

最新の火力計算機制御技術

New Technique of Computer Control for Thermal Power Station Automation

丸山英久*
Hidehisa Maruyama

桑原洋*
Yô Kuwabara

松村重兵衛**
Jyubei Matsumura

要 旨

火力計算機制御において特に問題が多かったアプリケーションソフトウェアについて、その解決のためのプログラム構成およびこれを実現するためのソフトウェアシステムを紹介し、あわせて DDC の代表的適用例としてのタービン昇速の手法について説明する。

1. 緒 言

1960 年代初頭にめざましい開発期を迎えた火力発電所の計算機制御は当初の予想に反し、計算機システム構成機器の信頼性不足、計算機応用のためのソフトウェア (Application Software) の未熟さなどからくる問題点が生じ、一時的に沈滞状態にあったが、その間においても鋭意開発研究が続行され、またデータロガー、シーケンスモニタなど計算機の情報処理装置としての応用により問題点の解決が図られた。その結果、計算機ハードウェア性能の大幅な向上にあわせてソフトウェア技術の開発も進み、当初問題点として取り上げられたもののほとんどは解決、ここに第二の飛躍の時期を迎えようとしている。

本稿では過去の問題点の摘出も含めて現在われわれが有する最新の火力計算機制御の技術を紹介するものである。なおここでは主として制御上の技術に限り、情報処理装置としての機能には触れないものとする。

2. アプリケーションプログラムの構成

従来計算機制御において採用されていたプログラムは、火力発電所を構成する各機器の操作を、その順序に従って時間的に並べて計算機に記憶実行させる方式で、いわゆる In-line プログラム方式と呼ばれるものである。この方式は次のような欠点を有している。

- (1) いったん成立した条件があとで満足できなくなった場合の振り変わりの処置が複雑である。
- (2) 制御が順調に進まなくなったときそれに対処するため以降の制御順序の変更に要するプログラムが膨大となる。
- (3) 上記と同じ趣旨であるがプラント起動、停止、通常負荷運転および異常状態それぞれに専用のプログラムを用意する必要がある、かつ機能的に重複する部分が多くなる。
- (4) プログラムが膨大となるため不完全、考え落としを生じ、完全を期待できない。したがって異常の際に運転員に多くの負担をかける結果となる。またデバッグに多大の労力を必要とする。これらの欠点を解決するため開発されたものが以下に述べる方式である。

2.1 システム分割

前述のように在来のプログラムはプラント各機器の操作を一定の時間的順序に従って並べる方式であるが、ここで述べるものは時間的順序に関係なく各機器を性格的に相互に関連あるものだけを小グループにまとめそれぞれに対応するプログラムを作るようにする。このシステムプログラムでそのシステム内のすべての情報、操作を取り扱うことになるが、このようにすることによりプログラムをシステム単位で考えれば良いため、比較的限定された情報の取り扱い

表 1 システム分割 (例)

No.	シ ス テ ム 名
1	ミルシステム A (ミル, フィーダ, サイロ)
2	ミルシステム B (ミル, フィーダ, サイロ)
3	ミルシステム C (ミル, フィーダ, サイロ)
4	ミルシステム D (ミル, フィーダ, サイロ)
5	ミルシステム E (ミル, フィーダ, サイロ)
6	軽油バーナ
7	ファン, 空気予熱器 (FDF, GRF, AH, パージ)
8	ボイラ雑 (ベント, ドレン弁, コンプレッサほか)
9	給水ポンプ, 復水ポンプ
10	ボイラアナログ (1) (燃料, 空気)
11	ボイラアナログ (2) (給水)
12	ボイラアナログ (3) (蒸気温度)
13	スートブロー
14	タービンコントロールシステム, ドレン弁
15	タービン軸受油, 制御油システム
16	コンデンサ真空, シール
17	給水加熱器
18	蒸化器, 補給水
19	冷却水系統
20	循環水系統
21	発電機, 各種遮断器
22	励磁機
23	発電機雑 (水素, 密封油システム)
24	その他

ですみ、プログラム作成が容易であるとともに、デバッグ、シミュレーションも小システム単位でできるので能率が良い。また自動化、非自動化の区別もシステム単位で考えれば良いため部分自動化から全自動へビルディングブロック式の拡張も行なうことができる。

表 1 はシステム分割の例であるがこのように 1 システム中には相互に密接に関連し合った機器、操作を含ませる必要がある。

2.2 システムプログラムの構成

各システムのプログラムはシステム内の処理をすべて行なわせるよう次のように機能別に区別されたプログラムを持たせる。この構成を Functional Approach 方式と呼んでいる。

(1) 理想状態決定プログラム DSD (Desired Status Determiner)

現在のプラント状態からそのシステムがいかなる状態にあるのが理想的であるかを決定するプログラムで、ある負荷以上では必ず給水ポンプ、復水ポンプとも 2 台ずつの運転が必要であると決定するなどがこれにあたる。

(2) 現実状態決定プログラム ASD (Actual Status Determiner)

現在そのシステムがいかなる状態にあるかを判定するプログラムで、たとえばシステムの中のポンプ 2 台が運転中かどうか、もし運転していたとしても 1 台は異常状態にあることなどを決める。

(3) 操作判断プログラム PP (Plan Picker)

DSD, ASD で決定された結果を比較して一致していなければ操作の指令を出すプログラム。もし一致していたたとえば運転員から機器の点検、修理の要求が与えられたとすれば代替機を起動

* 日立製作所国分工場

** 日立製作所日立工場

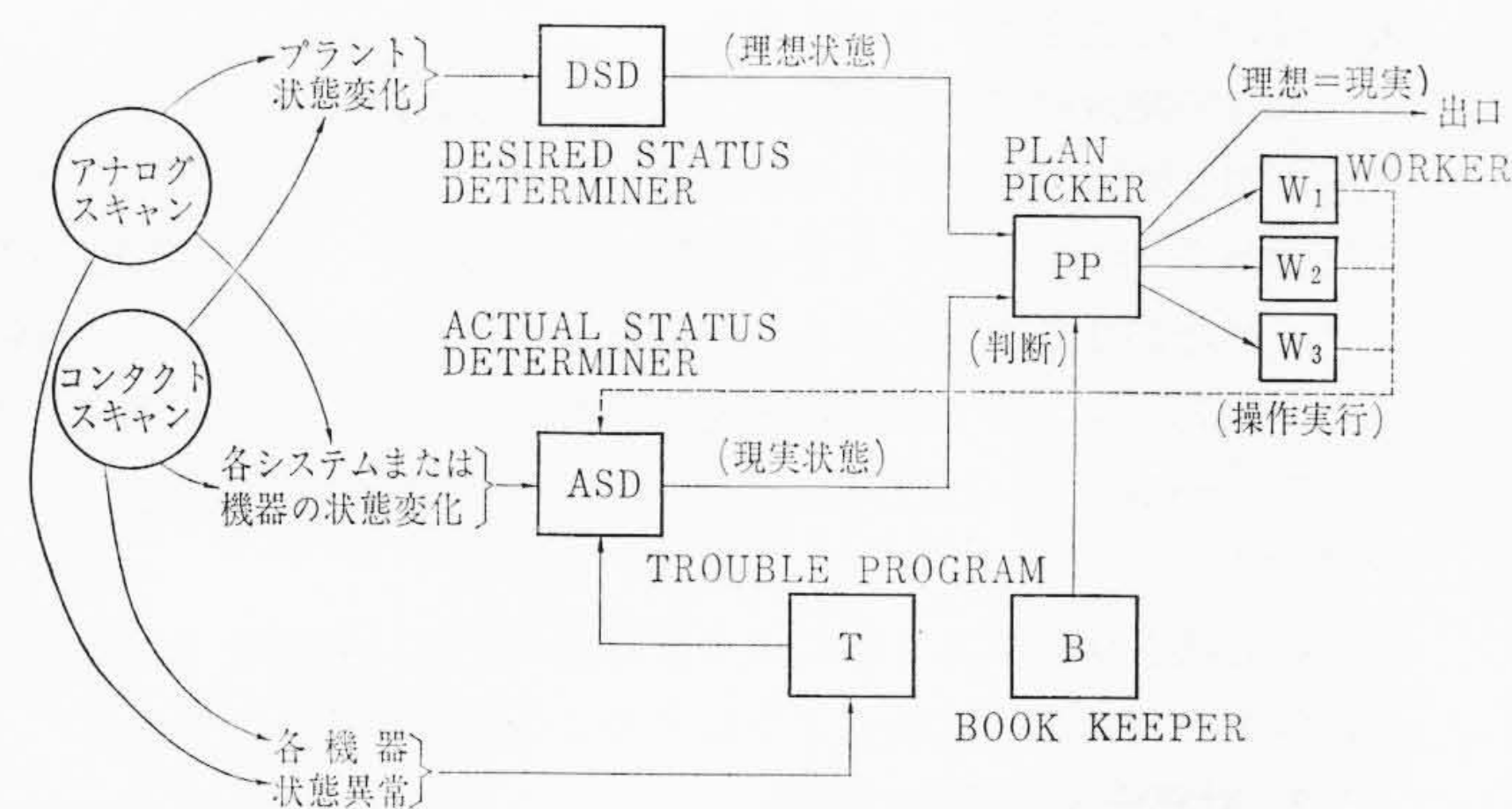


図1 各システムプログラム基本構成

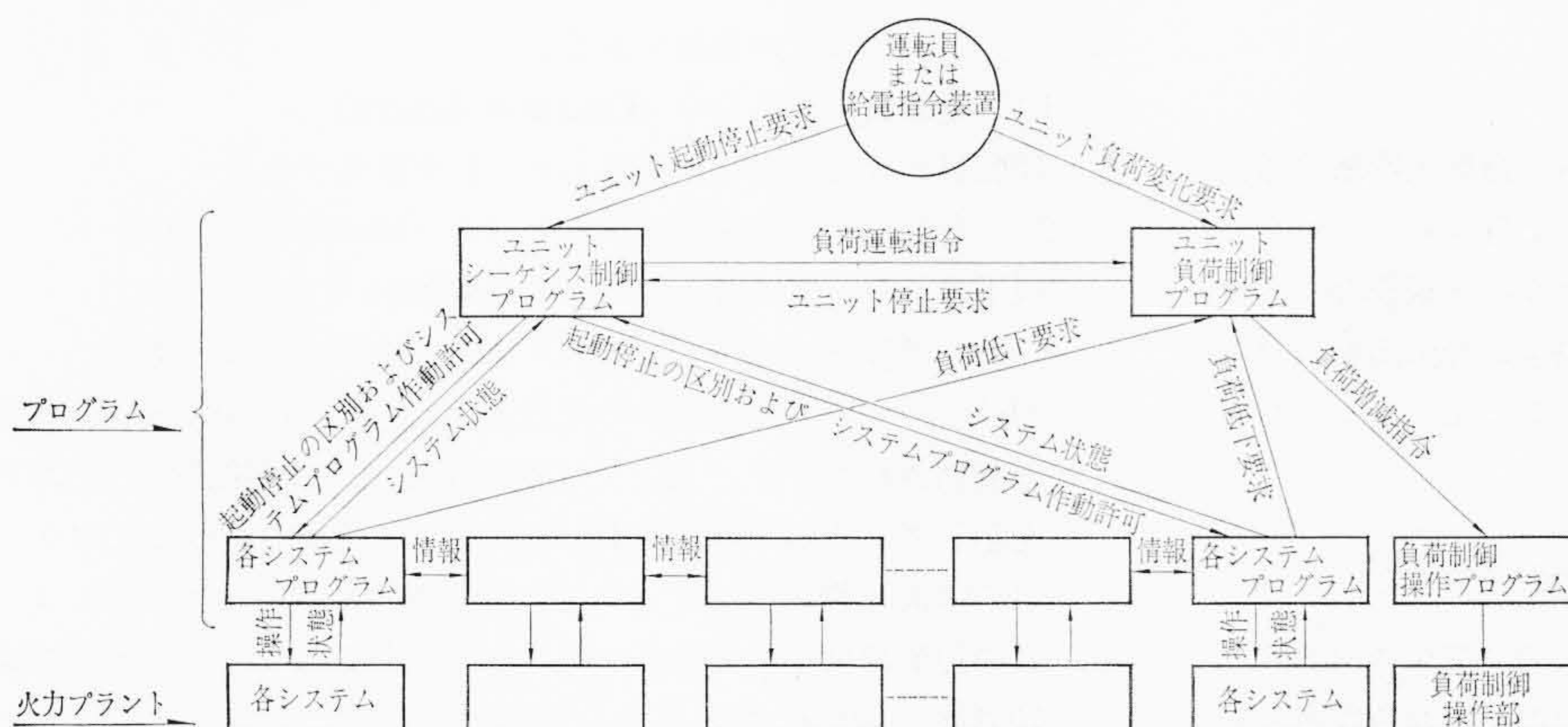


図2 全体プログラム構成

表2 ユニット起動制御表 (例)

ラインNO.に対応する
システムの状態

起 動 用 テ ー ブ ル

22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0																						
	0																					
		0																				
1	1	1	0																			
1	1	1	1	0																		
					0																	
						1	0	0												0		
							0															
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0													
										0												
									1	0												
											0											
1	1	1	1	1	1				1			0										
1	1	1	1	1	1				1			1	0									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1							
															0							
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
	1	1													1	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
																			1	0		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							0		
																			1	1	1	0

ライン
No.

システム名

1	ホットウエル
2	循環水系統
3	冷却水系統
4	復水ポンプ
5	ドラムレベル
6	ファン系統
7	ボイラバージ
8	軽油系統
9	蒸気圧力制御
10	潤滑油系統
11	ターニング系統
12	制御油系統
13	グランド蒸気系統
14	コンデンサ
15	タービンラッチ
16	発電機水素
17	タービン昇速
18	励磁系統
19	同期併列
20	負荷上昇
21	重油系統
22	負荷制御

← 一段のパターンが
一致すれば
このシステムの
DSDをトリガ

させてのちその機器を停止するといった判断を下す。

(4) 操作実行プログラム W(Worker)

PPからの指令により操作端を駆動するプログラム。ただしこのプログラムは単にPPからの指示ばかりでなく自身で機器の保安に関する判断を行なっている。所内電圧降下時にはたとえPPから大容量補機の起動指令が出されていても一時起動を保留することなどがこれにあたる。

(5) 異常監視プログラム T(Trouble Program)

入力走査(アナログおよびコンタクトスキャン)の結果から異常状態を判定してその結果をASDに与える。ASDは状態判定の一要素としてこれを用いる。

(6) 情報保持プログラム B(Bookkeeper)

大容量モータで一定時間内の起動回数制限がある場合、この起動回数を記憶しておくなど運転履歴に関するもののほか(1)~(5)のいずれにも属さないものでPPの判断に役立つデータをたくわえておく機能を持っている。

これらプログラムの相互関連は図1に示すとおりである。プログラム起動(トリガ)は後述のユニットシーケンス制御プログラムからのものを除き原則的にアナログ入力値およびコンタクト入力の状態に重要な変化が検知されると必要なプログラムをトリガする、いわゆる Event Orient 方式である。DSDについて言えば、ポンプ台数がユニット負荷に関係するものであり、負荷変化がスキャンの結果判明すれば、そのDSDはトリガされる。また遮断器接点がON→OFFまたはOFF→ONと変化すれば

関連するASDが動かされる。一般的にDSDまたはASDがトリガされればなんらかの操作が必要と考えられるため自動的にPPをトリガするしくみを採っている。PPが必要な操作ありと判断すれば操作実行のためのプログラムWを起動するがこのとき通常の操作が実行される時間だけ時間遅れをもってふたたびASDをトリガするようセットがなされる。操作の結果システムの状態が変化すれば当然入力の変化になりASDはこのほうからトリガされるなどであるが、万一操作に失敗したときふたたびPPに適切な判断を行なわせるためこのような方法をとっている。なおWの操作が成功して入力変化の結果からASDがトリ

ガされたときには操作時間経過からのトリガは実行されない。この関係は図1中の点線で示される部分である。

2.3 全体プログラム構成

前述のように各システムプログラムはそのシステム内でのすべての処置を行なうよう構成されているが、これらのシステムをプラント全体の立場から総合管理するプログラムが必要である。ユニットシーケンス制御プログラム、ユニット負荷制御プログラムがこれにあたり、これらと各システムプログラムとの関係を示したのが図2である。

(1) ユニットシーケンス制御プログラム

運転員または中央給電指令所より起動もしくは停止のいずれの操作をこれから行なうかの指令を受けプログラム中に有している各システムの状態と照合する表を選択する。表2はユニットの起動を取り扱うものの一例で横方向は各システムが稼働しているかどうかビットI(In-service)またはO(Out of service)で表わしたもので上段から順に現実の状態との相異をチェック、もし現実の状態が表中のパターンに適合すればその段に相当するシステムのプログラムをトリガする。トリガは原則的にシステムのDSDに与えられASD、PPの判断に従って操作を進めていく。ここで注意すべきことはこのシーケンス制御プログラムは単にDSDをトリガするのみで実際に操作を実行すべきかどうかの判断は各システムにまかされていることである。

(2) ユニット負荷制御プログラム

負荷制御は起動停止制御と異なって専用のプログラムのもとに実行される。このとき各システムの状態により達成し得る負荷量が定まっているためこれを越える負荷増要求に対しては本プログラム内で要求負荷の修正が行なわれる。

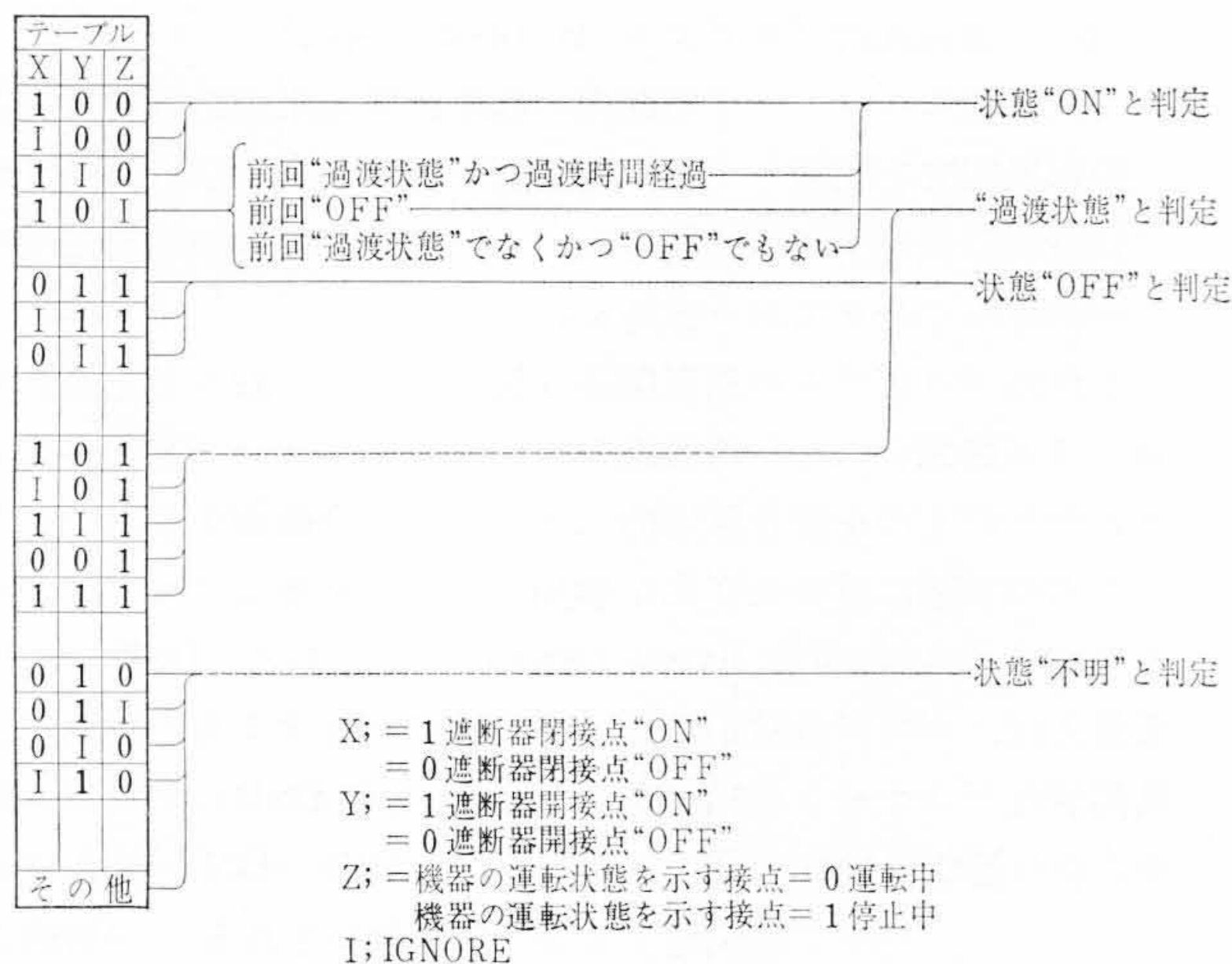


図 3 状 態 判 定 方 式

以上のプログラム構成の特長は各システム内の自衛上実施する操作とプラント全体の立場から判断する要素とを2分することにより計画者にとって考えやすく、火力プラントのように大規模なシステムでは考え落としのしないプログラムの作成ができ、計画所要人員の節減にもつながる。またこのことはデバッグ、シミュレーションの際に特に有利な構成である。

3. 計算機による状態判定

計算機制御開発の当初から計算機に加える入力（アナログおよびコンタクト）の信頼性が問題となり、その向上のためなみなみならぬ努力が払われてきて、それなりの効果は上がってきたといえる。しかしいかに信頼性が向上したとはいえこれら入力のトラブルを皆無とすることは不可能で、このためトラブル発生時にも正確な判断が下せるようなプログラムを使用している。

3.1 プラント機器の状態判定

従来、一般のインターロックシステムでは計測点にそれぞれ1個の検出器を設けて、これが正しい動作をするものとして組まれているものが多い。この場合検出器の不動作もしくは誤動作したときには運転員の判断を入れるなり、プラントにとって安全側にシーケンスが進むフェールセーフの考え方が採られている。計算機を導入して各種の判断を行なわせ運転続行に対する信頼性を上げるためには、単一の検出器に頼るのは適当でなく、同一の計測点に3個の検出器を設けて3個中2個の検出結果が一致すればそれが正しいとする、いわゆる2 out of 3を採用した例がある。

この方法をさらに改良し、より完全なものにしようとしたものが次に述べる方法である。

図3はプラントの代表的補機の状態を判定する方式の概略を示したものである。取り扱っているものはモータ駆動のポンプまたはファンで、その遮断器の閉位置を示す接点のON/OFF、開を示すもののON/OFFおよび補機の運転によって作動する接点、たとえばポンプ吐出圧力、ファン出入口差圧など3種の接点の状態を組合せて判定する。判定は接点のON/OFF組合せのすべてのケースにさらに接点が動作不良で無視しなければならない状態(Ignore)も含めて行なわれるが、従来の単に補機が運転もしくは停止の状態を決めるばかりでなく、過渡状態、たとえば遮断器接点は明らかに機器の運転状態を示しているが運転結果を示す接点が作動していない状態すなわち遮断器が投入されたばかりでポンプがまだ全速に達していないときの判定も行なわれる。このときには過渡状態を経過するであろう時間をセットしてこの時間経過後再度プログラムを動かして判定する。また接点の状態のみで判定困難のときには前回の判定結

果も用いて結論を出すようにする。

これらの組合せで状態が判定できないときにはこのプログラムで状態不明との結論として、ほかの特別なプログラムでプラント全体の状態から見て少なくとも従来運転員が行なっていた総合判断の程度まで行なわせるようにする。一例として給水ポンプ単独では運転状態が確認できなくても規定の給水流量があり、ほかの給水ポンプの状態がわかっていればそのポンプの運転状態を解析できることを利用する。

この方法を採用することにより計算機が正しい判断を下して運転員に無用の負担を与えないようにすることができる。

3.2 計算機入力不良の処置

入力不良の際にはこれをそのまま放置しておけば計算機の判断を誤らせる結果にもなるため、いったん不良が発見されればこれをIgnore状態として以降プログラム中では積極的に使用しないようにする。これには次の2種がある。

(1) 運転員によるもの (Operator Ignore)

運転員が入力の異常を発見してこれを除外する。

(2) 計算機が不良を判断するケース (Machine Ignore)

以下のケースでは計算機が入力をIgnoreする。

(a) 計算機A/D変換器フルスケールをはずれた場合。

(b) 一つの入力とほかの入力との相互関連から明らかに不良と判別されたとき。たとえば遮断器接点は開閉位置ともOFFを示しているが、運転結果を示す接点は運転中を示しており、さらに前回判定を行なったときには停止中であつたとすれば、この運転結果を示す接点は明らかに不良である。このときには計算機がIgnoreであるとして処理する。

Ignoreが行なわれれば、その入力は入力スキャンからはずされて以後運転員が正常であることを確認してリセットするまではそのままの状態が続く。

3.3 入力変化によるプログラムトリガ (Event Orient)

従来の方式では一定時間ごとに状態判定のプログラムなどを動かすTime Orient方式が多く用いられていた。Time Orient方式では必要の有無にかかわらず多数のプログラムを絶えず動かしておく必要があり、また単一の目的のプログラムを多く用意することになり計算機に早い処理速度が要求される。そのほか計算機速度にもよるがプラントの状態変化が生じたとき、ただちに適切な処置がとりにくいのもこの方式の欠点である。

これを解決したものがEvent Orient方式であり、これと前述した機能別プログラム構成と組み合わせることにより非常に合理的なシステムとなる。

Event Orientの基本はすべての入力を定められた周期で走査して、任意の入力について重要な変化が生じたときに、その入力に関連したプログラムをトリガして必要な処置をとる。

一般的に各システムにおいてはシステム内に含まれる機器の状態が変化したときASDをトリガして絶えず現状をは握する。またプラントの変化、たとえば負荷が変化したときにはDSDが動いて理想の状態を判定するよう構成される。

Event Orient方式を採用すれば、Time Orientのように不必要なプログラムの動きがなく計算機の時間が有効に使用できること、プラントまたは機器の状態変化が生じたとき、ただちに即応した処置がとられることになる。

4. PPCP (Power Plant Control Software System)

前述のように火力発電所の自動化プログラム方式は、過去の貴重な経験を基にして、Event Orient方式を中心とするFunctional Approach方式として確立されるに至った。本方式を実際に適用し

て自動化プログラムを作成してデバック、シミュレーションなどを行なうには、安心してたよることのできる、理解しやすく、使いやすくしかも能率の良いソフトウェアシステムがぜひ必要である。これを目的として開発されたのがPPCSであり、ここにその概要を述べる。

PPCSは下記により構成される。

(1) マスタストラクチャ

On-line で使用される基本的諸機能を含むソフトウェア体系で基本的機能のおもなものとして下記があげられる。

- (a) Event Orient 機能
- (b) 制御プログラム用 Priority List Processing
- (c) Delay List Processing
- (d) 制御用メッセージ出力制御
- (e) 制御用出力制御
- (f) コントロール・マクロ・ステートメント
- (g) On-line debugging aid

(2) コントロール・マクロ・ステートメント

これは制御プログラムを書き、デバックし、シミュレーションするに際して使用される火力発電所自動化のために特別に用意された言葉(ステートメント)で、これにより上記に要する時間の大幅な短縮が可能である。

(3) ソフトウェア・シミュレーション・システム

従来プログラムのシミュレーションはハードウェアのシミュレータに頼っていたが、プログラムチェックにじゅうぶんなだけの再現性が得がたい、flexibility に欠ける、時間的制御がむずかしいなどのため、順次ソフトウェア・シミュレーション手法へと移行していく傾向にある。現在、次に述べるタービン昇速用のもののほか、負荷制御、ポンプ・ファンシステムなどに対するものが完成しており、今後順次拡張されていく。

(4) フローチャートのパッケージ化 (Packaged Flow Chart)

膨大な量のフローチャートを短期間に完成させるためには、できるだけ類似のものを集約して、個々の適用に対してはテーブルを埋めることで処理するのが賢明であり、このようなフローチャートは Packaged Flow Chart として整備されている。

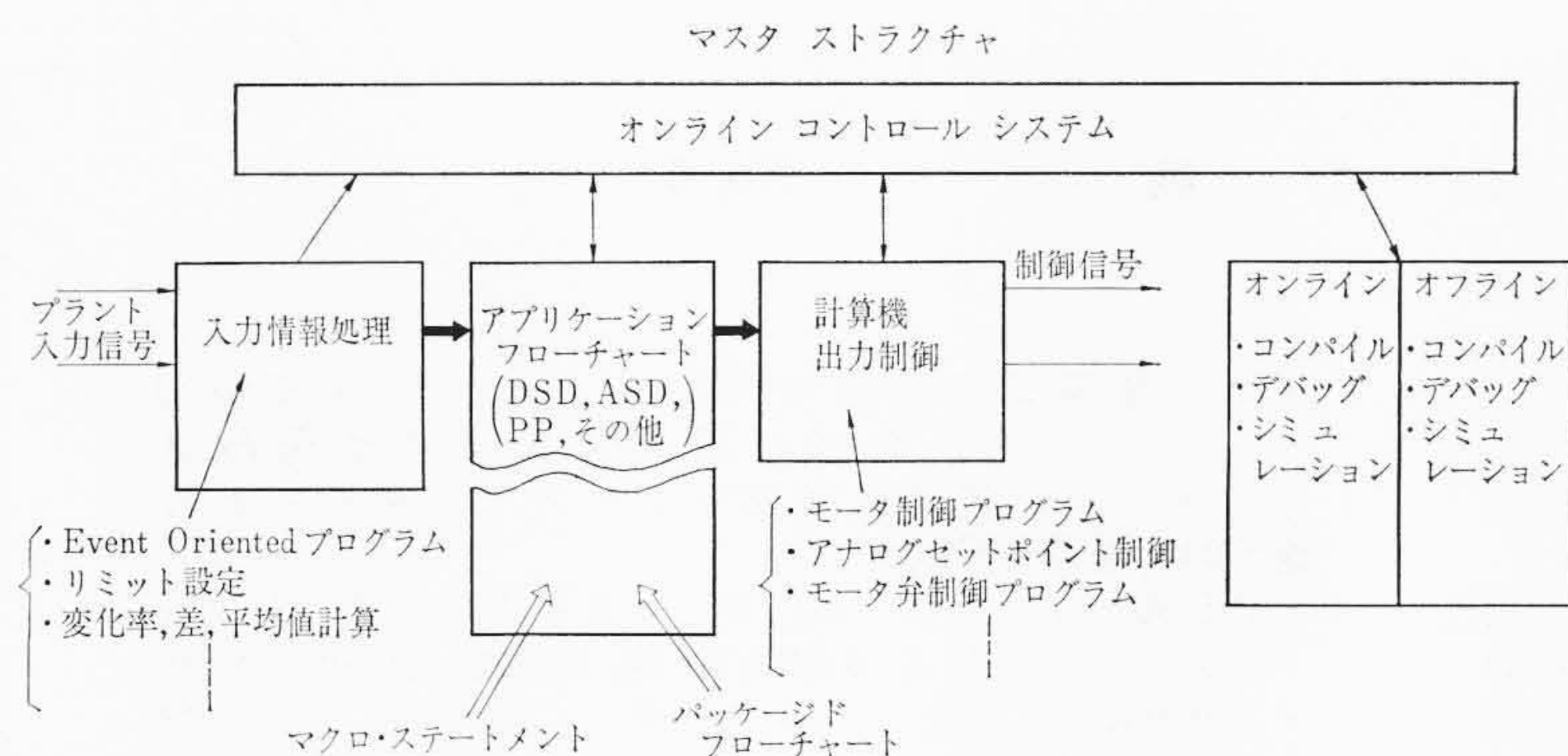


図4 マスタストラクチャ概念図

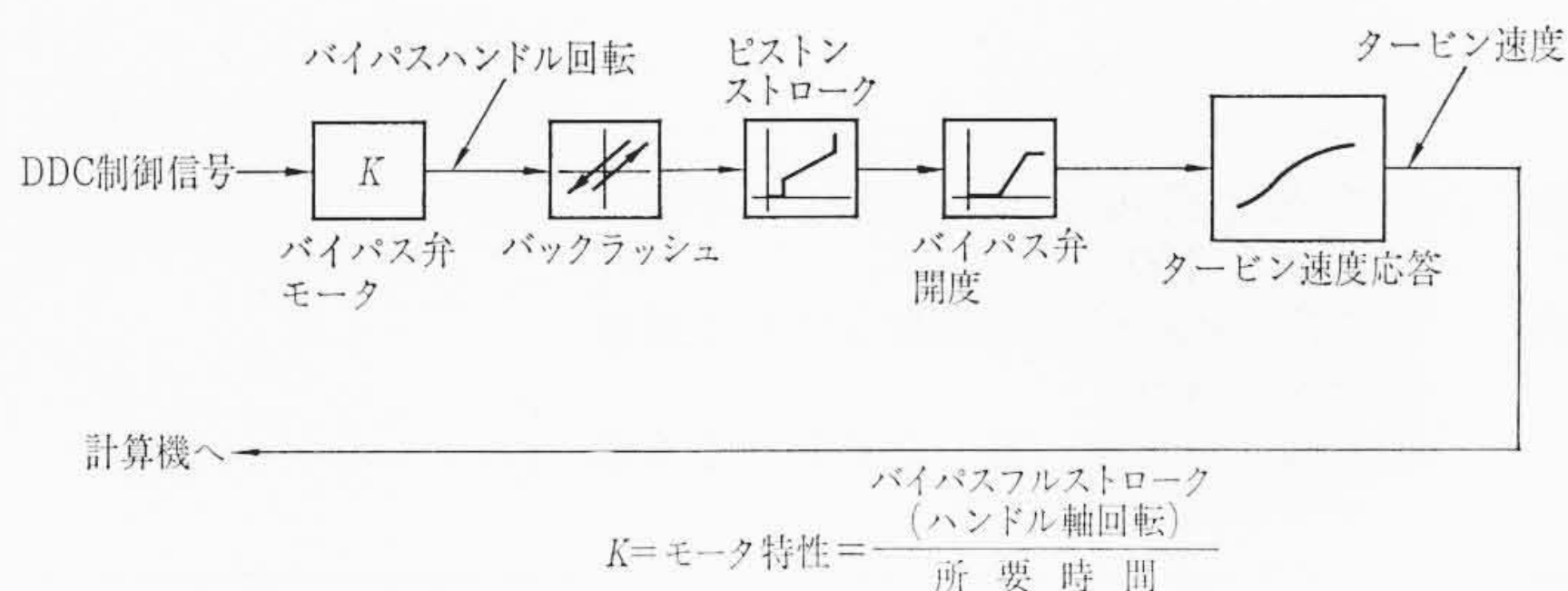


図5 タービン速度特性

図4はマスタストラクチャの概念を示したものである。マスタストラクチャは特定のアプリケーションを対象としてソフトウェア手法の技術的確立、Man-hour の削減を軸として生まれてきたものであり、今後の火力発電所自動化のカギを握るものと考えられる。

5. DDC (Direct Digital Control)

計算機の制御への適用方法としてDDCがある。DDCは従来のアナログ制御のように各制御対象ごとに専用の装置を設ける必要がなく、計算機の処理速度が許されればほかの機能、数種の制御対象を同時に制御できるので経済的でもある。また制御方式のいかんによってはアナログ装置で実現できなかった精度で制御を実現することもできる。

DDCの制御対象として現在次のようなものが実施されようとしている。

(1) タービン軸受油温、発電機水素温度制御など定値または定値に近い制御。

(2) タービン昇速制御

前者はアナログ制御装置で実現している単純な制御ループで容易に実現できアナログ装置の代行と言う経済的効果も得られる。後者のタービン昇速は、タービンが火力プラントの主機であり、制御の良否がそのまま重大事故、寿命に影響するため慎重な取り扱いを要し、しかも制御対象の特性が大幅に変化するなど多くの問題を含んでいる。しかしこれを解決することによりDDCの大半の問題は解明されると考える。われわれはすでにタービン昇速の制御方式を確立し、シミュレーションテストを実施しているのでその概要を述べる。

5.1 タービンシミュレーション

通常、タービン昇速に用いられる全周噴射起動方式について見ると、その機構は主塞止弁バイパス弁モータ、操作ピストン、主塞止弁バイパス弁およびタービン本体とからなる。これらの関係を示したものが図5である。ここで注意を要するものはモータからバイパス弁開度に至る過程の機械的ガタであり、傾向は図に示すとおりである。したがって制御計算式ではその点を考慮しなければならない。

タービン本体の速度応答は衆知のように一般の制御対象とは異なり次の特性を持つ。

(1) タービン入口蒸気圧力変化によるゲイン変化

蒸気圧力上昇すればゲインも上昇する。

(2) タービン速度変化によるゲイン、時定数の変化

速度上昇によりゲイン、時定数とも小となる。

このうち(2)は特に著しく、制御範囲で数倍の開きがある。

このようなタービン特性のシミュレーションプログラムを有しており、制御特性の解析を行なう有力な手段となっている。

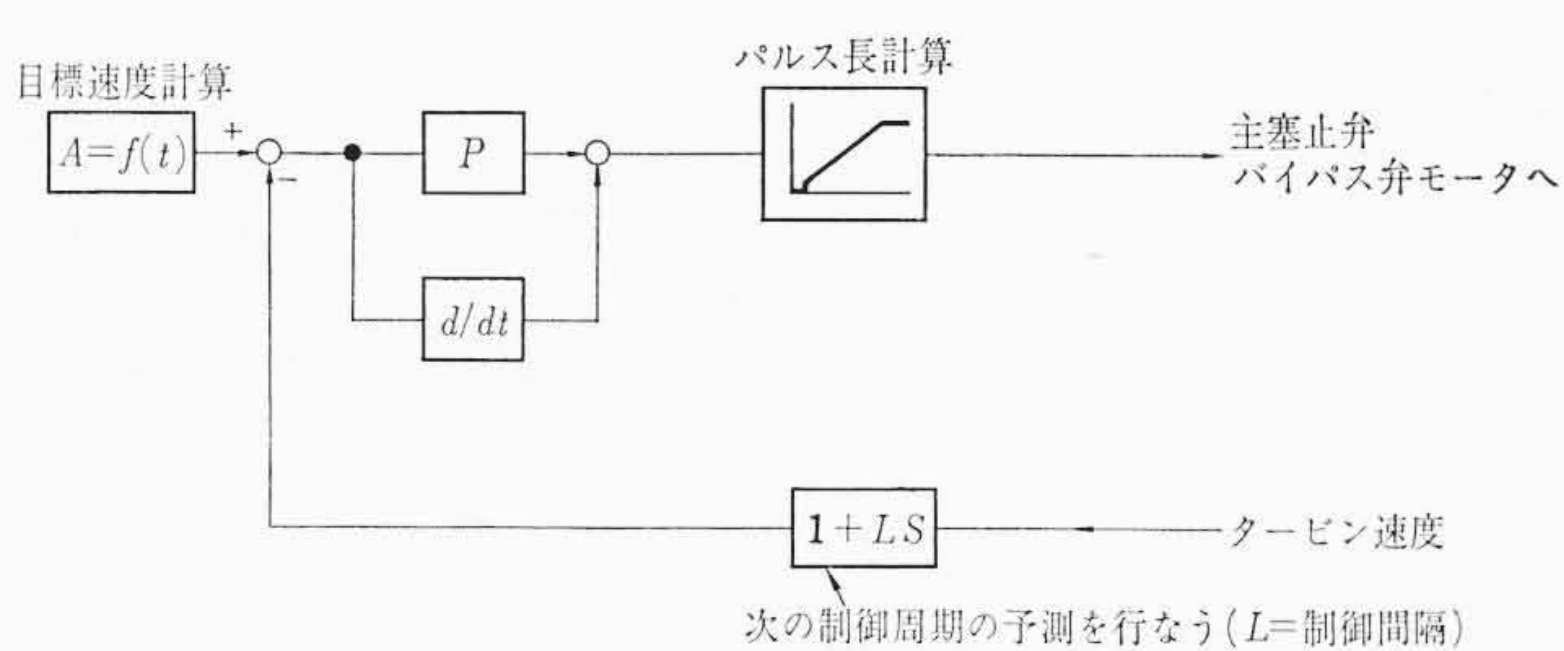


図6 タービン速度制御計算方式

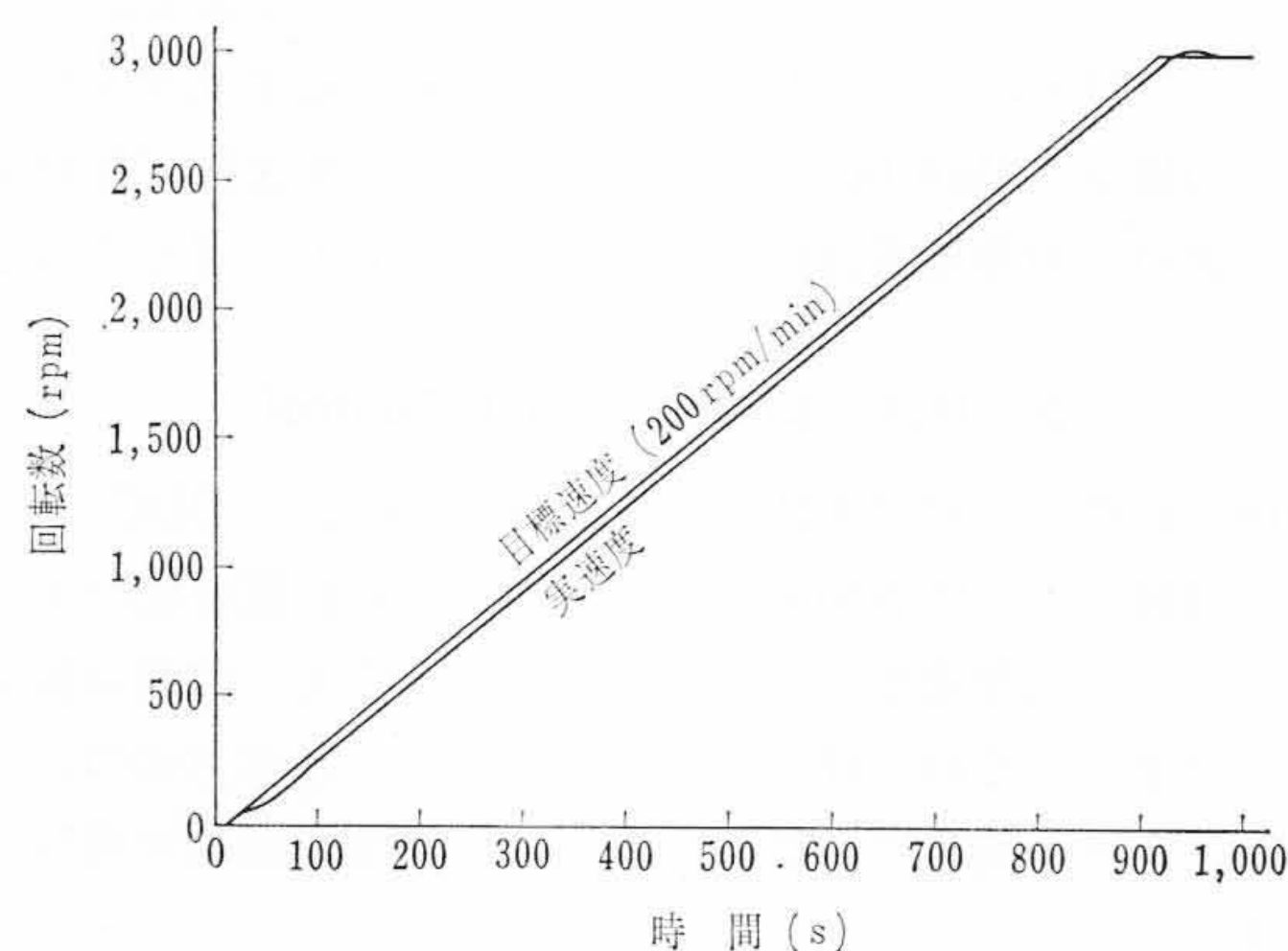


図7 タービン昇速シミュレーションテスト結果

5.2 制 御 方 式

前記特性をもったタービン速度を制御するため次の方式がとられている。図6はその概念を示したものである。

(1) 目 標 速 度 計 算

与えられた速度こう配となるよう、制御周期ごと目標速度を計算。

(2) P I 演 算

目標速度と実速度との偏差に対して演算を行なう。この場合、操作端が積分特性を有するモータであるため実際にはPD演算とする。

(3) 出 力 パ ル ス 長 計 算

(2)項演算結果の大小に応じて操作端モータを駆動するパルス長を計算する。パルスの最大長さは操作周期までで、また最短パルスもモータの応動可能範囲までとしそれを越えたものについては次回の操作周期まで持ち越す。

(4) 速 度 計 算

速度検出は正確さを期するためパルスで計測している。これにより誤差は量子化誤差だけとなる。このような実速度のほかに、現在までの速度軌跡と弁開度、蒸気条件から次の制御周期に速度がいかに変化するかを予測して修正する。

(5) そのほかの計算

制御対象のゲイン、時定数変化による演算定数の変化の計算を行なうほか、機械的ガタの吸収のため一時的にパルス長を増加するなどの計算を行なう。

これらの方式を用いてシミュレーションテストした実績は図7のとおりである。ここで見られるとおり、従来のアナログ装置での制御結果で実現し得ない精度のものが得られている。特に速度を予測して制御する方式が、タービンのように大きな時定数を持った対象に実効がある方式である。近く本方式を使用して実プラントのタービン昇速DDCを実施する予定で、引き続いてこれを負荷制御の方向に拡大していく方針である。

在来、DDCは実験的に火力プラントに用いられるケースが多く、マイナーループ制御の範囲を出なかったが、将来は主制御ループに対して採用されんとしている。この場合の問題は計算機システムの信頼度であり、アナログ装置をバックアップとして使う方式、Dual Computer Systemなど合理的で経済的なシステムの検討が必要である。

6. 結 言

以上計算機制御技術の一端を紹介したが、最近の計算機の性能向上には著しいものがあり、適用分野も拡大の一途をたどっている。しかしいかに優秀な計算機があってもその応用技術(Software)が当を得なければ能力を発揮できない。火力プラントにおける計算機制御も同様であるが、開発当初数多くあった問題のほとんどは解決され、次のステップに踏み出さんとしている。計算機制御の目的も当初のワンマンコントロールまたは無人化から新たに運転の信頼性を高めることにも注目されており、今後この方向での飛躍が期待される。いずれにせよ計算機制御技術は総合技術であり、単に計算機技術者のみならず火力プラント技術者の一致協力が大いに必要である。

参 考 文 献

- (1) 広吉、丸山：日立評論 46, 113 (昭 39-1)
- (2) 広吉：OHM, 52-5, 54 (昭 40)
- (3) F.A. Ritching ほか：Central Station Control-Computer Participation and Prudence, American Power Conference (1964)

Vol. 51

日立評論

No. 6

目 次

■ 論 文

- ・周波数変換機並列運転時の負荷配分
- ・鶴崎共同動力納 28,000 kW 二段抽気復水タービンの新しい電子油圧式ガバナ
- ・大容量変圧器巻線の短絡強度
- ・コンデンサ電動機の補助回路の設計
- ・電力回生ブレーキ付、パルス制御装置および主要電気品
- ・集合自動電話用交換機の標準化 —PC30形交換機—
- ・自動車工業におけるコンピュータシステム

- ・混成厚膜集積回路を用いたミキサー速度制御
- ・フェライト系鋳鋼の低温における衝撃特性
- ・ブラウン管防爆処理用ポリエステル樹脂の特性
- 500 kV 送電機器特集
- ・BPA (アメリカ) 納 500 kV 変圧器
- ・日立における500 kV 開閉機器の現状
- ・500 kV 計器用変成器
- ・超高速キャリアリレー装置
- ・500 kV 系の開閉サージとその抑制対策

発行所 日立評論社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号 100

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101

振替口座 東京20018番