

磁気演算増幅器による自動負荷周波数調整装置

Automatic Load Frequency Controller Using Magnetic Operational Amplifier

桑 村 武 志*
Takeshi Kuwamura

水 口 一*
Hitoshi Minakuchi

中 野 修 一**
Shūichi Nakano

伊 藤 昌 夫**
Yoshio Itō

久 保 田 哲**
Tetsu Kubota

内 容 梗 概

今回四国電力株式会社に磁気演算増幅器(MOA)を使用した自動負荷周波数調整装置(AFC)を納入した。この装置は従来信号演算用に電子管式平衡計器を用いていたものをすべてMOA化したもので、制御方式においても新しい内容が含まれている。おもな特長をあげると次のとおりである。

- (1) 水火力を協調して AFC を行なうと同時に同一水系発電所に対しては2種類の水位制御を自動的に切換えて行なうことができる。
 - (2) AFC, ELD の協調方式についてもそれぞれの制御目的に応じた負荷分担ができるよう考慮が払われている。
 - (3) MOA 化したため演算部は無接点、静止形となり信頼性が一段と向上した。
- 本論文ではこの装置の概要について説明する。

1. 緒 言

電力会社における給電自動化の一環として AFC が実施されてからすでに10年になるが、この間装置の改善がたえず行なわれてきた。

特に最近では系統容量の増大に伴い従来のように水力発電所だけでは調整容量が不足となり、火力発電所をも利用するようになった。

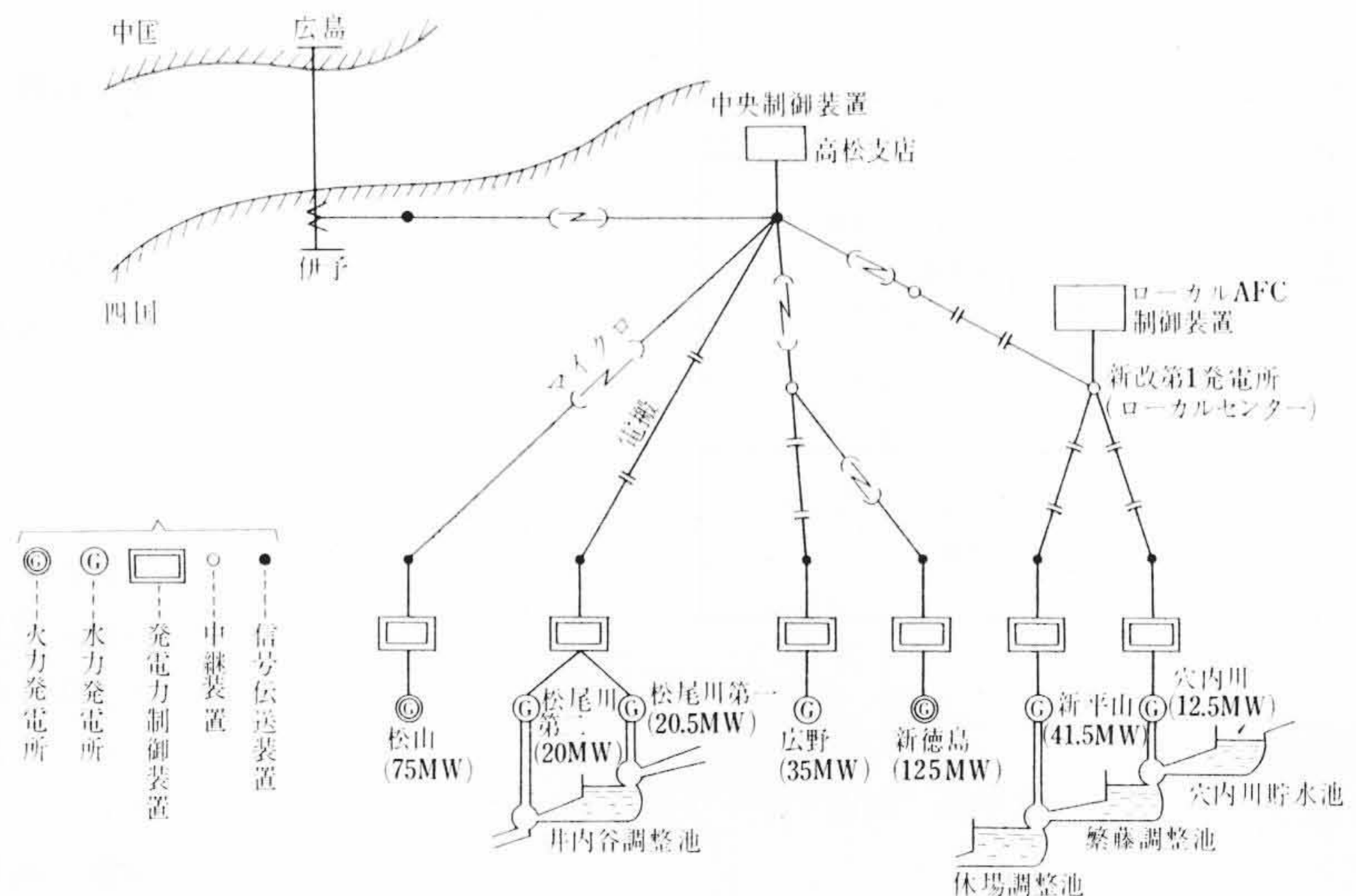
この場合水力発電所は出力を急変させることができるが、火力発電所では急激な負荷応動範囲が限られており、大きな変動負荷をとるときはその変化率を抑制する必要がある。したがってこれら特性の異なる発電所群をいかに協調させるかは大きな問題となる。

一方、経済負荷配分装置(ELD)が実用の段階にはいってないので、AFCとELDの協調についても考慮する必要がある。また調整発電所が同一水系にあるとき、それらに付随する調整池について水位制御をあわせ行なう必要もある。

昭和39年3月四国電力株式会社に納入したAFC装置は、これらの諸問題を十分検討して製作されたもので、松尾川第1(20.5 MW)松尾川第2((20 MW)、広野(35 MW)、穴内川(12.5 MW)、新平山(41.5 MW)各水力発電所および松山(75 MW)、新徳島(125 MW)各火力発電所を中央より制御してAFCを行なうものである。

本装置はいろいろな特長をもっているが、そのおもなものをあげると次のとおりである。

- (1) 水、火力協調してAFCを行ない、同一水系発電所に対しては2種類の水位制御を自動的に切換え行なえるようにしている。
- (2) AFC, ELD の協調方式についても、それぞれの目的に応じた制御分担ができるよう考慮されている。
- (3) MOA 化したため演算部は無接点静止形となり信頼性が一段と向上した。



第1図 四国電力 AFC 系統図

2. AFC 制御方式

2.1 制 御 対 象

本装置は四国電力系統が単独に運転される場合は系統周波数制御を行ない、隣接他社と連系運転する場合には系統周波数と連系線電力の両者を自動調整するものである。制御対象は第1図に示すとおりで、松尾川系(松尾川第1, 第2発電所)と穴内川系(穴内川, 新平山発電所)では水位制御を並行して行なっている。

2.2 AFC 制御の種類

本装置で行なう制御は次のとおりである。

(1) F.F.C. (Flat Frequency Control)

連系線電力に無関係に系統周波数を許容偏差内に保つ制御。

(2) T.B.C. (Tie Line Biased Control)

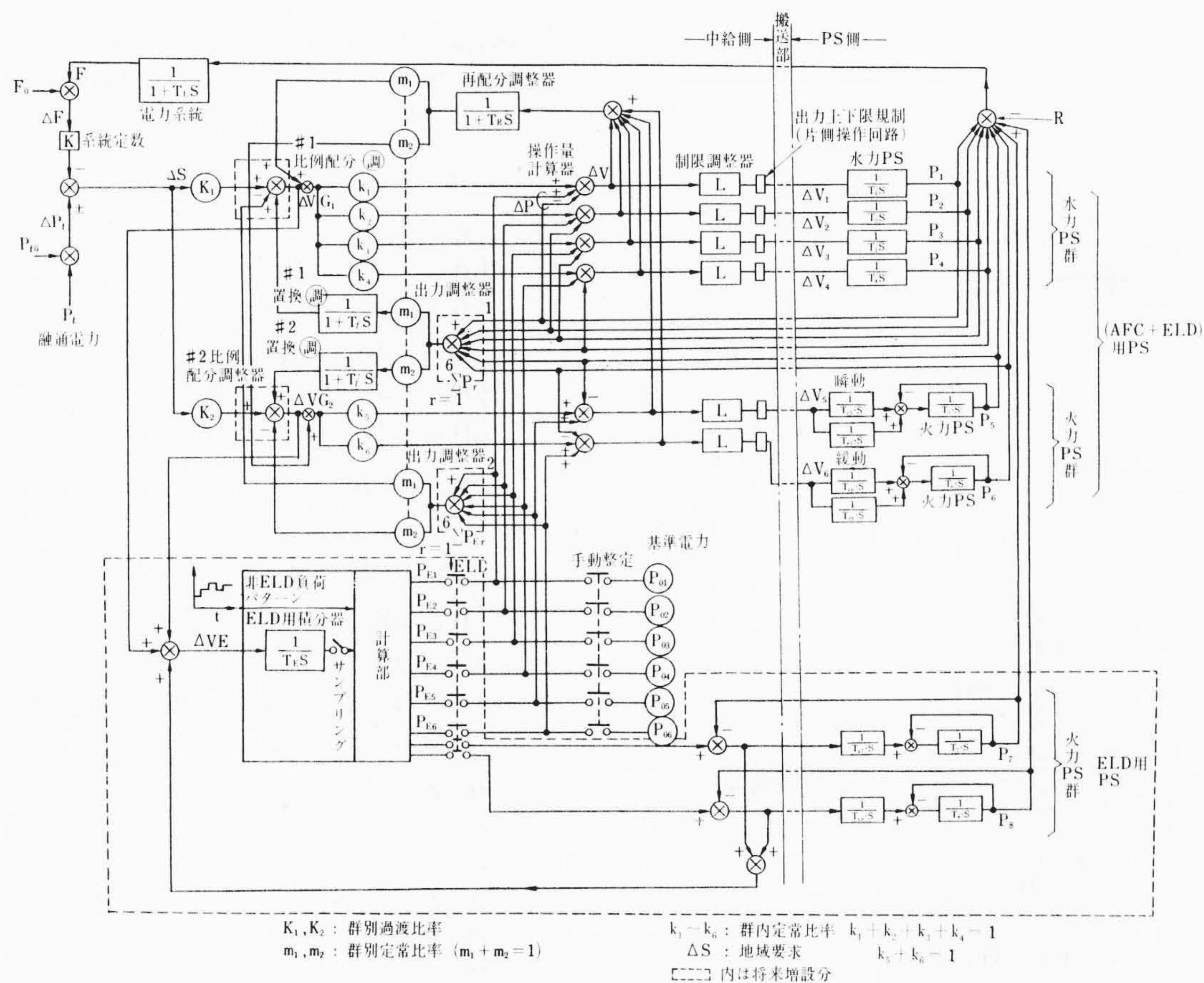
周波数偏差 ΔF と連系線電力偏差 ΔP_t を検出し、自系統に発生したじょう乱に対してのみ自系統内の調整発電所を制御して連系系統のAFCを行なう方式で、その結果として ΔF , ΔP_t を許容偏差内に保つことができる。

(3) F.T.C. (Flat Tie Line Load Control)

周波数には無関係に連系線電力を許容偏差内に保つ制御。

* 四国電力株式会社

** 日立製作所国分工場



第2図 (AFC+ELD) 制御方式ブロック図

(4) F.P.C. (Flat Power Control)

発電所出力を中給からの目標指令値どおりに運転する制御。

2.3 制御方式

2.3.1 方式説明

本装置の制御ブロック図を第2図に示す。

ここでは常時使用される TBC の場合を例にとり動作を説明する。

検出部で作られた周波数偏差 ΔF 、融通電力偏差 ΔP_i を適当な比率で重畳し、 $K \cdot \Delta F + \Delta P_i$ なる総合操作量を作る。(K は系統状態で決まる定数で $\Delta P_i = 0$ とすれば FFC を行なうことができる) この電圧を群別過渡比率調整器および群内定常比率調整器で所望の比率に分圧し、各発電所別の目標偏差電力値を計算する。この目標値は、それぞれの実偏差電力 ΔP (発電所のテレメータ指示から基準出力整定値を引いたもの) 相当の電圧と比較され、その差が計算される。

これを操作信号 ΔV として発電所へ送り、電力増幅したのちガバナモータを制御する。

発電機出力はテレメータで中央へ送り返され、各群ごとに所望の時定数をもった置換調整器で発電所出力を加算し、各発電所の基準電力の総和を差し引いて $\sum \Delta P$ 相当の電圧を作る。これを上述の配分回路を用いて各 PS に配分し、被制御量偏差信号と重畳して各発電所向操作信号を作る。

平衡状態では負荷分担比率 $\Delta P_1 : \Delta P_2 : \Delta P_3 : \dots$ を所望の比率に合わせながら AFC を行なうことができる。

さらに本装置は再配分調整器がついているので、故障発電所が生じた場合でも残りの健全な発電所で円滑に AFC を継続することができる。

再配分調整器は ΔV の総和を求める一次おくれ要素で、時定数は相当大きく選んであるので正常運転時には応動しないが、故障

発電所が生じて定常的に周波数偏差が出るようになったとき動作し、比例配分調整器入力回路に信号を送って健全な発電所への指令値を修正し上述の目的を果たすようにしてある。

2.3.2 制御方式の特長

制御方式のおもな特長は次のとおりである。

(1) 水火協調 AFC

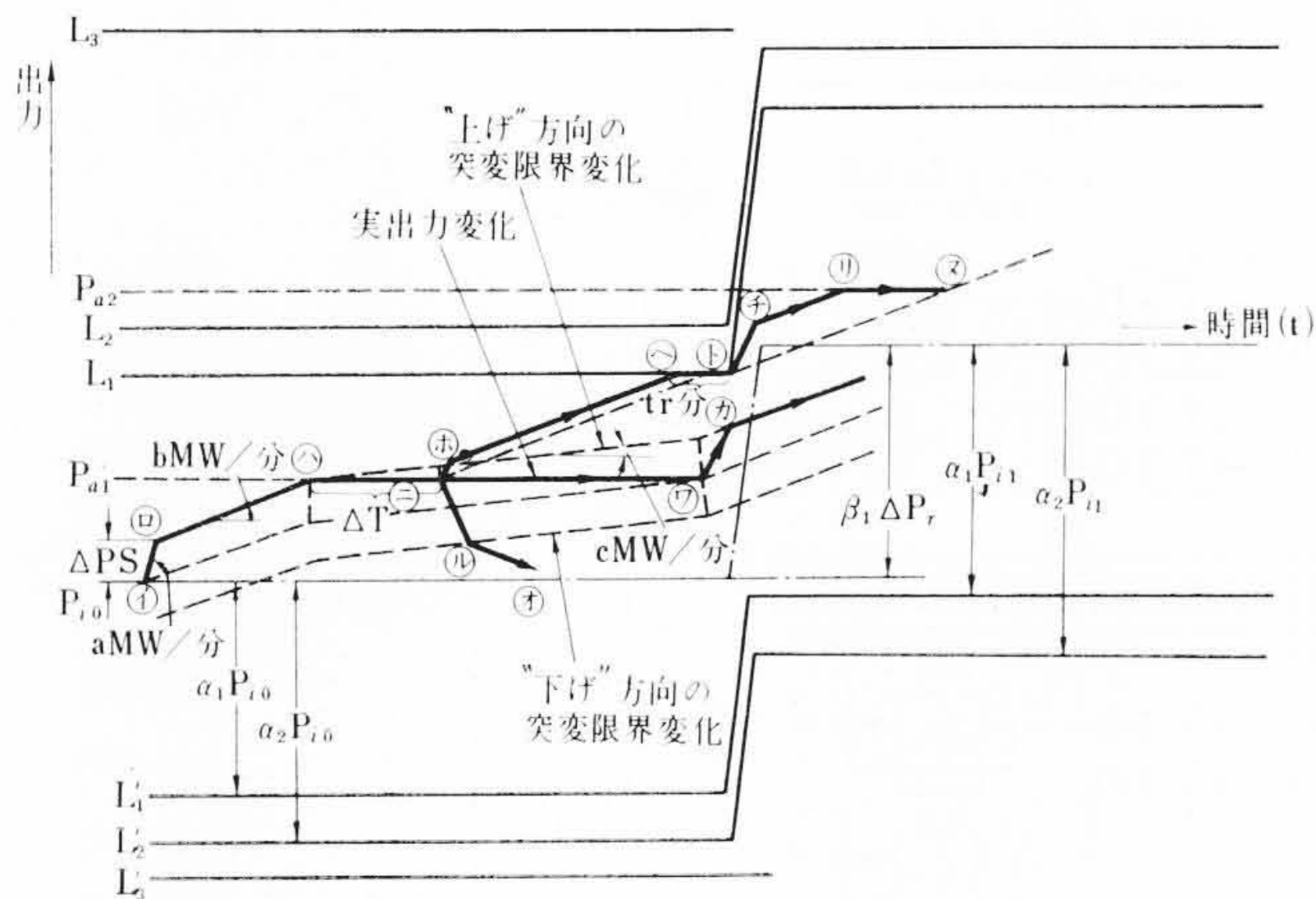
置換調整器の時定数を変化すれば、全制御系の速応度を大幅に変えるので、時定数の異なる置換調整器を用いて、それぞれ長短周期の負荷変動に応動する2群(水力群、火力群)において、比例配分制御を行なうことができる。水、火力協調 AFC では、水力発電所は短周期負荷に、火力発電所は主として長周期負荷に応動させるよう上述定数を設定している。(火力発電所は短周期分に対しては限られた変動幅しか応動させない)

特に火力発電所に設置した装置は、AFC 指令値をそのまま加えるとタービン、ボイラなど主機の許容制限条件をこえるおそれがあるので、水力とは異なる特殊な機能をもつ装置をつけ瞬動幅、緩動変化率などに上限を設けて安全な応動をさせるよう考慮してある。

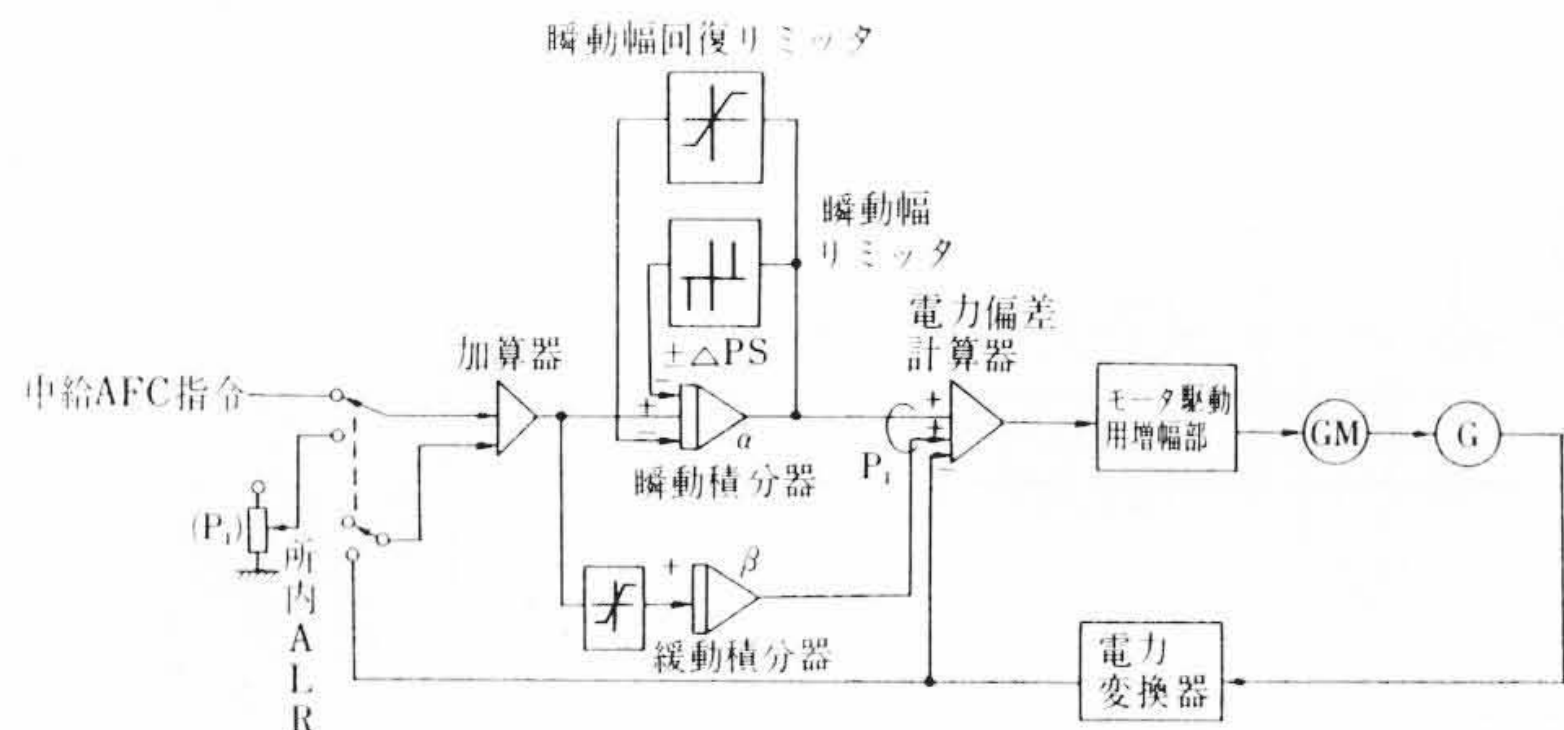
その装置の特性は第3図に示すとおりで、第4図はそのブロック図である。

上述の制限のほか、中給側および発電所側にそれぞれ基準出力自動設定装置をつけて第5図のように基準出力、中間リミット値を自動的に設定するようになっている。手動設定した基準電力 P_0 で運転中に、実出力が L_1 (または L_1') リミットをこえたとき、この状態が一定時間継続すれば、基準電力を P_1 まで上げると同時に出力応動可能範囲 L_1 および L_1' を自動的に引き上げる。(引下げも同様)

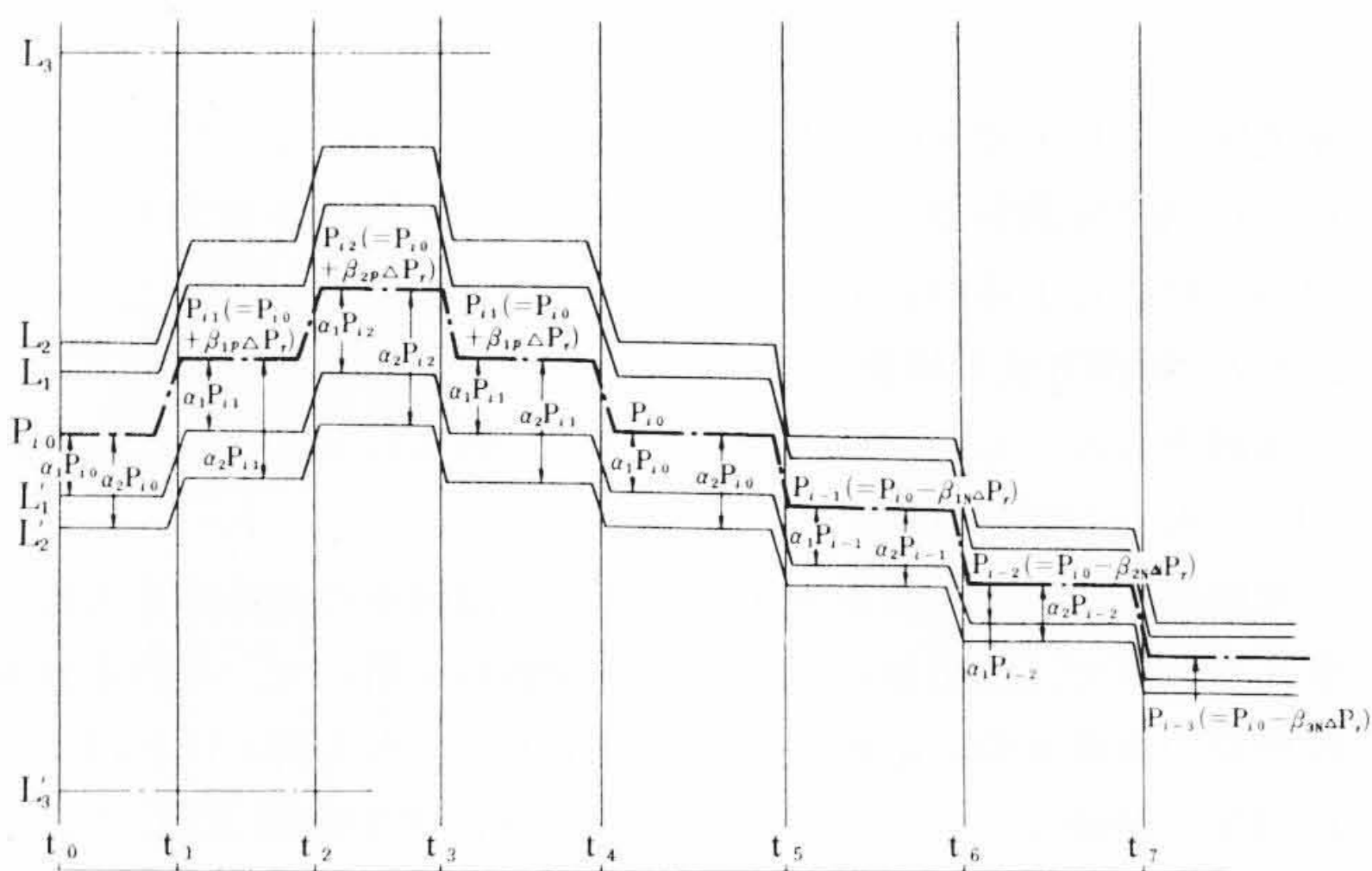
また L_2 (または L_2') リミットにかかれば実出力をこの限界内に戻すよう操作する。このように時限とともに自動移行する L_1 ま



第 3 図 火力 AFC 装置の特性



第 4 図 火力 PS 側 AFC 装置ブロック図



第 5 図 火力 AFC 系 基準出力自動設定特性

たは L_2 なる中間リミットがあるので、この範囲内では前記瞬動幅および緩動変化率は比較的大きくとして運転することができ、それだけ大きく系統制御に協力することができる。

上述の基準電力、中間リミットの自動移行(格上げ、格下げ)は手動で整定した基準値 P_{i0} を中心にして上 3 段、下 3 段までの範囲で行なわれる。

(2) AFC と ELD の協調

将来 ELD 装置がオンラインで使用される場合には、偏差電力 ΔP から ELD 用積分器で当日の予想ずれ負荷分を計算し、ELD 負荷の修正を行なったうえ各発電所の最経済出力を求め、これを中心として AFC を行なうよう考慮されている。

系統にステップ状の負荷急変が生じた場合、この負荷はまず過渡配分比率に従って AFC 発電所に吸収され、次にこれが定常配分比率にしたがうよう配分が移行し、さらに最終的には ELD で計算した最経済的な配分に落着くよう 3 段階の過程をたどって協調制御が行なわれる。

この制御方式においては定常状態では次式が成立する。

(基準出力=0、再配分調整器および ELD 用 PS は省略して考える。なお式中の文字については第 2 図参照)

$$-\Delta S = R - \sum_{r=1}^6 P_r \quad (1)$$

$$\Delta V_1 = k_1 \Delta V_{G1} + P_{E1} - P_1 \quad (2)$$

$$\Delta V_2 = k_2 \Delta V_{G1} + P_{E2} - P_2 \quad (3)$$

$$\Delta V_3 = k_3 \Delta V_{G1} + P_{E3} - P_3 \quad (4)$$

$$\Delta V_4 = k_4 \Delta V_{G1} + P_{E4} - P_4 \quad (5)$$

$$\Delta V_5 = k_5 \Delta V_{G2} + P_{E5} - P_5 \quad (6)$$

$$\Delta V_6 = k_6 \Delta V_{G2} + P_{E6} - P_6 \quad (7)$$

$$\Delta V_{G1} = -\Delta S + m_1 \left(\sum_{r=1}^6 \Delta V_r + \sum_{r=1}^6 P_r - \sum_{r=1}^6 P_{Er} \right) \quad (8)$$

$$\Delta V_{G2} = -\Delta S + m_2 \left(\sum_{r=1}^6 \Delta V_r + \sum_{r=1}^6 P_r - \sum_{r=1}^6 P_{Er} \right) \quad (9)$$

$$\Delta V_E = \Delta V_{G1} + \Delta V_{G2} \quad (10)$$

平衡状態では $\Delta V_r = 0$ 、 $\Delta V_E = 0$ となり、かつ

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1 \quad k_5 + k_6 = 1 \quad m_1 + m_2 = 1 \quad (11)$$

に選んであるので $\sum_{r=1}^6 P_r = R$ となり

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_{E1} \\ P_2 &= P_{E2} \\ P_3 &= P_{E3} \\ P_4 &= P_{E4} \\ P_5 &= P_{E5} \\ P_6 &= P_{E6} \\ \Delta V_{G1} &= \Delta V_{G2} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

が成立する。すなわち平衡状態では ΔS が 0 になり、しかも発電所出力 P_r は ELD で計算された出力 P_{Er} に等しくなる。換言すれば各発電所は最経済的な出力の近傍で AFC を行なう。

(3) 水位制御付 AFC

松尾川第 1、第 2 発電所や穴内川、新平山発電所では、それぞれの水系において容量の小さい調整池をはさんで二つの発電所がつながっているので、AFC 制御と並行して水位制御を行なう必要がある。

この水位制御には次の 2 種類がある。

(i) 上下流発電所の中間にある調整池の水位を常に一定(基準値)に保つ制御(A 方式)

調整池水位の基準値に対する偏差を ΔH とし AFC 制御信号を l とすれば、上下流両発電所の出力差を ΔP (上流発電所出力 - 下流発電所出力)としたとき上流発電所に対しては $(l + m \cdot \Delta p + n \cdot \Delta H)$ 下流発電所に対しては $(l - m \cdot \Delta p + n \cdot \Delta H)$ に比例した操作信号を送れば、調整池水位を常に一定に保ちながら AFC を行なうことができる。(ここに m, n は比例定数)

(ii) 上・下流発電所のそれぞれの下流にある各調整池の水位変化(有効水深に対する百分比変動)を常に等しくする制御(B 方式)

第 6 図のブロック図に示す回路で次の制御を行なう。

上流 PS に対する操作量

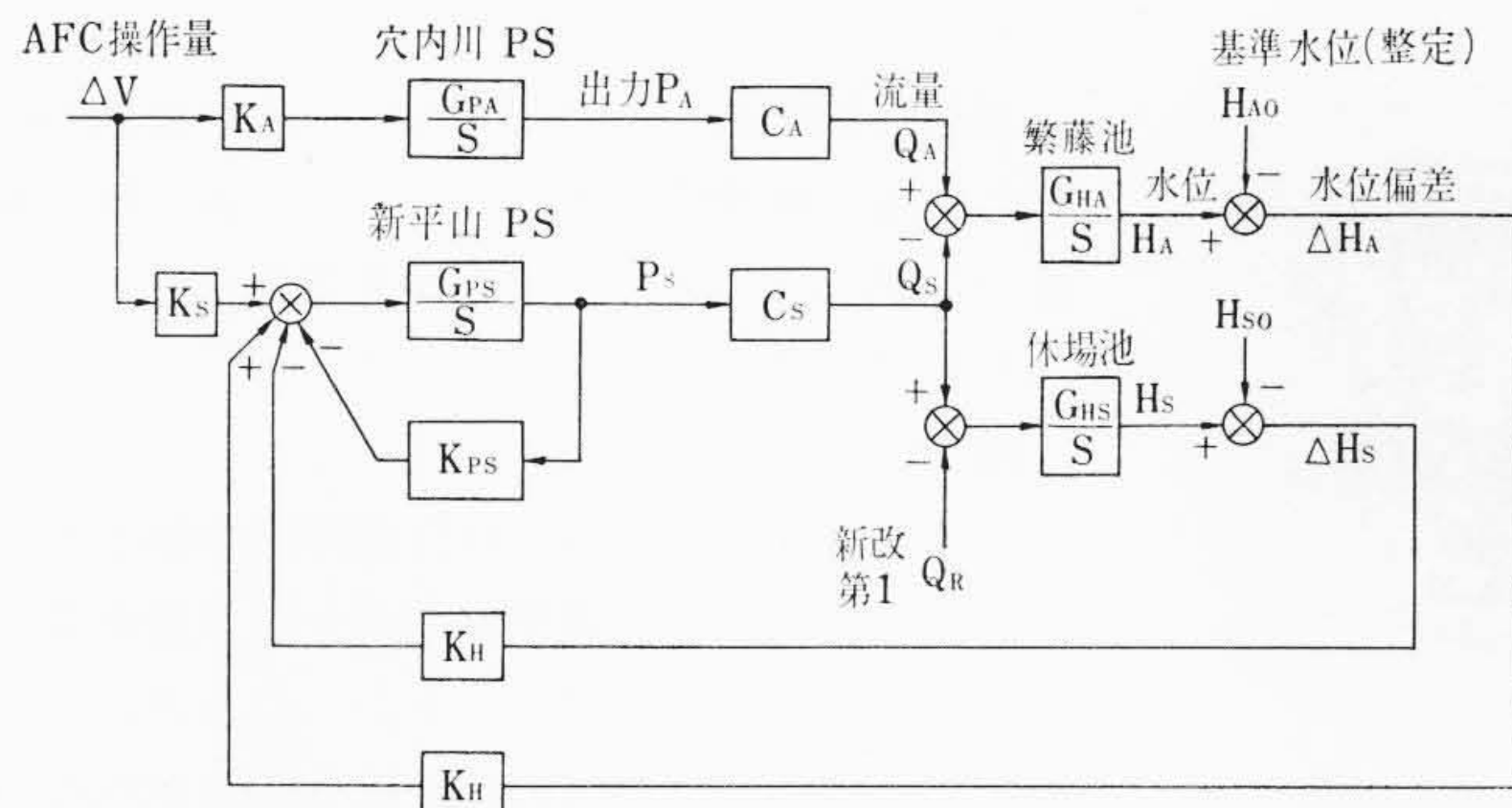
$$S_A = \Delta V \cdot \frac{K_A}{K_A + K_S}$$

下流 PS に対する操作量

$$S_S = \Delta V \cdot \frac{K_S}{K_A + K_S} + K_H \cdot \Delta H_A - K_H \cdot \Delta H_S - K_{PS} P_S$$

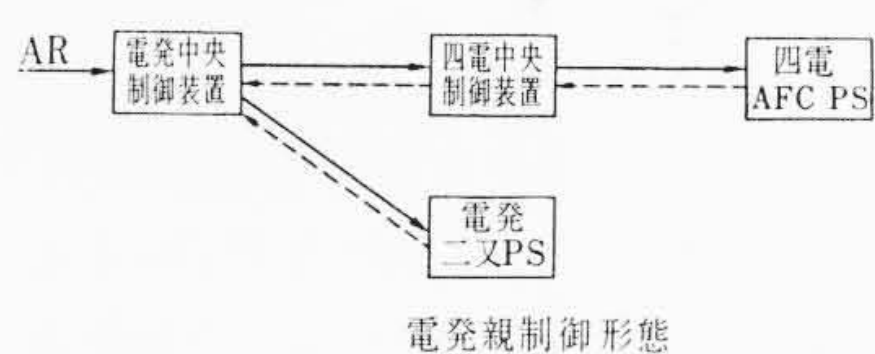
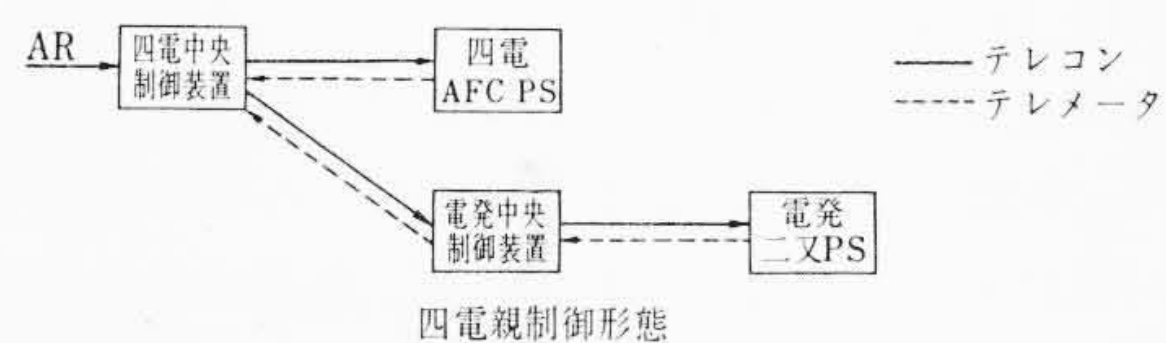
平衡状態では $\Delta V = 0$ $S_A = S_S = 0$ の条件より

$$\Delta H_A = \Delta H_S + \frac{K_{PS}}{K_H} \cdot P_S$$

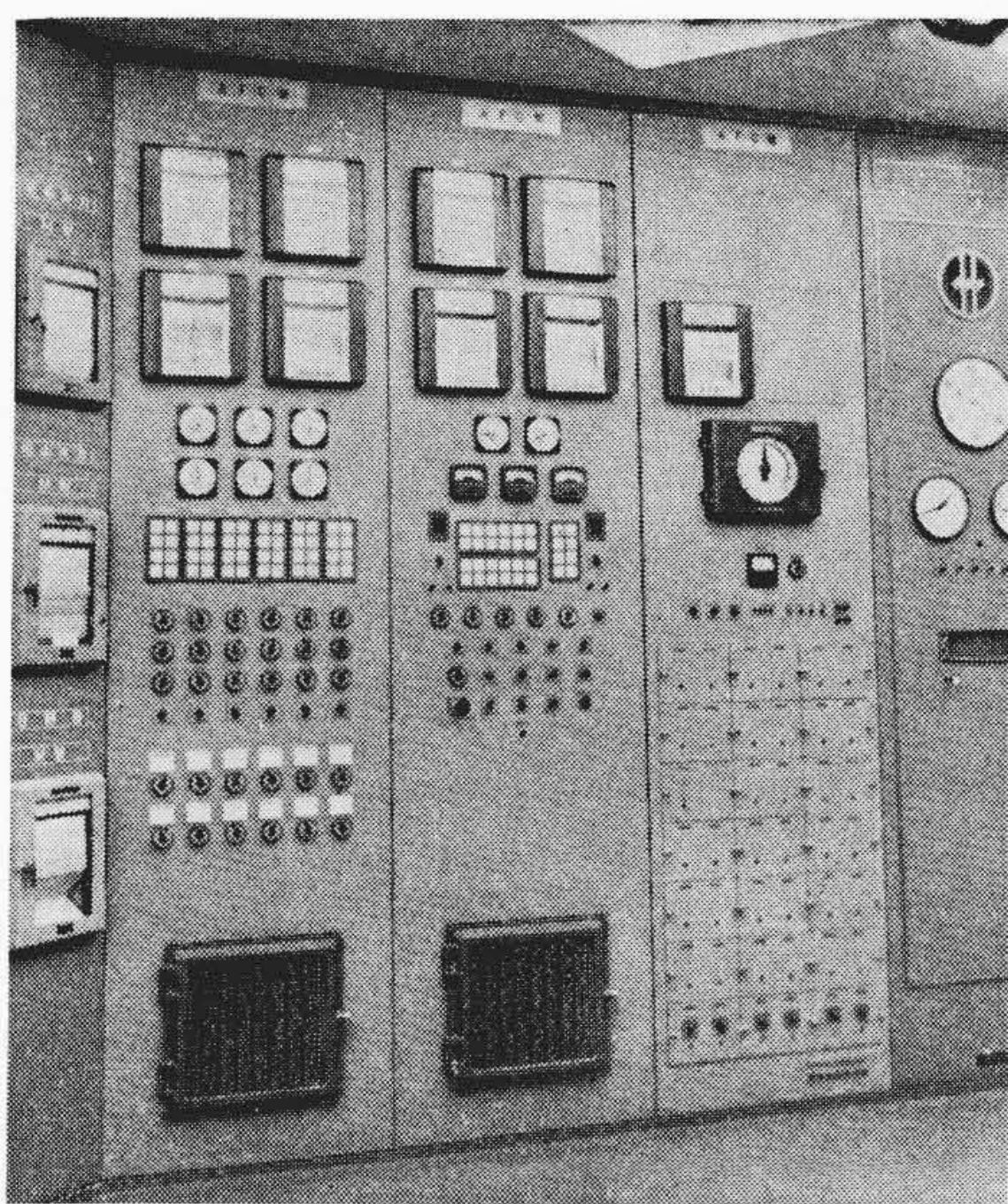


第6図 水位制御方式ブロック図

(上下流発電所の下にある各調整池の水位変化率を常にひとしくする制御—B方式)



第7図 四国系—電発系制御形態



第8図 中央給電司令所設置 AFC 装置

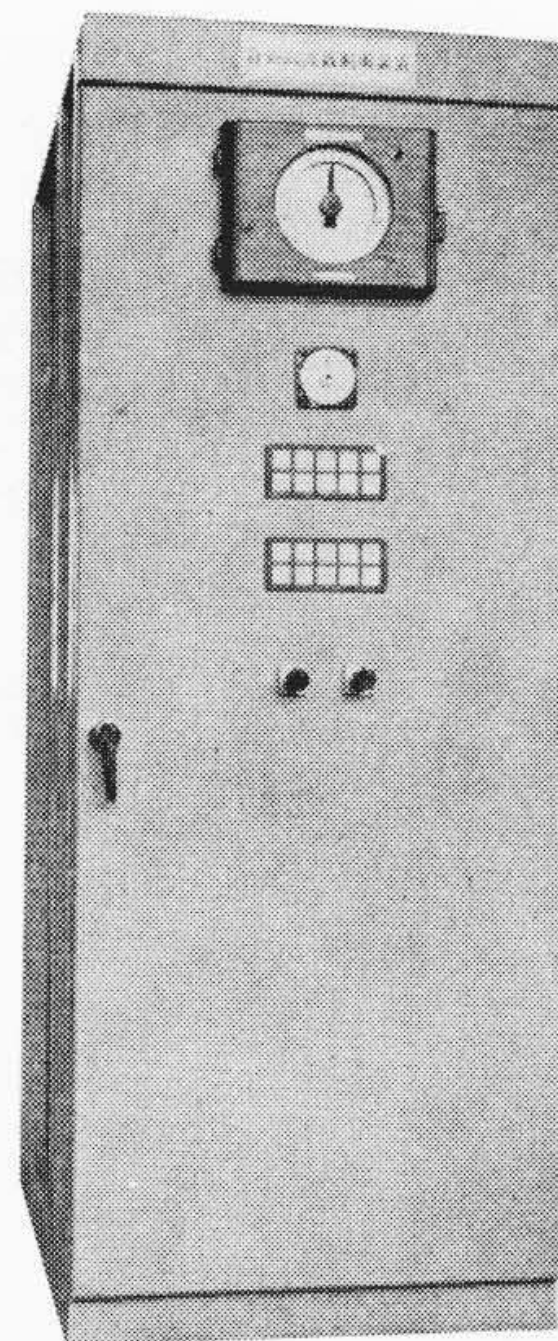
K_{PS}/K_{HS} を実用上無視できる程度の小さい値に選べば、中間および下流の両調整池の水位変化率をひとしくしながら両発電所で AFC を行なうことができる。

松尾川第1, 第2 PS ではA方式制御を行なっているが穴内川, 新平山 PS に対しては新改第1 PS (ローカルセンター) から遠方制御して A, B 両方式制御を自動的に切り換え実施できるようにしてある。(常時はA方式とし, なんらかの原因でその結果下流調整池水位が所定の制限バンド以外になれば, B方式に切り換わり制限バンドを回避する)。

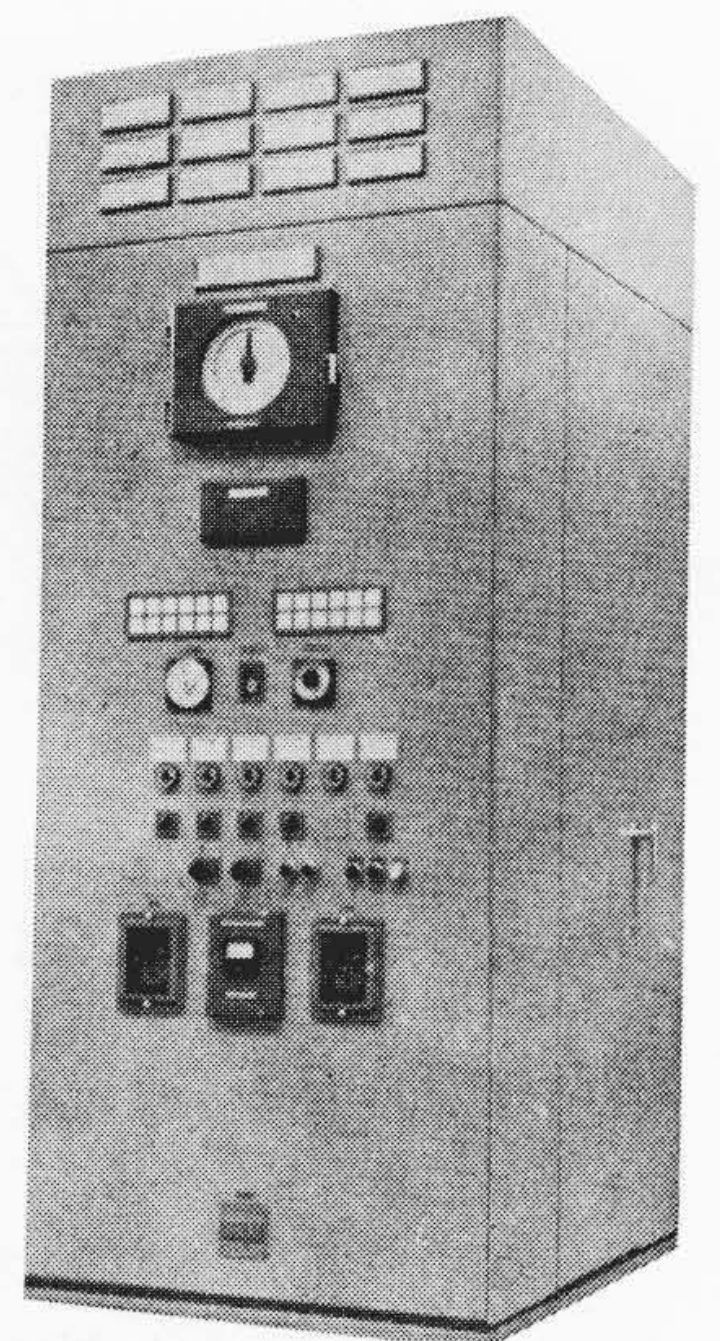
3. AFC 装置

四国電力系統の AFC は第1図に示したとおりである。

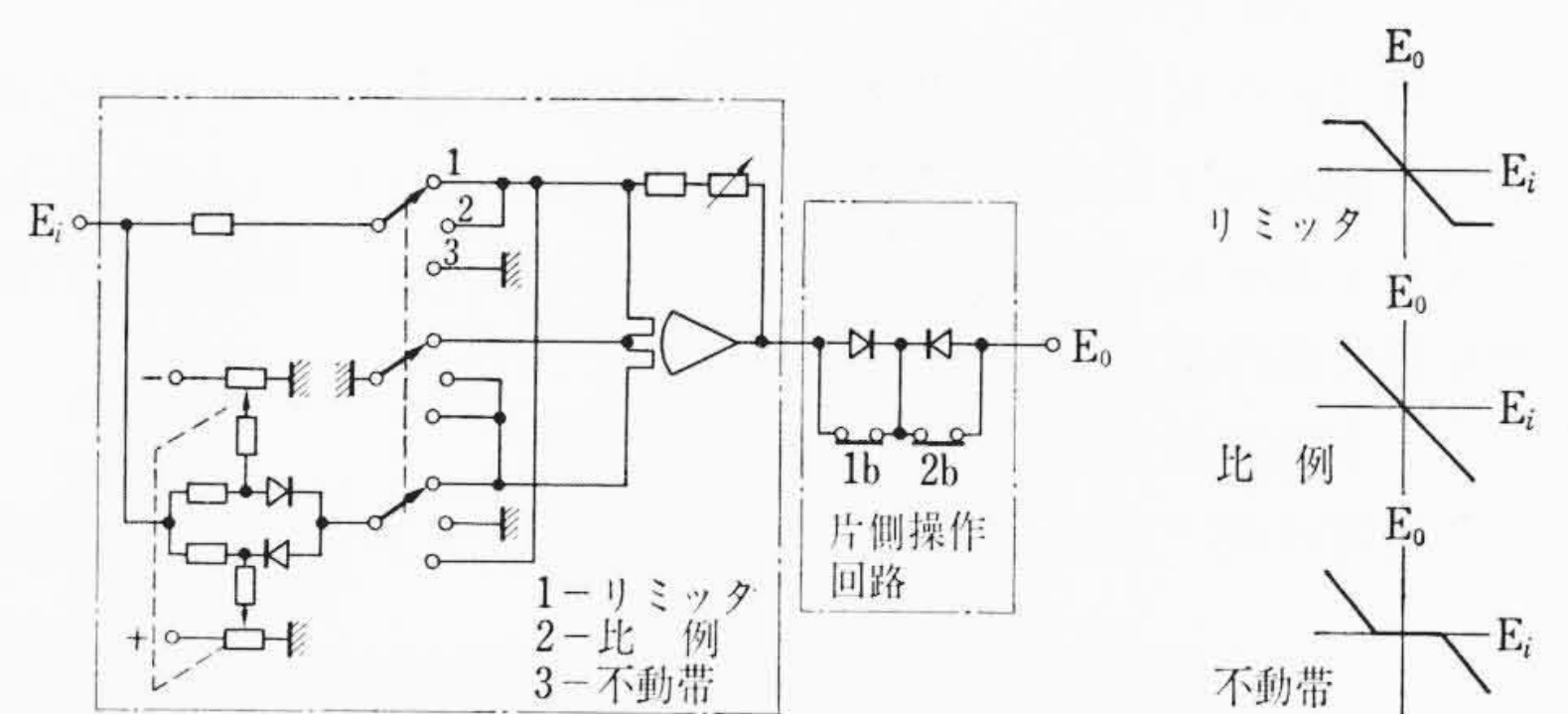
電源開発株式会社伊予変電所, 二又発電所における AFC 装置の運転開始により電発 AFC 装置と四国電力株式会社 AFC 装置は第7図のような制御形態で運用される。



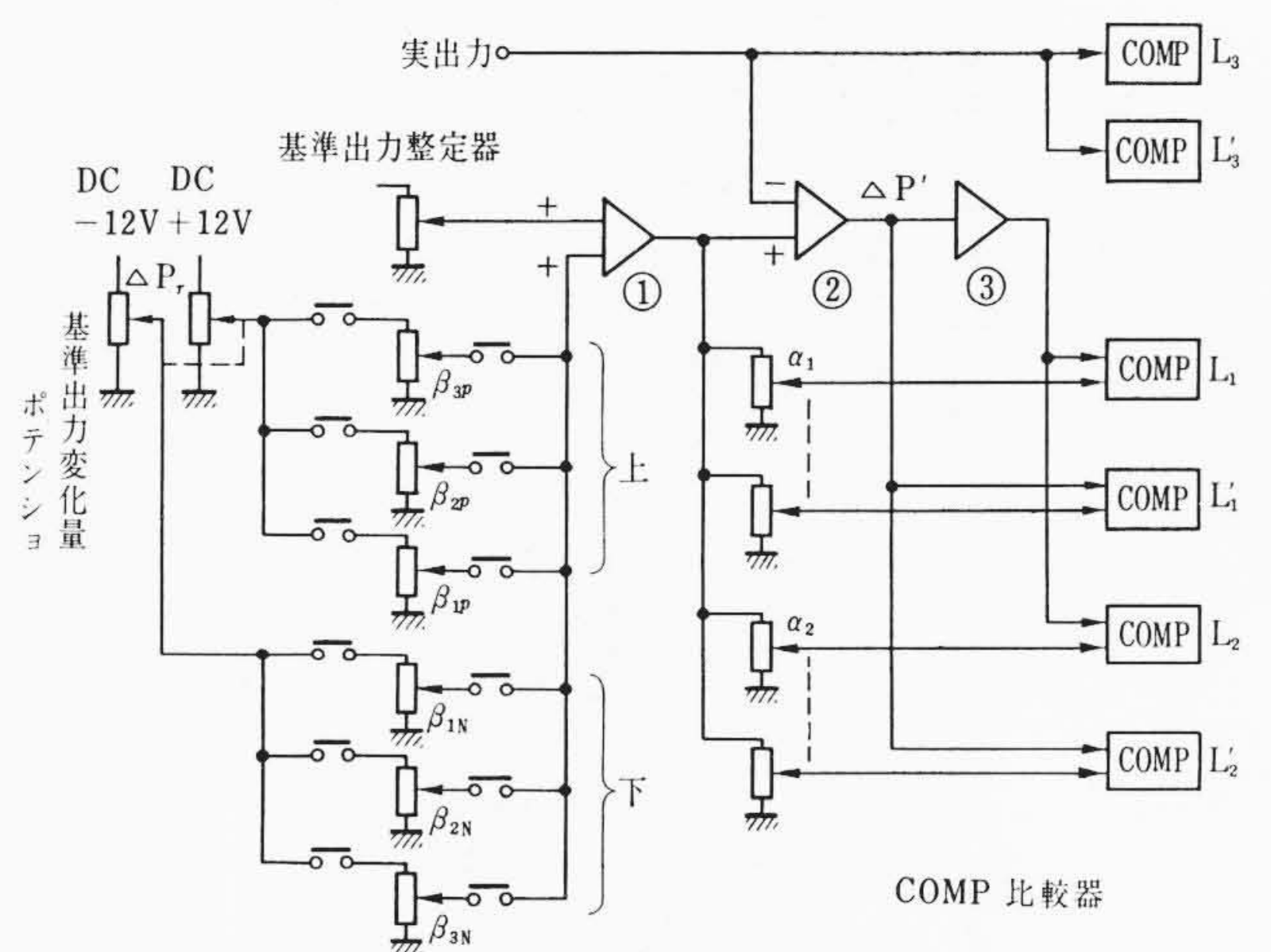
第9図 穴内川発電所(水力)設置制御装置



第10図 松山発電所(火力)設置装置



第11図 制限調整器

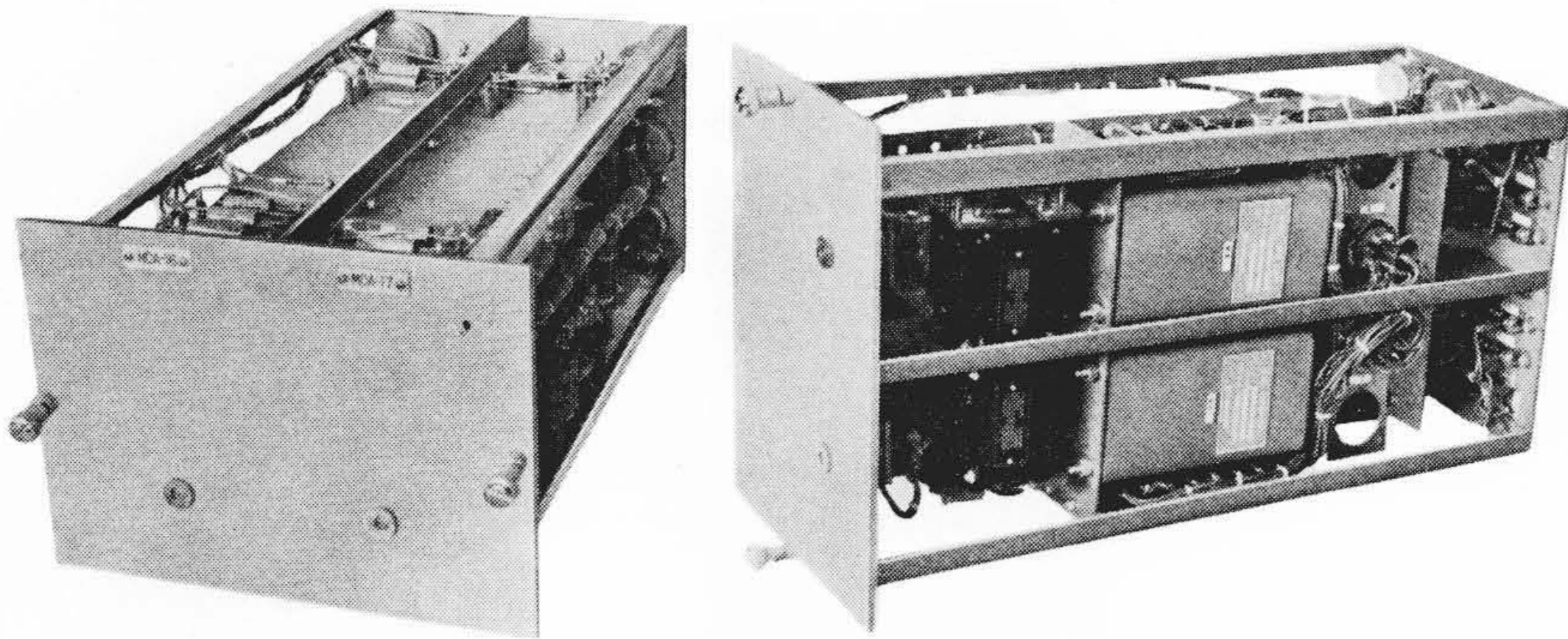


第12図 基準出力自動整定回路

第8図は中央給電指令所設置装置を示し, これには検出部および MOA, 記録計が収納されている。第9図は水力発電所制御装置の一例として穴内川発電所設置装置を示す。第10図は火力発電所制御装置の一例として松山発電所設置装置を示す。

本装置の製作に当たっては AFC および (AFC+ELD) 系について制御特性の検討を行なうとともに信号演算回路とくに本装置の特長である磁気演算増幅器についても種々検討を加えた。そのおもなものは次のとおりである。

- (1) 各種演算器について特性の確認とその向上策を検討した。
- (2) AFC 固有の演算を行なうための各種基本回路を開発した。



第13図 MOA ユニットの外觀

(3) 多数の MOA を簡便にチェックするためのチェック方式を確立した。

(4) MOA シャシの標準化を検討した。

これらの研究で得られた MOA 回路は第2図(中給側), 第4図(発電所側)に示すとおりである。

第2図についておもな回路を説明する。

(1) 比例配分回路

これは比例配分調整器出力電圧を群内各発電所向けに所定の比率で比例配分する回路である。 $k_1+k_2+k_3+k_4=1$, $k_5+k_6=1$ なる関係を満足しながら各発電所分担当が計算され, 配分出力計算器を経て操作量計算器へ送られる。

(2) 制限調整器

各発電所向け操作信号は適宜, 不動帯, リミッタ, または利得

調整要素を通して発電所へ送られる。

制限調整器は1台の MOA で上述3要素のいずれにも切換使用できるようにした信号修正装置で, 各対象 PS の応答特性や運用条件から所望の要素に選定して使用される。

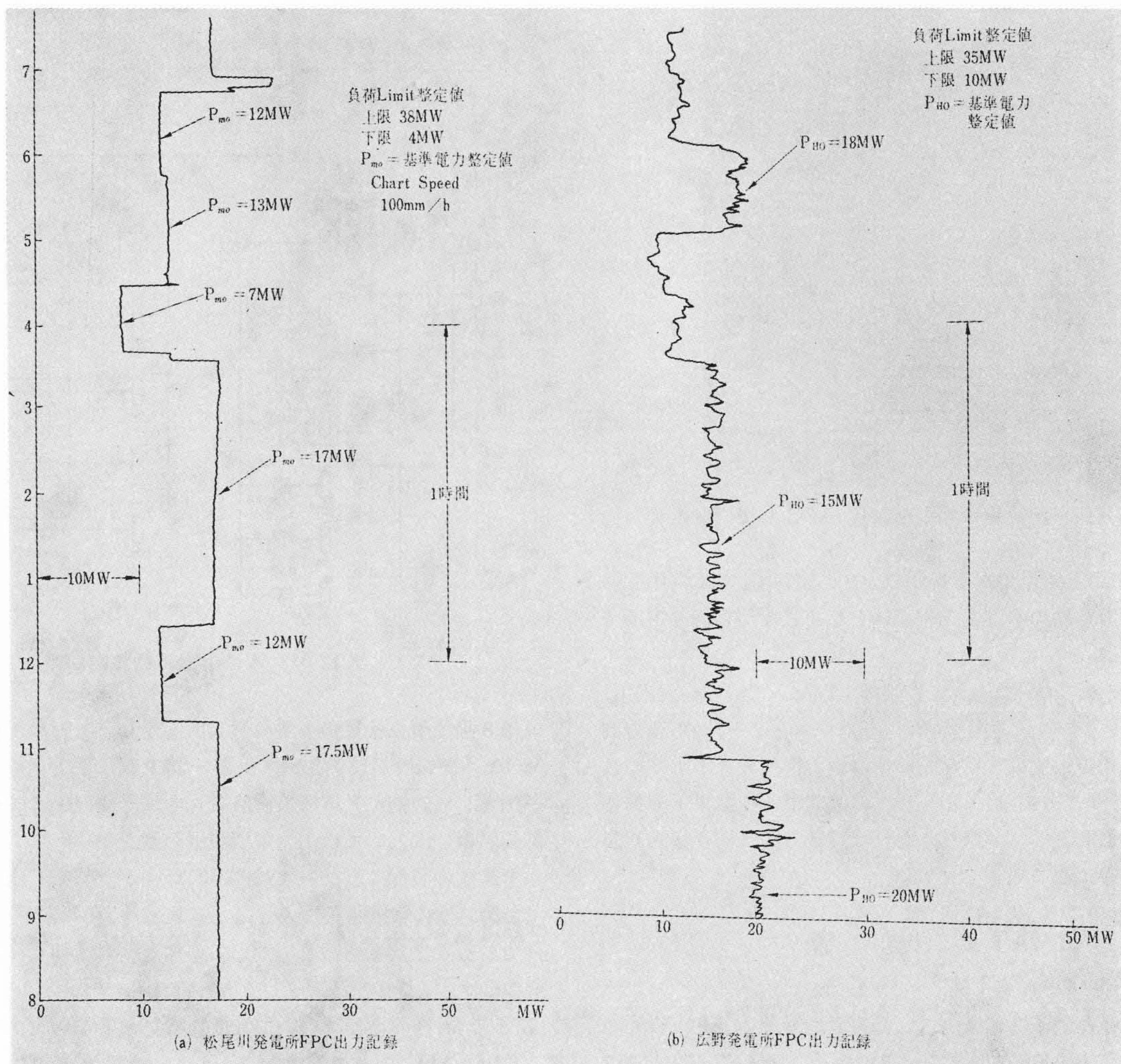
第11図はその詳細を示す。

制限調整器の出力端には片側操作回路を設けているが, これは発電所出力が上限(接点2b開)または下限(1b開)にかかったとき, それ以上の上げまたは下げ方向の操作量を送らないようにし, リミットから戻す方向の信号のみを通過させるようとするものである。

(3) 基準出力自動整定回路

第12図に基準出力自動整定回路を示す。この回路は第5図に示す L_1 , L_2 中間リミットの監視を行なうための回路で, 中給側および火力 PS にそれぞれ設けられている。基準出力の $\alpha_1\%$ (L_1 用) および $\alpha_2\%$ (L_2 用) の値と ΔP (実出力-基準出力) を比較してリミット L_1 (L_1') および L_2 (L_2') に達したか否かを検出する。

出力が L_1 (L_1') リミットにかかって t_r 時間(第3図参照)継続すれば, $\beta_{1P} \cdot \Delta P_r$ ($\beta_{1N} \cdot \Delta P_r$) だけ基準出力値を自動的に移動させる。この自動移動は手動で整定した基準出力 P_{i0} を中心として上方3段, 下方3段まで行なうことができるが, それぞれの移動量 ($\beta_{1P} \cdot \Delta P_r$, $\beta_{2P} \cdot \Delta P_r \dots \beta_{2N} \cdot \Delta P_r$, $\beta_{3N} \cdot \Delta P_r$) は個別に手動整定することができる。



第14図 FPC 試験結果

第1表 現地試験結果

試験種別	制御対象 PS		試験条件	試験結果
	水力系	火力系		
過渡応答試験	FPC	松尾川 PS 広野 PS	(1) 中給で松尾川 PS、広野 PS 基準電力整定器の整定値をそれぞれ次のように変化した。 20MW→35MW 35MW→20MW (2) 制限調整器は「比例」にした。	発電所出力は安定に変化し、松尾川 PS は約40秒、広野 PS は約30秒で定常状態に達している。
	FPC	松尾川 PS	(1) 基準電力整定器の整定値を 7 MW, 12 MW, 17 MW などに変化した。 (2) 制限調整器は「比例」にした。	発電所出力は整定値を中心に ±0.5 MW (定格出力の約±1.2%) 以内に収まっている。 (注) 松尾川 PS は機械式調速機
平常運転	FPC	広野 PS	(1) 基準電力整定器の整定値を 15MW, 18 MW, 20 MW などに変化した。 (2) 制限調整器は「比例」にした。	発電所出力は整定値を中心に ±2 MW (定格出力の約±5%) 以内に収まっている。 (注) 広野 PS は電気式調速機
	TBC 比例制御	松山 PS 新徳島 PS	(1) 中国—四国連系系統定数整定 6 MW/0.1 c/s 置換調整器時定数 30 秒 群内配分比率 松山:新徳島=1:2 基準電力整定 松山 PS 70MW 新徳島 PS 120MW	連系線電力偏差は ±10 MW ($1P_t$ テレメータフルスケールの20%) 以内周波数は 60.0±0.1 c/s 以内に収まっている。
試験	TBC 比例制御	広野 PS 松山 PS 新徳島 PS	(1) 中国—四国連系系統定数整定 6 MW/0.1 c/s 置換調整器時定数 群1:20 秒 群2:30 秒 群別定常比率 群1:群2=1:4 群2内配分比率 松山:新徳島=1:2 基準電力整定 広野 PS 15 MW 松山 PS 70 MW 新徳島 PS 120 MW	同上

(4) MOA 試験盤

試験盤のスイッチ操作で各 MOA の零バランスチェック、単体精度チェックなどを簡単に行なうことができる。また AFC 運転中に各 MOA の出力電圧をチェックできるようにしてある。

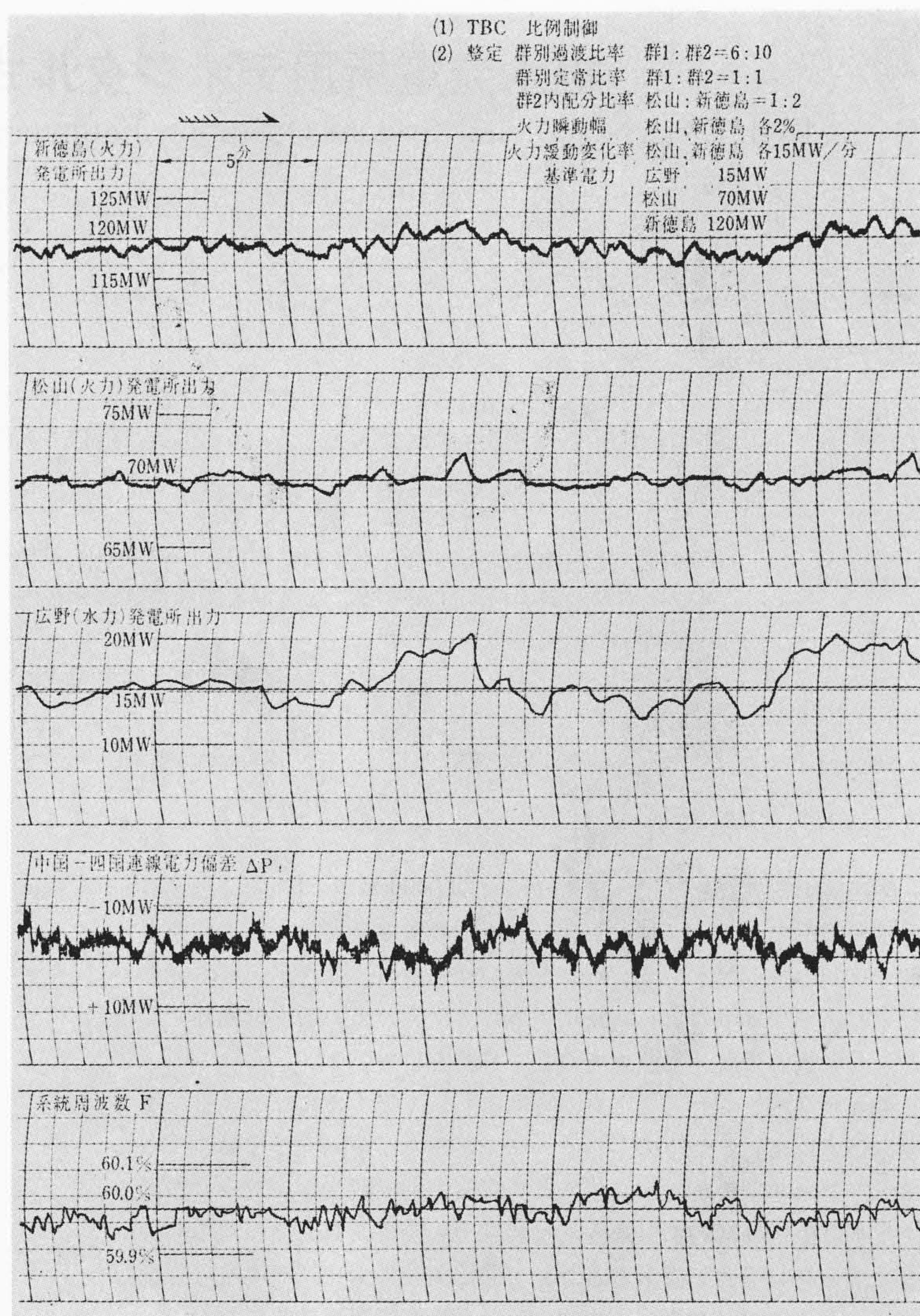
(5) MOA ユニット

第13図に MOA ユニットの外観を示す。寸法は幅 240×高さ 176×奥行 400 mm、重量は約 10kg で MOA 2 台が収納されている。

4. 現地試験

本装置は昭和38年1月から中国電力系統と連系して水力系単独の営業運転を開始したが、さらに昭和39年3月より火力系(松山 PS 新徳島 PS)も含めた協調運転にはいった。

この間数回にわたり現地試験を行なったが、その概要は第1表に示すとおりである。第14図は FPC 試験結果で、機械式調速機の松



第15図 AFC 運転記録

尾川 PS は ±0.5 MW、電気式調速機の広野 PS は ±2 MW にそれぞれ収まっている。

第15図は営業運転実績の一例で、周波数、連絡線電力ともに所望の 60±0.1 c/s 以内、±10 MW 以内にはいっていることがわかる。

なお穴内川系水位制御は昭和39年3月制御装置を納入し8月現地試験実施の予定である。

5. 結 言

磁気演算増幅器形 AFC 装置の完成により制御装置の信頼度が一段と向上した。また水・火力の協調により AFC 調整容量が増大されるとともに、AFC と ELD の協調についても満足すべき性能を得た。これにより今後実施が予定されている ELD 当日制御、水系制御などの大規模な計算制御装置にたいして、明るい技術的見通しをうることができた。最新の課題を解決した本装置の活躍が大いに期待される。

本装置の完成まで多大のご指導とご協力をいただいたの関係各位に厚くお礼を申し上げますとともに今後ともいっそうのご協力をお願いする次第である。