

# 水力発電設備の機器状態監視システム

## Monitoring System for Hydroelectric Power Station Equipment

水力発電所はほとんどが無人化され、遠方から集中制御されているため、運転員が機器の詳細な運転状態を把握するには困難な面がある。このため機器の運転状況を確実に把握し、安全な運転の確保を図る目的で機器状態監視システムを開発した。機器の異常を的確かつ迅速に発見するためには、刻々と変化する運転状態量に影響を与える諸因子を、過去のデータや運転シミュレーションから明らかにし、運転状態量を影響因子の関数として監視する必要がある。主機については運転状態の良否をよく表している軸受温度、固定子コイル温度をもとに、補機については圧油タンクの圧力、油面の影響因子をもとに、運転状態変化に対応して異常の兆候を初期段階で発見する運転状態監視法を開発した。

森口一夫\* Kazuo Moriguchi

吉田里美\*\* Satomi Yoshida

伊藤明男\*\*\* Akio Itô

### 1 緒言

水力発電所は、制御所から集中遠隔制御によって無人で運転されるため、遠隔地に駐在している運転員が機器の詳細な運転状況を把握することができず、機器の異常の兆候を初期段階で発見することは困難な面がある。また、機器の事故障害の発生を検知して、他の機器への被害の拡大を防止する保護装置が設けられているが、この保護装置が動作したときには機器はかなりの障害を受けており、その修復には多大の費用と期間を要する場合が多い。

一方、設備の保守は、定期的な巡視点検によって行われているが、運転状態データの取得に多くの時間を要しているばかりでなく、事故障害発生時の経過が不明なため適切な対応が困難であるなどの問題を持っている。

このため、機器の運転状態の把握や、異常の初期段階での検出、巡視点検の省力化が行える運転監視装置の開発が望まれている。この要望にこたえるため、水力発電機器の運転状態データを取得するとともに、運転状態のシミュレーションを行い、監視アルゴリズムの検討を行った。

### 2 運転監視装置の概要

運転監視装置の構成を図1に示す。装置は制御所に設置される親局と発電所側に設置される子局によって構成し、両者はモデムによって接続している。親局は複数台の子局を接続する能力を持っている。子局は発電機器に設置された温度、圧力、油面センサなどからのアナログ信号および継電器の接点信号を取り入れ、監視アルゴリズムに従って異常の発生を

監視するとともに、運転状態量の最高値、最低値、平均値などを記録する。親局は複数の子局を相手に各発電所の異常の有無、運転記録データをモデム通信回線を通してディスクに収録するとともに、CRT、プリンタによって遠隔地の発電所の運転状態を表示する。保守員はこれらのデータを参考にして、巡視点検の際の重点点検項目を想定することが可能になる。また、ディスク上のデータを編集表示することによって、経年変化などの情報が得られるため、従来ある一定期間ごとに行われていたオーバーホールなどの時期を機器の状態に即して伸長、短縮することが可能となる。そして信頼性を落とすことなく保守の省力化を行うことができる。

### 3 監視アルゴリズム

適切な監視アルゴリズムを作成するためには、運転状態量を左右する影響因子を明確にする必要がある。この影響因子を明確にするため、数箇所の子局で状態量を実測するとともに、状態量変化のシミュレーションを行った。監視対象として、主機の運転状態を最もよく現している主軸温度、発電機コイル温度および代表的な補機である圧油装置とした。

#### 3.1 軸受温度の監視アルゴリズム

##### (1) 軸受温度変化のシミュレーション

軸受温度の変化は、軸受ギャップの潤滑油のせん断抵抗によって発生する発熱量と、冷却器によって取り去られる冷却熱量によって定まる。軸受温度の変化は、以下の仮定によって動的解析を行うことができる。

\* 日立製作所 日立工場 \*\* 日立エンジニアリングサービス株式会社 \*\*\* 日立製作所 大みか工場

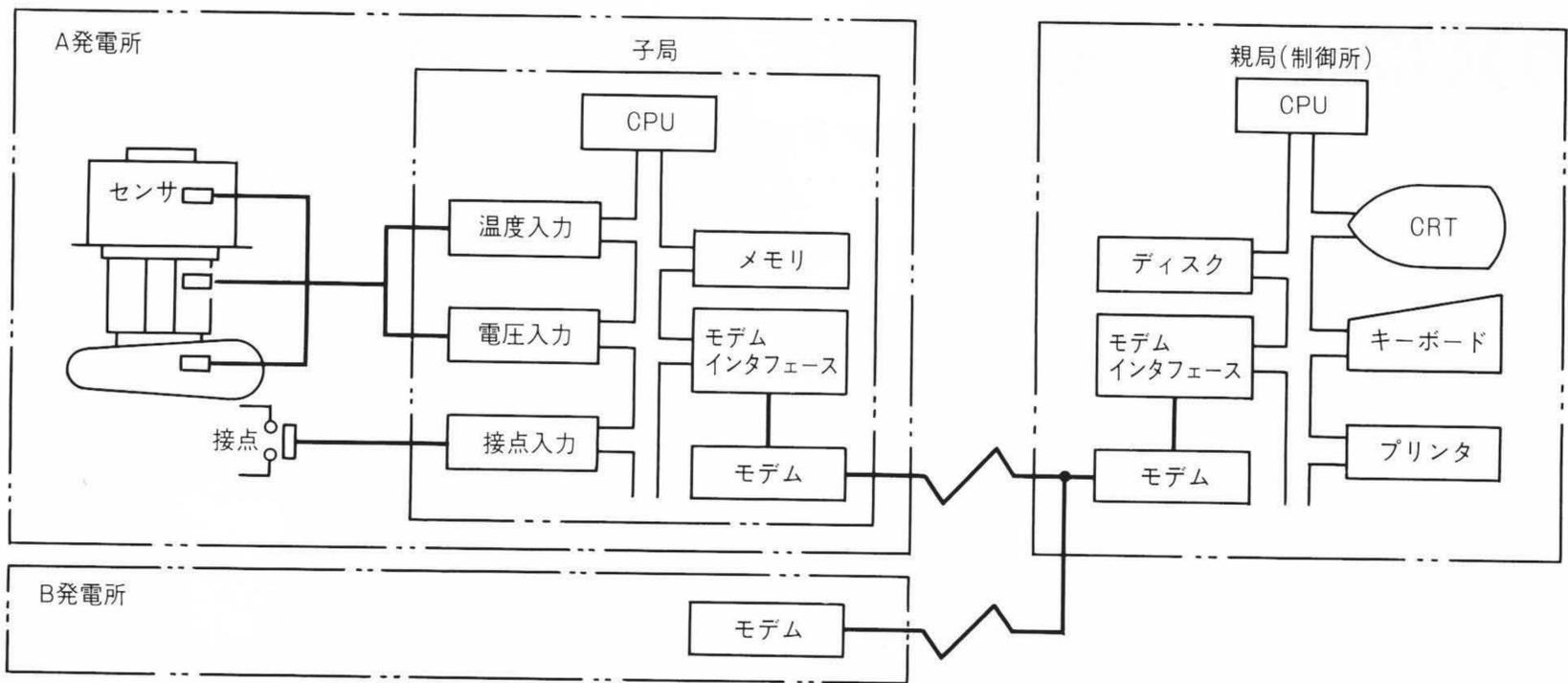
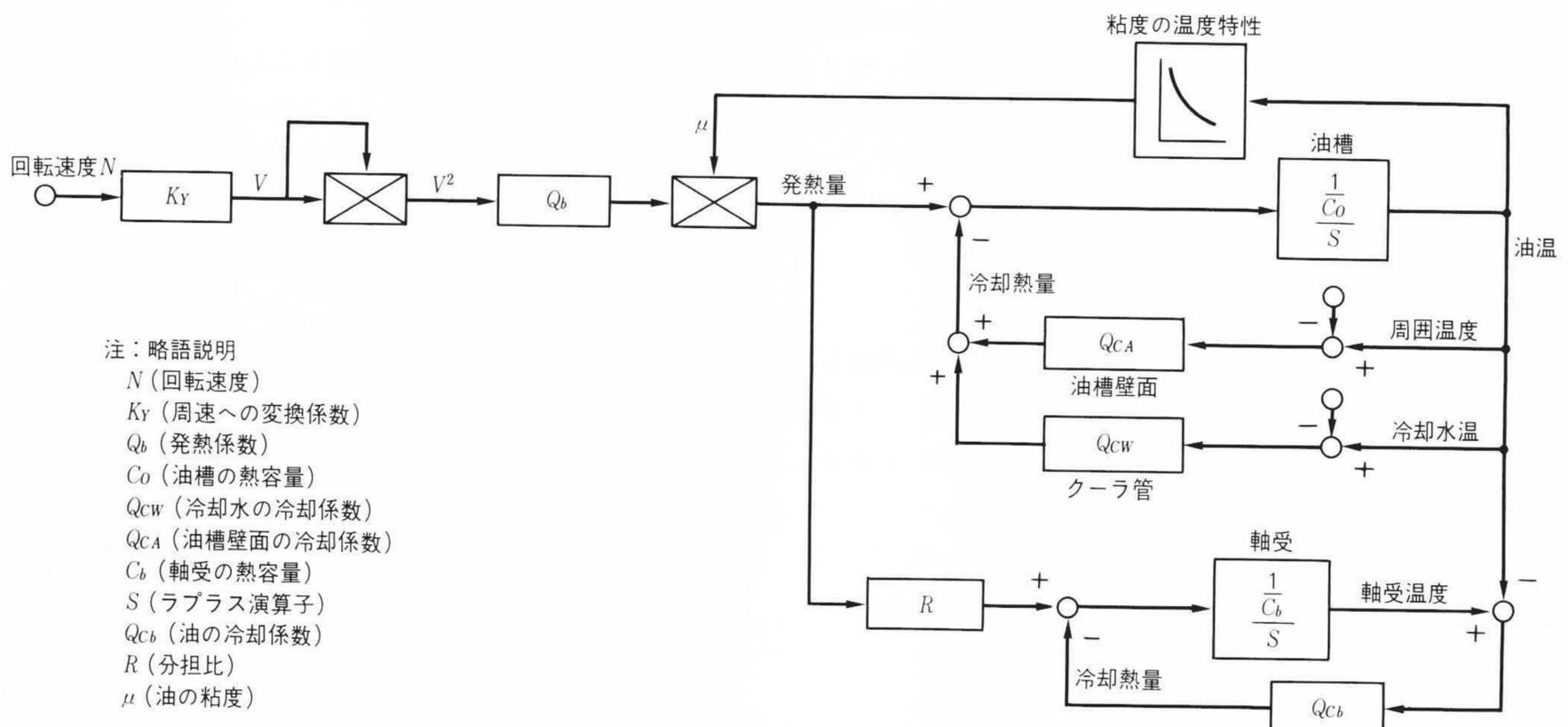


図1 運転監視装置の構成 運転監視装置は、発電所に設置される子局と制御所に設置される親局で構成し、両者はモデムで通信を行う。

- (a) 軸受の発生熱量は、軸受の形状によって定まる発熱係数 $Q_b$ 、ジャーナル周速 $V$ の二乗 $V^2$ 、潤滑油粘度 $\mu$ によって定まる。この潤滑油粘度 $\mu$ は温度によって大幅に変化する。
- (b) この発熱量の大部分は潤滑油内に伝達され、クーラ管および油槽壁面による冷却熱量との差が潤滑油温度を上昇させ、その積分定数は $1/C_o$ ( $C_o$ :油量と比熱によって定まる潤滑油の熱容量)とする。
- (c) クーラ管による冷却熱量は油温と冷却水温の差に比例し、油槽壁面による冷却熱量は油温と周囲温度の差に比例する。

- (d) 軸受パッドには発熱量の一部が伝達され、潤滑油による冷却熱量との差が軸受パッド温度を上昇させ、その積分定数は $1/C_b$ ( $C_b$ :軸受重量と比熱によって定まる軸受パッド熱容量)とする。
- (e) 潤滑油による軸受の冷却熱量は、軸受温度と潤滑油温度の差に比例する。

以上の仮定から、軸受温度変化シミュレーションに用いたブロック図を図2に示すが、発熱量変化に対する油温軸受温度の変化、冷却水温、周囲温度変化に対する油温、軸受温度の変化は、いずれも一次遅れ関数となっている。



注：略語説明  
 $N$  (回転速度)  
 $K_Y$  (周速への変換係数)  
 $Q_b$  (発熱係数)  
 $C_o$  (油槽の熱容量)  
 $Q_{CW}$  (冷却水の冷却係数)  
 $Q_{CA}$  (油槽壁面の冷却係数)  
 $C_b$  (軸受の熱容量)  
 $S$  (ラプラス演算子)  
 $Q_{Cb}$  (油の冷却係数)  
 $R$  (分担比)  
 $\mu$  (油の粘度)

図2 軸受温度変化のブロック図 軸受温度は発熱量と冷却熱量によって定まり、軸受温度、油温は冷却水温、周囲温度の一次遅れ関数となる。

(2) 軸受温度の変化例と監視法

水車発電機の軸受は、冷却方式から水冷式と空冷式に大別される。地下式発電所で室温および冷却水温がほぼ一定の場合の水冷式軸受の起動から停止までの軸受温度の変化の実測例を図3に示す。起動後、軸受温度は一次遅れ関数で上昇後、一定値となる。冷却水温の季節変化に対しては、図4に示すように安定後の温度は冷却水温の一次関数となるが、計算値に対して実測値は多少のばらつきを持っている。これは周囲温度の変化や軸受荷重の変化などの影響によるものと考えられることができる。したがって、安定後の軸受温度は冷却水温をパラメータとして、ばらつきを考慮して図4に示すような警報レベルを設定して監視することにより、事故障害の初期段

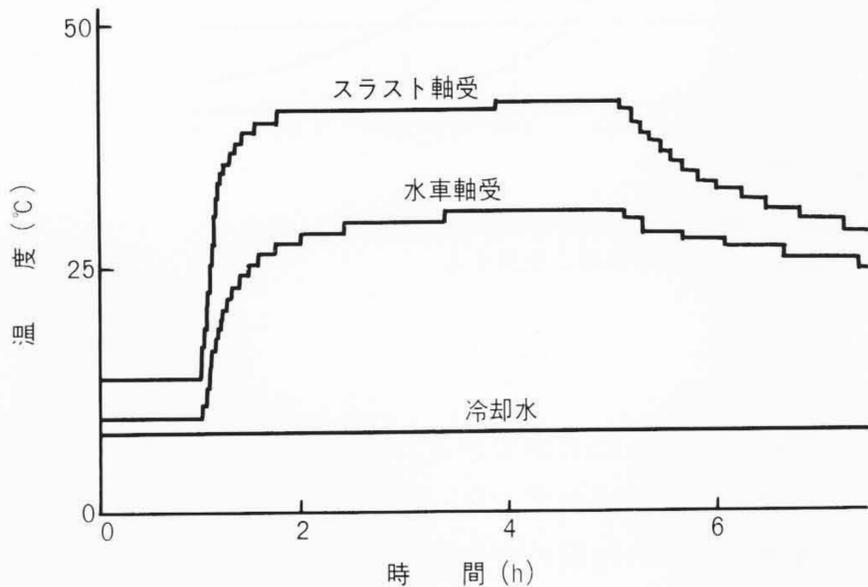


図3 起動・停止時の水冷軸受温度変化例 起動時には一次遅れ関数で温度は上昇し、安定後は冷却水温が一定値なので一定温度となる。

階で異常を検出することができる。

起動時の軸受温度の上昇率は発熱量に比例するが、潤滑油の粘度が温度によって大幅に変化するため、発熱量は潤滑油の温度によって大幅な変化を生じ、起動時の温度上昇率は図5に示すように起動直前の潤滑油温度によって変化する。

したがって、起動時の温度上昇率は、起動直前の潤滑油温度をパラメータとして、図5に示すような警報レベルを設定して監視することができる。

一方、停止時には油膜の生成が不安定となり、軸受の軽微な異常に対しても回転速度が低下しているにもかかわらず軸受温度が上昇するため、停止時に温度変化率が常に $\ominus$ (マイナス)であることを監視することによって、軸受異常の早期発見が可能となる。軸受温度が安定後、すなわち軸受発熱量と冷却熱量が一致している場合には、回転速度が低下し始め、発熱量が減少すると直ちに軸受温度は低下する。ところが、図6に示すように、起動後で軸受温度が上昇中、すなわち発熱量のほうが冷却熱量よりも大きい場合に停止させた場合には、回転速度が低下しているにもかかわらず軸受温度はある期間上昇してその後低下し、その温度上昇期間は温度上昇率が大きければ長く、小さければ短い。これは回転速度が低下しA点で発熱量と冷却熱量が一致するまで温度上昇が持続するためである。したがって、停止時には図7に示すように停止直前の軸受温度変化率をパラメータとして、停止直前温度変化率が0の場合には停止時許容温度変化率も0とし、停止直前温度変化率が $\oplus$ (プラス)の場合に限り停止直前温度変化率によって、 $\oplus$ 方向温度変化許容時間と $\oplus$ 方向許容温度変化率を定めて監視することができる。

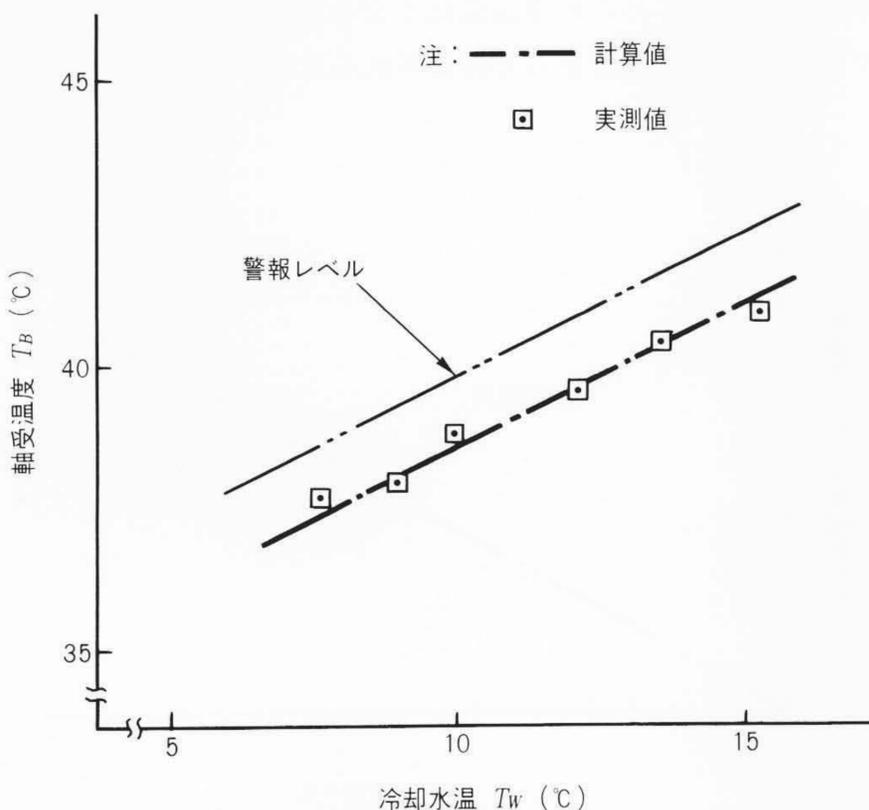


図4 軸受温度と冷却水温度の関係 軸受温度は冷却水温度によって変化し、冷却水温度1°Cの変化に対し、軸受温度は約0.5°C変化する。

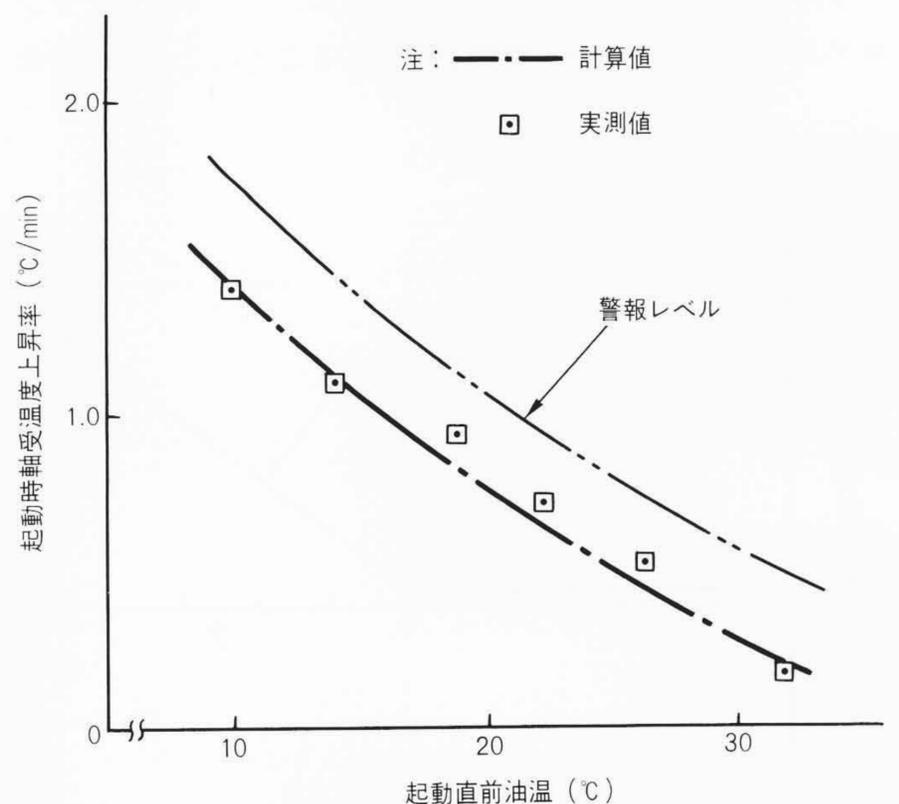


図5 起動時の軸受温度上昇率と起動直前油温の関係 起動時の軸受温度上昇率は、起動直前の油温によって変化する。

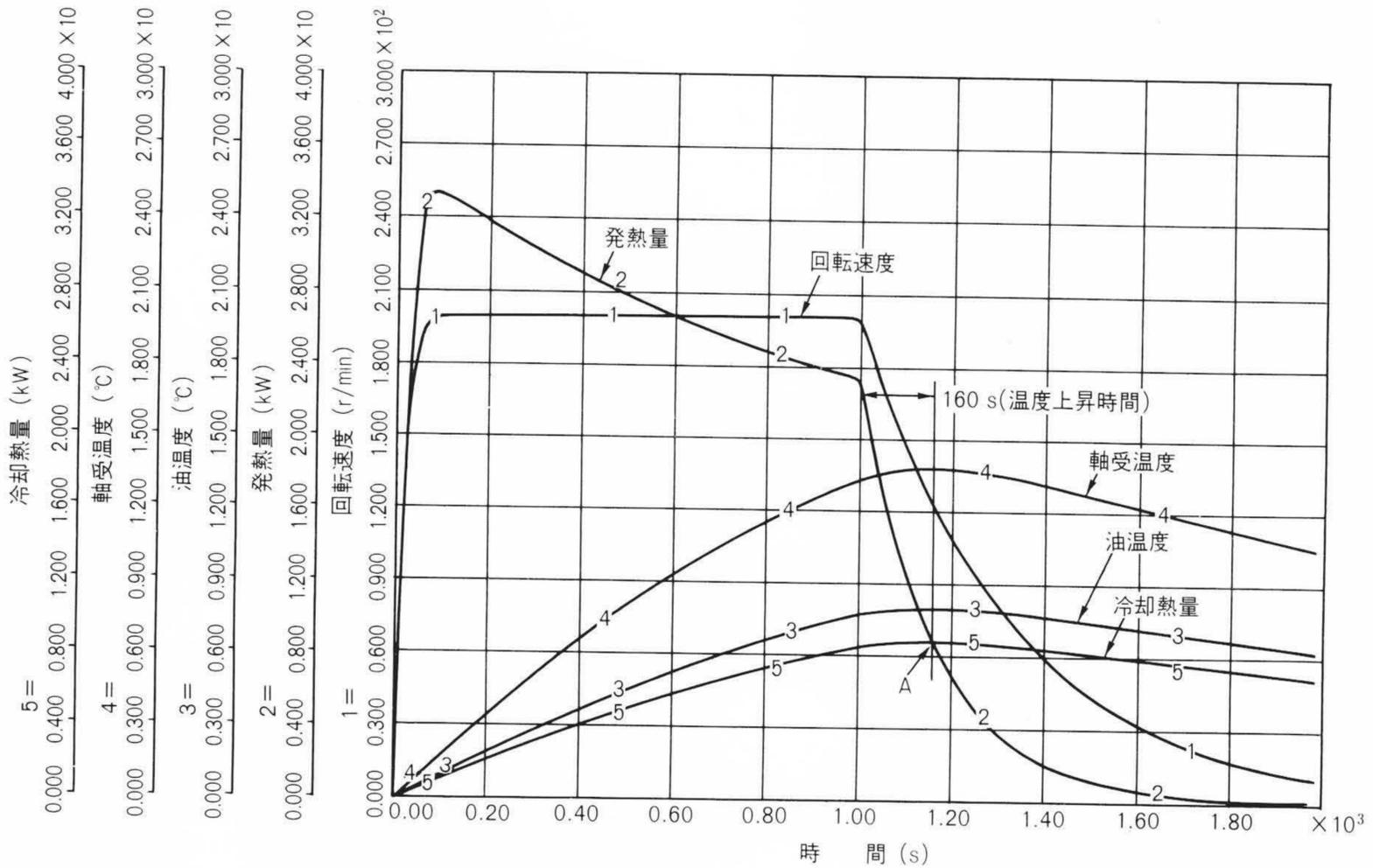


図6 停止時の回転速度と軸受温度のシミュレーション結果 軸受温度が上昇中に回転速度が低下しても、発熱量と冷却熱量が一致するまで軸受温度は上昇し、上昇時間は停止直前の上昇率に比例する。

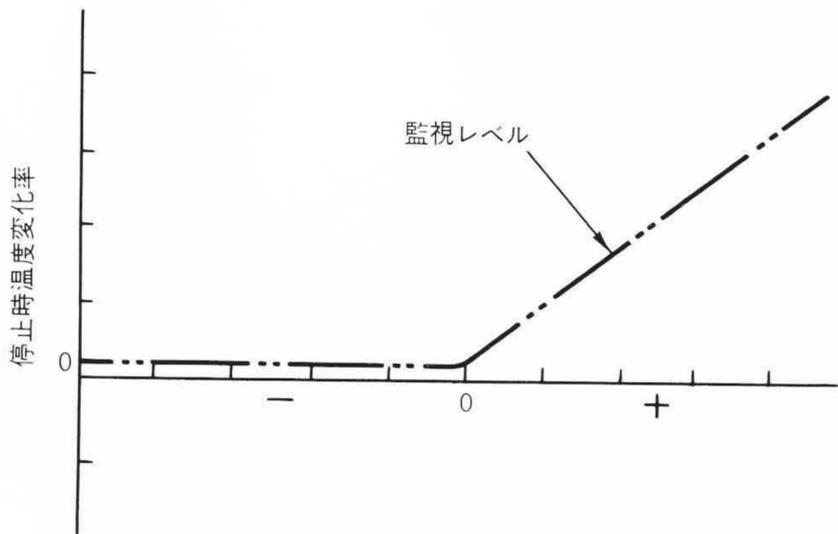
また、地上式発電所で空冷式軸受の場合は、周囲温度が1日を周期として変化するため、図8に示すように軸受温度は周囲温度に対して遅れ時間 $T_d$ を持って追従することになる。このような軸受に対しては遅れ時間を補正したうえで、周囲温度をパラメータとして監視する必要がある。

### 3.2 圧油装置

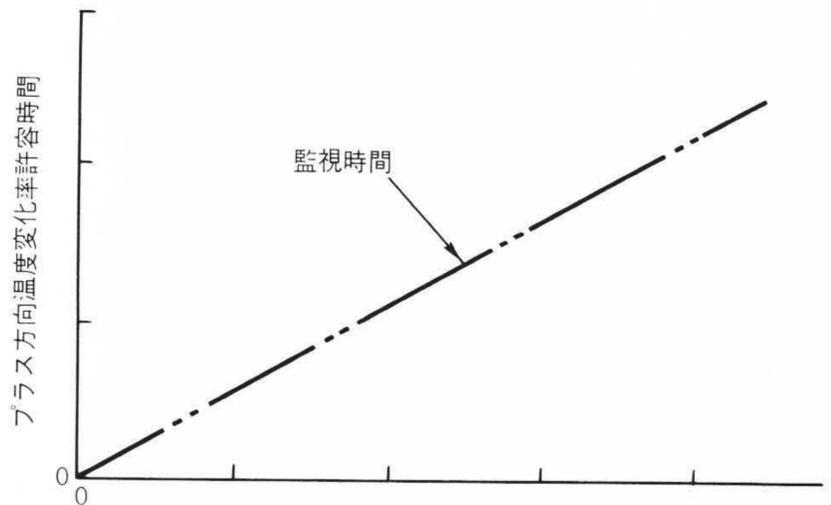
圧油装置では、圧油タンク内の油圧と油面の関係、圧油タンク内の油量と集油タンク内油量の総和、アンローダのオンロード時間とアンロード時間を監視することによって、異常

を早期に発見することができる。圧油タンクの圧力はアンローダによって制御されており、図9に圧油タンクの圧力、油面、集油タンクの油面の変化状態を示す。

圧油タンク内の圧力と油面の関係は、図10に示すように変化する。すなわち、オンロード時にはタンク内の油面は急激に上昇するため断熱変化曲線上をたどって変化し、タンク内の空気温度は上昇する。アンロード時にはタンク内の油面は緩やかに変化するため等温変化となるが、タンク内の上昇した空気温度が放熱によって冷却されるため、アンロード初期

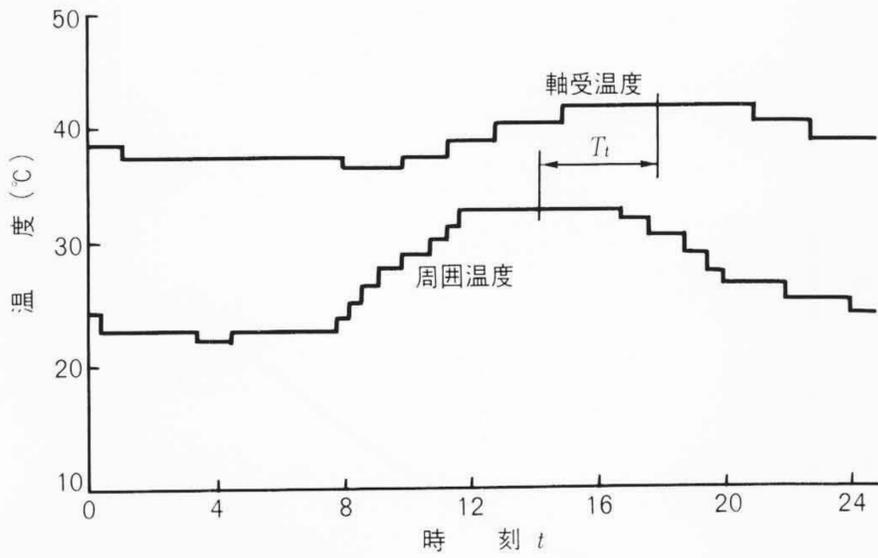


(a) 停止直前温度変化率



(b) 停止直前温度変化率

図7 停止時の軸受温度監視法 軸受温度が安定時には、停止時許容温度変化率は0とする。軸受温度が上昇時には、ある時間内だけ許容温度変化率を⊕とし、許容時間外は0とする。



注：略語説明  $T_i$  (遅れ時間)

図8 空冷軸受の温度変化 地上式発電所の空冷軸受温度は、周囲温度変化に対して時間遅れがある。

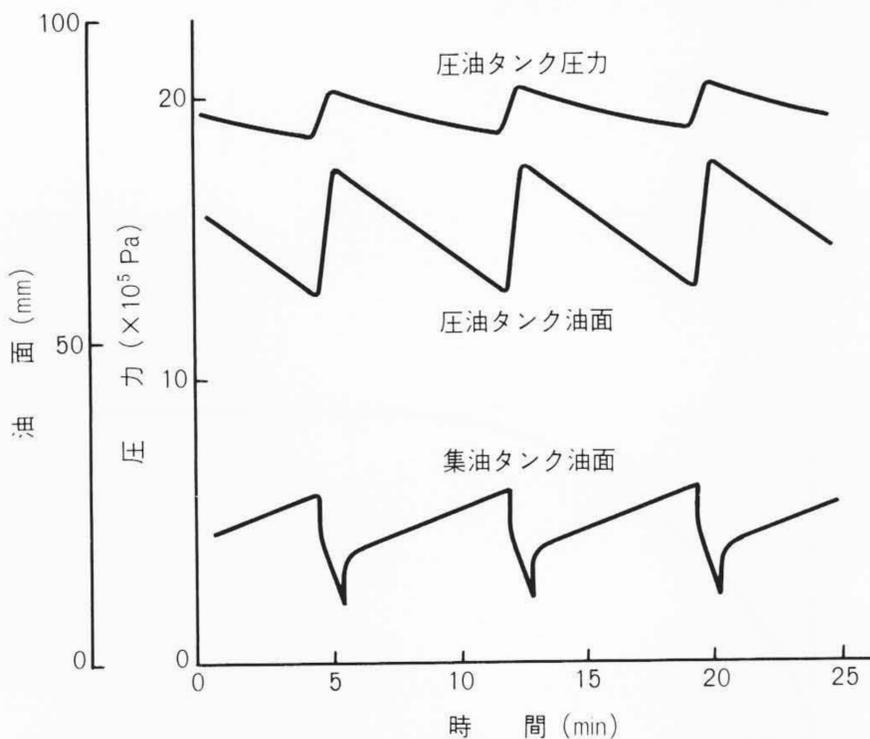


図9 圧油装置の圧力、油面の測定例 圧油タンクの圧力はアンロードによって制御されており、圧力、油面は一定間隔で変化する。

には油面の低下に対する圧力の低下は大きくなるが、放熱後は等温変化曲線をたどって最初の出発点に戻る。したがって、油圧と油面の変化曲線を取り囲むような警報レベルを設定することによって監視することができる。

また、集油タンク油量と圧油タンク油量の関係は、図11に示すように両者の和が一定になる直線上をたどる。したがって、変化直線の上下に警報レベルを設定することにより、漏油による操作油の減少、冷却水混入による操作油量の増大を早期に発見することが可能である。

さらに、図9に示す圧油タンク油面の変曲点をとらえることによって、アンロード時間、オンロード時間を検出し、圧油ポンプ性能、油圧機器の内部漏油の増大を検出することができる。

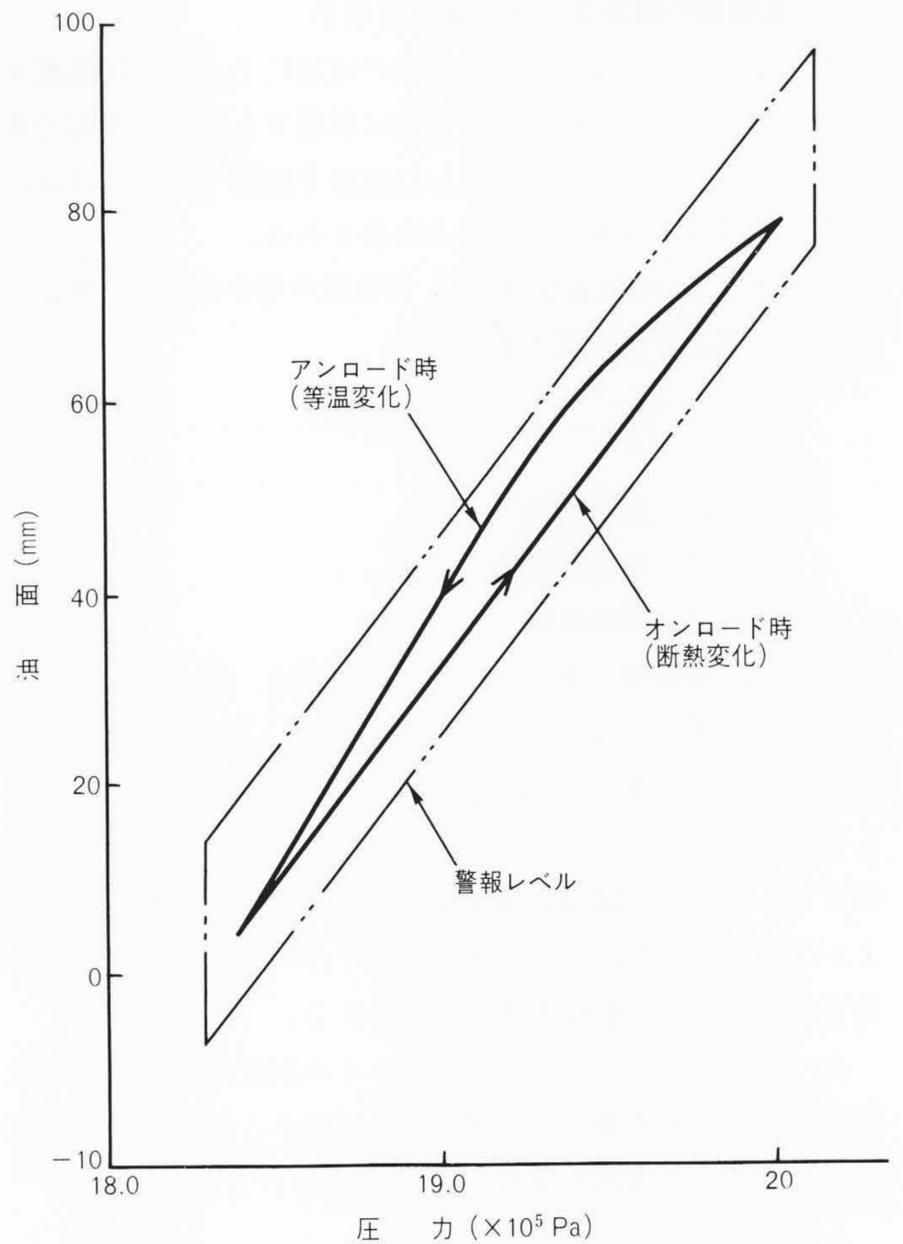


図10 圧油タンクの圧力と油面の関係 オンロード時には断熱変化曲線を、アンロード時には等温変化曲線をたどって変化する。

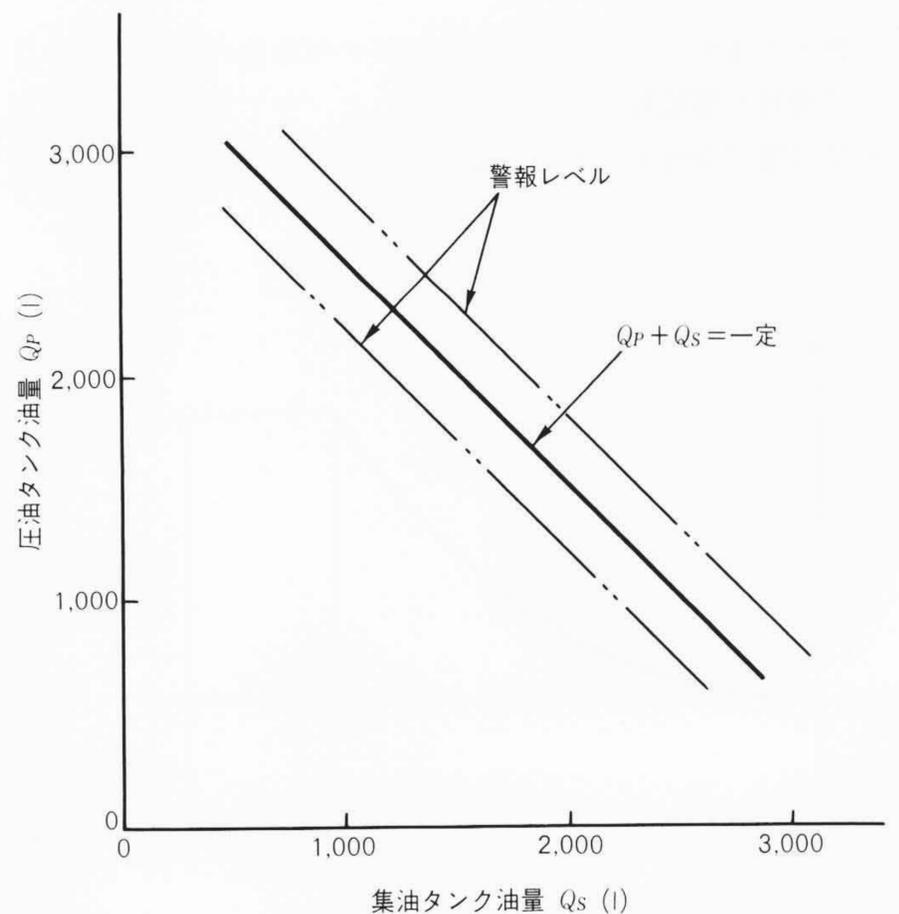


図11 圧油タンク油量と集油タンク油量の関係 圧油タンク油量と集油タンク油量の和は一定である。

### 3.3 発電機の固定子コイル温度監視法

固定子コイルの温度は、絶縁物の種別によって許容温度が規定されているが、絶縁物の寿命に影響する重要な要因である。したがって、長期に安定した運転を継続するためには、固定子コイルの温度を監視する必要がある。

固定子コイルの定常温度 $\theta$ は、発電機の発生熱量と放熱量の関係から求まり、次式で表される。

$$\theta = \frac{Q}{h \cdot A} \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $Q$  : 発生熱量  
 $h$  : 熱放散係数  
 $A$  : 放熱面積

ここで、発電機の損失による発生熱量は、**図12**に示すように負荷に無関係でほぼ一定な固定損(鉄損、風損、機械損)と電流に比例して増加する負荷損(銅損、漂遊負荷損)から成る。したがって、固定子コイルの定常温度は、発電機の損失に比例することから、**図13**に示すように電流の二次関数で表すことができる。これにより、固定子コイルの定常温度に対する許容値を設定し、監視することができる。

次に、負荷変化に対する固定子コイル温度の変化は、発電機の熱時定数を考慮した一次遅れ系で表すことができ、時定数を $T$ とすると次式となる。

$$\theta = \frac{Q}{h \cdot A} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \dots \dots \dots (2)$$

(2)式から、**図14**に示すように固定子コイル温度の過度変化に対して、許容値を設定して監視することができる。

## 4 結 言

無人で運転されている水力発電所の信頼性の向上を図る目的で機器状態監視システムを開発した。中でも設備の異常を初期段階で発見するため、状態量を実測するとともに、状態

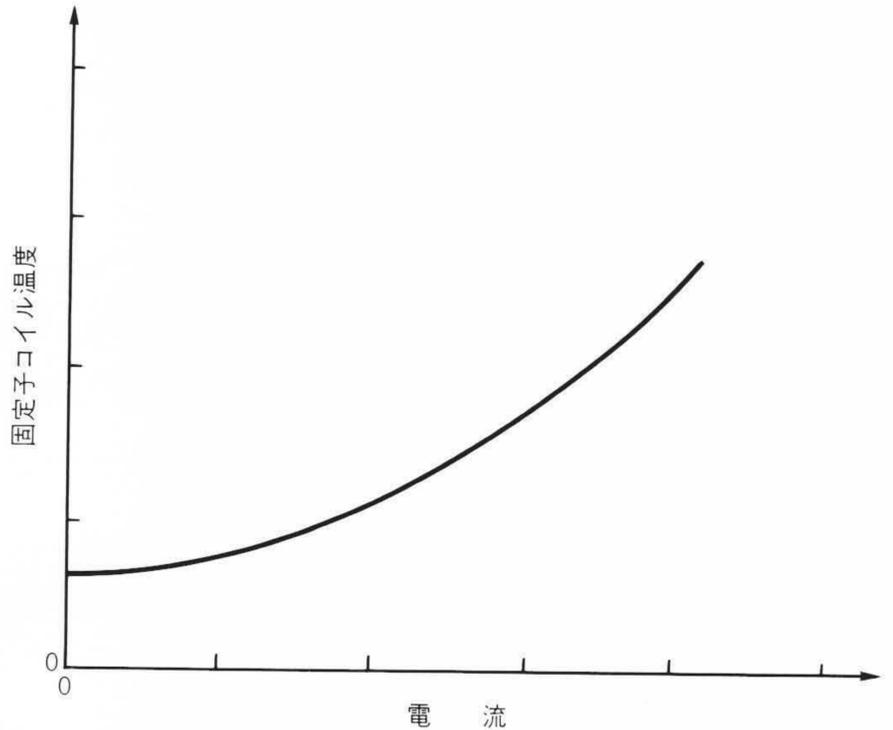


図13 固定子コイルの定常温度 固定子コイルの定常温度は、電流の二次関数で表すことができる。

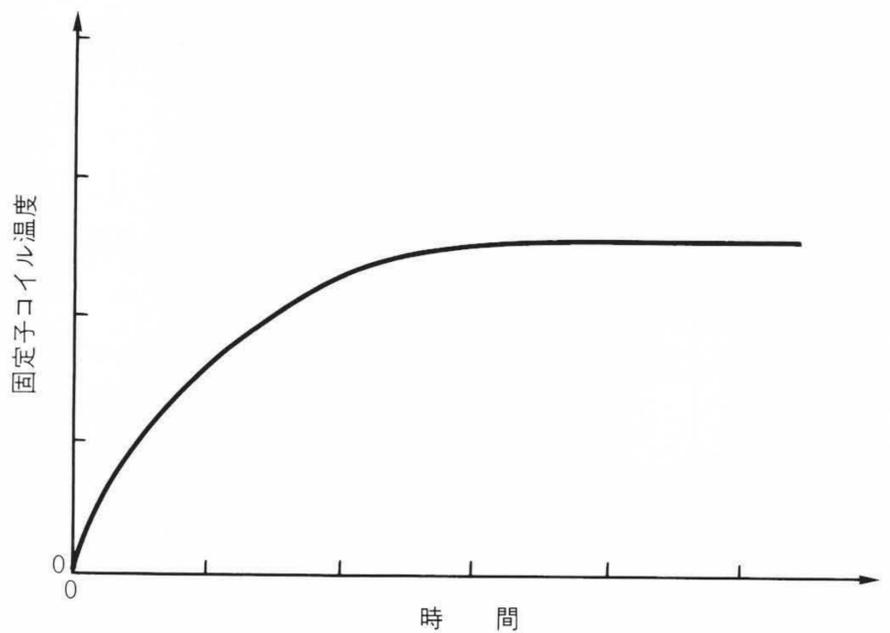


図14 固定子コイルの温度過度変化 固定子コイルの温度は、電流のステップ状変化に対し一次遅れ関数となる。

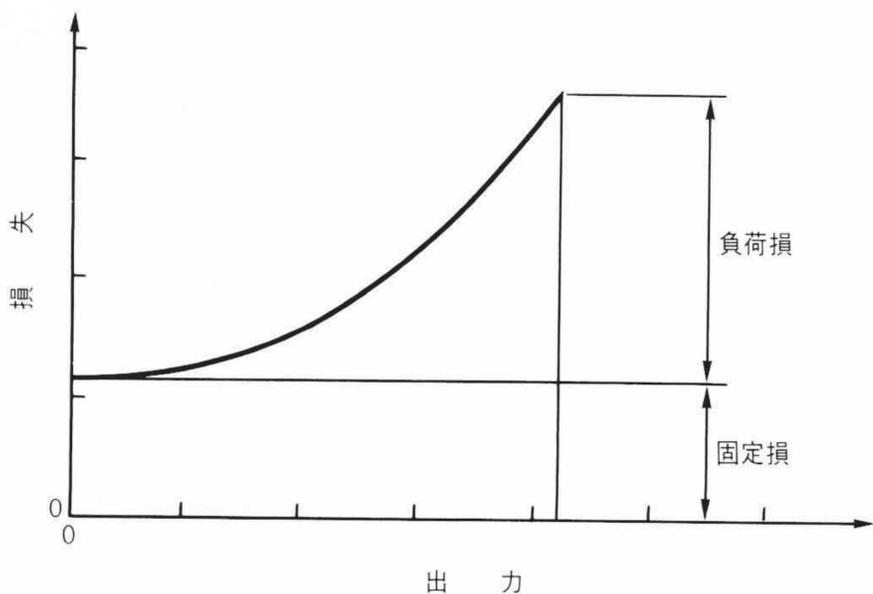


図12 発電機損失 発電機の損失は、出力に対して一定な固定損と、出力に比例して増加する負荷損に分けられる。

量変化のシミュレーションを行い、運転状態量を左右する影響因子を明らかにし、この影響因子をパラメータとして運転状態量を監視するアルゴリズムを開発した。

終わりに、このシステムの開発にあたってご指導をいただいた電力会社の関係各位に対し、心からお礼を申し上げます次第である。

### 参考文献

1) 伊藤, 外: 水力発電所の機器状態監視システム, 日立評論, 88, 8, 809~814(昭63-8)