

運転の自動化と 電子油圧式ガバナ(EHG)

Automatic Operation and Electrohydraulic Governor

Recently we must treat much more exact information on the process with which turbine control devices accomplish their functions. As the control functions become more complex, we have been steering toward the direction of less complex systems that accomplish the specified functions depending upon the demands of the power networks and automatic operation.

We started to develop Electro-Hydraulic Governor (EHG) in 1965 and have supplied 10 turbines with EHG. EHG is most suited to automation and complex control systems because of its excellent performance in flexibility, response and accuracy.

This article explains automation using EHG which is connected to the analog sub-loop, for example, Automatic Starting-up Regulator (ASR), Automatic-Synchronizing System (ASS), Automatic Valve Transfer System (AVTS), Automatic Load Regulator (ALR) and Automatic Following Regulator (AFR). In addition it outline EHG for nuclear steam turbine.

安元昭寛* Akihiro Yasumoto
岸上 孝** Takashi Kishigami
有江亮介* Ryôsuke Arie

1 緒 言

最近、火力および原子力発電所の単機容量が増大するにつれ、安全性の向上および運転員の労力削減ならびに主要機器のより高度の運転管理がきびしく要求されるようになり、各電力会社において、タービンプラント運転の自動化、さらには電子計算機の制御への導入が、続々と試みられるようになった。

したがって火力発電プラントの制御システムは、ますます複雑化し電力系統網からの時々刻々の要求に対し、速くしかも精度のよい応答をすること、起動、停止の過程で安全かつ円滑な自動運転が行ないうることが要求されてきた。すなわち、

- (1) 負荷しゃ断時に急速に弁を閉め、タービンの速度上昇を抑えうること。
- (2) 調速機の特性をプラントの要求に従って広範囲に、しかも容易に調整することができ、起動、停止が容易であること。
- (3) 制御装置、弁駆動装置が小形になること。
- (4) 作動油の漏れによる火災の危険がないこと。

電子油圧式ガバナ (Electro-Hydraulic Governor, 略称 EHG) あるいは、プラントとの連結を考慮した電子油圧式制御装置 (Electro-Hydraulic Control System, 略称 EHC) は、従来の機械油圧式ガバナ (MHG) にも増して、上記の諸要求を満たす機能をもっている。

大電力網を有するたとえばアメリカ本土の火力および原子力プラントでは、1,000MWクラスのタービンユニットが、数多く建設されているが、そのほとんどがEHG(またはEHC)を備える動向にあり、わが国においても、700MW以上の火力および原子力タービンプラントの自動化には、EHGの採用が不可欠の条件となるであろう。

日立製作所では、このような状況にかんがみ、早くからEHGの開発と実用化に着手し、火力用再熱タービンの運転実績を積み、さらに、原子力タービン制御系統のEHG化を進めている。本報ではEHGの運転経験を紹介し、プラントの自動化に際してEHGが有する優位性と特徴について解説する。

2 プラント自動化とEHG

2.1 自動化の動向

近年、タービンプラントの大容量化に伴い、安定性の向上、運転員の労力削減などを目的とし、種々自動化が試みられてきた。従来これら自動化はすべて調速系統に機械油圧式ガバナを採用したものでいわゆるガバナモータ、ロードリミッタモータあるいは主蒸気止め弁バイパス弁モータを自動化装置にて駆動させる方式であった。この自動化の方法にも種々あるが、一般的には表1に示す3方式に分けられる。特に最近では、制御系統の複雑化、プラント運転技術の複雑化により、運転員個人の注意力、技術力にたよるのみでは、プラントの安定運転および機器の安全を確保することはむずかしくなってきた。

日立製作所は、これら複雑かつ高度な自動化の要求に対処するために従来の機械油圧式制御装置に対して電子油圧式制御装置を採用すべく開発、実用化を進めてきた。これは電子油圧式ガバナを中心に、タービン自動化のための各種サブグループ制御装置と、より高度な判断制御ができる計算機を図1のように連結し、タービンプラントの全自動化を図るものである。たとえば、図2に示したEHGとMHGにおける自動速度制御装置(ASR)のブロック図の比較のように、自動化により付加すべき回路は、従来のMHGに比較してEHGの場合

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所大みか工場

表 I タービンプラント自動化の形態 自動化の形態として、(1)各種サブグループ制御装置+リレーシーケンス、(2)計算機+各種サブグループ制御装置、(3)直接デジタル制御の三つがある。

Table I Types of Automation for Turbine

自動化の方式	アナログサブグループ装置によるアナログ制御	計算機とアナログサブグループ装置を組合せたアナログ制御	計算機による直接デジタル制御
運転実績(例)	大分共同動力株式会社 1.2号 250kW	東北電力株式会社 秋田1号 350MW	中国電力株式会社 玉島1.2号 350MW
参考文献		(1)	(2)

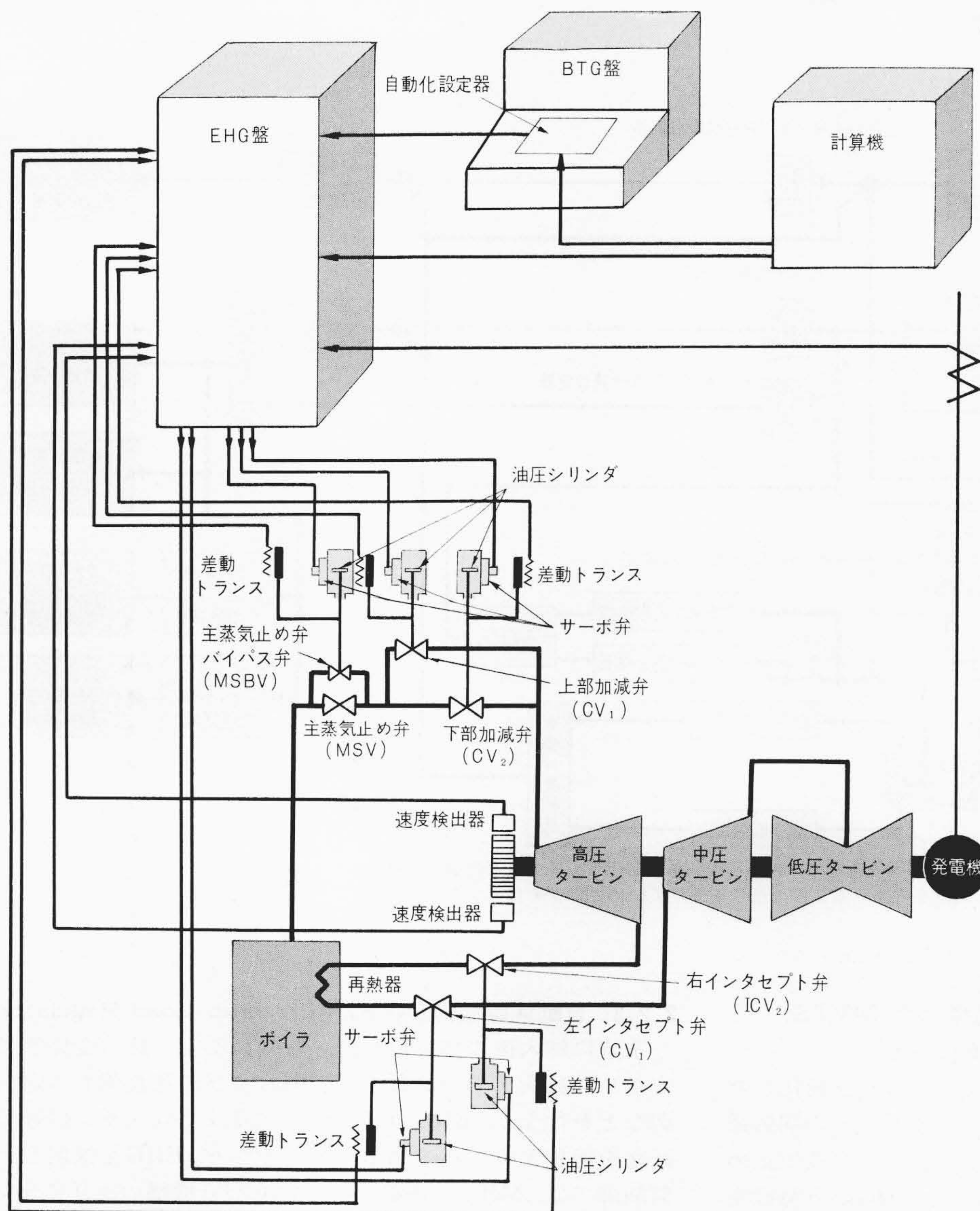


図 I EHGの全体構成 EHGを使ったシステムの自動化構成の例を示す。計算機より直接EHG盤へ入力される信号、BTG盤を經由してEHG盤へ入力される信号があり、制御量はすべてEHG盤へ伝達される。

Fig. I System Construction of EHG

はプログラム信号発生部だけとなり、非常に簡単になる。以下、その具体例である日本国有鉄道納め川崎発電所4号機(125MW)タービンプラントについて述べる⁽¹⁴⁾。この方式は今後の大容量タービンプラントにもそのまま適用できるものである。

2.2 タービン自動化の範囲と構成

タービン自動化の範囲は、タービン通気から併入、弁切換えを経て、定格負荷までの全起動過程と通常運転中の負荷制御を含むものである。またその制御ブロック図は、図3に示すように、計算機、自動化部分およびEHG部分より構成されている。以下その代表的な機能について列挙する。

2.2.1 自動昇速制御 (ASR, Automatic Speed Regulator)

従来のMHGにおいてはASRを使用していたが、制御回路および機械機構が複雑化する難点があった。EHGにおいてはターニング速度から定格速度まで精度よく制御でき、かつ図3に示す簡単なプログラム信号発生回路を追加するだけで従来のASRと同程度あるいはそれ以上の制御性が得られ、ラプチェック制御、暖機時の低速度定値制御はもちろんのこと、タービン振動発生時の処置など種々の機能をもたせている。また計算機との結合方式はいわゆる監視制御方式を採用し、目標速度設定器あるいは速度上昇率設定器の設定点の変更および投入除外指令などを出す。

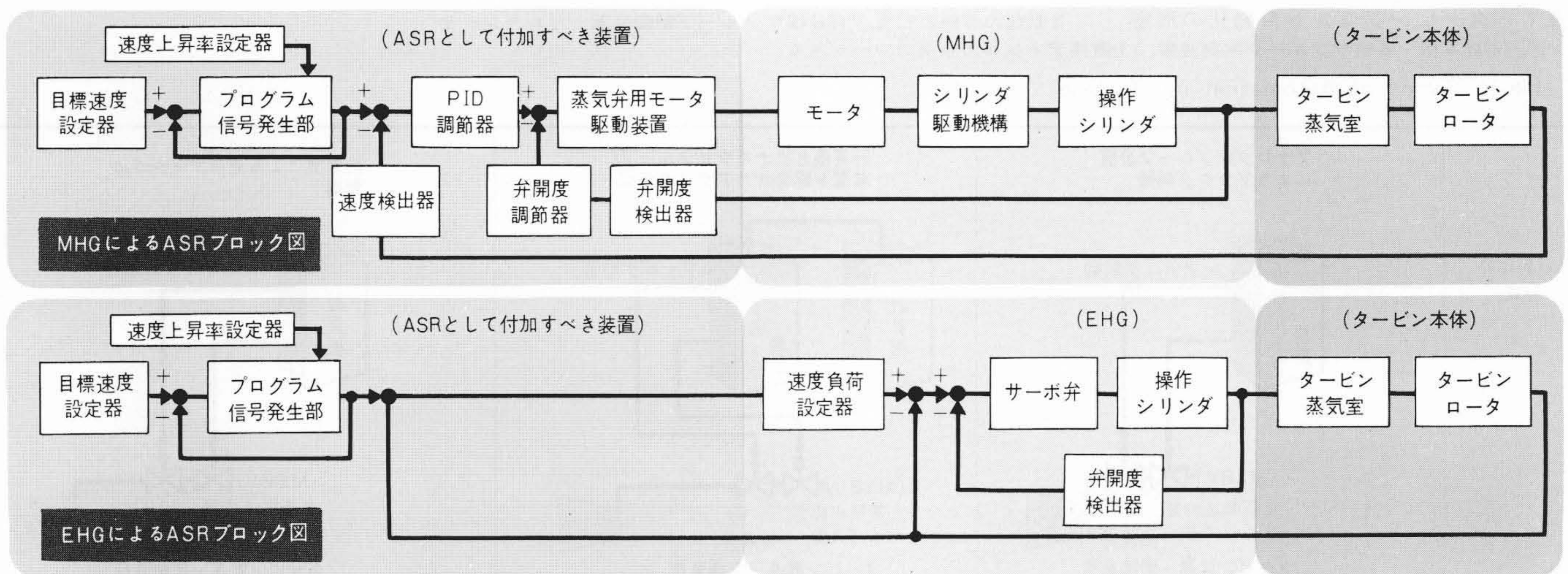


図2 EHGとMHGによるASRブロック図の比較 EHGとMHGにASR機能を付加した場合のブロック図である。EHGに付加した場合のほうがより簡単である。

Fig. 2 Comparison of ASR Blocks by means of EHG and MHG

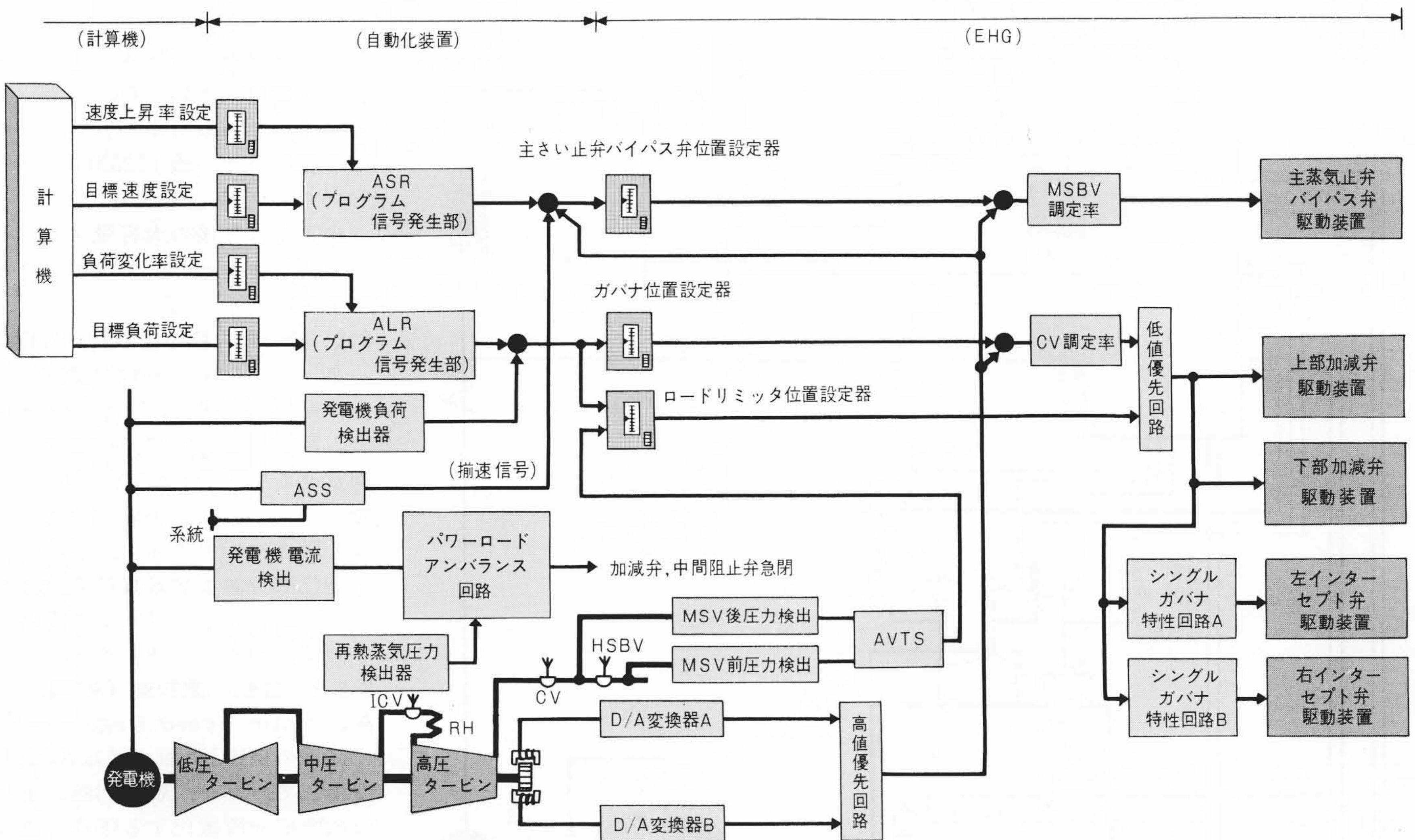


図3 EHG自動化装置ブロック図 計算機からは速度上昇率、目標速度、負荷変化率、目標負荷の指令が設定信号として与えられ、各設定に応じたプログラム信号を発生する。その信号を受けてEHG回路が動作し、タービンを目標値まで負荷上昇させる。

Fig. 3 Block Diagram EHG for Automatic Operations

2.2.2 全周噴射から部分噴射への自動弁切換 (AVTS, Automatic Valve Transfer System)

従来、運転員が手動で行っていた切換方法を自動化したものであり、EHGの場合はMHGの場合よりも、その制御系がさらに簡単になる。すなわち図3に示すように主蒸気止め弁前後の差圧の変化量を電氣的に検出して、EHGの負荷設定器(65P)あるいは負荷制限器(77)を絞り込む方式である。また、この絞り込み途中の負荷減少を最小に制御するサブルーブ制御装置を有する。

2.2.3 自動負荷制御 (ALR, Automatic Load Regulator)

系統に併入後の初負荷制御、さらに所定の負荷変化率で設定された負荷までの負荷上昇制御および任意負荷での定値制御などを行なう。EHGの場合制御回路はプログラム信号発生回路を追加するのみの簡単なものとなる。EHGを採用した負荷制御では、MHGで問題となったレバー機構のクリアランスなどがないたため、その制御性は数段向上している。

2.3 信頼性の向上

高い動作信頼度が要求されるEHGではシステム構成、設計、製作および試験にあたって、次のような細心の注意を払っている。

2.3.1 主要回路の二重化

単一部品の故障が直ちに装置の誤動作に至らないように主要回路はすべて二重化されており、そのおもなものは次のとおりである。

- (a)定電圧電源系統
- (b)タービン速度検出系統
- (c)速度調定率系統
- (d)シングルガバナ特性回路
- (e)パワーロードアンバランス回路

特にパワーロードアンバランス回路は3回路設けており、3回路のうち2回路が作動すると正常な動作と判断され、中間阻止弁および加減弁のダンブ弁を作動させて油を抜き、弁を急閉させる。なお1回路のみ作動したときは誤動作と判断され警報する。

2.3.2 試験

本装置の主要回路には信頼性の高いIC演算増幅器、IC電圧比較器、抵抗、ダイオードなどを使用し、かつ十分に吟味された高い信頼度と安定な動作実績のある部品のみを使用している。さらに出荷前には高温槽(そう)にて高温エージングとヒートサイクルおよびロングランテストを行ない、部品の初期不良を摘出するようにしている。

3 EHGの運転経験とその問題点

日立製作所におけるEHGの開発は、1965年に開始され現在に至るまで75MW再熱タービンをはじめとして表2に示すように8台が営業運転を行ない、3台を製作中である^{(1)~(6)}。開発当初、制御油圧を高圧化するか、従来のままの低圧油圧で進めるかの判断を要請されたが、結局高圧化することに統一した⁽⁷⁾。国内初のEHG装備のタービンは、1968年営業運転を開始し、すでに約4年間運転を継続している。また国内初の再熱タービンのEHG化は、1969年に運転を開始している。これまではおもに多段抽気タービンやボイラの特性上タービン主蒸気圧力制御を要求される産業用火力プラントを中心にEHGを実用化してきた。これは非常に複雑な制御を要請されるためにEHGとされたものである。大容量タービンへの採用については、784MW原子力タービンの制御装置を計画であり、これら開発後約7年間に得られた各種の経験は、今後の計画に十分活用できるものが非常に多い。これら実用化途上に経験したおもな問題と解決法について述べる。

(1) サーボ弁の浸食

開発初期においてサーボ弁が定期的に浸食されるという問題を数回にわたり経験した。これは油中のきょう雑物、その他がサーボ弁に悪影響を与えて、サーボ弁のスプールエッジやノズルを浸食していたことに起因していた。この問題は同時期にアメリカにおいても経験されており、アースフィルタによるバイパスフィルタリングが有効であることがわかった。アースフィルタは油中のきょう雑物を除去する物理的作用と同時に、劣化を防ぐ化学的作用をも持ったフィルタである。アースフィルタを設置することおよび油の定期的な管理基準を設けこれを励行することにより、この問題は完全に解決された⁽⁴⁾。

(2) 温度による伝送信号レベルの変動

タービン本体に取り付けられた弁開度検出用差動トランスの出力電圧が、弁開度一定の場合でも外気温度が変わる

表2 電子油圧式ガバナ開発過程 1965年に開発を開始し、その後の実績ならびに784MW原子力タービンに至るまでの運転経過年数を示す。

Table 2 Development Process of Hitachi Electro-Hydraulic Governor (EHG)

施設者名	発電所名	出力 (MW)	タービン 種類	運転開始						
				1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
日立研究所	試作機	3	復水	運転開始						
鶴崎共同動力(株)	鶴崎一号	28	2段抽気復水							
昭和発電(株)	市原発電所五号	75	再熱復水							
ブリジストンタイヤ(株)	彦根工場一号	5.2	抽気背圧							
新日本製鉄(株)	広畑一号	22.6	抽気背圧							
十条製紙(株)	石巻工場一号	23	抽気背圧							
鶴崎共同動力(株)	鶴崎二号	35	抽気背圧							
新日本製鉄(株)	広畑二号	22.6	抽気背圧							
東北製紙(株)	秋田工場一号	29	2段抽気復水							
昭和発電(株)	市原発電所六号	175	再熱復水							
日本国有鉄道(株)	川崎発電所四号	125	再熱復水							
東京電力(株)	福島原子力発電所四号	784	原子力							

と変動するという問題が発生した。原因は差動トランスからEHG盤までの配線の浮遊容量が温度によって変化するためであることが判明した。これは差動トランスの出力を交流伝送していることに起因するものであるから、差動トランスの近くに整流回路を設け、直流伝送に変更することによって解決した。

4 原子力タービンと電子油圧式制御装置

日立製作所では東京電力株式会社・福島原子力発電所納め第4号機784MW原子力タービンに、EHGを適用した。その概要について紹介する。

沸騰水形原子力プラントにおける蒸気タービンの制御は、一般火力用蒸気タービンに比べて次のような特質がある。すなわち、沸騰水形原子炉はその特性上蒸気圧力をタービン側で制御することが要求される。また、系統よりの解列事故など負荷急減時あるいはタービン起動・停止時などは原子炉運転上、主蒸気はタービンをバイパスして復水器へ流入させる制御が必要である。このように従来の火力タービンよりも複雑な制御が要求されること、遠隔化、自動化が要求されることなどの制御上の特質からEHGの採用は大きな利点があると考えられる。沸騰水形原子力プラントのタービン蒸気系統を

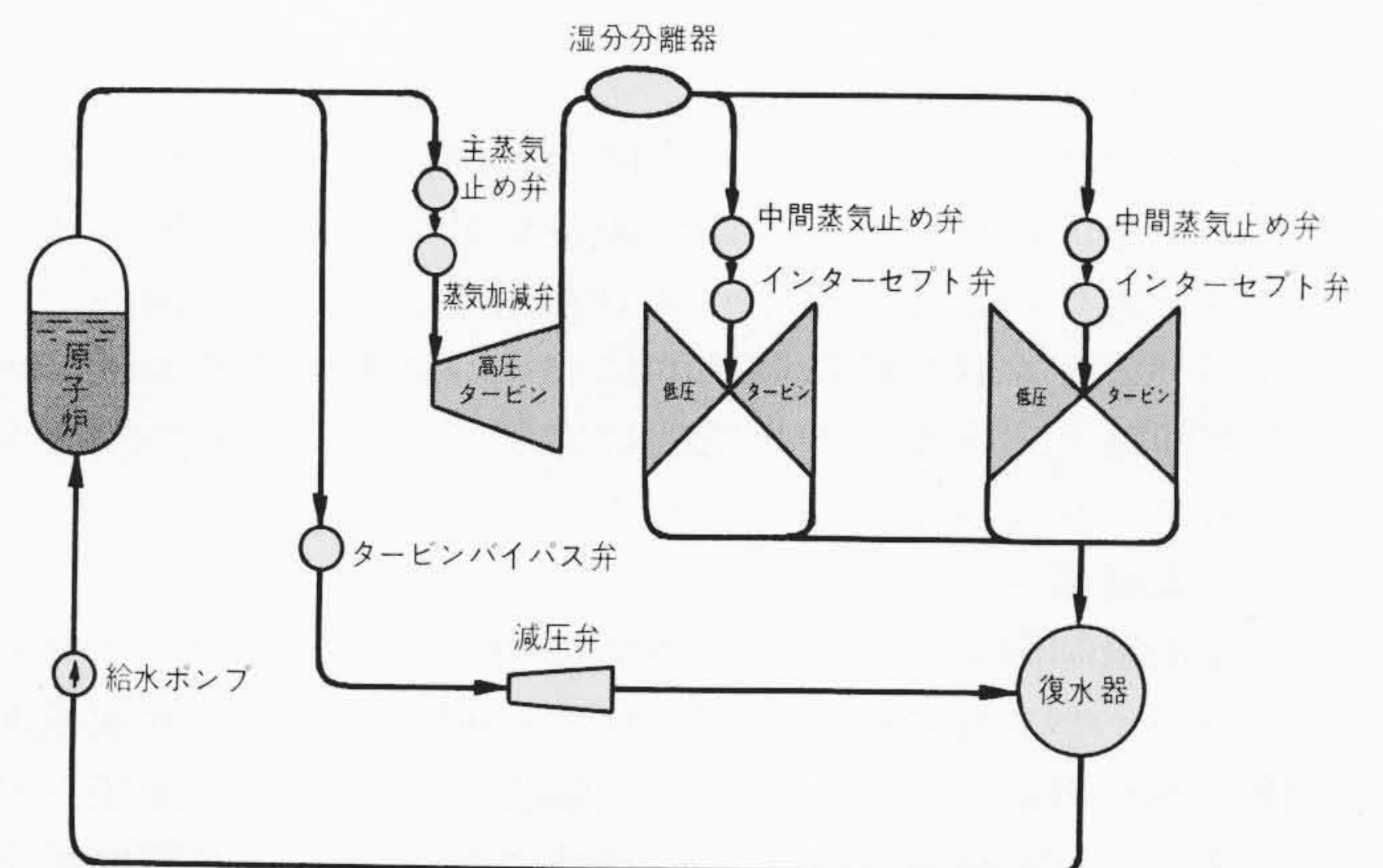


図4 原子力タービン蒸気系統 原子炉からの蒸気の一部は主蒸気止め弁、蒸気加減弁を通り高圧タービンで膨張したあと、湿分分離器を経て、中間蒸気止め弁、インターセプト弁に至り、低圧タービンで膨張する。他方はタービンバイパス弁、減圧器を経て復水器へ流入する。

Fig. 4 Schematic Steam Flow Diagram of BWR Type Nuclear Steam Turbine

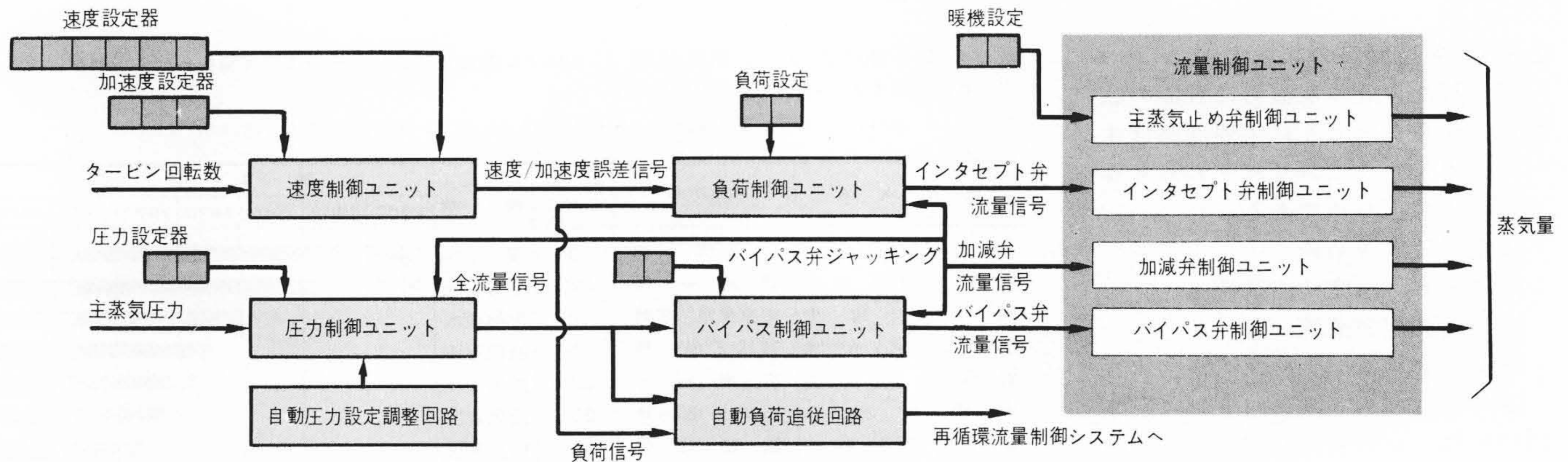


図5 原子力タービンEHGブロック図 速度制御ユニット、圧力制御ユニット、負荷制御ユニット、バイパス制御ユニット、流量制御ユニット、自動負荷追従回路、自動圧力設定調整回路より構成される。

Fig. 5 Block Diagram of EHG for BWR Type Nuclear Steam Turbines

図4に、EHGによるタービン制御系統ブロック図を図5に示す。

(1) 速度制御ユニット

速度制御ユニットは、速度あるいは加速度の設定値と実際の速度あるいは加速度を比較して速度/加速度誤差信号を得る回路であり、信頼性を考慮して二系列化されている。特にタービン起動時には速度誤差信号と加速度誤差信号を比較し、加減弁開度にして小さな信号を優先して通過させる回路を内蔵している。

(2) 圧力制御ユニット

圧力制御ユニットは、主蒸気圧力の設定値と実際の圧力を比較して圧力誤差信号を発生し、原子炉全流量信号として各ユニットに信号を供給するユニットである。本ユニットには、速度制御ユニットからの加減弁開度指令信号と圧力制御ユニットからの加減弁開度指令信号とを比較し、弁開度にして低い信号を優先して通す低値優先回路および圧力制御性を補償するための遅れ/進み補償回路が含まれている。このユニットも二系列の構成である。

(3) 負荷制御ユニット

負荷制御ユニットは、速度/加速度誤差信号に調定率を付加し、速度信号に対する加減弁とインタセプト弁の開度指令信号を発生する回路である。このユニットには負荷しゃ断時、最大速度上昇率を低くするためのパワー・ロードアンバランス回路を含み、その信号で負荷設定をゼロにすると同時に、各制御弁の油圧回路中の急閉ソレノイド弁を励磁して弁を急閉する。

(4) バイパス制御ユニット

バイパス制御ユニットは、圧力制御ユニットで得られた原子炉全流量信号と、加減弁流量信号を比較し前者が規定値以上大きいときにバイパス弁を開く信号を得る回路である。タービン起動時に強制的にバイパス弁を開くジャッキング回路と、復水器の真空度に応じてバイパス弁の開度を制限するリミット回路が内蔵されている。

(5) 流量制御ユニット

各流量制御ユニットは、蒸気加減弁、インタセプト弁およびバイパス弁の開度を定位化する回路であり、弁流量非線形補正用電気カム、サーボ増幅器、サーボ弁、油圧シリンダおよび電磁弁などにより構成されている。弁開度指令信号に応じて油圧シリンダを開閉すると同時に、その動きは差動トランスによって電気量に変換されフィードバックされる。

(6) 自動負荷追従回路

自動負荷追従回路は、負荷要求信号を原子炉制御側へ戻

す回路であり、その出力は再循環流量制御システムへ伝達され、再循環流量を調整して原子炉出力を変える。同時に自動圧力設定調整回路にも伝えられ、タービンの圧力設定値を自動的に調整する。

一方、各弁類を開閉するための油圧シリンダに $112\text{kg/cm}^2\text{g}$ の高圧制御油圧を供給する高圧油圧ユニットは、火災の危険性を防止するために、ストレートりん酸エステル系不燃性作動油を用いており、潤滑油系統とは完全に別系統である。機器構成としては、油ポンプ、ラインフィルタ、チェック弁、アキュムレータ、油冷却器および各種計装品より成り、重要部分はすべて2系列で保守点検を容易にしている。また油が特殊であるためのバイパスフィルタリング装置が設置され、油の管理を十分にできるよう配慮されている^{(1)~(9),(11)}。

制御油圧に $112\text{kg/cm}^2\text{g}$ という高圧油を採用しているために弁駆動機構部は小形化され、制御特性を改善する一つの要因となっている。

5 結 言

タービンプラントの自動化とEHGの特長について解説し、EHGが自動化プロセスに、より容易に結合される特長を、具体例を挙げて述べた。日立製作所では、すでに175MW再熱タービンをはじめとして、EHGを採用した例として、すでに10台の実績を有しており、これらの運転によって得られた経験は、大容量火力および原子力タービンにも、そのまま適用できるものである。今後、これらの貴重なノウハウを基に、信頼性の高い、運転の容易なEHGを市場に提供できるものと確信している。

参考文献

- (1) 柴藤, 有江, 岸上: 日立評論 51, 498 (昭44)
- (2) 安元, 有江: 計装 12, 83 (昭44)
- (3) 安元: 油圧技術 8, 60 (昭44-2)
- (4) 安元: 油圧技術 10, 35 (昭46-6)
- (5) 柴藤, 有江: 計測と制御 8, 505 (昭44)
- (6) 清水, 柴藤, 有江ほか: 火力発電 20, 739 (昭44)
- (7) 河竹, 前沢, 有江: 火力発電 21, 796 (昭45)
- (8) 内山, 安元, 岸上: 日立評論 53, 219 (昭45)
- (9) 印出, 野村, 安藤ほか: 火力発電 21, 785 (昭45)
- (10) 柏原, 滝: 日立評論 53, 535 (昭46)
- (11) 有江, 杉森, 岸上: 日立評論 54, 112 (昭47)
- (12) 佐々木, 松村, 福島ほか: 日立評論 53, 340 (昭46)
- (13) 河本, 二川原, 小河内: 日立評論 53, 943 (昭46)
- (14) 常広: 電気鉄道 26 (No. 4) (昭47)