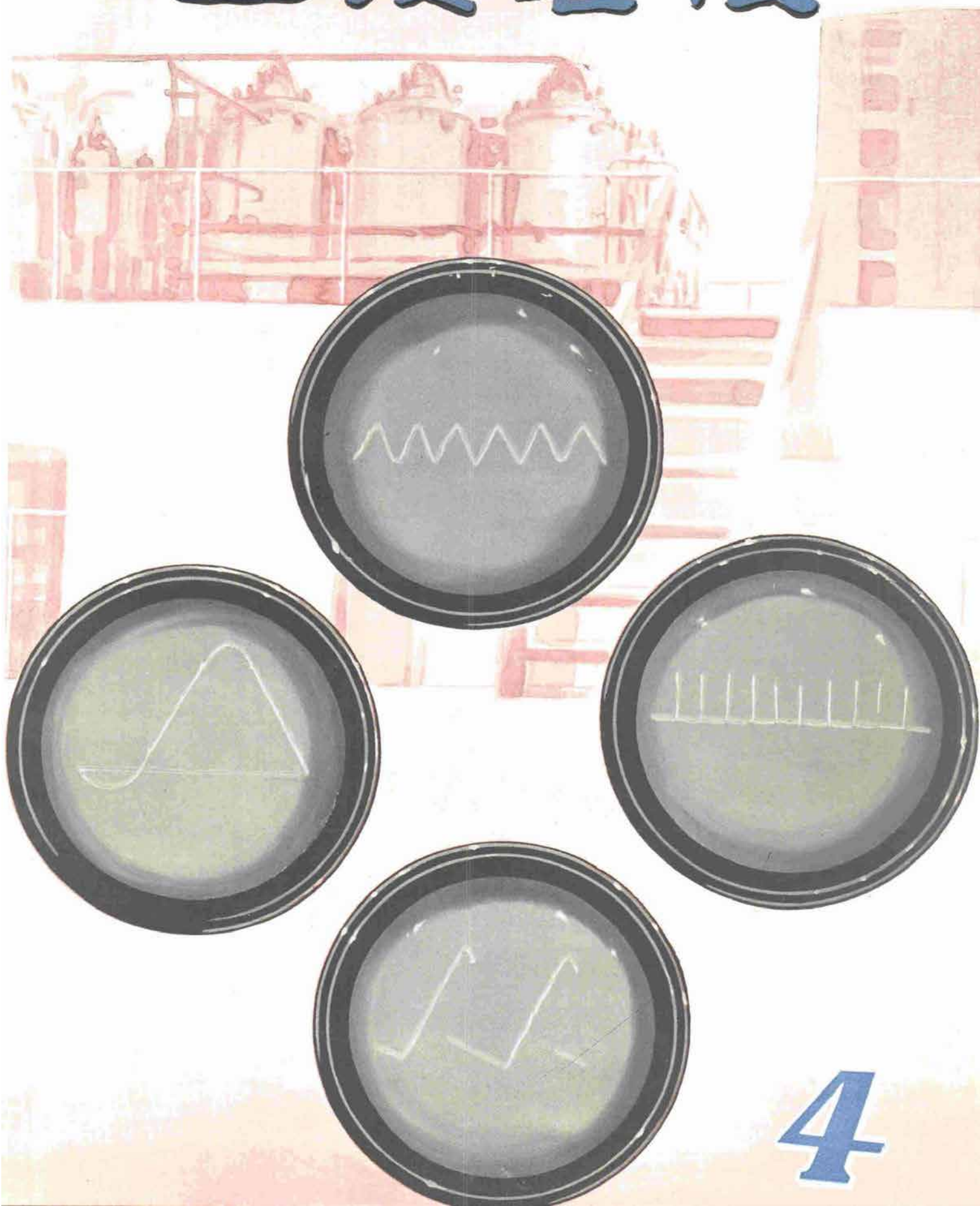
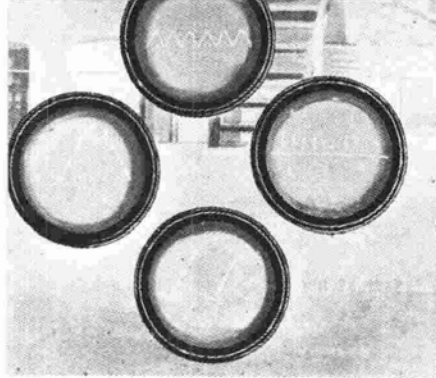


— MITSUBISHI — DENKI —

# 三菱電機





# 三菱電機

## 表紙説明

三菱鉱業高島鉱業所に設置せられた3,000kW  
イグナイトロン周波数変換器(6 $\sim$ 50 $\sim$ )で  
ある。昭和26年12月より無事故で運転してい  
ることは初めての形式の周波数変換器として  
は好成績というべきであろう。

ブラウン管オシロ、上は直流電圧 (2,000V  
1215%のリップル) 左は交流電圧 (3,000V)  
右はイグナイター電流、下はイグナイトロンの  
陽極陰極間に現われる電圧波形を示してい  
る。

昭和27年 第26巻 第4号

## 目次

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 3,000kWイグナイトロン周波数変換装置.....     | 已斐... 2    |
| 同期機過渡現象の解析.....                | 潮.....10   |
| 超音波探傷試験における二三の問題.....          | 河合...16    |
| 超音波による鋼中探傷の例.....              | 高沖...21    |
| 国鉄横浜変電所 2,000kW 回転変流機の改造 ..... | 片岡・加藤...28 |

## 三菱電機株式会社

### 本社

東京都千代田区丸の内(東京ビル)  
(電) 和田倉 (20) 代表1631・2331

研究所 兵庫県尼ヶ崎市南清水  
神戸製作所 神戸市兵庫区和田崎町  
名古屋製作所 名古屋市東区矢田町  
伊丹製作所 兵庫県尼ヶ崎市南清水  
長崎製作所 長崎市平戸小屋町  
大船工場 神奈川県鎌倉市大船  
世田谷工場 東京都世田谷区池尻町  
郡山工場 福島県郡山市字境橋町  
福山工場 福山市沖野上町  
姫路工場 兵庫県姫路市千代田町  
和歌山工場 和歌山市岡町  
中津川工場 岐阜県恵那郡中津町  
福岡工場 福岡市今宿青木  
札幌修理工場 札幌市北二条東12  
大阪営業所 大阪府北区堂島北町8番地1  
(電) 福島 (45) 5251-9

名古屋営業所 名古屋市中区広小路通  
(電) 本局 (23) 6231

福岡営業所 福岡市天神町(天神ビル内)  
(電) 西 (2) 5821-5825

札幌営業所 札幌市南一条西5の14  
(電) (2) 3378・3911

仙台事務所 仙台市東一番丁63  
(電) 仙台 2573・8057

富山事務所 富山市安住町23の2  
(電) 富山 4692・5273

広島事務所 広島市袋町1(明治生命ビル)  
(電) 中 1069・4824

## 「三菱電機」編集委員会

|     |       |      |          |       |
|-----|-------|------|----------|-------|
| 委員長 | 岸本久雄  | 荒井潔  | 安藤三二     | 石橋英樹  |
| 委員  | 浅井徳次郎 | 岡屋精二 | 川田勝利     | 小林治一郎 |
|     | 市吉惟浩  | 澁谷進一 | 田宮利彦     | 松田新市  |
|     | 進藤貞和  | 前田幸夫 | 松尾米太郎    | 松岡治   |
|     | 熊村秀平  | 森村久男 | 薄井廉介     |       |
| 幹事  | 吾郷侃二  |      | (以上50音順) |       |

昭和27年5月15日印刷 昭和27年5月20日発行

『禁無断転載』 定價1部金30円

### 編集兼発行人

印刷所

印刷者

発行所

東京都千代田区丸の内2丁目3番地

東京都港区麻布竹谷町1番地

東京都港区麻布竹谷町1番地

三菱電機株式会社内

電話 和田倉 (20) 1631

吾郷侃二

博文堂印刷所

大橋佑吉

「三菱電機」編集部

日本出版協会登録 213013

# 3,000kW イグナイトロン周波数変換装置

## 3,000kW Ignitron Frequency Changer

60 $\sim$ から50 $\sim$ への電力変換用としてイグナイトロンを使用した静止式周波数変換装置が完成され、昭和26年11月から運転にはいつた。本稿は静止式周波数変換装置の原理および特性を解説し、上記の装置の概要および現地における試験成績の一部と運転特性を報告したものである。

伊丹製作所 己斐健三郎

### 1. ま え が き

今回初めてイグナイトロン整流器を使用した3,000kWの周波数変換装置が完成され、60 $\sim$ から50 $\sim$ への電力変換用として三菱鉱業高島磁業所において昭和26年11月から運転にはいつた。

この種の電子管を使用したいわゆる静止式周波数変換装置はわが国では新しいもので、従来の回転機によるものと異つた特性を持つており、使用個所によつては回転機式の持ちえない優れた特性を発揮する。とくにわが国のように60 $\sim$ 系と50 $\sim$ 系が分立しかつ周波数変動の著しい電力系統のもとではその使用範囲も広いと考えられるので、この機会に静止式周波数変換装置を簡単に解説し、首題の装置の概要および運転特性を報告する次第である。

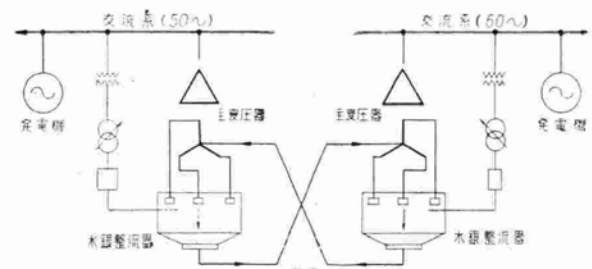
### 2. 静止式周波数変換装置の解説

#### ア. インバータの原理

水銀整流器を使用した周波数変換装置にはいろいろの方式があるが、大電力変換用として普通使用されるものは1図のように2組の水銀整流器を交叉接続とし、1組は整流器として交流 $\rightarrow$ 直流の変換を行わせ、他の1組をインバータとして直流 $\rightarrow$ 交流の逆変換を行わせるものである。

この装置は上記のように一度直流に変換するため、両交流系間の電力変換は全く非同期的に行うことができる。

インバータとして使用される水銀整流器は、整流器として使用されるものと本質的な差異はなく、図に示すようにいずれの場合も電流は陽極から陰極に流れるがただ各陽極に流れる電流の通流位相が異つてゐる。つまり整流器の場合は各陽極電流はその陽極につながる変圧器の



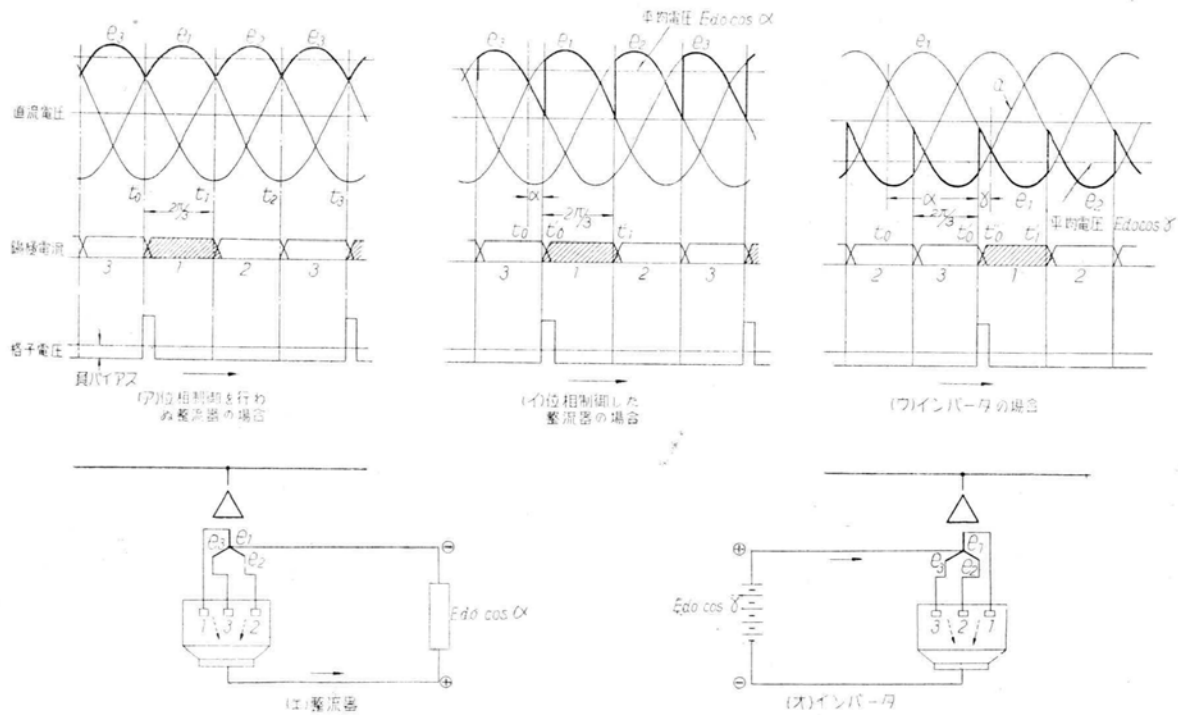
1 図 静止型周波数変換装置の接続

Fig. 1. Connection of Electronic Frequency Changer.

相電圧が1サイクル中正となる期間に流れるが、インバータの場合はこの相電圧が負の期間に流れる。すなわち制御回路の格子または点弧子の電源位相を変化して、陽極の点弧位相を約 $180^\circ$ 遅らせることによつて整流器をインバータとすることができる。

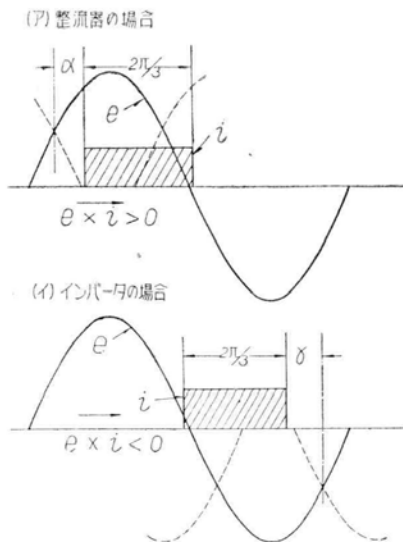
2図はこの説明図で簡単のため三相回路で示してある。(ア)図は位相制御を行わない整流器の場合で、(エ)図に示すように各陽極1, 2, 3につながる変圧器の二次相電圧をそれぞれ $e_1, e_2, e_3$ とすると(ア)図のように陽極1の電流は $e_3, e_1$ の正側交点 $t_0$ より $e_1, e_2$ の同交点 $t_1$ まで流れる。 $t_1$ で陽極2の電圧は1よりも高電位となるため、陽極1の電流は消滅し陽極2が点弧し $t_2$ まで電流を流す。

どのように陽極3の電流は $t_2$ より $t_3$ まで流れる。したがつて直流電圧(電弧電圧降下を無視した無負荷時電圧)はこれらの通流期間中の各相電圧を包絡する太線で示す波形となる。(イ)図は位相制御を行つた場合で、 $t_0$ では格子に負バイアスがかへられているため陽極1は $t_0'$ 点で点弧する。



2 図 動作 説明 図

Fig. 2. Illustrating Diagram for Rectification and Inversion.



3 図 変圧器二次  
電圧と電流  
Fig. 3.  
Rel tion of Voltage  
and Current at  
Transformer 2ry  
Winding.

すなわち格子に印加する正の尖頭波電圧の位相を  $t_0$  より  $t_0'$  に遅らすことによつて、陽極の点弧を  $\alpha$  角だけ遅らせることができる。直流電圧は同じく太線で示すようになり無負荷時平均直流電圧は  $E_{d0} \cos \alpha$  となる。ここに  $\alpha$  は位相制御角(遅れ角),  $E_{d0}$  は位相制御を行わない場合の無負荷時平均電圧である。したがつて点弧位相をさらに遅らせ  $\alpha=90^\circ$  とすると  $E_{d0} \cos \alpha$  は零となる(ただし負荷は抵抗に比べてインダクタンスが非常に大であると仮定する)。さらに位相を遅らせ  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  とすると  $E_{d0} \cos \alpha$  は負となる。この場合  $t_0'$  より  $t_1'$  までの相電圧の平均値は負となるため、格子を正としても陽極電流は流れない。このとき(オ)に示すように直流

側よりこの負の相電圧にうち勝つ電圧を加えると電流を流すことができる。この場合変圧器の二次巻線に流れる電流の方向は前と同じであるが、流通する位相が異つている。したがつて 3 図(ア)と(イ)に示すように電力の符号は正負逆になり(ア)の整流器の場合と(イ)の場合では変圧器は反対の仕事をしたこととなる。つまりこの 3 図(イ)すなわち 2 図(ウ)の場合がインバータで、直流側の電力は変圧器を経て交流側に押込まれることになる。2 図(ウ)に示すようにインバータの場合の位相角は遅れ角  $\alpha$  であらわさず相電圧の負側の交点  $t_0''$  からの進み角  $\gamma$  であらわされる。ただし  $\gamma=180^\circ-\alpha$  である。また太線で示す包絡線はインバータの場合は直流電動機における逆起電力にあたるもので、直流側より加えられる電圧はこれより大きくなければならない。

インバータで直流を交流に変換するためにはもちろんその交流系の相回転にあわせて陽極に順次電流を流す必要があり、2 図(ウ)に示すように陽極 3 から 1 に転流させるためには格子を正電位にしたとき陽極 1 の電位は 3 よりも高くなければならない。したがつてインバータの陽極を順次転流させるためには変換する交流電圧を陽極にあたえるとともに、格子を  $t_0''$  よりも進んだ位相で開放することが必要である。この位相で転流を行わないと  $t_0''$  以後の位相では  $e_3$  は  $e_1$  より高電位となりもはや陽極 3 より 1 への転流は行われず 3 は電流を流しつづけ、逆起電力となつていた負の相電圧は  $\alpha$  点で正となり、陽極 3 には大きな短絡電流が流れる。一般に二つの陽極間の転流には陽極回路のリアクタンス(転流リアク

位相制御角  $\gamma > (\text{重り角 } u) + (\text{消イオン時間 } \tau)$   
 の条件が満足される位相で行うことが必要である。

上に述べたようなインバータを1図のように整流器と組合わせた静止式周波数変換装置はつぎのような特性をもっている。

- (1) 出力側交流系にかならず交流電源を必要とし、これでインバータ用変圧器を励磁する必要がある。このことは一面インバータより出る交流電力の周波数はこの交流電源の周波数そのもので、入力側（整流器側）交流の周波数とは全く無関係であるということになる。したがって回転機式のものに比べて非常に可撓性が強く、周波数変動の著るしい大容量交流電力網間を連繫するものとしては最適のものである。
- (2) 起動、停止が簡単で変換電力の調整が容易である。アの理由で同期合わせ等を必要とせず、開閉器の開閉によつてただちに起動停止ができる。また変換電力の調整はインバータの逆起電力に対する整流器出力電圧を増減すればよく、これは位相制御で簡単にかつ平滑に行うことができる。またこの位相制御で整流器とインバータを逆にすれば、電力変換の方向を容易に逆にすることができる。

(6) 以上はこの装置の優れた特性であるが、一方この装置は同期機のように励磁によつて力率を調整することはできない、のみならず入力側および出力側のいずれの交流系においても若干の遅相  $kVA$  を必要とする。これはこの装置の欠点で、この装置が使用される交流系に十分な遅相電力の供給源のない場合は静電蓄電器等を併用する必要がある経済的に不利となることが多い。

同所の電力系の概要は 4 図に示すとおりで自家発電設備として 7,000kW 1 台, 3,000kW 2 台のターボ発電機がありいずれも 3,300 V 50 $\sim$  である。3,000 kW のものは老朽しているため新しく 4,000kW ターボ 2 台が年

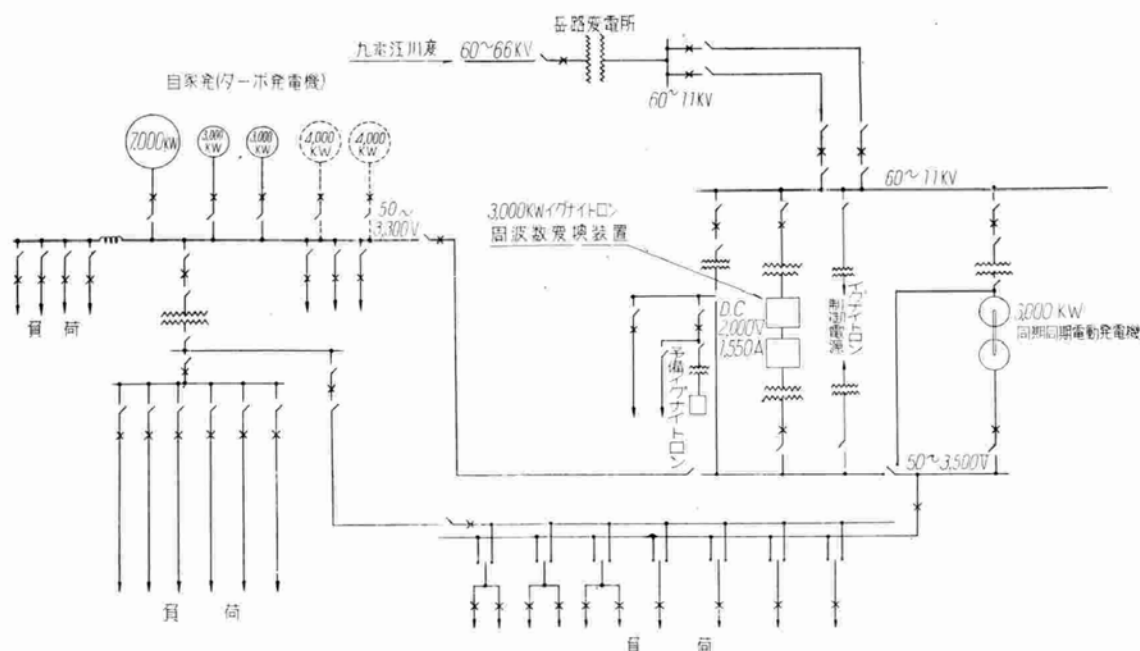
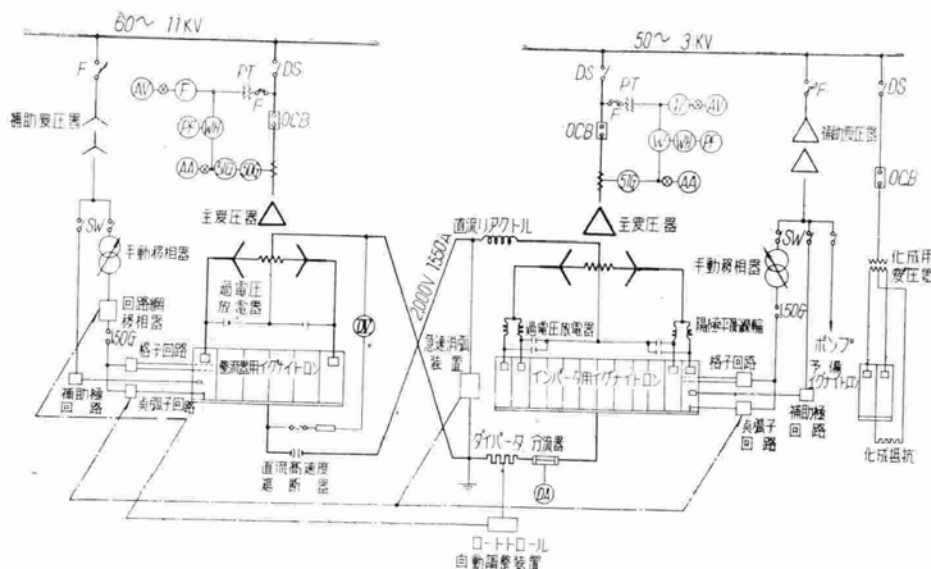
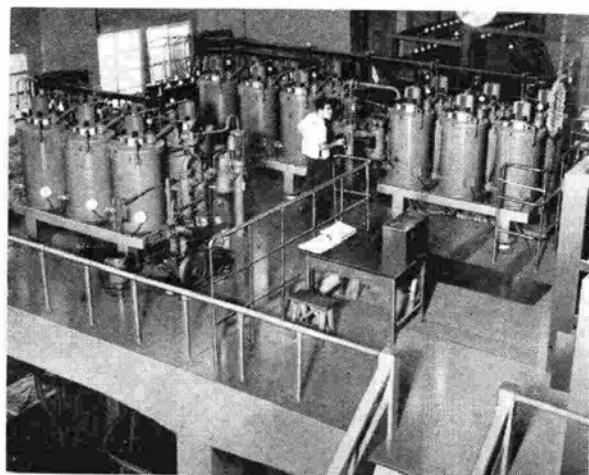


Fig. 4. Power Circuit Diagram at Takashima Mines (Mitsubishi Minig. Co.)



5 図 3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置  
Fig. 5. Skeleton Diagram of 3,000kW Ignitron Frequency Changer



6 図 三菱鉱業高島鉱業所納入  
3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置  
後方 : インバータ用イグナイトロン  
手前 : 整流器用イグナイトロン  
Fig. 6. 3,000 kW Ignitron Frequency Changer.

入力側 60~ 11 kV (買電)  
出力側 50~ 3.3 kV (自家発)  
直流側 2,000 V 1,550 A 連続定格  
力率 60~側 93% (最高)  
50~側 89% (最高)  
能率 92~94%  
(昭和26年11月20日官庁立会試験完了)

内に増設される。一方九州配電から 60~ の電力は街路変電所で 66kV から 11kV に変降され 4.7km の海底ケーブル二回線で同島に達している。同島の負荷はすべて 50~ で、買電電力を 50~ に変換する 3,000kW の同期同期電動発電機が既設々備としてある。

3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置・已斐

## ア. 主要機器

この装置の概略結線図は 5 図のとおりである。

整流器は整流器用変圧器および OCB を経て 60~、11 kV 母線に接続されている。この変圧器の容量は 4,350 kVA 連続定格で、結線は一次三角、二次二重星形六相(相間リアクトル付)である。インバータは同じくインバータ用変圧器および OCB を経て 50~ 3,300 kV の自家発母線に接続されている。この変圧器は 4,650 kVA、連続定格で結線は整流器用と同一である。いずれの変圧器も

電動操作の無電圧時タップ切換装置がありほかに化成タップを持つている。

直流回路は 2,000V、1,550A で直流リアクトル、高速遮断器および変換電力自動調整用のダイバータが接続されている。直流リアクトルは直流電流の脈動を平滑にするとともに、故障時の事故電流を制限するためのものである。なお直流回路はインバータ側を接地してある。

この装置の整流器およびインバータには最近目覚ましい発達を遂げたイグナイトロンを使用している。6 図は現地における写真で、整流器は 6 タンク(手前) インバータは 12 タンク(後方) よりなつてゐる。いずれも 3,000 kW 連続定格でこれらの外形寸法、および重量は 1 表に示すとおりである。

1 表 イグナイトロンの外形寸法 重量

|                   | 長さ<br>(mm) | 幅<br>(mm) | 高さ<br>(mm) | 吊上<br>高さ<br>mm | 製品<br>重量<br>(kg) | イグナイト<br>ロン単槽重<br>量 (kg) |
|-------------------|------------|-----------|------------|----------------|------------------|--------------------------|
| 整流器用<br>イグナイトロン   | 2,800      | 1,300     | 2,000      | 2,600          | 3,300            | 400                      |
| インバータ用<br>イグナイトロン | 5,000      | 1,370     | 2,000      | 2,600          | 6,550            | 400                      |

整流器およびインバータを構成する各イグナイトロンタンクはいずれも同一のもので、そのいずれとも容易に取替えられる予備イグナイトロンタンク 2 本が化成装置とともに付してある。

冷却方式は水冷式で、同島では豊富に水が得られないため電蝕防止も考えて循環再冷方式となつてゐる。全イグナイトロンタンクを冷却する循環冷却水は 1 台の海水用再冷器で冷却される。水銀ポンプはべつの小型海水用再冷器で冷却される。

この装置にイグナイトロンを使用した理由は

- イグナイトロンが今までの整流器としての実績よりみて従来の多陽極型のものより信頼度が高いばかりでなく、インバータとしてもその運転にもつと

も必要な確実な制御能が容易に得られること

b. イグナイトロンは点弧子制御を行うため前に述べた消イオン時間 $\tau$ が短く、したがって $\tau$ が小となり高力率の運転特性が得られること

c. 多陽極型に比べ電弧電圧が低く高能率であること

d. 小型軽量の小タンクに分割されているため取扱保守が容易であること、各タンクを比較測定することによって温度、真空の監視が容易にでき、万一故障の場合は予備タンクと簡単に取替えること等のためである。

いうまでもなくイグナイトロンは他の型の整流器と異り点弧子によって毎サイクル陰極輝点を生成し陽極を点弧する。したがって点弧子のみでも位相制御が行われるがこの装置は二重格子として点弧子と格子を併用して、もつとも確実に陽極の点弧を制御するようになっている。

一方イグナイトロンでは点弧子が失弧して、このため転流失敗がおこる場合が考えられる。これに対してはインバータ側イグナイトロンを12タンクとし、各相に2タンクのイグナイトロンを並列とし1タンクが失弧しても他のタンクで転流を行うようにしてある。

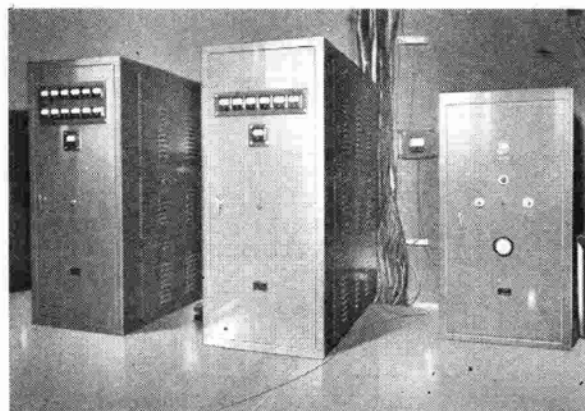
#### 4. 制 御 装 置

制御回路は前記5図に示すように整流器およびインバータ側にそれぞれ主回路母線につながる220Vの制御用変圧器を有している。イグナイトロンの補助極回路は直接これにつながっているが、格子および点弧子回路は位相制御をするために、誘導型移相器を通してこれにつながっている。この移相器は手動であるが整流器側にはほかに自動調整用の回路網移相器があり前の移相器と直列になっている。

点弧子回路は点弧子を確実に点弧するために、蓄電器の充電々荷を小型硝子整流器で放電し、非常に尖頭値の高い電流を点弧子に流すようになっている。

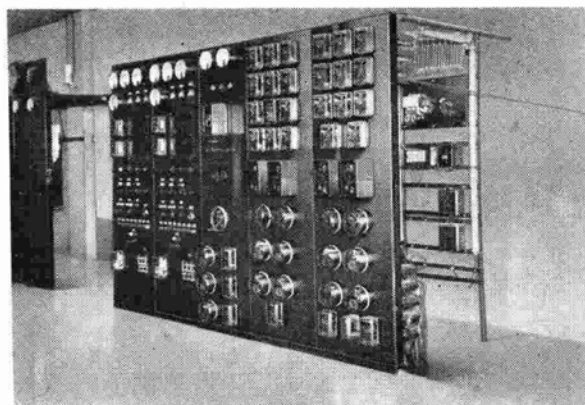
点弧子・格子および補助極回路はイグナイトロン本体の高圧が印加されているため、これらは7図の写真のようにキュービクル型器具盤にまとめイグナイトロン本体横に設置してある。これらを制御するスイッチ、継電器類は絶縁変圧器の低圧側にあり、8図に示す制御盤にまとめられてある。制御盤はこの写真のように整流器およびインバータ側の変圧器とイグナイトロンを制御する交流盤2面と直流盤1面および継電器盤2面からなっている。直流盤は直流遮断器の操作ハンドルおよび整流器側移相器があり変換電力を操作する。この盤には変換電力の自動調整装置がついている。

この装置の変換電力は前述のように整流器出力電圧とインバータの逆起電力の大きさで定まるが、これらの電圧は点弧位相の制御によって定まるほか、交流側の電圧変化で変化する。このためこの装置は交流側の電圧変動にかかわらずあらかじめ調整した任意の値に変換電力を



7 図 三菱鉱業高島鉱業所納入  
3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置  
制 御 器 具 盤  
左方より インバータ器具盤  
整流器器具盤  
整流器用硝子整流器盤

Fig. 7. Auxiliary Control Cubicles.



8 図 三菱鉱業高島鉱業所納入  
3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置  
制 御 盤  
左方より 60 $\sim$  交流盤  
50 $\sim$  交流盤  
直流盤 (自動調整盤)  
整流器継電器盤  
インバータ継電器盤

Fig. 8. Control Panels.

自動的に保持するようになっている。この自動調整装置は前記の回路網移相器とロートロールよりなっている。ロートロールは直巻界磁を有する200 Wの他励式発電機で二つの相反する他励界磁を持つており、この一つは直流回路のダイバータによって変換電流に比例した界磁を与える電流界磁で、他の一つは規準界磁で任意の一定界磁を与える。回路網移相器は直流励磁巻線を有する飽和リアクトルで、ロートロールの出力で直流励磁を変化すると、このリアクタンスが変り、位相制御が行われる。したがって変換電流があらかじめ調整した値よりはずれると、ロートロールの電流界磁と規準界磁

の平衡が破れ電圧を誘起し、直巻界磁によつてこれを増幅しその出力は飽和リアクトルの直流励磁を変化し位相制御によつて整流器出力電圧を増減して、変換電流を調整値に保つことができる。

この装置を起動するには交流盤の回転スイッチで整流器およびインバータの制御回路と変圧器を生かし、直流遮断器を投入した後整流器側手動移相器を回転すれば、変換電力はきわめて円滑に増大するから任意の値に増大した後自動調整装置を投入すればよい。停止の場合はこの逆を行えばよい。したがつて同期合せ等を要せず簡単に起動でき、また起動時電源に衝撃を与えることはない。

#### ウ. 保護装置

この装置は回転機と趣を異にしているためとくに運転保守が容易なように冷却系・真空系等の故障および異常に対して警報表示および OCB 自動開放等の保護連動を行うとともに、保守員の誤操作に対して安全なように起動停止に十分な電気連動を施してある。

逆弧および転流失敗に対しては 5 図に示すように消弧遮断装置と直流高速度遮断器があり急速に故障電流を遮断する。真空系・冷却系に異常がなく偶発的な逆弧および転流失敗によつて、これらの装置が動いた場合は自動的にただちに再閉路を行い運転を継続するようになっている。なお自動再閉路後一定時間内にふたたび遮断が行われた場合は自動的に整流器およびインバータ側の OCB を開放し交流系から切捨すようになっている。

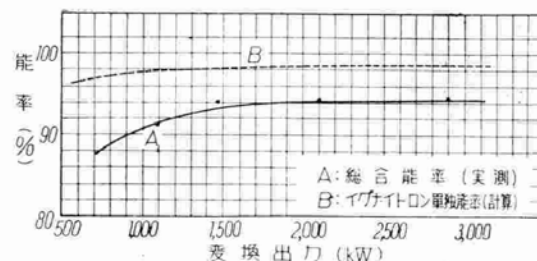
消弧遮断装置は二種あつて、5 図に示すように一つは高速度継電器 50 G によつて、整流器側交流電流が過大となつた場合に整流器側およびインバータ側の格子回路と点弧子回路を遮断し消弧遮断を行うもので、いま一つはサイラトロンを使用し転流失敗時のインバータの逆起電力の喪失を利用してこれを働かし、整流器およびインバータの点弧子電流を切り消弧遮断を行うものである。転流失敗時の故障電流は直流リアクトルによつて立上りが若干遅れるため、電圧変化を利用したサイラトロンで消弧遮断すれば、転流失敗時の故障電流は著るしく少くなりこの装置および交流系に与える故障時のショックはきわめて小さい。この場合は直流遮断器も普通作動せずただちに自動再閉路が行われるため転流失敗の発生をほとんど感知できない程度である。

#### 4. 試験成績および運転特性

この装置は現地据付後各種の試験を実施したがその概要はつぎのとおりである。

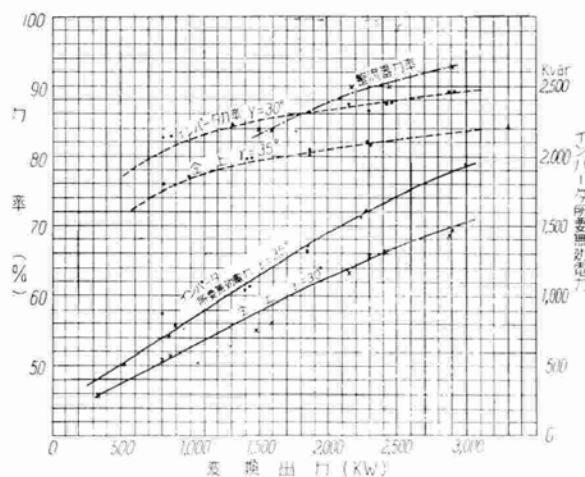
##### ア. 能 率

9 図はこの装置の能率を示すもので、曲線 B は整流器またはインバータのイグナイトロンのみの単独能率で  $1/2$  負荷以上で 93.5~98.7% である。整流器側交流入力とインバータ側交流出力から測定した変圧器損失を含めた総合能率は曲線 A で  $1/2$  負荷以上で 93~94% であつた。



9 図 3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置の能率

Fig. 9. Efficiency of 3,000kW Ignitron Freq Changer



10 図 3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置の力率と所要無効電力

Fig. 10. Power Factor and Necessary Lagging kVA of 3,000 kW Ignitron Freq Changer

#### イ. 力 率

前に述べたようにこの種装置は同期機によるものに比べ力率がわるく 10 図にこの実測値を示してある。

整流器側力率は全負荷において 93% となつている。低負荷においては整流器の電圧を下げるために点弧位相を遅らせるので力率が悪くなつている。しかし変換負荷と交流電圧に応じて変圧器タップを切換えれば力率を 95% 程度にあげることができる。(この測定はタップ切換えを行わずに実施したものである)

インバータでは前記 2. のアで述べたように位相進み角  $\gamma$  に一定の条件があり、この  $\gamma$  によつて力率が定まる。図には  $\gamma$  が  $30^\circ$  および  $35^\circ$  の場合の測定値とそのときの交流側よりインバータに供給すべき遅相無効電力を示してある。現在実際の運転は  $\gamma$  角を  $27^\circ \sim 33^\circ$  としてあり、力率は大体 85~87% である。

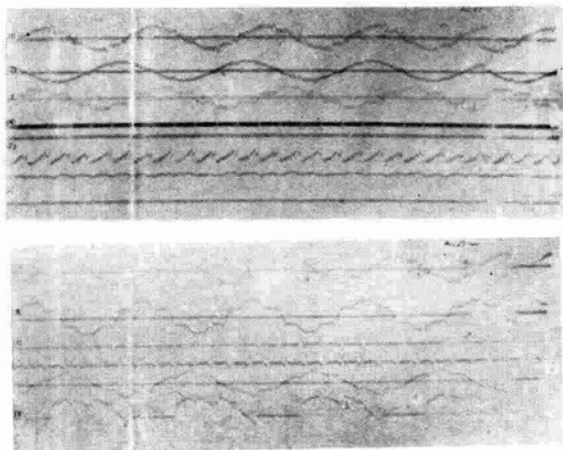
#### ウ. 誘導障害

一般に水銀整流器を使用する場合は交流側および直流側の電圧電流に高調波が含まれ、このため付近の通信線およびラジオ等に誘導障害がおこることがある。とくに位相制御を行う場合はその傾向が強くなる。今回の高島の場合は送配電線の大部分がケーブルであるためその障

害はないと予想されその対策はべつに講じなかつた。据付後の実測結果も一般電話、ラジオに対してはほとんど問題なくただ海底ケーブルに封込まれた変電所間の直通電話のみ 1,200 $\sim$  程度の誘導音が若干生じている。

11図のオシロは 3,000kW の変換を行つている場合の直流および交流側の電圧電流波形である。

なおこれらの高調波が負荷側に与える影響は認められなかつた。



11図 3,000kW 変換時の電圧、電流波形

- 現象 (1) 整流器側交流電圧(11kV)  
 (2) インバータ側交流電圧(3,050V)  
 (3) インバータ側交流電流(680A)  
 (4) インバータ点弧予電流  
 (5) インバータ直流電圧(1,850V)  
 (6) 直流電流(1,620A)  
 (7) (1)に同じ  
 (8) 整流器側交流電流(250A)  
 (9) (4)に同じ  
 (10) 整流器点弧予電流  
 (11) 7,000 kW ターボ出力電流  
 (12) インバータ陽極、陰極間電圧

Fig. 11. Voltage and Current Waveform at Full load.

## エ. 運 転 特 性

その他一般の運転状況はきわめて安定で、制御回路に二、三不備の点があつたが調整後は転流失敗もほとんどなく良好な運転成績を示している。

同所既設の回転式周波数変換機では、周波数変動と負荷変動のためにこれを自家発系統と並列運転することは困難であつたが、この装置によつて完全にかつ容易に買電と自家発電電力を連繫でき、しかも位相制御によつてきわめて容易に買電消費量を調整しうる等優れた運転特性を発揮している。

また同所の重要な坑内揚水ポンプ等は周波数の低下によつて著るしく機能が低下するため、現今のように周波数変動の著るしい場合は同期式変換機によつて変換された買電々力では運転困難であつたが、この装置を使用すれば周波数変動の大きな買電々力を、自家発の 50 $\sim$  一定の電力に変換することができる。このことは今更のべ

るほどのことではないがこの装置の大きな利点である。

## オ. 事 故

起りうる事故は前にのべたように整流器側の逆弧とインバータ側の転流失敗である。逆弧の場合は前述の消弧継電器で 1 $\sim$  以内に故障電流を遮断しうるし、転流失敗の場合はサイラトロンを使用した急速消弧装置によつてきわめて迅速に遮断することができる。しかも一般に水銀整流器は回転機に比らべて機械的に頑丈である。したがつて事故による損傷はこの装置自体よりもむしろ電源系統に対する影響が問題で、とくに転流失敗時高速のターボ発電機におよぼされる影響が懸念されたが現地試験の結果問題ないことが判つた。

12図および 13図は約 7,500 kW の電力変換中のこの装置を、人為的に転流失敗させ(インバータの一相を故意に失弧させる)約 1 秒後に自動再閉路を行つた場合の各所の電流、電圧を 2 台の電磁オシロを連動して撮影したものである。オシロ図は上よりインバータ側一次電圧、急速消弧装置サイラトロン電流、7,000 kW ターボ電力、直流電圧、直流電流、7,000kW ターボ電流、3,000 kW ターボ電流、インバータ側一次電流、整流器一次電流、ロートル出力電流、直流電流である。11図は急速消弧装置を使用せず直流高速度遮断器で遮断した場合で、12図は急速消弧装置を作動せしめた場合である。これによると転流失敗時の故障電流は直流電流の最大値では前者の場合は 9,300A、サイラトロンを動作させた後者のときは 3,650A となつている。また 7,000 kW ターボの出力は前者で 7,500 kW、後者で 7,000 kW の最大値をとり 2 $\sim$  程度で故障が消滅するとともに減少し、この装置が再閉路されるまでこの装置に替つて負荷を分担している。同発電機の電圧変化は故障発生時わずかに減少する程度である。3,000 kW ターボおよび整流器側交流電源に対する影響も僅少で問題なく、サイラトロンの急速消弧装置を使用したときはとくに影響が少い。

発電機に対する機械的ショックは外部よりはほとんど感知できない程度であつた。

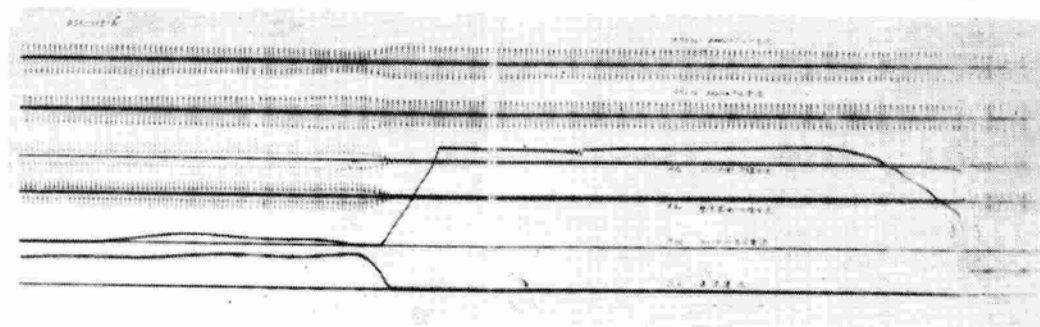
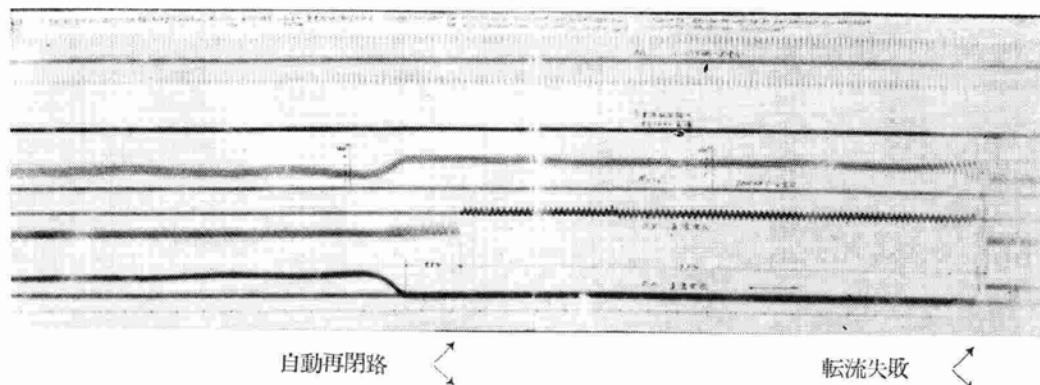
## カ. そ の 他

この種装置の運転には無効遅相電力の供給が問題となるが、この装置は 2 章に述べたように比較的高力率であるため所要無効電力も 10 図に示すように少く負荷があまり大きくない場合は 7,000 kW ターボの過励磁でこれを供給できるが、さらに老朽した 3,000 kW ターボのタービンを取はずしこれを低周波起動し同期進相機として利用することも計画され、現地における予備試験は好成績であつた。

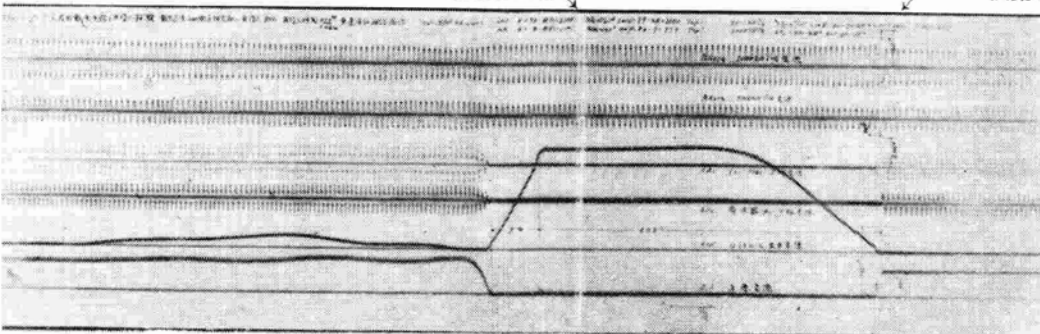
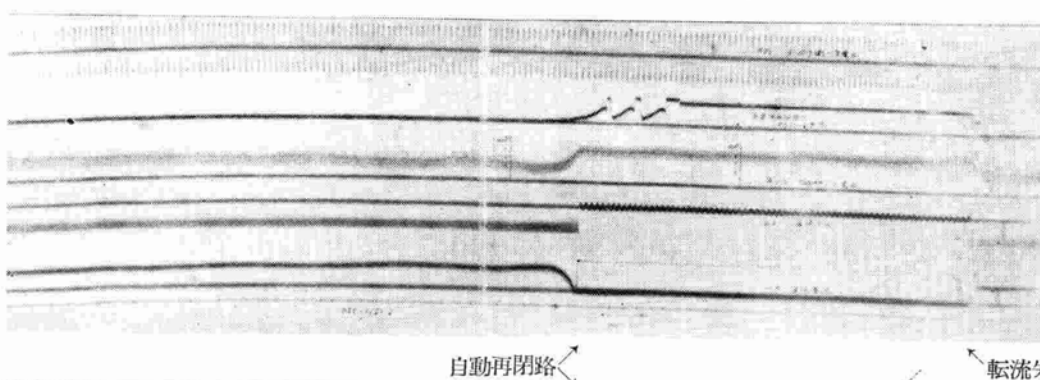
なお 60 $\sim$  側力率は 3,000 kW 同期変換機の電動機側過励磁によつて非常に改善することができた。

## 5. む す び

以上述べたように静止式周波数変換装置は従来の回転機式のものと全く趣を異にしており、その優劣は使用目



12 図 転流失敗時の故障電流 (直流高速度遮断器で遮断した後自動再閉路した場合)  
Fig. 12. Fault Current at Inverter Arctrough.



13 図 転流失敗時の故障電流 (サイラトロン急造消弧装置で遮断した後自動再閉路した場合)  
Fig. 13. Fault Current at Inverter Arctrough.

的、使用場所の電力系統の状況等十分検討したうえでないと一概に断じられない。またこの装置の実際の運転成績の良否もお今後の時日の経過をまたねばならない。

しかしながら今回の場合のように十分な無効電力源があり、かつ周波数変動の大きな場所においては、一応現地試験の結果からみて従来のものに比べて非常に優れた特性を発揮できることが明らかとなつた。したがつてわが国のような電力系においてはこの種装置の今後の発展が期待される。

3,000 kW イグナイトロン周波数変換装置・已斐

設計者の一員として、達識ある決断によつて本邦最初のこの装置の採用をあえて決定された方々に深く感謝するとともに、さらに一層よりよきものへの完成を期する次第である。

終りにのぞみこの装置の基礎的研究に盡力された研究所電気課故津崎一栄技師および浜田賢技師、本装置の試験調整に盡力された検査課鯨岡技師、種々指導をたまわつた大中臣輔副長、木村久男博士、加藤又彦係長等各関係者に深謝する次第である。

# 同期機過渡現象の解析 1

## Analysis of Transient Phenomena in Synchronous Machines

同期機の各回路を変数回路として対称軸成分を用いて解析し、その基本方程式をえて、各種過渡現象への応用例を示した。なお従来用いられて来た各種解析方法の相関関係についても付言する。

研 究 所 潮 恒 郎

### ま え が き

同期機における過渡現象の研究は古くから多くの機器ならびに電力技術者に扱われて来た問題である。なかんずくその平衡ならびに不平衡短絡過渡現象は機器の保護ならびに系統安定度の上からきわめて重要であつて、現在においてもなお幾多の問題が残されている。この問題に関して最初に卓越した研究結果を与えたのはDohertyおよび Nickle であつた。同期機過渡現象の基本的な各種の問題に対する解明は、ほぼその 1926 年から 1930 年に至る間の報告中<sup>(1-4)</sup>に与えられている。さらにその後これに大きな光明をもたらしたのは Park であつていわゆる二反作用理論を發展せしめ、この問題に対する現在の基礎を確立したのである。<sup>(5,6)</sup> その後の研究はほとんどすべてがこの Park の線に沿つて行われ、引続き Wagner, Clerke その他の人々によるすぐれた發展と応用とが行われている。<sup>(7,8,9)</sup> 最近における顕著な研究は Kron その他の人々によるこの問題の發展であろう<sup>(10,11)</sup>それは主として交流計算盤あるいは ANACOM によつて問題を解決するための数学的予備手段を与えんとするものであるが、広汎な概括的な立場からテンソル解析、あるいは微分幾何学を用いて進歩的な研究を進めつつあるのである。

筆者は先に、凸極発電機の負荷遮断時の異常電圧の解析のためにこの問題を取扱い、同期機の解析方法ならびにその応用についてこれを一般化し、各種過渡現象の一般的解法をうる事ができた。この報告においてはこれを主体にしてその概要を述べんとするものであるが、なお各種の解析方法ならびにその相互間の関連性にも言及したいと考える。得られる結果はもちろん、従来各種の方法により求められた結果と一致するものであるが、周知の結果を別の側面より眺めその物理的意義を明らかに

し、これを統一して今後の参考とするためここに報告する次第である。

### 第1章 凸極同期発電機過渡現象の一般的解法

#### ア. 基本 程式および誘導系数

回転機を取扱うにあつて根本的に重要な問題は、その規準座標系を如何に選ぶかということである。これについては後に詳述するが、その規準座標系の選び方によつて、種々の成分、たとえば直軸、横軸、 $(d, q)$ 、正相逆相  $(x, y)$ 、正転逆転  $(f, b)$ 、 $\alpha$  成分  $\beta$  成分  $(\alpha, \beta)$  等が生じてくる。またそれによつて特殊な物理量が現われたり消えたりし、それぞれ扱うべき現象に応じて便、不便を生じてくる。

いま、もつとも理解に容易なように電機子回路の成分は固定子に固定し、回転子回路の成分は回転子に固定した座標系について考察を進めよう。これは後述するとおり、力学的にはホロノーム座標系について考えるわけである。その際つぎのような仮定を置いておく。すなわち

- (1) 発電機の各回路（電機子、界磁、制動巻線）を各々  $LR$  回路と考える。
- (2) 各回路の自己誘導系数、ならびに回路間の相互誘導系数は、回転子の空間的位置によつて、基本、あるいは2倍の周波数をもつて時間的に脈動する。
- (3) 制動巻線は界磁周辺に連続的に置かれた多相巻線を形成するものと仮定し、その界磁、ならびに電機子に対する作用を微小要素の積分効果として取扱う。
- (4) 磁気回路の飽和、回転数変動の影響は無視する。

上記仮定のもとに、一般的な場分について、電機子、界磁、ならびに制動巻線回路には、つぎの三つの基本微分

方程式が成立する。

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ M_0 \cdot I + \int_0^{2\pi} i_a(\theta) \cdot (\mu(\theta)) \cdot d\theta + i_f \cdot M_1 \right\} \cdot + r \cdot I = V \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ l_f \cdot i_f + M_1 \cdot \mathcal{G} + \int_0^{2\pi} i_a(\theta) \cdot \mu_{fa}(\theta) \cdot d\theta \right\} \cdot + r_f \cdot i_f = v_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left\{ d\theta \int_0^{2\pi} i_a(\varphi) \lambda(\theta, \varphi) d\varphi + \vec{\mu}(\theta) \cdot \mathcal{G} \cdot d\theta \cdot + i_f \cdot \mu_{fa}(\theta) \cdot d\theta \right\} + r_a(\theta) i_a(\theta) \cdot d\theta = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

(1) は電機子回路の式, (2) は界磁回路の式, (3) は制動巻線回路の式である。上式において

$$I = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \dots\dots \text{電機子電流} \quad V = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \dots\dots \text{端子電圧}$$

$i_f$  は界磁電流,  $i_{af}$  は制動巻線電流,  $\theta$  は界磁極面上において 1 pole pitch を  $2\pi$  とした場合の制動巻線素子の位置,  $\tau = 2\pi f t$  である。

また

$$M_0 = \begin{pmatrix} l_1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & l_2 & m_{23} \\ m_{13} & m_{23} & l_3 \end{pmatrix} \dots\dots \text{電機子誘導系数}$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \dots\dots \text{界磁電機子間相互誘導系数}$$

$l_f$  ..... 界磁回路自己誘導系数

$$(\mu(\theta)) = \begin{pmatrix} \mu(\theta)_1 \\ \mu(\theta)_2 \\ \mu(\theta)_3 \end{pmatrix} \dots\dots \text{制動巻線電機子間相互誘導系数}$$

$\mu_{fa}(\theta)$  ..... 界磁制動巻線間相互誘導系数

$\lambda(\theta, \varphi) d\varphi$  .....  $\theta$  および  $\varphi$  なる位置の制動巻線素子間の誘導系数

また  $r$  は電機子巻線抵抗,  $r_f$  は界磁回路抵抗,  $r_a(\theta)$  は制動巻線回路抵抗とし, また,  $\mathcal{G}$ ,  $M_1$ ,  $\vec{\mu}(\theta)$  はそれぞれ  $I$ ,  $M_1$ ,  $(\mu(\theta))$  の要素をとるベクトルを表わす。ここに各誘導系数は通常の値 (Henry) に  $2\pi f$  を乗じた値 (ohm) をもつてし, 前述のとおりつぎのように仮定する。

界磁電機子間の誘導系数は

$$M_1 = m_0 A_0 + \frac{1}{2} m e^{j\tau} A_1 + \frac{1}{2} m e^{-j\tau} A_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし

$$A_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad A_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix} \quad A_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{pmatrix} \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

また電機子においては  $M_0$  の各要素は

$$\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = l_0 A_0 + \frac{l}{2} e^{2j\tau} A_2 + \frac{l}{2} e^{-2j\tau} A_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{pmatrix} m_{12} \\ m_{23} \\ m_{31} \end{pmatrix} = m_0' A_0 + \frac{m'}{2} e^{j\frac{\pi}{3}} e^{2j\tau} A_2 \cdot + \frac{m'}{2} e^{-j\frac{\pi}{3}} e^{-2j\tau} A_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

また制動巻線電機子間では

$$(\mu(\theta)) = \mu_0 A_0 + \frac{1}{2} \mu e^{j(\tau-\theta)} A_1 \cdot + \frac{1}{2} \mu e^{-j(\tau-\theta)} A_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

また制動巻線界磁間では

$$\mu_{fa}(\theta) = \mu_1 \cos \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

制動巻線自身の誘導系数に関しては, 一応つぎのように仮定して計算を進めることとする。

$$\int_0^{2\pi} \lambda(\theta, \varphi) i_a(\varphi) d\varphi = \lambda(\theta) i_a(\theta) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{とし, } \lambda(\theta) = \lambda \cos 2\theta + \lambda_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

と置く。

#### 1. 正相平衡負荷電流に対する解

過渡現象を解析するにあたっては重畳の方法を取る。したがって始めに正相平衡負荷電流に対する解を求めて置く。

$$I = I_0 = \frac{1}{2} i e^{j(\tau-\phi-\frac{\pi}{2})} A_1 \cdot + \frac{1}{2} i e^{-j(\tau-\phi-\frac{\pi}{2})} A_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに  $\phi$  は電流の誘起電圧に対する位相角である。

$$\text{また } i_a(\theta) = 0 \quad i_f = \frac{v_f}{r_f} \quad \dots\dots\dots (12)$$

となるから

$$V = v_{0x} A_1 + v_{0y} A_2 + v_{0o} A_0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

と表わすならば,

$$\left. \begin{aligned} v_{0x} &= \frac{1}{2} m i_f e^{j(\tau+\frac{\pi}{2})} + \frac{1}{2} (l_0 - m_0') i e^{j(\tau-\phi)} \cdot \\ &\quad - \frac{1}{4} (l - 2m') e^{j(\tau+\phi)} \\ &\quad + \frac{r}{2} j e^{j(\tau-\phi-\frac{\pi}{2})} \\ v_{0y} &= v_{0x} \\ v_{0o} &= \frac{2}{3} i (l + m') \cos(3\tau - \phi) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

注目すべきは零相電圧に第三高調波分の存在することであるが, ただ同期機の構造上  $m' = -l$  であつてほとんど,  $v_{0o} = 0$  として差支えない。

## ウ. 一般過渡現象の解法

いま電機子電流に何等かの原因で  $\Delta I$  なる変化を生じ、また端子電圧に  $\Delta V$  なる変化を生じたとする。しかるとき  $\Delta V$  と  $\Delta I$  とは外部回路条件によつて関係付けられる。今変動発生前の  $V$  および  $I$  をそれぞれ、 $V_0$  および  $I_0$  とすれば、変動発生後

$$\left. \begin{aligned} V &= V_0 + \Delta V \\ I &= I_0 + \Delta I \\ \text{かつ、} V &= f(I) \quad (\text{外部回路条件}) \end{aligned} \right\} (15)$$

である。 $\Delta I$  なる電流変化による、発電機端子電圧変化を求め、これを  $\Delta V$  とすれば、 $\Delta I$  に関する微分方程式をえてこれを解くことができる。いま  $\Delta I$  なる電流変化に対する (2) 式および (3) 式は

$$l_f \frac{d\Delta i_f}{d\tau} + \frac{d}{d\tau} \mathfrak{M}_1 \cdot \Delta \mathcal{G} + \mu_1 \frac{d}{d\tau} \cdot \int_0^{2\pi} i_a(\theta) \cos \theta d\theta + r_f \Delta i_f = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mu_1 \cos \theta \frac{d\Delta i_f}{d\tau} + \frac{d}{d\tau} \vec{\mu} \cdot \Delta \mathcal{G} + (\lambda_0 + \lambda \cos 2\theta) \cdot \\ \cdot \frac{d i_a(\theta)}{d\tau} + r_a(\theta) i_a(\theta) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

となる。(16) および (17) 式を連立せしめ  $2\Delta i_f$  および  $i_a(\theta)$  を解けば、これを (1) 式に代入し

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} \left\{ M_0 \cdot \Delta I + \int_0^{2\pi} i_a(\theta) \cdot (\mu(\theta)) \cdot d\theta + \Delta i_f \cdot M_1 \right\} \\ + r \cdot \Delta I = \Delta V \end{aligned} \quad (18)$$

が得られる。

なお一般に以後つぎのような変換によつて解析を進めることとしよう。

$$\Delta I = i_0 A_0 + i_x A_1 + i_y A_2 \quad (19)$$

$$\Delta I = v_0 A_0 + v_x A_1 + v_y A_2 \quad (20)$$

## エ. 次過渡現象(制動巻線の時定数よりも小なる時間)

まず、次過渡現象の解を与えよう。これは実際問題としてもつとも重要な部分である。発電機回路に変動の起つた直後、制動巻線回路の時定数に比して短時間の間は、界磁制動巻線、電機子に対して、鎖交磁束不変の法則を適用できる。時定数については後に考えることとし界磁および制動巻線回路の抵抗分を無視すると、(16) および (17) 式は

$$l_f \cdot \Delta i_f + \mathfrak{M}_1 \cdot \Delta \mathcal{G} + \mu_1 \int_0^{2\pi} i_a(\theta) \cos \theta d\theta = 0 \quad (21)$$

および

$$\mu_1 \cos \theta \cdot \Delta i_f + \vec{\mu} \cdot \Delta \mathcal{G} + (\lambda_0 + \lambda \cos 2\theta) i_a'(\theta) = 0 \quad (22)$$

となる。(19) とともに (21), (22) を解けば、 $\Delta i_f$ ,  $i_a$  が得られ、途中の計算は省略するが、つぎの結果となる。

$$\Delta i_f = -\frac{3m_4}{2\Delta f} (e^{j\tau} i_y + e^{-j\tau} i_x) - \frac{3m_0}{\Delta f} i_0 \quad (23)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \Delta f &= l_f - \frac{\mu_1^2}{\Delta_0} & m_4 &= m - \frac{\mu \mu_1}{\Delta_0} \\ \frac{1}{\Delta_0} &= \frac{\pi}{\lambda} \left( 1 - \sqrt{\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0 + \lambda}} \right) \end{aligned} \right\} (24)$$

また

$$i_a(\theta) = -\frac{\mu_1 \cos \theta \cdot \Delta i_f + \vec{\mu} \cdot \Delta \mathcal{G}}{\lambda_0 + \lambda \cos 2\theta} \quad (25)$$

そこで、この (23) および (25) 式を (18) 式に代入すれば、電機子電流に対する微分方程式が得られるのである。途中のマトリックス計算は相当複雑であるが、これを省略し、その結果のみを示せばつぎのようになる。

$$\frac{d}{d\tau} x_0 \cdot i_0 = v_0 \quad (26)$$

$$\frac{d}{d\tau} (\xi_1 i_x + \xi_2 e^{2j\tau} i_y) = v_x \quad (27)$$

$$\frac{d}{d\tau} (\xi_1 i_y + \xi_2 e^{-2j\tau} i_x) = v_y \quad (28)$$

ただし、上式において

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= l_0 + 2m_1' - \frac{3\mu_0^2}{\Delta_1} - \frac{3m_0^2}{\Delta f} \\ \xi_1 &= (l_0 - m_0') - \frac{3m_4^2}{4\Delta f} - \frac{3}{4} \frac{\mu^2}{\Delta} \\ \xi_2 &= \frac{1}{2} (l - 2m') - \frac{3m_4^2}{4\Delta f} \cdot \\ &\quad \cdot - \frac{3}{4} \mu^2 \left( \frac{2}{\Delta_0} - \frac{1}{\Delta_1} \right) \frac{1}{\Delta_1} = \frac{2\pi}{1/\lambda_0^2 - \lambda^2} \end{aligned} \right\} (29)$$

(26)~(28)式は発電機の構造上、 $m_1' = -l$ ,  $m_0 = 0$  とした場合で、かつ  $r=0$  とした場合のものである。一般には式はこれより幾分複雑となつて、基本波変常数を含んだ項が幾つか加わってくるのであるが、通常の解析にはこれで十分であるので省略しておく。(26)~(28)式が後に示すとおり、各種の過渡現象の解析に応用して便利な一般式である。なお式からただちに判るように、解析に用いた  $(x, y, 0)$  系のインピーダンステンソルは

$$Z = \begin{pmatrix} p\xi_1 & p\xi_2 e^{2j\tau} & 0 \\ p\xi_2 e^{-2j\tau} & p\xi_1 & 0 \\ 0 & 0 & px_0 \end{pmatrix} \quad (30)$$

で与えられる。要素が変常数であることに注意したい。

## オ. 過渡現象(界磁回路の時定数より小さい時間)

変動の発生後時間が経過して、制動巻線回路の時定数あるいはそれ以上になると、制動巻線回路に対しては、鎖交磁束不変の法則が適用できなくなる。これが通常のいわゆる過渡リアクタンスにより支配されるところであつて、ここに過渡現象というのはその意味である。この場合、制動巻線の鎖交磁束の中、直流分に対してはこれに相応する  $i_a(\theta)$  が流れないのである。したがつて、

(16) および (17) 式において

$$\int_0^{2\pi} i_a(\theta) \cos \theta d\theta = i_{aa} \quad (31)$$

とおけば,  $i_{aa}$  についての微分方程式は

$$\begin{aligned} & -\frac{d^2 i_{aa}}{d\tau^2} \left( l_f - \frac{\mu_1^2}{A_0} \right) + \frac{di_{aa}}{d\tau} \left( \frac{l_f}{r_a} + r_f \right) \\ & + \frac{i_{aa} r_f}{\alpha_a} = -\frac{l_f \mu}{2A_0} \frac{d^2}{d\tau^2} (e^{j\tau} Q_1 + e^{-j\tau} Q_2) \cdot \Delta G \\ & - \frac{r_f \mu}{2A_0} \frac{d}{d\tau} (e^{j\tau} Q_1 + e^{-j\tau} Q_2) \cdot \Delta G \\ & + \frac{\mu_1}{A_0} \frac{d^2}{d\tau^2} (M_1 \cdot \Delta G) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(32)$$

となり, そこで

$$\left. \begin{aligned} i_x &= i_{x1} + i_{x2} & i_{x1} &= i_1 e^{j\tau} \\ i_y &= i_{y1} + i_{y2} & i_{y1} &= i_1 e^{-j\tau} \\ i_o &= i_{o1} + i_{o2} & i_o &= \text{直流分} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

とおけば, (32)の過渡状態の解は

$$\begin{aligned} i_{aa} &= -\frac{3l_f \mu}{2A_f A_0} (e^{j\tau} i_{y2} + e^{-j\tau} i_{x2}) \\ & + \frac{\mu_1}{A_f A_0} \left\{ \frac{3}{2} m (e^{j\tau} i_{y2} + e^{-j\tau} i_{x2}) \right. \\ & \left. + 3m_o i_{o2} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(34)$$

となり, これより

$$\begin{aligned} \Delta i_f &= \frac{3\mu_1 \mu}{2A_f A_0} (e^{j\tau} i_{y2} + e^{-j\tau} i_{x2}) \\ & - \frac{\mu_1^2}{A_f A_0 l_f} \left\{ \frac{3}{2} m (e^{j\tau} i_{y2} + e^{-j\tau} i_{x2}) \right. \\ & + 3m_o i_o \left. \right\} - \frac{1}{l_f} \left\{ \frac{3}{2} m (e^{j\tau} i_y + e^{-j\tau} i_x) \right. \\ & \left. + 3m_o i_o \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(35)$$

そしてこれらの結果から, 電機子回路の式を求めれば以下のようになる.

$$\frac{d}{d\tau} \{ x_o' i_o + (x_o - x_o') i_{o2} \} = v_o \quad \dots\dots\dots(36)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\tau} \{ \xi_1' i_x + (\xi_1 - \xi_1') i_{x2} + \xi_2' e^{2j\tau} i_y \cdot \\ & \cdot + (\xi_2 - \xi_2') e^{2j\tau} i_{y2} \} = v_x \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\tau} \{ \xi_1' i_y + (\xi_1 - \xi_1') i_{y2} + \xi_2' e^{-2j\tau} i_x \cdot \\ & \cdot + (\xi_2 - \xi_2') e^{-2j\tau} i_{x2} \} = v_y \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(38)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} x_o' &= l_o + 2m_o' - \frac{3m_o^2}{l_f} \\ \xi_1' &= (l_o - m_o') - \frac{3m^2}{4l_f} \\ \xi_2' &= \frac{1}{2} (l - 2m') - \frac{3m^2}{4l_f} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

(36)~(38)式が過渡状態を与える式である.

**カ. 定態現象** (界磁回路の時定数よりも大きい時間)

変動発生後時間が経過して, 界磁回路に対しても鎖交磁束不変の法則が適用できなくなつた場合であつて, やはり(33)式を用い,  $\Delta i_f$ ,  $i_d(\theta)$ ともに  $i_{x2}$ ,  $i_{y2}$ ,  $i_{o2}$  のみを含んだ式として与えられる. すなわち

$$\Delta i_f = -\frac{3m_a}{2A_f} (e^{j\tau} i_{y2} + e^{-j\tau} i_{x2}) - \frac{3m_o}{A_f} i_{o2} \quad \dots\dots\dots(40)$$

となり, また電機子回路の式は

$$\frac{d}{d\tau} \{ x_{os} i_o + (x_o - x_{os}) i_{o2} \} = v_o \quad \dots\dots\dots(41)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\tau} \{ \xi_{1s} i_x + (\xi_1 - \xi_{1s}) i_{x2} + \xi_{2s} e^{2j\tau} i_y \cdot \\ & \cdot + (\xi_2 - \xi_{2s}) e^{2j\tau} i_{y2} \} = v_x \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(42)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\tau} \{ \xi_{1s} i_y + (\xi_1 - \xi_{1s}) i_{y2} + \xi_{2s} e^{-2j\tau} i_x \cdot \\ & \cdot + (\xi_2 - \xi_{2s}) e^{-2j\tau} i_{x2} \} = v_y \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(43)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} x_{os} &= l_o + 2m_o' \\ \xi_{1s} &= l_o - m_o' \\ \xi_{2s} &= \frac{1}{2} (l - 2m') \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

(41)~(43)式が定態現象に関して与えられる式である.

## 第2章 各種リアクタンスとその関係

第1章にえた結果にもとずき, 従来用いられている各種リアクタンスならびにその相互関係について計算して見る.

### ア. 過渡リアクタンス

(27)および(28)式において正相基本波電流に対する発電機のリアクタンス降下を求めてみると,

$$\Delta I = \frac{i}{2} \left[ \frac{e^{j(\tau-\phi)}}{e^{-j(\tau-\phi)}} \right] \quad \dots\dots\dots(45)$$

として,

$$\begin{aligned} \Delta V &= (\xi_1 + \xi_2) \frac{i}{2} \cos \phi \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{e^{j\tau}}{e^{-j\tau}} \right] + (\xi_1 - \xi_2) \cdot \\ & \cdot \frac{i}{2} \sin \phi \frac{d}{d\tau} \left[ \frac{-j e^{j\tau}}{j e^{-j\tau}} \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(46)$$

となり, したがつて

$$\text{直軸次過渡リアクタンス} \quad x_d'' = \xi_1 + \xi_2 \quad \dots\dots(47)$$

$$\text{横軸次過渡リアクタンス} \quad x_q'' = \xi_1 - \xi_2 \quad \dots\dots(48)$$

すなわち,

$$x_d'' = (l_o - m_o') + \frac{1}{2} (l - 2m') - \frac{3m_1^2}{2A_f} - \frac{3\mu^2}{2A_0} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} x_q'' &= (l_o - m_o') - \frac{1}{2} (l - 2m') \cdot \\ & \cdot + \frac{3}{2} \mu \left( \frac{1}{A_0} - \frac{1}{A_f} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(50)$$

次過渡リアクタンスは電機子回路の漏洩リアクタンスと制動巻線回路のインダクタンスの直軸分あるいは横軸分の和と見なしうる.

$$\text{つぎに逆相基本波電流 } \Delta I = \frac{i}{2} \begin{pmatrix} e^{-j(\tau-\phi)} \\ e^{j(\tau-\phi)} \end{pmatrix} \quad (51)$$

による内部降下を求めると、

$$\begin{aligned} \Delta V = & \xi_1 \frac{i}{2} \frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} e^{-j(\tau-\phi)} \\ e^{j(\tau-\phi)} \end{pmatrix} \\ & + \xi_2 \frac{i}{2} \frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} e^{j(3\tau-\phi)} \\ e^{-j(3\tau-\phi)} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(52) \end{aligned}$$

基本波分にのみ着目すれば、

$$\text{次過渡逆相リアクタンス } x_2'' = \xi_1 \quad \dots\dots\dots(53)$$

すなわち

$$x_2'' = \frac{x_a'' - x_q''}{2} = (l_0 - m_o') - \frac{3m_1^2}{4A_f} - \frac{3\mu^2}{4A_1} \quad \dots\dots\dots(54)$$

なお、逆相基本波電圧に対する基本波電流より  $x_2''$  を求めれば

$$x_2'' = \frac{\xi_1^2 - \xi_2^2}{\xi_1} = \frac{2x_a'' x_q''}{x_a'' + x_q''} \quad \dots\dots\dots(55)$$

逆相リアクタンスはその他求め方により色々異なるのであつて、凸極機に対する対称分リアクタンスを一義的に定めることはできないのである。これについては後述する。

零相リアクタンスは前述の  $x_0$  であつてこれは交流分に対しては過渡および定態状態に対して変らない

#### イ. 過渡リアクタンス

(37) および (38) 式において、正相基本波電流に対するリアクタンス降下を計算すれば、 $i_{x2} = i_{y2} = 0$  であるから明らかに、

$$x_a' = \xi_1' + \xi_2' = (l_0 - m_o') + \frac{1}{2}(l - 2m') - \frac{3m^2}{2I_f} \quad (56)$$

$$x_q' = \xi_1' - \xi_2' = (l_0 - m_o') - \frac{1}{2}(-2m') \quad \dots\dots\dots(57)$$

周知のとおり、 $x_a'$ 、 $x_q'$  には制動巻線の常数は何も入つて来ず、 $x_a'$  は電機子漏洩リアクタンスと界磁漏洩リアクタンスの和であり、 $x_q'$  は電機子漏洩リアクタンスと電機子反作用横軸分の和であつて、これは  $x_q$  に等しい。

逆相リアクタンスに対しては、次過渡現象の場合と全く同様で、

$$x_2' = \xi_1 = x_2'' \quad \dots\dots\dots(58)$$

となる。

#### ウ. 定態リアクタンス

定態リアクタンスも(42)、(48)式より全く同様に求められ

$$x_d = \xi_{1s} + \xi_{2s} = (l_0 - m_o') + \frac{1}{2}(l - 2m') \quad \dots\dots\dots(59)$$

$$x_q = \xi_{1s} - \xi_{2s} = (l_0 - m_o') - \frac{1}{2}(l - 2m') = x_q' \quad (60)$$

となり、また

$$x_2 = x_2' = x_2'' = \xi_1 \quad \dots\dots\dots(61)$$

と与えられる。

なお制動巻線を有しない場合には、次過渡の式と過渡の式とが全く一致して来ることは明瞭である。

### 第3章 同期機解析方法の分類とその相互関係

ここで、従来慣用せられてきた同期機の解析の色々な方法、およびその相互関係について概説する。

#### ア. 規 準 座 標 系

前章においては解析方法としては主として  $(x, y, o)$  なる成分を用いて来た。これは通常のいわゆる対称座標法成分に相当するものである。回転機においてはその基準座標系の取り方によつて解析方法が異つて来、色々な成分があらわれて来る。いずれにせよ三相機の場合には成分の数は3個である。いま従来より良く用いられているものについて分類すると以下のとおりである。なお、ここでは電機子回路の規準座標系にのみ着目して見る。しかるときはつぎの(1)系および(2)系に大別されるのである。

##### (1) 系. 固定子に固定せる座標系

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| 物理的 | 三相軸 $(a, b, c)$          |
|     | 直角軸 $(\alpha, \beta, o)$ |
| 仮想的 | 対称軸 $(x, y, o)$          |

##### (2) 系. 回転子に固定せる座標系

|     |                   |
|-----|-------------------|
| 物理的 | 直角軸 $(d, q, o)$   |
| 仮想的 | 正転逆転軸 $(f, b, o)$ |

なお回転子回路の座標系の取り方によつて、さらにいくつかに分類され、たとえば  $(m, c, o)$  系等が出て来るし、またいずれの機械的構成にも固定しない座標系たとえば  $(g, k, o)$  のようなものも出て来るが、ここには省略する。これらはいずれもそれぞれに便、不便の特長を有し、たとえば不平衡故障の問題については  $(\alpha, \beta, o)$  が便利であるが、界磁との関連ある問題については  $(d, q, o)$  が便利である。

固定子に固定せる座標系は力学的にはホロノーム系であるに対し、回転子に固定せる座標系は非ホロノーム系であつて、通常のラグランジュの変分方程式と異つた形となるものである。これにはつぎの変換テンソルを考えれば判る。

#### イ. 変換テンソル

すなわち、これら各座標系間の変換テンソルは以下のようになる。まず(1)系の間では、

$$C \begin{pmatrix} abc \\ \alpha\beta o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(62)$$

$$C \begin{pmatrix} abc \\ xyo \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(63)$$

$$C_{xyo}^{(\alpha\beta o)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -j & j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (64)$$

次に (2) 系の間では,

$$C_{fbo}^{(dqo)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -j & j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (65)$$

物理的に考えても明らかに  $C_{fb}^{(dq)} = C_{xy}^{(\alpha\beta)}$  である.

また逆変換が逆テンソルであることはいうまでもない. なお, 上記のものは, 慣用の形のものであるが, 通常のテンソル解析の invariant  $V \cdot I$  を不変ならしめ, インピーダンス変換が  $G_i^* ZC = Z'$  となるようにするためには  $C_{xyo}^{(abc)}$  には  $1/\sqrt{3} C_{xy}^{(\alpha\beta)}$  または  $C_{fb}^{(dq)}$

に  $1/\sqrt{2}$  の係数をつけたものを用いた方が便利である.

いずれにせよ上記 2 種の変換は  $\tau$  の函数を含み, それらはホロノーム変換が成立している. しかるにいま

(1) 系, (2) 系間の変換を考えると, たとえば

$$C_{dq}^{(\alpha\beta)} = \begin{pmatrix} \cos \tau & -\sin \tau \\ \sin \tau & \cos \tau \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (66)$$

$$C_{fb}^{(xy)} = \begin{bmatrix} e^{j\tau} & 0 \\ 0 & e^{-j\tau} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (67)$$

通常もつとも良く用いられるものは,

$$C_{dqo}^{(abc)} = \begin{bmatrix} \cos \tau & -\sin \tau & 1 \\ \cos(\tau - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\tau - \frac{2}{3}\pi) & 1 \\ \cos(\tau - \frac{4}{3}\pi) & -\sin(\tau - \frac{4}{3}\pi) & 1 \end{bmatrix} \quad (68)$$

また

$$C_{dq}^{(xy)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{j\tau} & je^{j\tau} \\ e^{-j\tau} & -je^{-j\tau} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (69)$$

は前章に出て来た変換である. これも係数を  $1/\sqrt{2}$  とした方がよい. これらの変換テンソルにより, 各座標軸によるリアクタンステンソルは,

$$Z = C_i^* ZC \quad \dots\dots\dots (70)$$

なる変換を受ける. たとえば  $(x, y, o)$  系より  $(d, b, o)$  系へ変換すれば, (30) 式を用いて,

$$Z = C_{dq}^{(xy)*} \begin{bmatrix} p\xi_1 & p\xi_2 e^{2j\tau} \\ p\xi_2 e^{-2j\tau} & p\xi_1 \end{bmatrix} C_{dq}^{(xy)} \\ = \begin{pmatrix} x_a'' p & -xq'' \\ x_a'' & xq'' p \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (71)$$

これがいわゆる, Park の式である.

(1) より (2) への変換はきわめて重要な意義を持つている. たとえば, 変換  $C_{fb}^{(xy)}$  を演算子  $p$  にほどせば,

$$C_i^* pC = \begin{pmatrix} p+j & 0 \\ 0 & p+j \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (72)$$

一般に

$$C_i^* F(p)C = \begin{pmatrix} F(p+j) & 0 \\ 0 & F(p-j) \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (73)$$

で, これはいわゆる変時定理

$$L e^{\mp t} f(t) = F(p \pm a)$$

に相当し, 電気力学的に言えば, 運動物体の Lorentz 変換をあらわすともいえるので, そのため, (2) 系では (1) 系で  $p$  を含んだ項から,  $p$  を含まぬ項が誘導されることになるのである. この項はいわゆる非ホロノーム体と称せられるもので, 一つの別な物理量を表現するものとなる. Park の式では磁束をあらわすものである. また (2) 系では (1) 系のようにインピーダンスランソルに  $\tau$  の函数を含まないが, その代り, 回転機に静止回路網がつながれた場合, (66), (67), あるいは (73) に見るような変換を受けなければならないのである.

なお起動, ハンディングのように, 回転速度の変化する場合には, 固定子にも回転子にも固定されない一定速度で回転する座標系をとるのが便利である. もちろん,  $\xi_1 \xi_2 x_a'' x_q''$  等は  $p$  の函数としてあらわれてくる. 電力系統の安定度等を論ずる場合には必要な問題であるが, この報告の範囲をこえるので省略する.

(以下次号)

# 超音波探傷試験における二三の問題

## Some examples in Super-sonic Testings

長崎製鋼株式会社  
長崎製鋼所

河 合 正 吉

### 1. ま え が き

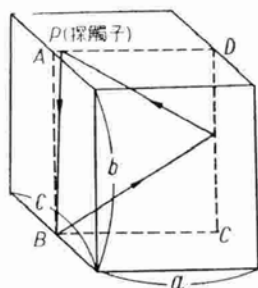
三菱電機製超音波探傷器を昭和 25 年に入手以来、弊社製品の納入先よりの要請もあり、各種製品の探傷検査を施行しているために、深く基礎的実験をする暇も無かつたがその間検査上の必要に迫られて行つた実験、とくに鋼材の欠陥判定の障害になる異常反射ならびに粗大結晶粒の影響について吟味した結果に関し報告する次第である。

### 2. 異 常 反 射

超音波試験中真の欠陥よりの反射とは考えられないような異常反射波が、底面反射波の中間に現れることがしばしばある。これらの異常波のうちとくに一次底面波付近のものが製品の立会検査等において問題となることがあつたので、その正体を掴むために二、三の例について調査したが、その結果に関して報告する。

#### ア. 正方六面体の異常反射

1 図のように六面体の稜付近に探触子をあてがうと、多くの異常反射波が現れる。これらの反射波の特長として、すべての反射波は一次底面波の後方に現れる。異常反射は稜における反射の関与することによつて起るものと考えられるが、その行程を計算するために、1 図のように探触子を含み、一つの稜に直角な面  $ABCD$  を採り



1 図 正方六面体における試験方法

Fig.1. Inspection method for right cube.

この面内で生起する反射を考えることとする。いま反射を三群に分け、 $DC$ ,  $AB$  線における反射を  $r_1$ ,  $BC$ ,  $AD$  線における反射を  $r_2$ ,  $B$ ,  $D$ ,  $C$  点における反射をそれぞれ  $r_i$  ( $i=B, D, C$ ) とすれば、問題になる異常反射は  $r_R$  に始まる反射であり、これについて  $r_1$ ,  $r_2$  系の反射のみが現れるものの行程  $s$  は

$$s = \sqrt{\{(2m+1)b\}^2 + (2na)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに稜の反射が加わるものの中で比較的簡単な場合の行程は

$$s = n_b b + n_a a + l \sqrt{a^2 + b^2} + \sqrt{(m_b b)^2 + (m_a a)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし  $(n_b + l + m_b)$  および  $(n_a + l + m_a)$  は常に偶数である。一例として  $b=150$ ,  $a=50$  なるときの底面波と上式によつて計算された異常波との関係位置を 2 図に示す。

この結果は実測とよく一致することが知られた。さらに異常波のうち一次底面波付近に現れるものは、探触子を稜から離すにしたがつて次第に弱くなり、終には消失するが、この現象は音波の発散性により矛盾なく記述される。

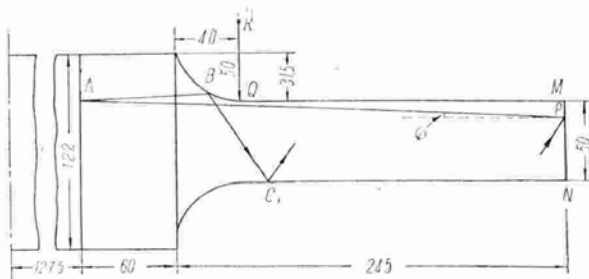
#### イ. タービン円板の異常反射

つぎに試験片の凹凸によつて起る異常反射の例として、長崎造船所に納入された築上発電所の発電機用タービン円板の探傷試験の際に現れた異常波について述べ



2 図 六面体における異常波の位置

Fig.2. Positions of abnormal waves in cube.



3 図 タービン円板における異常反射

Fig. 3. Abnormal Reflection in the turbine disc.

| 底面波 | 一次 |  | 二次 |
|-----|----|--|----|
|     |    |  |    |
| 異常波 |    |  |    |

4 図 タービン円板における異常波の位置

Fig. 4. Positions of abnormal waves in the turbine disc.

る。3 図に円板断面の寸法を示す。図中  $M$  あるいは  $N$  (図では  $M$ ) の近傍  $P$  に探触子を当てると、一次底面波の後方に異常波が現れた。この異常波を 3 図  $P \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C_1 \cdots \rightarrow P$  なる反射波と考えて行程を計算してみる。近似的には

$$s = PA + AQ + \sqrt{MQ^2 + 2nMN}^2 \approx 495 + \sqrt{(205)^2 + (100n)^2} \quad \text{.....(3)}$$

ここに  $n$  は  $C, N$  面における反射回数を表すものとする。3 図に掲げられた幾何学的条件よりさらに正確な行程の計算ならびに異常反射波が現れるための  $PM$  の上下限等も求められるが、その計算過程については省略し、 $PM=10$  mm するときの異常波と底面波との相対位置を 4 図に掲げるに留める。

以上の結果は実測とよく一致することが知られた。

#### ウ. 軸の異常反射

よく仕上げられた軸の側面を探傷する際にも異常波が現れる。この異常波は振動板の法線と相当大なる傾角をなして発散する音束によつて生ずるものと考えられる。いま円周上の一点から超音波が送られたとき  $m$  回の反射を繰返して原点に戻る場合の傾角を  $\varphi$  とすれば

$$\begin{cases} \varphi = \frac{n\pi}{2m} & n=1, 2, \dots \\ m=n+2i & i=1, 2, \dots \end{cases} \quad \text{.....(4)}$$

しかして  $D$  を軸の直径とすれば、行程  $s$  は

$$s = mD \cos \varphi \quad \text{.....(5)}$$

これらの異常波のうち実際に観測されるものは、比較的反射回数が少く、また次数の小なる節面の間に存在しない超音波探傷試験における二三の問題・河合

1 表  
Table 1.

| $m$ | $n$ | $\varphi^\circ$ | $\nu$ |
|-----|-----|-----------------|-------|
| 3   | 1   | 30              | 1,299 |
| 4   | 2   | 45              | 1,414 |
| 5   | 3   | 54              | 1,469 |
| 5   | 1   | 58              | 3,378 |
| 7   | 2   | $38\frac{4}{7}$ | 2,739 |

2 表  
Table 2.

| $i$ | $\varphi_{Mi}$ | $G_i$ |
|-----|----------------|-------|
| 1   | 0              | 0.50  |
| 2   | $18^\circ 54'$ | 0.108 |
| 3   | $33^\circ 49'$ | 0.064 |

ければならない。したがって  $\varphi$  が比較的小で

$$\nu = \frac{s}{2D} \quad \text{.....(6)}$$

が 1 ないし 2 に近いものを求めれば 1 表のとおりである。

他方円形振動板の指向係数  $G_1$  は

$$G_1 = \left| \frac{J_1(k_a \sin \varphi)}{k_a \sin \varphi} \right| \quad \text{.....(7)}$$

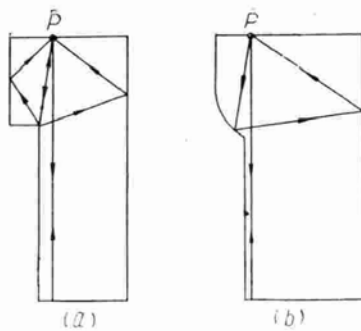
で表されるが、各節面内の  $G_1$  の極大値を与える  $\varphi$  の値を  $\varphi_{Mi}$  とすれば、 $2.5$  Mc,  $a=10$  mm なる場合  $\varphi_{M1}=0$ ,  $C_1(0)=0.5$ ,  $\varphi_{M2}=10^\circ 54'$ ,  $G_1(\varphi_{M2})/G_1(0)=0.132$ ,  $\varphi_{M3}=17^\circ 38'$ ,  $G_1(\varphi_{M3})/G_1(0)=0.065$  となる。これらを 1 表と比較すれば  $\varphi_{M2}$  がほぼ  $18^\circ$  と一致するが、その強度は主波の強度の 6.5% に過ぎず、これが観測されることは期待され難い。

けだし軸の試験では振動板は軸と直線で接触し、他の部分は油層を経て軸と連絡されるに過ぎないのである。ゆえに円形振動板よりのエネルギーの発射は矩形板の場合の状態に類似するものと考えられる。たとえば  $2a \times 2b$  ( $a=10$  mm,  $b=5$  mm) の矩形板では、問題とする方向において指向係数  $G_2$  は

$$G_2 = \left| \frac{\sin(kb \sin \varphi)}{2kb \sin \varphi} \right| \quad \text{.....(8)}$$

この場合の  $\varphi_{Mi}$  を 2 表に掲げる。すなわち  $\varphi_{M3}$  近観測される可能性が存在する。これを 1 表と比較すれば、 $18^\circ$ ,  $30^\circ$  場合によつては  $45^\circ$  のもの迄異常波として現れることが期待される。

以上いずれの場合にも異常波はすべて一次底面波の後方に現れるから、疵の有無判定を一次底面波の前方に反射波が現れるか否かによつて行えば問題はない。しかし 5 図のような特別な場合には、一次底面波の前方に異常波の現れることもあるから注意しなければならない。これを要するに探傷検査を行う場合には、あらかじめ試験片の幾何学的条件を考慮し、異常波出現の可能性を十分検討してから、検査に着手することが必要と思われる。



5 図 異常射波の一例

Fig. 5. One case of abnormal reflection

### 3. 結晶粒の大きさと超音波の透過性

超音波の透過性が鋼材の結晶の大きさと密接な関係を有することはよく知られた事実である。一般的に鋼材が大型になると、反射波の全然現れない場合がしばしばある。このような場合には、普通大型鋼材中に存在する多数の微細な欠陥（反射波を生じない程度に微細な）による音波の散乱によるものと断定され、結晶粒の大きさの影響は看過され易い現状である。この意味において、以下の実験はとくに結晶粒の大きさの影響を調査するために行つたものである。

さて鋼材の内部に投射された音波の強度を  $I_0$  とすれば、 $x$  なる距離を通過する間に、音波の強度  $I$  は

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad \dots\dots\dots (9)$$

に従つて減衰する。ただし音波の発散の影響は省略する。しかるとき減衰係数  $\alpha$  は、音波の振動数  $f$ 、結晶粒の平均径  $D$  とによる。すなわち

$$\alpha = \alpha(f, D) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$\alpha$  は多くの場合  $f$ ,  $D$  と共に増加するが、上述の目的を達成するためには、この関係を定量的に決定すればよい。

実験としては、まず色々な結晶粒の鋼材を得るために 0.3 % C の鋼より 150mm 径、300mm 高の試験片を切出し、これらにつぎの4種類の熱処理を施した。

- |       |        |      |     |
|-------|--------|------|-----|
| (I)   | 1150°C | F.C. | (A) |
| (II)  | 950°C  | F.C. | (B) |
| (III) | 870°C  | F.C. | (C) |
| (IV)  | 850°C  | O.Q. | (D) |
|       | 630°C  | T.   |     |

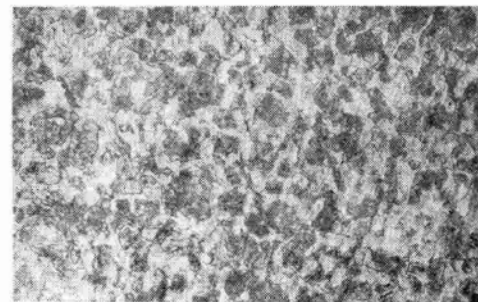
その顕微鏡写真を6図に示す。このような組織の鋼では結晶粒の大きさを定義することは困難であるが、便宜上フェライトの網状組織で結晶粒の大きさを表し、6図に付記したような数値を得た。超音波探傷器としては三菱電機製 FD—101, 102 を、探触子としては 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 5.0, 7.0 Mc のものを使用した。音波の反射は円棒試験片の両底面の間で行わせ、その際の反射波を実測した。反射波形の一例を 8, 7 図に示す。図



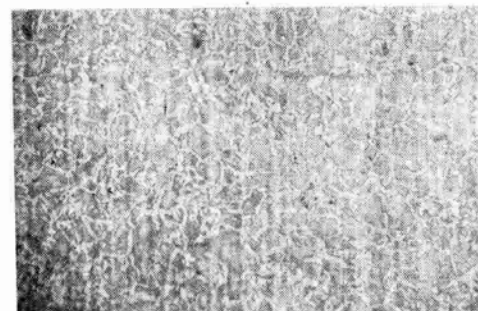
A  
D = 0.3 mm



B  
D = 0.14 mm



C  
D = 0.065 mm



D  
D = 0.020 mm

6 図 試験片の顕微鏡写真

Eig. 6. Microscopic structure of test pieces.

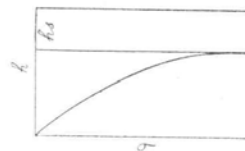
を一見すれば、結晶粒が大きくなればなる程音波の透過性が減少し、とくに高振動数の場合程その傾向の著るしいことが判る。

さてこの程度の実験で (10) 式を正確に評価することは到底不可能であるが、一応検査上の基礎的知識を得る程度の目的に対しては、定量的な検討も必ずしも無意味ではなからう。しからば定量的な検討を行うためには如何なる量を基礎量に選ぶべきであらうか？ 今一次底面波の波高を  $h$  とし、鋼材内に投射された音波の強度を

$I_0$ , 底面の反射係数を  $\kappa$ , 鋼材と探触子との間の損失比を  $\beta$ , 回路の条件 (たとえば同調, 感度等の条件) によって定まる常数を  $\sigma$ , 円埵の高さを  $H$  とすれば

$$\begin{cases} \hat{I} = \kappa(1-\beta) \hat{I} = \kappa(1-\beta) I_{0e}^{-2\sigma H} \\ h = f(\sigma, I) \end{cases} \quad \text{.....(11)}$$

さらに議論を簡単にするために回路条件を一つのパラメータで表し, これを  $\sigma$  とする. しかるとき  $h$  は  $\sigma$  に対する飽和値  $h_s$  に飽和する性質を有する. (9図参照)



9 図  $h$  の飽和特性

Fig.9 Saturation characteristics of  $h$ .

つぎに  $A, B$  二つの試料について  $\sigma$  を変化して各  $h$  を測定した結果を 10 図に掲げる. この図で注目すべき点は,  $\sigma$  の小なる範囲では

$$\frac{h_A}{h_B} = \text{Const}$$

なる関係の成立することである. この事実より,  $\sigma$  の小なる範囲で (11) 式の  $h$  は

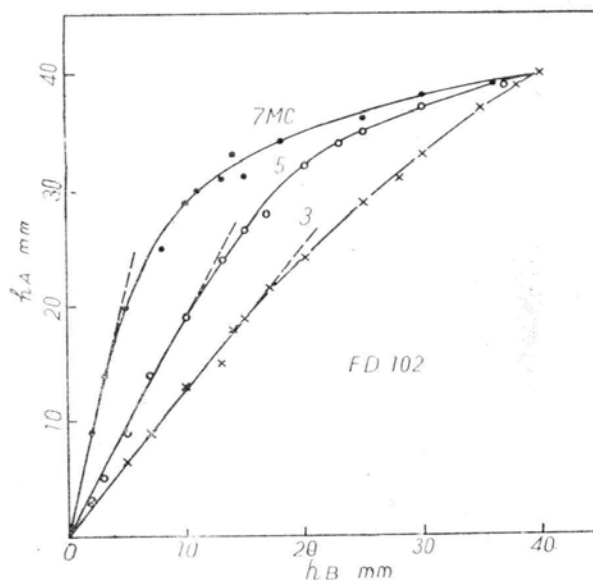
$$h = C I \quad \text{.....(12)}$$

なる形で表されることが推論される.

以上の議論により, 問題とする基礎量としては, 適当な条件の下における一次底面波を  $h$  とし, 特定の試験片のそれを  $h_1$  とするとき,

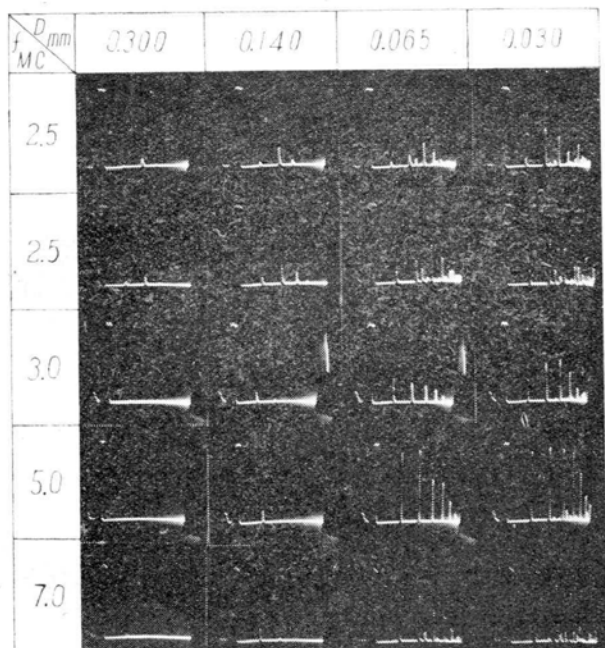
$$\rho = \frac{h}{h_1} = e^{2H(\alpha_1 - \alpha)} \quad \text{.....(13)}$$

なる量を定義し, これを採用することの合理的なことが結論される.



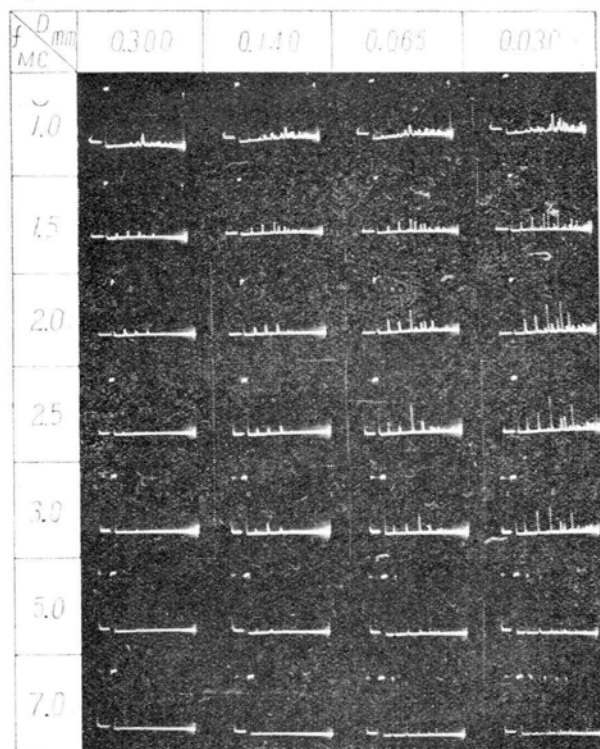
10 図  $h_B$ - $h_A$  曲線

Fig.10.  $h_B$ - $h_A$  (characteristics) curves.



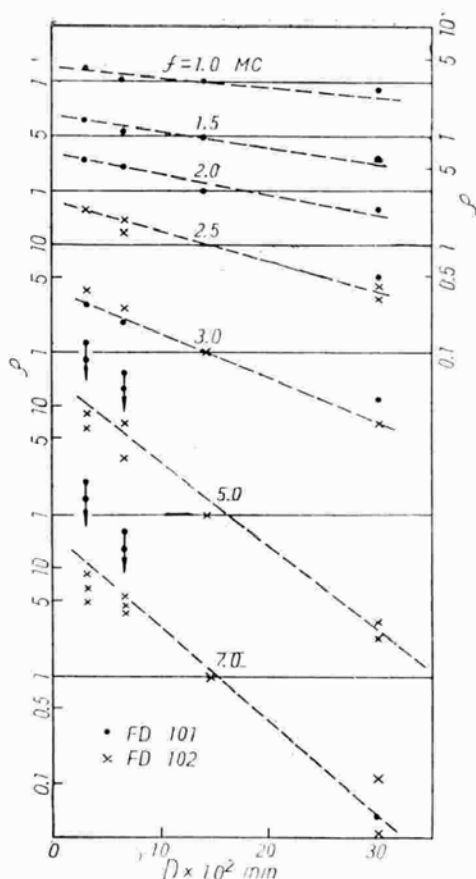
7 図 FD-101 による反射波形

Fig.7. Reflection wave formes by type "FD-101".

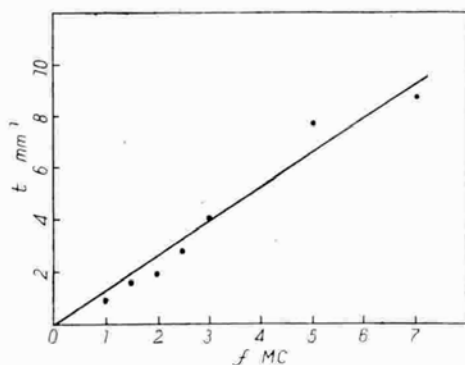


8 図 FD-102 による反射波形

Fig 8. Reflection wave formes by type "FD-102".



11 図 D-log ρ 曲線  
Fig.11. D-log ρ curves.



( $m=2, n=3;$   
 $m=4, n=3;$   
 $m=1, n=-1$ )  
12 図 f-t 曲線  
Fig.12. f-t curves.

よつて各試料に関し各振動数の場合の  $\rho$  を求め ( $B$  試料を標準に取る),  $D$  対  $\log_{10} \rho$  の関係を 11 図に示す. 図よりこの関係は直線的であり, しかも直線の勾配は振動数の増加にしたがつて増大することが知られる. この傾向はよく 12 図に示されている.

すなわち勾配  $t$  は

$$t = \frac{4}{3} f \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\therefore \log \rho = \frac{4}{3} f (D_1 - D) \quad \dots\dots\dots(15)$$

よつて (13) 式より

$$\alpha_1 - \frac{2}{3H} f D_1 = \alpha - \frac{2}{3H} f D = \text{const.}$$

$$\therefore \alpha = \frac{2}{3H} f D + \text{const.} = \frac{1}{450} f D + \text{const.} \dots\dots\dots(16)$$

かくして (10) 式の定量的な表示が得られたが,  $\alpha$  は常数部分と  $f D$  に比例する部分とより成ることが判つたのである.

従来  $Al$  の試験片に関する実験より

$$\alpha = c f^m D^n + \text{const}$$

等の実験式が求められているが, この場合には単一組織で結晶粒の大きさが厳密に決定される点で上述の例とは異なる点に注意しなければならない.

#### 4. むすび

超音波探傷の際試験片の幾何学的条件により, 底面波の他に欠陥よりの反射波と誤認され易い異常反射波の現れることを計算と実測とにより確認した.

つぎに超音波の透過性は結晶粒の大きさおよび振動数の増大するにしたがつて減少し, 減衰係数  $\alpha$  は実験式として

$$\alpha = \frac{1}{450} f D + \text{const.}$$

で表されることを示した. 大型鋼材の探傷検査では透過距離が大となり, また結晶粒の大きさも比較的大であるから, 精度を犠牲にして  $f$  を小にしなければ探傷の不可能となることが結論される.

なお終りに実験に従事された弊社技術部研究課の松田堀田, 米田 3 君に謝意を表する次第である.

# 超音波による鋼中探傷の例

## Some examples of super-sonic flow detection in steels

日本製鋼所室蘭  
製作所研究部

高 沖 亮

### 1. ま え が き

超音波による鋼中探傷法が使用されるや製鋼部門のみならず鋼材使用部門でもにわかに注目を引くに到つた。

製鋼部門では無破壊のまま直接しかも簡易に内部欠陥の状況を調査しうるので、製鋼各工程における製造法の検討に役立ち品質管理的に有効に利用しつつある。

しかし一方わが国においては新分野であるために探傷実例が少いこと、基礎的研究が実用面に合致せざることおよび各種探傷器の性能不統一等の問題が幾多存在している。

本例は当所で行つた実際例の一部で、現場的な大型鍛造品の探傷例および実験的な例を述べる。なお超音波探傷器は三菱電機製 FD-101 型を使用した。

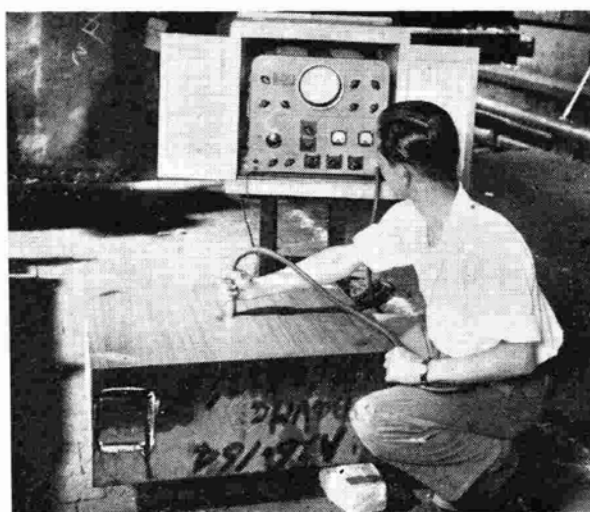
### 2. 現場的な探傷の例

#### ア. 品質管理的な探傷

高度の技術を必要とする特殊鋼、とくにロール類、発電機およびタービン用回転軸、型用鋼、軸受鋼、大型ベニオン等および大型鍛鋼品のクランクシャフト、中間軸その他鍛鋼品の欠陥調査を行つている。

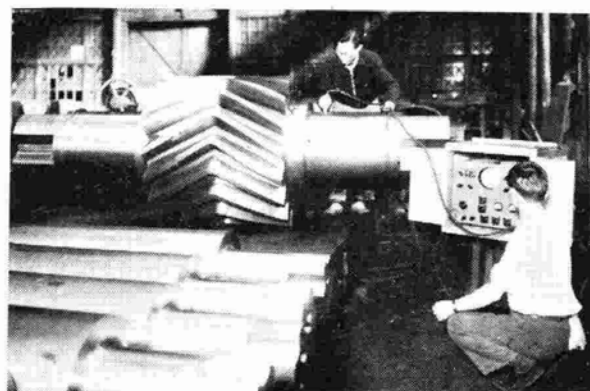
探傷は重点的探傷を主体にし品質管理的な運営を行い、或る工程で欠陥調査を行つて直接次工程にその結果を利用し、また探傷後その製品の使用実績から超音波探傷による機械設計上の許容欠陥を追求し、わずかの欠陥存在をも許さぬものについては全面探傷を行つて一箇の製品に数日を要する例もある。型用鋼およびベニオン探傷の例を 1 図、2 図に示した。三菱電機製 FD-101 型超音波探傷器で 2.5 および 3 Mc 使用の例である。

つぎに、従来から各種の検査法により欠陥調査を行いその欠陥の原因を追求して材質向上に努めているが、内部欠陥しかも組織等の影響を若干含めた欠陥が超音波探傷図形に現れて来るのでその観点から幾多の探傷結果を纏めて調査を試みた。その一例を 3 図に示す。高炭素クロム鋼の同一製品について A1~A12 は溶解順を示し、同一溶解の数箇の製品の探傷を行つた結果を図の区



1 図 型用鋼の超音波探傷の例

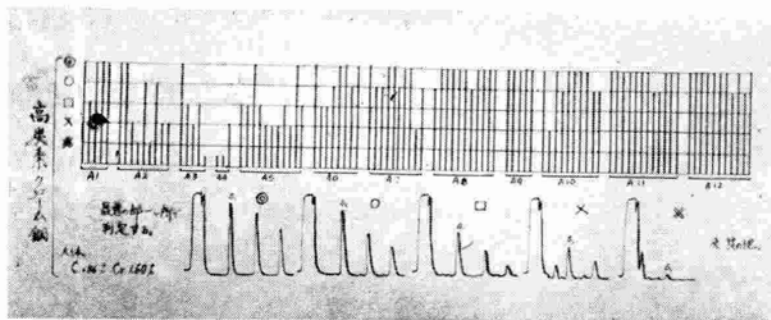
Fig.1. An example of super-sonic testing applied on the forged steels.



2 図 大型ベニオン探傷の例

Fig.2. An example of super-sonic testing applied on a large pinion.

分にしたがって判定分類したものである。A1~A5は溶解による良、不良は区々であるがA6以降はほとんどの溶解においても良結果を得ている。A6以降の好成



3 図 高炭素クロム鋼に就いて超音波探傷成績を溶解順に調査した例  
Fig.3. Effects of super-sonic testing applied on High carbon-chromium steels shown in order of melting.

績は実に製鋼法の向上によるものであつてこれらのうち一、二比較的不良とされるものがあるがこれは別の原因によると考えられる。

その他同様な調査結果から塩基性平炉鋼、酸性平炉鋼および電気炉鋼等の比較検討にも役立っている。(1)

#### イ. 焼入による鋼材内部欠陥の変化<sup>(2)</sup>

鋼中欠陥の発生過程を調べるための超音波探傷の利用法は重要な事項の一つである。その一部門として、調質時の焼入応力の欠陥に対する影響を調査した。

4 図は分塊ロールについてAおよびB部を径方向に3 Mcで探傷しあらかじめ調質前の欠陥を調査しておき、つぎにこれを油調質した後ふたたび同位置を探傷して欠陥を比較した。「○」印は欠陥を認めた場所、「●」印は欠陥を比較調査した場所でその結果を同図の探傷図形に示す。

これによると調質前に認められた欠陥が調質後必ずしも同位置に認められるとは限らずまた新しく見出されたものもある。しかし大体において同位置に欠陥反射が認められる。それらのうち同一欠陥と認めらる代表的なものについての比較では、欠陥反射の高さには余り変化がなくとも底面反射の高さが低くなる傾向にある。これは探傷面の仕上程度も若干影響するが、欠陥反射高と底面反射高との比を考えれば良いので、したがって欠陥反射強度は増大したことになる。ここに組織上むしろ減衰率は小となつてゐる筈である。すな

わち肉厚の中央より内部にわたつて存在したこれらの欠陥は焼入による冷却応力を受けて欠陥部が拡大したといふことができる。

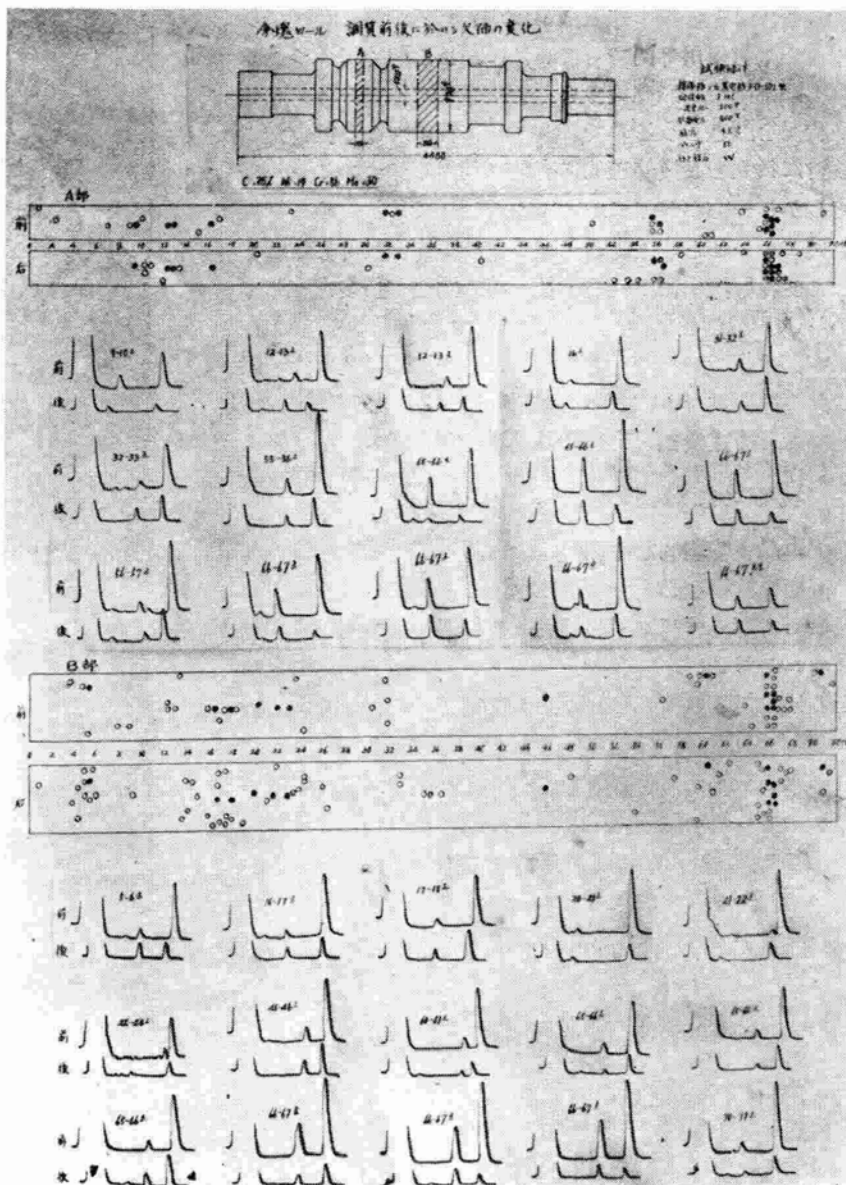
実際鋼材欠陥に関してはむしろ調質前に弱点を形成せしめないことが大切である。

### 3. 実験的探傷の例

#### ア. ゴーストの探傷<sup>(3)</sup>

非金属介在物が超音波探傷により欠陥反射として図形に現れるか否かについて異論あり<sup>(4)</sup>また重要な問題である。

当所でクランクアームの輪条ゴースト部から切出した5 図に示す如き試料について2.5, 3, 5, および7 Mcで探傷方向を種々変えて測定した結果、単なる偏析部からの反射はそれが確かな欠陥反射の如くには現れず、明瞭



4 図 分塊ロールの内部欠陥が焼入応力を受けて変化する模様を示す  
Fig.4. An example of changing conditions of interior flow of a separate block roll by hardening stress.

に欠陥反射の現れたものを切断して調査すると割れを伴っていることが判った。6 図は偏析部の割れの状態を示し方向によつては反射状況を異にすることが判る。

また7 図は5 図に示すB片を  $xy$  面で切断して硝酸で軽く腐蝕したものであつて、P と記すは相当強い偏析部であるが欠陥反射は現れず Q で示す部には割れが伴つていてこの反射は明瞭に探傷できた。

これは現場探傷を行つていればいわゆるゴースト線が明瞭に端部に現れていても探傷図形にはそれらが現れて来ない事実と符合するものである。

ここに偏析部が層を成して数多存在する場合各々からの反射が重つて探傷図形に現れる可能性および周波数および感度をさらに増加すれば現れる可能性はある。

#### 1. 超音波減衰に関する実験<sup>(3)</sup>

従来鋳鋼、鋳鉄および鋼塊においては音波の散乱、吸収があり減衰率が非常に大であるに対し、鍛鋼材については減衰率が小さいことが知られている。よつて鋼塊から焼鈍、鍛造の比を増加する各工程で減衰状況の比較調査を試みた。

試料は8 図および9 図に示す如き成分の  $Ni-Cr$  鎮静鋼塊(約400 kg)の中央部から長さ100 mm に、また極軟鋼半鎮静鋼塊(約120 kg)の中央部から長さ100 mm に切出したものを用い、長手方向に2.5, 3, 5, および7 Mc の超音波を使用して減衰状況を調べた。

焼鈍は前者は  $850^{\circ}\times 4h$ ,  $620^{\circ}\times 6h$  の二段焼鈍、後者は  $950^{\circ}\times 3h$  焼鈍を行つた。鍛造比は第一回1.6 第二回2.0 に変え、各々の試片の長さは原長に仕上げた。

その結果鋼塊焼込のままで  $Ni-Cr$  鋼の場合柱状晶部(8 図の1~3 cm 部)では内部の自由晶部に比しよく音波は透入し、極軟鋼の場合は反対に自由晶部(9 図の4~6 cm 部)が他に比しよく透入する。その状況は高周波の超音波になる程差が甚しい。

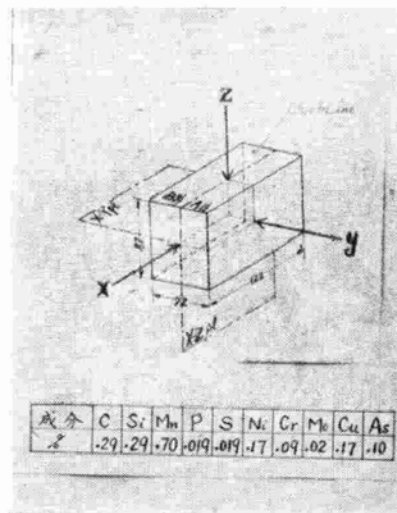
つぎに焼鈍を行うとさらに音波透入は全般的によくなるがなお内部と外部とは減衰傾向は前と同様である。さらに鍛造を加えるときわめて減衰は小となり、鍛造の利いた外部がその度を増し極軟鋼の如く小試料では第一回鍛造で内外ほとんど同一となる。

さらに鍛造比を増すと内部までほとんど同様な減衰を示し音波はよく透るようになる。これは鍛造効果を調べるに便である。

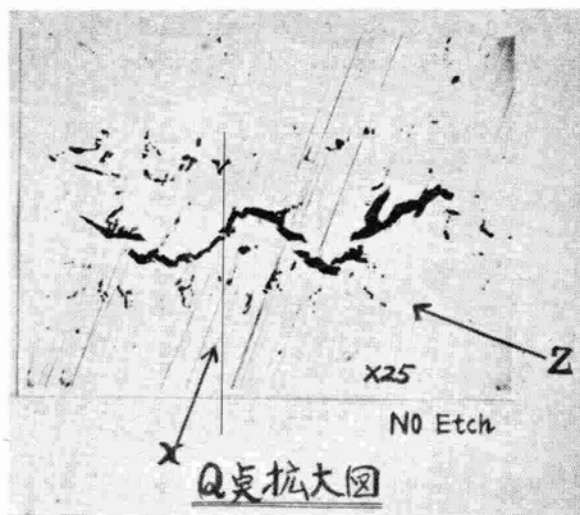
これらの減衰に対する若干の考察を行うと、A1 についての Mason の実験<sup>(5)</sup> によく似た考察が考えられる。鋼の場合結晶粒としては  $Ni-Cr$  鋼で10 図に示す如く、パーライト、フェライトの粒度に関係し、焼込状態ではさらに初晶形成時、その境界に充填部と音響抵抗を異にする何物かが存在し、強い音響的不連続部を形成し易いことも考へている。いわゆる10 図であることは鋳鋼の場合等にも成立すると考えられる。<sup>(2)</sup>

焼鈍材に対する上述の考察から炭素鋼についての調査結果は0%を0.10~0.70%迄変化させると同様の結果

超音波による鋼中探傷の例・高沖



5 図 クランクアームの輪条ゴースト部から切出した試験材の探傷要領  
Fig. 5 An outline of super-sonic testing of the testing sample cut off from the circular zone of the crank arm with ghost zone.

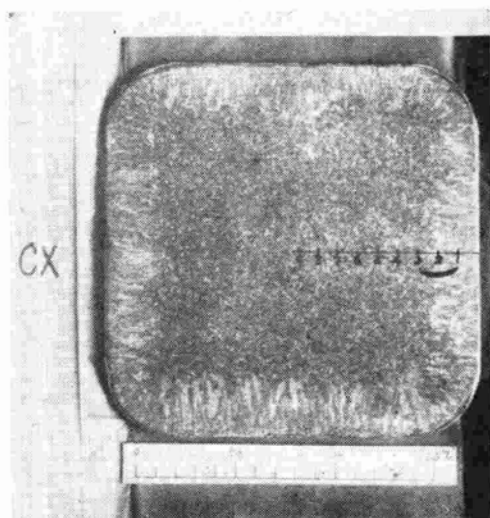


6 図 偏析部にある割れの状況および探傷方向  
Fig. 6. Conditions of cracks in the segregation zone and direction of super-sonic testings.

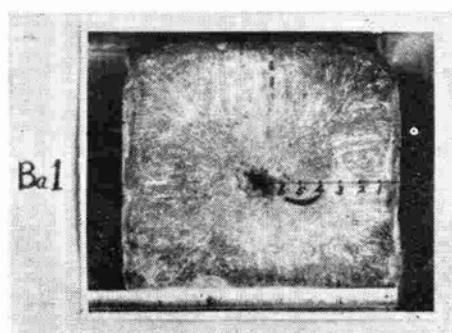


7 図 試料の切断面でゴースト線部(P)およびゴースト線中の割れ(Q)を示す  
Fig. 7. Show the ghost lines (P) and the ghost lines with cracks (Q) at the section of the sample.

| 符 号  | C   | S <sub>i</sub> | M <sub>n</sub> | P    | S    | N <sub>i</sub> | C <sub>r</sub> | M <sub>o</sub> |
|------|-----|----------------|----------------|------|------|----------------|----------------|----------------|
| CX   | .29 | .30            | .48            | .023 | .015 | 3.12           | .62            | tra            |
| Ba 1 | .12 | .17            | .35            | .039 | .034 |                |                |                |



8 図 3. Ni-Cr 鋼のマクロ腐蝕図  
Fig.8. Macrostructure of Ni-Cr steels.



9 図 4. 極軟鋼のマクロ腐蝕図  
Fig.9. Macrostructure of very mild steels.

が得られる。(2)

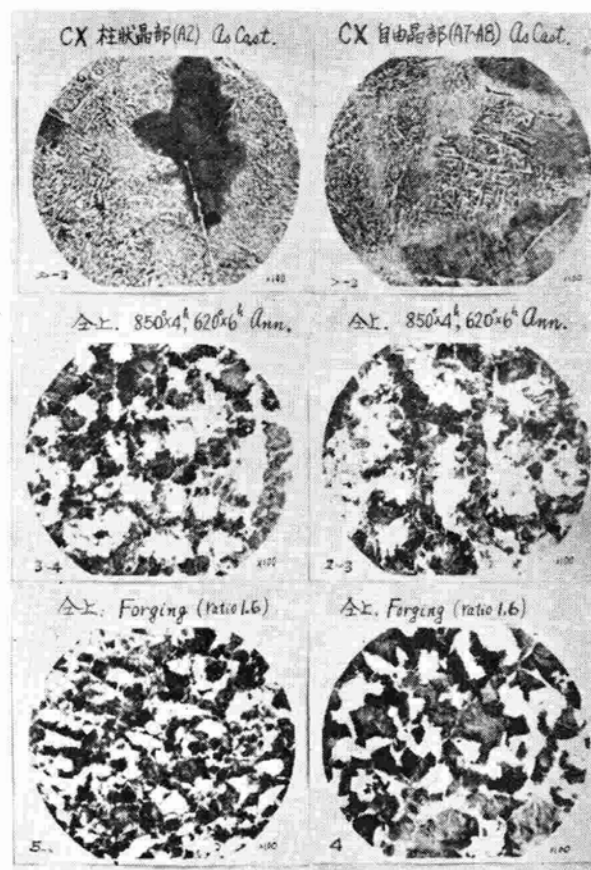
11図はその状況を示す。

また結晶粒度が減衰に関与する一例は再加熱鍛造品にも出ることがあり焼鈍を現わして来る。(2)

なおチルドロールのチル部は音波がよく透入すること(2)焼入層が内部に比し減衰率がきわめて少い事およびノジュラー鉄は普通鉄よりも音波がよく透入すること等が知られている。

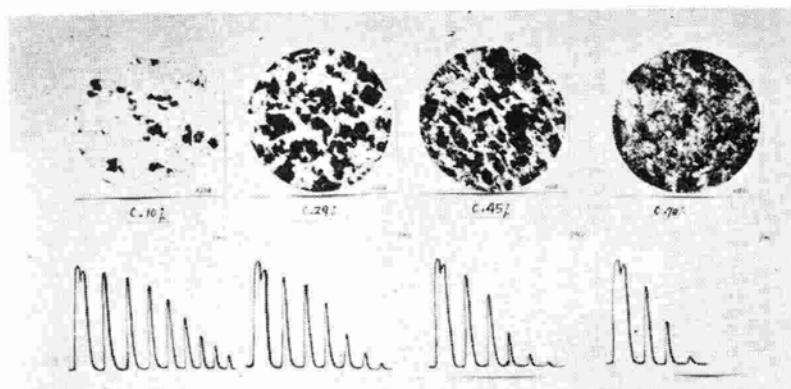
上述の鍛造効果を調査した一例は 12 図で 18 トン、S 30 C 鋼塊 Bottom Side から鍛造切出した試料について、2.5 および 7 Mc で調査した結果は図の如くで中央部が減衰が大である。

(ただし無疵で第二回および第一回底面反射高の比をブラウン管上で測定した) 7 Mc の場合とくに顕著である。供試料は図示の如くきわめて清浄な鋼であり、硫黄



10 図 Ni-Cr 鋼の外周部(A2)および中央部(A7~A8)に相当する部の鑄込状態、焼鈍後、および第一回鍛造後の顕鏡写真(X100)

Fig.10. Microscopic structure of Ni-Cr steels at its outward surface zone near surface (A2) and center zone (A7-A8). (For primary, after annealing and 1st forging)



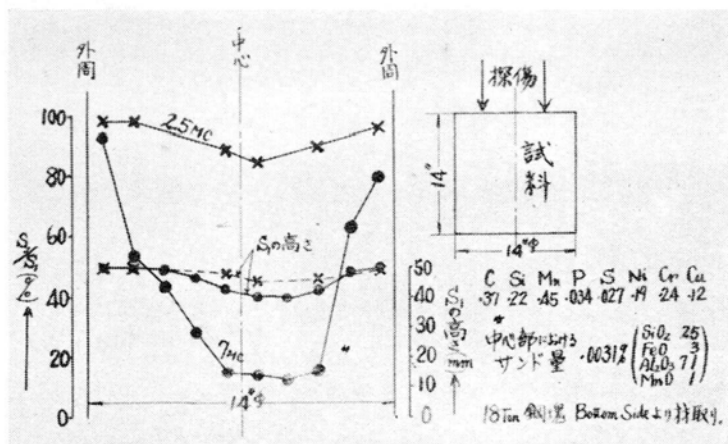
11 図 C, 0.10~0.70%炭素鋼の顕鏡組織と超音波減衰状況 (7 Mc)

Fig.11. Relation between damping phenomena and microscopic structures in 0.10~0.7% carbon steels.

印画にも全く内外の差異は見当らぬ。顕鏡試験で焼鈍は十分である。試料は 2,000 トン プレスで鍛造したものであるが図示の結果を得た。

#### ウ. 割れの方角性に関する実験

超音波探傷によると欠陥図形が現れると必ず欠陥が存在するといえるが、欠陥があるもの必ずしも探傷図形に現れるとは限らぬことは簡単な光の反射法則から類推される。しかし実際には欠陥は多少なりとも凹凸をもつ



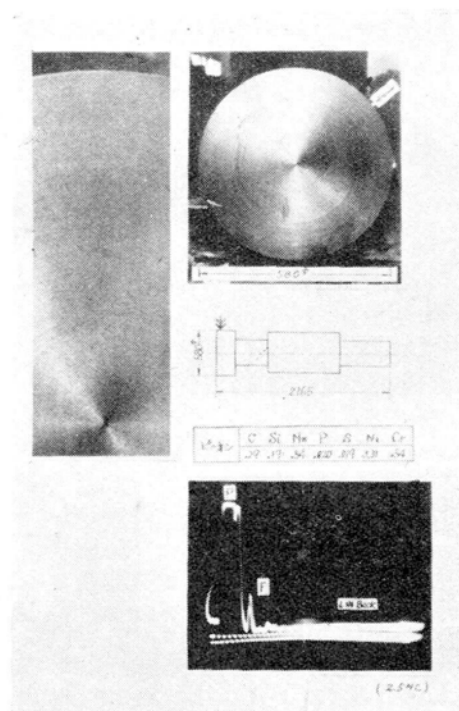
12 図 円筒試料を軸方向に探傷した場合各部での超音波減衰状況 (7 Mcおよび2.5 Mc)

Fig.12 Damping effects of super-sonic testing in axial direction on various positions of column surface (7 Mc and 2.5 Mc).

で欠陥よりの反射は得られる。ここに Straight Beam で一探触子法を用いた場合、割れ方向によつて欠陥反射の様子が異なる一例を述べる。

代表的な例は 13 図に示す如き小白点が多数平行にしかも試料のほとんど中央部分に存在する場合に探傷方向を a, b, c, d と変えて調べた。a および c 方向は無疵部、b は白点の面に垂直方向から探傷したもの、d はそれに平行に探傷したものである。d においては欠陥図形が全く現れずただ減衰が甚しく現れて来た。

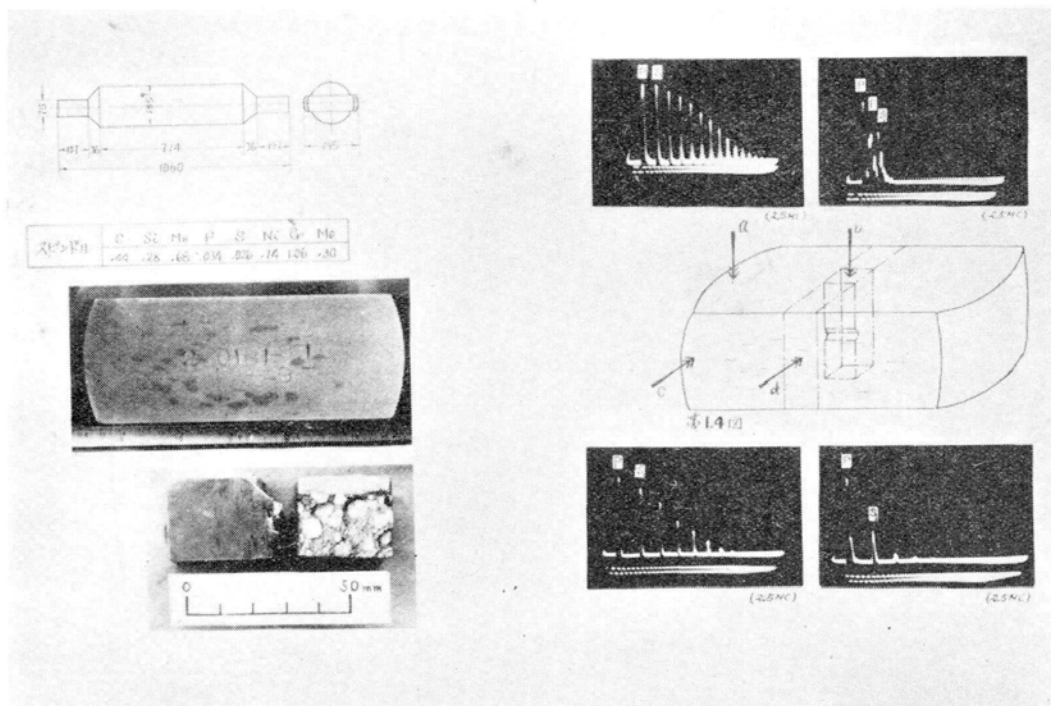
同様な例は 14 図に示すピエオンで径方向にある数多



14 図 径方向にある白点を径方向に探傷した図  
Fig.14. Super-sonic testing from radial direction of white spot existing along radial direction.

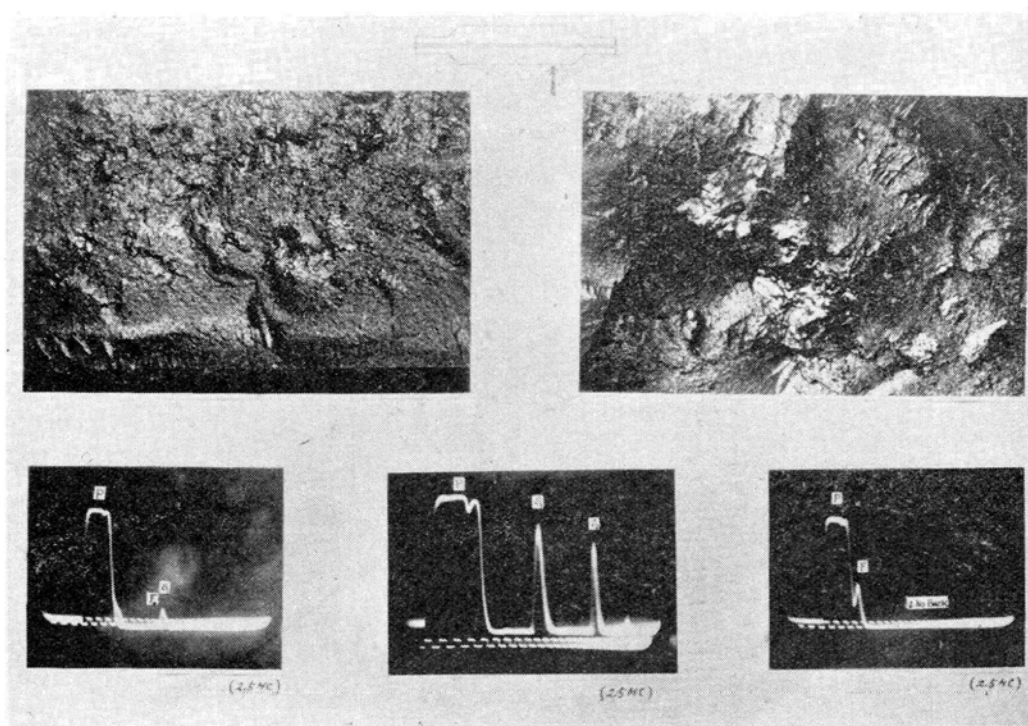
の白点を径方向に調査した場合である。

比較的大なる白点が径方向にある場合の例は 15 図に示す如くで探傷図形の右端がそれである。当然底面反射は無い。中央探傷図形は無疵部、左端は中央穴付近にあ



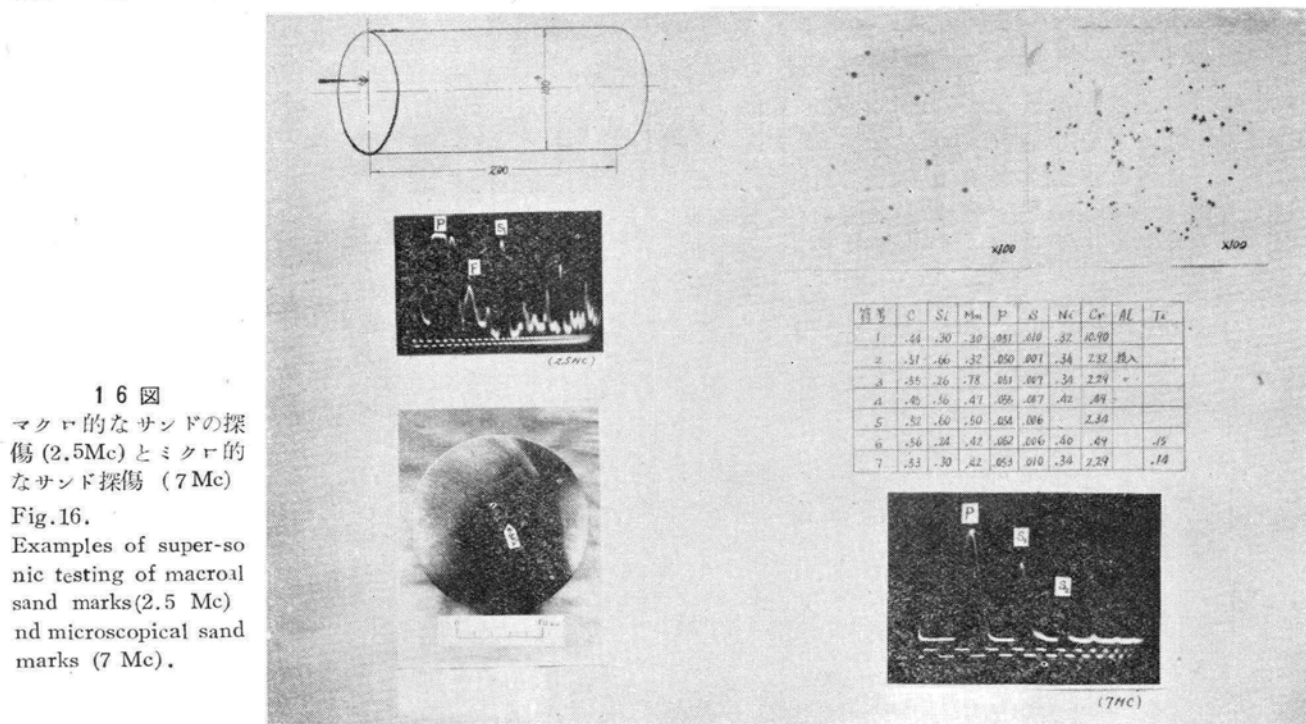
13 図 方向を変えた時の白点探傷

Fig.13. Super-sonic testing of white spots from various directions by super-sonic beam.

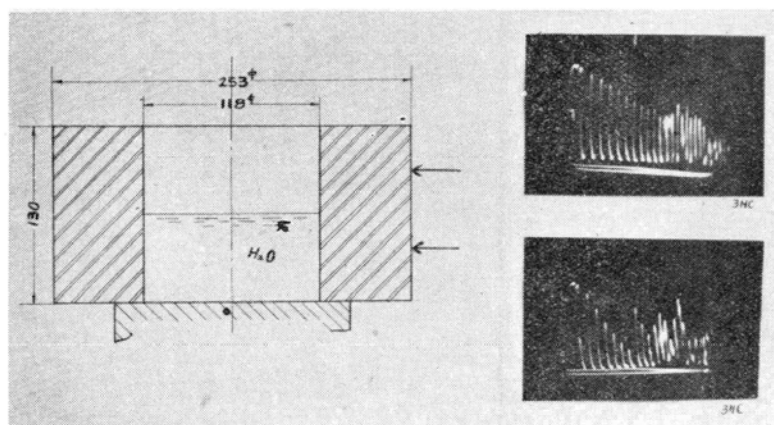


15 図  
ロールに存在する白点  
(比較的大形状のものと  
中心孔附近の粒白点) の  
探傷, 中央探傷図形は無  
Fig.15.

White spots existing the  
roll (comparatively large  
white spot, and granular  
white spots around the  
center bore zone). Non  
fault in the middle  
photo.



16 図  
マクロ的なサンドの探傷  
(2.5Mc) とミクロ的  
なサンド探傷 (7 Mc)  
Fig.16.  
Examples of super-so  
nic testing of macroal  
sand marks (2.5 Mc)  
and microscopical sand  
marks (7 Mc).



17 図 超音波による鉄製容器内の液体  
の存否検出の例

Fig.17.  
An example of inspection of liquid  
level in enclosed iron vessel by super-  
sonic waves.

る小白点の傷探を示す。

以上はすべて欠陥反射高と底面反射高との比を考えて探傷する必要がある<sup>(7)</sup>ことを示している。

#### エ. サンドについて<sup>(6)</sup>

サンドの探傷図形が現れるか否かについて若干の考察があるが<sup>(8)</sup>、実験結果化学分析上のサンドおよび顕鏡的な非金属介在物については7 Mc においても明らかな欠陥反射としては現れないでむしろ肉眼視できるサンドでしかもその周囲には空隙があると思われる程度のものが観測された(16 図 参照)これはゴーストの探傷と同様に取扱える。

#### オ. その他<sup>(2)</sup>

高压筒内の液化された量を外部から確実に知るために超音波の利用法が考えられている。<sup>(9)</sup> 簡単な鉄製円筒内に液体を入れて外部から 17 図の如く調べると液体の存在が判る。

### 4. むすび

超音波探傷法が最近著るしく使用されて来たが、未だ十分なる基礎的研究、探傷例等が無く応用部門と共に研究を続行せねばならぬ状況である。

ここに当所で行った現場的実験的実例の一部を述べた次第である。

すなわち現場的な一例としては当所に施行しつつある探傷の様子および品質管理的な用法を述べて、焼入時に内部欠陥が如何に変化するかに言及した。実験的な一例はいわゆるゴーストの探傷、超音波減衰性の実験を述べて若干の考察をし、さらに割れの方角性に関する実験およびサンドに対する探傷結果その他について述べた。

由来、超音波探傷法は鋼材製品についての決定的検査法なりや否やについては各国とも論議ある如くで本報告にも決定的な使用に関しては未だ研究の余地あることを示している。しかし利用面は上述の如く多々あり今後探傷に当る人にわずかでも参考になれば幸甚とする所である。

最後に本報告の発表に当り日本製鋼所室蘭製作所長鴨下克己氏ならびに三菱電機研究所尾島学二氏に敬意を表し、種々御指導を賜った室蘭製作所研究部長阿部富美夫氏、部長代理下田秀夫博士ならびに三菱電機研究所近藤敬吉氏に感謝申し上げ、実験に助力を賜わった室蘭製作所研究部第二課の諸子に感謝申し上げる次第である。

### 引用文献

- (1) 学振報告 19委-2380
- (2) " 19委-2364
- (3) " 19委-2289  
高沖:昭26・春 鉄鋼協会講演会発表
- (4) A. W. Rankin, C. J. Boyle, C. D. Moriarty and B. R. Seguin; Mech. Eng. July 1950. P 561  
J. V. Russell and H. E. Pellett;  
Iron Age. Jan. 31, 1946  
Benson Carlin; "Ultrasonics" P 249  
F. A. Firestone; J. Aco. Soc. Ame. Jan. 1946. P2  
R. W. Snowden; Iron Age. April 13, 1950. P79  
C. H. Desch, D. O. Sproule and W. J. Dawson;  
The Engineering Foundation, Welding Research Council (Supplement to the J. Ame. Weld. Soc. Jan. 1947) P 14 & 18  
八幡製鉄: 海外製鉄技術集録 号外6 P 46. '9.33
- (5) W. P. Mason; "Piezoelectric crystals and their application to Ultrasonics" P 47  
W. P. Mason and H. J. Meskimen;  
J. Aco. Soc. Ame. May 1947. P 464
- (6) 学振報告 19委-2305
- (7) F. A. Firestone; Met. progress, April 1950. P4  
A. W. Rankin, C. J. Boyle, C. D. Moriarty and B. R. Seguin; Mech. Eng. July 1950 P 562
- (8) Benson Carlin; "Ultrasonics" P 249  
菊池: "超音波に依る金属探傷法" P 9
- (9) F. A. Firestone; J. Aco. Soc. Ame. Jan. 1946. P2

# 国鉄横浜変電所2,000kW回転変流機の改造

## Alternation of 2,000kW Rotary Converter in the Yokohama Sub-station of the Japanese National Railway

国鉄横浜変電所設置の2,000 kW 回転変流機は米国ウエスチングハウス社の製品で二十数年前の製作であるため最早改修の時期に達していた。国鉄にはこのほか多数の改修の必要にせまられた変流機があるのでこれらの修理にあたって、電化協会の主催のもとに国鉄本庁、各局、地方鉄道会社、電機メーカーよりなる改修委員会が編成されて改修の根本方針が討議せられた。本文は上記横浜変電所回転変流機の改修にあたって上記基本方針のほかにわが社の考案になる改造を述べたものである。改造のおもな点は、(1)閉鎖他力通風型としたこと (2)全電圧リアクタ起動としたこと (3)電機子導体接続法の改良 (4)刷子寸法の統一 (5)閃絡継電器取付方式 (6)絶縁物の取替である。

神戸製作所

片岡高示  
加藤爲雄

### 1. 閉鎖他力通風方式の採用

回転変流機の定格  $2 \times 1,000 \text{ kW}$   $2 \times 750 \text{ V}$  1,333A  
750 rpm  
分巻、重公称定格。

従来の製品は主として開放型であつたが、今回はこれを防音、防塵および変電所内温度上昇の防止の目的から閉鎖他力通風型とした。1. 2. 3. 4 図に示すように2,000 kW ユニットをカバーで被い電動送風機で強制通風を行つた。送風機の定格は

型式 FOL-60A 風圧 150 mm 水柱、  
風量  $300 \text{ m}^3/\text{min}$

電動機 15 kW 200V 50 $\sim$  1,000 rpm.

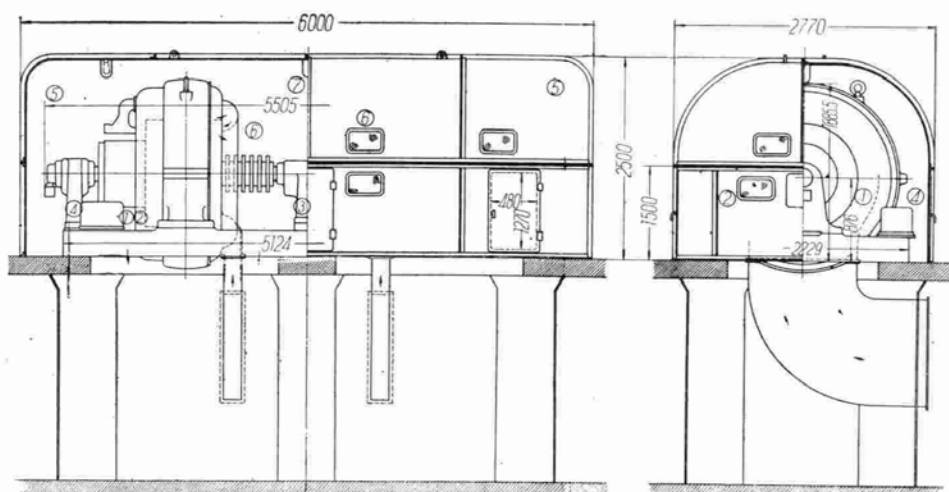
吸気口は地下室ビットの壁の一部に設け、これより風道にて継鉄に取付けたエンドベルの下口につながる。エンドベルに入つた風は一部は電機子の方へ一部は集電環の方へと分れる。この両方に分れる風量を自由に調整できるようにするためにエンドベルの壁には丸穴を明けメクラ板をネジ止めて取外しが可能なようにした。地下室の壁に送風機の吸出口を取付けて地下室全体が負圧側になるようにしてある。吸入口は1,000 kW 単機毎に設けてあるが排出口は2,000 kW ユニットについて一

箇所である。カバー上部に熱気のためを防止するために天井内部に軸方向に特別のトランクを取付けその中央から別のトランクで下へ導いて送風機吸込口に開いている。

カバー側面には三箇所に有機ガラス窓をはめて外部からも軸受温度計の指示が読めるようになっていた。正面には軸受中心高さの所に開閉自由の丸窓を蝶番で取付け外部から過速度リレーの取扱ができる。また整流子径に相当する箇所にも有機ガラス窓を設けて整流の点検が自由にできる。側面にそれぞれ3箇所、地下室壁に1箇所出入口を設けてある。カバーの強みアングルの骨は全然内部には出さず内部における保守作業に不都合がないよう考慮をはらつた。

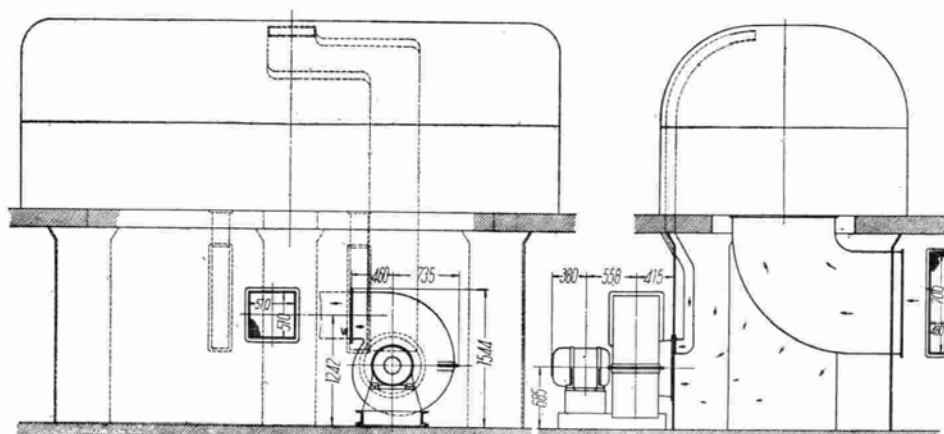
カバー内部には防音のためフェルトを全面にはりつけ、またとくに整流子の近くには耐燃塗料を塗つた。

エンドベルの構造はもつとも苦心した所で電機子内部の通風状態が均一になるよう十分の考慮を払つて設計した。カバー内部の温度分布は1表に示すように均一であつた。内部空気温度は1図に番号で示した点で測定した。また負荷状態は現場試験故に定格負荷ではなく500 $\sim$ 1,000 Amp の変動負荷であつた。



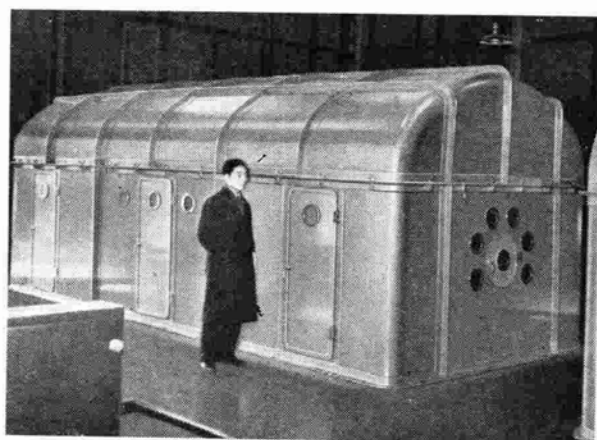
1 図

Fig. 1. Outline of 2,000 kW Rotary Converter.



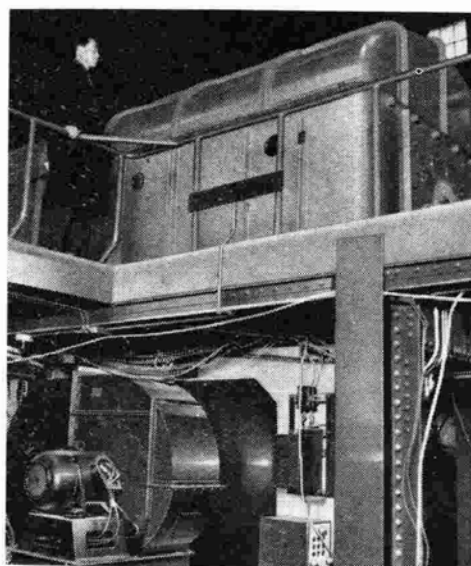
2 図

Fig. 2. Outline of 2,000 kW Rotary Converter



3 図 回転変流機カバー

Fig. 3. Cover of Rotary Converter.



4 図 地下電動送風機

Fig. 4. Motor Fan at the basement.

## 2. 全電圧リアクタ起動

従来当所の標準起動方式は変圧器に  $\frac{1}{3}$  起動タップを設けた  $\frac{1}{3}$  電圧起動方法であつた。今回はそれを起動リアクタによる全電圧起動方式に改めた。

起動試験の結果は 5 図に示すとおりで、起動瞬時電流は 1,280 Amp (全負荷電流の約 210 %) 起動時間 45 秒で起動時のパイロット刷子の整流も問題でなかつた。また最低電圧 9,700 V においては起動電流 1,060 Amp, 起動時間 65 秒であつた。なお従来の方式では起動電圧 180 V で起動電流約 300 % であり、変圧器一次側の起動 kVA は 100 % であつたが、この方式によるときは起動 kVA は約 210 % となる。

つぎにこの方式を比較すると、この方式の利点

- (1) 起動運転切換の大型電流接触器が不要。操作が簡単になる。
- (2) 変圧器に起動タップが不要。
- (3) 変圧器、回転変流

機、起動盤間の起動用配線が不要、建屋が縮小できる。

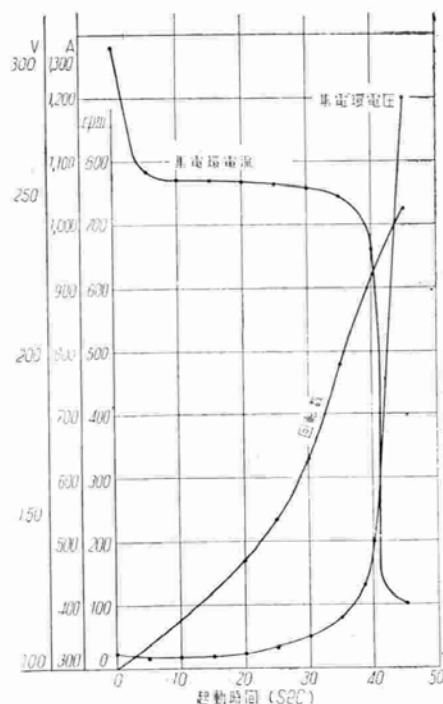
この方式の不便の点

- (1) リアクタが余分に必要となる。
- (2) 起動 kVA が増加する。
- (3) 起動終了後リアクタを短絡する双型開閉器が必要。

以上の利点のうち電磁接触器が不要になり操作が簡単になる点は保守上重要な点で検討すべき点であると思われる。つぎに上記の利害を考え合わせると建設費の点では、新設変電所の場合は上記第3項が大きな因子となつてリアクタ起動の方が幾分安価になる。しかし改造変電所の場合には幾分割高になる。

1 表 温度上昇試験

| 時<br>間 | 分<br>コイル |    | 補<br>コイル |      | 機<br>鉄 | 空 気 温 度 |      |      |      |      |      |      | 吸 排<br>気 温 |      |        |
|--------|----------|----|----------|------|--------|---------|------|------|------|------|------|------|------------|------|--------|
|        | 右        | 左  | 右        | 左    |        | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 気          | 気    |        |
| 0      | 28       | 29 | 24       | 29   | 25     | 25      | 25   | 23.5 | 24   | 24   | 24   | 23.5 | 15         | 24.5 | H<br>側 |
| 1      | 31       | 32 | 25       | 29   | 25.5   | 26      | 26   | 24.5 | 25   | 25   | 25   | 24.5 | 15         | 25   |        |
| 2      | 32       | 33 | 26       | 31   | 26     | 27.5    | 27   | 25   | 26   | 26   | 26   | 25.5 | 15         | 26   |        |
| 3      | 32       | 33 | 28       | 34   | 26.5   | 28      | 28   | 26   | 27   | 26.5 | 26.5 | 26   | 14         | 26   |        |
| 4      | 32       | 33 | 29       | 34.5 | 27     | 28.5    | 28.5 | 27   | 27.5 | 27.5 | 26   | 26   | 13.5       | 26.5 |        |
| 最終     | 41       | 41 | 32       | 34.5 | 27.5   |         |      |      |      |      |      |      |            |      | L<br>側 |
| 0      | 30       | 28 | 24       | 27   | 25.5   | 25      | 23   | 24   | 24   | 23.5 | 24   |      |            |      |        |
| 1      | 32       | 31 | 25       | 28   | 25.5   | 26      | 24   | 24.5 | 25   | 24.5 | 24.5 |      |            |      |        |
| 2      | 33       | 32 | 25.5     | 29   | 26     | 27      | 25   | 25.5 | 26   | 25.5 | 25.5 |      |            |      |        |
| 3      | 32       | 32 | 28.5     | 31   | 26.5   | 28      | 24   | 26   | 26.5 | 26   | 26   |      |            |      |        |
| 4      | 33       | 32 | 30       | 32   | 27     | 28.5    | 25   | 27   | 27   | 26.5 | 27   |      |            |      |        |
| 最終     | 40       | 41 | 31       | 32   | 27     |         |      |      |      |      |      |      |            |      |        |



5 図 全電圧起動(変圧器一次電圧 11 kV)

Fig. 5. Full voltage starting Characteristics.

### 3. 電機子導体の接続

電機子導体と整流子ライザとの接続部は電機子絶縁中もつとも弱点で事故の多い部分である。わが社では今回の改修にあたっては6図に示す方法によつて絶縁の完全を期した。すなわち接続部においては各導体毎に独立に絶縁を施して接続部の裸部分を全然なくしてライザ相互間の短絡を防いだ。しかもこの接続部においても導体間にすき間があるのでライザの扇車効果は大きく通風はきわめて有効である。

### 4. 刷子寸法の統一

国鉄のご意向によつて各社製の刷子寸法が下記に統一せられた。

直 流 刷 子 12.5×32×50 角度 30°

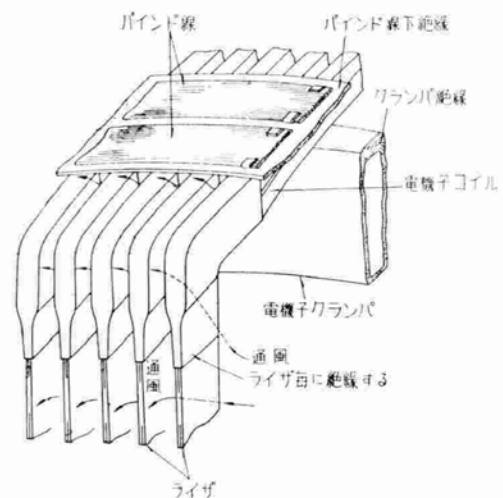
パイロット 6×32×50

交 流 刷 子 32×32×50

刷子保持器はわが社の方式である毎極一連のものが委員会で採用せられた。また刷子揚方式が各社異りしたがつて刷子の金具も区々であるためこれの統一は困難であるから刷子自体には金具は固定せず取外し自由なものにして刷子自体だけを上記のように統一された。それでわが社では刷子揚金具としては7図に示すようなものとした。(新案 12242 号) 図で 1, 2 は刷子クリップでこれでビッグテイルをはさみ3のボルトと4のナットでしめつける。刷子スプリングの先端が 1, 2 の下部の折り曲げた部にひつかかつて刷子が揚る装置になっている。

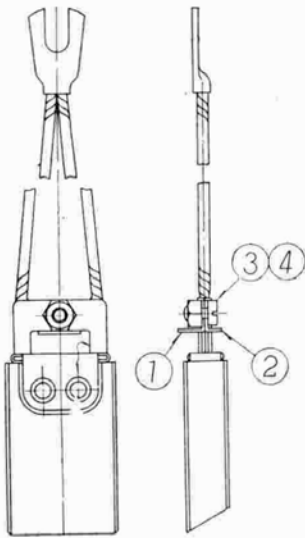
### 5. 台枠絶縁方式

閃絡継電器の取付方法に関連して回転変流機の継鉄および軸受台の絶縁方法と接地方式には種々あるがわが社では7図に示す方式を従来から採用してきたが、今回の委員会でもこの方式が採用されることになった。8図に



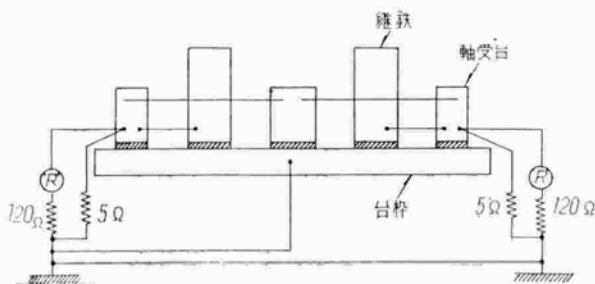
6 図

Fig. 6. End connections of Armature Winding.



7 図

Fig. 7. Carbon Brush with shunt Leads.



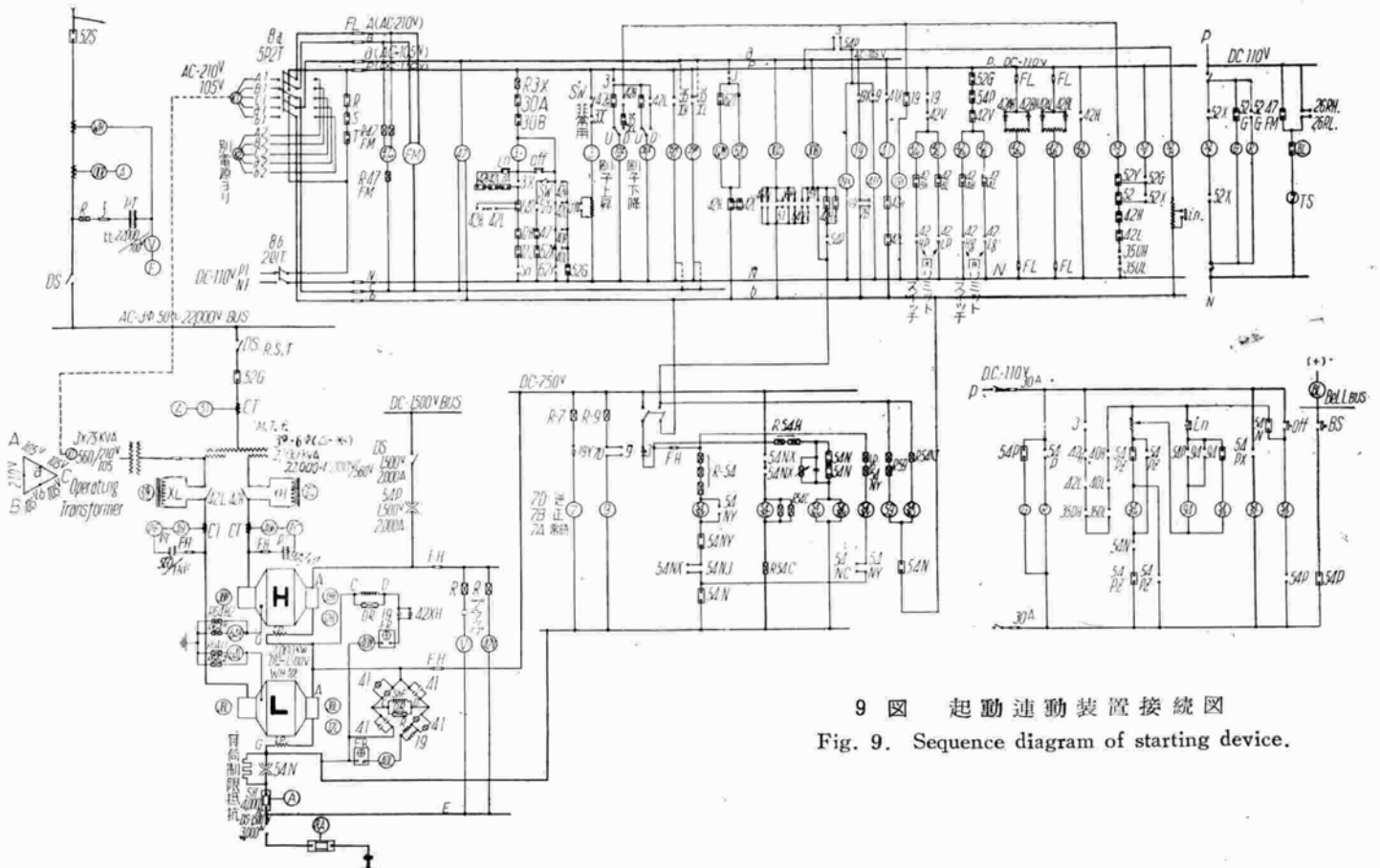
8 図 台枠絶縁方式

Fig. 8. Insulating method of startor.

示すとおり継鉄と軸受台をすべて台枠に対して絶縁する方式で、この方式を採用した理由とその利点は、

- (1) 継電器は直接々地ではなく 120 Ω の抵抗を通して、継電器の試験に便利なよう定格電流を 50 Amp 以下に選んだ。すなわち 50 Amp 以下では接地抵抗が 15 Ω 以上になると動作せぬ惧がある。(750V/15 Ω=50 Amp)
- (2) 以上の理由により継電器の定格を 2~12 Amp の小電流のものとするため 120 Ω で接地するようにした。最小電流を 2 Amp とすれば  

$$750V/2 \text{ Amp} = 375 \Omega \quad 375 - 120 = 255 \Omega$$
 あるいは  $120 \Omega \times 2 \text{ Amp} = 240 \text{ V}$   
 すなわち 750 V のときは 255 Ω の接地抵抗でも動作し、また最低 240 V でも動作することになる。
- (3) 5 Ω の接地抵抗を並列に入れた。工作物規程には接地抵抗は 10 Ω 以下となつていたので、120 Ω に並列に 5 Ω 入れた。なおこの 5 Ω の並列抵抗は接地抵抗 10 Ω 以下なることが確実な場合にかぎり入れることにした。
- (4) 軸電流は 2~3 m Amp 程度で軸受台と台枠との間に絶縁のない場合でも数 10 m Amp 程度というデータもあるが一応これを防止する方法とした。
- (5) 継鉄の絶縁。(1~(4) の理由では継鉄の絶縁を必要としないがもしこれがなければブラッシングその他の静止部に閃絡した場合は継電器に動作しない。



9 図 起動連動装置接統図

Fig. 9. Sequence diagram of starting device.

## 6. 自動起動操作

この方式は操作展開図(9図)に示すように、起動用開閉器を操作して主幹継電器 3 X および 3 を動作させると以下自動式に変流機の刷子を離揚して後に変圧器一次側の油入遮断器 52 G が投入される。変圧器の二次側から変流機にいたる回路に電流制限リアクトルと短絡用の電動操作式双型開閉器(起動盤に取付ける)を設け初めはこの開閉器は開放されているから変圧器二次側全電圧を変流機に印加して起動電流をリアクトルで制限して変流機は起動する。そのとき変流機の極性を極性継電器 7 で検出して逆に出ておれば界磁転換接触器 41 により界磁電流の方向を逆にして正しい極性が出たときに界磁電流を正に切換える。極性が正になり直流側に一定の電圧(約1,000 V)が出たときに直流電圧継電器 42 V が動作して電動操作式双型開閉器 42 を閉じてリアクトルを短絡し、かつ変流機の刷子を下降して正規の運転状態にはいる。

したがって起動までの電氣的連動方式や起動後の極性検出および運転にはいつてからの刷子下降、直流側遮断器の投入等の順序は従来の  $1/3$  タップ起動の場合と変らない。

保護装置として次のように電氣的連動を施してある。

- ア. 直接に主幹継電器 3 を落して直流正極および負極側の高速度遮断器 54 P と 54 N を開放し交流側の油入遮断器 52 G を遮断して運転を停止せしむるもの。
- a. 操作電源に電圧降下および逆相、欠相の現象を生じたとき。

- b. 起動に長時間を要し限時継電器 62 が動作したとき。
- c. 変流機の過速度制限器 12 が動作したとき。

- イ. 閉塞継電器 30 A 30 B を動作して主幹継電器 3 を落して運転を停止しかつその動作を 30 で表示するもの。

- a. 交流側の過電流継電器 51 および電流平衡継電器 46 が動作したとき。
- b. 変流機の軸受温度継電器 33 が動作したとき。
- c. 閃絡接地継電器 64 が動作したとき。
- d. 運転中にリアクトル短絡開閉器 42 が開放したとき。

- ウ. なお起動用リアクトルの保護として前記ア. b. 項の外にリアクトル本体に丸型温度計 26 R を取付けてリアクトルの過熱に対して警報を発する。

- エ. 変流機冷却用の送風電動機の電源に異状現象が生じた場合に継電器 47 FM が動作して警報を発する。

## 7. 起動用配電盤

起動盤は厚さ 50 mm 幅 813 mm 高さ 2,320 mm の黒塗仕上の大理石盤で高圧機側および低圧機側の 2 面 1 組よりなっている。(一部既設品を流用した関係で寸法は標準外になつている)

高さ 2,320 mm を 1,200, 490, 630 の三段に別けて上の段にはリアクトル短絡用双開形閉器 42 とその操作電動機および機構を一括して取付けて、中と下の段には 2 の開路用ならびに閉路用の電磁接触器 42 A 42 B 極性検出および確立用の界磁関係の電磁接触器が取付けてある。なお 42 の操作電動機は大理石盤には締付けずに盤とは浮かして盤の裏面の角鉄枠組に持たすようにして 42 の開閉の際に大理石に直接衝動を与えないよう留意している。

その他の仕様ならびに定格

起動用リアクトル 2 台  
2,000 kVA 1,800 A 50 ~ 370 V 1.5 分間  
乾式 起動時間 30 秒  
10 分間に 3 回起動に耐えるもの

リアクトル短絡用開閉器 2 台

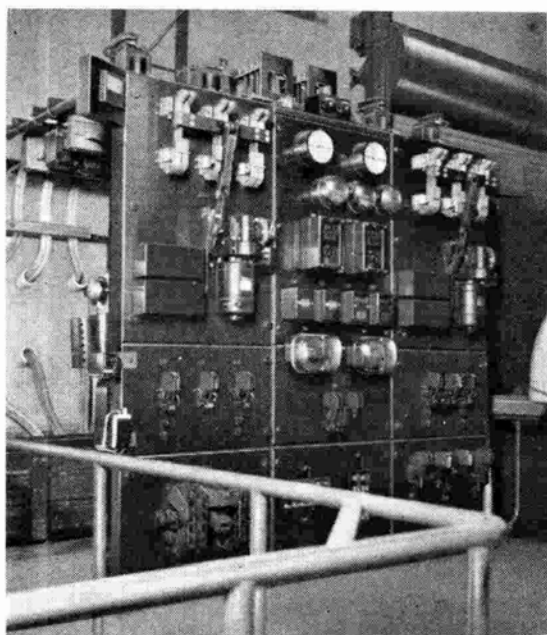
AC. 600 V 1,000 A 三極単投

同上用操作電動機 2 台

$1/4$  HP DC. 110 V 1,800 rpm 二重直巻 2 極

上記数量は H.L. 1 組分に要するものである。

最後に委員会を主催された電化協会の方々、種々ご教示を下さつた国鉄本庁および各鉄道局の方々に厚く感謝する次第である。



10 図 起 動 盤  
Fig. 10. Starting Panel.