

# 可変速揚水発電システムの開発

## Development of Adjustable Speed Units for Pumped Storage Power Plants

電力系統での原子力発電の比率が増加するのに伴い、夜間電力の調整能力が不足しつつある。このため、揚水発電ユニットに、従来行なうことのなかった揚水運転時の電力調整能力をもたすことが要望されている。この目的達成のため、運転中に回転速度を変えることのできる新しい可変速揚水発電システムを開発してきた。

本システムは大容量であることのほか、系統に流出入する電力を重視する必要性から、従来から一般産業界で行なわれている交流可変速システムとは異なる新しい技術の開発が必要となる。

系統の特性条件にも追従し、かつ高信頼性のシステムとするため、各種デジタル解析及びモデルシステムによる検証試験を行ない、実用化の見通しを得た。現在、次期大容量揚水発電所に適用するための前段階として、22MVA実証機を製作中である。

杉本 修\* Osamu Sugimoto  
 齊藤啓自\*\* Keiji Saitō  
 溝口 強\*\*\* Tsutomu Mizoguchi

### 1 緒 言

電力需給では需要(負荷)と供給(発電)が同時に行なわれており、常に双方のバランスが必要である。したがって、供給側では負荷に見合った発電を行なうため、常にきめ細かな発電量の調整を行なっている。一方、原子力発電所の比率の増大に伴い、夜間での所要発電量のほとんどを原子力でまかなえる状態となりつつある。すなわち、夜間は原子力のほかわずかな火力・水力と揚水だけが運転される状態となる。このような状況下での夜間の電力調整には、電力(負荷)調整能力をもった揚水発電システムの開発が必要で、関西電力株式会社と日立製作所は共同して開発を推進してきた。

本論文では、揚水運転時の電力調整が、可変速化で対応できること、及び可変速の実現手法としては、回転子側交流励磁方式が適していることを示す。また、回転子側交流励磁方式につき、その原理・構成の概要を紹介し、従来の揚水機にはない新しい機能について述べる。これら新しい機能とポンプ水車の制御とを組み合わせ、一般産業界でのファン、ポンプの可変速化とは異なる揚水発電プラントとしての運用方法、及び制御方法についてその概要を述べる。

可変速揚水発電システムの開発に当たって、各種デジタルシミュレーション並びにモデル機を使用しての検証などのシステム開発、及び大容量化に伴う各機器の開発を進めてきた。現在、実系統へ接続して実用性能の検証、信頼性確認を行なうための実証プラントとして、関西電力株式会社成出発電所1号機17.5MW実証機を鋭意製作中であり、完成すれば世界で初めての可変速発電システムとなる。

### 2 揚水運転時の周波数制御<sup>1)</sup>

#### 2.1 発電量の調整

電力需給では負荷と発電が同一量でなければならないが、電力系統の負荷は常に変動しているため、発電量をそれに合わせる必要がある。負荷と発電のアンバランス量は、系統の周波数変動として現われるため、系統の周波数を見ながら発電量を調整して、系統周波数を一定に保つ制御を行なう必要がある。これらの制御は変動の周期により呼び方を変えてい

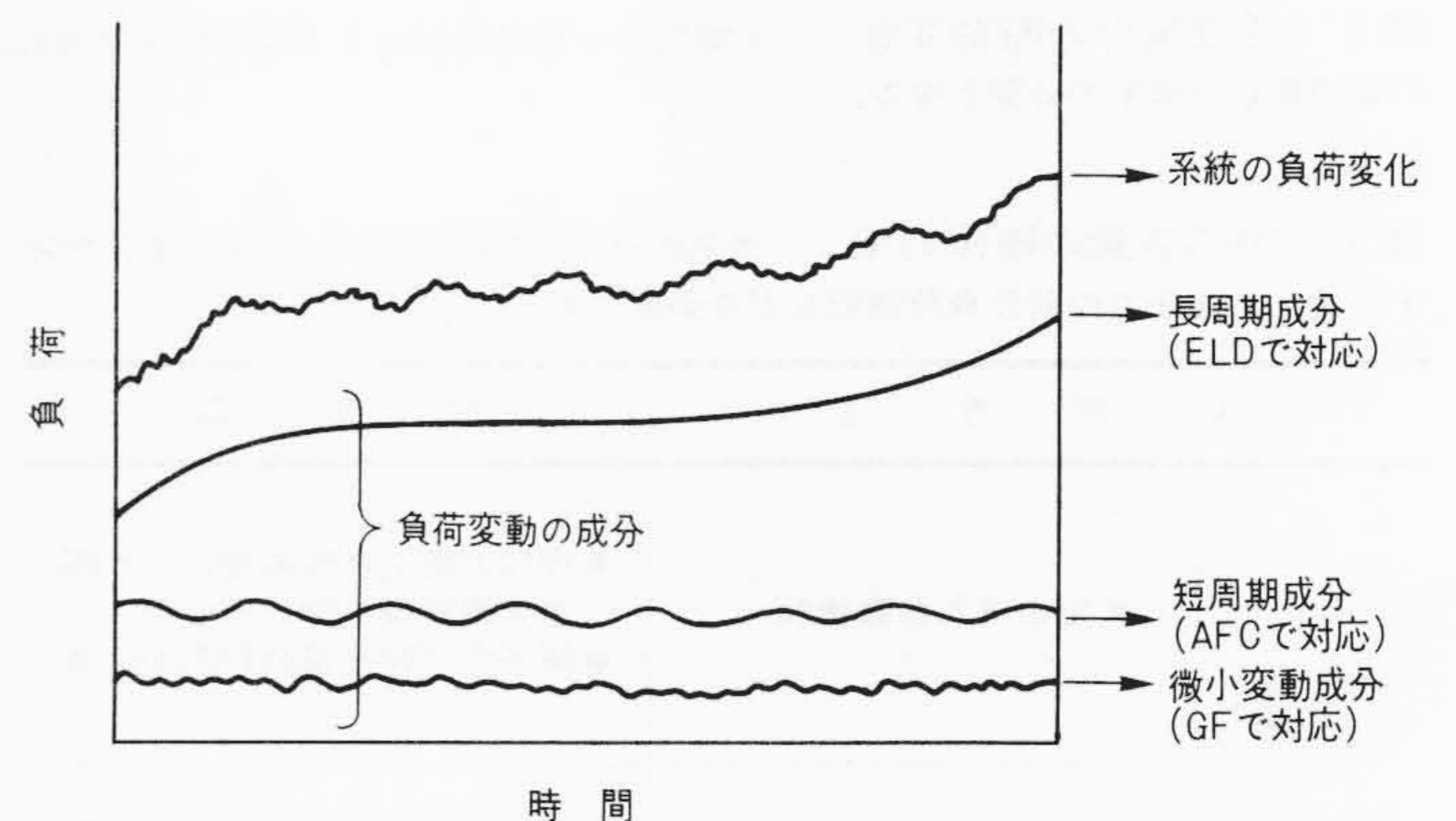


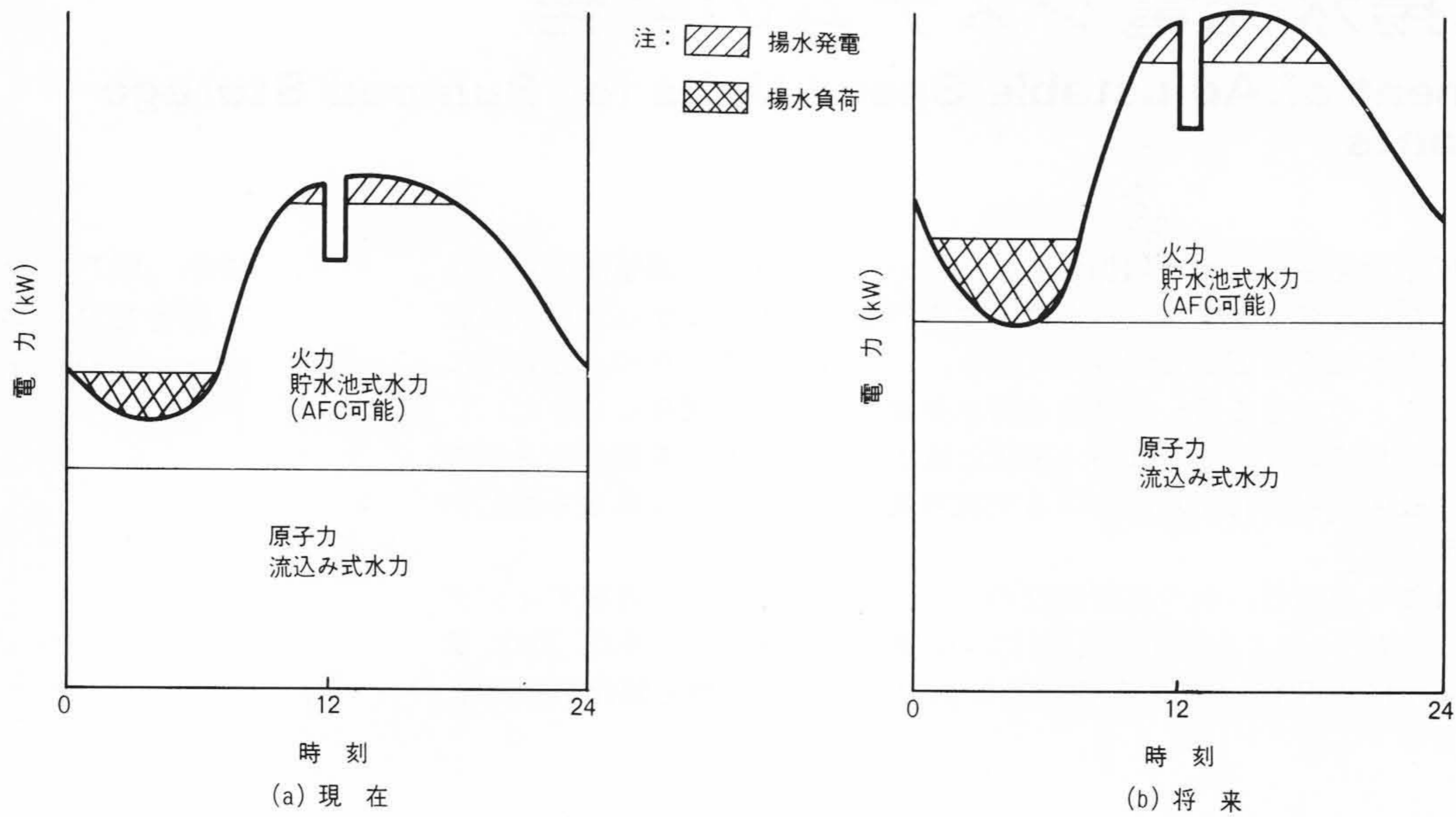
図1 負荷変動の周期成分 系統の負荷変動は、3種類の周期成分に分けられる。

る。負荷の変化の例を図1に示す。このうち長周期成分に対応する制御をELD(Economic Load Dispatching control: 経済負荷配分制御)、短周期(数分程度)成分に対応する制御をAFC(Automatic Frequency Control: 自動周波数制御)と呼び、更に短周期の微小変動成分に対応する制御をGF(ガバナフリー)と呼んでいる。ELD及びAFCは中央で統括された指令で制御されるのに対し、GFは調速機により各発電機単位で行なわれている。AFCによる発電量の調整範囲(以下、AFC容量と言う)は、系統内の発電電力に対して数パーセント程度であるが、系統周波数を維持するためにこのAFC容量を常に確保しておく必要がある。

現在、AFC容量は、昼間では、火力及び水力発電で、またDSS火力(Daily Start and Stop: 深夜起動停止火力発電所)機が停止する夜間では、残りの火力でそれぞれ確保している。しかし、近い将来、原子力発電の比率増大とそれに伴うDSS火力の増加により、夜間のAFC容量が不足することが予想される。これらの状況を図2に示す。すなわち、夜間は出力が一定である原子力と出力を調整できない流込み式水力との合計が、需要から決まる所要電力より大きくなり、負の発電で

\* 関西電力株式会社 \*\* 日立製作所日立工場 \*\*\* 日立製作所大みか工場





注：略語説明 AFC(Automatic Frequency Control：自動周波数制御)

図2 発電電力の時刻変化 発電電力一定の運転をする原子力発電の比率の増大に伴い、夜間でのAFC運転可能容量の比率が低下する。将来AFC容量確保のため新しい対策が必要となる。

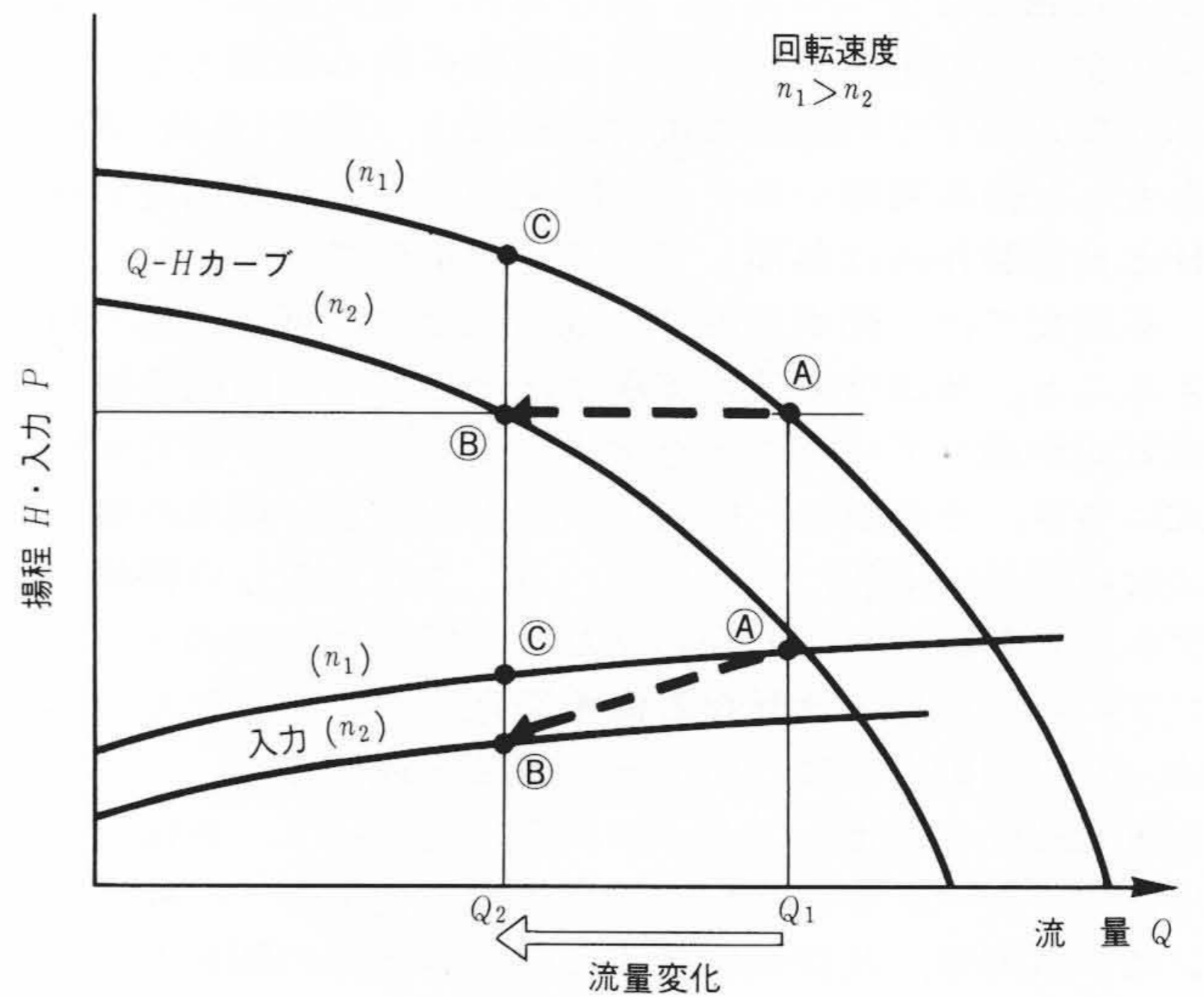
表1 AFC容量の確保対策 従来技術による対応では、揚水発電プラントの増加、原子力の部分負荷運転などを必要とする。

対策方法		問題点
従来技術	火力の併入台数増加	<ul style="list-style-type: none"> <li>●夜間の電力供給増加により揚水発電設備の増加が必要</li> <li>●原子力の発電量の抑制が必要</li> </ul>
	水力の夜間運転への移行	●上記のほか昼間ピーク負荷時の発電能力が不足
新技術	揚水時のAFC運転	●新しい技術開発が必要

ある揚水発電所の揚水運転で吸収しなければならないことが予想される。現状の揚水運転は、後述するように負荷調整ができないが、このような状態でAFC容量を確保するためには、表1に示すような対策が考えられる。しかし、従来技術の範囲で対策を行なうとすれば設備の増加が必要であり、得策とは言えない。したがって、揚水時にもAFC運転可能な技術が開発されれば、大きなメリットとなる。

### 2.2 揚水運転におけるAFC

現在の揚水発電所では、ポンプ水車は一定回転速度で運転される。揚水発電プラント用として広く使用されているフランシス形ポンプ水車のような固定翼ポンプ水車の特性を考えた場合、外部条件(上池と下池との水位差)で必要揚程が決まると、適正な案内羽根開度が決まり、ポンプ水車の必要動力が決定される。発電運転と異なり案内羽根開度を変えても、効率が大幅に低下するだけで、ポンプ水車の必要動力、すなわち必要電力はあまり変化しない\*)。一方、回転速度を変化させた場合、揚水運転時の特性、すなわちQ-H曲線が移動し、効率の変化をほとんど来さずに入力を変化させることができる。従来のように一定速度の場合と、回転速度を変化させた場合の比較を図3に示す。流体が閉ループ内で循環している



①：従来方式の通常運転ポイント  
 ②：回転速度を $n_1 \rightarrow n_2$ に変化させたときの運転ポイント  
 ③：案内羽根開度を絞ったときの運転ポイント(③-②の揚程差は、案内羽根部分で発生)

図3 ポンプ水車の揚水時の特性及び必要入力の変化 揚水発電所では揚程がほぼ一定であるため、回転速度を変えると流量が大幅に変化する。案内羽根開度だけでも流量を変化させることは可能であるが、入力はあまり変化せず、効率が大幅に低下する。

※) デリヤ形ポンプ水車のような可動翼のタイプであれば、一定回転速度であっても揚水運転時の必要動力を変化させることが可能である。ただし、構造上の制約から比較的小容量低揚程の地点にしか適用できず、揚水発電プラント用としてあまり適用されていない。また翼角度調整の速度が遅く、AFC用としては不向きである。



場合、回転速度を  $n$  とすれば一般に流量  $\propto n$ 、揚程  $\propto n^2$ 、必要動力  $\propto n^3$  となる。揚水発電所での揚水運転の場合は、揚程がほぼ一定であるため、流量  $\propto n^3$ 、必要動力  $\propto n^3$  となる。

以上のように、従来の一定速度のシステムでは、揚水運転時の負荷調整が実用上不可能であるため、揚水AFCは行なわれなかった。一方、回転速度を変化、すなわち可変速とすれば小さな回転速度の変化で大きな負荷調整が可能となり、大きなAFC容量を確保できるため、揚水運転時のAFCが可能となる。

一方、発電運転時でも回転速度を変化させることにより、水車運用の改善が図られる。主な利点を挙げると、

- (1) 上池、下池水面の位置変動(落差変動)が大きい場合、変動に応じて回転速度を変えることにより、高効率運転が可能となる。
- (2) 低流量・低出力時、回転速度を下げることにより、キャビテーション、振動などの発生要因を抑制する効果があり、より低流量・低出力の運転が可能となる。

今まで述べてきたように可変速化により、揚水運転時のAFCが可能となるとともに、発電運転時の性能向上にも役立つ。

### 3 可変速揚水発電システムの概要<sup>1),2)</sup>

交流機での可変速システムには従来から種々の方式がある。最近のパワーエレクトロニクスの発達により、新しい方式の開発及び大容量化が急速に進んでいる。揚水発電システムに適用するに当たっては、下記のような点を考慮しなければならない。

- (1) 数十万キロワットクラスの大容量であり、信頼性の高いシステムであること。
- (2) システムの安定性に悪影響を与えないこと。更に、システムの安定性に寄与できること。
- (3) 発電システムとして、各種運用上の対応が可能なシステムであること。
- (4) 高効率・低コストなシステムであること。

可変速システムの種類を大別すると、電源側(発電機固定子側)制御方式と二次側(発電機回転子側)制御方式がある。前者では従来の同期発電電動機が使える反面、発電電動機と同等以上の容量をもった周波数変換装置が必要である。一方、後者の場合、回転子側が交流となるため、従来構造の発電電動機は使用できないが、周波数変換装置の容量を小さくできる。特に2.2節でも述べたように、速度調整可能な運転範囲が小さくてよいため、固定子側制御方式と比較して大幅に小容量化が可能である。変換装置の小容量化は、低コスト化のほか、高調波量の低減、低損失化にもつながる。また、力率改善用コンデンサなしにシステムとして無効電力を遅れ力率(発電状態で)方向へ連続的に制御することも可能である。以上の事柄から、力率制御可能な回転子側交流励磁方式(以下、交流励磁と略す。)による可変速揚水発電システムの開発を推進している。

#### 3.1 交流励磁方式の構成及び原理

交流励磁方式可変速機の構成を、従来同期機の構成と対比させて図4に示す。従来の同期機と大きく異なる点は、下記のとおりである。

- (1) 回転子を円筒形とし、巻線を三相分布巻線とする。
- (2) 励磁装置としてサイクロコンバータを使用した周波数変換装置(60ヘルツ→数ヘルツへ直接変換)を用い、交流励磁とする。

この三相巻線にサイクロコンバータ(以下、CYCと略す。)から  $f_E$  (Hz) の励磁電流を通じた場合、回転子上には、

$$n_E = 2 f_E \cdot 60 / P \text{ (rpm)} \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $P$  : 磁極数

で示される速度で回転する磁界が発生する。 $n_E$  は回転子上から見た磁界の動きであり、固定子から磁界の動きを見た場合はこれに回転子自体の動きが加わる。いま、回転子の機械的回転速度を  $n_M$  とすると、固定子から見た磁界の回転速度  $n_S$  は、

$$n_S = n_M + n_E \text{ すなわち、} \\ n_M = n_S - n_E \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $n_S$  はシステムの周波数により決まる回転速度

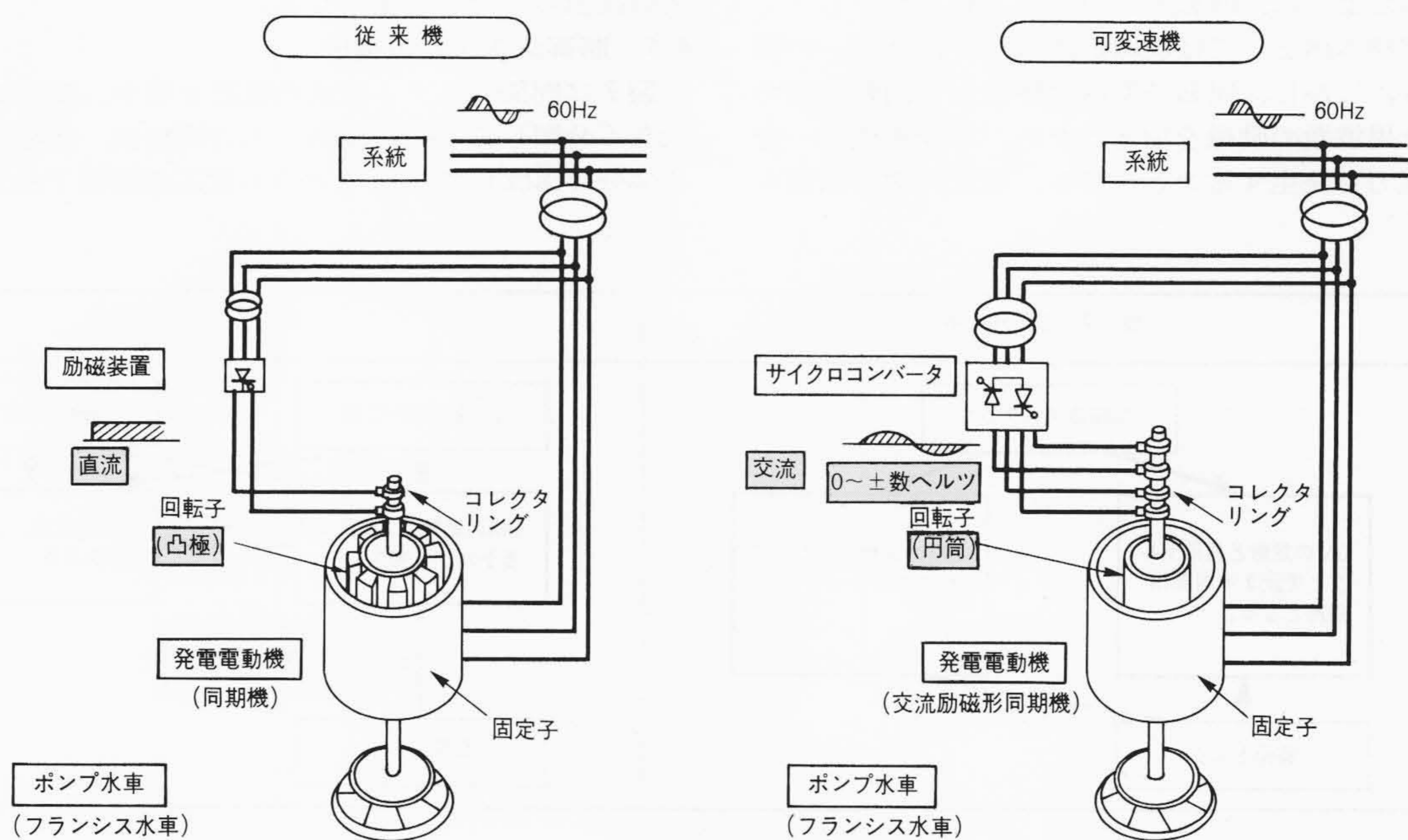


図4 交流励磁方式可変速揚水発電システムの構成図 従来の直流励磁に対して、サイクロコンバータを使用して低周波の交流で励磁する。発電電動機の回転子は従来の凸極に対して円筒形である。



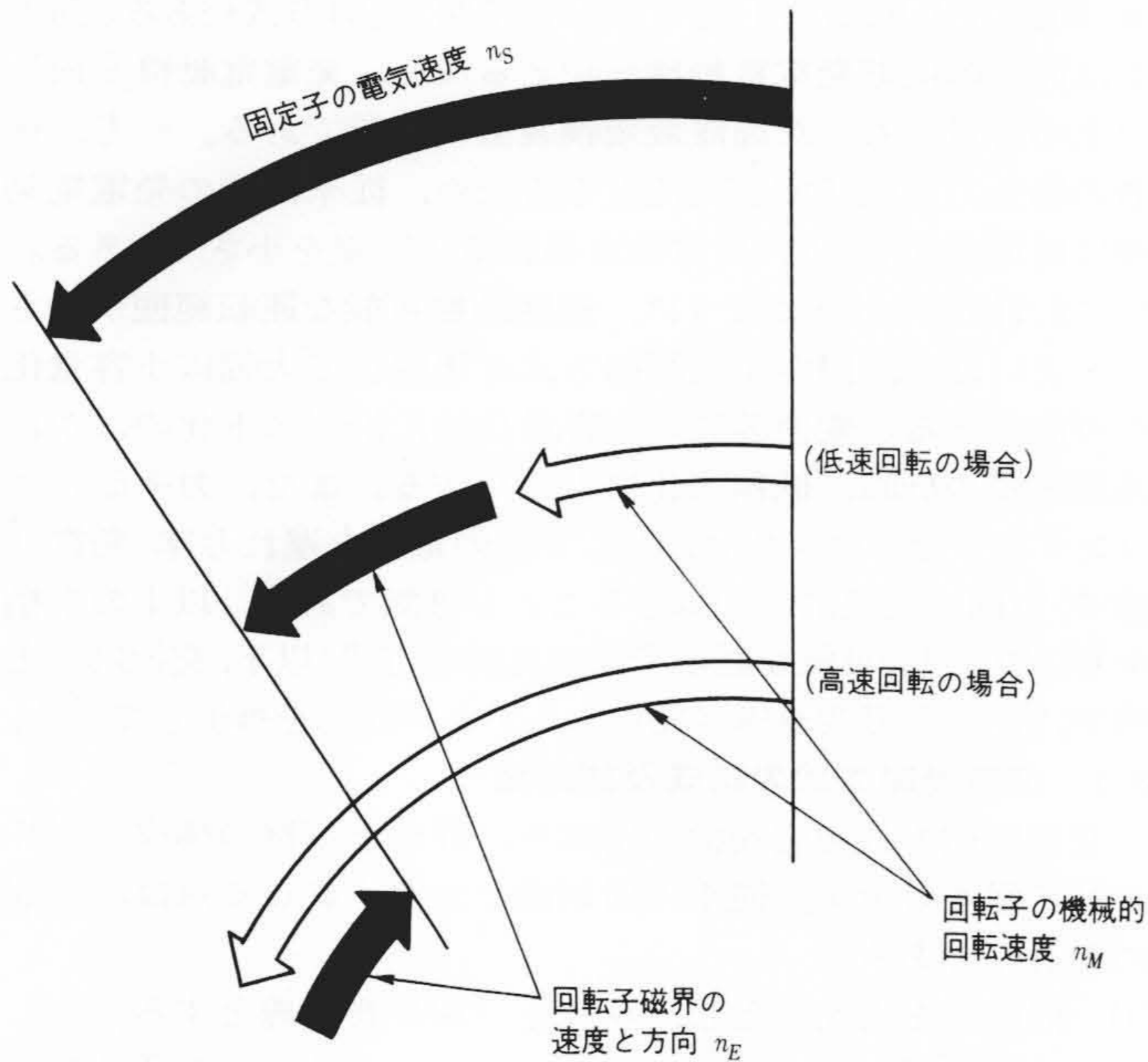


図5 回転子の回転速度と固定子の電気速度の関係 回転子の磁界の速度を変えることにより、回転子の機械的回転速度が変わっても固定子の電気速度を一定に保てる。

従来同期機は $n_E = 0$ であるため、 $n_M = n_S$ すなわち同期速度一定であるが、交流励磁方式では $n_E$ を変化させることができるため、その分 $n_M$ すなわち回転子の機械的回転速度を変化させることができる。この様子を示したのが図5である。 $n_S$ 、 $n_M$ 、 $n_E$ の大きさを矢印の長さで表わしており、 $n_E$ の大きさ及び方向により、 $n_M$ (機械的回転速度)が変化する様子を示す。このように、励磁を交流で行ない、その周波数を変えることにより同期機の可変速化が可能となる。

### 3.2 交流励磁方式の特徴

前節でも述べたように、回転子は円筒形三相巻線をもっているため、発電機本体としては巻線形誘導機とほぼ同一の構造となっている。しかし、回転子巻線に外部から回転速度の変化に対応した周波数の励磁を加えるため、可変速機は一定周波数の交流電力を発生することができ、現在の電力系統を

構成している従来の同期機と同じ機能をもっている。

また本システムは、出力特性の面でも励磁電流を基準とした場合に、従来の同期機と同様になる。すなわち、従来の同期機の実出力特性は、内部相差角で表わされるのに対し、本システムのそれは交流励磁電流の位相角で表わされる。このことから、交流励磁可変速機は同期機として扱うのが妥当である。もちろん励磁電流の大きさを変えることによって、無効電力(力率)を調整できる。

以上のように本システムは同期機と同様な特性をもつ一方で、従来の同期機の内部相差角に相当する励磁電流の位相角をCYCの電流制御により変えることができる。このことが従来同期機との大きな違いであり、かつ大きな特長でもある。この違いが、どのような現象として現われるかを示したのが図6である。揚水運転時を考えた場合、従来同期機ではポンプ水車の所要動力と発電電動機入力とが一致し、その変換エネルギー量と励磁の強さで一義的に決まる内部相差角を保ちながら、一定速度で回転する。一方、本システムでは、励磁電流の大きさと位相を調整することにより、ポンプ水車側動力と関係なく電気側の入力及び力率を調整できる。そのため、ポンプ水車側と電気側との入出力の差は、回転エネルギーとして貯蔵もしくは放出されながら、回転速度の変化として現われてくる。もちろん設定された可変速度制御範囲を越えることはできないため、最終的にはポンプ水車側動力と電気側入力とは一致させる必要がある。詳細は割愛するが、これらの制御は高速で行なうことができる。このことは、後述するデジタルシミュレーション及びモデル機での試験結果からも確認されている。

## 4 可変速システムの制御<sup>3)</sup>

3章で述べたように、可変速揚水発電システムではポンプ水車側の制御と電気側の制御が必要であり、機械側、電気側双方の運転状態が重要である。これらが一般産業界で主としてファン、ポンプに使用されている交流可変速システムの制御と異なる点であり、これを整理したものを表2に示す。したがって、制御思想も従来のシステムとは異なり、新しい制御技術の開発が必要となる。

### 4.1 制御システムの構成

図7に制御システム構成の概要を示す。制御システムは、大きく分類して電圧調整部、出力調整部、回転速度調整部の3部分で構成している。このうち電圧調整部と出力調整部は、

	従来凸極機	交流励磁機
制御対象	励磁電流の大きさ	励磁電流の位相、励磁電流の大きさ
現象	GMの定数と負荷トルクとで決まる内部相差角となる。 GMの定数により力率が決まる。	GMの定数により決まるトルクを発生。 GMの定数により力率が決まる。 回転速度の変化
外部条件	負荷トルク	負荷トルク

注：略語説明など GM(発電電動機)、負荷トルク(発電運転時は、水車が出す機械的トルク)

図6 従来機と交流励磁機との特性比較 従来機の運転状態は負荷トルクで決まるのに対して、交流励磁機では負荷トルクと無関係に運転状態を制御できる。



表2 揚水発電プラント用と一般産業用との制御思想比較 一般産業用では、制御目的は回転速度が主で電力は従であるのに対し、揚水発電プラント用では電力が主となる。

用途 項目	一般産業用 (ファン・ポンプ)	揚水発電プラント用
目的	●流量調整	●電力調整
制御対象	●電気系だけ	●電気系及びポンプ水車系
制御方法	●所定の回転速度にする。	●所定の電力にする。 ●電気系のパワーとポンプ水車系のパワーと協調をとる <sup>1)</sup>
慣性エネルギーの処理	●システムが必要とする電力をシステムから入・出力して、エネルギーを処理する。	●システムが必要とする電力となるよう、協調をとりながらエネルギーを処理する。

最終的にはCYCのサイリスタ位相角制御による励磁電流の制御となる。励磁電流の周波数及び位相制御の基準となる信号を、滑り検出器により系統周波数と回転速度の差として作りだす。この基準信号を元にして励磁電流の大きさ及び位相を制御して、固定子側の電圧及び系統電力を制御する。

回転速度調整部は调速機及び回転速度演算部から成り、所要電力及び落差(揚程)から最適速度及び案内羽根開度を設定

する。

#### 4.2 制御方式

3.2節にも述べたように、電気側入出力とポンプ水車側動力と両方制御できるため、これらをどのように制御するかは重要な問題となる。定常的には、電気側(入出力)とポンプ水車側の動力とを一致させる必要があり、回転速度も最適効率となる値(揚水時は必要な入力となる値)に設定する必要がある。しかし、回転速度を変化させる場合、慣性エネルギーが出入するため過度現象を生ずる。この点での制御方式を大別すると図8に示す方式が考えられる。

図8からも分かるように、方式(I)は回転速度を最終設定値に変化させてゆく方式である。発電運転時は、出力を増大させるために加速させると、慣性エネルギーのため電気出力がいったん減少することもある。揚水運転時は逆に、電気入力が増加したのち最終値となる。この方式は、一般産業界でのファン、ポンプなどに適用されている制御方式に近く、システムが必要とする出力への追随性が悪い。一方、方式(II)は出力(又は入力)を最終値に制御しようとするもので、本システムの特長を十分に生かした制御方式と言える。すなわち、システムが必要とする出力(又は入力)に励磁制御で高速に対応したあと、慣性エネルギーを利用しながら、回転速度を徐々に最適値に調整してゆく。

揚水発電所の運用としては、系統側から見た電力制御が主

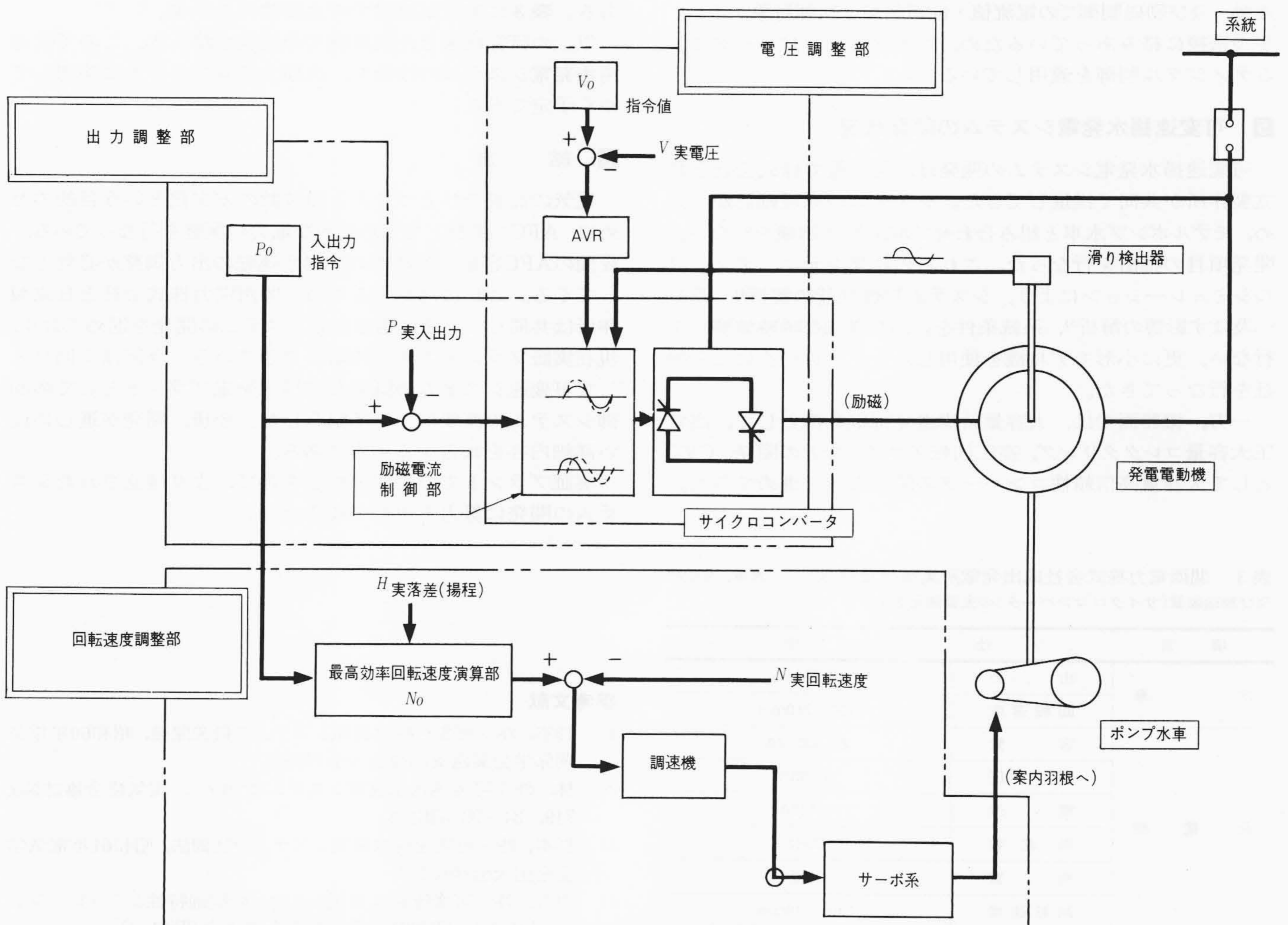


図7 制御系の構成 交流励磁可変速機を揚水発電プラントに適用した場合の制御系の構成を示す。従来のプラントと異なり、電気系とポンプ水車系との協調をとりながら制御を行なう。



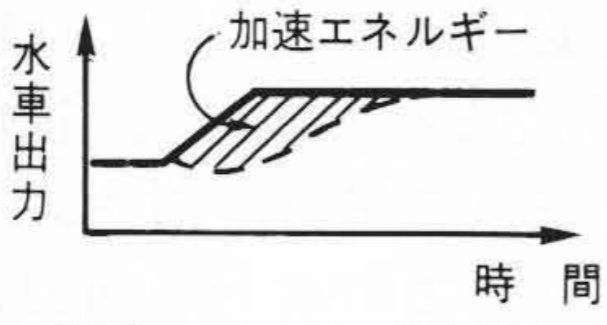

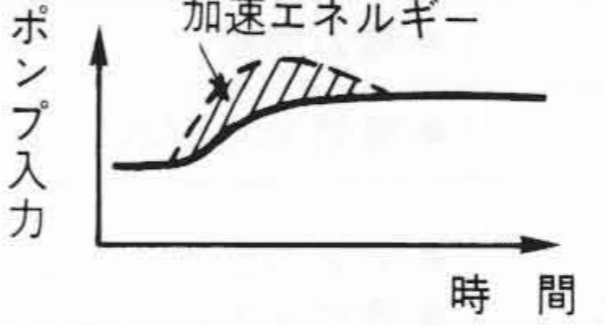
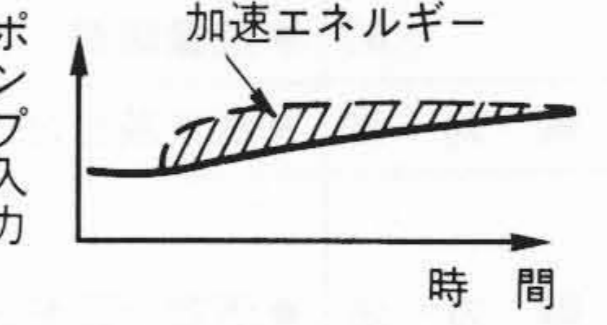
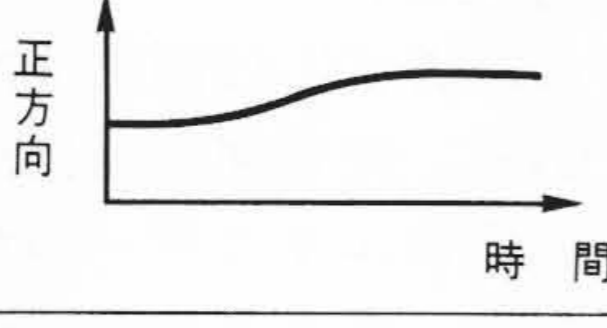
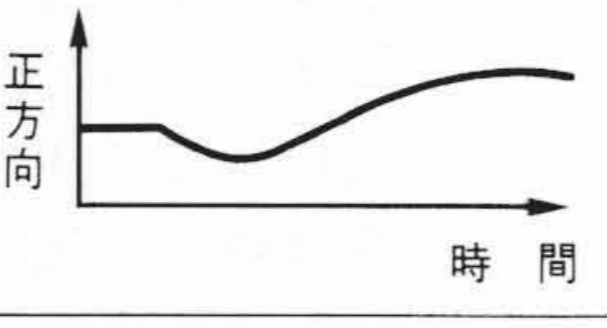
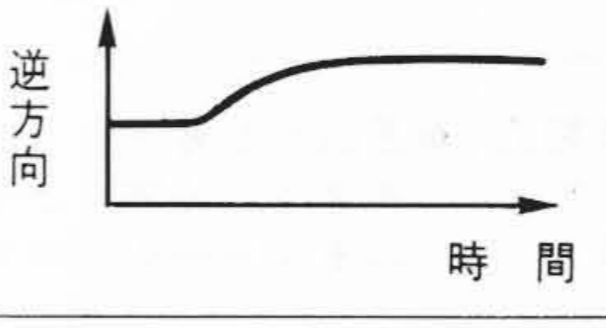
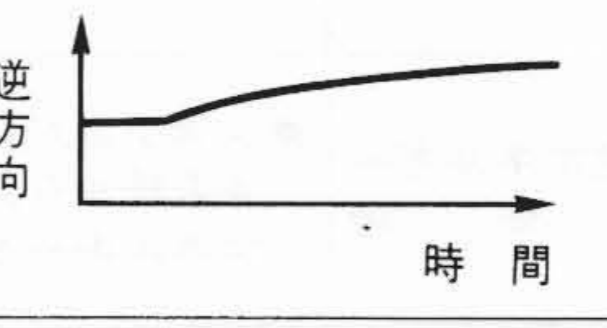
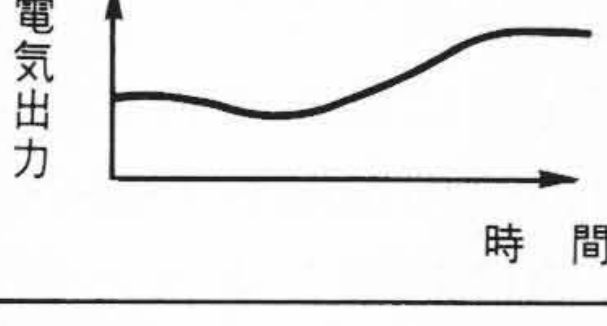
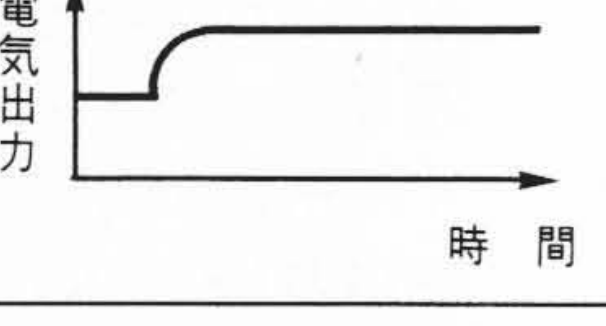
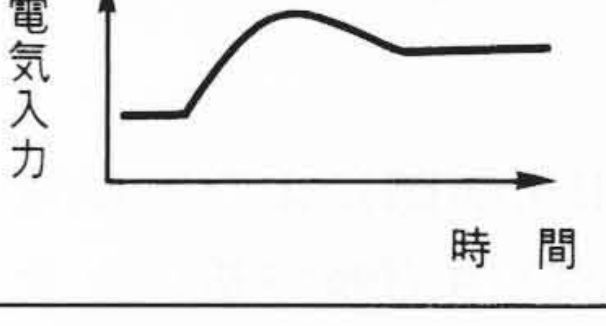
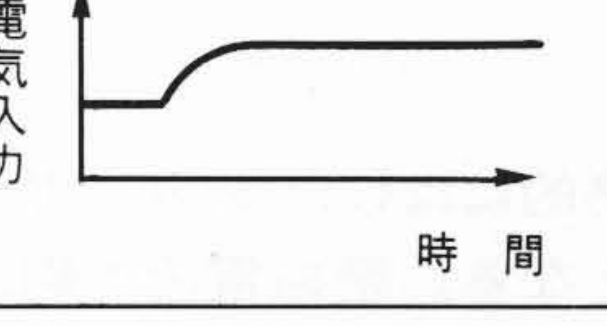
比較項目	発電時制御		揚水時制御	
	方式(I)	方式(II)	方式(I)	方式(II)
案内羽根制御	出力調整	速度(効率)調整	入力調整	効率調整
励磁制御	速度(効率)調整	出力調整	速度調整	入力調整
水車出力 (ポンプ入力)				
回転速度				
発電機出力 (電動機入力)				

図8 可変速制御方式の比較<sup>3)</sup> 電気系制御とポンプ水車系制御の協調のやり方の代表例を示す。方式(I)はポンプ水車の動力及び回転速度を主体とした制御方式であるのに対し、方式(II)は系統への電力を主体とした制御方式である。

であり、回転速度制御は従であるため、方式(II)の制御が適していると言える。

このように電気側励磁制御とポンプ水車側調速機制御との連動、及び励磁制御での電流値・位相制御と制御対象が多く、かつ密接に絡みあっているため、マイクロコンピュータによるデジタル制御を適用している。

**5 可変速揚水発電システムの開発状況<sup>1)</sup>**

可変速揚水発電システムの開発は、関西電力株式会社と日立製作所が共同で推進してきた。システムの原理確認から始め、モデルポンプ水車と組み合わせて理論検証試験を行ない、開発項目の抽出を行なった。これらの結果を元に、デジタルシミュレーションにより、システム制御性能の解析<sup>4)</sup>、系統へ及ぼす影響の解析<sup>5)</sup>、系統条件を含めた詳細な瞬時値解析を行ない、更に小形モデル機を使用したシミュレータによる検証を行なってきた。

一方、機器面では、大容量新構造発電電動機として、高電圧大容量コレクタリング、高圧回転子コイルなどの開発、CYCとして大容量高信頼性コンバータの開発などを進めてきた。

表3 関西電力株式会社成出発電所実証機仕様表<sup>2)</sup> 水車、発電機及び励磁装置(サイクロコンバータ)の主要諸元を示す。

項目	仕様	
水車	出力	18,500kW
	回転速度	190~210rpm
発電機	容量	22,000kVA
	電圧	11,000V
	電流	1,155A
	周波数	60Hz
	極数	36極
	回転速度	190~210rpm
励磁装置	容量	3,830kVA
	方式	サイクロコンバータ方式

最終的には、実系統での系統安定性、可変速制御の安定性及び信頼性確認のため、関西電力株式会社成出発電所1号機で、昭和62年から実証試験を行なうべく現在機器を製作中である。表3に実証試験機での主要諸元を示す。

以上の研究成果と、実証機での経験を踏まえ、この可変速揚水発電システムの技術を、次期大容量プラントに適用してゆく予定である。

**6 結 言**

電気の品質のひとつである周波数の安定化という目的のために、AFCを実施してきめ細かな電力の調整を行なっている。夜間のAFC容量確保のため、揚水運転の出力調整が必要となってくる。これに対処するため、関西電力株式会社と日立製作所は共同して可変速揚水発電システムの開発を進めており、現在実証プラントの建設段階まできている。今回は1回目として可変速システムの概要及び揚水発電プラントとしての制御システムの概要について紹介した。今後、開発が進むに従い詳細内容を報告する予定である。

実証プラントでの確認・検証を得て、より確立されたシステムの開発に努力を重ねてゆきたい。

**参考文献**

- 1) 杉本, 外: 可変速揚水発電システムの研究開発, 昭和60年電気関係学会関西支部連合大会(昭60)
- 2) 林, 外: 可変速揚水発電システムについて, 電気協会雑誌No. 749, 34~39(昭61-3)
- 3) 杉本, 外: 可変速揚水発電システムの制御法, 昭和61年電気学会全国大会(昭61-4)
- 4) 中川, 外: 可変速揚水発電システムの制御特性シミュレーション(その1), 昭和61年電気学会全国大会(昭61-4)
- 5) 谷口, 外: 可変速揚水発電システムの制御特性シミュレーション(その2), 昭和61年電気学会全国大会(昭61-4)