

# 産業用タービンにおける電子油圧式ガバナの運転

## Operation of Electro-hydraulic Governor for Industrial Steam Turbines

有江亮介\* 杉森篤雄\*\* 岸上孝\*\*\*  
 Ryosuke Arie Atsuo Sugimori Takashi Kishigami

### 要 旨

蒸気タービンの新しい制御方式である電子油圧式ガバナは制御性の良さ、融通性の良さなどの特長を生かして各種の適用が可能である。本報では特に産業用火力発電設備に焦点を当てて述べ、タービンに連結されるプロセスとの協調性について、日立製作所が納入したプラントを例にとり記述する。

### 1. 緒 言

すでに報告したように<sup>(1)</sup>、日立製作所では1965年より次の時代の蒸気タービン制御の主流を占めるであろう電子油圧式ガバナ (Electro-Hydraulic Governor, 略称EHG) の開発を開始し、1968年には製品化第1号機である鶴崎共同動力株式会社鶴崎事業所納め28,000kW二段抽気復水タービンを営業運転に入れることができた。その後着々と実績を積み重ね、10台の受注および運転実績をあげ、しだいにEHGという新しい制御装置の採用が一般化しつつある現状である。

EHGの開発が要請された技術的背景としては、機械的制御装置を電子化しようという時代の流れもさることながら、飛躍的に超大形化する火力発電プラントや、ますます複雑化する製紙、製鉄、化学、繊維などのプロセスプラントからの制御的要求に応ずるためおよび電子計算機との結合を容易にするためである。また、省力化のための自動化を容易にすることなども考えられる。特にEHGの持つ制御性能の良さ(応答速度、精度の改善)は超大形化する事業用発電プラントに、EHGの持つ制御的な融通性(Flexibility)を付与し、複雑なプロセスプラントの一部として利用される産業用発電プラントに、最も適した利用面を与えるものである。

本報では、特に産業用発電プラントへのEHGの適用に焦点を当てて、これまで日立製作所で製作した実例をあげて述べることにする。

### 2. 産業用タービンの特殊性と EHG の適用

産業用タービンの制御には事業用タービンの場合とは異なった特殊性がある。この特殊性は産業用タービンは単なる電力発生だけでなく、これに連結されるプロセスへの蒸気供給源としての目的を持っていることから生じてくるものである。

たとえば、通常の産業用タービンでは発電機を駆動して電力を発生するのみでなく、タービン段落の途中より蒸気を抽気し、その蒸気を生産プロセスに使用する場合が多い。あるいはタービン排気も事業用タービンのように復水器で復水するのではなく、そのままプロセスに使用するものもある。したがってタービンによって制御しなければならない制御量は、タービン回転数(あるいは出力)のみではなく、タービン抽気圧力や排気圧力も含まれ、そのために制御装置は非常に複雑なものとなる。これは事業用大形タービンが、負荷しゃ断時の最大速度上昇率を抑えるために各種付属装置が設けられて複雑化するのに比較して対照的である。産業用タービンのおもな

表1 産業用タービンの種類と制御

タービン種別	制 御 量	備 考
背 圧 タービン	回 転 数, 排 気 圧 力	単独運転……回転数制御 併列運転……排気圧力制御
抽気復水タービン	回 転 数, 抽 気 圧 力	単独・併列運転とも回転数と抽気圧力制御
抽気背圧タービン	回 転 数, 抽 気 圧 力 排 気 圧 力	単独運転……回転数と抽気圧力制御 併列運転……抽気圧力と排気圧力制御
二段抽気復水タービン	回 転 数, 第 1 抽 気 圧 力 第 2 抽 気 圧 力	単独・併列運転とも回転数, 第1・第2抽気圧力制御
二段抽気背圧タービン	回 転 数, 第 1 抽 気 圧 力 第 2 抽 気 圧 力, 排 気 圧 力	単独運転……回転数, 第1・第2抽気圧力制御 併列運転……第1・第2抽気, 排気圧力制御

種類としては、背圧タービン、抽気復水タービン、抽気背圧タービン、二段抽気復水タービン、二段抽気背圧タービン、三段抽気復水タービン、三段抽気背圧タービンなどが現圧計画されている。通常の場合の上記タービンの制御の特長を示すと表1のようになる。

表1から明らかのように抽気数が増加すれば、制御量も増し制御装置は、非常に複雑となる。表1に示したような制御は従来機械油圧式ガバナ (Mechanical-Hydraulic Governor, 略称MHG) によってもじゅうぶん実現されてきているが、抽気背圧タービン以降の制御装置になると、機構が複雑となるために、機械的装置では宿命的に避け得ない「ガタ」や「摩擦」の影響により、制御系の不安定という現象の生ずることが多く、試運転時の調整などに多大の時間と労力を必要とする場合があった。このようなタービンに対するEHGの適用はまさに最適ということができよう。

また、最近製紙プロセスにおける回収ボイラや製鉄プロセスにおける多種燃料燃焼ボイラの設置が一般化しているが、このようなボイラとタービンが組み合わされた場合、主蒸気圧力や流量をタービン側で制御する装置を設けたほうが、熱経済上および設備投資上有利な場合が非常に多い。前述した抽気背圧タービンや二段抽気タービンに新たに主蒸気制御が必要となる場合には、他の制御量の一つを除外しなければ制御の原理上安定した制御は不可能である。どの制御量を除外するかはプラントの系統構成や連結されるプロセスの重要度によって決められる問題であって、場合によっては各種の制御モードを決め、その間を自動的にあるいは手動によって切り換える必要性も生じてくる。しかるに従来のMHGでは、表1に示した運転モード以外の運転や、運転モード間の切換えを行なうことは、機構というものの本質的な欠点(複雑化、非線形要素の悪影響など)によってかなり無理な面がある。EHGは融通性に富んでいるので、このような制御的要求のあるプラントに比較的簡単に適用可能である。詳細については次節以下を参照されたい。

最後に自動化の問題があげられる。自動化は事業用、産業用を問わず最近進められる傾向にある。事業用大形タービンの場合は、

\* 日立製作所日立工場  
 \*\* 日立製作所電力事業本部  
 \*\*\* 日立製作所大みか工場

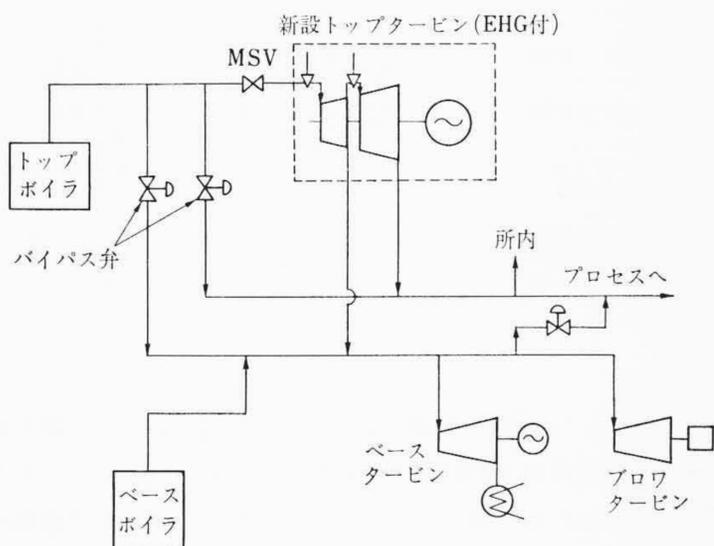
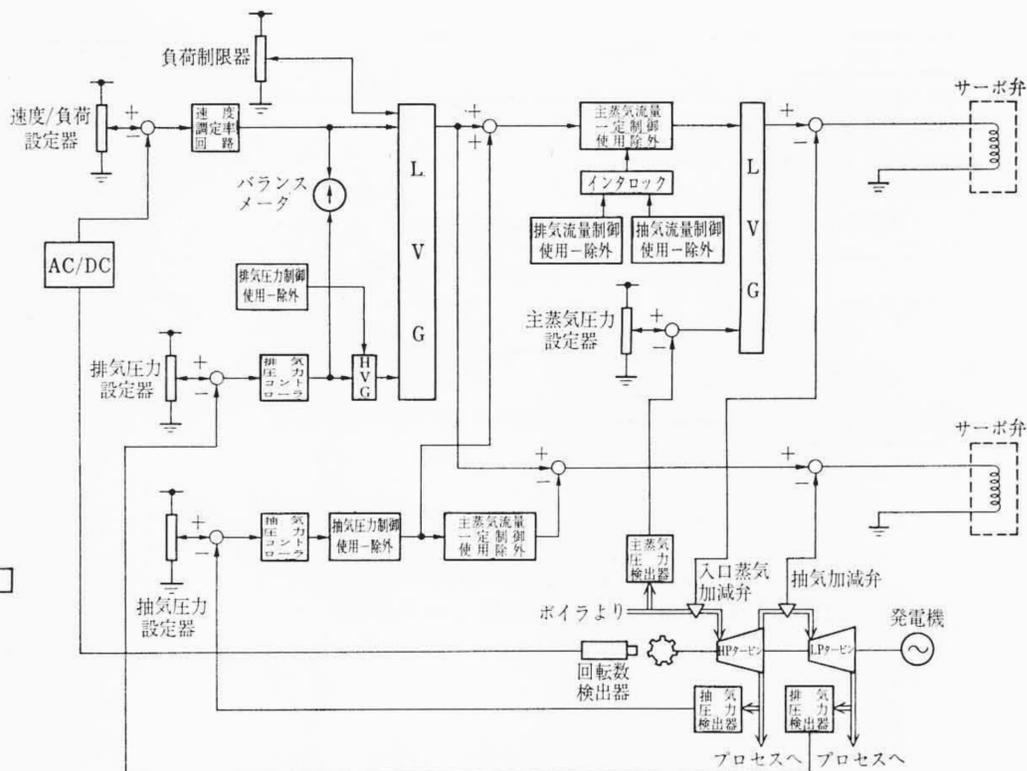


図1 プラント系統概略図



LVG: 低値優先回路 (LOW VALUE GATE)  
HVG: 高値優先回路 (HIGH VALUE GATE)

図2 制御ブロック図

表2 運転モード表

運転モード	制御方式	主蒸気量一定	抽気圧力	排気圧力	回転数	備考
1	主蒸気量一定-排気圧力制御	○	×	○	×	
2	主蒸気量一定-抽気圧力制御	○	○	×	×	ベースボイラ停止時
3	排気圧力制御	×	×	○	×	
4	回転数制御	×	×	×	○	起動時, 解列時

○印……制御すること ×印制御しないことを示す

排気条件 20K系へ送気

運転開始日 1971年1月

納入先 新日本製鐵株式会社広畑製鐵所

タービン自体はトップタービンであるため、主蒸気温度は566℃と非常に高温となっている。

ボイラは、製鉄所において発生する高炉ガス(BFG)およびコークス炉ガス(COG)を燃料としたボイラである。製鉄所では、エネルギーセンタからの指令により、燃料ガス需給調整による外乱、たとえば高炉の突発休風、ガスシステムの故障などで、これら供給ガス量の急変動に対してあくまでも自家発設備は従属的なものであり、これらの要請にこたえるための制御装置を必要とするものである。図1は本プラント系統概略図であるが、タービンの抽気系統に連絡されているボイラとの協調性も当然問題となってくる。以上の点より表2に示す四つの運転モードを設けた。

すなわち、タービンが受電系統と併列運転する場合には、主蒸気流量と排気圧力を制御する運転で、回転数は系列周波数に支配される。図1に示すように、タービン抽気ラインには、ベースボイラが連絡されているので、このベースボイラの主蒸気圧力制御装置が健全であるかぎり、タービン抽気系統圧力はベースボイラ側で制御可能であり、タービン側で制御する必要はない。この場合は主蒸気流量一定の排気圧力制御(表2の運転モード1)運転を継続する。しかし、ベースボイラが故障で停止したり、定検で停止している場合には、抽気系統圧力は無制御となるのでタービンで制御せざるを得ない。この場合には運転モードは主蒸気量一定の抽気圧力制御(表2の運転モード2)に切換えられる。もちろん上記1, 2のモードで運転中系統より解列された場合には、速度制御信号がすべてのほかの信号に優先して弁の開度を制御し、タービンを異常な過速から保護する回路構成である。本タービンの制御ブロック図は図2に示すとおりである。主蒸気量一定制御とは、積極的に流量を検出して制御する方式ではなく、タービンの入口蒸気加減弁の開度を一定に保持する方式であり、排気あるいは抽気圧力偏差信号では、抽気加減弁のみが開閉される方式である。なお、このタービンは1971年2月に営業運転を開始以来好調に運転を継続中である。本タービンの定格負荷よりの負荷しゃ断試験のデータは図3に示すとおりであ

運転上の制限値が小形の産業用タービンに比較して非常に多いため、それらの制限項目の監視を自動的に行ない、起動時に自動昇速装置(Automatic Speed Regulator, 略称ASR)とのインタロックを組み、運転の省力化を意図する大規模なものが一般的である。しかし産業用小形タービンの場合には制限項目も比較的少なく、事業用なみの大規模なものでは設備費用上高価すぎる。このような場合にガバナにEHGを採用して簡単な自動化を図ることは非常に有効な手段であると思われる。ただ、産業用タービンの場合は、定検時以外はほとんどタービンを停止させることがないため、特に毎日停止や週末停止などの起動停止の多いプラントに適用したほうがその威力は大きい。もちろん事業用大形タービンの場合でも、EHGを用いることによって自動化を行なうほうが、EHGの原理上有利であることは明らかである。

なお、EHGの概要については、これまで種々発表されているので本文では省略する。最後に文献をあげるので参考とされたい。

### 3. EHGの採用例

#### 3.1 主蒸気流量一定制御の抽気背圧タービンへの適用

この採用例は製鉄プロセスにおけるボイラとの組み合わせを目的として計画されたものである。タービンの仕様は下記のようなものである。

出力	22,600 kW (2台)
回転数	3,600 rpm
形式	抽気背圧タービン
主蒸気条件	99 kg/cm <sup>2</sup> G
抽気条件	30K系へ送気

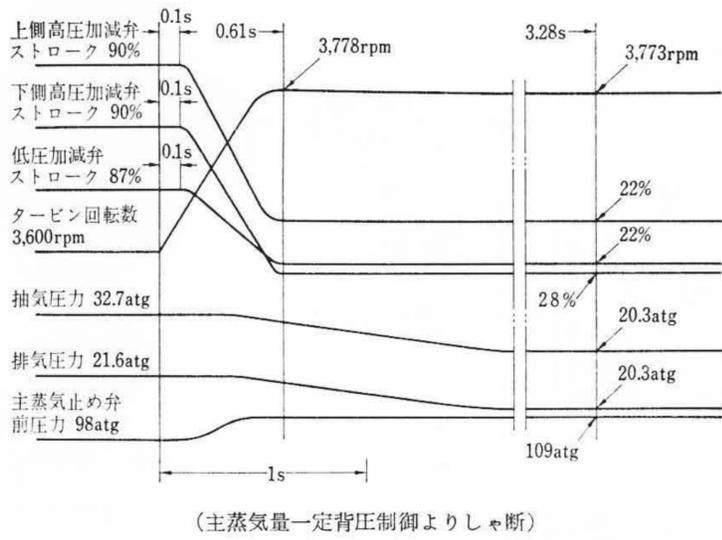


図3 新日本製鉄株式会社広畑製鉄所納 22,600 kW タービン, 4/4 負荷しゃ断試験

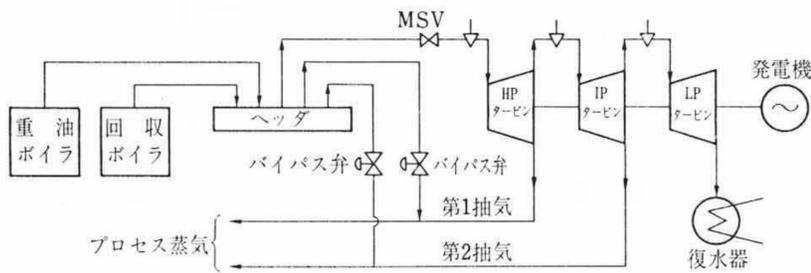


図4 プラント系統概略図

る。この図から EHG の応答の良さが明らかである。

3.2 主蒸気圧力制御を必要とするタービンへの適用

製紙プラントにおいては、通常回収ボイラと重油ボイラの2箇(かん)あるいは数箇を併列に接続して運転する場合が多い。回収ボイラを設置する目的は、薬品の回収および黒液中の熱量の回収であり、パルプ製造過程における廃液をエバポレータで濃縮した黒液を燃焼して蒸気を発生するボイラである。したがってパルプ製造設備の操業の度合いによって発生蒸気量は左右され、燃料制御が困難であるので、通常運転時のプロセス蒸気の負荷変動は重油ボイラで受け持つことになり、主蒸気圧力制御は重油ボイラによって行なわれる。このような状態においては、従来より MHG によって行なわれていた通常のタービン制御方式でもなんらさしつかえない。しかしながら重油ボイラが定検や故障修理のために停止している場合には、回収ボイラのみでの運転となり、ボイラ側で主蒸気圧力を制御することは困難である。したがってタービン側で常時主蒸気圧力を制御する必要が生じてくる。主蒸気圧力をタービン側で制御するためには、それまで制御していた抽気圧力あるいは排気圧力などの制御量のうち一つを制御除外しなければならず、このために各種の運転モードが生じ、運転モード間の切換えなども必要となる。

図4は製紙プラントに適用された二段抽気復水タービンのプラント系統概略図を示したものである。タービン仕様は下記のとおりである。

出力	29,000 kW
回転数	3,000 rpm
形式	二段抽気復水タービン
主蒸気条件	75 kg/cm <sup>2</sup> G
抽気条件	第1抽気 12K系へ送気 第2抽気 3K系へ送気

このタービンは東北製紙株式会社秋田工場に納入されるもので、現在試運転中である。

表3はこのプラントの運転モードを示したものである。回収ボイ

表3 運転モード表

運転モード	制御方式	主蒸気圧力	第1抽気圧力	第2抽気圧力	回転数	備考
1	抽気圧力-回転数制御	×	○	○	○	通常運転
2	主蒸気圧力-抽気圧力制御	○	○	○	×	主蒸気圧力低下時モード1より自動切換
3	抽気圧力-回転数制御	×	○	○	○	モード1, 2より解列した場合
4	主蒸気圧力-第2抽気圧力-回転数制御	○	×	○	○	重油ボイラ停止時
5	主蒸気圧力-第2抽気圧力-回転数制御	○	×	○	○	モード4より解列した場合

○印……制御すること ×印……制御しないことを示す

ラと重油ボイラが併列運転中の場合には、通常の制御である第1抽気圧力、第2抽気圧力および回転数(出力)を制御する運転モード1に示す運転が行なわれる。運転モード2は、運転モード1で運転中なんらかの原因で重油ボイラがトリップして主蒸気圧力が規定値以下に下がった場合に自動的に切換わる運転で、主蒸気圧力、第1および第2抽気圧力を制御し、回転数制御は除外され、電力負荷は回収ボイラへ供給される黒液の量によって決められる。

運転モード3は、前記運転モード1, 2で運転中系統解列した場合のモードであり、回転数制御を最優先する回路構成である。

運転モード4は重油ボイラの計画停止時(たとえば定検中)に使用されるモードである。すなわち運転モード2の場合の主蒸気圧力は、定格圧力よりある程度下がった圧力で制御されるのに対して、この運転モードでは、主蒸気圧力設定値を定格圧力まで上昇させて運転することが可能となっている。また第1抽気圧力制御は除外され、第2抽気圧力と回転数が、主蒸気圧力と同時に制御される回路構成である。

運転モード5は、モード4より系統解列した場合の運転であり、単独運転においても主蒸気圧力、第2抽気圧力および回転数を制御できるのが特長である。図5は以上の制御を行なうための制御ブロック図である。

図6は、同じく製紙プラントに採用された抽気背圧タービンのプラントの系統概略を示したものである。タービンの仕様は下記のとおりである。

出力	23,000 kW
回転数	3,000 rpm
形式	抽気背圧タービン
主蒸気条件	60 kg/cm <sup>2</sup> G
抽気条件	10K系へ送気
排気条件	2K系へ送気

本タービンは、十條製紙株式会社石巻工場へ納入されたものであり、前述の二段抽気復水タービンと同様、回収ボイラと重油ボイラの組み合わせである。本タービンの運転は表4に示すような四つの運転モードを有している。

運転モード1は、回収ボイラと重油ボイラ双方が運転されている場合のもので、従来より行なわれている抽気圧力と排気圧力制御運転であり、最も使用頻度(ひんど)の多い運転モードである。

運転モード2は運転モード1の状態、たとえば重油ボイラが危急停止し、主蒸気圧力が規定値以下に下降した場合に自動的に切換えられる運転モードであり、主蒸気圧力と排気圧力を制御し抽気圧力制御は除外される。

運転モード3は、重油ボイラ計画停止時に使用されるモードであり、主蒸気圧力設定を定格圧力まで上げ、定格圧力近傍での主蒸気圧力制御と排気圧力制御を行なう運転モードである。

運転モード4は、上記すべての運転モードから、系統解列した場

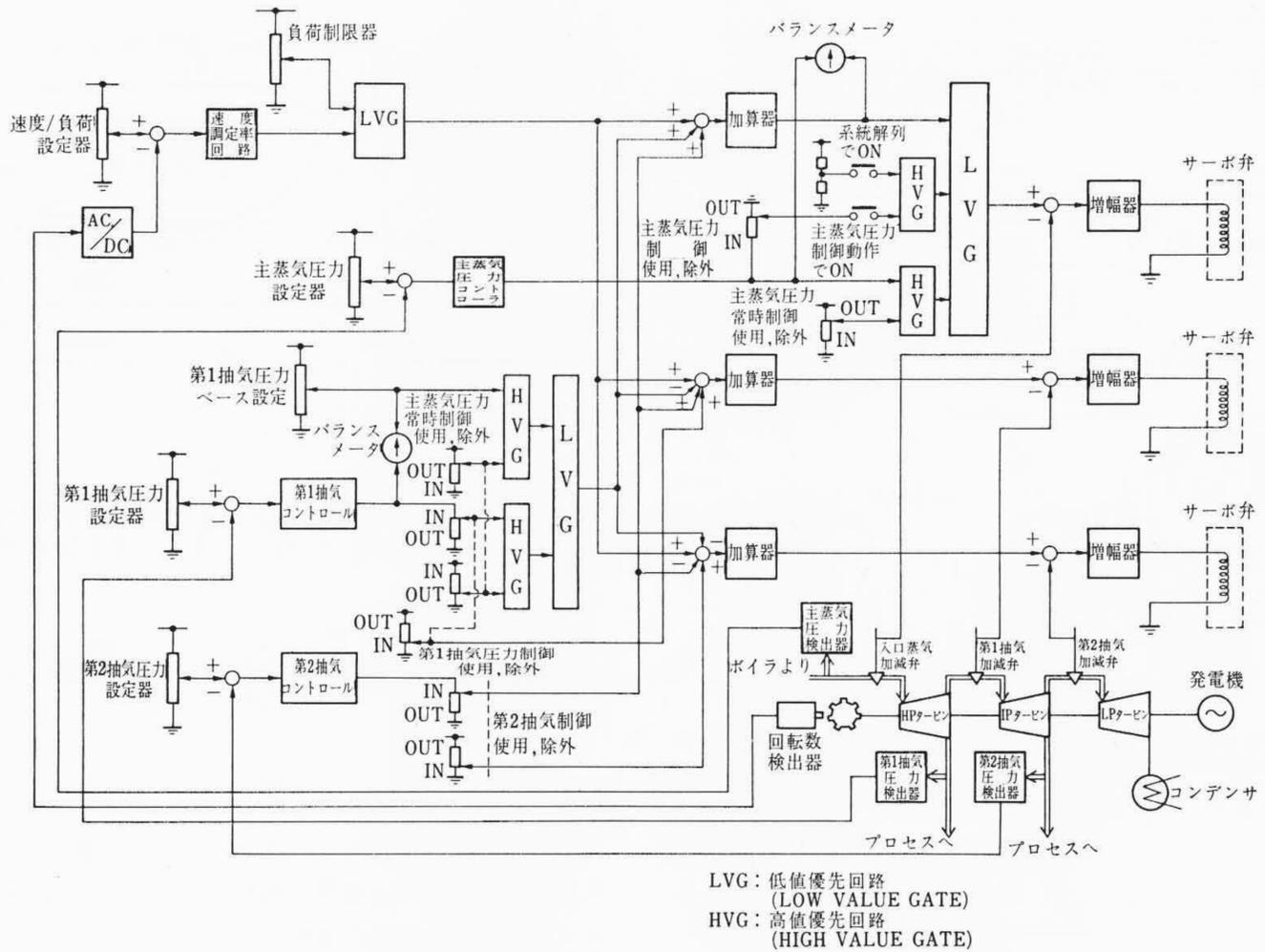


図5 制御ブロック図

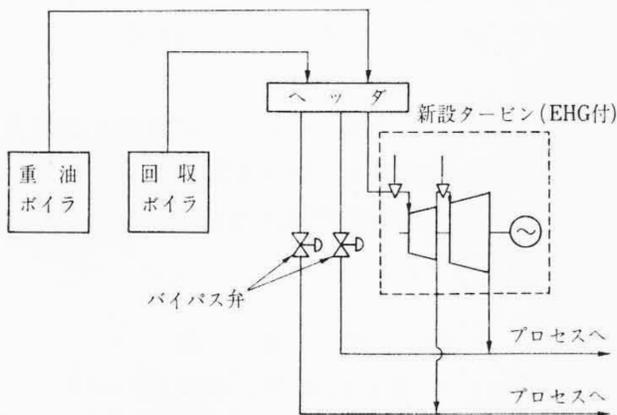


図6 プラント系統概略図

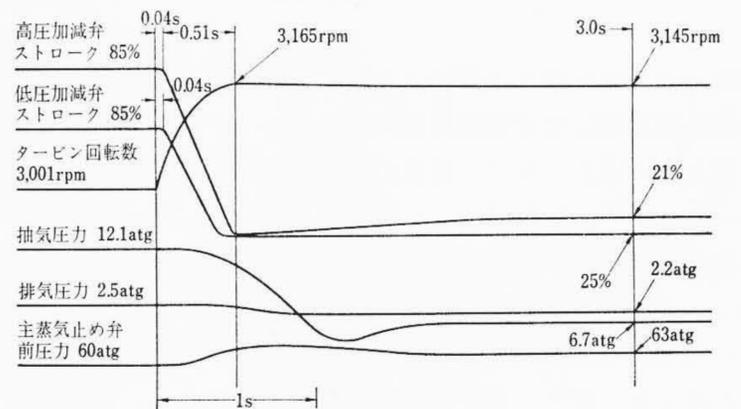


図7 十條製紙株式会社石巻工場納  
2,300 kW タービン, 4/4 負荷しゃ断試験

表4 運転モード表

運転モード	制御方式	主蒸気圧力	抽気圧力	排気圧力	回転数	備考
1	抽気圧力-排気圧力制御	×	○	○	×	通常運転
2	主蒸気圧力-排気圧力制御	○	×	○	×	1で運転中主蒸気圧力規定値以下で自動切換
3	主蒸気圧力-排気圧力制御	○	×	○	×	重油ボイラ停止時手動切換
4	回転数制御	×	×	×	○	系統解列時

合に自動的に切り替わり、タービンが異常に過速するのを防止するモードである。

本プラントは1971年6月無事営業運転を開始した。参考までに定格負荷よりの負荷しゃ断試験の結果を示すと図7のようになる。

以上述べてきたようにEHGを用いることによって、タービンが連絡されるプラントの特性に合った各種の変則運転が可能になったわけで、プロセスプラントの効率的な運用や、運転面に対して大きな貢献を与えるものと信ずる。

3.3 自動化への適用

近年人手不足の傾向が強まり、これに対処するため各産業で省力

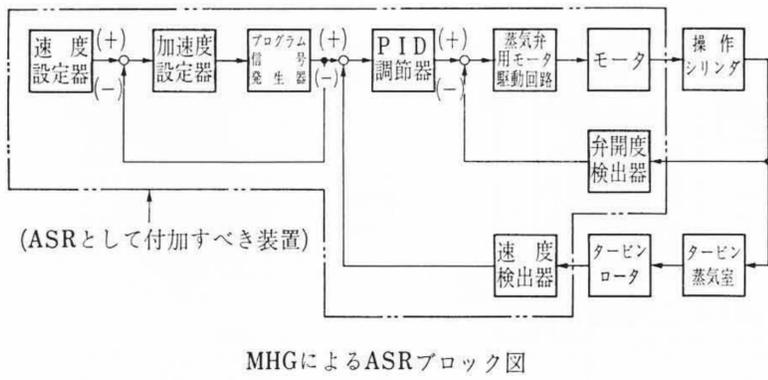
化、自動化についての要求が出されることが多い。この場合、EHGは単にタービンガバナとして使用されるばかりでなく、自動化のための有効な器具(TOOL)として用いることができる。以下、プリヂストーンタイヤ株式会社彦根工場納めの例をとり内容を説明する。本プラントは週末停止を原則としており、その起動の煩雑さを除くために、部分自動化の採用となったものである。タービンの仕様は下記のとおりである。

- 出力 5,200 kW
- 回転数 3,600 rpm
- 形式 抽気背圧タービン
- 主蒸気条件 80 kg/cm<sup>2</sup>G
- 抽気条件 17K系へ送気
- 排気条件 10K系へ送気

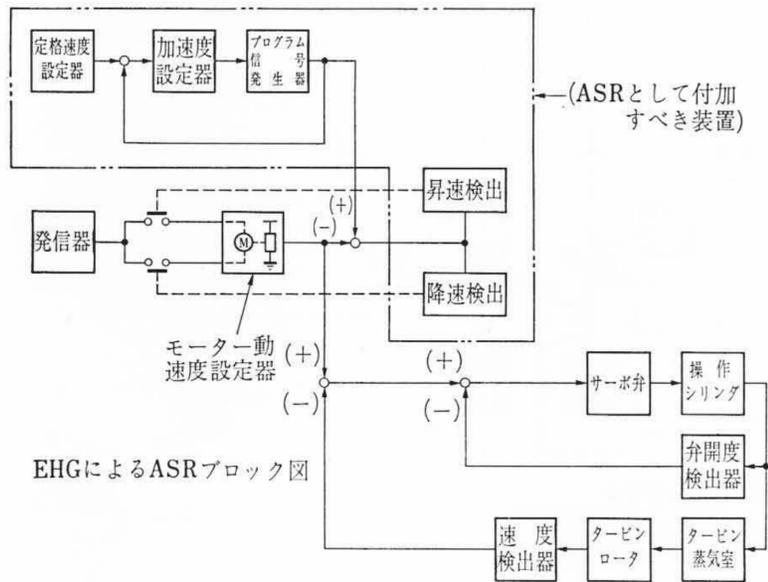
自動化の範囲は次のようなものである。

- (1) タービントーニング速度から、定格速度までの自動昇速
- (2) 自動同期
- (3) 自動初負荷確立

などである。タービンが初負荷を確立するまでに、運転員の行なう



MHGによるASRブロック図



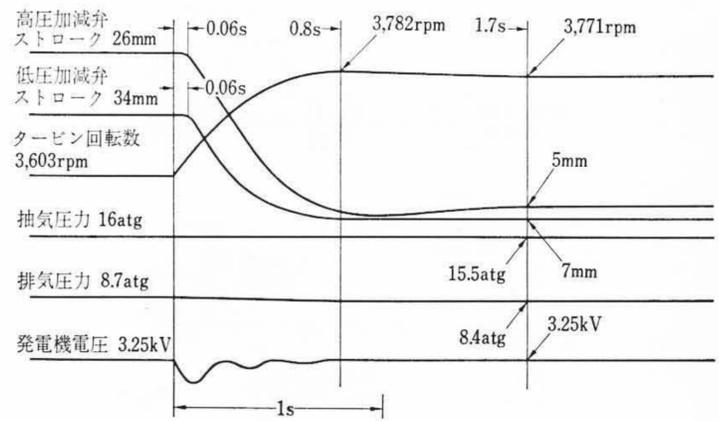
EHGによるASRブロック図

図8 電子油圧式ガバナ(EHG)と機械油圧式ガバナ(MHG)の自動起動装置(ASR)比較

操作は、タービン第1段後のメタル温度から昇速モードの選択を行ない定格速度付近で発電機界磁回路を生かし、自動電圧調整器を自動位置とすることのみで、従来の手動操作に比べて大幅に簡略化されている。

このようにタービンを自動昇速するASR機能をMHGに付加した場合とEHGに付加した場合の比較をブロックで表わすと図8のようになる。この比較図からも明らかなように、EHGに付加する場合のほうが、はるかに少ない部品数で構成される。したがって信頼性の向上が期待でき、またサーボ弁という高精度の部品を使っているために制御性能が大幅に向上する。

本タービンは1970年6月営業運転を開始し、現在まで好調に運



(抽気背圧運転)

図9 プリヂストンタイヤ株式会社彦根工場納5,200kWタービン、4/4負荷しゃ断試験

転継続中である。図9は定格負荷しゃ断試験の結果を示すものである。

#### 4. 結 言

以上述べてきたように、蒸気タービンの新しい制御方式である電子油圧式ガバナは、事業用大形タービンへの適用はもちろん産業用タービンへもその利点を生かして各種の応用が可能である。今後産業用火力発電プラントにおいても、その特殊性に合ったタービン制御によって、最大のプラント効率(熱経済的にも省力化においても)の運転を行なうために、ますます電子油圧式ガバナの採用が増加し、電子油圧式ガバナがタービン制御の主流を占める日が近いことが予測される。

最後に電子油圧式ガバナの採用にあたりご理解とご協力を賜ったプリヂストンタイヤ株式会社、新日本製鐵株式会社、十條製紙株式会社および東北製紙株式会社の関係者各位に深く感謝の意を表わす次第である。

#### 参 考 文 献

- (1) 柴藤, 有江ほか: 日立評論 51, 498 (昭44-6)
- (2) 柴藤, 有江: 計測と制御 8, 8 (1969-8)
- (3) 鈴木: 火力発電 21, 1 (1970-1)
- (4) 河竹, 前沢ほか: 火力発電 21, 60 (1970-6)