

火力発電所総合全自動化シミュレータ

Thermal Power Plant Total Automation Simulator

A thermal power plant simulator for the development of advanced total automation system has been developed through a joint work of the Central Research Institute of Electric Power Industry and Hitachi, Ltd. The intended automation covers such functions as optimum control, emergency processing, and adaptive control.

In this article are described the scope of research undertaken by the above two groups and the system configuration of the simulator.

竹内 元* Hajime Takenouchi
 堀 昭史** Akifumi Hori
 宮岡貞隆** Sadataka Miyaoka
 水谷 弘** Hiroshi Mizutani
 丸山英久*** Hidehisa Maruyama
 中田 昭**** Akira Nakata
 飯岡康博**** Michihiro Iioka
 中野善之***** Yoshiyuki Nakano
 西田武彦***** Takehiko Nishida

1 緒 言

火力発電技術は大容量化と効率向上の点で著しい進歩を遂げるとともに、自動化の点でも着実な発達を遂げている。しかし、近年の火力発電設備比率の増加、将来の原子力発電設備比率の増加に伴い、系統運用上の要請に応じて、火力発電プラントのひんばんな起動停止、負荷の大幅な調整、事故時の敏速適切な処理などを安全確実にこなすようになることはきわめて重要なこととなりつつある。

すでに、火力発電所の起動停止については電子計算機による自動化が実施されているが、火力発電所の諸設備には、多くの運転操作上の制限条件があり、高温、高压、大容量の複雑な諸設備の運転操作・制御動作を協調させつつ機器の損耗を最小にし、系統要請にこたえた負荷変動運転、起動停止操作を安全確実にこなすための総合全自動化システムが要求されている。しかし、このような火力総合全自動化システムを実発電所で直接開発することは困難である。特に発電機器の許容限界や事故時の運用操作の研究などは、最近の電力事情とも関連し不可能に近い。このため、実発電設備に代わってこれらの実証研究が可能な模擬装置の開発が望まれていた。火力総合全自動化シミュレータはこの目的に沿って、財団法人電力中央研究所と日立製作所の共同研究により開発されたもので、世界でも例のない大規模な研究設備である。本シミュレータは訓練用シミュレータとは異なり、研究解析用シミュレータである。以下、本シミュレータの構成を中心に研究構想、シミュレーション方式の概要について述べる。

2 研究構想

2.1 構 想

火力発電所に対する系統運用上の期待は、電力の安定供給と発電プラントの高効率運転にあることは言うまでもないが、わが国の電力事情から考察すると、原子力発電が基底負荷を分担し、火力発電が中間負荷を分担、水力・ガスタービン発電がせん頭負荷を分担する傾向になるものと考えられる。したがって、火力発電においては、プラントのひんばんな起動停止と大幅負荷変動が予期される。これらの運用に十分対処するためには、

- (a) 火力発電プラントの特性の解明とその活用改善

表1 火力発電所総合全自動化シミュレータの研究内容 負荷変動許容限界や最適起動過程の研究が含まれている。

Table 1 Items of Research by Using a Simulator for Total Full Automation of a Thermal Power Plant

大題目	研 究 題 目		火力発電所総合全自動化シミュレータ		
	中 題 目	小 題 目	*1	*2	*3
火力発電ユニット特性の解明ならびにその活用改善に関する研究	火力発電ユニットシミュレーションの実証的研究	ドラム形ボイラの火力発電ユニットシミュレーション方式	●		
		亜臨界圧貫流形ボイラの火力発電ユニットシミュレーション方式			
		超臨界圧火力発電ユニットのシミュレーション方式			
火力発電ユニットの負荷変動許容限界向上の研究	火力発電ユニットの負荷変動許容限界向上の研究	ドラム形ボイラの火力発電ユニット負荷変動許容限界	●	●	
		亜臨界圧貫流形ボイラの火力発電ユニット負荷変動許容限界			
		超臨界圧火力発電ユニット負荷変動許容限界			
運転方式合理化による起動停止特性向上の研究	運転方式合理化による起動停止特性向上の研究	ドラム形ボイラの起動停止特性	●	●	
		亜臨界圧貫流形ボイラの起動システム			
		超臨界圧ボイラの起動システム			
火力発電ユニットの管理用論理判断指令方式の研究	最適計画機能の研究	ドラム形ボイラの火力発電ユニット最適起動過程	●	●	●
		亜臨界圧貫流形ボイラの火力発電ユニット最適起動過程			
		超臨界圧火力発電ユニットの最適起動過程			
	起動時適応制御の研究	起動時動特性自動測定方式	●	●	●
		起動時適応論理判断方式			
		適応単能制御方式			
事故時自動処置の研究	事故発生箇所探索方式	●	●	●	
	事故予測自動処理方式				
	事故処置論理判断方式				
単能制御装置の制御分担範囲に関する研究	アナログ制御方式	●	●	●	
	アナログ・デジタル併用制御方式				
計算機直接制御方式の研究	燃焼制御方式	●	●	●	
	給水制御方式				
	蒸気温度制御方式				
起動時蒸気圧力温度単能制御方式の研究	ドラム形ボイラ起動時単能制御方式	●	●		
	亜臨界圧貫流形ボイラ起動時単能制御方式				
	超臨界圧ボイラ起動時単能制御方式				

注：*1. 機器動特性模擬装置 *2. 制御操作盤 *3. 管理用論理判断指令装置

* 財団法人電力中央研究所 工学博士 ** 財団法人電力中央研究所 *** 日立製作所電力事業本部 **** 日立製作所大みか工場 ***** 日立製作所日立研究所 ***** 日立電子株式会社

(b) 発電プラント運転の最適計画，起動時適応制御，事故時自動処置の方式確立と自動化の両面から研究を行なう必要がある。

そのため，これらの研究を火力発電所総合全自動化シミュレータにより実施しようとしており，その構想を下記に示すと同時に，その具体的研究内容を表1に示す。

- (a) ボイラについてはドラム形，貫流形ボイラのいずれの研究も可能とする。
- (b) プラント容量は500～1,000MWまで模擬を可能とする。
- (c) 実発電所では実施不可能な条件での運転状態も模擬可能とする。
- (d) シミュレータの構成はハイブリッド形とする。
- (e) 実プラントデータの集録と活用が容易なシステムとする。
- (f) シミュレーション実験の時間スケールが変えられるようにする。
- (g) シミュレーションの任意の時点でホールドし，その状態から容易に再スタートできるようにする。

なお，本シミュレータは後述する機器動特性模擬装置，制御操作盤および管理用論理判断指令装置を中心に構成するようにした。図1は火力発電所総合全自動化シミュレータの構成を示すものである。

2.2 火力発電プラント特性の解明とその活用改善

本研究では，定常負荷運転時に比較して，複雑な挙動を呈する起動運転特性の解明を図る。また，発電プラントの起動停止に機器の厚肉部，特にタービンロータやケーシングに過渡的にかかる熱応力を低く押え，機器寿命の低下防止と安全性，信頼性の増大を図るための最適起動過程の研究なども含まれる。また，中間負荷分担責務増大の見地から，発電プラントのいっそう合理的かつ迅速な起動停止を行なうため，ボ

イラとタービンの協調を図り，特にタービンメタル温度に適合した圧力，温度の蒸気を迅速にタービンに供給して起動時間の短縮を図るなど，運転制限条件を考慮しつつ給電要請に即応する最適な起動，停止運転方式の開発も含まれている。

2.3 火力発電ユニットの管理用論理判断指令方式

本研究では，管理用論理判断指令装置により高度な論理判断を行なって，機器の状態に応じた運転制御操作を指令し，機器のいかなる状態でも自動的に的確な処置を行なって，総合的に最適な運転を可能にする総合自動化システムを研究開発することをねらっている。

管理用論理判断指令装置は次の四つの機能を持っている。

- (1) 適応制御機能
機器の状態パターン認識，動特性推定，学習制御，予測制御の機能を含み，火力発電ユニットの動特性の変動に応じて，最適計画機能を通じて運転操作スケジュールの修正または制御動作の修正を行なう機能である。
- (2) 最適計画機能
起動停止および大幅な負荷変動の給電要請に即応するため，火力発電ユニットの現在の状態および動特性推定結果を利用して，点火準備からの運転スケジュールを発電所全体が総合して最適なものとなるように計画する機能である。
- (3) プログラム作成指令機能
最適計画機能の指令を受け，操作部および単能制御装置に所定の手順に従った指令を発する機能である。
- (4) 事故時自動処置指令機能
火力発電プラントの異常状態発生に際し，プラント挙動の様相を識別し，事故の未然防止，または事故対処を迅速かつ適切に行なう機能である。次に，本研究計画に基づく主要予想効果は下記のとおりである。

(a) 起動停止の迅速化

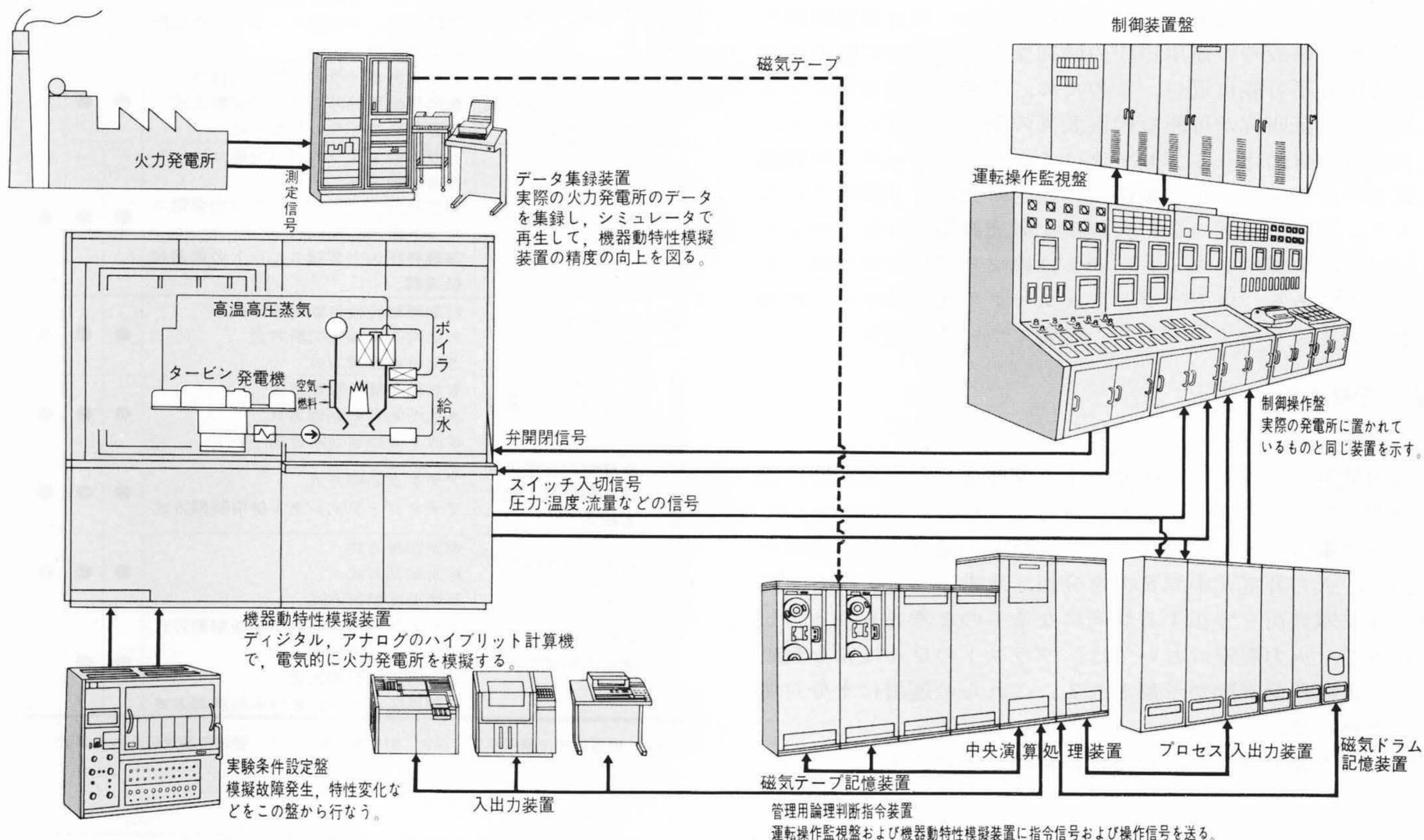


図1 火力全自動シミュレータの構成 ハイブリッド計算機で火力発電所を模擬している。

Fig. 1 Schematic Diagram of a Simulator for a Thermal Power Plant

- (b) 負荷応動能力の増大
- (c) 事故対処能力の増大
- (d) 急速再起動
- (e) 電力系統運用自動化システムとの効果的連係
- (f) 起動停止の最適円滑な実施, 高能率運転の維持などに基づく燃料費の節減, 運転の省力化

3 シミュレータの構成と機器の概要

3.1 シミュレータの構成

図2は火力発電所総合全自動化シミュレータの機器構成を示すものである。本装置は大別すると、火力発電プラントを模擬した機器動特性模擬装置、中央制御盤およびプラント自動制御装置に対応した制御操作盤ならびに機器動特性模擬装置および制御操作盤に対して高度な制御指令を与える管理用論理判断指令装置を中心に構成されている。表2は火力発電所総合全自動化シミュレータの構成機器を示す一覧表である。

機器動特性模擬装置、制御操作盤および管理用論理判断指令装置は、それぞれ単独または部分的結合を行なって使用することが可能なよう構成されている。特に、機器動特性模擬装置と管理用論理判断指令装置は、研究開発の途中で、並行してソフトウェアの開発を行なう必要があり、その要求にも対処できるように構成されている。なお、シミュレータの全装置を結合して研究実験を実施する場合の、運転操作の中心はオペレータコンソールであり、運転操作監視盤の中央に設

置されている。

また、実発電所のプラントデータを磁気テープに集録して、機器動特性模擬装置でのプラント特性検討に役だてられるようデータ集録装置が結合できるように考慮されている。

実験条件設定盤は、模擬故障の発生や、プラント特性変化を実験条件として与えやすくするために設けられたものである。

3.2 機器の概要

3.2.1 機器動特性模擬装置

図3は機器動特性模擬装置の外観を示すものである。本装置は、ドラム形ボイラまたは貫流形ボイラを有する火力発電ユニットの、ボイラ、タービン発電機、復水器、給水加熱器、給水ポンプおよび強制通風機などの主要補機ならびに起動バイパス系統その他各種系統を模擬する装置である。対象となる系は相当複雑であり、また、できるだけ実発電ユニットの動作に近い模擬を行なう必要があるため、各部分の特性を模擬する方式の検討を行なった結果、ハイブリッド計算機システムとした。すなわち、流体の流れを模擬する場合のように比較的簡単で、しかも伝達関数で示されるような部分は、アナログシミュレーションが好適であり、タービン特性のように運転条件によりパラメータの大幅な変化を伴うものや、火炉特性のような四則演算を主体とした部分には、デジタル計算の手法が有効である。さらに、熱交換器、蒸発部特性のうちには、蒸気温度のように伝達関数により求める部分と、

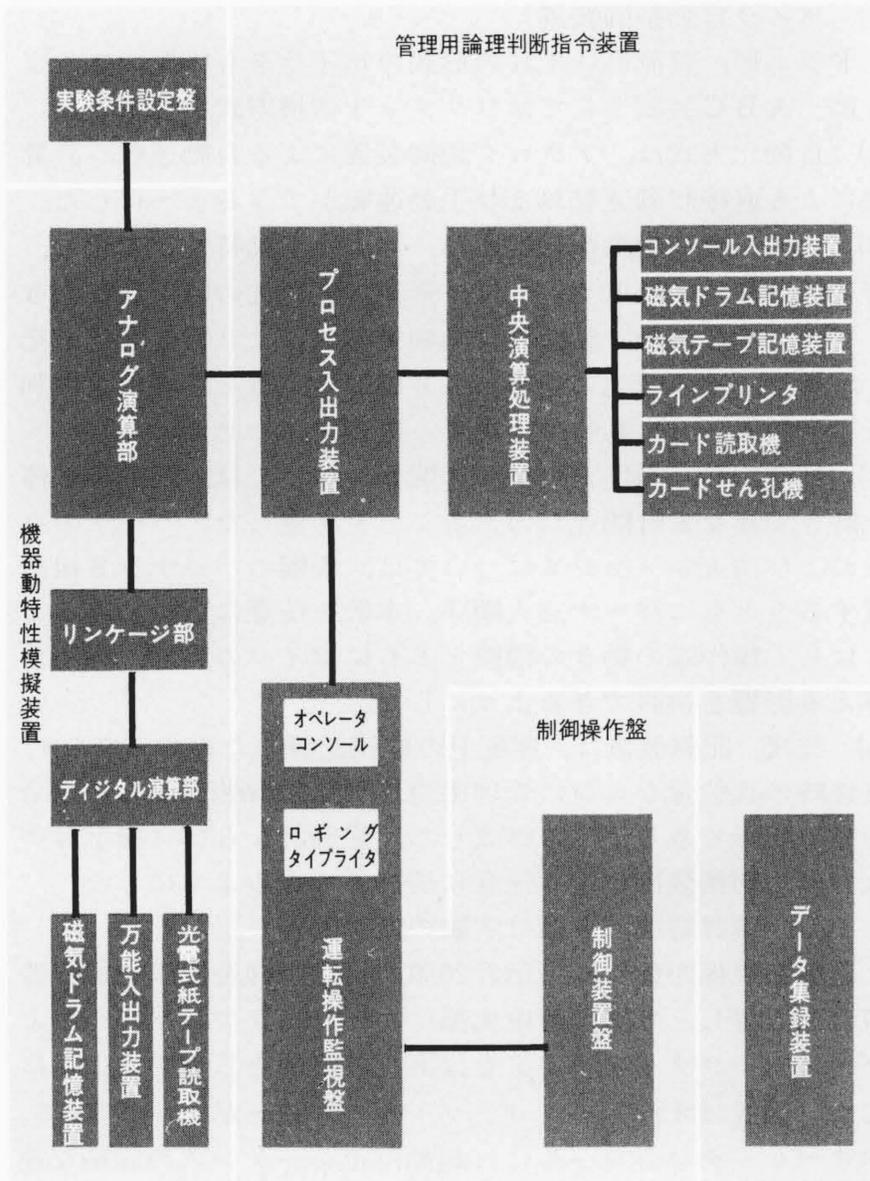


図2 火力全自動化シミュレータ機器構成 管理用論理判断指令装置のプロセス入出力装置が機器動特性模擬装置と制御操作盤との信号授受を行なう。

Fig. 2 Configuration of Devices for a Simulator of Thermal Power Plant

表2 火力発電所総合全自動化シミュレータ構成機器 大規模なアナログ演算部と制御用計算機を中心に構成されている。

Table 2 List of Devices for a Simulator for Total Full Automation of a Thermal Power Plant

区分	装置名称	主要構成機器	備考
機器動特性模擬装置	アナログ演算機	加算器, 積分器, 乗算器, ポテンショメータ関数発生器	加算器 220台を含む大規模なもの
	リンケージ部	A-D, D-A変換器	A-D変換器 122台を含む。
	デジタル演算部	ハイブリット用小形計算機	コア 8k語 補助メモリ 64k語
制御操作盤	運転操作監視盤	自動制御装置設定器 操作スイッチ 指示計, 記録計 オペレータコンソール	実発電所中央操作盤とほぼ同一規模
	制御装置盤	自動制御装置 条件判定比較器 インタロックリレー 定電圧電源装置	自動制御装置用演算機約 220台を含む。
管理用論理判断指令装置	中央処理装置	HITAC 7250 システム	コア 32k語 補助メモリ 512k語
	プロセス入出力装置	アナログ入出力 デジタル入出力	
	周辺装置	ラインプリンタ, 磁気テープ, カード読取器 コンソール入出力装置	
その他	実験条件設定盤	アナログ計算機と設定盤	



図3 機器動特性模擬装置 アナログ計算機と専用デジタル計算機のハイブリッド構成となっている。

Fig. 3 A Plant Dynamics Simulator Devices for B-T-G Unit

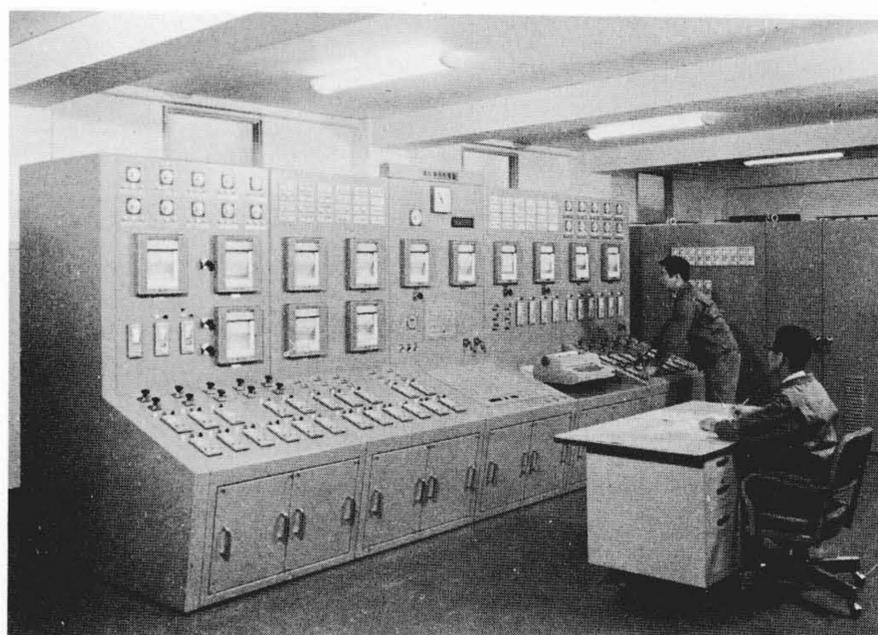


図4 制御操作盤 運転操作の中心は、運転操作監視盤で行なわれる。

Fig. 4 Control and Operating Panel of the Simulator

ガス温度、伝熱パラメータのように多項式により求める部分が混在している形のものがあり、これらに対してはアナログ、デジタル両方の手法が必要となる。

機器動特性模擬装置の構成は、前述の表2に示したようにアナログ演算部、リンケージ部およびデジタル演算部から成っている。

アナログ演算部は、本模擬装置が機器の動特性模擬を主体として使用するときの時間短縮を伴う模擬と、火力全自動化シミュレータとして使用する場合の実時間による模擬を考慮して、積分時定数を1/1,000~100sまで設定できるように考慮した。

さらに、火力発電ユニットの各機器の特性解明を必要に応じプログラムを組み変えて詳細に模擬できるよう、固定配線式とせずプリパッチ盤方式を採用し、回路変更の自由度を確保した。なお、プリパッチ盤方式での接触回路数の増加を避けるため、積分器についてはアナログ演算部内で積分素子と演算増幅器の接続を行ない、また乗除算器、関数発生器については、演算増幅器を組み込み配線を行なって、プリパッチ盤上での接続数の削減を図った。

一方、デジタル演算部は、8k語のコア記憶容量を有し、数値語18ビット、サイクルタイム2 μ sのハイブリッド用計算機CLOAP-2000Eで構成し、64k語の外部記憶装置と組み合わせ、今後の模擬規模の増大に対処した。

リンケージ部は、アナログ、デジタルの各信号を変換するA-D変換器、デジタルポテンショメータ、D-A変換器を含み、またアナログ演算部、デジタル演算部間の制御信号もこの部分を介して伝達するようになっている。

3.2.2 制御操作盤

図4は制御操作盤の外観である。本制御操作盤の構成は前述の表2に示したように、火力発電ユニットの集中監視操作を行なう運転操作監視盤と、ユニットの起動停止ならびに通常負荷運転時におけるボイラ、タービンの自動制御を行なう制御装置盤から構成されている。

制御操作盤は実発電ユニットと同一の機能構成とすることが望まれるが、模擬する内容が必ずしも実発電ユニットと同一でないことおよび発電ユニットではまだ実用化されていない運転方式の実験的研究が必要なことなどから、次の点を考慮して各装置を構成した。

(1) ボイラ自動制御装置(ABC)、計測装置、警報表示器などの装置本体は、原則として実発電ユニットと同一のものを使用し、それら装置により構成される制御・計測系統、警報系統およびその機能は模擬に適したものとする。

(2) 各装置が構成する系統は、その構成を任意に変えることにより、模擬装置の特性変更に応じた最適な運転操作、あるいは新しい運転方式の開発を可能とする。

以下、本装置の構成上の特長について述べる。

(1) ボイラ自動制御装置

ドラム形、貫流形いずれの形式のボイラをも模擬できるように、ABC装置としてはワンタッチ切換方式を採用した。

(2) 自動化方式は、アナログ制御装置による自動運転、計算機による直接制御運転および手動運転ができるようにした。

(3) 大幅な負荷変動運転時には、ユニット動特性が変化し、特に低負荷時ではドラム水位、蒸気温度特性の時定数が大きくなる。そのため、動特性自動測定装置により特性変化を把握し、その変化に適応して制御器の定数を管理用論理判断指令装置から自動的に変更する機能を持たせた。

(4) 補機、弁、操作シーケンス関係については、起動時と停止時とで異なる時間遅れのあることを考慮した。バーナの点火および消火シーケンスについては、模擬のバーナを8組設置するとともにバーナ点火順序、本数を任意に選択できるようにし、操作端の動きの模擬とともにボイラの昇温、昇圧に与える影響を検討できるようにした。

(5) 監視、記録装置は、運転上の監視記録のためのみならず、実験時の状態量ならびに管理用論理判断指令装置からの指令信号も記録できるように構成した。記録計ならびに指示計の入力は、切換装置により任意に切換えできるようにした。

なお、積算時間計を設け実験の便を図った。

運転監視操作盤には指示計20個、自動制御装置設定操作器47台を設置し、さらに盤中央部にオペレータコンソールおよびメッセージタイプライタを設置して実験をしやすいようにした。図5はオペレータコンソールの外観を示すものである。本オペレータコンソールには起動停止シーケンスの詳細な運転状態表示器、最適計画機能・適応制御機能・事故時自動処置機能など各種機能の生死選択スイッチ類のほか、実験データの設定や各種印字記録などの作動指令選択スイッチが設けられている。

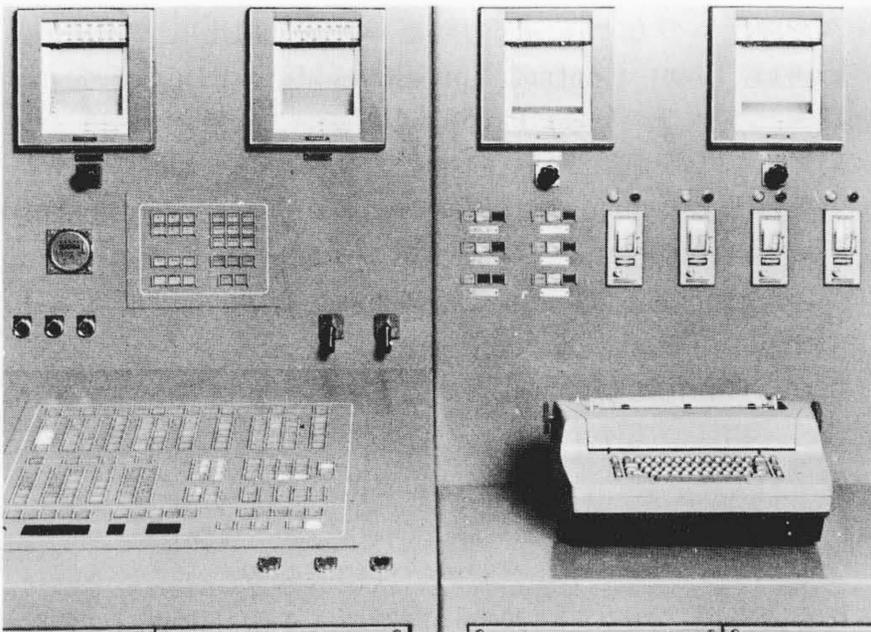


図5 オペレータコンソール シミュレーション試験の各種状態表示が一括行なわれる。

Fig. 5 Operator's Console

3.2.3 管理用論理判断指令装置

管理用論理判断指令装置は、火力発電所総合全自動化シミュレータ運転に必要なあらゆる情報を収集し、高度な論理判断を実行し、全自動運転を遂行するシミュレータの中核部である。このため、本装置は制御用デジタル計算機HITAC 7250を中核とし、プロセス入出力装置部から火力発電ユニットの機器に相当する機器動特性模擬装置および計測制御装置に相当する制御操作盤を対象として、情報の収集および運転指令の発信を行なう。また、最適計画機能、適応制御機能および事故時自動処置指令機能ならびにプログラム作成指令機能などを論理判断するものである。

管理用論理判断指令装置の機器構成は、前述の表2に示したように、32k語のコア記憶容量を持つ中央処理装置、512k語

の記憶容量の補助メモリ装置を中心に、プロセス入出力装置および周辺機器群から構成されている。

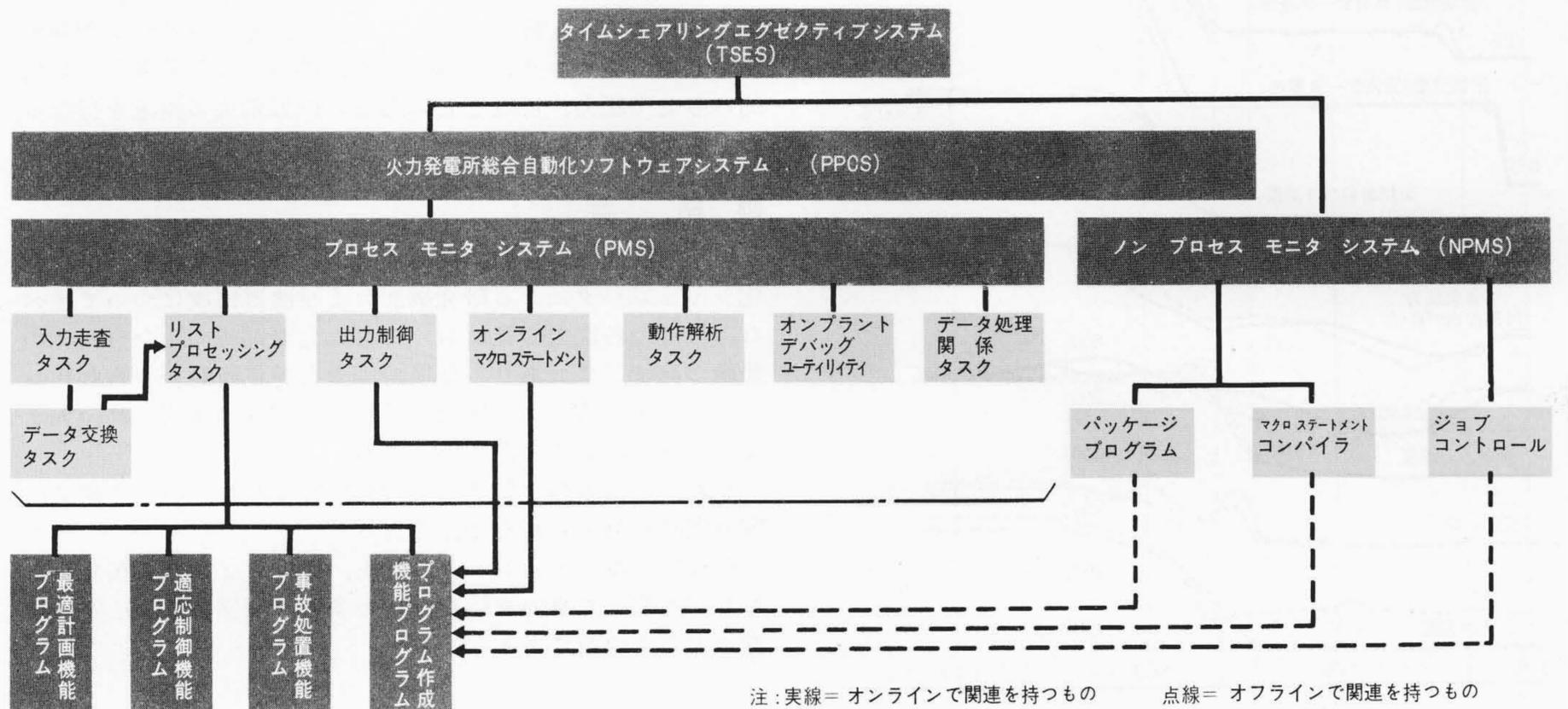
なお、本装置のプロセス入出力装置部分は、アナログ計算機からの両極性信号を扱うよう設計され、周辺機器にはプログラム開発やシミュレーション実験途上における各種データが容易に得られるようラインプリンタおよびカード読取装置を具備している。また、磁気テープ装置を備えて、データ集録装置により現地実プラントで収集したデータの読みみや、研究開発途中におけるソフトウェアシステムのプログラム装荷、ライブラリプログラムなどの利用が簡便に行なえるようになっている。

4 ソフトウェア

4.1 シミュレーションソフトウェアの概要

シミュレータのソフトウェアは、機器動特性模擬装置で発電プラント自体を模擬するためのソフトウェアと、管理用論理判断指令装置のソフトウェアとに大別される。機器動特性模擬装置は前述したように、アナログ計算機ALS-2000Aとデジタル計算機CLOAP-2000Eとのハイブリッドシステムとなっている。火力発電プラントの特性を模擬する模擬方式の構成については4.2で述べるが、本ハイブリッドシステムでは、これら模擬方程式を解く処理は全く混合演算として行なわれるようになっている。すなわち、アナログ部とデジタル部の相互の信号授受はそれぞれ120数チャンネルにおよび、A-DおよびD-A変換器により行なわれ、アナログ部のみでは困難な非線形時変動係数微分方程式で表わされるプラント特性が容易に処理できるように構成されている。なお、本システムのソフトウェアはハイブリッド演算用のCLOAPS およびHYBRID-FORTRANを完備している。

次に、管理用論理判断指令装置のソフトウェアは、前述の適応制御機能、最適計画機能、プログラム作成指令機能などを研究開発するのに適したものでなければならない。そのためには、



注：実線＝オンラインで関連を持つもの 点線＝オフラインで関連を持つもの

図6 管理用論理判断指令装置のソフトウェアシステム 研究開発用のマクロ命令やライブラリプログラムが豊富に準備されている。

Fig. 6 Software Structure of Computer System

- (1) プログラム構成は、ユニットの運転状態および機器の動作状態に柔軟に適用できる多様性を持ち、かつビルディングブロック方式による機能の追加削除が容易であること。
 - (2) 研究開発対象のアプリケーションプログラムを効果的に支援できるよう火力発電ユニットの運転制御に特有なベシックソフトウェアが完備されていること。
 - (3) ユニットの運転制御および操作に必要なとされる一連の処理を記述するに適切な言語が準備されていること。
 - (4) 開発済みのオンラインで作動するプログラム群と、プログラム作成およびデバッグのためオフライン用プログラム群が準備されていること。
- などが不可欠な条件である。

図6は管理用論理判断指令装置のソフトウェア構成を示すものである。本装置のソフトウェアシステムは、発電ユニットのオンライン研究と並行して、オフラインでプログラム開発ができるタイムシェアリングエグゼクティブシステム(TSS)を基本とし、オンラインプログラム管理を行なうプロセスモ

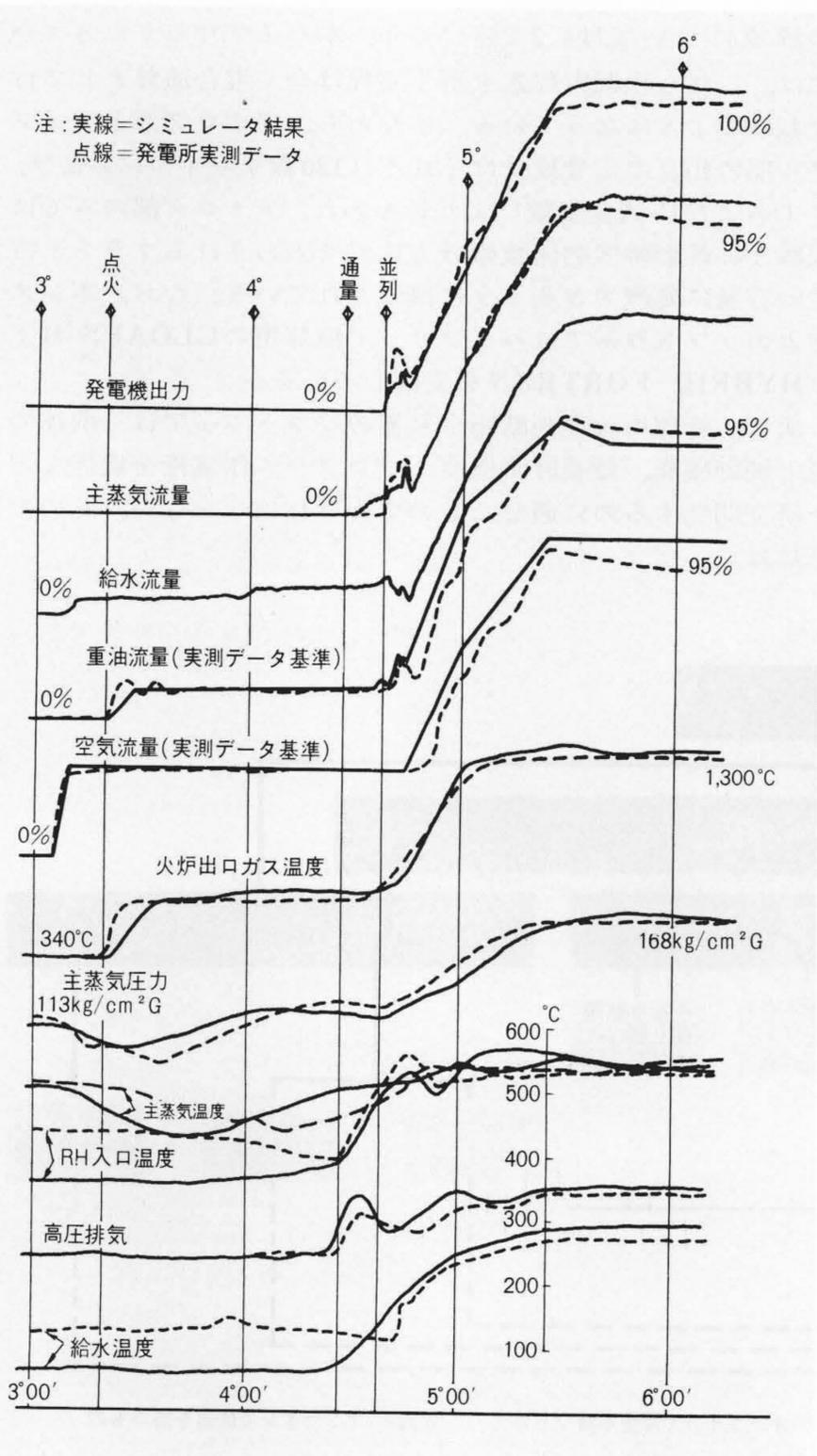


図7 起動時シミュレーション例 発電所の実測データと本装置の起動特性の模擬はよく一致している。

Fig. 7 An Example of Simulated Start-up

ニタシステムのもとに、火力発電所総合自動化用ソフトウェアPower Plant Control Software (以下、PPCSと略す)を具備している。このPPCSのもとでは、シミュレーション入出力として管理用論理判断指令装置の授受する信号のデータ処理はもとより、自動化用制御プログラムや、適応制御機能、最適計画機能およびプログラム作成指令機能などのプログラムが研究の進行とともに結合されて有機的に動作するようになっている。

なお、自動化用制御プログラム方式は、各機器を性格的に区分し、相互に関連するものだけを小グループにまとめ、一つのファンクショナルプログラムとしている。

4.2 模擬方式

発電ユニットの特性は機器動特性模擬装置でシミュレートされる。模擬ブロックは非常に複雑であるが、ブロック内に使用される模擬方程式は発電プラントの特性を正確に模擬し、しかもシミュレーション実験が行なわれやすいような考慮を払っている。

(a) 模擬方程式は、従来よく行なわれていた基準値からの偏差量について求めた線形式ではなく、絶対値について求めるものである。これは起動停止を含む広い負荷範囲を正確に模擬するためである。

(b) アナログ処理とデジタル処理との分割については模擬ブロックごとに検討し、模擬回路、プログラム効率、計算結果の精度などを考慮して決めている。ボイラ系ではデジタル、アナログ混合形となっており、タービン、給水系ではデジタル処理が中心となっている。

(c) 温度、圧力および流量などは火力プラントの模擬で最重要な変数であり、温度については蒸気やガスの特性を求める場合にエンタルピを基準とした模擬式から換算式を用いて求める方法とした。

(d) プラント補機の起動停止のむだ時間は、制御盤に備えたタイマにより設定することとするが、実験目的に応じてもっと正確な補機特性が必要となる場合には、補助演算盤上に模擬回路を組めるようにした。

図7は動作実験の一例として行なったプラント起動時の特性の模擬である。操作量としては試験信号を管理用論理判断指令装置のアナログ出力端から機器動特性模擬装置側へ自動的に与えて圧力、温度などの応答の模擬効果の検証を行なったものである。

5 結 言

以上、財団法人電力中央研究所納め火力発電所総合全自動化シミュレータによる研究構想および機器構成について述べた。最近、各電力会社においても火力発電所の総合自動化の要請が高まりつつあり、今後、本火力発電所総合全自動化シミュレータによる実証研究の成果が各方面に適用され、大きな効果をあげることが期待される。

なお、今後も引き続き共同研究が行なわれ、所期の研究内容の実証が進められる予定である。

最後に、本シミュレータの計画、研究および装置製作にあたりご指導、ご協力をいただいた多くの関係各位に心から謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 竹内ほか：「火力発電所総合全自動化シミュレータの仕様に関する調査研究」 電力中研、技一研、調査研究報告7017、(1971年3月)