U. D. C. 621.314.65

水銀整流器の性能

Characteristics of Mercury Arc Rectifiers

木村鍾治* 岩田幸二* 浅野弘**
Shōji Kimura Kōji Iwata Hiroshi Asano

内容梗概

水銀整流器の性能は電圧，電流をはじめとする多くの要素によって決定される。まず実負荷運転の状況を種々な測定器を利用して十分に検知し，この知識に基いて多くの現象を分析し，その目的に応じた基礎研究や等価試験によって性能を追究し，逆耐電圧を中心として研究を進め，全体として実用上十分な水銀整流器の完成に到達した。

1. 緒言

水銀整流器は従来長く使用されてきた電鉄用や化学用のほかにも電動力応用あるいは逆変換器として使用され，最近は交流車両用として使用されるようになった。したがって水銀整流器もこれらの用途に適するように設計せねばならない。その設計に当っては常に用途を念頭におき，これにともなう種々の条件を考慮して性能を決定せねばならない。ここに常に性能の研究が必要となる。

水銀整流器の性能には電流，電圧，温度はもちろんのこと負荷状態，整流器用変圧器の特性，点励弧，格子回路などの要素が関連するが，水銀整流器本体についてもっとも重要なのは逆耐電圧と異常電圧である。温度に関連して表現すれば高温特性と低温特性である。これらの問題についてわれわれの研究の概略を述べてみたいと思う。

2. 水銀整流器の研究過程

2.1 逆耐電圧の分類

水銀整流器について逆耐電圧というのは要するに陰極から陽極に向って電流の流れる逆弧現象の起る限界電圧のことである。逆弧発生位相を分類してみると

(1) 種々の位相において起り，意外に低い電圧にてもおこる場合[1]

(2) 転流直後において起る場合

(3) 逆電圧最大値付近において起る場合

のようになり，(1)～(3)のどれもが起る場合もあるし，そのうち一つだけ起る場合もある。逆弧発生時の逆電圧はそれぞれ異なっていて，分離できなかった場合には逆耐電圧はまったく広い範囲に種々な値を示して解明が困難であったが，最近の研究においてはこれらを分離することができる。

(1)はいわゆる異常逆弧と呼ばれるものであって内部のよごれや水銀粒などに影響されている[1][2]。これはまず最初に絶滅せねばならぬ問題である。(2)は転流直後に陽極付近に残留したイオンが陽極に衝突して逆弧を発生せしめるものであって，構造や負荷状況に関係する[2]。格子制御を行う場合には特に考慮せねばならぬことであって，従来もつとも研究の対象となってきた。(3)は本質的に整流器の逆耐電圧という言葉にふさわしいものであって，構造，温度に関係している[3]。

(1)の異常逆弧については日立製作所において材料，構造，使い方の問題を研究した結果，この種類の逆弧をまったくなくすることができ問題にすることはなくなった。したがって(2),(3)について述べてゆきたいと思う。

2.2 逆弧位相

各位相における逆耐電圧を測定するのには等価試験によって実験の逆電圧期間において人為的に高い逆電圧をかけて逆弧させる方法をとってきた[2][4]。これによって大体の逆耐電圧の実態を知ることができるけれども，実際問題として現実に運転されている整流器において逆弧はどんな位相において起るかをはっきりさせる必要に迫られた。このためわれわれは偶発現象撮影装置や現場の作業者にも簡単に取り扱うことのできる逆弧検出装置を駆使して研究を推進した。くわしい波形の研究などには前者を使用したが，簡便に逆弧極およびその逆弧位相を検出するには後者がまったく好都合であった。

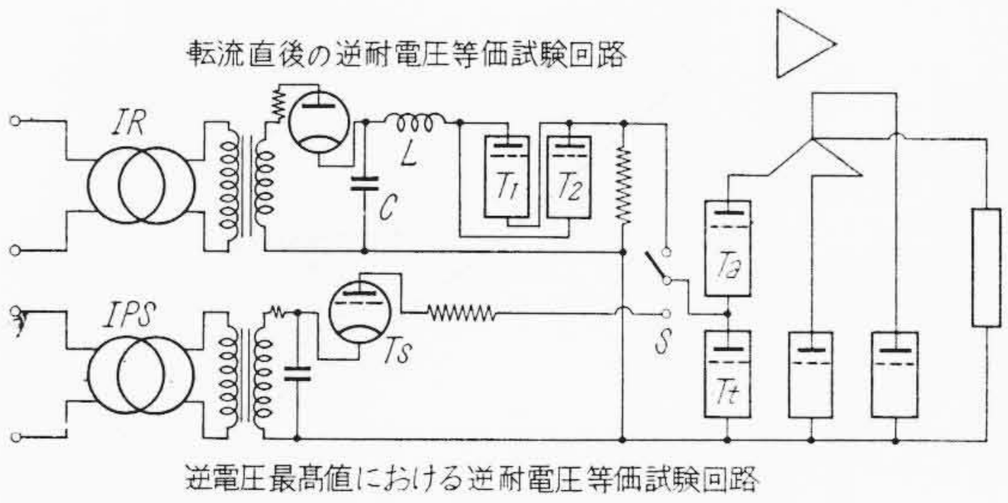
これによりわれわれはいろいろの用途の整流器に対して逆弧の種類を判別することができるようになり，それによってまた対策をたてることができるようになった。

2.3 等価試験

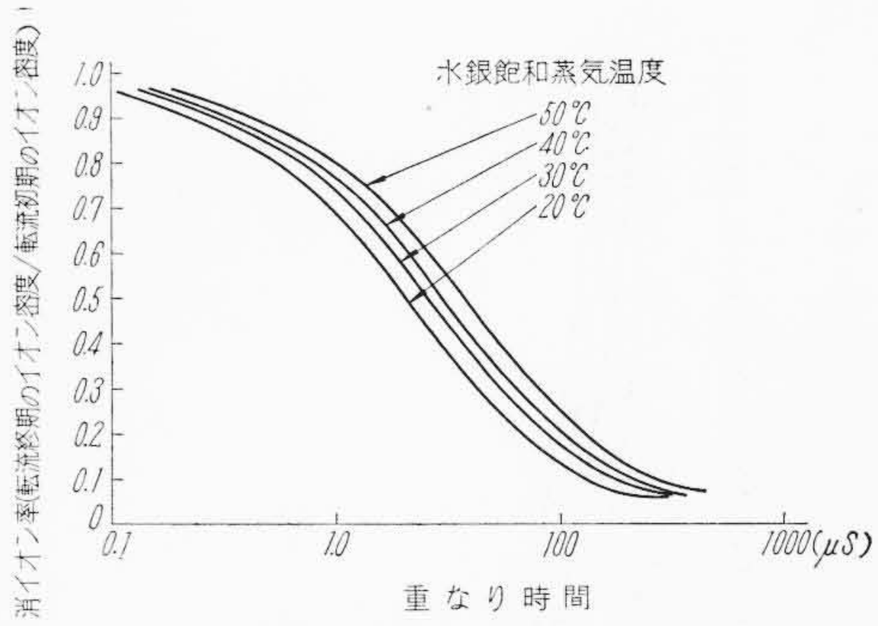
水銀整流器の研究に当って実負荷にておいて行うことがもっとも正確であるけれども実際上の問題として多額の電力と時間を必要とする。実際運転の状況が明瞭になった現在においては等価試験が大きな意味をもってくる[1][6]~[8]。つまりわれわれは問題を集約して等価試験を行うことができる。

もっとも一般的に行われてきた等価試験は転流直後の等価試験である。これは有名な K. H. Kingdon および

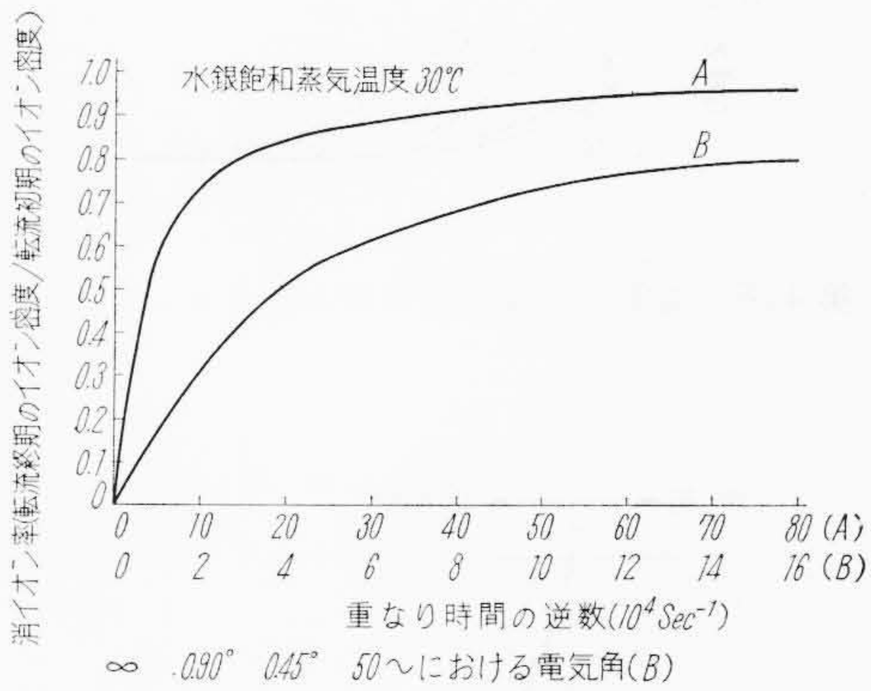
* 日立製作所日立研究所
** 日立製作所日立工場



第1図　等　価　試　験　回　路



第2図　重なり時間に対する消イオン率



第3図　消イオン率と重なり時間の逆数

B. L. Lawton[1]が初めて提唱して以来種々くふうが行われてきた。その基本的回路は**第1図**のとおりである。同図Sを上に接続すればこの回路になる。供試タンクT_tには補助タンクT_aを通して低電圧にて所望の電流を流しておき，転流終期において制御タンクT_1を動作させると正に充電されたコンデンサCよりリアクトルLを通ってT_tに放電電流が流れる。これは振動電流となり，電流OAになったときT_tには高い負の逆電圧がかかる。コンデンサからの放電電流が流れている間に補助タンクT_aが制御能を回復しているので，T_tに負電圧がかかってもT_aを通って電流の流れることはなく，変圧器の低圧巻線に大きい電圧の加わることはない。ここで整流器の運転に合うようL，Cの値を選ぶことが重要である。

次に逆電圧最高値の逆耐電圧を求めるには**第1図**Sを下に接続し，通流停止期間にT_tに高い負電圧が加わるように制御用放電管T_sを働かせる。これによって逆弧したかどうかを判別することができる。

われわれは以上のように運転中“何が起っているか”ということを知って研究点を明らかにし，ある時は基礎的な研究により，ある時は等価試験により，水銀整流器の不明点を明らかにしてきた。今では転流直後の問題も，逆電圧最高値の逆弧もまた後記する低温特性の問題点もまったく解決することができるようになった。

3.　転流直後の逆耐電圧

3.1　転流終期のイオン密度

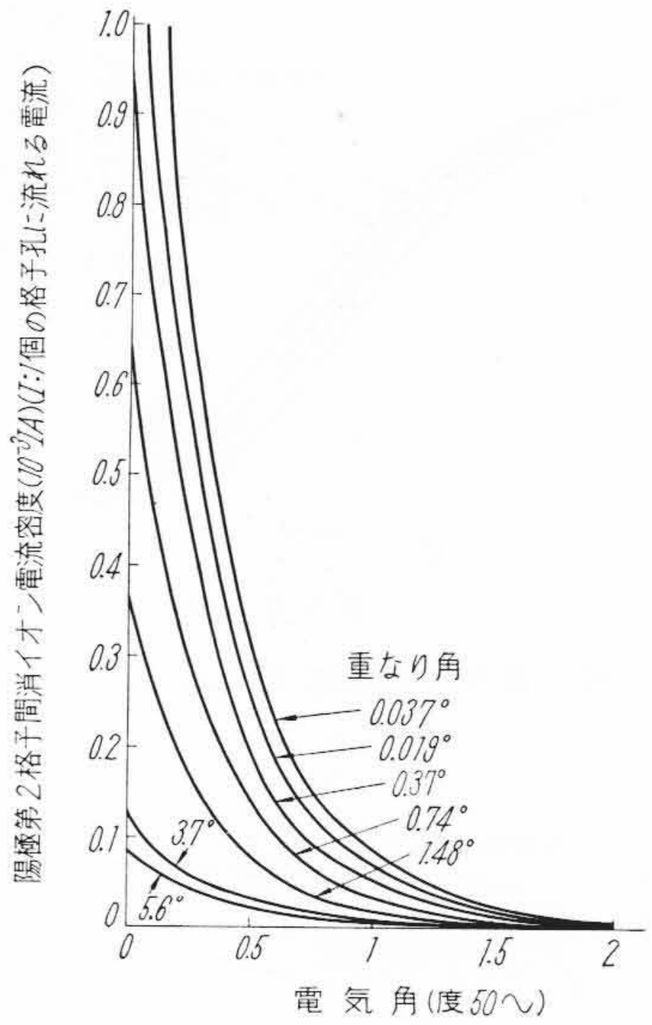
まず転流直後における陽極付近の電荷の様子を考えてみよう。アークの状態は格子を含む陽極付近の構造，電流および水銀飽和蒸気温度によって定まる。これらの量から転流が始まる直前の陽極付近のイオン密度を算出することができる[9]。次に転流が始まると電流が減少すると同時にイオン密度も小になるが，なおイオンは残留して，通電が終っても残留イオンとして残る。これも算出することができ消イオン率(転流終期のイオン密度/転流初期のイオン密度）は**第2図**のようになる。これにより重なり時間，すなわち電気的には重なり角が大になれば残留イオンも少なくなることがわかる。初期における等価試験の根拠とするところは残留イオン密度が$\frac{di}{dt}$（iは陽極電流）に比例するということであった。この点を検討してみよう。**第2図**を書き直し，重なり時間の逆数を横軸にとって水銀蒸気温度30°Cの場合をかけば**第3図**のようになる。N_0を転流初期のイオン密度とすれば重なり時間の逆数は略$\frac{1}{N_0}\frac{di}{dt}$に比例する量である。したがって重なり時間の逆数にして$4\times10^4\,s^{-1}$以下（50～電気角では0.45度以上）においては転流終期のイオン密度は$\frac{di}{dt}$に比例することになり，重なり時間が小になれば次第に転流初期のイオン密度に関係してくることになる。ただしこの特性は水銀整流器の構造によって変化することに注意せねばならない。

3.2　転流が終ってのちの逆電流

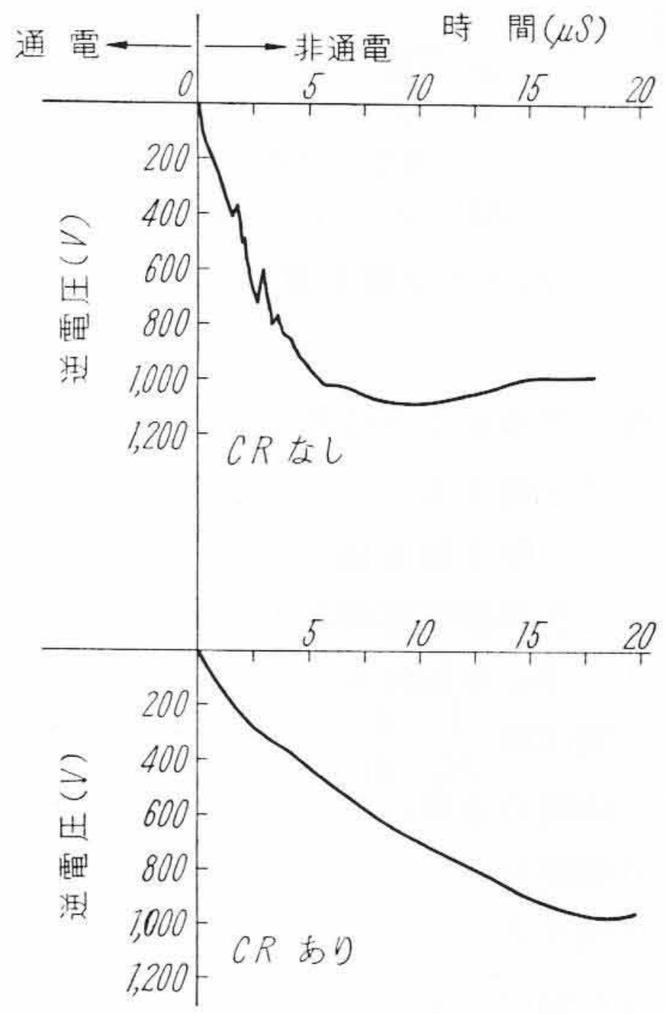
転流が終ってのちはイオンの自然拡散消滅が行われる。格子下から流入してくる電流は考えないことにして，陽極格子間の残留イオンによる陽極への逆電流を算出するとたとえば**第4図**のようになる。重なり角が変化すれば転流終了後の逆電流は変る。

3.3　転流終了後の逆耐電圧

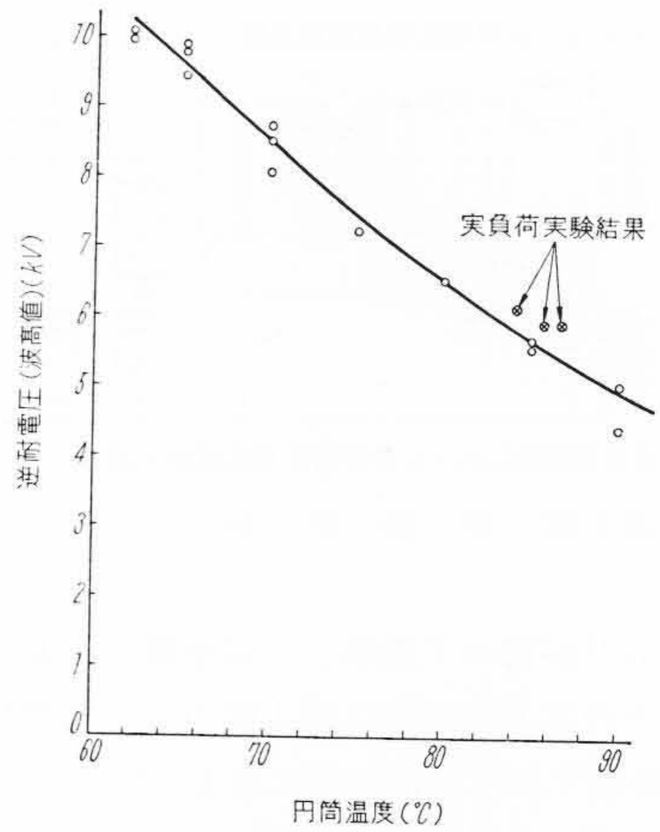
転流終了後の逆電流がわかれば逆耐電圧を推定することができる。種々な基礎的研究を行った結果逆弧は一般に(逆電流密度)×(逆電圧)がある値に達すると発生する



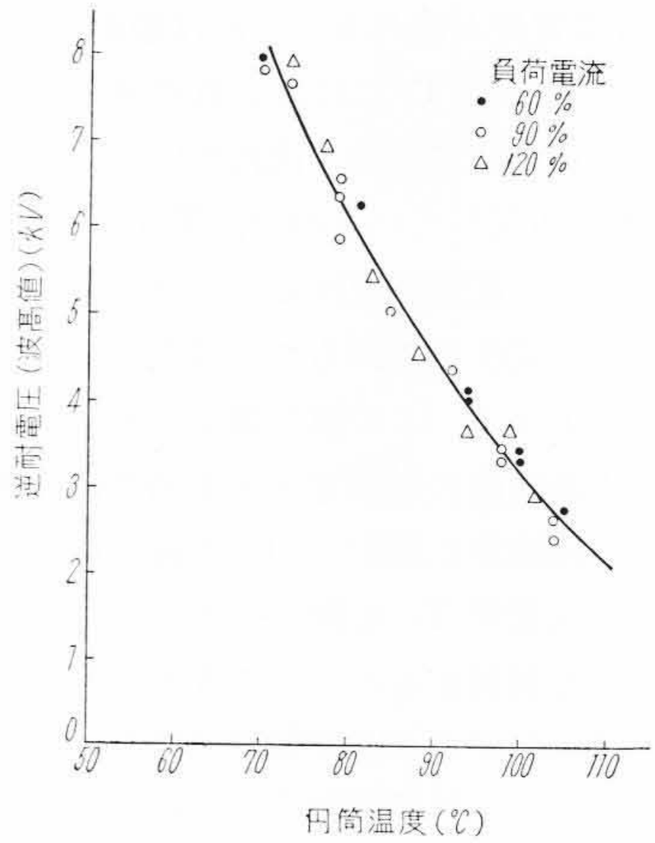
第4図　通電停止後の電気角と消イオン電流密度



第5図　振動防止回路の効果



第6図　円筒温度と逆耐電圧



第7図　定常状態における円筒温度と逆耐電圧の関係

ることを確めた。この値と**第4図**の結果を使用して逆耐電圧を求めることができる。

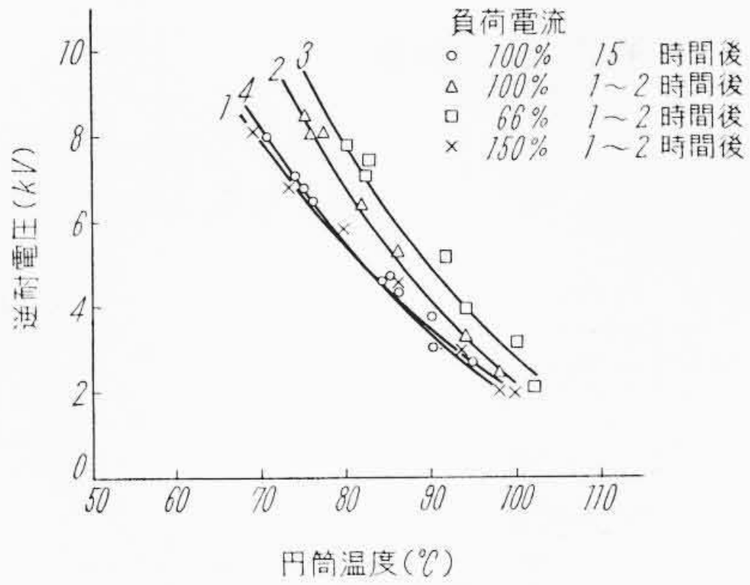
3.4　転流時の振動

整流装置は変圧器や直流リアクトルなどを含んでおって，この回路にはインダクタンスや漂遊キャパシタンスが存在する。したがって転流直後の逆電圧は振動波形となる[(2)(10)]。この逆電圧のかかり方によって逆弧の発生状況が定まる。ときにはこの漂遊キャパシタンスによって転流が行われることもあるのでよく実際の運転状況を観察せねばならない。逆電圧の一例をあげると**第5図**のような である。陽極陰極間に抵抗とコンデンサを入れて逆電圧波形をゆるやかにすることができる。以上のように転流直後の逆耐電圧はVを逆電圧とし$V\frac{di}{dt}$のみによって左右されるものでなく，$V\frac{di}{dt}$，$i\frac{dV}{dt}$，すべてに関係し，本項にのべたような方法によって解決することができる。したがってC, R 付の逆弧ひん度は実質上次章の逆電圧最高値の逆弧の場合と一致する。

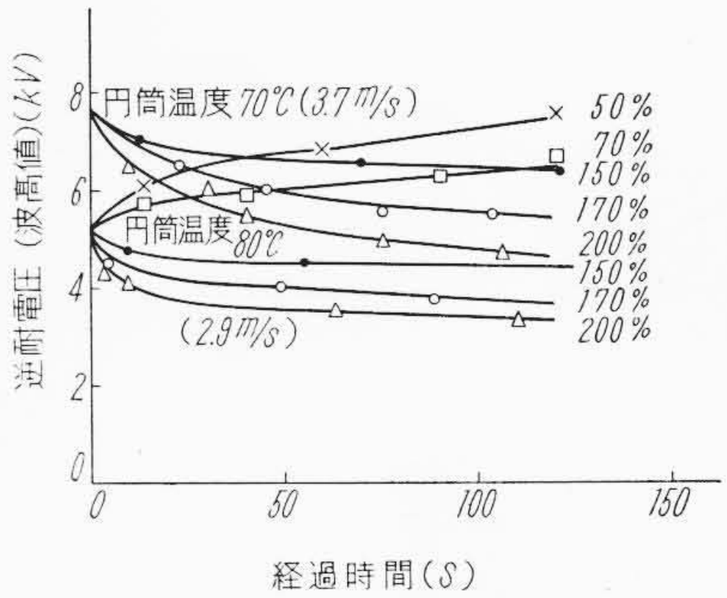
4.　逆電圧最大値における逆耐電圧

4.1　定常状態における逆耐圧と円筒温度の関係

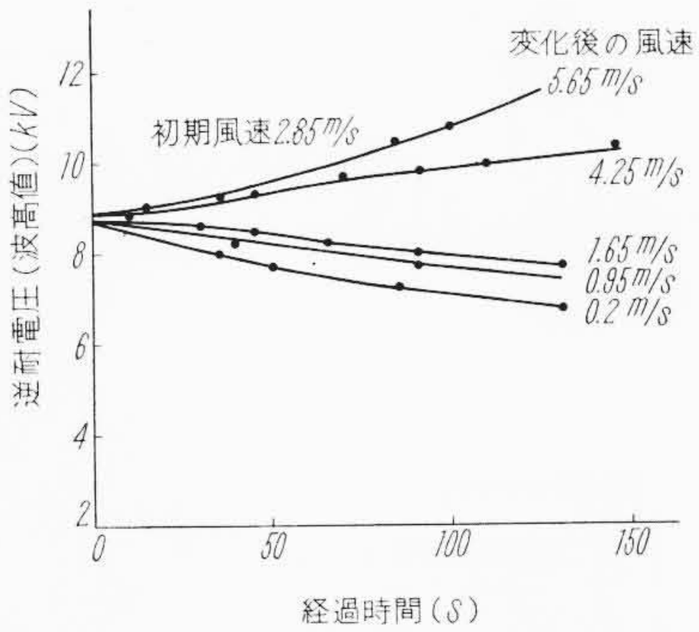
陽極電流一定として冷却風量を適当にすれば所望の円筒温度および陰極温度で熱的平衡状態をうる。等価試験によってその逆耐電圧を測定すれば**第6図**のようになる。実負荷実験結果も同図にあげたが，等価性は非常によく保持されている。しかも非常に再現性がよく，等価



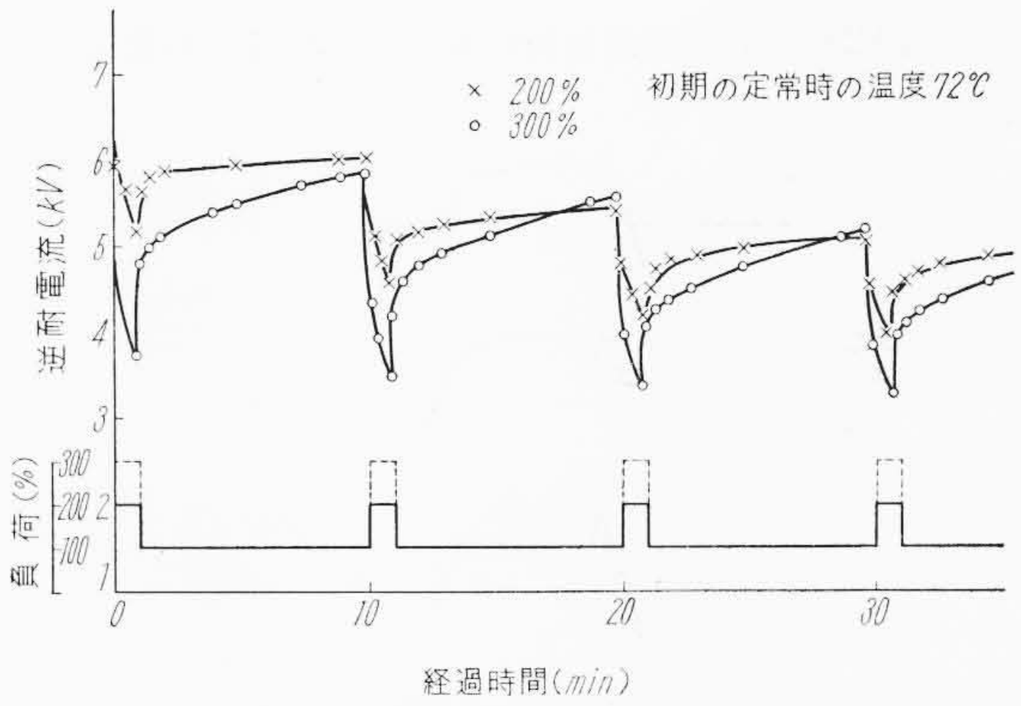
第8図　円筒温度と逆耐電圧



第10図　負荷電流を変化したときの逆耐電圧の時間的変化



第9図　負荷電流一定の状態で冷却風の風速を2.85 m/sから種々変化したときの逆耐電圧の時間的変化



第11図　過負荷電流を繰り返し通電したときの逆耐電圧の時間的変化

試験によって性能研究を行うことの正しいことを示している。一般にタンクの構造によって逆耐電圧は陽極電流によって左右されずに円筒温度のみによって定まる場合と多少陽極電流に影響される場合とがある。**第7図**は前者であり，**第8図**は後者である。**第8図**では陽極電流の通電時間によっても逆耐電圧が変化することを示す。

4.2　冷却風量を変化したときの過渡特性

タンクを熱的平衡状態でしばらく保った後陽極電流をそのままにして冷却扇の絞りによって風量を変化し，その過渡的な逆耐圧の変化を調べる。その一例が**第9図**である。これらの特性が温度制御の基本になるもので実運転に大きい関係をもっている。

4.3　陽極電流を変化したときの過渡特性

水銀整流器は負荷変動の著しい用途に使用されることが多い。したがって，過負荷耐量を十分に検討しておかねばならない。風量一定とし，ある陽極電流で平衡状態を保って後陽極電流を急変した場合を追跡する。**第10図**がその結果である。実験の都合上円筒温度は特に高くしておき，風量は一定のまま，100％の基本負荷から50～200％の変化を与える。これからわかるように実際の運転では60°C以下の運転温度であり，逆電圧最大値は直流電圧 1,500 V 相間リアクトル付二重星形結線で約3.5 kV，直流電圧 650V単相全波結線で約2kV であるから十分に逆耐力があることがわかる。

4.4　過負荷を繰り返したときの逆耐電圧の変化

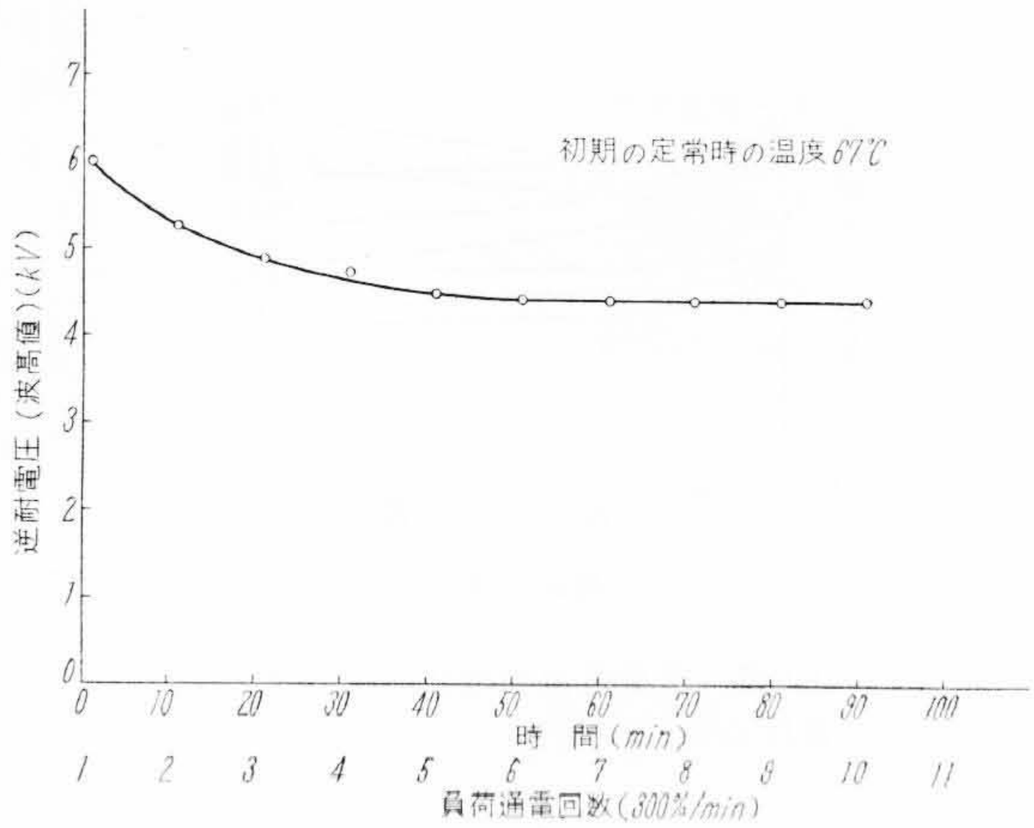
100％負荷にしておき 200あるいは300％の過負荷電流を9分間隔1分通電を繰り返したとき，すなわちE種定格試験をしたときの一例を**第11図**に示す。この図からわかるように逆耐電圧が変動する。種々の状況下で行った多くの実験はすべて同様の傾向を示している。この場合の最小の逆耐電圧は実験を繰り返して10回後にはある一定の値に落着く。**第12図**はその結果でありこれはE種定格の妥当性を証明しているものである。

以上のようにわれわれは水銀整流器の過渡特性を十分に検討した結果，負荷の状況がわかればあらかじめその特性を知ることができるようになった。

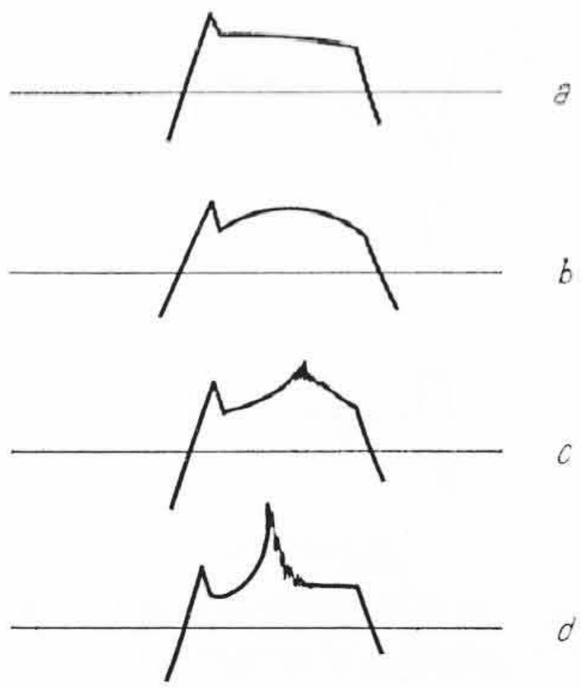
5.　低温時における負荷耐量

5.1　低温特性の改善

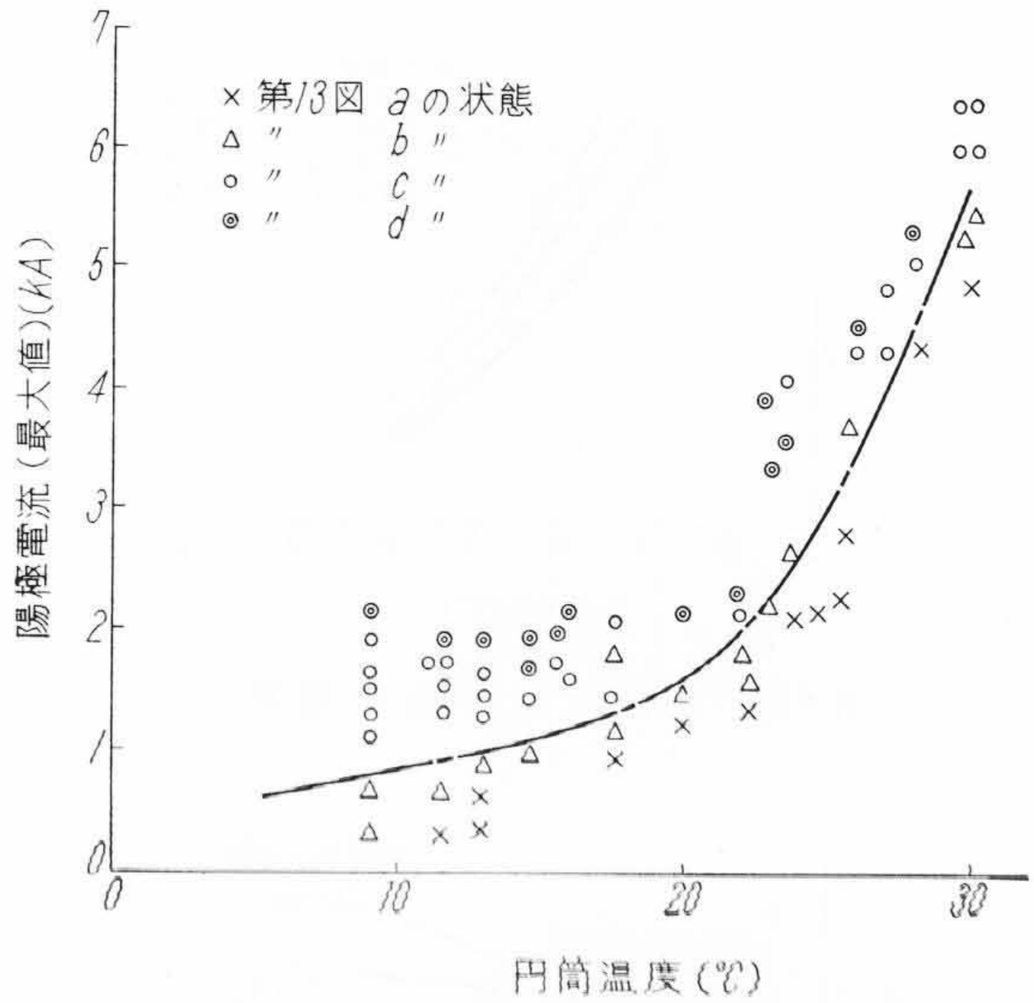
水銀整流器は寒冷地で使用する場合もある。このようなときには蒸気密度の不足によって異常電圧を発生する



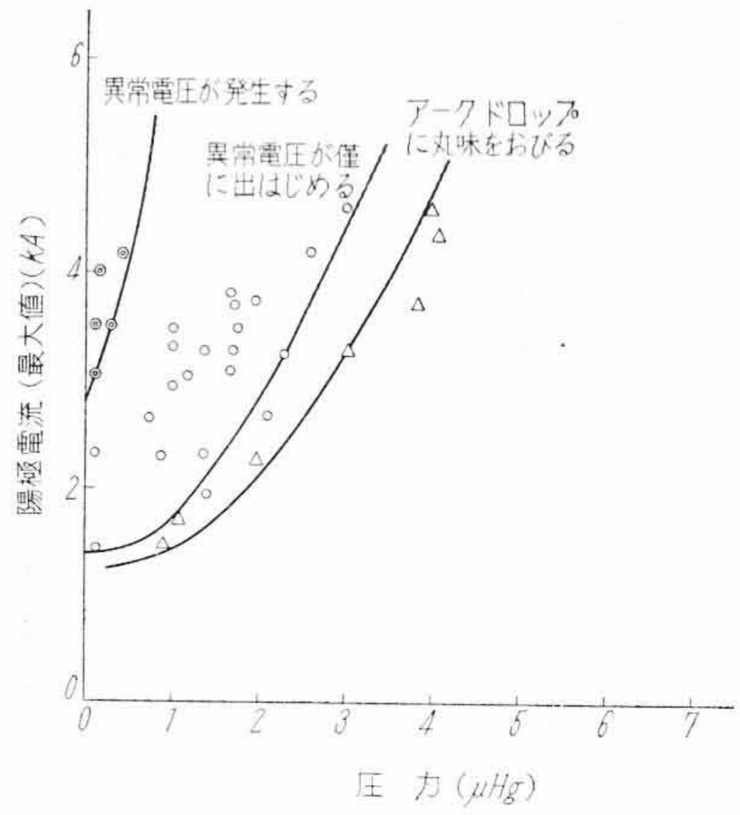
第12図　E種定格試験における逆耐電圧の変化



第13図　種々なアークドロップの形態



第14図　円筒温度とアークドロップ波形との関係



第15図　圧力と異常電圧発生状況

おそれがある[11][12]。これを防ぐために電熱器を取り付けるが，案外めんどうな場合が多い。別な方法は器体中になんら副作用のないガスを封入しておくことである。すなわちガス入り水銀整流器である。このガスとしては種々な物理的，化学的資料に基きクセノンを使用することにした。

5.2 異常電圧

水銀整流器は電流を大きくして行けば第13図に示すようにa～d 4種のアークドロップを示す。同図aが正常の状態であってdになれば異常電圧発生の状況である。異常電圧を発生すれば逆弧に発展する場合が多いので異常電圧発生限界については十分考慮しておく必要がある。また異常電圧は低温時急に通電した場合に発生するものであって，短時間でも通電した後においてはその限界電流値ははるかに大きくなる。ガスの入っていない整流器につき円筒温度を横軸にとってa～dまでの発生限界電流を示せば第14図のようになる。次に封入ガス圧をいろいろにかえて内部の圧力に対する異常電圧発生の限界を調べて見ると第15図のようになり，異常電圧に関する限りにおいては5～6 μHgのクセノンを封入すれば十分である。

5.3 ガスの清浄効果

ガス封入で問題になるのはガスの清浄効果である。このためタンクをドライアイスで冷却し，−20℃まで下げ，そこへ急に陽極電流を流して清浄効果を調べる。この効果のもっとも厳格な条件として繰り返し通電法を使用した。すなわち1～通電1～休止を繰り返し，この繰り返しを1秒行って5秒休止する，1～通電を20回/分で1分繰り返す，数サイクル通電を20回/分で1分行うなど種々の方法で行った。その結果一例をあげればガスの清浄効果は電流が大きいほど，温度が低いほど，初期の封入圧力が小さいほど著しい。また連続通電の場合はほとんど起き

ない。これは構造に関係し，種々構造をかえて実験した結果特殊タンクでは5 μHg 以上あればほとんど清浄効果がないことがわかった。一般にガスを多量に入れると逆耐電圧は低下するものであるが，上記のような封入ガス量の少ないタンクでは逆耐電圧が高く，相当高電圧の整流器にも使用することができる。

6. 結　　言

水銀整流器の逆弧および異常電圧は従来不分明の点が多く，整流器の製作および使用上問題があった。封じ切り風冷エクサイトロン整流器が製作されるに伴い整流タンクの構造は一定し，種々の負荷条件における実際運転結果が数多く集積された日立製作所日立研究所では，これらのデーターに対応して実際使用状態におけるタンクの性能の解明に努めた結果，逆弧および異常電圧発生限界の条件を，等価試験で求めることに成功した。これらの研究結果は実用器に応用する場合よく適合し，運転の信頼度を高めるに貢献している。予熱不要のガス入り整流器の研究も完成し −10°C から 250 %負荷をかけることのできる整流タンクの製造が開始された。これら一連の研究によって水銀整流器の運転性能は著しく改善され完成の域に達した。

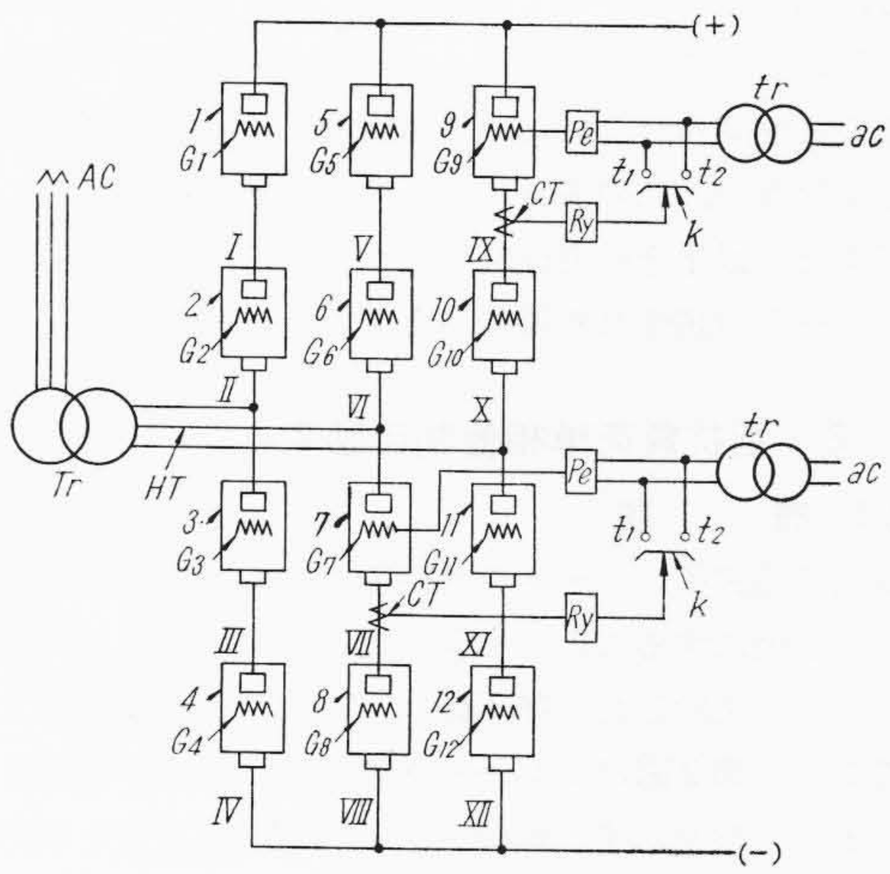
参　考　文　献

(1) K. H. Kingdon & E. J. Lawton: G. E. Rev. **42**, 474 (1939)
(2) 久保, 河上: 日立評論 **25**, 121 (昭 17)
(3) 木村, 岩田, 金沢: 昭34, 連大講演集 387
(4) A. W. Hull & F. R. Elder: J. A. Phys. **13**, 171 (1942)
(5) 特許出願中
(6) 叶屋, 亀田: 日立評論 **24**, 205 (昭 26)
(7) Zehner: Electronics **5**, 224 (1932)
(8) E. Marx: Electronics **5**, 224 (1932)
(9) M. Hoyaux: D. C. **2**, 122 (1955)
(10) 馬淵: 昭34, 連大講演集 389
(11) C. Kenty: J. App. Phys. **9**, 705 (1938)
(12) A. W. Hull & H. D. Brown: Trans A. I. E. E. **50**, 744 (1931)

新　案　の　紹　介

実用新案 第482546号

曽根田　瑞　夫・石　垣　喜　重　郎

高圧水銀弧光変換器保護装置

この考案は水銀整流器が多数個直並列に接続された変換器において，その各器の過電流故障に即応してそれらを各個別に急速に休止させるようにしたものである。図には整流器7と9に関連するもののみ示してあるが，各整流器の陰極母線に変流器CTを挿入しこれにより直接付勢される高速度継電器 R_y の短絡子Kによって格子制御回路にある絶縁変圧器 t_r の整流器格子側の端子 t_1, t_2 を短絡するようになっている。従来の同目的装置では変流器を交流回路ACに関連して高速度継電器を動作させているが，この装置だと変流器および継電器の絶縁上継電器接点を変圧器 t_r の一次側（ac 側）に設けねばならず，そのため保護に時間おくれが生じたのがこの考案で改良されている。（矢崎）