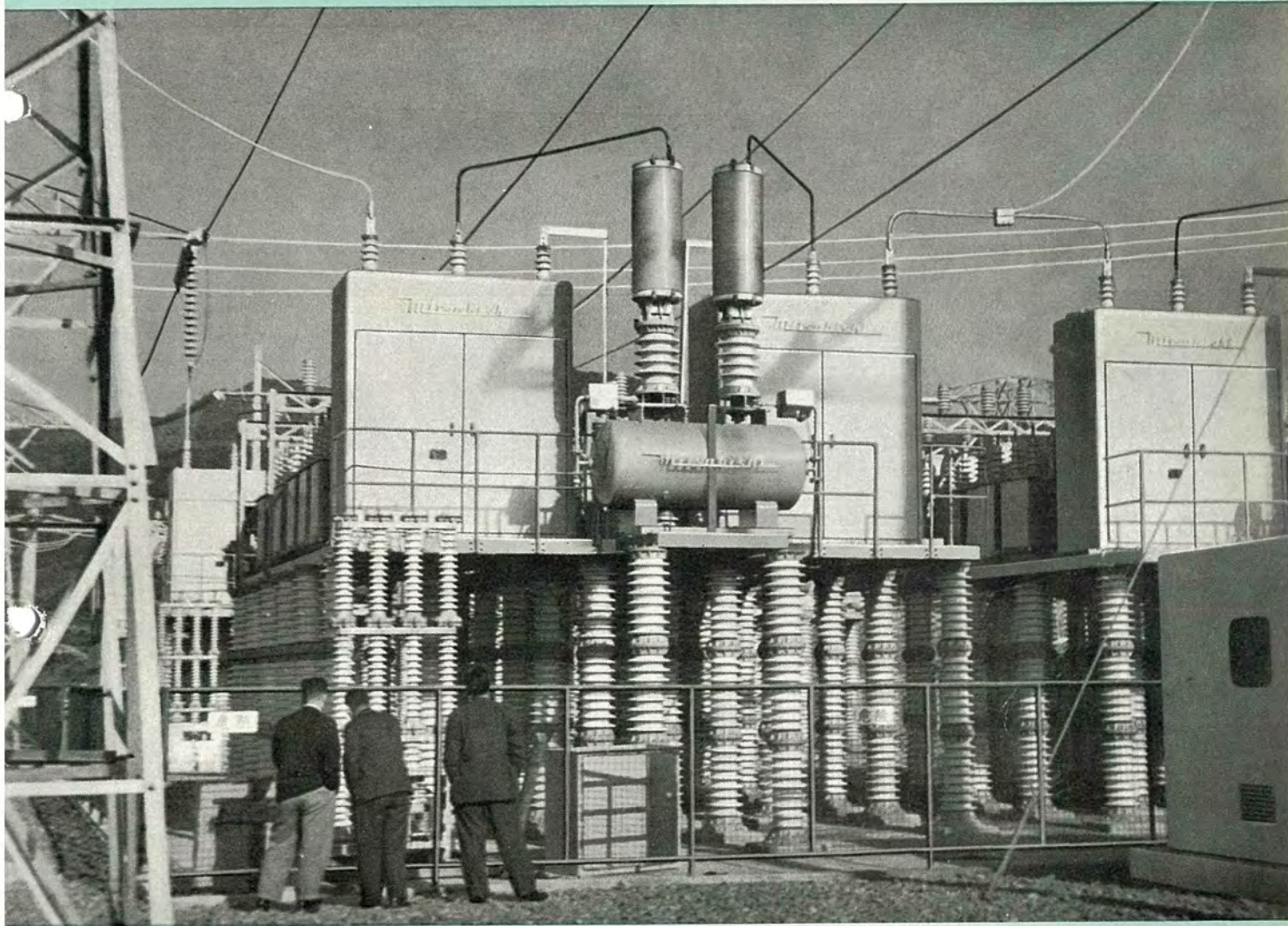


*MITSUBISHI DENKI*

# 三菱電機



九州電力山家変電所納 直列コンデンサ保護装置

4

VOL31 1957



# 三菱VLB型 負荷断路器

この VLB 型負荷断路器は標準の V 型断路器に遮断機構を取り付けたものであって、遮断機構には遮断時のみ電流が流れるだけであるので、遮断部は断路器としての連続定格あるいは瞬時定格電流等をそこなうことなく、しかも軽量にできております。遮断部は碍筒でできておりガスを封じ込んであるので使用中の保守はいりません。

## 特 長

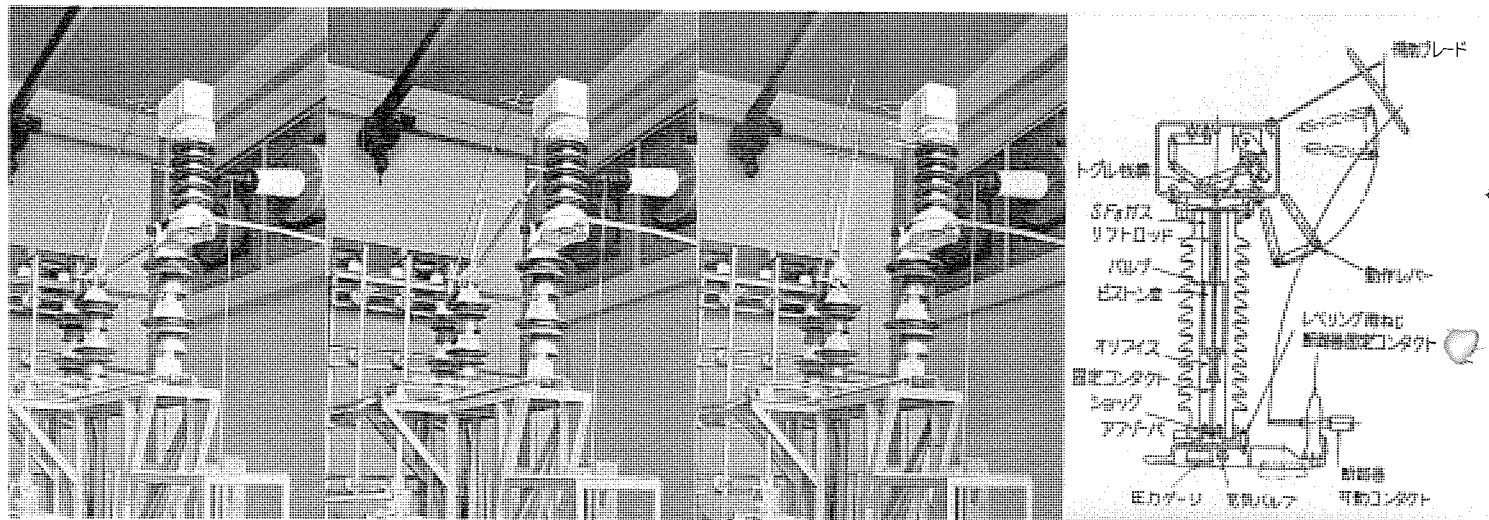
1. 本器は変圧器励磁電流、線路充電電流および負荷電流の開閉に対して十分の能力を有しております。
2. 高絶縁耐力、高消弧能力をもつ SF<sub>6</sub>（六弗化硫黄ガス）の使用により高遮断能力を有します。
3. 並列回路構造となっており遮断部は遮断時のみ負荷電流を流すので断路器の特性はそのまま維持されます。

閉路状態

遮断部開放開始

開路状態

内部構造図

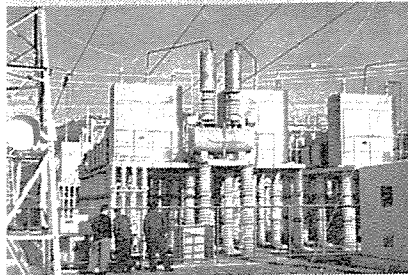


わが国ではまだ実用化されていませんが、欧米ではかなりひろく負荷断路器が使用されています。

## 納入経歴

当社の納入実績は右表のとおりであります。

納入先	定 格		使用状態	数 量 (台)	製作年月
	電圧(kV)	電流(A)			
台湾電力株式会社	69	400	屋 外	1	昭和31年6月
同 上	34.5	400	同 上	1	同 上
遼東パイプ株式会社	34.5	400	同 上	1	昭和32年11月
台湾紙業株式会社	34.5	400	同 上	1	昭和31年12月
台湾造船株式会社	34.5	400	同 上	1	昭和32年1月
台湾電力株式会社	69	600	同 上	1	製 作 中
台湾嘉新セメント株式会社	69	400	同 上	1	製 作 中
台湾電力株式会社	34.5	400		1	製 作 中



MITSUBISHI DENKI

三菱電機

## 表紙説明

九州電力中央幹線の電力潮流および電圧調整用として山家変電所に設置された直列コンデンサの保護装置で、空気吹付型保護間隙、短絡開閉器および操作装置1式を含むもので、保護間隙はつぎの性能を有するものである。

保護間隙 空気吹付型  
放電耐電流 5,000~10,000 A  $\frac{1}{10}$  sec  
5,000 A 以下  $\frac{1}{4}$  sec

保護動作としては

1. 故障電流に対する蓄電器保護
2. 連続過負荷保護および蓄電器内部故障保護
3. 軽負荷時蓄電器挿入防止

昭和 32 年 第 31 卷 第 4 号

## 目次

山家変電所設置 220 kV 直列コンデンサ

.....宮田秀介・大森武司・大嶋幸一・新井正元・亀山三平... 2

電気機器絶縁コロナの試験.....原 仁吾...15

電気式水位調整器.....梅名茂男...26

ダイアレジン含浸計器用変成器.....樺沢孝治・大野 暁...34

高圧固定子コイルの耐電圧の管理.....板倉信郎...39

かご形誘導電動機の溝数組合せとスキューが磁気騒音に

及ぼす影響.....関野 博・白田長一・梶谷定之...44

### 技術解説

論理数学における主な関係とそれに対応する基本回路

OR 回路, AND 回路とは? .....菅野正雄...50

### W 社文献抄訳

電力用変圧器の趨勢.....田村良平...56

配電系統の保護.....亀山三平...57

ニュースフラッシュ.....58

最近登録された当社の特許および実用新案.....60

## 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 兵庫県尼崎市南清水

長崎製作所 長崎市平戸小屋町

無線機製作所 兵庫県尼崎市南清水

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 福山市仲野上町

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 岐阜県中津市駒場安森

福岡工場 福岡市今宿青木

静岡工場 静岡市小島 110

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) 大阪 (34) 代表 5251

名古屋営業所 名古屋市中区広小路通

(電) 本局 (23) 代表 6231

福岡営業所 福岡市天神町

(電) 中 (4) 7031—7036

札幌営業所 札幌市大通西 3 の 5

(電) 札幌 (2) 代表 7236

仙台営業所 仙台市東一番丁 63

(電) 仙台 (2) 代表 1601

富山営業所 富山市安住町 23 の 2

(電) 富山 4692・5273・2550

広島営業所 広島市袋町 6 (富国生命ビル)

(電) 中 (2) 2211~4

高松出張所 高松市紺屋町 34 番地

(電) 高松 3178・3250

小倉出張所 小倉市京町 10 丁目 (五十鈴

ビル) (電) (5) 小倉 3614

品質奉仕の三菱電機

# 山家変電所設置 220 kV 直列コンデンサ

九州電力株式会社 取締役 宮田 秀介  
 日新電機株式会社取締役技術部長工学博士 大森 武司  
 第二技術課蓄電器課長 大嶋 幸一  
 三菱電機株式会社伊丹製作所 新井 正元\*\*  
 亀山 三平\*

## 220 kV Series Capacitor Installed at Yamae Substation of the Kyushu Electric Power Company

Kyushu Electric Power Co. Hidesuke MIYATA  
 Nisshin Electric Manufacturing Co. Takeshi OMORI • Koichi OSHIMA  
 Itami Works Masamoto ARAI • Sampei KAMEYAMA

In March 1956 Yamae Substation of the Kyushu Electric Power Company marked a memorable spot on the electrical map of Japan when the first 220 kV series capacitor was installed there with an aim to control the power flow of the central main transmission line. Success achieved by this installation is so remarkable that it has increased the transmission capacity and decreased the losses of three Kyushu main transmission lines, being one of the most outstanding, high voltage apparatus in the world. Every possible means was employed in the study of this unit before the installation to insure successful operation, which was further attested in the field tests.

### I. ま え が き

九州の南部電源地帯で発電する電力は大淀幹線、上椎葉三池線、東幹線の 110 kV 3 幹線により北部需要地に輸送されていたが、電力需給の増大およびそれに伴う電源開発の進捗に従い、上椎葉—山家間にさらに 1 幹線を建設し、電力輸送の増強を図ることが計画され、この計画実現のため九州電力株式会社内に潮流制御委員会が設けられ、内外各方面の絶大なる協力と助言により 2 年有半にわたり本計画の推進に努力が続けられた。

この計画によれば上椎葉山家線（中央幹線）は 220 kV 設計で、この建設後は全北上電力が 4 ルートに分割されて需要地に供給されることとなり、種々の技術的および経済的検討を加えた結果、中央幹線・東幹線・上椎葉三池線の 3 幹線をループ運転とすることが最も妥当であると結論づけられた。しかし 2 幹線以上のルートをループ運転する場合、各ルートの R/X が異なるとループ運転によってかえって送電損失が増加することになる。上記 3 幹線の R/X は 1 表に示すように、中央幹線の R/X が他の 2 幹線のそれと異なり、ために中央幹線と他の 110 kV 2 幹線との間に適当な潮流制御を行い、送電損失を最少とする必要がある。

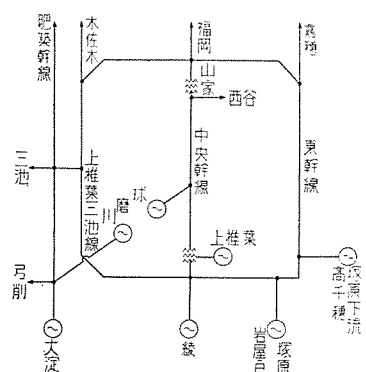
1 表 線路インピーダンス (110 kV 換算値)

線 路	インピーダンス ( $\Omega$ )	R/X
中央幹線 (上椎葉—山家)	$4.64+j 32.15$	1/6.94
東 幹 線 (上椎葉—高千穂—山家)	$13.7+j 42.94$	1/3.14
上 椎 葉 三 池 線	$12.87+j 38.82$	1/3.02

このための潮流制御装置としては直列コンデンサを中央幹線に挿入し、線路リアクタンスを補償して中央幹線の R/X を他の幹線のそれに近づける方法および、移相変圧器によって中央幹線の電圧位相を変更する方法の 2 案が考えられる。直列コンデンサと移相変圧器とはおのおのその特長を有し、その 1 つに決定することは難かしい。したがって送電安定度を増大し、受電端における調相設備を節約する意味から直列コンデンサがすぐれておりまた価格の面でも直列コンデンサが有利であるので、本ループ系統の潮流制御は中央幹線受端山家変電所高压側において主として直列コンデンサにより行い、その一部を移相変圧器で調整することとなった。

わが国においては超高压系統への直列コンデンサ補償方式の適用は本設備をその嚆矢とし、とくに潮流制御の機能を目的として設置されたことは、今後の送電系統の系統構成の問題に大きく貢献することと考える。

諸外国における超高压系統への直列コンデンサ適用の例としては、BPA の送電系統に 3 ヲ所 230 kV 直列コンデンサが設



1 図 九州電力系統図  
 Fig. 1. Single-line diagram of the power system of the Kyushu Electric Power Co.

置されてより、この内 Rocky Ford (59.4 MVA) と St. Andrews (36 MVA) の2ヵ所の設備は各送電線の送電容量増加を目的とする外に各送電線の負荷分担をその断面積に比例するよう配分し、送電損失を低減する等の効果を発揮している。また同様の目的で Sweden では 220 kV 送電線と併列運転する 380 kV 送電線に直列コンデンサが設置された。

中央幹線は上述せるように 220 kV で設計され昭和30年初月より運転にはいったが山家変電所竣工までは 110 kV にて使用し、南部水力電源の開発状況、送電損失回収、中国連繫に関連せる工事の進捗度、周波数変更の進捗などに従って九州送電系統の構成はループ前の状態を含め、次の5段階に大別されることになった。

- (1) 各幹線別個の放射状系統
- (2) 中央幹線 (110 kV) 上椎葉三池線ループ (現在系統)
- (3) 中央幹線 220 kV 昇圧
- (4) 東幹線 60 サイクル化後ループ編入
- (5) 球磨川開発、四国連繫最終系統

これら送電系統の変更および送電電力の増加に伴い、山家変電所潮流制御用直列コンデンサ設備も4段階に分けて、各段階ごとに増設することになった。その第1段階 (第1期) として 110 kV 中央幹線末端に 15.4  $\Omega$ / $\phi$  38,100 kVA コンデンサ設備が設置され昭和31年3月、直列コンデンサ補償系の各種の機能の試験が実施され、所期の効果を十分発揮することを確認、現在満足すべき運転状態にはいつている。

以下に本設備を設置するに至るまでに計算ならびに検討された諸事項・設備・試験結果について記す。

## II. 直列コンデンサによる電力潮流の制御

### 1. 電力系統のループ運転

一般に電力送電方式としてのループ系統と放射状系統とを比較するに、ループ系統においては各送電幹線山側を全系統並列とするため、多数の中性点抵抗器 (Petersen Coil と並列に) を使用することによる通信誘導障害の問題、系統短絡容量増大の問題、リレー誤動作時の事故の拡大等の欠点を有し、かつ各送電線のインピーダンスがまちまちであることから必ずしも予期された送電損失の軽減を図りうるとは限らない。しかしループ系統はまた下記のごとく種々の利点を有するので、ループ系統とする方が利益となる場合が多い。すなわち

#### ア. 系統運用の円滑化

本系統の場合、中央幹線完成後南部において発生する電力を東幹線・上椎葉三池線・中央幹線・大淀幹線の4ルートで北部需要地に送電するに当り、その電力損失を最少とし、電力の配分を最も適当なものにしなければならない。上椎葉でループしない場合は各電源の発電状況や負荷の変動に応じて電源の切換が必要となる上、可能

な電源の切換にも一定の限度があり、能率的かつ円滑な系統運用は期し難い。しかし上椎葉でループすれば以上の問題が比較的容易に解決し、その運用の円滑化を自動的に行うことができる。

#### イ. 送電損失の軽減

系統運用の円滑化の問題と関連した項目であるが、放射状系統をループすることにより合理的な潮流分布となし、送電損失の軽減を図ることができる。一般にループ系統の電力損失に関して次のことがわかっている。

ループ系統の電力損失最少の条件は後記するように各ルートの  $R/X$  がおのおの等しいことである。したがって上椎葉三池線と東幹線とのように  $R/X$  の等しい線路をループする場合にはループしない場合に比し必ず損失は減少する。

しかし  $R/X$  の異なる線路をループする場合にはこの電力損失最少の条件を満たさねばかりでなく、かえってループせぬ場合よりも電力損失が増大する場合もある。ループしない場合の損失は各線路の電源の割り振りを自由に選びうるか否かに左右され、もしこれを自由に選びうるならば非ループ時の損失はループ時の損失より必ず小にできる。ただし前述のように電源の切換は一定の限度があり、この煩雑な操作は系統運用上好ましくなく、この点に(1)項にのべた系統運用上のループの利点がある。

上記せるところを換言すれば  $R/X$  の等しい線路ではループすれば、ループしない場合に比し損失は減少し、 $R/X$  の異なる場合は非ループ時に電源の振り分けを適当に行えば送電損失は最少にでき、ループすれば損失が増大することが多く潮流制御が必要となる。

#### ウ. 送電容量の増大と安定度の向上

各ルートをループしたときの電力不等率はループ運転を行わない場合の不等率を向上し、送電容量を増大させる。

また系統に多重事故が起った場合などたとえリレーが完備されていてもループ系統でない限り発電機の解列、負荷脱落を防ぐことはできない。したがってきわめて良質の電力が強く要望される今日、保護装置の完備と共にループ運転を行えば、不等率を向上し定態、過渡安定度を増大して、サービスの向上を期することができる。

以上のようにループ系統は1,2の欠点があるにもかかわらず、これを補うに足る多くの利点をもつのでループ系統が採用されるが、これには送電損失を最少にするために潮流制御の必要が起る。

### 2. 潮流制御装置としての直列コンデンサと移相変圧器

ループ系統の電力潮流を制御する方法としては一般に直列コンデンサと移相変圧器とが考えられる。直列コンデンサはその挿入により線路リアクタンスを補償し、各ルートのインピーダンスを適当なものとするに對し、移相変圧器は電圧位相を調整して電力潮流の制御を行う。

このいずれを選ぶべきかは一律に断定し難いが次の諸点が検討の対象となる。

まずほぼ同一の効果を与える直列コンデンサと移相変圧器の容量を比較するに直列コンデンサの容量は負荷電流とオーム数によって規定せられ、負荷の力率がほぼ100%の場合には、コンデンサ挿入による位相の変化を $\theta$ とすればコンデンサ容量はほぼ線路容量と $\tan \theta$ との積で表わされる。一方移相変圧器の容量は線路容量と $\sin \theta$ との積であるから理論的には必要とする移相角度が小さい場合には両者の容量はさして相違がない。

次に系統に生じた事故、あるいは電源切換による潮流の変化などの場合にはそれに応じて直列コンデンサあるいは移相変圧器の設置されてあるルートの潮流をも変化させたい要求が起り、これを直列コンデンサのみにより行くとすればコンデンサを小容量に分割する必要があるから設備がかさみ操作も複雑となる。したがってコンデンサ補償度あるいは移相変圧器の移相度を変えうという点では潮流の小変化に対しては移相変圧器の方が有利であろう。

移相変圧器には上記運営上の利点があるが機構上の問題があることと、直列コンデンサおよび移相変圧器の本質的な機能の相違から、直列コンデンサではオーム数を増して潮流制御の効果を強化するとき、受電端の所要調相容量は減少するのに対し、移相変圧器による場合には調相容量を増加しなければならない。

直列コンデンサ、移相変圧器いずれかの選択は以上のほか過電圧保護・系統投入時ショック・異常現象・経済比較などを考慮する必要があるが、これらを2表(a)、(b)に簡略にまとめた。

2表(a) 直列コンデンサと移相変圧器との各性能の比較

項目	直列コンデンサ	移相変圧器
機能	線路リアクタンスの補償	電圧位相の調整
調整	正方向のみ 粗調整	正逆両方に効く。位相大きさを单独調整出来る。細調整可。
過電圧保護	特に要しない	避雷器
侵入波に対して	別に問題はない	検討を要する(直列励磁コイル)
短絡強度	保護間隙	検討を要する(直列線輪)
調相容量	少い	多い
異常現象	検討を要す	別に問題はない
所要容量	おおよそ同じ(やや大)	おおよそ同じ(やや小)

(b) 直列コンデンサ、移相変圧器併用時と直列コンデンサ単独使用時との比較

項目	直列コンデンサ	直列コンデンサ、移相変圧器併用時
調整	微細調整不能	一定ベースを直列蓄電器にもたせ移相変圧器で微細調整
ループ運転解列の場合	3幹線ループ時1幹線が解列すると他幹線が過負荷になることがあるがうまく制御できない	同左の場合すぐ調整して下げる
異常現象	負制動現象の検討を要す	少い
価格		若干高価

### III. 設置に当り検討された諸問題

#### 1. 直列コンデンサ補償ループ系統の過渡安定度

直列コンデンサ補償系統においては系統故障時保護間隙が放電すればコンデンサは短絡状態となり、送受電端の位相差角が急増し、故障発生あるいは1回線選択遮断に伴う位相差角の変動に加重し過渡安定度が低下しやすい。

従来の系統の事故は2回線同時故障が相当多く、したがってこれをループ運転とすれば、発電機の解列、負荷脱落を防ぎ、利用率の向上と共に定態、過渡安定度の向上を期待することができる。

本系統の過渡安定度計算は過去2回交流計算盤により計算している。第1回は中央幹線を220kVに昇圧し球磨川、西谷の各220kV分岐線が完了した将来系統についてである。第2回は算定系統を中央幹線110kV使用状態とし中央幹線・上椎葉三池線・東幹線の3幹線ループについてである。

##### A. 中央幹線 220kV 昇圧時

故障条件：中央幹線黒川における3相短絡により中央幹線1回線遮断

故障時間：12サイクル

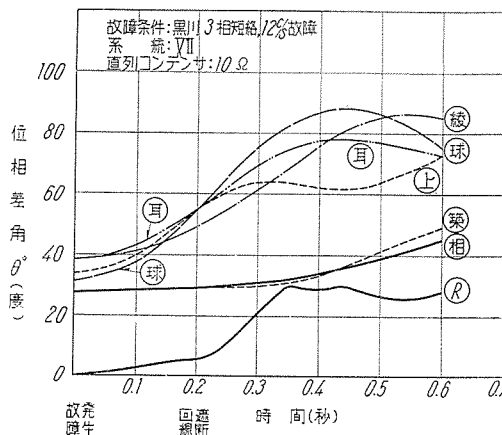
系統は3幹線ループを用い、直列コンデンサ10 $\Omega$ 補償とした。

直列コンデンサ保護間隙は、算定の結果放電するものと考えられたので、直列コンデンサは故障中および1回線遮断後も短絡状態にあるものとした。

この場合の計算による発電機相互間の相边角の変動は2図に示すとおりで、最大60°である。したがってこの結果から故障回線1回線遮断後、直列コンデンサ保護間隙を強制消弧せずとも、ループ系統であれば十分安定を維持しうることが確認された。

##### イ. 中央幹線 110kV 使用時

この場合は直列コンデンサ放置の状態とし、中央幹線山家側および東幹線高千穂側の故障に対して算定した結



2図 中央幹線(220kV)黒川3相短絡時位相差角動揺曲線  
Fig. 2. Power angle-time curve 3 $\phi$  short at Kurokawa.

果、最大相差角は  $70^\circ$  となるが、中央幹線以外の故障に対しては 0.4 秒で行いければ系統は安定なことが確認された。しかし中央幹線故障では保護間隙放電の可能性が大であり、実系統とやや異なるように思われる。

以上 2 回の算定結果から中央幹線を 110 kV で使用した場合 220 kV に昇圧した場合両者とも系統は安定であり、放射状系統に比しループ系統が過渡安定度の点とくに有効なことが確認された。

## 2. 無負荷変圧器投入

一般に無負荷変圧器が直列コンデンサを通じて投入される場合、線路電流に時として著しい歪波形が現われ、その電流値は定格励磁電流値をはるかに越えかつ電源周波数より低い  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/5$ ,  $1/7$ ……等の分数調波をもって持続し、永く持続するのを許さない現象を起すことがある。この現象は投入時の位相変圧器の飽和特性、回路定数の構成等によって左右される。ただし分数調波の発生により機器にかかる電圧は大したものではない。また系統が全然無負荷でなくなんらかの負荷を有している場合には無負荷変圧器を投入しても分数調波は発生しにくい。

九州の系統で実際の運用に際し無負荷変圧器を投入する可能性のあるのは次の場合である。すなわち

- (1) 中央幹線解列後の試送電時、山家、上椎葉変圧器の無負荷投入
- (2) 平常運転時、山家あるいは上椎葉の変圧器 1 バンク運転中、他の 1 バンクの無負荷投入
- (3) 中央幹線再閉路

以上のうち (1) に対しては山家の主変流器に瞬時動作、自己復帰型低電流リレーを挿入し、直列コンデンサ通過電流減少時は自動的にコンデンサを短絡し電流が増加したときは自動的に復帰させるようにし、無負荷変圧器の投入は除く。

(2) に対しては上述したように異常現象は発生しないと考えられる。

(3) 中央幹線は 2 回線運転時 3 相再閉路方式を使用し、これは他回線健全で負荷を条件としているので変圧器の無負荷投入は行われない。

無負荷変圧器投入に関しては以上のように実運転に際しては、その可能性がないと考えられるので、さらに検討は行わなかった。

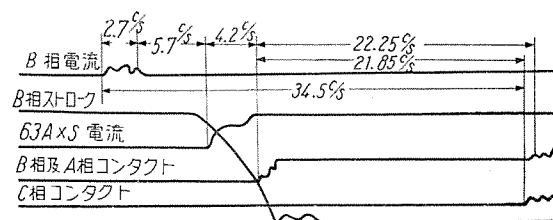
## 3. 不平衡放電に伴い側路開閉器不平衡投入の影響

### ア. 直列コンデンサ不平衡放電時の側路開閉器の動作

3 図は不平衡放電時の側路開閉器の動作を示すオシログラムである。すなわち gap 不平衡時は約 35 サイクル不平衡直列コンデンサ挿入状態におかれるわけである。これらの影響として考えられる事項は下記のとおり。

- (1) 110 kV として P.C 補償系統に使用される場合、

山家変電所設置 220 kV 直列コンデンサ・宮田・大森・大嶋・新井・亀山



3 図 直列コンデンサ側路開閉器、1 相投入時の他相動作  
Fig. 3. Oscillogram showing the operation of the by-pass switches. (B  $\phi$  gap sparks over)

110 kV 系統に接地を生じないときは直列共振による中性点の電圧上昇を一般的には起すのであろうが、現地試験実測値では現系統においては一応問題にならないとの結論を得たが 220 kV 昇圧時は直接接地系となるので次の諸点を検討した。

- (a) 230 kV 回路内環流零相電流による後備保護継電器の動作
- (b) 同上環流零相電流による通信誘導障害
- (c) 再閉路との関連

### イ. 直列コンデンサ不平衡短絡時の中央幹線零相電流

220 kV 昇圧時の放電間隙不平衡動作時の中央幹線零相電流を交流計算盤により求めると 3 表のようになる。またこれを理論的に検討した結果は 4 表のごとくなる。

### ウ. 通信線に対する誘導

本点においては中央幹線が直接接地系であるためあらかじめ考慮検討済で、地絡電流 1,000 A 以下では通信線誘導電圧は問題にならない。

したがって 3 表または 4 表の零相電流においても問題はない。

3 表 直列コンデンサ放電間隙不平衡動作時  
中央幹線 IC (A) (九電交流計算盤)

故障点	故障種類 動作間隙 潮流	2 相短絡接地		3 相短絡接地	
		1 相	2 相	1 相	2 相
D 山家三池線山家出口	洪水 Peak	-123-j45 132	-35+j16 38	82+j99 121	-53+j118 119
	洪水 Offpeak	-88-j5 88	-18+j29 34	65+j61 89	-23+j91 94
F 山家嘉穂線嘉穂出口	洪水 Peak	-91-j35 98	-31+j15 34	56+j80 93	-44+j180 185
	洪水 中間	-62+j25 67			

系統は \* 印のみ 3 幹線ループ 他はすべて 2 幹線ループ

4 表 理論上の最大零相電流 (筆算)

短絡種別	擾乱種別	中央幹線 回線数	系統常数	中央幹線零相電流	同左 1 相当	備考
1 相短絡	故障時	2 回線	制限無	$16.48-j142.0A$ $=142.9\angle 83^\circ$	23.8A	
"	常態負荷時	"	"	57.0A	9.5	
"	故障時	1 回線	"	$15.6-j131.1$ $=132\angle 83^\circ$	4.4	
"	常態負荷時	"	"	52.8	17.6	
2 相短絡	故障時	2 回線	$1 \leq \frac{x_0}{x_1} \leq 3$	$21.0-j154.8$ $=156\angle 82^\circ$	26.0	
"	常態負荷時	"	"	62.4	10.4	
"	故障時	1 回線	"	$19.0-j145.7$ $=147\angle 82^\circ$	4.9	
"	常態負荷時	"	"	58.7	19.6	







はない。

次に中央幹線現地テストに当っては、以上の直列コンデンサ系の一般的諸問題に加えて系統の特殊性を考慮し三菱製 HKB-2 型常時位相比較搬送保護継電装置が一部改造の上適用された (6 図)。すなわち

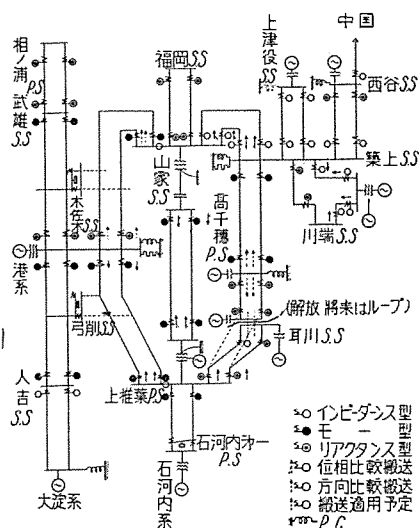
(1) 短絡故障保護に関しては前述どおり位相比較継電方式でなんら差支えない。すなわち保護区間両端を通過する正相分出力のみによって常時位相比較を行い距離継電器により故障を検出した場合のみ動作を与えて内外の故障の判別を行わせる方式を採用した。したがって 3 相短絡・3 相接地・2 線短絡・2 線接地はすべてこの回路で保護されることになる。

(2) 接地故障保護に関して

この系統は消弧線輪接地系であり、5 秒後に並列抵抗が挿入され、完全接地時、全有効分故障電流は 180 A である。しかし接地故障が中央幹線山家変電所近傍で発生した場合には上椎葉発電所側より流入する有効分接地電流がきわめて少く、かつ区間内充電電流が比較的多く補償回路などの設置を必要とする。

要するに、接地故障に対して位相比較を行うためには区間両端により十分な有効分接地電流を供給する必要があるから、この場合位相比較を適用できず、有効分接地電力による電力方向比較方式を採用した。すなわち接地故障発生より 3 秒後に、接地故障検出継電器を生かし、搬送装置を電力方向比較用に切換える。5 秒後に並列抵抗が挿入されると同時に接地継電器が動作し、接地電力が 1 端より流出しておればトリップを阻止し、流入端のみであれば電力流入端のみが遮断する方法を採用した。したがってもし系統がループ接続となっておれば直列引外動作となる。

以上の電力方向比較接地保護は HKB-2 型常時位相比較搬送装置をそのまま流用するもので、1 線接地のみをこれにより保護する。なお方式は短絡優先方式を



7 図 継電器方式図

Fig. 7. Future protective relay system of the Kyushu Electric Power Co. Systems.

山家変電所設置 220 kV 直列コンデンサ・宮田・大森・大嶋・新井・亀山

採用している。

いずれにしても、かかる高インピーダンス接地系に直列コンデンサが挿入された場合の接地故障保護は 1 線接地故障時に直列コンデンサのいずれかの保護間隙が放電して過大な零相環流電流を生じないことを前提条件として考えたものである。

もしこのような現象が発生したとすれば方向比較方式でも、位相比較方式でも内部故障を外部故障と判断する結果となる。

現地テストの結果は 3 回の内部故障、1 回の外部故障に対し、全 4 回共正動作であった。なお中央幹線、中央部 (立門) における人工接地 (内部故障) において直列引外し動作を行うことなく両端同時遮断を行った。

中央幹線昇圧後の全系統の保護継電方式は 7 図の予定である。

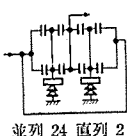
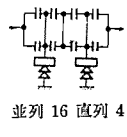
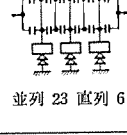
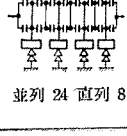
## IV. 直列コンデンサ設備

### 1. オーム数

第三章に述べたように、九州南部地区の電源開発に伴い各幹線の送電電力は大幅に増大する。したがってループ系統をつねに電力損失最小かつ系統安定度向上を保ち

工 期	設置回路	線路容量	潮流制御装置	
			オーム数 (カッコ内は 110kV 換算値)	電圧位相調整器
第 1 期	110 kV 側	150MVA	15.4 Ω	なし
第 2 期	220 kV 側	200MVA	46 Ω (11.5 Ω)	±6.5° (±25kV)
第 3 期	220 kV 側	300MVA	48 Ω (12.5 Ω)	同上
第 4 期	220 kV 側	300MVA	60 Ω (15 Ω)	同上

5 表

工期	直 列 コ ン デ ン サ 設 備		電 圧 位 相 調整器設備	備 考
第 1 期	回路電圧 110 kV オーム数 15.4 Ω 定格電圧 14,000 V 定格電流 908 A 台 数 144 台 定格容量 38,100 kVA	 並列 24 直列 2	不 要	
第 2 期	回路電圧 220 kV オーム数 46 Ω 定格電圧 27,830 V 定格電流 605 A 台 数 192 台 定格容量 50,800 kVA	 並列 16 直列 4	容量 11.5MVA 調整電圧: 220 kV の電圧 に対し直角分 電圧 ±25 kV 台数: 2 台	山家 SS 主変圧器 2 台
第 3 期	回路電圧 220 kV オーム数 48.3 Ω 定格電圧 42,000 V 定格電流 870 A 台 数 414 台 定格容量 110,000 kVA	 並列 23 直列 6	同 上	同 上 3 台
第 4 期	回路電圧 220 kV オーム数 61.6 Ω 定格電圧 55,870 V 定格電流 907 A 台 数 576 台 定格容量 152,400 kVA	 並列 24 直列 8	同 上	同 上

系統運営の円滑化を図るためには、中央幹線の電力潮流を全北上電力の 65~75% に保つ必要があり、潮流制御装置である直列コンデンサオーム数も電力の増大に伴い変化させる必要がある。

すなわち、中央幹線は当初 110kV (消弧線輪接地系統) で運転され、工事の進捗に伴い 110kV より 220kV (直接接地系統) に昇圧されるので、電源の開発および系統構成の変更に伴い、直列コンデンサオーム数および容量は前記のごとく変化する。また直列コンデンサは固定し負荷時電圧位相調整器の作用で補うように考慮された。

なお、昇圧・オーム数変更・容量の増加は結線の簡単な変更、コンデンサ架台の増設で容易に行いうるよう考慮されている。(5 表)

## 2. 第 1 期設備の概要

直列コンデンサ設備は前述のように各期に伴い、そのオーム数および構成を変更するが、第 1 期の設備は 110kV 消弧線輪補償系統に使用され下記の定格である。

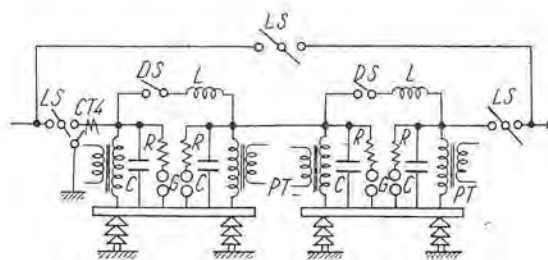
回路電圧	110kV (消弧線輪補償系統)
周波数	60 c/s
線路容量	150 MVA (865 A 100 kV にて)
オーム数	15.4 $\Omega$
定格電圧	14,000 V
定格電流	908 A
定格容量	38,100 kVA

本装置は下記の機器より構成され、8 図のように接続される。

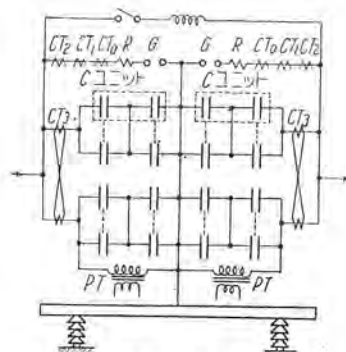
単位コンデンサ (日新電機製)	
7,000 V 60 A 180 $\Omega$ 265 kVA 147 台	
保護装置 (三菱電機製)	
保護間隙装置 (空気吹消型)	6 台
キュービクル	12 台
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 3em; margin-right: 5px;">}</div> <div>           短絡開閉器            制御用変流器            故障検出用変流器            計器用変圧器            継電器盤         </div> </div>	
抑制リアクトル	
圧縮空気装置キュービクル	1 台
絶縁架台 (日新電機製)	
計器用変流器 (主回路用) (三菱電機製)	
線路開閉器 (三菱電機製)	

これらの機器のうち直列コンデンサ・保護装置キュービクル・保護間隙および抑制リアクトルは共通の架台上に登載し、圧縮空気装置キュービクルは架台外別置とし直列コンデンサ 3 相分に対して 1 台を使用し、地上より耐圧碍筒を通して架台上へ給気する。

絶縁架台は 170 号の絶縁強度を有し耐震強度 0.5 とし設計されたものを使用し、系統電圧および構成変更に応じ 5 表のように容易に接続変更しうる。



(a) 総合結線図 (220kV 二期分)



(b) 単位架台の結線図

- C ..... 直列コンデンサ
- CT<sub>1</sub> ..... # (主回路用)
- PT ..... 計器用変圧器
- LS ..... 線路開閉器
- DS ..... 短絡開閉器
- G ..... 保護間隙
- R ..... 抑制抵抗
- L ..... 抑制リアクトル

8 図 結線図  
Fig. 8. Connection diagram.

直列コンデンサは単位コンデンサを所要台数並列にしたもの 2 組を直列にし、1 基の架台上に登載し、この架台の組合せにより 1 相分を形成するごとくし、コンデンサ端子間には保護間隙、制御用変流器および計器用変圧器を挿入し過電圧保護およびコンデンサの事故検出を行うようになっている。一方直列コンデンサ設備の保守点検時の保安のため線路開閉器 (山側) に接地装置を設け線路開閉器 (山里側共) と相互の鎖錠を施してある。9 図は計器用変流器、10 図は V 型断路器を示す写真である。

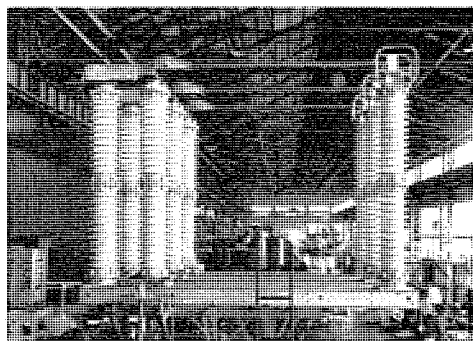
## 3. 直列コンデンサの絶縁強度、許容過負荷および許容過電圧

直列コンデンサの絶縁強度は保護間隙の放電電圧整定値、保護間隙の種類および抑制抵抗の有無、種類などで決定される。保護間隙の放電整定値については、中央幹線、東幹線および西幹線 3 ループ時の系統について 3 相短絡電流を交流計算盤で計算すると共に、平常運転時に発生する過電圧、すなわち電力動揺時および直列コンデンサ挿入時の過電圧を考慮して直列コンデンサ定格端子電圧の 2.6 倍とした。

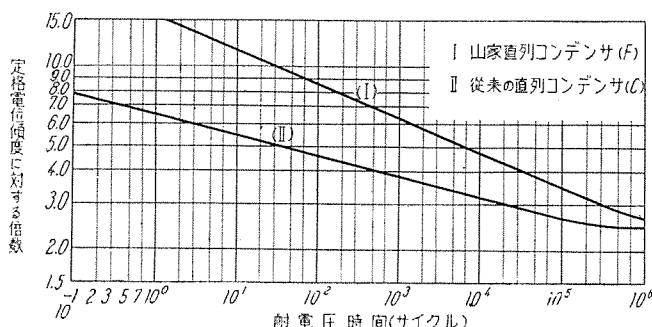
したがってその絶縁強度は現行並列蓄電器標準強度の 120% に設計がなされた。その許容負荷ならびに過電圧は下記のとおりである。



9 図 PC-17 型計器用変流器  
Fig. 9. Type "PC-17" current transformer.



10 図 V 型断路器 230 kV 1,200 A  
Fig. 10. Type "V" disconnecting Switch.



11 図 山家直列コンデンサの耐電圧-時間特性  
Fig. 11. Allowable Voltage-time curve of the series capacitor.

連続許容過負荷	定格電流の 125%
短時間過電流	定格電流の 150% 10 分以内
瞬時過電圧	放電電圧整定値 1 分間

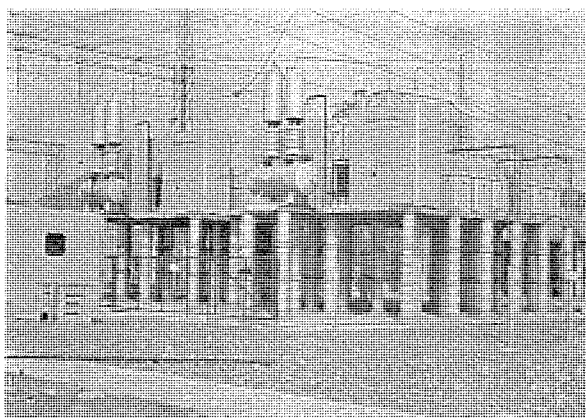
またこの直列コンデンサは特殊紙を使用し 11 図のごとき耐電圧・時間特性を有している。なお図には従来紙の特性も付記した。

#### 4. 直列コンデンサ保護

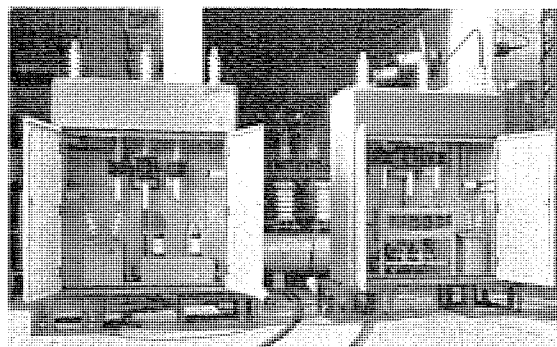
直列コンデンサの保護装置としては 2 つのものから成る。すなわち 1 つは保護間隙で、一定の過電圧において放電し故障電流通過時のコンデンサ端子電圧を抑制してコンデンサをより経済的にするものであり、他は直列コンデンサの短絡用開閉器でコンデンサ内部故障時の保護、連続過負荷にするコンデンサの保護、および遮断器事故などにより長時間間隙の放電が継続したときの間隙の保護に用いられ、また軽負荷時のコンデンサ短絡用としても用いられる。

今回設置の保護装置は、瞬時再挿入型と称される保護方式のもので、これは送電線の事故が発生し、コンデンサ端子に故障電流による過電圧が発生すると瞬時に間隙が放電してコンデンサを短絡保護するのみでなく、故障点が除去され、回路が平常にもどると、その瞬時から半サイクル以内の電流零点通過時に保護間隙は消滅して、過渡安定度上もっともコンデンサの存在を必要とするときにコンデンサを回路に再挿入する装置である。

この方式には、いわゆる空気吹付間隙を用いてある。すなわち空気を保護間隙に吹きつけることによって、故



12 図 山家変電所直列コンデンサ保護装置  
Fig. 12. Series capacitor protective device at Yamae Substation.



13 図 保護装置キュービクル (左、短絡開閉器計器用変圧器変流器、右、パルブリレーパネル計器用変圧器、変流器)  
Fig. 13. Cubicles for potential transformers, current transformers and air valves.

障電流毎サイクルの零点における間隙間の絶縁回復力を適当に選定し、故障電流による過電圧、すなわち間隙放電整定値以上の電圧に対しては、間隙は閃絡するが、故障が除去されたときに起るコンデンサ端子間の過渡電圧においては閃絡しないようにしてある。

いま、これらの配置、動作について説明する。

##### ア. 直列コンデンサ保護装置の配置

本保護装置は、直列コンデンサと同じ絶縁架台上に配置され、瞬時保護および連続過負荷保護の操作はすべて架台上において空気リレー弁によって自動的に行われ、その他の自動および手動操作は操作用配電盤により大地絶縁架台間の空気碍筒を通じて行われる。12 図は山家変電所における保護装置の配置を示す写真で、手前は保護間隙、後方は計器用変圧器・変流器類・空気リレー弁・短絡開閉器の納ったキュービクル (13 図は内部を示す) で、2 個のキュービクルの間にあるのがコンデンサ短絡時の振動を抑制するリアクトルである。

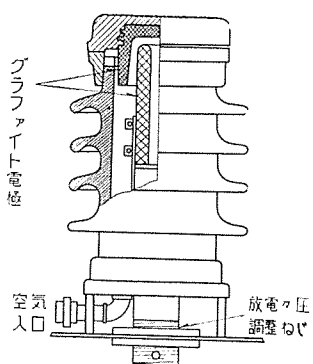
なお、保護間隙の外形および構造を 14 図 (a) (b) に示した。

##### イ. 直列コンデンサ保護装置の接続および動作

15 図は保護装置の接続を示す。

(1) 故障電流によって保護間隙放電整定値以上にコンデンサ端子電圧が上昇すると、間隙は放電し CT





14 図 (b) 保護間隙構造図  
Fig. 14 (b). Basic Construction  
of the air gap.

of the air gap.

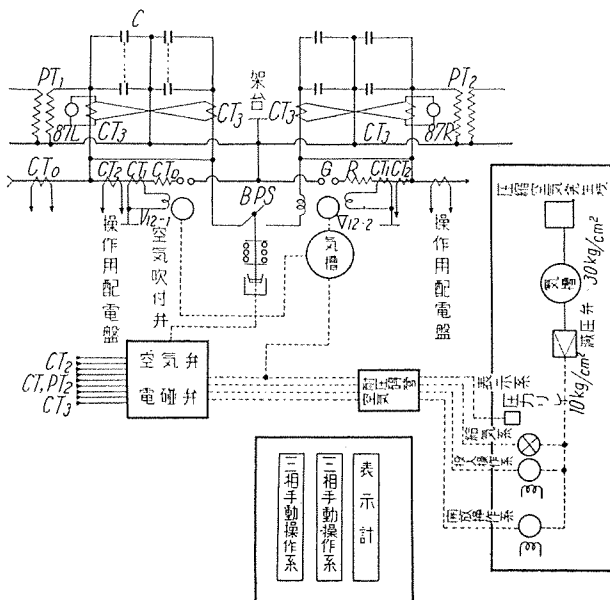


Fig. 15. The Connection diagram of the protection device.

また同時に空気の排気は耐圧碍筒によって大地上に伝えられ、圧力リレーによって制御盤に表示される。

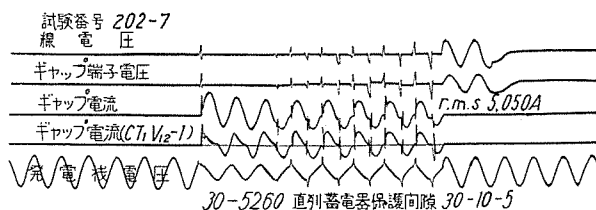


Fig. 16. Oscillogram showing the instantaneous automatic reinsertion of the series capacitor after the fault is isolated.

(4) 制御盤よりの操作の場合は、大地上の電磁制御弁の操作により空気を架台上に送り、空気リレー弁を通じて短絡開閉器の操作を行う。

本保護装置の特長を列記すると次のごときものである。

放電後約2サイクルは消弧作用がなく継電器に安定したインピーダンスを提供し、しかもその後は電流値にかかわらず強い消弧性能を有するのは、他力消弧方式によってのみないうことである。

特殊処理を施したグラファイト製電極を使用しているため表面電極の荒れもなく、機械力に対してもきわめて安全である。また空気吹付によって電弧脚は良く動く構造であるので 5,000 A、約 15 サイクルの放電を十数回行ったが損傷はほとんど問題とならなかった。

電弧脚が良く動きほとんど一様に消耗するので、間隙再調整を要するまでは、5,000 A で数百回と考えられる。したがって年1回の定期点検で再調整を行えば十分である。

保護装置は絶縁架台上にあり、操作はすべて空気によるため、絶縁架台上と大地間とは耐圧空気碍筒を通じるのみであるので、電氣的に絶縁架台、大地間を接続するのに比べ、高圧送電線においては油入 PT, CT 類を節約でき、また短絡開閉器も架台上にあるのできわめて小型にでき、しかも気中断路器型であるので保守容易であり大容量設備としては経済的である。

## V. 現地試験結果

### 1. 試験の目的

中央幹線 110 kV 運転時の潮流制御用直列コンデンサの設置工事は 31 年 2 月完成したので 3 月 3 日より 7 日早朝にわたり現場試験を実施した。

試験に際しては前記潮流制御委員会において行った交流計算盤、模擬送電線等による検討の結果を、実回路で実測値と比較検討した。とくに直列コンデンサを受電端に設置したので、短絡故障時にコンデンサが保護継電器動作に及ぼす影響を重視したのであるが、系統の都合上実系統での短絡試験は中央幹線昇圧 (32 年 1 月の予定) まで延期せざるを得なかったのは遺憾であった。そこで 3.3 kV の模擬系統について短絡試験を行い保護継電器に対する影響を実測した。本試験のおもな確認事項は次のとおりである。

#### (1) 潮流制御装置としての直列コンデンサの機能の検証

直列コンデンサ 15  $\Omega$  挿入によってループ系統の潮流制御はほぼ完遂されている。

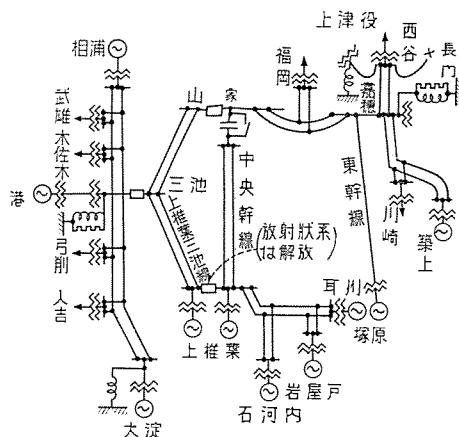
(2) 負荷状態における直列コンデンサの投入、短絡コンデンサ挿入時コンデンサ端子最高電圧は 2.16 倍でループ系統と放射状系統との相違は明らかではないが常時のコンデンサ開閉による放電ギャップの動作は考えられない。またループ系統においては電力の動揺はほとんどない。

(3) 直列コンデンサ補償が消弧線輪補償系統に及ぼす影響

事前検討の結果予想されたように直列コンデンサ設置は系統運営になんらの支障も与えなかった。

(4) 異常現象発生の有無  
異常現象発生懸念はない。

(5) 保護継電器に及ぼす影響



17 図 試験系統図 (九州 60 c/s 営業系統)

Fig. 17. Single-line diagram of the power system under tests.

### 2. 試験系統

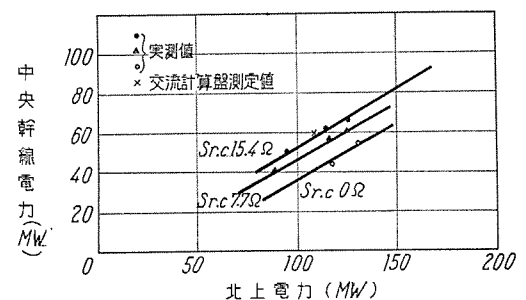
本試験実施時の系統図は 17 図のとおりで九州 60 サイクル営業系統そのままである。なお放射状系統試験は上椎葉発電所 110 kV 連絡母線で切り分けた。消弧線輪は大淀・三池・嘉穂・西谷・上津谷の 5 ヵ所に設置され、三池・嘉穂には併列抵抗を常時挿入使用している。

### 3. 潮流制御装置としての直列コンデンサ機能の検証

試験は配電盤計器による測定を主体に上椎原・三池・山家および嘉穂 4 地点にて実施した。

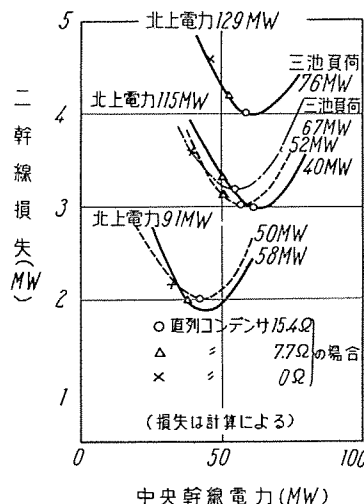
実測結果によるとループ系統の損失は直列コンデンサ 15.4  $\Omega$  にてほぼ最少となり 7.7  $\Omega$  ではその効果が 15.4  $\Omega$  の場合に比し 2/3 以下に減少する。三池・嘉穂の負荷分布に変化があってもコンデンサ設備は 15.4  $\Omega$  一定で差支えないことも確認された。ループ系統の電圧、無効電力の分布と調相容量との関係については明確な解答は得られなかったが、一応現在の調相設備で妥当と考えられる。18 図は各直列コンデンサオーム数に対する全北上電力と中央幹線電力との関係を示したもので、実測値と交流計算盤による算定値を示しており、両者はほぼ一致している。

19 図は北上電力を一定に押え、その各線への配分を変化した場合の全電力損失算定値を示したもので、損失は



18 図 北上電力と中央幹線電力の関係図

Fig. 18. Relation between total power and center transmission line power.



19 図 中央幹線電力と 2 幹線損失の関係図

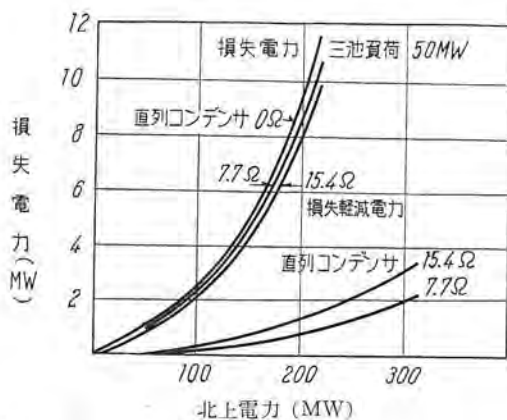
Fig. 19. Relation between the total loss and the center transmission line power.

6 表 直列コンデンサ短絡および挿入時の直列コンデンサ端子電圧その他

項 目	系 統	試 番	直 蓄 オ ー ム	操 作	直蓄端子電圧 (V <sub>c</sub> )…B. O. G. による測定値								直蓄 定格電 圧	直蓄電 壓 (V <sub>c0</sub> ) V		中央幹 線電 壓 (V <sub>0</sub> ) V	
					白 相				赤 相		青 相			定 態 値	過 渡 値	定 態 値	過 渡 値
					定 態 値	過 電 圧	過 電 圧/ 定態 値	過 電 圧/ 定格 電圧	定 態 値	過 電 圧	定 態 値	過 電 圧					
平 衡	放 射 状	B-3-2	7.7	off in	O. G. Miss.				7,500	12,500	7,500	12,500	7,000 "	264 275	735 1,055	1,900 1,920	3,280 7,050
		B-3-6	15.4	off in	15,000 12,500	0 27,000	— 2.16	— 1.93	15,000 12,500	0 18,700	15,000 12,500	0 20,400	14,000 "	285 315	1,174 1,145	1,880 1,910	8,110 7,040
	ル ー プ	C-3-3	7.7	off in	3,750 3,750	0 6,250	— 1.66	— 0.89	3,750 3,750	0 5,000	3,750 3,750	0 5,000	7,000 "	458 400	637 700	1,880 1,800	2,890 3,300
		C-3-6	15.4	off in	8,750 8,750	0 17,500	— 2.0	— 1.25	8,750 8,750	0 15,000	8,750 "	0 15,000	14,400 14,000	O.G. Miss. O.G. Miss.		1,985 1,900	3,970 4,020
不 平 衡	放 射 状	B-4-2	7.7	off in	O. G. Miss.								7,000 14,000	294 292	424 830	1,930 1,930	4,330 7,220
		B-4-5	15.4	off in	10,000	—	—	—	10,000	—	10,000	—					
	ル ー プ	C-4-1	7.7	off in	3,750	—	—	—	3,750	—	3,750	—	7,000 14,000	O.G. Miss. O.G. Miss.		1,840 1,870	1,920 6,430
		C-4-5	15.4	off in	9,250	—	—	—	9,250	—	9,250	—					

計算により求めたものであるが直列コンデンサ 15.4  $\Omega$  にて損失はほぼ最少となっていることがわかる。このデータを基礎にしてさらに北上電力を増加した場合の損失を算定した結果は直列コンデンサ 15.4  $\Omega$  挿入で満足しうることを示し、かつ 7.7  $\Omega$  コンデンサ挿入時は 15.4  $\Omega$  の場合に比較し、損失軽減効果は 2/3 以下に減少することがわかった。

三池・嘉穂の負荷分布が変化した場合の潮流分布ひいては電力損失軽減に及ぼす影響については試験時の負荷変化の幅が小さく、量的な検討はできなかったが、負荷分布変化によるループ内送電損失の変化は小さく、したがって損失最小の条件を満足するためには直列コンデンサオーム数を可変とせずとも固定オーム数で十分なことが確認された。また北上電力と Regulation との関係については、直列コンデンサ挿入による山家里側電圧の上昇はループ系統で 0.5~1.5 kV 放射状系統では 20~40 kV 程度で、この場合の電圧無効電力の潮流図より調相設備配分もほとんど現在のもので満足されると判断される。

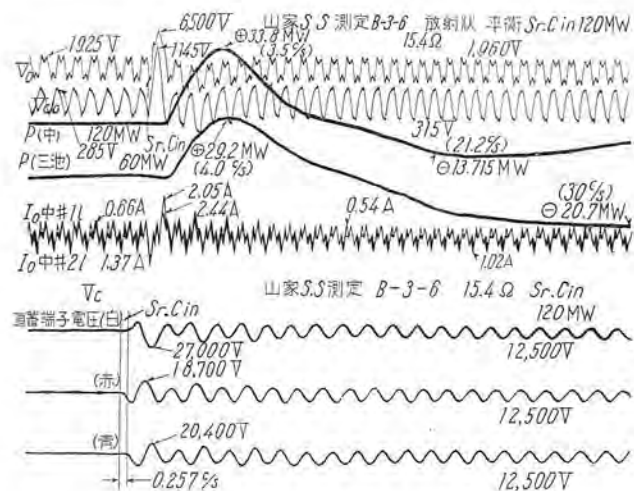


20 図 北上電力と損失電力および損失軽減電力の関係  
Fig. 20. The effect of the series capacitor on the transmission loss.

#### 4. 負荷状態における直列コンデンサ短絡および挿入

直列コンデンサ挿入時のコンデンサ端子電圧上昇は過渡時最大値が、定態値電圧との比率において最高 2.16 倍、定格端子電圧との比率において最高 2.14 倍であった。

放射状系統とループ系における差異は明確ではない。現在保護間隔は 2.5 倍に整定されているが、今回の実測よりみて常時の直列コンデンサ開閉操作に伴う保護間隔放電の懸念はない。またこの際の電力動揺について見ると放射状系統では直列コンデンサ投入時は約 3.5~3.9 サイクル後最大振幅となり 26~31 サイクル後最少振幅となって爾後減衰電力動揺を数周期繰返して安定する。短絡の場合は 5.6~6.5 サイクル後最少振幅となる。ループ系では直列コンデンサ挿入時約 5 サイクルで最大振幅となり短絡時は 6.8 サイクルで最少振幅となって、



21 図 放射状系統直列コンデンサ 15.4 オーム (負荷 120 MW)  
Fig. 21. Oscillogram showing the power swing on the radial system.



いずれの場合にも 9~12 サイクル後安定する。過渡電力と定態電力との比はループ系統の方がやや大きい、ループ系統では最初の変化だけで、その後の電力動揺はほとんどないことが確められた。

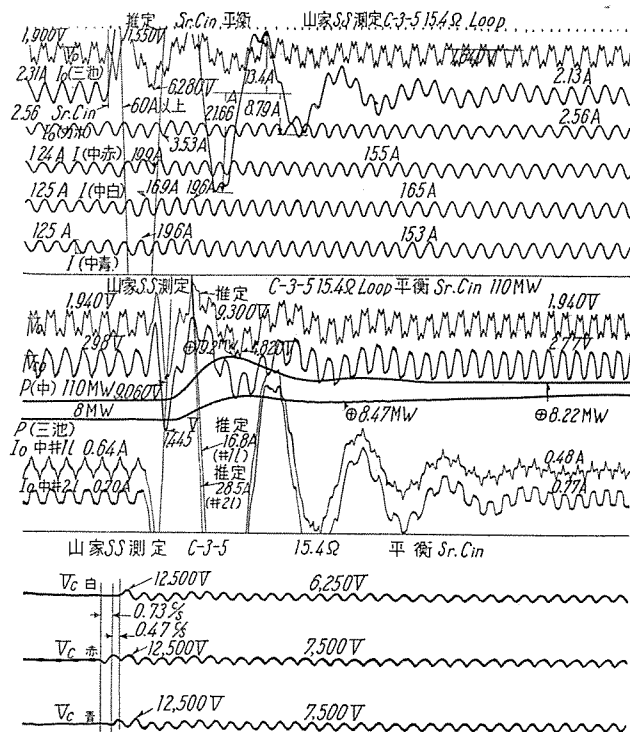
## 5. 無負荷変圧器の投入

直列コンデンサ補償系統に無負荷変圧器を投入する際、コンデンサのオーム数いかによっては持続分数調波振動を発生することがある。しかし系統が負荷を有している場合には、他の無負荷変圧器を投入しても持続振動が発生する可能性はほとんどない。今回の実測においても福岡にある変圧器を無負荷にて投入したが三池・嘉穂の負荷は接続されたままなので異常現象発生の可能性はほとんどなかった訳であるが、爾後の系統運用の資料として実施したもので結果は予期どおり異常を認めなかった。

## 6. 消弧線輪補償系統への影響

消弧線輪補償系統に直列コンデンサを挿入した場合、消弧線輪タップにはほとんど影響なく、共振条件を満足しうることはすでに報告されているが、今回の直列共振および消弧試験の結果よりもこれが確認された。

直列コンデンサの挿入時あるいは短絡時に開閉器の非同時性により直列コンデンサ端子に発生する零相電圧は、消弧線輪補償系統では直列共振を生じ中性点電圧の上昇が懸念される。消弧線輪に並列に抵抗を常時挿入しておけば上記の懸念は防止しうる。今回の実測で得られ



22 図 ループ系統直列コンデンサ 15.4 オーム挿入  
Fig. 22. Oscillogram showing the power swing on the loop system.

た最高電圧は放射状系統で 10.64 kV ループ系で 11.55 kV 不平衡短絡の場合 7 kV であった。これらの数値は直列コンデンサ負荷の増大に伴って多少の上昇が考えられるが、現在並列抵抗が直列コンデンサ操作によって解放されることはまず考えられないので、中性点の電圧上昇は今回の試験実測値を多少上まわる程度に過ぎないと考えられる。

## 7. 系統継電器動作

### ア. 1 相弧光接地時の搬送系に対する雑音

試験に当ってはブラウン管オシロにより山家および上椎葉で試作の位相比較継電器および既設方向比較継電器の両者を接続し、1 相地絡時の搬送系に対する雑音の影響を調べたが、その結果は次のごとくである。

- (1) 事故瞬時および遮断器動作時以外は一般に雑音は小さい。
- (2) 他相地絡では区間故障と区間外故障とで雑音レベルの大きさに大差はない。
- (3) 地絡事故瞬時に 240~450 kc の広帯域で最高 40 db, 246±0.5 kc の狭帯域で最高 10 db 程度の雑音が認められた。
- (4) 遮断器動作時には 240~450 kc の広帯域で最高 32 db, 246±0.5 kc の狭帯域で最高 10 db 程度の雑音を発生した。
- (5) 消弧線輪補償のみの場合とこれに並列抵抗が挿入された場合とでは後者の方が雑音が小さい。
- (6) 伝送回路相の地絡は測定しなかったが、相当大きな雑音発生の可能性を考えられる。

### イ. 1 相弧光接地時の三菱電機製位相比較搬送継電器の動作

試作により試験に供された位相比較搬送継電器は 1 線地絡試験中内部事故 2 回、外部事故 1 回に対してはオシログラフおよび監視により、また内部事故 1 回に対しては実際に回路遮断を行わせてその動作をみたが、その結果はいずれも正動作が確認された。

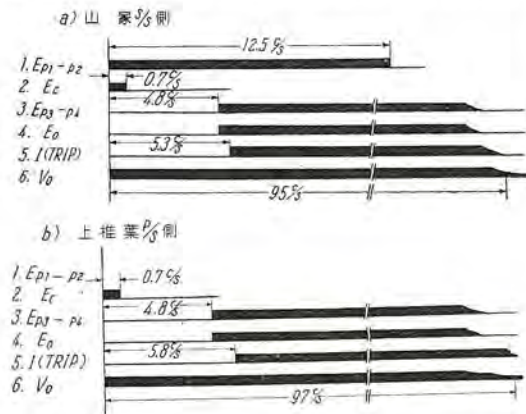
すなわち、継電器の動作状況は 23 図に示すごとくで立門における内部故障時には山家・上椎葉両端の継電器とも内部故障を判定し、動作力 X により故障後 5~6 サイクルにてトリップ回路を形成している。上椎葉における外部故障時には山家側継電器は内部故障とみて X が動作するが、これに先だち上椎葉側には外部故障と判断し Y が動作して抑制搬送波を送出してトリップ回路の形式を阻止している。

なお、故障除去時においても X の瞬時復帰、Y の緩動復帰の接点協調が満足され、故障の発生、除去のいずれにおいても誤動作のないことが確認された。

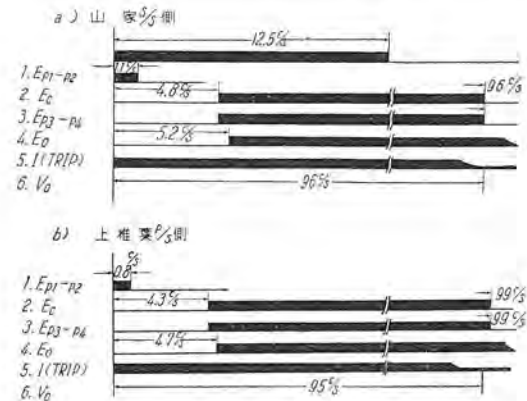
### ウ. 山家距離継電器の短絡模擬試験

試験回路は 24 図のように構成し、3.3 kV を電源として直列コンデンサの両端に設置した。モー型継電器とブイランダーリレーについて試験を行った。故障は山家の

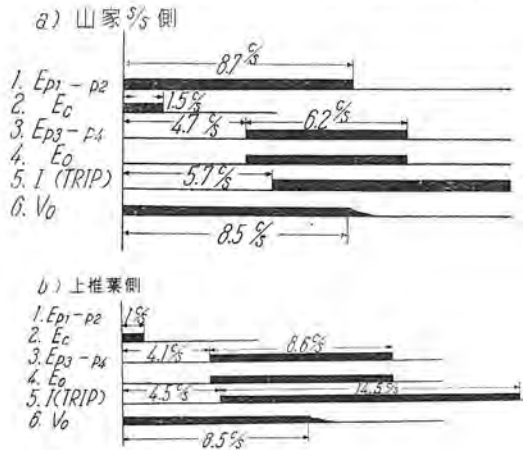
第1回 内部接地故障 (a) 立門 東芝リレーにてトリップ



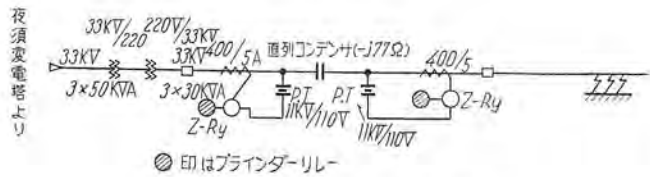
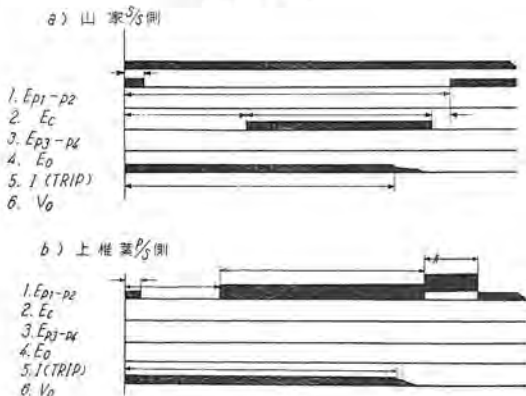
第2回 内部接地故障 (a) 立門 東芝リレーにてトリップ



第3回 内部接地故障 (a) 立門 三菱 HKB にてトリップ



外部接地故障



24 図 試験回路図  
Fig. 24. Test circuit diagram.

木佐木線出口, 中央幹線出口, および山家より 10 km の中央幹線の 3 地点での金属短絡によったがモーター型継電器の特性が確認された外, ブラインダーリレーは構造的に改造すべき点もあり, 測定に明確を欠いたので今後の問題として残された。

## VI. むすび

以上九州電力主幹線の電力潮流制御の目的をもって山家変電所に設置したわが国最初の 220 kV 直列コンデンサについて記述したが, (1) 本直列コンデンサの設置によりループ系潮流制御の所期の目的が達せられたが, この設備が本来の機能を発揮するのは 32 年 4 月の 220 kV 昇圧後のことで, 昇圧後の本試験によりさらに有用性が実証されよう。(2) 31 年 3 月実施の 110 kV 現場試験の結果, 当初の予備計算および検討結果どおりの満足な機能を発揮すると共に特殊現象ないし支障の生起もなかった。なお実系統の短絡試験は延期し, 代りに模擬短絡試験を行ったため保護間隙の動作特性, 間隙放電に伴う諸現象などの実測はでき兼ねたが, 前者は工場試験により, また放電時の雑音等を除いたその他の現象は模擬送電線, 交流計算機で, 十分検討済である。(3) とくに直列コンデンサ挿入による系統保護継電器は最も苦心した問題であるが, 220 kV 昇圧時には抜本的措置として, 位相比較継電器を採用することにより, 解決されることも確認した。(4) 220 kV 昇圧後の潮流制御の方法としては, 直列コンデンサと移相変圧器とを併用する方式を推進中である。直列コンデンサ補償方式が送電線とくに 275 kV さらに進んで 380 kV といった超高压送電線の設計要素の 1 つとして考えられるに至った現在, 本設備の完成はそれらの応用の試金石の 1 つとして自信を深め今後の発展を望みかつ期待するものである。

最後に本設備を計画実現し, 試験するに至るまでには九州電力株式会社内に潮流制御委員会を設置し, 2 年有余にわたり九州電力電気試験所・電力中央研究所・日新電機・東京芝浦電気・三菱電機の関係諸氏多数の絶大な協力を得て, 初めて今回の実現を見たものである。ここに関係各位に深謝する次第である。

1.  $E_{p1-p2}$  三菱 HKB リレー出力 (正相フィルタ出力)
2.  $E_c$  キャリヤ制御部出力 (これにより抑制搬送波が送り出される)
3.  $E_{p3-p4}$  キャリヤ制御部入力 (これによりトリップリレー R を動作させる)
4.  $E_0$  動作力
5.  $I (TRIP)$  トリップ電流
6.  $V_0$  零相電圧

23 図 継電器動作状況  
Fig. 23. Operation diagram of Mitsubishi "HKB" phase comparison relay.



# 電気機器絶縁コロナの試験

研究所 原 仁 吾\*

## Corona Tests on Insulation of Electric Machines

Engineering Laboratory

Jingo HARA

Corona tests on the insulation of electric machines have been conducted for a long time. With the advancement in the method of measurement, however, better results have come to be available to permit the judgement of the internal conditions of the insulation in more accurate ways. This can be applied to the quality control at the factory and maintenance tests in the field. This article gives description on the mechanism of corona discharge and methods of corona measurement with a few actual results and also future outlook on this subject.

### 1. ま え が き

電気機器の絶縁物中にボイドが存在し、これに高電圧が印加されるとボイド中の気体は放電を起す。このボイド放電は、本来気体の放電現象の1つとして称えられているコロナ放電とは、本質的には多少違っているが、普通にはボイド放電も含めてコロナと総称していることが多い。絶縁物中のボイド放電は、それにとまって生ずるオゾンによる酸化作用、電子衝撃作用および熱作用などによって、絶縁物を物理的・化学的に変質劣化させ、ついには絶縁破壊の原因となることはよく知られている<sup>(1)(2)(3)</sup>。電気機器のコロナ測定は古くから行われてきたが、最近絶縁破壊の前駆現象としての理論的研究、および絶縁劣化程度の診断試験の1つとして、とくに関心がもたれ、その測定法もいちじるしく進歩してきた。このコロナ測定はまた、工場における製品の品質管理や、絶縁構造の改善、研究のためにも役立つ有効な方法で、当社においてもすでに工場において使用されているが、絶縁物中のボイド放電の基礎的性質、コロナ放電の測定法、およびこれらに関する最近の海外の情勢などについて紹介し、あわせて2, 3の実験結果について報告する。

### 2. ボイド放電の基礎的性質

ボイド放電の機構についてはWhitehead<sup>(4)</sup>, Mason<sup>(1)</sup>らが比較的理論的に解明し、その後多くの人々によって考察が加えられているが<sup>(5)(6)(7)</sup>、絶縁物中のボイド放電はガラスオゾナイザの放電機構とよく類似しており、またボイドを人工的に模擬した薄板試料についての実験結果は、これらの理論と比較的よく一致することも報告されている<sup>(7)</sup>。しかし、なお究明すべき幾多の問題が残っており、また以下に述べる測定法や測定結果の解析に際しては、ボイド放電の性質について基礎知識を必要とすることが多いので、すでに公表されていることが多いが、これについてまず説明する。

いま1図のようにボイドを有する絶縁物に $v$ なる電圧を印加した場合を考える。ここで

$C_s$  = ボイドと直列にある絶縁物の静電容量

$C_0$  = ボイドの静電容量

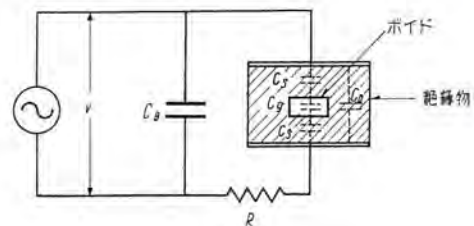
$C_B$  = ボイドのない部分の絶縁物の静電容量

$C_B$  = 電源と並列にある容量

$R$  = 観測用抵抗

とする。ボイド放電の特質は、ボイドと直列に絶縁物の層があることで、ボイド放電によって移動した電荷は、放電路と直列にある絶縁物上に蓄積されて放電はすぐやみ、この蓄積電荷が、漏洩あるいは電源電圧の変動などによって変化しないかぎり、引き続いて放電は起らない。直流ではボイド放電があまり問題にならないのはこのためであるが、交流では印加電圧がたえず変化しているから、1サイクル中に何回も放電が起る。そこで以下交流のばあいについて考える。

いま、1図で印加電圧 $v$ が次第におおきくなって、ボイドの両端にかかる電圧 $v_0$ が、その放電開始電圧 $V_i$ になるとボイドは放電する。ここで $V_i$ のおおきさは、金属電極間にはさまれた気体の放電電圧とほぼ同じで、ボイドの深さと、その部分の気圧とに関するPaschenの法則によってあらわされる値と、ほとんど一致することがたしかめられている<sup>(8)</sup>。ボイドが放電すると同時に電荷はボイドと直列にある絶縁上に蓄積され、 $v_0$ はその放

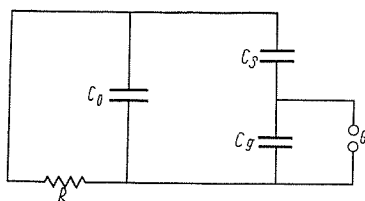


1図 絶縁物中のボイド放電の測定

Fig. 1. Measurement circuit of void discharge in insulation.

\* 電気第1研究室





2 図  
ボイド放電の等価回路  
Fig. 2.  
Equivalent circuit  
of void discharge.

電の維持電圧  $V_{g0}$  にまで下って放電はやむ。すなわちボイドの両端には  $\Delta V = V_i - V_{g0}$  なる急峻なキックが生ずる。このようなときの等価回路は 2 図であらわすことができ、ボイドパルスの観測用抵抗  $R$  の両端には (1) 式で示す  $\delta v$  なる電圧があらわれる。(1) 式では実際の絶縁物の状態を考慮して、 $C_0 \gg C_g \gg C_s$  とした。

$$\delta v \doteq \frac{C_s}{C_0} \cdot \Delta V \cdot \exp \left[ -\frac{t}{C_0 R} \right] \dots \dots \dots (1)$$

ただし  $\Delta V = V_i - V_{g0}$

すなわち  $R$  両端で観測するボイドパルスの高さは、 $C_0$  と  $C_s$  に反比例してあらわれ、かつ  $\Delta V$  に比例する。 $\Delta V$  はボイドの寸法によりきまり、ボイドの深さに比例しておおきくなる。また波尾は  $C_0 R$  によって決定され、 $R$  の値によって変化する。ボイドが放電するときのキックの波頭は、普通  $10^{-7}$  ないし  $10^{-8}$  秒程度であるといわれている<sup>(4)</sup>。

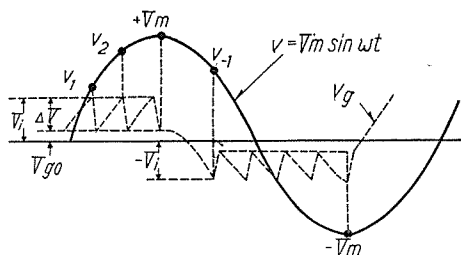
つぎに交流 1 サイクル中に生ずるボイドパルスの数を求めてみる。3 図は交流を印加したときのボイド放電の説明図である。いま印加電圧  $v$  が上昇して第 1 回目にボイドの電圧  $v_g$  がその放電開始電圧  $V_i$  になればボイド放電が起る。このときの印加端子電圧  $v_1$  は

$$v_1 = \frac{C_g + C_s}{C_s} \cdot V_i \dots \dots \dots (2)$$

であたえられる。放電が起ると  $v_g$  は  $V_{g0}$  まで下り放電はやむ。つぎに端子電圧が上ってボイドの電圧を  $\Delta V = V_i - V_{g0}$  だけ上昇せしめれば、再びボイドは放電々々  $V_i$  になって第 2 回目の放電が起る。このときの端子電圧を  $v_2$  とすると、上述のことから

$$v_2 - v_1 = \frac{C_g + C_s}{C_s} \cdot \Delta V \dots \dots \dots (3)$$

以後  $v$  の最大値  $V_m$  まで端子電圧が  $\frac{C_g + C_s}{C_s} \cdot \Delta V$  だけ変化するとボイド放電が起る。 $V_m$  を過ぎると印加端子電圧は下るから放電はやむ。ついで  $v_g$  の極性は反転して逆方向に放電が始まるが、このときの印加端子電



3 図 交流印加時のボイド放電の説明  
Fig. 3. Schematic representation of void  
discharges with A-C applied.

圧  $v_{-1}$  は次のようにして求まる。いま  $+V_m$  で放電が休止したとすると、その瞬間  $C_s$  および  $C_g$  には、それぞれ  $V_m - V_{g0}$  および  $V_{g0}$  の電圧が加わっている。端子電圧が減っていくと  $C_s$ ,  $C_g$  上には外部から電荷  $q = \int i dt$  が流れ込んで

$$v_g = V_{g0} + \frac{q}{C_g} = -V_i \dots \dots \dots (4)$$

になると逆方向の放電が起る。すなわちこの間に  $v_g$  は  $V_{g0} + V_i$  だけ変化するが、この変化に相当する印加端子電圧の変化は  $\frac{C_g + C_s}{C_s} \cdot (V_{g0} + V_i)$  である。したがって

$$v_{-1} = V_m - \frac{C_g + C_s}{C_s} (V_{g0} + V_i) \dots \dots \dots (5)$$

となる。

ボイド放電のし始めと、し終りの印加端子電圧の差は、 $(v_{-1} + V_m)$  であり、また端子電圧が  $\Delta V \cdot (C_s + C_g) / C_s$  変化するごとに、ボイド放電は 1 回起るから、1 サイクル中に起るボイドパルスの数  $n$  は、

$$n = 2 \left\{ \frac{v_{-1} + V_m}{\Delta V \cdot \frac{C_g + C_s}{C_s}} \right\} \\ n \doteq \frac{4}{\Delta V} \left\{ V_m \frac{C_s}{C_g + C_s} - \left( V_i - \frac{\Delta V}{2} \right) \right\} \dots \dots \dots (6)$$

であらわされる。すなわち 1 サイクル中のパルス数  $n$  は、印加電圧の波高値  $V_m$  とともに直線的に増加し、その増加の傾斜は  $\Delta V$  に反比例する。

つぎにボイド放電により費されるエネルギーを考えて見る。 $C_0 \gg C_g \gg C_s$  とすると放電によりボイド中を運ばれる電荷  $q$  は、

$$q \doteq C_g \cdot \Delta V \dots \dots \dots (7)$$

1 回の放電により失われるエネルギー損失  $w_0$  は

$$w_0 \doteq C_g \Delta V \left( V_i - \frac{\Delta V}{2} \right) \dots \dots \dots (8)$$

1 サイクル中のエネルギー損失  $W_0$  は

$$W_0 = n \cdot w_0 \\ \doteq 4 C_s \left( V_i - \frac{\Delta V}{2} \right) \left\{ V_m - \frac{C_g}{C_s} \left( V_i - \frac{\Delta V}{2} \right) \right\} \dots \dots \dots (9)$$

したがって毎秒の損失は、 $f$  を周波数とすると、

$$W = 4 f \cdot C_s \cdot \left( V_i - \frac{\Delta V}{2} \right) \left\{ V_m - \frac{C_g}{C_s} \left( V_i - \frac{\Delta V}{2} \right) \right\} \dots \dots (10)$$

となる。すなわちボイド放電による損失は印加電圧とともに直線的に増加し、また周波数に比例する。

以上述べたボイド放電の基礎的性質の解説は、理想的なばあいであり、実際の絶縁物のばあい幾分修正が必要である。とくにボイドの表面漏洩抵抗や、絶縁物の体積漏洩抵抗などを考慮すると、問題はさらに複雑になる。普通ボイド放電が起ると、放電により生じた NO ガスが、ボイド表面の吸湿層に吸収されて、 $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HNO}_2$  などの導電性皮膜を形成するため、ボイド表面の漏洩抵抗の低下や、ボイドと直列にある絶縁物の局部的劣化による体積漏洩抵抗の減少が起り、実際にはこれらを考慮する必要があることが多い。一般にこれらの漏洩抵抗が放電

におよぼす影響を簡単に説明すると<sup>(6)</sup>、まずボイドと直列にある絶縁物の体積漏洩抵抗が減少すれば、ボイドにかかる電圧分布が増加し、その結果放電開始電圧が低下し、同じ印加電圧でも放電によるエネルギー損失は増加する。つぎにボイドの表面漏洩抵抗が低下すると、(1)ボイド放電後、表面の残留電荷が漏洩するため、ボイド電圧の回復が早くなり、放電回数が増加する。(2)外部電圧が最大値になったとき放電が休止するが、漏洩のために表面電荷の逆電界が減衰し、逆極性放電の開始がおくれる。すなわち放電発生有位相範囲がせまくなる。(3)エネルギー損失は減少する。

### 3. コロナの検出

電気機器に発生するコロナは、これに伴って生ずる音を聞いたり、光を目で見たり、また回路内に適当な検出素子を接続して、コロナパルスを経電的方法によって測定する。適当な装置を用いるとコロナ発生箇所を検出することができる。また  $\tan \delta$  や直流分の測定からも、コロナを検出することができる。

#### ア. 耳で聞く法

コロナ音を直接耳で聞く方法で、乾式絶縁機器に応用できるが、正確は期しえない。医者用の聴診器のようなものを用い、先端の集音部をコロナ発生箇所付近に近づけ、人体に危険のないように工夫すれば、コロナ発生箇所を検出することができる。いずれにしても定量的な測定は困難である。

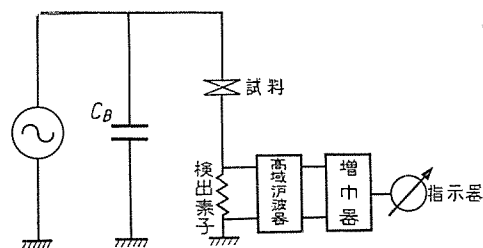
#### イ. 目で見える法

周囲を暗くしておきコロナ発生に伴う光を直接目で見する方法で、簡単であるが定量的測定はできない。

#### ウ. 電氣的方法

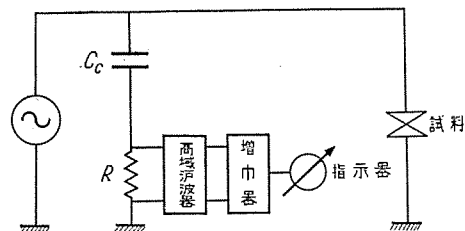
測定回路内に適当な検出素子を接続してコロナパルスを検出し、その出力を高域濾波器を経て増幅した後、適当な指示器を有する測定器で測定するもので、もっとも一般的に用いられている方法である。基本的な測定回路の2,3について説明する。

4図の回路は両端子非接地の試料の測定に用いる。側路コンデンサ  $C_B$  は試料中に生じたコロナ電流の帰路となり、また電源側のコロナの電流の側路となるので、このインピーダンスが試料のインピーダンスにくらべて十分小さいときは、電源変圧器中のコロナを分離することができる。1端接地された試料では、5図のように検出素子抵抗  $R$  を結合コンデンサ  $C_c$  の接地側に接続するが、このばあい電源変圧器中にコロナが発生すれば、試料のコロナと分離できないので、このようなときは、6図のように低域濾波器を接続することによって、電源側のコロナを分離することができる。以上の方法はいずれも試料への高圧リード線や接続端子からは、必要な試験電圧までコロナを発生しないことが必要である。検出素子として  $L$  または  $L, C$  の共振回路を用いることもあるが、定量的測定には周波数特性のない抵抗を用いるこ



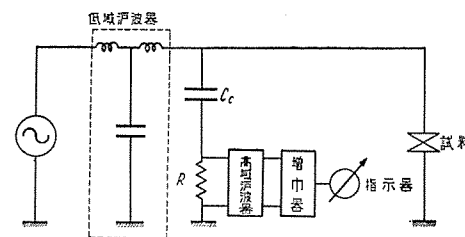
4 図 非接地試料の測定回路

Fig. 4. Measurement circuit for ungrounded sample.



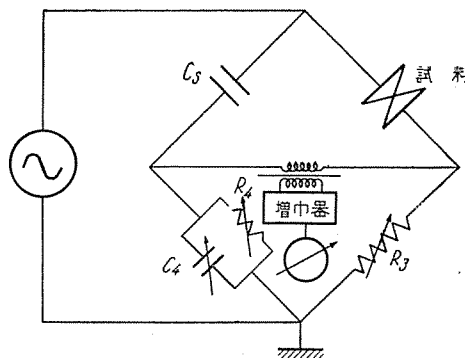
5 図 1 端接地試料の測定回路

Fig. 5. Measurement circuit for grounded sample.



6 図 低域濾波器を用いた測定回路

Fig. 6. Measurement circuit using low pass filter.



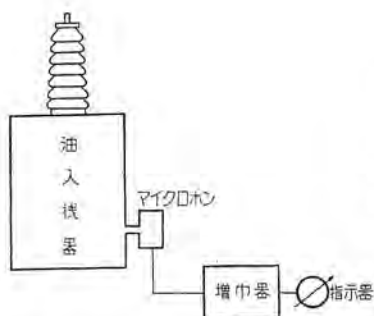
7 図 ブリッジ回路による検出

Fig. 7. Schering bridge detector.

とが多い。7図の回路はコロナを発生しない標準コンデンサ  $C_1$  を用い、試料および  $R_3, R_4, C_4$  でブリッジを構成し、あらかじめブリッジ辺を調整して、印加周波数に対しブリッジを平衡させておき、試料のコロナによる高周波不平衡電流を検出する方法で、検出感度は高いが、シェリングブリッジと共用するとき以外は、一般には用いられていない。

#### エ. 超音波マイクロホンによる方法

上述の方法は試料の高圧側リード線、およびその他の外部回路からコロナを発生しないようにする必要があるため、高圧油浸機器のように試験電圧が高くなるものは、一般に試験が難しくなる。数 10 kV までの套管やコ



8 図 マイクロホンによる油中コロナの検出  
Fig. 8. Microphone method for detection of corona in oil.

ンデンサについては、4 図ないし 6 図の方法で試験が行われているが<sup>(10)(11)</sup>、試験電圧が 100 kV 程度になると、リード線の直径を大きくしたり、端子部に特殊の注意をはらっても実際には外部コロナをなくすることはできない。このようなとき、外部コロナと試料からの油中コロナを区別する方法として、高圧リード線に大きな直径の導線の代りに、直径 40 ミル程度の細い導線を用い、また端子部のドームに針状の構造物を放射状にとりつけ、これらから生ずる負の空間電荷が、強度の強い正のコロナストリーマの発生を妨げる特性を応用して、強い強度の外部コロナを低減し、指示器のブラウン管上の波形から油中コロナと外部コロナを簡単に区別できることが報告されている<sup>(12)</sup>。しかしながらこれらの方法にくらべ、超音波マイクロホンによる方法は、油中のコロナ音だけを検出できるので、外部コロナに悩まされることが全くない。すなわち、8 図のように変圧器や遮断器の排油弁にマイクロホンを取りつけ、油中コロナにともなって生ずる超音波を検出するもので、油中では超音波はほとんど減衰せず、また気中音は油中にほとんど侵入しないから、油中コロナだけを安定に検出することができる。この方法によるコロナ試験については数年前すでに発表した<sup>(13)</sup>、最近油中に 2 個あるいはそれ以上のマイクロホンを沈めてコロナを検出すると同時に、コロナ発生箇所から各マイクロホンまでの超音波の伝播時間を、高速度ブラウン管オシロで測定し、コロナ発生箇所を検出していることが報告されている<sup>(14)</sup>。

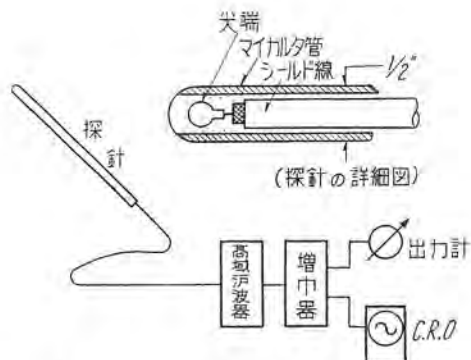
#### オ. 探針法によるコロナ発生箇所の検出

回転機のような乾式絶縁機器では、9 図に示すような探針を用いてコロナ発生箇所を検出することができる<sup>(15)</sup>。すなわち供試機にある必要な電圧に充電しておき、探針の先端を供試機の絶縁物表面に沿って探索すれば、探針をコロナ発生の局所に近づけたときのみ指示器は動作し、コロナ発生点を検出できる。この方法はコロナ発生量の絶対量の測定は不可能であるが、発生箇所を検出すると同時に、同種類の試料では各発生箇所におけるコロナ強度を相対的に比較することができる。

#### カ. $\tan \delta$ 法および直流分法

直接コロナを検出する方法ではないが、 $\tan \delta$  や直流分の測定からもコロナを検出することができる。

印加電圧を次第に上昇させながら  $\tan \delta$  を測定すると、絶縁物中にボイド放電が起れば  $\tan \delta$  が急増するので、



9 図 探針法によるコロナ発生点の検出  
Fig. 9. Probe method for locating ionization.

$\tan \delta$  の電圧特性からコロナを判定することができ、古くから行われている方法である。絶縁物中のボイドを模した模型実験では、ボイド放電の開始電圧、電圧対  $\tan \delta$  特性などが理論値とよく一致することが報告されている<sup>(16)</sup>。

またコロナ放電や非対称電極間の放電には、極性効果があり、整流作用があるので、コロナ放電が起ると直流分があらわれる<sup>(17)(18)</sup>。したがって直流分の電圧特性を測定するとき、絶縁物中にボイド放電が起れば直流分は急変する。直流分の急変点からボイドの放電開始電圧を知ることができる。

## 4. 測定器

前節に述べたようにコロナの検出にはいろいろの方法があり、したがって測定器も検出法によってそれぞれ異なるが、一般には共通したところが多い。ここでは最も一般的に用いられている前節ウに述べた、電気的検出法に用いられている測定器について述べる。

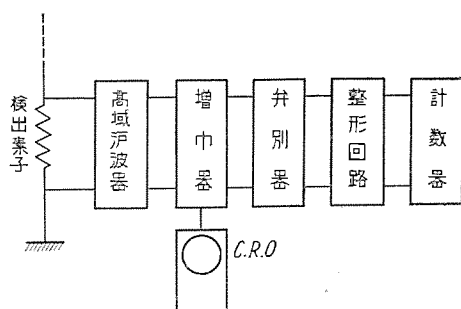
4 図ないし 6 図に示すとおり、検出素子抵抗  $R$  の両端の出力を、高域濾波器を通して電源周波数を遮断した後、コロナ分だけを増幅し、適当な指示器によってその量を測定するか、あるいは直接  $R$  の両端に Radionoisemeter を接続して、コロナを測定する方法が一般に用いられる。

高域濾波器は試験電圧の基本波およびその高調波を遮断するために用い、遮断周波数は普通 1 ないし 10 kc に選ばれる。増幅器はコロナパルスを比較的忠実に増幅するため、1 kc ないし 1 Mc の範囲で特性の平坦なものが必要であり、その増幅率は指示器の必要度によっても異なるが、普通 60 db ないし 70 db 程度のものが用いられている。指示器にはいろいろあるが、現在広く用いられている方法は次のとおりである。

#### ア. ブラウン管オシログラフ法

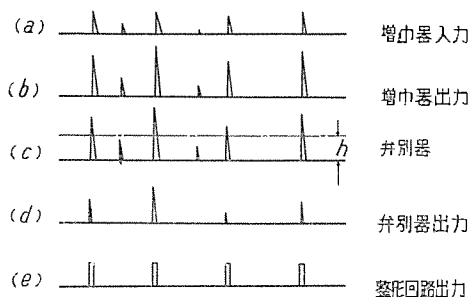
コロナパルスの大きさ、発生位相などをブラウン管オシロで観察するもので、個々のパルス波形の観測には、高速度単掃引オシログラフを用いるが、繰返しブラウン管オシロを用いて、コロナの大きさや数などの状態を観察することが多い。印加電圧に対するコロナ発生位相幅の大きさを測定することも提案されている<sup>(19)</sup>。





10 図 計数法の概略図

Fig. 10. Schematic diagram of counter method.



11 図 各段における波形の説明

Fig. 11. Schematic representation of wave form at each step.

#### イ. 電圧計法

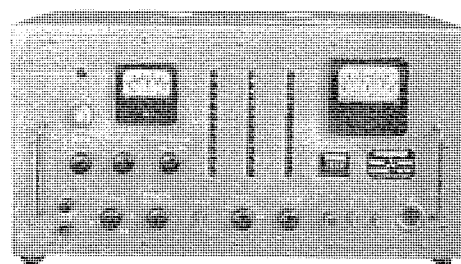
増幅器出力を2極管で整流し、これを高入力インピーダンスの電圧計で測定するもので、パルス電圧の大きさと数の積、すなわち放電々荷量に比例する値の、時間平均値を指示させるものである。電圧計としてはP型真空管電圧計が一般に用いられる。Radio noise meterによる方法は一種の電圧計法である。

#### ウ. 計数法

コロナパルスの数を計数する方法で、その数をパルスの波高値に従って分類して計数する方法が用いられている。10図はこの回路のブロックダイアグラムで、11図は増幅器以降の各段階における波形を示す説明図である。検出素子抵抗 $R$ の両端のコロナパルスは増幅器によって増幅された後、弁別回路に入り、11図(c)に示すように任意の値 $h$ で切断し、ある区分値 $h$ 以上のパルスのみ通過させ、その出力を同図(e)に示すように整形した後計数装置を動作させる。区分値 $h$ は可変で適当なおおきさに変えられる。計数装置としては、限時装置を備えてその時間内のパルス数を計数する方法と、1秒間のパルス数の平均値を示させるようにした計数率計とがある。後者は精度は多少悪いが、実用上問題にならないばかりが多い。また実際の測定では監視用として、繰返しブラウン管オシロで波形を観測する方法を併用するのが普通である。

12図および13図は当所で試作したコロナ計数装置で、12図は1,000個まではパルス数を個々に計数し、それ以上は計数率計に切換えて測定するようにしたものであり、13図は計数率計のみを有する測定装置である。増幅器

電気機器絶縁コロナの試験・原



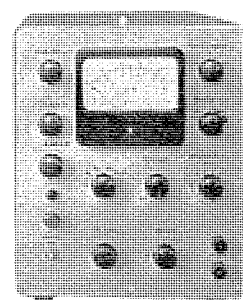
12 図 コロナパルス計数器

Fig. 12. Corona pulse counter.

の増幅率はいずれも1Mcまで $67 \pm 3$ dbで、区分値は増幅器の入力端に換算して、約0.5ないし100mVの範囲内で適当に変えられる。数および区分値のチェック回路を自蔵している。

#### エ. その他

その他の指示方式として磁気録音器によるコロナ電圧の記録、および増幅器出力を拡声器により音響として聴覚で判断する方法などがあるが、一般に定量的には測定困難である。



13 図 コロナパルス計数率計  
Fig. 13. Counting rate meter for corona pulse.

#### 5. 測定量の表示

以上述べたいろいろの測定器によって、絶縁物に電圧を印加したばあい corona 開始電圧、コロナ消滅電圧、およびある印加電圧における相対コロナ強度（コロナパルスのおおきさと数に比例する量）などを測定できるが、これらはいずれも検出素子抵抗 $R$ の両端にあらわれるコロナの量を測定するので、測定される量は絶縁物内部の実際のコロナ強度ではなく、(1)式からわかるように、試料内でボイドの占める部分の静電容量と、ボイドのない部分の静電容量の割合によって変り、また試料と並列に接続される静電容量の値などによっても変る。すなわち試料を含めた測定構成回路の回路常数によって測定値は違ってくる。さらに一端が接地されている電気機器では、5図のように結合コンデンサを供試機の端子に接続して測定するが、普通の電気機器では、巻線内に生じたコロナパルスは測定端に伝播するまでに減衰する。したがって測定量から実際のコロナ強度を知るためには、いろいろの要素を考慮して計算しなければならず、試料の内部状態がよくわかっており、たとえば平行平板間のボイドのような比較的単純な電極配置の試料などでは、測定量から絶縁物内部のコロナ強度やコロナエネルギーを求めることができるが、実際の電気機器では内部のコロナ強度の絶対値を知ることは極めて困難である。

したがって現在電気機器に対するコロナ試験では、コ

コロナ開始電圧や消滅電圧の測定、および印加電圧と相対コロナ強度の関係を調べるのが普通であるが、前述の計数法によれば、ある印加電圧におけるコロナパルスの高さと発生数を調べることができ、(1)式に示した $\Delta VC_0/C_0$ とパルス数 $n$ との関係、あるいは(6)式に示したパルス数 $n$ と印加電圧との関係などから、 $\Delta V$ と $n$ の分布、すなわちボイドのおおきさと数の分布状態をある程度類推することができ、絶縁物の内部状態をよりよく判断することができる。

印加時間に対するコロナ強度の変化を見る方法もある。文献(6)にはガラス板にはさまれたボイド放電の時間的変化を詳しく観察してあるが、回転機絶縁について測定した2,3の結果によれば、破壊電圧よりかなり低い値の印加電圧では、コロナ発生数は印加時間と共に最初は急に減少してある値に近づくが、印加電圧をあげるにしたがってこの減少の割合は少くなり、破壊電圧直前ではコロナ数は時間に対してほとんど減少を示さないか、かえって増加の傾向を示す。なおこの傾向は波高値の比較的高いパルスが顕著である。

コロナ開始電圧は、電気機器絶縁の内部状態を示す値としてよく用いられているが、この値は測定器の感度によってことなるので、比較のためには測定器の感度を指定する必要がある<sup>(10)</sup>、普通検出素子抵抗 $R$ 両端のコロナ電圧(区分値)を指定してコロナ開始電圧を表示しているが、この値はまた測定構成回路の回路常数によってことなるので、測定回路と測定器の感度を含めた回路系について目盛定めをする必要がある。

測定回転の目盛定め法について述べると、いまボイドを含んだ絶縁物の等価回路を2図のようにあらわせば、ボイド放電により試料の両端には(1)式に示す $\delta v$ なる電圧変化が生ずる。したがって測定回路に $\delta v$ なるパルス印加したことと等価になるので、14図に示すように、測定回路の1部にコロナパルスに似た波形をもつ既知のおおきさの電圧を印加し、このとき検出素子抵抗 $R$ にあらわれる電圧をよみ、実際のコロナ試験のときのおよみと比較することによって目盛定めすることができる。目盛定め用の信号電源としては、電子管式パルス発生器を用いる法、既知の直流電圧で試料を充電しておき、マイクロスイッチで試験回路に放電させる法、試料と直列に放電管をおき、60サイクル電圧をこれが点弧するまであ

げて階段状の電圧パルスを得る方法などが用いられている<sup>(12)(21)</sup>。このような方法で目盛定めをすれば、試料内のボイド放電によって、検出素子 $R$ にあらわれる見掛けのコロナ強度の絶対値を知ることができるが、試料内のボイドの状態がわからない限り、真のコロナ強度を求めることはできない。

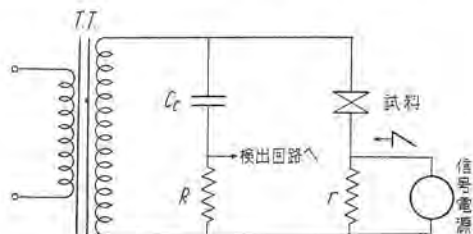
## 6. 測定結果

当社ではおもに発電機コイルや乾式絶縁のCT, PTなどについて、絶縁物含浸法の研究を始め、工場における品質管理や現場試験に、計数法によるコロナ測定装置を用いているが、これらの測定結果の一部についてごく簡単に記述する。

コイルやCT, PTについては15図に示す測定回路を用い、1端接地の発電機巻線の試験では検出素子抵抗 $R$ を結合コンデンサ $C_0$ の接地側に接続した。 $R$ 両端にあらわれるコロナ電圧は、測定器内部の弁別器によりあるおおきさに区分し、その値以上のコロナパルス数を計数した。この区分したおおきさを以下区分値と称する。すなわち区分値0.5mVのコロナとは、 $R$ 両端にあらわれるコロナ電圧の波高値が0.5mV以上のものであることを示す。コロナ開始電圧は、ある区分値において指示器のメータが振れはじめるときの印加電圧の値をもって表示し、かつそのときの区分値を明記した。

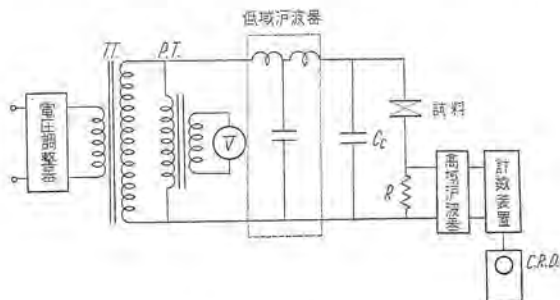
### ア、発電機コイルの絶縁構成、含浸処理法の研究

発電機コイルは、その構成絶縁材料、含浸用ワニスの種類、含浸方法、その他工作処理法によって、特性はいちじるしくことなる。使用材料や含浸処理法の相違が、コイル絶縁の内部状態にどのように影響するかを、数多くのモデルコイルについて調べた一連のコロナ試験のうち、代表的な1例を16図に示す。モデルコイルの絶縁厚さは定格6.6kV級とほぼ同じで、長さは約1m、コイル表面にコロナ防止処理を施したものである。16図で(a)コイルは3kVにおいてコロナが発生しはじめ(区分値1.25mV)、3.5kVにおいては高波高値のコロナパルスは少ないが、4kVに電圧をあげるとコロナパルスの数は急激に増え、この電圧で新たに放電を起すおおきさのボイドが多数あることを示しており、以後電圧を



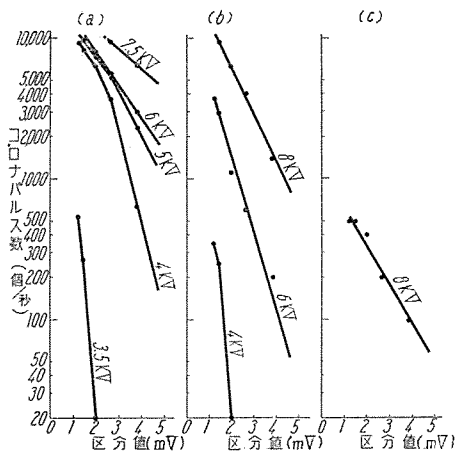
14 図 回路の目盛定め法

Fig. 14. Calibration method for measurement circuit.



15 図 コロナ試験回路

Fig. 15. Schematic diagram of corona test circuit.



16 図 モデルコイルのコロナ特性の一例

Fig. 16. Typical characteristics from corona test with model generator coil.

あげるにつれて高波高値の脉冲が顕著に増えている。すなわち絶縁物内部には比較のおおきなボイドも存在することを示している。(b)コイルのコロナ開始電圧は3.2 kV (区分値 1.25 mV) で、(a) コイルと大差ないが、ボイドの数およびおおきさは(b)コイルより遥かに小さく、また(c) コイルは6 kV まではコロナを発生せず、8 kV においても高波高値のコロナは少なく特性は非常に良好である。コロナ試験終了後絶縁物を切断し、肉眼および顕微鏡によって絶縁物内部を観察した結果、(a) コイルはかなり多数のボイドが肉眼でたしかめられ、(b) コイルは非常によく注意すればところどころに薄いボイドの層が認められ、(c) コイルでは全くボイドを認めることはできなかった。

#### イ. コロナ開始電圧と $\tan \delta$

理想的なボイドを模擬したサンプル試験では、コロナ開始電圧と、 $\tan \delta$ -電圧曲線において  $\tan \delta$  が増加しはじめる電圧とは、ほぼ一致することが発表されているが<sup>(10)</sup>、実際の発電機コイルではボイドのおおきさや形状がまちまちであり、区分値を小さくしてコロナ開始電圧を測定すると、 $\tan \delta$  が増加しはじめる電圧よりも低い値でコロナが検出される。すなわちコロナ測定装置によれば、ボイド放電による損失分が、シェリングブリッジによる  $\tan \delta$  の測定値に影響を与えない程度の、きわめて小さいエネルギーのボイド放電も検出できる。数本の発電機コイルについて、区分値を 0.785 mV から 3.85 mV まで変化して測定したコロナ開始電圧と、シェリングブリッジを用いて注意深く測定した  $\tan \delta$  特性から求めたコロナ開始電圧との比較を1表に示す。コロナ開始電圧はこのように区分値によってことなるので、比較のためには区分値を一定にして測定する必要がある、さらには前節にのべたような目盛定めにより、見掛けのコロナ強度を指定する必要がある。この値の統一には、ボイド放電が絶縁物の劣化におよぼす影響や、試料の静電容量、実際の測定技術などを考慮して決めるべきであると考え、今後の研究課題の1つであろう。

1 表 コロナ開始電圧の比較

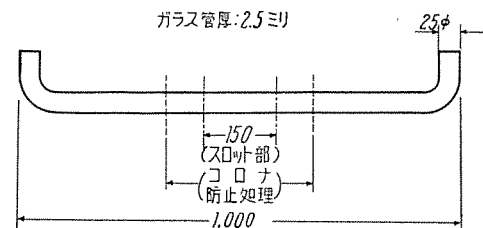
コイル番号	$\tan \delta$ 曲線より判定したコロナ開始電圧 (kV)	コロナ計数装置によるコロナ開始電圧 (kV)			
		区分値 0.785 mV	区分値 1.25 mV	区分値 2.0 mV	区分値 3.85 mV
1	約 5	4.3	4.9	5.4	6.5
2	// 5.5	4.5	5.1	5.5	6.2
3	// 6	3.9	4.5	5.0	5.4
4	// 5.5	4.7	5.0	5.5	5.9
5	// 5	4.0	5.2	5.8	6.3
6	// 4	3.3	3.7	3.9	4.7

Paschen の法則によれば、ボイドの厚さがある程度以下になれば放電電圧はかえって上昇し、放電電圧の最小値は1気圧のガスでは約 300 ないし 400 V 程度で、このときの間隙は約 0.01 mm となる。実際の発電機コイルの絶縁厚さと Paschen の法則による最小放電電圧を示すボイドの間隙長とから、コイルのコロナ開始電圧の最小値を計算すると、6.6 kV 級コイルでこの値は約 4 kV 程度になるが、実際にはボイドがあればこの値以下でもコロナが発生する。これはボイドにかかる電界が実際には平等電界ではないためと考えられる。

#### ウ. 発電機コイルのコロナ防止塗料の研究

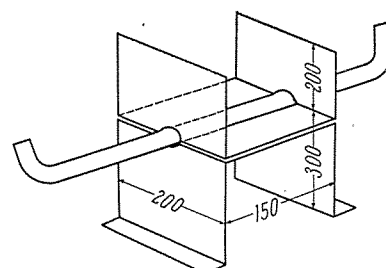
高圧コイルのコイル表面には、コイルが溝部におさまる部分および溝の出口付近にコロナ防止処理をほどこすが、このコロナ防止処理の方法によって、コイル表面のコロナ開始電圧はいちじるしくことなる。コロナ防止処理法の研究のため、17 図に示すようなガラス管の模擬コイルを用い、コロナ防止塗料の抵抗値や処理方法などをいろいろ変えて、これを 18 図のような模擬スロットにおさめ、コロナ開始電圧の相違を調べた。なおこのばあい高圧側電極としては、ガラス管内に硫酸銅溶液を入れ、またガラス管表面のコロナ防止処理をしていない部分には、実際のコイル表面処理に用いるものと同じ塗料を塗布した。

このような方法で試験の結果、コロナ防止処理が全然してないばあいは、1.8 ないし 2.2 kV からコロナが発



17 図 模擬コイルの寸法

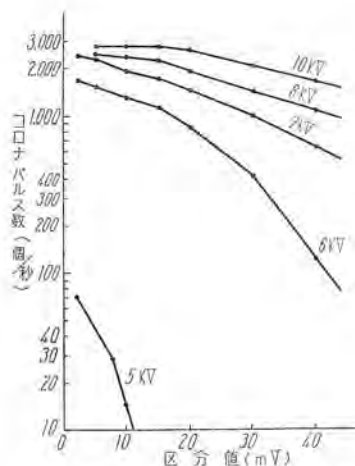
Fig. 17. Dimension of imitate generator coil.



18 図 模擬スロットに納めたコイル

Fig. 18. Schematic diagram of test assembly for testing surface corona of sample coil.





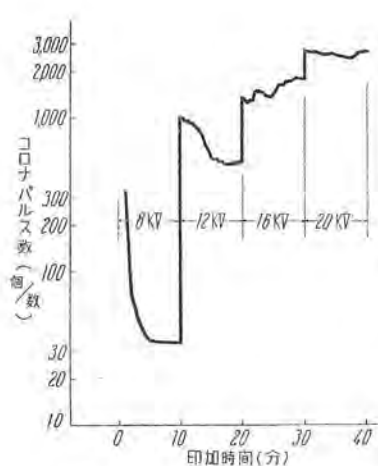
19 図 古い 6.6 kV タービン発電機の試験結果  
Fig. 19. Test result obtained with 6.6 kV old turbine generator.

生しはじめ (区分値 0.785 mV), 適当なコロナ防止処理がほどこされたものは, コロナ開始電圧が約 7.0 ないし 9.5 kV (区分値 0.785 mV) であることを確かめた。処理方法が悪いと実際の発電機の運転対地電圧以下の電圧においてもコロナが発生する。なおこの試料で内部コロナの開始電圧は同じ区分値で 10 kV 以上であることを確かめてある。

## エ. 現場試験

現場試験としては, 発電機の保守のための絶縁診断や, コイル巻替え時の破壊試験の際に, コロナ試験を実施してきたが, 19 図は定格 6.6 kV, 20,000 kW の古いタービン発電機についての実測例である。印加電圧が 5 kV から 6 kV になるとコロナパルスは急激に増え, 電圧上昇と共に高波高値のパルスが顕著に増加している。すなわち絶縁物中には印加電圧 6 kV 程度で新たに放電を起すおおきさのボイドが多く, またおおきなボイドも多数含まれていることを示している。20 図はコロナパルスの時間特性を示す 1 実測例で, この発電機の破壊電圧は約 25 kV であったが, 破壊電圧よりかなり低い 8 kV においては, パルス数は時間とともに急激に減少しているが, 電圧上昇につれてこの傾向は少なくなり, 破壊電圧に近づくとパルス数はかえって増加の傾向を示している。このような傾向はいずれのボイドにも同じであるとは限らないようで, 破壊電圧近くで電圧をあげたとき, それ以前の印加電圧よりもかえってパルス数が減少を示すようなときもあり (パルスの波高値は高くなる), この原因は明かでないが, 破壊電圧近くの高電圧におけるボイドコロナおよびコイルエンドに発生する表面コロナの現象論的究明, およびコロナ計数器の計数分解能, ある程度以上の高波高値のパルスで増幅器が一時不感になる可能性, などの点を検討する必要があるように思う。

9 図に示した探針を用いて, コロナ発生箇所を 2, 3 の発電機について調査した結果では, コイルエンドの溝端, コイル押えの支えリングや締付ボルトの付近, コイルエ



20 図 コロナパルスの時間特性  
Fig. 20. Time characteristic curve of corona pulses.

ンドの曲りの部分などにおもにコロナが検出され, コロナ防止処理が施されていないコイルの溝端におけるコロナ, および支えリングや締付ボルト付近で生ずるコロナは, 比較的強度が強いことが確かめられた。この探針測定の後に行った破壊試験で, その破壊箇所がコロナを検出された場所に多かったことは注目に値する。

## 7. 今後の問題点

コロナ試験は電気機器の絶縁状態をしらべる有効な方法であるが, 実際の機器にこの試験を適用するにあい, 今後なお解決すべき幾多の問題がある。それらの幾つかについては既に記述したが, おもな点を列挙してみると次のとおりである。

### ア. ボイドコロナと表面コロナの識別

電気機器に発生するコロナは, 絶縁物内部に発生するボイドコロナの他に, 絶縁物表面からも生ずるが, 現在のところ, 測定結果から直ちにボイドコロナと表面コロナを識別することは非常に難しい。ボイドコロナと表面コロナは発生箇所がことなるので, コロナパルスの周波数成分が相違するはずであり, コロナの周波数特性を測定して両者を識別する方法が研究されている。発電機のコイル表面と鉄心間に生ずる溝放電と, 絶縁物内部に生ずるコロナ放電は, これらの周波数特性を測定して両者を識別できることも報告されているが<sup>(12)</sup>, その判定にはかなりの経験と熟練を要するようで, 今後一層の研究が期待される問題である。

### イ. 絶縁物の寿命と密接に関連のあるコロナ強度の表示法

試料の内部状態がわかっており, 電極配置が比較的単純なものでは, 測定結果から絶縁物内部の真のコロナ強度を求めることができるが, 一般には検出素子両端の見掛けのコロナ強度しか求めることはできない。したがって現在絶縁物の内部状態をあらわす手段として, コロナ開始電圧, コロナ強度の電圧特性などが測定されている。コロナ開始電圧は電気機器の絶縁状態をあらわす有力な目安ではあるが, コロナ開始電圧のおおきさと, 機器の運転電圧におけるコロナ強度とは必ずしも比例関係がなく, コロナ開始電圧の低いものは, 運転電圧におけるコロナ強度がおおきいとは一概にいえない。文献 (20) には電気機器の絶縁状態の表示は, コロナ開始電圧よりも, 運転電圧におけるコロナ強度で比較すべきであると提案している。また絶縁物の劣化によらず影響が, 多数の小さいコロナパルスと, 少数のおおきなコロナパルスとで, いずれが顕著であるかを検討して, もっとも有害な要素をパラメータとしてコロナ強度の表示法を考えることは, コロナ測定によって絶縁物の劣化程度を知る上に, 極めて必要なことである。コロナ計数法によって印加電圧とコロナパルスの数およびおおきさの分布を調べるこ

とは、従来よりも絶縁の内部状態に対し有力な情報が得られるとはいえ、一般的に比較するばあい、試料のおおきさや形状の相違に対して必ずしも普偏性がない。

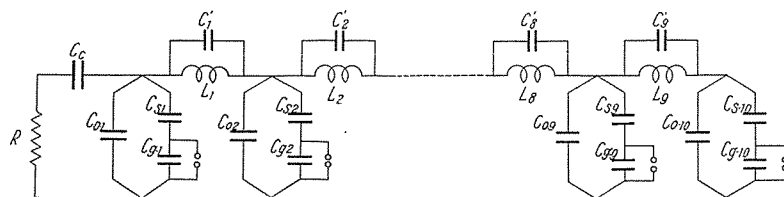
#### ウ. コロナ開始電圧の測定法の統一

コロナ開始電圧の値は、区分値あるいは適当な方法により目盛定めをした見掛けのコロナのおおきさを指定しなければ、比較のために用いることはできない。現在電気機器のコロナ開始電圧の測定に際して、見掛けのコロナのおおきさを幾らにして測定すべきかについては、統一された推奨値はない。この値の決定には、現在の測定技術やコロナが絶縁物におよぼす影響の度合、および試料の絶縁構造などを考慮して決定するべきものであると考えるが、見掛けのコロナ強度は試料の静電容量によって変わるので、たとえば発電機の単独コイルのばあいと、組立てられた巻線のばあいには、ことなつた見掛けのコロナ強度で測定するのが合理的であろう。いずれにしても測定法の統一が望まれ、できうれば試料の静電容量に影響されないような基準値の確立が望まれる。

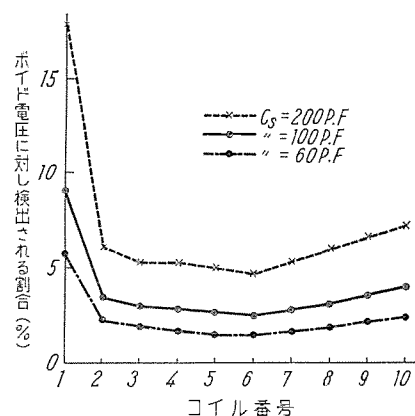
#### エ 巻線のコロナ測定

発電機のように組立てられた巻線のコロナ測定では、コロナパルスが巻線中で減衰するので、発電機端子に接続された検出素子にあらわれるコロナ電圧は、コロナを発生した場所によってことなる。

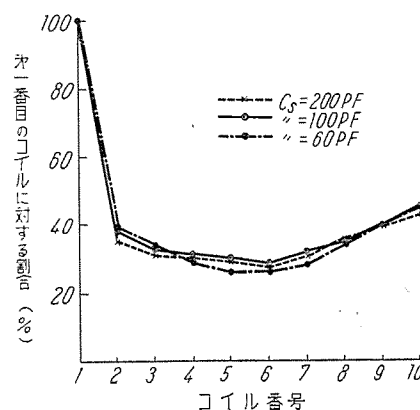
21 図に示すような発電機を模擬した等価回路で、各コイルにボイド放電が起つたばあい、検出素子  $R$  にあらわれるコロナパルスの高さを、交流計算盤によって求めてみた。図中  $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0,10}$  は各コイルのボイドのない部分の静電容量、 $C_{s1}, C_{s2}, \dots, C_{s,10}$  はボイドと直列にある絶縁物の静電容量、 $C_{g1}, C_{g2}, \dots, C_{g,10}$  はボイドの静電容量をあらわし、また  $C'_1, C'_2, \dots, C'_9$  および  $L_1, L_2, \dots, L_9$  はそれぞれ各コイル間の結合容量およびコイルのインダクタンスをあらわす。  $C_c$  は結合コンデンサで  $R$  は検出素子である。各コイルのボイドに一定のおおきさの矩形波を順次に印加したばあい、 $R$  両端にあらわれる電圧の波高値を測定した結果を 22 図に示す。なおこの場合の等価回路の常数は、数ターンコイルの水車発電機のばあいを模擬し、 $C_{01} = C_{02} = \dots = C_{0,10} = 900 \mu\mu F$ ,  $C_{g1} = C_{g2} = \dots = C_{g,10} = 1000 \mu\mu F$ ,  $C'_1 = C'_2 = \dots = C'_9 = 600 \mu\mu F$ ,  $L_1 = L_2 = \dots = L_9 = 200 \mu H$  とし、 $C_{s1} = C_{s2} = \dots = C_{s,10}$  は、ボイドの面積がことなるばあいを模擬して  $200 \mu\mu F$ ,  $100 \mu\mu F$  および  $60 \mu\mu F$  について計算した。なお  $C_c = 2000 \mu\mu F$ ,  $R = 5 k\Omega$  とした。



21 図 発電機巻線の等価回路  
Fig. 21. Equivalent circuit of generator winding.



22 図 巻線中のコロナ発生場所による検出コロナ電圧の変化  
Fig. 22. Variation of corona voltage detected according to location of discharges in generator winding.



23 図 第1番目のコイル放電に対する検出コロナ電圧の割合  
Fig. 23. Percentage of detected corona voltage to No. 1 coil discharge.

22 図よりわかるように、検出素子に1番近いコイルのボイドが放電したとき、 $R$  両端にあらわれる電圧の波高値は、ボイド電圧に  $C_{s1}/C_{01}$  を乗じた値とほぼ同じでボイドの部分の面積が全体に対する割合のおおきいほど高く、ほぼ (1) 式と一致するが、第2番目以降のコイルが放電を起したときは、 $R$  両端の電圧はいちじるしく小さくなる。第1番目のコイルが放電したときの  $R$  両端の電圧を 100% として表示すると、23 図のようになり第2番目以降のコイルが放電したときは、約 30 ないし 40% の電圧しかあらわれない。タービン発電機のようにターン数が少なくなると、 $L$  および  $C'$  は小さくなるが、 $L = 30 \mu H$ ,  $C' = 100 \mu\mu F$  とし計算した結果では、第2番目以降で減衰する割合は 23 図とほとんど同じ傾向を示した。

数本のコイルが同時に放電したとき  $R$  両端にあらわれる電圧は、各コイルが放電したときの波形の合成となり、各パルスの位相関係で複雑となるが、いずれにしても発電機端子で測定するコロナのおおきさは、コロナの発生場所および発電機の回路常数によってことなるので、発電機のコロナ測定



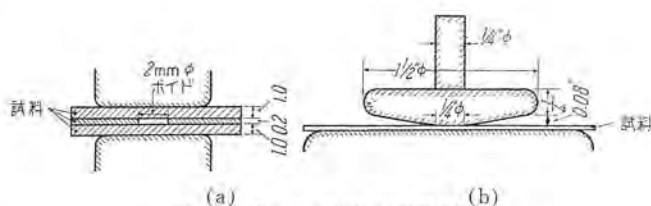
に際してはこれらのことを考慮して、測定結果を分析する必要がある。

以上現在行われているコロナ測定に関して、おもなる問題点を記述したが、これらの問題については海外においてもいろいろの考察が行われており<sup>(20)</sup>、アメリカにおいても A. S. T. M. の Electrical Test Sub-Committee で、コロナ試験法の標準を決めるための委員会が最近設けられ、試験法の暫定案が提出されていることが報告されている<sup>(21)</sup>。わが国においても、中央電力研究所を中心に回転機線輪試験法研究会において、回転機コイルのコロナ試験法が討議されているので、近くコロナ測定法に対する統一した推奨案が提出されることを期待している。

## 8. 絶縁材料の耐コロナ特性

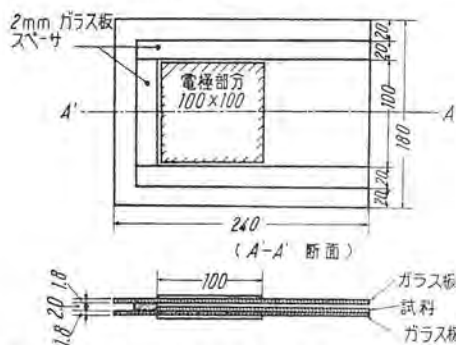
絶縁材料の劣化におよぼすコロナの影響については、すでに多くの人によって研究され、各種材料のコロナ強度と寿命との関係が明かにされつつある<sup>(23)(24)</sup>。Dakin は直角エッジを有する直径 1/2 時の円筒電極と平板間にはさまれた薄板試料で、表面コロナと寿命の関係をしらべ、絶縁物の長時間破壊試験における破壊までの時間は、相対コロナ強度の逆数に比例すると述べている<sup>(24)</sup>。またナイロンやマイラの長時間破壊電圧の値は、印加時間を長くするとコロナ開始電圧に近づき、Kel F やテフロンは耐コロナ特性が他の有機材料にくらべて極端に悪く、これに反しマイカは非常に優れた耐コロナ性を有していることを報告している。また Siemer<sup>(25)</sup> は発電機コイルの破壊電圧におよぼすコロナの影響について、実用のコイルやモデルコイルについて、いろいろの試験を行った結果、マイカを主絶縁材料とする発電機コイルでは、コロナが絶縁の劣化におよぼす影響は極めて少いことを述べ、現在、発電機コイルに対するコロナの弊害については、過度に神経質になり過ぎているとも述べている。これに反し未含浸のセルローズ質絶縁物は、コロナによって短期間におかされると報告している。このように絶縁材料の耐コロナ性は材質によって非常にことなるので、これらの材料の耐コロナ性を知っておくことは、電気機器の経済的運転の観点からも極めて必要なことである。

一般に絶縁物の寿命はコロナエネルギーあるいは相対コロナ強度の函数として表わすことができるが、試験電極の形状や材質によってことなり、また周囲の媒質、温度および湿度、湿気その他の汚物の存在などによってことなる。したがって材料の耐コロナ性を比較するばあい、電極の形状や試験条件を統一する必要がある。またこれらの試験は、その材料が実際に使用されるばあいになるべく近い条件で試験されるべきで、Mason は、24 図のような標準電極を提案している<sup>(2)</sup>。内部コロナに対する耐コロナ性は、同図 (a) の電極配置を用い、ボイドの放電開始電圧とそのときの放電のおおきさを測定し、また印加電圧と放電開始電圧の比と寿命との関係をしらべることによって求め、表面コロナに対する耐コロナ性は、同



24 図 耐コロナ特性の測定用電極

Fig. 24. Test electrode arrangements for corona resistance test.



25 図 フランスから提案されている耐コロナ性試験電極

Fig. 25. Proposed French cell for corona aging.

図 (b) の電極を用い、試料の短時間破壊電圧と長時間破壊電圧(いずれも交流)の比として表わす方法を提案している。電極 (a) は表面コロナが発生しないように油中で用いる。また最近 ASTM で試験電極として考えられているものは、25 図に示すようなもので<sup>(21)</sup>、これは I. E. C に提出されたフランスの方法であるが、4 枚の 100×100 mm の試料を準備し、そのうちの 1 枚(試料 A)は 25 図の電極の部分におき、他の 1 枚(試料 B)はすぐその隣りに接近して配置する。この配置で電極間にコロナ開始電圧以上の一定電圧を印加すると、試料 A は直接コロナの影響を受け、試料 B はコロナ放電による副産物の影響を受ける。他の 2 枚はコロナの影響は受けず、ただ試料 A, B と温度、湿度および周囲媒質が同じ状態の所に放置したもの(試料 C)と、大気状態に放置したもの(試料 D)を比較のために用意しておく。この状態で一定時間試験した試料を、目で観察し、また定められた方法で機械的、化学的および電気的に検査し、その結果から試料の耐コロナ性を評価し分類するための基準が考えられている。この容器で試験できる試料の厚さは約 0.4 mm 以下のものであるが、それ以上の厚さのものおよび複合絶縁材料に対する試験法も考慮されている。

わが国においても絶縁材料の耐コロナ性に対する関心は最近急に高まり、試験法の確立される日も遠くはあるまい。このような試験によって得られる知識は、また工場や保守のためのコロナ試験にも、いろいろな情報を与えるだろう。

## 9. む す び

1. コロナ試験の方法および試験結果の解析に必要な知識を得るため、ボイド放電の基礎的性質について述べた。



2. 種々のコロナ測定法について述べたが、計数法によって印加電圧とコロナパルスのおおきさおよび数の分布状態を測定すれば、絶縁物内部のボイドの状態をある程度類推することができる。

3. コロナ開始電圧は電気機器の絶縁状態をあらわす値としてよく用いられるが、この値は測定器の感度によってことなるので、比較のためには測定回路系の全体について目盛定めをし、統一された試験法によって測定する必要がある。

4. コロナ測定は、絶縁物の内部状態を知る方法として、工場における品質管理や絶縁構造の研究、その他電気機器の保守のための絶縁試験などに有効な方法であるが、コロナ計数装置を用いて測定した2,3の実測例を示した。

5. 内部コロナと表面コロナの識別法、適当なコロナ強度の表示法をはじめ、今後解決すべき幾多の問題点がある。発電機や変圧器のように組立てられた巻線の試験では、コロナパルスが巻線を伝播中に減衰するので、測定結果の解析は複雑となる。

6. 絶縁材料はその材質によってコロナに対する抵抗性がいちじるしくことなり、これらの材料の耐コロナ性を知ることは、電気機器の絶縁構成および機器の経済的運転の観点から必要なことであるが、現在提案されている2,3の耐コロナ性の試験法について紹介した。

以上コロナ測定に関し、その測定法、測定結果の表示法、今後研究すべき問題点などについて述べたが、本文が今後コロナ測定を実施される方々にとって聊かなりとも参考になれば幸いである。

最後に終始ご指導を賜った研究所電気第一研究室、横須賀室長、種々ご協力を戴いた化学第一研究室、石黒室長、佐藤研究員、長崎製作所伊佐山課長、神戸製作所安達主任、伊丹製作所中野係長に対し深謝すると共に、コロナ計数装置の開発に御協力を仰いだ当所工務課浅見主任に感謝の意を表する。

#### 文 献

- (1) J. H. Mason: The Deterioration and Breakdown of Dielectrics from Internal Discharge P. I. E. E. **98**(1951)
- (2) J. H. Mason: Breakdown of Insulation by Discharges, P. I. E. E. Part IIA, **100** No. 3, (March 1953)
- (3) H. F. Church, C. G. Garton: Some Mechanisms of Insulation Failure, P. I. E. E. Part IIA, **100** No. 3, (March 1953)

- (4) Whitehead: Dielectric Breakdown of Solids, (Book) (1951)
- (5) H. C. Hall, R. M. Russek: Discharge Inception and Extinction in Dielectric Voids, P. I. E. E. Part II, **101** (Feb. 1954)
- (6) 池田, 堀井: 固体絶縁物の内部放電現象について, 電験誌 **18** No. 4 (昭 29-4)
- (7) 犬石, 白藤, 上岡: ボイドパルスによる絶縁劣化予知の基礎的研究, 閃電技研報告, 第 2 号 (昭 29-4)
- (8) W. T. Starr: Corona in Low-Voltage Motor Windings, A. I. E. E. Tech. Paper, 54-99
- (9) 堀井: ボイド放電のエネルギー損失, 絶縁劣化研究懇談会資料, 第 7-1
- (10) H. H. Brustle, D. L. Johnshon, A. L. Scheideler: Progress in the Evaluation of Solid Core High Voltage Bushings, A. I. E. E. Trans. Paper 55-176
- (11) J. H. Hopkins, T. R. Walters, M. E. Scoville: Development of Corona Measurements and their Relation to the Dielectric Strength of Capacitors, A. I. E. E. Trans. **70** Part II (1951)
- (12) T. W. Liao, J. S. Kresge: Detection of Corona in Oil at Very High Voltages, A. I. E. E. Tech. Paper 54-396.
- (13) 木村, 原: コロナ式油試験器, 三菱電機 (昭 22-5).
- (14) J. A. Anderson: Ultrasonic Detection and Location of Electrical Discharges in Insulating Structures, A. I. E. E. Trans. Paper 56-744.
- (15) E. H. Povey, F. S. Oliver: Nondestructive Testing of Generator Insulation, A. I. E. E. Tech. Paper 51-130
- (16) 池田, 堀井: ボイド放電に対する電圧対  $\tan \delta$  特性, 電学誌 **75** 111 (昭 30-2)
- (17) 福田: 絶縁不良検出の一方法, 電気日本 **35** (昭 23-8)
- (18) 山中, 吹田: 絶縁劣化判定の直流分法に関する模型実験, 関西支部連大 **24** (昭 31-4)
- (19) 法貴, 藤, 木谷, 酒井: コロナパルスによる発電機巻線絶縁耐力判定の一方法, 電学連大 **266** (昭 29-5)
- (20) J. Fabre, G. Läng, J. Laverlschere, G. Levoy, J. Narey, G. Ruelle: Research Work on the Insulation of Large Synchronous Machines, C. I. G. R. E. Report No. 137 (1956)
- (21) C. W. Ross, E. B. Curdts: Considerations in Specifying Corona Tests, Power Apparatus and System, No. 23 (April 1956)
- (22) John S. Johnson: Slot Discharge Detection Between Coil Surface and Core of High Voltage Stator Windings, A. I. E. E. Tech. Paper 51-367
- (23) P. R. Howard: The Effect of Electric Stress on the Life of Cables Incorporating a Polythene Dielectrics, J. I. E. E. **98-II** (1951)
- (24) T. W. Dakin, H. M. Philofsky, W. C. Divens: Effect of Electrical Discharges on the Breakdown of Solid Insulation, A. I. E. E. Tech. Paper 54-70
- (25) W. Siemer: Die Bewertung der Hochspannungsisolierung Elektrischer Maschinen, ETZ-A, Bd. 76, H. 9, 15. 1955.

# 電気式水位調整器

神戸製作所 梅名茂男\*

## Electric Water Level Regulators

Kobe Works Shigeo UMENA

To operate a water wheel so as to make its water flow equal to take-in water is a vital condition in a hydro-electric power station without regulating pond. An automatic water level regulator, then, comes to play an important part to obviate inconvenience of a manual operation. An electric water level regulator is a device to convert the water level to an electric quantity, with which a load limiting motor of the governor is controlled to adjust the water flow. It works with high response and sensitiveness besides features of simplicity in the arrangement compared with an old pneumatic set.

### 1. ま え が き

流れ込み式水力発電所においては、水車の使用流量を、水槽への流入水量と同量になるよう水車を運転することが必要である。水位調整器はこの操作を自動的に行うために設置されるもので、水槽水位をほぼ一定に維持し、水面変動を抑制するよう水車の使用流量を調整して、上記の目的を達しようとするものである。水位調整器としては、従来主として圧縮空気式が使用されているが、この方式では、圧縮空気発生装置、水槽と発電所間の連絡空気管、調速機の付属装置など、設備が複雑となるうえ、調整装置の有する慣性が比較的大きく、乱調を生じ易い。また連絡空気管は屋外に設置されるため、長年月の使用の間には腐食により空気洩れを生じ、その保守に大きな労力を必要とする。したがって電氣的に同一の目的を達することができれば、きわめて簡単になるので、以下、電気式水位調整器についてその概要を述べる。

### 2. 動作原理

電気式水位調整器は、水槽水位を電氣量に変換して発電所に送量し、水車調速機の負荷制限電動機を制御して導水弁開度を調整し、水車流量を水槽への流入水量に対応させるものである。いま、水槽の断面積を一定として  $S \text{ m}^2$  とし、水槽への流入流量を  $Q_0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、水車流量を  $Q \text{ m}^3/\text{sec}$  とすれば、

水槽水位  $H \text{ m}$  は

$$dH/dt = (Q_0 - Q)/S \quad (1)$$

で与えられるから、つねに

$$Q_0 = Q \quad (2)$$

となるよう水車流量  $Q$  を調整するためには

$$dH/dt = 0 \quad (3)$$

となるよう、すなわち、水面変動の生じないように水車導水弁開度を調整し、同時に

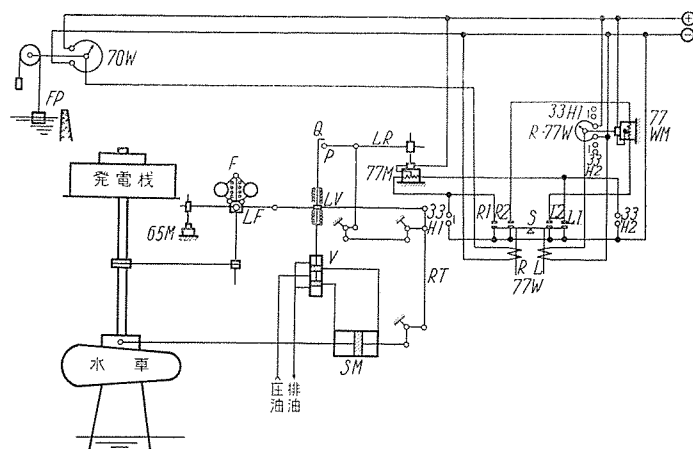
$$H_1 > H > H_2 \quad (4)$$

$H_1$ : 水槽の調整水位の上限

$H_2$ : 水槽の調整水位の下限

となるよう、すなわち、水槽水位  $H \text{ m}$  を運転に支障のない範囲  $H_1 \sim H_2 \text{ m}$  に維持すれば、水位調整器としての目的は達せられたことになる。

1 図は電気式水位調整器の概要を示す説明図である。図において、 $F$  は適当な駆動方法によって水車から駆動されるアクチュエータ、 $V$  は圧油配圧弁で、平衡レバー  $LV$  とはスプリングを経て連結せられ、 $LV$  の位置によって導水弁作動用サーボモータ  $SM$  を制御し水車への流入水量を調節する。 $65M$  はいわゆるガバナモータで、或る回転数に相当した  $F$  の位置にかかわらずレバー  $LF$  の一端を上下し、 $LV$  の位置を調整するための調整速度調節用電動機である。しかし、以上の要素は復元機構  $RT$  とともに通常の調速機を形成している。 $77M$  は負荷制限電動機で、レバー  $LR$  の傾斜を調節するためのものである。 $LR$  の一端  $P$  は、 $V$  の操作棒に取付けられた突起  $Q$  と相対しており、 $Q$  は  $P$  によって下降運動



1 図 水位調整器説明図

Fig. 1. Schematic diagram of water level regulation.

を制限されるように構成されている。(なお、 $V$  が下降した場合に  $SM$  は導水弁を開き水車流量を増加するものとする。)したがって、あらかじめ  $65M$  を操作して  $LF$  を右下りに傾斜させれば、 $F$  の位置に関係なく  $V$  を降下せしめるよう  $LV$  を傾斜させることができるが、 $P$  と  $Q$  とが相接すれば  $V$  の下降運動は制限され、それ以上導水弁を開くことはできない。 $70W$  は水槽水位に応動する抵抗器で、フロート  $FP$  により制御され、その抵抗値は水位の上昇によって増加するものとする。継電器  $77W$  は一種の平衡継電器で、支点  $S$  により支えられた平衡桿の両端に線輪  $R, L$  を有し、この線輪は、外部の固定永久磁石中に可動的に挿入されて、その電磁力は、便宜上、可動線輪を上方に引上げるように作用するものとする。 $R1, R2; L1, L2$  は電気接点で、 $L$  側に比べて  $R$  側の電磁力が大きいときには、 $R1, R2$  が同時に閉路し、逆に  $R$  側電磁力が小さいときには、 $L1, L2$  が同時に閉路するものとする。いま  $77W$  の線輪  $R$  を上述の  $70W$  に接続し、線輪  $L$  を、操作電動機  $77WM$  により調整される可変抵抗器  $R-77W$  に接続して、接点  $R2, L2$  により  $77WM$  を制御し、 $77WM$  は、 $R2$  の閉路により  $R-77W$  の抵抗値を増加する方向に、 $L2$  の閉路により  $R-77W$  の抵抗値を減少する方向に回転するものとする。たとえば水槽水位が上昇したとき、 $70W$  の抵抗は増加し、線輪  $R$  の電磁力が増加する。したがって、 $77W$  は接点  $R2$  を閉路し、 $R-77W$  の抵抗値を増加するように  $77WM$  を回転させ、線輪  $L$  の電磁力が  $R$  の電磁力と等しくなって平衡する。水槽水位が降下したときもどうよう、 $77W$  は、 $R-77W$  の抵抗値を減少させて平衡し、 $77W$  の平衡状態では、 $R-77W$  の抵抗値は水位を表現する  $70W$  の抵抗値に等しく、 $R-77W$  の摺動子の位置は水位を指示することになり、 $77W$  の接点  $R1, L1$  により、水位変動の発生、および変動方向を検出することができる。

したがって、 $R1, L1$  により  $77M$  を制御し、 $R1$  の閉路によって  $P$  点を下げる方向に、 $L1$  の閉路によって  $P$  点を上げる方向に  $77M$  を回転させたとすれば、水位が上昇したときには導水弁を開き、水位が降下したときには導水弁を閉じ、水車の使用流量を増加、または減少させて、水槽への流入水量に対応させることができる。なお、1 図には図示していないが、この操作は適当な乱調防止継電器と組合せて間歇的に行うようになっている。

しかし、このようなオンオフ制御では、前記の式 (2) を完全に成立させることは不可

能で、

$$Q_0 = Q + \Delta Q \quad \dots\dots\dots (5)$$

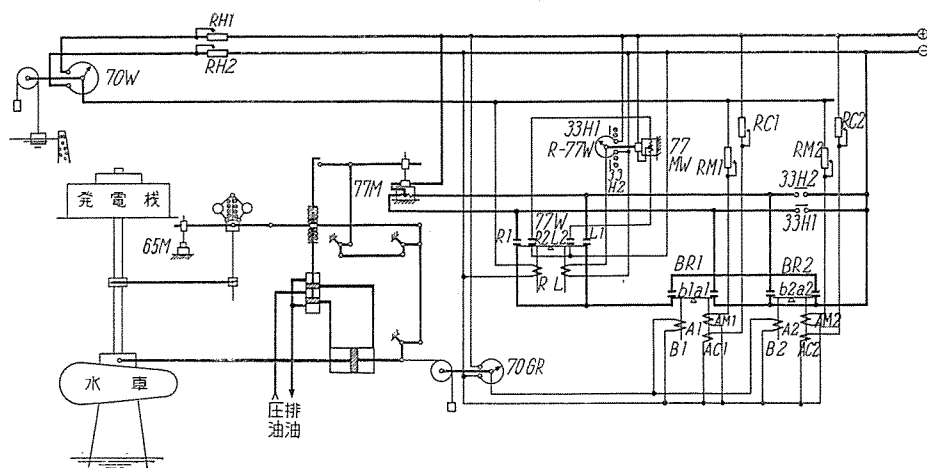
が成立することになる。したがって、流込流量が定常状態にあるとき、1 度、 $77W$  の動作により  $77M$  を操作してから、再び  $77W$  が動作するまでの時間  $T_{sec}$  は、 $77W$  の感度を水位に換算して  $H'/m$  として、式 (1), (5) より

$$H' \cdot S = \int_0^T \Delta Q \cdot dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

で与えられるから、 $\Delta Q$  の小さい程操作時間間隔  $T$  は長くなって、 $77M$  の操作頻度は減少し、水車出力の変動回数も少く、安定な運転を続けうることになる。このためには、水車流量の 1 回の調整量が小さいほど良く、

( $77M$  の速度)  $\times$  ( $77M$  の操作時間) を小さくすることが望まれるが、 $77M$  の起動特性、および乱調防止継電器の動作特性より、 $77M$  の操作時間を、通常、1/3 秒程度以下にすることは、操作を不安定にするので、操作時間の短縮にはおのずから限度がある。したがって、このときには、図示していないが、 $77M$  に直列抵抗を挿入して減速し、1 回の調整量を適当なものとし、 $77M$  を手動操作するときには、この直列抵抗を短絡して通常の操作速度が得られるようになっている。また、 $33H1, 33H2$  は  $R-77W$  に設けた位置開閉器で、 $33H1$  は、 $R-77W$  の摺動子の位置が前記の式 (4) の  $H_1$  に対応する水位以上となったときに閉路し、 $33H2$  は、 $H_2$  に対応する水位以下となったときに閉路するもので、 $33H1$  により導水弁を開き、 $33H2$  により導水弁を閉じるよう  $77M$  を操作して、式 (4) を満足するように水槽水位を維持するためのものである。

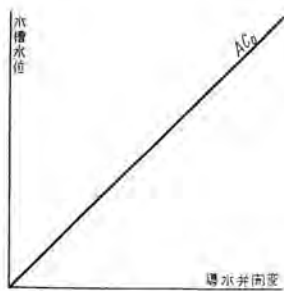
水槽への流入水量の大幅な変動は、特殊なときのほかはまず起り得ないから、上記の方式により十分安定な運転を続けることができるが、たとえば豪雨による流入水量の急激な増加、または水槽満水位の状態から水車を起動したときなどには、乱調を起すことなく安定に、しかもできうるかぎり速かに、水車の使用流量を流入水量に対応させることが必要である。このためには、水車流量に



2 図 水位調整器説明図

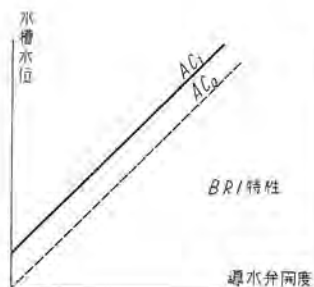
Fig. 2. Schematic diagram of water level regulation with adjustable regulating range.





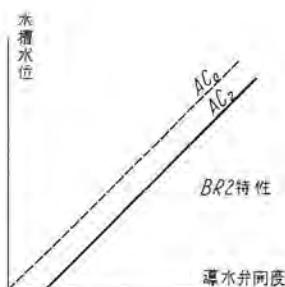
3 図 平衡継電器特性

Fig. 3. Characteristics of balanced armature D-C relay.



4 図 平衡継電器特性

Fig. 4. Characteristics of balanced armature D-C relay with adjusting coil.



5 図 調整水位特性

Fig. 5. Water level regulation curve.

関係する導水弁開度を水位調整器に負帰還して、水位と水車流量とを関連づけることが望ましい。

2 図はこのような水位調整方式を示す説明図である。図において、70GR は、この帰還用抵抗器で、導水弁と連絡され、導水弁開度の程度によりその抵抗値を変化し、導水弁開度が増加すればその抵抗値は次第に増加するものとする。BR1, BR2 は 77W とどのような平衡継電器で、固定永久磁石中を上下に動く線輪 A1, B1; A2, B2 (A1, A2 はそれぞれ主線輪 AM1, AM2, 補償線輪 AC1, AC2 により構成されている) を有している。a1, b1; a2, b2 はこれらの接点で、B 側に比べて A 側の電磁力が大きいときに a1, a2 が閉路し、逆に A 側電磁力が小さいときには b1, b2 が閉路するものとし、図に示すように、70W, 70GR, および BR1, BR2 の A 側補償線輪 AC1, AC2 は直流定電圧電源に、B 側線輪 B1, B2 は 70GR に、A 側主線輪 AM1, AM2 は 70W に接続するものとする。したがって、補償線輪 AC1, AC2 の電流を零としたとき、BR1, BR2 の特性を 3 図に示すようなものとすれば、水槽水位と導水弁開度との関係が直線 AC0 より上部にあったときには接点 a1, a2 が、下部にあったときには接点 b1, b2 が閉路することになる。つぎに、AC1 は AM1 の電磁力を減ずるように、AC2 は AM2 のそれに加わるよう構成されているものとすれば、2 図に示す調整抵抗 RC1, RC2 により BR1, BR2 の特性は、それぞれ 4 図の AC1, AC2 のように変更されることになる。

いま、水槽水位と導水弁開度との関係が 5 図の斜線部にあって、水位も平衡状態にあると仮定すれば、接点 b1, a2 はともに閉路し、77W の接点 R1, L1 はともに閉路状態にある。つぎに、なんらかの原因で水槽への流入水量がわずかに増加したとすれば、水槽水位は上昇するから、前述のようにして接点 R1, R2 が閉路し、逆に水槽への流入水量が減少したとすれば、接点 L1, L2 が閉路する。したがって、b1, a2 がともに閉路状態にあることを条件として、R1, L1 により 77M を間歇的に操作し、水車流量の微細調整を行い、流入水量の変動が大きくて流入水量と水車流量との差が大きいとき、換言すれば、水槽水位と、それに対応する導水弁開度との差が大きくなり、その関係が 5 図の継電器特性 AC1, AC2 の上、下(斜線外)に移行したようなときには、急速に、そ

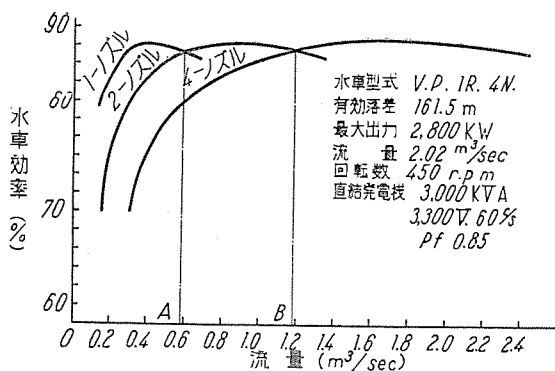
の関係を斜線部内に持ち来すようにする。水槽水位と導水弁開度との関係が、AC1 より上側にあるときは接点 a1 が閉路し、AC2 より下側にあるときは b2 が閉路するから、これらの接点により 77M を制御し、導水弁開度が AC1 より上側にあったときには導水弁を開き、AC2 より下側にあったときには導水弁を閉じ、水位と開度との関係を斜線部内に持ち込み、続いて上記の 77W による流量調整を行えば、過調整となって乱調を生ずることなどなく、急速に水車流量を流入水量に対応させることができる。また、2 図に示した抵抗 RC1, RC2 の調整により継電器 BR1, BR2 の特性 AC1, AC2 を原特性 AC0 より所望の位置まで平行移動させ、水位調整器の特性を変更することができるのは明らかであるが、主線輪 AM1, AM2 の直列抵抗 RM1, RM2 を加減して特性 AC1, AC2 の傾斜を変更することもでき、また必要な場合には、抵抗 RH1, RH2 を調整して調整水位を移行することもできる。

以上の説明では、水位が変換される電氣量を電圧として述べたが、水位を、たとえば圧縮空気式電流変換器(水位-圧縮空気圧-電流)、あるいはセルシン式電流変換器(水位-セルシン式送量器回転角-電流)などにより電流に変換したときには、帰還用抵抗器 70GR のかわりに導水弁開度電流変換器を使用し、平衡継電器をこれら電流に応動させれば、上記と全くどうようになり水位調整器をうるができる。しかし、このような方式では、間に慣性を有する変換装置が介在するため、水位検出部に抵抗を使用する直接式のときほど水位調整器の速応性を高めることは困難で、水槽発電所間の連絡電線数に制限があるとき、水槽水面が氷結してフロートを使用できないときなどの特殊な場合にしか採用されない。

上述した電氣式水位調整方式は、ペルトン、フランシス、カプランのいずれの水車に対しても適用できるが、マルティノズル・ペルトン水車に対しては、水車流量により使用ノズル数をかえて高能率運転を行うので、多少調整方式がかわってくる。つぎに高能率運転を行うペルトン水位の調整方式について、その概要を述べる。

### 3. マルティノズル・ペルトン水車の高能率運転と水位調整器

マルティノズル・ペルトン水車は、1 個のランナに複



6 図 効 率 曲 線

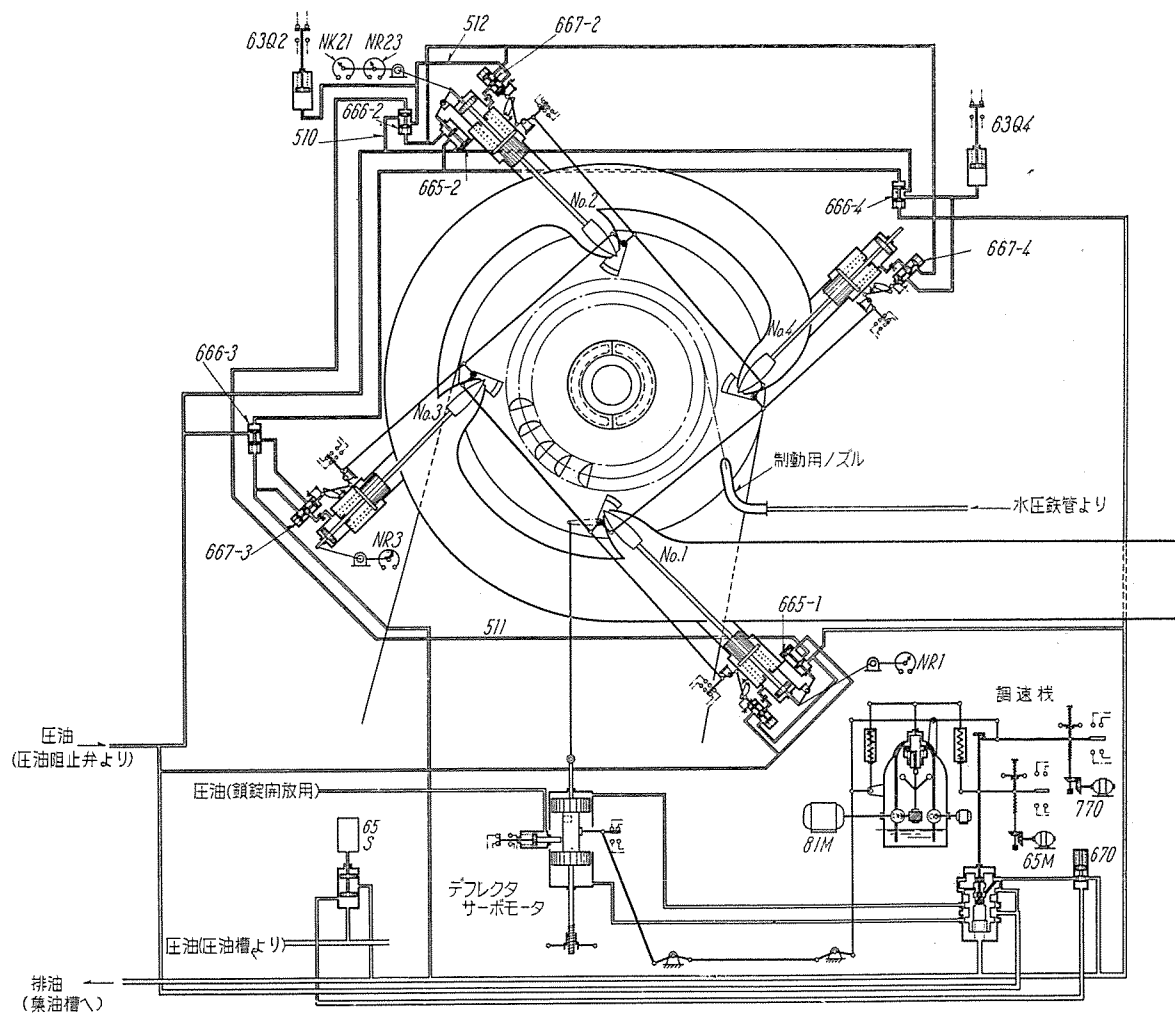
Fig. 6. Efficiency curve of 1 runner 4 nozzle pelton wheel for Ishii Power Station, Kansai Denryoku K. K.

数個のノズルを設けたもので、水車流量に応じて、その効率が常に最高となるよう使用ノズル数を増減することができ、構造上、横軸水車よりも縦軸水車の方がノズルの切換が容易で、しかも 1 個のランナに最大 6 個のノズルを使用できるので、軽負荷の運転時間が長い高落差発電所に対しては、縦軸マルチノズル・ペルトン水車が採用される傾向にある。

以下、関西電力、石井発電所を例として、マルチノズル・ペルトン水車の高能率運転ノズル切換装置と水位調整器について説明する。

#### ア. ノズル切換装置

石井発電所のペルトン水車は、ランナ 1 個に 4 本のノズルを設け、その使用数を 1, 2, 4 本に切換えるもので、6 図は、この水車のノズル切換を行った場合の効率曲線を示すもので、A 点以下の流量では 1 ノズル運転が、A 点以上 B 点以下の流量では 2 ノズル運転が、B 点以上の流量では 4 ノズル運転が高能率であることがわかる。本発電所では、A 点に対応する No. 1 ニードル・サーボモータの行程により No.2 ノズルを起動し、B 点に対応する No. 2 ニードル・サーボモータの行程により No. 3 および No. 4 のノズルを起動するもので、调速機は 1 個のデフレクタ・サーボモータを制御し、4 個のデフレクタは、リンク機構で連結されて常に同開度を保ち、起動したノズルは、デフレクタ開度に対応するようになっているから、起動ノズルの開度は自動的に平衡する。7 図は、调速機とノズル切換装置関係の圧油自動操作系统図で、入口弁に近い方から順次 No. 1, No. 3, No. 2, No. 4



7 図 调速機、ノズル切換装置圧油自動操作系统図

Fig. 7. Pressure oil diagram of governing system for 4 nozzle pelton wheel.



のノズルを配置してある。いま、デフレクタの鎖錠を解き、同時に圧油阻止弁を開いて、デフレクタ・サーボモータ用配圧弁(720)、および No. 1 ニードル・サーボモータ用配圧弁(667-1)に圧油を送った後、起動停止用ソレノイド(65S)を動作させて、危急停止装置(670)に圧油を送り、720からの排油を阻止すれば、デフレクタ・サーボモータ、したがって、4個のデフレクタおよびNo. 1 ノズルのみは、調速機により制御されるようになる。No. 1 のノズルが開いて、No. 1 ニードル・サーボモータの行程が6図のA点に対応するものとすれば、これに連動するNo. 2 ノズル用切換配圧弁(665-1)が作動して、圧油を配油管(511)によりNo. 2 ノズルの補助配圧弁(666-2)に送り、そのピストンをスプリングに抗して押し下げ、No. 2 ニードル・サーボモータ(667-2)に至る配圧管(512)を、圧油阻止弁からの圧油管(510)に接続して、カムによりデフレクタに連動する667-2を活かし、No. 2 のノズルは、ニードル・サーボモータ固有の開放速度で、デフレクタ開度に対応した開度まで開き、No. 1, No. 2 のノズル開度は自動的に平衡する。No. 1, No. 2 のノズル開度が6図のB点に対応するものとなれば、前記とどのようにして、No. 2 ニードル・サーボモータに連動するNo. 3, No. 4 ノズル用切換配圧弁(665-2)が作動して、No. 3 および No. 4 ニードル・サーボモータ用配圧弁をそれぞれ活かし、No. 3, No. 4 のノズルをデフレクタに応じて開き、全部のノズル開度は平衡するようになる。水車の使用流量が減少して、再度、切換点Bに至れば、前述の動作とは全く逆に、まず665-2によりNo. 3 および No. 4 ニードル・サーボモータ用配圧弁は排油管に接続され、サーボモータは、スプリングにより、固有の閉鎖速度でノズルを閉鎖する。さらに流量が減少して切換点Aとなったときもどうよう、No. 2 ノズルが閉鎖する。したがって後続ノズルが起動したときに、デフレクタを閉方向に動かせば、後続ノズルは固有の開放速度で開くが、先行ノズルは開度を減少し、いずれも、デフレクタ開度に対応した同一開度を取り、また後続ノズルが閉鎖したときに、デフレクタを開方向に動かせば、後続ノズルは固有の閉鎖速度で全閉するが、先行ノズルのみはデフレクタ開度に対応した開度まで開いて行く。切換点A, Bにそれぞれ対応するNo. 1 および No. 2 ニードル・サーボモータの行程は、そのときの使用ノズル数により異なることは当然で、No. 2 ノズルを起動するときと閉鎖するとき、換言すれば使用ノズル数がNo. 1 ノズル1本のときと、No. 1, No. 2 のノズル2本のときとのA点に対応するNo. 1 ニードル・サーボモータの行程、およびNo. 3, No. 4 のノズルを起動するときと閉鎖するときとのB点に対応するNo. 2 ニードル・サーボモータ行程は、いずれもそれぞれ78mm および 33mm である。実際には、切換配圧弁(665-1), (665-2)の作動点を同一流量として、前記の78mm, 33mmに調整すれば、作動点付近の流量では、頻繁に

ノズル切換が起って、安定な運転を続けることが困難となるので、665-1は、No. 1 ニードル・サーボモータの行程78mm および 25mm にて、665-2はNo. 2 ニードル・サーボモータの行程81mm および 33mm にて(これらの値は現地における効率測定の結果によりさらに細い調整ができるよう、整定値に相当量の幅を持たせてある)作動するように整定してある。8図は負荷増加のときの、9図は負荷減少時の効率の変化を示すものである。また、各ニードル・サーボモータの全行程はNo. 1, No. 2 をいずれも85mmに、No. 3, No. 4 を65mmにしてある。

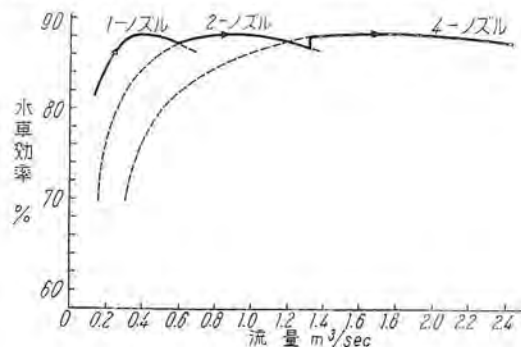
#### イ. 水位調整器とノズル切換操作

本発電所の水位調整器には、ノズル切換時に生ずる水車流量の変動を極力抑える装置を付加してある。10図は、その概要を示す説明図で、70W, 65M, 77M, などは2図におけるものと同一である。77W1, 77W2は2図の77Wと構造、動作は全く同じ平衡継電器でWL1, WR1 および WL2, WR2 はそれぞれ77W1, および77W2の接点L, Rにより動作する操作継電器である。77WM1, R-77W1, 77WM2, R-77W2も2図の77WM, R-77Wに対応するもので、本発電所では前記式(4)の $H_1, H_2$ を

$$H_1 = 9.99 \text{ m (水梯溢流天端 10.0 m)}$$

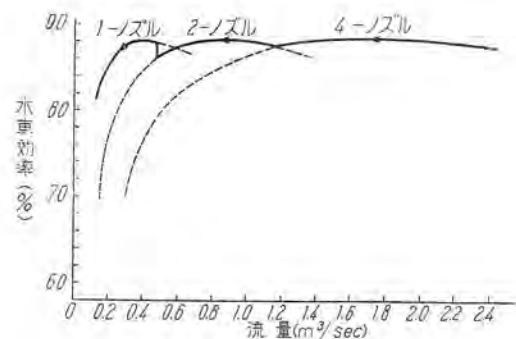
$$H_2 = 9.81 \text{ m} \quad \text{に選んである。}$$

33H1, 33H2はR-77W1の位置閉鎖器で、2図のそれに対応し、33H1a, および 33H1bは水位が9.99m以



8 図 負荷増加時の効率曲線

Fig. 8. Efficiency curve under increasing load for 4 nozzle pelton wheel.



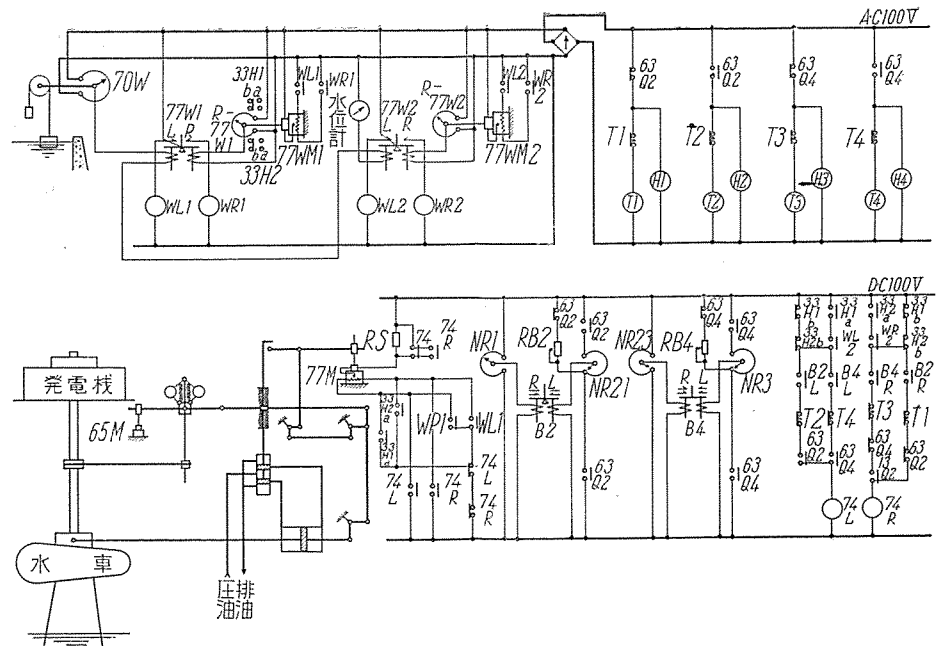
9 図 負荷減少時の効率曲線

Fig. 9. Efficiency curve under decreasing load for 4 nozzle pelton wheel.



上となったときにそれぞれその接点を閉路および開路し、33H2a および 33H2b は水位が 9.81m 以下となったときにそれぞれその接点を閉、開するもので、水位調整および以下述べる切換操作に使用されている。また、使用ノズル数により、デフレクタ・サーボモータ開度は、そのときの水車流量と一義的な関係を有しないから、本発電所では、導水弁開度を水位調整器に負帰還することは取止め、77W1 により水位の変動方向 ( $dH/dt$  の正負) により 77M を間歇操作してデフレクタ・サーボモータを制御し、水位調整をおこなっている。この場合も、前述したように 77M

に直列抵抗 RS を挿入し、77M を減速して、77W1 の 1 回調整流量を適当なものとしているが、一方、後続ノズルが、起動あるいは閉鎖したときに生ずる水車流量の急変を極力押えることが必要である。後続ノズルの開閉速度は、落差、水圧鉄管などの周囲条件から許容される水圧変動率を超えないように決定されるものであって、後続ノズルの起動、閉鎖に伴う水車流量の変動率も、この開閉速度に関係するから、前述したように、後続ノズルが起動したときには、デフレクタ・サーボモータを閉方向に動かして、先行ノズルを閉鎖し、後続ノズルが起動したときには、デフレクタ・サーボモータを開方向に動かして先行ノズルを開き、かつ、その操作速度を、後続ノズルの開閉速度に対応させれば、後続ノズルの状態変化による水車流量の変動を打消することができる。しかし、この流量平衡操作は、水位、および流込量と水車流量との差に関連して行うのが効果的で、流量差が大きく、かつ、水位が許容水位範囲を超えているときには、



10 図 4 ノズルペルトン水車の電気式水位調整器説明図  
Fig. 10. Schematic diagram of electric water level regulator for 4 nozzle pelton wheel.

後続ノズルの状態変化による水車流量の変動は、かえって流量差を少くし、かつ水位を許容範囲に持ち来す効果を有するので、ノズルの状態変化に委ねる方がよい。本発電所では 1 表に示すように水位が許容範囲にある場合には無条件に、水位が許容範囲外にあるときには、水位の変動方向により、ノズル切換時の流量平衡操作を行っている。なお、後続ノズルが閉鎖するとき、No. 3, No. 4 ノズルは、サーボモータ行程 33mm で閉鎖するが、このときは、No. 1, No. 2 ノズルを 78 mm まで開き、No. 2 ノズルは 25mm で閉鎖するが、このときは、No. 1 ノズルを 64mm まで開けば水量は平衡する。10 図の 77W2 はこのときの水位変動方向を検出するもので、前述の 77W1 と全く同じものであるが、77W1 の動作範囲を (水位調整器として必要な感度の点から) 9.8 ~10.0m に限定したために、別に設けたものである。NR1, NR21, NR23, NR3 は 7 図に示すように、それぞれ No. 1, No. 2, No. 3 ニードル・サーボモータに取付けられて、その開度に比例して抵抗値を増減する開度応動抵抗で、平衡継電器 B2, B4 に図示のように接続してある。63Q2, 63Q4 は、No. 2 および No. 4 ニードル・サーボモータ用補助配圧弁(666-2), (666-4) に取付けた油圧継電器で、いずれも、後続ノズルが起動すれば動作し、閉鎖すれば不動作となるものである。いま、たとえば、No. 2 ノズルが起動したとすれば、63Q2 が動作し、B2 は、No. 1 と No. 2 のノズル開度が平衡して、NR1 と NR21 との抵抗値が等しくなるまで、その接点 B2L を閉路し続ける。したがって、1 表に示すように、水位が 9.99m 以上で 33H1a が閉路しているときに、水位が降下して WL2 が動作するか、水位が許容範囲内にあるとき、33H1b, 33H2b がともに閉路しているときには、

1 表 流量平衡操作方式

後続ノズルの状態変化		ノズル 起 動			ノズル 閉 鎖		
水 位 変 動 方 向		上昇	変動なし	降下	上昇	変動なし	降下
水 槽 水 位	9.99 m 以上	操作せず	操作せず	下段に同じ	現象として起り得ない		
	9.99 m より 9.81 m まで	後続ノズルと開度が平衡するまで先行ノズルを閉鎖する			水車流量が切換前の流量となるまで先行ノズルを開く		
	9.81 m 以下	現象として起り得ない			上段に同じ	操作せず	操作せず

操作継電器 74L が動作し、水位調整器回路を開くと同時に、RS を短絡して、77M を急速に負荷減少側に回転し、No. 2 ノズルの開放速度に対応する速度で、No. 1 ノズルを閉鎖する。ノズル開度が等しくなれば、B2L は開路し、74L は不動作となって、流量平衡操作は停止され、再び水位調整器により、ノズル開度を調整することになる。なお各ノズルはすべてその開、閉速度がそれぞれ同一となるよう、あらかじめ調整されているが、これを、常に厳密に一致させることは困難で、この速度の不均一に基因する過渡的なノズル開度の不平衡により、再び B2L が動作し、水位調整を妨げる恐れがあるので、流量平衡操作は、ノズルの切換があるごとに 1 回に限定している。T1~T4 は、このために設けた時限継電器で、たとえば、T2 について説明すれば、63Q2 が動作したとき、時限要素 T2 および保持線輪 H2 が付勢される。T2 の整定時限が経過すれば、はじめて、T2 はその接点を開き、H2 により開路状態を継続して、74L の動作回路を開路し続ける。したがって、T2 の動作時限を適当に整定すれば、流量平衡操作は 1 回に限定することができる。なお、T2 は (T1, T3, T4 もどうようであるが) 63Q2 が不動作となり、H2 が消勢されると、瞬時に復帰するものである。No. 3, No. 4 ノズルが起動したときも、上記とどうよう、B4 は、No. 2 ノズルと No. 3 ノズル (No. 4 ノズルは常に No. 3 ノズルと同開度を保つ) の開度が平衡して、NR 23 と NR3 の抵抗値が等しくなるまでその接点 B4L を閉路し、T4 が動作するまで 74L を動作させる。つぎに、たとえば No. 3, No. 4 ノズルが閉鎖したとすれば、63Q4 は不動作となり、B4 の右脚線輪は、調整抵抗 RB4 に接続される。RB4 は、1 表に記載したように、水車流量が、No. 3, No. 4 ノズル閉鎖前の流量となるまで No. 2 ノズルを開くための抵抗であって、その抵抗値は、No. 1, No. 2 ノズルが前述の規定開度まで開いたときに、NR23 による B4 の左側電磁力に、右側電磁力が平衡するよう決定してある。したがって、63Q4 が不動作となり、No. 3, No. 4 ノズルが閉鎖するに伴い、NR3 の抵抗値は減少して行くが、B4 の右脚線輪には、RB4 による一定電磁力が発生し、その接点 B4R を閉路するので、水位が 9.81m 以下で 33H2a が閉路しているときに、水位が上昇して WR2 が動作するか、水位が許容範囲内

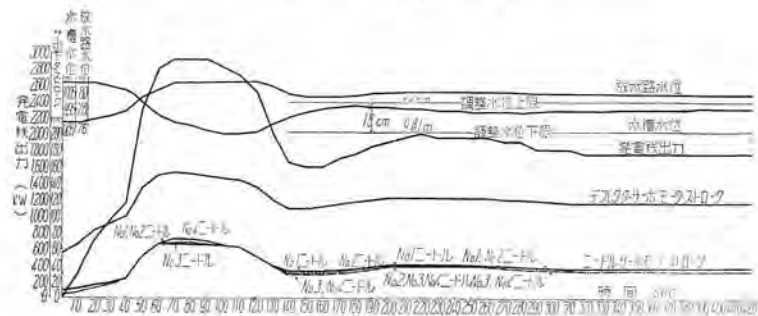
にあつて、33H1b, 33H2b がともに閉路しているときには、74R が動作して 77M を急速に負荷増加側に回転し、No. 3, No. 4 ノズルの閉鎖速度に対応する速度で、No. 1, No. 2 ノズルを開く。No. 1, No. 2 ノズル開度が規定開度となれば、B4R は開路し、74R は不動作となって、流量平衡操作は停止され、T3 が動作して、この操作を 1 回に限定する。No. 2 ノズルが閉鎖したときもどうよう、抵抗 RB2, 継電器 B2, T1 により、平行操作を行うものである。

#### 4. 試験結果

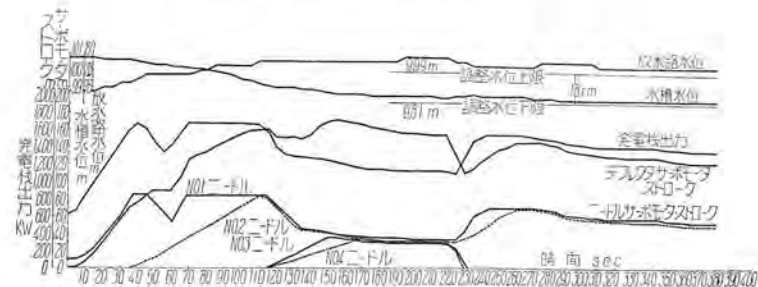
11 図は東北電力、松神発電所 (2 表参照) における試験結果の一例である。この発電所は、上流の大池第 2 発電所を親発電所として遠方制御され、親発電所から水位



11 図 松神発電所水位調整器試験  
Fig. 11. Test record of electric water level regulator for 6,500 kW francis turbine at Matsugami Power Station, Tohoku Denryoku K.K.



12 図 石井発電所水位調整器試験  
Fig. 12. Test record of electric water level regulator for 2,800 kW 4 nozzle pelton wheel at Ishii Power Station, Kansai Denryoku K.K.



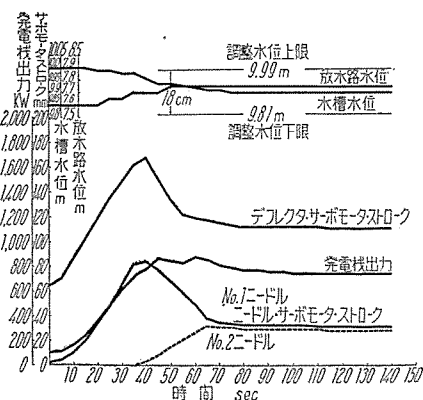
13 図 石井発電所水位調整器試験  
Fig. 13. Test record of electric water level regulator for 2,800 kW 4 nozzle pelton wheel under high efficiency operation, at Ishii Power Station, Kansai Denryoku K.K.

調整器の使用、除外ができるようになっている。調整水位の上限を EL. 79.14m (水槽溢流天端 -EL. 79.25m)、下限を EL. 78.84m とし、水位検出部にはセルシン式送量器を使用した。12 図～14 図は関西電力、石井発電所における試験結果である。12 図はノズル切換を行わない通常のペルトン水車として運転した例で、水車を比較的長時間停止した後に起動し、発電機を並列して直ちに水位調整器により負荷したものである。発電機並列後、約 5 分にて安定な運転に入っている。13 図は、やはり水車を長時間停止した後、ノズル切換による高能率運転を行わせた例で、並列後 35 秒にて No. 2 ノズルが起動し、水槽のバック・ウォーターの影響により 115 秒にて No. 3, No. 4 ノズルが起動して、水槽水位を急速に許容範囲内に収めた後、No. 3, No. 4 ノズルを閉鎖して、並列後、約 6 分で安定な 2 ノズル運転を続けている。本図より明らかなように、後続ノズルの状態変化後、急速にデフレクタ・サーボモータ、およびニードル・サーボモータ・ストロークが変化しているのは、流量平衡操作の結果で、とくに後続ノズルの起動時には、発電機出力には大した変動が見られない。後続ノズルの停止は、ニードル・サーボモータ・ストロークの小さいところで起るので、ノズル全閉までの時間が短く、流量平衡操作を行っても、発

電機出力には変動が現われている。また、ニードル・サーボモータの開放速度に不揃いが見られるのは、サーボモータ開側絞り弁の調整不足の結果と考えられる。14 図は水車を無負荷運転して水槽に湛水した後、水位調整器を使ったときの負荷状況の一例で、負荷後 35 秒にて No. 2 ノズルが起動し、1 分 20 秒後には安定な運転に入っている。2 表に電気式水位調整器の製作実績を示す。

## 5. む す び

以上、流れ込み式水力発電所の電気式水位調整器について述べた。日本では、水力発電所は流れ込み式発電所が多く、取水河川の自流に応じて運転するベースロード・ステーションが大半で、調整池式発電所は専らピークロード・ステーションとして尖頭負荷時にのみ運転されるため、通常、水位調整器は流れ込み式発電所に設置されて、水車調速機の負荷制限装置を制御することになっている。このような調速機には、もはや、電力、周波数調整装置としての調速機本来の姿はなく、単に負荷遮断時の水車過速度防止装置、いわゆるエマージェンシ・ガバナとしての使命しか存在しないが、流れ込み式発電所の性格から考えれば、やむを得ないことである。事例には乏しいが、調整池式発電所であって、河川の自流に応じてベースロードをまかないながら、尖頭負荷にも対処して、その水車発電機をシステムの安定度維持に寄与させる必要がある場合には、水位調整器により調速機速度調整電動機を制御すればよく、このような調整制御は、即応性に乏しい従来の機械式水位調整器をもっては到底不可能で、電気式水位調整器によりはじめて可能となるものと思われる。なお、ときには逆調整池発電所などにおいて、放水路水位を一定に調整することがあり、また揚水ポンプ所においては、揚水池水位を調整することが行われるが、このようなときには、水位応動抵抗 70W を放水路、または揚水池に設置して、どのような方法によって水位調整を行うことができる。攪筆するにあたり、ご指導を賜った関西電力伊藤建設部次長をはじめ、厳冬の候、数度にわたり夜を徹して試験調整にご協力下さった関西電力、新三菱重工、ならびに当社の関係者各位に衷心より謝意を表する次第である。



14 図 石井発電所水位調整器試験

Fig. 14. Test record of electric water level regulator for 2,800 kW 4 nozzle pelton wheel under high efficiency operation, at Ishii Power Station, Kansai Denryoku K.K.

2 表 電気式水位調整器製作実績

納入先	発電所名	水車型式	台数	水車出力 (kW)	有効落差 (m)	流量 $m^3/sec$	回転数 (rpm)	水位調整範囲 (cm)	水位検出方式	備 考	納入期日
関西電力	石井 発電所	縦軸 ペルトン	1	2,800	161.5	2.02	450	18	抵抗式	高能率運転, 夜間無人	30-10
東北電力	松神 発電所	〃 フランシス	1	6,500	76.47	9.76	428.5	30	セルシン式	遠方制御	30-8
北陸電力	白峰 発電所	〃 〃	2	7,800	181.0	5.1	750	30	抵抗式	1 人制御	31-12
住友共同電力	川口 発電所	〃 ペルトン	1	7,500	199.2	4.35	360	30	〃	高能率運転, 遠方制御	製作中
長野県庁	春近 発電所	〃 フランシス	2	12,700	151.8	9.57	600	30	〃	1 人制御	〃
北陸電力	牧発電所 (3号機)	〃 〃	1	16,200	94.8	19.6	360	未定	〃	〃	設計中



# ダイヤレジン含浸計器用変成器

伊丹製作所 樺沢孝治\*・大野 暁\*

## Diaresin Immersed Instrument Transformers

Itami Works Takaji KABASAWA・Satoru OHNO

Dry type instrument transformers treated with insulation varnish or compound according to old practice have a number of defects. Especially they lack dependability in regard to the moisture absorption. In the latest trend, all manufacturers have started to use polyester resin for the insulation of dry type units with success. Mitsubishi has been studying on the material and treatment with them for many years and now is in a position to introduce to the market dry type instrument transformers vacuum impregnated with Diaresin according to a unique method. They are widely acclaimed by various circles with promising future.

### 1. ま え が き

従来の絶縁ワニスあるいはコンパウンド処理乾式計器用変成器は、種々欠点があり、とくに吸湿の点で信頼性に欠けていたが、最近各社ともポリエステル樹脂を使用したモールド型乾式変成器の製作を開始し、絶縁劣化の問題を解決して特高回路でも安心して使用できるように努力している。この種の計器用変成器は一般に不飽和ポリエステル樹脂を使用したもので、機械的にけんろうで外観もよく電気的諸特性が優秀である上、耐水・耐油・耐酸・耐アルカリ性・金属に対する接着性などの点で従来の乾式はもちろん油入型にまで替って使用されることが推察される。

当社においても早くより材料および処理方法の研究を重ね、独自の真空含浸方式による“ダイヤレジン含浸型乾式変成器”を多量に製作しており、その使用実績に対しては各方面より好評を得ているところである。以下材料の一般的性質、含浸方式試験結果およびモールド型との比較などについて紹介し、参考に供したい。

### 2. ポリエステル樹脂

一般にポリエステル樹脂は不飽和多塩基酸（無水マレイン酸・アジピン酸等）と多価アルコール（エチレングリコール・アリルアルコール等）の混合物を加熱、縮合させて得られる不飽和鎖状のエステルに（このようにしてできた重合樹脂はかなり粘稠な液体か固体であるが）常圧で適当な沸点をもつ反応性ビニール単量体（スチロールモノマー）を添加したもので、これに触媒（過酸化ベンゾイル等）と重合促進剤（ジメチルアニリン等）を用いて重合硬化せしめたものである。

この樹脂は反応に当って内部より硬化し、また縮合性樹脂の場合におけるように、水あるいは揮発分の発生を伴わず、加圧する必要がない。硬化した樹脂は不溶不融性のきわめて安定した物質である。

これらが可塑性絶縁材料として重要な要素であって適宜な処理方式と相まてば後述のように機械的強度・耐水・耐油・耐薬物特性・電気的特性・なかなづく耐吸湿など諸特性にきわめて信頼度が高い。

### 3. 三菱ダイヤレジン

ダイヤレジン（略して DR と記す）はポリエステル樹脂の一種であって、三菱電機において製作されている。常温においては微黄色、透明の液状をなしている。

適用すべき機器および処理工作のいかんによって DR の品種も数種にわたっているが乾式変成器に対しては下記の 2 種類が使用されている。

すなわち DR-CC と呼ばれる粘度の高い（10～12 ポイズ）ものおよび粘度の低い（0.8～1.0 ポイズ）DR-FF である。

### 4. DR の諸性質

乾式変成器に使用される DR-FF と従来使用されてきた絶縁コンパウンドの物理的性質の比較は 1 表のごとくである。

耐薬物性について比較した結果は 2 表のごとくである。

電気的性質については 3 表、4 表に示している。

誘電率、力率は 1,000 V, A-C 60 c/s シェーリングブリッジより測定し、絶縁抵抗は直偏法により体積固有抵抗として表わした。電極は 70～80 mmφ、ガードリングと主電極との間隙は 1 mm 以下で電極は全部銀粉塗料を使用した。

その結果は 3 表のようになる。

耐電圧は 12.5 mm φ の球状電極を使用し、800～1,000 MΩ 位の高抵抗の導電ワニスを電極部に 50 mm φ 位塗布し測定した。

その結果は 4 表のごとくである。

さらに耐熱・耐水・耐薬物・耐油の諸性質についての試験結果はつぎのとおりである。

1 表

	DR-FF	コンパウンド
比重 20°C	1,081	1,024
硬度 ショアー A 20°C 100°C	97 75	94 25 (80°C)
1 ヶ月浸水後の吸 水率%	0.3	0.3
10 hr 煮沸後の吸 水率%	0.6	—
変圧器油 1 ヶ月浸 油後の吸水率%	0.3	溶 解

2 表

	DR-FF	コンパウンド
塩 酸	異 状 な し	異 状 な し
硝 酸	〃	〃
硫 酸	〃	〃
苛性ソーダ	〃	〃
アセトン	膨 潤	溶 解
ベンゾール	〃	〃
アルコール	少しく軟くなる	異 状 な し
変圧器油	異 状 な し	溶 解

3 表 DR-FF の電氣的性質

温度 (°C)	13	42	72	100	122
$\epsilon$	3.35	3.52	3.87	4.34	4.57
$\tan \delta$ %	0.95	1.12	2.37	2.79	2.08
$\delta \times 10^{12} \Omega \text{ cm}$	10,000<	10,000<	1,000	50	6

4 表

温 度 (°C)	30	70	115
DR-FF kV/mm	66.4	80以上	80以上

### ア. 試験片

DR-CC, DR-FF をポバールフィルムで包んだガラス板 2 枚の間に流しこんで加熱、硬化させたもので、空気に触れない状態で硬化したわけである。DR-CC だけは、その使用条件から考えてこれでは実際の場合と異なるから下記のように特別の処理を施したものを作った。各試験片の硬化条件はつぎのとおりである。

(1) DR-CC-A 試料を 70°C で 2.5 mm 厚さの板状に硬化させ、これを 15×30×2.5 mm の大きさに切断したのち再び試料を表面に塗り、空気に触れた状態で 110°C で 16 時間加熱した。すなわち、この試験片の表面はスチロールが 1 部蒸発し、色が濃くなり、つやが増して使用状態における表面と同じ状態になっているわけである。以後 CC-A と称す。

(2) DR-CC-B 試料を 70°C で 3 時間、110°C で 16 時間空気に触れない状態で硬化させ、15×30×2.5 mm の大きさに切断したものである。この試験片は実用状態の CC 樹脂の表面を一層を剥したような組織である。以後 CC-B と称す。

(3) DR-FF, CC-B と同様に硬化させ、15×30×2.5 mm の大きさに切断したものである。以後 FF と称す。

以上の試験片は、試験前にコンディショニングを一定にするため 50°C で 3 時間乾燥し、デシケータで一昼夜以上

保って各試験を行った。

### イ. 試験項目および方法

(1) 耐熱試験 200°C の熱風循環炉中に 10 時間おく。

(2) 耐水性、浸水試験は水中に常温で 1 ヶ月間浸漬し、煮沸試験は沸騰水に 25 時間浸漬した。耐湿試験は日中 8 時間は 40°C, RH 100% の恒温恒湿槽中におき、夜間はそのまま室温に放置した。期間 1 ヶ月、夜間は気温が下るため水滴がつき一種の浸水状況になった。

(3) 耐酸、耐アルカリ性、耐酸試験は 10% の塩酸、硫酸、硝酸中に 20 日間常温浸漬し、耐アルカリ試験は 5% の苛性ソーダ中に 20 日間常温浸漬した。

(4) 耐溶剤性、耐溶剤試験はベンゾール、スチロールモノマ、醋酸エチル、アセトン中に 25 時間常温浸漬しエチルアルコール、ガソリン (2 号揮発油) 中に 7 日間常温浸漬した。

(5) 耐油性 耐油試験はトランス油中に 30 日常温浸漬した。

### ウ. 試験結果

(1) 耐熱性 200°C で 10 時間加熱後に外観はいずれも褐色を少し増し、試験片の長さとは幅は CC-A は変化がないのに反し、その他は多少収縮または伸びがあり、重量減少は CC-A が少く、その他はこれより多く、硬度は CC-A, B がわずかに硬化の傾向を示し、その他は変化がない。

(2) 耐水性 CC-A および CC-B は沸騰水中に 25 時間つけると吸水による重量増加が若干あり硬度も低下するが、その他はいずれも各条件に対して安定である。また水中への溶出はまったく認められなかった。

(3) 耐酸、耐アルカリ性 耐酸性はいずれも強く、耐アルカリ性は CC はやや弱い、FF は強い。

(4) 耐溶剤性 ベンゾール、スチレン、醋酸エチルおよびアセトンに浸けたものは、いずれも膨潤し重量を増加したが、アルコール、ガソリンおよびトランス油に対しては比較的強く、また溶剤の試験片へのしみはあるが、試験片が溶剤中に溶け出すことはほとんどなかった。

## 5. ダイアレジン含浸の方式

上述のように素材の諸特性は絶縁物としてきわめてすぐれたものであるが、これが変成器に実施された場合巻線細部にまでよく浸透した上で重合硬化することが不可欠であって、ことに PT の場合はなおさらである。

このためには DR の注入を真空状態において行うことのほかに DR の流動性を適当に考慮する必要がある。

すなわち粘度の低い DR は容易に巻線深部まで浸透することは明らかであり、また高粘度の DR は巻線外周に比較的厚く付着して内部には浸入しない結果となる。

いま高粘度の DR に巻線をその一部分を残して浸し硬化させれば、巻線は比較的厚い殻に包まれた状態となる。

ついで、これを真空中におき殻が着いていない部分か



ら低粘度の“レジン”を注入すれば巻線深部にまで浸透し洩れることなく殻の内部にたたえられそのまま硬化する。最後に注入部分を高粘度“レジン”で覆い硬化させる。

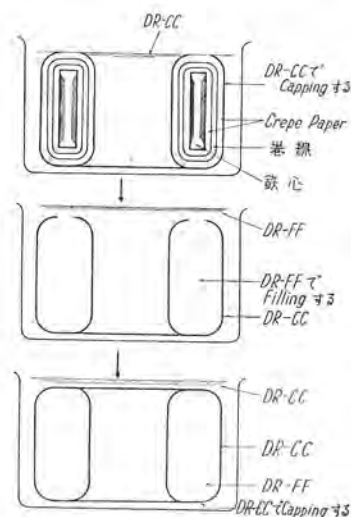
こうすれば内部まで十分に浸透硬化の目的を達して素材の特性を完全に活用することができる。

三菱ダイヤレジン含浸型はまったく以上の原理によって処理され、実際には高粘度の DR-CC による処理（これを Capping と称している）を最少 2 回以上行って外殻の完全を期し、低粘度の DR-FF 含浸（filling と称する）に際しては窒素ガスによって加圧している。

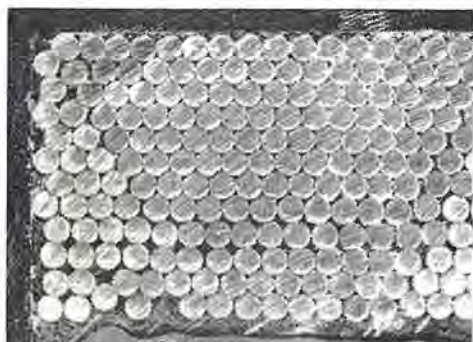
なお、巻線相互間および巻線鉄心間には従来のワニステープまたはクロースに代りクレープ紙を使用している。この紙は非常に強い上に引張れば約 2~3 倍に伸びるヒ

ダを持っておりこのヒダ間に DR を良く保持し、紙質もまた浸透性が非常に良く DR を巻線細部まで浸透させ、含浸樹脂硬化後はちょうどベークライト状になり、かつクレープ紙が補強となって絶対にキレツを 방지電気的機械的に非常に強いものになる。

また使用電線は当社独特の特殊エナメル銅線を使用してい



1 図  
Fig. 1.



2 図 モデルコイル断面図  
Fig. 2 Section of model coil.



3 図  
6,600/110 V 200VA  
6 号 A  
PT 巻線断面図  
Fig. 3.  
Section of potential transformer winding.

る。この電線も当社で生産しており、電気的諸特性はもちろんのこと、熱的、機械的とくに耐薬物的に非常に優秀であり DR、クレープ紙と相まって乾式変成器を非常に高性能なものにしている。

## 6. ダイヤレジン含浸型の性能的特質

### ア、湿気の浸入がほとんど考えられない

従来の乾式変成器の絶縁劣化の主原因は吸湿であるが、その原因は絶縁ワニスにあり、この絶縁ワニスは合成樹脂・アスファルト・キリ油・亜麻仁油などを加熱濃縮してから揮発油・ベンゾールなどの溶剤に溶かして液状にしたもので、この溶剤は巻線内部に含浸しやすくするために加えたものであるから、乾燥の際完全に追い出す必要がある。また乾燥処理の方法によっては、巻線の内部で溶剤の一部が逃げ場を失ってそのまま残ったり、蒸発の際乾燥皮膜の中に気泡を残し、ワニス皮膜の絶縁材料としての特性を低下させるのである。また従来のワニスは約 50% の溶剤を含んでいるため、乾燥処理の際皮膜は約 1/2 の厚さにやせるから、巻線に巻いた繊維質材料の隙間を完全に埋めるには処理を何回もする必要がある。しかも溶剤が蒸発し去るとき微細な穴が残れば、これを完全に埋めることは困難である。このため絶縁コンパウンドの真空含浸が行われるようになったが、つぎにのべるような難点がある。

これに反して前述のような当社独特の DR 含浸型変成器では樹脂がよく充填し気泡を残さず硬化するから湿度の浸入がほとんど考えられず、しかも DR 自体の吸水率は 1 表のようにきわめて少く、吸湿特性試験においてもコンパウンド処理変成器に比べ格段の差を示している。

したがって、長期末使用のまま保管してあっても特性には何ら変化なく、また使用時に再乾燥の必要はない。

### イ、温度に対して影響が少い

従来のコンパウンドは常温において固形であるため、巻線に含浸させるためには加熱して液状とすることを要する。耐熱性を保つためには軟化点の高いものが望ましいが、操作時の高温が他の絶縁材料に悪影響を与える点が問題となる。

また軟化点の低いものを使用すれば当然耐熱性が悪くなる。これに反して DR は常温において液状であり、操作温度も 100°C 内外のため操作が簡単である。また温度特性試験においても 4 表のように DR は従来の絶縁材料の概念を破り温度が上昇すればむしろ耐電圧値が良くなるという結果を示している。またコンパウンドは大体 80°C 内外で軟化し始めるから室温の高いところでは使用不可能である。

DR 処理変成器は当社エナメル銅線と相まって 120°C まで常時使用ができる。-30°C の冷熱試験においても変成器クランプに付着している DR に 3 カ所約 5 mm 長さのヘヤークラックがはいったほかは外観に異常なく、その直後耐圧その他の各種試験を行ったが異常はなかつ



た。

5 表

### ウ. 過電流試験における電磁力に対する抵抗が大きい

DR は樹脂配合により適度の硬度および柔軟性を持たしている。巻線構造と相まって過電流試験における電磁力に対する抵抗が大きい。絶縁その他に損傷を生じない。当社では過電流強度 40 倍を標準としているが、150 倍、300 倍のものも製作している。

### エ. 耐薬物的に強い

DR は 2 表に示すように大部分の薬品に対して強く、また使用電線も当社エナメル銅線を使用しているので、DR 処理変成器は化学工場その他有害ガス発生での使用も十分可能である。

測定項目			吸 湿 条 件 96% RH					
			1 日室温 29°C	5 日室温 26°C	16 日室温 23°C	48 日室温 16.5°C	106 日室温 18°C	133 日室温 17°C
ダイヤレジン	1 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$2.5 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^{12}$	$0.956 \times 10^{12}$	$3.1 \times 10^{11}$		$4.7 \times 10^{10}$
		tan δ (%)	2.1	2.4	1.85	1.5	1.6	7.7
		容量 (P.F)	99	99	99	99	98.5	90
	2 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$1.88 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^{12}$	$1.24 \times 10^{12}$	$5.1 \times 10^{11}$		$8.56 \times 10^{10}$
		tan δ (%)	2.1	1.9	2.15	1.55	2.05	2.4
		容量 (P.F)	205	210	202	202	188	197
コンパウンド	1 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$3.0 \times 10^{10}$	$1.5 \times 10^{12}$	$1.24 \times 10^{12}$	$2.4 \times 10^{11}$		$2.38 \times 10^{10}$
		tan δ (%)	2.35	3.27	1.92	1.9	1.7	9.2
		容量 (P.F)	100	108	102	108	100	105
	2 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$2.03 \times 10^{10}$	$1.5 \times 10^{10}$	$3.4 \times 10^{10}$	$5.8 \times 10^{10}$		$9.7 \times 10^8$
		tan δ (%)	8	9.6	7.7	7.2	8.5	24
		容量 (P.F)	98	99	98.5	98.5	85	90
	1 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$2.41 \times 10^9$	$2.32 \times 10^9$	$2.89 \times 10^9$	$1.41 \times 10^9$		$3.6 \times 10^8$
		tan δ (%)	18	15	14.4	16.8	19	34
		容量 (P.F)	183	182	177	182	180	220
	2 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$2.42 \times 10^{10}$	$1.6 \times 10^{10}$	$3.4 \times 10^{10}$	$6 \times 10^9$		$1.93 \times 10^8$
		tan δ (%)	8.8	9.4	7.6	6.9	7.5	18
		容量 (P.F)	98	99	99	99	98	90

6 表

### 7. 製品における劣化試験

吸湿および温度の変化による絶縁劣化の状態を製品について試験した結果は 5 表、6 表のとおりである。

製品としては TN-0 型 6,900V 300-600/5A 40 VA 絶縁レベル 6 号 A のものである。

絶縁コンパウンド含浸型に比較して格段の差を示していることがわかる。

### 8. モールド型との比較

(1) 成型金型がいらないので低原価となる。

(2) 製作工程に成型金型から生じる制限を受けないからより量産ができる。

(3) 成型金型を考慮しなくてよいから、仕様に対して自由に設計ができる。

(4) 品質はモールド型に比較していさきかも遜色はなくむしろレジンの浸透は良いくらいである。

### 9. ダイヤレジン含浸型の標準定格

ダイヤレジン含浸変成器は 7, 8, 9 表を標準としているが、各型式とも JEC-118 および JIS-C1710~1713 の規格を十分満足するものである。4~12 図はその製品写真である。

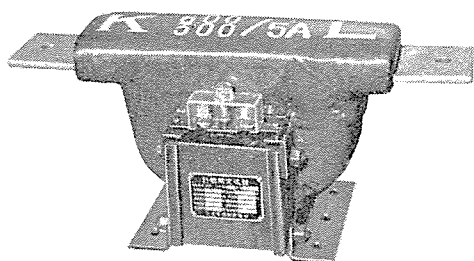
測定項目			測定温度				
			150°C	120°C	90°C	60°C	28°C
ダイヤレジン	1 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$2.00 \times 10^8$	$1.48 \times 10^9$	$2.63 \times 10^{10}$	$3.75 \times 10^{11}$	$1.50 \times 10^{13}$
		tan δ (%)		9.4	2.62	2.0	3.1
		容量 (P.F)		145	133	128	124
	2 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$4.49 \times 10^7$	$6.64 \times 10^8$	$2.50 \times 10^{10}$	$1.88 \times 10^{11}$	$3.75 \times 10^{12}$
		tan δ (%)		16.7	3.4	2.06	2.73
		容量 (P.F)		323	272	255	240
コンパウンド	1 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)	$2.08 \times 10^8$	$1.88 \times 10^9$	$3.19 \times 10^{10}$	$3.75 \times 10^{11}$	$1.88 \times 10^{12}$
		tan δ (%)		7.8	2.68	2	2.6
		容量 (P.F)		162	150	140	138
	2 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)			$4.05 \times 10^7$	$2.90 \times 10^8$	$2.24 \times 10^{10}$
		tan δ (%)			50<	24.8	7.4
		容量 (P.F)			180	147	120
	1 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)			$4.81 \times 10^9$	$3.45 \times 10^7$	$2.57 \times 10^9$
		tan δ (%)			50<	50	13.3
		容量 (P.F)			450	340	218
	2 次 アース	絶縁抵抗 (Ω)			$3.77 \times 10^7$	$2.75 \times 10^8$	$2.34 \times 10^{10}$
		tan δ (%)			50<	26	7.8
		容量 (P.F)			200	155	125

7 表 ダイヤレジン含浸計器用変流器一覧表

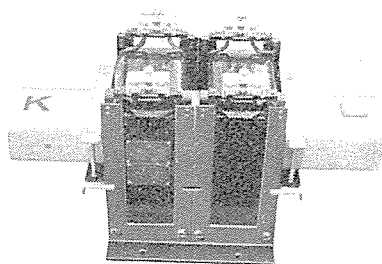
型名	最高回路電圧 (V)	1 次電流 (A)	相	負担 (VA)	絶縁階級	使用場所	摘 要
TN-0	3,450 6,900	5~1,200	単	15,40	3A, 6A	屋内	巻 線 型
TN-02				2×15,40			
TN-1				15,40	10A		
TN-12	2×15,40						
TW-0	3,450 6,900	1,000~6,000		15,40	3A, 6A		貫 通 型 1次碍管絶縁
TW-02				2×15,40			
TW-1				15,40	10A		
TW-12	2×15,40						
TW-2	23,000			15,40	20A		
TW-22				2×15,40			
TB-0	3,450 6,900	100~6,000		15, 40	3A, 6A	屋内外	巻 線 補償貫通型 1次碍管絶縁
TB-1	11,500				10A		
TB-2	23,000				20A		

8 表 ダイアレジン含浸計器用変圧器一覧表

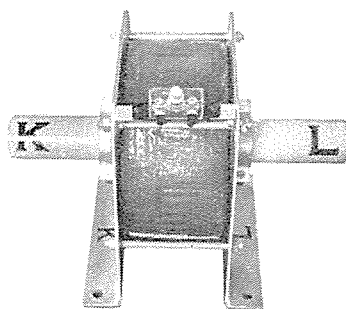
型 名	1 次電圧 (V)	2 次電圧 (V)	3 次電圧 (V)	相	負担 (VA)	絶縁階級	使用場所
TV-0	3,300	110		単	100,200	3A, 6A	屋内
TV-0X			110				
TV-0	6,600		110			6A	
TV-0X							
TV-1	11,000		110			10A	
TV-1X							



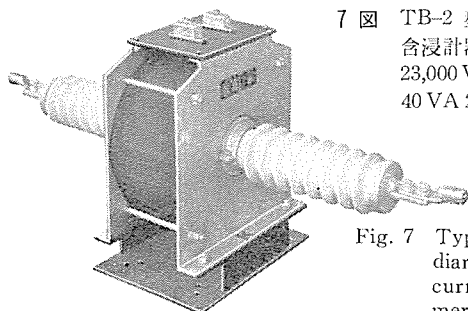
4 図 TN-0 型ダイアレジン含浸計器用変流器  
Fig. 4. Type TN-0 diaresin immersed current transformer.



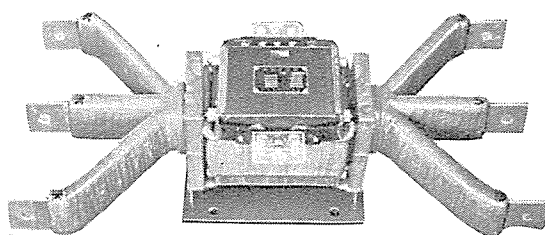
5 図 TW-02 型ダイアレジン含浸計器用変流器  
Fig. 5. Type TW-02 diaresin immersed current transformer.



6 図 TB-0 型ダイアレジン含浸計器用変流器 6,900 V, 300/5 A 40 VA 6 号 A 1.0 級  
Fig. 6 Type TB-0 diaresin immersed current transformer.

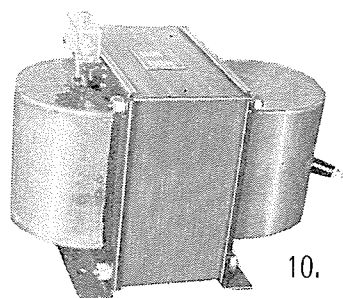


7 図 TB-2 型ダイアレジン含浸計器用変流器 23,000 V 300-150/5 A 40 VA 20 号 A 1.0 級  
Fig. 7 Type TB-2 diaresin immersed current transformer.

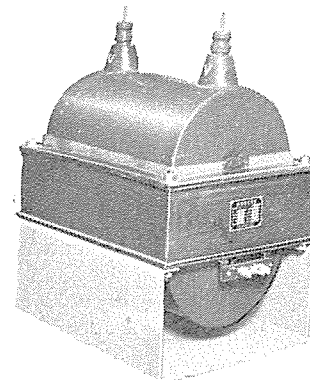
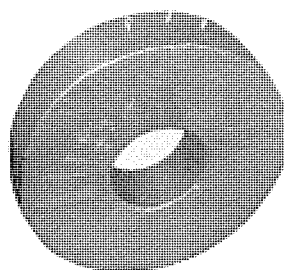


8 図 BS 型ダイアレジン含浸計器用変流器 (230 kV) 200/5A 40VA 1.0 級  
Fig. 8 Type BS diaresin immersed current transformer.

9 図 TZ-0 型ダイアレジン含浸零相変流器 6,900V 300 A 6 号 A  
Fig. 9 Type TZ-0 zero phase diaresin immersed current transformer.



10 図 TV-0 型ダイアレジン含浸計器用変圧器 6,600/110 V 200 VA 6 号 A 1.0 級  
Fig. 10 Type TV-0 diaresin immersed voltage transformer.



12 図 D-C 25,000A/D-C 5A 直流変流器補助変流器付  
Fig. 12. D-C current transformer with an auxiliary current transformer.

9 表 ダイアレジン含浸零相変流器一覧表

型 名	最高回路電圧 (V)	1 次電流 (A)	相	絶縁階級	使用場所
TZ-0	3,450 6,900	5~1,500	3	3A, 6A	屋内
TZ-1	11,500			10A	

## 10. む す び

以上ダイアレジン含浸型乾式変成器の材料および含浸方式について種々特質、利点を述べたが当社では乾式変成器のみならず小型巻線機器は全部 DR 真空含浸を行い、いずれも良好な成績をあげている。しかしながら技術の進歩は 1 日も停滞を許さないことは明らかで、今後ともダイアレジン絶縁工作法を一層改良発展させるとともにさらに高い技術の開発に努力したい。なお一般のモールド型変成器の欠点を改良した当社新方式によるモールド型乾式変成器についても日を改めて記する機会があろう。なお試作以来尽力を願った研究所石黒参事以下関係者ならびに伊電二工作課中野技師に感謝の意を表す。

## 参 考 文 献

- (1) ダイアレジン CC, FF, M2 の性質 (その 1) 技術メモ第 13593 号

# 高圧固定子コイルの耐電圧の管理

神戸製作所 板倉 信 郎\*

## Control over Dielectric Strength of High Voltage Stator Coils

Kobe Works Shinro ITAKURA

Dielectric strength is the most vital quality of high voltage stator coils and control over it has a great bearing on success in high voltage engineering. As a method to attain the goal, one having recourse to the statistic process is worthy of study. This is an article giving an example of a statistical quality control over the objects, starting with problems and proceeding with such steps as determination of controlled items, study on results and effectiveness, theoretical background.

### 1. ま え が き

水車発電機その他大形交流機用の高圧固定子コイルにおいて、耐電圧は重要な品質特性であるが、これを計量的に計測するためには破壊試験を行わなければならない。これには相当多額の費用がかかる。従来の品質保証の方法は、一般に規格電圧による耐圧試験の結果から良否を判定して保証するものであって、顧客からとくに要求されるとか、設計仕様や工作仕様を変更するなど特別のばあいのほかは、破壊試験による耐圧試験は行わなかった。これはいわば定性的な品質保証のしかたであるが、一般に全数検査を行うのであるから、消費者に対する品質保証の方法としては、これで十分であるといえる。しかしながら生産者が行う品質管理のための計測方法として見るときは、十分なものとはいえない。このような試験結果からは、ロットの品質が不良率など計数値で表現されるだけであり、破壊試験の結果から得られる計量値のばあいにくらべて、はるかに情報量にとぼしい。すなわち一般の試験によって規格に合格するばあいも、その品質水準が規格と定量的にどのような関係位置にあるのか、現状が果して合理的な水準にあるものかどうかなどが明らかでなく、また設計品質が規格に対して十分余裕があるときは、不良がほとんど出ないから、材料や中間工程あるいは半成品品質に変動があっても、それらの効果がどのように完成品品質に反映するかが十分把握できない。

われわれは昭和 29 年以降、コイルの最終工程から無作為に少数試料を抜き取り、その耐電圧を破壊試験によって計測して、母集団の品質分布・母不良率などを統計的に推定することにより、定量的に品質を保証している。またこのデータから管理図を作成し、あるいは分散分析法を適用するなどにより、品質の変動要因を解析し、材料や工程を管理するための資料として用い、完成コイルの耐電圧を改善しあるいは均質に保持することに役立て

ている。

コイルの絶縁品質には、耐電圧のほか種々の重要な特性がある。またコイルの品質を管理するためには、その手段として“品質の原因”となる材料や工程を管理することが一層重要な問題であるが、ここではこれら広範囲の問題にはふれず“品質の結果”であるコイルの最終品質特性のうち、とくに重要な耐電圧を取りあげ、その統計的取扱と、得られた情報の管理面への利用について概要を述べることにする。

### 2. 管 理 要 領

#### ア. 試料の抜取

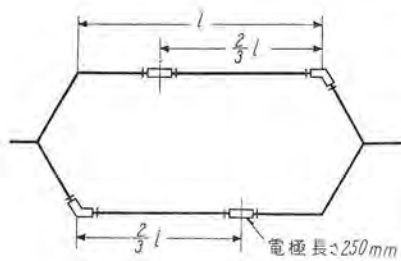
機械1台分のコイルの全ロットを製造日程で区分して、はじめの  $\frac{1}{3}$  のロットから無作為に 2 本、つぎの  $\frac{1}{3}$  のロットから無作為に 2 本、合計 4 本のコイルを抜き取る。これらを全ロットを代表する試料と考える。最後の  $\frac{1}{3}$  のロットから抜き取らないのは、経済上の理由と、得られた情報をその工事の終了前に工程にフィードバックして、必要なばあいの処置がその工事自体に対してもとりうるようにするためである。別に材料および工程は、全ロットを通じて管理状態に保持するように、管理図法などを用いて管理されるから、上のような試料から得られる情報が、全ロットすなわち 1 台分のコイル全体（有限母集団）またはそのときの工程自体（無限母集団）に関するものと考えても大きなかたよりはなない。なお以下のデータはすべてアスファルトボンド絶縁のコイルに関するもので、最近採用したダイアレジン絶縁のものはふくまない。

#### イ. 試料測定値

各試料ごとに 1 図に示す 4 箇所について、商用周波電圧による破壊試験を行い、1 分間耐電圧を記録する。試験は絶縁階級 6 号のときは 20,000 ボルトから、絶縁階級 11 号のときは 30,000 ボルトからはじめ、階段的に 5,000 ボルトずつ上昇させて破壊する。電圧上昇速度は 500 ボ

\* 工作部





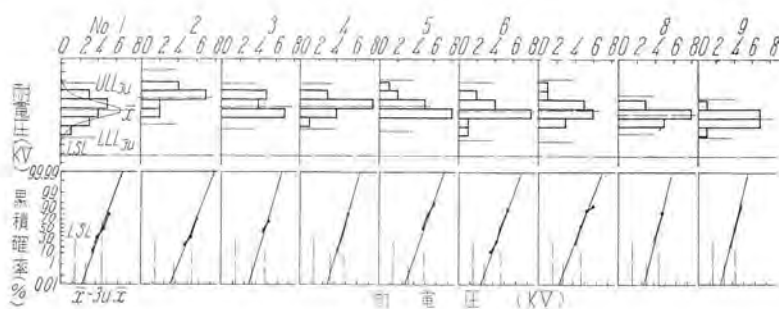
1 図 試料  
Fig. 1. Sample.



2 図 耐電圧試験中の試料  
Fig. 2. Sample under the ultimate strength test.

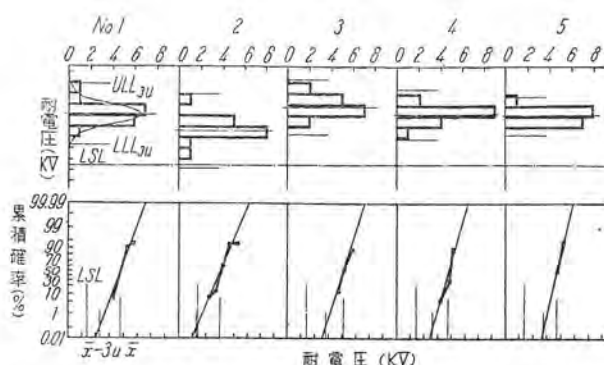


3 図 耐電圧試験装置  
Fig. 3. Equipment for ultimate strength test.



4 図 6,600 V 級コイルの耐電圧の分布 上図: ヒストグラムと推定した母集団正規分布曲線 下図: 累積相対度数図と推定した母集団累積正規分布曲線  
Fig. 4. Distributions of the ultimate strength of 6,600 V class coils  
Upper: Histograms and normal distribution curves of the estimated populations.

Lower: Cumulative relative frequency polygons and cumulative normal distribution curves of the estimated populations.



5 図 11,000 V 級コイルの耐電圧の分布 上図: ヒストグラムと推定した母集団正規分布曲線 下図: 累積相対度数図と推定した母集団累積正規分布曲線  
Fig. 5. Distributions of the ultimate strength of 11,000 V class coils.

Upper: Histograms and normal distribution curves of the estimated populations.

Lower: Cumulative relative frequency polygons and cumulative normal distribution curves of the estimated populations.

ルト毎秒で、各段階での保持時間（電圧上昇に要する時間をふくむ）は 1 分間とする。このようにして機械 1 台について 16 個の測定値が得られる。試験中の試料を 2 図に、試験装置を 3 図に示す。

### ウ. 解 析

#### (1) 母集団分布の推定

##### a. ヒストグラムと推定した母集団正規分布曲線

試料測定値から機械 1 台ごとにヒストグラムを画く。耐電圧が正規分布に従うものと考え、ヒストグラムの上に推定した母集団正規分布曲線を重ねて 4 図および 5 図の上図のように作図する。ただしつぎの式で求めた試料平均値および不偏分散平方根  $u$  をもって、それぞれ母平均  $\mu$  および母標準偏差  $\sigma$  の推定値とする。

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\hat{\sigma} = u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに

$x_i$ : 試料測定値

$n$ : 試料の大きさ

これによって試料および母集団分布の大小のすがたが一見してわかる。4 図の上図は 6,600 ボルト級、5 図の上図は 11,000 ボルト級のばあい、以下いずれも実測データによるものを示す。

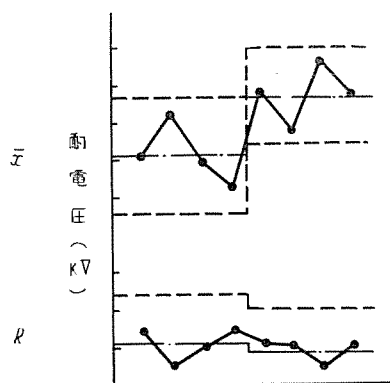
##### b. 累積相対度数図と推定した母集団累積正規分布曲線

試料測定値から累積相対度数図と推定した母集団累積正規分布曲線とを、4 図および 5 図の下図のように重ねて作図する。

これによって母不良率の推定などを行う。4 図の下図は 6,600 ボルト級、5 図の下図は 11,000 ボルト級のばあいを示す。推定不良率があらかじめ定めた基準の値をこえれば製造を中止し、そのロットおよび工程に対して処置をとる考えであるが、実際は図に見るように、そのようなばあいが起っていない。なお 3・ウ節の備考を参照されたい。

#### (2) 管理図などによる解析

機械 1 台ごとに試料測定値から、コイル内変動を級内変動、コイル間変動を級間変動として、6 図のように  $\bar{x}-R$  管理図をかいて、簡便な解析を行うほか、必要に応じコイルの部位（直線部と屈曲部または上口と下口）、ロットなどを因子として取り上げ、分散分析法などによってそれらの効果を検定する。工作法を改善した結果、最近のコイルでは直線部と屈曲部とで有意な差は認めら



6 図  
 $\bar{x}$ -R 管理図 (検定用)  
 Fig. 6.  $\bar{x}$ -R chart  
 (for test of  
 significance)

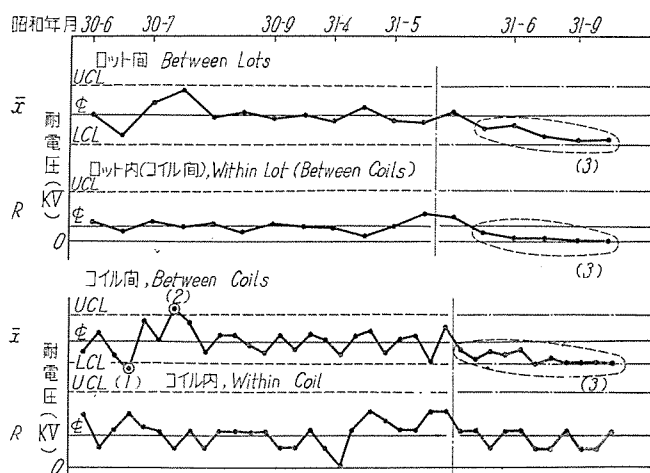
れない。

### (3) 管理図による調整

コイルの絶縁階級で層別して、7 図および 8 図のように  $\bar{x}$ -R 管理図を作る。7 図は 6,600 ボルト級、8 図は 11,000 ボルト級である。上の  $\bar{x}$ -R 管理図ではロット内 (コイル間) 変動を級内変動, ロット間変動を級間変動とし, 下の  $\bar{x}$ -R 管理図ではコイル内変動を級内変動, コイル間変動を級間変動としている。管理外れの点に対しては, 該当する試料を詳細にしらべるとともに, 材料および中間工程の記録や管理図などと対照して原因をつきとめ, 材料および工程に対して処置をとる。テープ巻など手作業の技能のムラや不注意などは, 工程管理の段階ではつかみにくいものであるが, 完成品品質に関する  $\bar{x}$ -R 管理図は, このような要因を抽出するのに役立つ。

### (4) その他

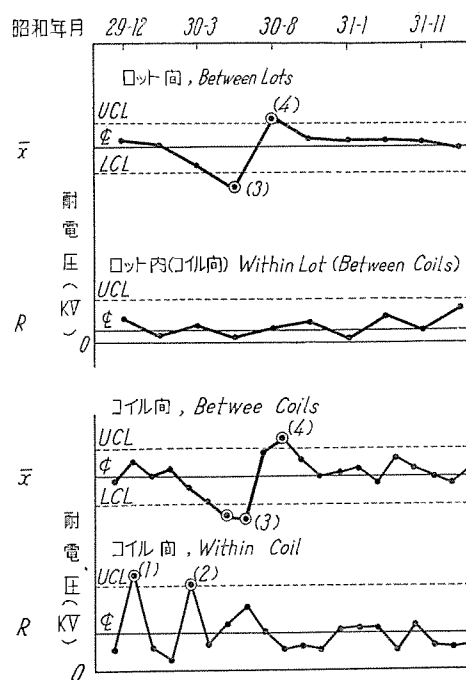
これらのデータは, 設計・材料および工程の標準類が適切なものであるかどうかを解析するために利用するが一例としてマイカテープ巻回数に対する耐電圧の回帰を



- (1) 原因: マイカテープ巻の欠陥, 処理: テープ巻技能の訓練
  - (2) 原因: マイカテープ巻作業をとくに入念に行った。
  - (3) 原因: 下巻テープ巻作者(新入工)の未熟練, コンパウンド含浸作業条件が変わった。
- 処置: 新入工の再訓練, コンパウンド含浸タンクの掃除。

7 図  $\bar{x}$ -R 管理図 (6,600 V 級)

Fig. 7.  $\bar{x}$ -R charts (6,600 V class).



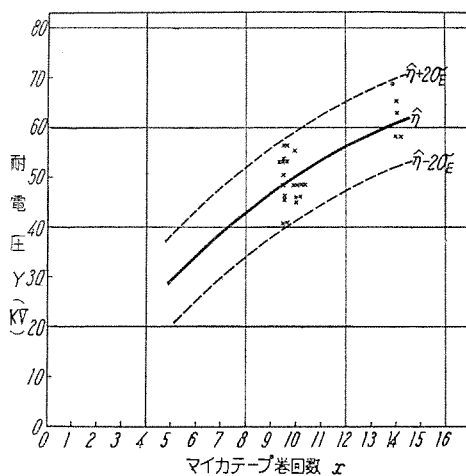
- (1) 原因不明
- (2) " "
- (3) 原因不明
- (4) " "

8 図  $\bar{x}$ -R 管理図 (11,000 V 級)

Fig. 8.  $\bar{x}$ -R charts (11,000 V class).

分析した結果を 9 図に示す。

以上解析の結果得られた情報は品質管理課で所定の様式にまとめ, 関係先に通報し, それぞれ適切な処置がとられる。



9 図 マイカテープ巻回数に対する耐電圧の回帰 (アスファルトボンド絶縁)  
 回帰方程式:  $\eta = -0.19 + 6.8x - 0.17x^2$  ( $5 \leq x \leq 15$ )  
 回帰による推定の標準誤差 (回帰曲線からの Y の母標準偏差の推定値):  $\sigma_y = 4.54$

ここに

- x: マイカテープ巻回数  
 $\hat{\eta}$ : x に対する Y の母平均  $\eta$  の推定値 (推定した回帰曲線上の点の Y 座標)  
 Y: 60 c/s 1 mm 耐電圧 kV (図上の ×印は実測値 y)  
 回帰の有意性の検定 (分散分析) 1 次: \*\* (危険率 0.01 で有意)  
 2 次: - (危険率 0.13 で有意)

Fig. 9. Regression of ultimate strength (Y, kV) upon the number of mica-tape laps (x).



### 3. 結果の考察および効果

#### ア. 品質保証

かつては所望の品質の材料が入手できないなどの理由もあって、若干の不良が発生していたが、最近生産される高圧固定子コイルの耐電圧は、データに見るように規格を相当上回る水準に達している。事実規格条件による全数試験の結果でも耐圧不良はまったく出ない。このことは製造品質の明らかな向上を示すもので、最近出荷されている機械の高圧固定子コイルに関する耐電圧などの絶縁品質は、計量的データの基礎の上に十分の自信をもって保証することができる。

#### イ. 品質維持

6,600 ボルト級のばあい、7 図に見るように最初の数ロットより後半の方が安定しているといえるが、最近の数ロットにおいて平均値が低下している。この原因はコンパウンド含浸およびテープ巻工程の欠陥にあることが明らかとなったので、図記載の処置がとられた。ロット内変動が 11,000 ボルト級のばあいより大きいことは、なお検討を要する。耐電圧破壊試験を気中で行うときは、クリープによって他の部分の絶縁を劣下させ、これが測定誤差を大きくするおそれがあるので、絶縁油中で行うことを考えている。

11,000 ボルト級では 8 図に見るように、ロット内変動をのぞきいずれも前半において管理外れを示している。しかも変動要因を発見できなかったことは、当時材料および中間工程の管理がいまだ十分でなかったことを示す。後半において安定しつつあることから見て、6,600 ボルト級のばあいと同様の要因による管理外れではないかと考える。

#### ウ. 品質向上

材料および中間工程の要因を除去することによって、管理前（データ省略）にくらべ製造品質のパラツキが小さくなるとともに、平均値においても向上している。その結果現状の工程能力で見るとき設計品質は、とくに 6,600 ボルト級のばあい規格に対してかなりの余裕がある。不良がまったくなく安心して保証できるのであるが、一方経済的観点から見れば、設計品質が不要に高水準を目標とするものになっていないかどうか問題になる。しかしながら現況は、消費者がますます高品位を期待する傾向にあるので、設計の品質仕様は下げていない。

備考：全数検査の規格値 LSL は瞬時試験に対するものであるから、これを 1 分間耐電圧値に換算すれば、図の位置より低くなる。

### 4. 理論的考察

#### ア. 推定誤差

2・ウ節の (1) および (2) 式で母数を推定するときの誤差として、抽出誤差・測定誤差・不偏分散平方根のかたよりなどによるもののほかに、試料測定値の独立無

作為性の不備にもとづくかたよりが考えられる。すなわち元来は 1 台分の全コイルの中からまず無作為に 16 個のコイルを抜き取り、そのおのから無作為に 1 箇所測定して得た 16 個の測定値を用いるべきところであるが、さきに説明した方法では、16 個の測定値がその試料との関連において、独立かつ無作為なものとはいえないからである。独立性の欠陥にもとづく分散のかたよりは、期待値に関するつぎの関係で示される。

$$E(u^2) = \frac{4}{5} \sigma_1^2 + \sigma_2^2 < \sigma^2 \dots \dots \dots (3)$$

ここに

$\sigma_1^2$  : コイル間の品質分布の母分散

$\sigma_2^2$  : コイル内の品質分布の母分散

$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$  : 総合した品質分布の母分散

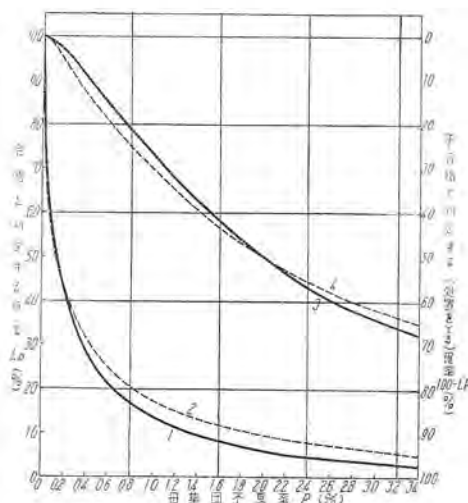
このような種々のかたよりによって、計算した  $u$  は平均的に  $\sigma$  より小さ目にするはずである。

不良率の推定においては、耐電圧の分布が厳密には正規型でないことによる誤差が加わる。また推定した不良率は、箇所不良率とでもいふべきもので、コイルの本数不良率ではない。ただし  $\sigma_2^2$  が小さければ、両者の間に大きなちがいはない。

#### 備考

測定値は 1 分間の印加に耐えた最終の電圧をとっているが、真の耐電圧は、この値とつぎの段階での電圧（1 分間の印加に耐えなかった電圧）との中間の値であるはずで、このために平均で真値より 2,500 ボルト程度低く推定される。これは結論に対して安全側にはたらく。

#### イ. OC 曲線



- 曲線 1 :  $n=16$   $\tau_a=3.00$  ( $\alpha=0.00135$ )
- 曲線 2 :  $n=12$   $\tau_a=3.00$  ( $\alpha=0.00135$ )
- 曲線 3 :  $n=16$   $\tau_a=2.05$  ( $\alpha=0.020$ )
- 曲線 4 :  $n=12$   $\tau_a=2.05$  ( $\alpha=0.020$ )

10 図 OC 曲線 ( $\bar{x} - \tau_a u \geq LSL$  : 合格  
Fig. 10. Operating characteristic curves.  
( $\bar{x} - \tau_a u \geq LSL$  : Accept)



推定不良率がある基準の値  $\alpha$  をこえるときは、製造を中止しそのロットおよび工程に対して処置をとることは、正規分布の片側確率  $\alpha$  に対する標準偏差  $\tau\alpha$  を定めておき、母集団分布の  $\tau\alpha\sigma$  下限の推定値として

$$\mu - \tau\alpha\sigma = \bar{x} - \tau\alpha u \quad \dots\dots\dots (4)$$

を求め、これと規格下限(全数検査のばあいの試験電圧) LSL とを比較して、つぎのようにロットの採否(製造を継続すべきかどうか)を判定して処置をとることに相当する。

$$\left. \begin{array}{l} \bar{x} - \tau\alpha u \geq \text{LSL} : \text{採択} \\ \bar{x} - \tau\alpha u < \text{LSL} : \text{棄却} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

いま、

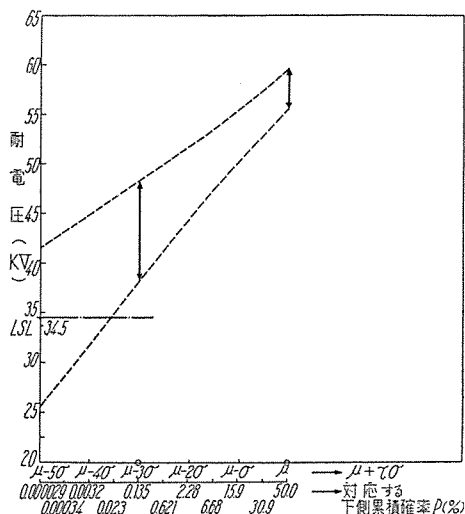
$$n=16, \quad \tau\alpha=3.00 \quad (\alpha=0.00135)$$

$$n=12, \quad \tau\alpha=3.00 \quad (\alpha=0.00135)$$

$$n=16, \quad \tau\alpha=2.05 \quad (\alpha=0.020)$$

$$n=12, \quad \tau\alpha=2.05 \quad (\alpha=0.020)$$

の各ばあいについて、OC 曲線 (Operating Characteristic Curve) を求めると、近似的に 10 図のようになる。



11 図  $\tau\sigma$  下限の信頼区間(一例 5 図の No.1 のばあい) 信頼度  $1-\varepsilon=0.90$

Fig. 11. 90 % confidence intervals of  $\tau\sigma$  limits (an example corresponding to No. 1 at Fig. 5)

## ウ. $\tau\sigma$ 下限の信頼区間

理論上は分布のスロは無限にひろがっているが、実際の分布では有限のところ分布の限界がある。その限界はたとえば  $\mu \pm 3\sigma$  とか  $\mu \pm 3.5\sigma$  というようなところであろう。

$\tau\sigma$  下限すなわち  $\mu - \tau\sigma$  の信頼度 90% のときの信頼区間を 1 例として 5 図の No. 1 のばあいについて推定した結果は、近似的に 11 図のようになる。

なお別の方法<sup>(3)</sup>で上の例について不良率の信頼限界を求めると、“信頼度 95 %で、たかだか 0.07% 以下”と推定される。

## 5. む す び

以上簡単な統計的手法による耐電圧の管理について述べた。完成品品質に関する計量値にもとずいて十分解析することなく、いわば手さぐりで生産するばあいに比べれば、このようなきわめて少数の試料によるとぼしい情報でもかなり役立ち、従来より合理的な管理ができるようになったと考える。

ほかに層間耐電圧・誘電体力率・絶縁抵抗・半導体ワニスの抵抗などの絶縁品質特性および寸法・形状など機械的特性の管理の問題、さらにそれら諸特性と相関のある材料や工程の管理についても興味ある問題があるが、それらの紹介は別の機会にゆずることとする。最後にご指導をたまわった当製作所小島井品質管理課長・研究所菅野物理第 1 研究室長はじめ関係各位、製造工程の管理を担当される安達巻線工場主任・小泉技師およびデータを整理された検査担当の渡辺技師にふかく感謝する。

## 文 献

- (1) William Schneider, G. L. Moses: Statistics—The Insulation Engineers Crystal Ball, Westinghouse Engineer, Sept. 1948.
- (2) J. M. Juran: Quality-Control Hand Book, 1951.
- (3) 田口玄一: 実験計画法, 182 (1954).

# かご形誘導電動機の溝数組合せとスキューが磁気騒音に及ぼす影響

名古屋製作所 関野 博\*・臼田 長一\*\*・梶谷 定之\*\*\*

## Effect of Slot Combination and Skew on Magnetic Noise of Squirrel Cage Induction Motors

Nagoya Works Hiroshi SEKINO・Choichi USUDA・Sadayuki KAJITANI

In spite of a number of reports on the studies of magnetic noise of squirrel cage induction motors, very few of them give clear cut view on the relation of phenomena with theoretical explanation and very little is discussed about quantitative materials. To overcome these problems, various experiments were conducted to make a theoretical analysis based on the results. In doing so, theoretical equations of magnetic-force waves are given and relations with magnetic noise are stated. Slot combination and skew quantity are studied to see how they affect on the noise of the motor.

### 1. ま え が き

かご形誘導電動機の異常現象の究明が進むにつれ、磁気騒音の理論的研究も種々行われてきた。しかしながら、この問題はあまりにも複雑であるため、まだ明確にして十分な解答が与えられていないようである。多くはその説明が単に定性的であり、またその解明に近似的手法が用いられているが、定量的な資料の裏付けに乏しいため実情に対してどの程度の確かさを有するものか定かでない憾みがある。

われわれは、異常現象の問題に関し、メーカーの立場として最良の設計要素を選定しうる簡明にして有力な根拠を得ようと研究を続けているのであるが、とくに理論と現象との結びつきを自から確認するため、溝数組合せ、スキュー量、巻線分布などの諸条件を変えたモータを実際に作り、各種の実験を行っている。

ここでは、その結果の一部を取り上げ、溝数組合せとスキュー量が磁気騒音にどんな影響を与えるかを論ずることとする。すなわち、現在までに行った実験用モータの騒音実測の結果をもとに、理論的解析を試み、この現象と理論との結びつきを明らかにしようとするものである。

### 2. 空隙内半径方向磁気力波<sup>(1)(2)</sup>

われわれが耳に聞く騒音はどんなものでも、ある部分を振動させる力から始まるものである。次にその振動部分、あるいはその振動が伝達される他の部分が発音体の役目をする。したがって騒音の研究は、まずその騒音を発生せしめる力の研究から始まる。

モータの磁気音は、空隙内高調波磁束によって生ずる半径方向磁気力により、ステータコア、フレーム、あるいはロータに磁気振動が発生することから始まる。したがって磁気音の説明にあたってまずこの磁気力を明らかにする必要がある。

なお計算に先だって、以後の表式中に含まれる記号の

説明を付して置く。

$b$ : 空隙内磁束密度

$D$ : 内径 cm

$f$ : 周波数 c/s

$f_1$ : 電源周波数 c/s

$f_k$ : 力波の周波数 c/s

$g$ : 空隙長 cm

$K_c$ : カート係数

$K_s$ : 飽和係数

$K_d$ : 分布係数

$K_p$ : 短節巻係数

$K_{dp}$ :  $K_d \cdot K_p$  巻線係数

$K$ : 力波の極対数

$l$ : 鉄心長 cm

$m_1$ : ステータ相数

$m'$ : ロータ高調波の次数 (極対数で表わす)

$n'$ : ステータ高調波の次数 (極対数で表わす)

$N$ : 毎相の直列導体数

$P$ : 極対数, 基本波に対するもの

$Q$ : 溝数 1…ステータ, 2…ロータ

$\tau$ : 極間隔 cm

$s$ : 滑り, 基本波に対するもの

$\tau_g$ : スロットピッチ cm

$S$ : スキュー量 cm

$\eta$ : スキュー係数

$\xi$ : ロータ結合係数

その他文中に説明する記号は省略する。

さて半径方向磁気力  $f_r$  は次式で与えられる。

$$f_r = \frac{b^2}{8\pi} \quad \text{ダイン/cm}^2 \dots (1)$$

$b$  は空隙内任意の点の磁束密度であるが、基本波のみならず各高調波成分も含まれる。

したがって

$$b^2 = \sum_{\mu} b_{\mu} \cdot \sum_{\nu} b_{\nu} \quad \mu, \nu: \text{整数で表わすことが}$$

できる。

$b_\mu, b_\nu$  について

(1) ステータ高調波成分のみの組合せ

(2) ロータ高調波成分のみの組合せ

(3) ステータ高調波成分とロータ高調波成分との組合せが考えられるが、(1) は力波の周波数が電源周波数の2倍であって騒音周波数としては非常に低く、(2) は極数の大なる、すなわち比較的小なる力波を与えるので騒音の起因としてはほとんど問題にならない。通常の磁気騒音は(3)の組合せによって発生する。

したがって  $b_\mu$  をステータ  $n_b'$  高調波成分、 $b_\nu$  をステータ  $n_a'$  高調波成分によって生ずるロータ  $m_a'$  高調波成分とすれば、

$$b_\mu = b_{n_b'} = B_{n_b'} \sin\left(\omega t - n_b' \frac{\pi}{p\tau} x_1\right) \quad \dots\dots (2)$$

$$b_\nu = b_{m_a'} = B_{m_a'} \sin\left[\left\{1 + \frac{m_a' - n_a'}{p}(1-s)\right\} \omega t - m_a' \frac{\pi}{p\tau} x_1\right] \quad \dots\dots (3)$$

かご形ロータでは  $\frac{m_a' - n_a'}{p} = \frac{k_{2a} Q_2}{p}$ 、 $k_{2a}$ : 整数となる

いまステータコアに変形を与え磁気音を生ぜしめる全半径方向力波の量を決定するために、一直径方向についてこれら半径方向力波のポール間にわたるベクトル和を求める必要がある。

$$F_r = c_1 l \int_0^{\frac{p\tau}{k}} b_{n_b'} \cdot b_{m_a'} \cdot \sin \frac{\pi}{p\tau} \cdot x_1 dx_1 \quad \text{gr} \dots\dots (4)$$

$$= c_1 c_2 \int_0^{\frac{p\tau}{k}} \left[ \cos\left\{\frac{(m_a' - n_b')}{p\tau} \pi \cdot x_1 - \frac{(m_a' - n_a')}{p}(1-s)\omega t\right\} - \cos\left\{\frac{(m_a' + n_b')}{p\tau} \pi \cdot x_1 - \left(2 + \frac{(m_a' - n_a')}{p}(1-s)\right)\omega t\right\} \right] \sin \frac{\pi}{p\tau} x_1 dx_1 \quad \text{gr} \dots\dots (5)$$

ただし

$$c_1 = 2 \times \frac{1.02}{8\pi} \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^2 = 8.12 \times 10^{-5} \text{ gr/cm}^2 \dots\dots (6)$$

$$c_2 = \frac{l}{2} \cdot B_{n_b'} \cdot B_{m_a'} \quad \dots\dots (7)$$

(5) 式からわかるように、半径方向磁気力は空隙の周辺に沿って余弦法則で分布する力の波であり、第1項は、 $k = m_a' - n_b'$  なるときに考えられるべきであり、第2項は  $k = m_a' + n_b'$  なるときのみ考えられるべきである。

すなわち

(1) 力波の極対数が  $k = m_a' - n_b'$  なるとき 周波数  $f_k$  は

$$f_k = \frac{m_a' - n_a'}{p}(1-s) \cdot f \quad \text{であり} \quad \dots\dots (8)$$

(2) 力波の極対数  $k = m_a' + n_b'$  で与えられるとき、

$$\text{周波数は } f_k = \left\{2 + \frac{m_a' - n_b'}{p}(1-s)\right\} f \text{ となる} \dots\dots (9)$$

各項について計算を進め、力波の最大値を求める。

$$\begin{aligned} \text{いま } \frac{m_a' - n_a'}{p}(1-s)\omega t &= \alpha, \quad 2 + \frac{m_a' - n_b'}{p}(1-s)\omega t \\ &= \beta \frac{\pi}{p\tau} x_1 = x \quad \dots\dots (10) \end{aligned}$$

とおくと

かご形誘導電動機の溝数組合せとスキューが磁気騒音に及ぼす影響・関野・白田・梶谷

$$\begin{aligned} F_r &= \frac{p\tau}{\pi} c_1 c_2 \int_0^{\frac{\pi}{k}} \left[ \cos\{(m_a' - n_b')x - \alpha\} - \cos\{(m_a' + n_b')x - \beta\} \right] \sin x dx \\ &= \frac{p\tau}{\pi} c_1 c_2 \left[ \cos \alpha \int_0^{\frac{\pi}{k}} \cos(m_a' - n_b')x \sin x dx + \sin \alpha \int_0^{\frac{\pi}{k}} \sin(m_a' - n_b')x \cdot \sin x dx \right] \\ &\quad - \frac{p\tau}{\pi} c_1 c_2 \left[ \cos \beta \int_0^{\frac{\pi}{k}} \cos(m_a' + n_b')x \sin x dx + \sin \beta \int_0^{\frac{\pi}{k}} \sin(m_a' + n_b')x \sin x dx \right] = I_1 + I_2 \quad (11) \end{aligned}$$

上式第1項  $I_1$  についてさらに計算を進めると

$$\begin{aligned} F_{r(I_1)} &= \frac{p\tau}{\pi} c_1 c_2 \left[ \cos \alpha \int_0^{\frac{\pi}{k}} \cos kx \sin x dx + \sin \alpha \int_0^{\frac{\pi}{k}} \sin kx \cdot \sin x dx \right] \\ &= \frac{p\tau}{\pi} c_1 c_2 (L \cdot \cos \alpha + M \cdot \sin \alpha) \quad \dots\dots (12) \end{aligned}$$

ところで

$$\begin{aligned} L &= \int_0^{\frac{\pi}{k}} \cos kx \cdot \sin x dx \\ &= - \left[ \frac{\cos \frac{1+k}{k} \pi - 1}{2(1+k)} + \frac{\cos \frac{1-k}{k} \pi - 1}{2(1-k)} \right] \quad \dots\dots (13) \end{aligned}$$

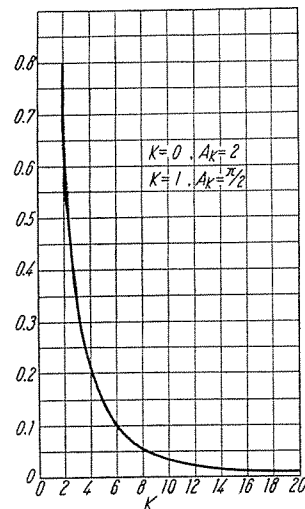
$$\begin{aligned} M &= \int_0^{\frac{\pi}{k}} \sin kx \cdot \sin x dx \\ &= \left[ \frac{\sin \frac{1-k}{k} \pi}{2(1-k)} - \frac{\sin \frac{1+k}{k} \pi}{2(1+k)} \right] \quad \dots\dots (14) \end{aligned}$$

(12)式はまたつぎのように表わすことができる。

$$F_{r(I_1)} = \frac{p\tau}{\pi} c_1 c_2 \cdot A_k \sin(\alpha + \psi) \quad \dots\dots (15)$$

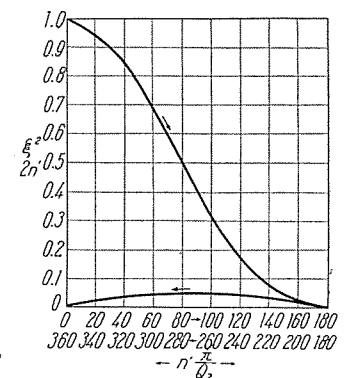
$$\text{ところで, } A_k = \sqrt{L^2 + M^2}, \quad \psi = \tan^{-1} \frac{L}{M} \quad \dots\dots (16)$$

$k$  の種々の値に対する  $A_k$  の値は1図で示される。



1 図  $A_k$  の値  
Fig. 1. The value of  $A_k$ .

(11)式の第2項  $I_2$  についても同様(15)式をうる。この場合  $A_k, \psi$  は共に(13), (14),



2 図  $\xi_{2n'}$  の値  
Fig. 2. The value of  $\xi_{2n'}$ .



(16)で規定された値をとるが、 $k$ の値は(9)で示した値となり、周波数も異なることに注意しなければならない。  
また(13)式、(14)式は $k \neq 1$  なるときのみに成立するが、 $k=1$  では $A_k = \frac{\pi}{2}$ 、 $k=0$  では $A_k = 2$  となる。

磁束密度の振幅  $B_{n_a'}$ 、 $B_{m_a'}$  は(17)式、(18)式で求まる。

$$B_{n_a'} = \frac{1.255}{g \cdot k_c \cdot k_s} \cdot \frac{\sqrt{2} m_1}{\pi} \cdot N_1 \cdot \frac{k_{a1} n_{a1}' \cdot k_{b1} n_{b1}'}{n_{b1}'} \cdot I_1 \quad \text{ガウス} \cdots (17)$$

$$B_{m_a'} = \frac{1.255}{g \cdot k_c \cdot k_s} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot Q_2 \cdot \frac{\eta_{2m_a'}}{m_{a1}'} \cdot I_{2m_a'} \quad \text{ガウス} \cdots (18)$$

$I_{2n_a'}$  はステータ高調波  $n_a'$  によってロータに誘起された電流である。その絶対値は、

$$|I_{2n_a'}| = \frac{S_{n_a'} \cdot X_{n_{2n_a'}}}{\sqrt{r_{2n_a'}^2 + S_{n_a'}^2 (1 + \tau_{2n_a'})^2 X_{2m_{2n_a'}}^2}} |I'_{1n_a'}| \\ = G |I'_{1n_a'}| \quad \cdots (19)$$

かご形ロータでは

$$I'_{1n_a'} = \frac{2m_1 N_1 k_{a1} n_{a1}' \cdot k_{b1} n_{b1}'}{Q_2 \cdot \eta_{2n_a'}} \cdot I_1 \quad \text{となる。} \cdots (20)$$

$I_1$  は半径方向力波を求めようとする状態におけるステータ電流である。

$$s_{n_a'} = 1 - \frac{n_a'}{p} (1-s) \quad \cdots (21) \quad \text{はステータ } n_a' \text{ 高調波に関するロータの滑りである。}$$

$r_{2n_a'}$  は導棒1本あたりの  $n_a'$  高調波に対する抵抗。

$X_{m_{2n_a'}}$  は  $n_a'$  高調波によるロータの主リアクタンス。

$\tau_{2n_a'}$  は  $n_a'$  高調波に対するロータの漏洩係数である。

(19)式において通常  $r_{2n_a'}^2 \ll S_{n_a'}^2 (1 + \tau_{2n_a'})^2 X_{2m_{2n_a'}}^2$  ゆえ

$$|I_{2n_a'}| \doteq \frac{1}{1 + \tau_{2n_a'}} |I'_{1n_a'}| \quad G \doteq \frac{1}{1 + \tau_{2n_a'}} \quad \cdots (22)$$

(22)式は高次高調波に対してさらに近似的に次のようになる。

$$\frac{1}{1 + \tau_{2n_a'}} \doteq \eta_{2n_a'}^2 \cdot \xi_{2n_a'}^2 \quad \cdots (23)$$

ところで

$$\xi_{2n_a'} = \frac{\sin n_a' \cdot \frac{\pi}{Q_2}}{n_a' \cdot \frac{\pi}{Q_2}}, \quad \eta_{2n_a'} = \frac{\sin n_a' \cdot \frac{\pi}{Q_2} \cdot \frac{S}{\tau_{2n_a'}}}{n_a' \cdot \frac{\pi}{Q_2} \cdot \frac{S}{\tau_{2n_a'}}}, \quad \cdots (24)$$

$\xi_{2n_a'}$  は  $n_a'$  ステータ高調波に対するロータの結合係数とも称せられるべきもので2図に示すような函数である。

$\eta_{2n_a'}$  は  $n_a'$  高調波に対するスキュー係数である。

(15)式と(17)~(23)式から結局半径方向力波の最大値は

$$Fr = 6.48 \times 10^{-6} \frac{D \cdot l}{(g \cdot k_c \cdot k_s)^2} \cdot (m_1 \cdot N_1 \cdot I_1)^2 \cdot c \cdot A_k \quad \text{gr} \quad (25)$$

となる。

$$\text{ただし } c = \frac{k_{a1} n_{a1}' \cdot k_{b1} n_{b1}'}{m_{a1}' \cdot n_{b1}'} \cdot \frac{\eta_{2m_a'}}{\eta_{2n_a'}} \cdot G \quad \cdots (26)$$

$$\cdot \frac{k_{a1} n_{a1}' \cdot k_{b1} n_{b1}'}{m_{a1}' \cdot n_{b1}'} \cdot \eta_{2m_a'} \cdot \eta_{2n_a'} \cdot \xi_{2n_a'}^2 \quad \cdots (26')$$

### 3. 力波の発生<sup>(1)(3)(4)</sup>

前述の力波のうち、磁気音に大きな影響を与えるもの、(かりに有害力波と称す。すなわち  $Fr$  が大で  $k$  が小さなもの)を作る磁束密度の高調波成分  $m_a'$  と  $n_b'$  の組合せを考える。

**ア**、ステータ基本磁束密度  $n_a' = p$  によって生じたロータ電流によりロータ溝高調波  $m_a' = \pm k_{2a} Q_2 + p$  を作る。これとステータ溝高調波  $n_b' = \pm k_{1a} Q_1 + p$  との組合せにより

$$k = m_a' + n_b' = \pm (k_{2a} Q_2 - k_{1a} Q_1) + 2p$$

$$k = m_a' - n_b' = \pm (k_{2a} Q_2 - k_{1a} Q_1) \quad \text{なる力波を作る。}$$

$k_{1a}$ 、 $k_{2a}$  は整数〔なお  $k$  の値が大となる  $\pm (k_{2a} Q_2 + k_{1a} Q_1) + 2p$ 、 $\pm (k_{2a} Q_2 - k_{1a} Q_1)$  は無視する〕

ただし無負荷時では  $n_a' = p$  によって与えられるロータ電流が零と考えられるのでこの経過による力波の発生は無視できよう。

**イ**、ステータ溝高調波  $n_a' = \pm k_{1a} Q_1 + p$  により、ロータ高調波磁束密度  $m_a' = \pm (k_{2a} Q_2 - k_{1a} Q_1) + p$  を生ず。これとステータ基本波  $n_b' = p$  と作用して

$$k = m_a' + n_b' = \pm (k_{2a} Q_2 - k_{1a} Q_1) + 2p$$

$$k = m_a' - n_b' = \pm (k_{2a} Q_2 - k_{1a} Q_1) \quad \text{なる力波を作る。}$$

このア項とイ項は力波の発生過程が異なるが、同じ極数と周波数を有する力波を作る。

以上はステータ、ロータ溝高調波に起因する力波を考えた。通常磁気音の主因はこの溝高調波によるもので一般に  $k_{1a} = k_{2a} = 1$  を考えれば十分である。

したがって

$$k = Q_2 - Q_1 \pm 2p, \quad f_k = \left| \frac{Q_2}{p} (1-s) \pm 2 \right| \cdot f \quad \cdots (27)$$

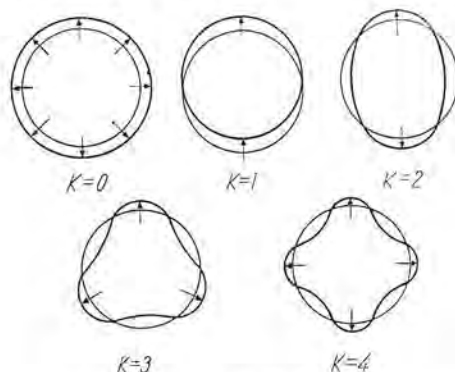
を得る。

**ウ**、相帯高調波  $\pm k_m \cdot m_1 p + p$   $k_m$ : 整数 は一般に溝高調波に比し磁気騒音に与える影響は少ない。しかしながらある条件によっては  $k$  の小なる多量の力波を発生する可能性があり、上記と同様の方法で十分な検討を必要とする。

**エ**、その他、電源周波数中の高調波成分、モータの機械的不均一性、電気的非直線性より生ずる高調波が存在するときは、前述の溝高調波、相帯高調波によって生ずる力波の性質を変えてしまうので実験に当っては注意を要す。

### 4. 力波の種類

力波の極対数  $k$  の各値に対する力波の種類は3図に示す。この力波の形はまたステータの変形、変位あるいはロータの変位の傾向を示す。



3 図 力波の種類

Fig. 3. The kinds of pole waves.

ア.  $k=0$  円周上いちように半径方向磁気力を与え、ステータコア全体を一度に押し広げ、縮めようとする。この力は時間と共に正弦波的に増減する。

イ.  $k=1$  変形でなく、直径方向に変位を与えようとする力が働く。この場合ステータの変位よりもロータの変位が問題となる。

ウ.  $k=2$  いわゆる楕円歪を与える。ステータコアの振動に大きな影響を与えるものと考えられる。

エ.  $k=3, 4, \dots$   $k$  の値が増加すると共に変形は多角形的になってくる。

これらの力は単独でなく、通常奇数同志が、たとえば  $k=1$  と  $k=3$ 、偶数同志が、たとえば  $k=0$  と  $k=4$  とあわさって存在するのでその影響は一段と大きくなる。

## 5. 磁気力と騒音の関係<sup>(2)(5)</sup>

音の強さを求めるのにつぎのような式がある。

$$S = 121 + 20 \log_{10}(2 \cdot d \cdot f) \quad \text{db} \dots (28)$$

$d$ : 振動の振幅 インチ,  $f$ : 振動の周波数 サイクル

上式をみれば、極対数  $k$ , 周波数  $f_k$  の同じ力波に対し、力  $F_r$  が  $\frac{1}{2}$  になると  $d$  も  $\frac{1}{2}$  になるので磁気音は約 6 db 減少することがわかる。

異なる  $k$  の値に対しては、ステータコアの変形をリングの変形と考えて

$$k=2 \text{ のとき } d_{k=2} = \frac{W D_s^3}{6 E h^3}$$

$$k=3 \quad d_{k=3} = \frac{9 W D_s^3}{256 E h^3} = \frac{1}{4.75} \cdot d_{k=2} \quad \dots (29)$$

$$k=4 \quad d_{k=4} = \frac{W D_s^3}{75 E h^3} = \frac{1}{12.5} \cdot d_{k=2} \quad \text{となる。}$$

ところで、 $W$ : 全荷重 ポンド,  $E$ : 弾性係数 インチ単位,  $D_s$ : ステータコアの平均直径 インチ,  $h$ : ステータコアの溝背部の長さ インチ である。

したがって、同一周波数同一量の力波に対し  $k=3$  は  $k=2$  より磁気音は約 13.5 db 少く、 $k=4$  は  $k=2$  より約 22 db 減少することになる。このように  $k$  の増加と共に磁気音はめだって減少するので、磁気音の原因としては少い極対数をもった力波が重要なことがよくわかる。

$k=0, k=1$  の場合は  $k=2, 3, 4, \dots$  等の場合と異なり、ステータに与える変形の性質が変ってくるので、これらの間を巧みに関係づけることは困難である。

なお、上記の説明には共振現象が考慮されなかった。もし力の周波数が振動体の固有振動数とマッチするときには共振現象を起し、小さな力でも非常に大きな振動の振幅を与えるから、あらかじめステータコアの固有振動数を求め、共振状況を検討することが肝要である。

ステータコアの半径方向に対する固有振動を算定するのにつぎのような簡略式がある。

$$f_{\text{nat}} = \frac{8.22}{r} 10^4 \frac{1}{\sqrt{1 + h_i/h_c}} \quad \text{c/s} \dots (30)$$

ところで、 $h_c$ : ステータコア背部の長さ cm

$h_i$ : ステータ歯の長さ cm

$r$ : ステータコアの平均半径 cm である。

1 表 力波の極対数と周波数, ステータ 24 溝全節巻

ロータ溝数 $Q_2$	極対数 $k$ 周波数 $f_k$	$k= Q_2-Q_1+2p $	$k= -Q_2+Q_1+2p $	$k= Q_2-Q_1 $		
		$f_k=\left\{2+\frac{Q_2}{p}(1-s)\right\}f$	$f_k=\left\{2-\frac{Q_2}{p}(1-s)\right\}f$	$f_k=\frac{Q_2}{p}(1-s)f$		
	$k$	$f_k$ (c/s)	$k$	$f_k$ (c/s)	$k$	$f_k$ (c/s)
22	2	780	6	540	2	660
23	3	810	5	570	1	690
24	4	840	4	600	0	720
25	5	870	3	630	1	750
26	6	900	2	660	2	780
27	7	930	1	690	3	810
28	8	960	0	720	4	840
29	9	990	1	750	5	870
30	10	1020	2	780	6	900

電源周波数 60 c/s 無負荷時  $s=0$ . 溝高調波によるもの。

2 表 力波の量 (kg), ステータ 24 溝全節巻

ロータ溝数 $Q_2$	力波極対数 $k$	周波数 $f_k$	スキュー (ロータスロット・ピッチ)			
			0	0.5	1.0	1.5
22	2	660	1.190 (1.0)	0.620 (0.521)	0.162 (0.136)	0.127 (0.107)
23	1	690	6.700 (1.0)	4.120 (0.614)	0.468 (0.698)	1.113 (0.166)
	3	810	0.835 (1.0)	0.552 (0.662)	0.038 (0.046)	0.180 (0.215)
24	0	720	7.670 (1.0)	4.840 (0.631)	0.627 (0.082)	1.470 (0.192)
		840	0.423 (1.0)	0.289 (0.683)	0.038 (0.088)	0.088 (0.206)
	4	600	0.423 (1.0)	0.243 (0.576)	0.034 (0.095)	0.075 (0.175)
25	1	750	5.350 (1.0)	3.590 (0.672)	0.510 (0.096)	1.045 (0.195)
	3	630	0.355 (1.0)	0.217 (0.607)	0.013 (0.037)	0.071 (0.200)
26	2	780	1.920 (1.0)	1.388 (0.722)	0.321 (0.168)	0.321 (0.168)
27	1	690	2.002 (1.0)	1.314 (0.655)	0.192 (0.096)	0.397 (0.198)
	3	810	1.429 (1.0)	1.028 (0.720)	0.208 (0.145)	0.159 (0.111)
28	0	720	2.560 (1.0)	1.870 (0.731)	0.196 (0.077)	0.544 (0.212)
	4	840	1.936 (1.0)	0.697 (0.745)	0.175 (0.186)	0.138 (0.148)
29	1	750	3.34 (1.0)	2.401 (0.719)	0.405 (0.121)	0.673 (0.201)
30	2	780	1.452 (1.0)	1.040 (0.716)	0.208 (0.145)	0.267 (0.185)

200 V, 60 c/s. 無負荷時. 1馬力 4極 ( $D=11.1$   $l=6$   $m_1=3$   $N_1=620$ )  
( $l_1=1.2$   $g=0.04$   $k_s=1.3$   $k_r=1.2$ )

表中の括弧内の値は 0 スキューを 1 とした比率を示す。

## 6. 力波の算定

ロータ: かご形銅ロータ 22~30 溝 おのおのについて 0, 0.5, 1.0, 1.5 ロータスロットピッチスキューを行う。

ステータ: 24 溝全節巻, 36 溝全節巻, 両者の直列導体数は同じ。

上記のロータ, ステータを組合せる。組合さったモータは 1馬力 4極, スリーブベアリング, ファンなしのもので、これらについて騒音を実測したが、一方計算によって、200 V, 60 c/s で無負荷運転したときの主要力波を求めた。1 表はステータ 24 溝に対する主要力波の表であり、2 表は  $k=4$  までの力波についてその最大値を算出したものである。ステータ 24 溝の場合は問題とした



3 表 力波の量 (kg) ステータ 36 溝全節巻

ロータ溝数 $Q_2$	スキュー (ロータスロット・ピッチ)		0	0.5	1.0	1.5
	力波極対数 $k$	周波数 $c/s$				
22	2	660	0.270	0.139	0.037	0.029
	4	1,200	0.230	0.033	0.028	0.021
23	1	690	1.338	0.815	0.098	0.215
	3	810	0.153	0.097	0.009	0.033
24	0	720	1.566	0.976	1.272	0.296
	4	840	0.077	0.053	0.009	0.017
		600	0.095	0.055	0.009	0.017
25	1	750	1.061	0.706	0.097	0.209
	3	630	0.080	0.049	0.004	0.017
26	2	780	0.351	0.255	0.059	0.059
	1	690	0.451	0.296	0.044	0.090
27	3	810	0.280	0.196	0.038	0.029
	0	720	0.576	0.422	0.044	0.123
28	4	840	0.184	0.138	0.034	0.029
		960	0.276	0.134	0.042	0.021
	1	750	0.752	0.543	0.092	0.150
29	3	990	0.418	0.213	0.054	0.004
	2	780	0.330	0.234	0.046	0.063
30		1,020	0.945	0.522	0.104	0.134

200 V, 60 c/s. 無負荷時. 1 馬力 4 極  
( $D, L, g, k_v, k_s, m, N, I, I_1$  は第 2 表と同じ)

のは溝高調波のみであり、他の相帯高調波について検討したところ、いずれもその量は少なく、あるいは極対数  $k$  の値が大きく、それらの影響を無視することができた。

ステータ 36 溝全節巻との組合せでは、ステータ溝高調波による力波の極対数がいずれも大きく騒音に及ぼす影響は下記以外無視することができる。

$Q_2=22$  溝  $k=4$   $f_k=1200$  c/s,  $Q_2=29$  溝  $k=3$   $f_k=990$  c/s  
 $Q_2=28$  溝  $k=4$   $f_k=960$  c/s,  $Q_2=30$  溝  $k=2$   $f_k=1020$  c/s

この場合は相帯高調波第 11 次 ( $n_a'=22$ )、第 13 次 ( $n_a'=26$ ) が有害な力波を与えるものと考えられ、先の 1 表、2 表の計算における  $n_a'=26$  ステータ溝高調波の代りに、 $n_a'=26$  相帯高調波を、 $n_a'=-22$  ステータ溝高調波の代りに  $n_a'=-22$  相帯高調波を替えて考えることができる。

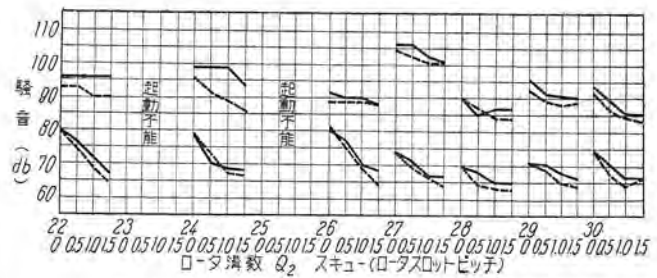
高調波の次数および符号はまったく同じであるからこの発生力波の極対数、周波数も同じ結果をうるが、力の量は変ってくる。

すなわち、ステータ 36 溝全節巻における第 11 次高調波の巻線係数  $k_{apn_a'=22}=0.177$ 、第 13 次高調波の巻線係数  $k_{apn_a'=26}=0.218$  であり、ステータ 24 溝の溝高調波に対する  $k_{ap}=0.966$  であるから、第 11 次相帯高調波磁束密度 ( $n_a'=22$ ) はステータ 24 溝高調波の 0.183 倍に、第 13 次相帯高調波磁束密度 ( $n_a'=26$ ) はその 0.225 倍に減じている。したがって力の量もそれ相応に減少している。以上の方法で求めたステータ 36 溝に組合せた場合の力波の表を 3 表に示した。

なおこのステータコアの固有振動数は (30) 式を用いて概算すると 5,800 c/s となり、実験においては共振現象を考慮する必要がない。

## 7. 実測結果

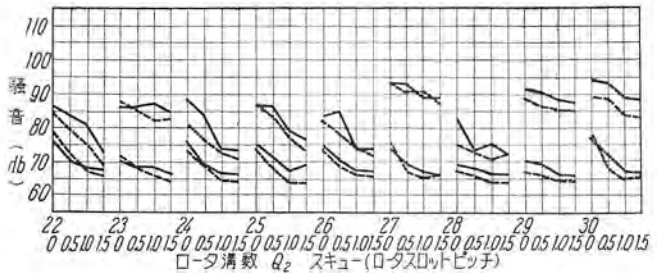
上記のモータに対する騒音の実測結果は 4 図、5 図に示す。4 図はステータ 24 溝に対するもの、5 図はステータ



— 60 c/s 上側起動時 — 50 c/s 下側無負荷運転時

4 図 騒音実値 (ステータ 24 溝全節巻 1 HP 4 P 200 V)

Fig. 4. The measured values of noise (stator 24 slots, full pitch winding, 1 HP 4 P 200 V)



— 60 c/s 上側起動時 — 50 c/s 下側無負荷運転時

5 図 騒音実値 (ステータ 36 溝全節巻 1 HP 4 P 200 V)

Fig. 5. The measured values of noise (stator 36 slots, full pitch winding, 1 HP 4 P 200 V)

タ 36 溝に対するものである。200 V, 50 c/s, 60 c/s で (実線は 60 c/s, 点線は 50 c/s) 起動時最大騒音 (カーブの上側) と無負荷時騒音 (カーブの下側) を測定、測定はモータ中心から 50 cm 離れたところ、モータの軸と同じ高さで、軸に対し直角、軸方向について行ったが、図の値は軸に対し直角方向のものについても与えられている。

### ア、ステータ 24 溝の場合

ロータ溝数  $Q_2=23, 25$  は完全に起動できなかった。 $k=1$  なる多量の磁気力波がその原因である。2 表を見ると  $Q_2=23$  と 25 では 23 の方が一層条件が悪いということもわかる。

$Q_2=27, 29$  も共に  $k=1$  なる力波を生ずるがその値は 23, 25 のものに比し約 1/2~1/3 に減少しているので起動することができた。

$Q_2=24, 28$  は  $k=0, 4$  の力波を有している。28 は 24 に比し力波の量が 1/3 に減少、したがって磁気音は 10 db 減少の見込みとなる。実測値では 0 スキューのものについて 9 db の減少が見られた。

$Q_2=22, 26, 30$  はいずれも  $k=2$  の力波を生ず。力波の量の計算結果によると磁気音は  $26>30>22$  の順になるが、実測結果は  $26>22>30$  であった。一般に  $k=2$  の場合は  $k=0, k=1$  の場合に比し、力波の量の割に回転中非常に大きな騒音を与える。

起動時は  $Q_2=23, 25, 27$  がとくに騒音大であった。これより  $k=1$  なる力波が起動時に大きな磁気音を発生せしめることがわかる。

磁気音の消去には、適切なスキューを施すことが非常に効果的である。1.0~1.5 ロータスロットピッチスキュー



一を施すと力波の量は、スキューなしの場合の約10%に減少する。これは磁気音 20 db の減少に相当する。実際の騒音は磁気音のみでないからそれほど下らないが、最大 15 db の減少が実測されている。

#### イ. ステータ 36 溝の場合

この場合は、3 表、4 表からわかるように、ステータ 24 溝の場合に比し力波の量が大幅に減少している。 $Q_2=23$ , 25 溝も起動することができた。とくに起動時騒音がステータ 24 溝のときより全般的に減少しているのがめだつ。

回転時については、 $k=2$  の力波を与える  $Q_2=26$  が、ステータ 24 溝に対するものより騒音が減少しているのが理論的にもうなずける。また  $Q_2=22$ , 26, 30 については、ステータ 24 溝とは逆に  $Q_2=26$  が最小騒音であり、前述のように溝高調波によって付加的力波を作った  $Q_2=22$  溝, 30 溝が 26 溝より大きな騒音を与えることもうなずける。ただし、22 溝の実測騒音は予想以上に大きかった。

### 8. 磁気音の消去<sup>(1)(2)(3)</sup>

以上の理論的考察と実験的考察から磁気音の消去につきの方法が有効であることがわかる。

ア. 極数の小なる力波を発生する溝数組合せを避ける。

(1)  $k=0$  なる力波は同一量の力波に対し  $k=2$  の場合より騒音上の被害は少い。しかし、ステータコア、枠の円周上とくに強度的に弱いところがあると歪がその箇所に集中し磁気音が大きくなる可能性もある。また騒音とは別に同期クロローリングを発生するからこの意味でも、この力波の発生を防止すべきである。

$$|Q_2 - Q_1| = 2p \text{ または } 0 \quad \cdots \cdots (31)$$

(2)  $k=1$  なる力波は、運転時よりもむしろ起動時に一層大きな磁気音を生じ、はなはだしいときは起動不能となる。

$$|Q_2 - Q_1| = 2p \pm 1 \text{ または } 1 \quad \cdots \cdots (32)$$

(3)  $k=2$  なる力波は、運転時に大きな磁気音を発生する因となる。

$$|Q_2 - Q_1| = 2p \pm 2 \text{ または } 2 \quad \cdots \cdots (33)$$

これらの事項は、文献にも見出せるのであるが、以上のように実験的にも十分確認できたわけである。

イ. 有害力波の量ができるだけ少くなるようなロータ溝数にする。ア項の定性的解析法で有害力波の発生が予想されてもその量が小さいときは問題にならない。ときには定性的解析法で有害力波の発生が見られても、定量的に求めるとその量が零になる場合もある。したがって新たに溝数を選定する際は単なる定性的解析に留まらず、定量的解析もぜひ必要である。

一般にロータ対ステータ溝数比  $Q_2/Q_1 < 1.25$  ならしめるのがよく、この条件では (25') 式中の  $\xi_{2n_c}$  が非常に小さくなる。2 図参照。したがって力波の量が小さくなる。

ウ. ステータ巻線ピッチを適切にし有害な相帯高調波を小にする。本実験ではとくに巻線ピッチが磁気音に与える影響を取り立て論じてはいないが、ステータ 36 溝のように磁気力波の発生に相帯高調波が大きな要素となっていると考えられるものもあり、巻線ピッチを適切にして (26') 式中の  $k_{dpln_c}(n_c)$  を小さくし、力波の量を減少せしめることは重要なことである。

エ. 適切なスキューを行うこと。適切なスキューが磁気音の消去にはなはだ有効であることは示した。最適のスキュー量は (26') 式中の  $\eta_{2m_c}$  と  $\eta_{2n_c}$  の積が最小なるように考慮されるべきであるが、通常ステータ溝高調波に対し  $Q_2/(Q_1 \pm p)$  ロータスロットピッチスキューを行うのが効果的である。

### 9. む す び

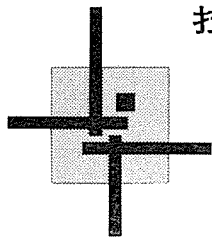
以上、かご形誘導電動機の磁気音に関し、理論的考察と実験的考察を併せ加え、溝数組合せとスキューの選定に設計上の1つの指針をうることができた。もとよりこの問題ははなはだしく複雑であり、以上の結果をもって直ちに十分な答となすことはできないが、この結果はまたこの研究の有力なベースとも思えることができると思っている。

実験はまだ継続中であり、今後はさらに溝数を変えたロータと、種々巻線ピッチを変えたステータとの組合せについて、また電源の歪波形による影響、モータの機械的不均一性、電気的非直線性の影響などについて広範囲に実験を重ねて行きたいと思っている。

諸賢のご批判とご指導を切に希望する次第である。

#### 参 考 文 献

- (1) Noise and Parastic Torques in Induction Motors. Westinghouse Eng. Memo 1798, 1942. by M.M. Liwischitz.
- (2) The Nature of Polyphase Induction Machines. John Wiley & Sons New York 1951. Chap. 10. by P. L. Alger.
- (3) Single-phase Induction Motor Noise due to Dissymmetry Harmonics. AIEE. Trans. 1955. by D.F. Muster, G. L. Wolfert.
- (4) Number of Force-poles and Noise Frequency. Westinghouse Eng. Memo. 1773, 1941. by M.M. Liwischitz-Garik.
- (5) The magnetic of Polyphase Induction Motors. AIEE. Tech. paper 54-1. by P.L. Alger.
- (6) The Cause and Elimination of Noise in Small Motors. AIEE. Trans. 1938. by W.R. Appleman.
- (7) Harmonic Theory of Noise in Induction Motors. AIEE. Trans. 1940. by Morrill.



## 1. ま え が き

最近、種々の機構の計数式段取り自動化 (digitally programmed automation) ということが脚光を浴びてきている。電子計算機における種々の演算とか、工作機械やエレベータなどの計数式段取り制御 (digitally programmed control) とかがその例であるが、その演算とか、制御とかの主要部には、数学における2進法演算を利用しているものが多い。

2進法演算は、2つの値だけをとる変数を取り扱う論理数学 (Bool 代数学) を利用するものであるから、継電器回路に用いられる接点の“開”と“閉”との2つの状態を、それぞれ、2進法演算で取り扱う2つの数、0と1とに対応させ、これを接点回路の理論的取扱いに役立てることができる。したがって標題のような問題は、すでに相当以前から明らかにされていたことであったが、最近、回路の開閉操作を、接点によらずに、真空管・電子管・トランジスタ・パラメトロン・サイバトロン\*等の、広い意味での電子装置に頼って、その性能の著しい向上をみるにおよんで、2進法演算が再び見直されてきた感がある。そして標題にも示したような名前の回路の外に、NOT 回路とか、INHIBIT 回路とかいう、これまでにあまり聞きなれなかった名前の回路が、この方面にたびたびあらわれるようになった。

それでこの解説では、このような回路について、論理数学の初歩から、なるべくわかり易く——と言ってもこれは筆者の1人合点かも知れないが——説明しようとしてみたものである。

説明は第I部と第II部とにわけ、第I部ではおもな論理数式関係を、第II部では論理数式と種々の基本回路との関係を明かにしてある。

## 第I部 論理数式関係

## 2. 定 義

2.1. 以下、とくに断らない限り、 $x_1, x_2, \dots, x_n$  ( $n$ は有限) は、いずれも0または1のどちらかの値をとる変数とする。

## 2.2. 論理和

$$y = f(x_i, x_j) = \max(x_i, x_j) \quad (2.1)$$

の意味をつぎのように定める。

- (i)  $x_i > x_j$ , (従って  $x_i = 1, x_j = 0$ ) ならば,  $y = x_i = 1$ ,
- (ii)  $x_i < x_j$ , (従って  $x_i = 0, x_j = 1$ ) ならば,  $y = x_j = 1$ ,
- (iii)  $x_i = x_j$ , (従って  $x_i = x_j = 0$  または 1) ならば,

$$y = x_i = x_j.$$

便宜上, (2.1) 式の間接関係を

$$y = x_i // x_j^{**} \quad (2.2)$$

と書き、これを、 $x_i$  と  $x_j$  との論理和という。(紛れのない限り、単に和ともいう) 論理和の意味は、普通の代数学におけるものとは趣が違っていることに注意されたい。

論理和の結果もまた、もとの変数と同様に、0か1かのいずれかとなっている。

\* ウェスチングハウス電機会社ではサイバック (Cypak) と呼んでいるもの。

\*\*  $x_i // x_j$  を  $x_i \vee x_j$  とか、 $x_i + x_j$  と書く書物もある。

## 2.3. 論理積

$$y = f(x_i, x_j) = \min(x_i, x_j) \quad (2.3)$$

の意味をつぎのように定める。

- (i)  $x_i > x_j$ , (したがって  $x_i = 1, x_j = 0$ ) ならば,  $y = x_j = 0$ ,
- (ii)  $x_i < x_j$ , (したがって  $x_i = 0, x_j = 1$ ) ならば,  $y = x_i = 0$ ,
- (iii)  $x_i = x_j$ , (したがって  $x_i = x_j = 0$  または 1) ならば,  $y = x_i = x_j$ .

便宜上, (2.3) 式の間接関係を

$$y = x_i x_j \text{ または } x_i \cdot x_j \quad (2.4)$$

と書き、これを  $x_i$  と  $x_j$  との論理積(あるいは単に積)という。

2.1 項での定義により、 $x_i, x_j$  はいずれも0か1かのどちらかの値しかとらないから、論理積は、普通の代数学における積と同等の意味をもつものと考えてよい。論理和の場合と同様に、論理積の結果もまた、もとの変数と同様に、0か1かのいずれかとなっている。

なお、1つの関係式において、論理積と論理和が同時にはいつているときには、論理積の演算は論理和の演算に先行するものと約束する。たとえば

$$y = x_1 x_2 // x_3 \quad (2.5)$$

は、 $z_1 = x_1 x_2$

とするとき、 $y = z_1 // x_3$

の意味で、 $z_2 = x_2 // x_3$

とするとき、 $y = x_1 z_2$

の意味ではない。この意味のものは  $x_1(x_2 // x_3)$  と書くのが普通である。

## 2.4. 共軛(または否定)

$x_i$  が与えられたとき、

$$y = 1 - x_i \quad (2.6)$$

なる  $y$  を  $x_i$  の共軛という。すなわち

$$x_i = 0 \text{ ならば } y = 1,$$

$$x_i = 1 \text{ ならば } y = 0$$

であるが、とにかく  $y$  は  $x_i$  の反対の値をとることになるから、 $y$  は  $x_i$  の否定 (NOT) ともいわれる。

便宜上、 $x_i$  の共軛を  $\bar{x}_i$  と書くことにする\*。

## 3. 定義から直ちに導かれる簡単な諸関係

つぎに示すいろいろな関係は、第2節における定義から直ちに導かれる。

$$1 // x_i = x_i // 1 = 1. \quad (3.1)$$

$$0 // x_i = x_i // 0 = x_i. \quad (3.2)$$

$$1 \cdot x_i = x_i \cdot 1 = x_i. \quad (3.3)$$

$$0 \cdot x_i = x_i \cdot 0 = 0. \quad (3.4)$$

$$x_i // x_j = x_j // x_i. \quad (3.5)$$

$$x_i x_j = x_j x_i. \quad (3.6)$$

$$x_i // \bar{x}_i = \bar{x}_i // x_i = 1 // 0 = 1. \quad (3.7)$$

$$x_i \bar{x}_i = \bar{x}_i x_i = 1 \cdot 0 = 0. \quad (3.8)$$

$$(\bar{x}_i) = \bar{\bar{x}_i} = 1 - x_i = x_i. \quad (3.9)$$

\*  $\bar{x}_i$  を  $\sim x_i$  とか、 $x_i'$  と書く書物もある。

$$x_i/(x_j/x_k) = (x_i/x_j)/x_k = x_i/x_j/x_k. \quad (3.10)$$

$$x_i(x_j x_k) = (x_i x_j) x_k = x_i x_j x_k. \quad (3.11)$$

$$x_i/x_i/\dots\dots\dots/x_i = x_i. \quad (3.12)$$

$$\underbrace{x_i x_i \dots\dots\dots x_i}_{n \text{ 個}} = x_i^n = x_i. \quad (3.13)$$

$$x_i \doteq x_j \text{ ならば,} \\ x_j = \bar{x}_i. \quad (3.14)$$

#### 4. 論理数学における証明手続き

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  を  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の和, 積および共軛の有限個の結合されたものとするとき, その間に成立ついろいろの関係を証明するには, 一般的には, 第2節における定義と次に説明する原則とを利用すればよいであろう. すなわち,  $x_i$  を除いた残りの  $n-1$  個の  $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$  が固定されているとした場合, 証明しようとする関係が  $x_i=0$  および  $x_i=1$  の両方の場合について成立てば十分である.

これは,  $x$  として連続変数を用いた場合の一般代数学では, 特定の有限個の値の所で所望の関係が成立つても, 一般に所要の関係が成立つとは限らないことに比べれば, 極めて簡単なことである.

もちろん, 個々の問題については, それぞれに便利な証明手続きも考えられることは次節以下にみられる通りである.

#### 5. やや複雑な関係

$$x_i(x_j/x_k) = x_i x_j/x_k. \quad (5.1)$$

$$x_i/x_i x_j = x_j. \quad (5.2)$$

$$x_i(x_i/x_j) = x_i. \quad (5.3)$$

$$x_i/\bar{x}_i x_j = x_j. \quad (5.4)$$

$$(x_i/x_j)(x_i/x_k) = x_i/x_j x_k. \quad (5.5)$$

$$(x_i/x_j)(\bar{x}_i/x_k)(x_j/x_k) = (x_i/x_j)(\bar{x}_i/x_k). \quad (5.6)$$

$$x_i x_j/\bar{x}_i x_k/x_j x_k = x_i x_j/\bar{x}_i x_k. \quad (5.7)$$

証明:

(5.1) 式:

$$x_i=1 \text{ ならば } \text{左辺} = \text{右辺} = x_j/x_k,$$

$$x_i=0 \text{ ならば } \text{左辺} = \text{右辺} = 0.$$

よって (5.1) 式は成立つ.

(5.2) 式:

(5.1) 式の関係および (3.1) 式を利用すれば,

$$x_i/x_i x_j = x_i(1/x_j) = x_i \cdot 1 = x_i. \quad \text{Q. E. D.}$$

(5.3) 式:

$$x_i(x_i/x_j) = x_i^2/x_j = x_i/x_j = x_i. \quad \text{Q. E. D.}$$

(5.4) 式:

$$(5.3) \text{ 式により } x_i = x_i/x_i x_j.$$

であるから,

$$x_i/\bar{x}_i x_j = x_i/x_i x_j/\bar{x}_i x_j = x_i/(x_i/\bar{x}_i) x_j = x_i/1 \cdot x_j \\ = x_i/x_j. \quad \text{Q. E. D.}$$

(5.5) 式:

$$(x_i/x_j)(x_i/x_k) = (x_i/x_j) x_i/(x_i/x_j) x_k = x_i/x_i x_k/x_j x_k \\ = x_i/x_j x_k. \quad \text{Q. E. D.}$$

(5.6) 式:

$$x_j \doteq x_k \text{ ならば, } x_k = \bar{x}_j \text{ であるから,} \\ x_j x_k = x_j \bar{x}_j = 0.$$

したがってこの場合には確かに (5.7) 式は成立つ.

また,  $x_j = x_k$  ならば,  $x_j x_k = x_j^2 = x_j$  であるから,

$$\text{左辺} = x_i x_j/\bar{x}_i x_j/x_j = (x_i/\bar{x}_i/1) x_j = x_j,$$

$$\text{右辺} = x_i x_j/\bar{x}_i x_j = (x_i/\bar{x}_i) x_j = x_j.$$

したがってこの場合も (5.7) 式は成立つ.

ゆえに一般に (5.7) 式は成立つ.

#### 6. De Morgan の定理

6.1.

$$y = x_1/x_2/\dots\dots\dots/x_n \quad (6.1)$$

$$\text{とすれば, } \bar{y} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots\dots\dots \bar{x}_n \quad (6.2)$$

すなわち, 各変数の論理和の共軛は, 各変数の共軛の論理積となる.

証明:

$$\text{まず, } y_1 = x_1/x_2 \quad (6.3)$$

$$\text{とすれば, } \bar{y}_1 = \overline{(x_1/x_2)} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \quad (6.4)$$

であることは, つぎのようにしてわかる.

$$x_1=1 \text{ ならば } y_1=1.$$

$$\text{したがって } \bar{y}_1=0.$$

$$\text{また, } \bar{x}_1 \bar{x}_2 = 0.$$

$$\text{ゆえに } \bar{y}_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2.$$

$$x_1=0 \text{ ならば } y_1=x_2,$$

$$\text{したがって } \bar{y}_1 = \bar{x}_2.$$

$$\text{また, } \bar{x}_1 \bar{x}_2 = \bar{x}_2.$$

$$\text{ゆえに, この場合も } \bar{y}_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2.$$

結局, 一般に (6.4) 式が成立つことがわかる.

$$\text{つぎに, } y_2 = x_1/x_2/x_3 = y_1/x_3 \quad (6.5)$$

とすれば, 前と同様の方法で

$$\bar{y}_2 = \overline{(x_1/x_2/x_3)} = \overline{(y_1/x_3)} = \bar{y}_1 \bar{x}_3 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \quad (6.6)$$

が導かれる.

以下, 同様にして, (6.2) 式の成立つことが証明される.

6.2.

$$y = x_1 x_2 \dots\dots\dots x_n \quad (6.7)$$

$$\text{とすれば } \bar{y} = \bar{x}_1/\bar{x}_2/\dots\dots\dots/\bar{x}_n. \quad (6.8)$$

すなわち, 各変数の論理積の共軛は, 各変数の共軛の論理和となる.

証明:

(6.2) 式の関係と (3.9) 式の関係とにより

$$\bar{y} = \overline{(x_1/x_2/\dots\dots\dots/\bar{x}_n)} = (\bar{x}_1/\bar{x}_2/\dots\dots\dots/\bar{x}_n). \quad \text{Q. E. D.}$$

6.1 項および 6.2 項の関係をあわせて De Morgan の定理という.

#### 7. 一般化された De Morgan の定理

第6節において説明した De Morgan の定理はつぎのように一般化される.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, //, \cdot) \quad (7.1)$$

を変数  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 和記号 (//) および積記号 ( $\cdot$ ) を有限個含む論理関係を示すものとすれば,  $y$  の共軛  $\bar{y}$  については

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, \cdot, //) \quad (7.2)$$

の関係が成立つ. すなわち, もとの関係において,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の位置に  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$  を, 和記号 (//) の位置に積記号 ( $\cdot$ ) を, 積記号 ( $\cdot$ ) の位置に和記号 (//) をおき換えれば, もとの関係の共軛関係が得られる. これは一般化された De Morgan の定理と呼ばれるが, この関係の成立つことは, 第6節で証明した De Morgan の定理の有限個の組合せから成立っていることから明らかである.

例 1. (5.4) 式の関係の証明への応用

$$y = x_i/\bar{x}_i x_j \quad (7.3)$$

の共軛関係をつくれば,

$$\bar{y} = \bar{x}_i/(x_i/\bar{x}_j) = \bar{x}_i x_i/\bar{x}_i \bar{x}_j = \bar{x}_i \bar{x}_j. \quad (7.4)$$

(7.4) 式の関係の共軛をとれば,

$$y = x_i/x_j. \quad (7.5)$$

よって (5.4) 式の関係が証明される.



例 2.

$$(x_1/x_2)(\overline{x_1x_2}) = x_1\overline{x_2}/\overline{x_1x_2} = (x_1/x_2)(\overline{x_1}\overline{x_2}/\overline{x_1x_2}). \quad (7.6)$$

証明:

$$(x_1/x_2)(\overline{x_1x_2}) = (x_1/x_2)(\overline{x_1}/\overline{x_2}) = x_1\overline{x_1}/x_1\overline{x_2}/\overline{x_1x_2}/x_2\overline{x_2} = x_1\overline{x_2}/\overline{x_1x_2}. \quad (7.7)$$

つぎに (7.7) 式の両辺に  $(x_1/x_2)$  を掛ければ,

$$\text{左辺} = (x_1/x_2)^2(\overline{x_1x_2}) = (x_1/x_2)(\overline{x_1x_2}),$$

$$\text{右辺} = (x_1/x_2)(x_1\overline{x_2}/\overline{x_1x_2}).$$

よって  $(x_1/x_2)(\overline{x_1x_2}) = (x_1/x_2)(x_1\overline{x_2}/\overline{x_1x_2})$ . Q. E. D.

## 8. 展開定理

$n$  個の変数  $x_1, x_2, \dots, x_n$  を有限個の和または積で結ぶ関係式

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (8.1)$$

を分解して,  $f(0, 0, \dots, 0), f(1, 0, \dots, 0), \dots, f(1, 1, \dots, 1)$  および  $x_1, x_2, \dots, x_n$  との有限個の和または積の形に変えることを,  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  の展開という.

展開にはつぎのようなものが考えられるが, その最終の形に到達するまでには多くの中間的展開式も考えられる.

8.1.

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= x_1x_2\dots x_nf(1, 1, \dots, 1)/ \\ &\quad \overline{x_1x_2\dots x_n}f(0, 1, \dots, 1)/\dots/ \\ &\quad \overline{x_1x_2\dots x_n}f(0, 0, \dots, 0). \end{aligned} \quad (8.1)$$

証明: まず

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1f(1, x_2, \dots, x_n)/\overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n) \quad (8.2)$$

の関係の成立つことは,  $x_2, x_3, \dots, x_n$  を固定しておいて,  $x_1 = 0$  としたときも,  $x_1 = 1$  としたときも, (8.2) 式の関係が成立つことが直ぐわかる.

同様に考えれば,

$$f(1, x_2, x_3, \dots, x_n) = x_2f(1, 1, x_3, \dots, x_n)/\overline{x_2}f(1, 0, x_3, \dots, x_n), \quad (8.3)$$

$$f(0, x_2, x_3, \dots, x_n) = x_2f(0, 1, x_3, \dots, x_n)/\overline{x_2}f(0, 0, x_3, \dots, x_n) \quad (8.4)$$

であるから,

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1x_2f(1, 1, x_3, \dots, x_n)/x_1\overline{x_2}f(1, 0, x_3, \dots, x_n)/\overline{x_1x_2}f(0, 1, x_3, \dots, x_n)/\overline{x_1}\overline{x_2}f(0, 0, x_3, \dots, x_n) \quad (8.5)$$

となる.

以下同様にして計算を進めれば, (8.1) 式の関係が導かれる.

8.2.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \{x_1/x_2/\dots/x_n/f(0, 0, \dots, 0)\}\{\overline{x_1}/\overline{x_2}/\dots/\overline{x_n}/f(1, 0, \dots, 0)\}\dots\{\overline{x_1}/\overline{x_2}/\dots/\overline{x_n}/f(1, 1, \dots, 1)\}. \quad (8.6)$$

証明: (8.1) 式において,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の代りに  $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}$  とおき換えれば,

$$f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}) = \overline{x_1}\overline{x_2}\dots\overline{x_n}f(1, 1, \dots, 1)/x_1\overline{x_2}\dots\overline{x_n}f(0, 1, \dots, 1)/\dots/x_1\overline{x_2}\dots\overline{x_n}f(0, 0, \dots, 0) \quad (8.7)$$

の関係が得られる. この式の両辺の共軛関係をつくれれば, 第 7 節において説明した一般化された De Morgan の定理により,

$$f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \{x_1/x_2/\dots/x_n/f(0, 0, \dots, 0)\}\{\overline{x_1}/\overline{x_2}/\dots/\overline{x_n}/f(1, 0, \dots, 0)\}\dots\{\overline{x_1}/\overline{x_2}/\dots/\overline{x_n}/f(1, 1, \dots, 1)\} \quad (8.8)$$

となるが, これは (8.6) 式の関係に外ならない.

## 9. 展開定理を利用した数種の関係

$$x_1/f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1/f(0, x_2, \dots, x_n). \quad (9.1)$$

$$x_1f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1f(1, x_2, \dots, x_n). \quad (9.2)$$

$$\overline{x_1}/f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \overline{x_1}/f(1, x_2, \dots, x_n). \quad (9.3)$$

$$\overline{x_1}f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n). \quad (9.4)$$

証明:

(9.1) 式: 展開定理と (5.4) 式とを利用することによって,

$$\text{左辺} = x_1/x_1f(1, x_2, \dots, x_n)/\overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n)$$

$$= x_1/\overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n) = x_1/f(0, x_2, \dots, x_n).$$

Q. E. D.

(9.2) 式:

$$\text{左辺} = x_1\{x_1f(1, x_2, \dots, x_n)/\overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n)\}$$

$$= x_1f(1, x_2, \dots, x_n).$$

Q. E. D.

(9.3) 式:

$$\text{左辺} = \overline{x_1}/\overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n)/x_1f(1, x_2, \dots, x_n)$$

$$= \overline{x_1}/x_1f(1, x_2, \dots, x_n) = \overline{x_1}/f(1, x_2, \dots, x_n).$$

(9.4) 式:

$$\text{左辺} = \overline{x_1}\{x_1f(1, x_2, \dots, x_n)/\overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n)\}$$

$$= \overline{x_1}f(0, x_2, \dots, x_n).$$

Q. E. D.

## 10. 対等 (parity) の定義

2 つの変数  $x_i, x_j$  の積とおのおのの共軛  $\overline{x_i}, \overline{x_j}$  の積との論理和

$$x_ix_j/\overline{x_i}\overline{x_j} \quad (10.1)$$

を, 2 つの変数  $x_i, x_j$  の対等 (parity) といい, これを簡単に

$$x_i|x_j \quad (10.2)$$

と書くことにする\*. すなわち

$$x_ix_j/\overline{x_i}\overline{x_j} = x_i|x_j = x_j|x_i. \quad (10.3)$$

対等は, 電子計算機などにおいて parity check と呼ばれている検算の一方式によく利用される.

## 11. 対等の定義から導かれる簡単な関係

$$1|1 = 0|0 = 1. \quad (11.1)$$

$$1|0 = 0|1 = 0. \quad (11.2)$$

$$x_i|1 = 1|x_i = x_i. \quad (11.3)$$

$$x_i|0 = 0|x_i = \overline{x_i}. \quad (11.4)$$

$$\overline{x_i}|\overline{x_j} = x_i|x_j. \quad (11.5)$$

$$x_i|x_i = \overline{x_i}|\overline{x_i} = 1. \quad (11.6)$$

$$x_i|\overline{x_i} = \overline{x_i}|x_i = 0. \quad (11.7)$$

## 12. 対等に関する主な関係

$$(x_i|x_j) = (x_j|x_i)(x_i|x_j) = \overline{x_i}|x_j = x_i|\overline{x_j}. \quad (12.1)$$

$$(x_ix_j|x_kx_k) = (x_j|x_k)/\overline{x_i}. \quad (12.2)$$

$$(x_i|x_j)|x_k = x_i|(x_j|x_k) = x_i|x_j|x_k. \quad (12.3)$$

$$\begin{aligned} x_i|x_j|x_k &= x_ix_jx_k/(x_i/x_j/x_k)(x_i/x_j/x_k/x_k/x_k) \\ &= x_ix_jx_k/x_i(x_j/x_k)/x_j(x_k/x_i)/x_k(x_i/x_j) \\ &= x_ix_jx_k/\overline{x_i}\overline{x_j}\overline{x_k}/\overline{x_i}\overline{x_j}\overline{x_k}/\overline{x_i}\overline{x_j}\overline{x_k}. \end{aligned} \quad (12.4)$$

証明:

(12.1) 式: 一般化された De Morgan の定理を利用すれば,

$$(x_i|x_j) = (x_ix_j/\overline{x_i}\overline{x_j}) = (x_ix_j)(x_i/x_j)$$

$$= (\overline{x_i}/\overline{x_j})(x_i/\overline{x_j}) = \overline{x_i}x_j/\overline{x_i}\overline{x_j} = \overline{x_i}|x_j = x_i|\overline{x_j}.$$

Q. E. D.

(12.2) 式:

$$f(x_ix_j, x_k) = (x_ix_j|x_kx_k) \quad (12.5)$$

として, これに展開定理 (8.1) 式を適用すれば, つぎのように証明される.

$$\begin{aligned} (x_ix_j|x_kx_k) &= x_ix_jx_k(1|1)/\overline{x_ix_jx_k}(0|0)/\overline{x_ix_jx_k}(0|1)/ \\ &\quad x_ix_j\overline{x_k}(1|0)/\overline{x_ix_jx_k}(0|0)/\overline{x_ix_jx_k}(0|0)/\overline{x_ix_jx_k}(0|0)/ \\ &\quad \overline{x_ix_jx_k}(0|0) \end{aligned}$$

\*  $x_i|x_j$  を  $x_i \dot{x}_j$  と書く例もある.

$$\begin{aligned} &= (x_i/\bar{x}_i) x_j x_k / \bar{x}_i (\bar{x}_j x_k / x_j \bar{x}_k) / (x_i/\bar{x}_i) \bar{x}_j \bar{x}_k \\ &= (x_j/x_k) / (x_j/x_k) \bar{x}_i \\ &= (x_j/x_k) / \bar{x}_i, \quad (5.4) \text{ 式の関係により).} \end{aligned}$$

(12.3) 式:

$$f(x_i, x_j, x_k) = (x_i/x_j) | x_k$$

に展開定理 (8.1) 式の関係を活用すればつぎようになる。

$$\begin{aligned} (x_i/x_j) | x_k &= x_i x_j x_k ((1|1)|1) / \bar{x}_i x_j x_k ((0|1)|1) / \\ &\quad x_i \bar{x}_j x_k ((1|0)|1) / x_i x_j \bar{x}_k ((1|1)|0) / \bar{x}_i \bar{x}_j x_k ((0|0)|1) / \\ &\quad \bar{x}_i x_j \bar{x}_k ((0|1)|0) / x_i \bar{x}_j \bar{x}_k ((1|0)|0) / \bar{x}_i \bar{x}_j \bar{x}_k ((0|0)|0) \\ &= x_i x_j x_k / \bar{x}_i \bar{x}_j x_k / \bar{x}_i x_j \bar{x}_k / x_i \bar{x}_j \bar{x}_k. \quad (12.6) \end{aligned}$$

同様に、

$$\begin{aligned} x_i | (x_j/x_k) &= x_i x_j x_k (1|(1|1)) / \bar{x}_i x_j x_k (0|(1|1)) / \\ &\quad x_i \bar{x}_j x_k (1|(0|1)) / x_i x_j \bar{x}_k (1|(1|0)) / \bar{x}_i \bar{x}_j x_k (0|(0|1)) / \\ &\quad \bar{x}_i x_j \bar{x}_k (0|(1|0)) / x_i \bar{x}_j \bar{x}_k (1|(0|0)) / \bar{x}_i \bar{x}_j \bar{x}_k (0|(0|0)) \\ &= x_i x_j x_k / \bar{x}_i \bar{x}_j x_k / \bar{x}_i x_j \bar{x}_k / x_i \bar{x}_j \bar{x}_k. \quad (12.7) \end{aligned}$$

(12.6) と (12.7) とを比較すれば

$$(x_i/x_j) | x_k = x_i | (x_j/x_k).$$

この関係が成立てば、両辺の括弧をはずして

$$(x_i/x_j) | x_k = x_i | (x_j/x_k) = x_i | x_j | x_k$$

と書くことができる。

(12.4) 式: この関係の内、最後の関係は (12.3) 式の関係に導く途中で証明されている。

第二の関係は、

$$\bar{x}_i \bar{x}_j = (x_i/\bar{x}_j),$$

$$\bar{x}_j \bar{x}_k = (x_j/\bar{x}_k),$$

$$\bar{x}_i \bar{x}_k = (x_i/\bar{x}_k)$$

が成立つので、最後の関係から直ちに導ける。

第一の関係はつぎのようにして証明される。

展開定理 (8.6) 式を

$$f(x_i, x_j, x_k) = x_i \bar{x}_j \bar{x}_k / \bar{x}_i x_j \bar{x}_k / \bar{x}_i \bar{x}_j x_k$$

に適用すれば、

$$\begin{aligned} f(x_i, x_j, x_k) &= \{x_i/\bar{x}_j/x_k\} f(0, 0, 0) \{ \bar{x}_i/\bar{x}_j/x_k \} f(1, 0, 0) \cdot \\ &\quad \cdot \{x_i/\bar{x}_j/x_k\} f(0, 1, 0) \{ \bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k \} f(0, 0, 1) \{ \bar{x}_i/\bar{x}_j/x_k \} \\ &\quad \cdot f(1, 1, 0) \{ \bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k \} f(1, 0, 1) \{ \bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k \} f(0, 1, 1) \cdot \\ &\quad \cdot \{ \bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k \} f(1, 1, 1) \} \\ &= (x_i/\bar{x}_j/x_k) \cdot 1 \cdot 1 \cdot (\bar{x}_i/\bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) (x_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) \\ &\quad (x_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) \\ &= (x_i/\bar{x}_j/x_k) \{ (\bar{x}_i/\bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) \} \{ (x_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) \\ &\quad (\bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) \} \{ (x_i/\bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) \} \end{aligned}$$

が得られる。

しかるに (5.5) 式により

$$\begin{aligned} (\bar{x}_i/\bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) &= (\bar{x}_i \bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i \bar{x}_j/\bar{x}_k) \\ &= \bar{x}_i \bar{x}_j/x_k \bar{x}_k = \bar{x}_i \bar{x}_j. \end{aligned}$$

同様に

$$(\bar{x}_i/\bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) = \bar{x}_i \bar{x}_k,$$

$$(x_i/\bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i/\bar{x}_j/\bar{x}_k) = \bar{x}_j \bar{x}_k.$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} f(x_i, x_j, x_k) &= (x_i/\bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_i \bar{x}_j) (\bar{x}_j \bar{x}_k) (\bar{x}_i \bar{x}_k) \\ &= (x_i/\bar{x}_j/x_k) (x_i \bar{x}_j/x_k) (\bar{x}_j \bar{x}_k/x_k) (\bar{x}_i \bar{x}_k). \end{aligned}$$

よって (12.4) 式の第一の関係が導かれる。

### 13. n 個の変数から成る対等の性質

13.1.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 | x_2 | \dots | x_{n-1} | x_n$$

とすれば、 $x_1, x_2, \dots, x_n$  の内、0 が奇数個あれば、

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (13.1)$$

であり、 $x_1, x_2, \dots, x_n$  の内、0 が偶数個あれば、

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 \quad (13.2)$$

である。

何となれば

$$0|0|\dots|0=0, \quad \text{奇数個}$$

$$0|0|\dots|0=1, \quad \text{偶数個}$$

であるから。

13.2.

$$(x_1 | x_2 | \dots | x_n) = \bar{x}_1 | x_2 | \dots | x_n = x_1 | \bar{x}_2 | \dots | x_n$$

$$= x_1 | x_2 | \dots | \bar{x}_n,$$

$$(x_1 | x_2 | \dots | x_n) = \bar{x}_1 | \bar{x}_2 | \bar{x}_3 | x_4 | \dots | x_n$$

$$= x_1 | \bar{x}_2 | \bar{x}_3 | \bar{x}_4 | x_5 | \dots | x_n$$

$$\dots \dots \dots$$

一般に、

$$(x_1 | x_2 | \dots | x_n) = \bar{x}_1 | \bar{x}_2 | \dots | \bar{x}_n$$

と書けば、右辺の  $x_1, x_2, \dots, x_n$  の内、奇数個だけがその共軛となっている。そのわけは

$$x_i | x_j = \bar{x}_i | \bar{x}_j$$

の関係が知られているからである。

## 第 II 部 論理数式と回路関係

### 13. 開接点回路と閉接点回路

$x_i$  は 0 か 1 かのいずれかの値をとりうる変数であるから、これを接点回路の“開”か“閉”かのいずれかに対応させることができる。

この解説では、

$x_i=0$  を開接点回路に、

$x_i=1$  を閉接点回路に

対応づける。すなわち

$$\text{開接点回路: } \begin{array}{c} x_i=0 \\ \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} = \begin{array}{c} \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} = \begin{array}{c} \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} \quad (13.1)$$

$$\text{閉接点回路: } \begin{array}{c} x_i=1 \\ \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} = \begin{array}{c} \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} = \begin{array}{c} \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} \quad (13.2)$$

$$\text{一般接点回路: } \begin{array}{c} x_i \\ \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} = \begin{array}{c} \text{A} \end{array} \text{---} x_i \text{---} \text{B} \quad (13.3)$$

のように対応づける。

この対応関係を、論理和、論理積および共軛関係にあてはめればつぎようになる。

論理和  $= x_i | x_j = x_i$  と  $x_j$  との並列接続

$$= \begin{array}{c} \text{A} \end{array} \text{---} \begin{array}{c} x_i \\ \text{B} \end{array} \quad (13.4)$$

論理積  $= x_i x_j = x_i$  と  $x_j$  との直列接続

$$= \begin{array}{c} \text{A} \end{array} \text{---} x_i \text{---} x_j \text{---} \begin{array}{c} \text{B} \end{array} \quad (13.5)$$

共軛  $= \bar{x}_i = x_i$  の否定

$$\begin{array}{c} x_i \\ \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} = \begin{array}{c} x_i \\ \text{A} \end{array} \text{---} \text{B} \quad (13.6)$$

2 図

以上に対し、

$x_i=0$  を閉接点回路に、

$x_i=1$  を開接点回路に

対応づける考え方も可能である。この場合には、1 つの回路に対する論理数式関係は、同じ回路に対するこの解説中での論理数式関係  $f(x_1, x_2, \dots, x_n, //, \cdot)$  において、和記号 ( $|$ ) を積記号に、積記号 ( $\cdot$ ) を和記号に書き換えた関係  $f(x_1, x_2, \dots, x_n, \cdot, //)$  となることに注意すればよいであろう。たとえば、 $x_i$  と  $x_j$  との並列接続は  $x_i x_j$  なる論理積で、 $x_i$  と  $x_j$  との直列接続は  $x_i | x_j$  なる論理和で表現されることになるように。

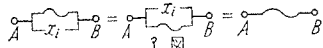
## 14. 種々の論理数式に対応する回路

論理数式

回路関係

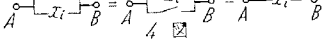
(3.1) 式:

$$1/x_i = x_i/1 = 1.$$



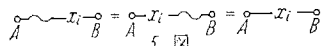
(3.2) 式:

$$0/x_i = x_i/0 = x_i.$$



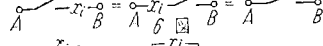
(3.3) 式:

$$1 \cdot x_i = x_i \cdot 1 = x_i.$$



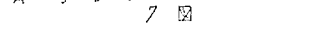
(3.4) 式:

$$0 \cdot x_i = x_i \cdot 0 = 0.$$



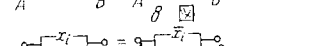
(3.5) 式:

$$x_i/x_j = x_j/x_i.$$



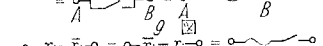
(3.6) 式:

$$x_i x_j = x_j x_i.$$



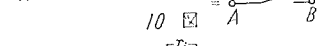
(3.7) 式:

$$x_i/\bar{x}_i = \bar{x}_i/x_i = 1/0 = 1.$$



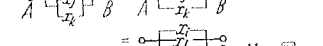
(3.8) 式:

$$x_i \bar{x}_i = \bar{x}_i x_i = 1 \cdot 0 = 0.$$

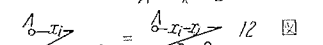


(3.10) 式:

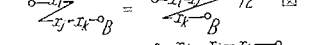
$$x_i/(x_j/x_k)$$



$$= (x_i/x_j)/x_k$$

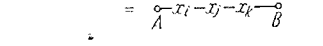


$$= x_i/x_j/x_k.$$

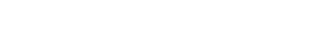


(3.11) 式:

$$x_i(x_j x_k) = (x_i x_j) x_k$$



$$= x_i x_j x_k.$$



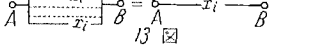
(3.12) 式:

$$x_i/x_i/\dots/x_i = x_i = x_i.$$



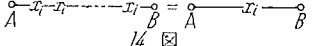
(3.13) 式:

$$x_i x_i \dots x_i = x_i.$$



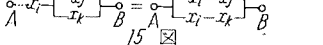
(5.1) 式:

$$x_i(x_j/x_k) = x_i x_j/x_k.$$



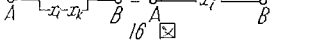
(5.2) 式:

$$x_i/x_i x_j = x_i.$$



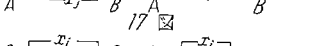
(5.3) 式:

$$x_i(x_i/x_j) = x_i.$$



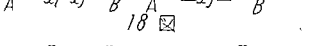
(5.4) 式:

$$x_i/\bar{x}_i x_j = x_i/x_j.$$



(5.5) 式:

$$(x_i/x_j)(x_i/x_k)$$

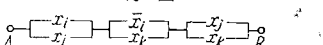


$$= x_i/x_j x_k.$$

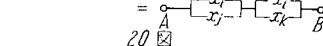


(5.6) 式:

$$(x_i/x_j)(\bar{x}_i/x_k)(x_j/x_k)$$

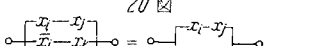


$$= (x_i/x_j)(\bar{x}_i/x_k).$$

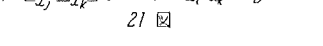


(5.7) 式:

$$x_i x_j/\bar{x}_i x_k/x_j x_k$$



$$= x_i x_j/\bar{x}_i x_k.$$



## 15. OR回路, AND回路, NOT回路, INHIBIT回路

真空管, フェライト, トランジスタ等を用いた無接点継電器によって実現される回路形式には特別な名称がつけられており, また, その記号法も種々考えられている. たとえばつぎに示すものはその1つの例である.

a. OR回路または Buffer 回路 いくつかの入力信号の内, 少くも1つが零信号でないとき, 出力信号が零でないことを示す回路.

入力信号を  $x_1, x_2, \dots, x_n$  とすれば, これらの内, 少くも

1つが1であるとき, 出力信号  $y$  が1であることを示す数式関係は

$$x_1/x_2/\dots/x_n = y \quad (15.1)$$

である. この関係を 22 図のようにあらわす. これは継電器でいえば, 各入力をあらわす接点群の並列結線に当る.

b. AND回路または Gate 回路 入力信号を  $x_1, x_2, \dots, x_n$  とするときのことごとくが零でないときだけ, 出力信号  $y$  が零でないことを示す回路

零でない信号を1とすれば, この回路は

$$x_1 x_2 \dots x_n = y \quad (15.2)$$

で表現されるが, この関係を 23 図のようにあらわす. これは継電器で言えば, 各入力をあらわす接点群の直列結線に当る.

c. NOT回路 1つの入力信号が零であるときはつねに出力信号が存在するが, 入力信号が零でなくなると, 出力信号が零となる回路

入力信号を  $x_i$  とすれば, 出力信号  $y$  は

$$y = \bar{x}_i \quad (15.3)$$

と表現されるが, この関係を 24 図のようにあらわす. これは継電器で言えばバック接点に当る.

d. INHIBIT回路または INHIBIT Gate 回路あるいは AND NOT 回路 2つの入力信号  $x_i$  と  $x_j$  があるとき,  $x_i = 1, x_j = 0$  のときだけ出力信号  $y$  が1となる回路

これは  $\bar{x}_j = 1$  であるから,  $x_i$  と  $\bar{x}_j$  との AND 回路と考えられる.

したがって, これは 25 図で表現できるわけであるが, これを 26 図のように書くのが普通である.

## 16. 種々の応用回路

まきがきにおいて述べた, 自動計算機や工作機械の計数式段取り自動化装置などに用いられる種々の演算回路や制御回路等は, 第15節において定義した OR, AND, NOT および INHIBIT 等の基本回路と, 時間遅延装置や記憶装置とを組合せて実現することができる. つぎにその2, 3の例を示す.

16.1. 半加算器  $x_1$  および  $x_2$  はいずれも0かまたは1かはいずれかの値を取りうる変数とするとき, その2進法での代数和

$$y = x_1 + x_2 \quad (16.1)$$

を考える. このとき, 表1に示すように, 入力  $x_1, x_2$  の組合

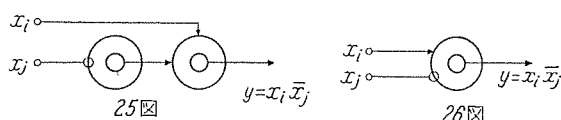
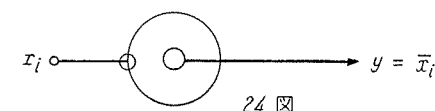
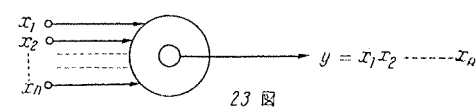
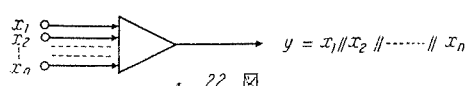




表 1

入 力		代数和	出力
$x_1$	$x_2$	$y$	$x_3$
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	10	0

表 2

入 力		出力	論理和	論理積	対等
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 \vee x_2$	$x_1 x_2$	$x_1   x_2$
0	0	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	1

せに対し、出力が  $y$  の第 1 位\* の桁の数  $x_3$  となるような装置が考えられるが、この装置は半加算器と呼ばれる。

半加算器をさきに述べた基本回路の組合せとして構成するため、表 2 に示すように、 $x_1$  と  $x_2$  とから、その論理和、論理積、対等などをつくってみる。そうすれば、 $x_3$  と対等  $x_1 | x_2$  との間には、つぎの関係のあることがわかる。

$$x_3 = (x_1 | x_2) = x_1 | \bar{x}_2 = \bar{x}_1 | x_2 \quad (16.2)$$

これはまた、(12.1) 式の関係から

$$x_3 = (x_1 // x_2) (x_1 x_2) \quad (16.3)$$

と書ける。

(16.3) 式の右辺は 27 図に示すような 3 つの基本回路から組立てられた 28 図のような回路で実現される。すなわち、28 図は入力  $x_1$  と  $x_2$  であり、出力  $x_3$  であるような半加算回路を示している。

なお、(16.1) 式の代数和  $y$  の第 2 位の桁の数値が  $x_1 x_2$  に等しいことは、 $y$  の第 2 位の桁が 1 となるのは  $x_1$  と  $x_2$  とが同時に 1 であるときだけであることから容易にわかる。

16.2. 全加算器 半加算器を考える動機となった (16.1) 式にならって、0 か 1 かのいずれかの値をとり得る 3 つの変数  $x_1, x_2, x_3$  の 2 進法代数和

$$y = x_1 + x_2 + x_3 \quad (16.4)$$

の第 1 位の桁の数値  $x_4$  が、 $x_1, x_2, x_3$  のどのような組合せから導かれるかを考えてみる。

$$\text{まず、(16.4) 式を } y = y_1 + x_3, \quad (16.5)$$

$$y_1 = x_1 + x_2 \quad (16.6)$$

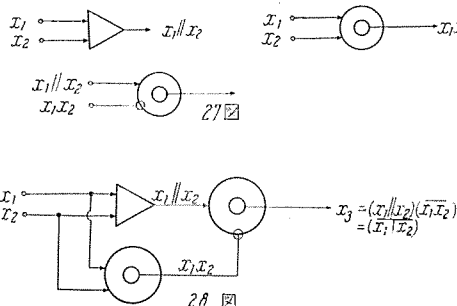
のように 2 つに分けて考える。 $y$  の第 1 位の桁の数値  $x_4$  は、 $y_1$  と  $x_3$  との代数和の第 1 位の桁の数値であるが、これはまた、 $y_1$  の第 1 位の桁の数値と  $x_3$  との代数和の第 1 位の桁の数値でもある。しかるに第 16.1 項での説明によれば、 $y_1$  の第 1 位の桁の数値は、 $x_1$  と  $x_2$  との対等  $(x_1 | x_2)$  の共輓  $(x_1 | \bar{x}_2)$  であるが、同じ第 16.1 項での説明から、 $x_4$  は  $(x_1 | \bar{x}_2)$  と  $x_3$  との対等  $(x_1 | \bar{x}_2 | x_3)$  の共輓、 $x_1 | x_2 | x_3$  に等しい。すなわち

$$x_4 = x_1 | x_2 | x_3 \quad (16.7)$$

(12.4) 式を参照すれば、これはまた、

$$x_4 = x_1 | x_2 | x_3 = x_1 x_2 x_3 // (x_1 // x_2 // x_3) (x_1 x_2 // x_2 x_3 // x_3 x_1) \quad (16.8)$$

と書ける。(16.8) 式の右辺が求める  $x_1, x_2, x_3$  の組合せであるが、これを OR, AND, INHIBIT 各回路の組合せとしてあらわせば 29 図のようになる (30 図はその略記号)



\* 桁位は低い方から第 1 位、第 2 位、... と呼ぶことにする。

(16.4) 式の第 2 位の桁の数値は、16.1 項での説明から考えれば、

(1)  $y_1$  の第 2 位の桁の数値  $x_1 x_2$  か、

(2)  $y_1$  が 1 であれば、 $x_1 // x_2 = 1$  であるが、そのとき、 $x_3$  が 1 である場合の、 $y_1 + x_3$  なる代数和における桁上りから起る  $y$  の第 2 位の桁の数値、 $(x_1 // x_2) x_3$  かのいずれかである。

結局、(16.4) 式の和における  $y$  の第 2 位の桁の数値は、

$$x_1 x_2 // (x_1 // x_2) x_3 = x_1 x_2 // x_2 x_3 // x_3 x_1 \quad (16.9)$$

と表わせることになる。

29 図の装置を利用して 2 つの 2 進数の和を求める回路を考えてみる。

$n$  桁の 2 つの 2 進数を

$$A = a_n a_{n-1} \cdots a_2 a_1, \quad (16.10)$$

$$B = b_n b_{n-1} \cdots b_2 b_1 \quad (16.11)$$

とし、さらに

$$c_1 = 0, \quad (16.12)$$

$$c_2 = a_1 b_1, \quad (16.13)$$

$$c_3 = a_2 b_2 // b_2 c_2 // a_2 c_2, \quad (16.14)$$

$$\vdots$$

$$c_{i+1} = a_i b_i // b_i c_i // a_i c_i, \quad (16.15)$$

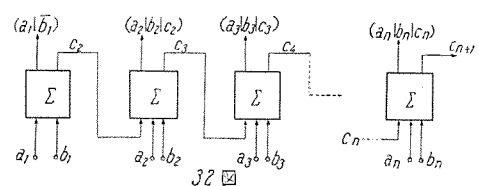
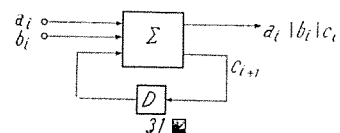
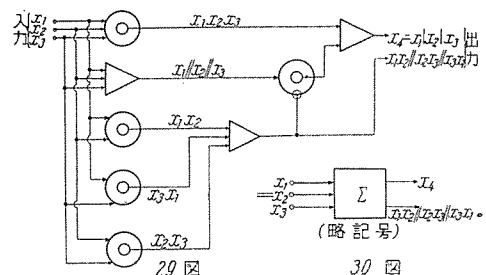
$$\vdots$$

$$c_{n+1} = a_n b_n // b_n c_n // a_n c_n \quad (16.16)$$

とおけば、 $c_{i+1}$  は 2 数  $A$  と  $B$  との代数和、 $A+B$  における第  $i$  桁での桁上り数値となっていることは前述のことから明らかである。したがってつぎのような加算器が考えられる。

(1) 直列型全加算器 (31 図) ただし  $D$  は 1 桁遅延装置である。

(2) 並列型全加算器 (32 図)



## 17. むすび

以上、電子計算機における演算や、機械のテープ制御などに使用される基礎回路の一部である、OR, AND, NOT, INHIBIT 回路等を、論理数学における演算と対比して導くことを説明し、2, 3 の例を挙げたが、サイバトロンを用いた種々の制御問題の例についての研究論文がやがて本誌を飾ることになるであろう。

## 電力用変圧器の趨勢

S. Bennon・G. R. Monroe: Trends in Power Transformer. (Westinghouse Engineer, Vol. 16, No. 6, Nov. 1956, p. 178~182)

### 外鉄型変圧器における進歩

#### (1) kVA 容量

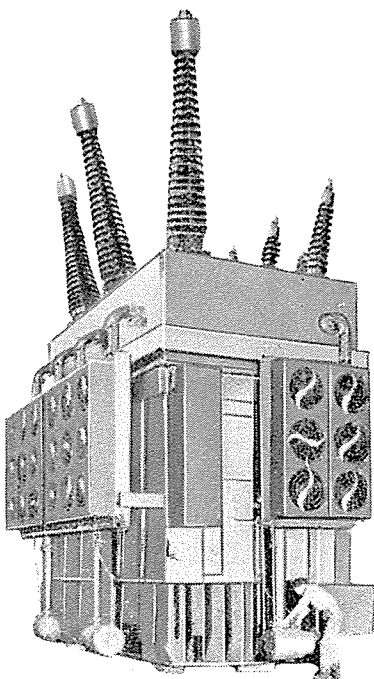
100 MVA の変圧器が始めて製作されたのがわずか 10 年前であるが、1952 年に 190 MVA、1954 年に 220 MVA、1955 年に 315 MVA 発電機用変圧器 2 台が納入された (1 図)。現在 325~380 MVA の変圧器を製作中で、すなわち最近 10 年間に容量が実に約 4 倍に増加している。単巻変圧器では 400 MVA の記録品が納入された (2 図)。

これはまったくあらゆる技術面——材料・工作・設計技術——の進歩の結果であった。等電位面に並行に固形絶縁物を配するとともに対コロナ絶縁は絶縁寸法を縮小し、方向性電気鋼板は高磁束密度を可能にし鉄心重量と鉄損を減小した。直流式高送油冷却は有効な熱交換を行い銅量を減じ最高温度点を下げた。外鉄型 Form-Fit 設計は重量寸法を縮小し一面機械的安全度を増大した。この 4 つの進歩のために合理的な寸法と重量の限度内で高容量器を製作可能にしたのである。

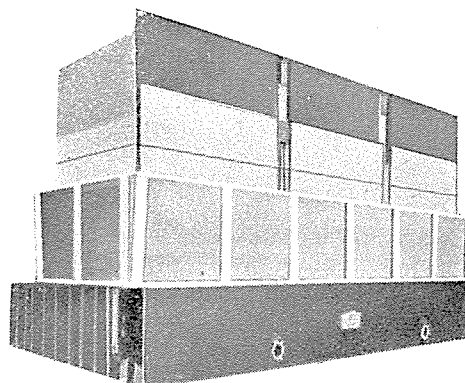
この大容量化傾向は kVA 当りのコスト設備費を下げ運転費を節約して経済性を増大し、信頼性の高まりとともに容量増加傾向を加速している

#### (2) 電圧定格

1935 年に 287 kV ができてから (Los Angeles-Boulder Dam line), 500 kV の試験器 (Brilliant, Ohio) が運転されたが、1953 年に最初の 330 kV、150 MVA 単巻変圧器が製作されるまで 18 年間は最高電圧であった。330 kV 変圧器は W 社で 5,000,000 kVA 以上製作された。



1 図 150 MVA, 330 kV, 3 相単巻変圧器



2 図 400 MVA, 330 kV 単巻変圧器の鉄心および線輪

また既設系統の昇圧傾向も顕著で 69 kV が 115 kV あるいは 138 kV に 138 kV は 230 kV にし、運転電圧を上げて応じている。

#### (3) BIL の低減

運転電圧が高くなるにつれて変圧器の価格が高くなり、1 つの障害であるが、115~161 kV は 1 階級、230 kV 以上は 1 階級半 BIL を下げることが現在のやり方である。系統接地と運転電圧が許せば BIL を 2 段下げることもある。たとえば、新 138 kV 設計 550 kV BIL を 450 kV BIL で運転している。また新しい 230 kV 変圧器 825 BIL を 750 BIL とする。かくして BIL 低減と原価低減が運転電圧をさらに高めた。

現在の低減 BIL の変圧器は避雷器の特性の進歩によって可能になったのであり、結果的には雷に対して 20 年前の全 BIL 絶縁の変圧器より保護が完全である。とくに 2 段低減絶縁に対しては低周波系統過電圧の問題について研究が必要である。

#### (4) 単巻変圧器

単巻変圧器の使用が次第に増加しているが、これはタップを少くすると価格の節減がとくに大きい。直通インピーダンスの小さい点は送電線路の直列インピーダンスで補われる。

#### (5) 可搬変圧器

変圧器の利用度を高める目的で可搬移動変圧器が増加した。外鉄型 Form-Fit 設計は端子套管を両側につけて横置きできる特長をもっており、著しく高さを減じ公道の限界高さ内に入れることが容易である。

新しい傾向として鉄道用のものがあるが、これは特に設計された車を付属し、一例を 3 図に示す。

#### (6) 油入ケーブル端子

ケーブル線路に対して変圧器に油入端子室をつける方式が開発された。すなわち変圧器套管は側面の油入ポケットの中に出され、套管は巻線端子であるとともに高圧ケーブル油と低圧変圧器との封緘をする。

### 内鉄型変圧器の進歩

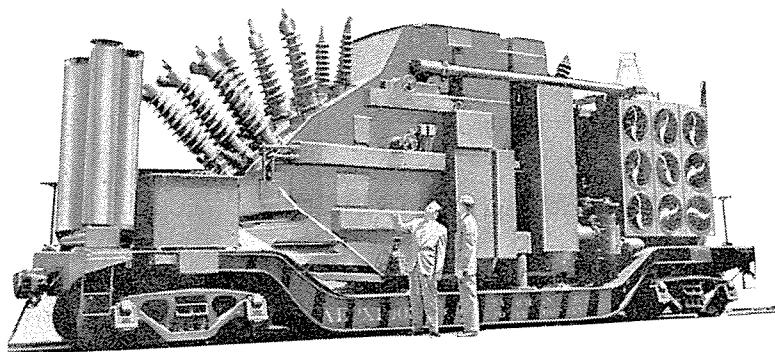
#### (1) 巻線の新しい型

34.5 kV 以下の小容量変圧器に Low-grocap と称する新しい巻線方式が採用された。これは名称の示すとおり対地静電容量をとくに小さく設計されたもので理想的衝撃電圧分布を呈する。69 kV 以上の中容量器には Hiser cap 巻線がすぐれている。これは直列静電容量がとくに大きく同じく電圧分布が優秀である。これらの変圧器は ASA にしたがってインパルス・テストの quality control を行っている。

#### (2) その他

Sealedaire 等について寿命試験の比較を行ったこと、15 kV 級の新套管、また Coastal Finish (塗装) について述べている。

(伊丹製作所 田村良平訳)



3 図 50 MVA 132 kV 移動変圧器

## 配電系統の保護

L. V. Chabala · T. J. Herter: Distribution System Protection, (Westinghouse Engineer, Vol. 16 No. 6 Nov. 1956, p. 183~187)

雷の襲来があつて電燈がわずがちらついても消費者はほとんど気がつかない。これは避雷器が雷を大地へ逃がし、あるいはリクローザが接地故障点を分離したからで、最近の配電線の保護装置の代表的な形式である。配電線への投資は電力会社の投資の半分近くに達するもので、この保護については慎重に考えられ種々の自動保護機器が開発され使用されているが、その主なものは、避雷器・カットアウト・ヒューズ・リクローザ、セクショナルライザである。

### 避雷器

襲雷による過電圧を保護し、雷を瞬時に大地へ逃がすもので、その後直ちに開路状態となって消費者への電力の供給にはなんら支障をきたさない。これにはパルプ型のもので、放出型とがあつて、前者は非直線抵抗を用いて電流を制御し、後者はガスを含んだファイバに電弧をあててガスを発生させ、これによっていずれも続流を遮断するものである。

### カットアウトヒューズ

配電線でなんらかの原因により短絡事故の起ることは避けられない。ヒューズは他の機器が破壊される前に短絡電流を遮断するために設けられた“故意に弱くしてある部分”である。カットアウトヒューズには密閉型、開放型があつて、前者は碍子の箱にはいつていて、溶断すれば蓋が開くようになっている。一方開放型は支持碍子の上下にヒンジを取り付けてヒューズ筒を断路器型にとりつけたもので、負荷断路用のアタッチメントをつけることができる。すなわちこれの操作レバーを引くとヒューズ筒内でヒューズが切れて普通のヒューズの溶断動作をして負荷電流を遮断する。

### リクローザ〔自動再閉路遮断器〕

リクローザは過電流によって開路し、自動再投入を調整された回数行うものである。

経験によると配電線事故のかかなりの部分は最初の再閉路で成功し、残りのほとんどは2回目の再閉路で成功している。したがつてたとえばヒューズと共に設置した場合、最初の1, 2回は瞬時に動作してヒューズが溶断しないで一時的な事故を除去するようにし、その後は投入時間ある程度長くして永久事故部分のヒューズが溶断できるようにするならばリクローザが開路

でロックされず停電をきわめて小範囲とできる。

### セクショナルライザ

リクローザをその電流動作時間特性を協調させて全配電線に設けることは経費がかさむので電流を遮断しないセクショナルライザを供用することが経済的である。これは過電流の回数を数えるカウンタによって電源側のリクローザの動作を見、それが開路でロックされる前の無電流状態のときに接点を開いて故障点を分離するものである。また線路分割等の普通の負荷電流は遮断できる。

### コールドロードピックアップスイッチ

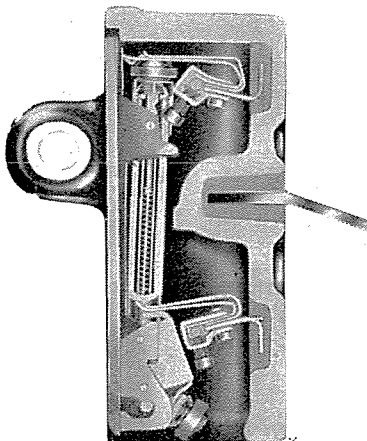
種々の自動保護開閉器が使用されてきたが、永久事故を取り除いてかなりの時間後送電を始めたときに、たとえば冷蔵庫・ポンプ等のモータがすべてスタートの状態になっている可能性が多い。このような場合、普通の負荷の何倍もの電流となって自動開閉器は動作し、送電ができないことがある。そこで電圧が印加されてからバイメタルを使用して或る調整された時間の後にこれらの負荷を分割して投入するようにしたものがコールドロードピックアップスイッチである。開路はリクローザ等が開路でロックされてから或る時間の後に行われる。

### 配電線の保護

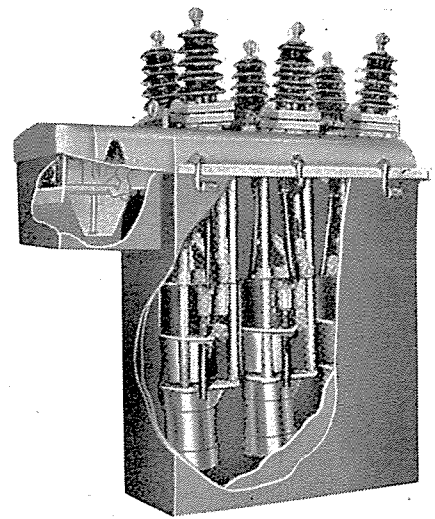
配電線のサービスの向上のためにはこれらの機器を経済的に良く協調して配置する必要があるが、そのためには配電系統の特性を良く知る必要がある。基本的な事項としては、(1) 保護機器は十分高い定格電圧であること、(2) 連続定格電流は合理的であること、(3) 遮断電流、短時間定格電流は短絡電流より十分大きいこと、(4) 保護区間の端での最少短絡電流が動作に十分なだけ大きいこと、(5) 直列となる保護機器の過電流動作時間特性が協調していること。

種々の定格のこれらの機器を組合せることによってより信頼しうる配電を経済的に行えるが、今後さらに新しい型のものへの要求がつつぎと現れてくるであろう。

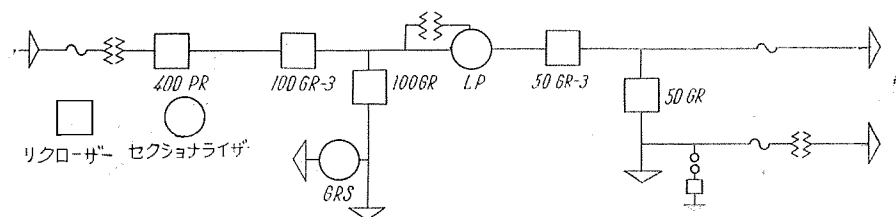
(伊丹製作所 亀山三平訳)



密閉型  
カットアウト  
ヒューズ

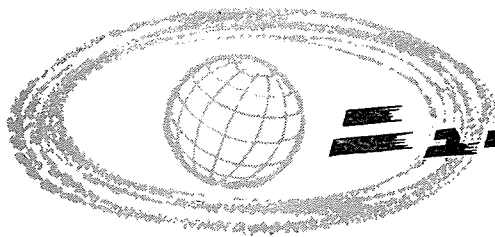


50GR-3 型 リクローザ



単線結線





# ニュースフラッシュ

## ■ 高分子化学の研究に偉力！

### ベルト起電機（電子線加速用）を開発

ベルト起電機はファンデグラフ型静電発電機とも呼ばれ、イオンを加速して物理実験用として各大学で使用されてきた。

本装置は電子を加速し工業的応用を目的として製作したもので、わが国では工業的応用としてその製作に乗り出したのは当社が最初である。

加速装置としては種々あるが、そのうちでも比較的に高いエネルギーと電流とが安定に得られるのがベルト起電機である。装置の原理は簡単で高速度（普通 20 m/sec 前後）で回転する絶縁ベルトで電荷を運搬し、それを高圧電極に蓄えて得た直流の高電圧によって加速した電子線を 200 サイクルで走査するものである。

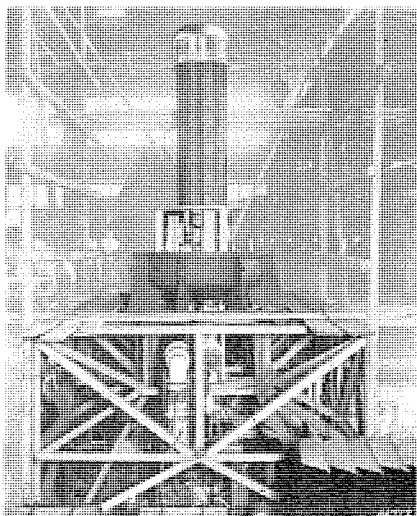
写真は左側がフープで右側が加速管である。この装置の工業的応用の 1 つとしては高分子化学がある。すなわち高分子物質に 1 Mev 程度の電子線を適量照射すると普通の化学方法では起らなかった新しい変化が起り、その強度、伸び、耐熱性等が改善され、またあらゆる溶剤に対して不溶性のものが得られる。

これは工業的には新しい型の高分子製造法の可能性を示しており、今後ますますこの方面の発展が予想される。

そのほか食品の殺菌、ゴムの加硫、石油精製後の残渣の硫黄分処理など種々の応用面が考えられている。

#### 仕様

最高電圧	2 Mev	（縦型）	3,450mm(高さ)
電子流	250 $\mu$ A	全長	5,000 mm
高圧タンク	1,280 mm $\phi$	ベルト幅	280 mm
ベルト駆動	5 HP 誘導電動機	絶縁柱の高さ	1,500 mm



ベルト起電機

ブリ直径 100 mm      充填ガス 窒素ガス 9 気圧  
最大回転数 3,000 rpm      電子線走査幅 300 mm

## ■ 東北パルプ向 142 in 2,000 ft/min 抄紙機用 電機品 受注

東北パルプ石巻工場向として新聞紙抄紙機用セクショナルドライブ電機品 1 式を受注した。

これは抄速 2,000 ft/min、直流電源として静止レオナード方式を採用しているわが国における記録的なもので、客先はもちろん製紙業界からも大いに注目されている。

特長は下記のとおり

1. 抄速（新聞紙）800～2,000 ft/min である。
2. セクショナルモータ用直流電源として水冷式密封型イグナイ トロン整流器を使用している。
3. 各制御方式は Westinghouse 社の制御方式を採用している。
4. 電源周波数変動 +2% -10%、電圧変動 +10% -15% に 対し抄速の変化はマシン整定速度の 0.1% 以内にある。
5. 各セクションモータ相互の速度偏差は 30% の負荷の変動 に対し 0.05% 以内にあり、その過渡状態における速度偏差 の最大値は 0.2% 以下継続時間 2 秒以内である。
6. 速応性を良好にするため各セクションモータの回路に直接 ブースタを入れ、ヘルパードライブ方式を加味したブースタ 制御方式を採用している。

## ■ 牽引力を誇る万能車

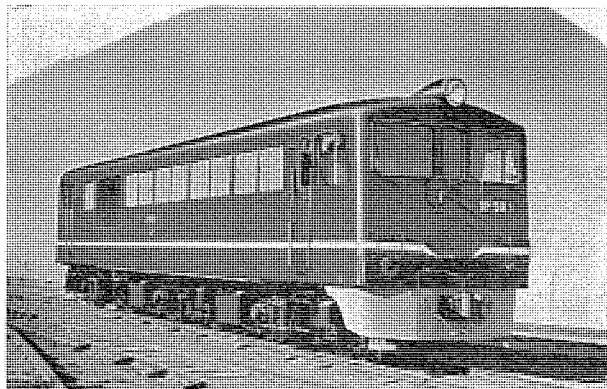
### DF 50 形ジーゼル電気機関車

国鉄動力近代化計画の一翼をにない亜幹線ジーゼル化の中心となる DF 50 形ジーゼル電気機関車は、昨年来国鉄工作局の指導により新三菱重工と共同で鋭意製作中であつたが、このほど 6 両の完成を見、急勾配でトンネルの多い土讃線と山陰線に配属された。

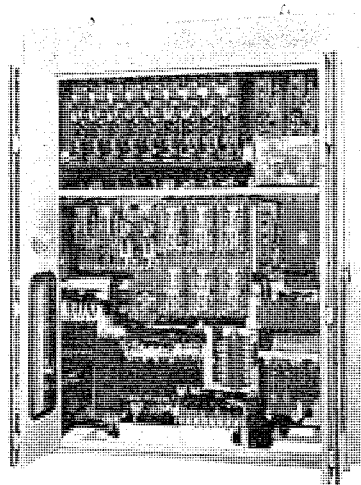
DF 50 形ジーゼル電気機関車は、去る昭和 28 年に試作完成したわが国最初の本格的な大形ジーゼル電気機関車 DD 50 形に比べ、出力を 20% 増大するとともに 6 動軸として軸重を軽減し引張力は大幅に増大した、中小線区の貨客両用の万能機関車として設計したもので、引続き国鉄の標準形式として大量生産が計画されている。機関車の主要目は下記のとおりである。

機関車形式      箱形両運転室  
車軸配置      B—B—B

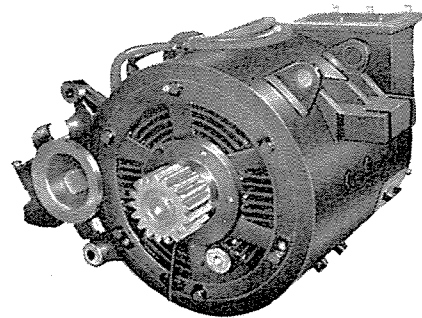
機関車寸法	長さ 16,400 mm (連結面間)
	幅 2,932 mm (最大)
	高さ 3,995 mm (空車)
運転整備重量	約 81 t
動輪直径	1,000 mm
ジーゼル機関	三菱神戸スルザー 8 LDA 25 形 1 台
	1 時間定格 1,200 HP 850 rpm
	連続定格 1,060 HP 800 rpm
主発電機	1 台
	連続定格 700 kW, 450 V, 1,560 A, 800 rpm
主電動機	MB-340-AVR 形 6 台
	連続定格 100 kW, 225 V, 520 A, 410 rpm
	歯車比 72 : 17 = 4.235 : 1
機関車性能	
	連続定格引張り 12,500 kg
	連続定格速度 17.5 km/h
	最大運転速度 90 km/h
制御方式	非重連, 空気式, 電磁式および電磁空気式併用
	制御回路電圧 100 V
燃料タンク容量	1,500 l



DF 50 形ジーゼル電気機関車



DF 50 形ジーゼル電気機関車用制御装置



MB-340-AVR 型主電動機

蓄電池容量	96 V, 320 AH (5 時間率)
ブレーキ装置	EL 14 A 空気ブレーキ, 手ブレーキ
列車暖房装置	SG 3 形蒸気発生装置
蒸発量	700~250 kg/h

## ■「東海村」原子力研究所の 1 号炉建設進む

原子力研究所で東海村に据付ける輸入第 1 号 WB 型原子炉は、昨年暮から年頭にかけて部分的に入荷していたが、最後の重要部分が 3 月に入荷した。

本設備の据付は原子力研究所からあらかじめ機械部分は日立、電気部分は三菱電機が依頼を受けたので、当社ではすでに現地調査、開箱立合等準備中であったが、3 月 11 日から本格的な据付に取かかった。

工事内容の概略は次のとおり。

1. コンソール型制御盤の据付
2. 補機動力回路の開閉器箱取付および配線
3. 制御棒その他制御回路の配線
4. 起動および安全等に対するインターロック回路の配線
5. アナシエータその他警報回路の配線
6. スクラム回路の配線
7. 計測器回路の配線

工事方法としての注意すべき点はつぎのとおりである。

1. 放射能にさらされる部分は特殊電線を使用する
2. 放射性ガスが漏れるおそれのあるサブパイル室に入る回路は特殊なシールドソケットを有するキャビネットにより厳重にシールドする
3. リアクタ室と制御室との間も特殊コンパウンドにより電源管をシールドする

この工事は 3 月末に完了し、調整に 2 ヶ月を要する見込みであるが、本年 10 月頃から同所に据付が始められる輸入第 2 号炉 CP-5 型は一部の製作を含み三菱グループにより建設することになっているので、その予備知識をうるために非常に役立つと思われる。

最近登録された当社の特許および実用新案

区 別	名 称	特 許 又 は 登 録 日	特 許 又 は 登 録 番 号	発 明 考 案 者	所 属 場 所
特 許	三相変圧器	31-9-10	225288	谷 中 頼 朝	伊 丹
"	点弧電極装置	"	225289	加 藤 又 彦	"
"	気体分析装置	"	225290	八 島 英 之	研 究 所
"	水位自動調整装置における制御電圧送出装置	31-9-19	225513	尾 畑 喜 行	神 戸
"	複数電動機の自動制御方式	31-10-5	225846	木 内 喜 修	長 崎
"	継電器回路	"	225847	尾 畑 喜 行	神 戸
"	内鉄型変圧器	"	225848	田 宮 利 彦	伊 丹
"	電機中性点接地電流抑制装置	31-10-11	226070	尾 畑 喜 行	神 戸
"	三相変圧器	31-10-27	226675	谷 中 頼 朝	伊 丹
"	スピーカ・コーン	"	226676	山 下 精 一	無 線 機
"	送電線脱調保護継電装置	31-11-9	226999	森 健 一	神 戸
"	直流送電装置	"	227000	阿 部 久 康	研 究 所
"	水銀放電燈に定量の水銀を封入する方法	"	227001	小 柳 義 正	"
"	保護継電方式	"	227002	藤 井 重 夫	神 戸
"	交流導体貫通装置	"	227003	尾 畑 喜 行	"
新 案	速度制御装置	31-8-29	449688	新 谷 内 次 一	"
"	自動階段	"	449689	藤 尾 保 正	名 古 屋
"	電動機速度自動制御装置	"	449690	武 田 英 夫	長 崎
"	電動機速度自動制御装置	"	449691	"	"
"	ボーリング主軸増速装置	31-8-30	449773	沼 野 豊 二	吉 田 村 浩 二
"	磁石発電機	"	449774	木 村 浩 二	姫 路
"	変圧器鉄心	31-9-4	449926	武 藤 正 夫	福 山
"	エレベータ乗場扉開閉連動装置	"	449927	谷 口 道 利	名 古 屋
"	変 成 器	"	449928	田 宮 利 彦	伊 丹
"	変圧器線輪	"	449929	"	"
"	現字型計量装置	"	449930	山 本 明 輝	福 山
"	接地事故検出装置を有する電磁巻線の中性点接地電流抑制装置	"	449931	尾 畑 喜 行	神 戸
"	浮動開閉器	31-9-7	450124	山 本 満 晃	福 岡
"	昇降機制御装置	31-10-10	451617	宮 兼 松 保 雄	名 古 屋
"	ドラム型制御器のドラム接触子	"	451619	梶 田 保 雄	"
"	弱界磁用限流継電器	"	451618	細 井 又 彦	伊 丹
"	電気弁整流装置の並列運転装置	"	451620	加 藤 昭 美	"
"	鉄 心	"	451621	神 谷 昭 美	中 津 川
"	鉄 心	"	451622	"	"
"	高速度電路遮断器	"	451623	小 路 誠 邦	神 戸
"	高速度遮断器	"	451624	岩 垂 誠 邦	"
"	電機巻線の接地保護継電装置	"	451625	門 頼 雄	神 戸 研 究 所
"	電気扇の首振装置	31-10-12	451722	丸 木 智 彦	中 津 川
"	変 圧 器	31-10-26	452608	田 宮 利 彦	伊 丹
"	天 井 扇	"	452609	市 岡 洋 彦	中 津 川
"	変 流 器	"	452610	田 宮 利 彦	伊 丹
"	キャパシタートリップ方式の保護装置	31-11-6	453143	新 井 正 元	"
"	着火用断続器の給油装置	"	453144	大 村 久 惠	姫 路
"	針状材の供給装置	"	453145	木 矢 野 幸 二	福 山
"	ジュースミキサーの容器	"	453146	増 谷 良 久	名 古 屋
"	回路遮断器引外し装置	"	453147	高 見 良 一	"
"	回転機速度回転力特性直視装置	"	453148	梶 田 長 定	"
"	巻上機の給油装置	"	453149	高 松 茂 利	福 岡
"	スタンド支持装置	"	453150	井 上 隆 一	中 津 川
"	定在波測定器	"	453151	上 加 藤 康 彦	無 線 機
"	水銀整流器	"	453152	奥 田 文 彦	伊 丹
"	電気トースタ	"	453153	門 頼 雄	名 古 屋
"	電機巻線の接地保護継電装置	"	453154	門 頼 雄	神 戸 研 究 所

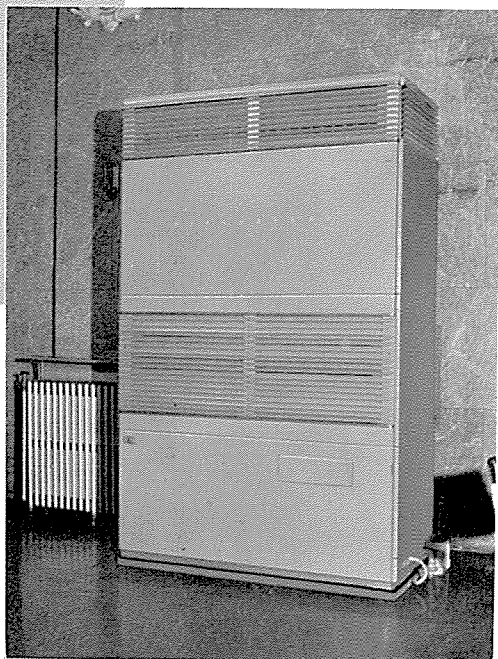


健康と仕事の能率を増進させる冷房装置

# 三菱ユニテヤ

百貨店、  
喫茶店、  
病院、  
紡績工場、  
電話局、  
ビルジグ、  
食堂、  
手術室、  
薬品工場、  
オフィス、  
劇場、  
料理屋、  
実験室、  
製菓工場、  
応接室等  
に……

三菱ユニテヤは、最新の技術と多年の経験および完備せる工場設備と、優秀な品質管理を駆使して製作しております。  
洗練された美しいデザインの三菱ユニテヤは、空気の調節装置としてすぐれた機能を持ち、手軽に、経済的に設備できます。  
ご希望により暖房装置、恒温、恒湿装置にも使用できます。  
完全なアフターサービスは各方面から多大の信頼と好評をいただいております。



DU-101 ユニテヤ  
(プレナムチャンパー付)

## 特 長

三菱ユニテヤは、振動や騒音がほとんどなく、必要な機能が合理的にまとめられていますから、つぎのような特長があります。

### 部分品には……

1. 圧縮効率がよく、振動の少ない圧縮機
2. 熱効率がよく、水頭損失の少ない凝縮器
3. 脱湿能力の大きい冷却器
4. サイレントで、風量の豊かな送風機
5. 確実な動作で、自由な温湿度を保つ制御装置
6. 吸音効率のよい防音材と、合理的な防振装置

### 機能的には……

1. ワンサイドサービスができます
2. 可動式グリルがついています
3. 冷却水配管は 左右いずれにでも接続できます  
DU 型は後側にも接続できます
4. 吹出口を前または上 いずれにでも取り付けできます
5. 外気取り入れの接続ができます
6. 暖房器、給湿装置が取り付けられます

標準仕様一覧表

型 名		SU-51	DU-81	DU-101	DU-151
外形	高さ	1,960	2,085	2,250	2,355
	高さ (プレナム付)	2,315	2,515	2,595	2,735
	幅 奥行	1,250 670	1,400 680	1,600 810	1,800 850
電動機	圧縮機用 (HP)	5	7.5	5×2	7.5×2
	送風機用 (HP)	3/4	1~2	2~3	3~5
冷 媒		F-12	F-12	F-12	F-12
能 力		4.5	7.5	9.3	13.9
製 品 重 量		738	825	1,300	1,450
標 準 塗 装		ローズグレー ハンマートン	ローズグレー ハンマートン	ローズグレー ハンマートン	ローズグレー ハンマートン



レストラン・喫茶店



ホテル・病院

昭和 32 年 4 月 8 日 印刷 昭和 32 年 4 月 10 日 発行

「禁無断転載」 定価 1 部 金 60 円 (送料別)

## 雑誌「三菱電機」編集委員会

委員長	大久保 謙	常任委員	宗村 平
副委員長	石川 辰雄	委員	石橋 英
常任委員	浅井 徳次	〃	岡進 精
〃	荒井 藤二	〃	津村 貞
〃	安野 正雄	〃	松尾 又
〃	菅村 武雄	〃	松田 新
〃	木堀 富次郎	〃	山森 上
〃	高井 得郎	幹 事	井市 村
〃	中野 光雄	〃	
〃	馬場 文夫		
〃	松田 新市		

(以上 50 音順)

編集兼発行人 東京都千代田区丸の内 2 丁目 3 番地 市村 宗明  
印刷所 東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 大日本印刷株式会社  
印刷者 東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 長久保 慶一  
発行所 三菱電機株式会社内「三菱電機」編集部  
電話 和田倉 (20) 1631  
日本出版協会会員番号 213013  
発売元 東京都千代田区神田錦町 3 の 1 株式会社オーム社書店  
電話 (29) 0915・0916 販替東京 20016