

電力系統における周波数の自動制御

Automatic Frequency Control of Electric Power System

小林 栄二* 平井 善一郎** 小松 凱**
Eiji Kobayashi Zen'ichiro Hirai Gai Komatsu

内 容 梗 概

電力系統の周波数を一定に保持することは電力の質的向上の見地から重要で、この方面における技術は数年来特に発達してきた。本論文では日立製作所において製品化されている自動周波数調整装置の概要を運転記録により説明し、電気式調速機については日立標準のEA型について述べ、さらにこれら両装置の協調運転について論述している。

1. 緒 言

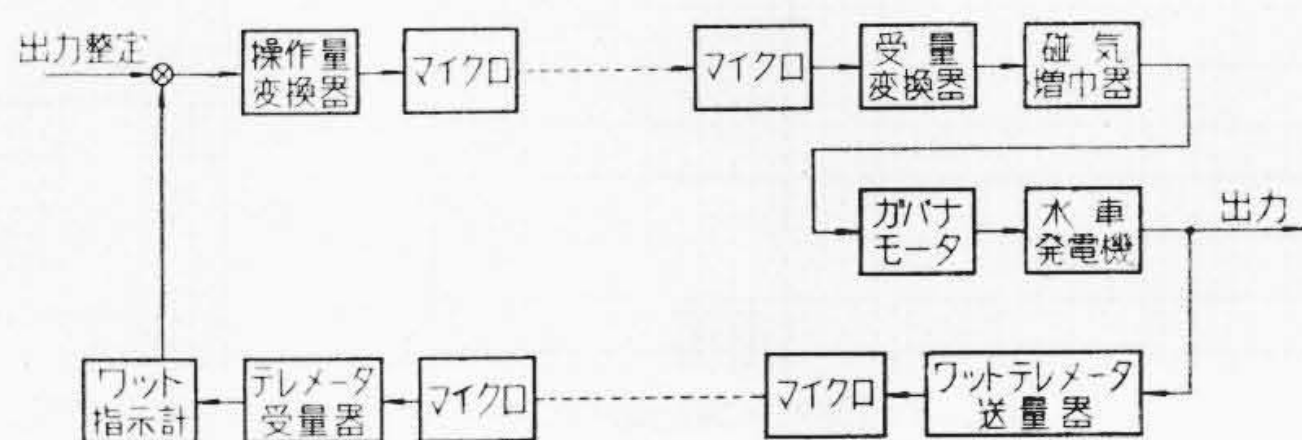
近年における諸産業の飛躍的な発展は電源開発の進捗、電力系統の拡充を促し、その運営の面において合理的な系統の自動制御が広く活用されるようになってきた。この場合制御の対象となるのは主として系統の電圧と周波数であつて、これらの安定性如何が電力の質を決定する。電圧の自動調整は以前から広く実施されており、その実績もあがつている。周波数については最近にいたり特に積極的な方策がとられるようになってきた。調速機はそれ自体で周波数調整の任務をもっているが、系統の変動負荷を各発電機が適切な比率で分担するように垂下特性がもうけられてある。すなわち制御技術的にいえば比例制御系を構成しているものであり、一定値制御はできずオフセットがのこる。一定値制御の目的のために積分制御系を構成する定周波数調整装置が必要になる。また一方調速機自体についてもより高感度、高速応性のものにするにより系統周波数の改善が期待される。

系統周波数を積極的な手段により一定値に保持する努力は電力事情の好転とあいまって真剣に採り上げられ自動周波数調整装置 (Automatic Frequency Control Set 略して A. F. C) が実用化され、また企業体間の融通電力を契約どおりに維持するために AFC を兼ねた周波数偏倚連絡線負荷調整装置など新しい局面が展開されている。

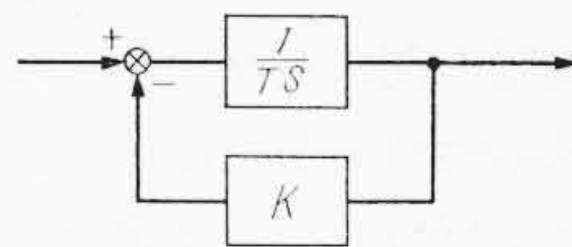
一方調速機の高感度、高速応性化には長い間関係者の努力が注入されてきたが最近に至り電気式調速機が開発、実用化され一段と良好な周波数維持に貢献している状況である。

2. 自動周波数調整

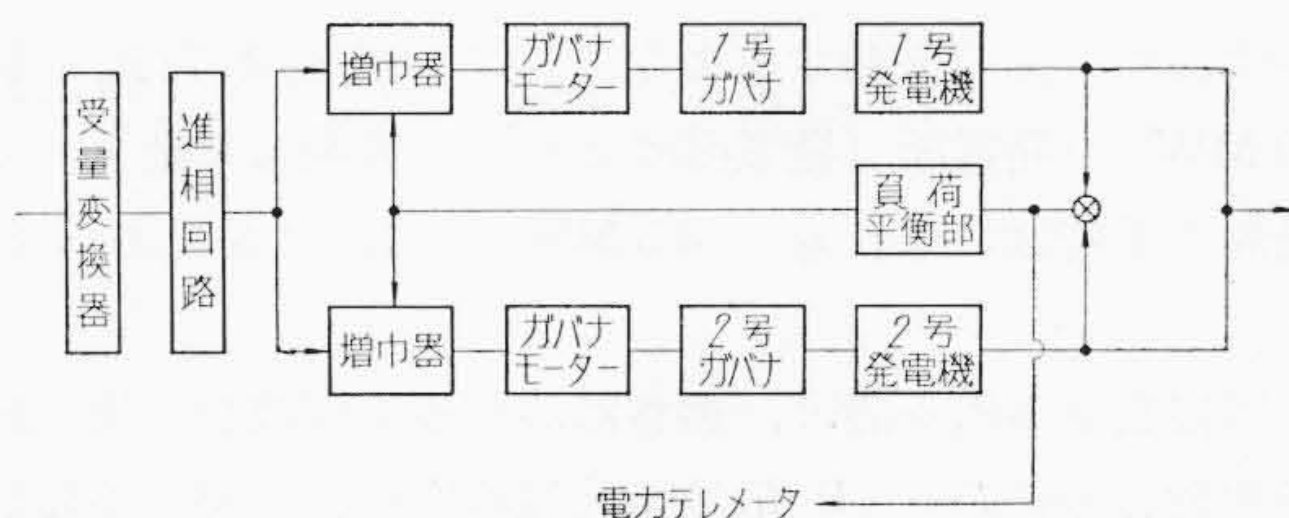
電力系統の周波数は連繫されたどの地点においても共通であるから、遠方制御を行う立場からは非常に都合がよく、中央給電司令所などから遠方にある発電所を制御するような計画が多くなつた。中央制御を行うには、さ



第1図 定負荷調整ブロック図



第2図 定負荷調整を簡易化したブロック図



第3図 発電所内の制御ブロック図
(2台の負荷平衡付の場合)

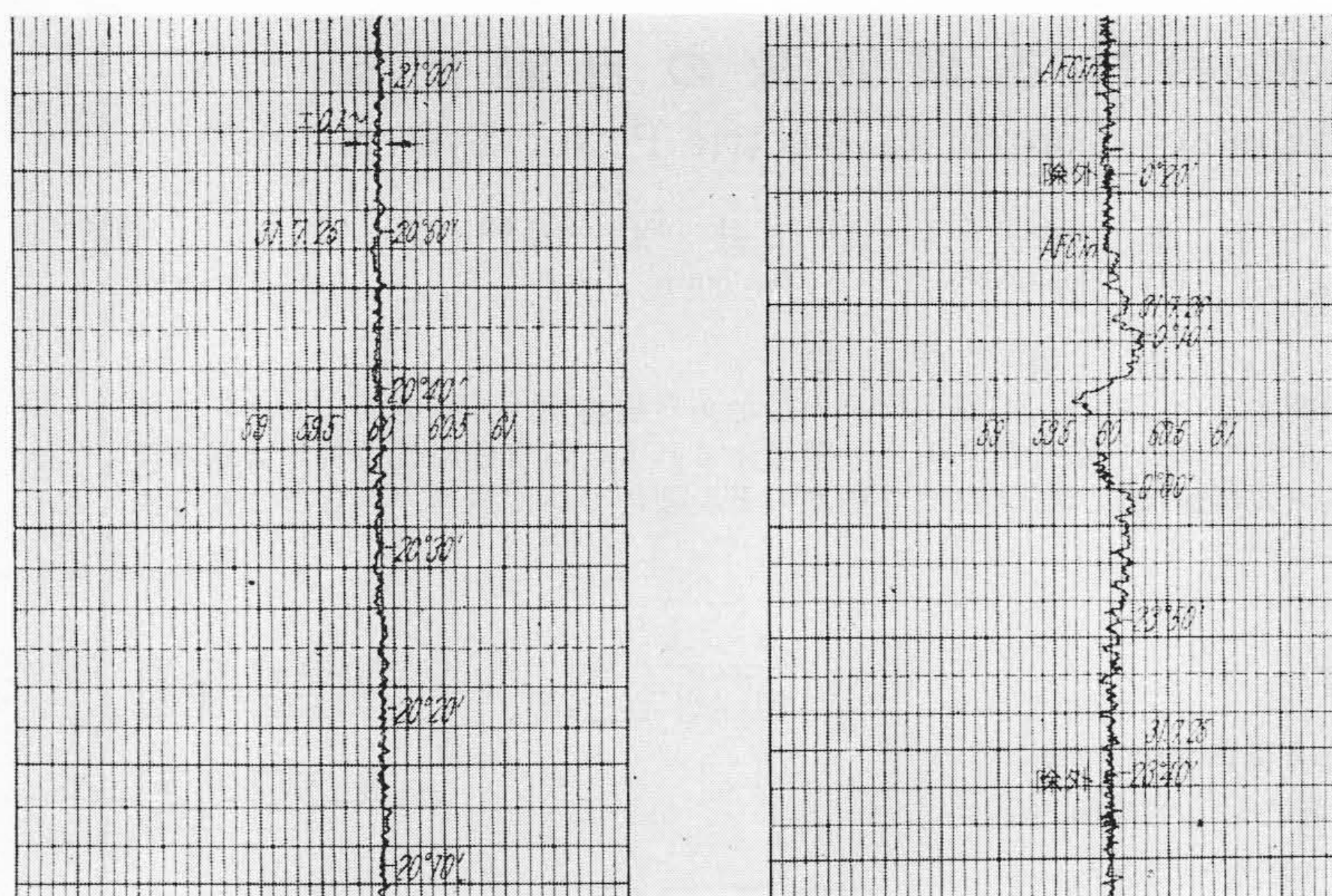
らにテレメータなども取り入れて中央において従来人がやっていた運転司令や計算なども自動的に処理できる多目的な装置にまとめられるようになった。

2.1 自動周波数調整の基本方式

遠方よりの定負荷調整はこの種の制御の基本となる方式である。これは遠方比例制御の一つで遠方の発電所の出力を中央制御所で整定した値に保持するものである。すなわち第1図に示すように発電所の出力をテレメータにより中央制御所にかえし、所望値に整定した値からの偏差分を変換⁽¹⁾してマイクロ波 (あるいは搬送波) にのせ伝送し、発電所側ではこの受信信号により発電機出力を増減するもので、その機能を簡単にかきかえれば第2図のようになる。

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所国分工場



(a) FFC 平常運転試験記録の一例 (b) 周波数調整試験記録の一例

第4図 A F C 試 験 記 録

第3図は発電所側のブロック線図で水車発電機2台の場合を示す。増幅器の前に進相回路をおき、過渡特性を改善し安定化と速応性の向上をはかり、その出力は2組の磁気増幅器により増幅して调速機(速度調整用モータ)を制御している。これら2組の磁気増幅器から水車発電機を含めた特性の差異により発電電力に不平衡を生ずる。これを補正するため負荷平衡要素を設け過渡、定常のいずれにもよく平衡するようにしている。本方式を約90 MW の発電所(発電機は2台)に実施した結果、2機間の平衡はいずれも ± 0.5 MW 以内にたもたれている。

周波数調整器を設け、調整器から整定周波数と実系統周波数との偏差 ΔF 信号を前述の定負荷制御の整定値のかわりに入れれば、定周波数調整 (Flat Frequency Control 略して F. F. C) の遠方制御となることは容易に理解できるであろう。第 4 図は F. F. C 試験の一例で (a) は比較的負荷変化の少ない時刻で周波数は ± 0.05 サイクル以内におさまっている。(b) は圧延機負荷 $\pm 5 \sim 6$ MW の稼動中の記録で制御を行つたときと、行わないときを示してある。制御を行わないときは ± 0.3 サイクルであるが F. F. C を行えば ± 0.1 サイクル程度に制御されていることがわかる。F. F. C と同様に周波数調整器のかわりに連絡線融通電力テレメータを受信して電力調整器に導き、整定値との偏差を定負荷調整の入力にいれれば定連絡線負荷調整 (Flat Tie Line Load Control 略して F. T. C) ができる。さらに上記 F. F. C, F. T. C の信号を適當の比で加えると周波数偏倚連絡線負荷調整 (Frequency Biased Tie Line Load Control 略して T. B. C) となる。

2.2 比例配分制御

わが国のように小容量発電所が分散している現状では、一箇所にて検出した信号により多数の発電所を同時に制御して A. F. C. の目的を果すように計画されることが多い。この場合には分散している多数の発電所の水利条件、定格容量、あるいは調整可能容量などを考慮した比率により負荷変動分を配分する必要がある。このため前述の F. F. C., F. T. C., T. B. C. 信号出力を第 1 図の定負荷調整装置に導く途中に、安定に比例配分させるための計算回路を付加する。第 5 図は比例配分制御のブロック図である。定負荷制御の

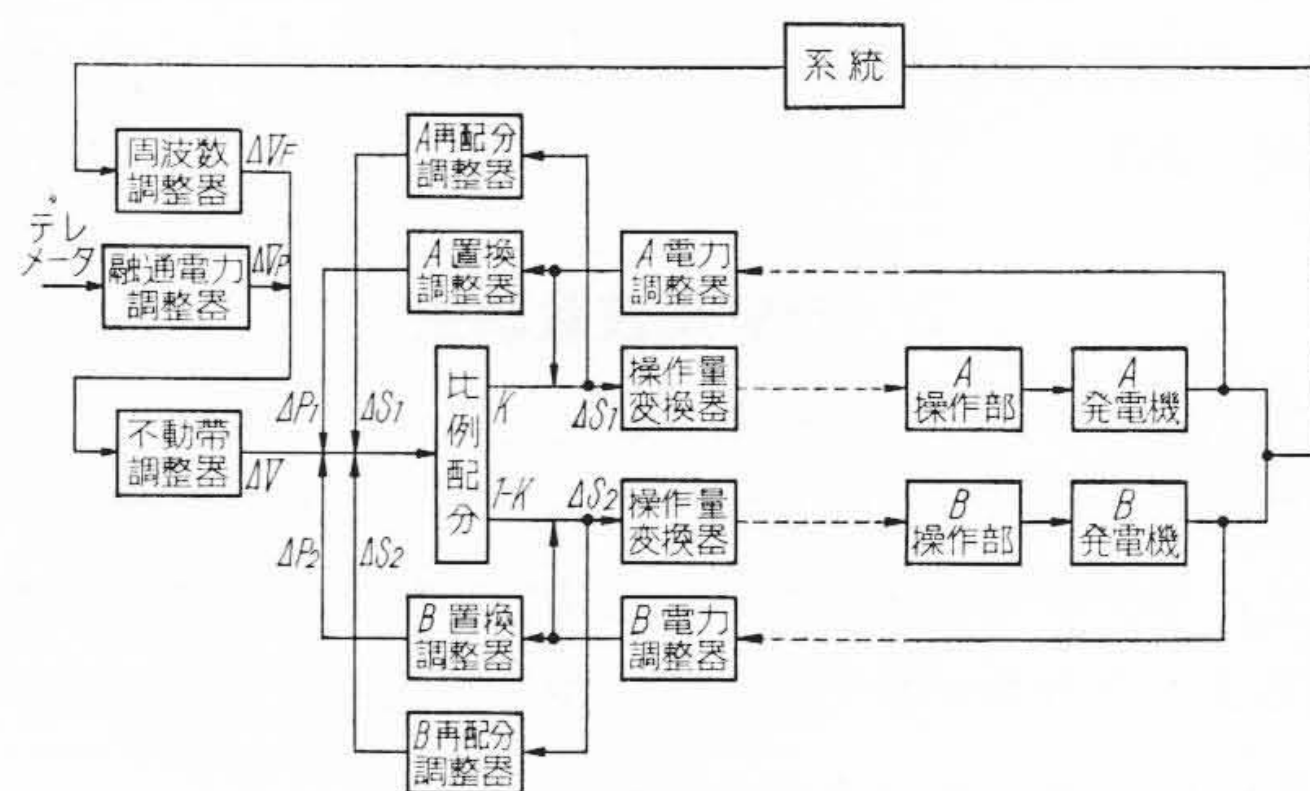
さらに図に記入した記号を用いて数式にて説明を補足すると

$$\Delta S_1 = -\Delta P_1 + K(\Delta P_1 + \Delta P_2) + K(\Delta S_1 + \Delta S_2) + K\Delta V \dots\dots\dots (1)$$

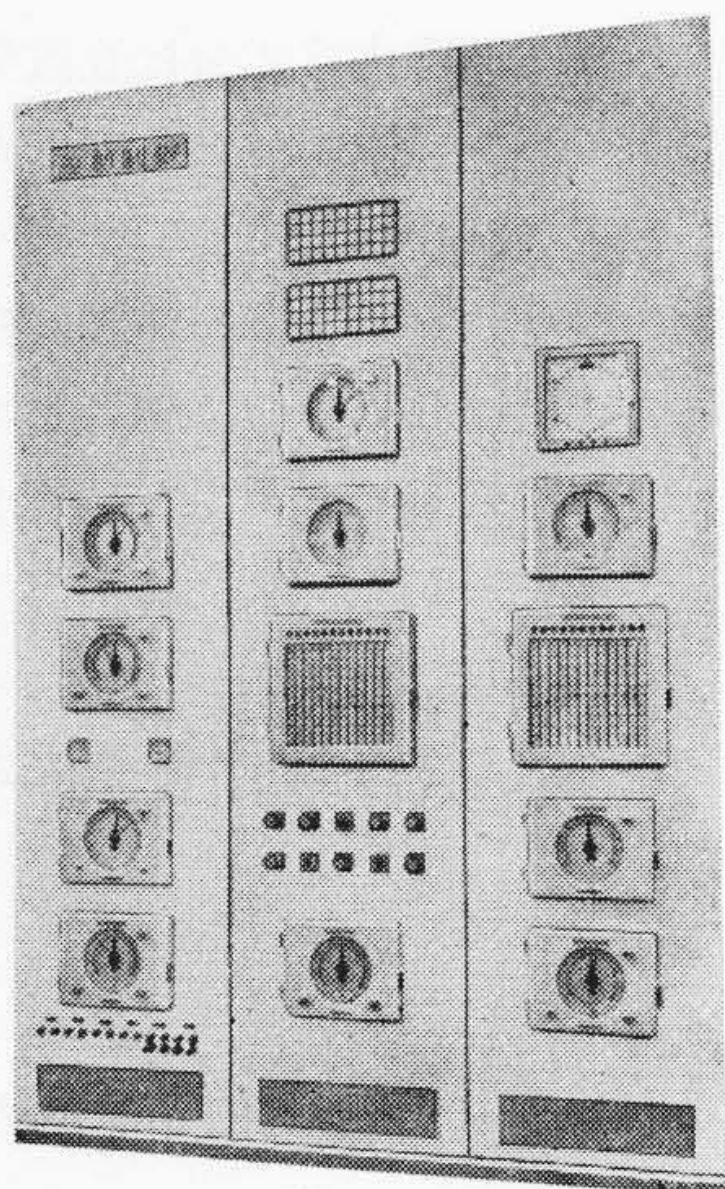
$$\Delta S_2 = -\Delta P_2 + (1-K)(\Delta P_1 + \Delta P_2) + (1-K)(\Delta S_1 + \Delta S_2) + (1-K)\Delta V \dots\dots\dots (2)$$

(1) (2) 兩式を加えると $\Delta V=0$ (3)

したがって少なくともいずれか一方の発電所が正常に動作していれば制御結果にオフセットは生じない。定常的には $\Delta V = \Delta S_1 = \Delta S_2 = 0$ であるから $\frac{\Delta P_1}{K} = \frac{\Delta P_2}{1-K}$



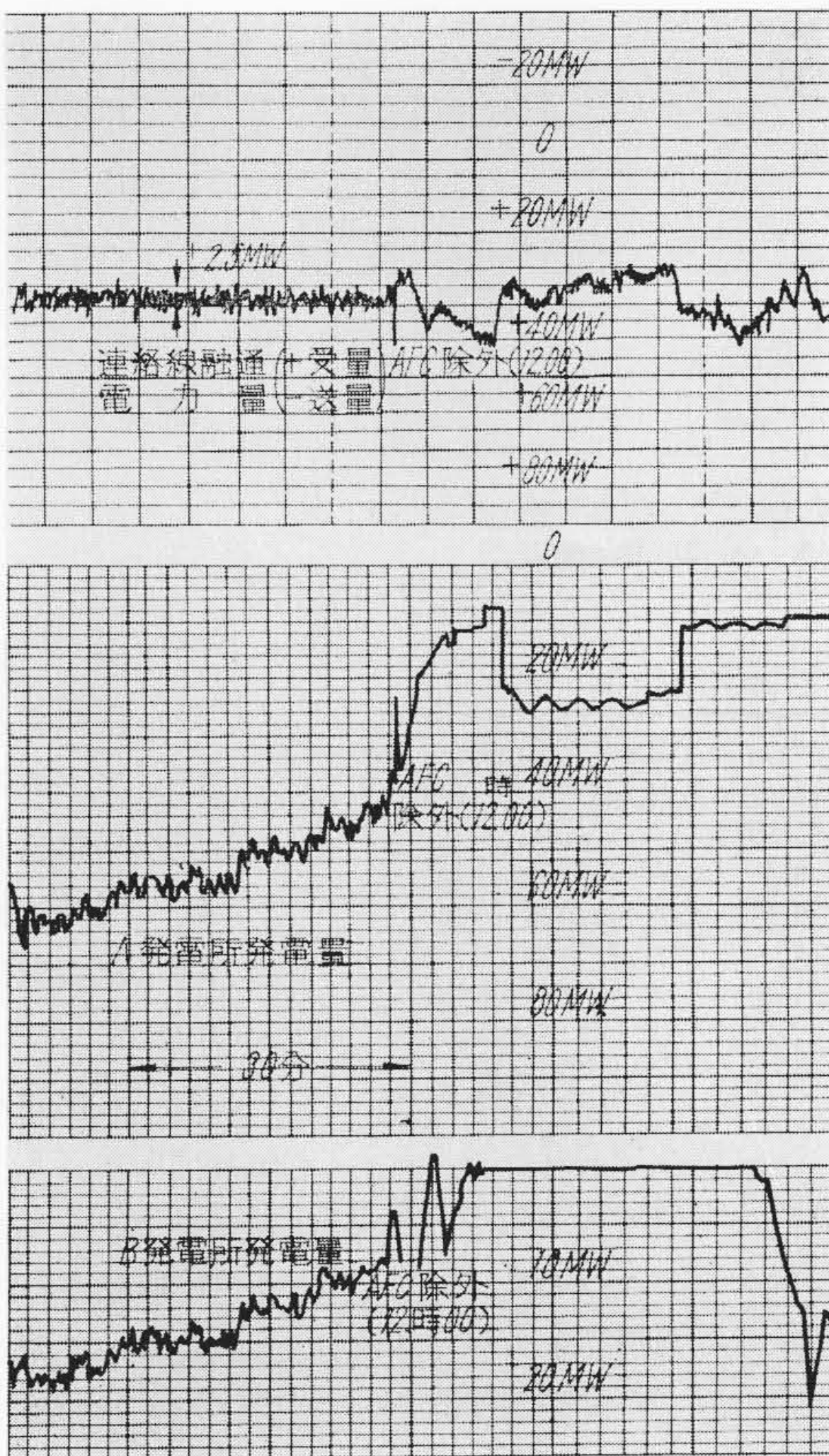
第5図 比例配分制御ブロック図



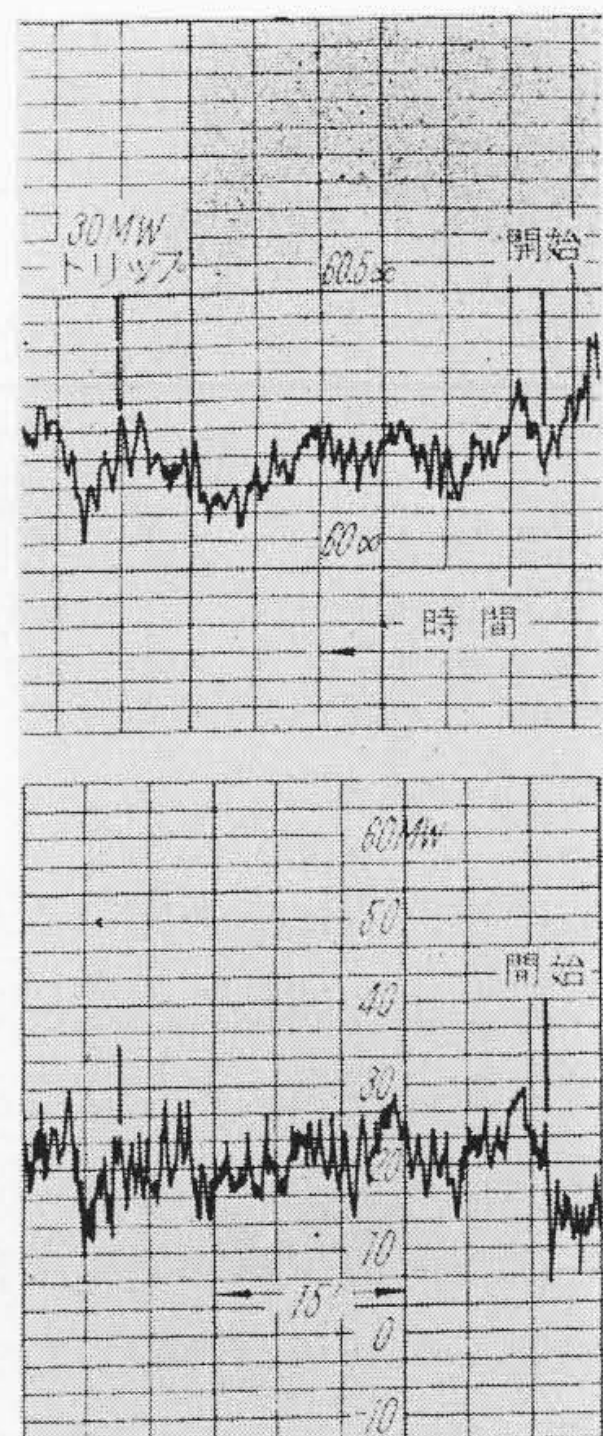
第6図 比例配分制御盤の外観
(水位制御付)

となり、それぞれの発電所出力は
整定値により $K:(1-K)$ の配分
比におちつく。第6図は本方式に
よつた装置の外観である。

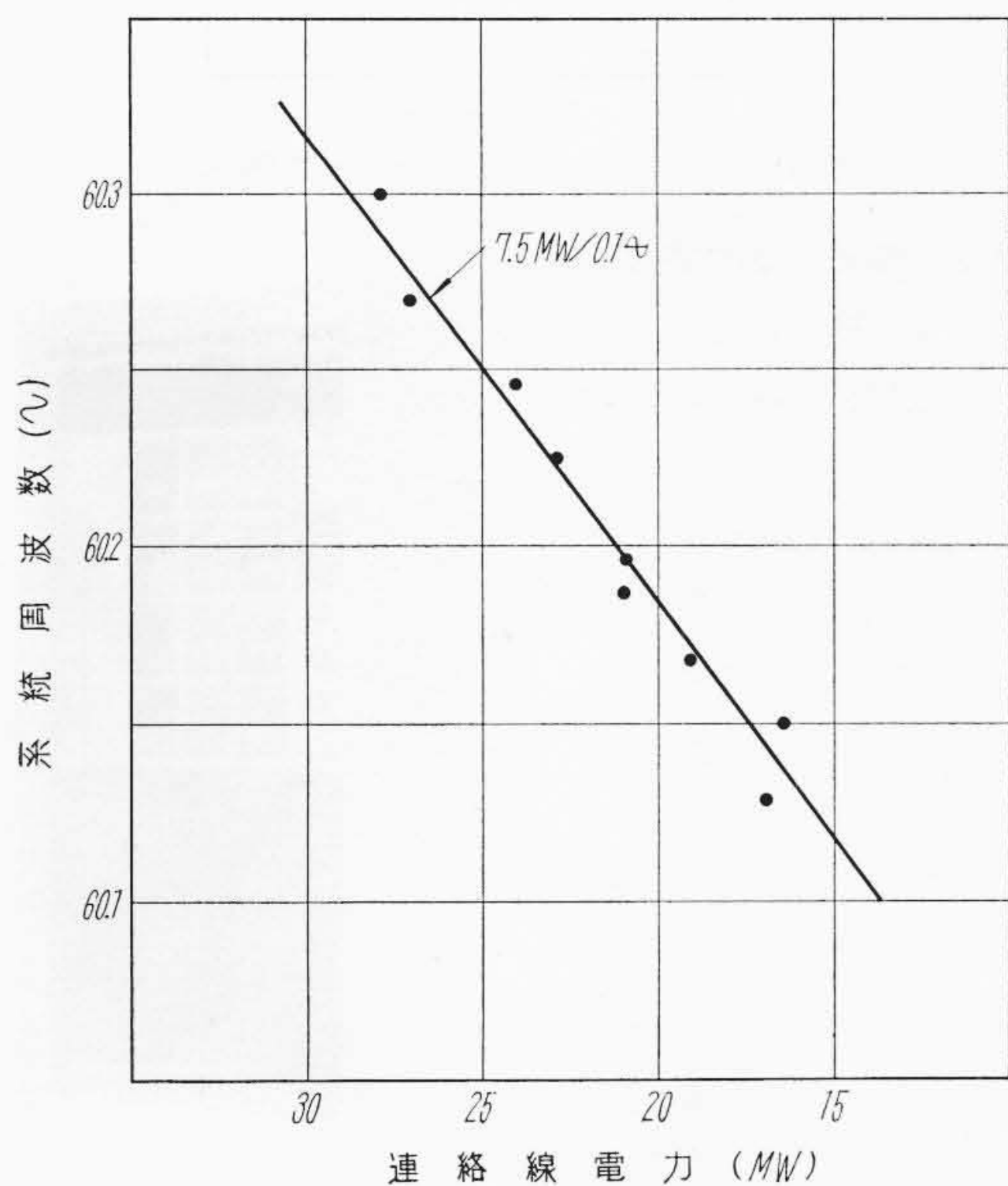
第7図はA、B両発電所を2:1
の配分比で F.T.C 制御を行つた
場合の記録 (A、B発電所のチャ
ート目盛が 2:1 になつている)
で整定値通りによく配分されてい
る。また第8図は他系統が A.F.C



(A発電所, B発電所の変動負荷配分比率 2:1)
(A発電所基準整定値 58 MW
B発電所基準整定値 16 MW)
第7図 FTC 比例配分制御試験記録



(連絡線の電力—周波数整
定値 7.5MW/0.1~)
第8図 TBC 制御試験
記録

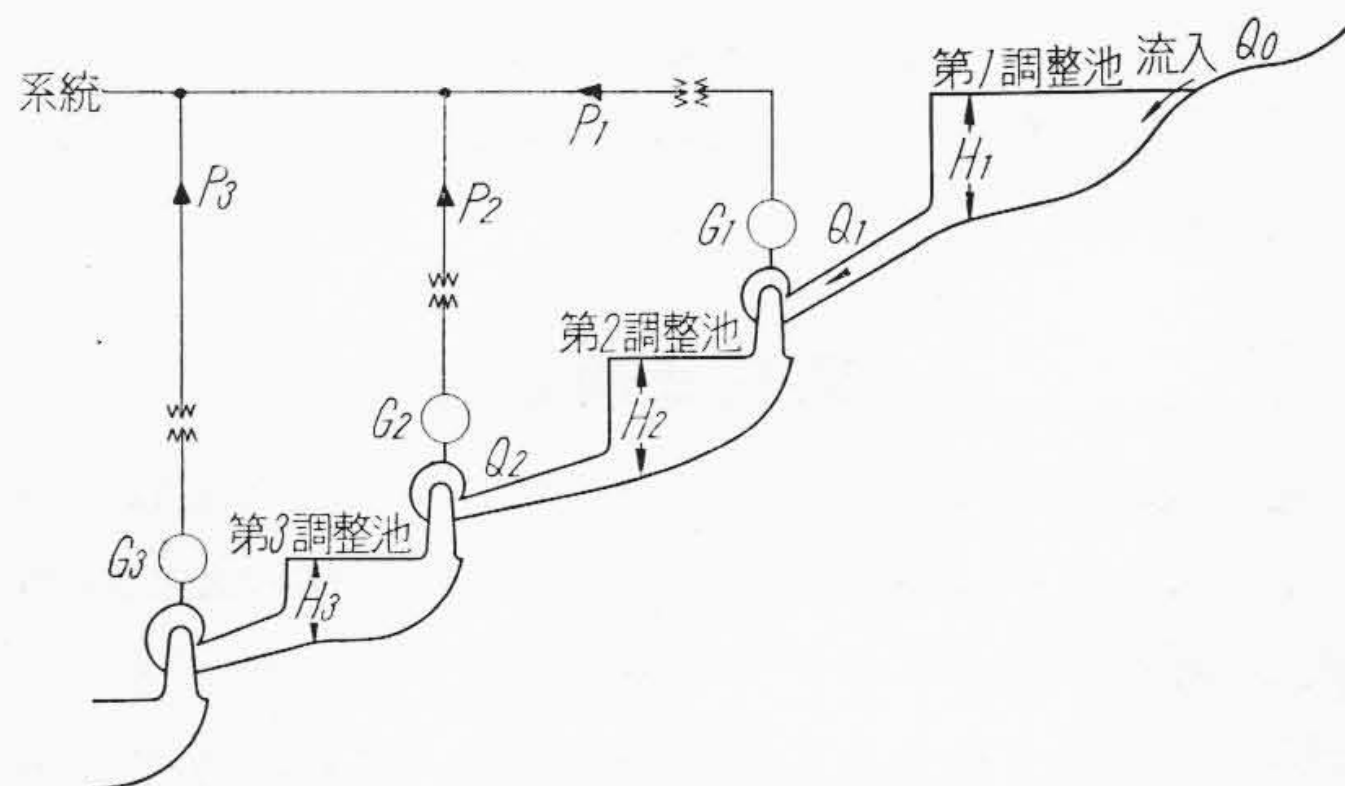


第9図 TBC 平常運転中における周波数と
連絡線電力の関係

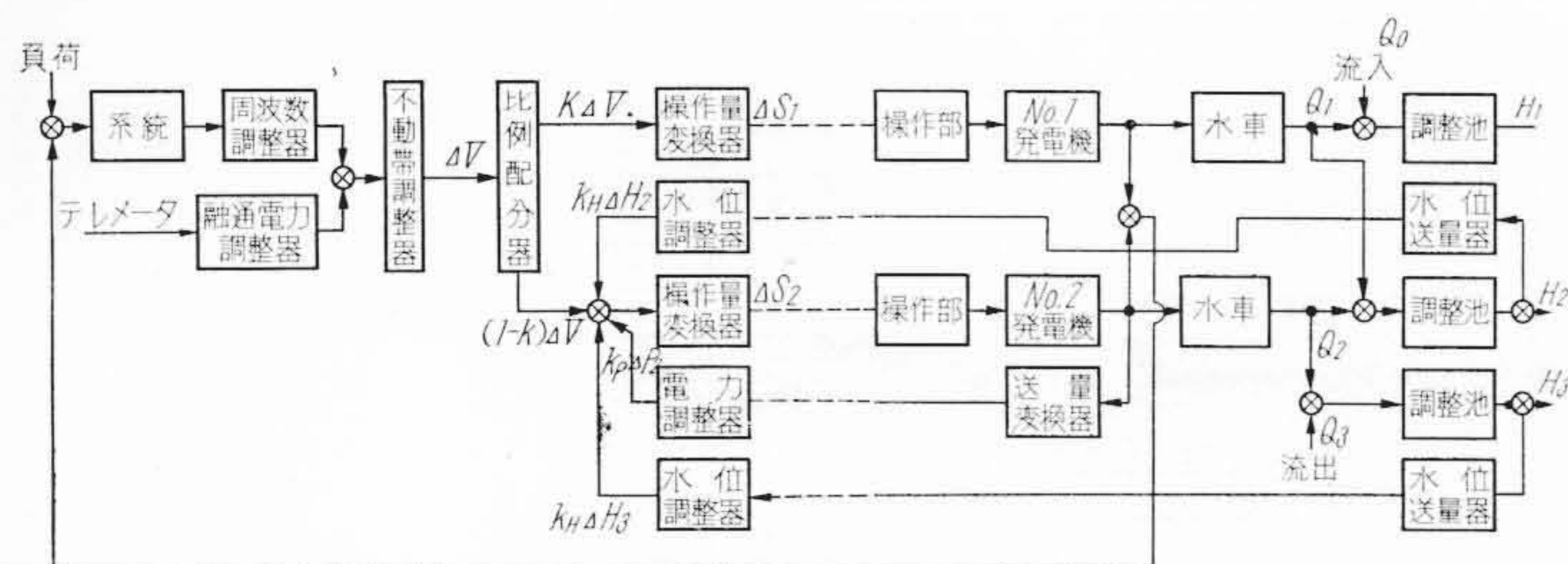
を行っていないときの T.B.C 制御において系統周波数
と連絡線電力の変化状況の記録で、このときの整定値
7.5 MW/0.1 ~ によく追従している。これをXY座標上
に示すと第9図のようになる。

2.3 水位制御を加味した A.F.C

わが国では同一水系の上下流に二、三箇所の発電所が
配置されている例が多いが、この場合は発電所間の調整



(同一水系に配置された例)
第10図 調整池関係図



第11図 比例配分制御ブロック図
(水位制御付)

第1表 水位比率制御試験結果

	利用水深 (m)	試験結果		水位変化 ΔH (m)	上昇率 $\frac{\Delta H}{H} \times 100\%$
		初期の水深 (m)	6時間後の 水深 (m)		
A 発電所	6	8.5	9.4	$\Delta H_2 = 0.9$	15
B 発電所	5	8.3	9.1	$\Delta H_3 = 0.8$	16

池の水位変化を考慮に入れて A.F.C. を行う必要がある。しかし調整池の水位を A.F.C. にどのように関連づけるかは運営方針により決定されるものであるから、具体的な制御方式もそれによつて決まる。第10図はその一例で、最下流の発電所は一定量の灌漑用水を放流する必要から定負荷運転を行い、上流の二つの発電所のみが調整用である。その放水を受け入れる第2、第3の調整池の水位上昇あるいは下降率が同比率になるように上流の第1、第2発電所の出力配分を遠方自動制御する。第11図にそのブロック図を示す。さらにブロック図に記入した記号を用いて数式にて説明すると

$$\Delta S_1 = K \Delta V \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta S_2 = (1-K) \Delta V + k_H (\Delta H_2 - \Delta H_3) - k_P \cdot \Delta P_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(4), (5)式において定常状態では $\Delta V = \Delta S_1 = \Delta S_2 = 0$ となり $k_H (\Delta H_2 - \Delta H_3) - k_P \cdot \Delta P_2 = 0$ (6)
ここで $k_P \cdot \Delta P_2$ は、調速機入力からみた発電機が積分型であるから、これを定量化するために挿入したもので適当に小さい値にすることにより、 $\Delta H_2 \div \Delta H_3$ とすることができる。すなわち二つの調整池水位の平衡を保ちながら A.F.C. を行うことができる。第1表に6時間の試験結果を示す。

3. 電気式調速機

電気式調速機は機械式のものに比し高感度で速応性がすぐれているので定周波の電力保持と発電所の運転効率向上に好適であるばかりでなく、系統の過渡安定度の改善に寄与するところも大きい。この点より日立製作所においては早くから電気式調速機の開発に着手し、速応型磁気増幅器を主体とする独得の制御装置を製作し昭和32

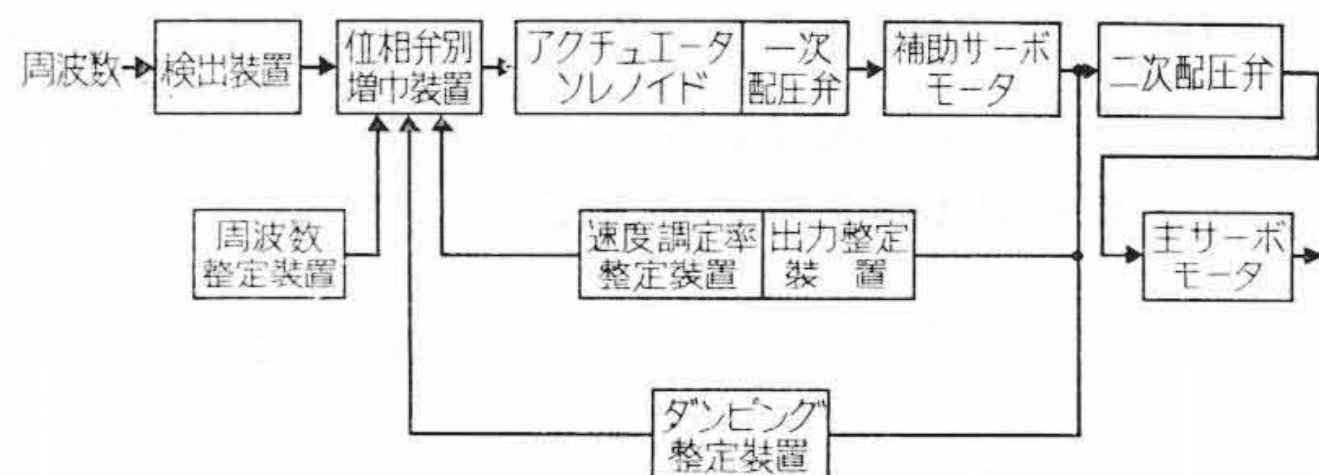
年秋3台を関西電力株式会社笠置発電所 15,000 kW 水車用として納入し、引続き改良を加えて使いやすくした EA 型9台を東北電力株式会社上野尻発電所はじめ各所に納入している。さらに新設発電所用として十数台を製作中である。

3.1 制御装置の構成

全装置は次の主要部分から構成されている。

- (1) 検出装置
- (2) 位相弁別増幅装置
- (3) アクチュエータソレノイドと一次配圧弁からなる圧油増幅装置および補助サーボモータ
- (4) 周波数整定装置
- (5) 速度調定率整定装置および出力整定装置
- (6) ダンピング装置

この主要部分の組合せは第12図に示すとおりである。なお(1), (2), (4), (5), (6)の各部分はレギュレータキュービクルに(3)はアクチュエータキャビネットに収納されている。レギュレータキュービクル、アクチュエータキャビネットの外観はそれぞれ第13, 14図に示すとおりである。

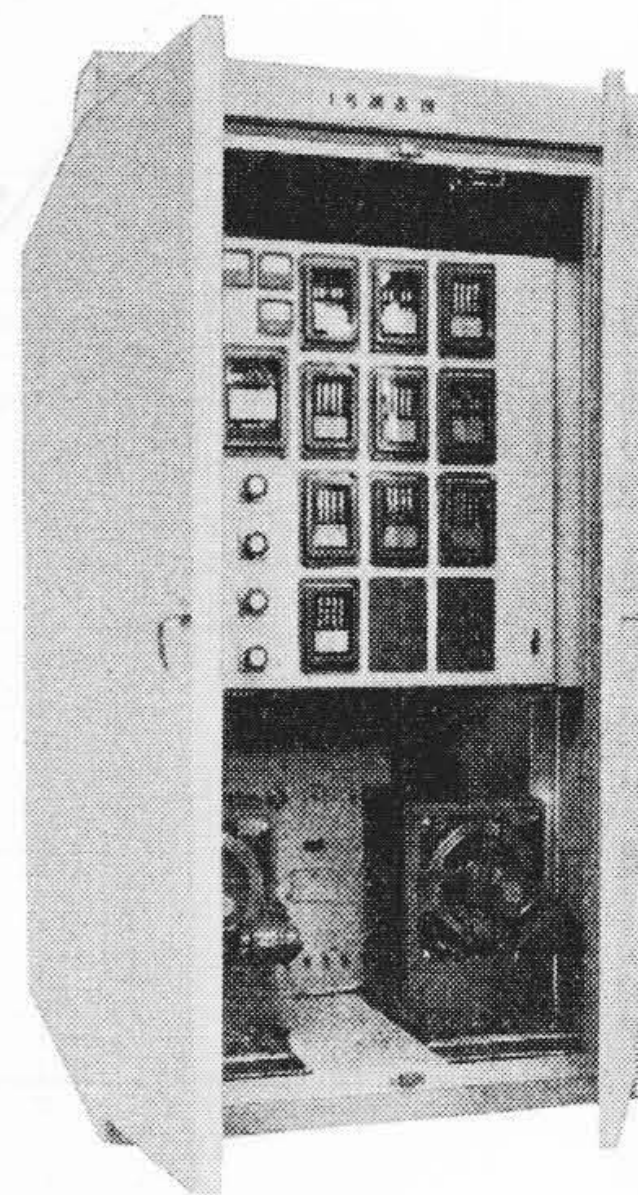


第12図 電気式調速機機構説明図

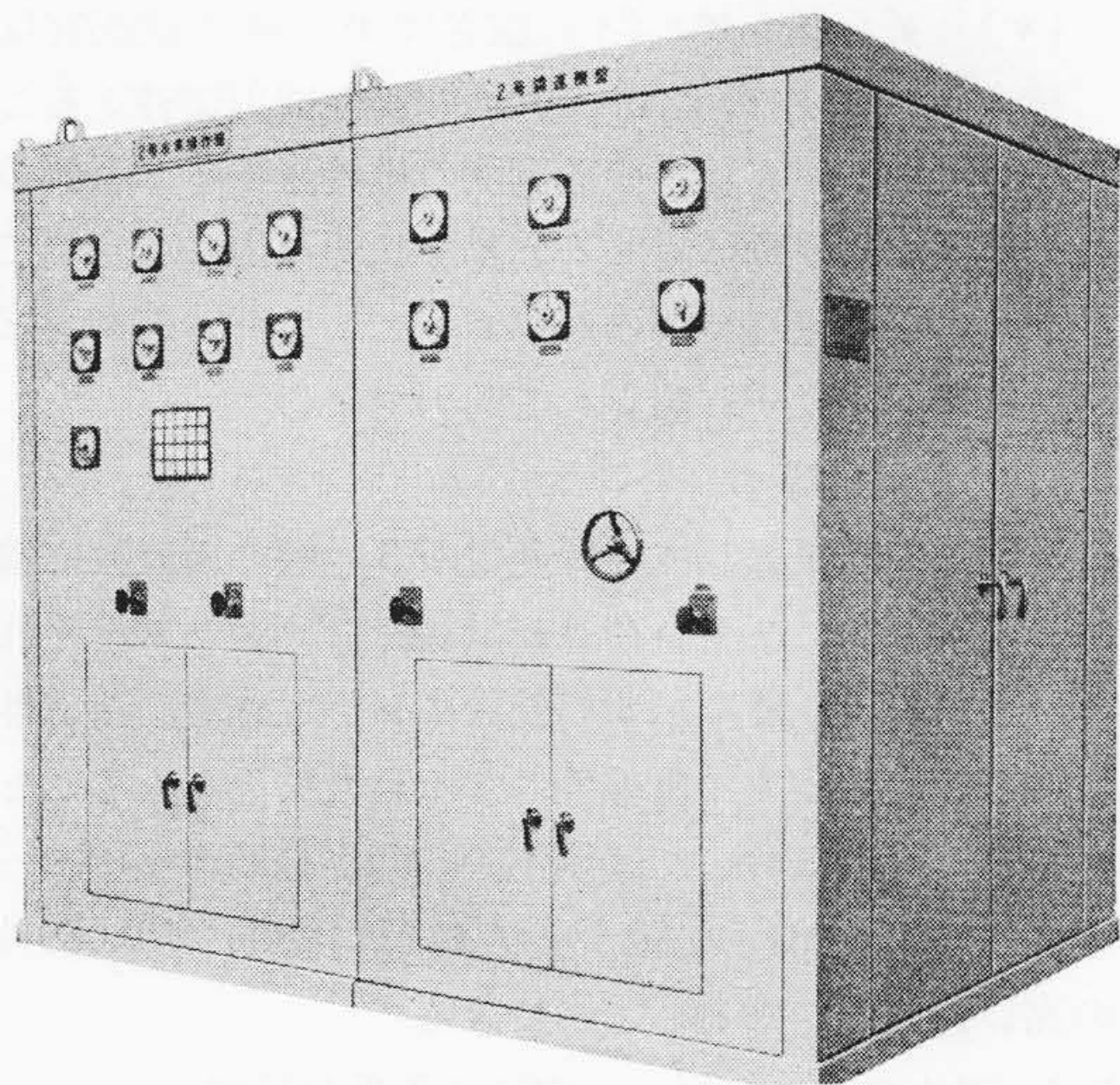
3.2 装置の動作説明

3.2.1 検出装置

周波数の検出にはリアクトルおよびコンデンサの並列共振回路を使用している。水車に直結されたアクチュエータ発電機の周波数がリアクトルおよびコンデンサによつて定められる共振周波数に一致している場合には共振回路に流入する電流は電源電圧と同位相でありその大きさは最小である。周波数が共振周



(東北電力上野尻発電所納)
第13図 レギュレータキュービクル



第14図 電気式調速機アクチュエータキャビネット

波数よりも高いかあるいは低い場合にはともに電流は増加し、電圧に対する電流の位相は進みあるいはおくれる。このように周波数の偏差を電圧に対する電流位相の進み遅れとして検出する。

3.2.2 位相弁別増幅装置

位相弁別増幅装置としてはプッシュプル接続の2個の速応型磁気増幅器を使用している。この速応型磁気増幅器には検出装置の入力電圧と同位相の電圧を出力巻線に、また一方検出装置の出力電流を変圧器をかいして90度移相したものを制御巻線の1組にあたえている。そしてこの速応性磁気増幅器の出力電流は制御電流の位相により制御される位相弁別特性をもち位相の変化に対して1サイクル以内に応動する。したがって検出装置と増幅装置の協同作用により周波数の偏差を検出し、これに比例した直流出力を次段のアクチュエータソレノイドにあたえる。

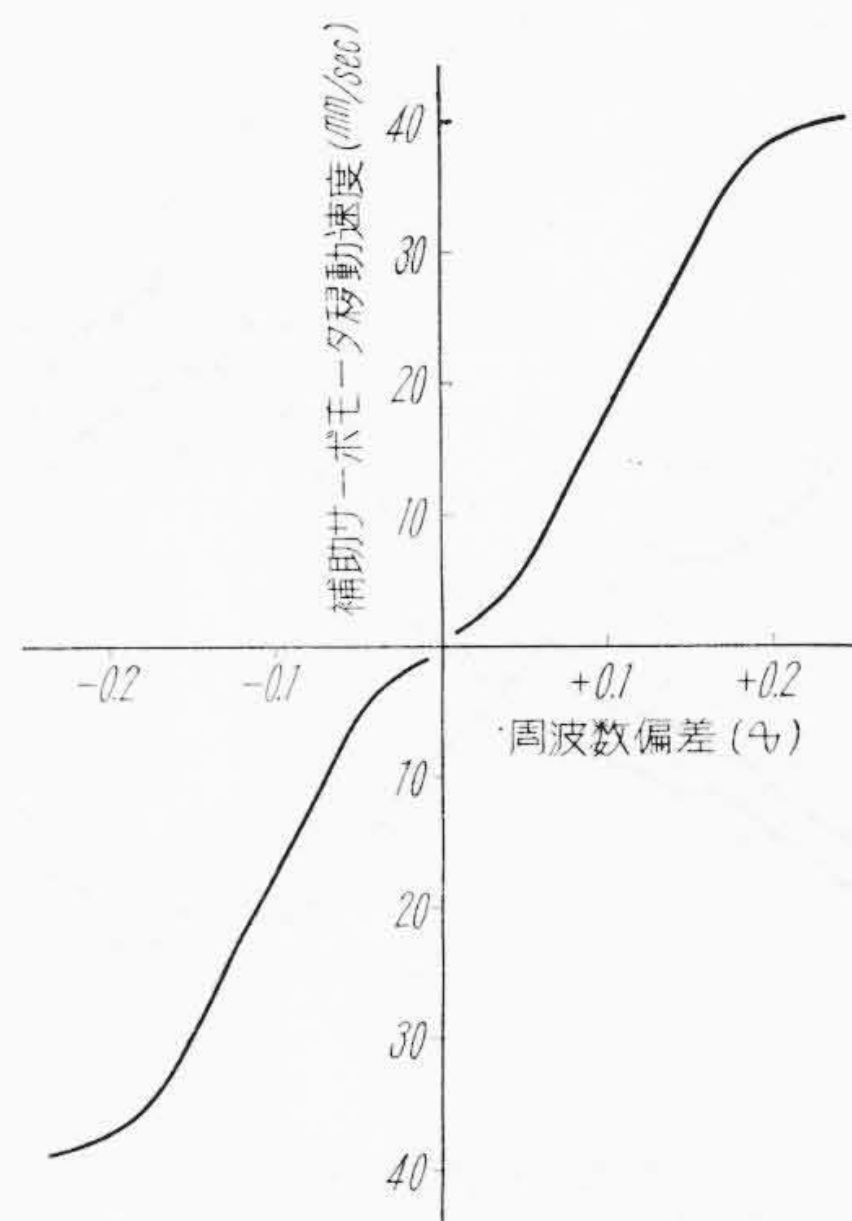
3.2.3 アクチュエータソレノイドと一次配圧弁か

らなる圧油増幅装置および補助サーボモータ

アクチュエータソレノイドには閉側および開側用の増幅器出力があたえられ可動部を周波数偏差に比例した量だけ変位させ一次配圧弁を動かす。一次配圧弁以降は従来の機械式調速機と異なることなく補助サーボモータより主配圧弁をかいして主サーボモータを操作する。ただ電気式調速機においては補助サーボモータを速度調定率、出力整定、ダンピング装置などの発信部として必要器具を連動させている。

3.2.4 周波数整定装置

検出装置入力側に2個の抵抗器をブリッジ接続しその一方を調整して、入力電圧と同位相または反対位相のある大きさの電圧を増幅器制御巻線の一つに入れて



第15図 周波数偏差—補助サーボモータ移動速度の一例

周波数整定値を調整する。

3.2.5 速度調定率整定装置および出力整定装置

補助サーボモータと連動する可動鉄心入りのリアクトルと可変の調整抵抗器とを入力回路に並列接続しリアクトルソレノイド中間端子と可変抵抗器摺動子とでブリッジ回路をつくり増幅器制御巻線の一つに加える。この回路で調整抵抗を固定すれば補助サーボモータ位置に応じて周波数整定点が変り速度調定率特性をもたせる。速度調定率は回路の入力電圧を調整して任意の値に定めることができる。また調整抵抗器を調整すればこれに応じた補助サーボモータ位置とすることができる。すなわちこれが出力整定で案内羽根開度を全閉から全開まで任意に整定できる。

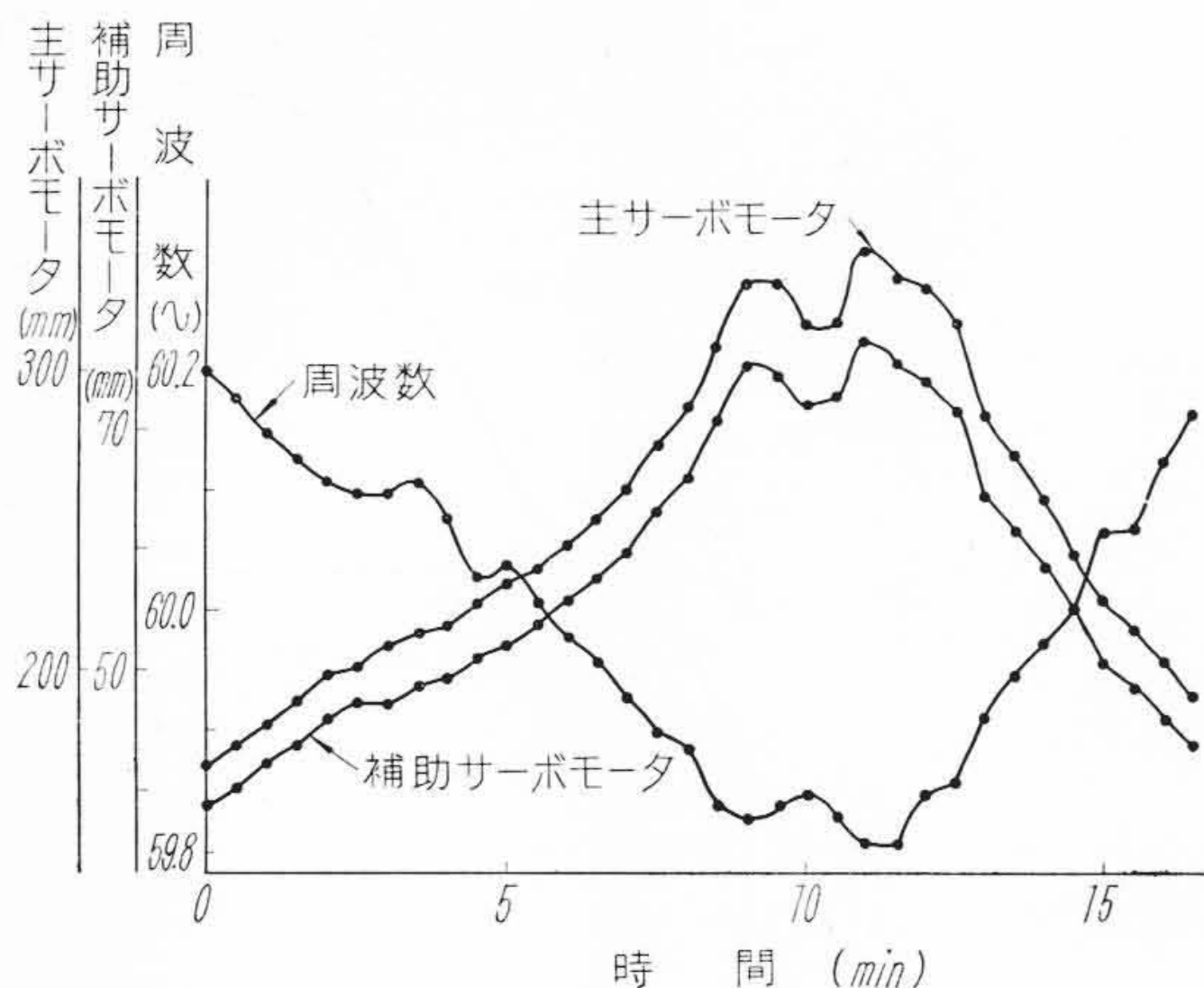
3.2.6 ダンピング装置

補助サーボモータと連動する可動鉄心入りのリアクトルに直列接続された変圧器の出力電流を整流して増幅器のダンピング巻線に入れており補助サーボモータ動作量の微分値を饋還してダンピング作用をあたえている。この回路は直列コンデンサおよびポテンシオメータの切替によつて、ダンピングの時定数、強さをそれぞれ独立に変え得るようになっている。

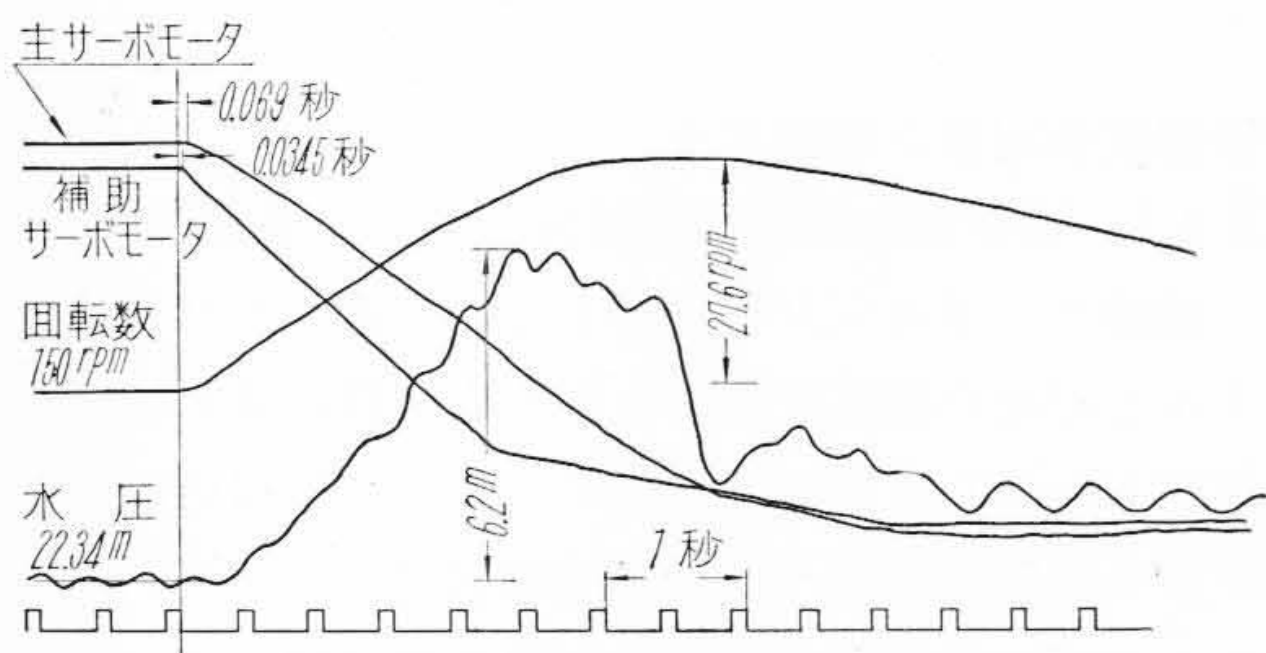
3.3 特 性

3.3.1 EA型電気式調速機の特性は下記のとおりである

- (i) 感度：補助サーボモータまでで $\pm 0.02\%$ 以内を標準とする。東北電力上野尻発電所水車用の工場試験実測値では平均 0.008% の高感度を得ている。
- (ii) 速応性：周波数偏差に対する補助サーボモータ移動速度の実測値は第15図に示すとおりであり



(関西電力笠置発電所3号機)
第16図 系統周波数応答試験結果

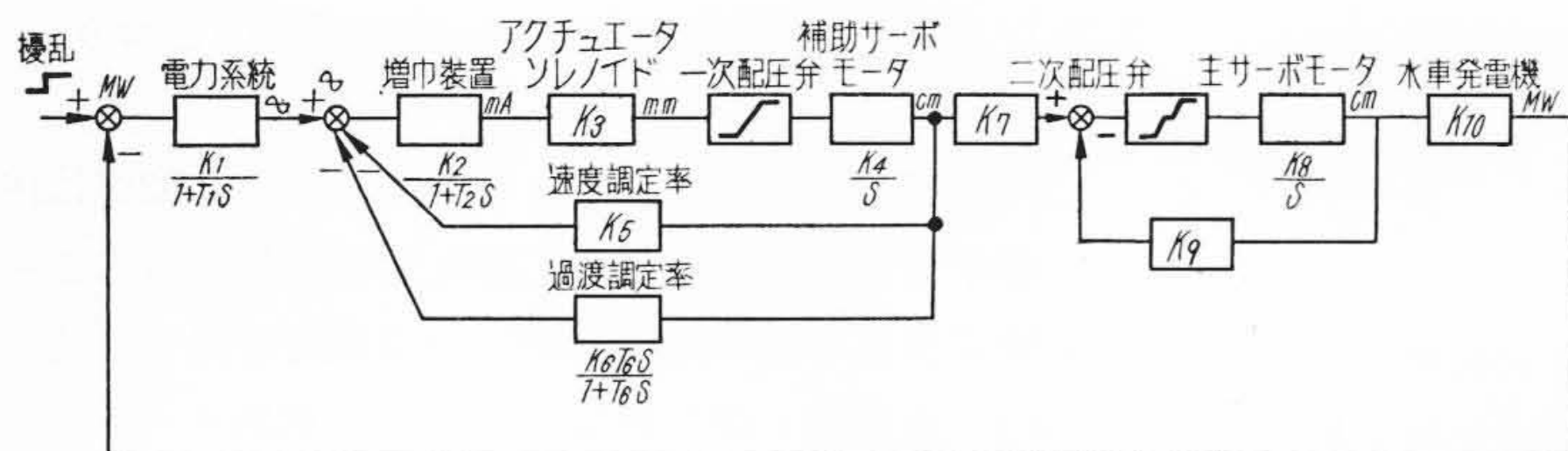


(関西電力笠置発電所3号機)
第17図 負荷遮断試験オシログラム
遮断負荷 11,040 kW

検出回路に 0.2～程度 の階段状変化をあたえた場合の補助サーボモータ不動時間は 0.04 秒程度である。また全負荷遮断時の不動時間は笠置発電所における実績では 0.034 秒できわめて高い速応性を示している。

(iii) 周波数整定範囲：規定周波数の +2～-4% 間任意に連続可調整である。

(iv) 速度調定率：整定範囲内のいずれの周波数においても 0～5% 間連続可調整である。



第18図 電気式調速機ブロック線図

(v) ダンピング：(イ) 強さは 0～50 % 間適宜切替 (ロ) 時定数は 0～10 秒間適宜選択切替えることができる。また系統並列前の単機運転時と系統並列後周波数変動に対する応動を状況に応じて変更できるように無負荷時のダンピングと負荷時のダンピングとをそれぞれ独立して選択できる。

3.3.2 総合特性

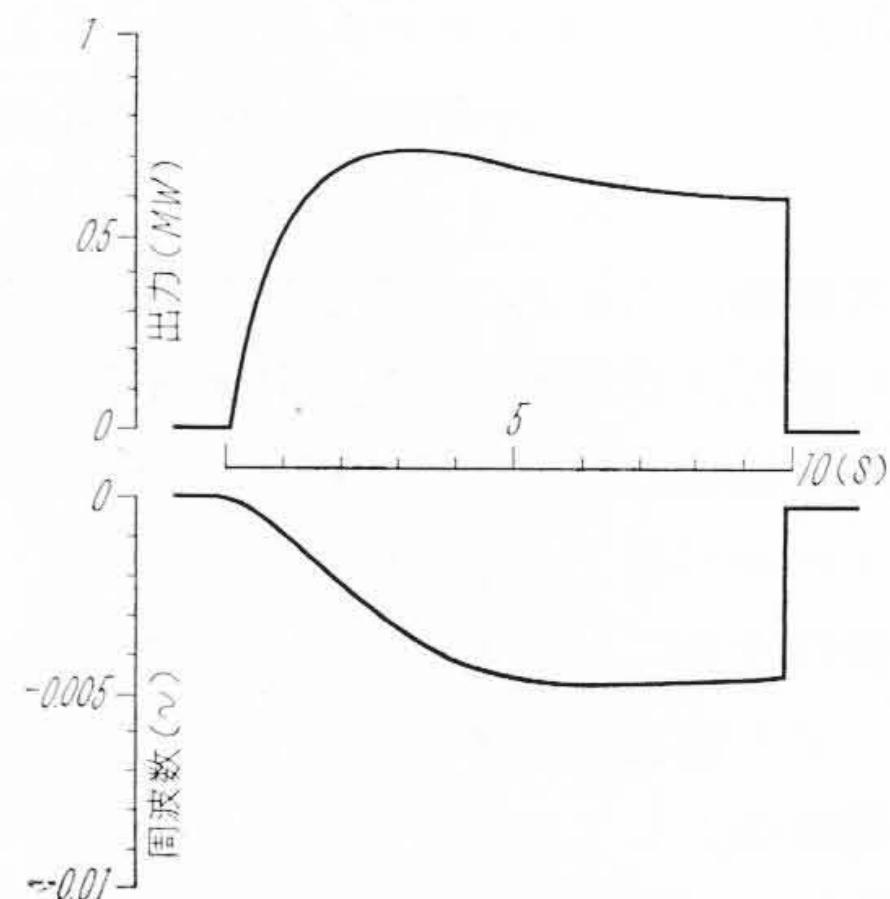
現地試験結果として笠置発電所3号機の周波数応答試験の結果および全負荷遮断試験オシログラムをそれぞれ第16, 17図に示す。前者において感度, 速応性および速度調定率の直線性のすぐれた結果をみることができ, 後者において閉鎖不動時間が補助サーボモータにおいて 0.034 秒, 主サーボモータにおいて 0.069 秒の高い速応性を知ることができる。

3.4 アナログコンピュータによる解析検討

東北電力上野尻発電所1号機はすでに工場試験をおわり現地試験をまつのみであるがこれについて実際使用する二次配圧弁, 主サーボモータ, リターン機構, 電力系統および電気式調速機各部の伝達函数を基にしてアナログコンピュータにより速度調定率, ダンピングの各設定値における案内羽根, 出力の応動, 系統周波数の制御結果を解析した。電気式調速機運転時のブロック線図およびアナログコンピュータ解析結果の一例をそれぞれ第18, 19図に示してある。電気式調速機は特性よく連続性, 直線性にすぐれているため動作の解析が容易でしかも速度調定率, ダンピングが任意に可調整であるため種々の組合せの場合を合成して実際運転時の様相を予知でき計画的運用を容易にするなど機械式にみられぬ高い利用効果を発揮しうる。

3.5 日立 EA 型調速機の特長

EA 型調速機は前記のとおり特性がすぐれており種々の整定部を任意に選択できて水車発電機にその責務を十



(東北電力上野尻発電所, 速度調定率 3% ダンピング強さ 6% 時定数 1 秒 外乱として階段状に 1 MW の負荷増加した場合)

第19図 アナログコンピュータ解析結果

分に発揮させ得ることはすでに使用実績より明らかである。装置として独得の速応性磁気増幅器を主体としているため安定で全使用範囲にわたって特別の考慮もいらず、サーボモータの発信器の応動部は可動鉄心リアクトルであるため接触部なく消耗の心配もない。しかも装置の全交流電源はアクチュエータ発電機より供給されるもの一本であるため補助電源に対する考慮も全然不要である。装置構成は電気部分をレギュレータキュービクルに圧油操作部分をアクチュエータキャビネットにおさめ、まとまりのよいものとしており運転中の操作はすべて主配電盤からできるように制御監視装置を備え、キュービクル内の器具配置も点検調整に便利なものとし簡潔にしている。

4. A.F.C. と電気式調速機の協調

電力系統の周波数変動すなわち負荷変動を分析すれば、年間の季節的な変動と一日中の時刻的な変動すなわち基底負荷変動と、この基底負荷のなかでのより小幅の変動にわけられる。この小幅の変動をさらに細かくわければ、ごく小さい急激な変動分すなわちフリンジ分とやや大きい緩慢な持続性の変動分すなわちサステインド分からなりたっている。

この周波数変動すなわち負荷変動にたいし、調整容量が十分な発電所に電気式調速機を適用して周波数を一定に保つ方式も実施され調速機のみにより系統周波数変動を $\pm 0.1\%$ の偏差以内におさめている例がある。しかし個々の発電機には出力に制限があり、この制限内で運転させるため調速機には速度調定率特性をもたせている。したがって真の意味の周波数一定保持運転をさせることはできない。このため一定周波数保持の目的のほかには時差補整また前述のごとき多目的な A.F.C. を必要とし、調速機と A.F.C. の協調が問題となる。

一方わが国では発電所の構成も水力が主で、しかも流れこみ式が多く調整容量の大きなダム式発電所にとほしい。したがって流れこみ水量に応じた出力のみを受持つ基底負荷発電所と、調整容量をもつ周波数調整発電所に運転目的がわけられる。後者の周波数調整発電所は、調速機運転発電所と自動周波数調整発電所とし、フリンジ分にたいしては電気式調速機で速応調整させ、サステインド分にたいして不動帯を付与した A.F.C. に調整させ周波数を一定にたもつ方式が推奨される。

かくすれば調速機運転発電所は定められた速度調定率特性にしたがい高感度に負荷を分担して小幅の出力変動内におさまリ、水の利用効率、水車運転効率もよい点に運転条件をたもちやすくし、A.F.C. 用発電所は不動帯幅をこえた変動分を忠実に吸収調整する。したがって調整発電所の分担動作責務を軽くし調整容量も少なくしうる。

しかし独立した系統を構成し、負荷変動も小さくゆるやかで大幅の変動は規則的なときは追従制御で補償することにより、A.F.C. のみで周波数変動を $\pm 0.1\%$ サイクル以内におさめうるところもある。かかる場合には電気調速機は A.F.C. による許容制御誤差範囲内では抑制し、突発的な急峻大幅の周波数変動、あるいは故障時の保護用として動作させることにより A.F.C. をたすけ、短時間内に周波数を回復させることができる。かくすれば調速機発電所は最高能率点の一定運転となり、水を過不足なく最も有効に利用できるもので経済性をたかめ、また自体の操作部の動作を最小限度におさえて消耗を防ぐなどの利点もある。

5. 結 言

A.F.C. ならびに電気式調速機は今後ますます普及するであろうが、これが協調運転は周波数保持の面より重要視される。すなわち負荷変動と発電所調整能力の配分、また許容制御誤差をもととして運転効率のとり入れかたの軽重、ならびに系統安定度などを考慮に入れて定められるべきものである。また最近各方面で研究されている経済配分制御も広域運用法の発展に従いますますその必要性が認められつつあるが、この種の装置を円滑に運用するには A.F.C. ならびに電気式調速機の責務が大きな役割をになうことにならう。本文に述べた装置はいずれも実用化されてから数年くらいしか経ていないので、今後も改良の余地はあるものと思うが、とにかく現在の程度までに完成させることができたのは各電力会社の関係者の熱心な御援助ならびに御協力の賜であり、紙上より厚く謝意を表する次第である。製作担当者としてもますます改良を加え、性能の向上に努力する所存である。

参 考 文 献

- (1) 静間ほか：日立評論 40, 922 (昭 33-8)