

# 400 MW可変速揚水発電システム

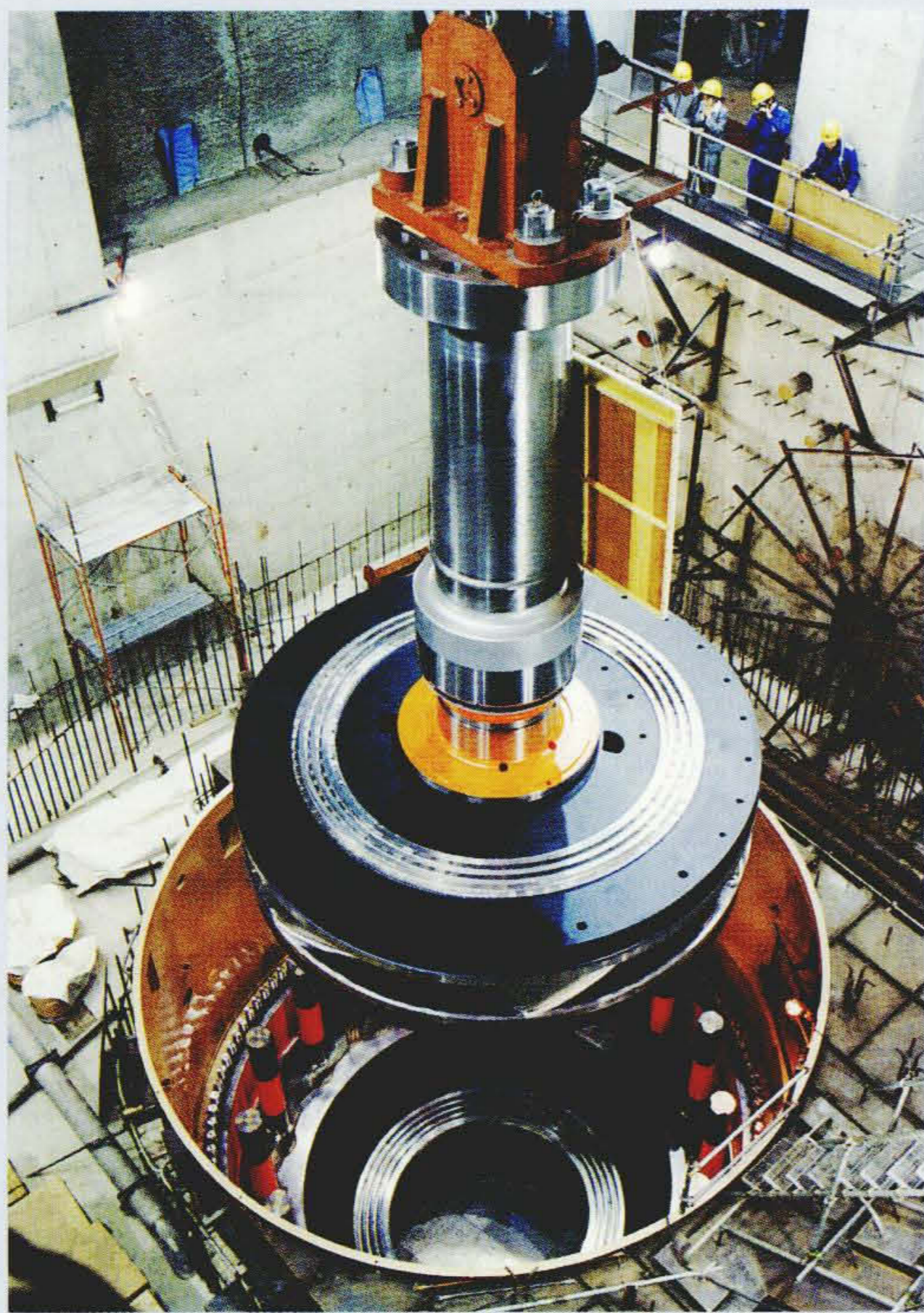
—関西電力株式会社大河内発電所4号機—

Completion of a 400 MW Adjustable Speed Pumped-Storage Hydraulic Power Plant

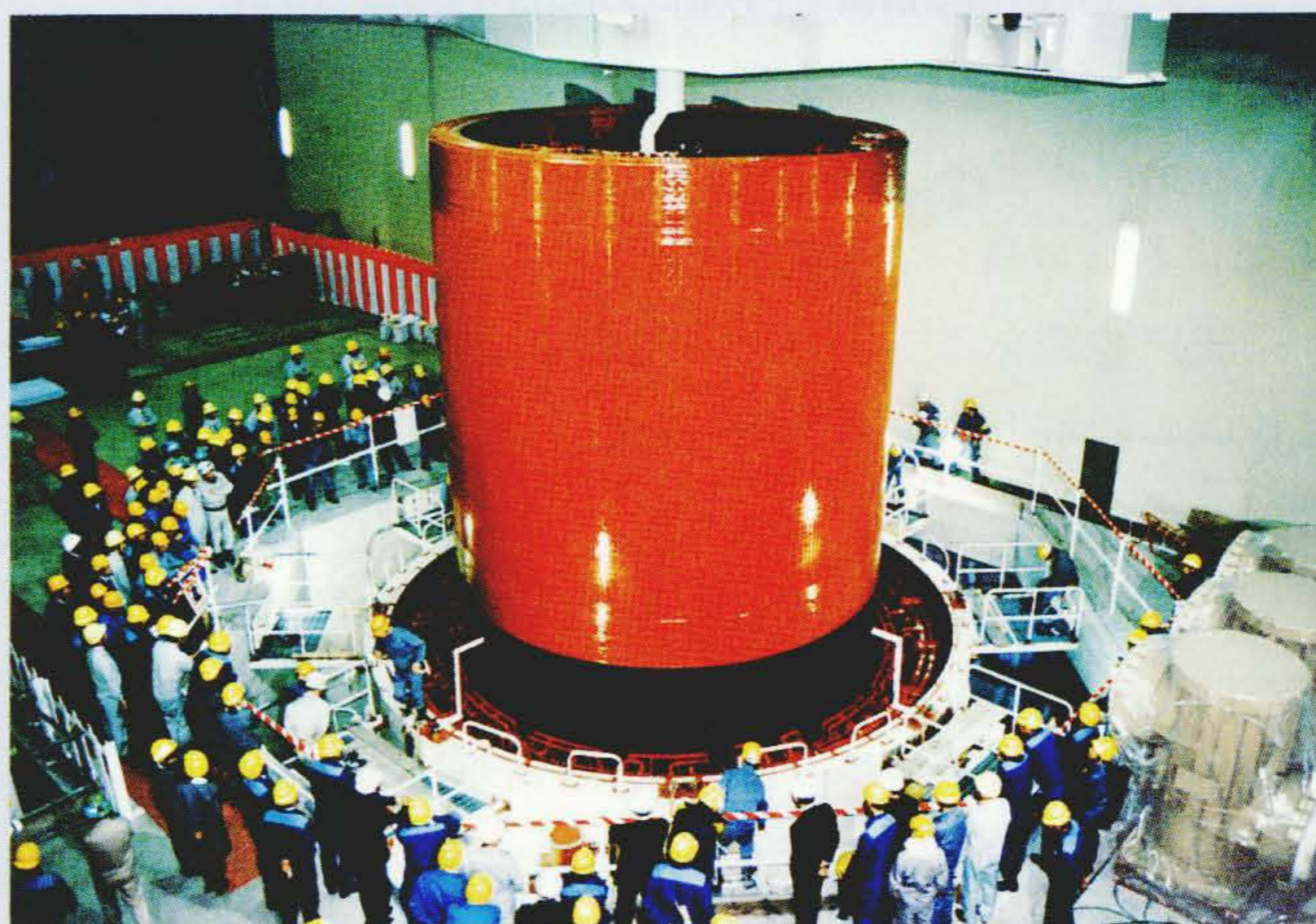
北 英三\* Eizō Kita

阪東 明\*\* Akira Bandō

桑原尚夫\*\* Takao Kuwabara



(a) 331 MW/388 MWポンプ水車ランナつり込み



(b) 395 MVA/388 MW可変速発電電動機回転子つり込み



(c) 72 MVAサイクロコンバータ(72アーム中の12アーム)

**400 MW可変速揚水発電システム主要機器** 関西電力株式会社大河内発電所4号機向け可変速システムの主要機器であるポンプ水車、可変速発電電動機、サイクロコンバータを示す。いずれも世界最大容量である。

近年の電力需要の伸びとともに昼夜の電力需要格差は拡大しており、揚水発電所の重要性はますます増大している。

可変速揚水発電システムは、電力系統の経済運用を主目的とし、ポンプ水車を可変速運転して夜間の周波数調整機能を揚水発電所に持たせるものである。日立製作所は関西電力株式会社との共同研究で、昭和56年から世界に先駆けてこのシステムの開発を進めてきた。平成5年12月には、関西電力株式会社大河内発電所4号機(以下、大河内4号機と言う。)で

世界初の本格的大容量可変速揚水発電システム400 MW機が完成し、運転を開始した。

400 MW可変速揚水発電システムは、可変速発電電動機とパワーエレクトロニクス応用機器の大容量化・高信頼度化という技術課題を解決して実現した。特に、回転部の慣性エネルギーを利用した高速の発電出力・揚水入力調整をパワーエレクトロニクス制御によって実現したことは、電力系統安定度向上などの新たな応用分野への展開が期待できる成果である。

\* 関西電力株式会社 \*\* 日立製作所 日立工場

## 1 はじめに

電力需要は常に変動している。電力需要と供給のアンバランスは系統の周波数変動として現れるため、系統周波数を一定に保つには発電電力の調整が必要である。電力需要変動のうち、昼夜にわたる大きな変化に対応する発電量調整はELD(Economic Load Dispatching Control: 経済負荷配分制御)で、小刻みに変わる速い変化にはAFC(Automatic Frequency Control)で対応している。AFCによる発電量の調整範囲(以下、AFC容量と略す。)は、系統周波数を維持するために必要な発電電力であり、系統内の総電力需要の数パーセントを常に確保しておく必要がある。

これまでAFC容量は、昼間は主に火力発電および水力発電で、夜間は火力発電で確保してきた。揚水発電所による負荷調整は運転台数調整だけであり、AFCには対応できなかった。そのため、可変速揚水発電システムによって夜間のAFC容量を確保すれば、AFC用の火力発電を停止できることになる。

ここでは、世界初の本格的大容量システムである大河内4号機の構成と運転データをもとに、400 MW可変速揚水発電システムについて述べる。

## 2 可変速システムの特長

### 2.1 原理・構成

可変速揚水発電システムの構成を図1に示す。ポンプ入力が入力が回転速度の三乗に比例するので、比較的小さな回転速度変化幅で大きなポンプ入力幅(AFC容量)を確保できる。このために可変速化の方式として交流励磁方式が適している。交流励磁方式にすると発電電動機の回転子コイルは、固定子側と同様に三相分布巻線となる。励磁電流周波数 $F_c$ は数ヘルツ以下のため、容量20 MVAを超える励磁装置としては、72アームサイクロコンバータが適している。回転子コイルが周波数 $F_r$ で回転すると回転子の磁極は $(F_r + F_c)$ で回転する。回転子磁極の速度が $F_s$ で、固定子磁束と同期すると、回転子磁極は従来の同期機と同じ働きとなる。したがって、電流振幅で回転子磁極強さを調整すれば無効電力を制御できる。また、固定子磁束に対する回転子磁極のずれ(内部相差角)で引き合う力が決まり、有効電力が決まる。

励磁電流の位相で内部相差角を積極的に調整し、有効電力制御できるのが従来の同期機にはない特長である。

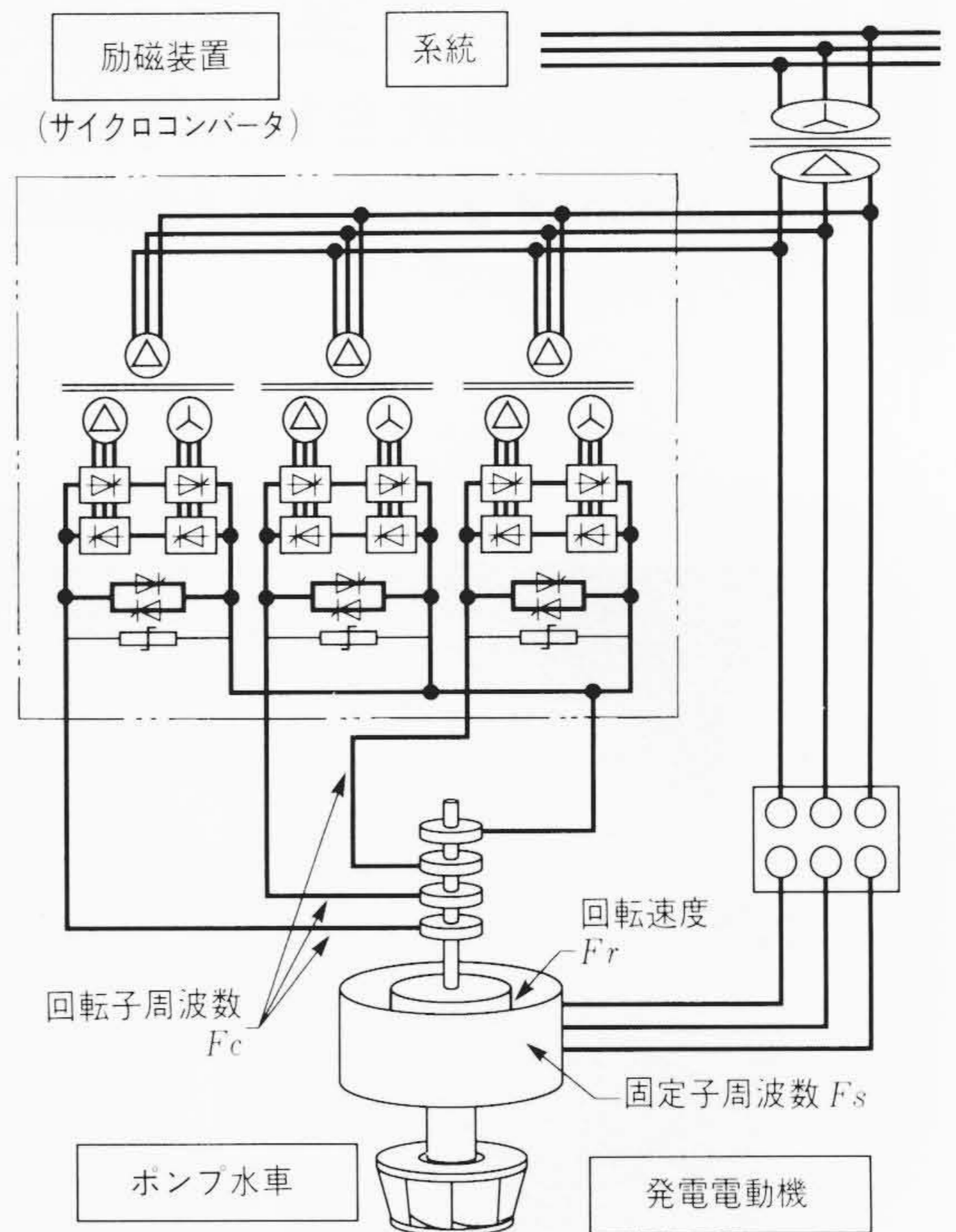
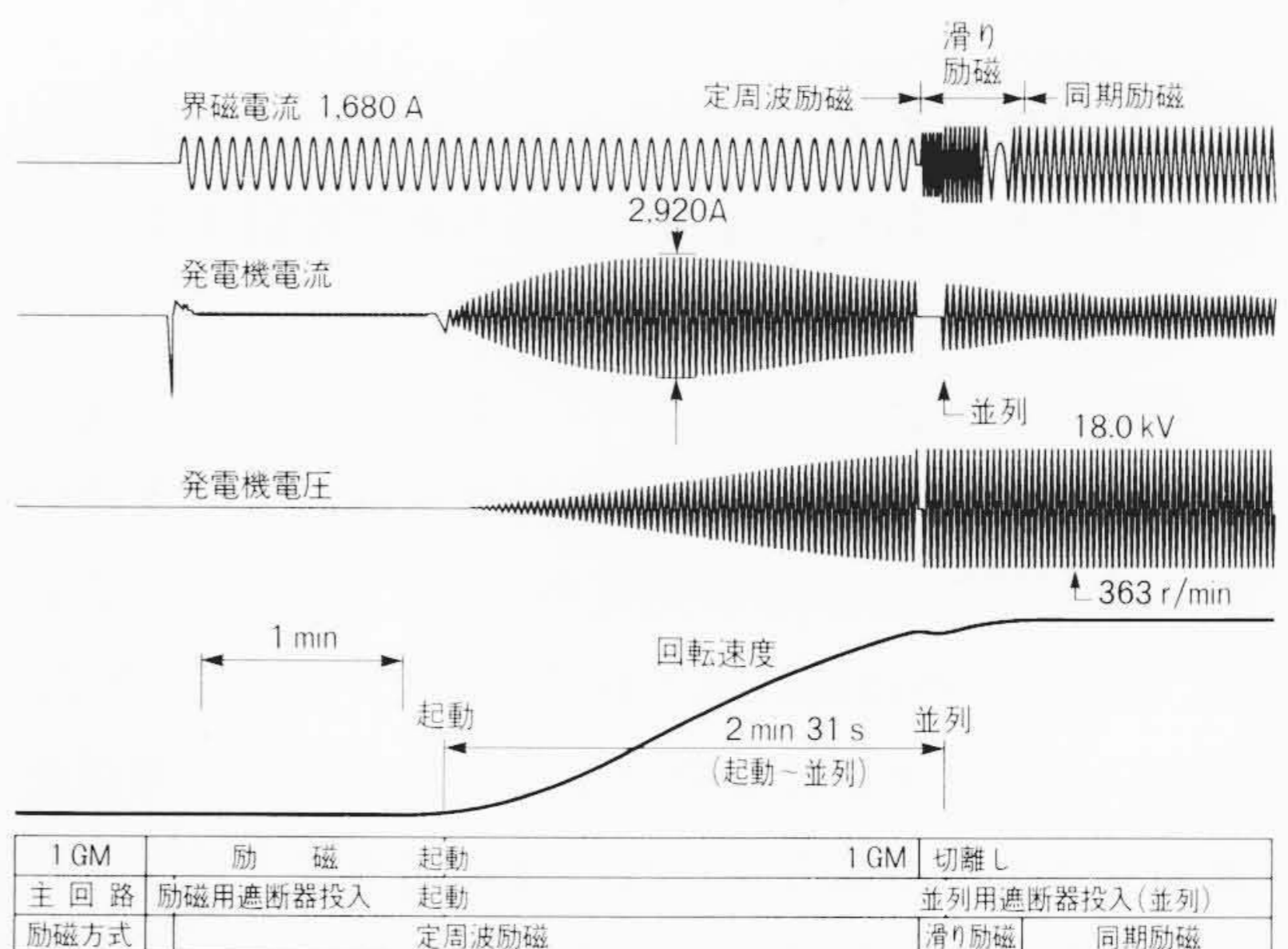


図1 可変速揚水発電システムの構成

可変速揚水発電システムには、周波数変換器容量が発電機容量よりも小さくて済む交流励磁方式が適している。回転子コイルに三相交流電流を供給すると、回転子磁極は $(F_r + F_c)$ で回転する。固定子周波数 $F_s$ との間で $(F_s = F_r + F_c)$ が成り立つように制御する。

### 2.2 有効電力制御方法

内部相差角で有効電力を調整する方法を3モード開発した。各モードの比較を表1(a)に示す。回転速度を制御するには同期励磁モードが、有効電力を制御するには滑り励磁モードがそれぞれ適している。大河内4号機では運転モードに応じて3モードを最適に切り換えている。揚水始動時の切り換え例を図2に示す。



注: 略語説明 GM(発電電動機)

図2 揚水始動時の励磁モード切り換え

3種の励磁モードを切り換えて最適化を図っている。

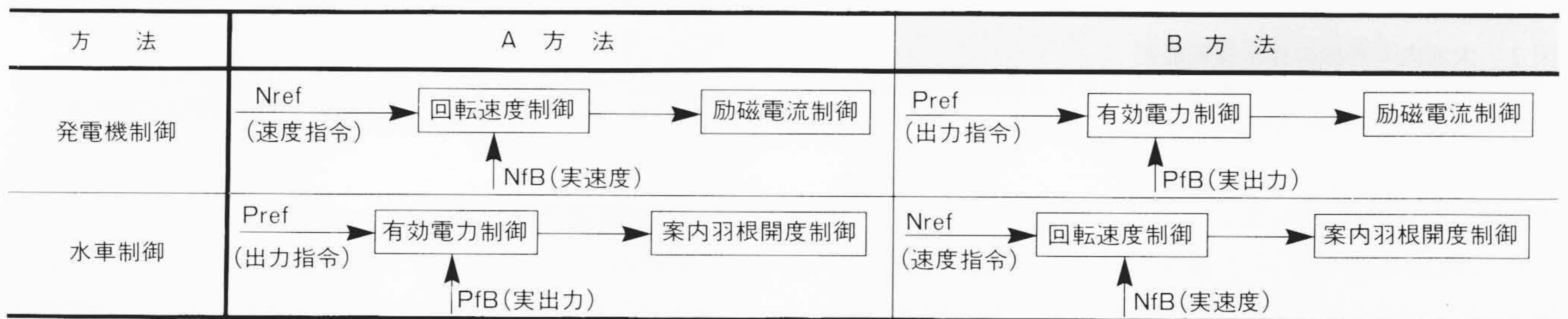
表1 交流励磁制御方法の比較

交流励磁方式の制御方法の選択によって、まったく違う特性となる。

(a) 励磁位相制御モード比較

モード	定周波励磁モード	同期励磁モード	滑り励磁モード
指令周波数	$F_c = \text{固定}$	$F_c = \text{可変}$	—
追従させる周波数	$F_s = (F_r + F_c)$ に追従させる。	—	$F_c = (F_s - F_r)$ に追従させる。
動作	内部相差角を一定に保つように $F_s$ を追従させる。	$F_r$ を $(F_s - F_c)$ に同期化力で拘束させる。	内部相差角を一定に保つように $F_c$ を追従させる。
使用運転モード	●揚水サイリスタ始動	●揚水プライミング水圧確立時 ●発電急停止時 ●回転速度異常時	●同期並列時 ●発電AFC運転時 ●揚水AFC運転時

(b) 出力制御モード比較



(c) 固定子周波数検出方法比較

方法	A方法	B方法
検出量	固定子有効磁束	発電機電圧
演算方法	瞬時対称座標法	正相演算
特徴	(1) 系統電圧位相急変時	位相急変せず
	(2) 系統側不平衡時	脈動分発生
	(3) 制御特性	出力制御と電圧制御の干渉が少ない。
	(4) 検出遅れ	原理的には遅れなし。

2.3 滑り励磁モードの制御方法

水車運転時の制御方法には、表1(b)に示すように、回転速度応答を重視するA方法と、有効電力応答を重視するB方法がある。大河内4号機では次の理由でB方法を採用した。

- (1) 可変速揚水発電システムはAFCが重要であり、有効電力応答を優先させる。
- (2) ポンプ水車と発電電動機にとって、機械的に最も過酷な運転は負荷遮断時である。A方法は、水車案内羽根が逆に開いて加速してしまうため、制御系を切り換える必要がある。B方法は水車側の制御切り換えが不要であり信頼性が高い。

2.4 固定子周波数検出方法

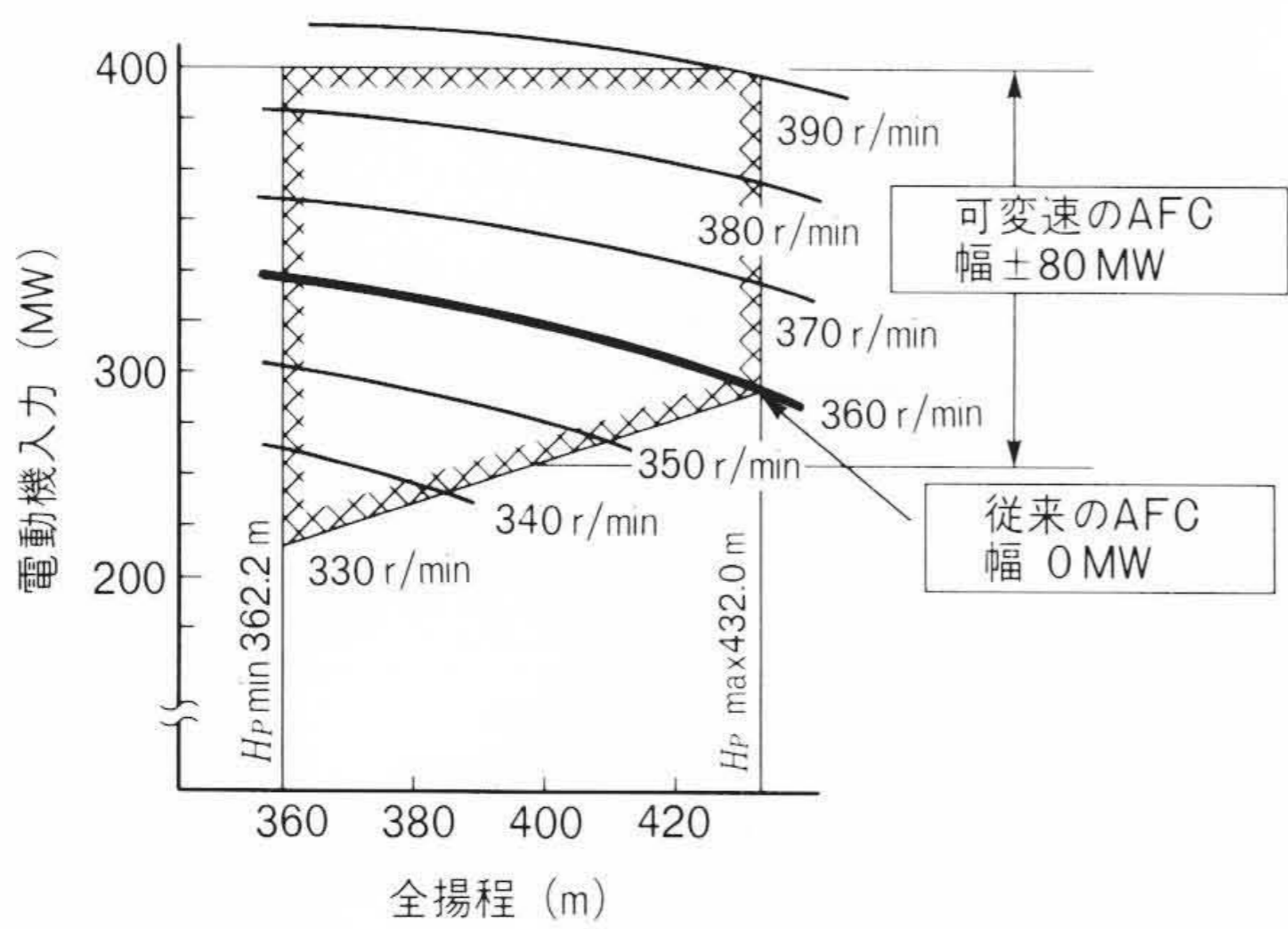
固定子側周波数 $F_s$ を検出する方法は、表1(c)に示すように、機械側出力トルク応答を重視するA方法と、系統側への追従を重視するB方法がある。従来の産業用可変速駆動システムの考え方を踏襲するとA方法となるが、大河内4号機では、高速再開路などの系統側急変時の安定性を重視してB方法を採用した。

2.5 大河内4号機の通常運転特性

大河内4号機のシステム仕様を表2に示す。運転範囲(図3参照)に示すように、揚水運転時には±80 MWの

表2 大河内発電所可変速発電システム仕様  
400 MW可変速システムの仕様を示す。

項目		発電時	揚水時
システム	出力(入力)	320 MW	400 MW
	力率	0.95	1.0
ポンプ水車	出力(入力)	331 MW	392 MW
	最高有効落差(揚程)	415.6 m	432 m
発電電動機	ランナ	フランス形2分割ランナ	
	容量(出力)	395 MVA	388 MW
	回転速度	330~354 r/min	330~390 r/min
	電圧	18 kV	
	コイルエンド支持	バイント支持	
サイクロコンバータ	コレクタリング	三相4線式	
	容量	72 MVA	
	電圧	5.2 kV	
	電流	8,000 A	
	出力周波数	-5~-1 Hz	-5~+5 Hz
	アーム構成	72アーム	
サイリスタ素子構成	各アーム3直列3並列		



注：略語説明 AFC (Automatic Frequency Control)

図3 大河内4号機の揚水運転範囲

同期速度360 r/minを中心に±30 r/minの可変速運転幅で±80 MWのAFC容量を確保している。

AFC容量を確保している。

運転範囲の下限から上限までのランプ応答特性を図4, 5に示す。発電運転, 揚水運転ともに有効電力の追従性が優れ, 有効電力優先制御の効果が出ている。発電運転時のインデシャル応答を図6に, 実際の揚水AFC運転時のシステム入力の変化例を図7に示す。以上の結果から, このシステムが計画時の性能を満たしていることが確認できた。

### 3 可変速揚水発電システムの課題

可変速揚水発電システムの特長は, パワーエレクトロニクス技術を適用した励磁装置(サイクロコンバータ)に負うところが多い。一方, このために生じる課題を解決する必要がある。

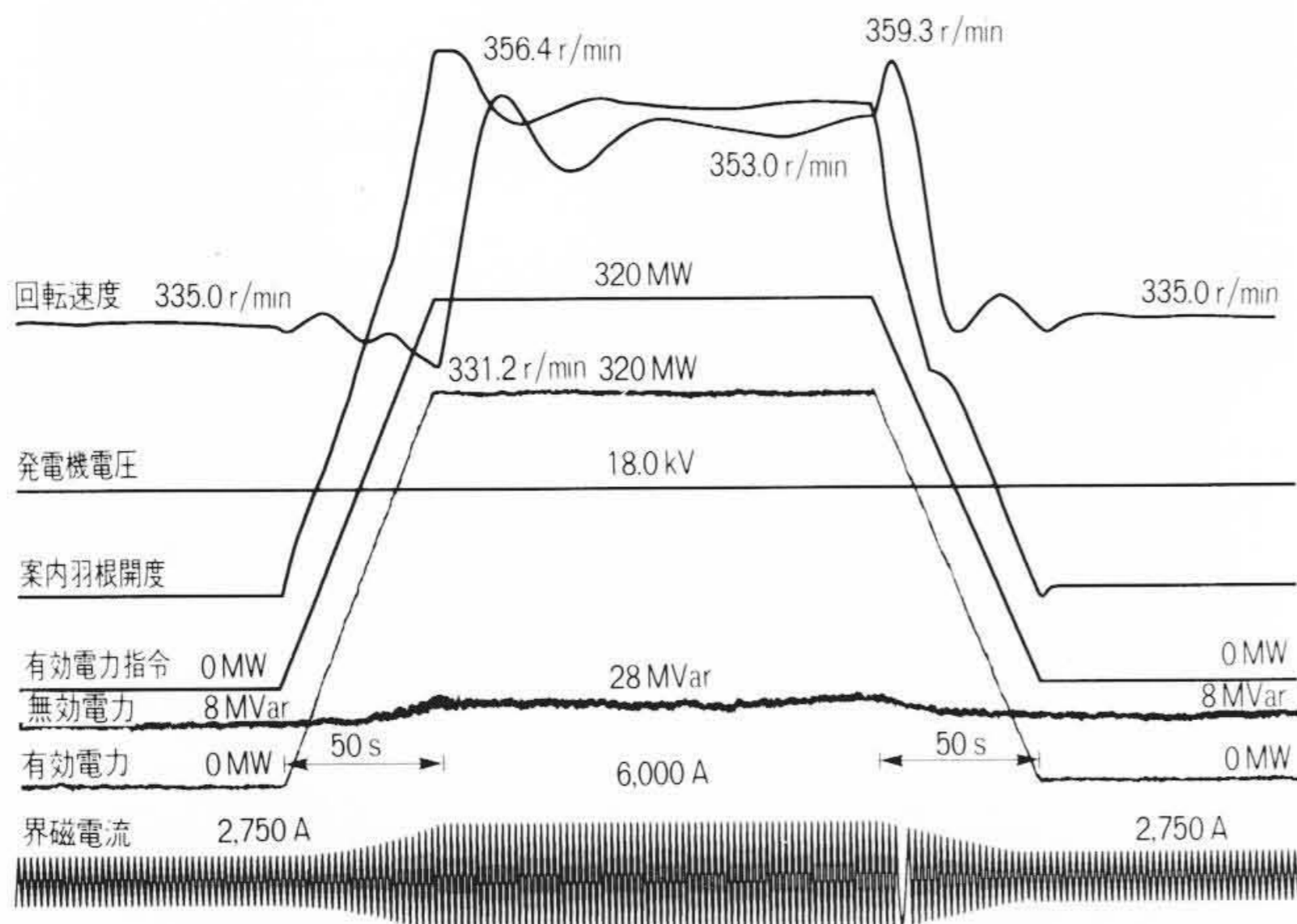


図4 発電負荷ランプ応答特性

有効電力は0 MWから320 MW(100%)まで指令に追従しているが, 回転速度はフライホイールエネルギーの吸収放出で変動している。

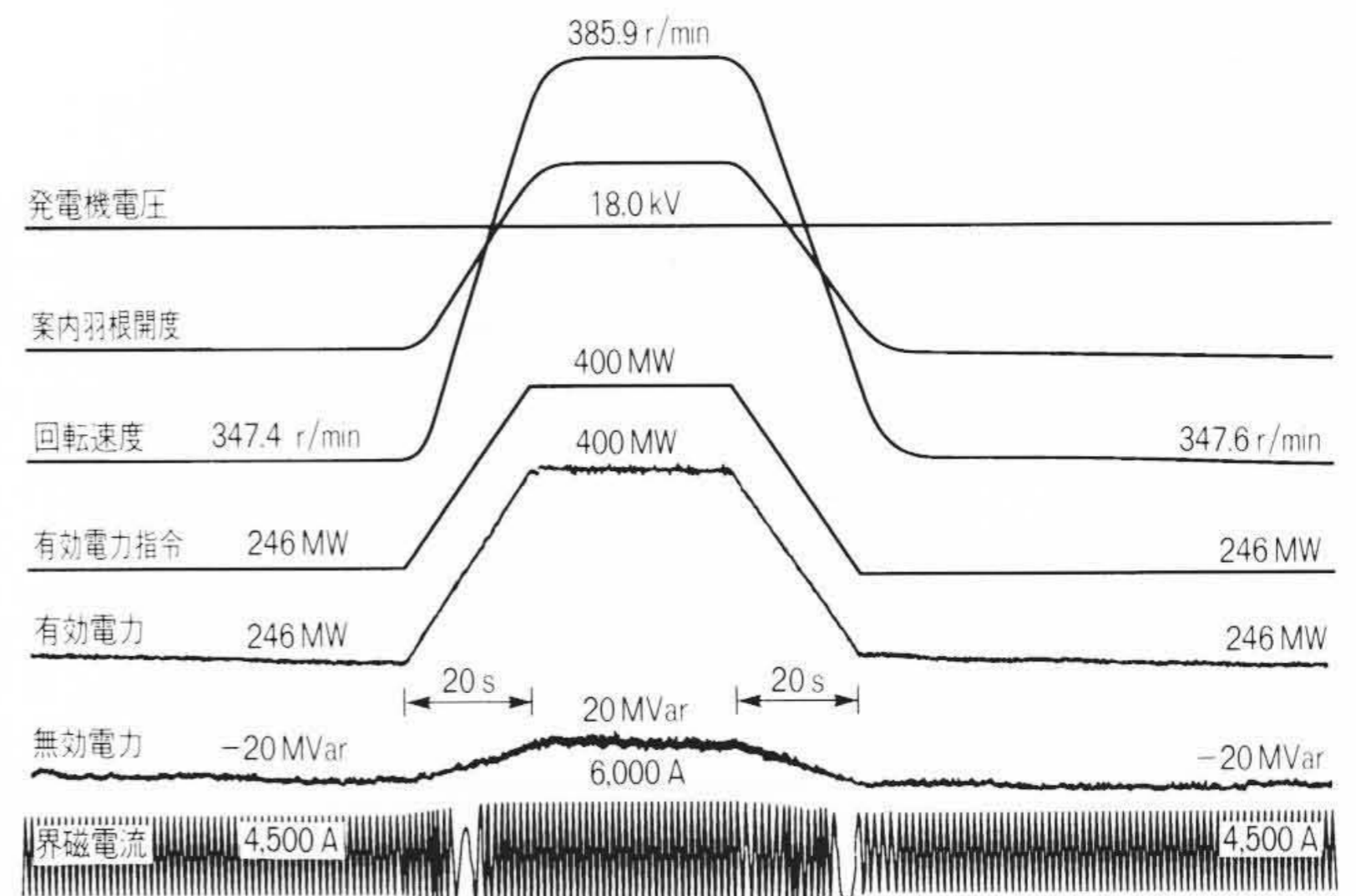


図5 揚水入力ランプ応答特性

揚水AFC範囲の下限(246 MW)から上限(400 MW)まで指令に追従している。電力優先制御のため, 回転速度の応答は比較的遅い。

### 3.1 過電流保護システム

大河内過電流保護システムを図8に示す。システムの特長は異常判別部分と温度推定演算部である。過電流の異常原因を,  $\Delta I$ の符号によって内部故障と外部異常波及に分けている。内部故障時には直ちに非常停止動作に入る。外部異常波及時の運転信頼性を高めるために, 各アームのサイリスタ素子温度を推定演算し, 結果が許容値以下なら運転継続する。素子温度は, 常に1~10 msの速さで変化するが, 発電電動機の回転子電流  $I_{dcct}$ , サイクロコンバータ内のアーム間の電流分担, 素子故障状況, 冷却用の純水入口温度などの条件を判別しながら72アーム分を同時に推定演算している。

こうした高速演算は, 最近のマイクロエレクトロニクスの進歩によって可能となった。

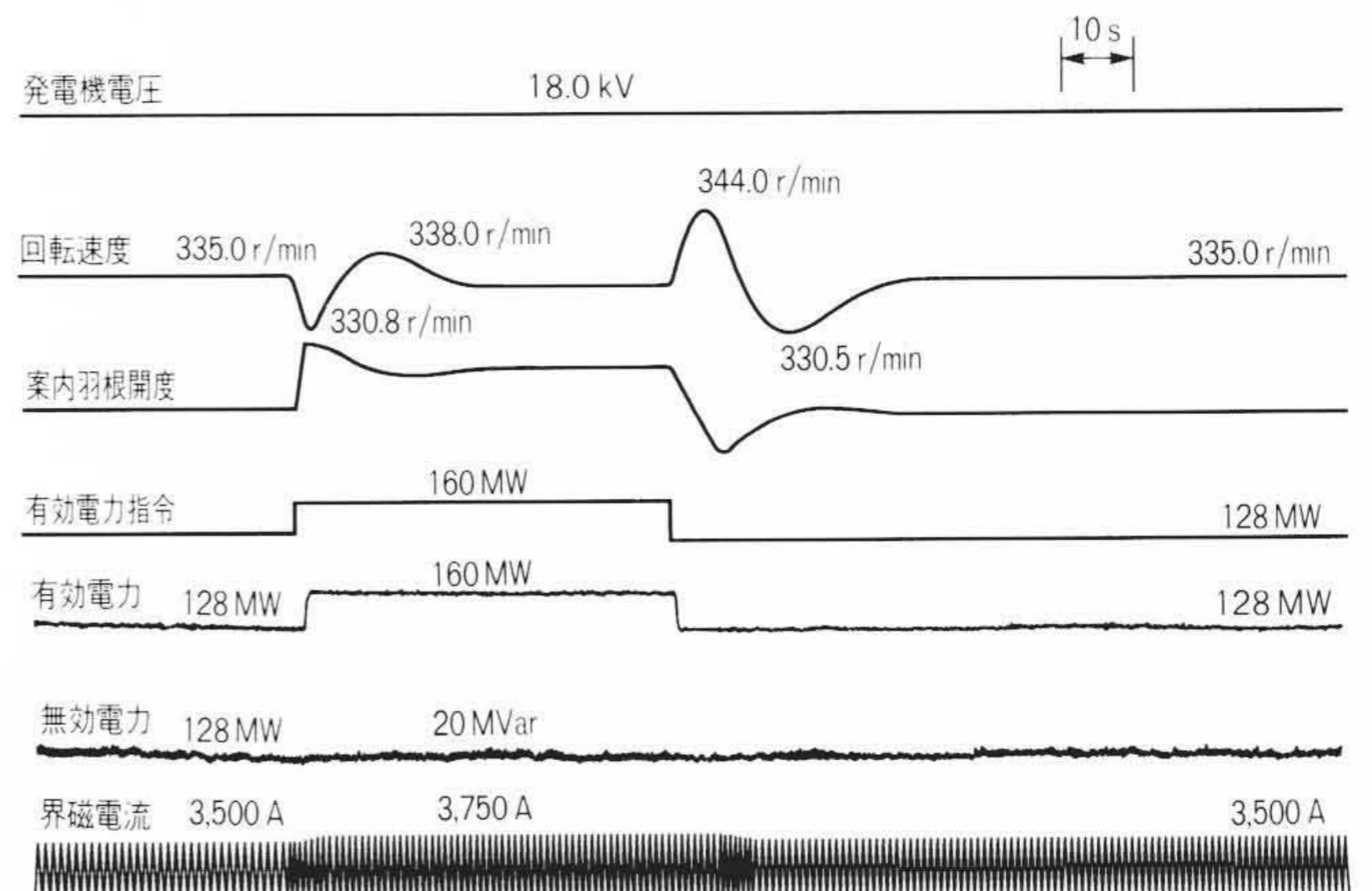


図6 発電負荷インデシャル応答特性

電力優先制御の特徴が顕著な例を示す。有効電力増加時にはフライホイールエネルギーを放出し, 水車案内羽根開度をオーバーシュートさせて回収している。

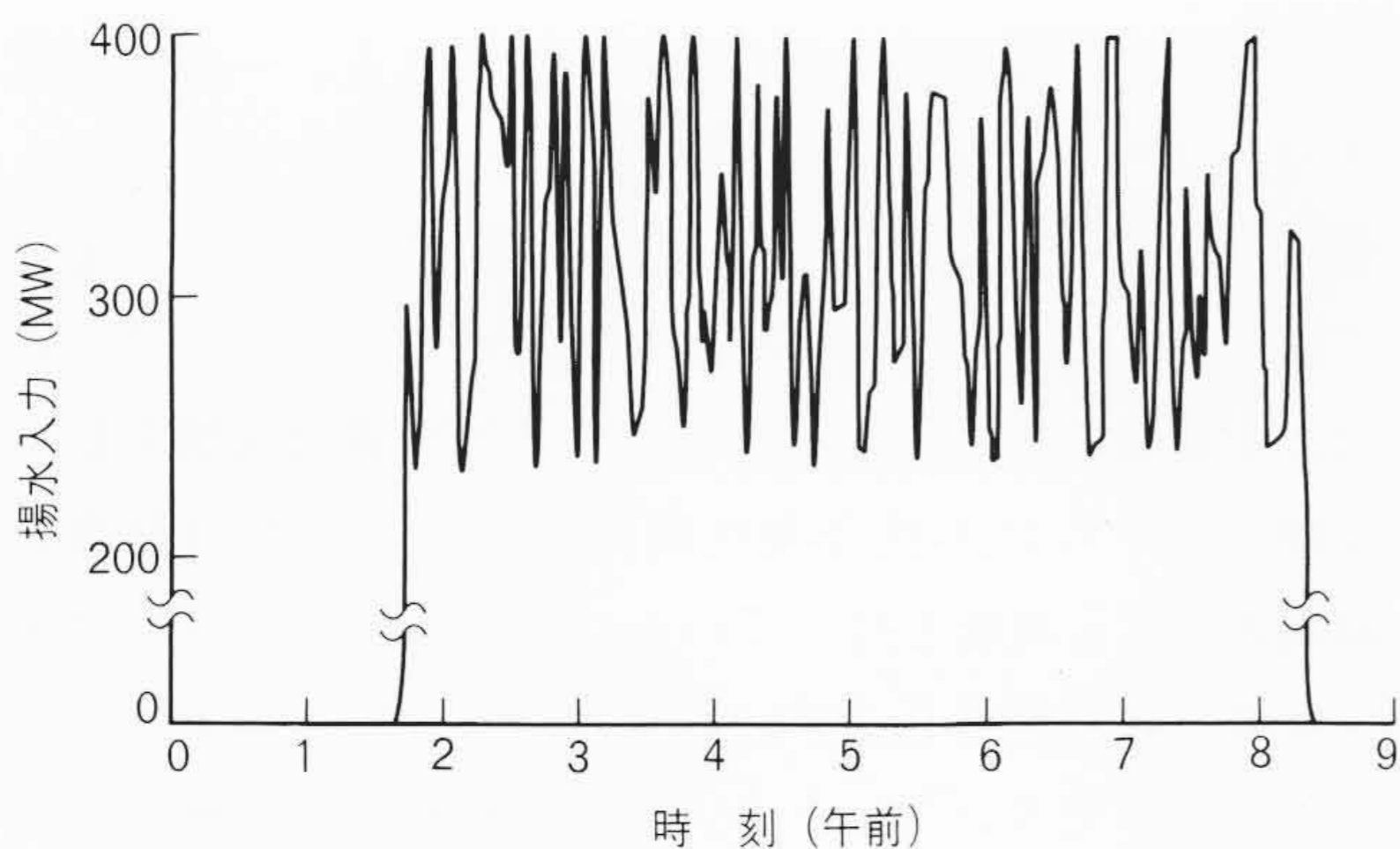


図7 揚水AFC運転時の入力変化例  
実際に深夜から朝まで揚水AFC運転したときの入力変化の例を示す。AFCの下限と上限の間を、1時間に5回程度往復している。

### 3.2 過電圧保護システム

系統側事故などの外部異常波及で励磁電流に脈動分が加わり、励磁電流が0になって回路を開放すると過電圧が発生する。従来は過電圧エネルギーを処理するために、大きなバイパス回路装置が必要であった。大河内4号機では過電圧を検出してサイクロコンバータのPN動作群を反転させ、バイパス回路を使用せずに励磁制御が継続できる。これにより、システムの運転信頼性を高めると同時に、今後の機器小型化が可能となった。この動作は、次に述べる系統試験で確認した。

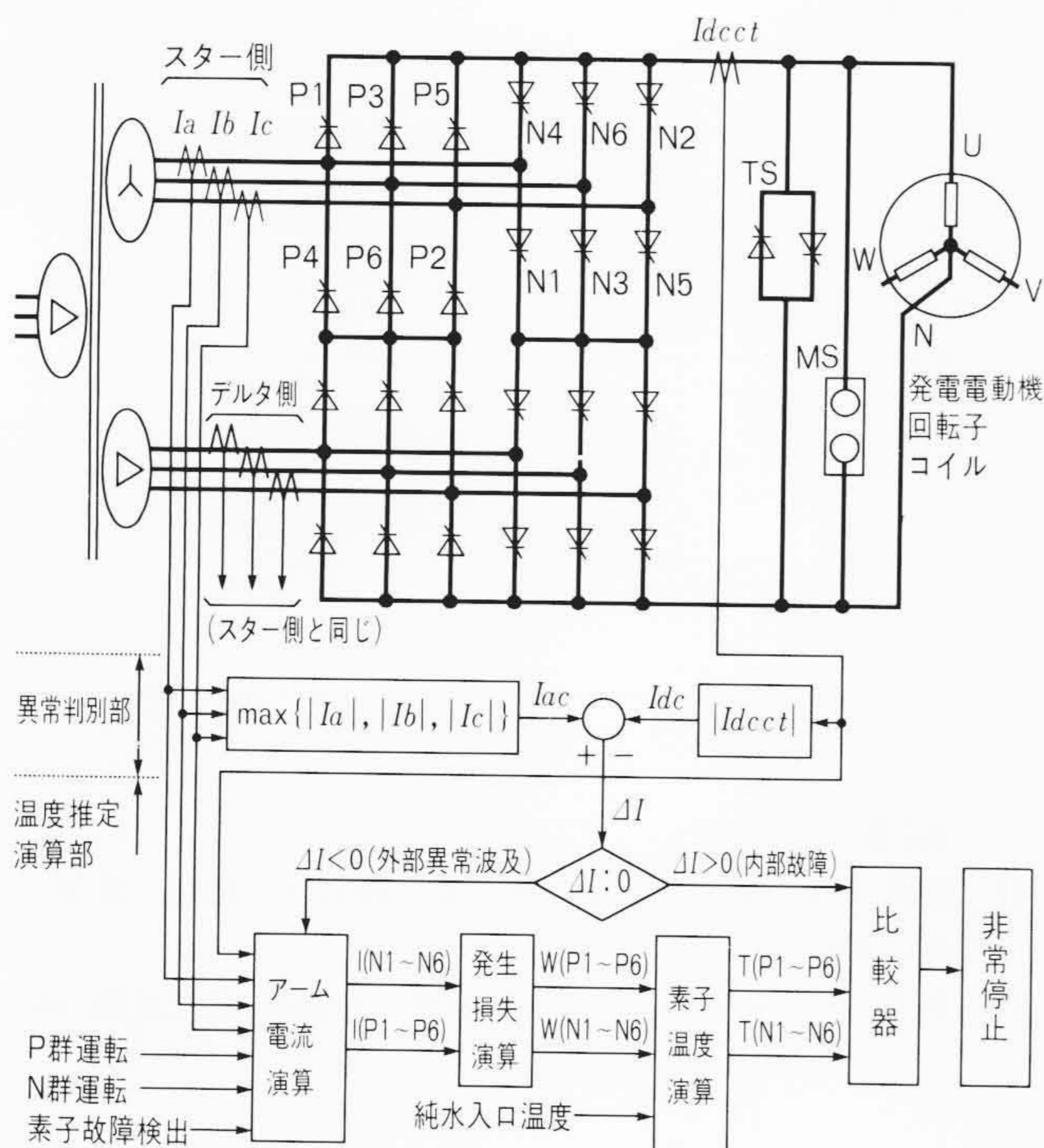


図8 過電流保護システム  
過電流の原因判別部分と、サイリスタの温度推定演算部から成る。

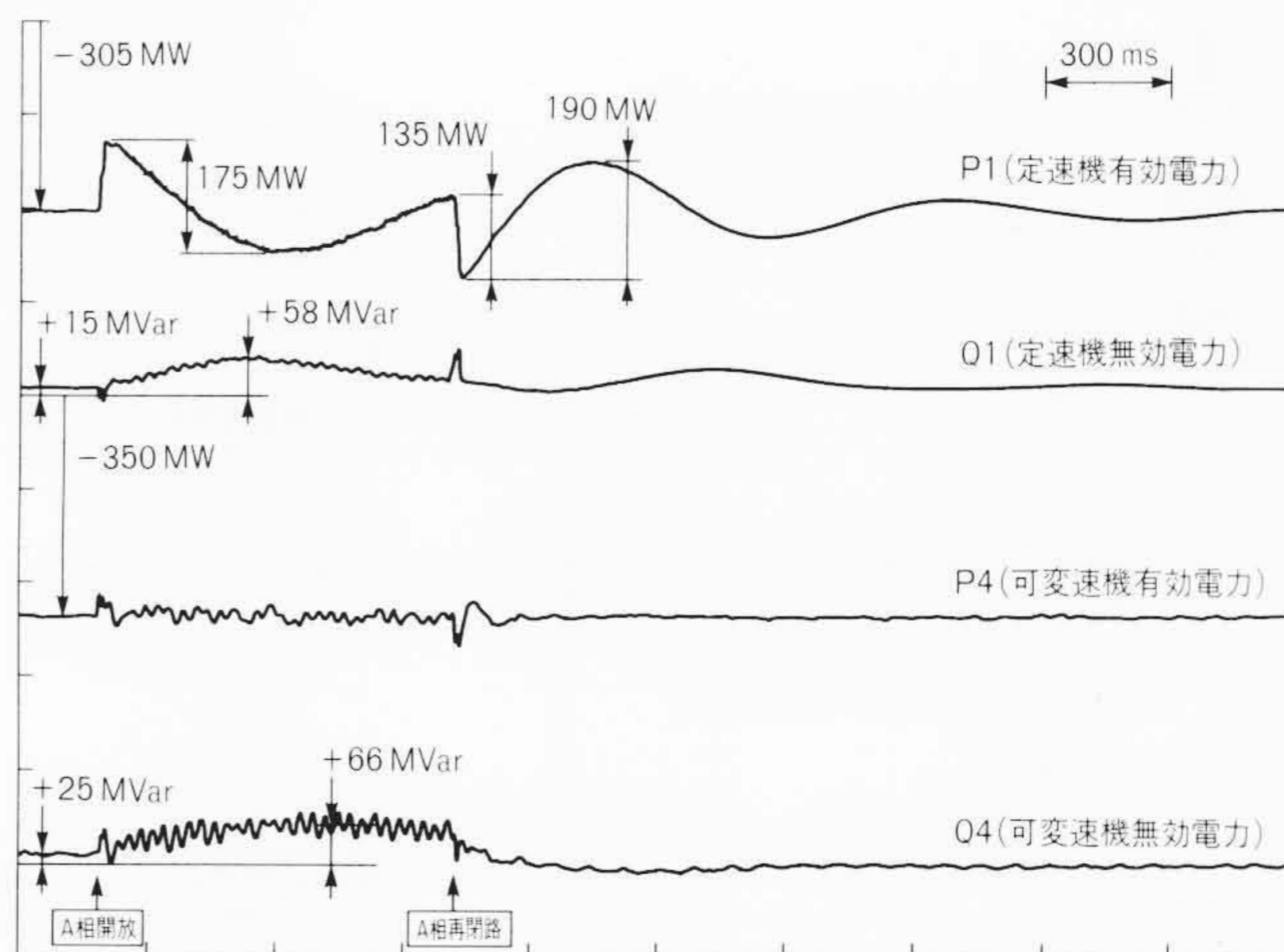


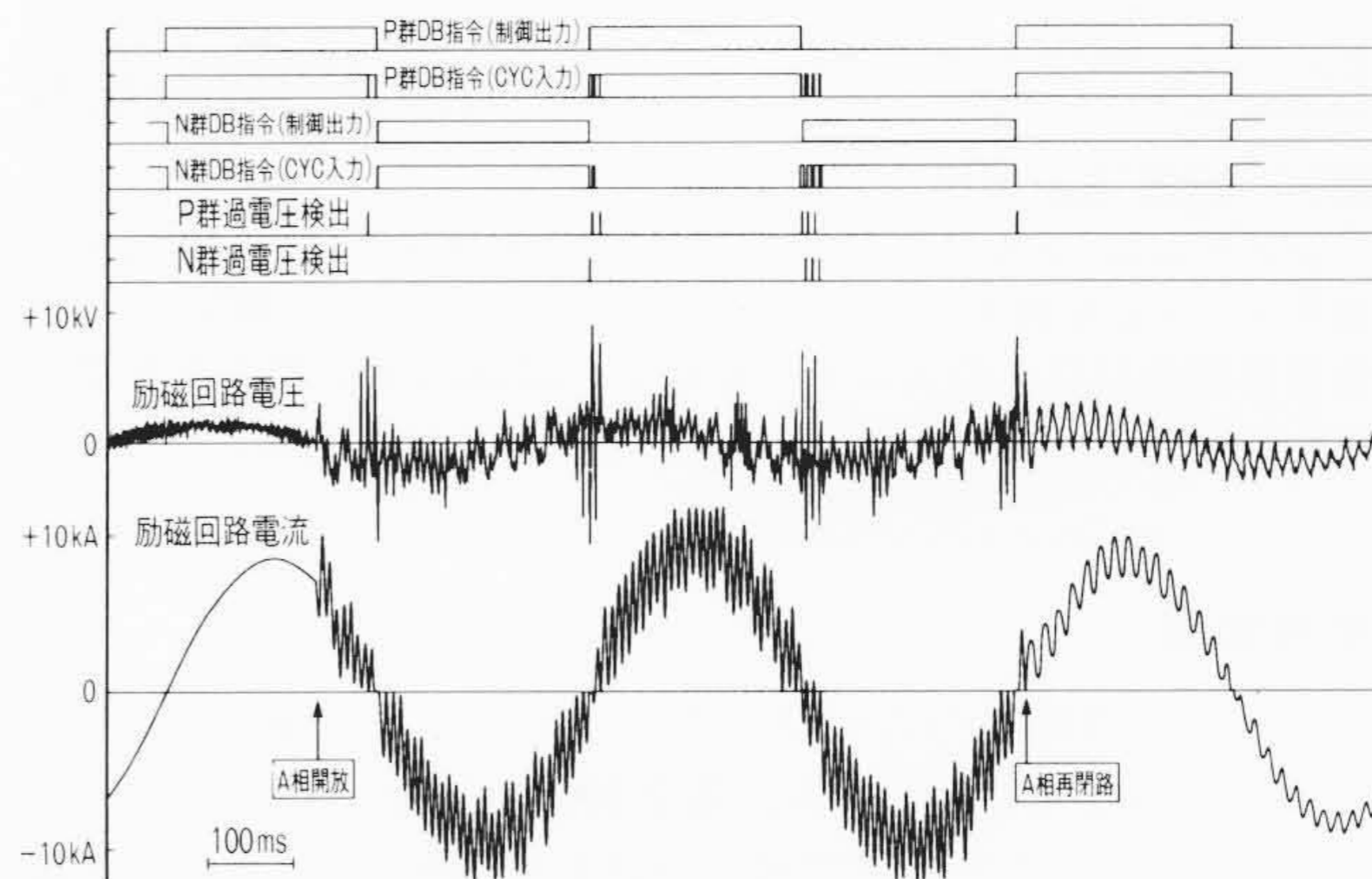
図9 系統試験結果(1号定速機・4号可変速機とも揚水運転)  
定速機の有効電力動揺に比べて、可変速機は振れも小さく収束も速い。

### 3.3 系統試験結果

大河内4号機では系統側異常波及時にも安定に運転継続させるために、有効電力優先制御、固定子電圧周波数検出方式、および過電圧過電流保護方法を開発した。500 kV系統1回線送電時の単相高速再閉路試験を実施し、こうした安定化機能の有効性を確認した。従来の同期機(定速機)と比較して可変速機の有効電力動揺はきわめて小さい(図9参照)。同時に計測した励磁回路側の動作を図10に示す。過電圧保護システムが動作し、安定して励磁制御を継続できることを確認した。

### 3.4 保守支援システム

可変速システムは、従来にない機器および制御方式を採用した。そのため、万一不具合が発生した場合には、



注：略語説明 DB〔運転(デブロック)〕, CYC(サイクロコンバータ)

図10 系統試験における励磁回路測定結果  
通常は制御出力の運転指令どおりにP群N群変換器を切り換えるが、系統側動揺の波及で過電圧が発生すると、過電圧保護動作で制御出力とは反対の指令をCYCに入力する。

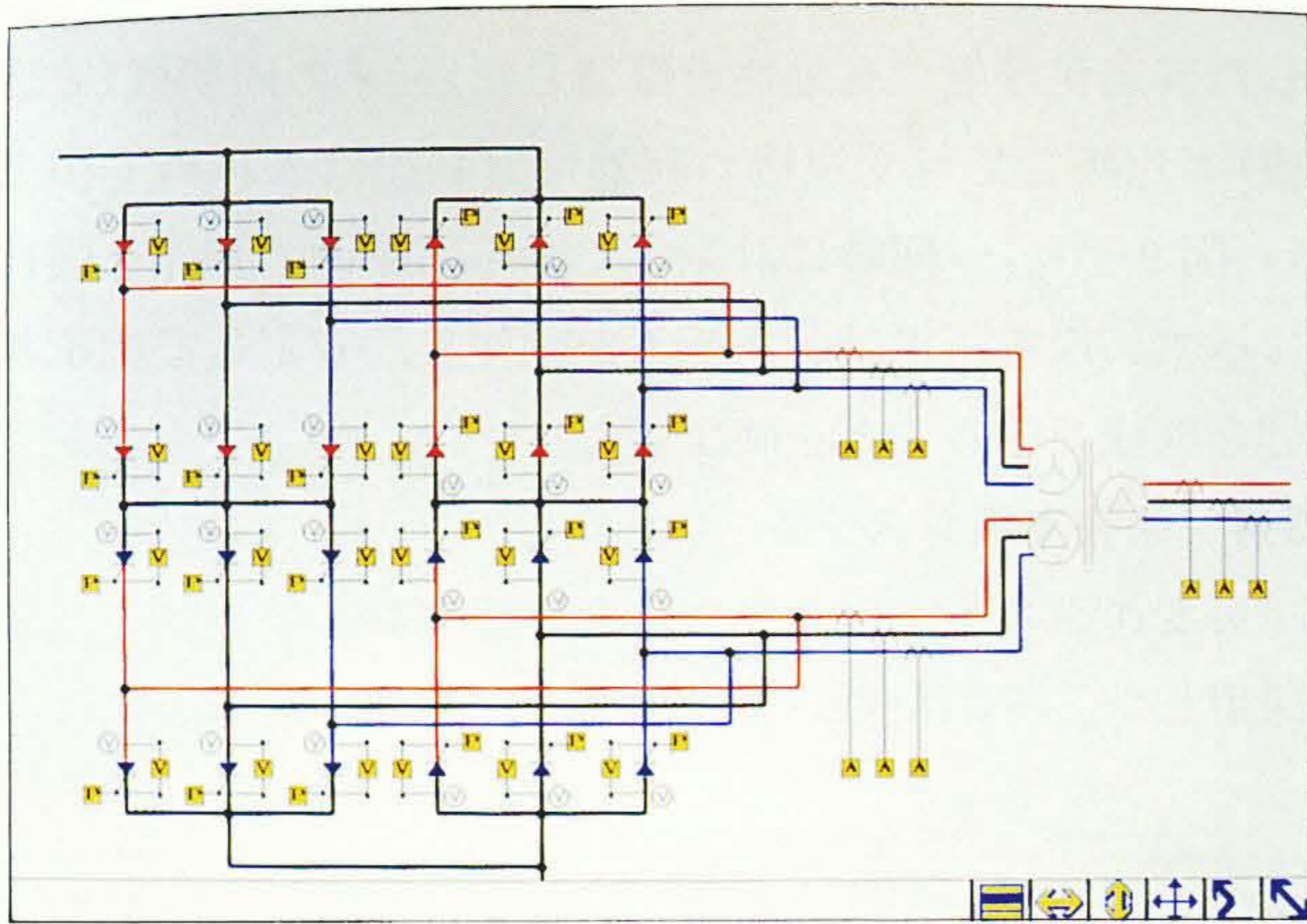
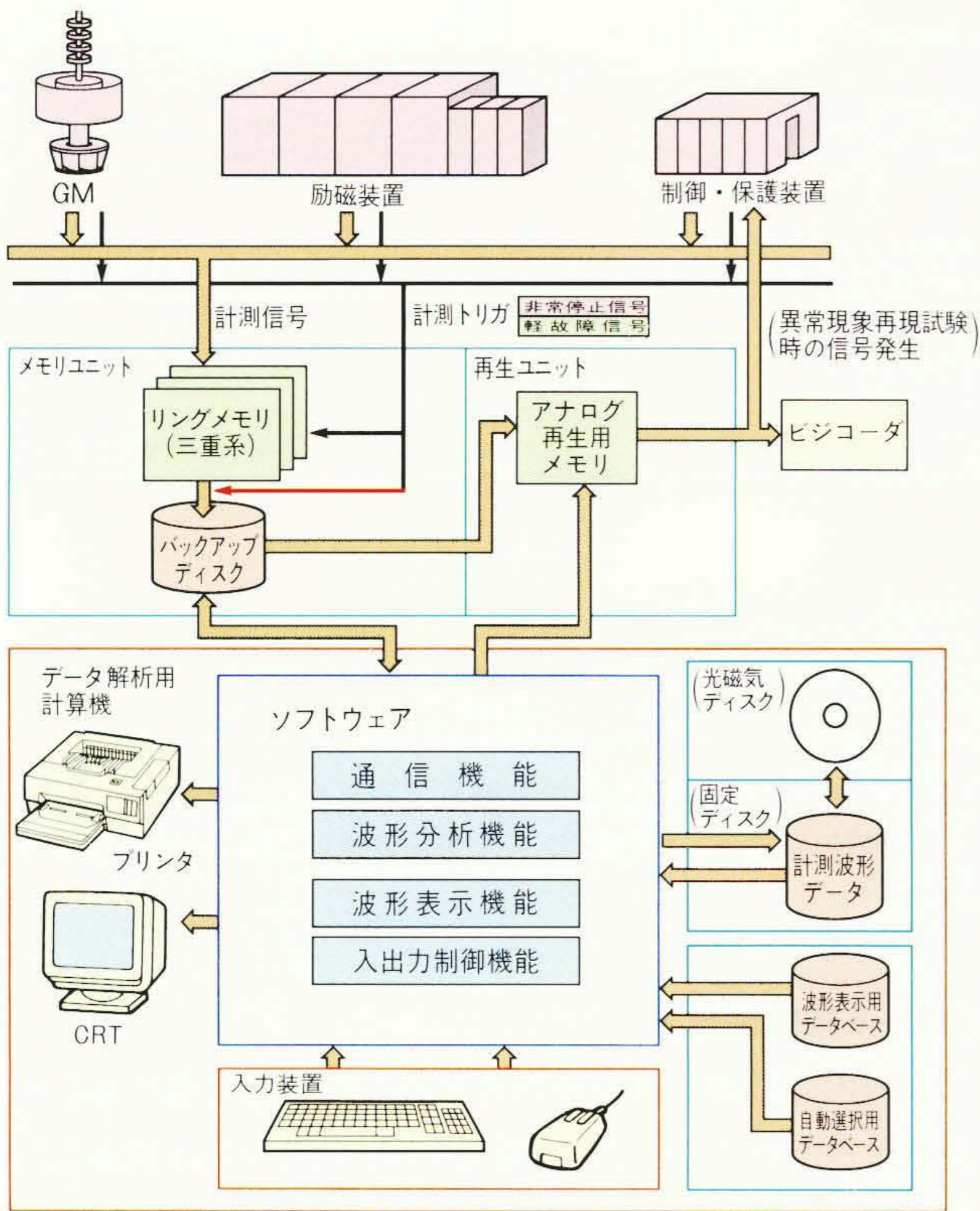


図11 過渡現象解析システム

システムは、メモリユニット、対話型波形表示と自動選択式波形表示ソフトとを備えたデータ解析用計算機から成る。画面は、対話型波形表示ソフトのメニューを示す。回路図上の黄色部を選択する。

原因究明に時間を要することも予想される。一方、系統運用上は可変速システムは不可欠なものとなっており、運転・保守員による迅速な復旧を支援するために、図11に示す過渡現象解析システムを開発した。このシステムは、主要機器、制御保護各部の電気的な過渡状態を監視記録し、さらに不具合発生時には、データを自動選択編集表示する機能を持っている。このために、アナログ・パルス・接点信号を含め、約千点から同時計測を行うデジタルメモリユニットと、データ解析用計算機でシステムを構成した。

今後、可変速システムに限らず、電力変換器を使用した大規模システムの異常監視への適用拡大が期待できる。

#### 4 おわりに

ここでは、電力系統の安定化に寄与する400 MW可変速揚水発電システムについて述べた。

大容量可変速揚水発電システムは、今後、各所で採用される見込みである。

可変速揚水発電システムをさらに電力系統の運用に貢献させるためには、システム性能の高度化とともに、特に励磁システム周辺の小型化、部品点数の削減が重要である。次世代大容量電力用半導体素子の開発をはじめとして、パワーエレクトロニクス技術の進歩は著しく、こうしたシステムの実現に向けて着実な開発を続けていきたいと考える。

#### 参考文献

- 1) 北：水力部門へのパワーエレクトロニクス適用技術-可変速揚水発電システム，電気評論，1993-9号(1993)
- 2) 西，外：交流励磁同期機の励磁電流制御方法，平成4年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.11(1992)
- 3) 湊，外：可変速揚水発電システムの開発，電気学会論文誌107巻3号(1987)
- 4) 阪東，外：交流可変速技術の電力機器への応用，電気評論，1987-10号(1987)
- 5) 杉本，外：可変速揚水発電システムの開発，日立評論，68，8，45～50(昭61-8)