# 最近の水力発電所の制御と計測

Controlling and Measuring Systems for the Latest Hydraulic Power Station

大 瀬 賢 也\* 新 井 健\*\*
Kenya Ōse Takeshi Arai

## 内 容 梗 概

最近の水力発電所の制御方式においては、監視制御の集中化、制御回路の簡略化、自動制御装置の採用の三つについて特に考慮がはらわれている。また負荷周波数制御のための新しい調速機運転様式、電子管平衡計器の発達により、これを応用した最近の主な計器についてのべてある。

#### 1. 緒 言

最近の水力発電所の建設は, 奥深い山間部におよび, いっぽう余 剰電力の有効な利用のために揚水発電所の開発もさかんである。

水力発電所の制御方式としてはこれらおのおのの発電所の特色に 応じて、少数の保守員により簡単な取扱いにより、確実でしかも経 済的に運転できることが大切である。このため必要最小限の監視制 御装置を集中的に取りまとめ、制御回路を簡単にしたり、自動制御 装置の使用によりできるだけ手動調整をはぶき、またすべての保守 点検が容易かつ簡易化されている。

いっぽう発電所の計測器は能率よく運転するための重要な要素であり,運転の簡易化を促進するため,電子管あるいはトランジスタを 使用した最新の記録計器,テレメータなどが広く用いられている。

以下最近の水力発電所における制御方式のすう勢につきのべ,ついでこれに使用する計測器について簡単に紹介する。

#### 2. 制御方式のすう勢

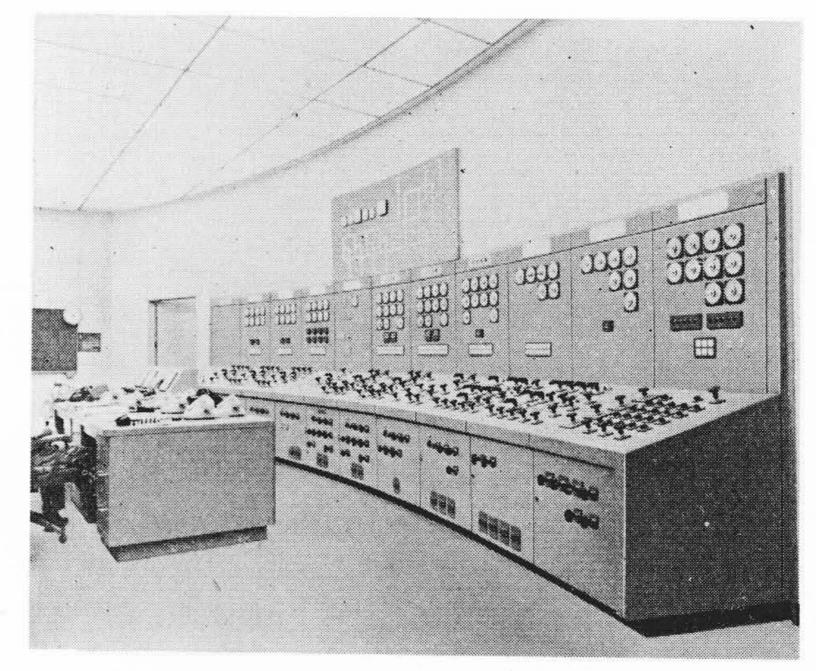
水力発電所の制御方式は少数の要員で多数の設備を合理的に運転するとともに、事故時においてもじん速適確な処置を行いうることが必要である。このため制御器具、方式に種々改良開発が加えられているが、最近の傾向として次の三つの代表的な点についてのべる。

## 2.1 監視制御の集中

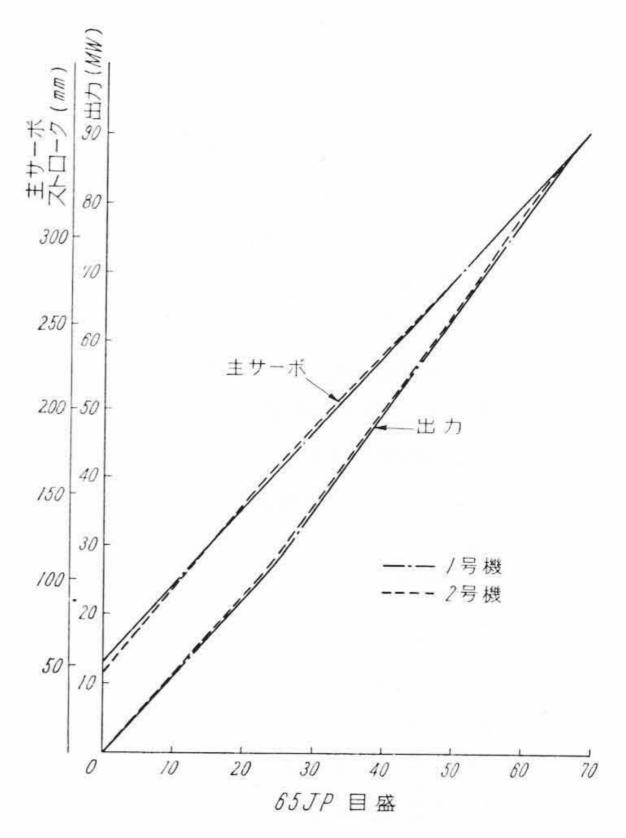
設備機器の数が多い新しい発電所において、その運転状況の監視と制御は、保守員にとって相当の労力を必要とする。このためには送電系統を含めた発電所全機器の操作を一括して容易に行うばかりでなく、照光模擬系統盤を併置して監視を容易にできるようにすることが望ましい。第1図は電源開発株式会社御母衣発電所の例で照光模擬系統は制御盤上の操作と関連して系統の運転状況を示すとともに、遮断器の自動遮断時には点滅表示を行うので、敏速な処置を行うことができる。このほか監視計器は極力記録計を使用すれば常時の記録の手数がはぶけ保守の能率増進となる。またこの場合後述の二要素記録計を使用すれば運転記録の解析にきわめて便利である。

# 2.2 自動制御装置の適用

補機,主機などの起動,停止は保守員の操作によるのが普通であるが,運転中の出力,電圧などの調整は,精度,速応性ともすぐれた新しい自動制御装置を適用することが望ましい。調速機については.従来の機械式調速機にかわって電気式調速機が広く用いられるようになった。電気式調速機はその特色の一つに結合運転装置を組合わせることができる。結合運転装置は2台以上の多数の水車発電機を一括制御するもので,発電所の出力制御をきわめて容易に,すなわち一つの出力整定器であたかも一台の水車発電機を制御するように行うことができる。第2図は2台の水車発電機を結合運転装置により運転した場合の試験結果で,出力整定値に対し(65 JP 目盛)



第1図 電源開発株式会社御母衣発電所主配電盤



第2図 2 台結合運転時出力分担特性

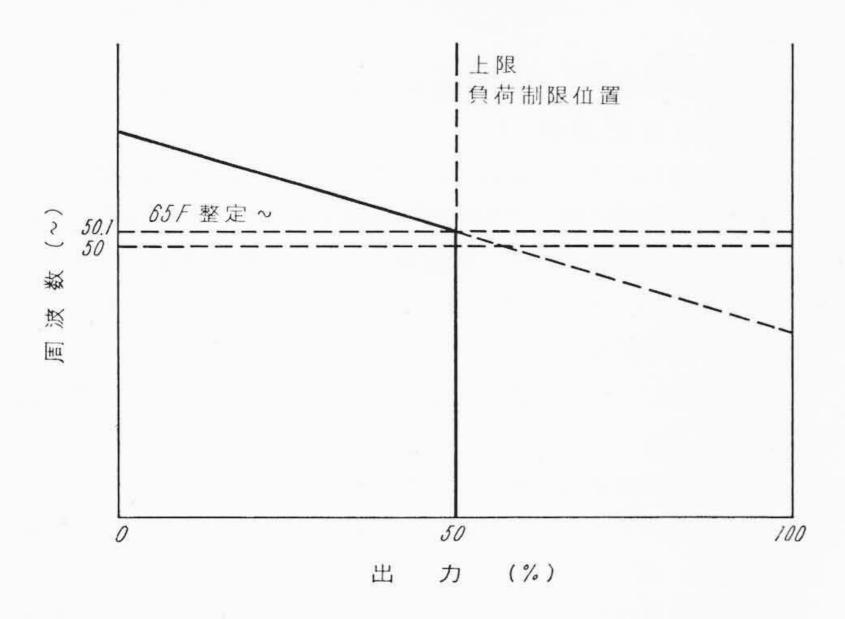
2台の出力および主サーボモータストロークがほぼ同一になっていることがわかる。

## 2.3 制御回路の簡易化

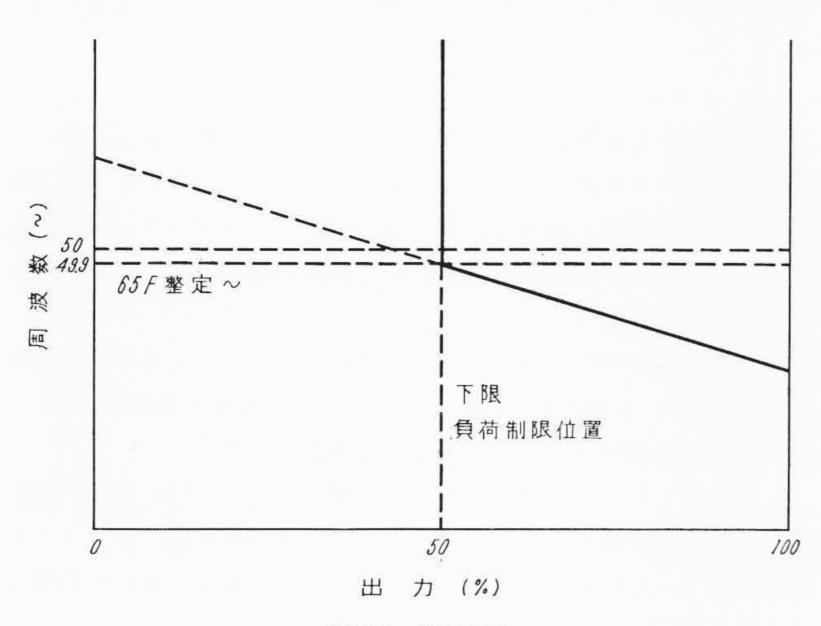
最近の水力発電所で超高圧送電設備が用いられるときなど,その配置の地理的条件から,かつ落差の有効な利用上からも地下発電所とし,送電設備を屋外地上設置とする場合がある。このような場合,機器の中央制御に従来のままの直接制御方式ではケーブル費が増加し

<sup>\*</sup> 日立製作所国分工場

<sup>\*\*</sup> 日立製作所那珂工場



(整定の一例を示す) 第3図(A) A 群発電所速度調定率特性



(整定の一例を示す) 第3図(B) B 群発電所速度調定率特性

経済的でない。またいわゆる遠方監視制御装置も複雑な選択回路を要して好ましくない。日立直接式遠方制御方式<sup>①</sup>は1本の制御用連絡線で相異なる極性の信号により操作用継電器を動作させ、入切操作を行わせる。

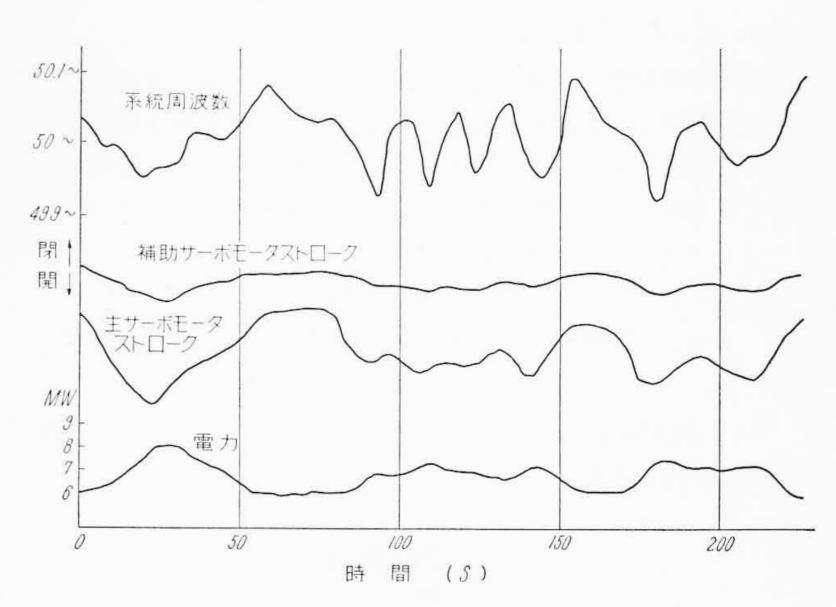
すなわち一つの機器の制御には、操作、表示用1本と全機器に共通の帰線1本の連絡線ですますことができ、操作も直接制御の場合となんら変りがない。本方式は前述の御母衣発電所の275kV送受電設備を地下配電盤室から制御するのに応用しているが、今後はますます広く用いられることが期待される。

#### 3. 調速機による負荷周波数制御

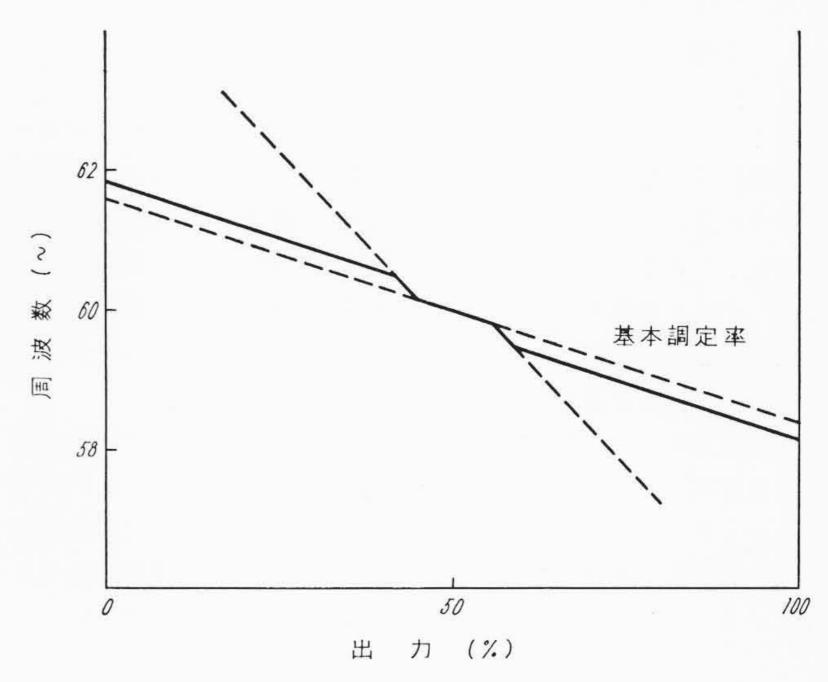
負荷変動による周波数の変動は季節的な変動,一日の時間的な変動などの基底変動と、予期できない不規則な小さな変動とからなっている。この小さな変動中の急激な部分は調速機に、そして比較的緩慢な変動部分は AFC に分担調整させて一定の周波数を保持させる運転が最も一般的な基本方式である。

検出感度 0.02%,不動時間 0.1 秒の高感度,高速応性の性能をもつ電気式調速機は調速機運転においてよく周波数変動に応動する。この場合実用上需要者側から許される限度内の周波数変動に対してある程度応動性をにぶらせることは,調速機自身のみならず水車の操作機構の消耗をも著しく低減し保守上からも好ましいものである。このため最近は従来のいわゆる調速機運転から少し趣きを異にし次のような運転様式を要求する傾向が強くなってきた。

すなわち周波数の変動がある許容値以内であるときは、調速機の



第4図 周波数応動オシログラフ



第5図 折線速度調定率特性

動作を強く抑制し、この許容値をこえて変化したときのみ急速に応 答するような運転様式である。

この目的を達するのに次の三つの方法がある。

#### 3.1 負荷制限器で調速機動作範囲を抑制する方式

この方式は前述の保守上の利点を生かし、さらに調整池の水を有効に使用するための一方式である。電気式調速機を備えるいくつかの発電所を2群に分け、A群は第3図(A)のように規定周波数以上に上った場合にのみ動作するように案内羽根開度の上限を負荷制限器でおさえて運転する。また、B群は第3図(B)のように規定周波数以下になった場合にのみ動作するよう案内羽根開度の下限を負荷制限器でおさえる。この上下限装置はいずれも機械的に調速機に組込まれ、上限は一次配圧弁に、下限は構造の複雑化をさけるため二次配圧弁にかけられている。また下限装置は周波数が一定値以上になれば動作する除外機構を備え、過速度の防止をおこなっている。

本装置を備えた電気式調速機<sup>(2)</sup>は、急激な変動負荷の対策として AFC と協力し、変動負荷の立上り部分吸収の目的で北海道電力株式 会社に納入し、第4図に示す周波数応答例のように周波数変動幅は ±0.1~以内に押えて好成績をおさめている。

## 3.2 折線速度調定率特性による方式

並列運転中の水車発電機は速度調定率特性にしたがい系統周波数と負荷とは相関連して適当な負荷分担が行われる。したがって**第5**図のように折線速度調定率特性をもたせて,ある整定周波数の間は調速機の動作をおさえ,範囲外で急速に応答させる方式もある。

#### 3.3 ダンピングを切替える方式

速度調定率特性は直線であるが、ダンピングが規定周波数の上下 のある範囲内ではきわめて強く、周波数変化に対し調速機の動作を おさえ、範囲外では弱くしてすみやかに動作させるものである。

東北電力株式会社上野尻発電所用電気式調速機の検出部から補助 サーボモータまでの伝達関数は<sup>(3)</sup>

$$F(S)=rac{16(1+TnS)}{0.0188S^3+0.122S^2+(1.88+TnPc+TnAn)\;S+Pc}$$
で表わされる。

An=過渡調定率 Pc=速度調定率 Tn=ダンピング時定数 高次のS項を省略すると

$$F(S) = \frac{16}{Pc} \times \frac{(1+TnS)}{\underbrace{(1.88+TnPc+TnAn)}_{Pc} S+1}$$

速度調定率を大きくすると補助サーボモータストロークは減少す るが,同時に時定数

$$\left(\frac{1.88 + TnPc + TnAn}{Pc}\right)$$

も小さくなるので、急しゅんな周波数変動に対する補助サーボモータの動作する程度は変らず、調速機の動作抑制には相当大きな速度調定率が必要になる。したがって調速機の動作をすみやかにしたり抑制したりするのにダンピングを切替えて時定数を大幅に変化したほうが最も効果的である。またこうすれば装置も周波数変動値の検出継電器と切替回路のみで十分構成でき、前記3方式中最も簡易かつ確実に目的を達せられる方式といえる。

四国電力株式会社大森川発電所では本方式を採用し、周波数変動値を継電器により検出し、これを整定周波数の±0.1または±0.2~においてダンピングの切替えを行っている。また電源開発株式会社御母衣発電所にも採用しているが、系統に対し十分な調整容量をもっているところに適用し水を有効に使用することがこのましい。

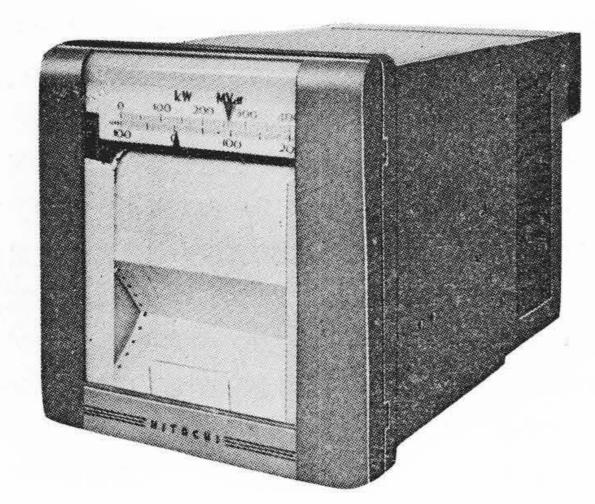
## 4. 最近の計測器の傾向

すでにのべたとおり発電所を経済的にかつ能率よく運転するためには、計測器による運転状態のはあくが重要な要素となってくる。このために発電所計器としては精度が高く寿命に富んだ信頼性のあるものであることはもちろん、盤占有面積が少なく、小勢力で保守が容易なことが要求される。

これは監視を便にする集中配置に好都合であるばかりでなく保守を簡易化するうえから大切である。

電子管平衡計器の発達はこれらの要求にそったもので記録指示計 に今後いっそう応用されるものである。

またディジタル技術の発達は水位測定のように大幅な測定範囲を 1 cm単位で測定するごとき高い精度を要求するむきに特に適し,活



第6図 VKP<sub>30</sub>-M 形電子管式二要素記録計外観

用されている。

次に最近の計測器のおもなものについて説明を加える。

## 4.1 二要素記録計

二要素記録計は1台の記録計に2組の自動平衡機構を内蔵して二つの測定量を同時に同一の記録紙に記録するもので、盤面積の節約に有効であるばかりでなく、相関連した二つの測定要素、たとえば電力と無効電力、ダム水位と放水路水位のごときを測定記録させることができ記録結果の検討に非常に便利である。

多要素記録計には打点式,記録紙分割式など種々あるが,第6図に示す日立 VKP<sub>30</sub>-M 形二要素記録計では二組のペンは時間軸の方向に約7分(記録紙送り速度 25 mm/hr)に相当するだけずらしてあるので,それぞれのペンは同一記録紙上を独立に移動し,記録紙全幅を有効に利用して測定量に応じた記録をする。

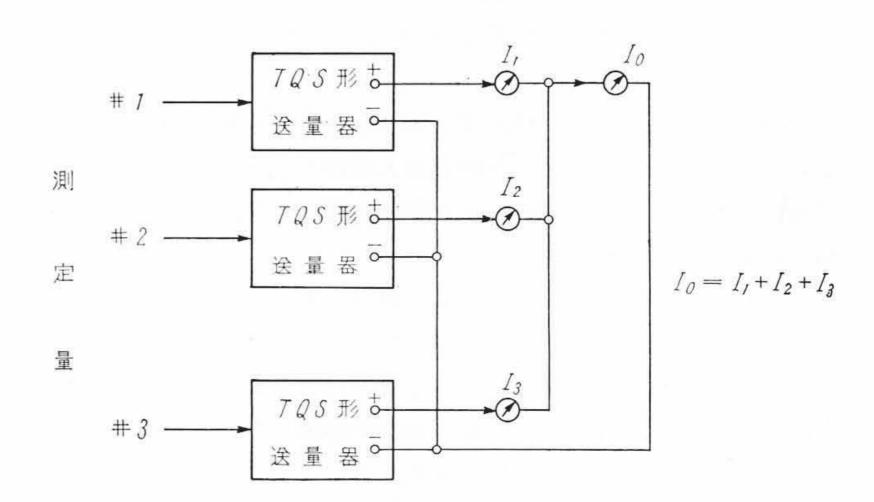
本記録計は電位差計方式としているので、各種の測定量は一度電 圧に変換して本器の入力とする。たとえば電力、無効電力の記録に はトルクバランス式変換器またはサーマルコンバータ変換器を用い る。

#### 4.2 トランジスタテレメータ

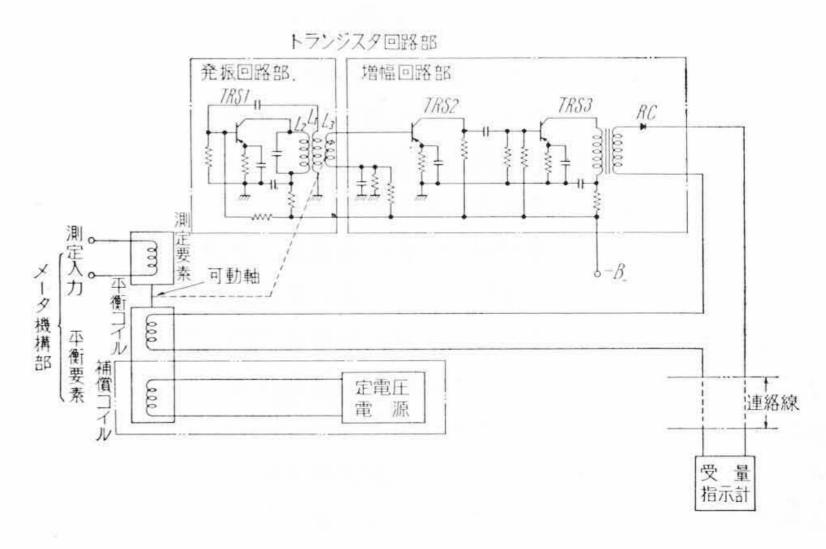
日立 TQS 形直送式トランジスタテレメータは検出部以外すべてにトランジスタを使用し、小形小勢力で半永久的寿命をもって遠隔測定装置として広く利用されている。本器はトルクバランスの測定原理を利用して、被測定量に対応した直流電流に変換し、連絡線を通じて受量側で指示または記録させるものである。

その性能は周囲温度  $20^{\circ}$ C において指示誤差  $\pm 1.5\%$ 以下全目盛幅 の 90% 変化して速応度 3 秒以下であり,周囲温度の影響は  $20^{\circ}$ Cと  $\pm 20^{\circ}$ Cにて定格値の  $\pm 1\%$  以下という高性能である。

したがってあらゆる被測定量の遠隔測定に適し、特に電圧、電流、 電力および水位指示などに多く利用され、また第7回に示すような 結線を行うことにより、発電所発生電力の総合測定にも広く利用で



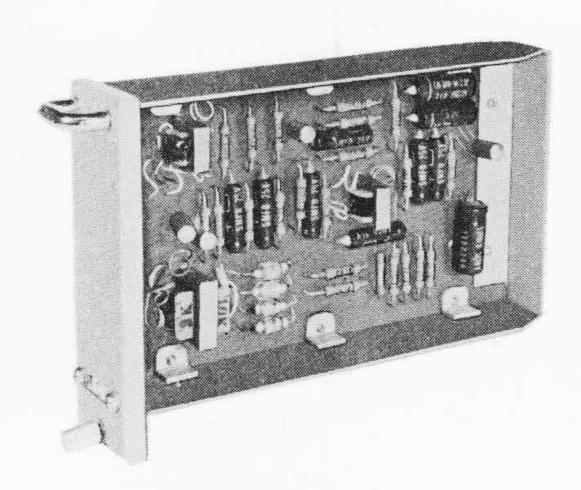
第7図 被測定量総合結線図



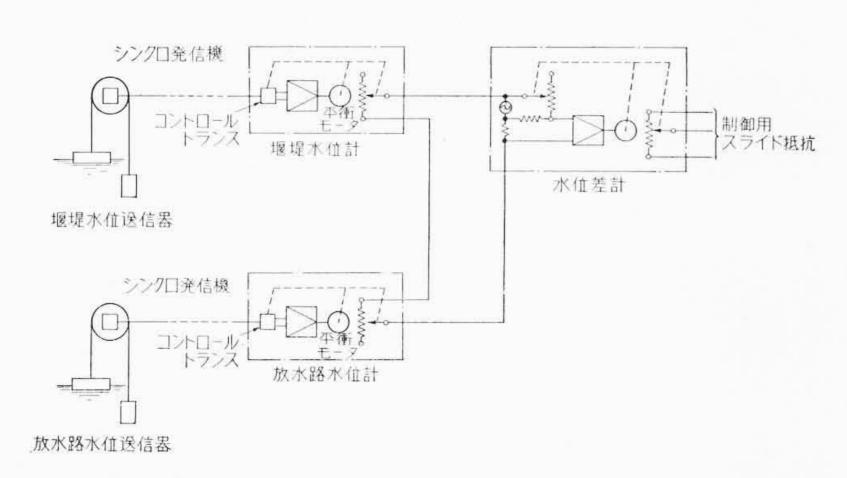
第8図 TQS 形送量変換器動作原理図



第9図 TQS 形送量変換器外観



第10図 トランジスタ回路部



第11 図 水 位 差 計 原 理 図

きる。

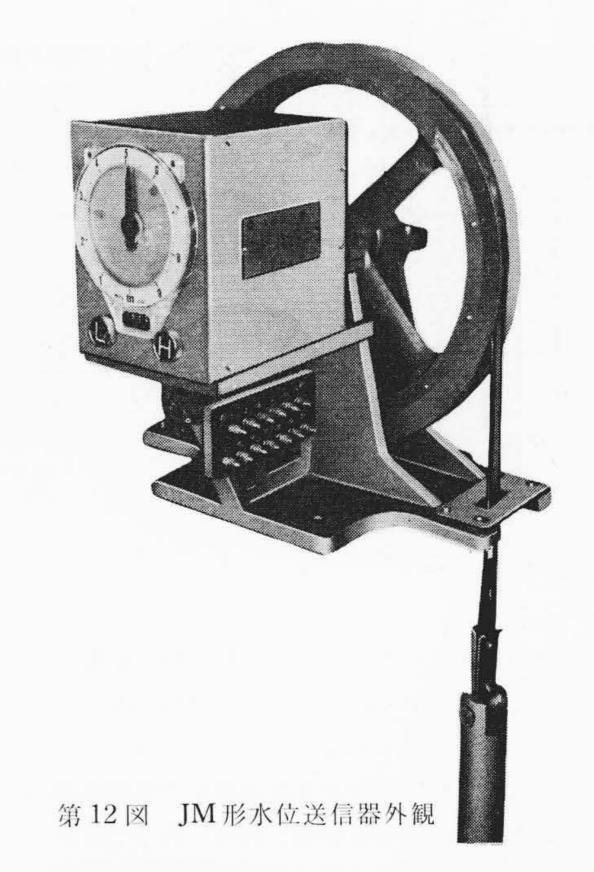
本器は大別すると第8図のように、測定入力に対応したトルクを発生するメータ機構と、直流電流を発生するトランジスタ回路部より構成される。被測定量が測定要素に加わると、それに対応したトルクが発生し、可動軸が回転する。この回転に伴い可動軸と一体になっているピックアップコイル  $L_3$  が移動し、トランジスタ TRS1 よりなるコレクタ同調形発振回路よりの誘起電圧が変化する。これをトランジスタ  $TRS_2$ ,  $TRS_3$  よりなる増幅回路で増幅しダイオード RC により整流する。この直流電流をメータ機構部の平衡要素に流し、測定要素に加わったトルクと逆方向のトルクを発生させるとともに連絡線に送出する。以上により測定、平衡両要素のトルクが等しくなるまで可動部が移動し、平衡要素に流れる電流が変化して平衡状態になる。したがって平衡状態では被測定量はこれにまったく対応した直流電流に変換される。

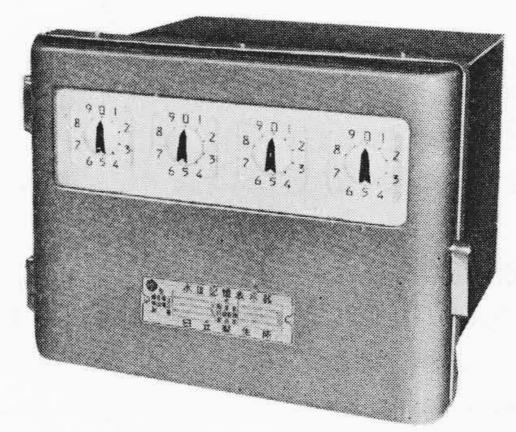
なお無効電力などのように零中心目盛の場合には、平衡要素の補償コイルに定電圧電源より一定電流を流し、零中心目盛になるようあらかじめトルクが与えられてある。第9図は変換器の外観、第10図はトランジスタ回路部の外観である。

## 4.3 水 位 差 計

水力発電所で落差を正確に知り指示するとともに,それに比例した信号を出して,水車の起動,あるいは揚水時の案内羽根開度の規制を行えば,高能率な運転ができる。

この目的に利用されるのが電子管平衡式水位差計で四国電力株式会社大森川発電所に採用されている。その原理を第11図について説明すると、ダムと放水路にはそれぞれフロート式の水位送信器が置かれ、水位に応じた電気信号は発電所に設置されたコントロールトランス方式の自動平衡形水位計に送られて水位を指示する。これらの水位計にはその測定範囲に比例した摺動抵抗が設けられていて指示値に応じた抵抗値をとるので、直列に接続するとダム水位と放





第13図 JM 形水位記憶表示器外観

水路との差,すなわち落差に比例した抵抗値をとりだすことができる。

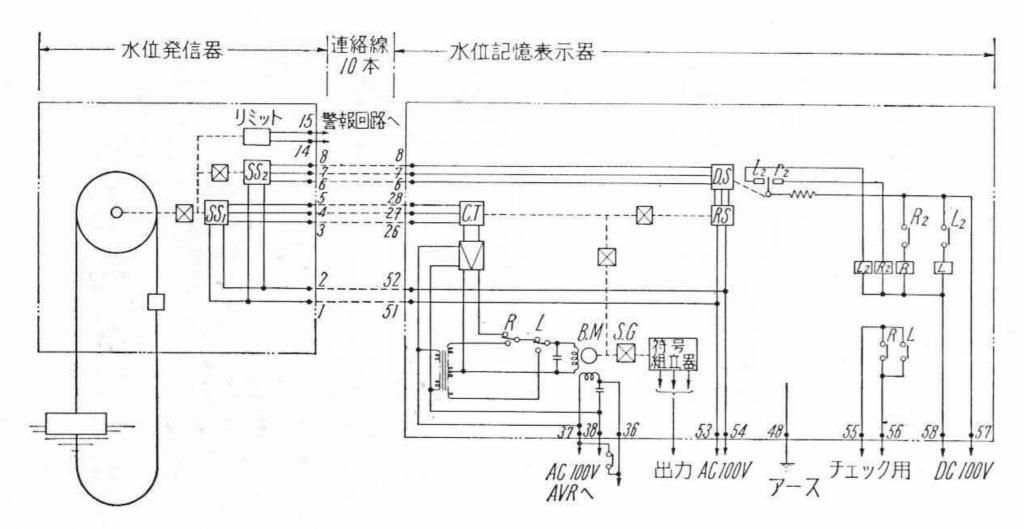
#### 4.4 ディジタル水位計

ダムの水位などのように 10 m をこす大幅の測定範囲を 1 cm の精度で測定することはアナログ方式では困難であり、数字によるディジタル指示方式が望まれる。

ディジタル方式ではいかにして高精度でディジタル変換を行うかが重点になるが、他方測定中の水位変動による指示の変化、速による変動に対する制動などいろいろな問題の解決が必要とされる。日立  $JM_1$  形ディジタル水位計はセルシンの応用により水位をディジタル符号に変換して指示するもので数値指示には長寿命計数放電管を使用している。

第12,13 図は本器の外観を示したものである。

第14図は原理説明図である。水位の変動はフロートをとおして車輪の回転角に変換される。この回転はセルシン $SS_1$ をたとえば1mにつき 1回転させ、コントロールトランス CT の回転角をセルシン $SS_1$  とまったく同一になるように制御する。すなわち両者の回転角に差があると CT から不平衡電圧が発生し、増幅され平衡モータBM を駆動し、CT の回転角が  $SS_1$  と一致するまで動作する。そこで平衡モータにより 1 cm ごとに跳躍的に回転するステップギャSGにより符号組立器を駆動すれば 1 cm 単位で確実なディジタル変換が行われる。しかし停電中の水位変動による指示値の較正は 10 m 1 回転するセルシン  $SS_2$ , RS を設け、差動セルミン DS を駆動し、正しい位置にあるかどうか検出する。すなわち  $SS_2$ , RS 間に差角が生ずると接点  $1_2$  あるいは  $1_2$  が閉成してリレー  $1_2$  L あるいは  $1_3$  を動



第14図 ディジタル水位計動作原理図

作させ平衡モータを一定の回転方向に回転させ接点が開くところまで動作する。かくしてセルシン  $SS_2$ , RS の差角が零となり CT の回転角は  $SS_1$  と全く対応したものとなる。

以上により停電中および読取中の水位変動による指示値の較正, あるいは連に対する制動が容易に行うことができる。

## 5. 特殊な主機の制御

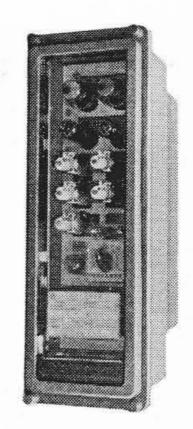
火力発電の増大に伴い余剰電力を利用しての揚水発電運転,水力 資源の利用を高めるための低落差地点の開発など効率の良い水車の 研究実用化により特殊な制御を要する水力発電所が多くなってき た。

揚水発電所の制御は操作がじん速,確実にできて機動性を十分に備えている方式が必要である。可逆ポンプ水車式揚水発電所における実施例では,最大発電中より最大揚水状態までの切替所要時間は約12分,また揚水より発電への切替えは約6分できわめてじん速な制御方式の実績がある。揚水発電所の制御方式の問題点については別にのべているのでここでは省略する。

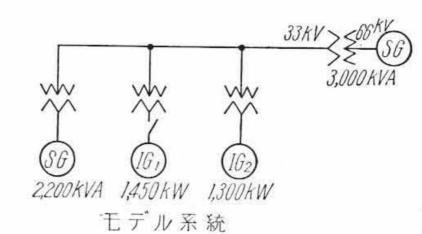
筒形水車発電機は中、小容量の低落差地点に利用されるが、これは効率が良いこと、および水車発電機が流路中に置かれるので建設費も非常に安くなるためである。発電機としては誘導発電機が多く採用される。この場合直入起動よりも水車により起動し、すべり検出後並列投入する方法がとられる。第15 図に示す日立 VSDF 形自動同期継電装置はすべり検出感度を1~5%の間任意に整定可能な同期継電装置である。第16 図は系統において誘導発電機を並列投入したときの計算による電力変動曲線であるが、投入時のすべりが大きいと電力変動も大きいことを示している。

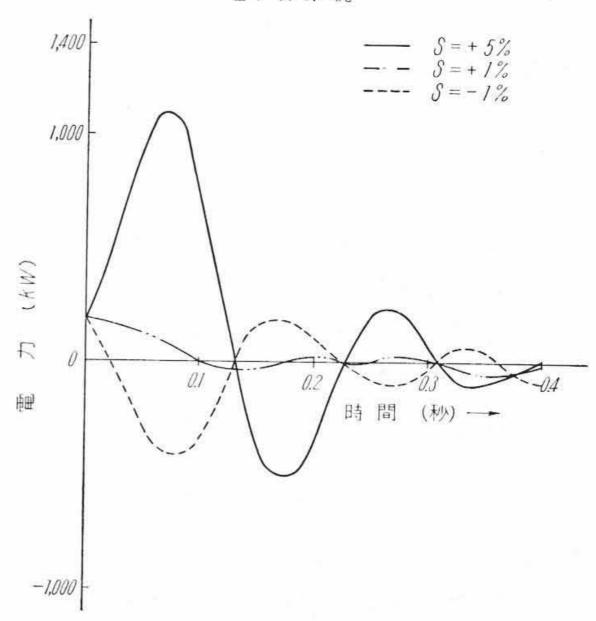
## 6. 結 言

以上最近の水力発電所の制御方式についてのべたが、最近の制御 方式の傾向は保守点検を合理的に簡易化し、能率よく運転できるこ とに意を用いている。そしてこの傾向は経済負荷配分装置の発達で



第15図 自動同期継電装置





第16図 誘導発電機並列投入時の電力変動曲線

電力系統の総合的な運営を加味しての運転制御が実施されつつある とき今後一層強まり、これとともに計測器も従来の測定量の単なる 指示、記録だけの目的からさらに自動制御装置の重要な検出要素、 測定要素としても広く活用されてゆくものと考える。

また近い将来には制御回路にトランジスタ,シリコンを応用しての無接点化,そしてまた中央からの指令による計算制御とデータ処理装置の適用による無人化にまで発展してゆくのも夢ではないと考えられる。技術の進歩は必要性から生ずるものである,ご使用者各位のご指導を期待してやまない。

#### 参 考 文 献

- (1) 池田: 日立評論 No. 4, Vol. 40 (1958)
- (2) 小林,海老名,小松: 日立評論 No. 4, Vol. 41 (1959)
- (3) 魵沢,山口: 日立評論 No. 26 別冊 (1958)