

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-395

遷音速風洞設備更新に関する予備調査(I)

——4,500KW直流電動機用電源設備——

萱場重男・鈴木正光・小松行夫

1979年10月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 遷音速風洞設備更新に関する予備調査(I)\*

——4,500KW直流電動機用電源設備——

董 場 重 男\*\* 鈴 木 正 光\*\* 小 松 行 夫\*\*

## 1. まえがき

当研究所の遷音速風洞設備は昭和35年に完成して以来多くの航空機や飛翔体の実験に使用され重要な技術データをの得るのに貢献してきたが、その間には主送風機基礎の不等沈下、直流電動機整流子の条痕発生、高電圧充電部の絶縁劣化等幾多の故障を克服してきた。しかし、設備設置後20年を経過した今日、現有設備の重要な構成要素は老朽化が漸次進行し、一部には技術革新のため補給品の調達が出来なくなったものも現われている。

この遷音速風洞設備の主送風機は、同一軸に直結された18,000kW巻線型三相誘導電動機と、4,500kW他励磁式直流電動機によって駆動されており、風洞測定部のマッハ数は主送風機の回転数の精度によって決定される。この回転数を精度良く制御する方法として直流電動機と直流電源を組合せた、いわゆる静止レオナード方式によって行われている。

この直流電源装置として当所で使用している水銀整流器は、多量の水銀を取扱うため社会情勢に適応し難くなり日本電気工業会においても昭和40年をもって水銀整流器の新規製作を中止し、補修作業も昭和50年をもって打ち切った。したがって現在は水銀整流器の補給及び補修に関する業界側の準備は皆無の実情である。たゞしこの間に、水銀整流器に代るべきものとして半導体整流素子の開発が急速に進み、一般電力用整流器として一応の成果を得るに至った。

このような情勢にかんがみ、当研究所の現有設備は設置後順調な稼働を続けているが、いずれ代替期に至るものとみて対応しておく必要がある。しかし、その更新には何億円もの巨額の前算を必要とするので、既設設備の寿命の推定、新設備導入の時期と、方式の決定には、十分慎重な配慮を払われねばならない。

本報告は、当研究所遷音速風洞駆動電動機用の直流電

源である水銀整流器を半導体制御整流器に換装するための準備として行った調査結果をまとめたものである。第2章においては、現有設備の機器構成と制御方式について概略を述べ、第3章においては本論文において特に問題とする水銀整流器の特性の1部について説明し、あわせて現有設備の寿命について考察する。

第4章以下では新しい方式の半導体制御整流器の工業面における実用化の状況および、これを当研究所の遷音速風洞用直流電源設備に適用する方法、並びに問題点について言及する。

## 2. 現有直流電動機系の概説

遷音速風洞駆動用電動機設備は<sup>(1)</sup>66,000V50Hzの商用電源を受電して、30,000kVA変圧器(当研究所変電設備)によって11,000Vに降圧したものを引込んで、18,000kW三相誘導電動機及び4,500kW直流電動機の電源としている。このうち直流電動機系の主回路は、直流電動機用遮断器(MBB)~負荷時電圧調整器(URS)~水銀整流器用変圧器(MR-Tr)~水銀整流器(MR)~直流電動機(DM)の順に構成されている。

図1にこの主回路と回転数制御系の基本系統図を示した。各機器の仕様および機能は次の通りである。

### 2.1 負荷時電圧調整器

本電圧調整器の仕様は次の通り。

型 式；屋外用、油入自冷式  
容 量；6,850kVA(最大線路容量)  
定 格；3時間  
相 数；3相  
電 圧；1次定格電圧, 11,000V,  
2次調整電圧, 9,680V  
タ ッ プ 数；33点, 段数±16段

これは、変圧器巻線に取付けた中間タップを負荷状態で切換えることによって、出力電圧は±9,680Vの間に33段階に調整できる。これにより水銀整流器に印加する電圧を調整することになり、移相制御範囲を縮め得ると共に、継続的な電源電圧の変動を補償することができる。

\* 昭和54年9月5日 受付

\*\* 空気力学第二部

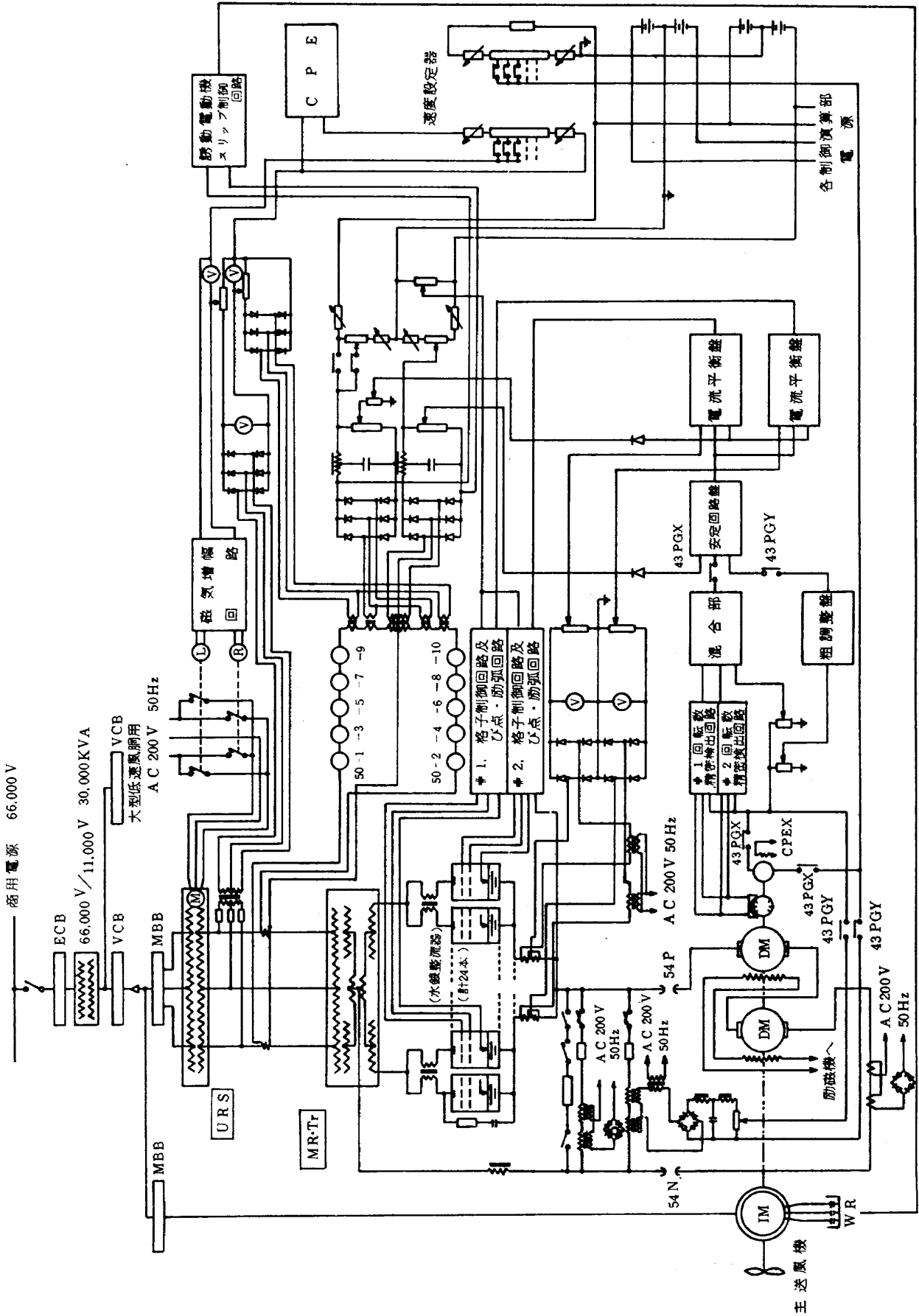


図 1 遷速風扇電動機設備系統図

## 2.2 水銀整流器用変圧器

本変圧器の仕様は次の通り

型式；油入自冷式，屋外用

容量；6,850 kVA

定格；3時間

周波数；50 Hz

相数；3/6相

1次電圧；20,000V

2次電圧；1,680V

1次巻線；△結線

2次巻線；並列2重星型結線

この変圧器の2次巻線では，三相星型結線のものを相間リアクトルで二重に接続し，これを並列に設けてあるので2次巻線の総数は12である。

整流器用変圧器は同一鉄芯に対する巻線数が多く，また，整流器の逆弧時には過酷な電流が流れるため電氣的，機械的ストレスが多い，このため一般の変圧器に比べ巻線は複雑で強固な構造になっている。

## 2.3 水銀整流器

本水銀整流器の仕様は次の通り

型式；単極水冷式，密閉型イグナイトロン

定格；5,000 kW

電圧；1,500V

電流；3,333A

器槽数；24本

この水銀整流器は，変圧器の1巻線につき陽極バランサーを介して2本ずつ接続されている。冷却方法は熱容量及び熱伝達率の大きい水冷式とし，整流器は大地に対し高電位のため，冷却水は良質の蒸留水を使用し再冷却による順環冷却を行っている。なお，整流器と再冷却器の間は絶縁ホースによって接続されている。

## 2.4 直流電動機

本直流電動機の仕様は次の通り

型式；二重電機子型他励磁式直流電動機

定格出力；4,500 kW，連続

定格電圧；1,500V (2×750V 直列接続)

定格回転数；710 rpm

過負荷耐量；250%，1分間

この電動機には，誘導電動機との直結側に歯車駆動によるパイロット発電機を，また，軸端側には回転数を精密に検出するためのスリット円板を固定してある。

## 2.5 直流回路保護機器

高電圧直流回路の異状に対処するための保護機器として，過電流に対して正方向直流高速度遮断器が，また，逆電流に対しては逆方向直流高速度遮断器が設けてあり，

異状電流に即応して主回路を開放する。

## 2.6 主送風機の回転数制御法

主送風機の回転数制御は，定電圧他励磁式直流電動機の回転数は電機子に印加される直流電圧値に比例する特性を利用して行っている。その方法は(図1参照)70 rpm～710 rpmの間で，20 rpm毎に設けた速度設定器により速度設定を行うと，これに対応した周波数を発振する基準水晶発振器と基準電圧が選定される。

基準電圧は，負荷時電圧調整器用と精密速度制御用の2系統があり，連続速度設定用ポテンショメーターによって±10 rpm 相当の電圧を微調設定することができ，次のような機能を担っている。

(1) 負荷時電圧調整器用基準電圧は，整流器用変圧器の1次電圧との比較電圧で，その偏差電圧によって負荷時電圧調整器のタップを切換え水銀整流器用変圧器の1次電圧を調整する。これによって直流電動機には水銀整流器を介して設定速度に見合った概略の直流電圧が印加される。

(2) 精密速度制御用基準電圧は，直流電動機の実回転数を検出して，設定回転数との偏差により水銀整流器の格子制御を行い，直流電圧を微細に制御するためのものでその概要は，直流電動機の軸端に固定した円板の周囲に設けた1,080個のスリットによって光学的にパルス数を検出し，これを周波数に変換したのちに，基準水晶発振器の周波数と比較して周波数の偏差を直流電圧に変換して取り出し，この電圧と基準電圧の差によって水銀整流器の格子制御を行い，主回路の直流電圧を微細に調整することができ，したがって，直流電動機の回転数を精密(710 rpmに於て，0.03%以内)に制御する。

直流電動機の負荷電流が一定値を越えた場合には，誘導電動機の2次抵抗器を自動的に制御して負荷分担を行っている。

4,500 kW 直流電動機と18,000 kW 誘導電動機及び主送風機は一軸に結合されているため，直流電動機の回転数を精密に制御することによって，遷音速風洞測定部のマッハ数は連続的に設定できると共に，長時間に亘り一定値に保持することができる。

## 3. イグナイトロン水銀整流器

水銀整流器は，電子放出のしやすい水銀を陰極材として，陽極および点弧子・格子などと共に密封した器槽内を高度の真空に保って，水銀アークの整流作用に基ずき交流より直流電力を得る重要な電子装置である。出力側の直流電力は，格子制御によって水銀アークを制御することにより精密に調整できるので，電力変換装置・工業

用電力装置として広く利用されている。

イグナイトロン水銀整流器は、この水銀整流器の1種で陽極と陰極を一对とし、交流の毎サイクルごとに水銀アークの基になる陰極点を生成するところに特徴を有し、小型・軽便で取扱い容易な構造になっている。

### 3.1 構造と各部の機能

直流順変換装置（交流を直流に変換する装置）として当研究所に設置されているイグナイトロン水銀整流器の構造を図2に示し、各部の機能について簡単に述べる。

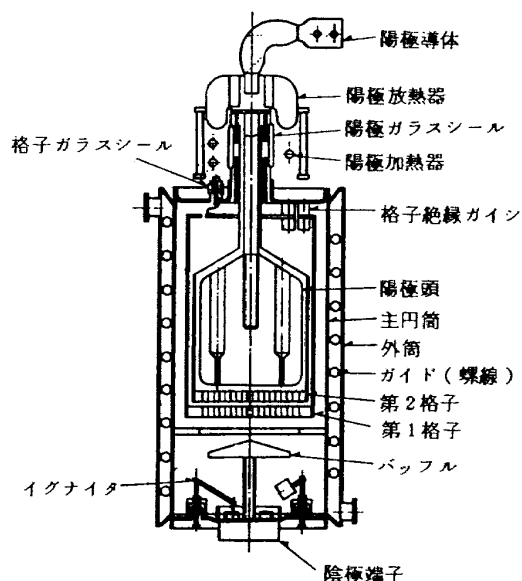


図2 イグナイトロン整流器の構造

(1) 陽極頭は、交流電圧が印加される部分で、水銀に侵されず電子放出がし難い材質が要求され、主に黒鉛が使用される。陽極頭は過度の温度上昇によってガスを発生（電子放出）すると逆弧を招く原因となるため、陽極放熱器によって放熱する構造になっている。

(2) 陽極加熱器は、陽極頭を加熱するもので、これは水銀整流器の始動時などに陽極頭の温度が低いと、水銀蒸気が陽極面に凝結付着して逆弧の原因となるのでこれを防止するために用いられる。

(3) 第1格子（陰極に近い方の格子）は、イグナイターで点弧する時点で十分な正の電位を有し、陰極点が発生した際に即時ピックアップして、陽極電圧の正の期間中確実に陰極点を保持するものである。

(4) 第2格子（陽極に近い方の格子）は、通常バイアス電圧によって負に偏倚されて電流を阻止しているが、位相制御による通電時期に正電位にすることによって、通電を開始させるものである。

(5) バッフルは、外部より電圧を印加しない格子で、水銀蒸気の流動を制御する役目をもっている。これによ

って順電圧及び逆耐電圧を高められると共に、格子制御回復時間を短縮できる。

(6) イグナイターは、水銀陰極面上に固定点弧子を浸したもので、これに急峻な電圧を印加すると水銀蒸気圧の局部上昇により火花を生じ陰極点を生成する。これは、可動部分がなく印加電圧に即応して陰極点を発生できるので、交流の毎サイクルごとに点弧することができる。

イグナイトロン水銀整流器は、構造上器槽は封じ切りのため、点弧子の劣化、消耗ごとに交換することができないので、当初より予備の点弧子を封入している。

(7) 陰極端子は、水銀陰極に通じていて直流電圧、電流の取り出し端子である。

(8) 内筒は水銀に侵されず高真空度に耐え、熱伝導率の良いものでなければならない、一般には内外筒ともにステンレス鋼が用いられる。内筒と外筒の間には冷却水が通り、アーク放電によって生じた熱を吸収し、器槽内の水銀蒸気圧を一定範囲に保つようになっている。

(9) ガラスシール部分は、陽極及び格子、イグナイター等の器槽内部品への導体貫通部分のシールであり、高絶縁耐力と気密性にすぐれ、また水銀に侵されない材質でなければならない。このため一般には、器槽材質および導体材質とほぼ同じ熱膨張係数の特殊ガラスを使用し、高温溶着でシールを行い、温度変化による気密低下を防止している。

### 3.2 異状現象

水銀整流器の異状現象の主なものとして、逆弧現象、異状電圧現象、通弧現象、失弧現象などがあげられる。

#### 3.2.1 逆弧現象

逆弧には正常逆弧と異状逆弧の二種類があり、いずれも陰極より陽極に向かって通電する現象である。

この逆弧現象は何らかの原因により、陽極中に多量の電子を放出する箇所が生ずると、他の陽極より陰極を通じてこの電子に向かって電流が流れ込むことによって発生する。このため、整流器としての併作用が失われ、整流器の交流側短絡となり交流側電線路、特に整流器用変圧器巻線に過大な電流を通じることになり、継続すると機器の破損、焼損をきたすことがある。

異状逆弧は、負荷の電圧・電流に一定の関係がなく、設計および製作過程、または保守の不注意に起因するものが多く一般に次の原因があげられる。

- (1) 真空度低下による内部残存ガス圧力の上昇。
- (2) 化成不十分による陽極よりのガスの放出。
- (3) 陽極過冷による水銀蒸気の陽極での凝着。
- (4) 製作工程において、陽極表面に油脂・アスベストなどの不純物の附着。

(5) 陽極材料の不良，陽極面の不整，工作不良。

(6) 格子回路の不正，格子構造の不適當。

また，正常逆弧は過負荷によるものが主で，電弧の消えた瞬間に発生するもので次の原因があげられる。

(1) 過電流で使用の際，電弧が消えた瞬間に多量のイオンが残り，これに飛躍的な逆電圧がかゝるとイオンは陽極に吸引されて衝突し，陽極を高熱にして陰極点を生じ逆弧となる。

(2) 陽極が負の期間中に，高い逆電圧が印加された時の放電現象による場合，（これは，両電極間の絶縁破壊電圧は，両極間の距離と蒸気圧の積に関するパッシェンの法則によるものである）。

(3) 格子による移相制御角が大きい場合，消弧直後の逆電圧上昇率が大きく，陽極前面のイオンが消滅しないうちに陽極に引きつけられ，陽極面上に陰極点を生じた場合。

(4) 水銀蒸気は電離によって電流を通じる役目をするが，過電流または冷却効果が減少したりすると，水銀蒸気の圧力が高まり，陽極電流消滅直後の逆電圧による放電現象によって逆弧となることがある。

水銀整流器の逆弧現象は完全に防止することはできないが，良質の材料と完全に化成された製品であれば，常に高真空度の維持と過負荷を避け，適当な冷却によってかなりの防止を図ることができる。

### 3.2.2 異状電圧現象

なんらかの原因で通電中の電弧が消えると（消弧時間  $5/10^5$  秒位），電流変化率は  $di/dt$  と極めて大きく，変圧器巻線その他電路中でインダクタンス  $L$  のあるところでは， $e = L \cdot di/dt$  なる異状電圧が誘起され，回路の絶縁破壊に至ることがある。

電弧の消滅原因には，陰極点の消滅および電弧柱の消滅などがあり，防止策としては整流器の過冷却を避けることである。異状電圧に対しては，異状電圧放電器及び異状電圧吸収装置を設け，被害の波及を防止できる。

### 3.2.3 通弧現象

通弧現象とは，電流を阻止すべきときに阻止し得ないで通電する現象で，残留イオンが多く格子が制御能力を回復する以前に陽極電位が正になった場合に起るものと，制御格子が制御し得る限度を超えて陽極電位が高い場合に起るものがあり，その主な原因として

- (1) 第二格子の負電位不足
- (2) 器槽温度上昇による水銀蒸気圧の過大
- (3) 過電流による格子前面の陽イオン過大
- (4) 器槽内部の真空度低下

などがあげられる。

### 3.2.4 失弧現象

失弧現象は，陽極電流を通じべきときに通電しない現象で，第一格子が正電位でも点弧しない場合，または，第一格子は点弧しているが陽極電流が通じない場合，あるいは，陰極点が消滅したり発生しない場合。などがあげられる。失弧の主な原因としては

(1) 励弧電流の過少，あるいは格子前面のイオン密度の過少。

(2) 器槽温度の低下，または高すぎ。

(3) 格子回路の故障。

などがあげられる。

### 3.3 定格

水銀整流器は，製作完了時に標準規格（JEC）などによる各種試験が実施され，保守を誤らないかぎり，その能力を十分に発揮するようになっているが，逆弧現象については確率的に発生するものとして取扱われている。

逆弧の発生は，逆弧等価試験<sup>(5)</sup>によって発生点を実測し，これによって 50 Hz 連続稼働の際，6 陽極あたり 1 年に 1 回の逆弧発生に相当する確率をもって水銀整流器の定格としている。

### 3.4 イグナイトロン水銀整流器の寿命

一般に使用されているイグナイトロン整流器は，正常の使用法であれば安定した稼働をするが，いずれは寿命期に至るものである，しかし，この寿命期を明確に推定する算定方式が存在しないのが実情である。

イグナイトロン整流器の寿命を決する要素としては，器槽内部に関連する真空度の低下，イグナイターの消耗，陽極または格子類の欠損，器槽の損傷などがあげられる。このうち最も懸念されるものは真空度の低下である。これは，器槽を貫通して取付けられる導電体の数が多く，この部分はガラスシールなど器槽と異なる絶縁性の物質で封緘されているが，この封緘部が長期間のうちに材料の枯れ，または熱疲労などによって微細な剝離などを生じ，真空度の低下を招く原因となることが考えられる。真空度低下による現象としては，まず高電圧領域における逆弧現象が多発し，遂次低電圧領域に移行してくるものと推定できる。

またイグナイターは，炭化ホウ素のような半導体の先端を水銀陰極に没し，これに急峻なパルスを与えると接触部に電力が集中して点弧作用を行うもので，各サイクルごとに新たな陰極点を発生させている。このため，水銀面への侵没深さが不十分になる程にイグナイターが消耗した場合，または結晶が破壊した場合，およびアマルガム化によって点弧能力が喪失した場合などを考慮して，ひとつの器槽に 3 本のイグナイターを取付けてあり，こ

表1 設備・相別逆弧発生状況 (昭和51年)

設備名 \ 相番	Ua	Va	Wa	Xa	Ya	Za	Ub	Vb	Wb	Xb	Yb	Zb	計	再化成器槽数
F <sub>1</sub>	2	3	1	2	1	2	5	1	1	3	2	2	25	12/24
F <sub>2</sub>	1	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	1	7	21/24
F <sub>3</sub>	10	4	5	5	5	5	1	1	0	2	2	0	40	1/24
F <sub>4</sub>	0	0	1	0	0	1	1	0	2	2	1	2	10	13/24
F <sub>5</sub>	2	5	8	1	1	2	7	4	5	5	4	5	49	0/24
F <sub>6</sub>	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	5	11/24
計													136	58/144

の全数が動作不良となったとき、及び陽極又は格子類の機能が喪失した場合、あるいは冷却水などによる器槽の腐蝕、その他外部の電気的な事故の波及による損傷などによる整流機能の喪失をもって寿命とみることができる。

表1および図3は、当研究所設備と類似の設備を使用している某製鉄工場の協力によって得られたイグナイトロン整流器の、逆弧発生件数およびイグナイターの消耗状況である。

この設備は、出力4,960kW 2台、5,700kW 4台からなり定格電圧はいずれも1,210Vである。変圧器結線法は二重星型結線のため、常用の整流器数は144本である。稼動状況は昭和39年より定期点検時、および故障修理時以外は連続運転であり、このため、年間稼動時間は約8,000時間とみられる。

表1は、この設備の昭和51年中の6ヶ月間に発生したスタンド別、相別の逆弧件数である、これによると、再化成(真空度再生処置等)した器槽の少ないスタンドに逆弧が多発している。しかし、逆弧発生が少ない器槽も

存在しているため、これが真空度劣化に起因した逆弧現象であるとすれば、真空度の経年劣化は定性的には進行しているが定量化には至らないものといえる。また図3は、同じ設備におけるイグナイターの不良率を示したものである。これによると、最初のイグナイターに比較して2本目、3本目のものゝ不良率は、短期間に進行する様相を呈している。

3.5 現有整流器設備の全般的寿命の推定

現在は、設備の寿命を明確に予知する技術が存在しないため設備の維持管理としては、一般に故障率の<sup>(6)</sup>減を計るべく積極的な予防保全策がとられているようである。予防保全策の主なものとして次のものがあげられている。

- (1) 設備改善; 回路改造, 部品の改善, 交換等。
- (2) 技術向上; 取扱者の教育による技能向上, 及び取扱上の注意等。
- (3) 環境改善; 周辺雰囲気, 環境改善, 清掃等。
- (4) 設備管理; 点検項目, 周期, 方法, 保全計画の立案等。

この予防保全によって、どれほどの故障率の減と寿命の延長を計れるかと云う予防保全の可能性については、設備の構成機器個々の信頼性向上が重要な課題になっている。

たとえば、複雑、膨大なシーケンスを伴う自動化設備のシーケンス用リレーについて云えば、いくら性能の良いものを使用しても寿命に限界があり、リレーの動作不良は極めて単純な現象ではあるが、その影響は単に設備が稼動しないだけでなく、保護装置系統の場合には非常に大きな設備損傷を招くことがある。このため、近頃はリレーに代って半導体部品が導入され信頼性の向上が計られている。

当研究所のイグナイトロン静止レオナード装置は、昭和35年に完成したもので、シーケンスはリレー回路で、

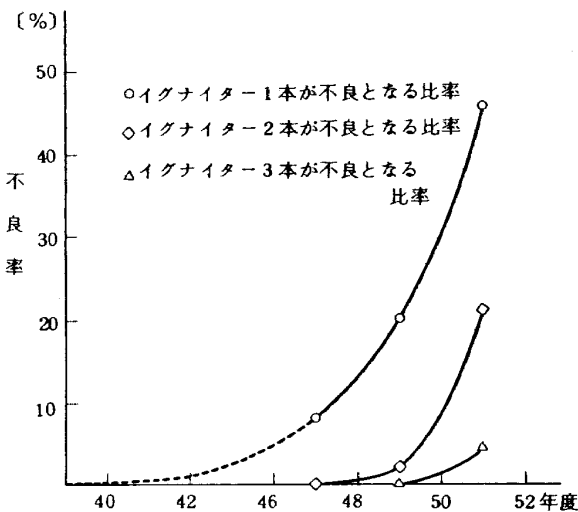


図3 イグナイターの消耗状況

また制御部は真空管回路で構成されている。この装置のほとんどの故障件数(週1回程度)を占めていた精密速度制御装置部を昭和47年にトランジスタ化することによって、以後この装置は故障件数が皆無の状態稼働している。

現在計画しているイグナイトロン静止レオナード装置の、サイリスター静止レオナード装置への換装にあたっては、設備保全の観点よりみれば技術革新によって主要機器であるイグナイトロン整流器の補給が断たれているため、早い機会に対応策を講じるのが最善である。

ここで、現有設備の実状を調査した結果を報告するとともに、これをもとに寿命について若干の推定を試みる。

表2は、遷音速風洞の年度別の起動回数と運転時間をまとめたものである。これによると稼働時間は生産工場の1ヶ年分程度であるが、一方、起動回数が非常に多いことが注目される。このことは、イグナイトロン器槽貫通部の絶縁封緘材に対して、加熱・冷却(ヒートサイクル)を繰返す結果となり、この部分の劣化が気密漏洩による器槽内部の真空度低下を招く原因になることが懸念される。

表3は、現有イグナイトロン整流器の耐圧試験結果およびイグナイターの消耗状況である。耐圧試験は、陽極と陰極の間に高電圧を印加し、放電開始電圧によって器

槽内部の真空度の状況、絶縁性などを調べる方法で、耐電圧値の高いほど良品とされている。

これによると各整流器とも、昭和44年測定時に比べて耐圧値の増減はあるがいずれも正常な値である。しかし、予備品として保有している3個の器槽のうち1個は完全に真空劣化に至り使用できない、他の1個も耐圧値が低く今後の経過によって不良と判断せねばならず、予備品として満足なものは1個のみである。

イグナイターの消耗については、整流器の無負荷時点弧試験(負荷電流のある時は、陰極水銀面に波動が生じている)の結果であるが、1本目が不良となっているものが2個あるが、いずれも残存2本のイグナイターが健全なので当分の間は支障なく稼働できる。

また、部品の耐用寿命は一般に図4に示すような故障

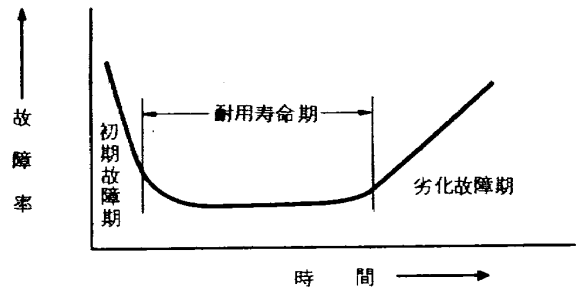


図4 故障率曲線

表2 遷音速風洞年度別の起動回数及び運転時間

昭和年度	35	36	37	38	39
運転時間		177 : 06	320 : 25	368 : 50	408 : 36
ヒートサイクル	21	76	156	202	241
昭和年度	40	41	42	43	44
運転時間	395 : 39	383 : 13	554 : 33	633 : 45	561 : 33
ヒートサイクル	250	248	400	434	384
昭和年度	45	46	47	48	49
運転時間	561 : 33	481 : 18	570 : 25	462 : 47	398 : 52
ヒートサイクル	388	352	343	290	251
昭和年度	50	51	52	53	54
運転時間	303 : 40	359 : 35	390 : 32	300 : 45	
ヒートサイクル	179	198	232	205	

時間 分  
 運転時間 7,633 : 07  
 ヒートサイクル 4,850 回

(昭和54年1月31日迄)



表3 イグナイトロン整流器耐圧試験結果 (昭和54年4月)

相番号は添図 (MR結線図) 参照

相番号(MR)	Uaa	Uab	Uba	Ubb	Vaa	Vab	Vba	Vbb	Waa	Wab	Wba	Wbb	
耐圧(kV)	44年	23	25	25	25	23	25	25	23	25	23	27	23
	54年	25	25	22	22	23	20	25	25	23	23	23	23
注1 イグナイター消耗													

相番号(MR)	Xaa	Xab	Xba	Xbb	Yaa	Yab	Yba	Ybb	Zaa	Zab	Zba	Zbb	
耐圧(kV)	44年	24	25	20	18	25	22	24	24	25	22	25	24
	54年	27	25	25	26	25	25	26	25	25	27	22	24
注1 イグナイター消耗				No.1 欠		No.1 欠							

予備整流器番号	注2 A	注2 B	注2 C
耐圧(kV)	44年		
	54年	9	22
注1 イグナイター消耗			

注1. イグナイター消耗試験は静的結果

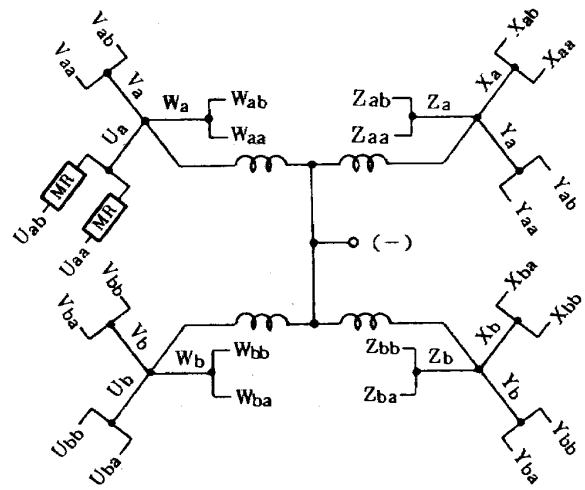
注2. A 昭和39年製

B 昭和45年製

C 昭和45年製 : 廃品

率曲線によって示される。これらの点より、現有イグナイトロン静止レオナード装置を総合的に判断すると次のようなことがいえる。

- (i) 稼働時間数、耐圧試験結果、イグナイターの劣化状況からみて耐用寿命期内にあると判断できる。
- (ii) しかし、耐圧試験結果を分析すると、真空度劣化傾向のものがみられるので、耐用寿命期後半に至っているものと推定できる。
- (iii) 整流器のヒートサイクルが非常に多いため、整流器々槽の導体貫通部分の封緘劣化による真空度劣化の発生が懸念される。ヒートサイクルによる劣化現象の資料は無いが、これは、異質材料による封緘になっているので、封緘部の劣化が予想される。この場合には、製品のばらつきの程度にもよるが、不良品の発生が始まると、比較的短期間に不良化が進行するものと予想される。
- (iv) 整流器本体が劣化不良に至った場合には、メーカーは製造を中止しており、また国内では同一定格の製品が使用されていないため、補給は絶望的である。
- (v) 整流器制御回路は真空管回路のため、真空管の補給も困難な情勢にある。



添図 MR 結線図

(vi) 劣化不良になった整流器を、回路より切離して運転する方法は、電動機の出力低下と回転数の不調を招くとともに、特殊構造の整流器用変圧器の内部故障の原因となり設備の寿命を早める。

#### 4. 半導体整流素子の開発 および利用の状況

工業面において一般に利用されている半導体整流素子は、主に高純度シリコンを主材としたものが多く、専ら整流作用を行うシリコン整流素子と、整流作用に制御機能をもたせたシリコン制御整流素子(サイリスター)がある。

直流順変換装置としてこの水銀整流器と半導体整流素子の開発過程をみれば、水銀整流器は電力用として開発されたのに対し、半導体整流素子は低電圧・少電流の分野より開発が進められ、遂次電力の分野で利用されるようになったものである。

第5図は、国内におけるサイリスターの実用的最大定格の推移をまとめたものであるが、<sup>(7)(8)</sup>これによると、4,000V以上の高耐圧サイリスターの実用化は極めて困難な状況にあるものと推測される。しかし、サイリスターの利用状況は、小型ながら高電圧・大電流に耐え使用温度範囲も広く、通常の使用法であれば半永久的寿命を有する優れた特性をもっているため、電力用としても利用価値が高く、直流順変換装置、サイリスターレオナード装置として広く利用されつゝある。

図6は民間鉄道における直流順変換装置の、設備容量

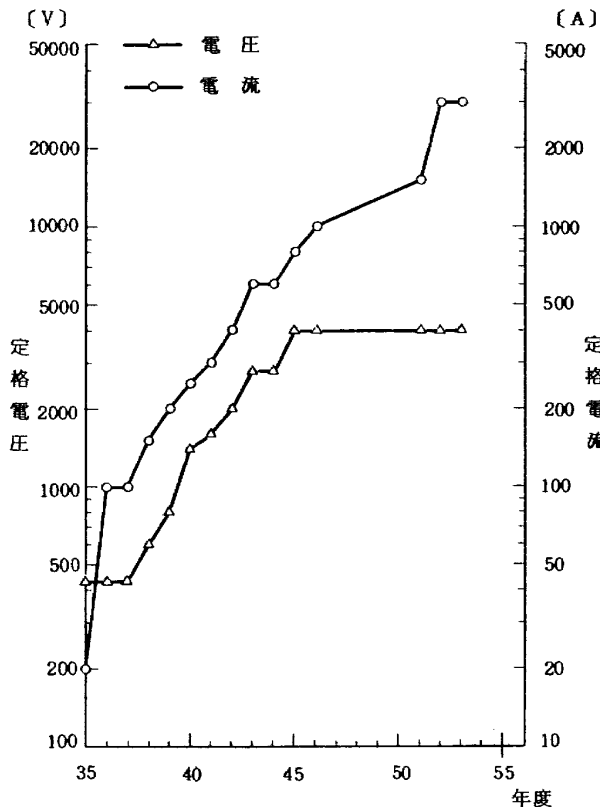


図5 サイリスターの実用的最大定格の推移

に対する機種別比率の推移を表わしたものである。これを見ると、増設設備はほぼ半導体整流素子によってまか

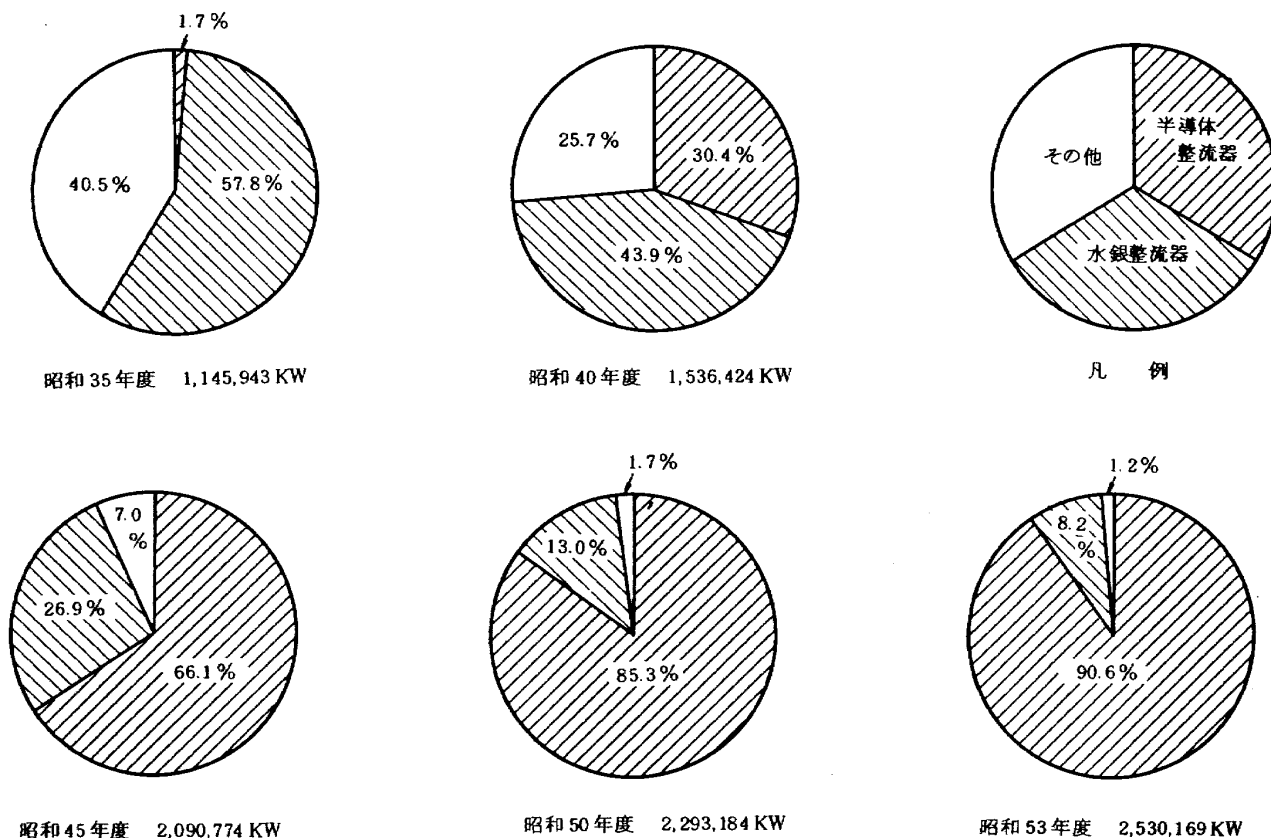


図6 民鉄における整流機器の比率

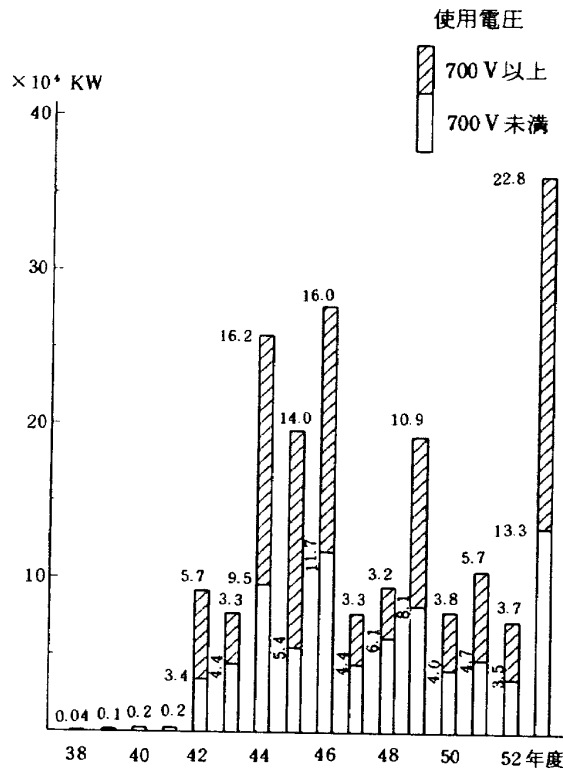


図7 サイリスター装置の製造実績

なわれ、水銀整流器や他の整流器の代替も半導体整流素子によって行われていることがうかがえる。

ここで、昭和50年度における水銀整流器の容量が13%を占めている点については、電鉄用の水銀整流器設備は同一定格のものが数多く設置されており、そのうちのいくつかの設備を半導体整流器に置換することによって、取除かれた水銀整流器は既存設備の予備品として確保されるために、急激な容量減少には至らないものと推測され、これは、他の工業面においても同様な傾向と云える。

図7はある重電機メーカーの、サイリスター装置の年度別製造実績を表わしたものでこれをみると、工業面に利用される高電圧・大容量の設備にもかなり普及してい

るものと云える。

### 5. 現有設備の換装方式の検討

現有イグナイトロン静止レオナード装置を、サイリスター・レオナード装置に換装する場合の回路方式は4案ほどにまとめられ、いずれの場合も、イグナイトロン整流器の撤去にともなって水銀整流器制御盤の換装を必要とし、換装方式によってはその他の機器の換装または配線変更などの改造を要するものがある。

また、各改造案に使用するサイリスター素子については、現在実用化されているものによって構成するものとする。

#### 5.1 換装方式

現有設備を、サイリスター化する場合に予想される各改造案について比較すると、表4のとおりである。

また、図8は現有イグナイトロン整流器による主回路図であり、これをサイリスター化した場合の各改造案の主回路図は、図9~12図に示すとおりである。

ここで、サイリスター素子の定格表示方式は、絶対最大定格方式に基いて表示されているので、素子の選定および必要数量は次のようにして求めた。

##### (1) 定格電圧

素子耐圧  $E_r$  は、素子に印加される交流電源電圧の実効値を  $E$  として一般に次の式によって求められる。

$$E_r > \sqrt{2} E \times 2 \times 1.1$$

これは、電源電圧の最大値は、実効値の $\sqrt{2}$ 倍であり、また、電源電圧には落雷または遮断器の開閉などによって、短時間ではあるが常用電圧の幾倍ものサージ電圧が発生することがある。このサージ電圧に対しては、異状電圧吸収装置または異状電圧放電器などによって、いかなるときでも、素子に印加される電圧は常用電圧の2倍を越えないように保護協調回路を設け、一方素子には、常用電圧の2倍の耐圧と10%の電圧変動率に耐え得るべ

表4 各改造案の比較

	変圧器	モーター回路	整流回路	主回路構成	素子定格電圧	素子定格電流	使用素子数	備考
第1案	更新	現用	6相 グレッツ結線	2×6アーム	2,500 V	1000 A	36(1S3P)	実用化 実績有り
第2案	更新	配線一部 変更	6相 グレッツ結線	2×6アーム	2,500 V	1000 A	36(1S3P)	実用化 実績有り
第3案	現用	現用	6相 2重星形結線	2×6アーム	3,500 V	1000 A	36(3S1P)	高電圧のため不利 未開発の分野あり
第4案	更新	現用	6相 グレッツ結線	1×6アーム	2,500 V	1000 A	54(3S3P)	高電圧のため不利 未開発の分野あり

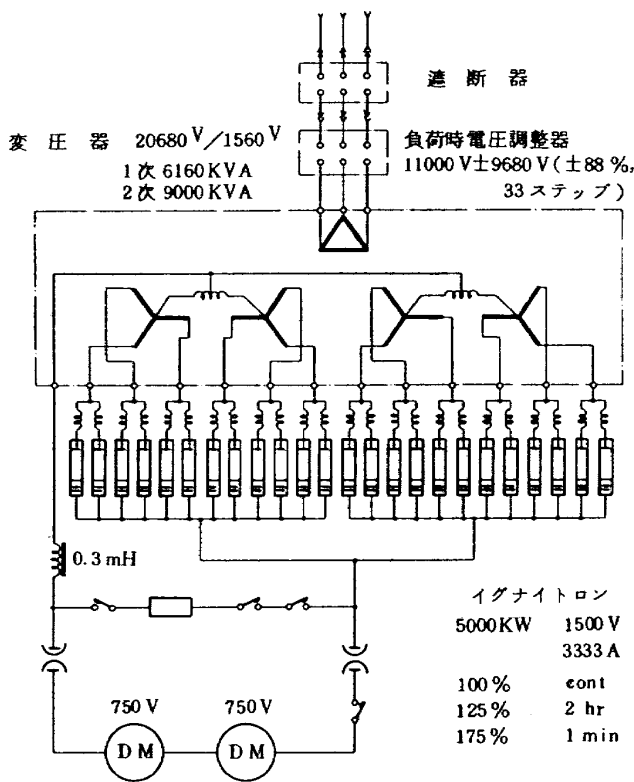


図8 現有設備の主回路図

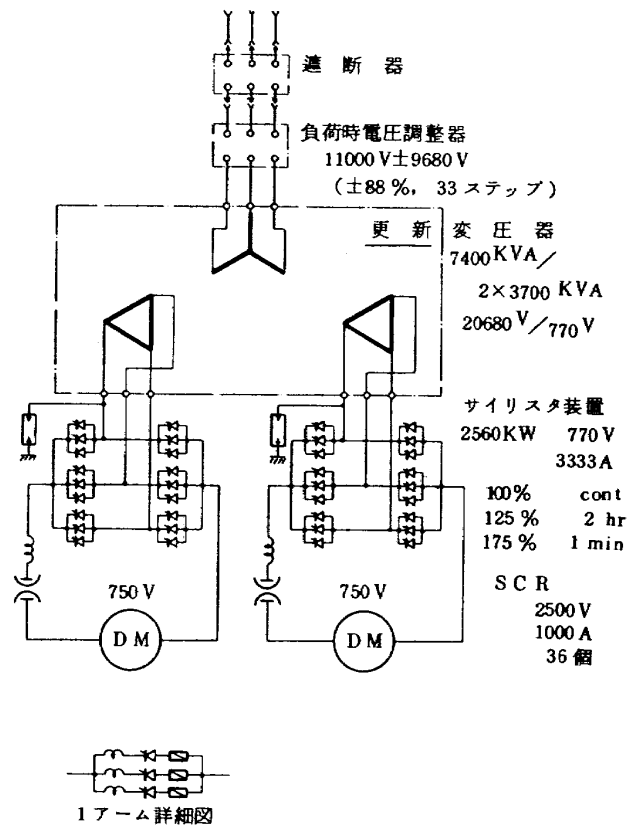


図10 改造第2案主回路図

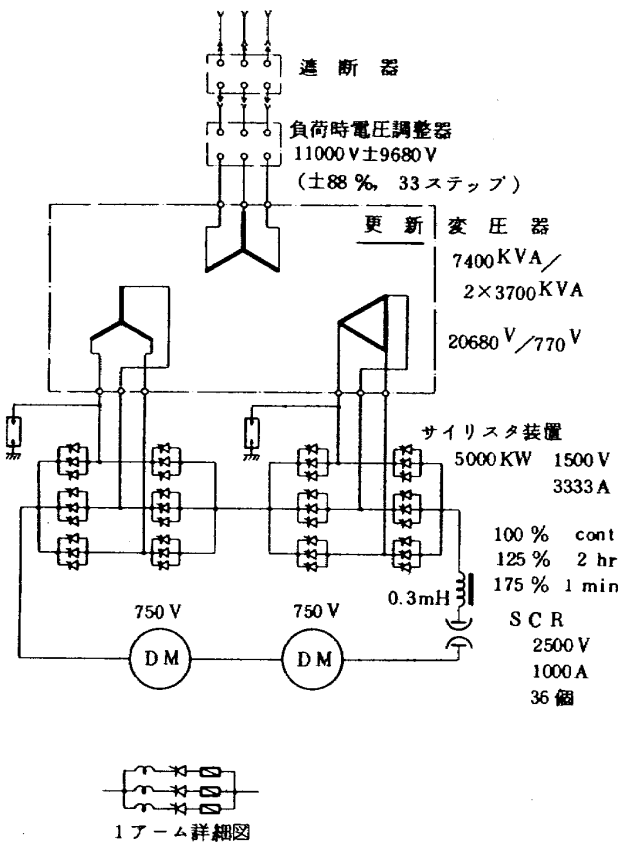


図9 改造第1案主回路図

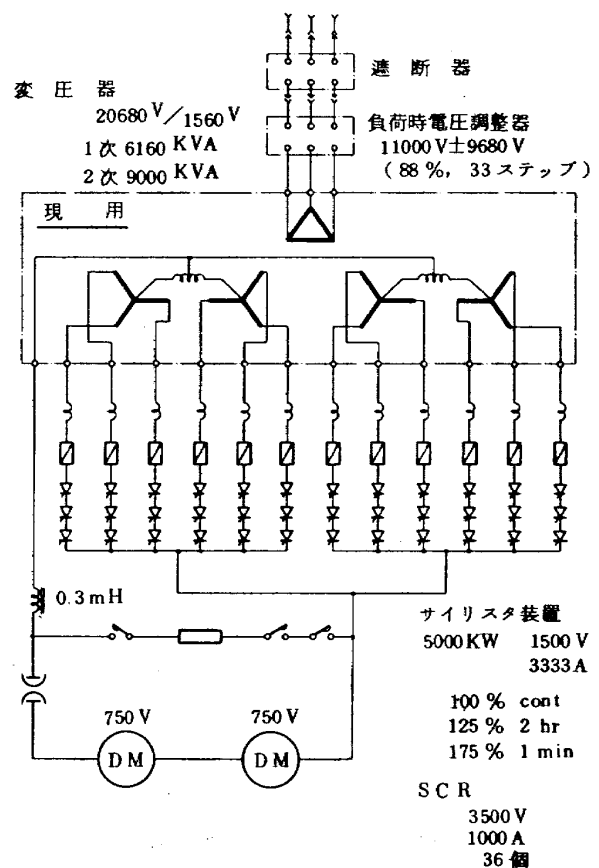


図11 改造第3案主回路図

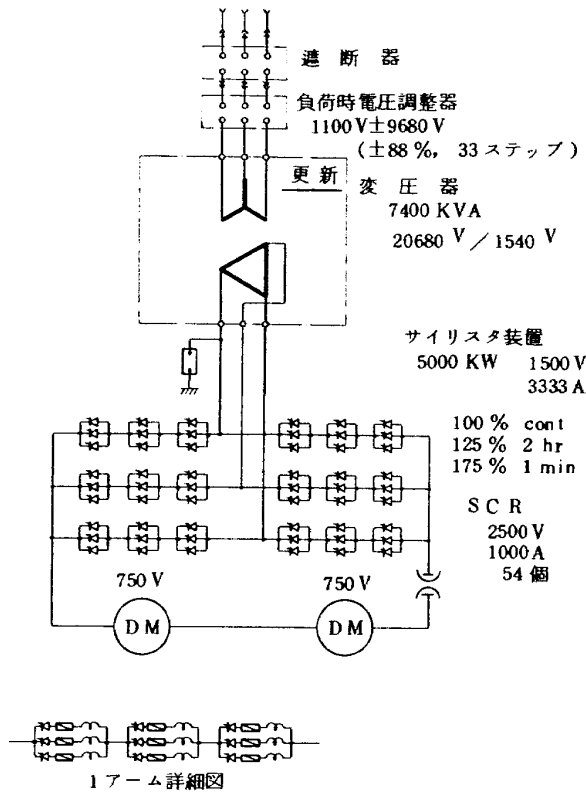


図 12 改造第 4 案主回路図

き耐圧責務を負わせて、サイリスター素子の定格電圧を選定する。

(2) 定格電流

サイリスター素子の平均順電流は、50Hz、単相半波整流における1サイクル期間中の平均電流値で表示することになっているため、50Hz、三相整流の場合の通電角は1/3サイクルとなるので、定格平均電流の3倍の電流を流すことができる。

また、大電流回路の場合には、素子を並列に接続して使用する必要がある、このときの並列回路全体の電流  $I_t$  は、一般に素子特性のばらつきを考慮した次式によって求められる。

$$I_t = (0.165 + 0.835n) I_0$$

$I_0$  : 定格平均電流

$n$  : 素子の並列数

なお、現有イグナイトロン水銀整流器設備の定格仕様は、直流電圧 1,500V、電流 3,333A、容量 5,000kW で、100% 負荷連続、175% 負荷 1 分間となっている。一方サイリスター素子は小型軽量なため、熱容量は非常に小さい。したがって 175% 負荷 1 分間という条件については設計上連続負荷として取扱いが必要があり、各改造案の所要電流は 5,840A として、サイリスター素子の必要数量を求めることになる。

5.2 現有設備の換装に関する問題点の検討

現在使用している遷音速風洞駆動用 4,500 kW 直流電動機の電源設備であるイグナイトロン静止レオナード装置を、サイリスター・レオナード装置に換装する方法としては前項に述べた 4 種の改造案があり、ここでは、これらの改造案の比較と問題点について簡単な検討を行う。

(1) 改造第 1 案の検討

本案は、現在汎用化されている耐圧 2,500V のサイリスター素子を使用し、直列接続数を 1 として主回路を構成する方法である。

主回路は、三相全波整流で得られる直流 750V の、2 群の整流回路を直列に接続して 1,500V の直流電圧を得る方法で、現用の水銀整流器用変圧器の更新を必要とする。また、この改造案では、出力波形が 12 相になるため直流電動機に良い影響を与える。

ただし、1,500V の大容量直流電動機は広く普及していないため、実績数では第 2 案に及ばないが、電動機の改造も要せず、技術的な問題もなく信頼できる改造案である。

(2) 改造第 2 案の検討

本案は、改造第 1 案と同様に 2,500V サリスター素子の直列数を 1 として主回路を構成するものである。この改造案は、現用の二電機子直列接続による定格電圧 1,500V、出力 4,500 kW 直流電動機の、一部結線を変更して、定格電圧 750V、出力 2,250 kW の直流電動機 2 台に改造する必要がある。

また、現用の水銀整流器用変圧器の更新を必要とする。主回路は、三相全波整流によって出力電圧 750V を得る 2 群の整流回路により、2 台の直流電動機を並列に駆動することによって、4,500 kW の出力を得ることができ。この方法は、サイリスター素子を直列に接続して高電圧を得る場合には技術的に困難な問題があるのに対し、その必要がないため広く普及しており、実績、信頼性ともに優れた改造案である。

(3) 改造第 3 案の検討

本案は、現用の整流器用変圧器をそのまま利用して、イグナイトロン整流器の部分を単にサイリスター素子に置き替えるだけの最も簡単な改造方法である。

この方法による主回路では、サイリスター素子に印加される逆電圧は、第 1 案、第 2 案に比べて現用変圧器の結線上 4 倍の値となり、回路上必要な素子の逆耐電圧は約 9,500V になる。しかし、現在までに開発されている素子の耐圧は 4,000V 級までであり、今後 9,000V 級素子の開発に至るのは極めて困難なことと予想される。

本改造案を実施するにあたっては、逆耐電圧 3,500V

の素子を3個直列に接続して使用することになり、この場合、直列接続される素子の点弧特性を極力一致させることが必要になる。これは点弧特性の一番遅い素子に回路の全電圧が印加され、悪影響を受けるためである。次に逆阻止期間中は、印加電圧を直列素子に均等に分担させるための外部付属回路を必要とし、制御回路および保護回路が複雑となり信頼性の低下は免れない。また、素子自体が相当高価なうえ特性を合わせるための歩留りの問題、故障素子が発生した場合には、当該素子単体の交換だけではなく直列数全体の交換を必要とすることから、電力用素子の直列接続による改造法は、回路の信頼性および保守性、技術的問題など総合的に判断した場合に、実現性に乏しい改造方法である。

#### (4) 改造第4案の検討

本案は、1台の変圧器で三相全波整流を行い、直流1,500Vの電圧を得る方法で、サイリスター素子は改造第3案同様に直列接続する必要がある。このため、外部分圧回路、素子特性、保護回路などの問題以外に、整流器用変圧器の更新も必要なため、実現性に乏しい改造方法である。

次に、サイリスター素子の機能はPN接合部温度の上昇によって失われるので、冷却方法に充分留意する必要がある。PN接合部分で発生した熱は伝導作用によって放熱部に導かれ、ここから自然放熱または強制風冷、あるいは液体冷却によって熱の発散を行う3種類がある。ここで液体冷却法以外の場合には、放熱フィンに付着する塵埃のために放熱効果が低下して素子の破壊を誘発することがある。

また、高電圧充電部分には塵埃が付着し易く、多湿時にはこれが原因で接地事故、または短絡事故を招くことがある。このため、外気導入による風冷方式の場合には、集塵効率の優れたフィルターを使用するとともに、必要風量の確保に留意することである。最近の設備では、整流装置を設置する室内には防塵処理を施し、空調設備による内部循環方式が普及しているようだが、長期に亘る保守性や維持費を考慮した際に、初期投資の多い液冷方式と、どちらを採用するかについては慎重に検討すべきであろう。

半導体整流素子の信頼性については、日本鉄鋼協会技術講座によれば、昭和42年から昭和51年の間に設置された圧延設備などの、電力用サイリスター素子15,499個について、昭和51・52年度における故障実績を年間換算した1年間あたりの故障率は、内部要因によるもの0.17%、外部要因によるもの0.07%、その他0.05%、合計0.5%であり、破損した素子はいずれも電流破壊の様相

を呈していると報告されている。この報告には、一次要因については言及されていないが、常に急激な負荷変動と、正転・逆転を繰返し連続運転を行っている設備の故障実績からみて、サイリスター素子の信頼性として一応の目安とみることができる。

一方、自動制御系におけるアンプ・カードの故障率については、トランジスターカード9,496枚に対し0.15%、ICカード1,196枚に対して0%と報告されている。一般に設備の信頼性は、主回路と制御回路が総合して評価されるものであり、特に制御回路は使用部品数が多く回路も複雑なため、常に信頼性の点で問題視されていたが、IC制御カードの普及によって、設備の信頼性は著しく向上するものとみられる。

## 6. あとがき

遷音速風洞駆動用4,500kW直流電動機は、使用電圧は1,500Vであり、この電圧で使用する直流電動機は類例の少ない機種である。したがって電源設備である水銀整流器についても同一機種が存在せず、不良品が発生した場合の補給は皆無の現状にある。

ここで水銀整流器による直流電源設備を、サイリスターによる直流電源設備に換装するにあたって行った予備調査の結果では、表4に示す4種の改造案があり、このうち、改造第1案および改造第2案が最も有力な換装方式と云える。

この調査を行うにあたっては、三菱電機株式会社重電技術部、有賀恵蔵氏には多大の御協力を得たので、ここに深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 航空技術研究所；航空技術研究所2m×2m 遷音速風洞の計画と構造，NAL TR-25 (1962)
- (2) 三菱電機；VOL 35, No.3, (1961)
- (3) 電気学会；水銀整流器，(1960)
- (4) 高田勇次郎；電気機器Ⅱ，(1961) オーム社
- (5) 電気学会；静止電力変換装置，(1975)
- (6) 板東眞治；第58回西山記念講座，(1979)，日本鉄鋼協会
- (7) SCRハンドブック，(1966)，丸善
- (8) 日刊工業新聞，(1967. 10. 27)
- (9) 小野山悟；電気鉄道，VOL 33, No.7, (1979)，鉄道電化協会

---

## 航空宇宙技術研究所資料395号

昭和54年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)

---

