30秒の周期で間欠通電を行い通電試験の前後における電気的特性と熱的特性の変化を調査した結果、全然変化が認められなかった。このような変動負荷に対しても十分安定していることを確認した。

シリコン整流素子の並列群間の電流平衡は平衡リアクトルにより非常に良好であり、不平衡率はわずか 2% であった。また各素子の冷却空気の通風断面について風量分布を細詳に測定した結果、風量はよくバランスしており、不平衡率は 10% 以下であった。

効率は、シリコン整流器、整流器用変圧器、電流平衡リアクトル、送風機を含めて 91.4% を確認した。

3.7.2 運転状況

昨年 11 月運転開始以来すでに 11 箇月を経過したが、シリコン整流素子の劣化、破損をはじめそのほかの事故も皆無というきわめて好調な連続運転を続けており、日立製整流素子が外国の製品に

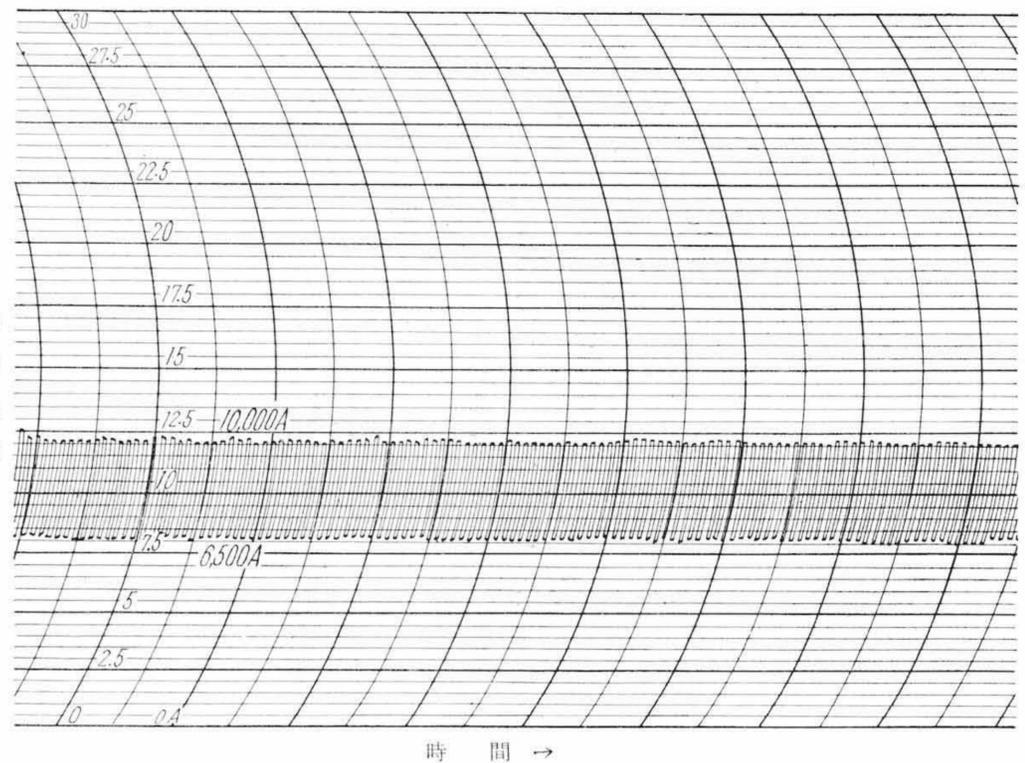
比べまったくそん色ないことを示している。

回転変流機のみ運転時、各シリコン整流器に流れる直流電流の平衡も、直流側接続導体の適切な配線により予期以上の良好な結果が得られた。遮断器の投入および遮断時における開閉サージも測定の結果、整流素子の定格電圧をはるかに下回り安全であることを確認した。

4. 結 言

以上直流昇圧用 3,500 kW シリコン整流器の概要について述べ、設計上の要点、シリコン整流器が昇圧用に適した電源であることを紹介した。アルミニウム電解槽のような変動負荷に対しても、国産整流素子がなんらの異常なく運転していることは、海外諸国に比しほとんど同一水準に達していることを示すとともに、既設回転変流機と縦続接続して直流電圧の昇圧用に使用することができたことは、このような用途に明るい見とおしが得られ、今後の応用が期待される。

シリコン整流素子の電流容量、耐電圧は逐次向上しているので、整流器キュービクルの寸法はさらに小形化が進み、本例のように既設電源室に追加電源を設ける際には最も有利な設備として用いられ



第 12 図 間欠負荷試験電流記録

るであろう。

本シリコン整流器を製作するに当り、昭和電工株式会社の関係各位よりご指導ご激励を賜った。併記して厚くお礼申しあげる。



特 許 と 新 案



最近登録された日立製作所の特許および実用新案

種 別	登録番号	名 称	工 場 別	氏 名	登録年月日
実用新案	510675	電子流分配形直流増幅器動作安定装置	多賀工場	阿部善右エ門	35. 3. 30
"	510683	放射線測定装置	多賀工場	阿藤岡健夫	"
"	510685	遠心分離機潤滑装置	多賀工場	川崎光彦	"
"	510686	放射線測定用電離函	多賀工場	鷺船見水哲雄	"
"	510688	エヤーベント式気化器	多賀工場	桜井正一郎	"
"	510690	機関始動装置の小歯車阻止装置	多賀工場	河市井井毛章進	"
"	510693	機関始動装置の小歯車阻止装置	多賀工場	河井	"
"	510697	気化器	多賀工場	蘆湯沢木川	"
"	510698	気化器	多賀工場	鈴中	"
"	510699	気化器	多賀工場	大川藤満光	"
"	510700	摺動弁式気化器	多賀工場	大川藤崎光	"
"	510702	回転形真空ポンプ	多賀工場	川崎崎光	"
"	510703	回転真空ポンプ	多賀工場	川崎崎光	"
"	510704	ポンプの自動空気補給装置	多賀工場	古大館津卓郎	"
"	510705	自動空気補給装置の作動弁装置	多賀工場	大大津津卓郎	"
"	510709	電子管式電圧安定装置	多賀工場	阿部善右エ門	"
"	510723	電動機	多賀工場	萩野谷忠昭	"
"	510725	空気圧式制御装置のフラッパー調整装置	多賀工場	倉持義徳	"
"	510727	空気作動式調節計における空気遮断装置	多賀工場	片桐陸夫	"
"	510729	制御装置	多賀工場	古徳市永	"
"	510730	制御装置	多賀工場	徳永	"
"	510733	気化器	多賀工場	佐藤	"
"	507460	卵蒸兼牛乳沸用受板	亀戸工場	梅山克巳	35. 3. 3
"	507461	牛乳沸用受板	亀戸工場	梅山克巳	"

(第 36 頁へ続く)