

蒸気タービン用デジタル式電子油圧ガバナ

Digital Electro-hydraulic Governor for Steam Turbine

日立製作所は、最近著しい進歩を遂げつつある小形電子計算機を応用した蒸気タービン用デジタル式電子油圧ガバナを開発した。昇速、負荷、調速機能などの制御機能を遂行するデジタルコントローラは二重化され、万一、制御側が故障しても待機側へ切り替えられ、連続的に制御機能を続行することができる。しかも、タービンの運転中に故障側コントローラの故障プリント板の種類、及び挿入位置を検査することが可能で、高いシステム信頼性及び保守性をもっている。制御機能はビルディングブロック構成のプログラムの形で、14種の基本機能のほか種々のオプション機能を備えており、従来のアナログ装置では困難であった複雑な機能をプログラムの処理して多様な顧客要請に応じられるよう設計されている。

東 敏彦* Higashi Toshihiko
 菊池 松人** Kikuchi Matsuto
 中野 善之*** Nakano Yoshiyuki
 浴 百合雄* Eki Yurio

1 緒 言

蒸気タービンの容量の増大とともに、タービンの安全性と負荷応答性はいっそう重要になり、その要請に応えるためガバナは機械式より電子油圧式におきかえられてきた。電子油圧式ガバナは現在、アナログ式が主流で日立製作所でも多数の装置を納入し、いずれも順調に稼動している。このような経験を通して制御アルゴリズムを遂行する電気部分、及び弁駆動装置、駆動用高圧油圧ユニットなど、機械部分は高い信頼性が保証されている。しかし、電力系統運用における火力プラントの責務が重大になるに従い、ますます複雑、多様化する制御に対処でき、しかも高い信頼性と保守性をもつシステムの開発が強く望まれている。そこで最近長足の進歩を遂げつつある小形電子計算機を応用した新しいデジタル式電子油圧ガバナ(以下、D-EHGと略す)を開発した。ここではD-EHGの概要と、併せてシミュレーション及びプロトモデルによる試験の結果について述べる。

2 制御機能

2.1 装置構成の概要

図1にシステム構成の概要を示す。同図は再熱タービンの例を示しており、D-EHGは主蒸気止め弁、蒸気加減弁及びインターセプト弁の開度を操作することにより調速、昇速制御及び負荷制御を行なう。主な入力信号は回転速度、各弁の開度、主蒸気圧力、第一段後圧力、再熱蒸気圧力、コンデンサの真空度及び発電機出力である。装置は二重系を構成するA系、B系のデジタルコントローラと共通部の3面で構成され、これにオペレータズコンソールが付属する。

2.2 制御機能

図2にD-EHGの機能及び電気-機械のインタフェースを、表1に各機能ブロックの内容を示す。これらの機能は、デジタルコントローラのメモリにプログラムの形で記憶されており、次のような特長をもっている。

- (1) 各機能はビルディングブロック構成のプログラムになっており、個々のタービンに応じて必要なブロックを選択し、システム構成することができる。
- (2) 弁管理機能など、従来のアナログ装置では非常に複雑になったものが、プログラムによる処理により簡単にできる。

(3) 豊富なオプション機能をもっている。例えば、弁テスト時の出力低下補償、オペレータズコンソールの各種設定、負荷制限器の自動追従、タービン熱応力管理機能との連動、上位計算機との連動などがある。

このような機能は、タスクと呼ばれるプログラムと、これらのタスク群を適当なサンプリング周期で起動し管理する管理プログラムとにより実行される。なおメモリ容量は、オプションを除く基本機能で約8K語である。

3 ハードウェア

3.1 概 要

図1に二重系を中心とするハードウェア構成を示す。D-EHGの心臓部である電源、デジタルコントローラの中央処理装置(以下、CPUと略す)及びプロセス入出力装置(PI/O)は二重化(A系、B系)され、またオペレータズコンソールとのインタフェース(押しボタンスイッチによる指令及び表示)はA系、B系の二組み設けられている。回転速度信号、弁開度信号、圧力信号などタービンからの入力信号はA系、B系へ振り分けられ、弁駆動信号のようなタービンへの出力信号はA系、B系のどちらかの信号を切り替え、出力している。

電源は信頼性を高めるために、A系、B系とも各々交流、直流電源が同時に入力でき、常時は交流電源を使用し、交流電源断の場合、直流電源がバックアップし、連続的に電源を供給できる方式としている。

パワーロードアンバランスリレーは、タービンへの機械入力に比例した再熱蒸気圧力と電気出力に比例した発電機電流の差を検出して、過速を防止する保護装置であり、多重化による高信頼度を得るためデジタルコントローラとは別系統で、部品数が非常に少ない高信頼度アナログ回路を2 out of 3構成にして用いている。

図3にD-EHGの外観を、図4に典型的なオペレータズコンソールを示す。

3.2 弁駆動部

各弁の駆動部は、油圧シリンダ、サーボ弁、電磁弁及びトリップ用ダンプ弁から構成されている。図2は蒸気加減弁とインターセプト弁の弁駆動油圧系統を示すものである。各弁

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所

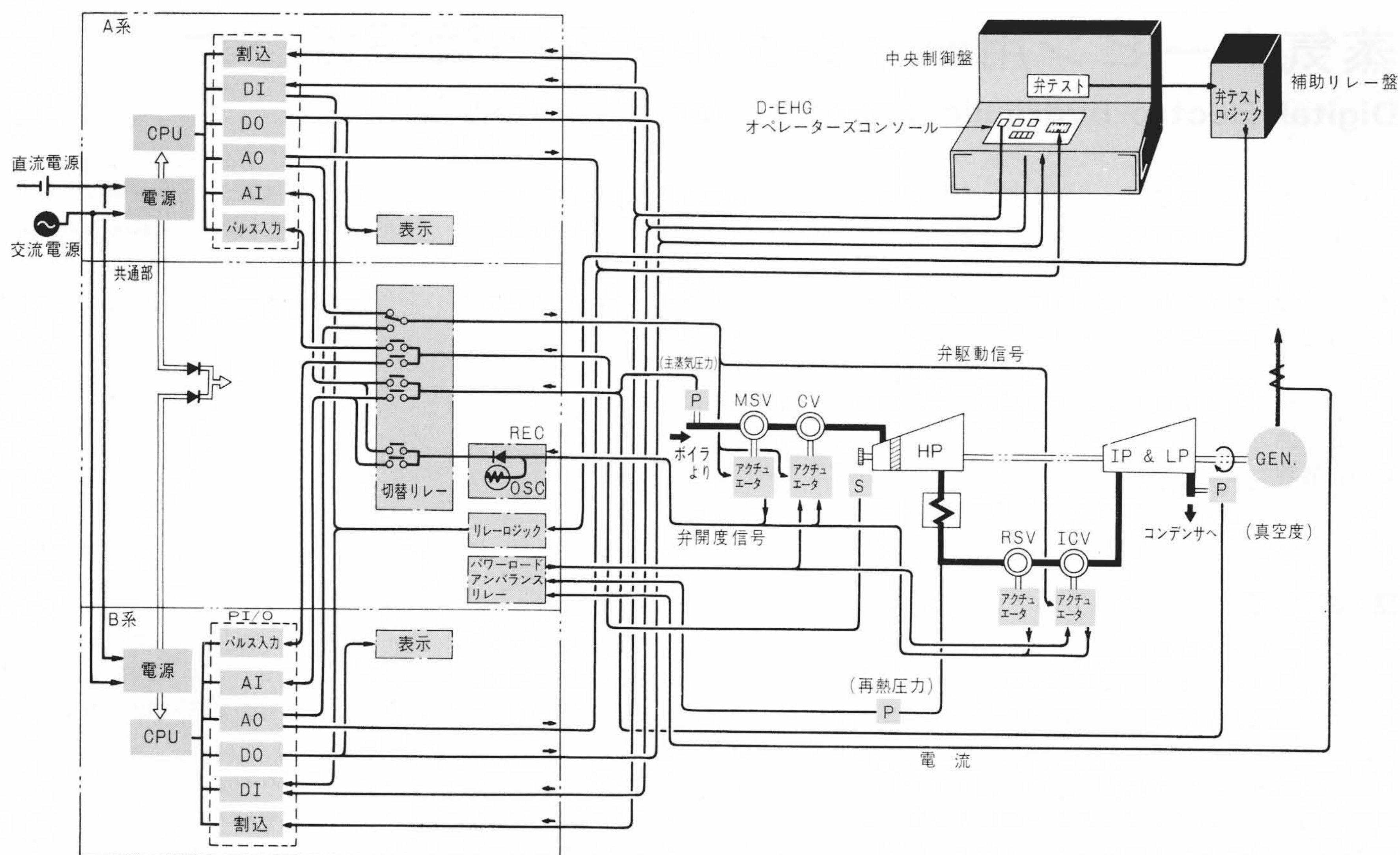


図1 システム構成及びD-EHGハードウェア構成 D-EHGはデジタルコントローラを含むA系，B系及び共通部から構成される。

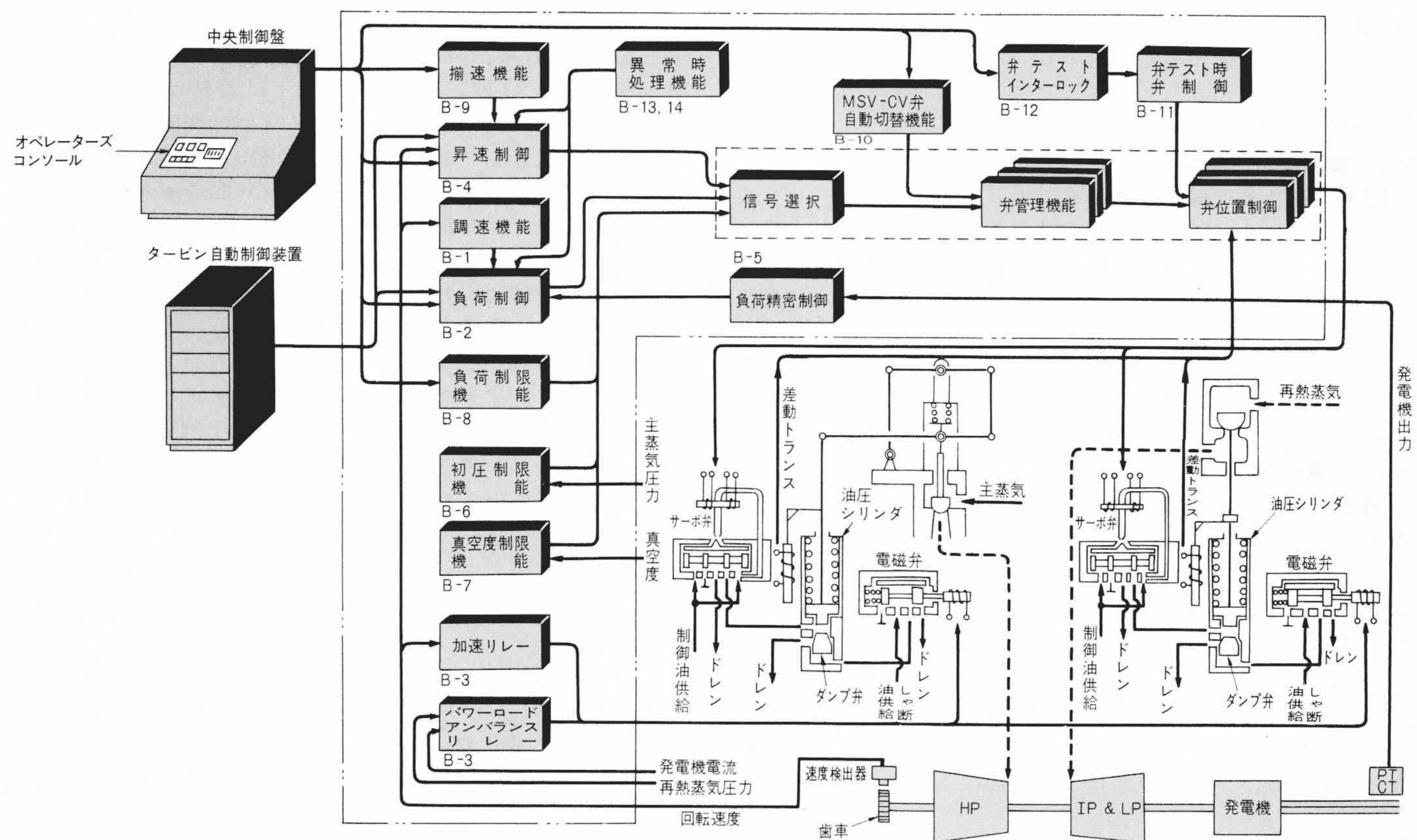


表1 D-EHGの基本機能 D-EHGの基本機能は14項目である。

項目	機能No.	機能名	機能の概要
1	B-1	調速機能	基準(定格)速度値、実際の(検出された)速度の偏差の量及び規定された速度調定率によってタービン出力(蒸気流量)を制御する機能で、タービンの調速機として最も基本的な機能である。
2	B-2	負荷制御	目標負荷値、負荷変化率を外部(例えばオペレーターズコンソール上からスイッチ操作により)から与えられてタービン出力を制御する機能である。
3	B-3	弁急閉制御 (パワーロードアンバ ランスリレー 加速リレー)	タービン発電機の負荷が急激にしゃ断された場合に、止め弁、制御弁を急激に閉じて、タービンの速度上昇を防止する機能である。
4	B-4	昇速制御	タービンの速度を零速度から定格速度まで昇速する機能である。
5	B-5	負荷精密制御機能	タービン発電機の出力を負帰還して、主蒸気条件(圧力、温度)の変化を受けないようにタービン発電機の出力値を規定値に制御する機能である。
6	B-6	初圧制限機能	主蒸気圧力が低下したとき、タービン発電機の出力を限定する機能である。
7	B-7	真空度制限機能	コンデンサの真空度が低下したとき、タービン発電機の出力を限定する機能である。
8	B-8	負荷制限機能	タービンの調速機能(B-1)、負荷制御(B-2)による制御値とは、独立にタービン発電機の上限值を限定する機能である。
9	B-9	揃速機能	電力系統にタービン発電機を併入する場合の速度の微調整機能である。
10	B-10	MSV-CV弁 自動切替機能	主蒸気止め弁、バイパス弁自動起動方式を採用したタービンに関して、タービン出力が20%程度のときバイパス弁と蒸気加減弁の切替を自動的に行なう機能である。
11	B-11	弁テスト時の弁制御	主蒸気止め弁、蒸気加減弁、再熱止め弁などの開閉テストを行なう場合に、タービン補助リレー盤などD-EHG盤の外部で弁テストのためのインターロック条件が構成され、閉接点が渡された場合、弁テストに適した速度で弁を閉路する。
12	B-12	弁テスト インターロック機能	主蒸気止め弁、蒸気加減弁、再熱止め弁などの開閉テストを行なう場合に、2個以上の同時閉動作の防止用インターロック、などのシーケンス機能を含む弁テスト機能である。
13	B-13	タービン異常発生時の 昇速制御	タービンを昇速する場合、(B-4)、タービン危険速度範囲において、振動発生を条件として、タービン速度を安全領域までランバック、あるいは昇速するような自動制御機能である。
14	B-14	タービン関連機器異常時の 負荷ランバック	発電機固定子の冷却水が断水したなど、タービン関連機器が異常となったとき、タービンの出力を降下させる機能である。

駆動部へきた高圧制御油はシャットオフ弁を通り油圧シリンダに送られるが、蒸気加減弁など制御弁の場合は、D-EHG制御盤からの弁開度信号を油圧信号に変える電油変換サーボ弁を介し、止め弁の場合はテスト用電磁弁を介している。負荷しゃ断及びトリップ時はタービンの過速防止のために、各主蒸気弁に油圧シリンダ内の油を急速に排出させる。このため、



図3 D-EHGキュービクル キュービクルはA系、B系及び共通部の3面で構成される。

トリップ用ダンブ弁を設け閉弁時間を短縮している。また適宜、弁全閉テストを行なうことによりダンブ弁の動作確認ができる。

4 二重系

4.1 二重系の方式

高いシステム信頼度を得るために種々の方法を検討し、その中から二重系構成を採用した。この方式の特徴について次に述べる。

(1) 二重化の範囲

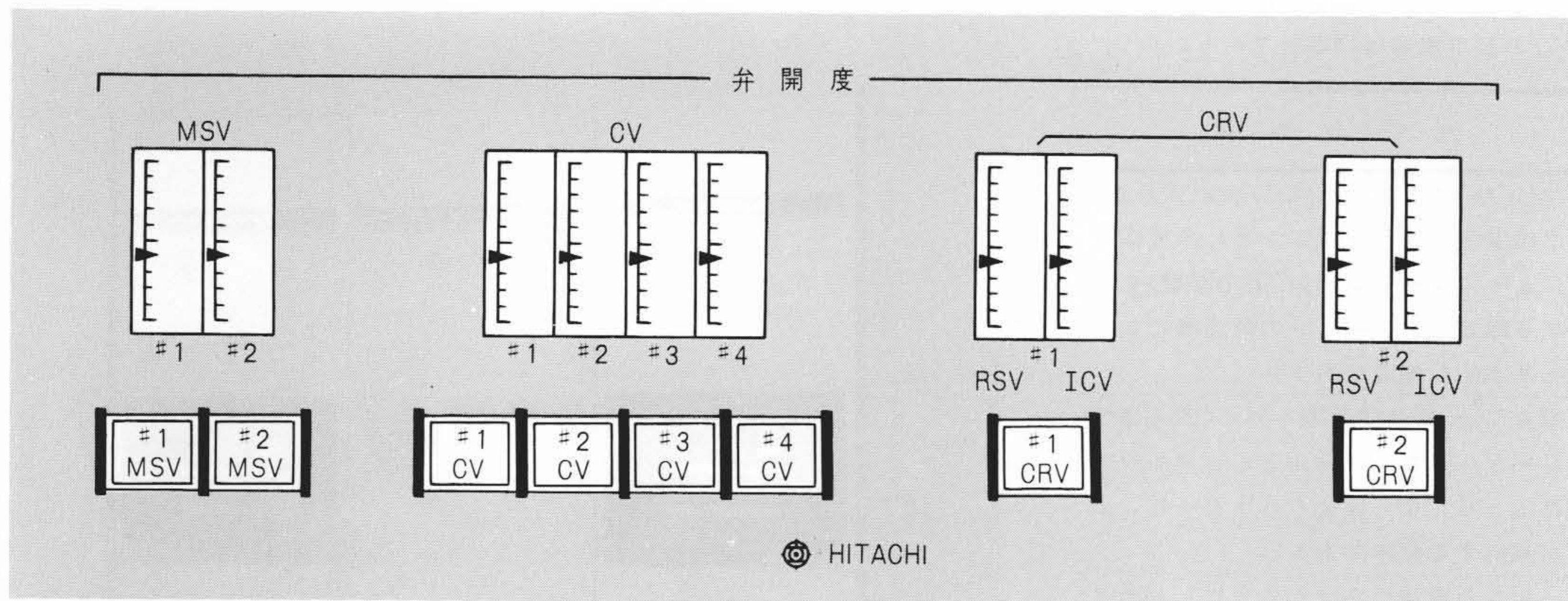
最近のエレクトロニクス技術の長足の進歩により出現したマイクロプロセッサは、部品の集積化によりシステム信頼度を飛躍的に向上するのに大きく寄与している。これにより、CPUはますます小形化するのに対し、プロセスPI/Oの小形化は難しく、CPUよりも相対的に故障率が高い。したがって、D-EHGではCPU、PI/Oを含めて二重化した。

(2) 保全系

A系が故障しB系に切り替わった場合、A系を修理し再び制御システムに復帰させ、B系の故障に備えることができれば保全系になり、システムのMTBF(平均故障間隔)は大きく向上する。したがって、D-EHGにおいても保全系を実現するため、運転中に故障側を簡単に切り離し、あるいは接続できる方式とし、更に保守用シミュレータを設けた。

(3) 切替方式

切り替わったときの制御の連続性を保つためにA系、B系とも常時入力を取り込み、演算するものとし、ただし、出力はA系、B系のいずれか一方からする方式とした。出力を切り替える手段としてA系、B系の出力を常時監視する方式と、各々の系に確実な故障検出機能をもたせる方式を検討し、同一効果に対しハードウェアの規模が比較的小さい後者の方式を採用した。



- 注：
1. 表示器付押しボタンスイッチ
 2. 表示器
 3. 2針メータ

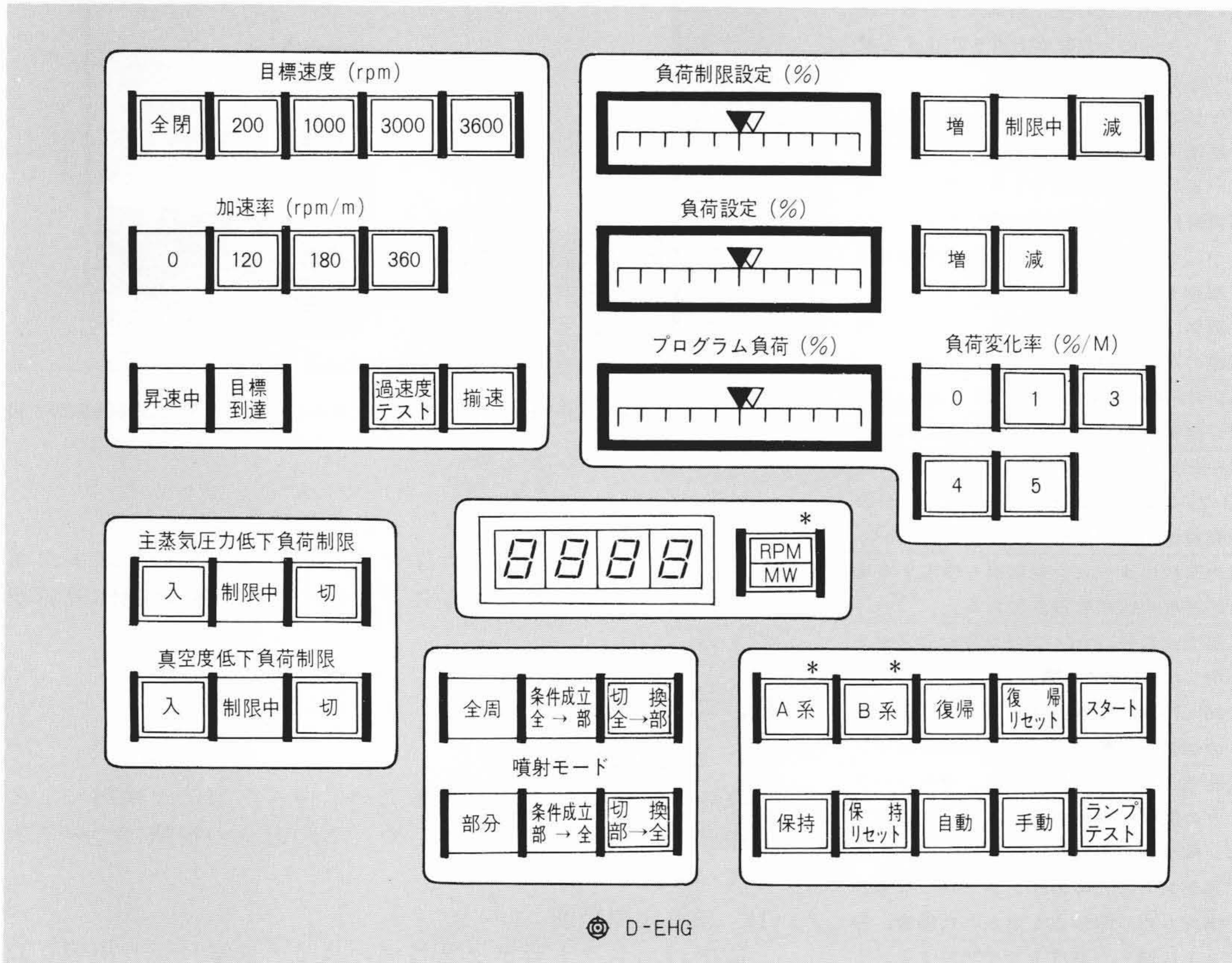


図4 オペレータズコンソール 標準オペレータズコンソールを示す。
図中*印以外のランプ表示は、上、下に分かれており各々A系、B系の状態を示す。

4.2 バンプレス(連続制御)切替

本装置の特長の一つは、A系、B系のうち一方が故障した場合でも、タービンを停止せず連続的に制御できることであるが、切替時に速度変動あるいは負荷変動があってはならない。本装置のように小規模のデジタルコントローラを使用する場合、2系間のメモリ内容の照合、プログラムの同期などを行なえば装置が複雑になるので、本装置では2系(A系、B系)が常時、独立に動作する方式とした。

しかし、昇速制御、負荷精密制御には比例・積分(PI)あるいは積分(I)演算を内部に含み、待機側は出力が開路になっているので、入力誤差などにより積分出力値はどんな値になるか分からない。

これに対処するため、負荷精密制御時の待機系の制御ループの構成方法を図5に示すようにした。すなわち、制御は発電機の出力を測定するPT(電圧変成器)、CT(電流変成器)からの信号を電力変換器で直流レベルに変換し、得られるアナログ信号 L_f と、オペレータズコンソールからの負荷設定値(目標負荷及び負荷変化率) L_s を読み込み、両者の偏差を

PI演算し、これを弁開度目標値とし弁の位置制御を行なうものであるが、待機側はPI演算をする代わりに弁開度の近似値として L_f の一次式をPI演算の初期値として待機し、切り替わった瞬間よりPI演算へ移行する。

このようにすれば、ほとんど変動なしに切替えが可能となる。なお図5中の一次式の定数 a 、 b は主蒸気圧力等のパラメータで変化する。

4.3 復帰方法

故障系の修理が完了した後、オンラインに復帰させる場合には、そのデジタルコントローラのデータメモリの内容を制御側のデータと一致させなければならない。

オペレータズコンソールの押しボタンスイッチの表示は上下2段に分かれており、上側はA系、下側はB系を示している。例えばB系を復帰させる場合は、上側が点灯している押しボタンスイッチを押すことによりA系、B系のデータメモリの内容を一致させることができる。

目標負荷設定値などアナログデータも同様にオペレータズコンソールからできる。

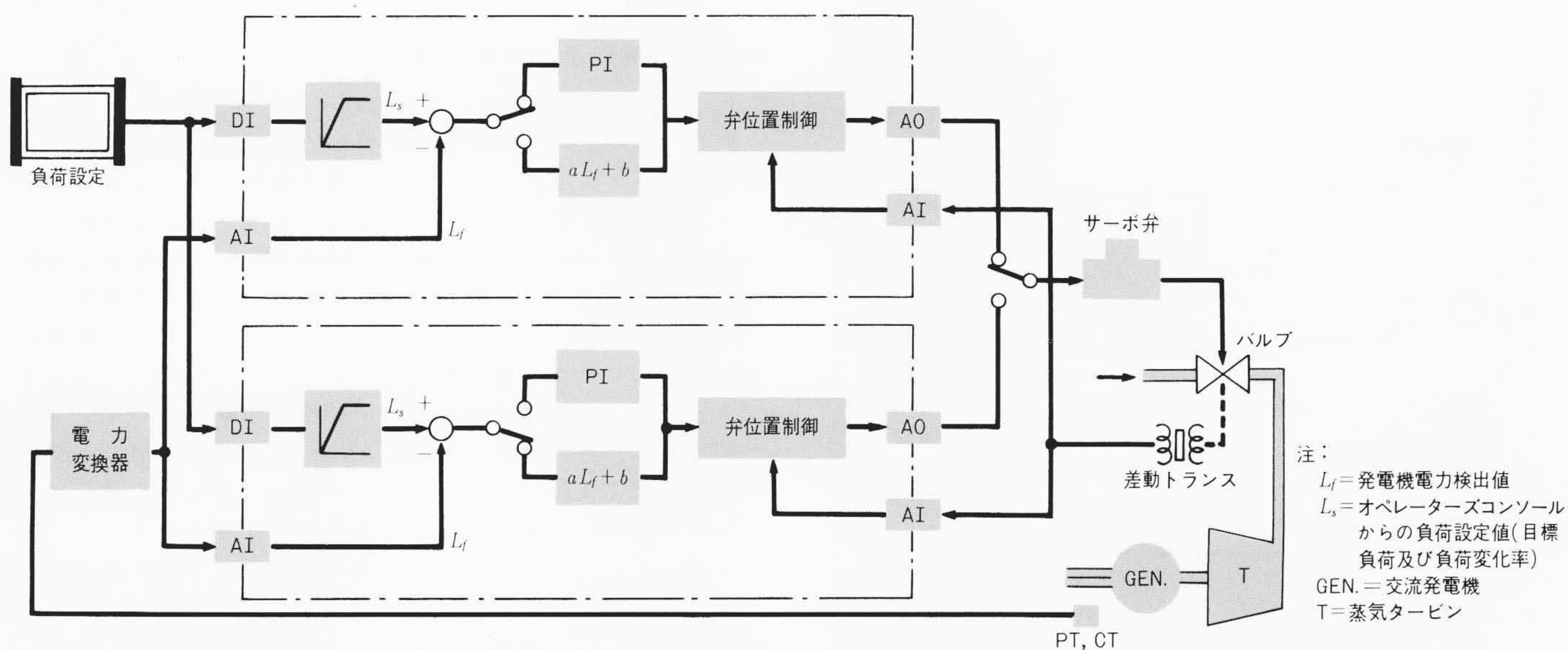


図5 切替方式例 負荷運転時におけるバンプレス切替を行なうための待機系の構成方法を示す。

5 保 守

5.1 保守に対する基本方針

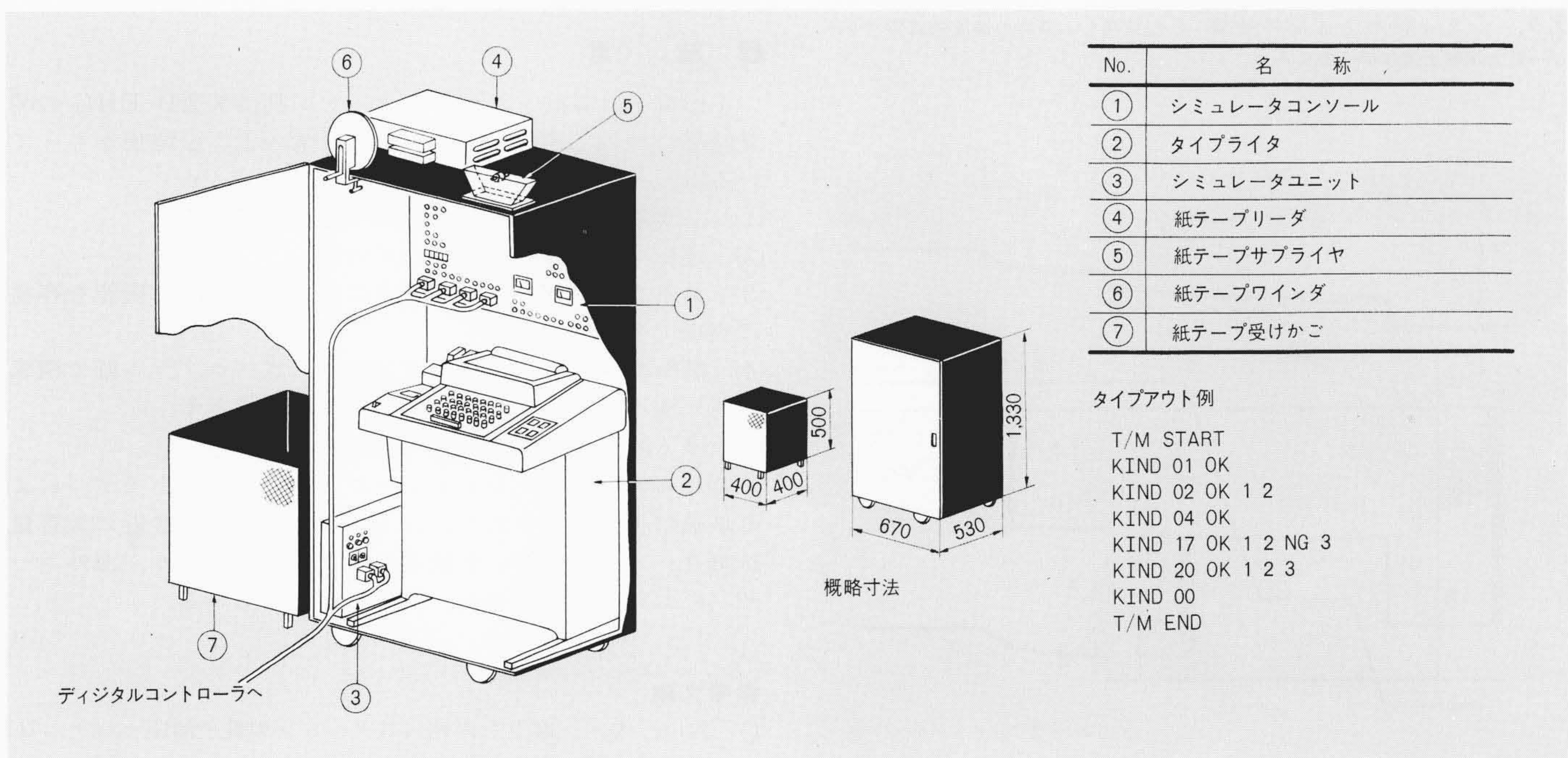
MTBF (平均故障時間) で代表されるシステム信頼度を向上させるには、一方がオンラインで動作中にも故障側のトラブルシューティング及び修理ができることが必要である。そのため、本装置では心臓部であるデジタルコントローラのトラブルシューティングを行ない、更にその結果による故障プリント板の交換後、総合的にタービン制御機能をチェックできる保守用シミュレータを準備するようにした。

5.2 保守の方法

保守用シミュレータの構成を図6に示す。主な構成要素はシミュレータコンソール、シミュレータユニット、タイプラ

イタ及び紙テープリーダーである。テスト用の T/M (Test & Maintenance) プログラムを動作させ、シミュレータコンソール、シミュレータユニットを操作し、デジタルコントローラのプリント板単位での良否のチェックを行なう。同図中のタイプアウト例に示すように T/M 開始信号を与えると T/M START KIND を印字し、保守員が T/M ナンバーをキー・インすると良い場合には OK、不良の場合には NG を印字する。PI/O のように同一種類のプリント板が複数枚ある場合はプリント板のナンバーも印字する。

上記の手順により不良プリント板交換後、簡単なタービンモデルを内蔵するシミュレータにより、機能チェックを行ない、その後、4. の二重系で述べた復帰方法によりオンラインに復帰させることができる。



No.	名 称
①	シミュレータコンソール
②	タイプライタ
③	シミュレータユニット
④	紙テープリーダー
⑤	紙テープサブライヤ
⑥	紙テープワインダ
⑦	紙テープ受けかご

タイプアウト例

T/M START
KIND 01 OK
KIND 02 OK 1 2
KIND 04 OK
KIND 17 OK 1 2 NG 3
KIND 20 OK 1 2 3
KIND 00
T/M END

概略寸法

図6 保守用シミュレータ タイプライタでテスト種類を指定すると、良否結果が印字される。またこれで、シミュレーションを行なうこともできる。

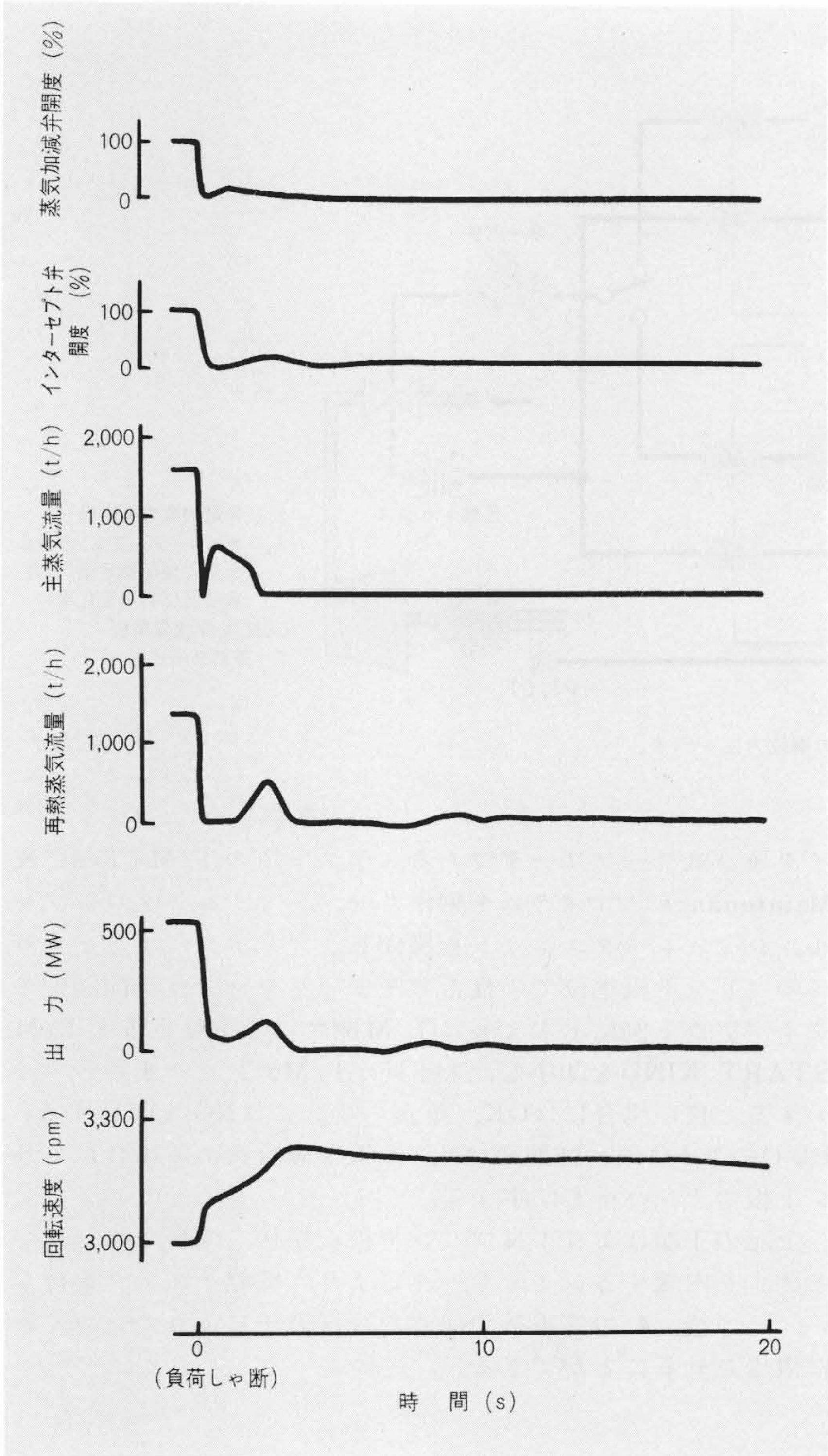


図 7 シミュレーションの結果 全負荷しゃ断時の速度制御特性を示し、最大速度上昇は約 7 % である。

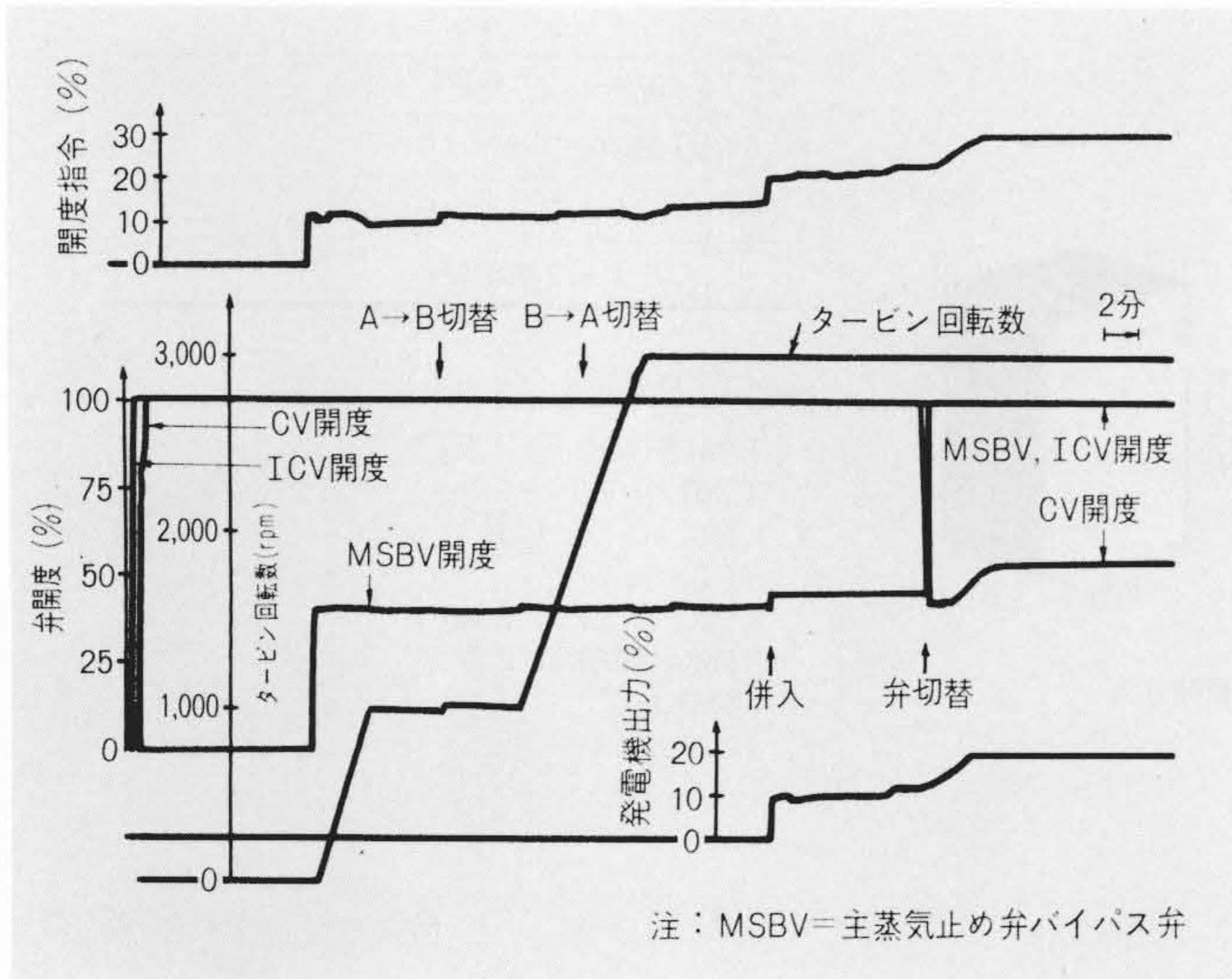


図 8 プロトモデルによる試験結果 昇速、負荷上昇特性及び二重系切替、弁切替の結果を示す。

6 制御機能及び性能の確認

6.1 シミュレーションによる解析

新しいガバナの制御機能及び性能を確認するために、コンピュータシミュレーションによる特性解析と、プロトモデルによるテストを実施した。シミュレーションによる検討は、実機テストの場合のような種々の制約がないので詳細な解析が可能となり極めて有効かつ重要である。このほど開発したシミュレータは、アナログコンピュータでタービンの線形かつダイナミックな特性を模擬し、またデジタルコンピュータでタービンの非線形特性とガバナ特性を模擬するハイブリッド型である。特にタービンモデルは、2. で述べた新しい制御方式の効果を実証するために、その制御に関連するタービン特性を定量的に詳細に模擬できるものになっている。

このシミュレータを使って、タービンの種々の運転モードにおける制御特性を解析し、ガバナとしての機能、性能を確認するとともに、制御パラメータの最適値を決定した。図 7 は、ガバナの重要機能の一つであるタービン負荷しゃ断時の速度制御のシミュレーション結果を示すものである。この例は速度制御にとって最も過酷な全負荷しゃ断の場合であるが、速やかな蒸気加減弁とインターセプト弁の協調制御により、最大速度上昇は非常调速機が作動する定格速度の 110～111% に対し余裕をもってしかも安定に制御されている。

6.2 プロトモデルによる試験

図 8 に D-EHG のプロトモデルによる昇速、負荷上昇試験結果の一例を示す。すなわち、昇速過程において 1,000 rpm で保持し、この保持中に切替の連続性を確かめるため故意に A 系から B 系へ切り替え、また 1,000 rpm から 3,000 rpm へ一定の加速率で昇速中にも B 系から A 系へ切り替えを行ない、更に定格 3,000 rpm に達した後、系統への併入、一定の初負荷(約 10%)、弁切り替及び、一定の負荷変化率での負荷上昇を行なったものである。同図中にはそれに伴う各弁の開度変化も示してある。試験は、更に各種ケースの昇速、負荷上昇、負荷しゃ断などを行ない、万全な制御機能を確認し、また信頼性試験により信頼性を確認した。

7 結 言

小形電子計算機を活用したタービン制御装置 D-EHG の開発結果について述べた。この装置は次のような特長を持っている。

- (1) 二重系構成により高信頼度を達成している。
- (2) 運転中の保守を可能としている。
- (3) ストアードプログラム方式により高度の制御機能を容易に実現できる。
- (4) 制御機能はビルディングブロック式プログラム群で構成され、個々のタービン仕様に柔軟に対応できる。
- (5) 多くの自動化機能を含んでいる。

これらの特長は、シミュレーション及びプロトモデルによる試験により確認された。以上のように装置は最近の大容量蒸気タービンの制御に合致した特長を備えており、海外ユーザーにおいても注目され、関心を持たれている。

参考文献

- 1) 内山、安元、岸上：再熱蒸気タービン用電子油圧ガバナ、日立評論、53、219 (昭46-3)
- 2) 二宮、今井、安元ほか 2 名：3,000rpm 175,000kW 低圧 1 車室 4 流排気形、日立評論、56、307 (昭49-4)