

液冷式高電圧水銀整流器

Liquid Cooled Type High Voltage Mercury Arc Rectifiers

馬 淵 貞 雄* 毛 利 銓 一**
Sadao Mabuchi Sen'ichi Mōri

内 容 梗 概

高圧整流器の冷却方式は絶縁技術上からは風冷式がすぐれている。さきに研究を行った風冷式整流器はその特長を有していたが一方風冷式では高圧整流器の運転に必要な 25°C 以下が得られない。本論文では風冷式を液冷式に改造して冷却容量をまし、同時に陽極分圧方式、主回路電気振動防止回路の設置、負荷電流自動調整装置などを追加して運転の安定度の向上がはかられた。また研究を便にするため、等価試験装置の強化、特殊測定装置の整備が行われ、高圧整流器の特性研究に一段の進歩が期待されている。液冷式整流器の特性の解明の一部が報告されているが、アーク電圧は 50A DC で約 40V 、主陽極の点弧特性は陽極電圧 10kV 以上に対し 30V 以下、制御能回復時間は 40A DC タンク温度 20°C において 120us である。

1. 緒 言

さきに試作した風冷式水銀整流器(20A , 120kV)についてはすでに報告した^{(1)~(3)}とおりの水銀順変換装置および逆変換装置として、定格負荷、定格電圧での連続運転に成功したが、さらに、各種の詳細な動作特性を明確ならしめるとともに、電流容量の増大、安定度の向上を計画し、整流タンクの冷却法を液冷式に改めるとともに、内部の構造、付属装置、変換回路のほか全面的に改造を実施し、昨年末ふたたび実験研究を始めた。次に、液冷式水銀整流器の紹介ならびに現在までの研究結果について述べる。

2. 液冷式高電圧水銀整流器の構造と特長

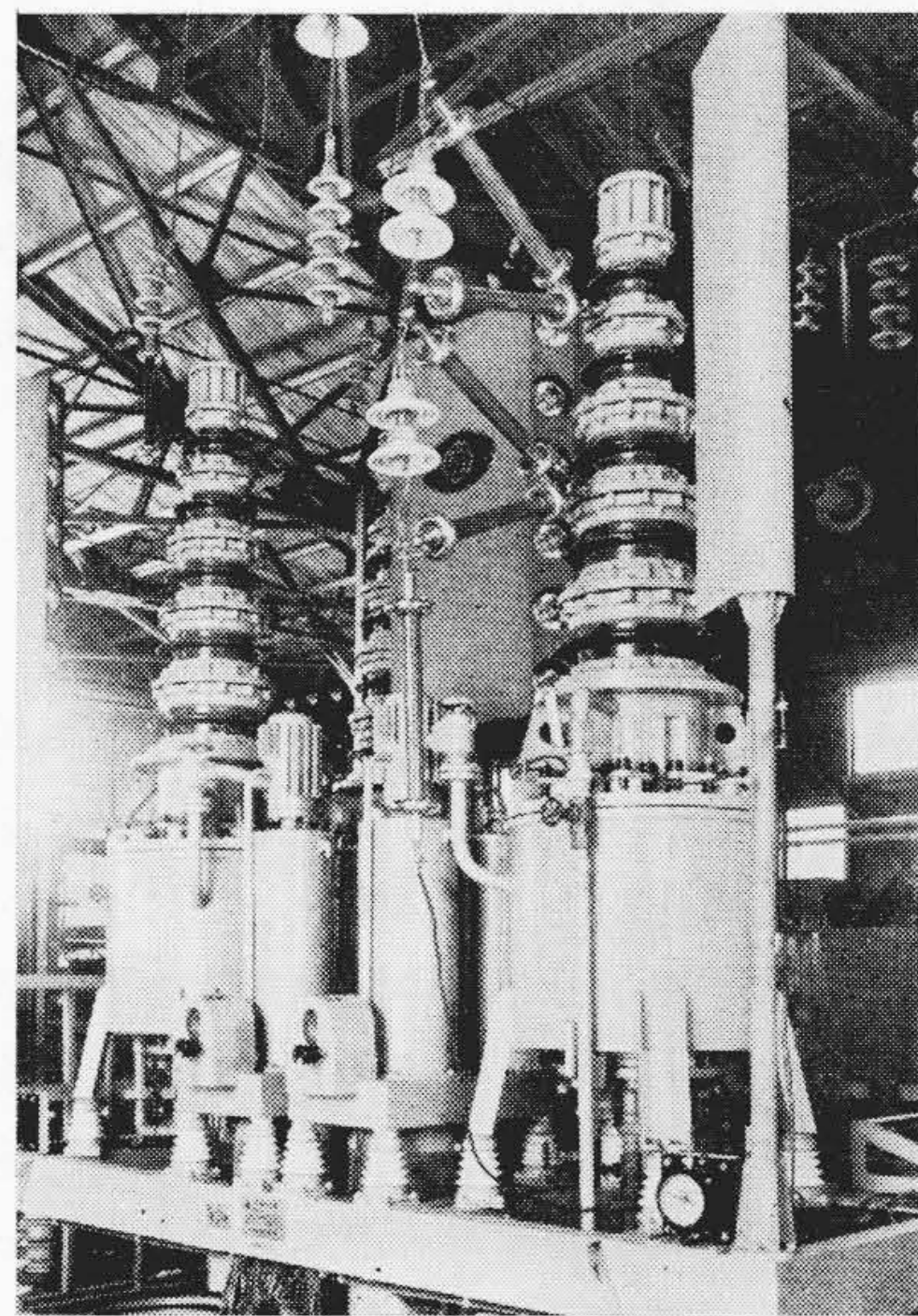
さきに試作した風冷式高電圧水銀整流器における整流タンクの温度は周囲温度(室温)の影響を受けることが大きく、精密な温度制御が困難であるばかりでなく、周囲温度以下に保つことも困難で、夏期には運転の困難となることさえあった。このため冷却法を液冷式に改め、温度調節を自由にするとともに、陰極部と格子部との温度を個別に調整できるようにした。ただし陽極の温度調節は従来どおり赤外線ランプで加熱している。

この整流タンクの外観を示せば第1図のとおりである。これにより、整流タンクの陰極部の温度は周囲温度に関係なく、常に任意の温度に保つことができ、その温度分布の調整も可能となり、温度に対する諸特性の測定も可能となった。

内部構造としては中間陽極、格子、バッフルそのほかの電極構造を改造し、電圧耐力、電流容量の増大、ならびに安定度の向上をはかった。その内部構造は第2図に示すとおりである。

* 電気試験所

** 日立製作所日立工場



第1図 液冷式高電圧水銀整流器の外観

3. 回路の変更

整流タンクの改造に伴ない付属装置、変換回路など全体にわたり多くの改造を実施した。これにより、逆弧、消弧、転流失敗などを防止し、動作の安定度の向上を計るとともに、各種の精密な動作特性の測定ができるように改められた。そのおもなものをあげれば次のとおりである。

- (1) 三本の整流タンク(水銀整流器)に対して一括して一つのキュービクルに組み込んでいた点弧回路、格子制御回路などを各タンクごとに分離独立させ、整流タンク自身に対し、最も適切な回路方式を採用した。
- (2) 中間陽極の分圧方式はCR分圧器をも併用できるようにした。

(3) 陽極電流の転流にともなう過渡振動防止装置として、水銀整流器用変圧器直流巻線端子と中性点間および直流電圧端子間に適切な振動防止回路の挿入ならびに陽極リアクトルの強化などを計った。

(4) 等価試験設備を強化した。これにより十分大きな直流電圧を加えたときの負荷耐量の測定ならびに各種の異なった条件のもとでの精密な動作特性の測定を可能にした。

(5) 受電設備の高調波電流補償回路を増強し、十分な連続負荷運転を可能にした。

(6) 整流タンクの温度調整を自由にしたことおよび自動温度調整装置を設けたことにより四季を通じ常に安定な温度維持ができるようにした。

(7) 変換回路の負荷電流(直流電流)の自動調整装置を設けて安定連続運転を可能にした。

(8) 特殊測定装置の開発および測定法の研究により、動作特性の精密な測定が可能となった。

以上により、各種特性の測定により、現象の解明が十分行なえるようになり、最善の動作特性を賦与させることができるとともに、安定な連続運転の実施が可能となり、安定な性能を実証することが期待される。

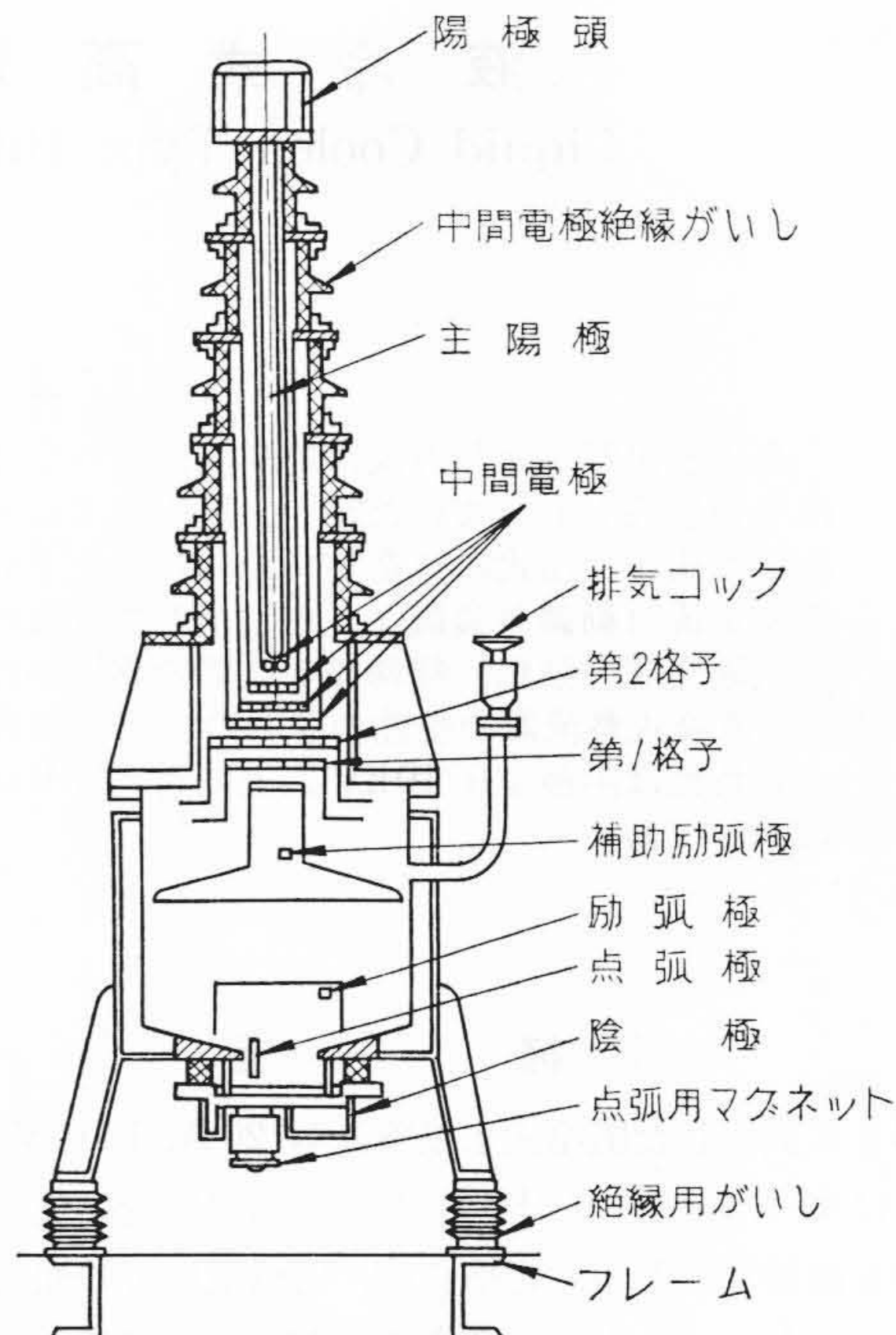
4. 研究問題と研究結果

4.1 整流タンクの電圧耐力

高電圧用整流タンクの電圧耐力の不足は逆弧現象として現われる。したがって、逆弧防止対策は特に必要とされるが、一方、電圧耐力の増強策としては整流タンク内部の構造、特に、格子および中間陽極などの電極構造が適切でなければならない。整流タンクの構造が適正であっても外部回路のいかんによっては非常に電圧耐力が異なるものである。特に陽極電流消滅直後主陽極および中間陽極に加わる飛躍逆電圧の波形の影響は著しい。

整流作用を1回行う1サイクルの期間においても、主陽極に加わる電圧は陽極電流の通電期間を除いた順電圧阻止期間(格子制御が行われている場合)と逆電圧阻止期間とにおいては非常に異なった様相を呈している。また逆電圧期間においても陽極電流消滅直後の消イオン電流の存在する期間と、それが消滅してしまった期間あるいは陽極電流の転流による過渡振動が重畳した期間などによっても非常に異なるものであるにかかわらず、いずれの期間においても十分な電圧耐力を有することが必要である。これには特に基本波電圧に過渡現象が発生した場合それぞれの条件を異にする初期においても、過渡現象の消滅した終期においても十分な耐圧があるように考慮されなければならない。

これらのうち、消イオン電流のない期間においては割合簡単で、過渡振動に対しても適切な中間陽極による分

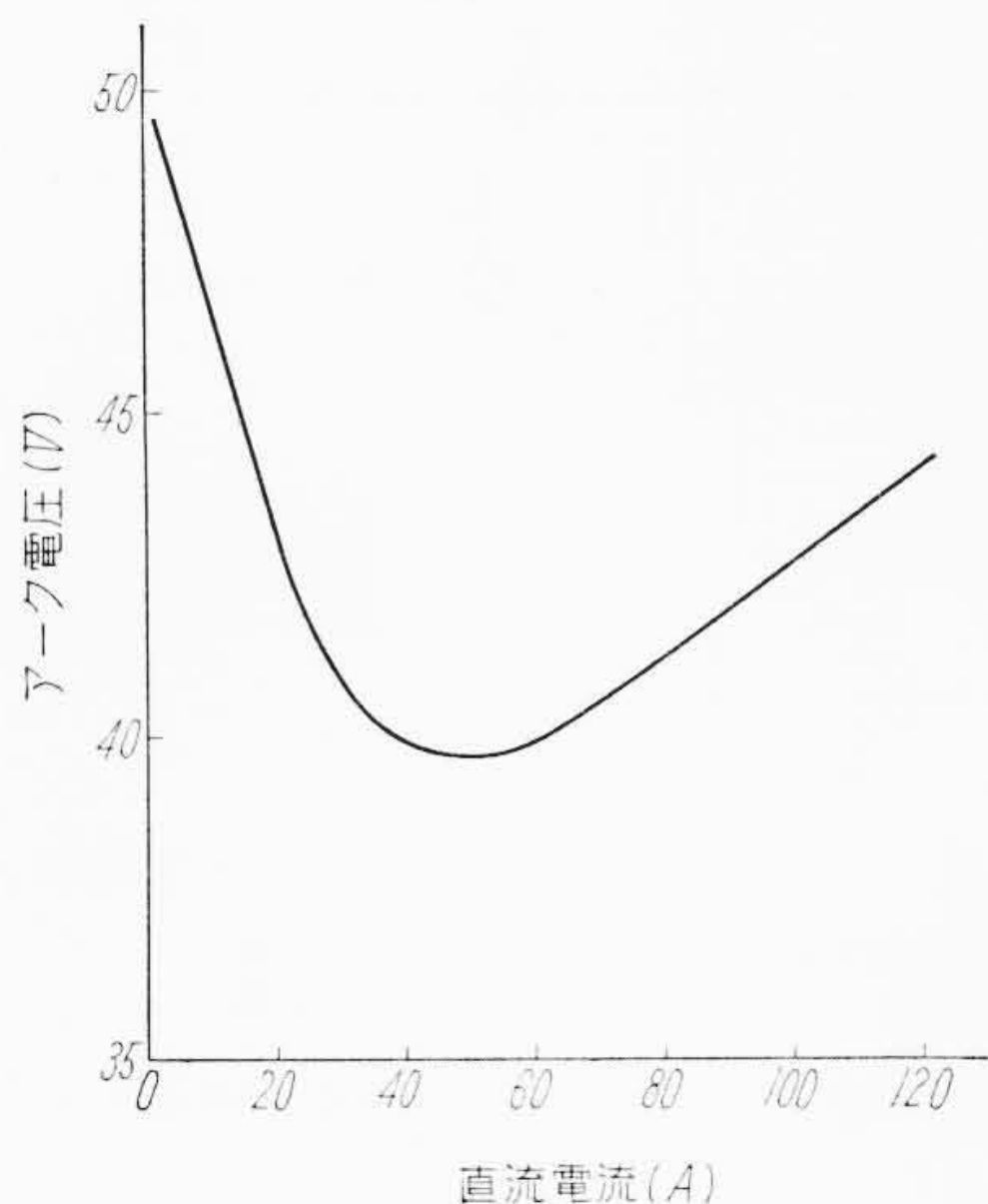


第2図 直流送電用高圧水銀整流器

圧が乱れないような分圧器を用意すること、および飛躍逆電圧の波形を外部より適切なものにさせるところの波形調整回路を設ければよい。しかし、陽極電流消滅直後においては、その消イオン電流の消滅状態により、主陽極および各中間陽極の電圧耐力はそれぞれ非常に異なるもので、それぞれの耐力に應ずるところの分圧方法が採用されなければならない。中間陽極の電圧耐力の回復しない内に、飛躍逆電圧の加わるのを防止するためには、その電極に抵抗を直接接続することが効果的である。

4.2 振動

陽極電流の転流の開始および終了時の現象は相電圧の短絡の開始および開放現象であって、それぞれの瞬時に過渡振動電圧が発生する。特に、水銀整流器用変圧器の巻線電圧が高電圧になると、その過渡振動は非常に大きくなり、その振動周波数も非常に高くなってくる。このため水銀整流器および変圧器の電圧負担を増大するばかりでなく、陽極電流消滅直後、まだ残留イオンの存在する期間に過大な逆電圧が加わることとなり、逆電圧耐力を非常に低下させる結果となる。したがって、飛躍逆電圧の過渡振動の振幅を小さく抑制することおよび振動周波数を低下させるための対策が特に必要である。このためには、水銀整流器用変圧器の直流巻線端子とその中性点間直流回路(たとえば直流巻線の中性点と水銀整流器の陰極)あるいは陽極陰極間に振動防止回路をそう入することが有効である。



第3図 アーク電圧特性曲線

4.3 消 弧

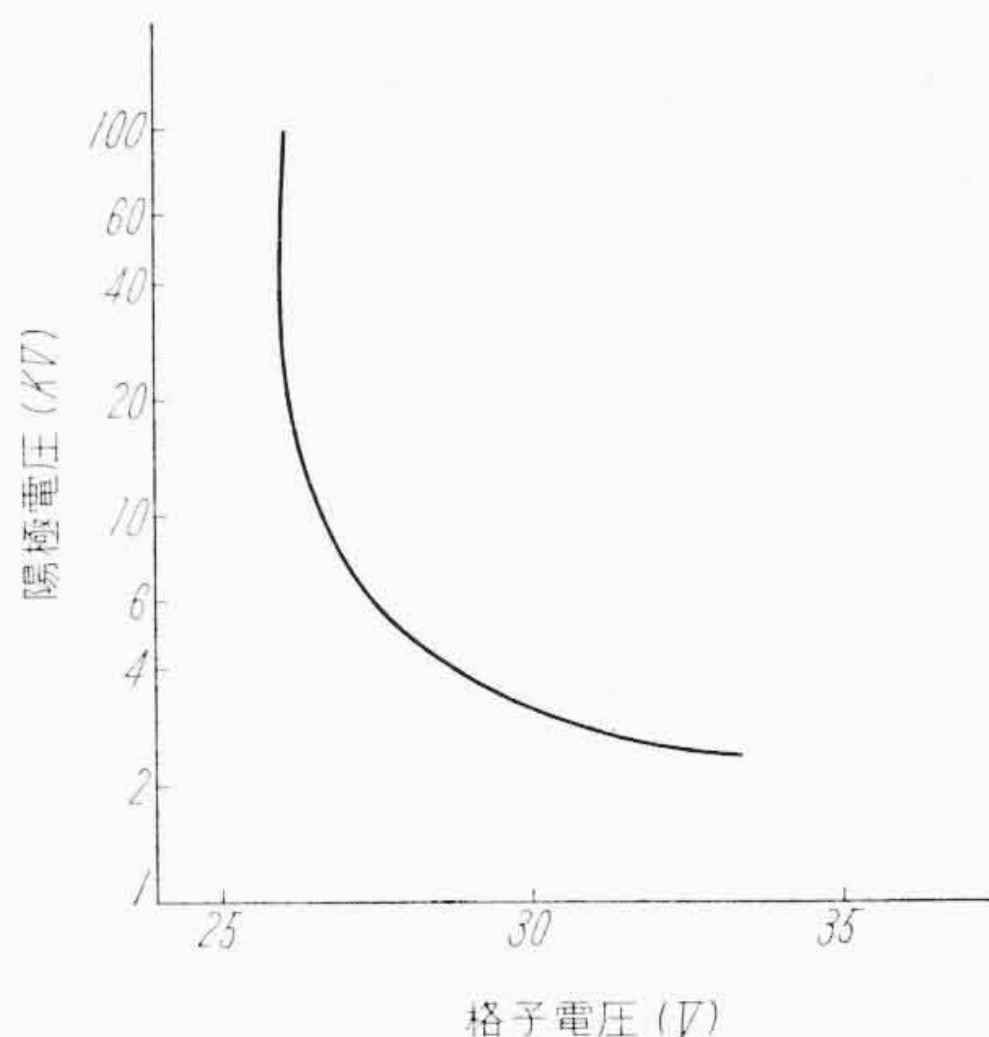
整流回路の電圧が特に高くなり、格子制御を行わないときの直流電圧が数万ボルトに達すると、常時励弧電流を通じ、陰極輝点を維持しているエクサイトロンにあっては、変換装置の負荷運転中に突然その陰極輝点が消滅し（もちろん励弧電流も消滅）、その運転が中断されてしまうことがある。この消弧現象の発生により、水銀順変換装置にあっては直流電圧の低下となり、水銀逆変換装置にあっては転流失敗現象を発生し、運転は中断される。

この消弧現象は陽極電流の転流瞬時に発生する非常に短時間の過渡現象であって、回路電圧の高くなるほど整流タンクの陽極部の対地静電容量の大きいほどその発生ひん度は顕著となってくる。この現象は同一の回路条件において順変換装置側よりも逆変換装置側に著しく現われる現象であって、これからしても逆変換装置には特殊な負担の加わっていることが知られる。一方水銀逆変換装置に加わる逆電圧値は順変換装置のそれより小さいので逆弧現象の発生は順変換装置のそれより非常に少ない。

この消弧現象の防止対策としては、陽極回路に特性のすぐれた陽極リアクトルをそう入すること、格子および励弧回路を電圧サージに対して十分安定ならしめること、変換回路の接地方法、接地箇所を適切なものとし、陽極部の有する対地静電容量をなるべく小さくすることなどの諸対策を総合的に実施することにより完全に防止することができる。

4.4 温度制御

水銀整流器の特性および性能は主として陰極部の温度により非常に相違するものであるが、特に高電圧水銀整流器においては精密な温度調整が必要とされるばかりでなく、器壁、陽極部そのほかの部分の温度分布にも影響されるところが多い。これらの最適値は温度に対する動



第4図 格子による主陽極の点弧特性

作特性より決定されなければならないが、陰極部の温度は15～25°Cの間に維持されなければならない。

4.5 格子および点・励弧回路

格子および点・励弧回路は転流にともなう過渡現象に対しても安定であることが必要であると同時に陽極電流消滅直後の消イオン作用が急速に行われるように選定されなければならない。格子電圧値およびその波形は1,500 V 級のものとは大差ないものでよい。陽極と陰極との間

の距離が比較的長いいため補助励弧極を備えているが、その電流値およびその波形(陽極電流との位相関係)は動作特性に大きく影響するので適切な値に選定されなければならない。

5. 高電圧水銀整流器の基本特性

現在までに求められた液冷式水銀整流器の基本特性について述べる。

5.1 アーク電圧

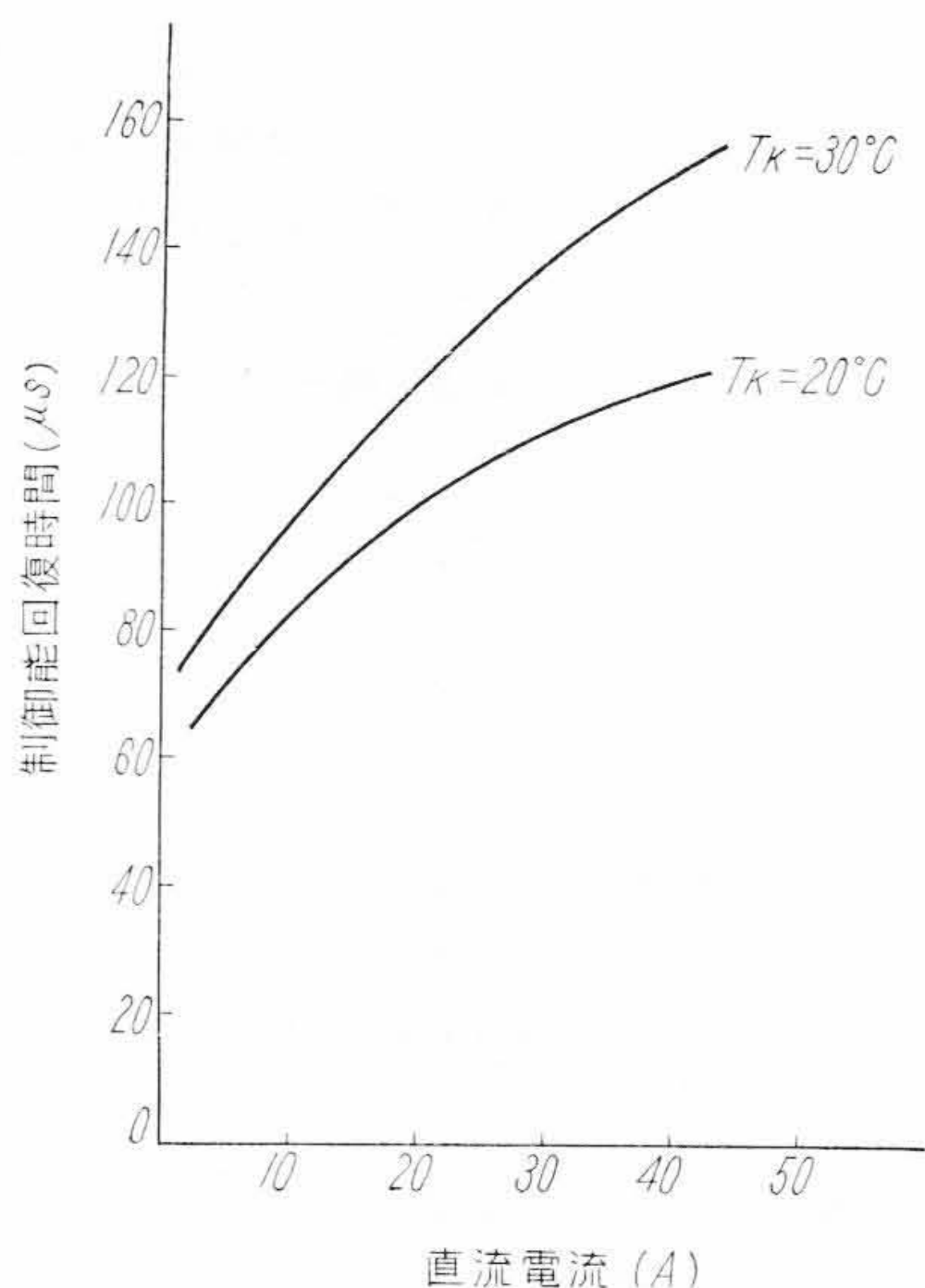
アーク電圧は低電圧三相半波整流回路において、その動作時の陽極・陰極間電圧波形をブラウン管オシログラフにより測定したものである。その特性曲線は第3図に示すとおりである。本高圧水銀整流器の定格は20/40 A, DC50/25 kV (平均値) であるが、図には120 Aまでの特性が示されており、アーク電圧は直流電流40 Aで最小値を示し、非常に余裕のあるものとなっている。また、その電圧値は約40 Vで4個の中間陽極を備えているにもかかわらず、あまり大きな値とはなっていない。

5.2 主陽極の点弧特性

主陽極に一定の直流電圧を印加しておき、格子の電圧を低い値より徐々に増大して行った場合、主陽極が放電を開始するときの格子の臨界電圧特性を示せば第4図のとおりである。この格子制御特性は正特性で格子電圧を+25 V以下に保つときは十分大きな陽極電圧に対して、その放電を抑制できるものであり、陽極電圧が10 kV以上の範囲における格子電圧の変化は少なく、ほぼ一定値を示している。

5.3 制御能回復時間

水銀アーク変換装置の動作時において、整流タンクの陽極電流消滅直後その内部には水銀イオンが残留し、これが十分消滅しない内には、格子による制御能は回復できない。すなわち一度放電した陽極はその陽極電流が消滅しても絶縁が回復するまでしばらくの時間(数100マ



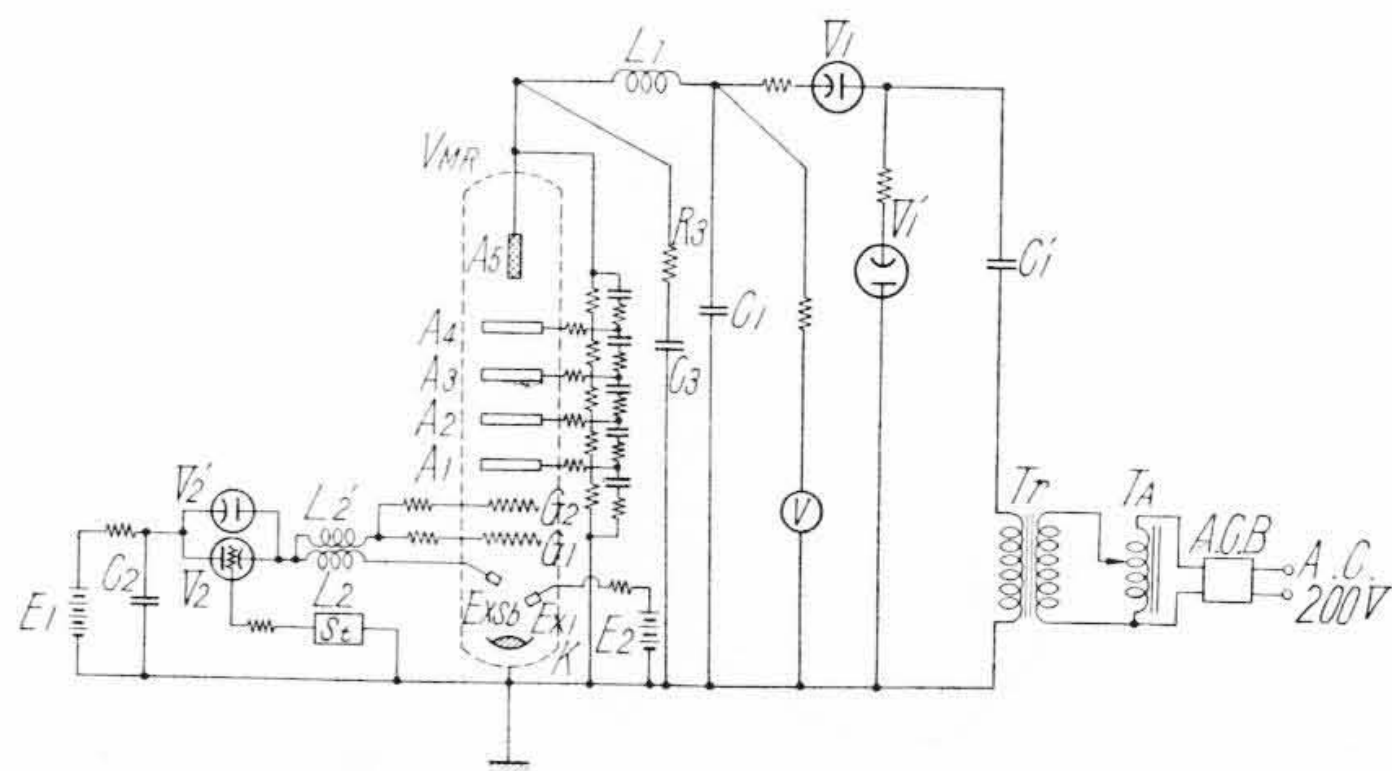
第5図 制御能回復時間特性曲線

マイクロ秒)を必要とする。この値は特に逆変換装置としての性能にたいするものである。この制御能回復時間の測定には2本の整流タンクを用いた並列形抵抗インバータ回路⁽⁴⁾を用い、その回路常数を調整して転流失敗を発生する時の動作波形および回路常数より求めた。第5図は直流電流値に対する制御能回復時間特性を示している。直流電流の大きいほど、制御能回復時間は大きくなっているが、直流電流40Aに対して120マイクロ秒(2度:電気角)ということは逆変換装置として使用した場合すぐれたものであることを示している。比較のために陰極温度(T_K) 30°Cの場合示しているが、これより使用範囲においてはあまり大きな差異のないことが明らかである。

6. 等価試験

水銀整流器の特性および性能の測定に当っては、周囲状況、回路条件あるいは電圧、電流値などを種々変えた場合の特性の測定が必要とされる。これには高電圧水銀整流器の場合、実回路、実負荷による試験より、等価試験によるほうが、各種の条件が自由にかつ割合容易に選定できるため特に有利である。等価負荷耐量試験に用いられた試験装置の接続回路を示せば第6図のとおりである。この試験においては、所定陽極電圧で、所定の波形を有する陽極電流を通じた後に、所定の値および波形の飛躍逆電圧を加えることにより、その逆電圧耐力を試験するとともに各部位の動作波形を測定することができるようになっている。なお、整流タンクの格子は起動パルス付勢した後はバイアス電圧だけが加えられるようになっている。

次に、等価試験回路の動作について説明する。コンデ

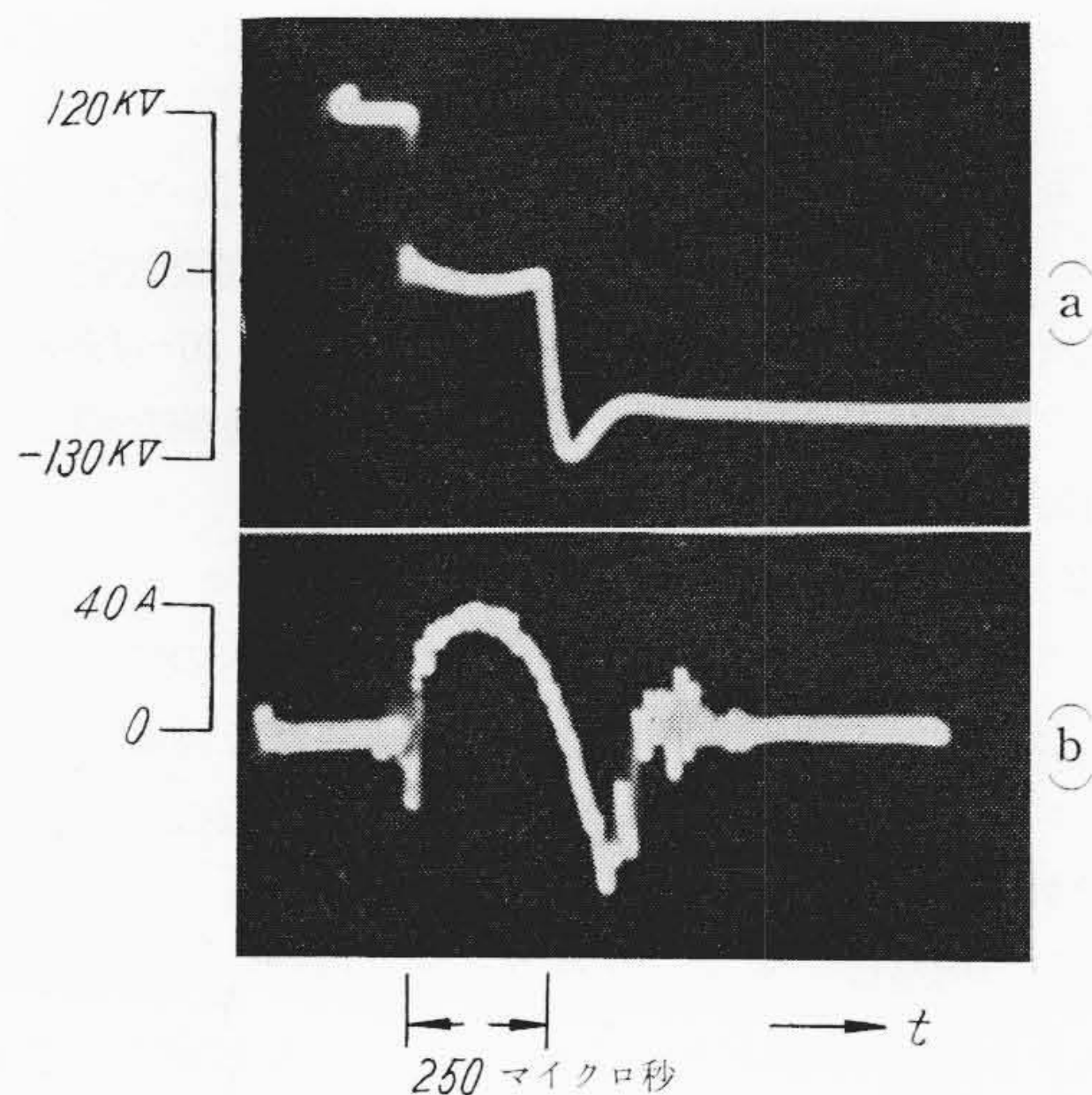


- | | |
|--------------------------|--|
| A1~A4: 中間陽極 | L2: 格子および励弧電圧用リアクトル |
| A5: 主陽極 | K: 陰極 |
| A.C.B.: 高速度過電流遮断器 | S _t : 起動装置 |
| C1: 試験電圧印加用コンデンサ | T _A : オートトランス |
| C2: 格子および補助励弧用コンデンサ | T _r : 試験電圧用変圧器 |
| E _{XI} : 励弧極 | V: 電圧計 |
| E _{XSb} : 補助励弧極 | V ₁ , V _{1'} : ケノトロン |
| G1, G2: 格子 | V ₂ : サイラトロン |
| L1: 試験電圧印加用リアクトル | V _{2'} : 整流管 |
| | V _{NR} : 供試高電圧用水銀整流器 |

第6図 等価試験回路図

ンサ C_1 は変圧器 T_r 、ケフトロン V_1 、 V_1' およびコンデンサ C_1' により所定の試験電圧値に充電されている。一方、所定のバイアス電圧に充電されたコンデンサ C_2 は起動装置 S_t によりサイラトロン V_2 およびリアクトル L_2 、 L_2' を通じて、補助励弧電流を通じ、かつ格子電圧を付勢する。この格子付勢電圧の印加と同時にコンデンサ C_1 はリアクトル L_1 を通じて整流タンクに放電電流を通じる。この放電電流によりコンデンサ C_1 は逆充電されるから、放電電流消滅直後、整流タンクの陽極には飛躍逆電圧が加わる。この飛躍逆電圧の波形は抵抗 R_3 、コンデンサ C_3 により所定の形(所定の dE/dt)に選定されている。陽極に加えられる試験電圧はオートトランス T_A により所定の値に調整される。なお補助励弧電流の通電時間、および格子電圧の正の幅は陽極の放電時間より小さい適当な値に選定されている。したがって、飛躍逆電圧の印加瞬時には格子に逆充電された C_2 の電圧がバイアス電圧として加えられている。

次に、この試験結果の代表例として試験電圧を +120 kV、陽極電流を 40 A としたときの作動波形を示せば第7図のとおりである。(a)図は整流タンクの陽極陰極間電圧波形を示したもので、順電圧 120 kV に対し十分よく耐えている。そこで放電電流を 250 マイクロ秒間通じた後に逆電圧 130 kV(max)が加わっているが、これにもよく耐えていることが明らかに示されている。(b)図はリアクトル L_1 の電流波形を無線式遠隔現象波形測定装置(後述)により同時に測定したもので、よい正弦波の電流を 250 マイクロ秒の間通じていることが明らかである。これに含まれている高調波分は放電に伴う無線雑音であり、また逆電流はコンデンサ C_2 の放電電流によ



(a) 陽極，陰極間電圧波形
(b) 試験電圧印加用リアクトル(L₁)の電流波形
(無線式遠隔現象波形測定装置による)

第7図 等価試験における動作波形

るものが現われている。

7. 測定装置の改良

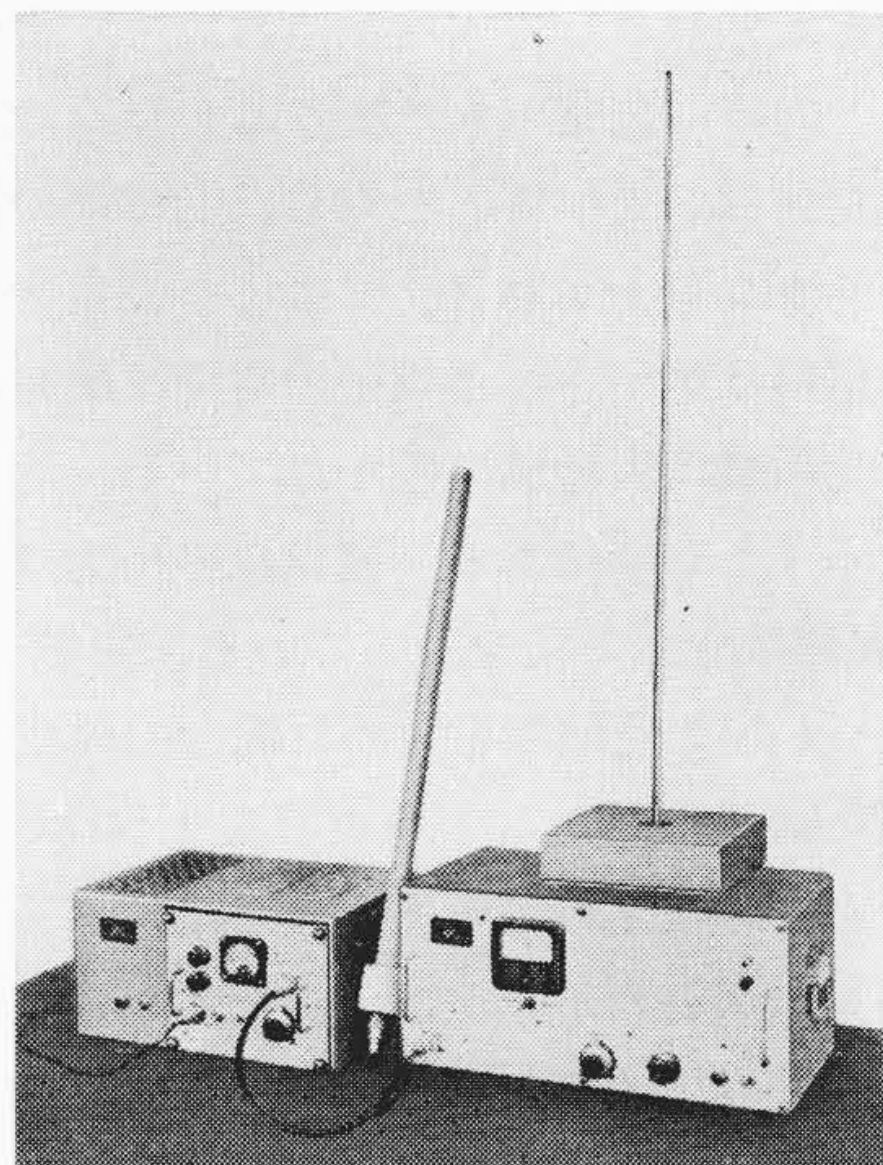
高電圧水銀整流器の合理的な設計，および回路常数の決定のためには性能および動作特性の精密な測定が必要とされる。しかし，これらの測定には種々の特殊な条件が含まれているため，従来の測定器では十分その目的を達することができないので，本研究のため特に開発された測定装置について述べる。

7.1 高速度回転ドラム形ブラウン管オシログラフ

多相整流回路を用いた水銀アーク変換装置にあっては基本周波数1への間において，整流相数だけの開閉作用が行われるものであって，その間に瞬時的過渡現象が多く含まれるものである。したがって，その動作状態を知るためには1への間にわたって正確な波形を測定することが必要とされる。このため高速回転ドラム形ブラウン管オシログラフを試作した。

本装置は後段加速2ビームブラウン管を3本使用した6素子オシログラフである。各ブラウン管の輝点はレンズにより回転ドラムのフィルム上に集められており，現象波形の撮影に当っては時間軸掃引を与えず，ドラムを高速度に回転させることにより，ドラムの1回転の時間だけ撮影をするようにしたものである。

本装置によりAC50への1への波形を長さ50 cmのフィルム上に各素子とも約50 mmの振幅で十分鮮明に記録することができる。記録される現象波形に対する周波数特性は真空管回路による増幅器の制限を受けるだけであるから，0～100 kcの範囲において均一な特性を備え



第8図 遠隔現象波形測定装置

ている。すなわち，波形は40 μ /mm以上の分解能を有しているから，50へに重畳した100 kcの波形まで正確に記録することができる。なお，ドラムの回転数を増大すれば100への波形を1へだけを50 cmにわたり記録することもできる。

なお，本装置はブラウン管に時間軸掃引を与えて，繰り返し現象波形の観測もできる。さらに単掃引による過渡現象の測定もできるようになっている。

7.2 遠隔現象波形測定装置

水銀アーク変換装置の運転時の動作特性の測定に当っては，大地側より見た各部位の電圧，電流波形ばかりでなく，互にそれぞれの電位を異にする部位の動作波形，たとえば陽極電流波形と格子電流波形，あるいは本実験設備のように水銀順変換装置と逆変換装置とを同時に運転したときの両者の陽極電流波形などを同時に，しかも大地側において測定できないものが多く含まれている。

このように，互に電位を異にする各部位の動作波形を大地側において同時に測定するため測定装置として磁気増幅器を応用した直流電流波形測定装置および無線通信を応用した遠隔現象波形測定装置を開発した。

(1) 直流電流波形測定装置

本装置は特に水銀整流器の陽極電流およびその直流電流波形測定ならびに監視用として作られたものである。この一次巻線は大地に対し，DC 50 kVの絶縁耐力を有している。二次巻線のための補助交流電圧にはAC 400へを用いている。したがって，高電位における電流波形を割合正確に測定することができる。また，直流電流の急激な変化は少なくとも1.25ミリ秒以内に検出できるので事故電流の検出回路としても利用することができる。

(2) 無線式遠隔現象波形測定装置

本装置は任意の電位を有する箇所の電圧，電流波形

を無線通信を仲介として大地側において、そのほかの動作波形と同時に測定できるようにしたものである。本装置は発信機と受信機とを有し、受信機の出力電圧波形をブラウン管オシログラフにより測定するものである。発信機は測定される端子の電位に絶縁して取付けられ、受信機は大地側に置かれている。その外観は第 8 図に示すとおりである。発信機の出力は 100 Mc, 1 W で周波数変調方式を用いている。変調周波数は ± 100 kc 以上で受信機を含めた総合的周波数特性は 20 c/s $\sim$ 20 kc/s にわたって均一であり 50 kc 程度の高調波分を有する現象波形の測定が可能である。しかし、整流回路電圧が数万ボルト以上になると放電にともなう雑音が幾分混入することは避けがたい。第 7 図(b) は本装置により測定された DC 120 kV の電位における電流波形の一例を示している。同時に測定された (a) 図の電圧波形と比較して、割合短時間の瞬時現象であるにもかかわらず、正確な波形の測定されていることが示されている。

7.3 偶発現象測定装置

水銀アーク変換装置の運転時には逆弧消弧あるいは転流失敗というような偶発性の過渡現象がときたま発生することがある。これらは一般に非常に発生確率の小さいものではあるが、変換装置の安定な運転を阻害するものであって、それらの発生原因の探求、解析、防止対策の確立などのために、それらの過渡現象をその発生の前後にわたって相当の期間正確に測定記録することが必要である。このために磁気記録方式を応用した測定装置およびブラウン管オシログラフを応用した測定装置を試作した。

(1) 磁気記録式偶発現象測定装置⁽⁵⁾

本装置は磁気記録装置により偶発的過渡現象の発生前に引続き発生後の波形を記録しておき、あとで、再生装置およびオシログラフにより、その現象波形を再現し、記録するものである。

構造の概要は、記録テープが円筒に巻き付けられた無終端で、その記録ヘッドにより記録され常にその半分は過去の現象波形を保有している。いま測定すべき過渡現象の発生を検出した信号が与えられると、消去ヘッドは動作を中止し、過去の波形を保有したまま過渡現象波形の測定を続け、残りの半回転後に記録ヘッドの動作が停止するようになっている。後刻、再生装置だけを動作させオシログラフにより波形を再現記録させることにより現象波形が得られる。

本装置は発生確率の小さい偶発現象の測定ができるように長時間の連続運転を考慮して、記録テープと各ヘッドとの間に 0.1 mm の間隔がとられている。したがって、ほとんど消耗部分はない。しかし、このため

記録テープの記録には周波数変調方式が用いられている。

記録、再生回路はすべて真空管回路を用いているため、入力は小さくてよい (10 mW 以下) が周波数変調方式を用いているため、総合的周波数特性は 20 $\sim$ 1,000 サイクルにわたるに過ぎない。しかし、定量的な測定も可能である。

(2) メモリブラウン管オシログラフ⁽⁶⁾

本装置はブラウン管の残光を利用したもので、前者の磁気記録方式のものに比べて記録される時間は短かいが総合的周波数特性がすぐれており、取扱いも簡単である。

その構造は、まず、ブラウン管には常時時間軸掃引を与えて、現象波形をかかせておく。いま測定すべき過渡現象の発生を検出した信号電圧により、ブラウン管上の波形を撮影するカメラのシャッターを開放させて撮影を開始する。一方任意に調整された所定の時間後にブラウン管の輝度変調によりその輝点を消滅させる。したがって、フィルム上には残光による過渡現象発生前の波形と同時に所定の時間の過渡現象波形とが記録される。また、記録波形の分解能を向上させるために時間軸掃引の数すなわち走査線は 1 本より 10 数本まで適当に選定することができる。

これにより、過渡現象発生前の波形は約 0.06 秒 (50 $\sim$ で約 3 $\sim$ 以上)、発生後の波形を 0.15 $\sim$ 0.02 秒間鮮明に記録することができる。

本装置はほとんど電子管回路だけでなりたっているため波形測定のための周波数特性は非常によく 0 $\sim$ 50 kc の間にわたって十分正確に測定することができる。したがって直流回路の過渡現象も非常に正確に記録することができる。

8. 結 言

液冷式高電圧水銀整流器の概要と、これまでに行われた研究結果の概要について述べたが、試験装置の整備と測定装置の改良とにより、一層精密な動作特性の測定により、高圧水銀整流器本来の特性が解明され、より合理的な設計方法ならびに使用方法が究明され、十分安定な高電圧水銀アーク変換装置の運転の確立されることが期待される。

参 考 文 献

- (1) 桑嶋, 曾根田: 日立評論 37, 1265 (昭 30-9)
- (2) 馬淵, 毛利: 電学誌 77, (830) 1505 (昭 32-11)
- (3) 同 上: E. T. J of Japan 4, 37 (Jun. 1958)
- (4) 電気学会「水銀整流器」: p. 182 (昭 28-5)
- (5) 法貴, 馬淵: 電試彙報 20, (8) 565 (昭 31-8)
- (6) 馬淵, 渡辺: 同 上 22, (8) 623 (昭 33-8)