

ゲルマニウム・シリコン整流器の応用

Application of Germanium and Silicon Rectifiers

近藤喜久雄*
Kikuo Kondō

内 容 梗 概

ゲルマニウム整流器，シリコン整流器は従来の変流機器に比べ多くの長所をもっているため，電気化学工業をはじめ各方面で使用され始めた。すでに14,000kW アルミニウム電解用電源設備は運転中であり，自励交流発電機の励磁装置にもその新しい応用分野は伸展している。ここではおのこのの応用例について，その回路構成を中心に概要を述べた。

1. 緒 言

最近，欧米をはじめわが国においても，新しい半導体整流器として誕生もないゲルマニウム整流器，シリコン整流器が急速に使用され始めた。これは従来の変流機器に比べて，これら半導体整流器が静止器で保守運転が簡単であるばかりでなく，設備費が低廉，運転効率が高いなど，幾多の長所が認められてきたことに基くもので，その応用分野も各方面に拡大しつつある。たとえば電解工業においては，金属の製造，ガス（水素，酸素，塩素）の製造用電源として使用され，電鉄用としては，直流変電所ならびに交流電车用整流器としてすでに試運転が行われている。また製鉄工業においても，鋼帯の電解清浄，電気メッキ用電源に使用されており，同期機の励磁装置に，アーク電源装置に，一般直流電源などに応用されている。

一方，半導体理論と製造技術の進歩は，制御素子付整流器を完成した。現段階では，数アンペヤの小容量器であるが，今後の大容量化に伴って，応用分野はきわめて広範囲に及ぶことが予想される。

日立製作所では，すでに記録的大容量である14,000kW アルミニウム電解用ゲルマニウム整流器をはじめ，各種用途のゲルマニウム・シリコン整流器を完成し，その応用種別も第1表のごとく各方面に及んでいる。

実際に，ゲルマニウム・シリコン整流器を設計，製作するにあたって注意を要する点は，負荷の特性によく適合した整流器とすることはもちろん，異常電圧，過電流，系統の事故時発生する現象に対する保護を十分に行うことで，負荷の性質，整流器の特性，回路構成，保護方式が全体として調和のとれたものであることが重要である。整流器エレメントの構成，直並列のバランス，冷却方法，保護方式などの一般事項はすでに発表⁽¹⁾されているので，本稿では，ゲルマニウム・シリコン整流器の応用例について述べる。

* 日立製作所日立工場

第1表 ゲルマニウム・シリコン整流器用途一覧

用 途	日立の製作代表例	備 考	
電 解 用 電 源	水	140 kW 28V	ゲルマニウム整流器
	食 塩	1,344 kW 112V	ゲルマニウム整流器
	アルミニウム	14,000 kW 140V	ゲルマニウム整流器
	銅	900 kW 150V	ゲルマニウム整流器
	亜鉛	383 kW 85V	ゲルマニウム整流器
	マグネシウム		
アーク電源	真空熔解炉	325 kW 65V	ゲルマニウム整流器
	熔接機	32 kW 80V	シリコン整流器
	放電加工機		
	映写機		
励磁電源	自励交流発電機	35 kW 110V	ゲルマニウム整流器
	同期電動機	30 kW 110V	シリコン整流器
	水銀整流器	4 kW 40V	ゲルマニウム整流器
	電磁石	37.5 kW 150V	ゲルマニウム整流器
蓄電池充電	発電所操作電源 (浮動充電)	16 kW 160V	ゲルマニウム整流器
	一般充電	8 kW 160V	ゲルマニウム整流器
動力電源	工作機械	200 kW 220V	シリコン整流器
	I B M	136 kW 220V	ゲルマニウム整流器
	ミル補機 一般直流電源	350 kW 117V	シリコン整流器
電鉄用電源	直流変電所	1,000kW 1,500V	シリコン整流器
		750kW 600V	シリコン整流器
	交流電車 交流電気機関車	575kW 1,350V	シリコン整流器
	補機電源	30.6 kW 18V	シリコン整流器

2. 電気化学工業における応用

電気化学工業において，直流電源を必要とする用途をその電解方式上分類すると，大略次のごとくになる。

(1) 溶融塩による金属の電解製錬

アルミニウム，マグネシウム，カルシウム，ナトリウム

(2) 水溶液による金属の電解製錬

銅, 鉛, 亜鉛, 銀, 金, カドミウム, ニッケル

- (3) 電解によるガス, アルカリの製造
水素, 酸素, 塩素, 苛性ソーダ
- (4) 金属の表面酸化
アルマイト
- (5) メッキ

以上のうち, アルミニウム製錬, 食塩電解, 水電解には大容量の直流を必要とする。この直流電源は, 運転効率が高く, 保守運転費が低廉で, 取扱いが簡単であることが最も必要である。従来の変流機器に比べ, この条件により適合しているのが, ゲルマニウム整流器およびシリコン整流器で, 特に回路電圧が低くても, 高効率が得られるので, 従来, 水銀整流器のために比較的高い電圧で計画されていた負荷の電圧は, 最近次第に低い電圧で計画されるようになった。電解槽を多数直列接続して, 高い電圧としていたものを, 電流容量の大きな電解槽を使用して直列台数を少なくし, 低い電圧とする傾向があるが, これは電流容量の大きな電解槽は, 一般に設備費, 保守運転費, 電解効率の点で有利であるとともに, 回路電圧が低くなるため, 感電の心配が軽減され, 漏洩電流も減少するためである。

また電解用電源の中には, その操作上絶対に停電を避けねばならぬものがある。かかる電源には, 従来の変流機器では, 予備として1台もしくはそれ以上の機器を準備するのが一般であるが, ゲルマニウム・シリコン整流器では, 整流器の予備器を設けず, エレメントの予備を若干準備して, 万一の事故時に備えることができるので, 全体の設備費が低廉になる。ゲルマニウム・シリコン整流器は, 並列に接続する整流器エレメントに余裕をとって構成しておけば, エレメントの一部が不良となっても, 停電することなく, 予備のエレメントと不良エレメントを交換して運転を継続することも可能である。

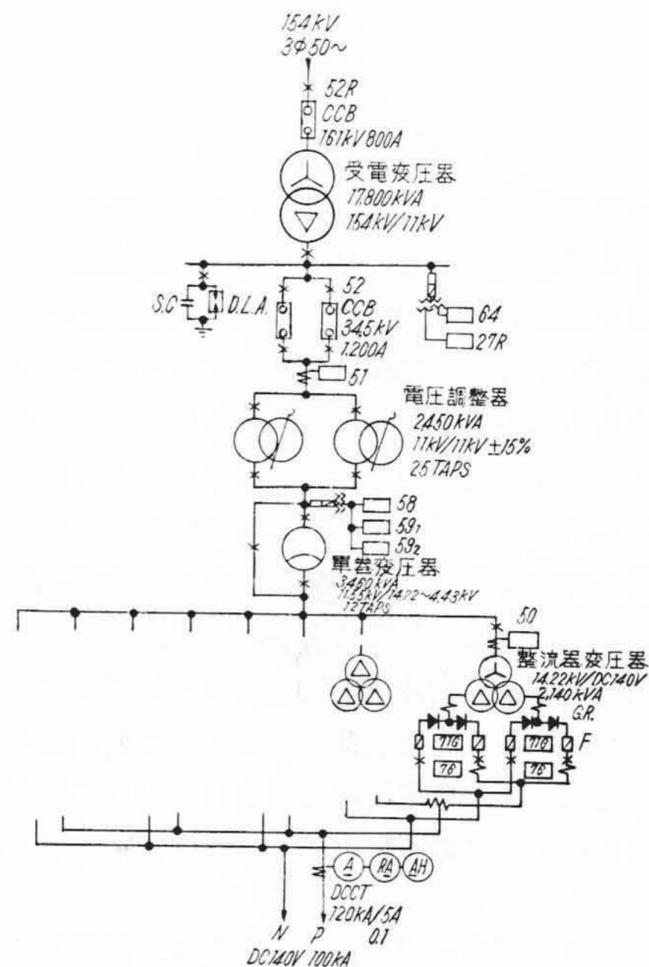
次に最近製作した電解用電源装置の実例について概要を述べる。

2.1 14,000 kW アルミニウム電解用ゲルマニウム整流器

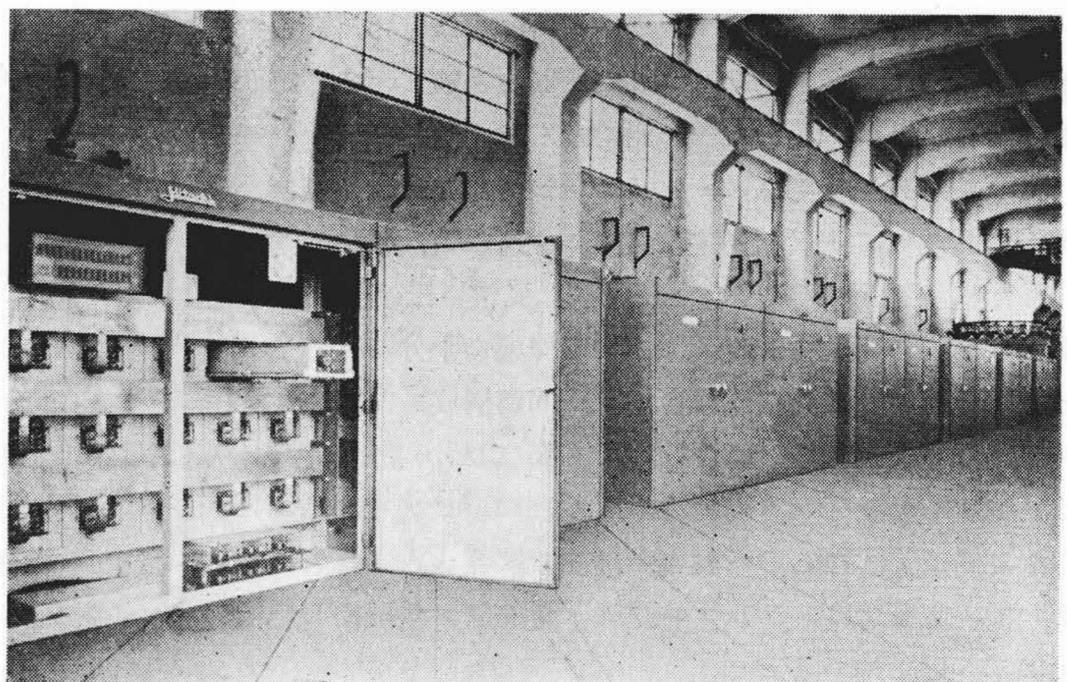
第1図に電気設備の単線結線図を示し, 第2図に14,000 kW ゲルマニウム整流器の外観を示す。本設備の内容はすでに発表済⁽²⁾であるので, 詳細は割愛するが, アルミニウムの電解炉には陽極効果という特殊現象があるため, 負荷電流はひんぱんに急減急増を繰り返す。整流器にとっては最も苛酷な負荷ということが出来る。このように大電流の急変する変動負荷にもかかわらず, ゲルマニウム整

流器はアルミニウム電解用電源として十分適したものであることが, その運転実績から実証された。

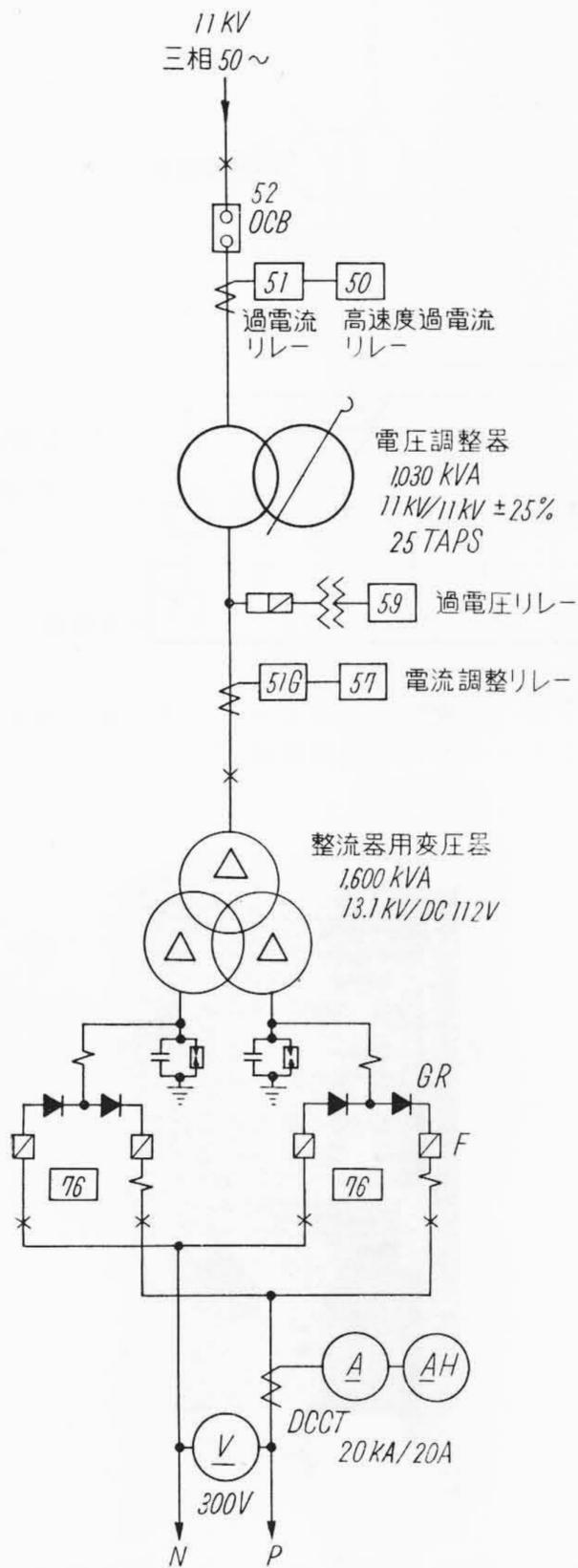
また, 現地試験結果より, 遮断器開閉時の開閉サージも整流器エレメントの耐圧以下に抑制されて, 十分協調が保たれ, 電流急変時および定常運転時の各整流器の分担電流, 各整流器エレメント間の分担電流も, 予期以上の良好なバランスが得られているので, この経験を基にさらに 100,000 A を超過する大電流のゲルマニウム整流器の製作可能なことが判明した。



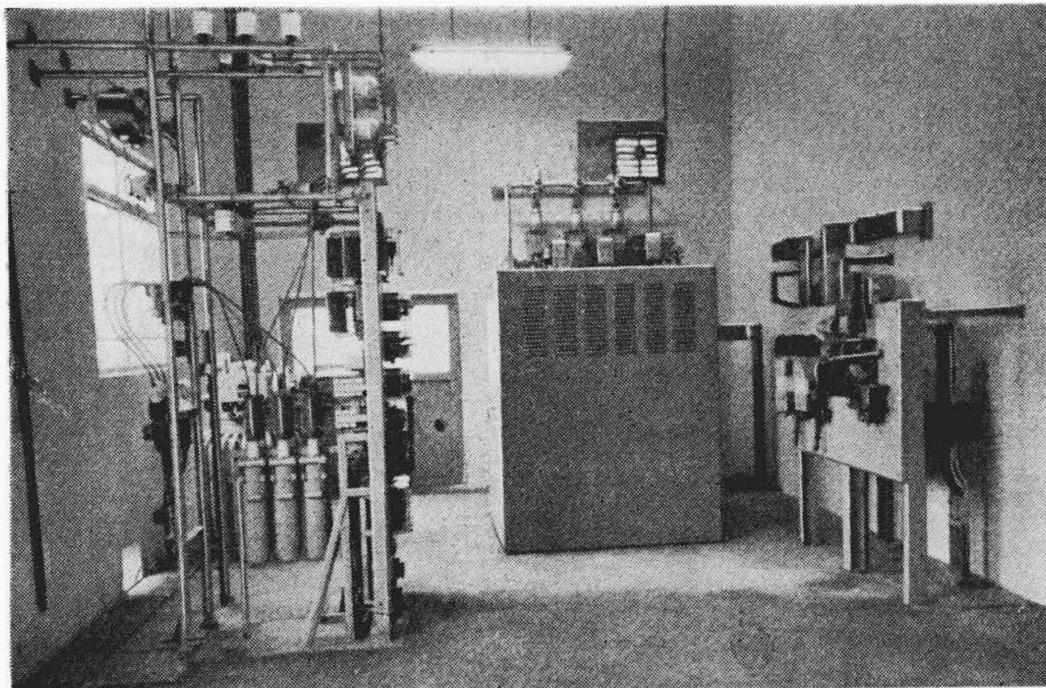
第1図 直流 140V 100kA ゲルマニウム整流器設備単線結線図



第2図 140V 100kA アルミニウム製錬用ゲルマニウム整流器



DC 112V 12,000A
第3図 直流112V 12,000A ゲルマニウム整流器設備単線結線図



第4図 28V 5,000A 水電解用ゲルマニウム整流装置

2.2 112V 12,000A 食塩電解用ゲルマニウム整流器
最近、食塩電解はもっぱら水銀法が行われ、単位電解槽の電流容量も次第に増加している。ゲルマニウム整流器が食塩電解用電源として適しているのは、前記のごとき特長によるほか、電解槽の電流容量増加に伴い、1,000Aでも10,000Aでも電流の大小にかかわらず任意の電流の整流器を追加し、既設の変流機器と並列運転ができる点にある。

また食塩電解に伴って発生するガスにより、回転変流機では整流子面、接触変流器では接点が侵されやすく、寿命に大きな影響を与えていたが、ゲルマニウム整流器は、整流作用を行うジャンクション部は完全密封された容器内に収納されているため、耐ガス性にも富んでいる。

第3図は112V 12,000A 電源装置の単線結線図を示す。

本装置の主なる仕様は次のとおりである。

交流入力	11kV	3φ	50~
直流出力	112V		
	12,000A		
整流相数	6		
電圧調整	20~112V		
制御方式	自動定電流制御		

2.3 水電解用ゲルマニウム整流器

水電解用電源にもゲルマニウム整流器は好適であって、周辺に腐蝕性ガスがある場合でも、食塩電解の場合と同様、整流器の機能、寿命にも大きな影響を受けず、安定な運転を行うことができる。

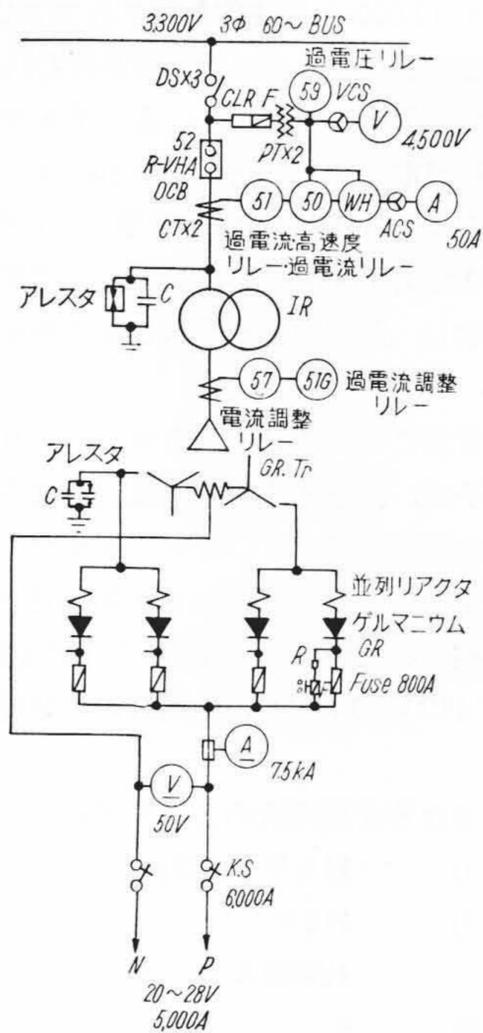
第4図は水素 24 m³/h 発生装置用 140 kW ゲルマニウム整流装置の概観を示し、その単線結線図を第5図に示す。

本装置の主なる仕様は次のとおりである。

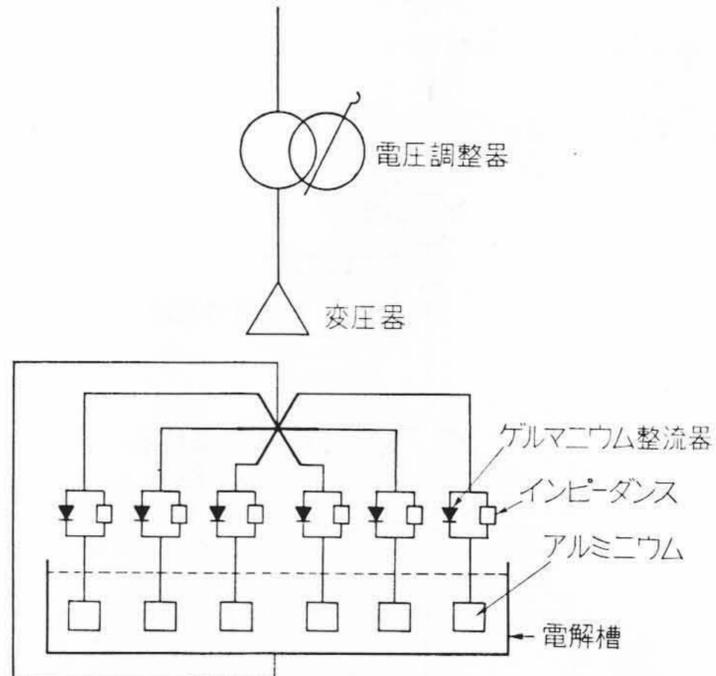
交流入力	3,300V	3φ	60~
直流出力	28V		
	5,000A		
整流相数	6		
電圧調整	20~28V		
制御方式	自動定電流制御		

2.4 アルマイト電源用ゲルマニウム整流器

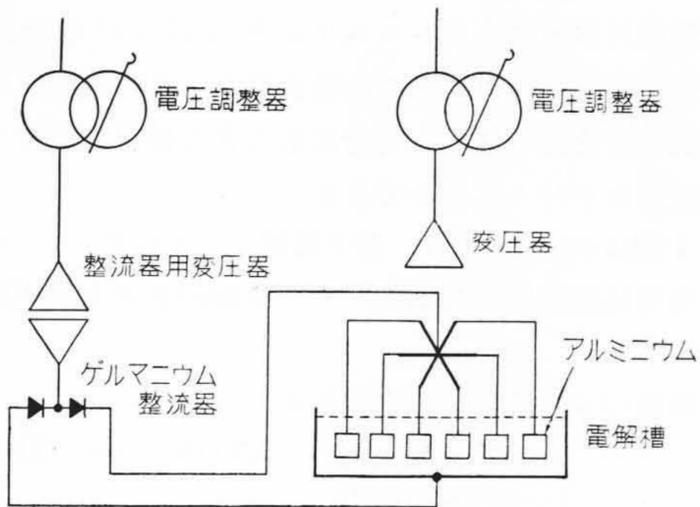
アルミニウムの表面に酸化皮膜を作る方法としては、硫酸溶液あるいは硝酸溶液中にアルミニウムを陽極として、直流を通電する方法が一般であるが、アルミニウムに流れる電流は一方向のみに流れる電流すなわち直流のみによるよりも、ある期間、逆方向にも流れる部分をもった非対称交流の方が上質の酸化皮膜が形



第5図 直流 20~28V 5,000A ゲルマニウム整流装置接続図



第7図 整流器とインピーダンスの組合せによるアルマイト用電源接続図

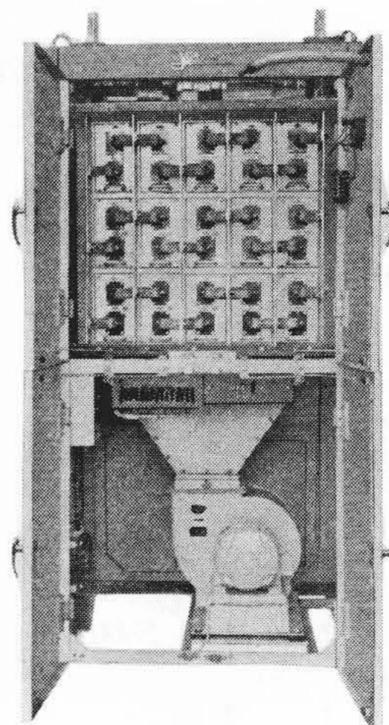


第6図 直流、交流重畳によるアルマイト用電源接続図

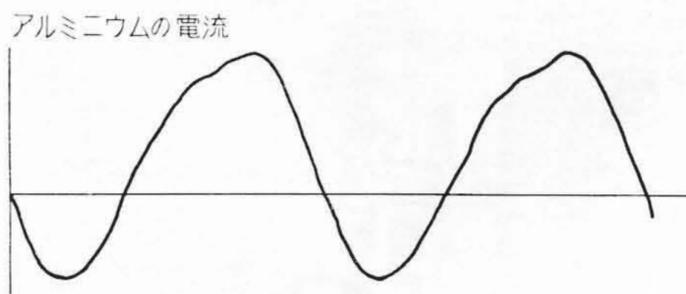
成されることが知られている。

この非対称交流をうる電源装置としては、第6図のごとく直流に交流を重ねせしめる方法や、第7図のごとく整流器要素とインピーダンスの組合せによる方法⁽³⁾などがある。

第6図の方式の直流電源に使用された一例として、60V3,000Aゲルマニウム整流器があり、第8図はその外観である。第7図の方法は、日立製作所で新しく開発したもので、整流器要素にはゲルマニウム整流器が適しており、インピーダンスとしては、コンデンサが実用的である。第9図は、ゲルマニウム元素とコンデンサを使用した場合の非対称電流波形の一例を示したものである。



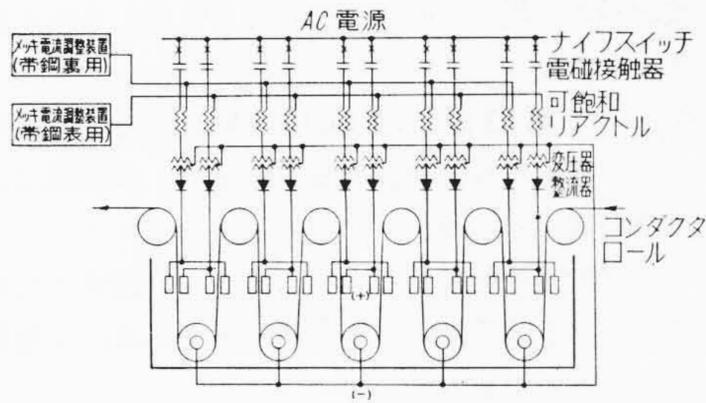
第8図 60V 3,000A アルマイト電源用ゲルマニウム整流器



第9図 アルマイト電源の電流オシログラム

3. 製鉄工業における応用

帯鋼圧延設備の著しい進歩とともに、その処理設備も発達し、連続焼鈍設備、電気メッキ設備、電解清浄装置により高速度で帯鋼を処理することが可能となった。す



第10図 電気メッキタンク主回路接続図

なわち、帯鋼のメッキは従来、ホットデイップ式であったが、最近では電気メッキ式に変わり、アメリカにおけるブリキ生産の80%以上は電気メッキブリキであるといわれている⁽⁴⁾。電気メッキによれば、大量生産が可能となる上に錫の節約ができ、帯鋼の表裏の錫付着量を自由に加減することができるなどの大きな特長をもっている。

第10図はメッキタンクの主回路接続図を示す。

これらの電気メッキ設備中、電解酸洗、メッキの作業は送りロールを通じて通電が行われ、電圧は20V、電流は合計120,000Aに及ぶ例もある。このような低圧大電流直流電源はゲルマニウム整流器が最も適しており、今後はますます使用されていくものと思われる。

日立製作所では、すでに電解清浄用直流電源として、24V 5,000Aゲルマニウム整流器を2セット完成納入し、現在好調に運転中であり、現在さらに2セットを製作中である。

4. 励磁電源への応用

4.1 同期電動機用励磁電源

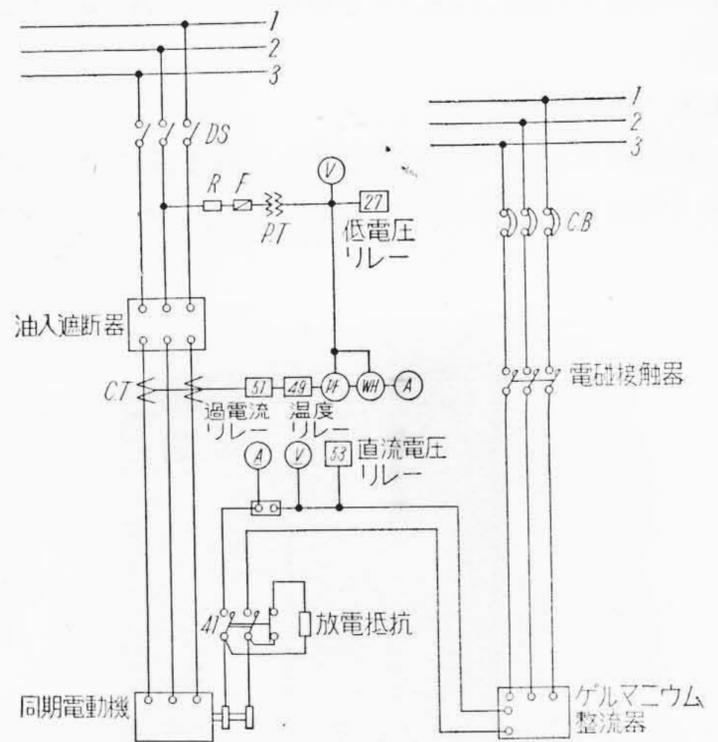
従来同期電動機の励磁機は、高速機では、直流発電機を電動機軸に直結するのが普通であり、低速機では、別に設けた高速誘導電動機で運転する電動発電機を使用するのが一般である。しかしながら、最近ゲルマニウム・シリコン整流器の登場により、励磁電源としてこれらの整流器が使用され始めた。第11図はゲルマニウム整流器による同期電動機の接続図を示す。

日立製作所ではすでに、8台の励磁装置を製作中であるが、本励磁装置は静止器で小形であるので、キュービクルに収納し、起動用スイッチキュービクルと列盤にして保守を容易ならしめている。

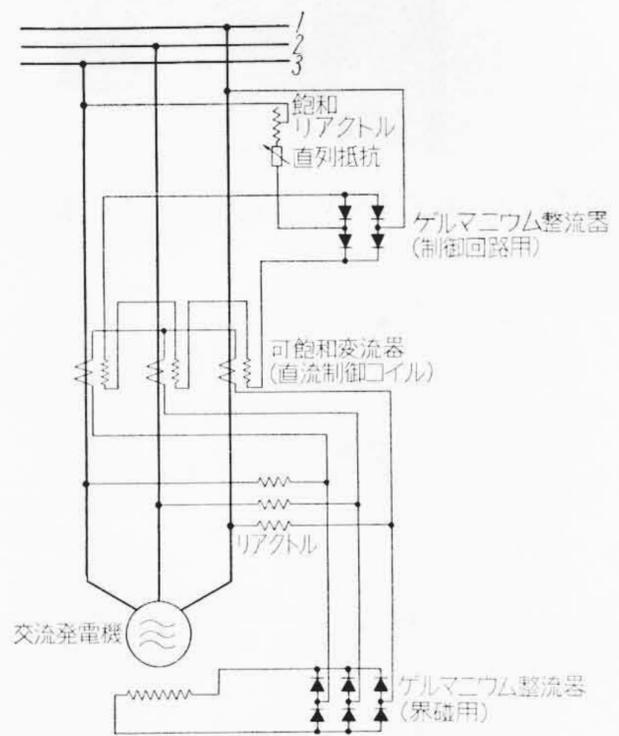
4.2 自励交流発電機

交流発電機自身の発生電圧と負荷電流とを合成整流して、自己励磁を行ういわゆる「自励交流発電機」は、従来の励磁機付き発電機に比べて、

- (1) 瞬時電圧変動率が小さい
- (2) 発電機が小形になる
- (3) 励磁装置は静止器である



第11図 ゲルマニウム整流器励磁同期電動機接続図



第12図 自励交流発電機接続図

(4) 過渡安定度がよいなどの特長があるため、最近使用され始めた。第12図は自励交流発電機の接続図を示すものである。

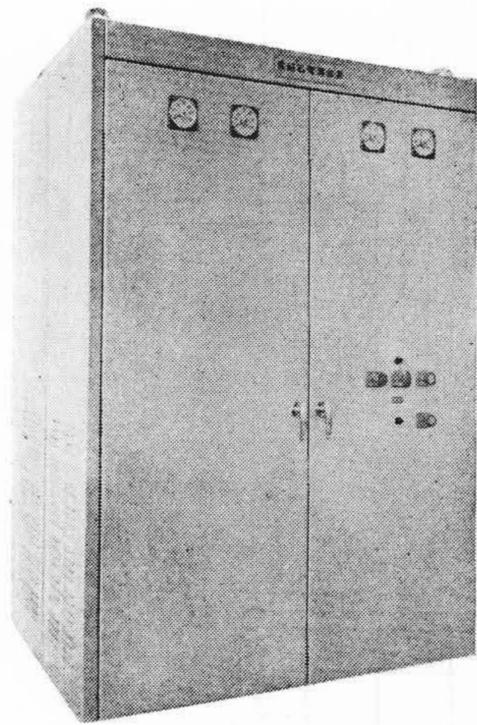
この発電機の発生する電圧と負荷電流とを合成整流する整流器に、ゲルマニウム整流器を使用した4,750kVA自励交流発電機を現在製作中である。今後は、ますますこの方式の発電機が歓迎され、したがってゲルマニウム・シリコン整流器も励磁用整流器として発展することが期待される。使用される整流器は制御装置の信頼度を左右する最も重要な部分であるため、特に厳選した整流器エレメントを使用するとともに、設計上も電圧電流に十分の余裕をとって整流器を構成することが望ましい。

特に発電機が3線短絡、2線短絡、負荷遮断投入、地絡、同期はずれの場合の過渡電流、異常電圧に対して整

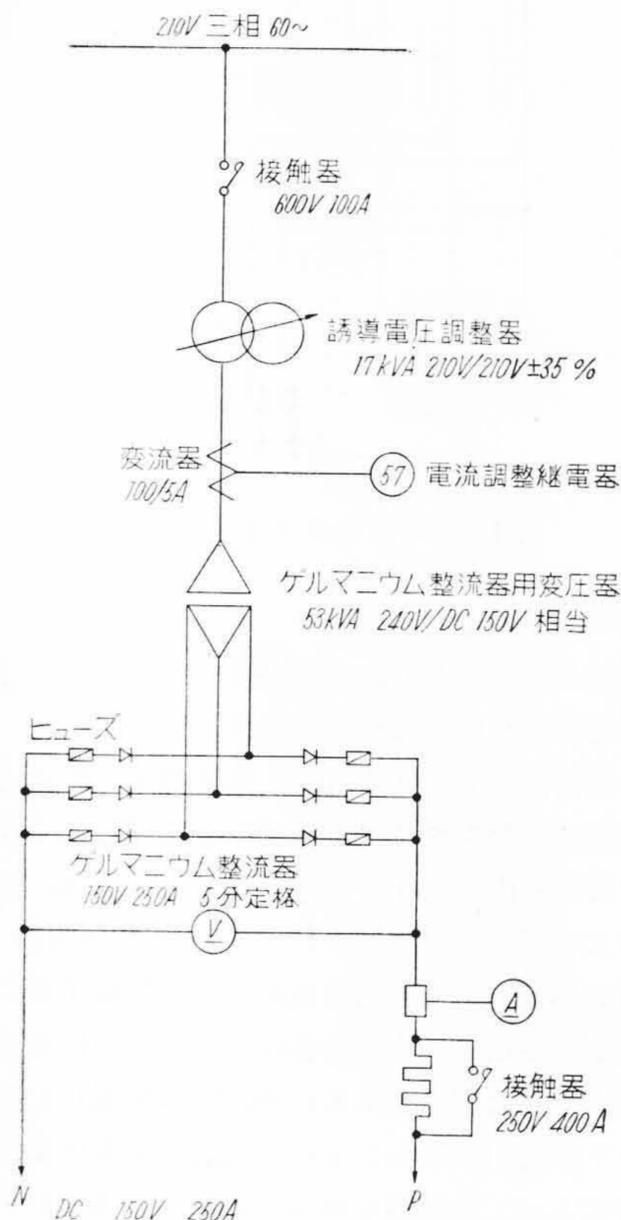
流器の特性と保護方式が十分協調を保っていないなければならない。

4.3 電磁石用電源

一般産業において直流電磁石は各種用途に利用されておりその直流電源も種々であるが、ゲルマニウム・シリ



第13図 直流150V 250A 電磁石電源装置



第14図 直流150V 250A 電磁石電源用ゲルマニウム整流装置接続図

コン整流器の出現により、この電磁石電源にも広く使用されるようになった。

一例として第13図に、14,000 kVA 交流発電機の回転子吊上用電磁石電源装置の概観を示す。本装置は、可逆式揚水発電所の水車ポンプの兼用機をポンプとして運転する際電動機運転起動時の突入電流を軽減するため、回転子を吊り上げるための電磁石電源である。主なる仕様は次のとおりである。

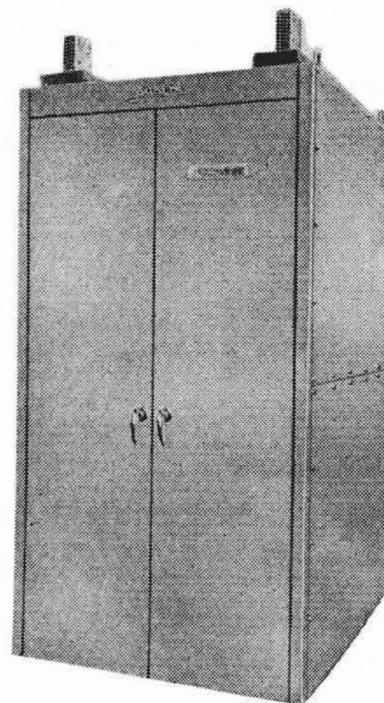
交流入力	210V 3φ 60~
直流出力	37.5kW
	150V
	250A
定 格	5分
整流相数	6
制御方式	自動定電流制御

第14図に本装置の単線結線図を示す。

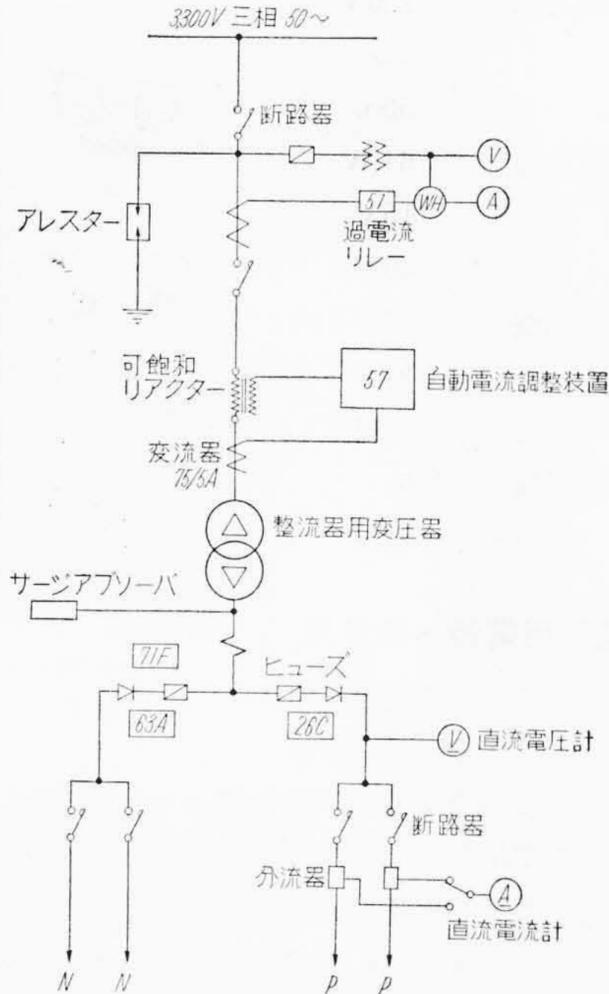
5. アーク電源への応用

真空熔解炉、熔接機、放電加工、映写機アーク燈などの直流アークを利用する用途では、負荷の電圧—電流特性は垂下特性を必要とする。これはアークが安定して継続するのに必要な条件で、今まで述べてきた電源の特性とは趣を異にし、垂下特性をうるために、可飽和リアクトルを使用したり、整流器用変圧器を高漏洩磁束形にする。可飽和リアクトルは一般に大容量あるいは特性を制御する場合に使用し、可飽和リアクトルの励磁電流を制御して負荷の電圧—電流垂下特性を制御することも可能である。整流器用変圧器を高漏洩磁束形にするのは小容量の熔接機などに行われる方式である。

第15図は 325 kW 真空熔解炉兼熔接機用ゲルマニウ



第15図 325 kW 真空熔解炉，熔接機用ゲルマニウム整流器



第16図 直流 65V 5,000A 真空熔解炉，熔接機用ゲルマニウム整流装置単線結線図

ム整流器キュービクルの外観を示す。本器の主なる仕様は次のとおりである。

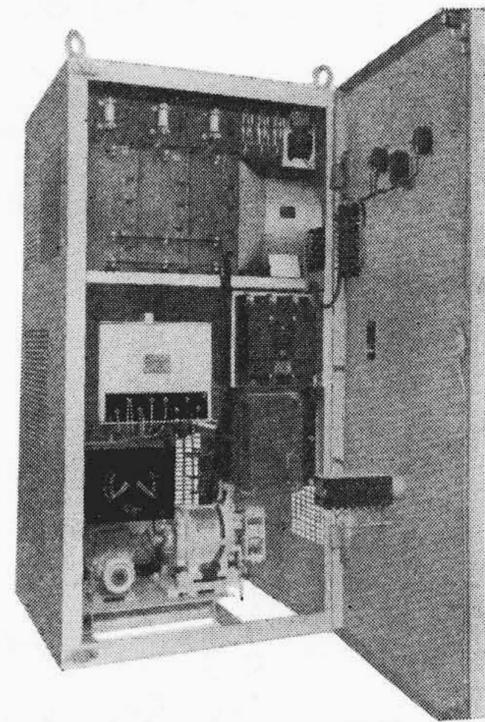
交流入力	3,300V 3φ 50~
直流出力	真空熔解炉使用時
	無負荷電圧 65V
	電流 5,000A
	電流調整範囲 500~5,000A
	熔接機使用時
	無負荷電圧 65V
	電流 800A
	電流調整範囲 300~800A
定 格	連続
整流相数	6
制御方式	限流制御

第16図に本装置の単線結線図を示す。

一般の直流熔接機において整流器形は従来セレン整流器が使用されてきたが，セレンに代りシリコン整流器を用いたものがすでに発表されている⁽⁵⁾。高効率，高い許容温度，小形などの特長は熔接機使用上最も望まれている条件であるので，今後大いに発展していくものと思われる。

6. 一般動力電源への応用

工作機械用直流電動機，IBM用直流電動機そのほか直流 110V，220Vで駆動される直流機の電源は従来一般



第17図 11.5kW IBM用ゲルマニウム整流器

に，誘導電動機—直流発電機が使用されているが，かかる一般直流電源もゲルマニウム・シリコン整流器の応用分野である。整流器は起動が早く，運転が簡単で，効率がよいので今後広く使用されると思われる。ただ従来の電動発電機に比べ過負荷容量が小さいが，整流器エレメントの構成に余裕をとり，過負荷保護を行っているので実際の運転には支障はない。

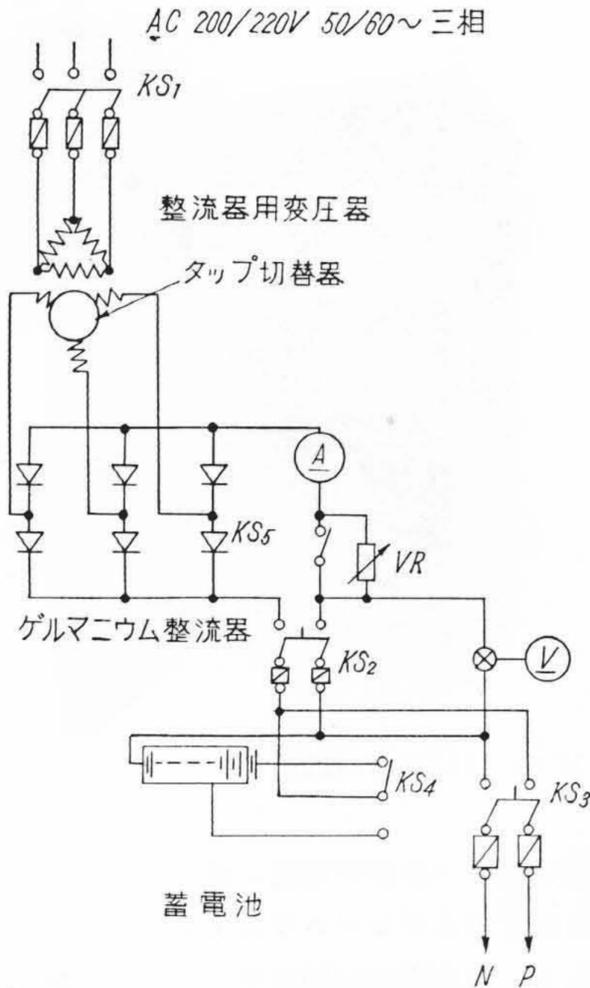
一例として第17図に11.5kW IBM用ゲルマニウム整流器キュービクルを示す。本キュービクルには，ゲルマニウム整流器，整流器用変圧器，誘導電圧調整器，制御装置そのほか付属器具一式収納されている。主なる仕様は次のとおりである。

交流入力	220V 3φ 50~
直流出力	11.5kW
	115V
	100A
整流相数	6
定 格	連続
制御方式	自動定電圧制御

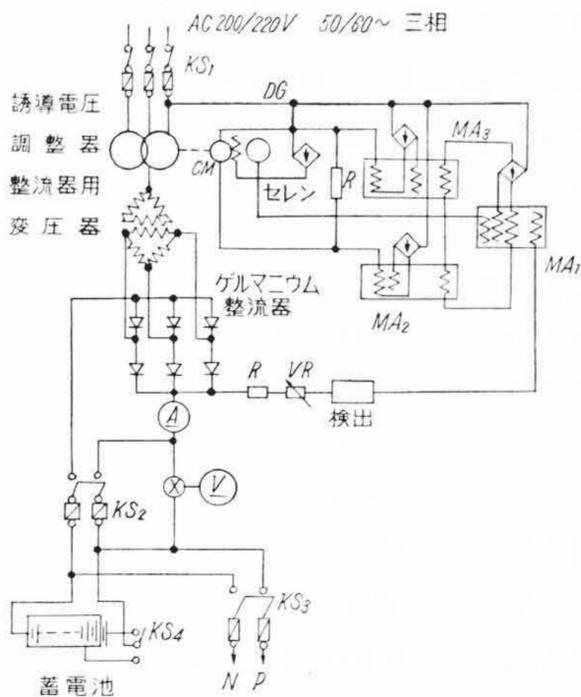
7. 蓄電池充電装置，小容量メッキ電源への応用

従来は，セレン整流器，グラインバー整流器，タンガ一整流器，ベルトローロなどが使用されていたが，効率，寿命，保守などの点でゲルマニウム・シリコン整流器がすぐれているので，この分野も応用に適している。

一例として第18図に8kW一般充電用ゲルマニウム整流装置の単線結線図を示す。充電時の電圧調整は整流器用変圧器二次巻線のタップ切替えにより行う。発電機所などの操作電源として浮動充電を行い，定電圧を要する場合は，第19図に示す方式が用いられる。すなわち



第18図 160V 50A 蓄電池充電用ゲルマニウム整流装置接続図

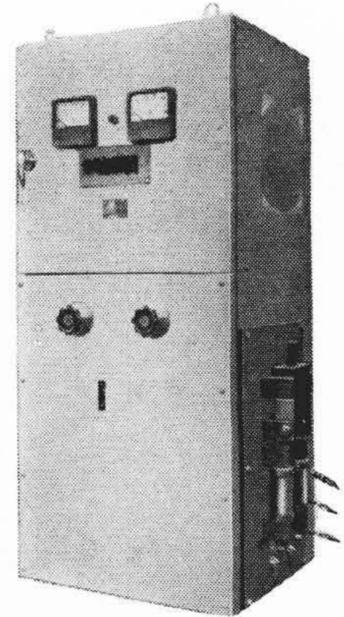


第19図 160V 50A 蓄電池充電用ゲルマニウム整流装置（自動定電圧方式）接続図

直流電圧を検出して整定電圧との差を磁気増幅器で増幅し、誘導電圧調整器の操作電動機を駆動して一定電圧制御を行うものである。

第20図は6kWメッキ用ゲルマニウム整流器キュービクルを示す。整流器、変圧器、タップ変圧器そのほかの付属器具一式をキュービクルに収納して小形化をはかり、運転保守に便利な構造となっている。主なる仕様は次のとおりである。

交流入力	220V
	3φ
	50~
直流出力	6kW
	15V
	400A
電圧調整	2.5~15V
	25タップ
	切替
整流相数	6
定格	連続



第20図 15V 400A メッキ用ゲルマニウム整流器

8. 電鉄用電源への応用

イギリスにおける交流電车用ゲルマニウム整流器、ドイツにおける交流電気機関車用シリコン整流器に関しては、すでに文献⁽⁶⁾⁽⁷⁾にも発表されているが、日立製作所においても本号「電鉄用シリコン整流器」に詳述されているごとく、1,000kW直流変電所用シリコン整流器を完成し、国鉄での試運転にはいった。また575kW交流電车用シリコン整流器も完成し、仙山線における試運転も完了した。

試験結果電鉄用整流器としてきわめて有望なことが判明したが、シリコン整流器エレメントは性能向上が急速に行われ量産も軌道にのりつつあるのでこの方面での使用は月をおって増加する勢いにある。

9. その他の応用

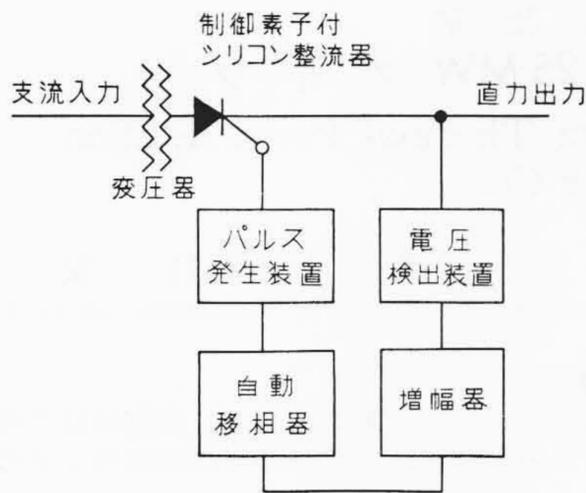
ゲルマニウムおよびシリコン整流器は現在なお性能向上の過程にあり、今後の特性向上と単価の低減はさらに広範囲の応用分野を開拓するものと思われる。たとえば、電気集塵装置の直流高圧電源、コッククロフト式直流高圧電源などにも使用されていくものと思われる。

また特殊用途であるが、非対称交流の正方向電流、負方向電流を別々に計測するのにゲルマニウム整流器を使用した実績ももっている。主なる仕様は次のとおりである。

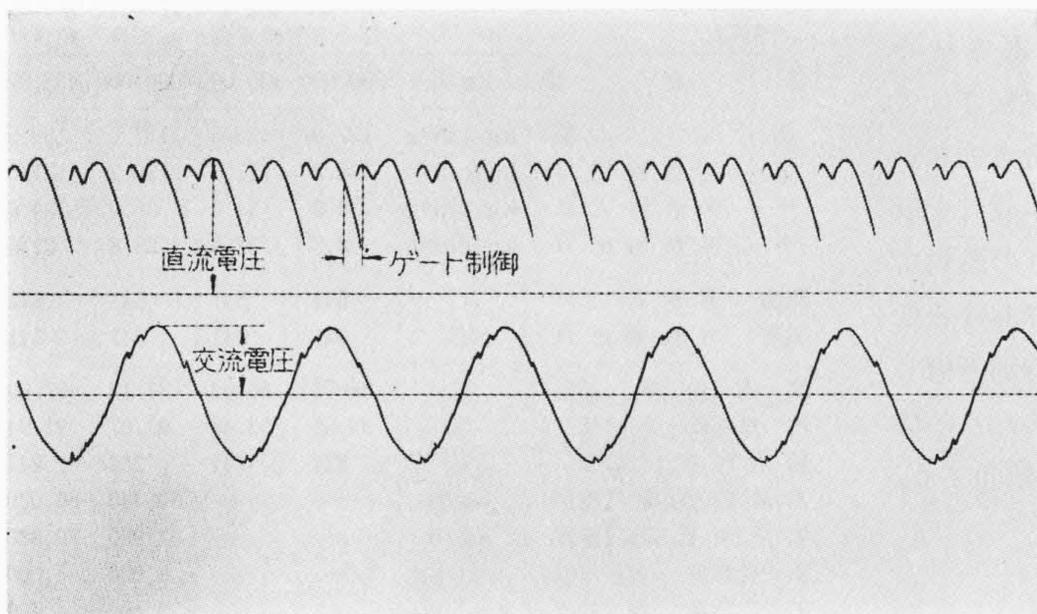
回路電流	正方向	575A×6
	負方向	192A×6
回路電圧		200V

10. 制御素子付シリコン整流器の応用

以上述べてきたゲルマニウム・シリコン整流器は、PN接合を利用した整流器であるので、みづから順方向電流の流れを制御する機能はない。したがって、整流器として直流電圧を変化せしめる場合には、交流側の電源電圧を変化せねば直流電圧を調整することはできない。



第21図 制御素子付シリコン整流器による定電圧電源ブロックダイアグラム



第22図 制御素子付シリコン整流器の電圧波形オシログラム

しかし、PNPN接合では、本号「電力用半導体整流器におけるPN接合の問題点」に述べられているごとく制御素子（第三極ゲート）にわずかの電流を流して、起動を制御することが可能であり、その特性はサイラトロンに似ているので、固体サイラトロンとも呼ばれている⁽⁸⁾。この制御素子付シリコン整流器（Silicon Controlled Rectifier）は

- (1) 比較的多量の電流の制御ができる
- (2) スイッチング速度が速い
- (3) 順方向電圧降下が小さい
- (4) 寿命が長い

(5) フィラメント電源が不要である
 などのすぐれた特性をもっているため、サイラトロンに代って多く使用されることはもちろん、電圧、電流容量の増大に伴って、電力用に進出することは明らかである。直流電源はほとんどすべてが電圧調整を必要とするので、大部分の整流器はこの制御素子付整流器に移行するものと考えられる。そのほか、直流電動機の手動制御、定電圧電源、定電流電源、スイッチ回路などに使用され、電力用、制御用両面にわたって広範囲に應用されるものと思われる。

一例として制御素子付シリコン整流器を使用した自動定電圧電源のブロックダイアグラムを示すと第21図のごとくである。第22図はその電圧波形オシログラムを示す。

11. 結 言

以上ゲルマニウム整流器、シリコン整流器の應用の実例を紹介し各方面で使用されている現状を報告したが、これら半導体整流器はようやく実用の緒についたにすぎない。今後はさらにその應用分野は広がっていくことと思われる。

また一方、制御素子付シリコン整流器の登場により、将来整流器界は様相を一変するであらうともいわれている。

以上、最近の半導体整流器應用の概要について述べ、需要家各位の御指導と御鞭撻を賜るべく、御参考に供した次第である。

本稿を草するにあたり、種々御指導をいただいた高木部長、毛利副部長に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 近藤, 池田: 日立評論 39, 1237 (昭32-11)
- (2) 近藤, 森田, 森山: 日立評論 40, 929 昭33-8)
- (3) 特許出願中
- (4) 山本: 電学誌 78, 958 (昭33-7)
- (5) E. F. Steinert: Welding Engineer Jan. 1958
- (6) Traction Current Rectification: The Railway Gazette April 13 (1957)
- (7) H. Zenneck: Siemens Zeitschrift 3, 1958
- (8) R. P. Frenzel, F. W. Gutzwiller: Electronics 31, 52 (March 28, 1958)