

大容量タービンデジタル制御システム

Digital Control System for Large-capacity Steam Turbines

本田 永信* Naganobu Honda
桑島 英純** Hidesumi Kuwashima

電力系統運用の多様化と蒸気タービンの大容量化に伴い、タービン制御システムには従来にも増して高度な制御機能、高い信頼性が要求となってきた。これを実現するには、判断能力と記憶能力に優れたデジタルコントローラの導入が不可欠であり、デジタル制御技術の適用拡大を図ってきた。

このたび、デジタルコントローラの特長を生かし各種制御機能を充実させるとともに、部分二重化から三重化までの高信頼度多重化システムのラインアップを完成させた。また、高速性と可視性を同時に満たすプログラム言語を開発した。

以上の高機能・高信頼化タービン制御システムは、他のデジタル制御システムと有機的に組み合わせることによって、プラント全体の性能、信頼性の向上に大いに寄与するものと考えている。

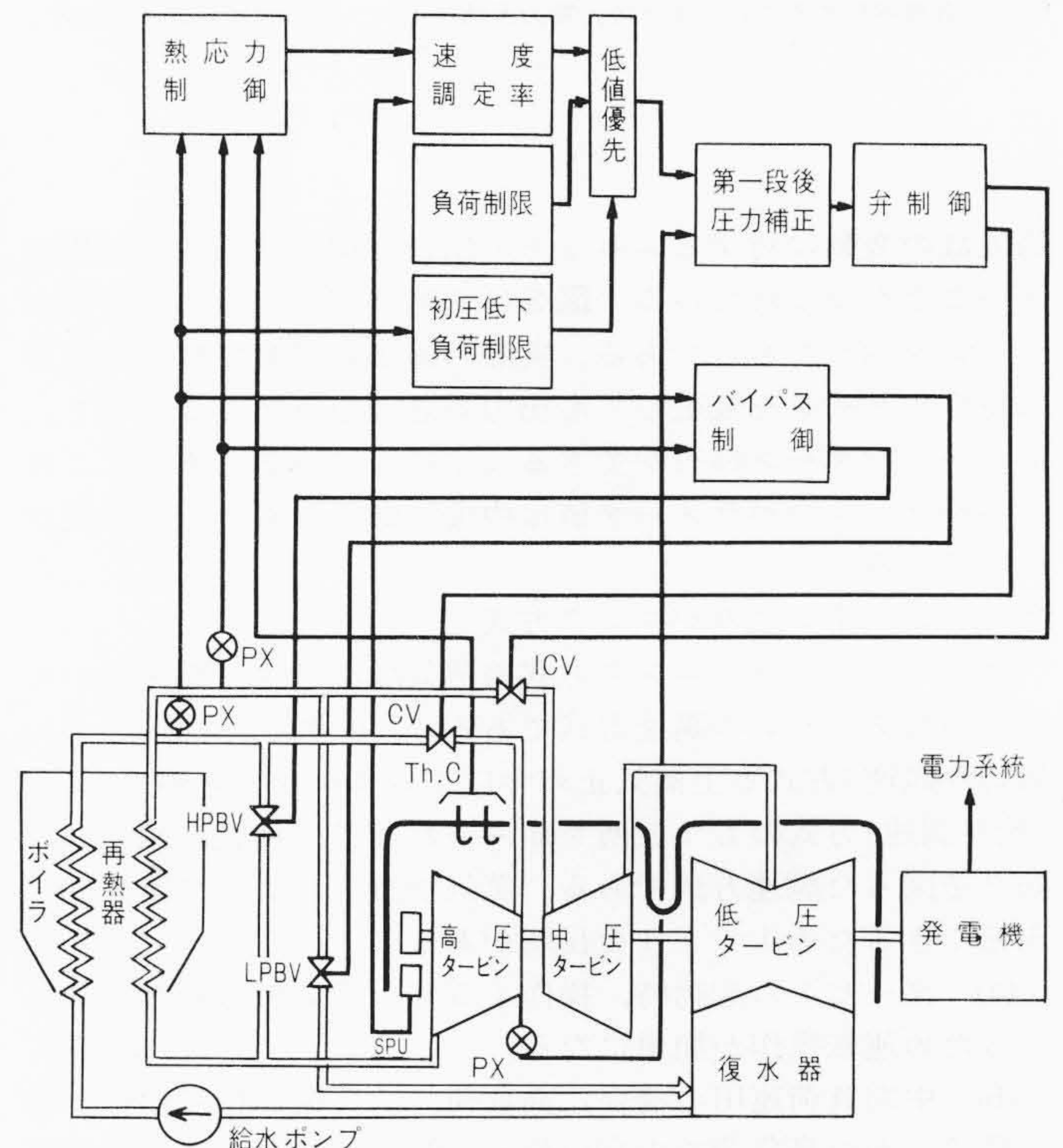
1 緒 言

近年、火力発電プラントの中間負荷運用、原子力発電プラントの負荷変更運転など、電力系統運用は従来にも増して多様化してきている。一方、単機容量の増大によって制御システムには更に高い信頼性が要求されている。日立製作所では、1977年にデジタルコントローラを採用した世界最初のD-EHG(デジタル式電子油圧カバナ)^{1),2)}をはじめ、タービンロータの熱応力を予測し制御を行なうHITASS(タービン自動制御装置)^{3)~5)}、タービンバイパス制御装置など、機能、性能、信頼性の高度化を指向しながらデジタル制御システムを発展させてきた。

以下、最近のタービン制御技術の動向とデジタル制御装置について概説する。

2 最近のタービン制御技術

電力系統運用の多様化によって、起動時間の短縮、負荷追従性の向上、ローカル負荷変動の吸収など各種の要求があり、**図1**に示すような技術課題に対処してきた。以下、**図2**に示すシステム概要を参照のうえ、その内容について述べる。タービン制御装置は、蒸気加減弁、インターセプト弁を操作して、タービンへの流入蒸気量を調節しタービン回転数、発電



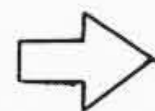
注：略語説明 CV(蒸気加減弁)、ICV(インターセプト弁)、HPBV(高圧タービンバイパス弁)、LPBV(低圧タービンバイパス弁)、SPU(速度検出器)、PX(圧力検出器)、Th.C(サーモカップル)

図2 タービン制御システムの概要 タービン制御装置は、蒸気加減弁のほか各種制御弁を操作し、タービン回転数、発電機出力、蒸気圧力などを制御する。

システムへの要求

対 応 策

系統運用の多様化
● 起動時間短縮
● 負荷追従性向上



可変速度調定率
コンバインドガバニング
中圧タービン起動
タービンバイパス
ロータ熱応力管理

稼働率向上



システム多重化
診断能力の向上

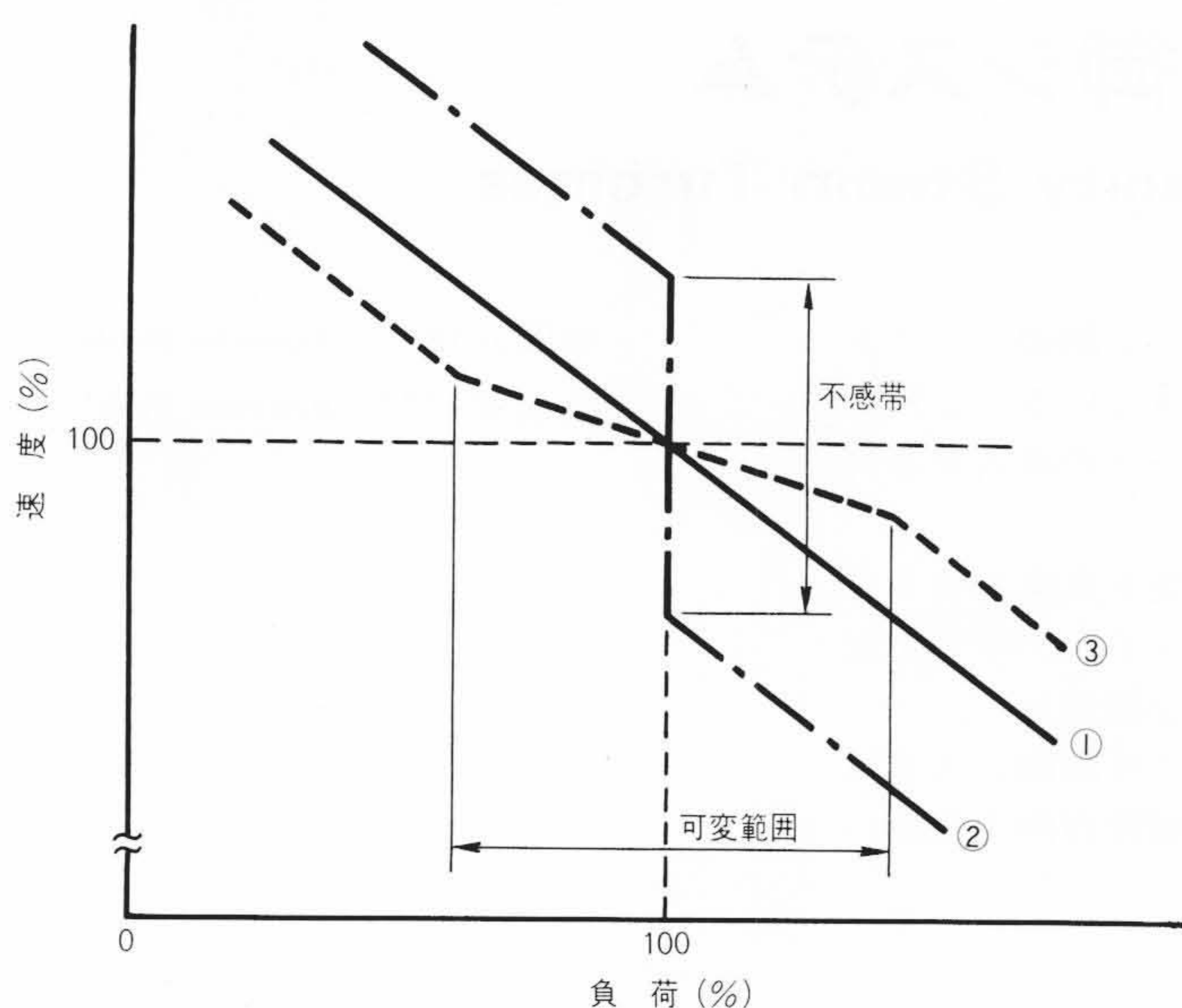
図1 タービン制御に対する技術課題 エネルギーの多様化、電力需要の変遷に対し、デジタルコントローラの演算能力、記憶能力を有効に活用できるデジタル制御システムを採用してきている。

機出力を制御している。また、タービンのバイパス系統では、高圧、低圧バイパス弁によってバイパス蒸気流量を調節する。

(1) 可変速度調定率

ローカル負荷の変化に対しては、出力を大きく負う場合や設定範囲内の周波数変動には出力を変えない場合など、系統

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立工場



注：① 通常速度調定率 ② 不感帯付速度調定率 ③ 可変速度調定率

図3 可変速度調定率の特性 系統周波数の変動に対応した出力分担特性を各種選択することによって、電力系統運用のフレキシビリティを拡大している。

周波数の変動に対するユニットの出力分担特性を各種選択できることが望まれている。図3は速度調定率の三つの特性パターンを示したものである。実際の運用に際しては、運転中に特性パターンを変更しても出力の急変を与えることなく、滑らかにパターン移行ができるようにしている。また、これら各パターンのパラメータ値は中央制御盤からの遠隔設定が可能である。

(2) コンバインドガバニング方式

コンバインドガバニング方式の蒸気加減弁は、従来用いられていたタービンの調速方式であるノズルガバニング(ノズル絞り切り調速)方式と主蒸気止め弁によるスロットルガバニング(絞り調速)方式のもつ長所を組み合わせ、性能、運転性の向上を図った調速方式である。蒸気加減弁によって連続的に運転できるため次のような長所がある。

- (a) タービンの起動時、操作する弁が蒸気加減弁だけであるため運転操作が簡単になる。
- (b) 中間負荷運用の場合、高負荷、低負荷の相互移行が容易で、かつ高負荷での高い効率、低負荷でのタービン内部の高い温度状態が確保できる。
- (c) 所内負荷運転時でも、急激な負荷低下に伴うタービン内部の温度降下が少なく、タービン運転の弾力性が增大する。

(3) 中圧タービン起動方式

中圧タービン起動方式は、タービンバイパス系統と組み合わせて効果的に適用しており、その起動パターンを図4に示す。本起動方式は、タービン通気から低負荷までの起動範囲では、蒸気加減弁を全閉にして高圧タービンへは蒸気を流さず、高圧タービンバイパス弁を経由して再熱器へと蒸気を流すものである。この方式ではインターセプト弁を操作し、中圧タービンへの蒸気量を調節して回転数、出力を制御している。したがって、起動時の蒸気条件とのマッチングを容易に得ることができるため、起動時間の短縮が図れる。

(4) タービンバイパス制御

タービンバイパス系統を設置したシステムは、高圧タービン、あるいは中低圧タービンをバイパスして蒸気を流すこと

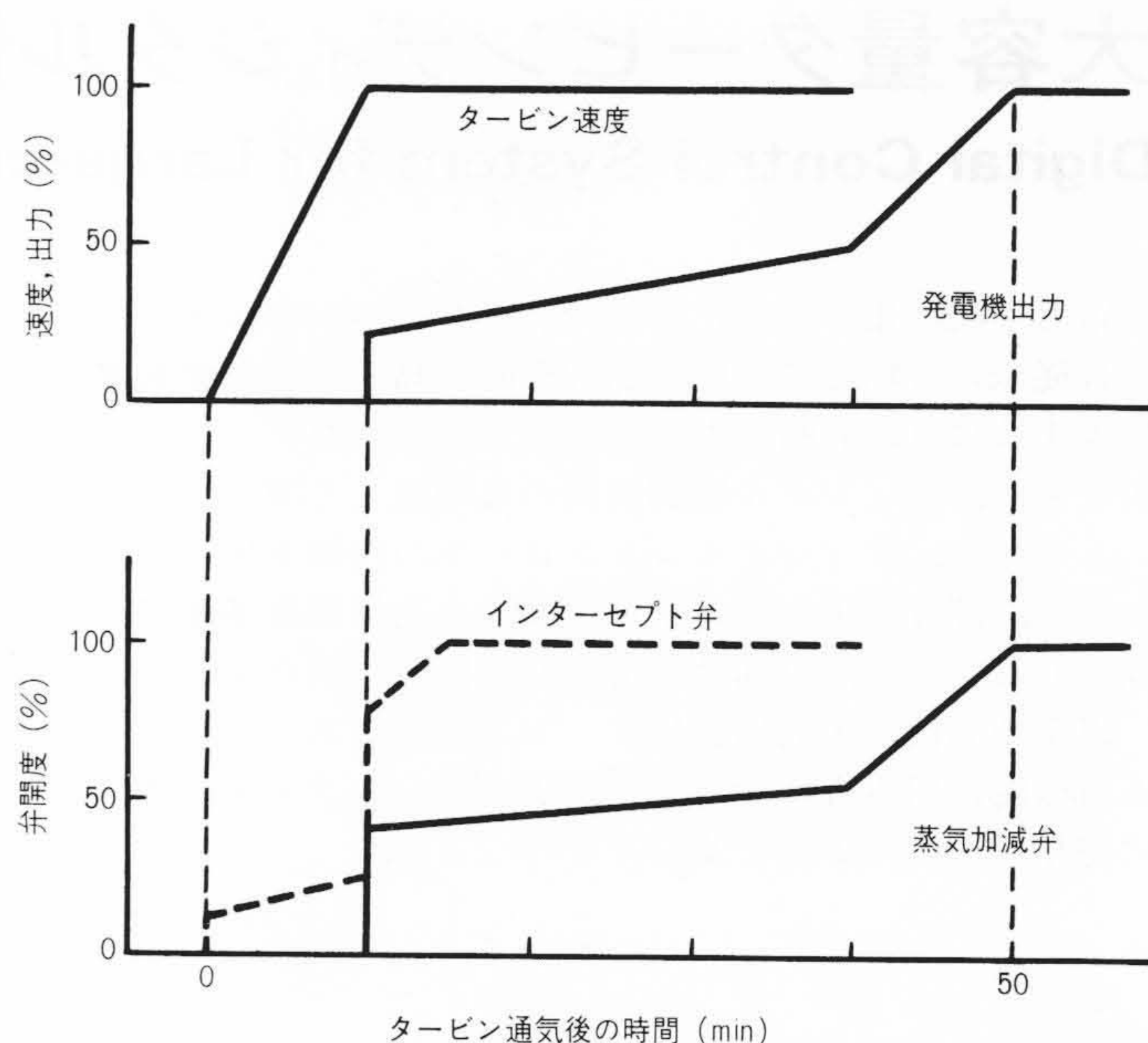


図4 中圧タービン起動のパターン 起動時はインターセプト弁により、中圧タービンに流入する蒸気量を制御することによって蒸気条件とのマッチングを容易にし、起動時間の短縮を図る。

ができるため、以下のような特長がある。

- (a) 起動時の再熱蒸気流量が確保可能であるため、再熱器の保護ができるとともに燃料投入量が増加でき、起動時間を短縮できる。
 - (b) 所内単独運転時の蒸気の逃し機能をもつことになり、所内単独運転からの再起動が容易にかつ迅速にできる。
- (5) 熱応力制御

中間負荷運用に伴い、タービンロータ熱応力を監視しながら適切な運転を行なうことが重要となってきた。

ロータ熱応力を常時監視し、また、熱応力を蒸気条件の予測値から予測して制御を行なう熱応力管理制御方式を採用している。本方式によって、熱応力を制限値以下に抑えながら最大の昇速率、負荷変化率を選定できるため、安全かつ起動時間の短縮、負荷追従性の向上を実現している。

以上のような技術課題を実現するため、デジタルコントローラのもつ豊富な演算能力、記憶能力を有効に活用したデジタル制御システムを採用してきている。

一方、単機容量の増大によって、制御システムの稼働率向上、信頼性の向上はますます重要な課題となっている。これらに関しては、以下の章で述べる。

3 高信頼化制御システム

高信頼性、高稼働率のシステムとするには、図5に示すように高信頼化手法のほか、故障検出機能、故障時の早期修復機能の充実化を総合的に行なう必要がある。

(1) 高信頼化手法

システムの信頼度を高めるには、使用する部品の選定と同時に、初期故障の事前摘出のため、スクリーニング、エージングを実施している。しかし、電子部品などの故障は避けられない要素をもっており、部品の単一故障に対してはシステム機能の停止を最小限化するコントローラ、検出器類を多重化したフォールトトレラントシステムとしている。

(2) 故障検出機能

多重化構成を行なった場合には、その全体の信頼度は故障

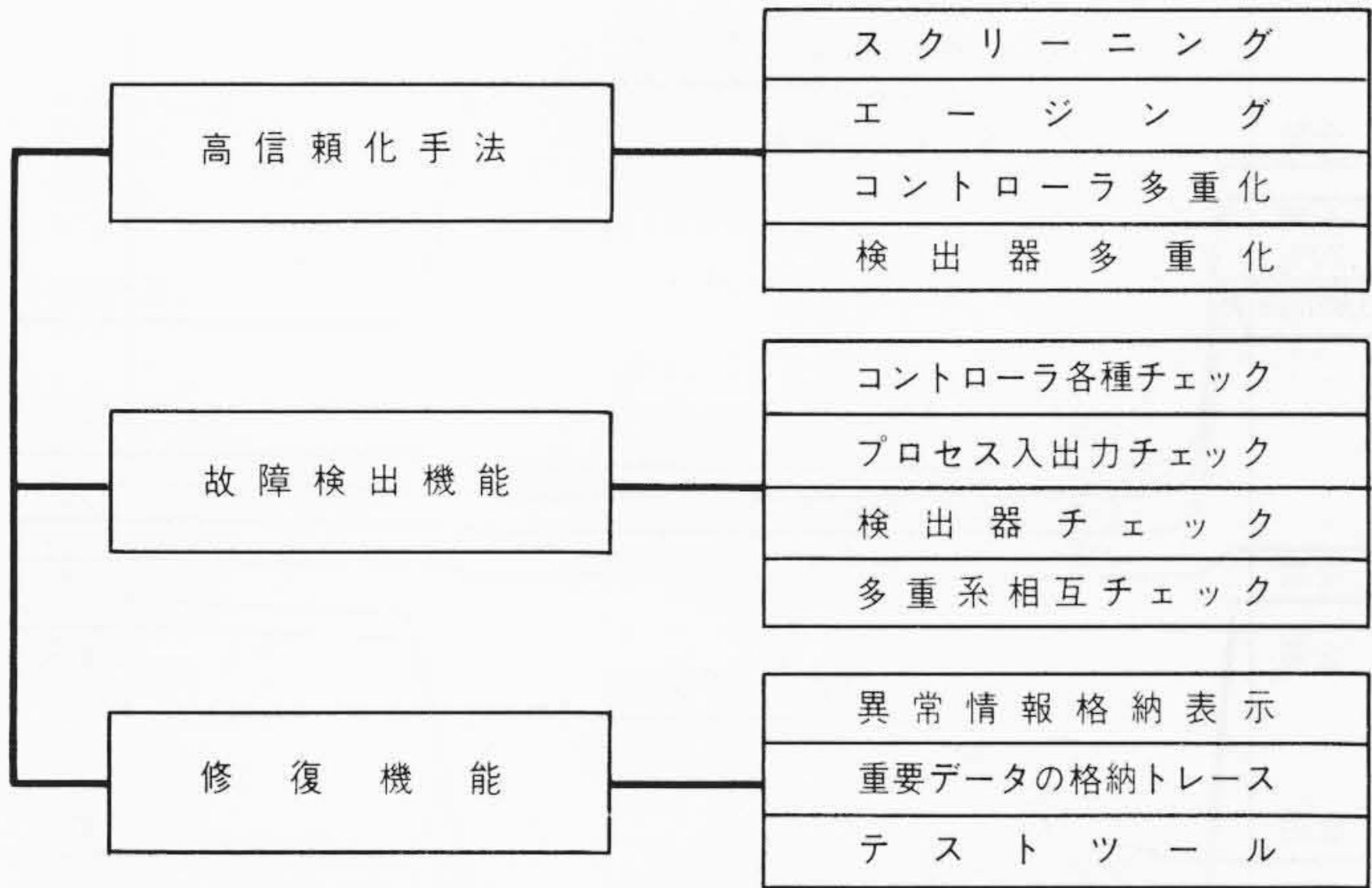


図5 システムの稼働率、信頼度向上策 高信頼化システムは、高信頼化手法のほか、故障検出機能の充実、故障時の早期修復機能が不可欠である。

検出能力に大きく依存する。また、故障箇所をローカライズし早期にシステムを修復するためにも、故障検出機能は重要な要素である。タービン制御システムでは、コントローラのもつパリティチェック、アドレスチェック、インバリッドチェック、タイムアウト、ウォッチドッグタイマなどの故障検出機能のほかに、プロセス入出力装置のオンライン常時個別チェック、検出器の合理性チェック、多重系相互の信号の比較照合など、故障検出能力を大幅に強化している。

(3) 修復機能

故障が発生した場合の異常情報の格納はもとより、要因に対する個別の故障表示を実施している。また、重要データの異常時前後のデータも格納可能にし、故障箇所摘出までの時間を最小とするよう配慮もしている。更に、復旧時のテスト用プログラム、シミュレータほか各種テストツールを整備している。

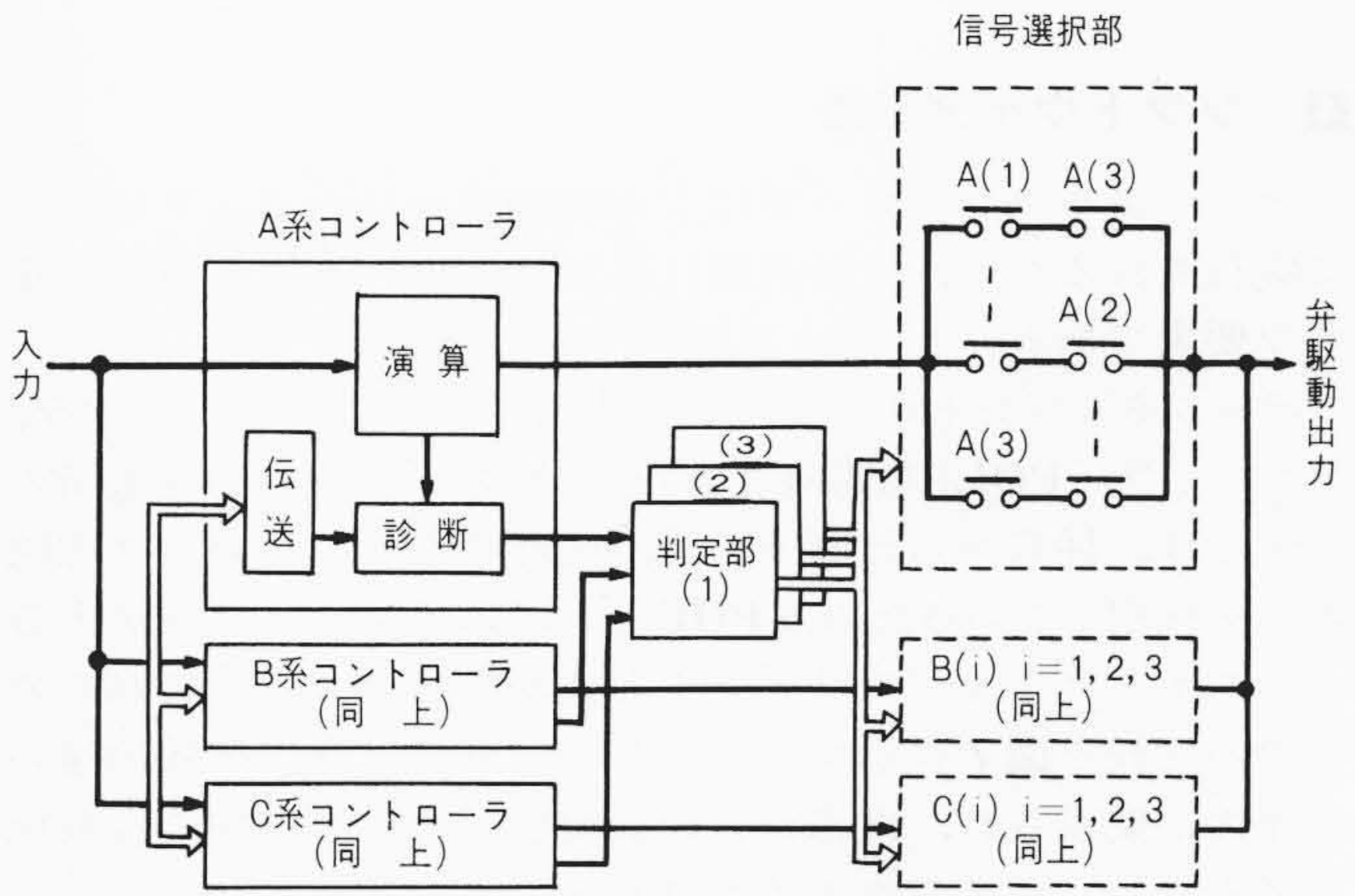


図6 三重系システムの構成 三重系システムは多数決判定を行なうことができ、大幅な信頼性向上を図ることが可能である。

多重化システムとして、部分二重化、完全二重化、三重化構成をラインアップしている。原子力プラントに適用した主タービン制御装置の三重系システムを図6に示す。コントローラはA系、B系、C系と三重化し、各系間は伝送により接続している。また、電源部や速度検出器、圧力検出器などの検出部、判定部、信号選択部とすべての構成部を三重化し、2 out of 3の多数決判定によって最も正常な信号を常に自動的に選択し、制御信号を出力する構成としている。なお、システム電源部は、所内の直流及び交流電源を受電し、一方の電源喪失があってもシステムダウンしない構成としている。

どのレベルの多重化システムを適用するかは、対象とするプラントの重要度と経済性によって選定されるものである。通常、停止した場合の影響度の大きい大容量プラントには完全二重化システムを採用しており、更に信頼性を必要とする場合には三重化システムを適用することになる。

方式		ダイレクトインプリメント	インタープリタ	アセンブラ、コンパイラ
表現法		ブロック線図で表現 		フローチャートで表現
作成手順	図面	ブロック線図		フローチャート
	変換	モジュール編集 ↓ 実行モジュール		アセンブラコンパイラ
	プログラム	修正・モニタ ↑ サポートプログラム		制御プログラム
図面との対応		実行モジュールがブロック線図に対応	制御テーブルがブロック線図に対応	制御プログラムがフローチャートに対応
変更、修正		ブロック線図に従い実施		フローチャートレベルで実施
処理速度		高速	低速	高速

図7 ソフトウェア言語の比較 従来のブロック線図表現の可視性を生かして高速処理を実現するには、ダイレクトインプリメント方式が適している。

4 ソフトウェア言語

デジタルコントローラによる制御はソフトウェアによって実行されるため、その言語は処理性、保守性を左右する重要な要素である。

デジタルコントローラの制御用言語として、アセンブラ、コンパイラ、POL(問題向き言語)が知られている。発電所の制御では、従来から比例+積分、論理積などのブロック線図表現を採用しているため、POLとしてはインタープリタあるいはダイレクトインプリメント方式が挙げられる。これらの言語の比較を図7に示す。タービン制御のように比較的速い処理性が要求され、従来からの表現法を用いて保守の容易化を図るには、ダイレクトインプリメント方式が適している。すなわち、タービン制御の場合には、0.02~0.1秒のサンプリング周期が必要であるが、インタープリタ方式では、制御テーブルの内容を常に解釈しながら処理を実行するため処理時間を要する。一方、ダイレクトインプリメント方式は、実行モジュールによって直接処理を行なうため高速処理が可能である。また、サポートプログラムを常駐させているため、プログラムの修正、データの監視をプログラム変換用のホストコンピュータがなくても、容易にブロック線図に従って実施できる特長をもっている。

5 デジタル制御システムの適用例

5.1 原子力発電所への適用

BWR(沸騰水型原子炉)原子力プラントのタービン制御は、タービン速度、発電機出力のほか、原子炉からの主蒸気圧力を制御するものであり、デジタルコントローラを3台使用した三重系システムとしている。制御装置の外観を図8に示す。コントローラ収納盤が各系統1面の合計3面、過速度を防止するパワーロードアンバランスリレー、バックアップガバナなどを収納した共通盤2面、タービンの保護インタロック盤2面から構成されている。本システムはシミュレータと組み合わせたシミュレーション試験を実施し、圧力ステップ応答特性、速度負荷制御特性などの確認を完了している。また同時に、多くの模擬故障による実証試験を行ない、常に正常側が自動的に選択され、システム全体の制御機能の維持ができることを確認している。更に、本システムは多重系の

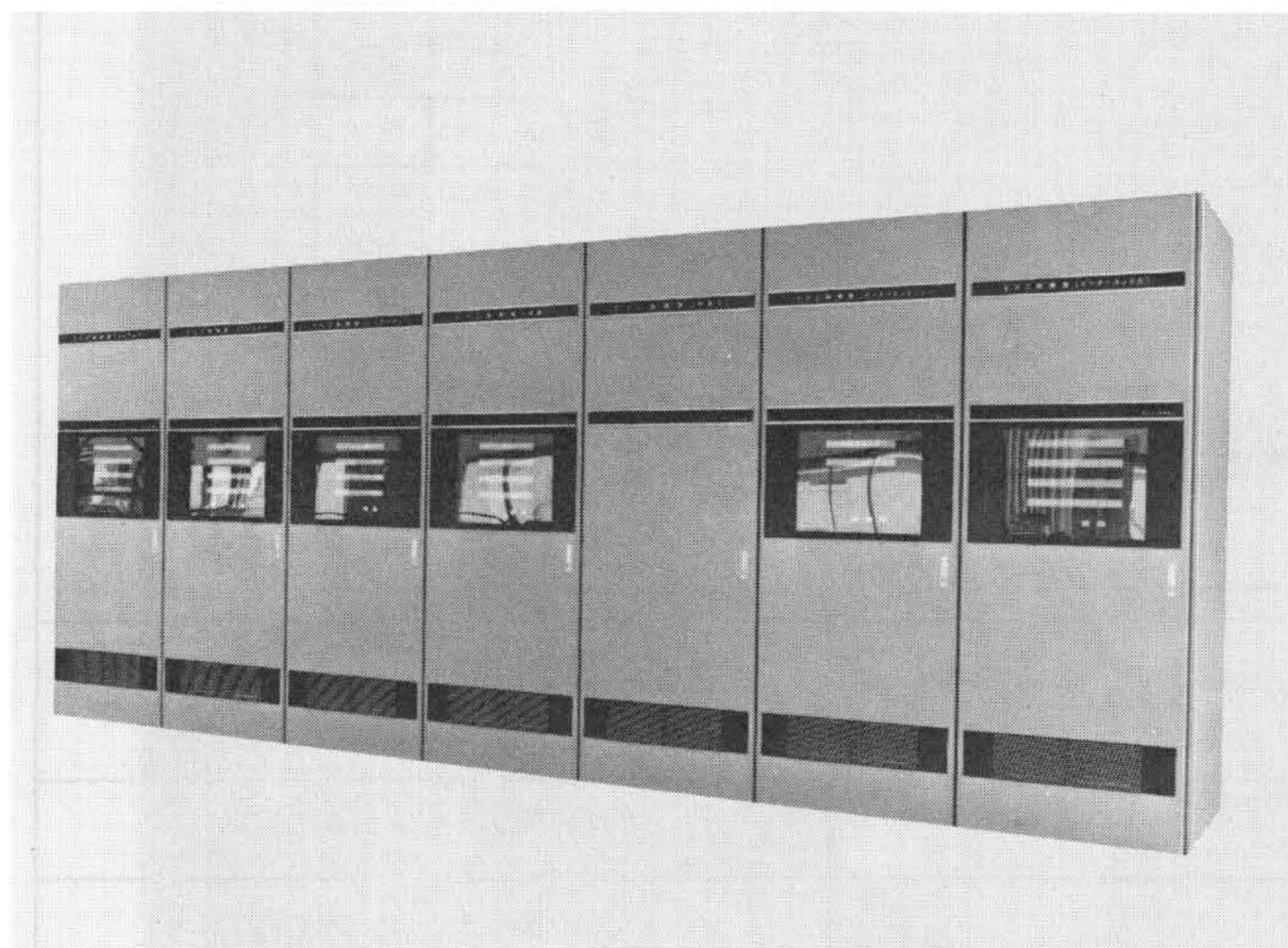


図8 原子力発電所用デジタルタービン制御装置 デジタルコントローラを3台使用して三重化構成とした高信頼化制御システムである。

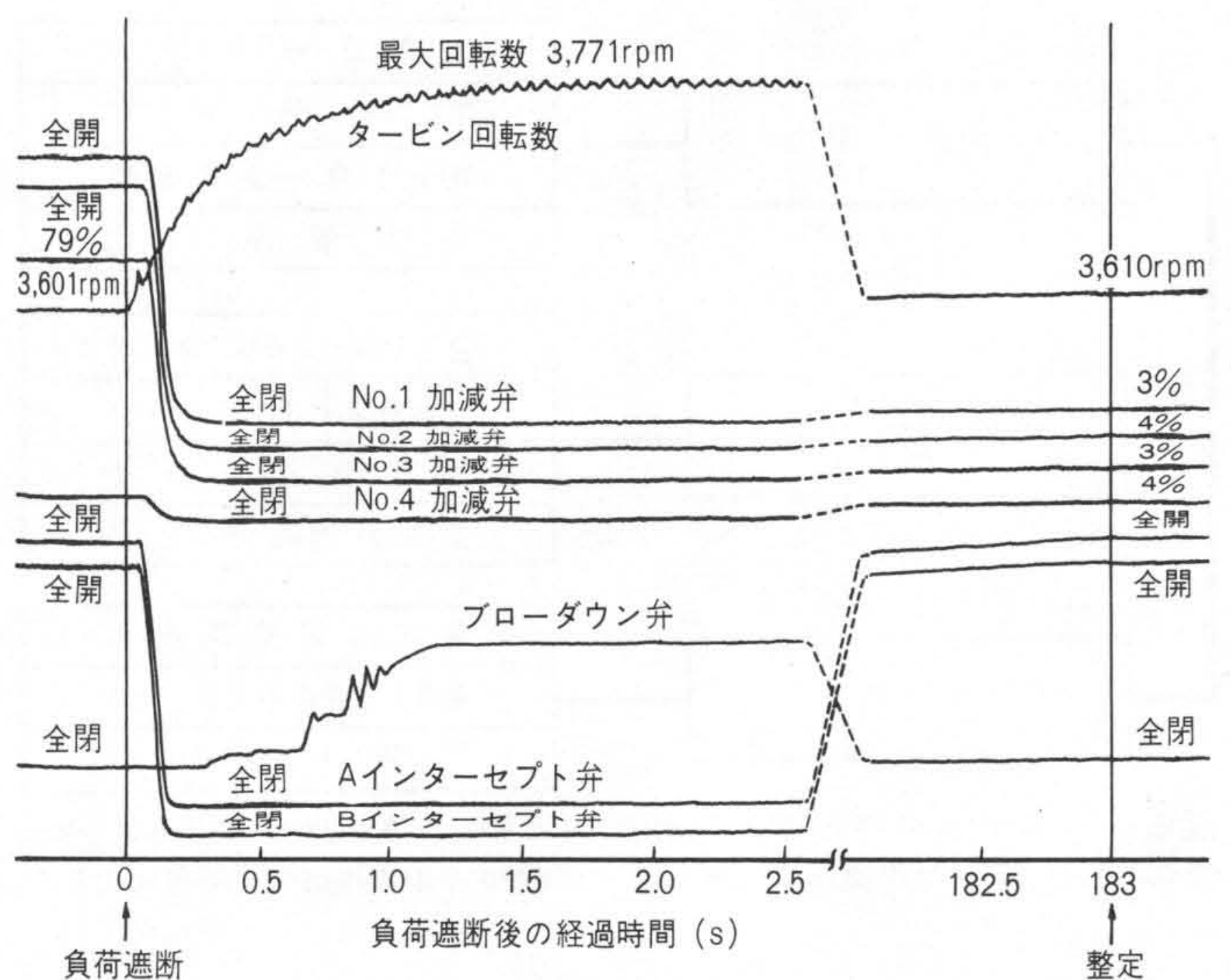


図9 100%負荷遮断結果 関西電力株式会社相生発電所3号機375MW 納めD-EHG(デジタル式電子油圧式ガバナ)の負荷遮断試験結果で、最大速度上昇率を抑制した良好な特性を得た。

各系統を独立構成としており、万一の故障に対して運転中での故障箇所修復を容易にしている。

5.2 火力発電所への適用

火力プラントでは、375MW変圧プラント用D-EHG(完全二重化)が新たに運転を開始した。本プラントは毎日起動停止を指向したものであり、変圧域での圧力変化を考慮した第一段後圧力補正特性、初圧低下負荷制限特性としている。図9に100%負荷遮断時の結果を示す。最大速度上昇率は4.75%と良好な結果を得ている。また、輸出プラントではタービンバイパス系統付、変圧運転、中圧タービン起動方式のシステムを納入し、現在試験運転中である。

以上の主タービン制御のほかに給水ポンプ駆動タービン用デジタル制御装置も現在運転中であり、所内単独運転移行時の良好な追従特性、低負荷域への運転範囲の拡大、自動起動停止機能の一体組込み化などの特長をもっている。

6 結 言

以上、最近のタービン制御技術とデジタル制御システムについて、電力系統運用の多様化対応、信頼性向上及びソフトウェア言語に関し述べた。現在、主タービン用D-EHGは8セット、HITASSは19セット、給水ポンプ駆動タービン用デジタル制御装置11セットを納入済みである。今後とも、電力会社殿をはじめ関係各位の御指導を仰ぎながら、ニーズに即したシステムへの展開を図りたいと考えている。

参考文献

- 1) 東, 外: 蒸気タービン用デジタル式電子油圧式ガバナ, 日立評論, 59, 5, 403~408(昭52-5)
- 2) 中野, 外: 大幅な出力変化領域でのタービン動特性の解明とデジタルガバナ開発への応用, 計測自動制御学会論文集, 16巻, 3号, 412~419(昭55-6)
- 3) 天日, 外: ロータ熱応力によるタービン自動制御装置, 火力原子力発電, 29, No.5, 473~482(昭53-3)
- 4) 松本, 外: ロータ熱応力タービン制御システム, 計測自動制御学会論文集, 16巻, 6号, 905~912(昭55-12)
- 5) 本田, 外: 蒸気タービン自動制御装置, 日立評論, 61, 3, 199~202(昭54-3)