

最近の水車調速機について

Some Recent Developments on Hydraulic Turbine Governors

鯨 沢 秀 夫* 山 口 幸 男*
Hideo Ebizawa Yukio Yamaguchi

内 容 梗 概

このほど関西電力株式会社笠置発電所に納入した電気調速機の特性と現地試験結果を述べた。試験結果は良好であつたが試験の過程において種々の調整が行われたのでそれらの解析を行つた。また一般に、水車発電機が並列に連繫され平常負荷運転を行つている場合について、調速機の特性が電力、周波数の変動にどう影響するかを述べた。

1. 緒 言

水車調速機は自動制御装置として最も古い歴史を有するものであり、その動作特性についてはすでに多数の報告がなされている。この水車調速機に、近年二つの新しい面における発展がみられる。すなわち電気調速機の実用化と、定常不規則な変動に対する考察である。電気式調速機は、今回関西電力株式会社笠置発電所に納入せられ、営業運転に入つており、調速機特性解析のための資料を得られている。平常運転時の特性を統計的に把握しようという試みは外国でも国内でもなされて、すでにすぐれた報告が出されているが、それらの結果にもとづき調速機の特性が、定常不規則変化に対してどのような影響を与えるかを調べることはきわめて大切なことで、今後の調速機の研究はこの方向に進むものと考えられる。

2. 日立電気式調速機について

2.1 調速機の特性

国内の傾向としては、自動周波数調整上の必要から、出力調整を自由に行い得るダム式発電所では次第に電気式調速機に切換えられつつあり、機械式調速機は基底負荷発電所に使用するのが大勢となつている。したがつて、電気式調速機は変動負荷発電所に設置するのが普通である。

水車調速機は従来ペンデュラムを速度検出部とする機械式のものがほとんどであつたが、最近の国内の新設大容量発電所には、速度検出に電氣的な同調回路を使用し、電子管あるいは磁気増幅器で増幅の後、油圧式配圧弁およびサーボモータを操作する電気式調速機が多く採用されるに至つた。電気式

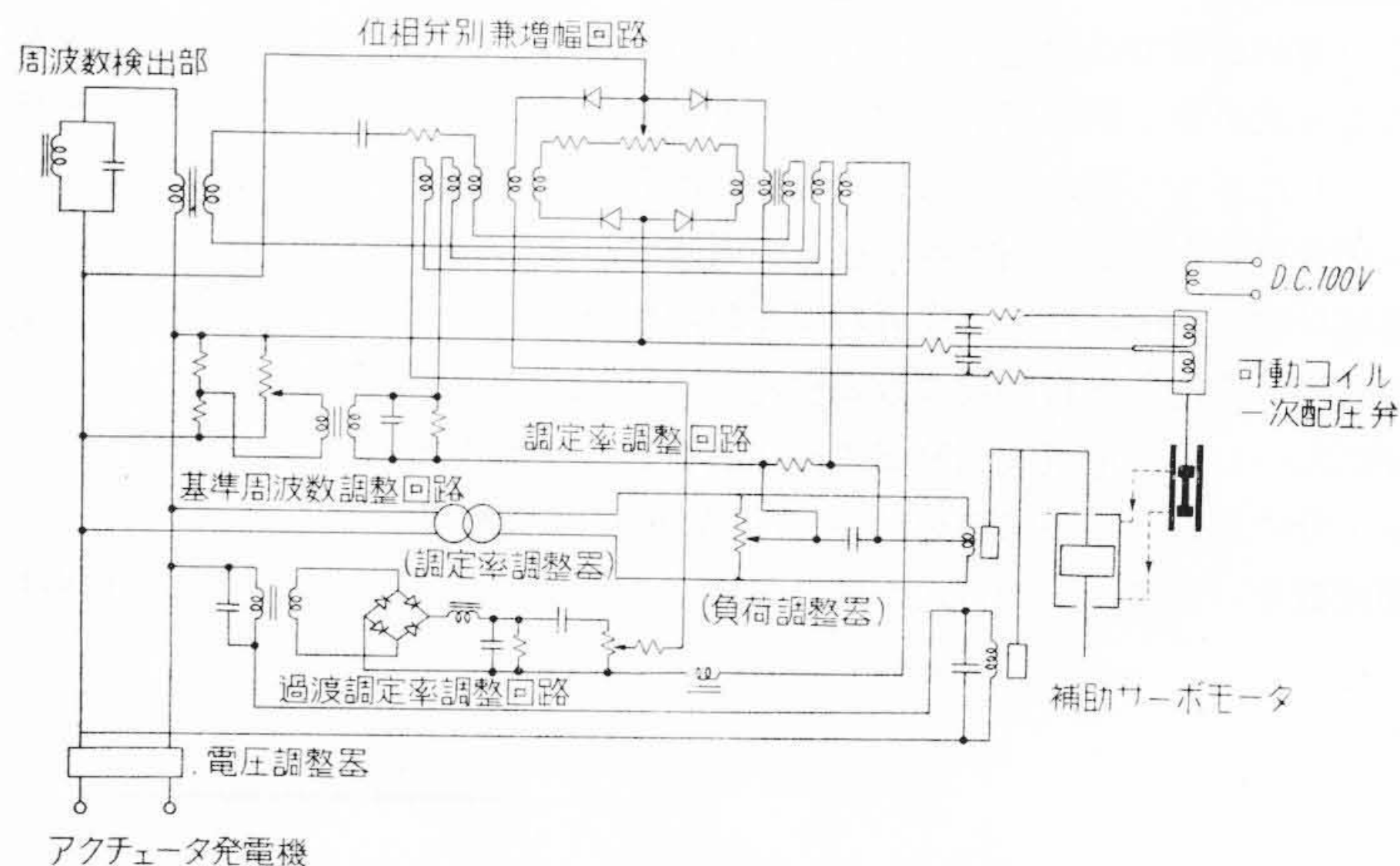
調速機は機械式調速機に比べ感度、速応性、利得の点ですぐれているが、電源およびその定電圧装置、周波数検出装置、増幅装置などを必要とし複雑になる。しかし電気回路の組合せによつてダンピング切換、発電機2台あるいはそれ以上の結合運転、水位調整運転などいろいろの使い分けが可能になる利点がある⁽¹⁾。

日立電気式調速機の動作原理(第1図参照)についてはすでに発表されているので、以下その特性について述べることにする⁽²⁾。

電磁弁コイルにおける Δf -電流特性の測定結果は第2図のようである。すなわちほぼ $500 \frac{\text{mA}}{\text{c/s}}$ であつて非常に大きな増幅度を有する。このため特殊な油圧倍力機構を介さずに直接配圧弁を操作するので時間遅れはきわめて少ない。またこの電磁弁電流と配圧弁変位との関係は平衡バネによつて定まるものであるが、 Δf -電磁弁変位は $2.5 \frac{\text{mm}}{\text{c/s}}$ であり、検出部、増幅器の時間遅れを考慮するとき、その伝達函数は

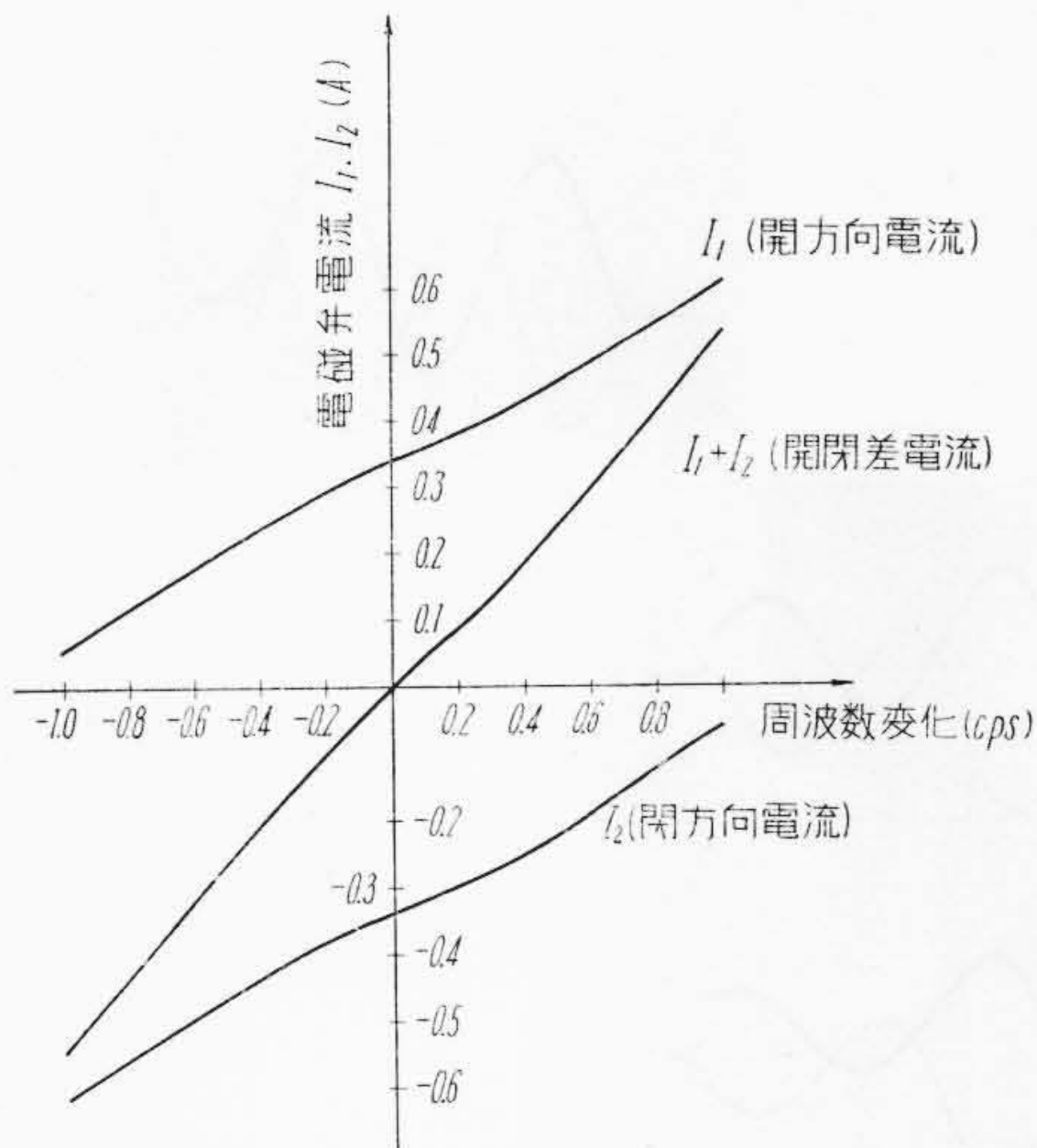
$$\frac{2.5}{(1+0.025S)(1+0.04S)} \frac{\text{mm}}{\text{c/s}} \dots\dots\dots (1)$$

と表わすことができる。この間の利得を極端に高くする

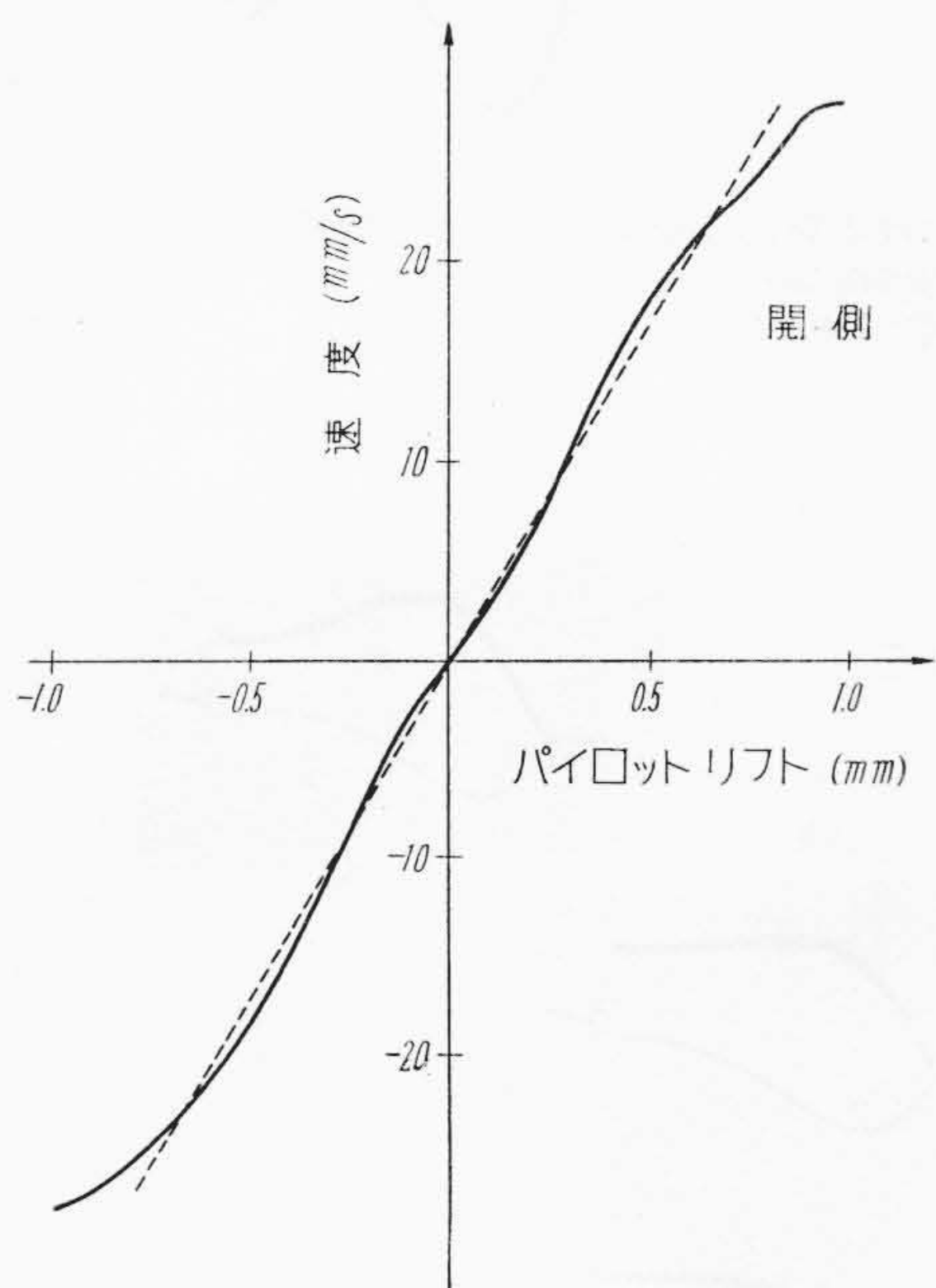


第1図 日立電気式調速機結線図

* 日立製作所日立工場



第2図 電気式調速機の周波数変化と電磁弁電流との関係

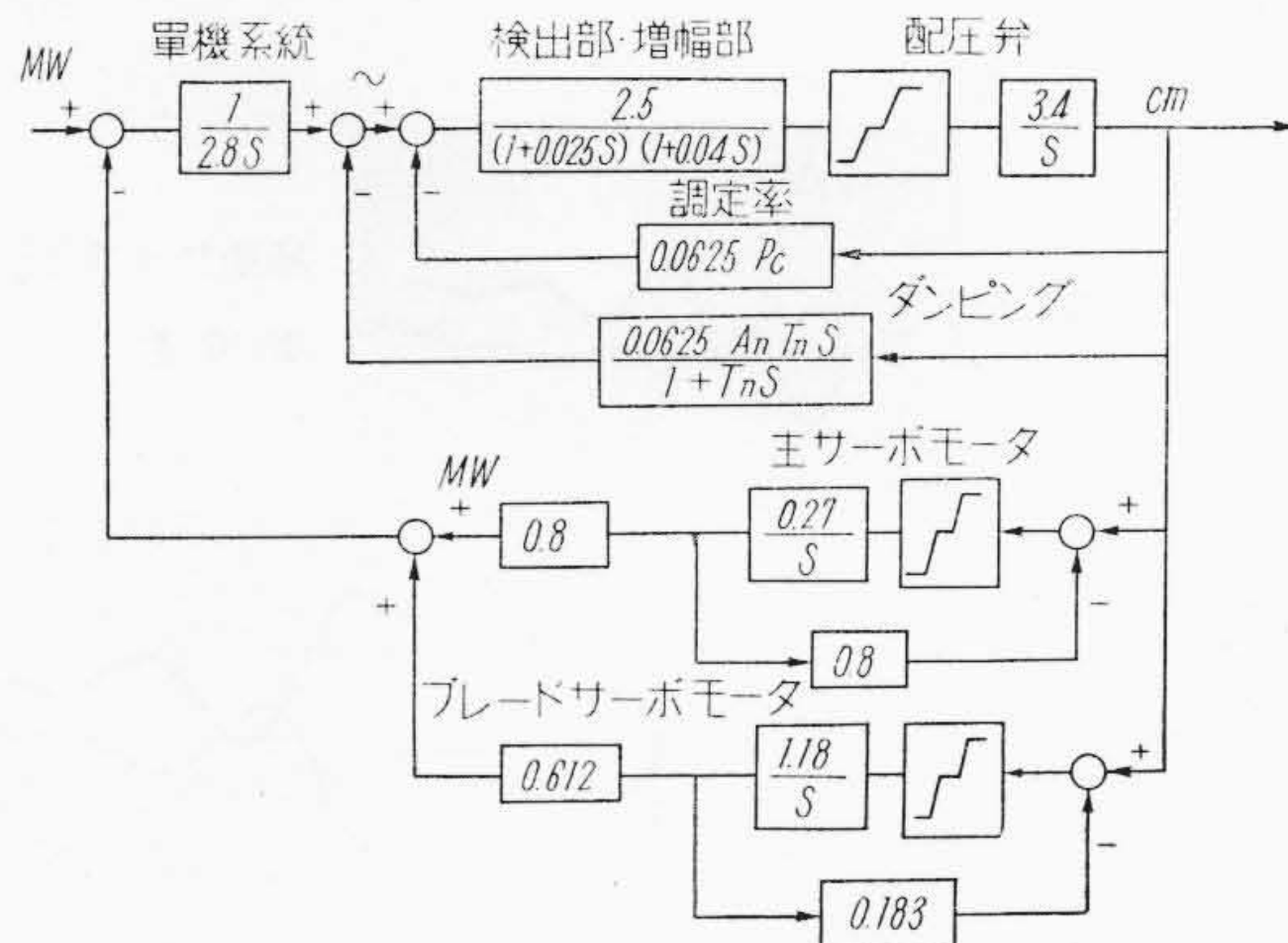


ほぼ 1mm の変位で移行速度は飽和する

第3図 電気式調速機の電磁弁変位と補助サーボモータ移行速度の関係

ことは、系を発振させる傾向となるので適当でない。

次に補助サーボモータの移行速度と電磁弁変位との関係は第3図に示すように不感帯と飽和を含んでいるが、これを点線のように直線的と見なせばこの利得は $34 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ である。ただし補助サーボモータの全ストロークは 80 mm である。したがって不感帯と飽和を無視した伝



第4図 東北電力株式会社上野尻発電所 21,000 kW カプラン水車の出力 9,400 kW におけるブロック線図

達函数は下記のようになる。

$$\frac{3.4}{S} \frac{\text{cm}}{\text{mm}} \dots\dots\dots (2)$$

ダンピングおよび調定率復元の回路は近似的にそれぞれ

$$\frac{0.0625 An Tn S}{1 + Tn S} \frac{\text{c/s}}{\text{cm}} \dots\dots\dots (3)$$

および

$$0.0625 Pc \frac{\text{c/s}}{\text{cm}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、An: 過渡調定率 (%)

Pc: 調定率 (%)

Tn: ダッシュポットタイム (s)

である。それゆえ検出部から補助サーボモータまでの非線型要素を無視した伝達函数は

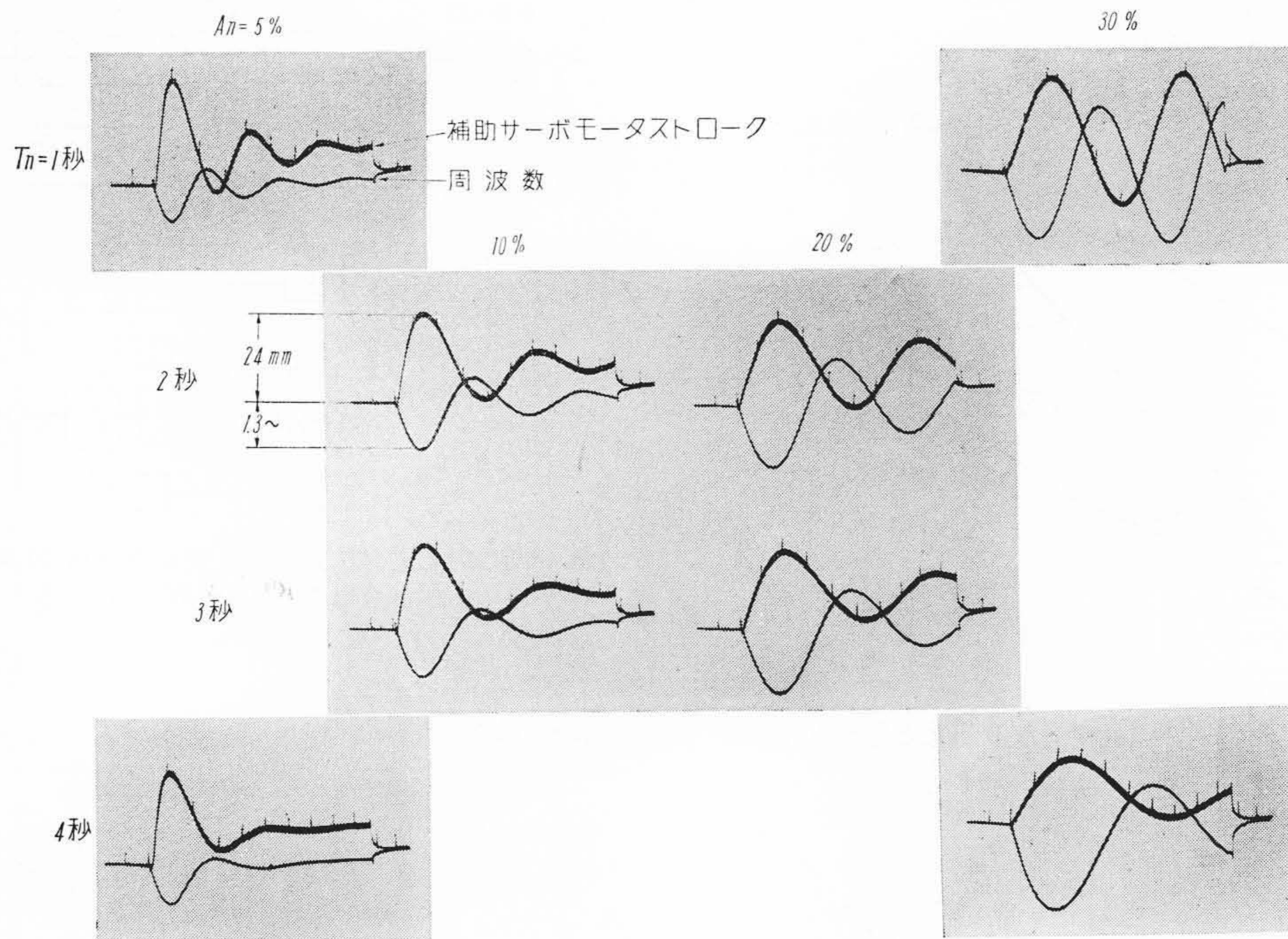
$$F(S) = \frac{16 (1 + Tn S)}{0.0188 S^3 + 0.122 S^2 + (1.88 + Tn Pc + Tn An) S + Pc} \dots\dots\dots (5)$$

である。

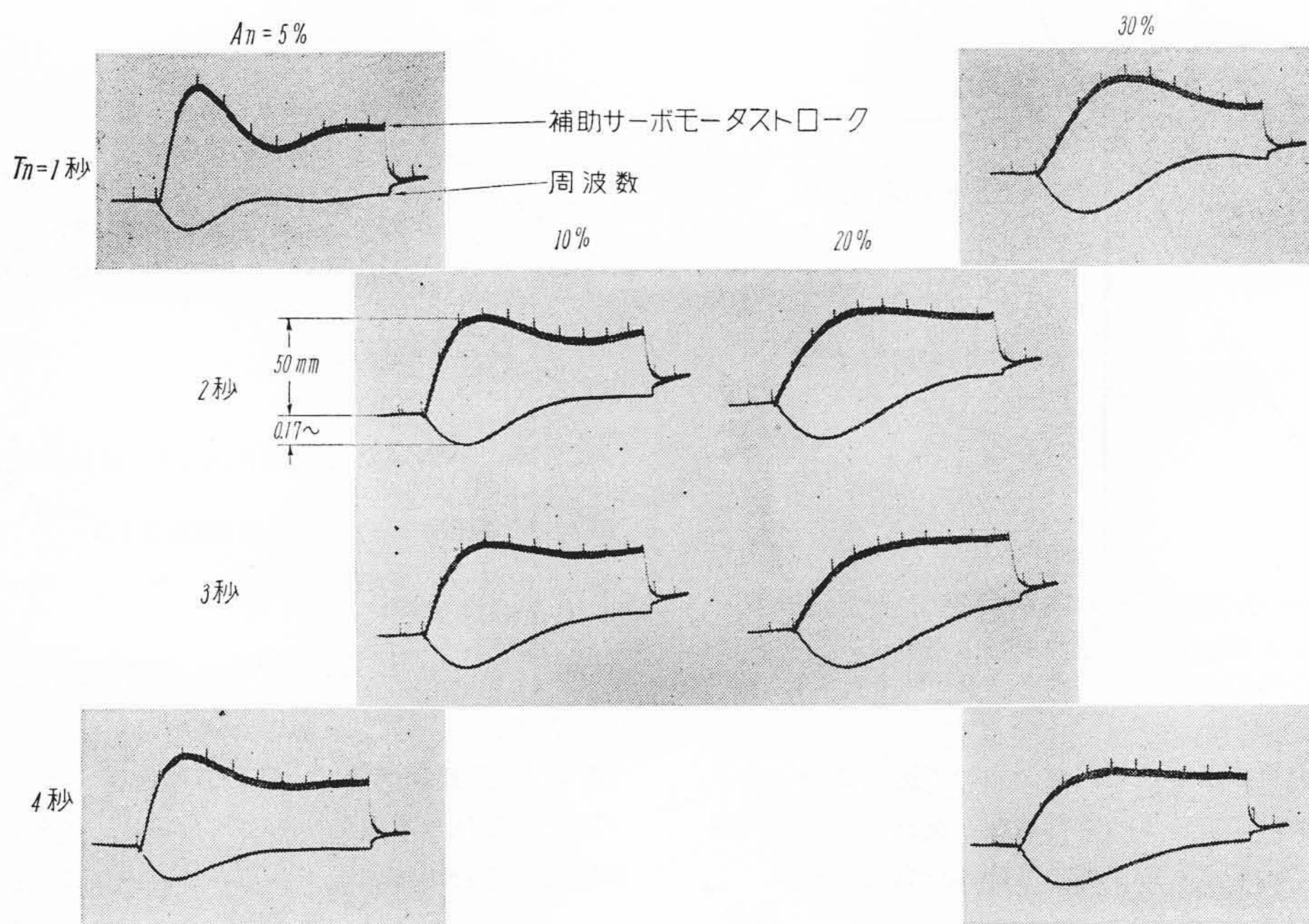
ちなみに ASEA社の検出部の Δf —電流特性は $7.1 \frac{\text{mA}}{\text{c/s}}$ 増幅部—電磁弁を含めた総合利得は $1.3 \frac{\text{mm}}{\text{c/s}}$ でありまた補助サーボモータの利得は全ストローク 120 mm に対し $60 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ でストローク 80 mm に換算すれば $40 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ である⁽³⁾。

2.2 電気式調速機による周波数制御

良く知られた事実であるが、大系統に連繫された水車調速機がきわめて安定であるのは、系統に自己制御性があり、かつ系統特性定数がきわめて大きいので事実上オープンループとなることによるものである。しかるに単独運転の場合には、この自己制御性が弱いので積分として取り扱うのが普通である。したがって安定性を問題と



第 5 図 上野尻発電所カプラン水車の単機運転時における周波数変動のアナコン解析結果
 負荷擾乱 2,000 kW に対する応答 演算時間 20 秒
 An : 過渡調定率 Tn : ダッシュボットタイム



第 6 図 上野尻発電所カプラン水車の並列運転時における周波数変動のアナコン解析結果
 演算時間 20 秒
 負荷擾乱 20,000 kW とし、3 台の調速機がまったく同一の特性を有するとした。
 An : 過渡調定率 Tn : ダッシュボットタイム

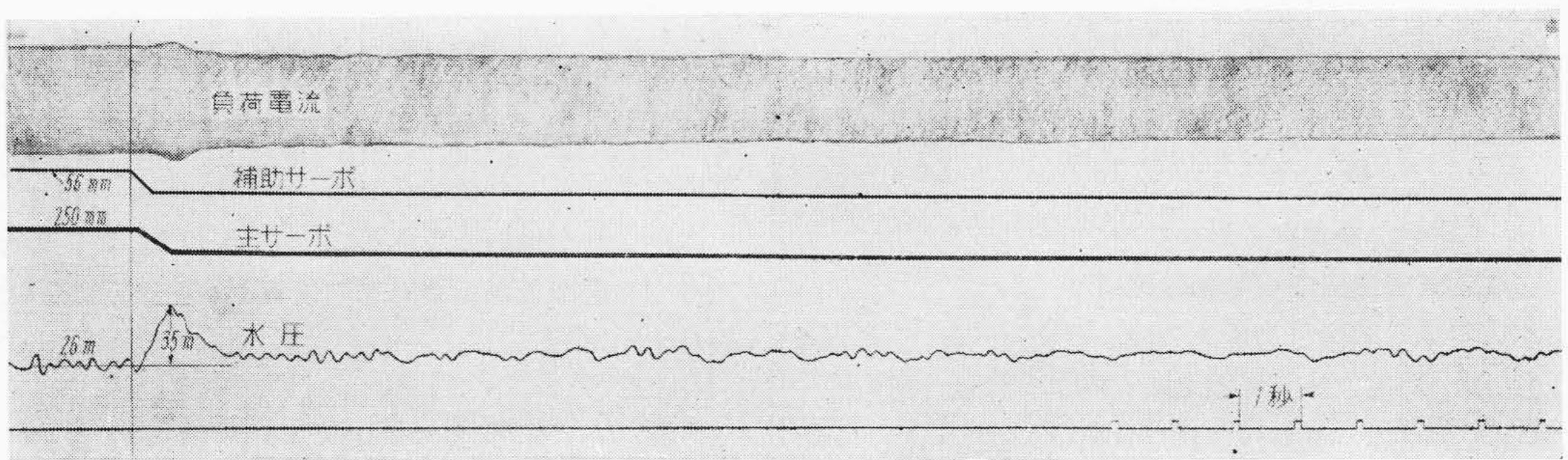
するときは単独系として検討する必要がある。

この調速機が水車発電機をどのようにして制御するかを、やや特殊な例として東北電力株式会社上野尻発電所納 21,000 kW カプラン水車の出力 9,400 kW の点を中心求めた。この場合主サーボモータ、水車発電機などを含めた全系の伝達函数は第 4 図のブロック線図に示すとおりである。周知のようにカプラン水車では案内羽根開度とブレード開度とが常に効率を最大とするように関係づけられているが、それぞれのサーボモータは別個の配圧弁で操作されている。ここでもし案内羽根用配圧弁と、ブレード用配圧弁が同様の特性を有するものであるならば一般のフランシス水車と同様の取り扱いが可能であるが、負荷遮断の際速度上昇をある値以下におさえるために案内羽根は 3～4 秒程度で閉鎖するが、ブレードは普通 20～30 秒で開閉されるゆえ、それぞれの利得は同一ではない。またたとえば水車出力は、案内羽根が $\frac{6}{10}$ から $\frac{7}{10}$ まで開いても、ランナーブレードが 6 度から 10 度を開かなければ、3,250 kW の出力増が望めないように案内羽根の開度の変化とブレード角度の変化の両者に影響されるものである。この両者は厳密には、相乗積としての効果を有するのであるが近似的に、それぞれの開度変化に比例した出力変化の和として表わせるものとみなす。たとえば案内羽根開度が $\frac{1}{10}$ 変化して 800 kW、ブレードが 4 度変化して 2,450 kW 合計出力 3,250 kW の変化をなすものとする。ただしこれらは、水車の模型試験などの資料から適当に定めるべきであり、あまり大きな

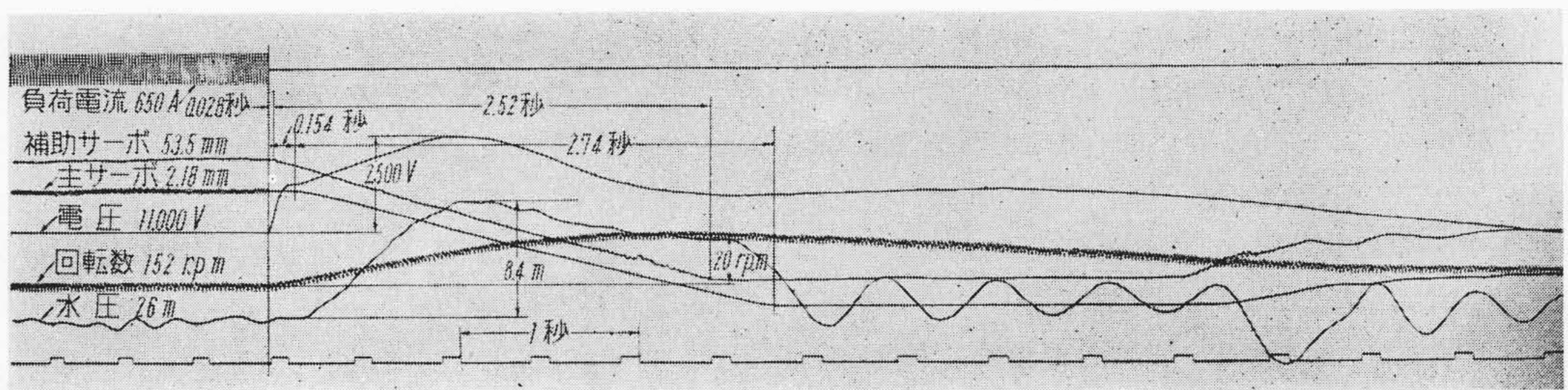
範囲に広げて変化幅を見込むと誤差が大きくなる。

第 5 図および第 6 図は負荷変動の際における調速機の動作をアナコンで計算した結果を示すものであるが、過渡調定率を大きくするとハンチングする傾向となり、むしろ少ない方が望ましいことがわかる。しかしあまり小さくすると、やはりハンチングする傾向となるので、このときはダッシュポットタイムを大きくとる必要がある。結局過渡調定率 5%，ダッシュポットタイム 4 秒の組合せが、安定でかつ周波数の低下も最も少ないであろうと考えられる。系統並列中はあらゆる An, Tn の組合せに対して、安定であつて、 An, Tn の組合せによる影響があまり現われていない。これは系統が、時定数 3 秒利得 $0.01 \frac{c/s}{MW}$ の一次遅れとして扱えるからである。

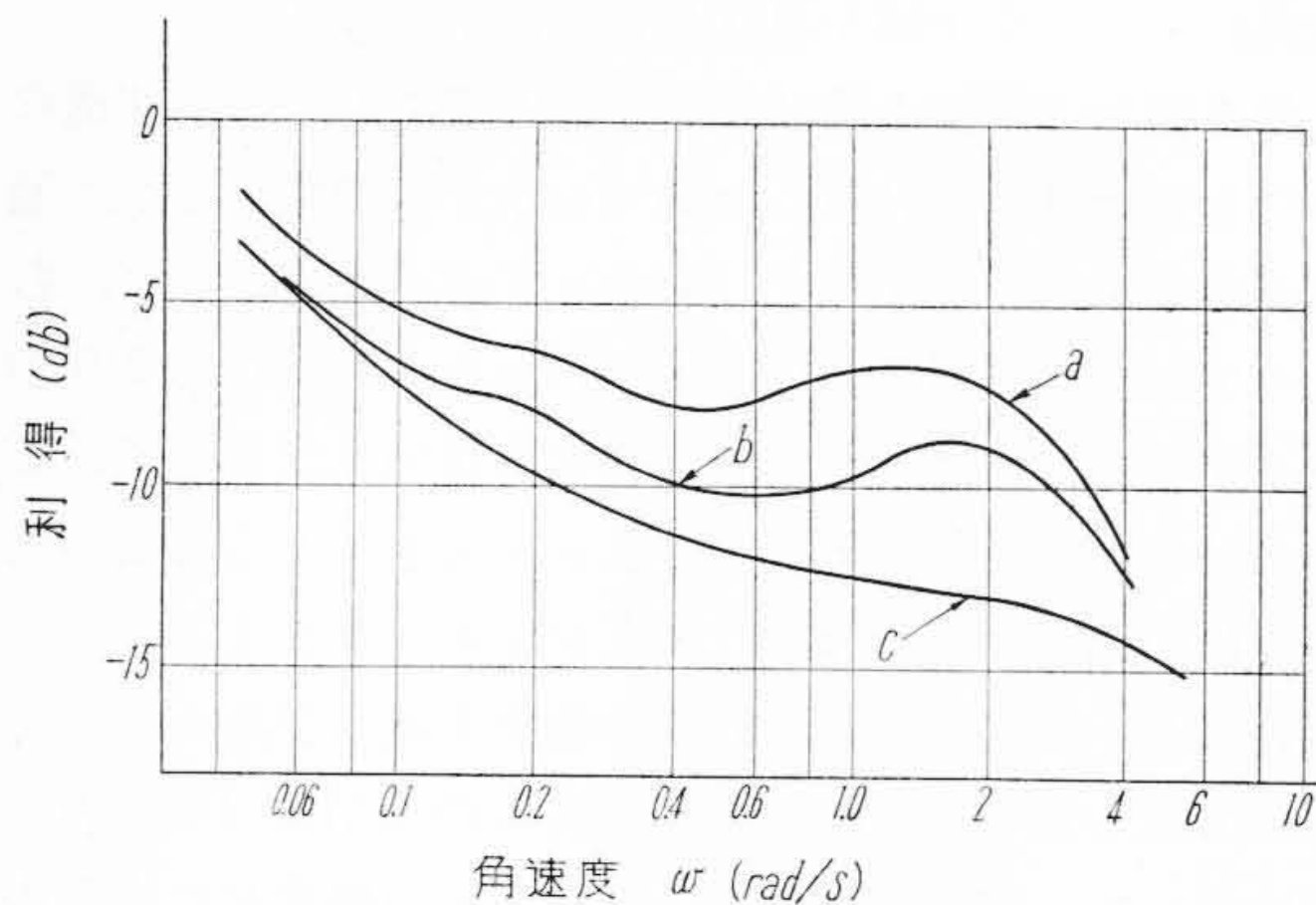
カプラン水車の場合、案内羽根・ブレード用各配圧弁の利得が異なるために少なからず制御に影響する。これは一つの系統に急激に負荷調整できる高速度タービンと比較的緩動作の水車が並列された場合に相当し、急激な変化に対しては過渡的な調整容量が少なくなり十分応じきれなくなるもので、特に系統の安定に影響するほどのものではないが、周波数偏差はいくぶん大きく表われることになる。しかし後述のように、系統の電力変動は比較的大きな時定数をもつて発生し、また自動周波数調整上から要求される制御速度もあまり早くないので現在までのところは問題となつてはいないが、今後多数の電気式調速機が採用されるようになると水車の制御速度に対する要求も高まつてきて、これらの点について種々検討



第 7 図 周 波 数 制 定 回 路 切 換 時 の 過 渡 応 答

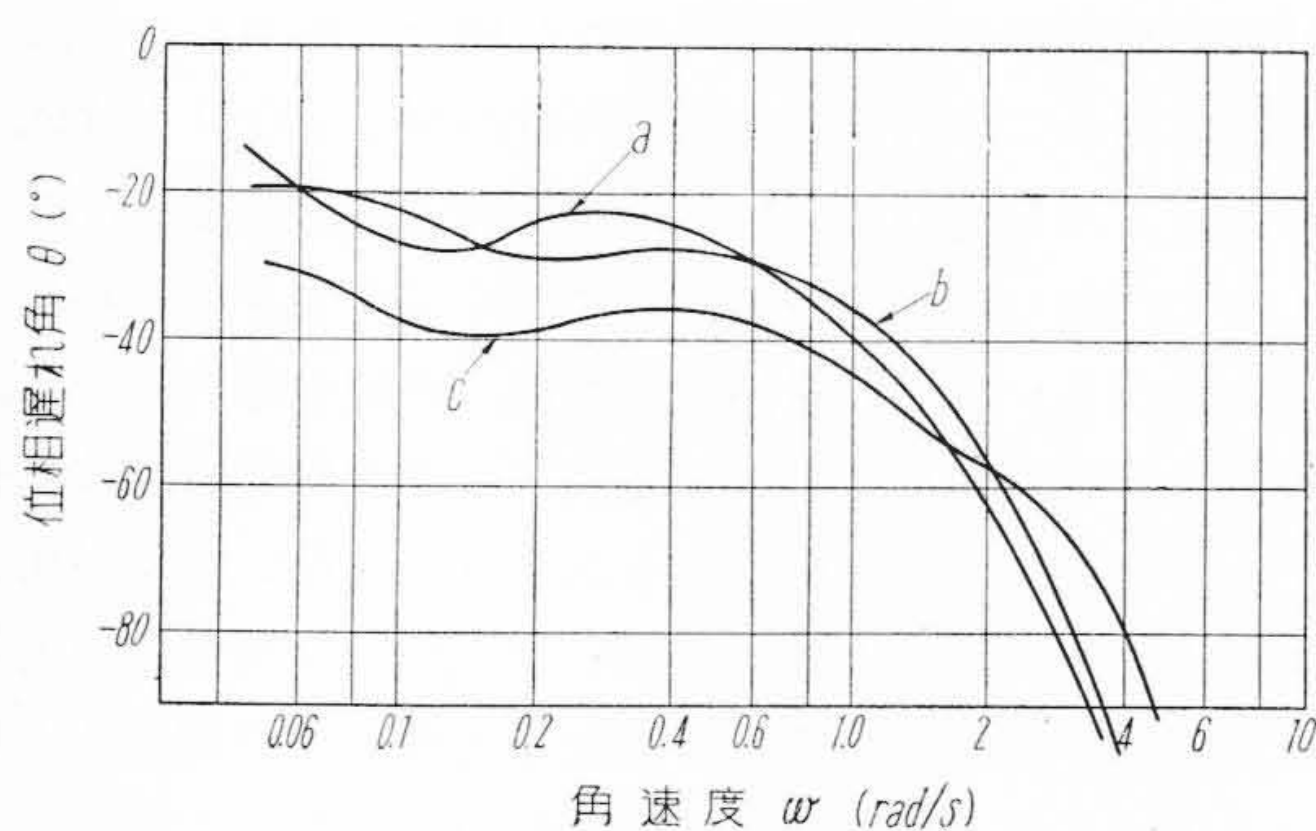


第 8 図 負 荷 遮 断 試 験 結 果
遮断負荷 11,620 kW



調定率 3%
 a. $An = 3\%$, $Tn = 2.8''$
 b. $An = 8\%$, $Tn = 3.3''$
 c. $An = 17\%$, $Tn = 2.2''$

第9図 周波数応答試験結果 (利得)
 全ストロークを0 dbとした



調定率 3%
 a. $An = 3\%$, $Tn = 2.8''$
 b. $An = 8\%$, $Tn = 3.3''$
 c. $An = 17\%$, $Tn = 2.2''$

第10図 周波数応答試験結果 (位相遅れ)

を要することになるものと思われる。

2.3 電気式調速機の現地試験結果

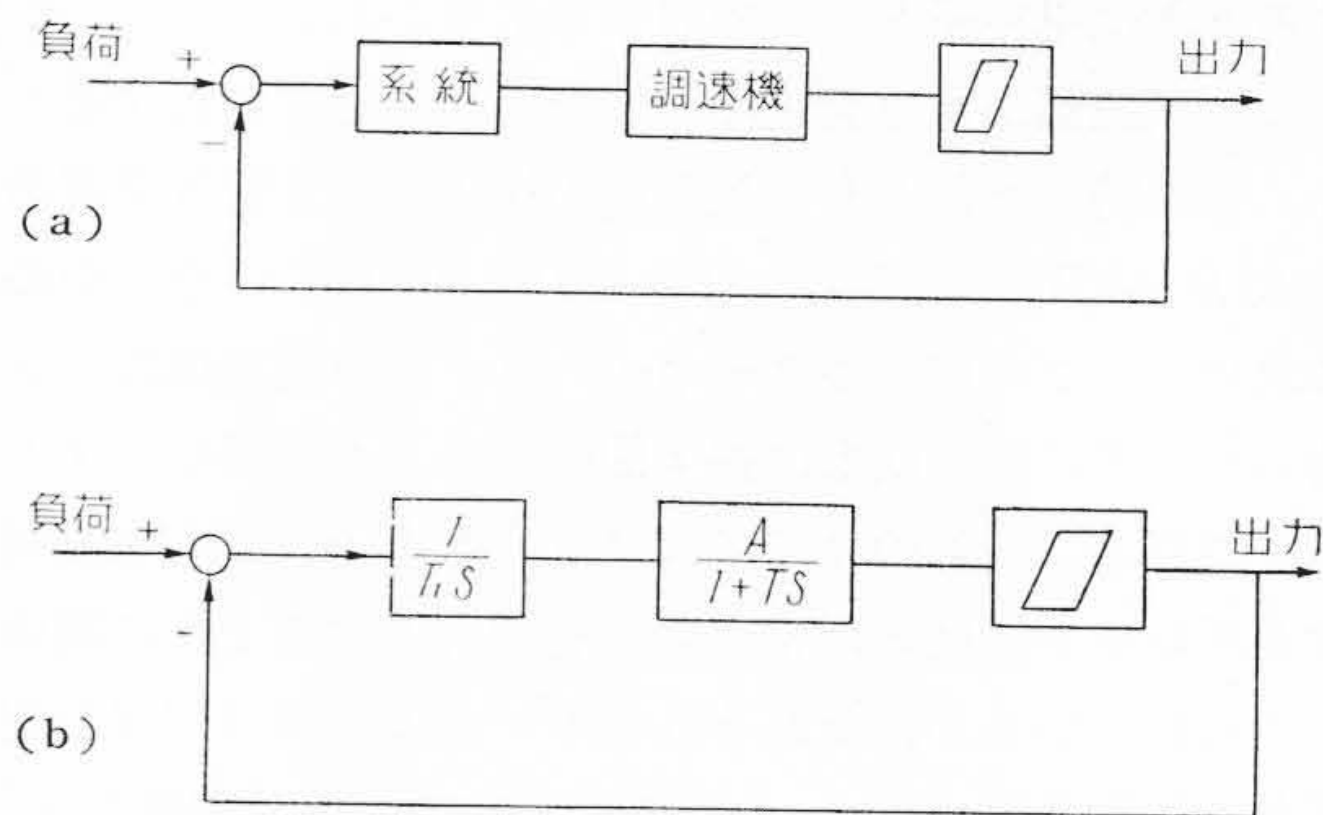
昭和33年3月関西電力株式会社笠置発電所に日立電気式調速機が納入され、現地試験も終了し好調な運転を続けているが、この際実施された試験結果の解析について簡単に述べる。

2.3.1 過渡応答試験および負荷遮断試験

周波数整定回路を急激に動作させて調速機の過渡応答を求めた結果を第7図に示す。また負荷遮断試験の結果は第8図に示すとおりで、動作および安定度とも異常がないことがわかった。

2.3.2 周波数応答試験

$\omega = 5 \text{ rad/s} \sim 0.05 \text{ rad/s}$ の周波数帯域について実施した周波数応答試験からボード線図を求めて第9, 10図に示した。この図から明らかなように利得はダンピングを強めると急激に低下するので、ダンピングを加



第11図 (a) バックラッシュのある系統のブロック線図
 (b) 簡略化したバックラッシュのある単機系統

減して系の安定を計ることができる。

このほか長時間記録による統計的な分析も行う予定であつたがサンプリング数が少なく不可能であつた。

関西電力笠置発電所は昭和10年の製作によるもので既設の機械式調速機を取り上げて電気式調速機と性能比較をするのも不適當と思われる箇所もあるが、一応動作頻度を比較すると、はなはだしく差のあることがわかる。既設のものは検出部の利得が低くしたが、応動も鈍いのであるが、電気式調速機では、感度が高いために無負荷運転時に最初レーシングが発生した。ふるい発電所では案内羽根操作機構、サーボモータ接続部、復原機構などに経年摩耗によるバックラッシュを生じていることがあり、電気式調速機に改造しても摩耗部分がそのまま残されていると、レーシングが発生しやすいから注意しなければならない。笠置発電所現地試験の結果は、たとえば第3号機では4 mm のバックラッシュに対して6 mm のレーシングがあつたので、バックラッシュの影響が非常に大きいことが予想される。

次にこれを検討してみる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。第11図はこの系統のブロック線図であるが計算の便宜上次のように近似的に表わす。

$$\text{系統の伝達函数: } \frac{1}{T_1 S}$$

$$\text{調速機の伝達函数: } \frac{A}{1+TS}$$

ガイドリング中のバックラッシュ: 等価伝達函数 N

ここに T_1 = 水車発電機の始動時間 (s)

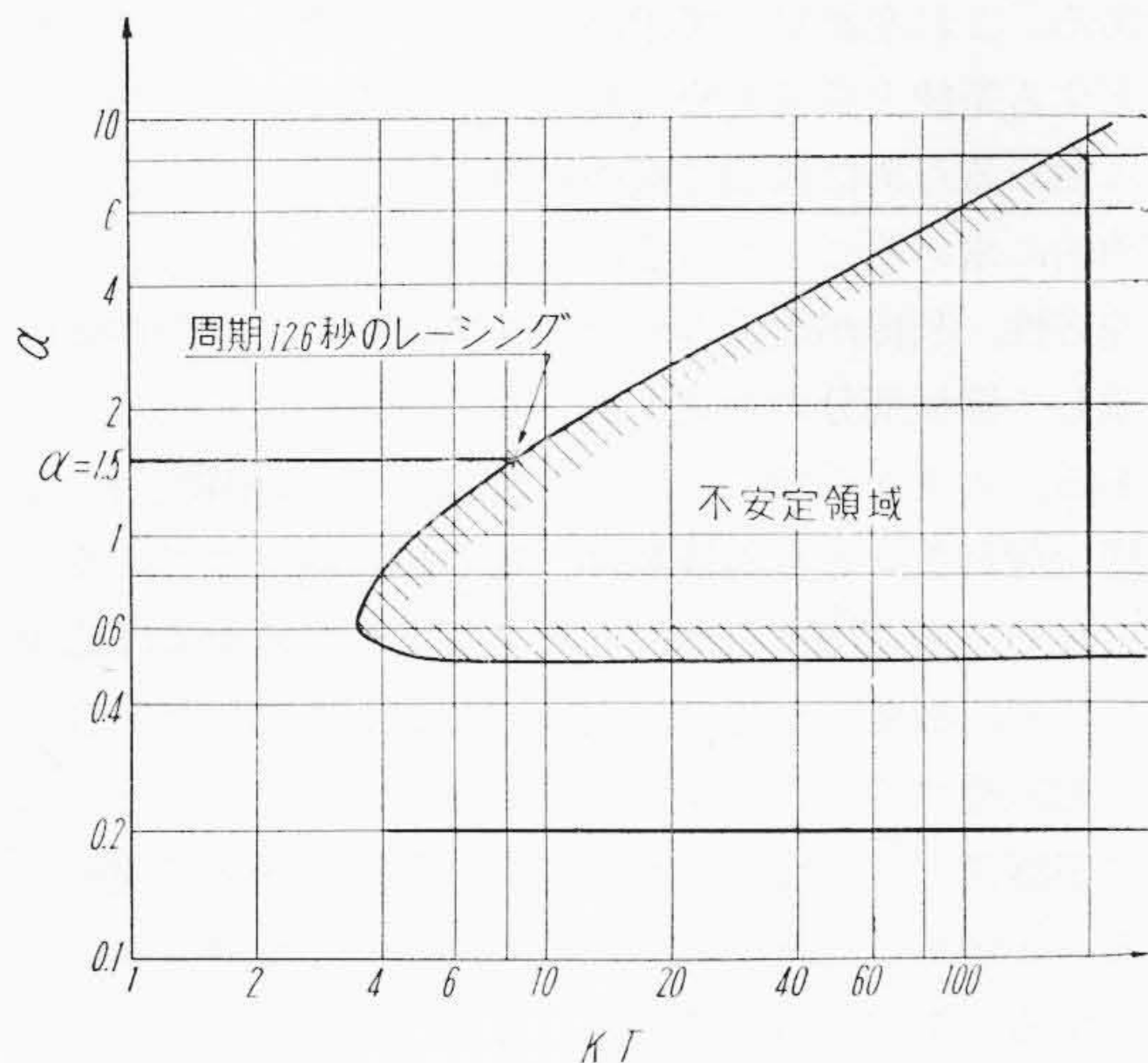
A = 調速機利得 (単位法)

T = 調速機時定数 (s)

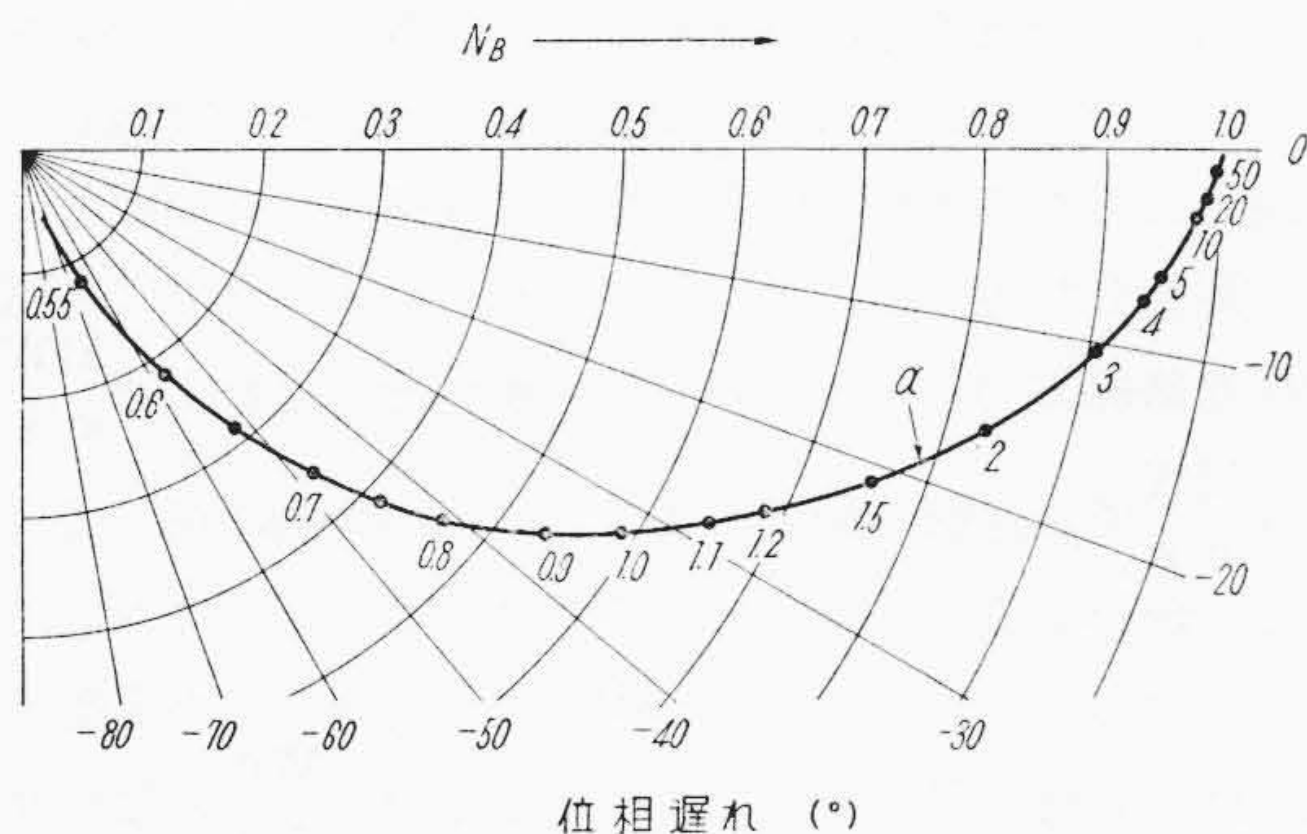
したがって、第11図 (a) は簡単に第11図 (b) のように表される。ただし

$$K = \frac{A}{T_1} \dots\dots\dots (6)$$

なる代置がしてある。したがって特性方程式は



第12図 バックラッシュのある単機系の安定限界



第13図 バックラッシュの等価伝達函数

$$KN + S(1 + TS) = 0 \quad (7)$$

であるから

$$N = X - iY \quad (8)$$

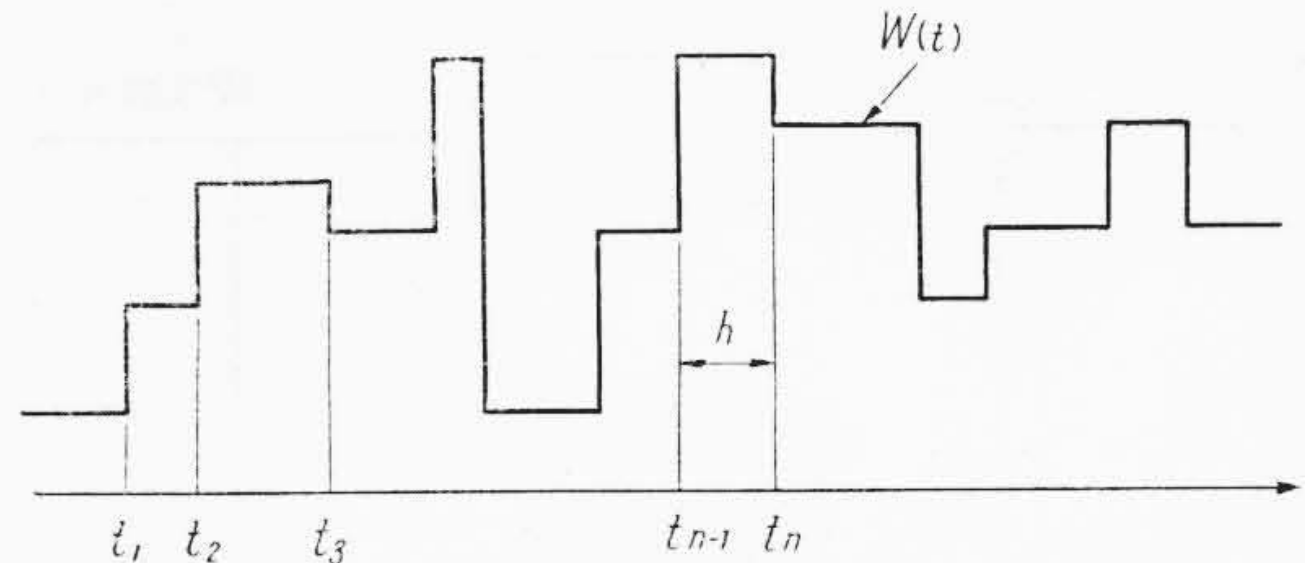
ここに

$$\begin{cases} X = \frac{1}{\pi} \left[\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \sin \left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \right\} - \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \right] + 1 \\ Y = \frac{1}{\pi \alpha} \left(2 - \frac{1}{\alpha}\right) \\ \alpha = \frac{Z_I}{Z_B} \end{cases}$$

とすれば安定限界として

$$\begin{aligned} KT &= \frac{X}{Y^2} \\ &= \frac{\pi \alpha^2}{\left(2 - \frac{1}{\alpha}\right)^2} \left[\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \sin \left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \right\} - \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{1}{\pi} \right] \quad (9) \end{aligned}$$

となりこれを図示すれば第12図のようになる。関西電



第14図 負荷変動パルス

力笠置発電所の例では $\alpha = 1.5$ であるから、安定のためには

$$KT \leq 8.85 \quad (10)$$

でなければならない。ここで第6式における時定数 T は主にダンピングの時定数によるもので、4～10秒の値を有している。 K は調定率、(過渡調定率)に逆比例する常数であるが、 $T = 5$ 秒とすれば第10式より K の安定値は

$$K \leq 1.77 \quad (11)$$

としなければならない。実際現地において復原を無負荷以下で強めて、このレーシングをきわめて少なくすることができた。この時の周期は

$$\frac{2\pi}{KY} = 12.6 \text{ 秒} \quad (12)$$

であつて、現地試験結果15秒とほぼ一致している。定性的にいえばバックラッシュの等価伝達函数は第13図から $\alpha = 1.5$ に対応する値として、利得 0.76 db 位相遅れ 21度であつて系の位相遅れが 180度をこえるようになるためである。

3. 平常運転に対する考察

3.1 系統の電力と周波数変動の関係

負荷変動が第14図に示すように、任意の時刻に任意の大きさで生ずるスイッチの切入によるようなランダムな過程で表わされる場合、調速機はどんな制御結果を示すであろうか。

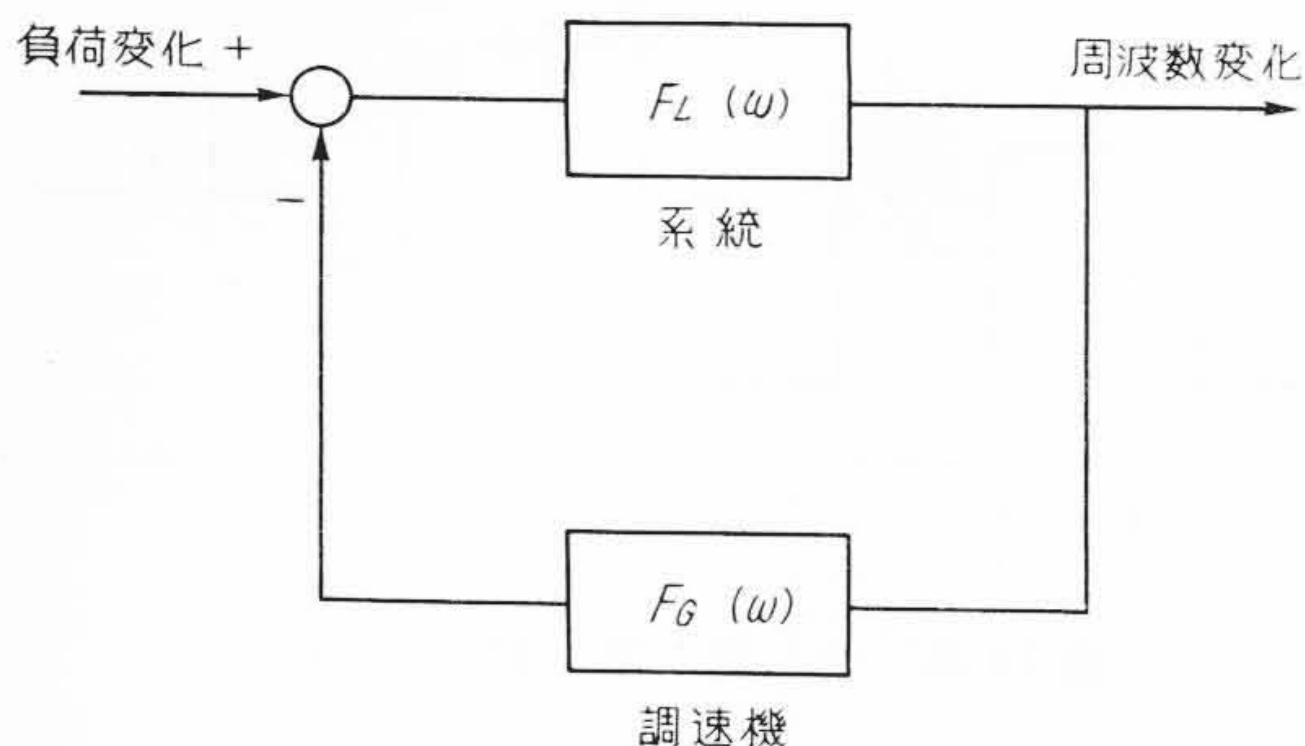
負荷を $W(t)$ で表わしその平均値を $\bar{W}$ とし、負荷が $W + \Delta W$ にある確率を

$$P(W) \Delta W = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta} e^{-\frac{(W - \bar{W})^2}{2\delta^2}} \cdot \Delta W \quad (13)$$

であると仮定する。すなわち負荷は平均値 $\bar{W}$ の周りに分散 δ^2 の正規分布に従つて変動するものとみなすのであるが、実際の試験結果でもこれは確認されている。次に変動の生ずる時間幅 h の確率はポアソン過程

$$H(h) \cdot \Delta h = \lambda e^{-\lambda h} \cdot \Delta h \quad (14)$$

であるとする。ただし λ は単位時間内に生ずる変動の平均数である。もし系統が大きくなると、小さい変動は相殺されるから、 λ は小さくなることが予想される。



第15図 制御系のブロック線図

負荷変動にエルゴード性を仮定すれば相関関数は集合平均として求められる。すなわち負荷の大きさ、幅はそれぞれ第(13)式および第(14)式で与えられており互に独立であるから

$$\begin{aligned}\varphi(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T W(t) \cdot W(t+\tau) dt \\ &= \iint W \cdot h \cdot P(W) H(h) dw dh \dots\dots\dots (15)\end{aligned}$$

となり負荷変動の自己相関関数 $\varphi(\tau)$ は結局

$$\varphi(\tau) = (\sigma^2 - \bar{W}^2)e^{-\lambda|\tau|} + \bar{W}^2 \dots\dots\dots (16)$$

で表される。簡単のために調速機は、平均負荷からの偏りがあったときのみ動作すると考え、 $\bar{W}$ を今後考えないことにする。また相関関数を規格化すればそのとき第16式は

$$\varphi(\tau) = e^{-\lambda|\tau|} \dots\dots\dots (17)$$

であるからこれをフーリエ変換して電力スペクトル

$$\Phi(\omega) = \frac{2\lambda}{\lambda^2 + \omega^2} \dots\dots\dots (18)$$

を導くことができる。

調速機を含めた系統の閉ループ伝達関数は第15図のように

$$F(\omega) = \frac{F_L}{1 + F_G \cdot F_L} \dots\dots\dots (19)$$

したがって、周波数変動の電力スペクトルは

$$\Phi_0(\omega) = \left| \frac{F_L}{1 + F_G F_L} \right|^2 \frac{2\lambda}{\lambda^2 + \omega^2} \dots\dots\dots (20)$$

であるが、これを逆変換すれば相関関数が求まるわけである。そして周波数変動の相関も求まり、変動の様子が判明するのであるが、実際の系統に対して省略しない調速機の伝達関数を用いて第(20)式を逆変換することはほとんど不可能である。今後電子計算機の利用によつて初めて可能となろう。標準偏差を求めるにはこの逆変換において、 $e^{i\omega\tau} = 1$ とおけば良いから $\Phi_0(\omega)$ の偶関数なることを利用して

$$\sigma_0^2 = \frac{\sigma^2}{\pi} \int_0^\infty \left| \frac{F_L}{1 + F_G F_L} \right|^2 \frac{2\lambda}{\lambda^2 + \omega^2} d\omega \dots\dots (21)$$

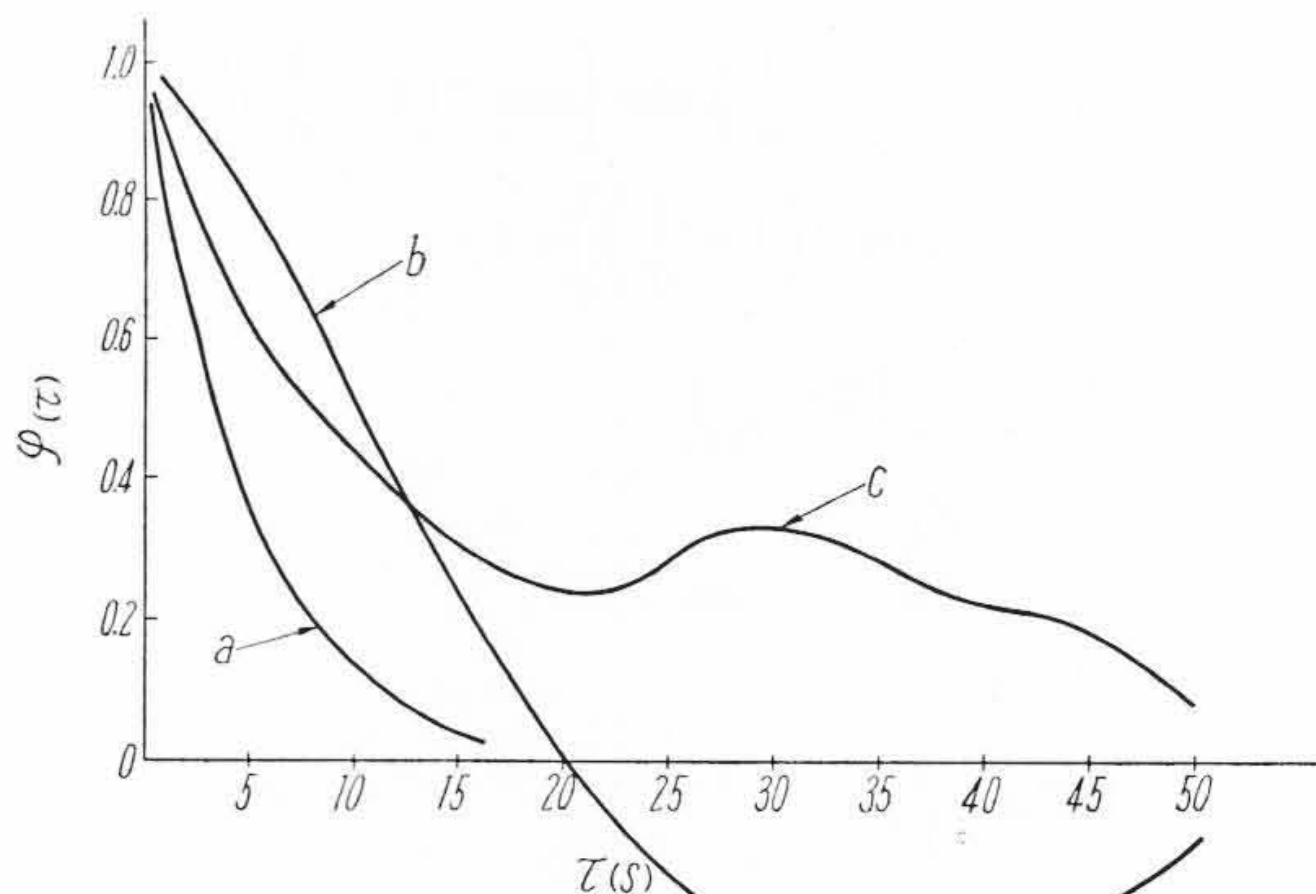
である。これを計算機で求めることができるならば、対象とする系統と負荷変動に対して、希望する周波数偏差内に納めるためには調速機の特性をどう設定すべきかを理論的に求めることが可能になるはずである⁽⁶⁾。

速応性、利得が改善された調速機はそれだけ動作頻度が激しく機械部分の摩耗も大となり寿命が短くなるわけである。大きな系統では、負荷の増減が互に相殺されて、制御を行わなくとも周波数は一定の幅に納まっている。したがって調速機は自然に回復する微細な変動には応動しないで、必要とする値以上に周波数が変動した場合のみ出力調整することにすれば頻度も少なくなる。そのために不感帯を設けたり、開閉方向の利得を変えて運転をすることがある。その場合定量的にどの程度動作頻度が減少するかを求めるのはかなり複雑な計算であるが同様の手順で計算できる。

3.2 実系統における電力と周波数の変動

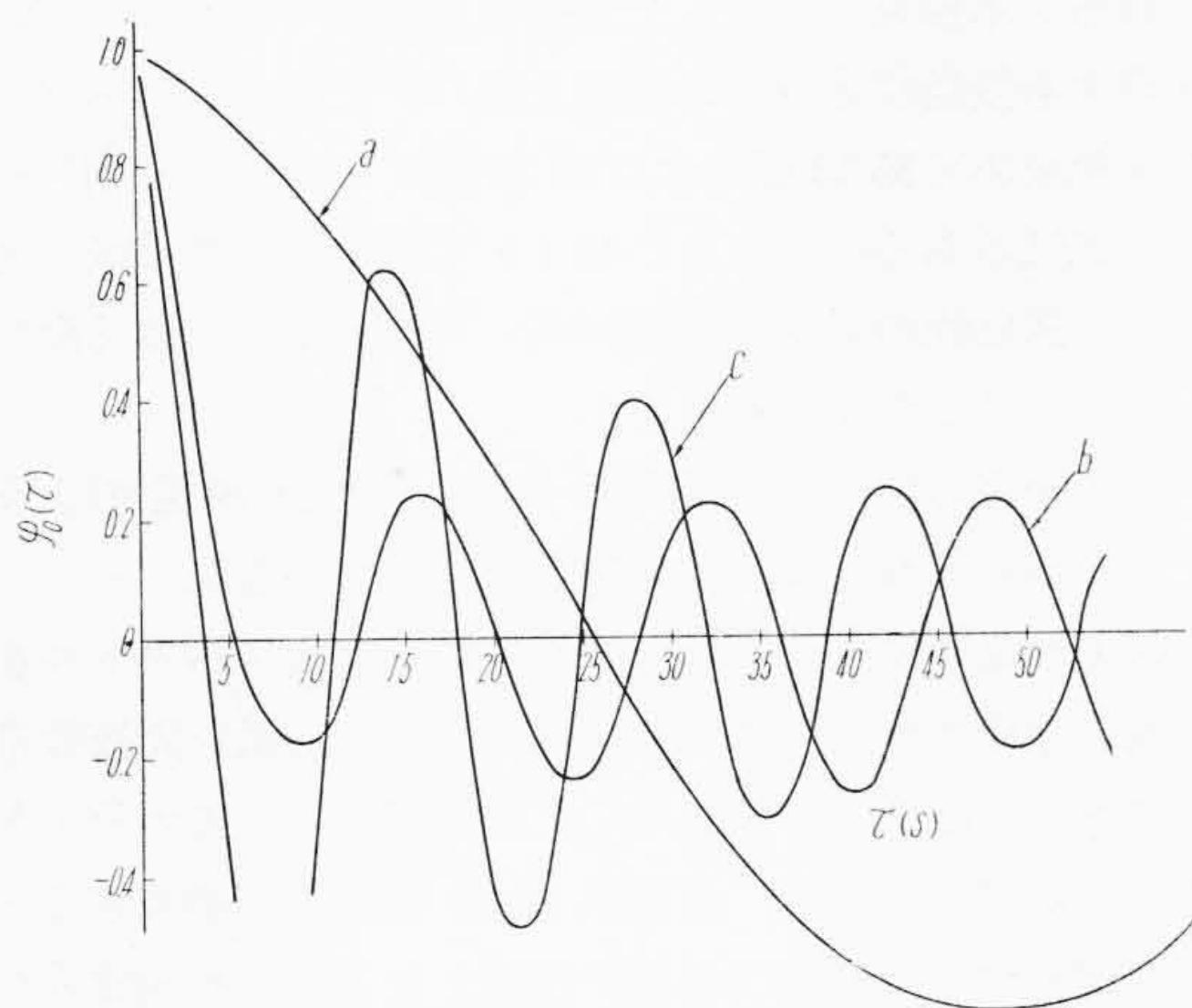
実際の大系統では、負荷変動や周波数変動がどのように生じているであろうか。関西電力株式会社で実施した試験の報告⁽⁷⁾によれば関西全系の調速機を負荷制限によつて運転した場合と、調速機運転にした場合とでは北陸幹線連絡線電力を σ として σ/σ_0 の値がそれぞれ $17.8 \frac{\text{MW}}{\text{c/s}}$ 、 $37.3 \frac{\text{MW}}{\text{c/s}}$ で調速機の制御により、 σ/σ_0 が2倍に達していることがわかる。系統を小さくすればこの傾向はさらに著しくなる。たとえば 114.5 MW の平均電力の小系統で調速機を負荷制限によつて運転すると $4.3 \frac{\text{MW}}{\text{c/s}}$ となり非常に小さい値であつたものが、調速機運転とし、しかもダンピングを除外した状態では、 $17 \frac{\text{MW}}{\text{c/s}}$ となり大系統のそれに近づく値を示しており制御効果の著しいことが了解される。

電力変動の相関関数を、長時間記録より求めると理論



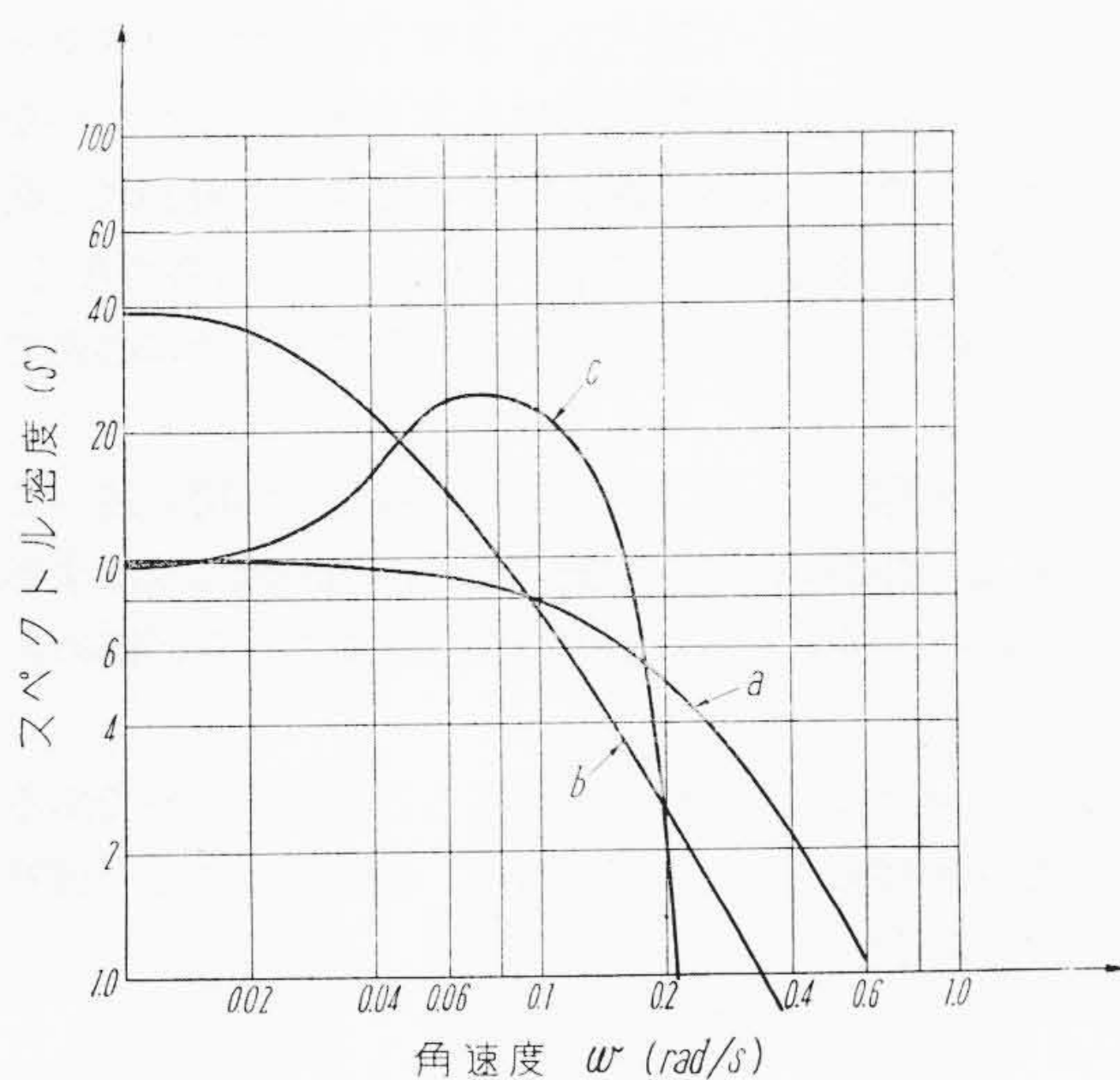
- (a) 調速機を負荷制限した場合
- (b) 調速機運転とした場合
- (c) ダッシュボット除外の場合

第16図 電力の自己相関関数
単独小系統の電力の自己相関関数



- (a) 调速機を负荷制限した場合
- (b) 调速機運転とした場合
- (c) ダッシュポット除外の場合

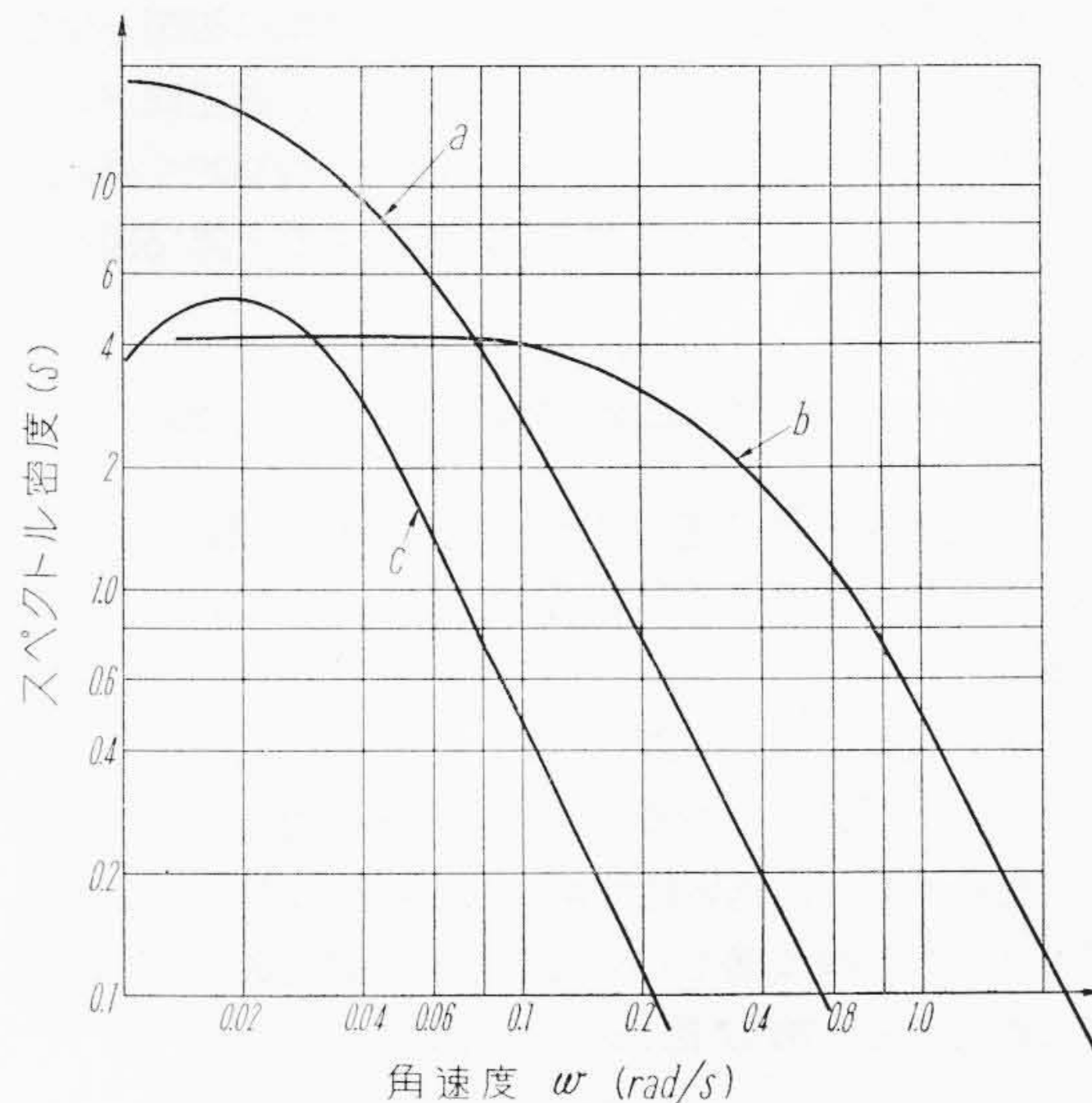
第17図 周波数の自己相関関数
単独小系統の周波数の自己相関関数



- (a) 调速機を负荷制限した場合
- (b) 调速機運転とした場合
- (c) ダッシュポット除外の場合

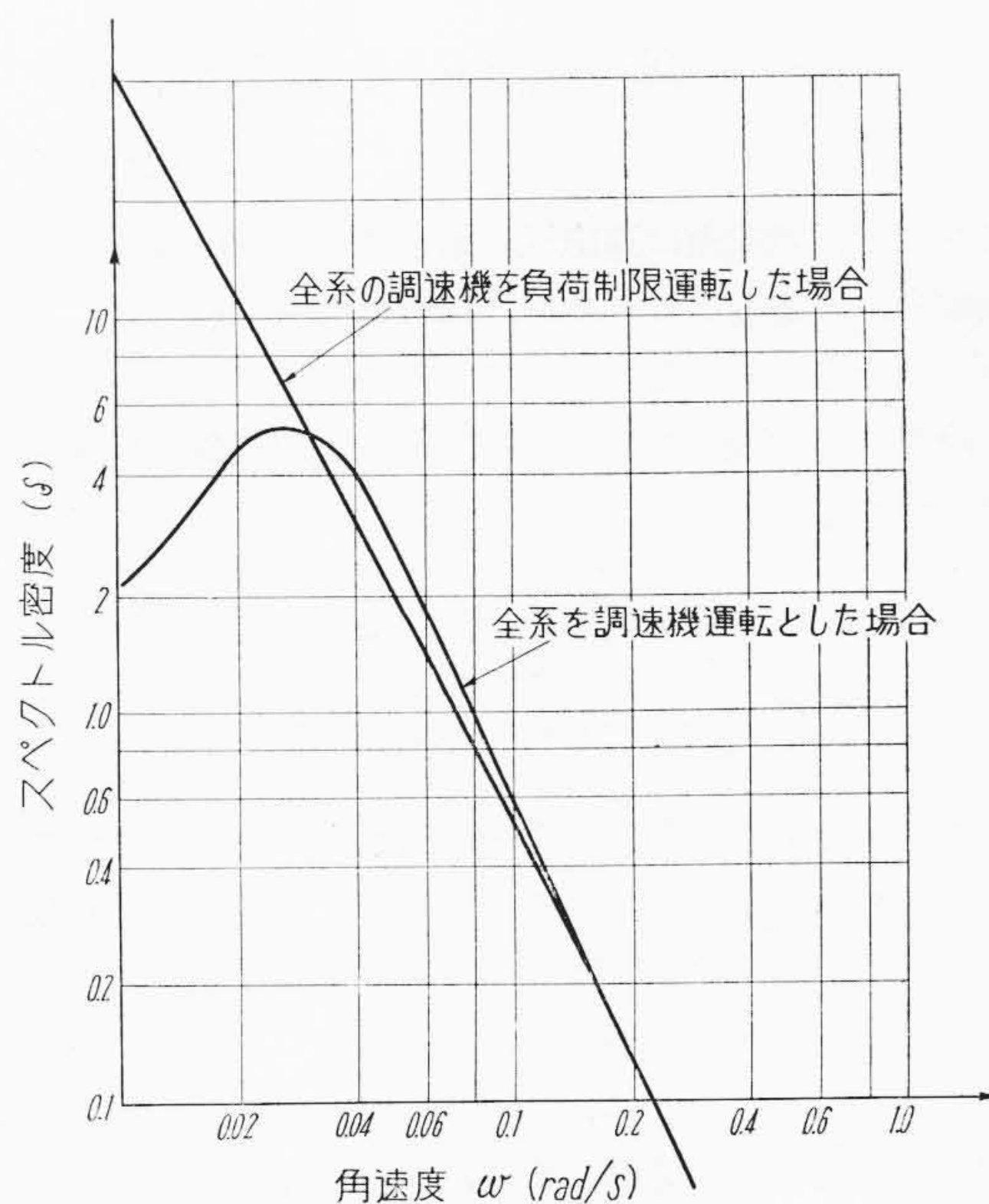
第18図 電力の電力スペクトル
単独小系統の電力の電力スペクトル

的には無限に長い時間から求めるべきであるが実際は十分長い有限時間より求める⁽⁸⁾と、前述のようなポアソン過程ではなく、多少の振動成分の含まれていることがわかる。振動成分はいつでも減衰するものであるが、周期は数十秒から200秒程度の間で比較的大きく緩慢な変化である。またランダム性は比較的弱く、最も強い場合でも 0.2 sec^{-1} で弱い場合は 0.01 sec^{-1} であまり急激な変化をしないことがわかる。一般に系統容量が大きくなるとランダム性の弱くなることは前に述べたが、周期的



- (a) 调速機を负荷制限した場合
- (b) 调速機運転とした場合
- (c) ダッシュポット除外の場合

第19図 周波数の電力スペクトル
単独小系統の周波数の電力スペクトル



第20図 関西全系統の周波数の電力スペクトル

成分も長周期でゆるやかなものになる。単独の小系統において调速機に全部负荷制限を付した状態では

$$\varphi(\tau) = e^{-\frac{\tau}{5}} \dots\dots\dots (22-a)$$

となり第16図(a)に示したように少し強い変化を示しているが、调速機運転にすると调速機はこの负荷変動に

よる周波数変動に反応するから、電力自体に相関を生じそのランダム性も弱くなるのである。もし調速機がいくぶん不安定であると、これによる電力の周期的変動が、含まれてくる。たとえば調速機運転にすると第16図(b)のように

$$\varphi(\tau) = e^{-\frac{\tau}{20}} - 0.2 e^{-\frac{\tau}{35}} \sin \frac{2\pi}{50} \tau \dots\dots (23 \sim a)$$

となる。それぞれの電力スペクトルを第18図に示したが、周波数帯域はいずれも高い範囲を含まないことがわかる。

系統周波数について調べると、調速機の制御がどうなっているかが良くわかる。単独小系統の調速機のダンピングを除外して、速応性を増加した場合は前述のように $\sigma/\sigma_0 = 17$ で効果が著しいのであるが、周波数の相関関数を求めてみると第17図(c)に示すように

$$\varphi_0(\tau) = e^{-\frac{\tau}{36}} \cos \frac{2\pi}{14} \tau \dots\dots\dots (24 \sim a)$$

と周期 14 秒の振動成分が表われている。しかも減衰は 36 秒で小さいから、めだつた振動成分を有するわけである。これに対応した電力の相関関数は第16図(c)のように

$$\varphi(\tau) = e^{-\frac{\tau}{30}} \left(\cos \frac{2\pi}{80} \tau - 0.5 \sin \frac{2\pi}{10} \tau \right) \dots\dots\dots (24 \sim b)$$

であつて、調速機は速応性の増加により 80 秒周期の振動成分には反応しているが、10秒周期のものに対してはまだ十分応じきれないものであることがわかる。第(22-a)式および第(23-a)式に対応した周波数の相関関数は、それぞれ

$$\varphi_0(\tau) = 0.4 e^{-\frac{\tau}{25}} + 0.6 \cos \frac{2\pi}{90} \tau \dots\dots (22 \sim b)$$

$$\varphi_0(\tau) = 0.75 e^{-\frac{\tau}{2.8}} + 0.25 \cos \frac{2\pi}{16} \tau \dots\dots (23 \sim b)$$

である。後者の場合には電力に周期的成分が含まれているが、減衰するものであるのに対して、周波数は減衰しておらず、電力変動には該周期の振動成分が存在しないことから、調速機の不安定によるものであることがわかる。第(22~a)式を第(22~b)式と比較してわかるとおりこの場合は調速機の影響はまったく表われない(負荷制限してある)のに、周波数に 90 秒の非減衰振動成分があり、これは系統自体の振動成分によるものと解釈

される。単独系に比較して全系の周波数の相関は、常に減衰する振動成分でその周期も長い。それぞれのスペクトルを求めて第18図および第19図に示したが、調速機に速応性のある場合とない場合とでは、周波数帯域が異なり、速応性のある調速機が高い周波数帯域で良く動作していることが示されている。

関西全系の周波数の電力スペクトルは第29図のようになるがいずれも高周波数帯域を含んでいない。

以上のように、電力および周波数の電力スペクトルを実際の系統で求めてみるといずれも比較的低い周波数帯域にあり、第9, 10図に示した調速機で十分であることが推定される。必要以上に、速応性を増加すると調速機を含めた系統は低域低波器となるが、振動成分が非減衰となつて表われてくるから十分注意しなくてはならない。

4. 結 言

電気調速機の特性と、関西電力笠置発電所における現地試験の結果について述べた。本文で述べたバックラッシュも、従来の旧型調速機ではあまり問題となつていなかったもので、高感度の調速機にして初めて現われた問題である。制御系の設計においては、一部の改修でなく、かなり広範囲に総合的な検討を進めることが特に必要である。

また近頃問題になつている時系列解析の応用を述べたが調速機の制御動作が、系統の電力、周波数に及ぼす影響を明確に把握するのに有力な手段であることが認められる。

本稿は現地試験の結果に負うところが多いのであるが、関西電力株式会社笠置発電所、関係各位に厚く御礼申上げて謝筆する。

参 考 文 献

- (1) 電気ガバナ特集: OHM. Vol. No. 3 p. 21 (1957)
- (2) 小林, 舩沢, 近野: 日立評論 38, 1225(昭31-10)
- (3) 実吉, 横田: 自動制御 5, 1 p. 29 (1958)
- (4) 沼倉: 自動制御 4, 4 p. 5 (1957)
- (5) Shen, C. N., Miller, H. A. and Nichols, N. B.: Trans. ASME Vol. 79 1957 p. 585
- (6) 舩沢, 海老名, 山口: 日立評論 39, 849(昭32-8)
- (7) 関西電力株式会社編: AFC 予備試験結果報告書
- (8) Tucker, M. J: British J. App. Phy. 8 p. 138 1957