

再熱蒸気タービン用電子油圧式ガバナ

Electro-hydraulic Governor for Large Reheat Steam Turbine

内山 好弘*
Yoshihiro Uchiyama

安元 昭寛**
Akihiro Yasumoto

岸上 孝***
Takashi Kishigami

要 旨

複雑、高度化する蒸気タービンプラントの制御システムとして、従来の機械式ガバナに代わって電子油圧式ガバナが開発され、すでに実用化の段階に達した。昭和発電株式会社市原火力第5号機 75,000 kW 再熱タービンは、再熱タービンとしてはわが国で初めて電子油圧式ガバナを採用しており、官庁試験を終了して営業運転を開始した。本報ではこの電子油圧式ガバナの構成、機能について紹介し、あわせて良好な運転性能と電子油圧式ガバナの利点について述べる。

1. 緒 言

わが国における火力発電の技術は年を追って進歩し、効率向上を目ざしたプラントの大容量化、蒸気条件の高温高压化は目をみはるものがある。すなわち 600,000 kW 超臨界圧タービンが稼働し、原子力大容量タービンが国産化される段階に達している。

これに伴い火力発電プラントの制御システムはますます複雑化し、高度な制御、運転、監視が要求されるようになっている。大容量再熱タービンの制御系には増大した電力系統網からの時々刻々の要求に対し、早くしかも精度の良い応答をすること、タービンプラントに対しては、種々な状況に応じて安全かつ効率のよい運転を維持すること、起動、停止の過程で安全かつスムーズな自動運転が行ないうることなどが要求されるようになった。

これらの要求を具体的に列記すると次のようになる。

- (1) 周波数変化に対して出力が線形であること。
- (2) 負荷しゃ断時に急速に弁を締め速度上昇を押えうること。
- (3) 計算機をはじめとして外部からの信号を容易に受け取りうること。
- (4) 出力の変化幅、変化率の制限、ボイラプラントの状況に応じた出力制限など、より複雑な安全上の処置を容易に行ないうること。
- (5) 调速機の特性をプラントの特性に従って容易に調整、補償しうること。
- (6) 出力、周波数の設定が広範囲に容易で起動、停止がしやすいこと。
- (7) 制御装置、駆動装置が小形になること。
- (8) 作動油漏れによる火災の危険がないこと。

これらの要求にこたえるために開発されたのが、アナログ方式を主体とした電子油圧式ガバナ (Electro-Hydraulic Governor) あるいはより広い意味で電子油圧式制御装置 (Electro-Hydraulic Control System) といわれるものである(以下本文では EHG と略す)。

EHG は海外では 1960 年代の初めから GE 社 (アメリカ)、WH 社 (アメリカ)、Siemens 社 (西ドイツ) などにおいて開発が始まり、現在まで電力事業用の大容量タービン、産業用タービンに対し、ともに数多くの製品化が報告されている。

日立製作所ではこのような状況にかんがみ、早くから研究開発に着手し、すでに産業用タービンに対しては 3,600 kW 抽気背圧タービン(昭和電工株式会社横浜工場)、28,000 kW 2 段抽気復水タービ

ン(鶴崎共同動力株式会社鶴崎発電所 1 号機)⁽¹⁾へ実装し、ともに 1 年以上にわたる連続運転の実績を得たのを手はじめに、各種産業用タービンの EHG の受注、製品化をすすめてきた。

一方、事業用タービンに関しては再熱タービン EHG の模擬試験装置を製作、制御機能、機器単体特性、制御特性、耐久性などについて長期の試験検討を行ない、その成果を生かして、1969 年末、昭和発電市原火力 75,000 kW 再熱タービンに再熱タービンとしてわが国で初めて EHG を実装し、試運転、官庁試験を経て営業運転を開始した⁽²⁾。

本報では 75,000 kW 再熱タービン EHG の概要を述べ、あわせて運転結果を紹介する。

2. 再熱蒸気タービン電子油圧式ガバナの構成

2.1 構成要素

EHG は大略次の部分から構成されている。

- (1) 検 出 部
- (2) 演 算 部
- (3) 弁 駆 動 部
- (4) 運 転 操 作 部
- (5) 高圧油圧ユニット

演算部はトランジスタ直流増幅器を主体として構成される電子演算回路であって、検出部より送られてくるタービンの出力、負荷、周波数に相当する電気信号を受け入れ、必要な演算を行なって弁駆動部への指令信号を送り出す。この指令信号に従い、弁駆動部は高圧油圧ユニットから送り出される油の力を利用して、タービンの蒸気弁を動作させる。タービンの起動、速度、出力の設定や監視は運転操作部のダイヤル、スイッチ各種指示計によって行なわれる。

図 1 は EHG のこれらの構成要素をまとめ系統図に表わしたものである。

2.2 検 出 部

蒸気タービンの制御に必要な検出量としては、タービンの回転数、蒸気圧力、発電機出力、各蒸気弁の開度がある。図 2 は速度検出器の構成を示したものである。速度の検出器には、回転数に対する出力電圧の直線性や検出範囲などの特性のほか、信頼性が特に強く要求される。そのため機械的な接触部を回避した無接触形のピックアップを採用した。タービンロータに近接したピックアップにより、ロータ回転数をそれに比例した数のパルス信号として取り出し、これを D-A 変換器で直流電圧に変える。検出範囲は非常に広く、低速からの起動制御も可能である。検出を 2 チャンネル式にし、一方が故障しても支障なく運転が継続されるようにしてある。

2.3 演 算 部

図 3 は演算部の回路系統を示したもので、図 4 に示すような EHG

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所大みか工場

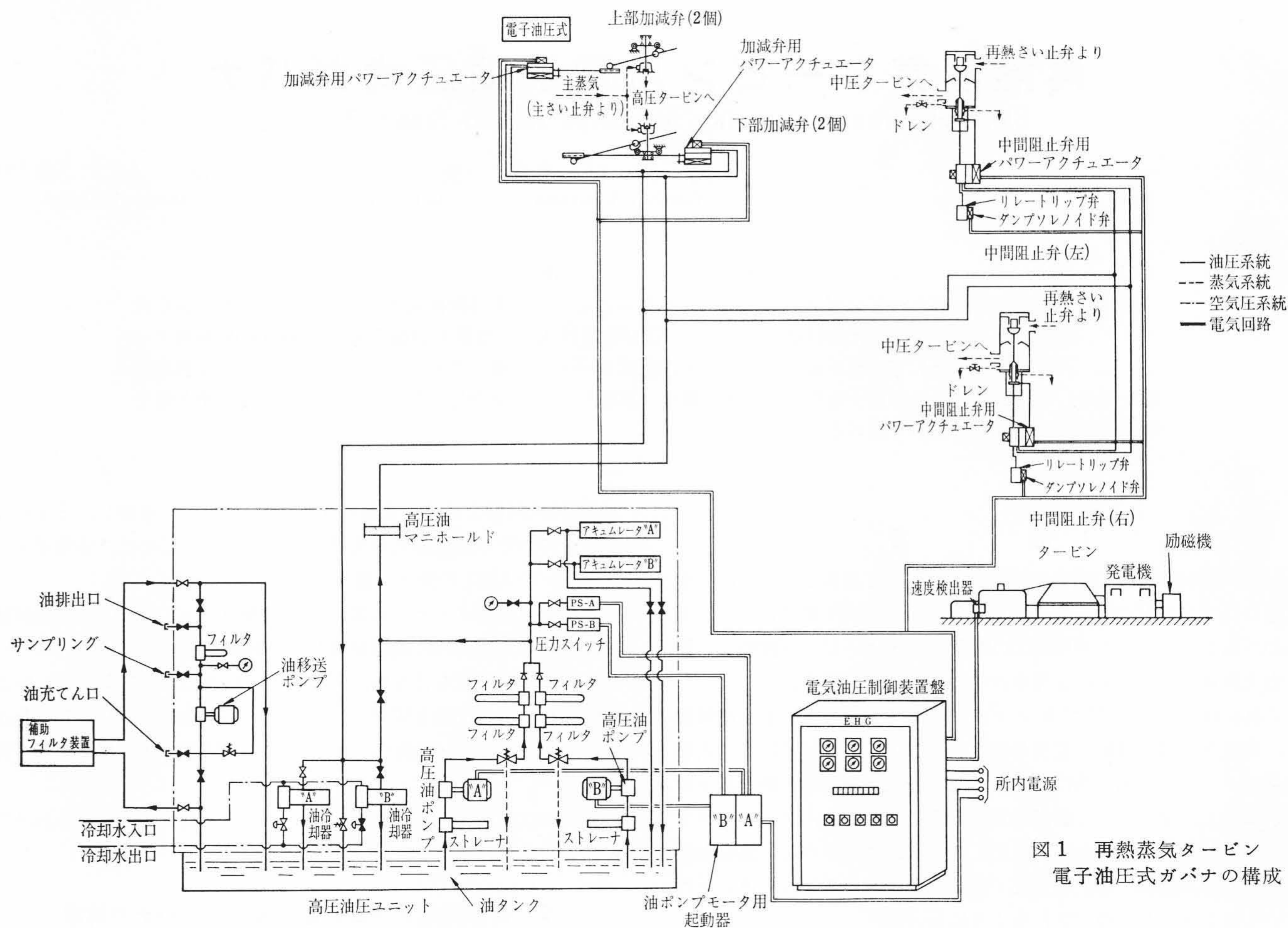


図1 再熱蒸気タービン電子油圧式ガバナの構成

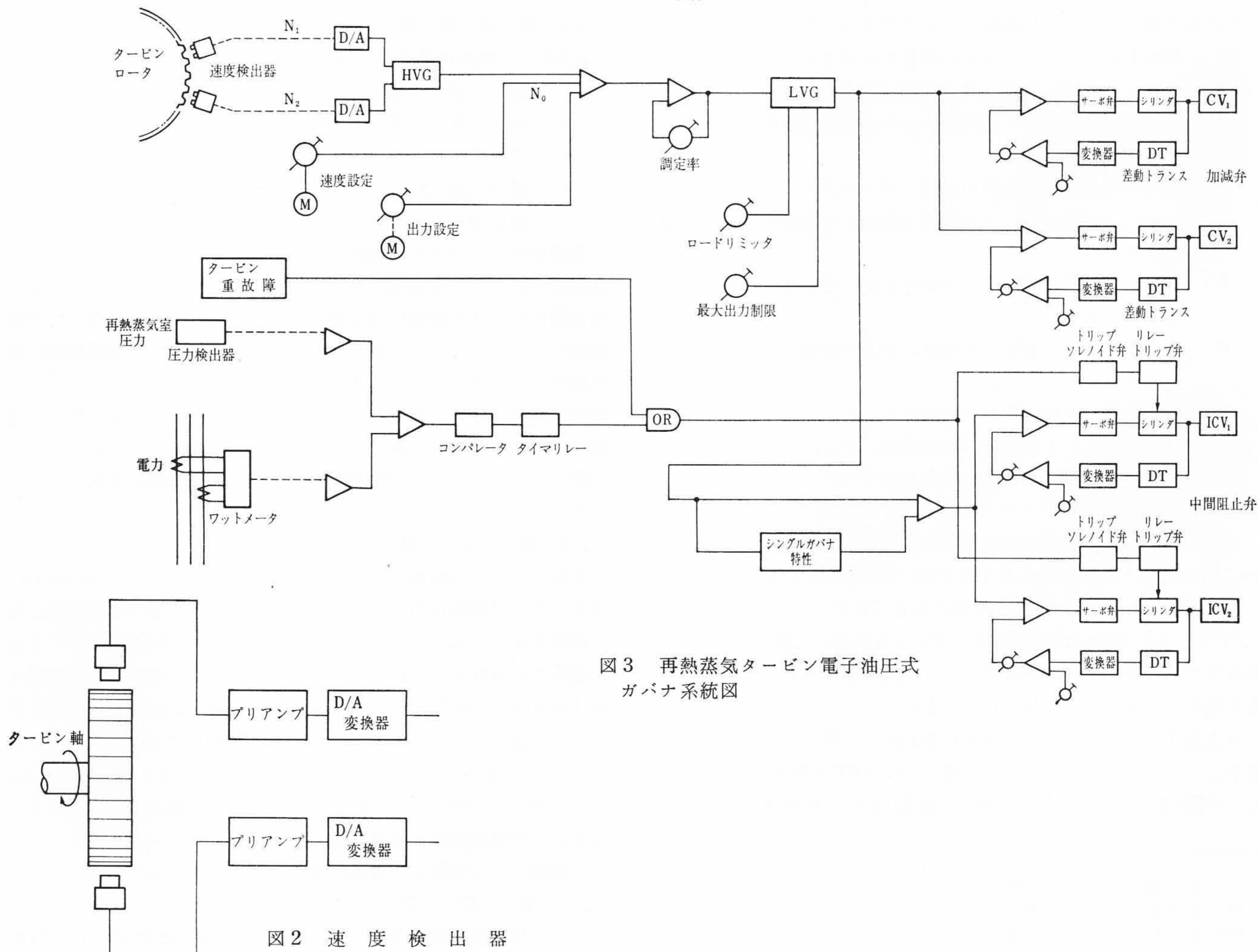


図3 再熱蒸気タービン電子油圧式ガバナ系統図

図2 速度検出器

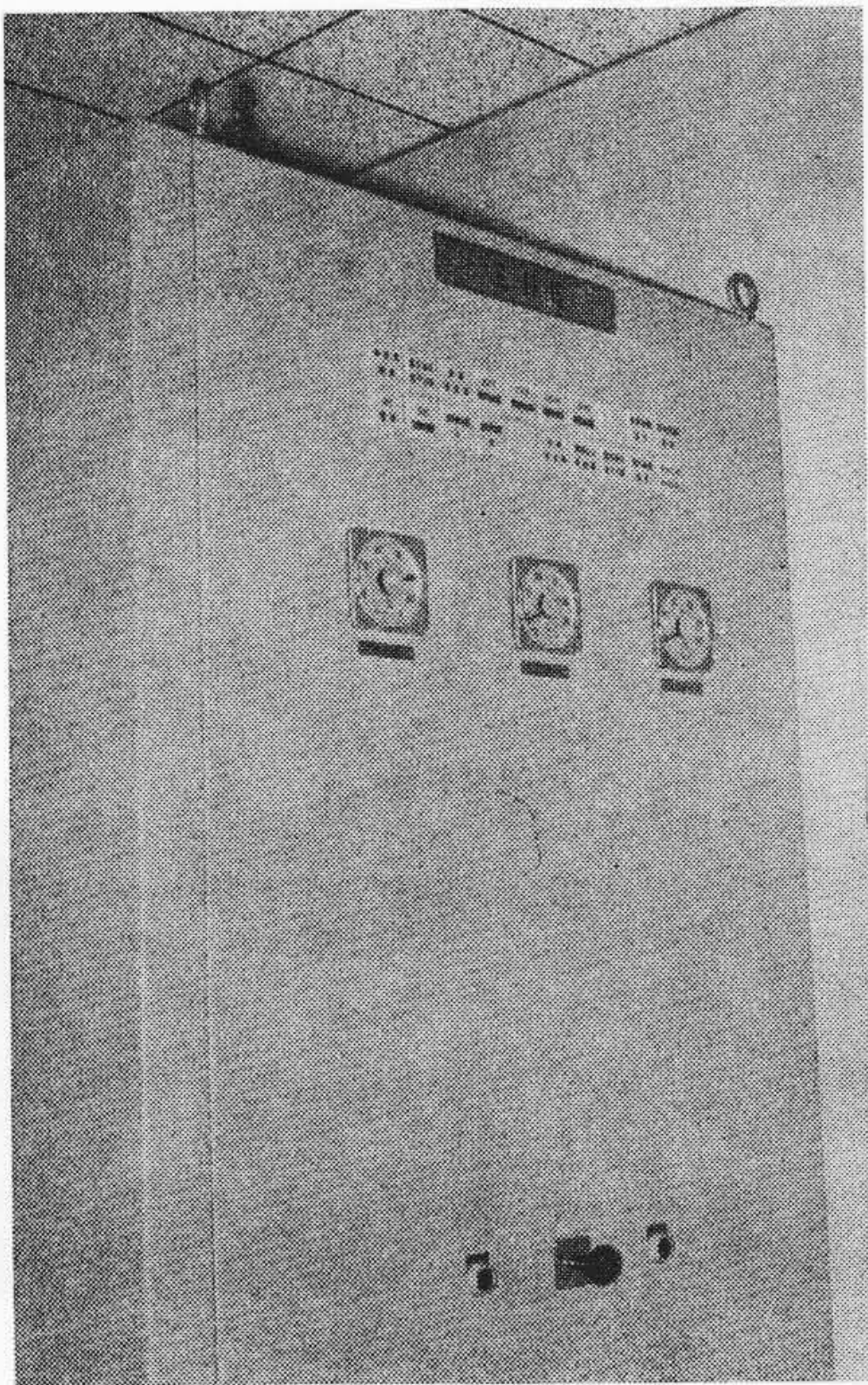


図4 75,000 kW 再熱タービン EHG 盤

盤内に組み込まれている。図3の三角のシンボルで示されるトランジスタ直流増幅器を主体として構成されており、タービンから送られてくるロータ速度や蒸気圧力に相当する電気信号を内部で演算し、操作信号を作って弁駆動部へ送る。以下EHGの持つ制御機能により演算部の構成を説明する。

2.3.1 調速負荷運転

上述した2チャンネルの速度検出器からは、それぞれタービンロータ速度に比例した直流電圧信号 N_1, N_2 が送られてくる。この信号のうち、速度の大きいほうの信号を最大値選択回路 (HVG) で選び、それと運転操作部で与えられる目標速度信号 N_0 とを比較し、速度偏差信号 ΔN を演算する。 ΔN には出力設定器からの信号が加算され、速度調定率に従って倍率でこれを増幅する。その後最小値選択回路 (LVG) を通し弁開度を設定する信号とする。

2.3.2 負荷制限運転

ロードリミッタのダイヤルでセットされた負荷信号電圧を前述のLVG回路に与える。LVGはここへはいる信号の最小値を優先通過させる回路で、ロードリミッタからの信号を調速負荷信号より小さくすることによって優先させ、電力系統の周波数変動に無関係に弁の開度を定めることができる。LVGにはこのほかに最大出力制限の信号が印加されている。

2.3.3 過速防止

この場合の過速とは、おもに負荷しゃ断に原因するロータ速度の異常上昇である。再熱タービンでは加減弁が閉じても容量の大きな再熱器内に蓄積された蒸気がロータを加速するため、できるだけ早く中間阻止弁を閉じてやる必要がある。EHGはこの要求を満たすものとして

(a) シングルガバナ特性、(b) パワーロードアンバランスリレーの二つの装置を併用している。シングルガバナ特性はロータの回転加速度が一定値以上になると過渡的に中間阻止弁を急閉させるようにしたものである。

またパワーロードアンバランスリレーはロータ過速の原因となる出力(再熱蒸気圧力)と負荷(電力)の差が一定値以上になった場合に中間阻止弁を調速制御ループ外から先行的に急閉させるようにしたものである。以下、図3によってその構成を説明する。

(1) シングルガバナ特性

シングルガバナ特性を持たせた回路は速度の偏差の信号に対

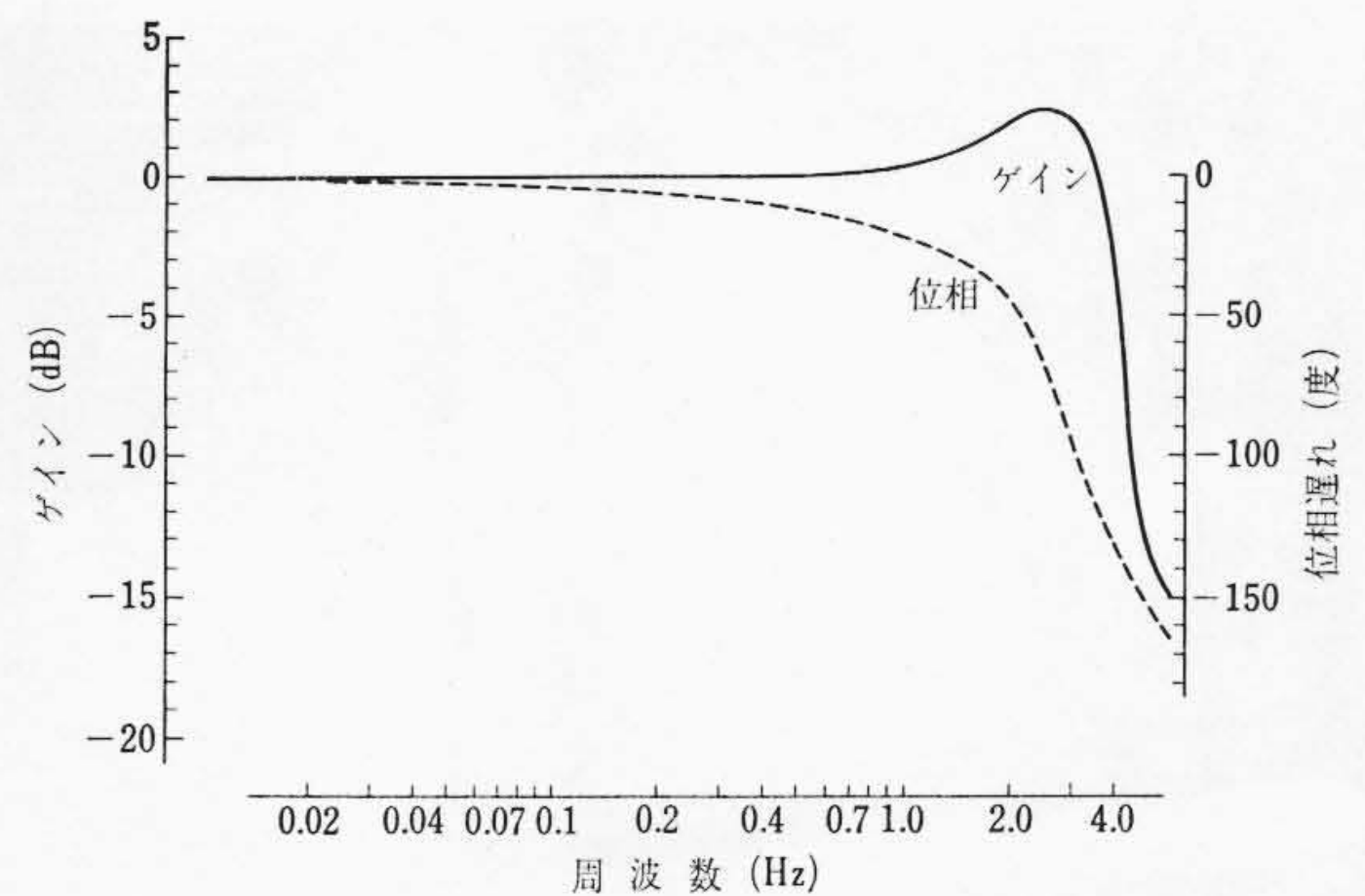


図5 加減弁駆動部の周波数特性

して、

- (a) 危急時のみ過渡的に弁閉信号を出す回路
- (b) 速度偏差量に従って静的に弁閉信号を出す回路

の二つに分けることができる。このうち(a)は次の部分から構成されている。

- (i) 過渡的に弁閉信号を発生させる負荷範囲を制限する回路
- (ii) 速度偏差信号を微分して加速度を出す回路
- (iii) 加速度が一定値以上にならないと弁閉信号を出さないよう制限する回路
- (iv) 発生した弁急閉信号を徐々に取り除くための回路

この(a)、(b)の信号を加算し、中間阻止弁を操作する信号とする。中間阻止弁は平常運転時には加減弁の開度よりも常に開いた状態にあるか、全開しており、タービンへの流入蒸気流量の調整はもっぱら加減弁が行なう。しかし負荷しゃ断時には中間阻止弁が加減弁より過渡的に早く閉じ、再熱器からの蒸気をしゃ断する。

発電機出力と中間阻止弁出口の蒸気圧力は平常運転では等価的にはほぼ等しい。しかるに負荷しゃ断などで電力負荷が瞬時なくなると蒸気圧力だけが残る、これがタービンロータ過速の原因となる。パワーロードアンバランスリレーはこの負荷と蒸気圧の差があらかじめ定められた一定値以上に大きくなったとき、調速系の作動に先行して中間阻止弁を急閉させるものである。図3に示したように電力負荷、蒸気圧力をそれぞれアナログ信号として検出監視し、上記条件が成立するとコンパレータが作動してダンブソレノイド弁を励磁する。

その結果リレートリップ弁、続いて中間阻止弁油圧シリンダの油圧がドレンされ、バネの力で中間阻止弁が急閉する。中間阻止弁急閉後調速系から弁閉信号が確認されるまでの間、タイマの働きによりリレーを復帰させない。

2.4 弁駆動部

図3には演算部からの弁開度指令信号によって弁の開閉を行なう弁駆動部を示してある。指令信号は電力増幅器で増幅され、リード線によって弁油圧シリンダに設置されているサーボ弁へ送信される。

サーボ弁では信号電流がスプールのストロークに変換され、油圧シリンダへの油の流量を調整してピストンをストロークさせる。油圧シリンダには差動トランスが直結され、ストロークを電気信号に変換しフィードバックして、開度信号に対する弁の定位化を図っている。

図5は弁開度指令に対する油圧シリンダストロークの周波数特性を示したもので、1 Hzの指令入力に対してもじゅうぶん良好な応答を示している。

中間阻止弁油圧シリンダはシングルアクションで、バネの力に抗して弁をあける構造である。

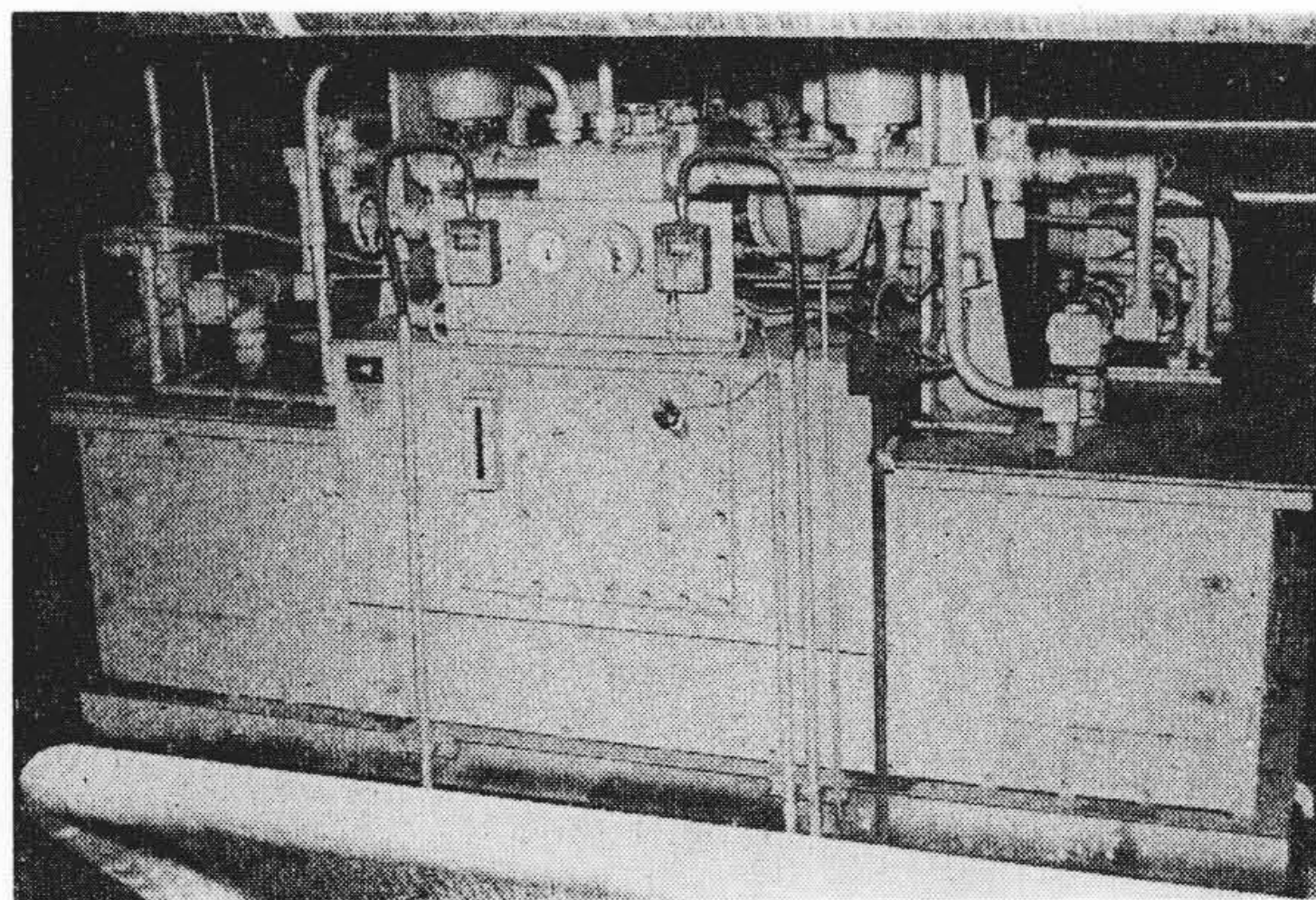


図6 高圧油圧ユニット

2.5 高圧油圧ユニット⁽³⁾

図3中に高圧油圧ユニットの系統図を示した。また図6はその外観である。

高圧油圧ユニットは大きく二つの部分に分けられる。弁駆動のための高圧油圧源と、油の浄化系である。そのおもな構成要素は、

- (1) 油タンク (1基)
- (2) 高圧ポンプ (2基)
- (3) オイルクーラ (2基)
- (4) エアドライヤ
- (5) ピストン形アキュムレータ
- (6) スペースヒータ
- (7) 油移送フィルタ装置
- (8) アースフィルタ装置

油タンク内の圧油はサクシオンフィルタを通過してプランジャポンプに吸い込まれ、吐出圧 112 kg/cm^2 で高圧ラインに送られる。ポンプには負荷変動に従って吐出量を調整し、油圧を一定に保つ圧力調整器が内蔵されている。高圧油はリリーフ弁、一次、二次フィルタを通過して高圧マニホールドから各弁のサーボ弁およびシリンダへ送られる。ポンプ吐出量を補い、油圧の振動を吸収するため2基のアキュムレータが設置されている。戻り油はクーラを通り冷却され、油タンクへ戻される。高圧主系統は全く同じものが2系列あり、運転中は一方が予備で休止し、ポンプ吐出圧が規定値以下になったとき自動起動される。

油の浄化系には2種のフィルタ装置があり、一定の周期で交互に運転し、油の浄化を図っている。その一つは油タンクへの油の入出装を兼ねた油移送装置であり、もう一つは酸化アルミを主体としたアースフィルタ装置である。アースフィルタは油中夾雑(きょうざつ)物のほかに化学的な活性をも除去し、油による腐食、浸食を防止する。

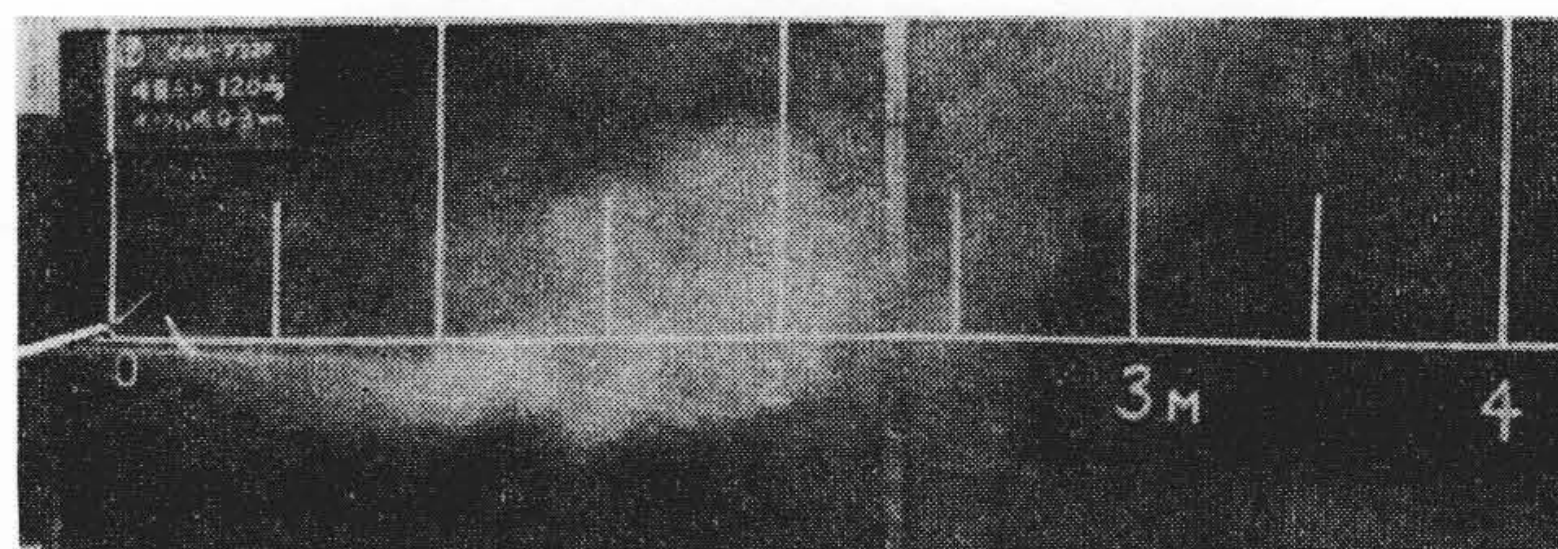
油中への水分の混入を防止するため、油面の変動に伴うタンク内への空気の入出は乾燥剤入りのエアドライヤを通して行なわれる。また起動時や外気の変化の大きい所ではスペースヒータで油温のコントロールが行なわれる。

高圧油圧ユニットの従来機器と異なる点をあげると次の点である。

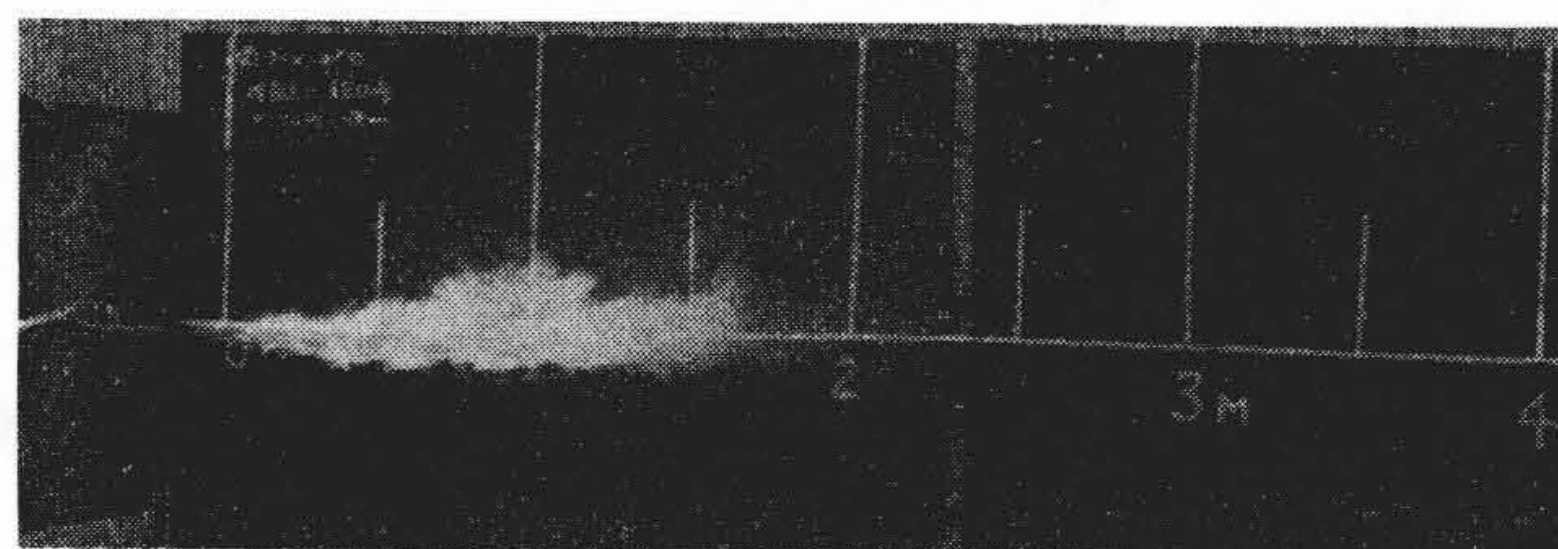
- (1) 応答の速さと油圧機器の小形化を目的として、制御油圧は従来の $10 \sim 14 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ から、約10倍の $112 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ に高圧化されている。
- (2) 作動油は火災の危険をなくするため、自然発火点が主蒸気温度より高いストレートリン酸エステル油を採用した。
- (3) 油圧系をタービン軸受潤滑油系と別にした。

表1 油圧油性状比較

項 目	タービン油	難燃性油
組 成	鉱 物 油	ストレート リン酸エステル
比 重 (15.5/15.5°C)	0.86	1,146
粘 度 (SUS)	155	223
自然発火点 (°C)	390	638
引 火 点 (°C)	200	260
発 火 点 (°C)	250	370
酸 化 (mg KOH/g)	0.1	0.02



(a) ストレートリン酸エステル



(b) タービン油

図7 高圧噴霧燃焼試験

2.6 油圧油の難燃性

油圧油としては潤滑性が良く添加物が含まれていない難燃性のストレートリン酸エステルを採用した。この油は比較的高価であるうえに、パッキン類などの使用材質に注意を払わなければならないが、耐性試験により、シリコンゴム、ブチルゴムおよびフッ素ゴム系統の材質を採用すればよいことを確認した。またタービン油に比べて金属機器に対するさび止め性は劣り、特に水分の存在下では深いさびを生じる傾向があることがわかったので、配管、タンク内面などの材質の選択と油の管理に特に注意を払った。表1は主要な性状をタービン油と比較し示したものである。

油の難燃性については、万一の高圧油系統の破裂事故により、油が噴霧されたときの燃えにくさを具体的に明らかにするため、アメリカ規格 (AMS 3150 B) に準じて高圧噴霧燃焼試験を実施した。比較資料として表1に示したタービン油を使用した。試験結果を示したのが図7である。

ストレートリン酸エステル油の場合には炎は点火トーチのごく近くに限られ、3.5 m の付近まで広がっているのは噴霧である。タービン油の場合、1.5 m の付近まで大きな火炎につつまれ、これに比較するとストレートリン酸エステル油がいかに難燃性であるかがわかる。

2.7 電子油圧式ガバナと機械油圧式ガバナの比較

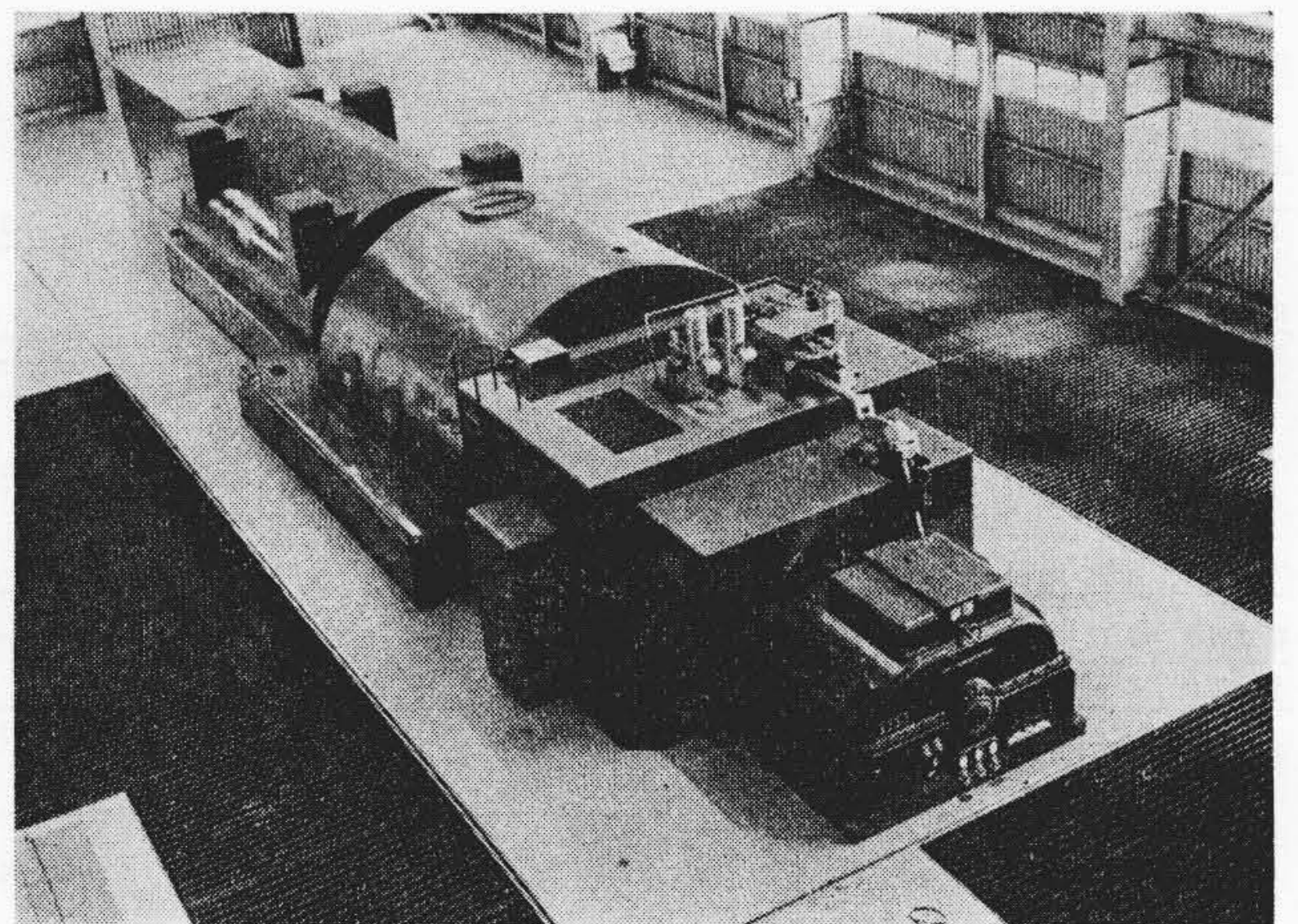
以上、電子油圧式ガバナの構成を概説したが、その特徴を機械式ガバナの場合と比較したのが表2である。

3. 再熱タービン EHG の運転実績

昭和発電株式会社市原火力発電所納め 75,000 kW タービンは再熱蒸気タービンとしてわが国では初めて EHG を装備したもので、

表2 電子油圧式ガバナと機械式ガバナの比較

No.	機 器 名	機 械 式 ガ バ ナ	電 子 油 圧 式 ガ バ ナ
1	速度検出器	遠 心 す い 形	無接点式電磁パルス発生器
2	調定率設定器	レバ ー 比 の 変 更	DC アンプ + 可変抵抗器
3	速度設定器	レバ ー 位 置 の 変 更	可 変 抵 抗 器
4	出力設定器	レバ ー 位 置 の 変 更	可 変 抵 抗 器
5	負荷制限器	ハンドル, 補助パイロット弁	可変抵抗器 + ダイオード
6	中間阻止弁急閉	(a) 油圧ダッシュポット	(a) 微 分 器 (b) ト リ ッ プ 弁
7	制御弁 サーボモータ	油 圧 パ イ ロ ッ ト 弁, 油圧シリンダ, 復元レバー の組合せ	サーボ弁, 油圧シリンダ 復元用差動トランスの組合 せ
8	油 圧 油	タ ー ビ ン 油 # 90	ストレートリン酸エステル
9	作 動 油 圧	約 14 atg	約 112 atg
10	潤滑油系統	作 動 油 系 統 と 共 通	作 動 油 系 統 と は 分 離



(昭和発電株式会社市原火力発電所第5号機)

図8 75,000 kW 再熱タービン

試運転により良好な運転特性を確認し営業運転にはいることができた。図8はタービン全景を、表3はその主要な仕様を示したものである。ここに主要な運転試験結果を示し、EHGの利点について述べる。

3.1 調速運転, 負荷制限運転

再熱タービン制御の基本として調速運転, 負荷制限運転がある。両者ともきわめて安定しており, 無負荷時のロータ速度の制御精度は±1rpmであることを確認した。また低速からの起動が可能で, 昇速, 同期投入などの起動操作がきわめて容易であることを確認した。

3.2 負荷しゃ断時の制御特性

負荷しゃ断時の過速防止の重要なファクタの一つとして, 中間阻止弁の閉止速度がある。これについては計画の段階で計算機によりタービン, ガバナのシミュレーションを行ない, 機能や制御性についてじゅうぶん検討を重ねるとともに, 試作模擬装置によって特性を確認し技術的にじゅうぶんな自信を持ってガバナ試験に臨んだ。

図9は計算機シミュレーションのためのブロック線図を示したものである。また図10は試作模擬装置の全景を示したものである。

全負荷運転からの負荷しゃ断試験の結果を示すと図11のようになる。中間阻止弁は0.1秒で閉じ始め, 0.3秒には全閉している。瞬時最高速度は3,222 rpm (7.33%) に押えることができた。

図12はしゃ断負荷に対する瞬時速度変動率を示したものである。40%以下の負荷ではパワーロードアンバランスリレーを働かせず, シングルガバナ特性だけで速度の上昇を抑えうるようにしている。

表4は電子油圧式ガバナの制御性能を機械式ガバナのそれと比較して示したものである。弁の応答, 制御特性, 精度において電子ガ

表3 タービンのおもな仕様

項 目	仕 様
タービン形式	TCDF-20
定 格 出 力 (kW)	75,000
回 転 数 (rpm)	3,000
主 蒸 気 圧 力 (kg/cm ² g)	102
主 蒸 気 温 度 (℃)	538
再 熱 蒸 気 温 度 (℃)	538
復 水 器 真 空 (mmHg)	722

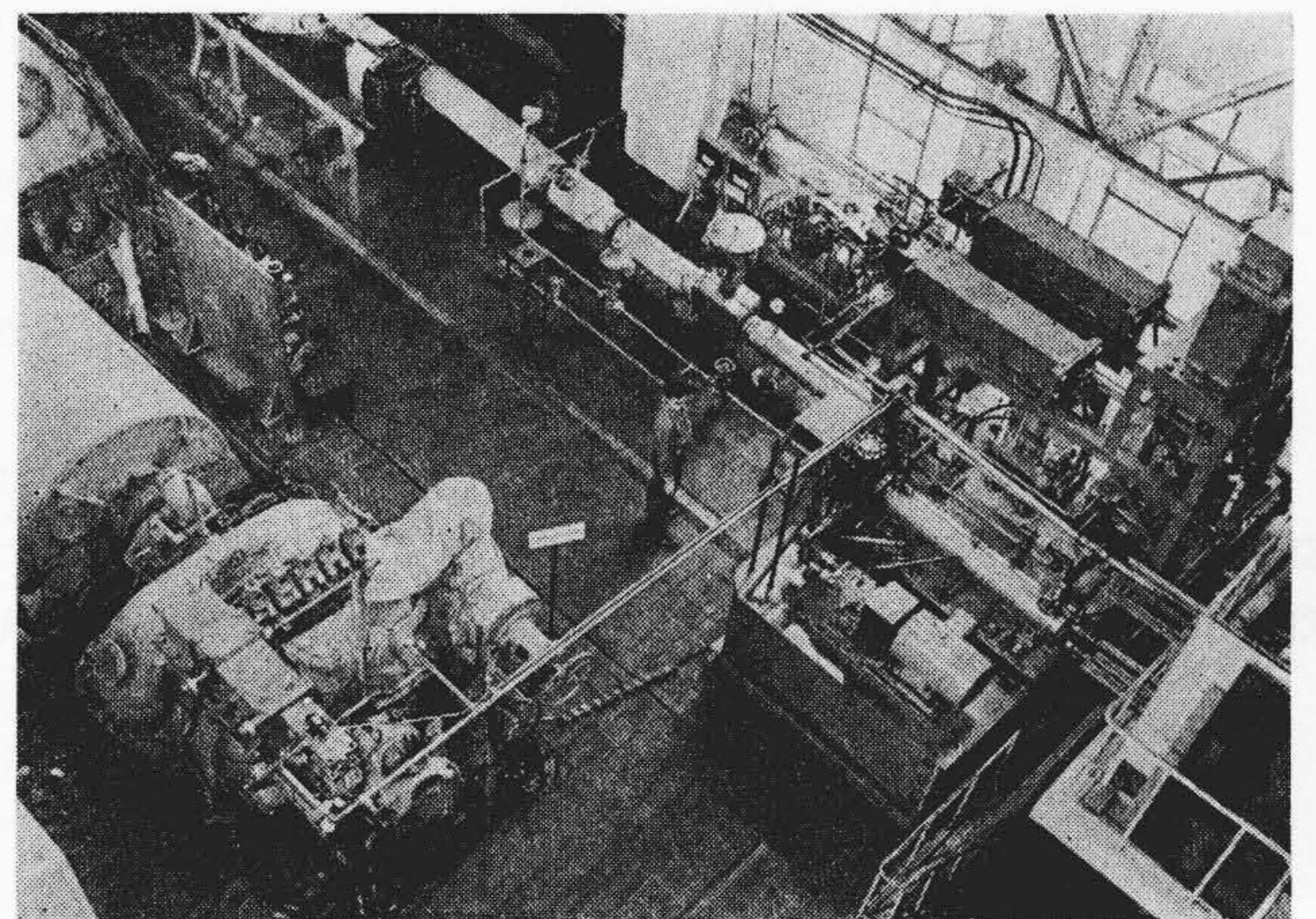


図10 再熱タービン電子油圧式ガバナ試験装置

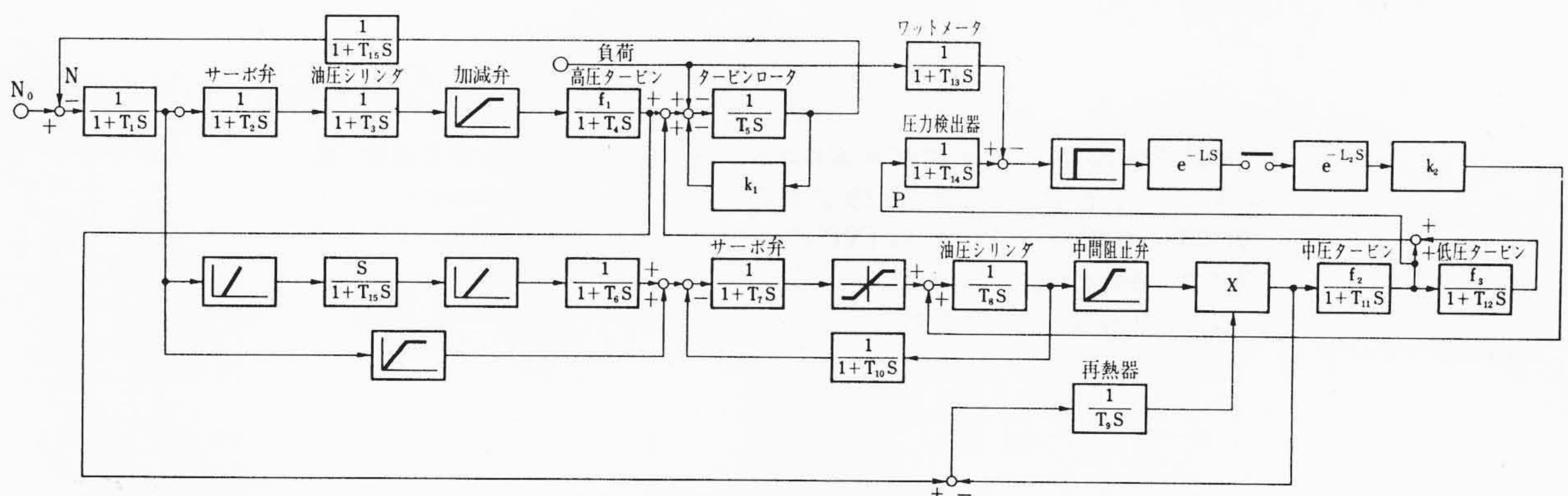


図9 再熱蒸気タービンシミュレーションブロック線図

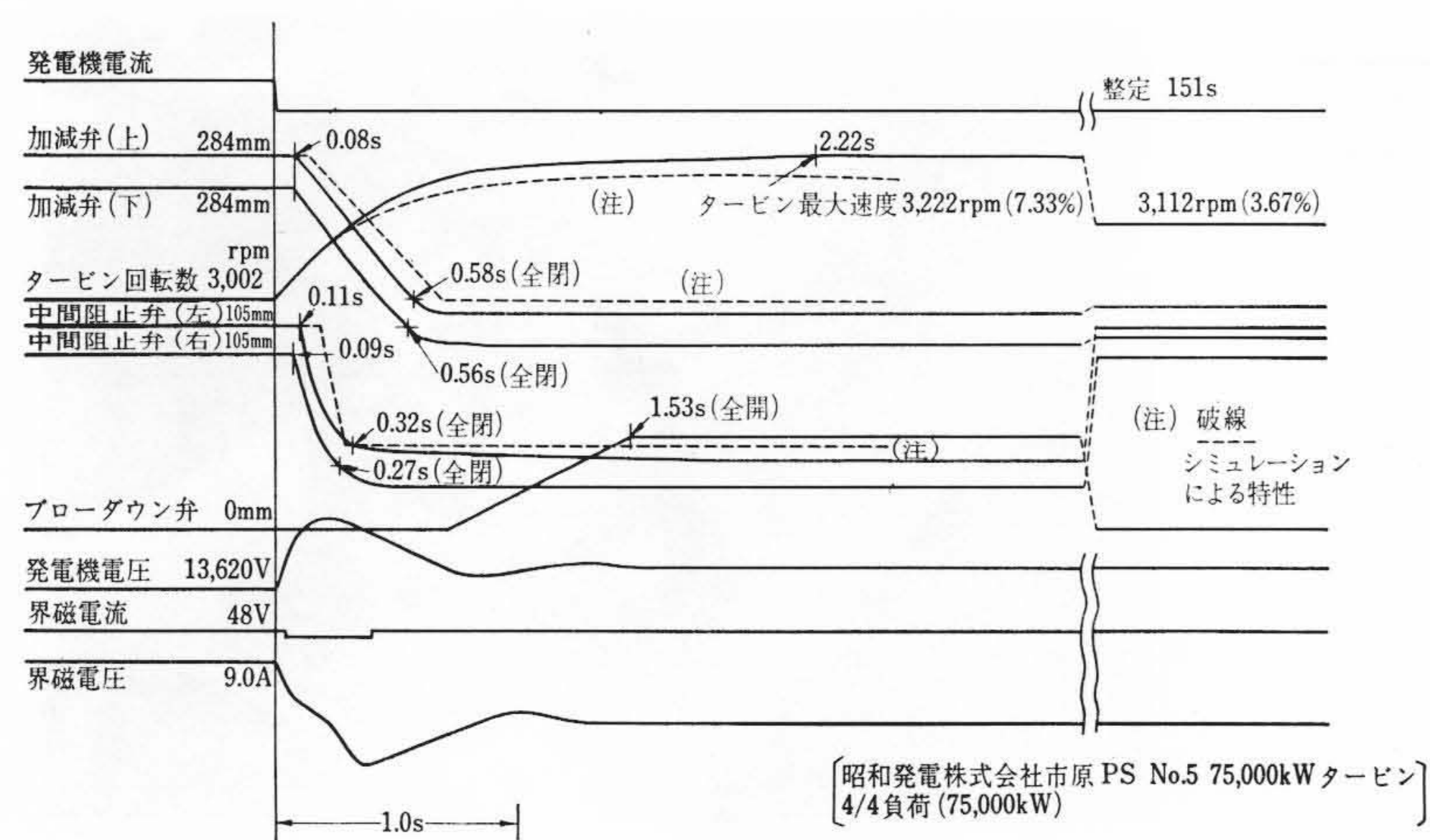


図 11 定格負荷しゃ断試験結果

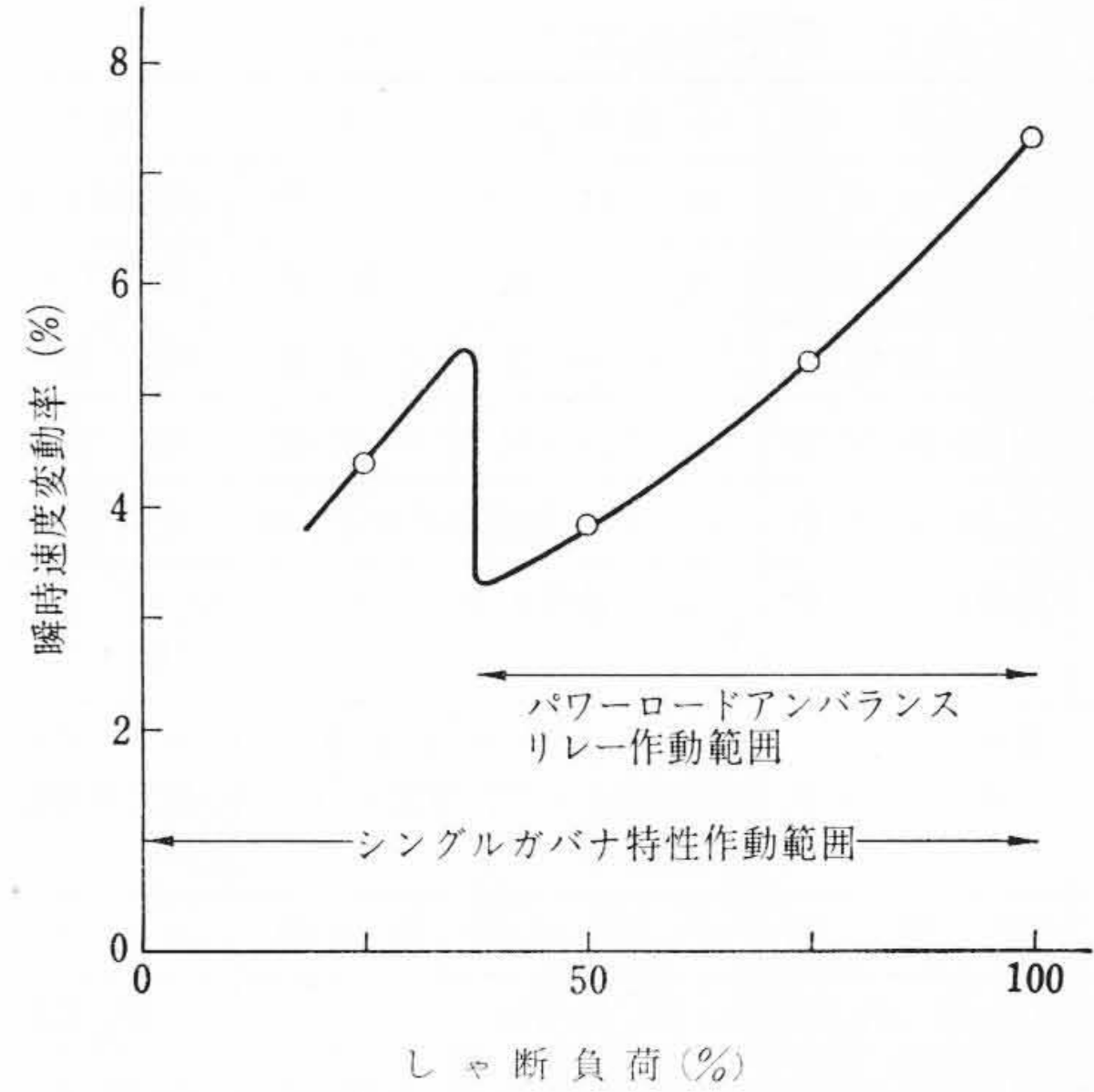


図 12 負荷しゃ断試験結果 (EHG)

バナがすぐれ、また運転調整に大きな容易性と自由度を持っていることがわかる。

4. 結 言

再熱タービンとして、国内では初めて電子油圧式ガバナによる運転を開始した昭和発電株式会社市原火力5号機 (75,000 kW) のEHGの概要を紹介し、その運転特性について述べた。これらを総括し、EHGの利点をまとめてみると次の点があげられる。

- (1) 電子回路の採用によって感度、応答性、精度など制御性能を高めることができる。
- (2) 起動、停止などの運転操作および各部の調整、保守、点検が簡単、かつ容易である。
- (3) 自動起動装置、自動負荷上昇装置あるいは計算機制御などのより高度な自動制御システムへの連結が容易である。
- (4) 油圧の高圧化に伴い、サーボ系を小形、簡単化することができる。
- (5) 難燃性油の採用により、火災の危険を皆無とすることができる。

すでにアメリカのメーカーでは、今後受注する大容量タービンはEHGを原則とする動向にある。上述のように多くの利点を持つEHGは大容量化し、ますます高度な制御システムを必要とする火

表 4 制 御 性 能 の 比 較

項 目		電子油圧式ガバナ (EHG)	機械式ガバナ (MHG)
応 答 性	サーボ系応答時定数 (ICV) (s)	0.19	0.21
	サーボ系むだ時間 (ICV) (s)	0.10	0.22
	瞬時速度変動率 (定格負荷しゃ断) (%)	7.3	7.9
調 速 範 囲 (%)		低 速 か ら	定 格 ±6
調 速 精 度 (%)		定 格 ±0.05	定 格 ±0.2
速 度 調 定 率 範 囲 (%)		1~10 (運転中可調整)	2~6 (運転中調整不可)

力発電プラントの要求に応じて、今後の調整システムの主流となるものと考えられる。

終わりに臨み、EHGを設置するにあたり、多大なご尽力を賜った昭和発電株式会社山中常務、印出技術部長、また同市原火力発電所佐藤所長、木谷所長代理、野村次長に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 柴藤、竹村：日立評論 50, 790 (昭44-2)
- (2) 印出、野村、安藤、安元、丸山：火力発電 21, 785 (昭45-7)
- (3) 安元：油圧技術 8 (昭44-2)

本誌 Vol.53 No.1「昭和45年度における日立技術の成果号」掲載記事「東北電力株式会社 秋田火力発電所納 計算機によるプラント自動起動装置」の中で、13頁右側下から13行目に「VP ボイラ」とありますのは「UP ボイラ」の誤りでございます。
ご訂正をお願いいたします。