

揚水発電所制御システムの最近の技術

Latest Control System for Pumped-Storage Hydroelectric Power Stations

マイクロコンピュータの出現によって、制御システムの高度化、高信頼度化が実現できるようになり、水力発電プラント制御システムの総合デジタル化の一環として、大容量揚水発電所用デジタル運転制御装置を開発し、東京電力株式会社玉原発電所へ納入した。

本装置はシステムの二重化、監視機能の充実、会話形プログラムサポートツールの採用などにより、従来の制御装置に比べて大幅な信頼性、保守性の向上が実現でき、優れた制御性も発揮できる。

更に自動電圧制御や調速制御など、高速な制御を必要とする分野のデジタル化も行なわれており、これら装置の概要について述べる。

神崎秀郎* *Hideo Kanzaki*

溝口 強* *Tsutomu Mizoguchi*

青津広明** *Hiroaki Aotsu*

1 緒 言

近年、揚水発電所は、大容量、高落差化の傾向にあり、電力系統でのその役割もますます重要になってきている。一方、運転制御方式も発電、揚水(サイリスタ始動、同期始動)、調相、試送電運転及び電気ブレーキ、弱点ピン折損制御など制御内容が高度化、複雑化してきており、従来の電磁形リレーシーケンスでは対処が困難になりつつある。更に揚水発電所特有の運転、停止が高頻度に行なわれること、及び遠方制御による無人化が進められていることによって、運転制御装置の信頼性の向上及び保守の省力化が強く望まれている。

一方、マイクロコンピュータの著しい技術進歩に伴い、これを用いることによって高度な制御機能が実現できること、保守の容易さに加えて、高信頼度システム構成が得られるなど、数々の特長をもたせることができる。

これらの動向を踏まえ、日立製作所では水力発電所へのマイクロコンピュータの導入を進めてきた。以下に、東京電力株式会社玉原発電所をはじめ多数を納入し、良好な実績を挙げているデジタル運転制御装置をはじめ、自動電圧調整装置及び調速機制御装置のデジタル化について述べる。

2 デジタル運転制御装置

2.1 システムの概要

揚水発電所の制御に必要な各種機能をそれぞれ独立にユニット化し、適用システムに応じてビルディングブロック式に組み合わせることによって、経済的で高い信頼性をもった制御システムが構成できるよう考慮している。これらの機能ユニットは、シーケンス制御、二次調整制御、遠方監視制御子局処理及び入力データの処理を行なわせるユニットなどから成り、システムの規模に応じて必要な機能ユニットが増設できる。特に、主機を制御する上で重要な機能ユニット及び機能ユニット間のデータの授受を行なうシステムバスは、デュアルシステム構成を考慮しており高信頼度システム構成が可能である。これらの機能ユニットはマイクロコンピュータを用い、ハードウェアの構成はそれぞれ同一である。またソフトウェアは、ファームウェア化された基本プログラムとシーケンス制御などのアプリケーションプログラムから成り、アプリケーションプログラムは高級言語を用い、取扱い保守に

対し特に配慮し、従来の制御装置と同等に扱えるように考慮してある。

2.1.1 機能構成

デジタル運転制御装置を適用した揚水発電所の機能構成を図1に示す。本装置での各機能ユニットの概要は次に述べるとおりである。

(1) 入力制御ユニット

主機の制御に必要な現場機器や監視制御卓からの条件、指令などの入力データや制御所へ送る監視情報を取り込み、データの複数回判定及び合理性チェックを行ない、信頼性の高い正しいデータをシステムバスへ送信する。

(2) 遠方監視制御子局ユニット

本ユニットは並列・直列変換器、変復調器から成る信号伝送ユニットと組み合わせて遠方監視制御子局機能を分担するもので、制御所からの指令を受けシステムバスへ送信するとともに現場機器や他の機能ユニットからのデータを選択、ワード配列編集し制御所へ監視情報として送る。

(3) シーケンス制御ユニット

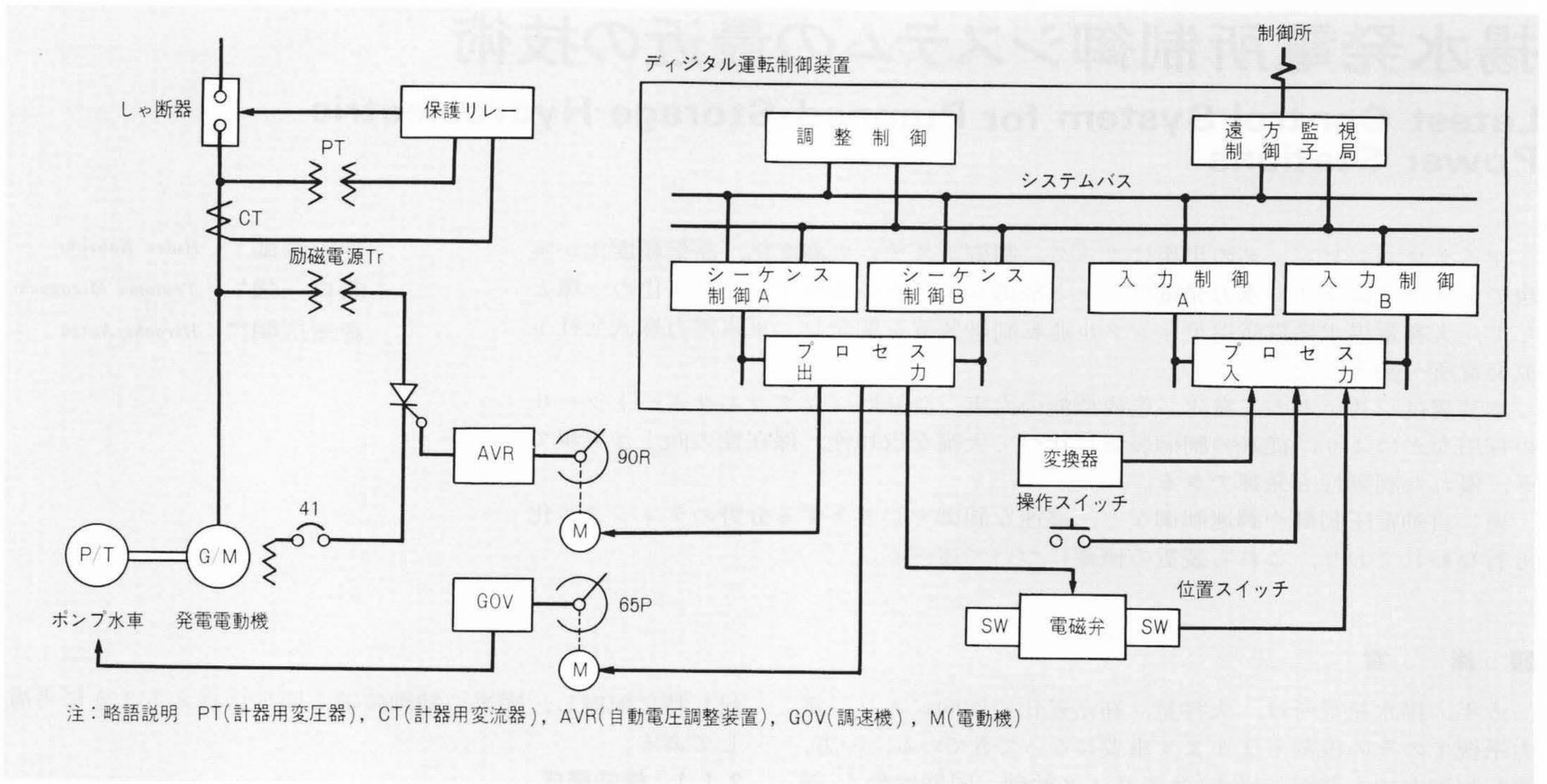
システムバスから指令や現場機器などのデータを受け、各種運転モードでの主機の運転、停止のシーケンス演算制御を行なう。その他制御渋滞監視や重要条件の定常状態監視などの監視機能を付加するが、マイクロコンピュータの演算処理の効率、負荷配分を考慮し監視用ユニットを分離することも可能である。

(4) 調整制御ユニット

主機の出力調整、無効電力の調整及び上池と下池の水位差に応じた発電運転時の最大出力制限や、揚水運転時の適正開度にガイドペーンを制御する水位差応動制御などの、二次調整制御機能を分担する。これらの演算結果はシステムバスを介して、シーケンス制御ユニットから出力し、一次調整制御系の基準値の設定器である負荷設定器65PM、電圧設定器90RMを駆動する。

以上述べた機能ユニットは、二重化したシステムバスに接続しており、主機を制御する上で特に重要な入力制御ユニット、シーケンス制御ユニットは二重化構成とし、システム全体の信頼性の向上を図った。ここで本システムでは、万一の

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立研究所



注：略語説明 PT(計器用変圧器), CT(計器用変流器), AVR(自動電圧調整装置), GOV(调速機), M(電動機)

図1 揚水発電所の機能構成図 デジタル運転制御装置を適用した場合の揚水発電所の概略機能構成を示す。

場合にも装置誤動作による主機の破損を防止することが重要であり、システムバス及び機能ユニットは、デュアルシステムによる二重化構成を採用した。

2.1.2 システム信頼性の向上

マイクロコンピュータを、揚水発電所用運転制御装置に適用するに当たり、次に述べるようなシステム信頼性の向上を図った。

- (1) デュアルシステムは実時間照合を行なうために、各機能ユニットの演算処理タイミングのずれにより、出力照合結果が不一致となり、制御特性の変化あるいは制御渋滞となる。これらを解決するために、二重系運転時に互いの演算処理のタイミング合わせを行なう演算同期照合方式¹⁾を採用する。
- (2) 各機能ユニットごとに、ハードウェア及びソフトウェアによる異常を検出し、不具合機能ユニットを除外し健全ユニットで片系運転を継続する。
- (3) システムバス制御に対しては、各機能ユニットのダウン、システムバス伝送路の短絡、開放及びノイズ、サージによるデータの受信誤りを考慮して、エラー検出機能を充実させ、システムバスの切替制御を行ない運転継続する。
- (4) 片系ダウンの状態からの復旧に際しては、健全系と復旧系のデータ合わせの必要があり、二重系ユニット間でオートバランス処理を実施する。
- (5) 出力回路などの1個所の不具合で誤動作に至らないように、最小限の現場機器の有接点をを用いた外部インターロックを実施する。
- (6) 主機の保護機能は、制御機能と完全分離する。

2.2 ハードウェアシステム

デジタル運転制御装置のハードウェア仕様及び構成は次に述べるとおりである。

2.2.1 ハードウェア仕様

本装置の一般仕様を表1に、入出力仕様を表2に示す。デジタル入出力部はDC110V、耐圧AC2,000V、1分間とするとともに無接点化を実現した。入力部はホットカプラによる絶

縁、無接点仕様の出力部はパルストランスによる絶縁方式を採用している。またこれらの入出力部は、現場機器と直接接続するダイレクト方式を玉原発電所で採用した。この他に、32点分の情報を1対のケーブルで集約して伝送するリモート方式も準備している。リモート方式では最大2kmまで伝送可能であり、ケーブル工事費の削減に有効である。リモート方式の場合、伝送ラインについても耐圧AC2,000V、1分間を確保している。

2.2.2 ハードウェア構成

機能ユニットのハードウェア構成を図2に示す。機能ユニ

表1 一般仕様 デジタル運転制御装置の一般仕様を示す。

No.	項目	仕様
1	周囲温度	-10~40℃
2	湿度	10~95%RH, 結露しないこと。
3	電源	DC110V, -20~+30%又は AC100V±10%, 50/60Hz±2Hz
4	耐圧	DC110V入出力端子及び 電源入力端子~アース間 AC2,000V, 50/60Hz, 1分間
5	絶縁抵抗	DC500Vメガーで5MΩ以上

表2 入出力仕様 デジタル運転制御装置の入出力仕様について示す。リモート入出力端末部は、現場制御装置内に分散設置することを可能としている。

No.	項目	仕様	実装点数
1	デジタル入力	DC110V, 10mA	16点/枚
2	デジタル出力	DC110V, 2A, 無接点	16点/枚
		DC110V, 0.5A, 無接点 DC110V, 0.5A, 接点	16点/枚 16点/枚
3	アナログ入力	±5V	8点/枚
4	リモート入力	DC110V, 10mA	8点/ユニット (32点/伝送1チャンネル)
5	リモート出力	DC110V, 2A, 無接点	4点/ユニット
		DC110V, 0.5A, 接点	8点/ユニット (32点/伝送1チャンネル)

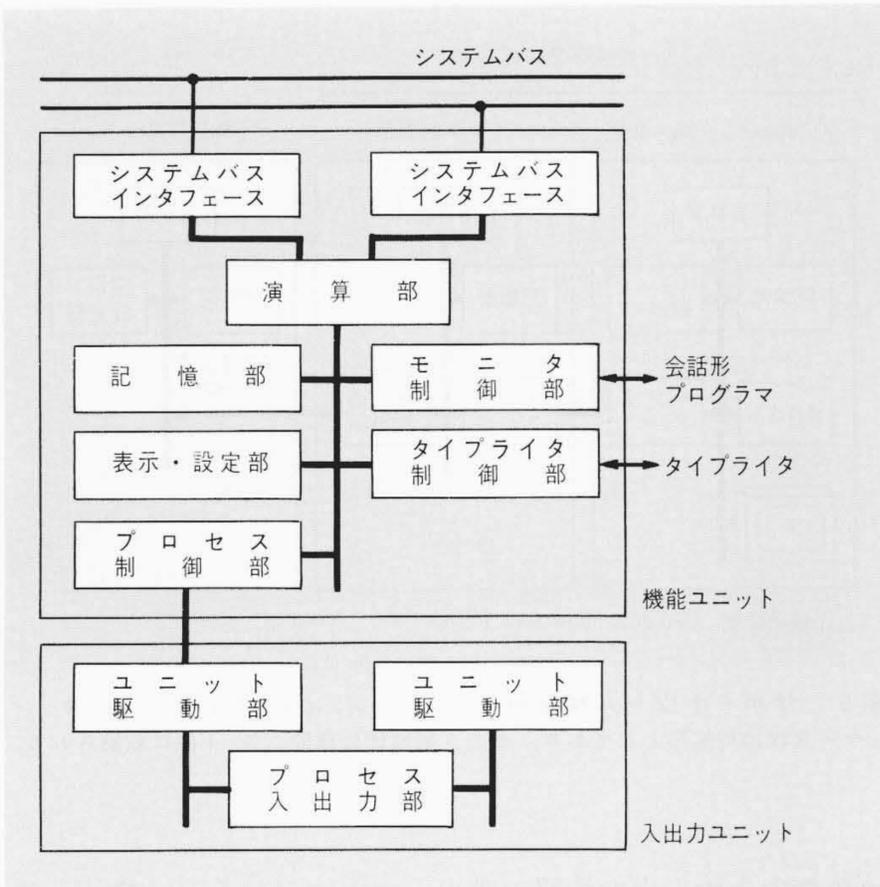


図2 機能ユニットのハードウェア構成図 機能ユニットの基本ハードウェア構成を示す。入出力ユニットは必要に応じ、追加することができる。

ットは各機能ごとに分割されたモジュールによって構成され、各々のモジュールは内部バスを介して演算部に接続される。モジュールはシステムバスインタフェース、記憶部、表示・設定部、プロセス制御部、モニタ制御部及びタイプライタ制御部に分離される。

(1) システムバスインタフェース

本モジュールはシステムバスとの伝送をつかさどり、送信1チャンネル、受信2チャンネルを収納している。伝送はHDLC (High Level Data Link Control)手順を採用しており、高効率伝送が行なえるほか、送信時のデータ競合を避けるために、各々のモジュールに競合制御回路をもたせ、システムバス管理用の親局を不要としている。

(2) 記憶部

記憶部にはICメモリとコアメモリを併用しており、用途による使い分けを行なっている。特にコアメモリ内のプログラム領域は、ハードウェアによるライトプロテクション機能を付加しROM(Read Only Memory)化し、誤ったプログラムの書換えを防止している。

(3) 表示・設定部

プログラムで使用する定数の書込み、変更、読み出し及びアナログ量の読み出しがオンラインで実施できる。

(4) プロセス制御部、ユニット駆動部

本モジュールは演算部を収納する機能ユニットとプロセス入出力部を収納する入出力ユニット間のデータ授受を行なうもので、入出力点数により入出力ユニットの増設が可能である。また機能ユニットの二重化に対応できるように、ユニット駆動部は二重化構成としている。

2.3 ソフトウェアシステム

本システムのソフトウェアは基本の方針として、

- (1) プラントを理解している人であれば、ソフトウェアを意識することなくプログラミングできる。
- (2) プログラムの作成はもちろんのこと、現地でのデバッグ及び保守が容易に行なえることを前提として構成している。

2.3.1 ソフトウェアの構成

ソフトウェアは大別すると、

- (1) システムプログラム
- (2) インタプリタ
- (3) マクロ命令
- (4) アプリケーションプログラム
- (5) データ格納部

から構成され、図3に示すとおりである。

システムプログラムは、アプリケーションプログラムのどのタスクを起動させるかを判断し、シーケンスカウンタに値をセットする。インタプリタは、アプリケーションプログラムのマクロ命令コードを解読し、マクロ命令とともにプログラムの処理を進めてゆく。ここでマクロ命令は、ハードイメージに合わせて制御ブロック図に相当するように作成している。

マクロ命令は表3に示すように、論理演算命令12種、制御演算命令18種、算術演算命令18種、変換命令6種及びフロー制御命令12種の合計66種を用意しており、シーケンス制御ユニット、調整制御ユニットなどのいずれの機能ユニットでも

表3 命令一覧 遠方監視制御ユニットを除くすべての機能ユニットに使用可能な代表的マクロ命令を示す。

分類	シンボル	機能	分類	シンボル	機能
論理演算	AND	論理積	算術演算	ADD	加算
	OR	論理和		SUB	減算
	F.F.	フリップフロップ		MULT	乗算
	LATCH	ラッチ		DIV	除算
	T-ON	オンディレイタイマ		MAX	最大値
	T-OFF	オフディレイタイマ		MIN	最小値
	T-OST	ワンショットタイマ		ABS	絶対値
	T-INT	インターバルタイマ		F.G	関数発生器
	他4種			他10種	
	制御演算	GAIN		ゲイン	変換
INTEG		積分	BTD	2進-10進変換	
DIF		微分	DTB	10進-2進変換	
LDLAG		進み遅れ	他3種		
BUMP		バンプレス切換	フロー制御	T-END	タスク終了
DBAND		不感帯		M-END	モジュール終了
LIMIT		リミッタ		C-STRT	条件付スタート
P-TRN		パルス列		他9種	
他10種					

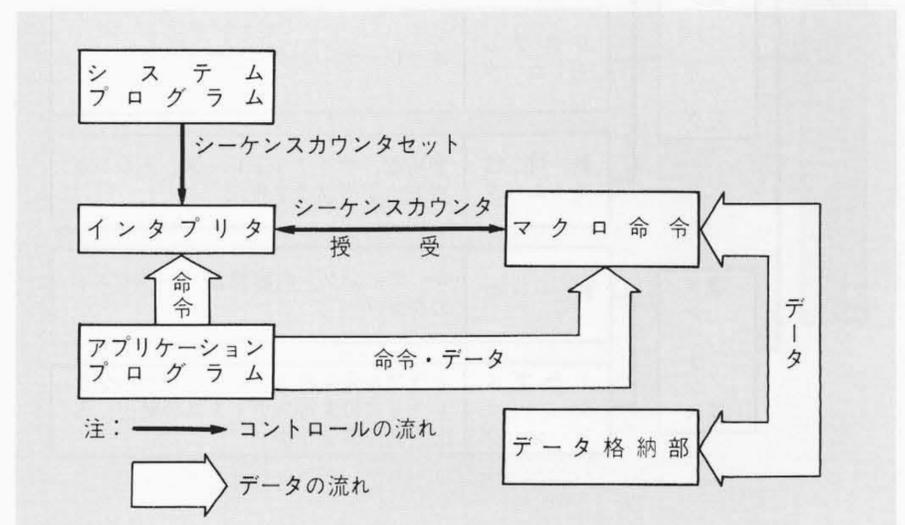


図3 ソフトウェアシステム構成図 インタプリタ方式によるプログラムの動作概要を示したものである。

使用でき、テーブル方式でプログラムの作成ができるように考慮してある。

2.3.2 会話形プログラマ

デジタル運転制御装置はストアードプログラム方式であるため、従来装置のように接点の動作や裏面配線を目で確認することができない。このため、マイクロコンピュータに関して高度な専門知識をもっていなくても、従来のプラントを理解している人であれば、十分使用できるようにサポートツール²⁾を準備している。

(1) サポートツールの機能

本装置はブロック線図をもとにしたマクロ命令によるプログラミング、デバッグ及びメンテナンスがだれにでも容易に行なえるようにするための手段として、マイクロコンピュータ内蔵のサポートツールであり、**図4**に機能構成を示す。

本装置はCRT(Cathode Ray Tube)とマクロ命令対応の専用キーボードを用い、会話形式によって上記機能を実現したものである。

(2) サポートツールの構成

図5にサポートツールの全体構成を示す。

本装置はマンマシンインタフェース部とモニタ制御部から構成している。マンマシンインタフェース部は専用キーボードとCRTを用いて、会話形式でプログラムの作成などをつかさどる部分であり、ソフトウェア的には専用キーボード入力に対するキーコード解析、CRT表示画面作画及びマクロ命令に対するFIF(Fill In the Form)コード解析プログラムが主体となる。また、キー操作入力コードがマクロ命令を表わすコードの場合は、マクロ命令に対するシンボル図などの作画手順、FIFコード作成手順などをテーブル検索によって抽出し、CRT画面の作画、FIFコードの生成などを行なう。

モニタ制御部は機能ユニットの演算進行状態をモニタし、マクロ命令の演算開始、終了タイミングの検出、指定された

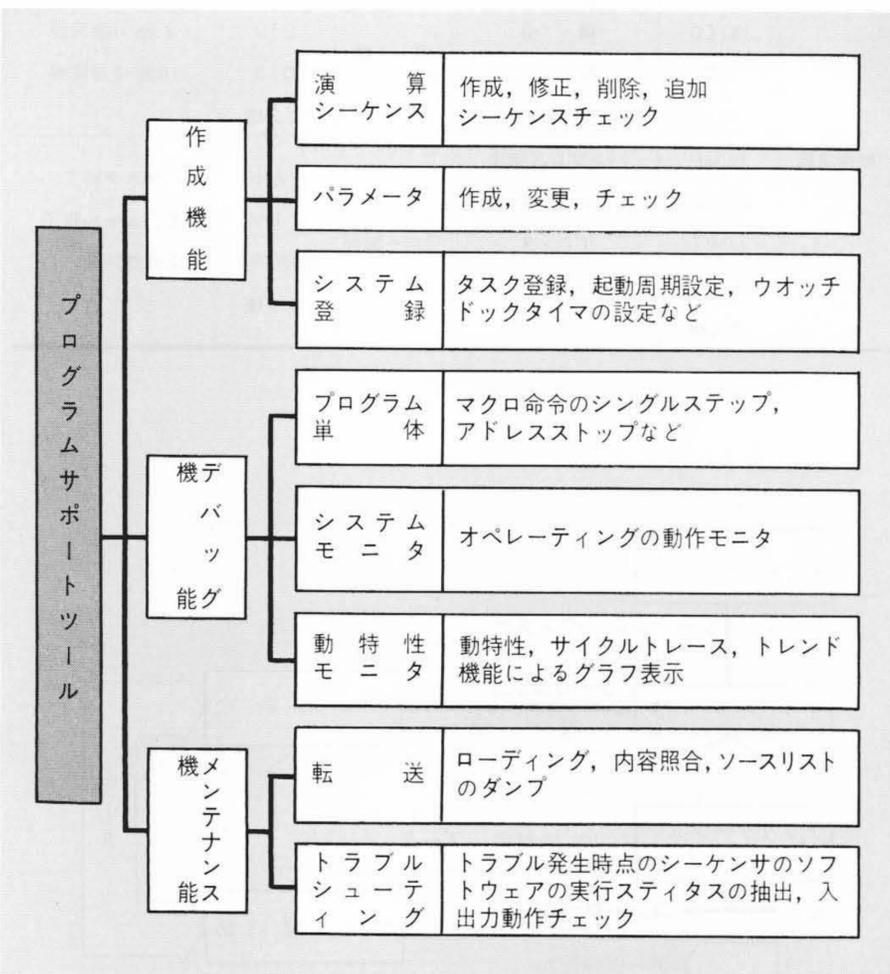


図4 プログラムサポートツールの機能構成図 プログラム作成はもちろん、オンラインデバッグ、メンテナンス機能に重点を置いた機能構成としている。

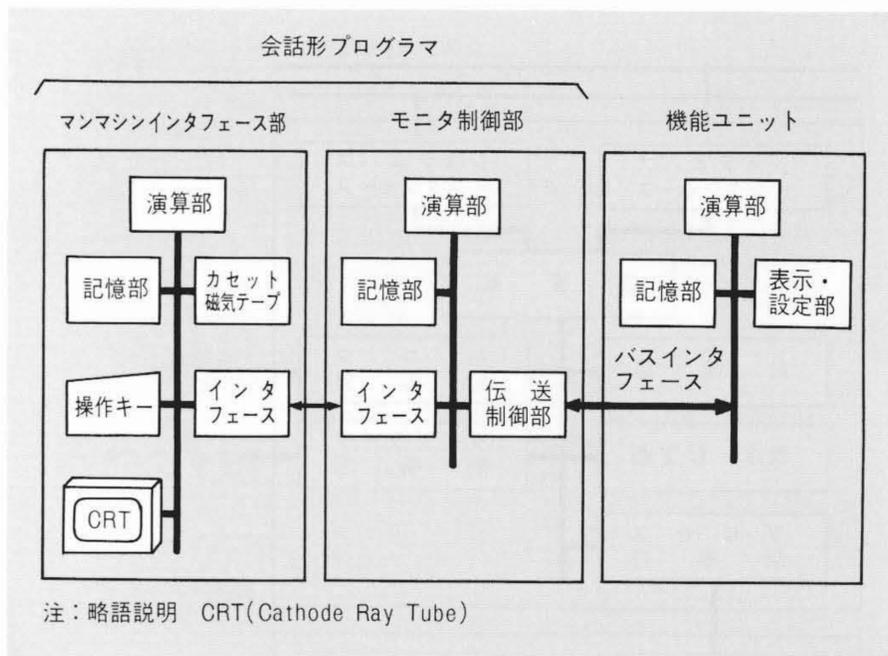


図5 サポートツール構成図 マンマシンインタフェース部はアタッチケース状の可搬形としており、モニタ制御部は機能ユニット内に収納される。

マクロ命令の入出力情報の抽出、マンマシンインタフェース部で作成したプログラムの、ローディングの機能をつかさどる。

3 デジタル自動電圧調整装置

最近の自動電圧調整装置は発電機電圧を一定に制御するほかに、無効電力の調整制御や低励磁、過励磁の制限、電力動揺抑制のための電力安定化制御など、種々の付加機能が追加されてきている。自動電圧調整装置は、発電機が系統に接続されている状態で系統事故発生時など電力動揺抑制のため、数百ミリ秒の励磁系電圧速度度が要求され、これが高応答であることが自動電圧調整装置の性能向上につながる。このため、自動電圧調整装置の高速高機能マイクロコンピュータの適用³⁾によるデジタル化が行なわれており、**図6**にデジタル自動電圧調整装置の制御システム図を示す。本制御システムの動作は、発電機出力回路に接続された計器用変圧器、計器用変流器から電圧、電流を検出し、信号変換部、A-D変換部を介して電圧制御、有効及び無効電力制御、系統安定化制御などの演算に使用するデジタル状態量を検出する。次にこれらの状態量をもとに、各制御機能に基づく演算を行なったのち、演算処理結果を自動パルス移相器に出力し、サイリスタの点弧位相を制御し界磁電流を調整するもので、従来のアナログ式に対してデジタル式では、メモリ機能の有効活用による適応制御を採用することによって次に述べるような特長をもっている。

(1) 性能の向上

- (a) 動態安定度の向上(低速応答)
 - (b) 過渡時の安定度の向上(高速応答)
- 系統安定化制御機能の付加と適応制御の採用

(2) 信頼性の向上

- (a) 自動監視機能の付加
- (b) 数値入力に対するチェック機能の付加

(3) 保守性の向上

メモリ機能の有効活用により90R、70Rなどの無接触化及び調整箇所削減によって、保守性の向上が可能である。

4 デジタル調速機制御装置

発電機の回転数を検出して、これを増幅し水車のガイドペーンを操作するのが水車調速機の役割であるが、最近の水力

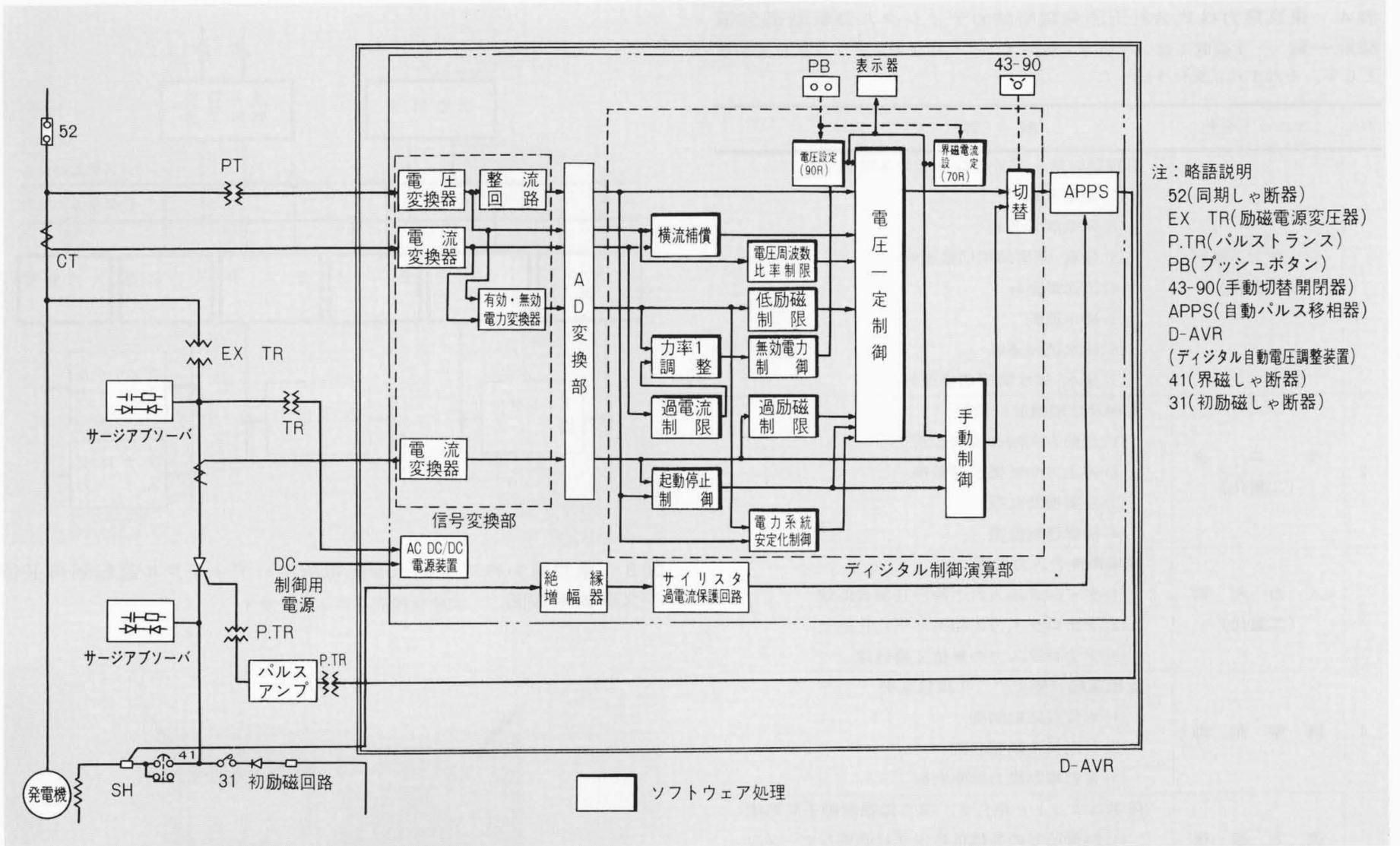


図6 デジタル式自動電圧調整装置制御システム図 制御に用いる状態量の検出には、精度上数ミリ秒の高速サンプリングが必要である。

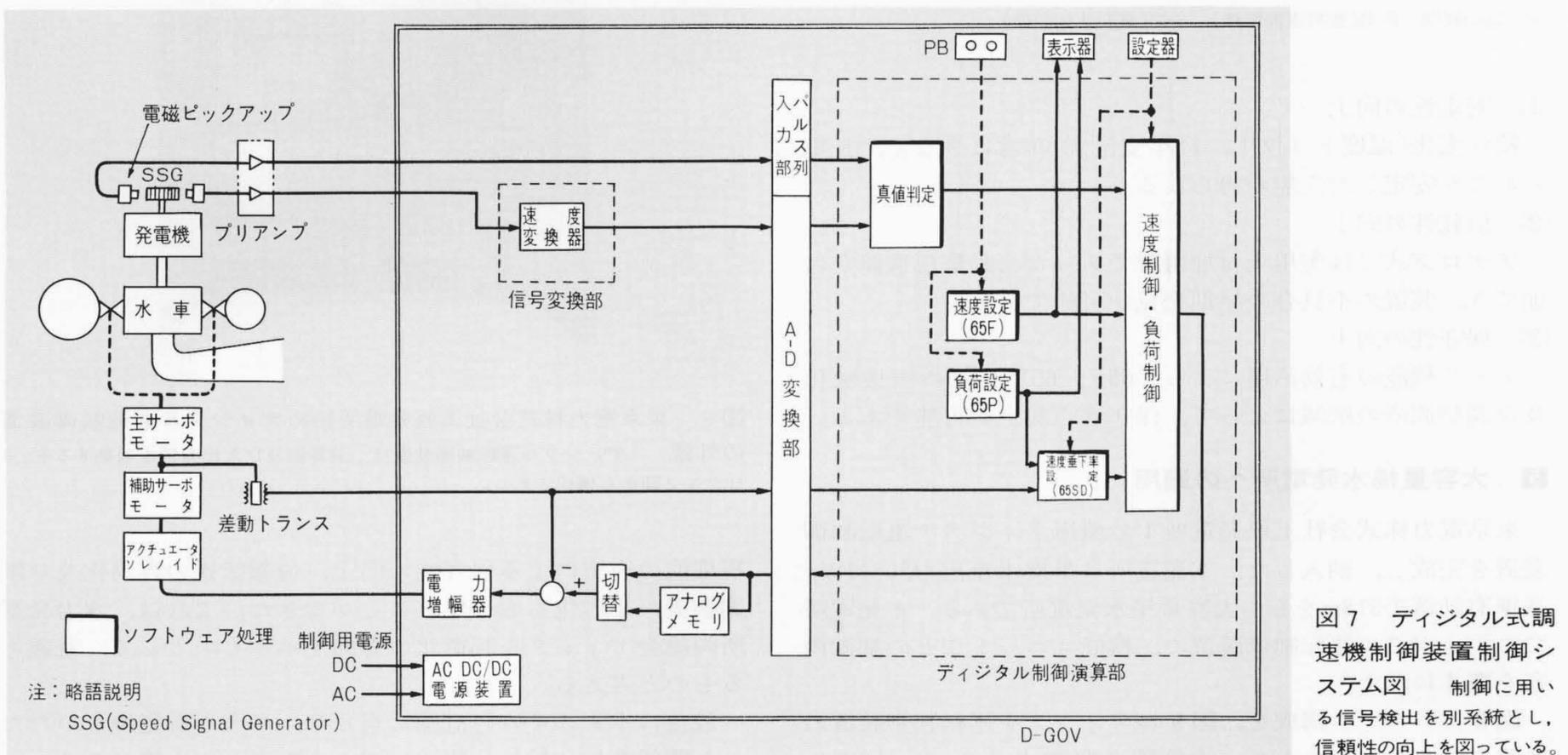


図7 デジタル式調速機制御装置制御システム図 制御に用いる信号検出を別系統とし、信頼性の向上を図っている。

発電所は大容量、高落差化、水路の長距離化など水車の安定性、負荷追従性に悪影響を及ぼす要因が多く、高性能な調速機の採用が必要となってきている。これら高速制御システムにも、マイクロコンピュータの適用によるデジタル化が行なわれており、図7にデジタル調速機制御装置の制御システムを示す。本装置の動作は発電機上部に取り付けられたSSG(Speed Signal Generator)と呼ばれる歯車と電磁ピックアップによって、主機回転数に比例したパルスを得、パルス列入力部を介してデジタル状態量を検出する。また検出信

号の信頼性の向上を図るため、別系統の電磁ピックアップによって速度変換部、A-D変換部を介して入力し、真値判定を行ないガイドベーン開度などの状態量と合わせて、速度制御、負荷制御の演算を行ない結果を出力する。この信号を外部にあるアナログメモリに記憶させることによって、万一マイクロコンピュータに異常が起きた場合、異常検出時の位置にガイドベーン開度をロックすることも可能である。

次に従来のアナログ式と比較した場合、デジタル式の特長について以下に述べる。

表4 東京電力株式会社玉原発電所納めデジタル運転制御装置機能一覧 本装置ではシーケンス制御ユニット及びモニタユニットを別置として、それぞれ二重化を図った。

No.	ユニット名称	制御内容
1	シーケンス制御 (二重化)	各種運転モードでのシーケンス制御 (1) 発電運転 (2) 発電調相運転 (3) 発電-発電調相切換運転 (4) 試送電運転 (5) 揚水運転 (6) 揚水調相運転 (7) 揚水-揚水調相切換運転
2	モニタ (二重化)	主機及び補機運転監視 (1) 起動方向制御渋滞監視 (2) 停止方向制御渋滞監視 (3) 主要機器監視 (4) 補機運転監視
3	入力制御 (二重化)	現場条件の入力処理 (1) デジタル入力の時系列照合処理 (2) アナログ入力の時系列平均化処理 (3) アナログ入力の単位変換処理
4	調整制御	主機運転状態での二次調整制御 (1) 水位差応動制御 (2) 自動負荷調整制御 (3) 自動無効電力調整制御
5	遠方監視 制御子局	伝送ユニットと組合せ、遠方監視制御子局処理 (1) 制御所との各種信号伝送に必要なデータ取り込み、変換、編集処理 (2) P-S変換, S-P変換, 復・変調処理

注：略語説明 P-S(並列直列変換), S-P(直列並列変換)

(1) 安定性の向上

特性変化(温度ドリフト, 経年変化)が非常に少なく, 長期にわたり安定した性能が得られる。

(2) 信頼性の向上

アナログ式では実用上付加困難であった自動監視機能が付加でき, 装置の不具合の早期発見が可能である。

(3) 保守性の向上

メモリ機能の有効活用によって65F, 65Pなどの無接触化及び調整個所の削減によって, 保守性の向上が可能である。

5 大容量揚水発電所への適用

東京電力株式会社玉原発電所1号機用デジタル運転制御装置を完成し, 納入した。本発電所は単機水車出力308MW, 基準有効落差518mをもつ大容量揚水発電所である。本発電所でのデジタル運転制御装置の, 機能ユニットごとの制御内容を表4に示す。

図8はシステム構成を, 図9はデジタル運転制御装置の外観を示したものである。演算部を収納するキュービクル(図9の右側)及び入出力部を収納するキュービクルの2面から構成され, このほかに変換器, 電源装置などを収納するキュービクル, 端子処理を行なうキュービクル2面がある。

6 結 言

マイクロコンピュータを適用した大容量揚水発電所用デジタル運転制御装置, 自動電圧調整装置及び調速機制御装置について述べた。本装置は従来の電磁形リレーを主体とした制御装置に代わるものであり, マイクロコンピュータの特長を生かし, 二重化構成による信頼性, 稼働率の向上, 自動監

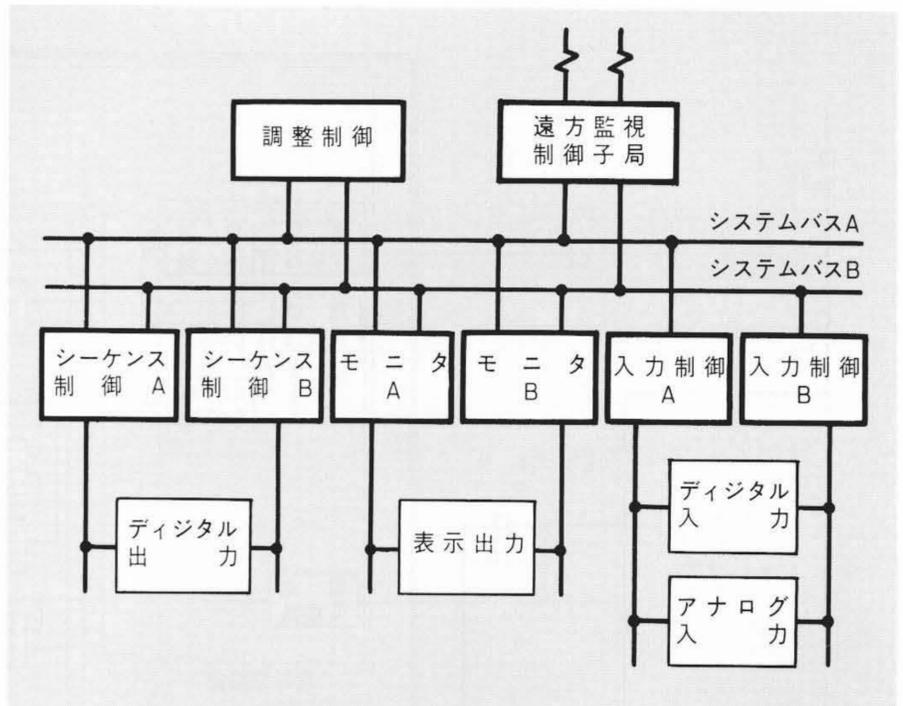


図8 東京電力株式会社玉原発電所納めデジタル運転制御装置システム構成図 太枠は機能ユニットを示す。

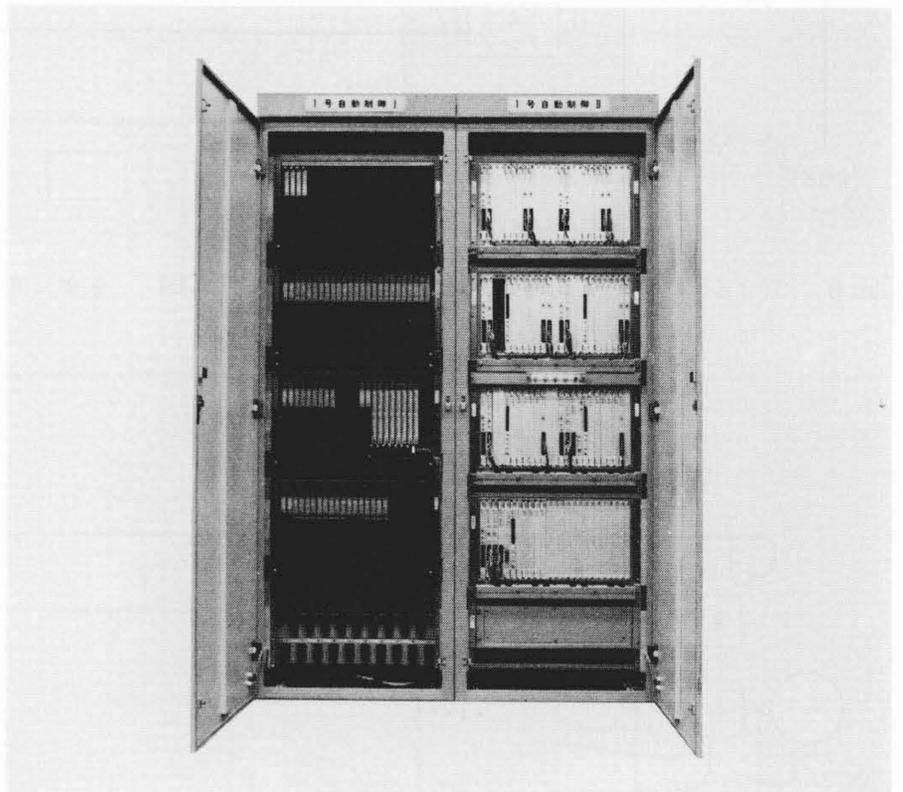


図9 東京電力株式会社玉原発電所納めデジタル運転制御装置の外観 デジタル運転制御装置は, 演算部及び入出力部を収納するキュービクル2面から構成される。

視機能の充実による保守性の向上, 情報伝送の容易化及び制御装置の小形化を成し得ることができた。これは, 水力発電所の総合デジタル制御化の方向を示すものとして, 意義あるものとする。

最後に本システムの計画に当たり, 多大な御指導をいただいた関係各位に対し, 厚く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 木村, 外: マルチマイクロコントローラによるプラント制御装置の二重化方式, 電気学会全国大会論文集, 1609~1610 (昭57-4)
- 2) 青津, 外: 制御向け高位言語によるマイクロコントローラ用オンラインモニタ制御装置, 第21回SICE学術講演会論文集, 115~116(昭57-7)
- 3) 下山, 外: PCの高速制御システムへの応用, 電気学会雑誌, 102巻, 4号, 289~292(昭57-4)