

単極水冷式大容量水銀整流器

川崎工場設計部整流器課 松本寅治郎

Large Single Anode Water-cooled Pumpless Mercury-arc Rectifier

Torajiro Matsumoto

(Rectifier Sect., Design Dep't., Kawasaki Works)

Synopsis

Recently grid controlled rectifiers are often utilized for speed regulation of motors and required the large overload capacity.

In compliance with this request, our Company has manufactured the 5,000 A excitron-type singleanode water-cooled pumpless rectifier.

In this paper, the construction, the temperature regulation and characteristics of this new-designed rectifier is described and the out-line of the auxiliary device of this rectifier is introduced.

I. ま え が き

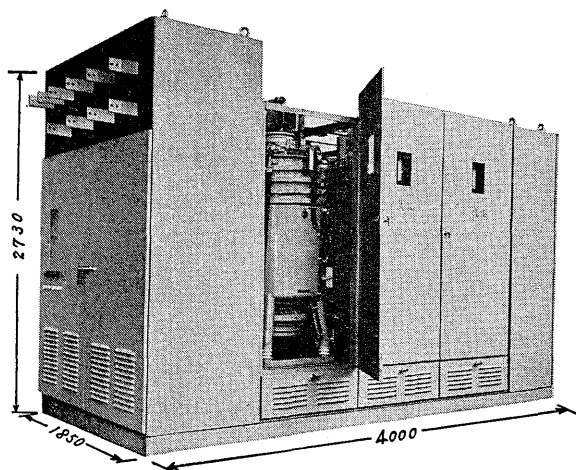
格子制御水銀整流器を電動力応用方面、特に静止レオナード方式として使用することは近年とみに盛んで、すでに多くの実施例をみているが、要求される大電流ピーク負荷耐量を満たすために多数の整流器の並列運転が一般に行なわれている。巻上機や可逆圧延機用電源として水銀整流器を使用する場合、特に深い格子制御で過負荷運転されるために大容量の水銀整流器が特に要望されてきた。このような要望にこたえて、このたび単基容量（6タンク）5,000Aのエキサイトロン形単極水冷封じ切り整流器を製作した。これは封じ切り整流器としてわが国最大の単基容量のものである（第1図）。

水銀整流器には単極形と多極形とあることは周知のとおりであるが、特に大容量になった場合、単極形には次の長所が顕著になってくる。

の長所が顕著になってくる。

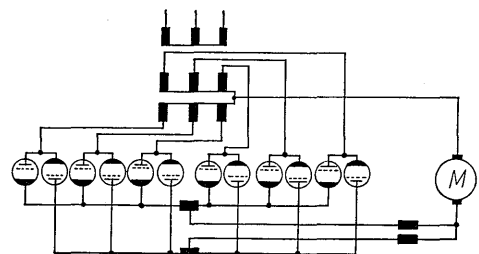
- 1) 予備タンク容量が少なくて済む。
- 2) 単極形では陽極寸法に関して全く自由で、したがって陽極直径を大きくするのに構造上なんらの困難もない。この点、多極形では陽極を円周上に配置するので、大容量の場合、陽極直径が大きくなって整流器がいたずらに大形になる欠点が生じ、これを避けて多数個の多極整流器の並列運転方式を採れば、通弧あるいは逆弧などの事故時に故障陽極に相当大きな短絡電流が流れて被害を拡大する恐れがある。単極形の大陽極は容易に極端な過負荷にならない。
- 3) 単極形では各相のタンクの陰極電位を自由に選べるので、たとえば可逆圧延機用電源に使用する場合、経済的に有利な逆並列接続方式（第2図）が可能となる。単極形の欠点として従来から上げられてきた次の諸点については、

- 1) 各タンクごとに点励弧電力を必要とする欠点は、整



第1図 単極水冷5,000A 封じ切り整流器

Fig. 1. 5,000 A single anode water-cooled pumpless rectifier



第2図 逆並列接続方式

Fig. 2. Antiparallel connection

流器容量が増大するにつれて点励弧電力の占める率が減少し、本整流器の場合では定格値においてアーク電圧損失の約数%にすぎない。これは点励弧電力が整流器容量とほぼ無関係に一定していることに基づく。

2) 失弧現象を起こしやすい欠点に対しては、単極整流器の失弧現象研究の結果、陽極電流消滅直後に発生し、これは陰極上の過剰荷電体密度に基づくものであることが判明したので、当社では陽極電流消滅過程の電流変化率 di_a/dt を利用して励弧極に衝流を流すいわゆる衝流励弧方式により失弧現象を解決している。単極整流器は大別してエキサイトロン形とイグナイトロン形に分かれる。エキサイトロン形は励弧極によって常時陰極輝点を維持する方式で、タンクと陰極を絶縁しており、一方、イグナイトロン形は点弧子によって陽極点弧位相と同期して毎サイクル陰極輝点を作る方式で、陽極電流消滅と同時に陰極輝点も消滅するので、特にタンクと陰極を絶縁する必要がない長所を有する。本整流器にエキサイトロン形を採用したのは、

1) 点弧子は使用中に消耗して取り換えなければならず、これにより封じ切り整流器の寿命が限定されること。

2) エキサイトロン形の方が安定した位相制御ができることである。

冷却方式として従来の封じ切り整流器の風冷式に代わって水冷式を採用したのは、

1) 水冷式の方が熱容量が大きいので、負荷の急変に対しても一定温度運転が容易でアーク自体が安定すること。

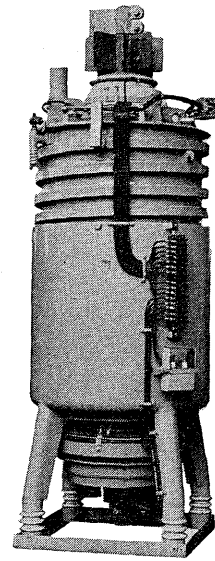
2) 四季を通じての温度変化が空気より少ないため、温度調節が容易であること。

3) 冷却効果が大きいので大容量整流器に適していることによる。

II. 構造

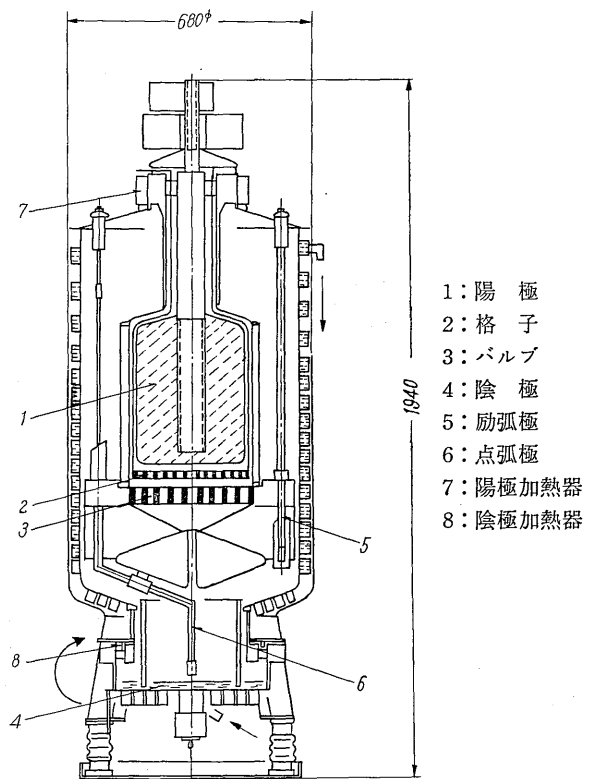
第1図に示すように前後に補助キュービクルを配し、その中間に整流タンクが6個配置されている構造である。前面キュービクルには点励弧装置を納め、後面キュービクルに温度調節関係装置、衝流励弧 CT、格子回路部品の一部が納められている。タンクはベッドフレーム上に固定され、ベッドフレーム下に冷却水管を蔵している。

第3図は整流タンクの外観を示し、第4図はその内部構造を断面図で図示した。円筒形真空タンクと円すい形のタンク底部および陰極底板上に銅のらせん状冷却管が



第3図 単極水冷封じ切り整流タンク

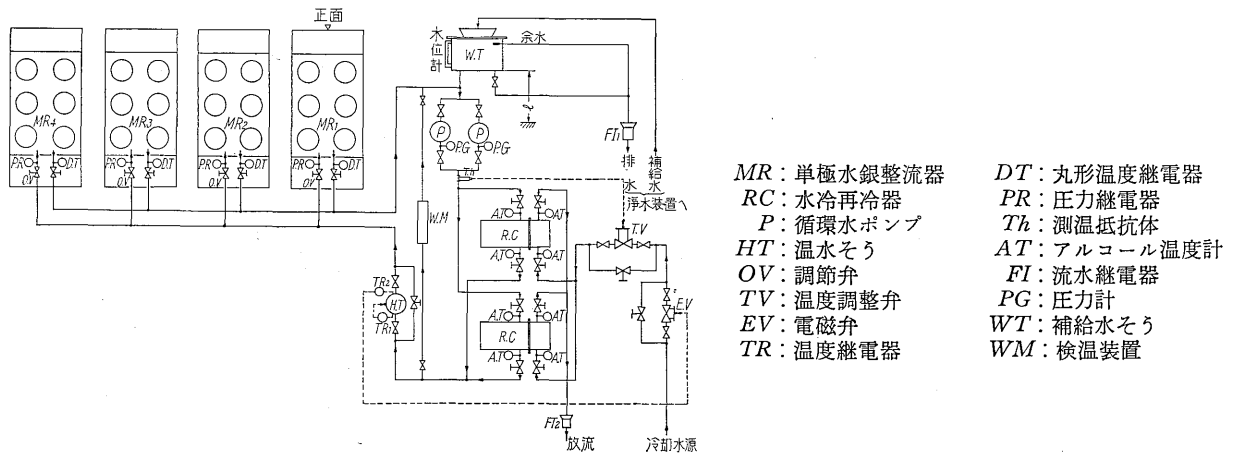
Fig. 3. Single anode water-cooled pulex tank



第4図 断面図

Fig. 4. Cross section

ろう付けされている。銅管は中を流れる冷却水によって腐食されないで、鉄製タンク壁の水素拡散による真空劣化は防止できる。陽極の外側には同心的にかご状格子が配置され、その外側にたんざく状の消イオン板を有する保護円筒がある。このたんざく状板は、放射状に配置されて陽極側面からの放熱をよくしており、しかも、



第5図 単極水冷整流器冷却水系図

Fig. 5. Water-temperature regulating system for rectifier

格子、陽極付近に側面から流入しようとするイオンがあっても、これを消イオンする作用を有している。同時に、ピーク負荷時、陽極付近の水銀蒸気不足に対して補給水銀の通路をもかねている。格子前面のパフルの側面にも消イオン板があって、下方の放電空間から陽極側面空間へのイオン流入を極力阻止している。電極封かん部はすべて多極封じ切り整流器で実績のあるガラス封かん部を採用しているが、特に陰極封かん部は大形ガラス封かん部の完成によって第4図に見られるように陰極側面に持ってきた。この構造によって陰極底板全面から直接、冷却水に放熱できるので陰極水銀の冷却効果が向上されると同時に、従来の陰極石英つぼ内に水銀を擁する構造にくらべ陰極構造が簡単化できた。点弧極1本、励弧極3本はタンクカバーから懸垂されている。点弧は水銀吹上方式で、励弧極にアークが流れると自動的に点弧回路は開路される。励弧は三相交流励弧で、上述の衝流励弧が重畳し励弧失弧を防止している。

III. 製作上の問題

封じ切り整流器製作上の第1の問題点は内部部品およびタンクの予備焼成および表面処理である。内部部品のうち、特に陽極グラフィットはガス含有量も他に比べて多いため、特に高温真空焼成の必要がある。当社では数千度の高温真空炉にて長時間脱ガスした後、組立まで真空炉に保管されている。タンク内面はサンド・ブラスト機によって酸化被膜のような表面の汚染が除かれ、組立完了後さらに数百度の炉中にて焼成脱ガスされる。電流化成では定格電流を越えた化成電流で連続化成するほか、特に最近の応用面を考慮してピーク負荷化成が低圧および高圧で行なわれる。化成完了後、ヘリウム漏れ検

出器により 10^{-6} ミクロン・*l*/sec までの漏れを検査し、最後に陽極グラフィット品質検査が行なわれる。これは格子に所定のピーク大電流を通し、陽極に所定の負の高電圧を印加した場合の陽極が逆弧するひん度を計数して行なわれる。以上の過程を終えて初めて整流器は封じ切られる。

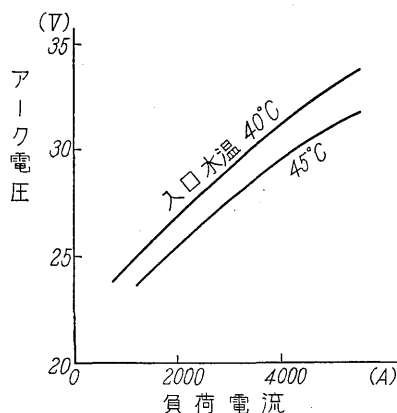
IV. 温度制御

陽極付近への水銀凝縮は陽極と格子、タンク間の絶縁を劣化させ、または水銀滴となって落下した場合は、陽極、格子付近で急蒸発して消イオン時間を遅らせ、逆弧あるいは転流失敗を起こすおそれがあるので、陽極封かん部に陽極加熱器を取付け、常にタンクの水銀凝縮壁より高温に維持されている。この加熱器の制御は陽極封かん部に近いカバー面に温度継電器を取付け、これにて加熱器を入り切りしている。陰極封かん部は陰極水銀の近くにあり水銀凝縮のおそれがあるので、封かん部に陰極加熱器を配し常時加熱している。冷却水系統は一例として第5図に示すように再冷却器を有する循環回路である。循環回路中には温水そうがあり、ここに取り付けられた温度継電器により温水そう加熱器を入り切りして水温を約40~45°Cの範囲に維持することができ、整流器起動条件が確立される。整流器運転中冷却水温が上昇してくると別の温度継電器により再冷却器の冷却水系路中の電磁弁が自動的に開き、さらに測温抵抗体により再冷却器冷却水系路中の調整弁の開度が自動的に変化して、放流量を加減し、整流タンク冷却水温を約45~50°Cの範囲に維持する。整流タンク冷却水量は常に一定であることが特長で、これにより平均負荷一定の場合のタンク壁に沿っての温度分布がほぼ一定に維持される利点がある。

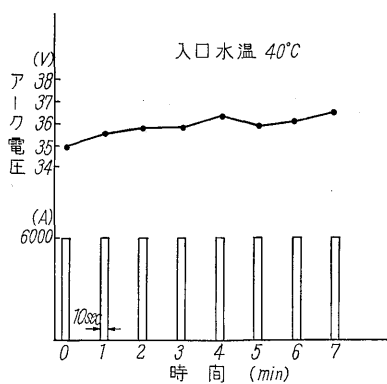
V. 試験結果

1. アーク電圧

冷却水温および負荷電流に対するアーク電圧値は整流器効率を決定し、また、整流器安定運転温度を決定する上に重要である。第6図に定常状態の負荷電流、冷却水温に対するアーク電圧を示し、第7図に無負荷より6,000A 繰り返し印加時のアーク電圧の変化を示す。この両者を比較して特にピーク負荷においてアーク電圧の急上昇は認められない。



第6図 負荷電流とアーク電圧
Fig. 6. Arc drop characteristics

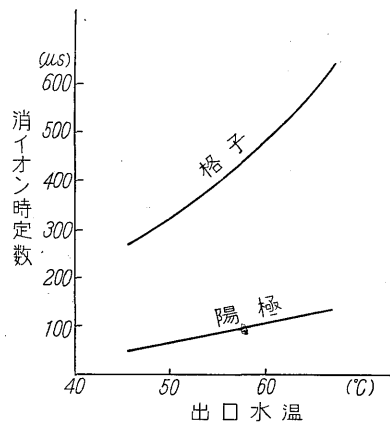


第7図 ピーク負荷時のアーク電圧
Fig. 7. Arc drop on peak load test

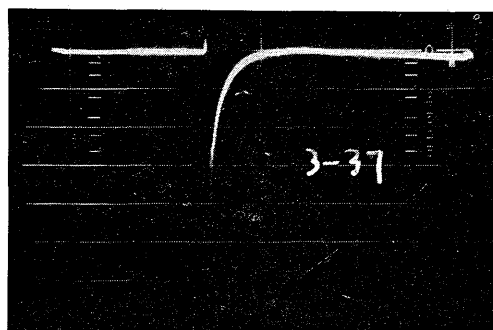
2. 消イオン

陽極および格子付近で主アーク消滅後、いかなる時定数でイオンが消えてゆくかは、整流器特性上重要である。陽極の消イオン時定数は直接逆弧に関係し、格子の消イオン時定数は格子制御能の低下、すなわち通弧あるいは転流失敗に関係する。第8図に測定結果を示す。陽極逆電流は陽極回路にそう入した接触変流機の接点を陽極電流消滅と同期して開放し、接点間に入れた100Ωの

抵抗の端子に現われる電圧降下で測定した。第9図は陽極逆電流測定例である。



第8図 陽極および格子消イオン時定数
Fig. 8. Deionization-time-constants of space surrounding anode and grid



第9図 陽極逆電流
Fig. 9. Reverse current of anode

3. 格子制御能試験

低圧試験において陽極電流消滅後、矩形波電圧を陽極に印加し、印加位相を変化した時の点弧矩形波電圧値を測定することによって、格子の制御能回復時間を知ることができる。また、直接、高圧試験で整流器を逆変換装置として運転し、格子進み角を変化させて実際に転流失敗を起こさせて転流余裕角を測定することができる。上記両測定の結果には多少の相違があったが、負荷電流3,000A、出口水温50°Cで転流余裕角は約12°(50サイクルにおいて)であり、60サイクル換算で約14.5°となり満足すべき結果を得た。

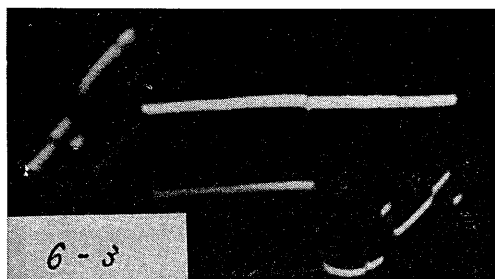
4. 高圧負荷試験

水銀整流器の逆弧を支配するものは陽極電流消滅時に陽極に流入するイオン流とこのとき陽極に印加される負の電圧の積と考えられている。イオン流は陽極電流の転流終了時における変化率 di_a/dt に比例するので、負の電

圧（飛躍逆電圧）とこの di_a/dt の積を回路責務 B と呼び、逆弧ひん度算定の基礎にしている。逆弧ひん度 W と回路責務 B との関係は次式（Poisson の式）により計算される。

$$W = \frac{\varepsilon^{-kB} (kB)^n}{n!}$$

ここに k は構造、運転条件により定まる定数、 n は整流器の弁品質度である。高圧試験は整流器用変圧器直流巻線電圧 1,400V で無負荷 50 sec と 5,000 A ピーク負荷 10 sec の繰り返し負荷で $\cos \alpha = 0.5$ （回路責務 $B = 2.6 \times 10^{10} \text{ V} \cdot \text{A} / \text{s}$ ）にて 80 回印加して各温度で 0 ないし 1 回の逆弧であった。高圧試験中の逆弧位相を掌握することは、逆弧原因の追求、整流器の改造発展に非常に有効であるが、当社はメモリ・オシロスコープにより逆弧時の位相を確認している。第 10 図はこの一例である。オシロの下の方の波形は、正常サイクルの陽極、陰

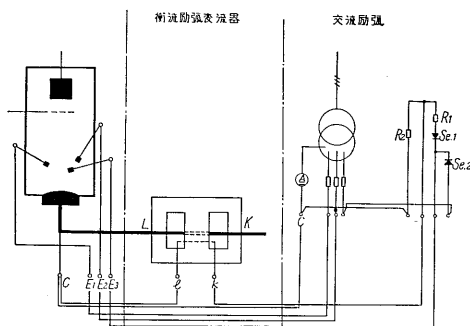


第 10 図 逆弧時のオシログラム（陽極、陰極間電圧）
Fig. 10. Oscillogram of voltage between anode and cathode at arc-back

極間電圧波形が描かれている。上の方が逆弧サイクルの波形で、陽極電流消滅直後に逆弧が発生している。逆弧によって陽極、陰極間にはアークで結ばれたので正常の逆電圧波形は現われず、直線となって描かれている。

VI. 補助装置

既述の衝流励弧回路を第 11 図に示す。自極の陰極導



第 11 図 衝流励弧回路

Fig. 11. Diagram of exciting circuit of rectifier

体の貫通した変流器の二次側をセレン Se_1 を介して励弧極の 1 本と陰極に接続している。陽極電流の流れ始めの転流期間では、変流器二次側発生電圧の極性が、励弧極側が陰極に対して負になるよう選ばれている。この際、二次電流は Se_1 に阻止されて励弧極には逆流せず、抵抗 R_2 を通る。陽極電流の転流期間では、二次電圧は励弧極が正となるべく現われるので、励弧電流を流す。陽極電流消滅後は変流器のインダクタンスに蓄えられたエネルギーが、抵抗 R_1 およびアークを通して放出され、ほぼ三角形の衝流励弧電流となる。この波形の調整は、変流器のギャップ調整によるインダクタンスの変化および抵抗 R_1 を加減して行なわれる。

格子制御装置はすでに電動力応用方面で使用されている水銀整流器に用いている開閉リアクトル形格子制御装置であって、

- 1) 応答が早い。
- 2) 制御電力が少ない（従来の約 10 %）
- 3) 消費電力が少ない（従来の約 50 %）
- 4) 装置が簡単でかつ小形である（従来の約 60 %）

という特長を有している。可逆圧延用として整流器を使用する場合、整流器は逆変換装置から順変換装置に急速に移行されるので、格子制御装置も 180° の移相角度を有している。移相リアクトルには直流励磁巻線、電圧制御（プンプル方式）巻線のほかに、循環電流一定制御巻線を有している。これは逆並列接続運転において、安定運転を期する意味で順、逆変換装置間の循環電流を一定に維持する目的である。逆並列接続のため、陰極電位がそれぞれ異なる（ただし 3 タンクは共通）ので、格子回路は各相にそう入された飽和変圧器の二次側から各相独立に取り出される。したがって格子消弧は飽和変圧器の一次側において、各相共通に一個の高速度継電器をもって、格子電圧を短絡する方式をとっている。

整流器を逆変換装置として運転する場合、なんらかの理由によって格子進み角 γ が減少して、 $\gamma - u$ (u : 重なり角) が転流余裕角より少なくなった場合、逆変換装置は転流失敗を起こし、直流側短絡事故を起こす。これを避けるために、格子回路に、自動制御回路と並列に補助パルス印加回路が接続される。これは格子自動制御と無関係に、常に一定の γ の位置で発生されているので、上述のような自動制御の γ の極端な減少に際しても、一定限度以下には格子点弧を遅らせないので、転流失敗は防止できる。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。