

最近の揚水発電所の制御方式

Controlling System for the Latest Pumping-up Station

齋 藤 武*
Takeshi Saitô

内 容 梗 概

最近続々と運転にはいりつつある揚水発電所の制御は容量増大に伴う起動方式の問題、機動性を発揮するための運転制御方式の合理化、新機種の開発に伴う特殊な制御装置などについて十分検討し、それぞれの発電所に最も適した方式が採用されている。また配電盤における制御監視の集中化およびデータロガーの採用などによる保守運転の合理化が進められている。本稿はこれらの新しい制御方式および配電盤、制御装置について最近の傾向を述べている。

1. 緒 言

最も経済的な揚水発電設備として可逆ポンプ水車式の揚水発電所が各所に建設されているが、いずれも日間調整を主とするものでその制御方式は機動性の高い運転が第一の条件である。日立製作所ではわが国初めての可逆ポンプ水車を昭和34年四国電力株式会社大森川発電所に納入したのをはじめ、次々と最新の揚水発電機器を完成納入し良好な運転実績をえている。これらの揚水発電所においては最も問題となる起動方式をはじめ、随時短時間で起動、停止のできる確実な自動方式などあらゆる面から十分検討され、豊富な製作経験と研究成果が織りこまれてそれぞれの発電所に最も適した制御方式が採用されている。さらに今後の容量の増大と設備台数の増加に備えて従来適用例の少なかった同期電動機式の起動方式などについて詳細な検討が進められている。

また新しく開発された斜流ポンプ水車用の特殊な制御装置や、流量と出力などの制限をうける発電運転の自動化、および制御監視の集中化やデータロガーの採用などによる保守運転の合理化が積極的に進められている。

以下これらの新しい制御方式および配電盤の最近の傾向について述べる。

2. 電動機起動方式

揚水運転のときは発電機を電動機として起動するため、主回路相

順や副励磁機極性などの切換えが必要となる。また起動トルク軽減のため推力軸受への高圧油送入やポンプケーシング内の水面押下げが一般に行なわれる。しかし最近急速に進歩しつつある斜流ポンプ水車ではランナベーンがほぼ全閉できるので水中起動が可能で、水面押下げ装置も不用となり、起動準備時間が短くてすむ。

電動機起動方式は従来簡単確実な誘導電動機式が広く採用されてきた。第1表は日立製作所における製作実績であるが、各発電所の系統条件や主機仕様などをあらゆる面から検討して決められたものである。一方最近の火力発電所単位容量は増大の一途をたどっており、系統連系の強化と相まってこれに見合う揚水発電設備も大形化し、設備台数が多くなるとともに主機製作技術の進歩によりその単機容量も大きくなる傾向が強い。このため起動時の系統および電動機に与える負担の軽減、起動時間の短縮などの点から同期電動機式の起動方式が実用化されようとしている。

2.1 制動巻線による自己起動方式

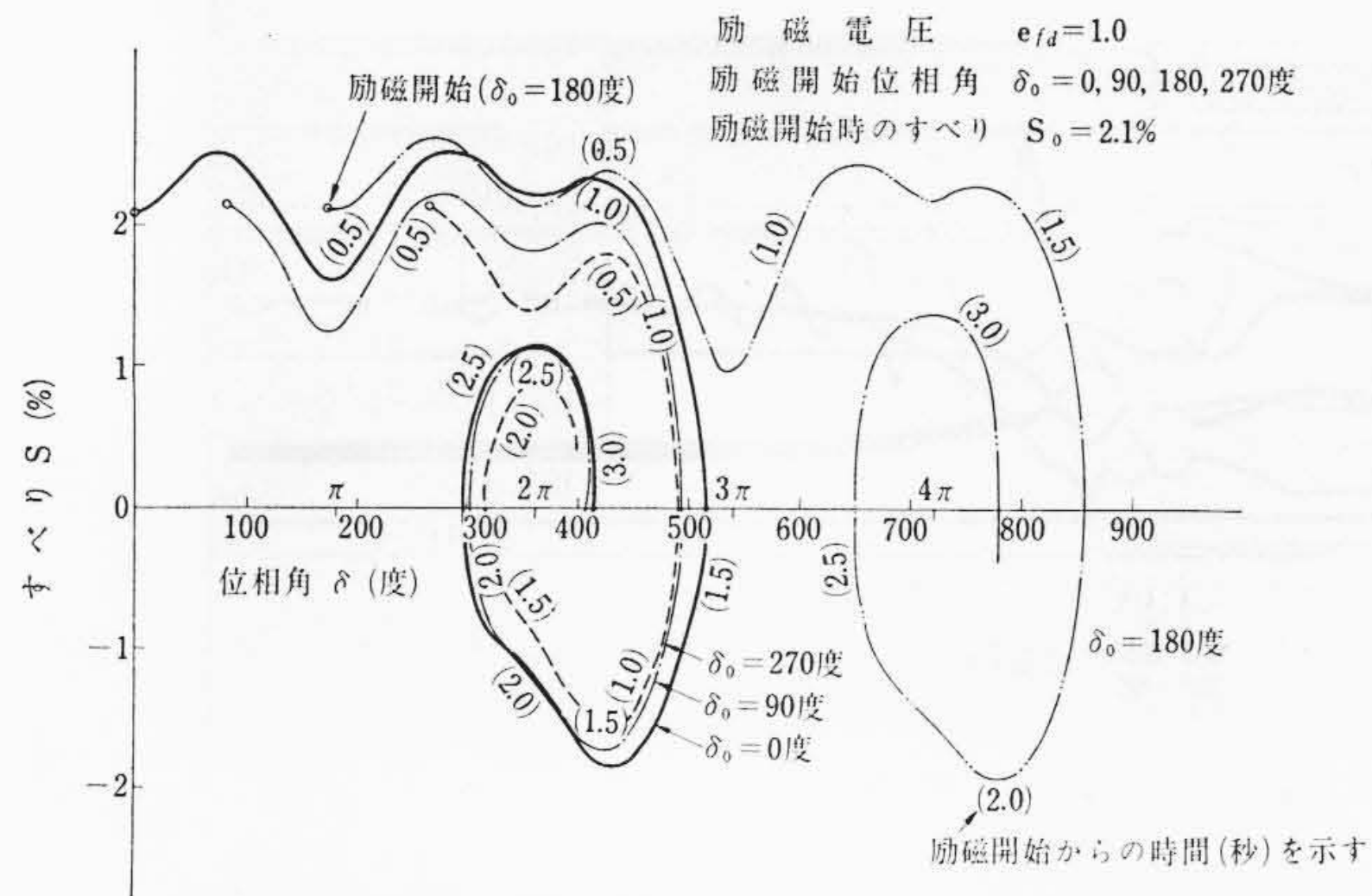
(1) 起 動

一般に設備の簡素化と所要起動トルクの点から主変圧器の中間タップを利用し半電圧（全電圧に対し60度進みとする）で起動する方法が広く採用されている。この場合系統および主変圧器のインピーダンスによる電圧降下は10~15%で起動kVAは定格の80~70%程度ですむのが普通である。系統電圧降下も数%程度なのでさほど大きな影響はないが、あらかじめ交流計算盤などで検討しておくことが望ましい。発電または揚水時の系統構成が大幅に

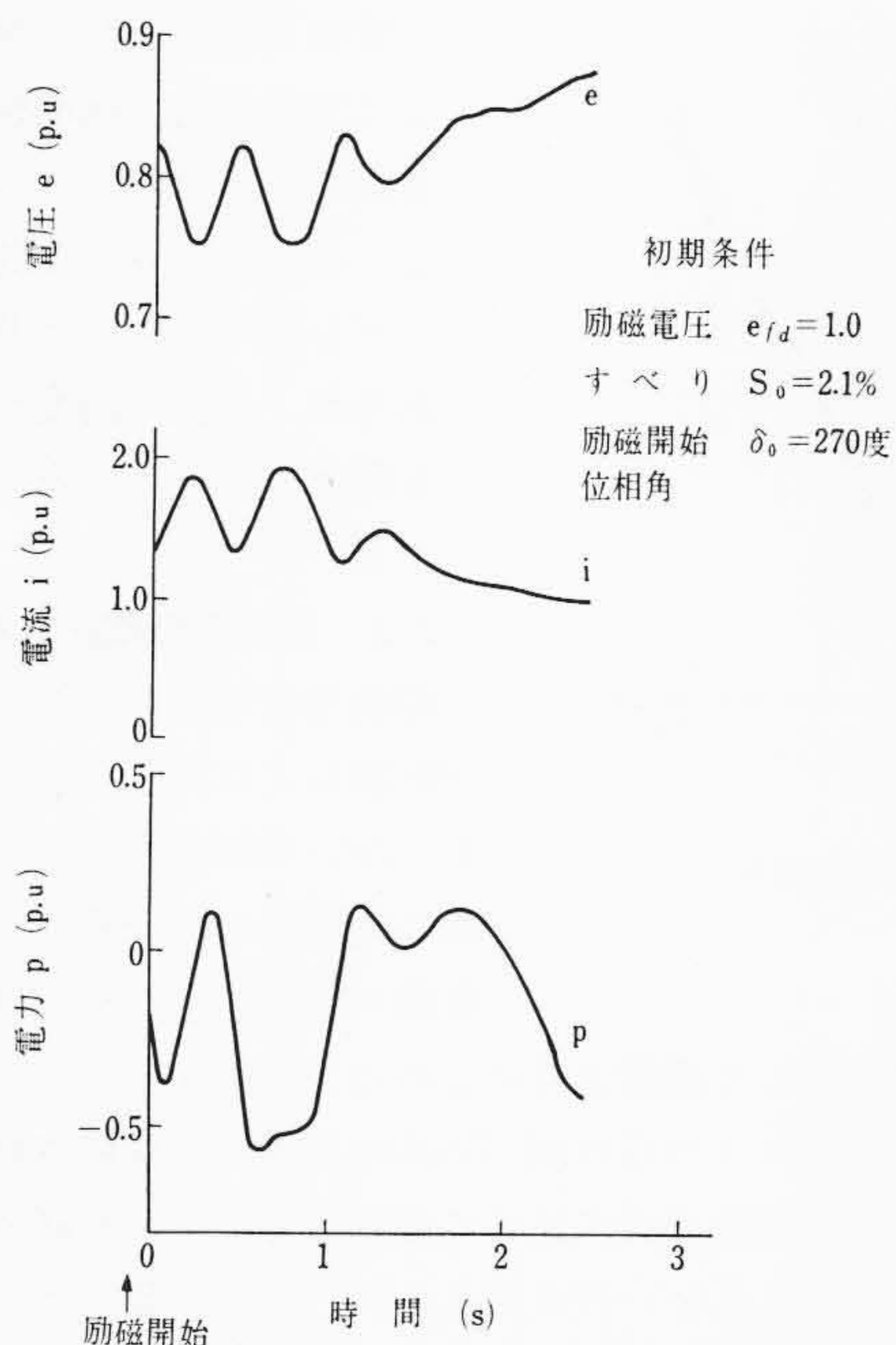
第1表 ポンプ水車式揚水発電所と起動方式

発電所名	大 森 川	畑 薙 第 一	三 尾	穴 内 川	池 原 (I期)	城 山	矢 木 沢
電動機出力(kW)	15,000	46,500	39,600	14,000	82,500	73,000	87,000
起動方式	制動巻線	制動巻線	制動巻線	制動巻線	制動巻線	制動巻線	制動巻線
起動電圧(%)	約 60	50	50	50	50	50	50
同期引き入れ時電圧(%)	100	50	100	100	50	50	50
変圧器結線							
起動トルク軽減方式	水面押下げ 圧油送入	水面押下げ 圧油送入	水面押下げ 圧油送入	ランナベーン全閉 圧油送入	水面押下げ 圧油送入	水面押下げ 圧油送入	水面押下げ 圧油送入
励磁装置	磁気増幅器形	磁気増幅器形	静止形自励式	磁気増幅器形	HTD形	HTD形	HTD形
運転開始	1959	1962	1963	1964	1964	1965(予)	1966(予)

* 日立製作所国分工場



(a) すべり位相角曲線



(b) 電圧、電流、電力対時間曲線

第1図 同期引き入れ特性計算例

変わり電圧変動範囲が大きいときには、主機はもちろん所内補機あるいは直配線などに対する影響も合わせ検討しておくことが必要で、変圧器高圧側に負荷時調整タップを設け揚水起動時には自動的に電動機端子電圧を一定に保つようにした例もある⁽¹⁾。

(2) 同期引き入れおよび全電圧切換え

半電圧にて電動機速度が上昇しすべり最小となれば直ちに全電圧に切換えるとともに励磁を与えて同期引き入れとする方法と、半電圧のまま励磁を与えていったん同期化させたのち半電圧と全電圧の位相差 60 度を利用して全電圧に切換える方法とがあり、と

もに実用されている。前者は励磁並列の機会を失うおそれのない安全確実な方法で系統条件のほかとくに適用上の問題はない。後者は半電圧でも同期引き入れが十分可能であること、60 度移相に要する減速時間が半電圧-全電圧の切換え時間に対し十分余裕が得られることが必要である。

同期引き入れ現象は同期機の運動方程式により近似計算することができるが、日立製作所では電気回路とくに引き入れの成否を決定する制動トルクの過渡現象を加味した精密なデジタル計算プログラムを確立し正確な予測計算を可能とした⁽³⁾。第1図は 80,000 kW 機についての計算例で、すべりが 2.1% のときは励磁を与える位相角のいかんにかかわらず同期引き入れしているが、同期速度に達する時間は位相角 270 度るとき最も短いことを示している。

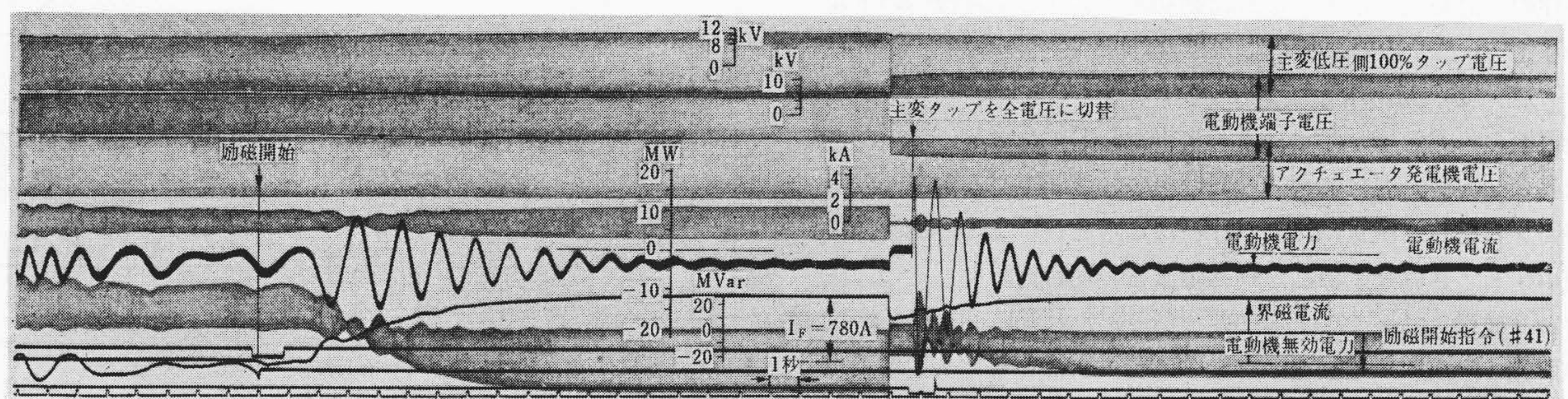
一般には励磁電圧にもよるが最小すべりを適確に検出して励磁を与えることで同期引き入れは可能であるが、到達する最小すべりに余裕が少ないときは最も引き入れしやすい位相角を検出して励磁を与え、回転子を早く同期速度まで加速してやることが有効である。また最小すべりは界磁巻線用放電抵抗によりかなり影響をうけるのでその抵抗値の選定には注意を要する。

半電圧と全電圧との位相差 60 度の移相に要する減速時間は主としてはずみ車効果および負荷トルクにより決まるが、開閉器やリレーの切換え時間を考慮して少なくとも 0.4 秒程度は必要である。全電圧切換え時のじょう乱は投入位相角が 0 度るとき最小で進相よりは遅相の範囲に入れるほうが小さい。したがって切換え時間や負荷トルクのばらつきなどを考慮して 0~5° の範囲で投入すればよい。また投入時のすべりの影響は位相角に比べて少ない。

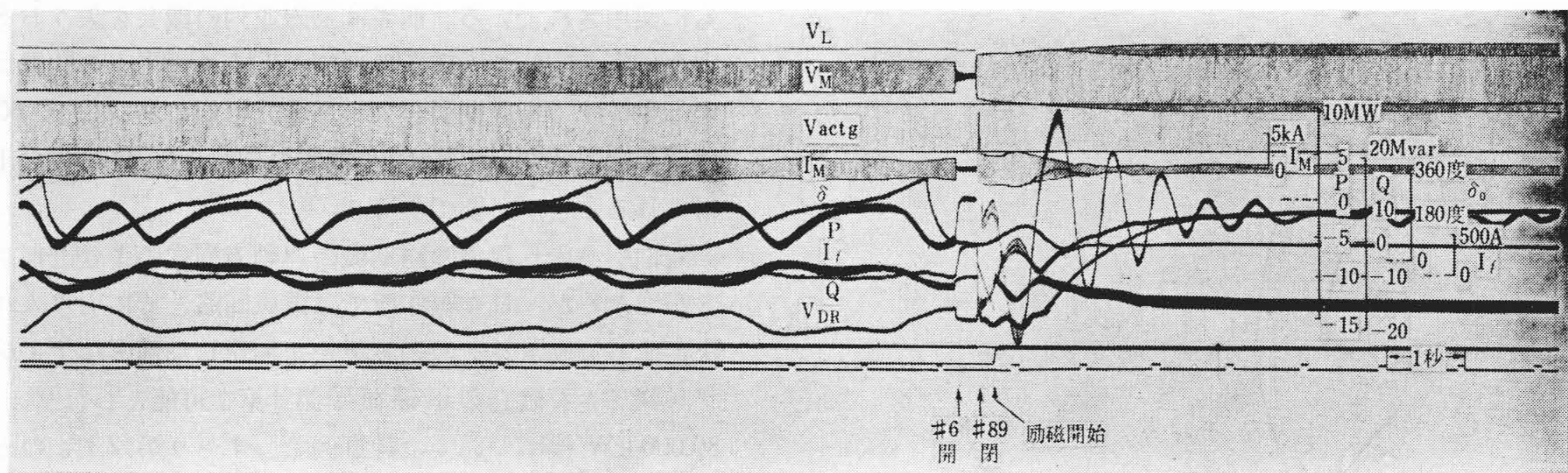
位相角の検出にはパイロット発電機と系統電圧とを比較する方法⁽²⁾もあるが、一般には簡単確実な限時継電器による方法で十分である。第2図に 46,500 kW 機における半電圧同期引き入れおよび全電圧切換え時のオシログラムの一例を示すが、電力動揺は半電圧同期引き入れ時のほうが小さく、減衰時間は全電圧切換え時のほうが短い。また第3図は 39,000 kW 機における全電圧同期引き入れ時の実例で電圧降下は若干大きい短時間で回復しており、電力動揺もさほど大きなものではない。

2.2 同期電動機式

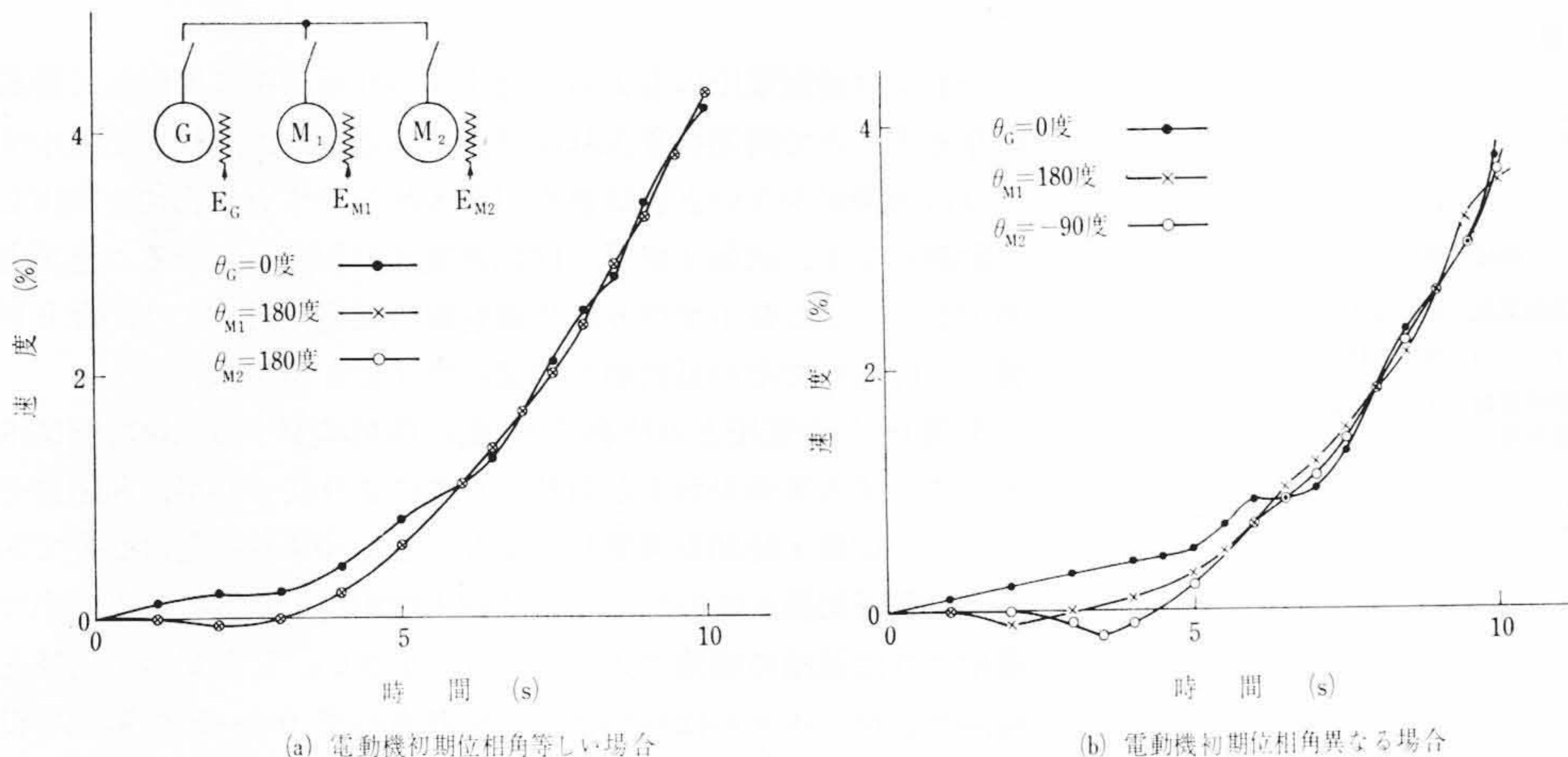
起動用発電機と電動機の電機子巻線をあらかじめ接続しそれぞれ別置励磁装置により適当な励磁を与えておき、発電機を水車で起動することによりごく低速度から同期起動させる方式で、系統に関係なしにまた多数の電動機を同時に起動できる大きな特長がある。とくに最近の大容量揚水発電所では主機台数がふえるとともに河川の自然流量を有効に使うため、一部を発電専用機とし他を発電、揚水兼用機とする傾向があるので、このような場合はまさに好適な起動方式といえる。従来も工場試験や現地特殊試験ではよく用いられて



第2図 半電圧同期引き入れおよび全電圧切換え時のオシログラム



第3図 全電圧同期引き入れ時のオシログラム



第4図 速度対時間曲線計算例

いるが、揚水発電所に適用するときには自動化による操作の簡易化と起動時間短縮を図り、より合理的なものとしなければならない。ここではその問題点と検討結果の一部を紹介する。

(1) 起 動 初 期

電動機の起動トルクを軽減するため水面押下げ、推力軸受への高圧油送入を行なうのはもちろんであるが、同期化トルクにより静止摩擦トルクに打ち勝って回し始めるために発電機、電動機ともそれぞれ起動に適当な励磁が与えられる。一般に電動機と発電機の励磁電圧の比は 0.8 程度が良いとされておりかつその大きさには各回路条件により最適値が存在する。また起動初期においては回路抵抗の影響が大きく、もし隣接の発電所を利用するような場合は途中に送電線や変圧器が存在するのでかなり困難さが増すものと予想される。しかし同一所内で接続されている場合は両者間の連絡母線の大きさは主として電流容量や短絡強度から決めても支障ない。

電動機 2 台以上を同時に起動するときには電動機間の初期位相角もかなり影響するので十分検討しておく必要がある。第 4 図に 100,000 kVA 発電機 1 台および発電電動機 2 台の場合の速度-時間特性の一計算例を示す。なお起動初期における発電機へのトルクの与え方については特別の制限はない。

(2) 速 度 上 昇

発電機の入力を増して、つまり水車案内羽根を徐々に開いて速度上昇させるが、この開き方は同期機の脱出トルク、水車の変落差特性を考慮して慎重に決めなければならない。また直結励磁機を使用するときは起動用別置励磁装置との切替え時期とその方法も合わせ検討しておくことも必要であるが、起動時間の短縮、制御の複雑さの点から起動時の励磁には若干余裕をもたせ案内羽根の開き方を落差、起動台数などにより制御することが実用的である。

(3) 同 期 並 列

定格速度となれば発電機を制御して自動揃速、同期検定を行ない通常の発電所のように自動並列することができ特別な問題はない。ただし電圧平衡には若干困難さはあるが、各機の温度影響を補償する程度でとくに厳密にやる必要は少ない。

2.3 低周波低電圧起動方式

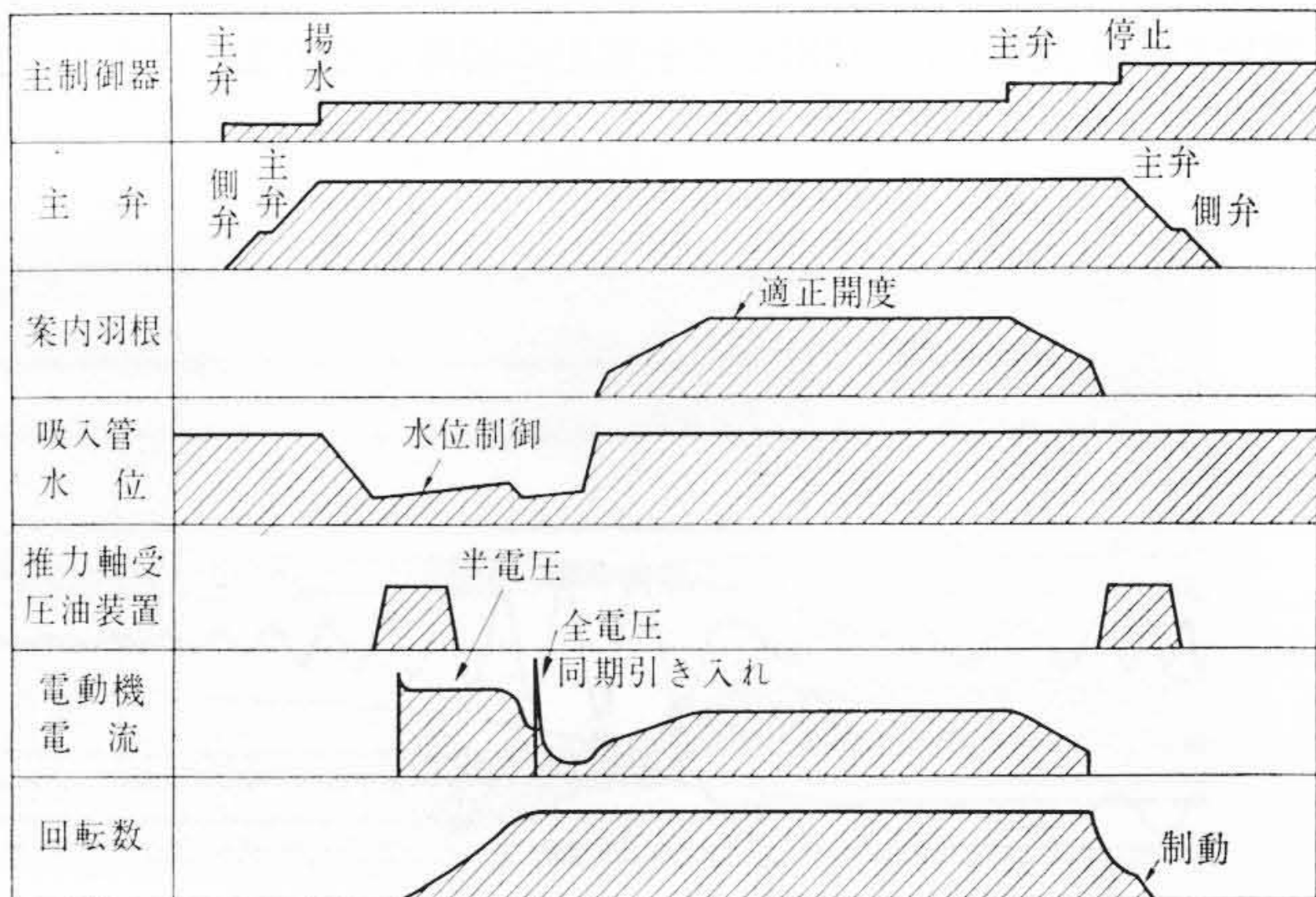
起動用発電機を 60~70% 程度の回転数および電圧としてから電動機をつないで制動巻線により起動し両機の色度がほぼ一致したところで電動機に励磁を与えて同期化し、以後

発電機入力を増して速度上昇せしめる方式である。ポンプ専用電動機ではあるがアメリカ Grand Coulee 発電所で採用されている⁽⁴⁾。本方式では自己起動方式に比べて制動巻線はかなり経済的となり系統にじょう乱を与えない利点はあるが、起動台数が多いときは制御も複雑となり機動性に欠けるきらいがある。しかし別置励磁装置の採用やポンプ水面押下げ装置の省略の可能性などに関連して今後比較検討の余地があろう。

3. 揚 水 方 式

3.1 フランシス形ポンプ水車

電動機並列完了すれば水面押下げ用給気弁を閉じ排気弁を開いて充水し、規定圧力に上昇したことを確認してから案内羽根または主弁を開いて揚水を始める。この期間はポンプにとって過酷な過渡状態であるから、それぞれのポンプ水車の特性や水系に適した開き方なるべく短時間でこの時期を通過させなければならない。第 5 図



第5図 案内羽根揚水運転順序

に揚水順序制御方式の一例を示す。なおランナ充水時の電動機負荷の変動はモデル特性とよく一致しており普通数秒間に15~20%増加する程度でなんら問題ないことが確認された。

3.2 斜流形ポンプ水車

ランナペーンの角度が調整できるという大きな特長があるので揚水起動はきわめて容易となる。すなわち起動時はランナペーン全閉とし水中起動ができるので並列完了後ランナペーンを開き圧力上昇を確認してから案内羽根を徐々に開くことにより円滑に揚水を始めることができる。

以上いずれの形式の場合も揚水時の負荷調整は後述の制御装置により自動的に行なわれる。

4. 制 御 装 置

4.1 案内羽根開度調整装置

揚水発電所では上、下ダムの水位変動が大きいので、ポンプ水車の特性に応じて揚水時にはできるだけ運転効率を高め、あるいは発電時の円滑な起動のため水位差応動案内羽根開度調整装置が必要で大森川発電所以降各所に設けられ十分その効果を発揮している。

最近ではデジタル式水位テレメータ装置と組み合わせて非常に精度の高い制御が可能となった⁽⁵⁾。第6図はその組合せ特性の一例である。

4.2 斜流ポンプ水車運転装置

一般に可動翼水車では落差に応じて案内羽根とランナペーン開度の関係を連続的に変えることにより高効率運転としているが、ポンプ水車の場合はさらに揚水量一定運転および最大揚水量制限運転など水系の運用に有効な運転方式が採用されている。とくに新しく開発された揚水量一定運転装置は機械と電気装置のたぐみな組み合わせによって簡易確実なものとすることができた。本装置は下部ダムの容量が小さく下流の流量制限などのある場合、その水系にあふれ水が生じないよう総合的運営を行なうために好適なもので、穴内川発電所で用いられている。以下その概要について述べる。

(1) 制 御 原 理

揚水量一定運転時の斜流ポンプ水車の特性例を示せば第7図のよう、これから揚水量を一定とするためには揚程が大きくなるにしたがい案内羽根開度を小さく、また揚程一定のとき揚水量を増すためには案内羽根開度を大きくすればよいことがわかる。これらの制御を最も簡単確実な方式とするため上、下ダムの水位差と流量の設定を電気的に行ない、案内羽根とランナペーンを機械的演算装置により設定することにした。

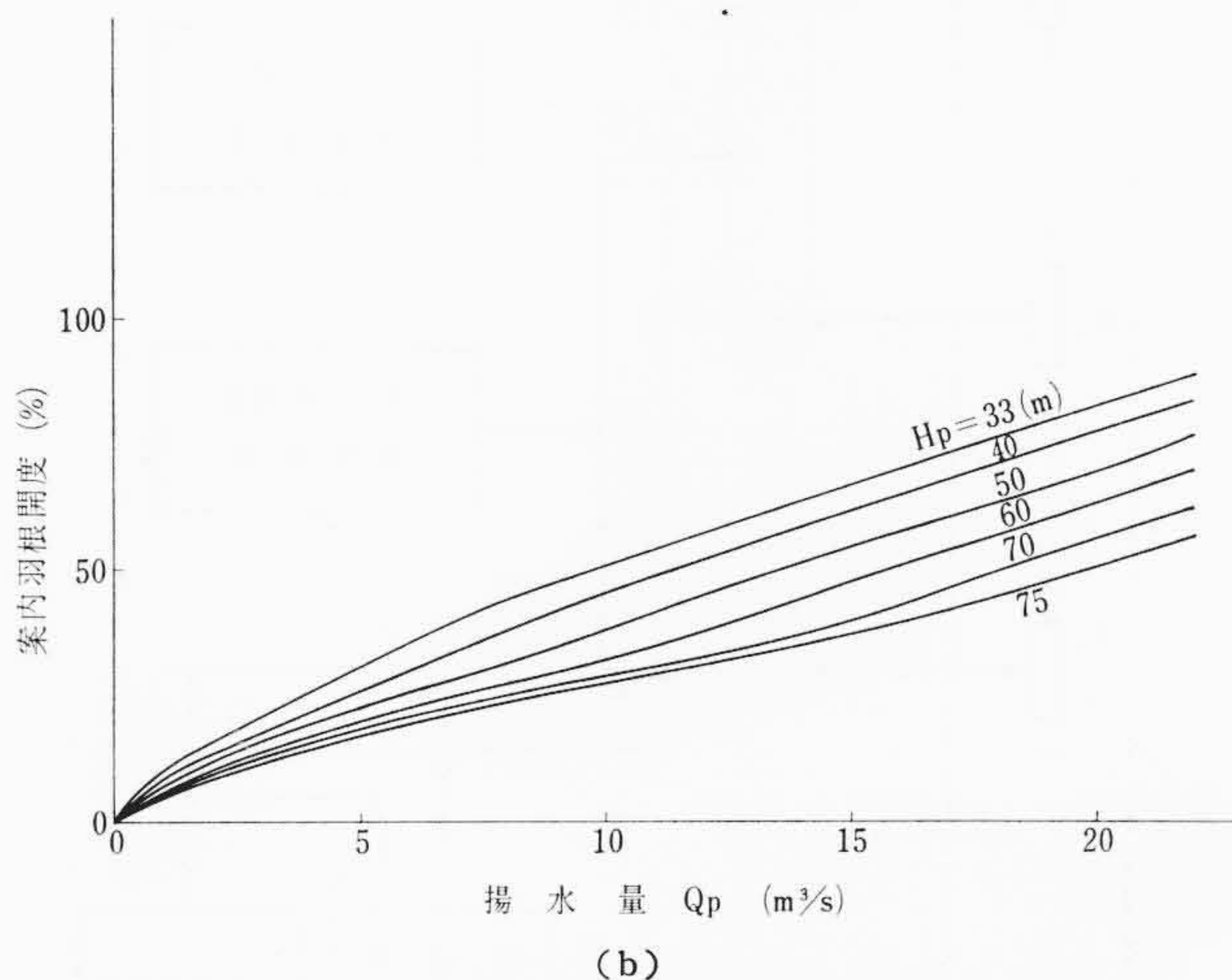
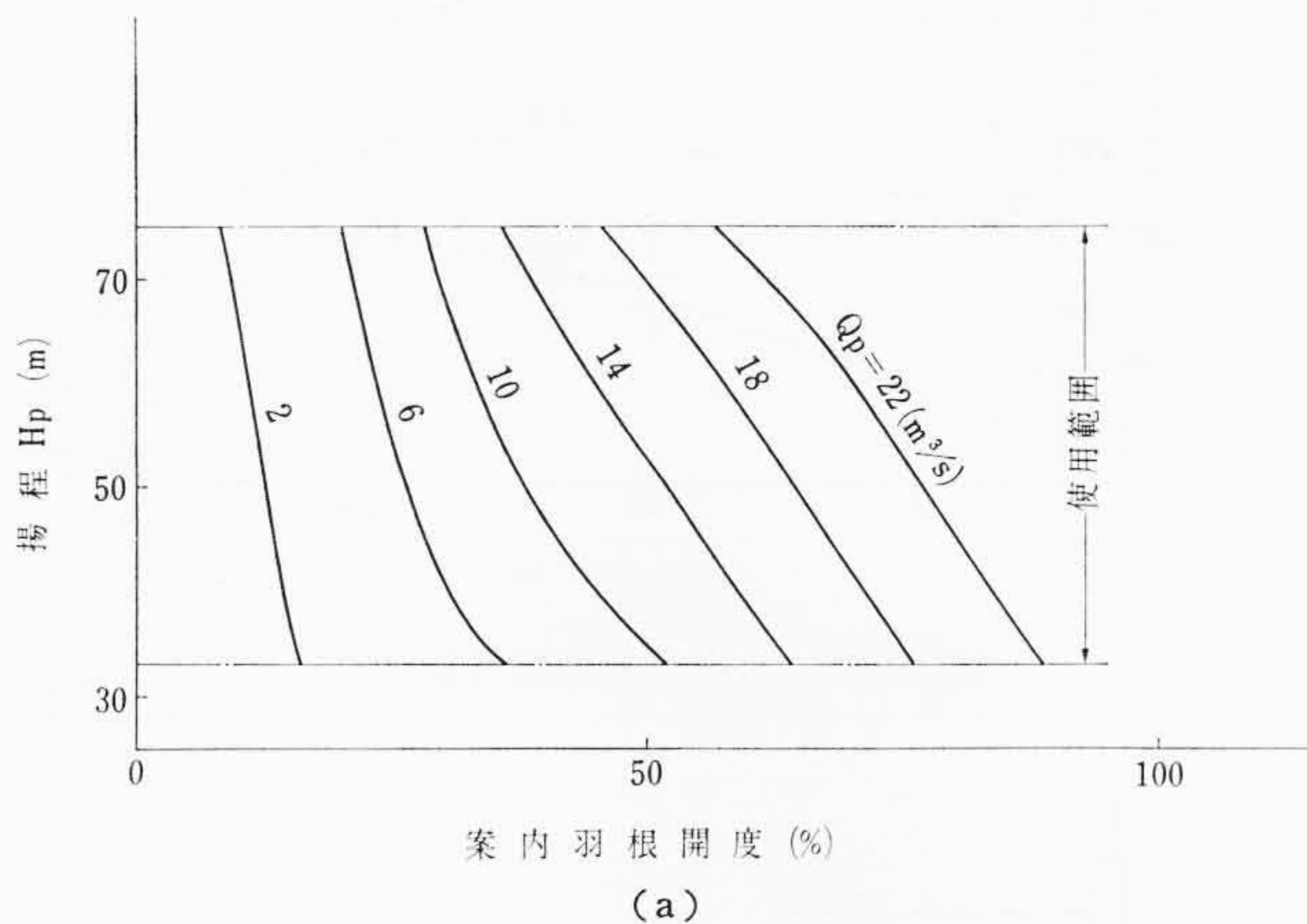
(2) 制 御 装 置

第8図にそのブロック図を示す。第9図には水位差および流量整定装置をブロック図で示す。水位差整定装置は常時生かされるが、無用の動作を避けるため可調整の不感帯を設けている。流量

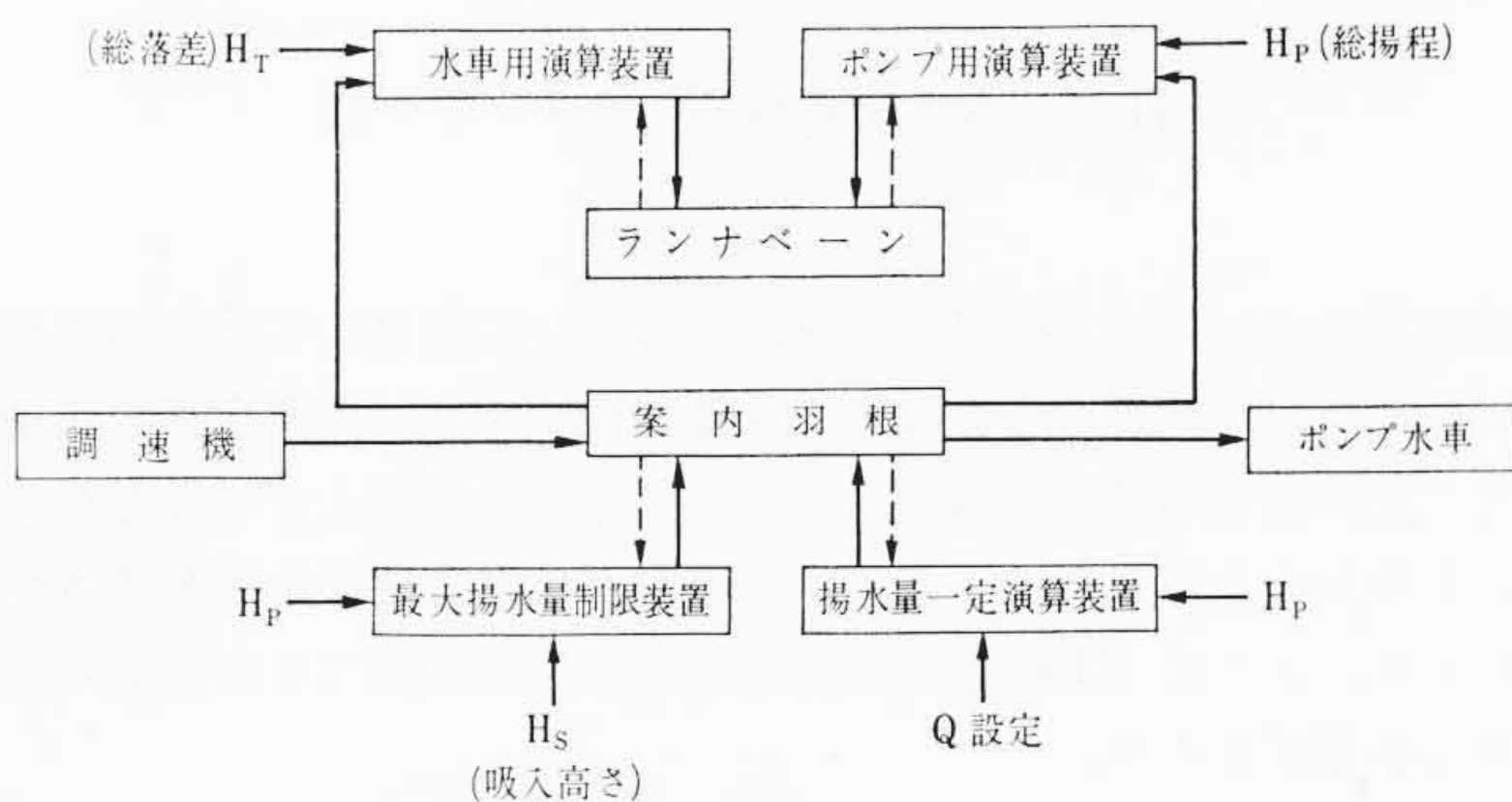
整定器は配電盤に取り付け手動および遠方操作も可能なものとしている。

4.3 発電運転用出力制限装置

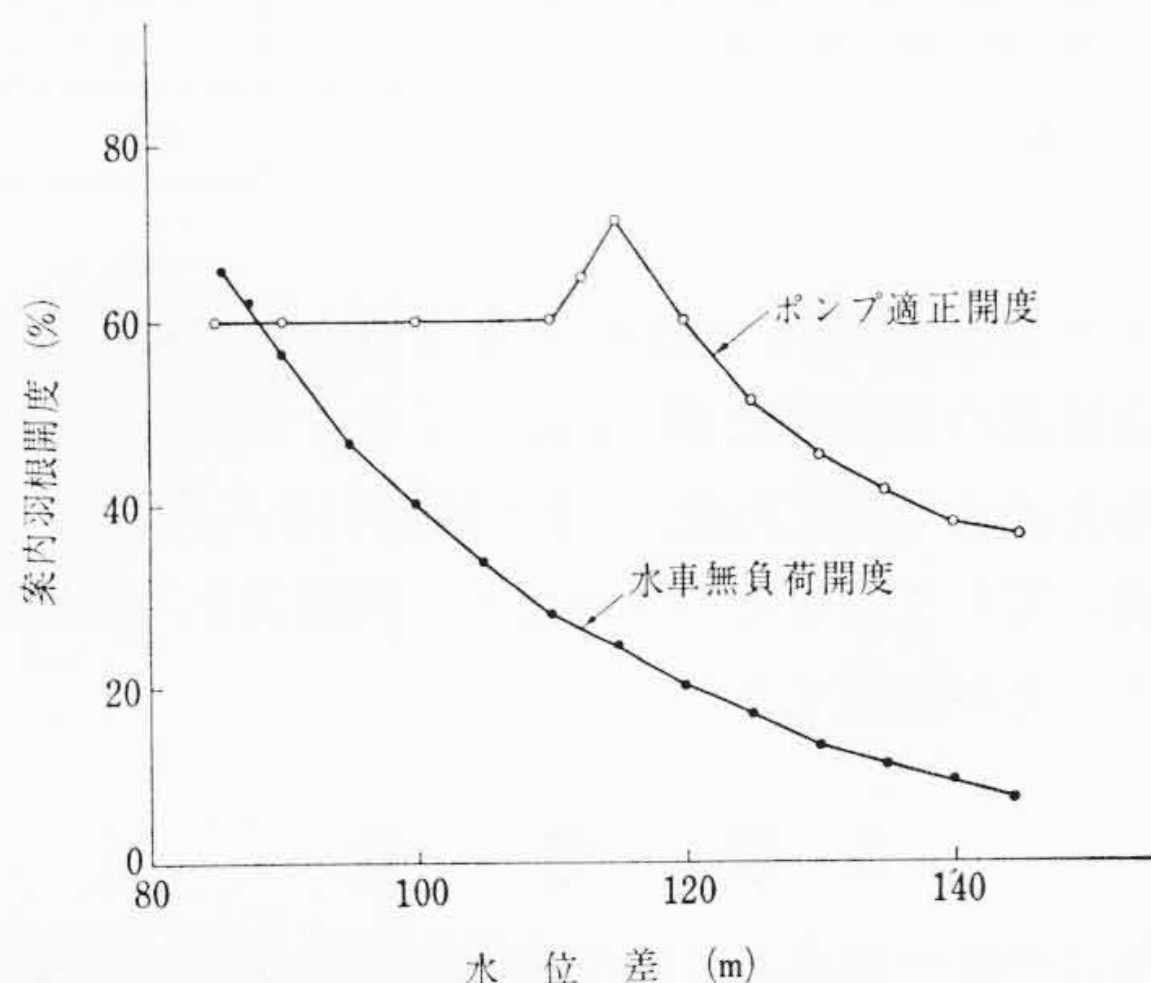
発電運転ではそのときの落差における最大出力で運転することが多いが、水系からの条件で最大流量が制限されることがある。また



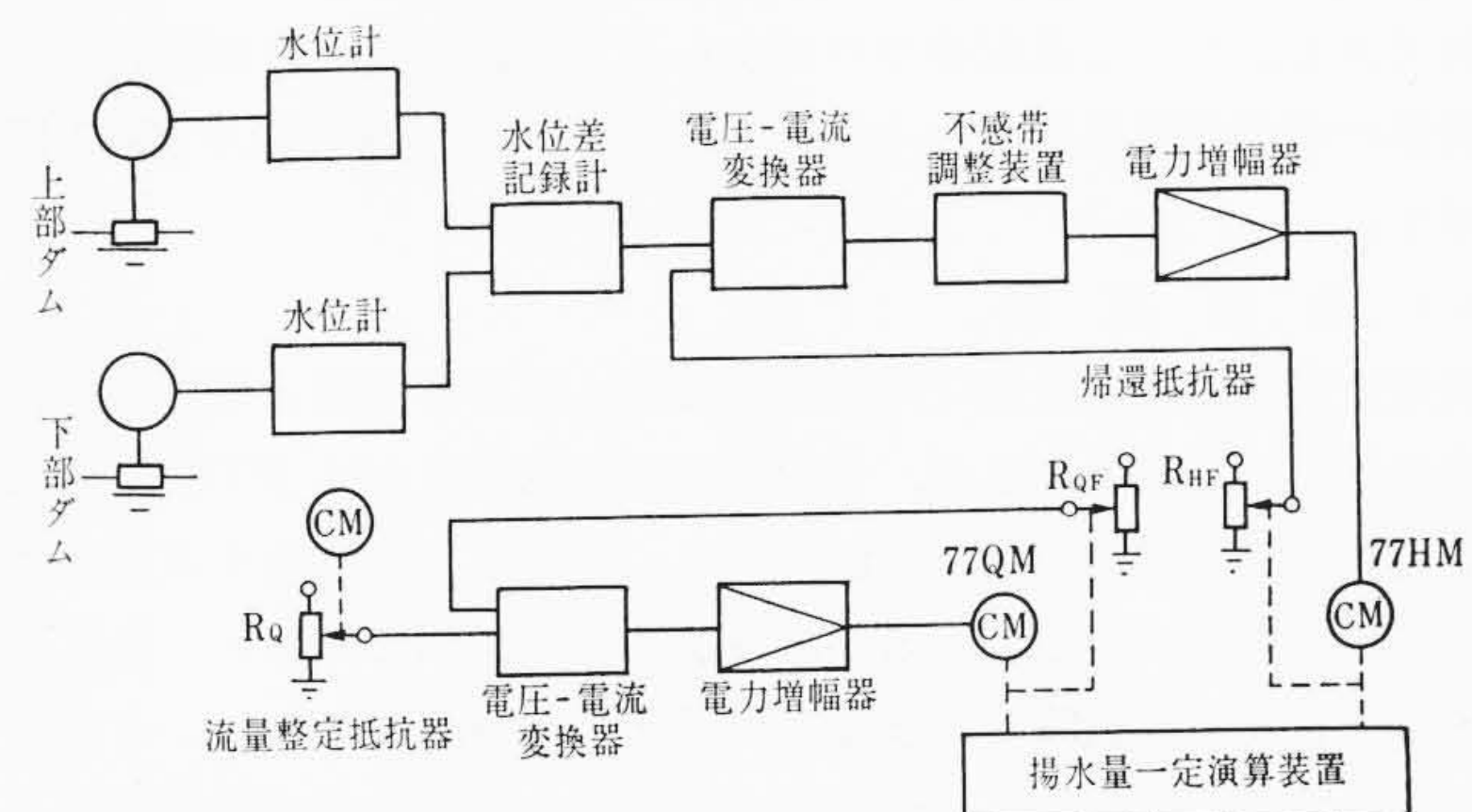
第7図 斜流ポンプ水車特性例



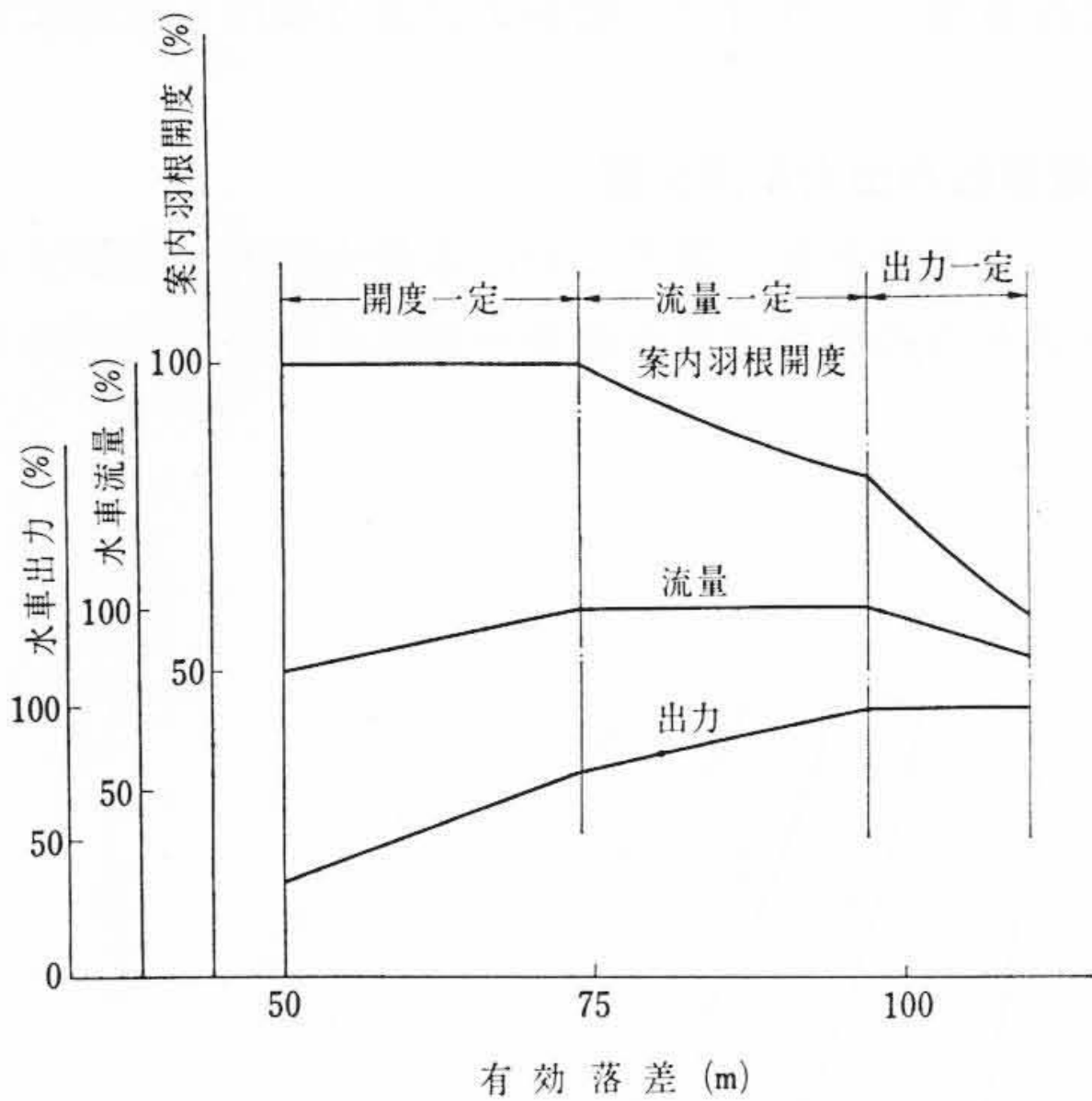
第8図 揚水量一定運転装置ブロック図



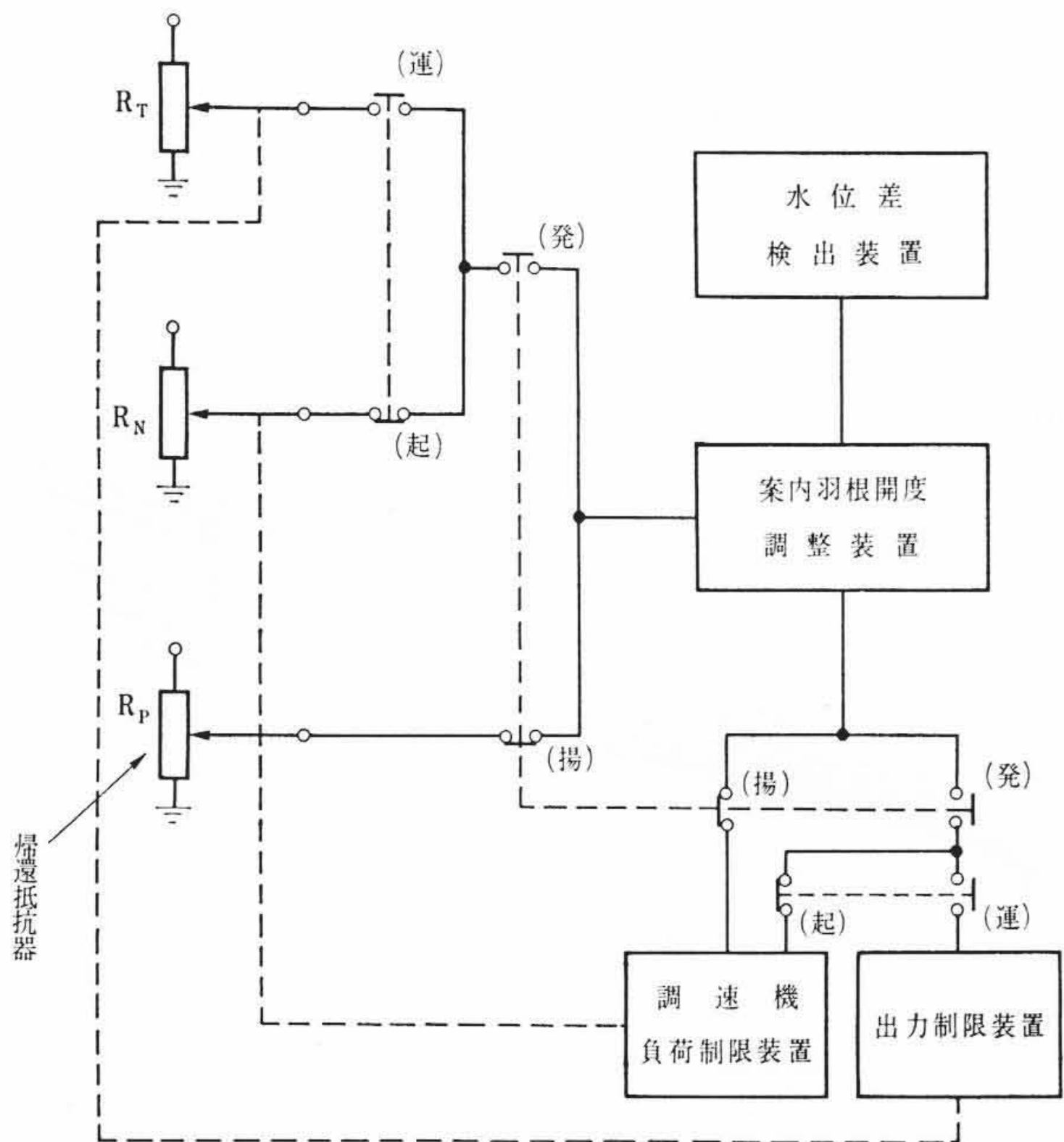
第6図 水位差応動案内羽根開度調整器組合せ特性例



第9図 水位差および揚水量整定装置ブロック図



第 10 図 水車出力制限特性例



第 11 図 水車出力制限装置ブロック図

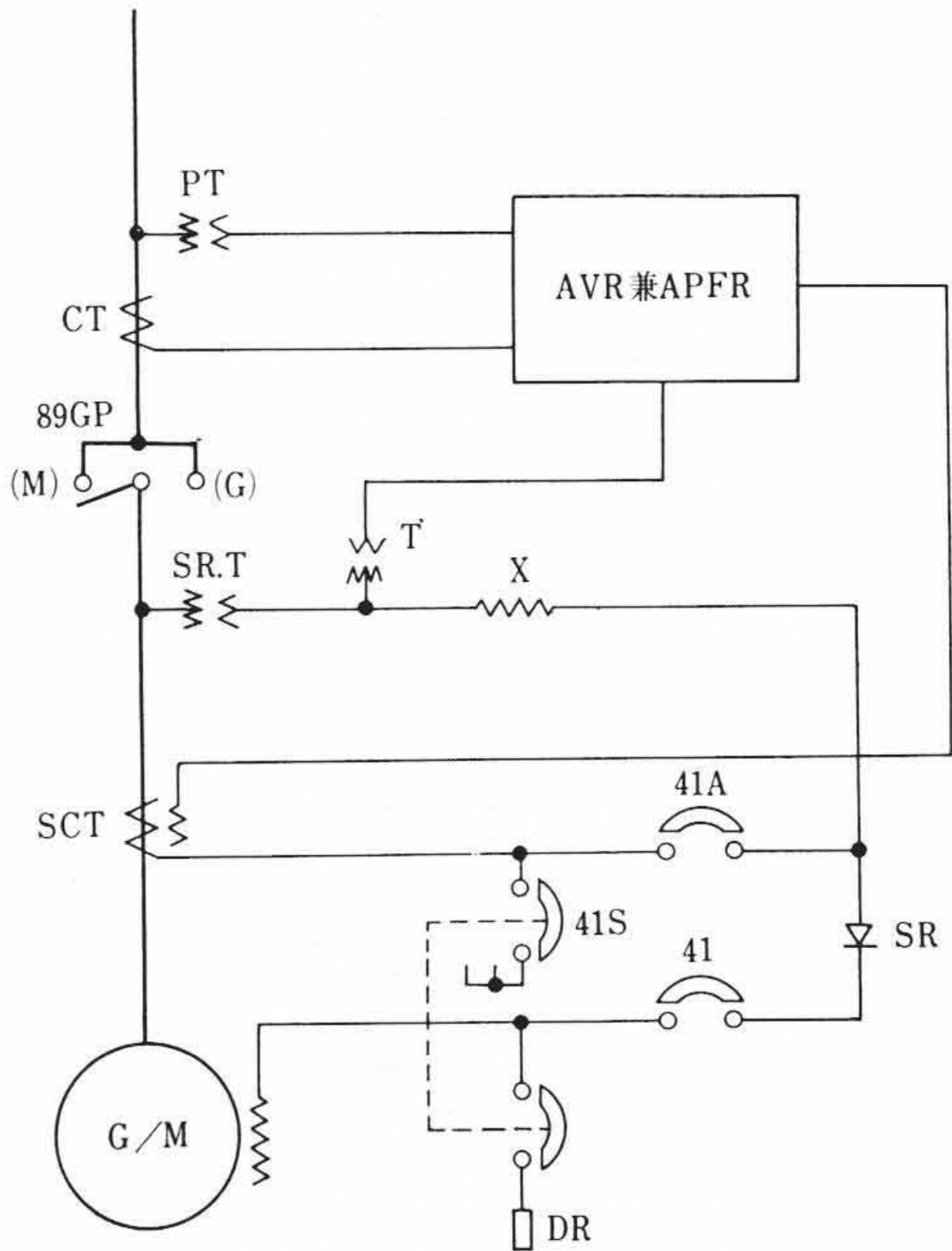
水車容量とポンプ容量は各種の条件から互いに関連して決められるが一般に落差が大きいときに案内羽根を全開すれば主機定格を超過することがあるので、落差に応じて出力制限を必要とすることがある。そのため上部または下部ダムの容量が小さく落差の変動速度が早いとき、とくに AFC 運転を行なうところでは出力を自動的に制限する必要がある。

第 10 図は出力制限特性の一例であるが、この運転制御は前に述べた水位差応動案内羽根調整装置を切換え使用することにより容易に実施できる。しかし運転操作の面から通常の调速機負荷制限装置とは別個の専用制限装置を設けることが良い。その原理図を第 11 図に示す。

4.4 励磁装置

発電電動機の励磁装置は電動機運転時に定力率制御とするための若干の器具が追加されるが、普通磁気増幅器形または HTD 形の高性能自動電圧調整器が用いられている。また水力発電所では速応性のすぐれた自励式励磁装置もかなり広く採用されているが、揚水発電所用としても起動時の問題などに種々の検討が加えられ、その結果なら問題なく十分にその機能を発揮しうることが確認された。

三尾発電所 (37,000 kVA/39,000 kW×1) は自励式励磁装置を採用



第 12 図 自励式励磁装置単線図

第 2 表 城山発電所データロガー測定項目一覧表

No.	測定項目	測定点数	警報
1	水位	2	○
2	140 kV 送電線電圧	2	
3	140 kV 送電線電流	2	
4	周波数	1	
5	主変圧器二次側電流	4	
6	発電電動機電圧	2	
7	発電電動機電流	4	
8	発電電動機界磁電流	4	
9	発電電動機電力 (発電)	4	
10	発電電動機無効電力 (発電)	4	
11	発電電動機電力量 (発電)	4	
12	発電電動機電力 (揚水)	4	
13	発電電動機無効電力 (揚水)	4	
14	発電電動機電力量 (揚水)	4	
15	所内電力	1	
16	所内電力量	1	
17	所内電圧	1	
18	所内電流	1	
19	気温	7	○
20	ポンプ水車案内羽根開度	4	
21	ポンプ水車流量 (発電)	4	
22	ポンプ水車流量 (揚水)	4	
23	主機圧油槽油圧	4	○
24	入口弁圧油槽油圧	4	○
25	発電電動機温度 (軸受)	16	○
26	発電電動機温度 (回転子)	4	○
27	発電電動機温度 (固定子)	12	○
28	発電電動機温度 (クーラ)	8	○
29	冷却水温度	2	○
30	主変圧器油温	12	○
31	所内変圧器油温	2	○
(計)		132	

した世界最大の揚水発電所で昭和 38 年 2 月から好調に運転中である。その励磁装置の単線図は第 12 図に示すとおりである。本発電所の揚水起動方式は半電圧起動、全電圧同期引き入れとしているが、起動突入電流に対してもなら問題なく、同期引き入れも円滑に行なわれていることが確認できた。

5. 配電盤

揚水発電所は発電—揚水と 2 種の運転を行なうため設備機器がある程度複雑化することは避けられないが、補機類はもちろんのこと



第13図 畑薙第一発電所主配電盤

主機の制御も極力自動化して操作の労を軽減している。大森川発電所では建設当初より遠方監視制御方式として完全無人化されており、近く穴内川発電所も同様無人化される予定で、少数の保守員で確実に経済的に運転できるものとしている。

主機台数が多いときには監視制御は縮小形の配電盤にまとめ保護継電器盤、記録計器盤などは別室に配置されることが多い。また故障表示器は小形ランプ式として監視机に組み込み、象形式の照光盤

を設けて自動運転の監視を容易なものとしている。畑薙第一発電所用主配電盤はその一例で第13図はその外観である。

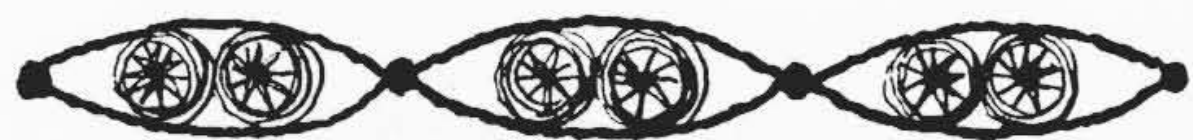
城山発電所ではさらに保守運転の便を図るためデータ処理装置を設けている。その処理項目は第2表に示すとおりである。城山発電所は地形の関係から地上配電盤室と地下主機室とは約200~400 mも離れているが、独特の直接式遠方制御方式を採用して操作ケーブルを大幅に減少している。またデータ処理装置でもデジタル式伝送回路の採用などによりケーブルの減少を図るとともにノイズ対策にも十分な考慮が払われている。

6. 結 言

以上いまや水力開発の主流を占めようとしているポンプ水車式揚水発電所の制御について、その実績と今後の問題点について述べた。最も重点となる起動方式には豊富な経験と研究成果をもとにさらに綿密なる研究努力を続けるとともに、今後の大容量化に備え同期電動機式など新しい方式にも積極的な検討を進めている。また技術の進歩による新機種の開発や広域経済運用の強化などにも力を注いでいる。

参 考 文 献

- (1) 特許出願中
- (2) 特許出願中
- (3) 奥田：昭38電気学会東京支部大会 259
- (4) E. P. Smoot, J. E. Jillma：G. E. Rev. Vol. 55 (1952)
- (5) 小松，松尾ほか：日立評論 46, 1364 (昭39-8)



特許第312952号

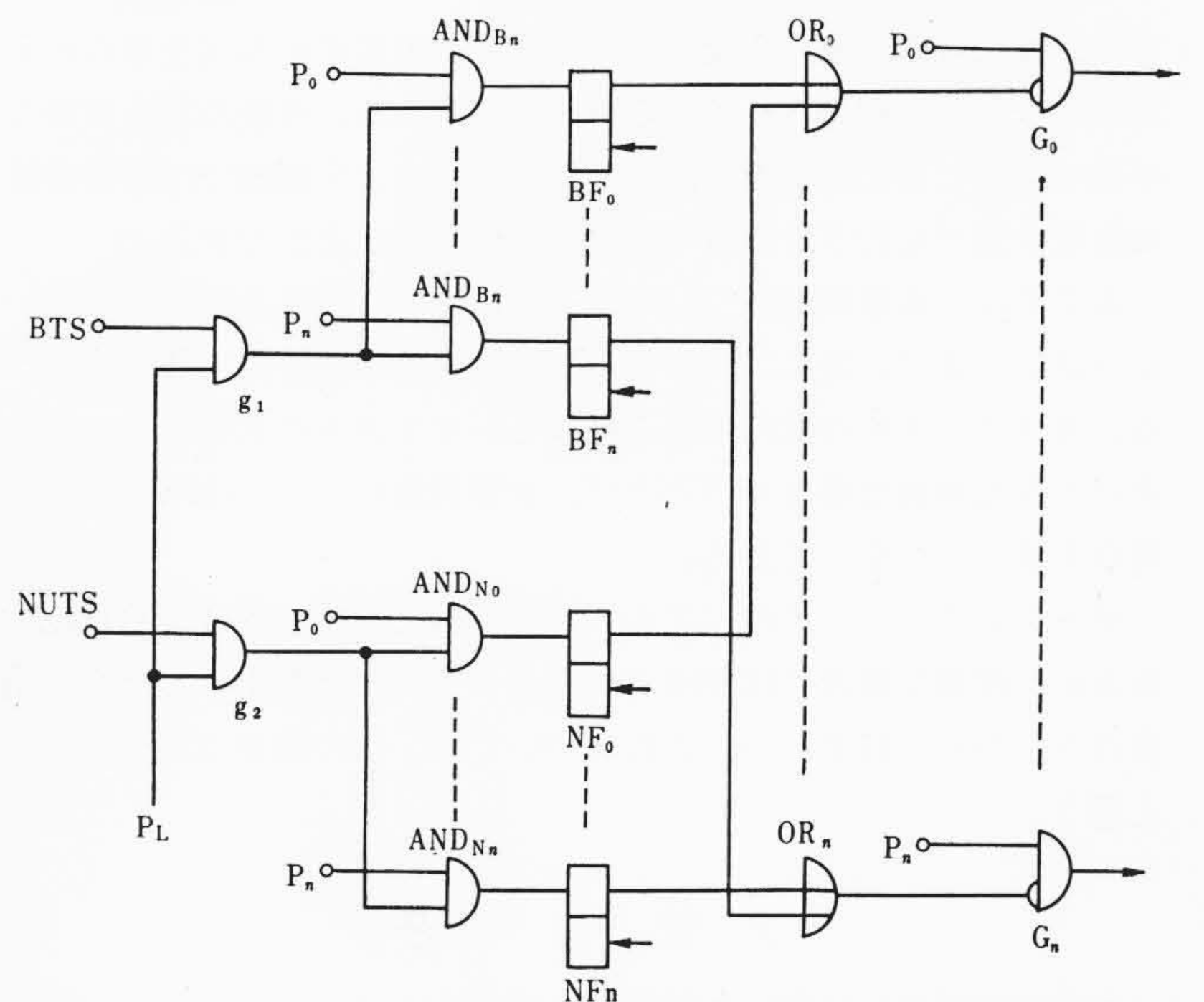
特 許 の 紹 介

中山 登・藤岡 旭
中野 浩行

時分割交換方式における発信加入者の閉塞方式

この発明は、時分割制御の交換機において発信加入者に話中音、空番号音を送出する場合、再びその加入者が発信接続を行なわないようにするため、その加入者を交換機接続回路から切りはなしてしまふ閉塞機構に関するものである。図示回路の端子 BTS, NUTS に話中音または空番号音の送出指令信号がくると、ゲート g_1 または g_2 が開き、発信加入者のパルス列と同相のパルス PL がゲート g_1 または g_2 に出力として現われる。このパルス列は制御回路内より送出されるもので制御回路が復旧すればなくなる。今端子 BTS に話中音送出指令信号がくると、搬送パルス $P_0 \cdots P_n$ の中には必ず一つ発信加入者のパルス列と同相があるから、この同相のパルス列はゲートを通してフリップフロップ $BF_0 \cdots BF_n$ の中対応するフリップフロップをトリカする。このフリップフロップを BF_0 とする。この出力はオアゲート OR_0 を通ってゲート G_0 に達する。ここまでの動作は端子 NUTS に信号が来た場合もまったく同じである。ゲート $G_0 \cdots G_n$ は各加入者回路に存在するもので、各加入者に対応するパルス列が通る。今ゲート G_0 に端子 BTS または NUTS によるインヒビット信号が加えられれば、その加入者の状態とは無関係に P_0 なるその加入者に対応するパルス列は、ゲート G_0 に到来しているけれどもゲート G_0 を通ることはできない。ゲート G_0 の出力で各加入者の変調器を制御すれば、インヒビット信号が加えられている状態では、その加入者のパルス列は共通伝送路には現われない。その加入者のパルス列が共通伝送路に現われなければ、当然制御回路には信号がなにもいかないから発信接続は行なわれず、その加入者は閉塞されたことになる。閉塞を解くのは加入者がオフ・フックした時ゲート $BF_0 \cdots BF_n$ またはフリップフロップ $NF_0 \cdots NF_n$ をリセットすることに

より行なう。このようにこの発明は簡単な構成で時分割制御の交換機における閉塞機能を実現することができる。(後藤)



時分割交換方式における発信加入者の閉塞方式