

水車調速機と系統制御

Water Turbine Governor and Power System Control

大石朝男* 山口幸男* 小松 凱**
Asao Ōishi Yukio Yamaguchi Gai Komatsu

内 容 梗 概

自動制御理論の発展により水車調速機の理論的な解析はかなり進んでいるが、実際に水車調速機の性能が電力系統の周波数制御にどのような役割を果たしているかを定量的に表現したものは少ないようである。ここでは水車調速機自身の果す役割と水車調速機に自動周波数調整装置を付加した場合に果す役割をボード線図を用いて論じてみた。

1. 緒 言

近年とくに、電力系統の容量が増大しつつあるが、電力需要の中でも製鉄用圧延機などの急しゅんな変動負荷と、繊維工業などのように周波数変動を極端に嫌うものが多くなってきている。周波数変動を小さくするには系統定数を小さくすることが一つの解決策であるので、従来の水車調速機にたいして応答度の改善が要求され、さらに自動周波数調整装置を設けた貯水池容量の大きいダム式調整発電所がクローズアップされてきた。新設の大容量水力発電所では機械式調速機に代って電気式調速機が採用され、かつ、結合運転が行われる傾向にあるのも前述の新しい要求に答える結果であるが、ここでは機械式あるいは電気式水車調速機の標準の仕様として要求される特性をボード線図の上で検討を加え、さらに付加装置の使用による得失を量的にはあくして、調整発電所の機能を論じようとするものである。

2. 水車調速機の特性

水車調速機に要求される仕様はおおむね次のようなものである。

- (1) 速度調整範囲 $-10\% \sim +3\%$
- (2) 速度垂下率 $0 \sim 6\%$
- (3) 過渡速度垂下率 $0 \sim 50\%$
- (4) 弾性復原の時定数 $0 \sim 10$ 秒
- (5) 不 動 帯 0.1% 以下
- (6) 応 答 速 度 $1/40$ (単位出力/秒 -0.1 c/s) 以上

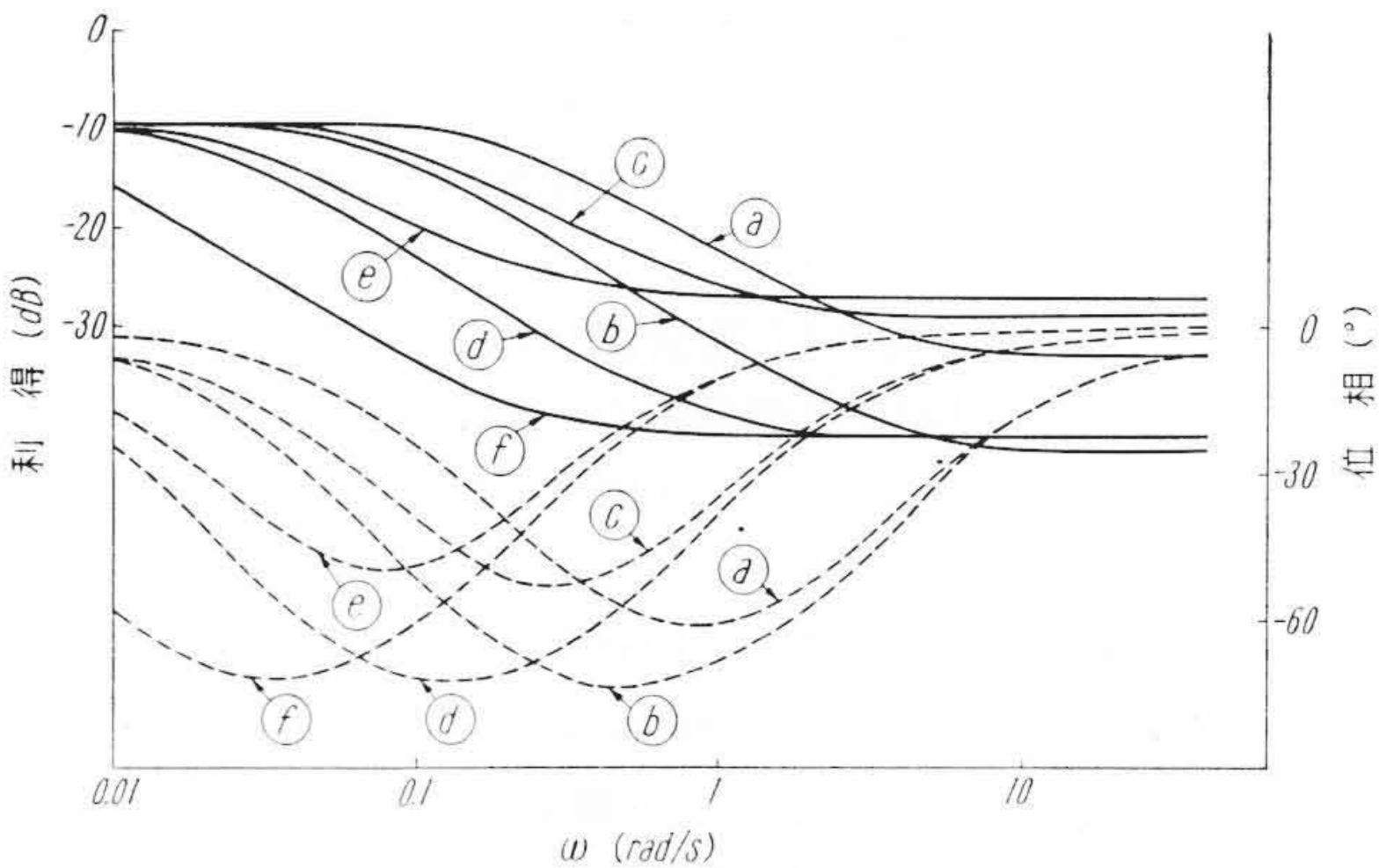
速度調定率 3% とし、過渡速度調定率の強さ、時定数を変えた一連のボード線図を第1図に示す。

各水力発電所の調速機の特性として第1図の一連の特性のうち、いずれを選ぶかはその水力発電所の地理的、地形的条件のほかに、電力系統における重要度、および各機器の特性から決定されるが、主として

- (1) 水車および発電機の特性
 - a. 水車の自己制御性、発電機の慣性
 - b. 水圧鉄管内の水の慣性
 - c. 水車および発電機の効率の変化 (制動負荷係数の一部を占める)
 - (2) 電力系統の特性
- がある。

3. 水車および発電機の特性

水車の出力は次式で表わされるように有効落差、流量および効率



補助サーボモータ全ストローク1単位、速度垂下率3%
⑧ 過渡速度垂下率3%時定数1s ⑩ 過渡速度垂下率30%時定数4s
⑨ 過渡速度垂下率30%時定数1s ⑪ 過渡速度垂下率3%時定数10s
⑦ 過渡速度垂下率3%時定数4s ⑬ 過渡速度垂下率30%時定数10s
第1図 日立電気式水車調速機ボード線図

の積であるため、効率および有効落差の変化の影響を受けるのは当然である。

すなわち

$$P = 9.8 \cdot \eta \cdot H \cdot Q$$

ここで P : 発電機出力 (kW)

η : 水車および発電機効率

H : 有効落差 (m)

Q : 流量 (m^3/s)

微小変化範囲内では、上式を単位法では次のように表わしうる。

$$P = h + q \dots \dots \dots (1)$$

一方案内羽根開度、流量および有効落差の間には

$$Q = K \cdot \sqrt{H \cdot U}$$

ここで K : 流量係数 (厳密には案内羽根開度の関数)

U : 案内羽根開度

微小変化範囲では、単位法で表わせば

$$q = \frac{1}{2}h + u \dots \dots \dots (2)$$

また、水圧鉄管内では案内羽根開度の変化にともなう流量の変化によって、鉄管内の水の慣性による水圧の変化が起る。すなわち、

$$\frac{L}{g} \frac{dQ}{dt} = -AH$$

ここで L : 水圧管路長さ

A : 水圧管路断面積

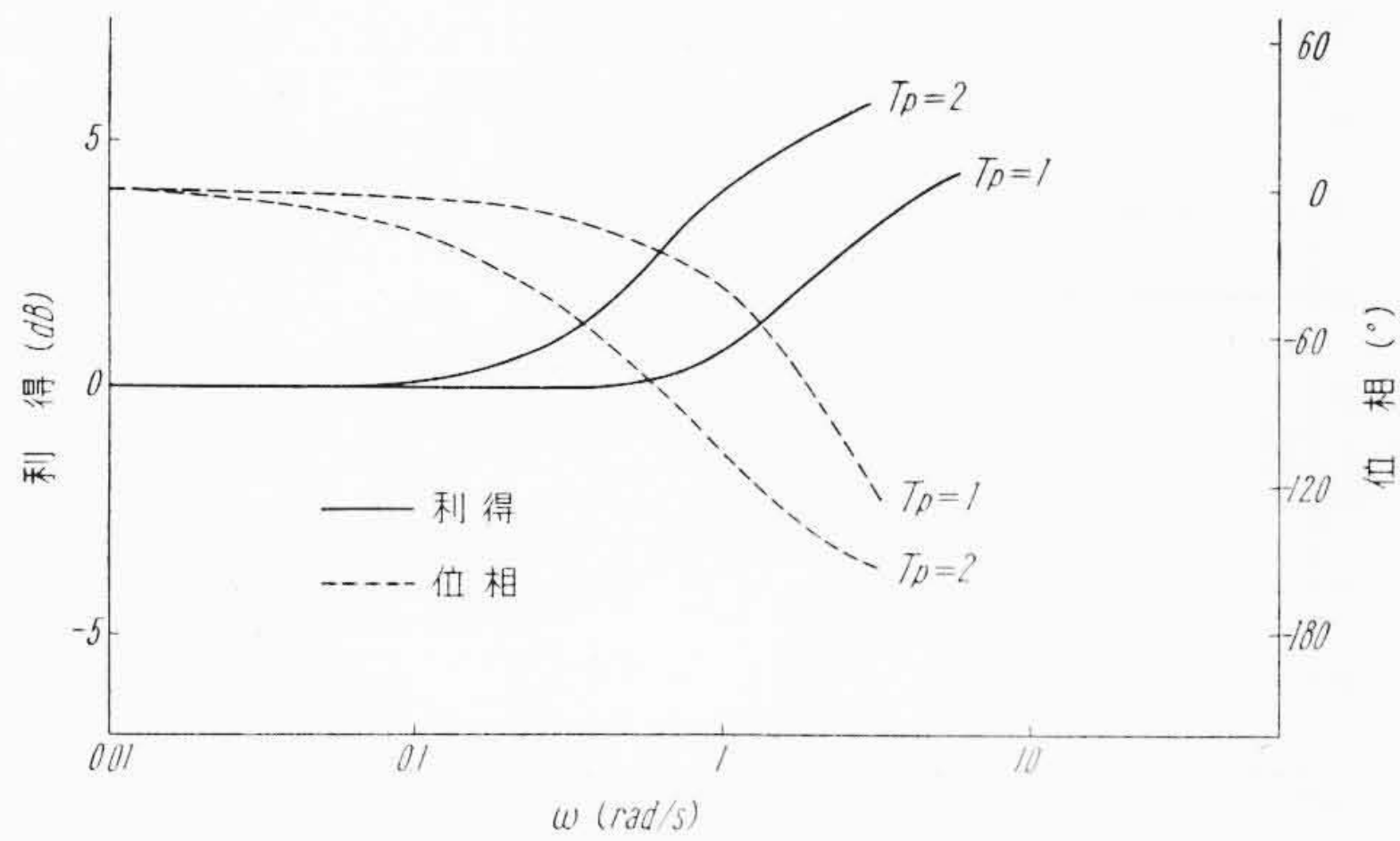
g : 重力の加速度

微小変化範囲では、単位法で表わせば、

$$T_p \cdot S \cdot q = -h \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{ただし } T_p = \frac{LQ_0}{AgH_0}$$

* 日立製作所日立工場
** 日立製作所国分工場



第2図 水圧管路を考慮した時の単位法で表わした
(出力/ガイドベーン開度)のボード線図

S: ラプラス演算子

(1), (2) および (3) 式より案内羽根開度と発電機出力との関係
を求める

$$P = \frac{1 - T_p \cdot S}{1 + \frac{1}{2} T_p S} \cdot u \quad (4)$$

となる。一般に鉄管慣性係数 T_p は2以下であるが、 T_p が大きくなると位相遅れが著しくなる。第2図に T_p を変えた場合のボード線図上に現われる影響を示す。 $\omega = 0.1 \text{ rad/s}$ 以下では利得は変わらず、案内羽根開度と発電機出力は比例し、位相遅れのないことがわかる。すなわち、普通の系統周波数の変動速度は $\omega = 0.1 \text{ rad/s}$ 以下の場合が多いので、鉄管慣性係数の影響を考慮する必要がないことを示している。無負荷時のレーシングについては、 $\omega = 0.1 \text{ rad/s}$ 以上のものがあり、利得が大きく、位相遅れが急激に大きくなるので、鉄管慣性係数 $T_p = 2$ 付近のものでは無視できないことが多い。

4. 系統の特性

系統の構成について考えてみると、発電機、調相機、各種電動機などの回転機械のほか、電灯・テレビ、電解槽などの静止負荷が送電線によって連結されている。その解析は複雑であるが、近似的には、回転体の慣性、制動負荷係数および調速機に要約し、実際の系統について各種の試験を行い、伝達関数を決定している。すなわち

$$T_m \cdot S f = -(K_L f + G(S) \cdot f) + p \quad (5)$$

ここで T_m : 回転体慣性係数

K_L : 制動負荷係数

$G(S)$: 調速機特性関数

となる。ここでいう調速機特性は2.1で述べたものと構成は同じであるが、周波数の周期的変化が比較的遅い部分を扱うため近似的な表示をしている。

現在国内の系統について回転体慣性係数および制動負荷係数の範囲は

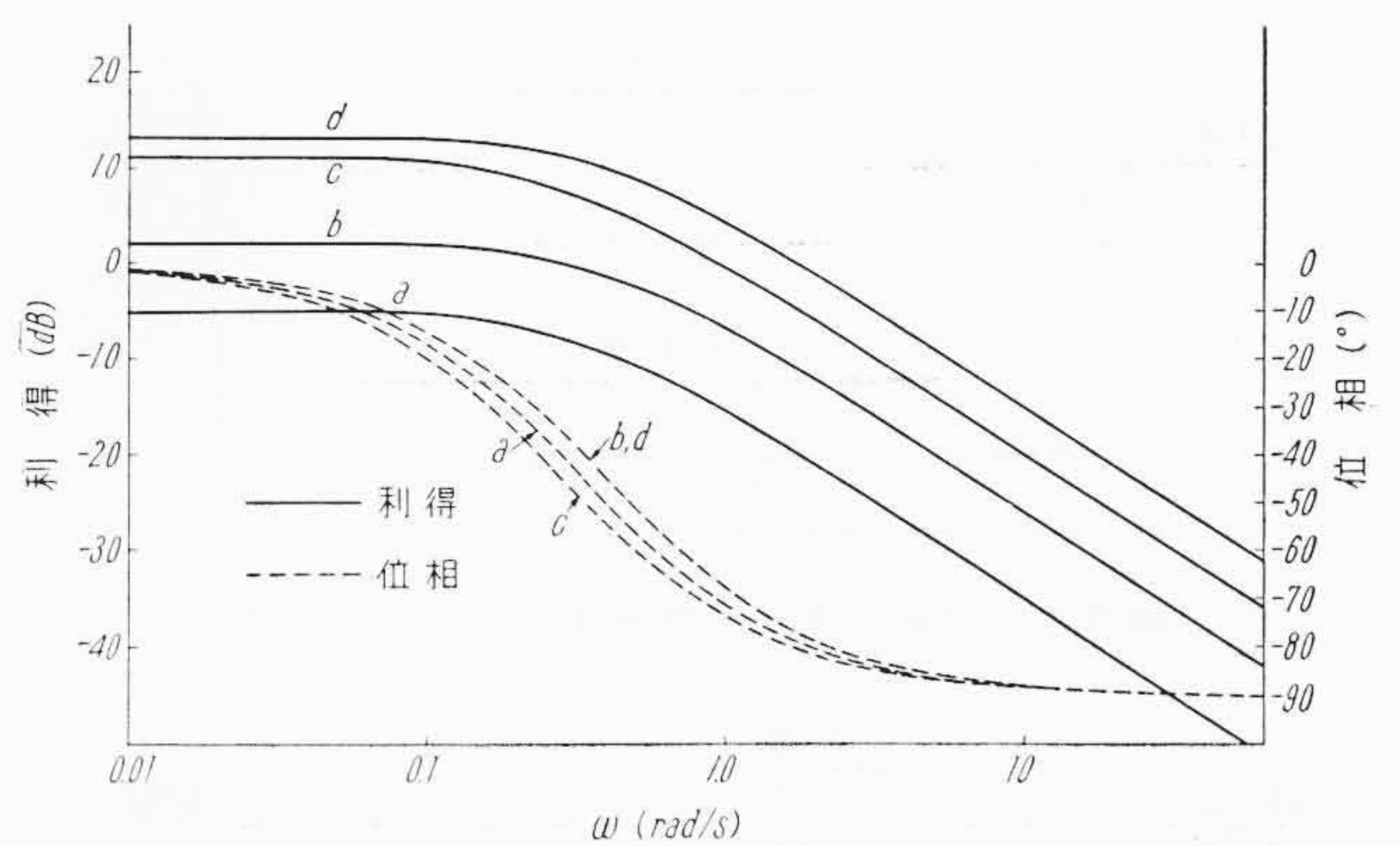
$$T_m = 5 \sim 60 \text{ MW} \cdot \text{s} / 0.1 \sim$$

$$K_L = 2 \sim 20 \text{ MW} / 0.1 \sim$$

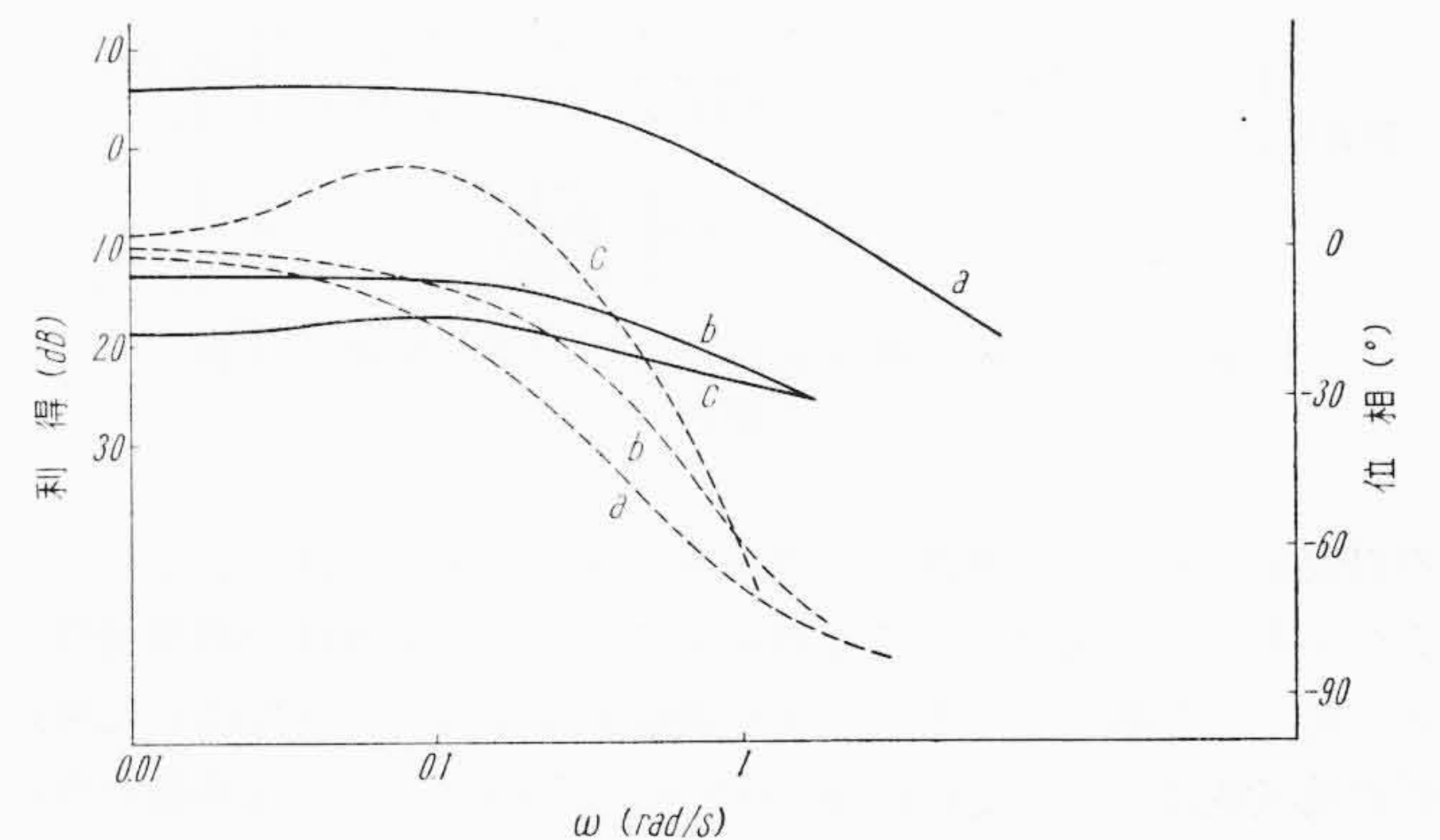
であり系統容量の増大に伴い増加の傾向にある。この範囲の系統でフリー調速機が存在しない場合の系統の特性をボード線図に示すと第3図のようになる。

一方系統中に含まれるフリー調速機の容量が大きければ、それだけ系統自体安定になるはずであるが、フリー調速機の容量が全系統容量のおおの0%, 20%および45%占める場合についてボード線図を画くと第4図になる。

この場合調速機フリー発電所を火力と水力に分け、おのおの一次遅れ要素で近似し、火力の時定数1秒、水力を10秒とし、等価速度調定率を火力7%, 水力5%と仮定している。系統諸係数が小さい時でも、フリー調速機の容量が大きくなると大容量系統の特性に近



第3図 系統の(周波数/負荷変化)のボード線図
0.1~10 MW 0 db
a: $1/K_L = 0.55$, $T_m/K_L = 3''$
b: $1/K_L = 1.25$, $T_m/K_L = 2.5''$
c: $1/K_L = 3.55$, $T_m/K_L = 3.5''$
d: $1/K_L = 4.5$, $T_m/K_L = 2.5''$



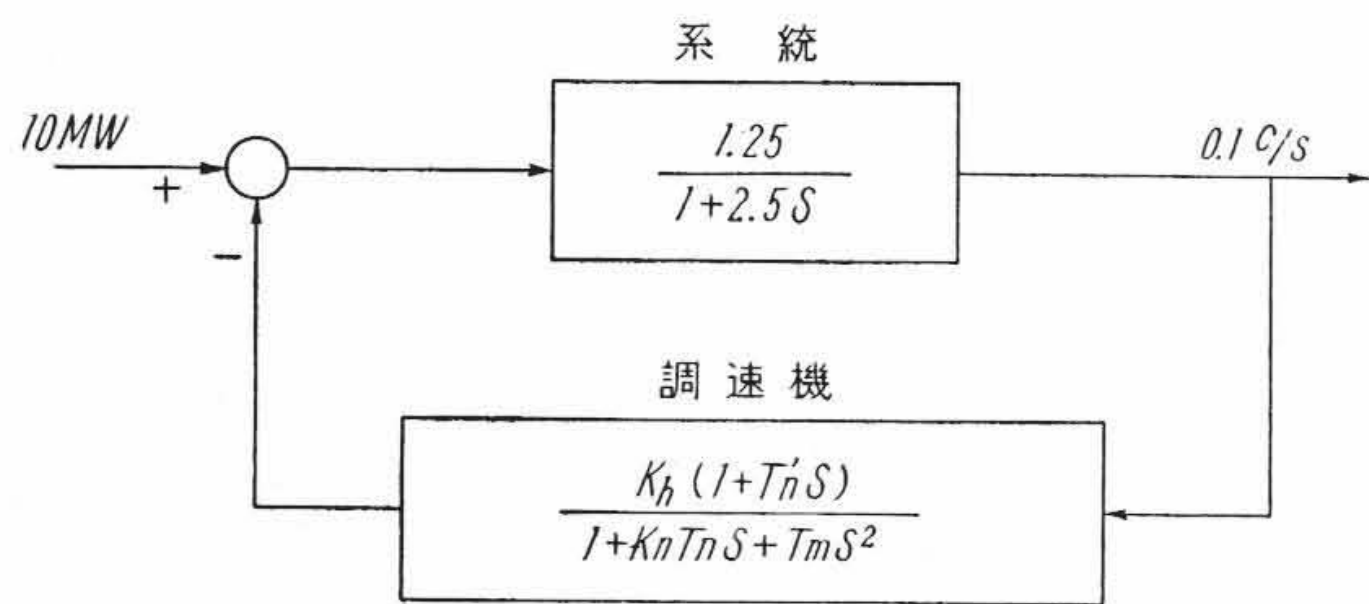
第4図 系統特性に及ぼす調速機フリー運転の影響
a: 調速機フリー運転 0%
b: 調速機フリー火力 20%
c: 調速機フリー火力 20%
調速機フリー水力 25%
単位 ~MW

くなることわかる。

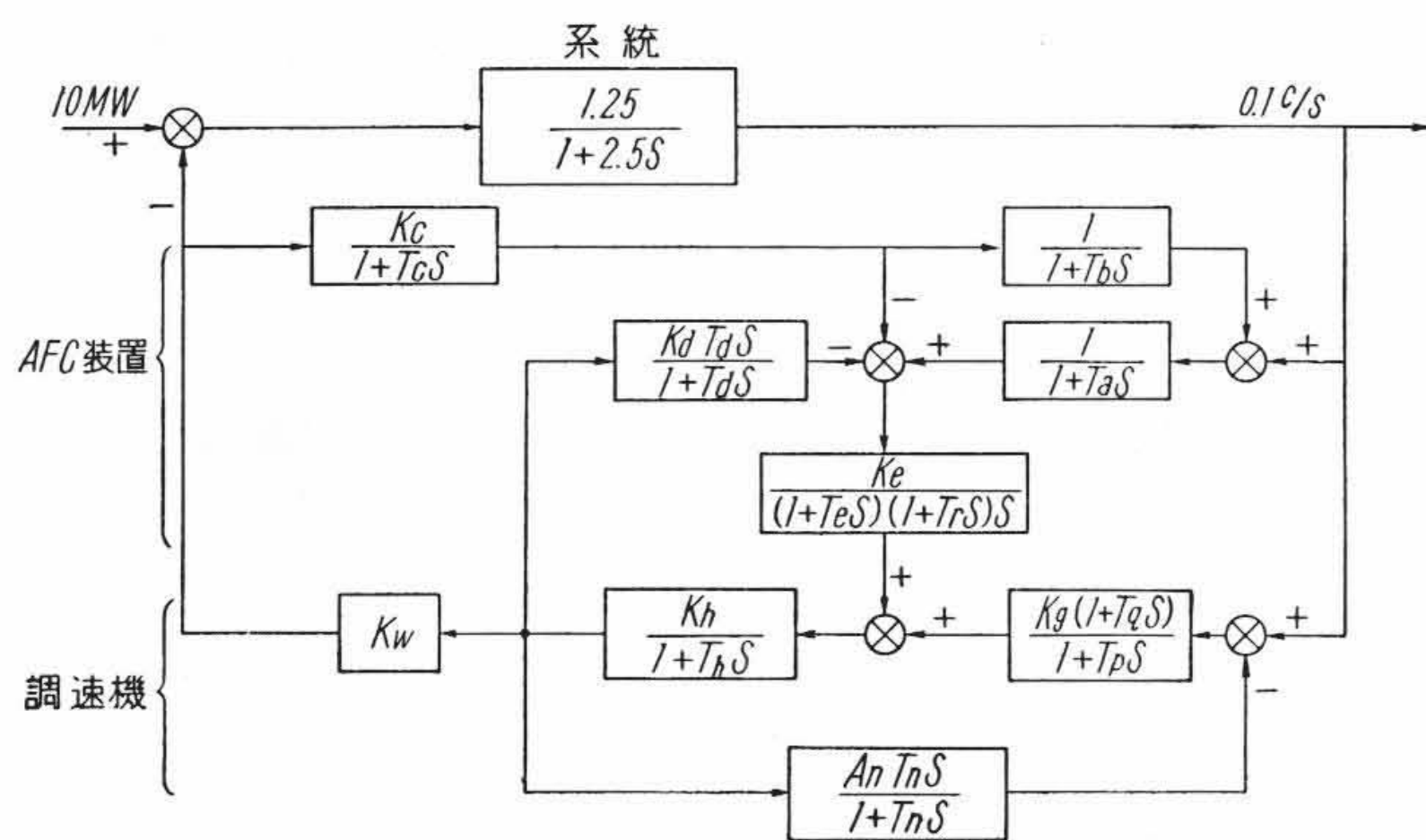
5. 水車調速機と AFC 装置

ある実在の系統について、その系統に所属する水車調速機が、どのような役割を演ずるかを調べることにする。

系統には前節で述べたように、制動負荷係数による自己制御性があり、また既設調速機の機能も加わって、負荷変化に対する周波数変化の関係は、巨視的に一次遅れとして扱うことが多い。このような系統の周波数を調速機で制御する場合の模型的表现を第5図のブロック線図に示した。実際には調速機出力は、水車案内羽根操作機構への入力となり、水路および水車の伝達関数、さらに発電機、変圧器、送電線路などを経て負荷側に連絡するものであるが、簡単のためにこの間を比例要素とした。また水車調速機に AFC 装置を付加した場合のブロック線図を第6図に示す。この例では、AFC 装置は系統周波数の変化分を増幅して、調速機の手動調整電動機を駆動する方式を採用しており、装置の安定度を高めるためサーボモータ開度ならびに発電機出力の両方より復原するようになっている。第5図の調速機と第3図bに示す系統との系において、調速機の手動調整率や過渡速度調整率をパラメータにして周波数と負荷外乱の関係を示すボード線図は第7図のとおりになる。この利得特性と第3図の系統単独のボード線図とを比較して明らかなように $\omega = 1.0 \sim 10 \text{ rad/s}$ の周波数領域に対しては、調速機の効果は少ない。これは調速機のもつ時定数のために、周期6秒以下の変動に対して調速機の利得が低下してしまうからである。水車調速機においては調速機



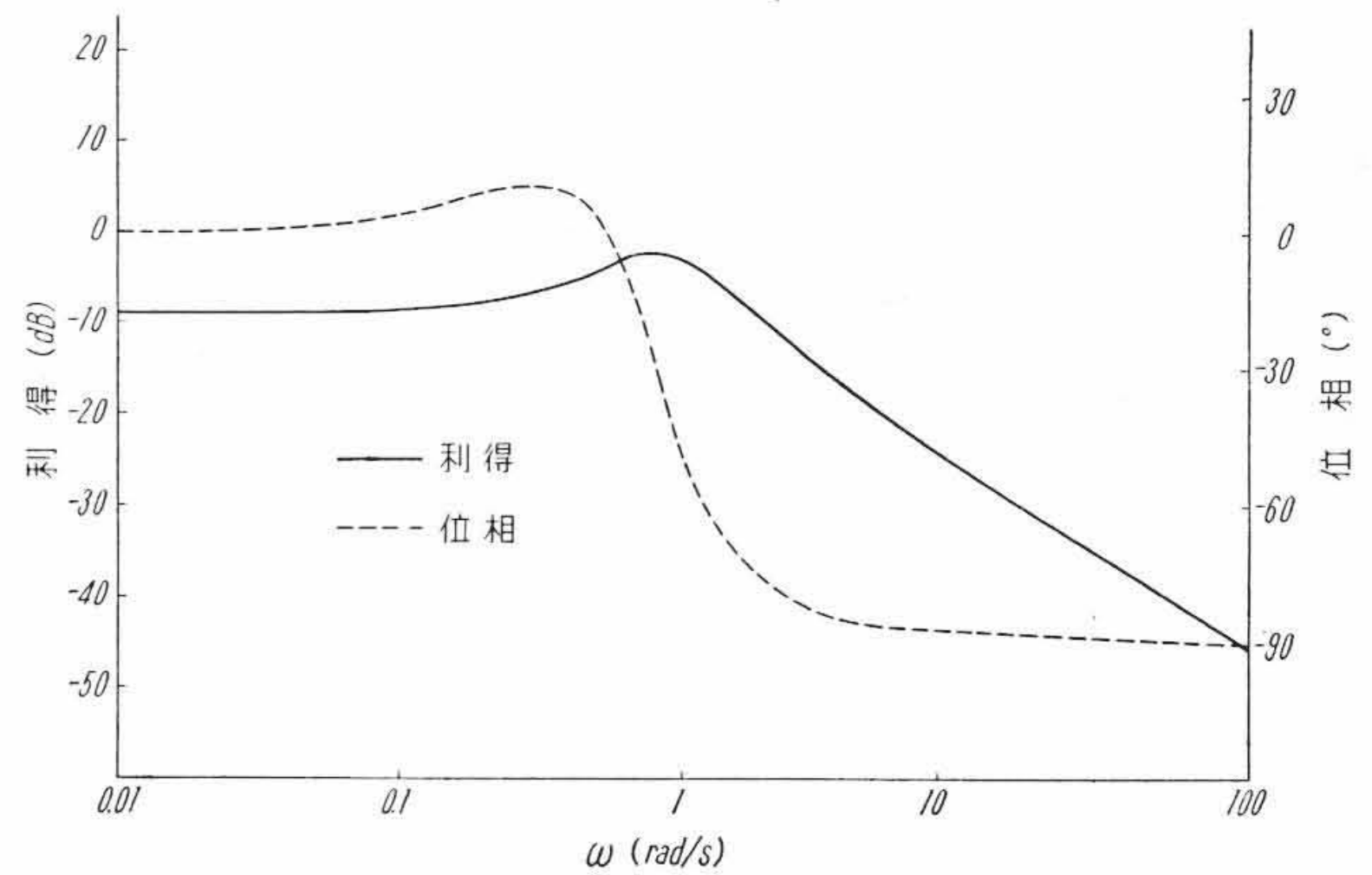
第 5 図 系統と電気式調速機のブロック線図



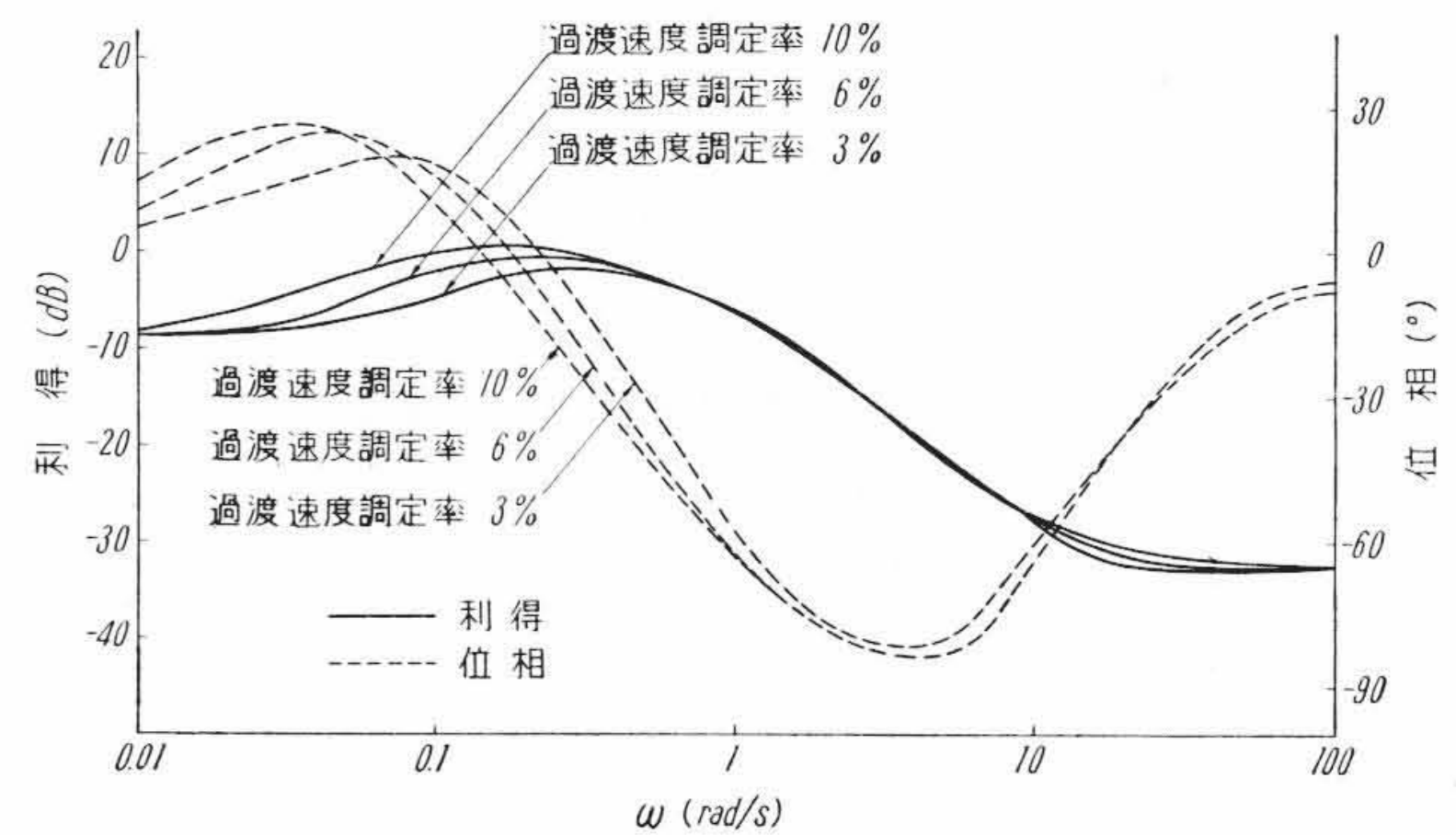
第 6 図 系統に機械式調速機と AFC 装置を付加したときのブロック線図

の利得を高めるには過渡速度調定率を少なくすれば良い。そこで、これを零にした場合に、速度調定率によって、調速機の利得特性がどう変わるかを調べてみると、速度調定率 3% および 6% にした時の折点周波数は、それぞれ約 $\omega = 0.5$ および 1.1、この結果系統の周波数は第 7 図 (a) に示すように負荷変動速度 ω の 1.0~10 rad/s の間で、 $\omega = 0$ の場合よりも 20 dB/dec の利得の低下となる。 ω が 10 rad/s 以上となっても過渡速度調定率が零である限りこの傾向は変わらない。弾性復原によって調速機の位相遅れが回復し、また利得も一定値に収れんすることは良く知られた事実であるが、このため周波数は 10 rad/s 以上の ω に対しては第 7 図 (b) に示すように電気式調速機の場合で -30 dB、機械調速式の場合で 7~-12 dB に収れんする。すなわち 10 rad/s 以上の周期の 100 MW の負荷変動に対して系統周波数は電気式調速機では 0.003 c/s、機械式調速機では 0.03 c/s の変動に過ぎず、一般に負荷の 10 rad/s 以上の成分に対してはあまり問題とならないのである。

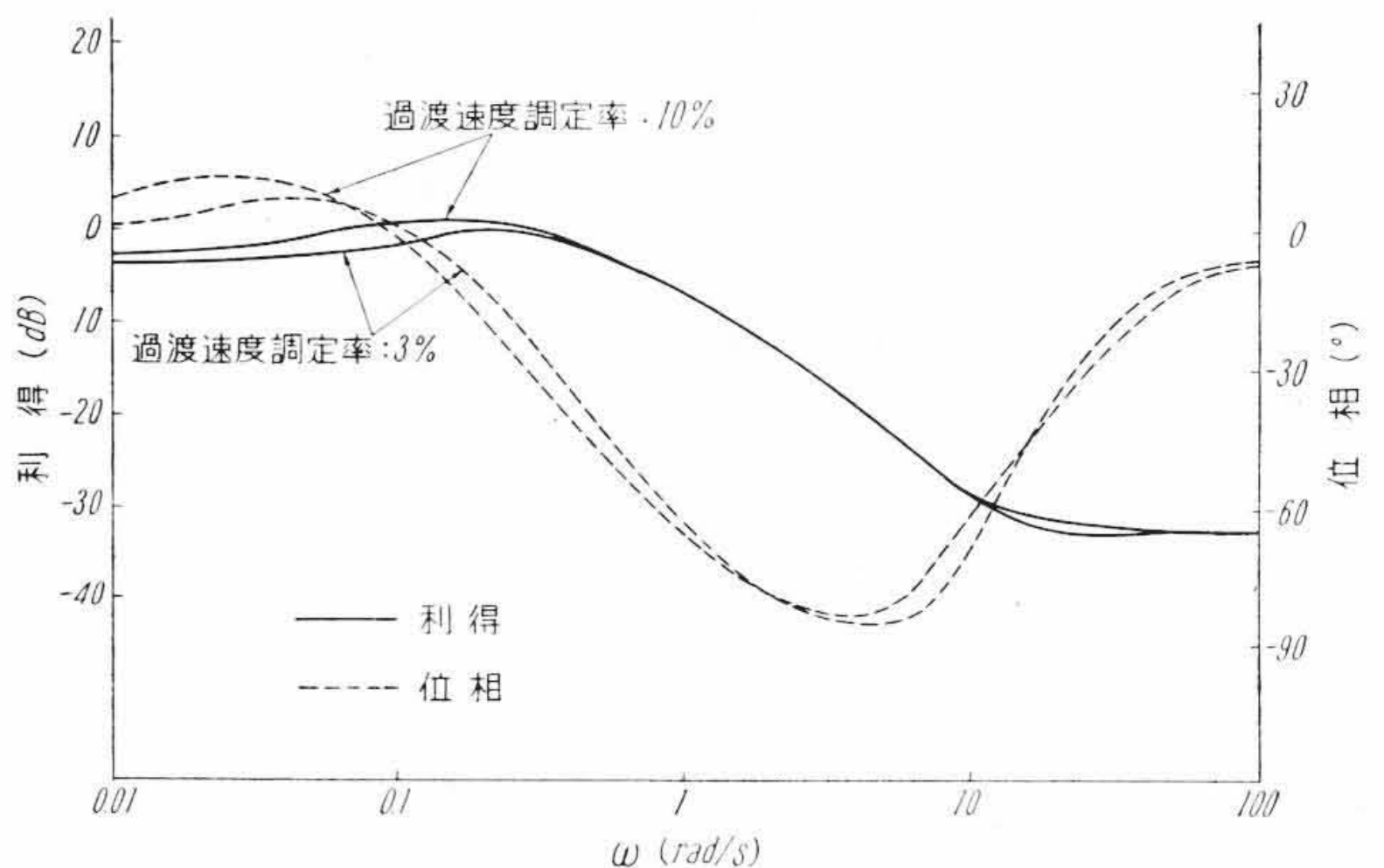
次に、低周波数領域ではどうなるかを検討してみると、系統単独では第 3 図 b でわかるように約 +2 dB の周波数変化が表われる。調速機に復原がなければこのオフセットはまったく表われぬからその点だけから考えると、復原のない状態が最も望ましいことになる。しかし一般には出力の平衡および単独時の運転も考えると復原をまったく省略することはできない。そこでいま、速度調定率を 3% とした場合を考えると過渡速度調定率のいかにかわらず $\omega = 0.01$ rad/s においては約 -9 dB に周波数の利得が低下する。〔第 7 図 (a)〕速度調定率を 6% とすると -3 dB の利得低下が得られ〔第 7 図 (c)〕、いずれの場合もきわめて安定である。過渡速度調定率を与えると $\omega = 0.01$ の付近では、第 7 図 (a) と第 7 図 (b) からわかるように同様の値となるが $\omega = 0.1$ rad/s の付近では利得は零前後となり 10 MW の変動に対しては 0.1 c/s 程度の周波数変化が生ずることとなる。しかしいずれにしても調速機の無い場合に比べ 1 rad/s 以下の ω に対して調速機の果す機能は大きいわけで、これは調速機の利得がこの領域で大きいことに対応している。この領域では速度調定率が零でない限り周波数の利得は比較的大きく、今日の厳しい需要家の要求に応ずるのにはまだ十分とはいえない。そのため調速



(a)



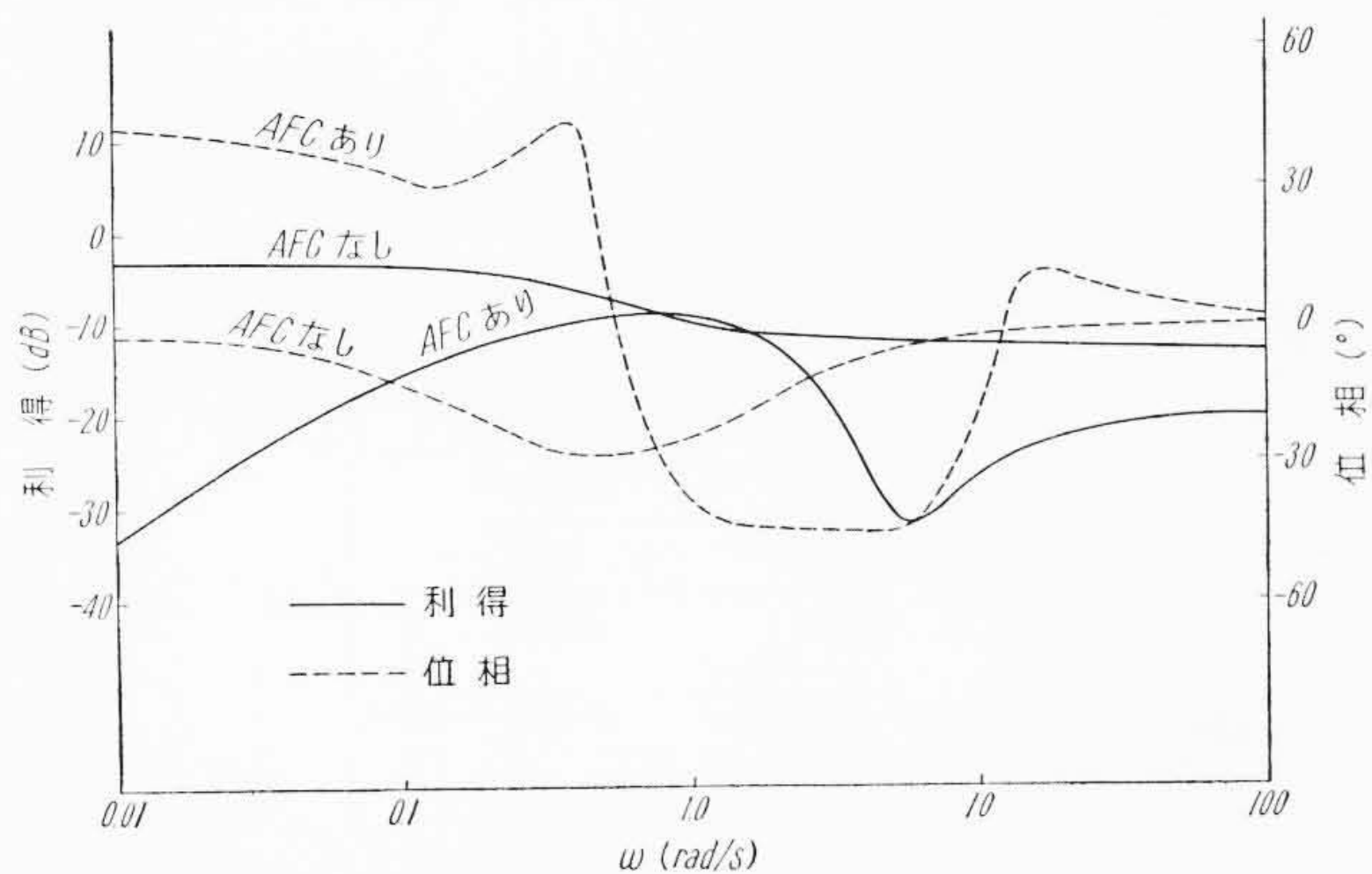
(b)



第 7 図 (c) (周波数/負荷変化) のボード線図

機に AFC 装置を付加するようになった。比較のために、機械式調速機に速度調定率を 6% とし、過渡速度調定率を 10%、時定数を 8 秒とした場合に、AFC を付加した時、およびしない時のボード線図を第 8 図に示した。 $\omega = 1$ rad/s ではいずれも -10 dB 程度であるが、調速機単独では、この値以下となることができないのに対し、AFC 装置があると $\omega = 0.01$ rad/s においては -30 dB 以下に低下し、低周波領域で非常に有効であることを示している。

このように、調速機にしても AFC 装置にしても原則的には低周波領域のものであり、10 rad/s 以上の成分にはあまり有効に作用するものではない。それゆえ、実際の電力系統においてどの程度の負荷変化が、どの程度の周期的成分を有しているかを調べる必要があるのである。もちろんこれは困難な調査であるが、中国電力



0.1 ~ 10 MW 0 dB
速度調定率: 6%, 時定数: 8", 過渡速度調定率: 10%

第8図 機械式調速機に AFC 装置をつけた場合と
つけない場合(周波数/負荷変化)のボード線図
(機械式調速機)

株式会社, 関西電力株式会社および国鉄技術研究所などでは試験を行い, 負荷変動の実態を明らかにしている。この結果によれば, 変動の大きさは標準偏差 1~4 MW 程度の正規分布をし, その生起するひん度は多くの場合ポアソン過程と見なせるが, その場合の折点周波数は 0.2 rad/s 以下のである。電力スペクトル密度はいずれも 0.1 rad/s 以上の周波数成分は急激に減少し, 制御対象として問題とならぬことが明らかにされた。第9図に系統負荷の電力スペクトル密度の例を示す。

この見地から考えると, 調速機および AFC 装置が, 負荷変動に対して $\omega=1$ rad/s 以下で有効に働けば十分といえる。調速機フリー運転の発電所系統がどの程度改造されるかを総合した系統特性定数によって検討してみよう。かりに, 系統特性定数 $1/K_L$ が 1.25 0.1~10MW であるような 50 c/s 系統で, 最大 100 MW の発電所を速度調定率 $P_c\%$ で運転したとすると, その発電所の出力特性 K は

$$K = \frac{2}{P_c} \cdot 100 \text{ MW} / 0.1 \sim$$

となり, 周波数変動速度 ω の比較的小さいところでは位相はおくれないことはないから, 系統特性定数は改善されて,

$$\frac{1.25}{1+1.25K} = \frac{1.25 P_c}{2.5+P_c} \cdot 0.1 \sim 10 \text{ MW}$$

となる。たとえば速度調定率 $P_c = 3\%$ とすると 0.68 0.1~10 MW となって系統の著しい改善が可能になるわけである。

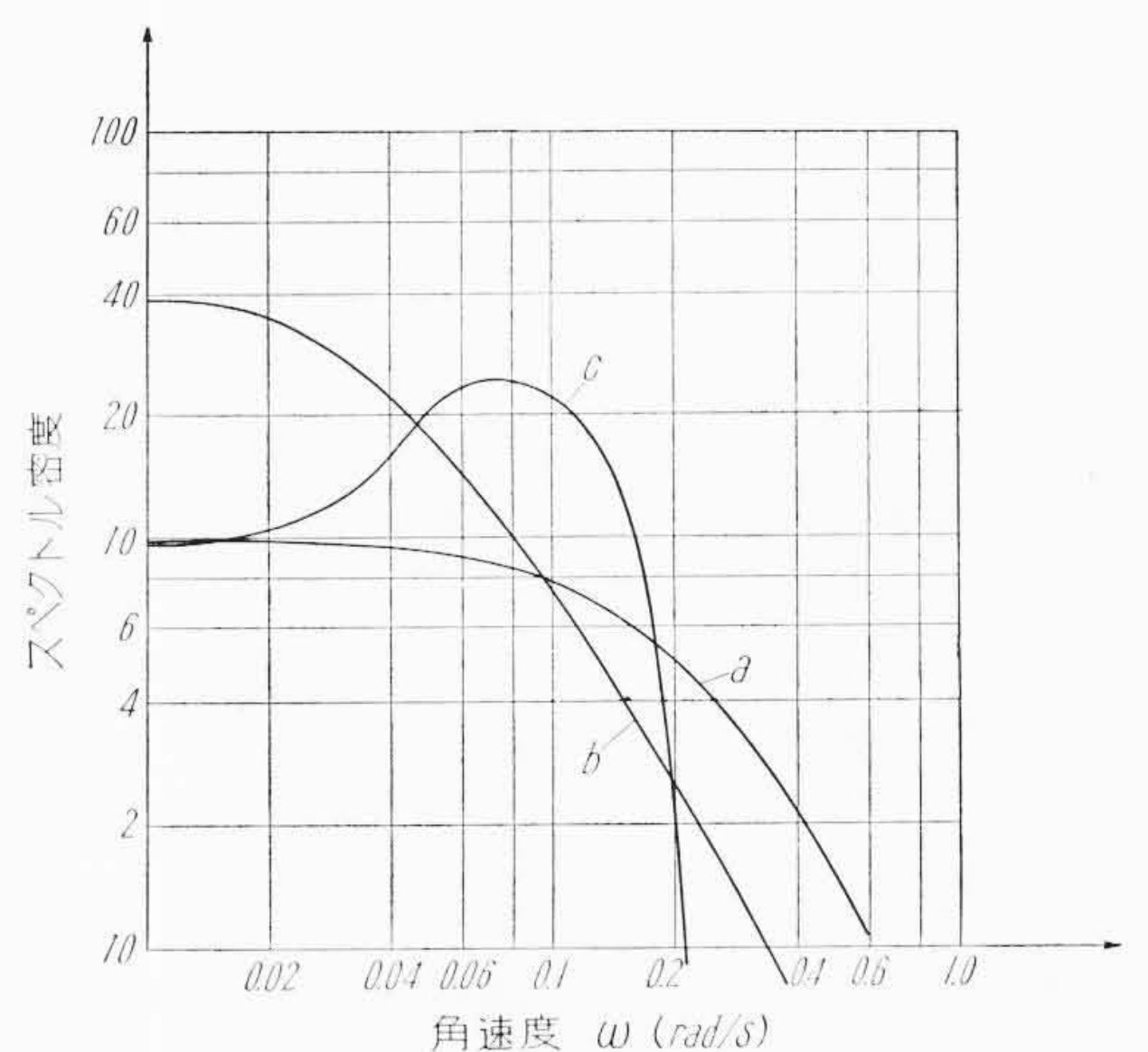
6. 水車調速機の発展

周波数制御上の要求から水車調速機の発展が招来された訳であるが, 前述までの検討によって, 水車調速機は速度調定率および過渡速度調定率を小さくすれば, 周波数制御装置の役割をかなりよく果たすことができるので, その目的に沿って最近開発された水車調速機の運転方式について説明する。

6.1 過渡速度調定率自動可変装置

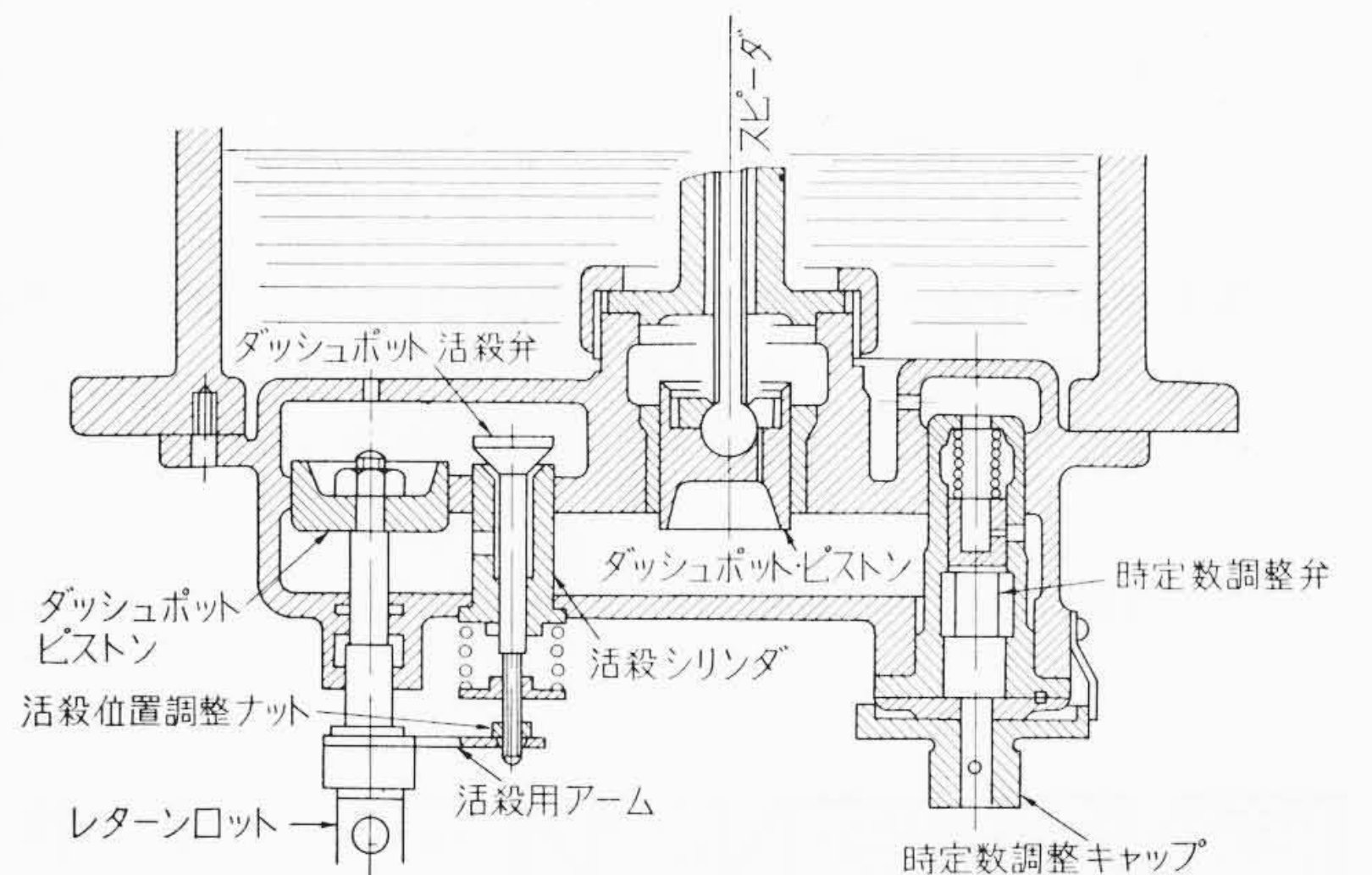
機械式水車調速機ではダッシュポット活殺装置と呼ばれている。

無負荷運転時には水車の自己制御性が弱いため, 過渡調定率を大きく時定数を長くとり不安定になるが, 系統と並列運転している時には応答をよくするためにはダッシュポットを除外したほうが好ましい。第10図に概略の機構を示すが, サーボモータのストロークが無負荷開度以上でダッシュポット活殺弁を押下げることによってダッシュポットのA室とB室を連通し機能を殺すことができる。同じように電気式調速機でも, 無負荷開度以上のサーボモータストロークで継電器を付勢してダンピングの強さおよび時定数を決



a. 調速機を負荷制限した系統
b. 調速機運転をしている系統
c. 一部の調速機ダッシュポット除外した系統

第9図 系統負荷の電力スペクトル密度の例



第10図 機械式調速機の過渡速度調定率自動可変装置

定する RC 回路を切替え無負荷時, 並列時の応答度を自動的に変えている。この効果は第7図 b より明らかである。

6.2 結合運転装置

2 台以上の水車発電機を有する発電所では, おのこの水車が任意の案内羽根開度で自由な調速機による運転がおこなわれると, 総合効率の悪い場合が起りうる。これは主として水車の効率が案内羽根開度によって変るためで, 特に1/2開度以下では悪くなる。これを改善する目的で, 数台の水車が同じ効率のよい案内羽根開度で運転するよう結合運転装置が考えられた。電気式調速機について実施された例について説明する。

単独運転では出力整定装置 65 p と補助サーボモータから調速機の磁気増幅器に復原量を与えているが, 結合運転ではこれが結合運転装置からの信号に切替えられる。結合運転装置では水車発電機の総合出力 ΣP が発電所の出力整定値 P_0 と一致し, かつ各発電機の出力が平衡するように調速機を操作する。第11図に回路を示す。

動作説明の便宜上, 65 JF の回路は無視し, 3 台の結合運転について説明する。

(1) RP_{1-3} と LP_{1-3} とでブリッジ回路をなしているから TP_{1-3} の入力出力側には 1 号~3 号発電機の出力に比例した電圧が現われる。

(2) 65 JP を整定して T_{JP} の出力には発電所の総合出力整定値 P_0 に比例した電圧が現われる。

TP_{1-3} の出力は和動接続されているからその両端には結局総合出力 ΣP に比例した電圧が現われる。 P_0 と ΣP に差があると 65 JSD

に電圧が現われ、 T_{DV} を介して増幅器に信号を送り、 P_0 と ΔP が等しくなるように調速機を操作する。

一方 T_{P1-3} の入力側から各増幅器の R_1, R_2, R_3 に各水車出力に比例した電圧が印加されて R_1, R_2, R_3 には平均出力との差の出力に比例した電圧が現われる。こうして増幅器は水車出力を平衡させるように動作する。

7. 結 言

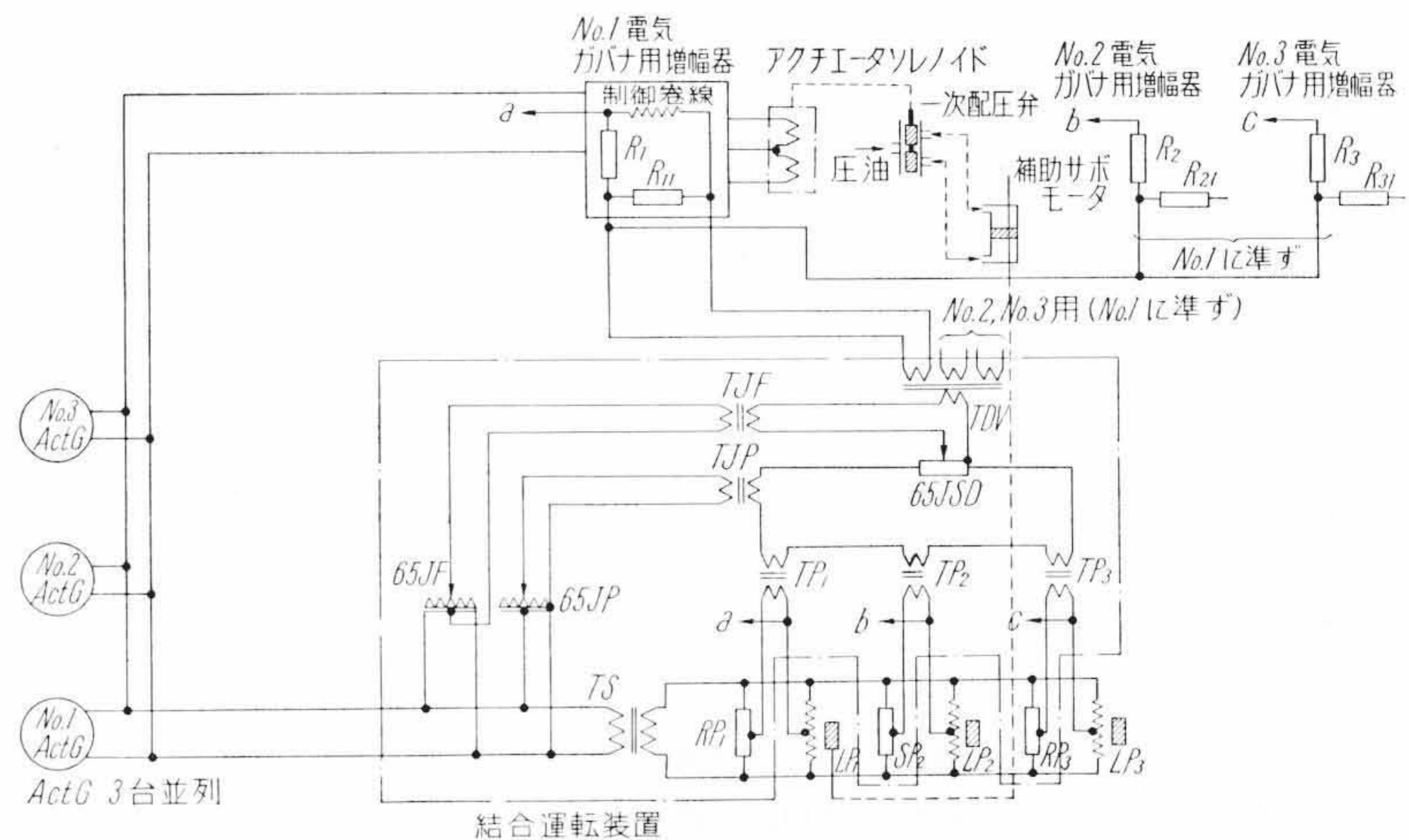
以上各項で検討したように、電力系統の周波数制御を改善する目的のためには

(1) 系統容量が大きい場合は問題ないが、容量が小さい場合でも系統中に含まれる発電所をできるだけ多く調速機フリー運転すれば周波数変動を小さくすることができる。

(2) 流込み水力発電所の多い系統では、水位調整器あるいは負荷制限運転をする場合が多いが、このとき単機容量の大きい発電所に AFC 装置を付加すれば低周波域での周波数変動を小さくすることができる。第8図は $\omega = 0.01 \text{ rad/s}$ で 30 dB も改善される例を示している。

第3, 4図には同一系統定数の電力系統でも全容量の20%の調速機を自由な調速機運転にすると周波数変動幅を 20 dB 程度、45% を自由な調速機運転にすると 25 dB 程度減少させることができる。

(3) 周波数調整発電所で水圧鉄管が長いときには、水圧上昇制



第11図 結合運転装置接続図

限のため飽和要素が含まれるばかりでなく時定数が長くなるが、 $\omega = 0.2 \text{ rad/s}$ 以下の低周波域ではほとんど影響がなく、AFC装置の付加が可能である。

などの定量的解析が十分役立つものと思われる。

一方調速機自体も周波数制御の面ばかりでなく、周波数制御と同時に水車の高効率運転も有効に行う必要があり、結合運転装置はその意味で応用範囲は広い。

終りに、本稿執筆に当り電力会社各位の系統試験報告を参考にさせていただいたことを付記し感謝する。



特 許 の 紹 介



特許第245643号

斎 藤 武

自 動 電 圧 調 整 制 御 方 式

同期機の界磁励磁度の自動調整に当って、回路の異常状態に対応するために、特設の速度励磁方式がとられることがある。たとえば、公知のレオスタチック調整装置に対してさらにその整定値より任意広い幅の整定を与えられた過電圧および低電圧継電器を付加し、これらが回路の異常電圧上昇または降下に応動することによって、界磁励磁の漸变的調整と並行に急变的調整を重畳し、急变的調整の優先的效果により、回路または接続機器の安定をはかるのである。この発明は、このような目的のもとに発電機1の励磁機2の出力回路（励磁回路）に界磁調整器3のほか過電圧抑制抵抗4を設け、これは常時接触器12によって短絡されているようにし、3は常時接触器14により短絡を解かれており、自動電圧調整器5によって漸变的調整が行われている。接触器12および14は、過電圧継電器11および低電圧継電器13に追動するものとし、5, 11, 13はそれらの動作整定加減抵抗6, 7, 8を経て回路電圧から付勢される。9は整定加減用操作電動機である。調整器5は6を介して100% (+10) ~ (-20)% なる整定範囲を与えられ、継電器11は、調整器5の上記整定値の(+7%)、また継電器13は(-7%)に各整定されている。このような整定関係にあると、回路電圧急上昇に際しては、調整器5により降圧動作するとともに継電器11が動作し、12を介して抑制抵抗4をそう入して急速減磁を行う。電圧急降下に対しては継電器13が動作し、14を介して3を短絡し、急速増励をはかって系統の安定度を確保する。なお同期機における負荷遮断などによる過電圧に対しても、継電器11は有効に動作するから同期機の過電圧保護をも兼ねる。さてこのような方式で、系統の電圧変動が激しい場合とか、あるいは調整器の点検などの理由で5全休止させる場合がある。この発明はこのようなときでも、方式が健なな機能を発揮するようにとの配慮から、継電器11, 13の整定を7および8を介して上限または上限に近くまで特に変更して、5の休止期間の乱調を避けるようにしたものである。

(宮 崎)

