

同期機の動態安定度

Dynamic State Stability of Synchronous Machines

田口 武夫* 高林 乍人* 奥田 健三*
 Takeo Taguchi Hayato Takabayashi Kenzō Okuda

内 容 梗 概

同期機の動態安定度について同期機の諸定数や自動電圧調整器の諸特性などの影響をデジタル計算機により検討し、凸極機非凸極機の差異や、自動電圧調整器の効果をおおむね明らかにした。また原動機の自動速度調整器の影響についても若干調べた。

1. 緒 言

近年、大都市周辺部の地中ケーブル送電線の増加および電圧の格上げにとともに、深夜などの軽負荷時に系統電圧は上昇する傾向にあり、これを抑制するため発電機は高力率または進相運転を余儀なくされる。この場合、発電機の励磁を低くするので同期はずれを起しやすくなり安定度が低下するのであるが、連続動作形の自動電圧調整器を用いて励磁制御を行えば、安定運転領域を拡大することが可能であり、これに関する研究発表は数多くなされている(1)~(5)。

本稿は1台の同期発電機が外部リアクタンスを介して無限大母線に接続される、いわゆる1機-無限大系に着目し、大容量タービン発電機および水車発電機を例にとって、各種の代表的な自動電圧調整器および発電機諸定数が電力系統の動態安定度に及ぼす影響を解析したものである。ここで自動電圧調整器としては、現在もっとも普及している標準的な方式である磁気増幅器、あるいは回転増幅機形のほか、これに電圧の微分制御を加味した方式のものならびに今後出現が予想される制御整流器方式を対象とした。さらに自動電圧調整器とともに、発電機の自動制御装置として重要な調速機の効果についても考察を進めた。なお解析に当たっては、主としてデジタル計算機を使用し、各種変量の過渡応答をみる場合にはアナログ計算機を用いた。

2. 理論的解析法

2.1 同期発電機および電力系統に関する計算式

ここで取り扱う系統は第1図に示すように1台の同期発電機が外部リアクタンス x_e を介して無限大母線に接続される場合である。計算式を導くに当たり次の仮定を設ける。

計 算 仮 定

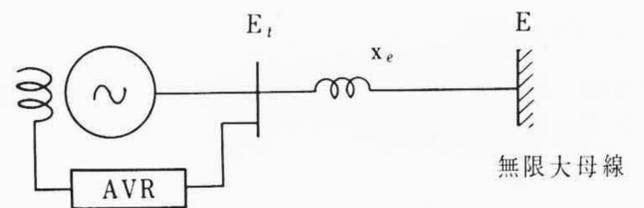
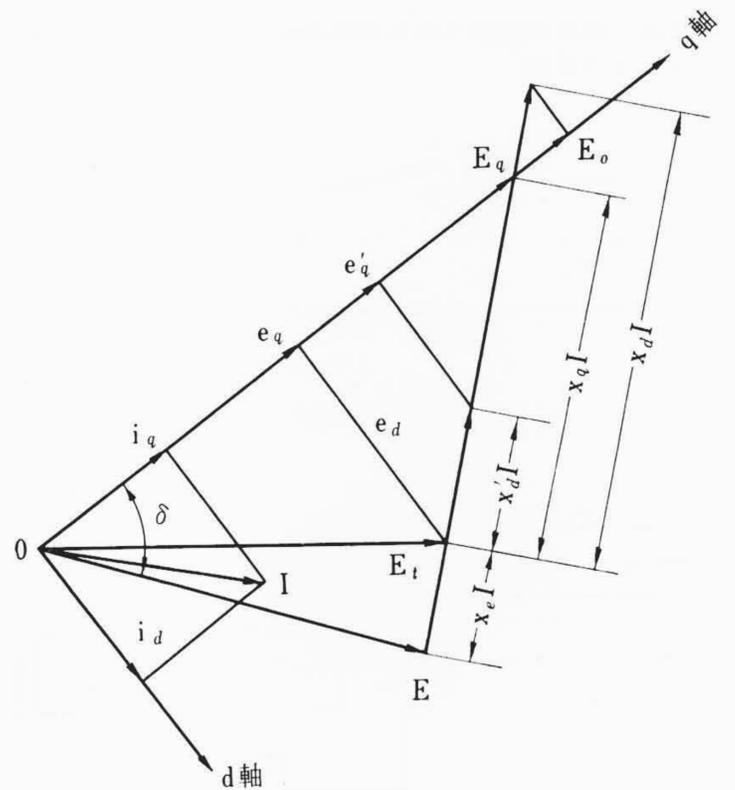
- (1) 動態時の過渡振動は、ある同期速度の定常状態を中心に微小振動するものとし、系の非線形性および微小変化分の2次以上の項は無視する。
- (2) 電機子回路および制動巻線の過渡現象は無視する。しかし同期機、原動機および系統特性に基づく制動効果は考慮する。
- (3) 電機子回路の抵抗分は考えない。

以下二反作用理論にもとづき、単位法で同期機の計算式を誘導する。第1図のベクトル図より、端子電圧について

$$\left. \begin{aligned} e_d &= x_q i_q & e_d &= E \sin \delta - x_e i_q \\ e_q &= e_q' - x_d' i_d & e_q &= E \cos \delta + x_e i_d \\ E_t^2 &= e_d^2 + e_q^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

界磁磁束に相当する電圧は、

* 日立製作所日立研究所



第1図 系統図ならびにベクトル図

$$e_q' = E_0 - (x_d - x_d') i_d \dots\dots\dots (2)$$

界磁回路について、

$$E_{fd} = p T_{d0}' e_q' + E_0 \dots\dots\dots (3)$$

出力は、

$$T_e = e_d i_d + e_q i_q \dots\dots\dots (4)$$

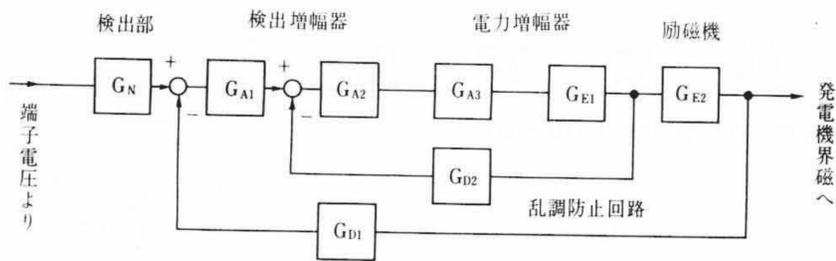
運動方程式は、

$$\frac{M}{2\pi f} p^2 \delta + \frac{D}{2\pi f} p \delta + T_e = T_m \dots\dots\dots (5)$$

となる。

ここに、 e, i は電圧電流で添字 d, q は直軸、横軸成分を表わす。

- また、
- E_0 : 公称内部誘起電圧
 - E : 無限大母線電圧
 - E_t : 端子電圧
 - E_{fd} : 界磁端子電圧
 - T_e : 電氣的出力
 - T_m : 機械的入力
 - T_{d0}' : 開路時定数
 - M : 単位慣性定数

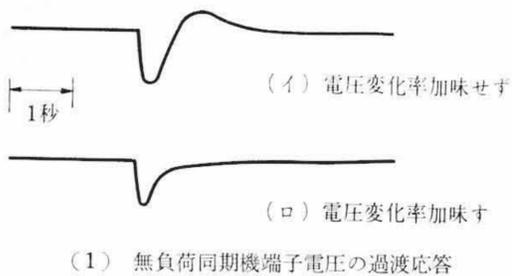


各ブロックの伝達関数

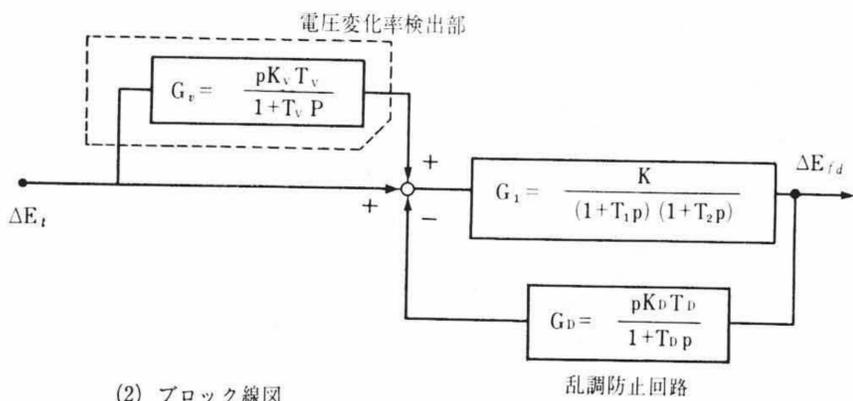
$$G_N = \frac{K_N}{1+pT_N} \quad G_{A1} = \frac{K_{A1}}{1+pT_{A1}} \quad G_{A2} = \frac{K_{A2}}{1+pT_{A2}} \quad G_{A3} = \frac{K_{A3}}{1+pT_{A3}}$$

$$G_{E1} = \frac{K_{E1}}{1+pK_{E1}} \quad G_{E2} = \frac{K_{E2}}{1+pK_{E2}} \quad G_{D1} = \frac{pK_{D1}T_{D1}}{1+pT_{D1}} \quad G_{D2} = \frac{pK_{D2}T_{D2}}{1+pT_{D2}}$$

第2図 磁気増幅器または回転増幅機形 AVR の開回路ブロック線図



(1) 無負荷同期機端子電圧の過渡応答



(2) ブロック線図

第3図 電圧変化率を加味した AVR のブロック線図とアナコンによる計算例

- D: 制動係数
- f: 周波数
- p: 微分演算子
- δ: 位相角

これらの式にて仮定より微小変化値について求めると

$$\left(\frac{M}{2\pi f} p^2 + \frac{D}{2\pi f} p \right) \Delta\delta = \Delta T_m - K_1 \Delta\delta - K_2 \Delta e'_q$$

$$\Delta e'_q = \frac{K_3}{1+T_{dz}'p} \Delta E_{fd} - \frac{K_4}{1+T_{dz}'p} \Delta\delta$$

$$\Delta e_t = K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta e'_q$$

ただし

$$K_1 = \frac{E_{q0} E \cos \delta_0}{x_q + x_e} + \frac{E_{e d0} \sin \delta_0}{x_d + x_e} \left(1 - \frac{x'_d}{x_q} \right)$$

$$K_2 = \frac{E \sin \delta_0}{x'_d + x_e} \quad K_3 = \frac{x'_d + x_e}{x_d + x_e} \quad T_{dz}' = K_3 T_{d0}'$$

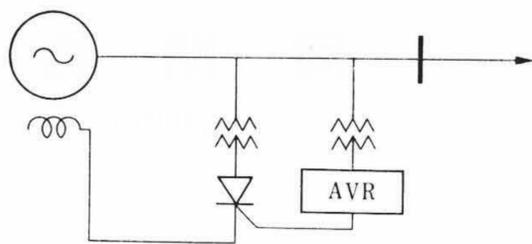
$$K_4 = E \sin \delta_0 \frac{x_d - x'_d}{x_d + x_e} \quad K_6 = \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \frac{x_e}{x_d + x_e}$$

$$K_5 = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \frac{x_q}{x_q + x_e} E \cos \delta_0 - \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \frac{x'_d}{x'_d + x_e} E \sin \delta_0$$

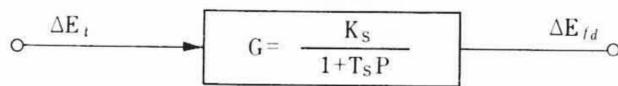
添字0は振動の中心値を意味する。

2.2 自動電圧調整器に関する計算式

自動電圧調整器(以下 AVR と略記する)はいうまでもなく発電機



(1) 励磁回路



(2) AVR ブロック線図

第4図 制御整流器形 AVR

端子電圧を所定の値に保つように界磁電圧を制御する装置であって各種の形式のものがあるが、抵抗器形などの間欠制御形のものには除外し、連続動作形のものとして次の3種の代表的な AVR について解析を進める。なお AVR の特性式は次式のようになる。

$$\Delta E_{fd} = G_{AVR} \Delta E_t \dots \dots \dots (7)$$

ただし, G_{AVR} : AVR の伝達関数

2.2.1 磁気増幅器形あるいは回転増幅機形 AVR

いずれの AVR も励磁機を含めブロック線図で表現すれば第2図のようになり、同図の増幅器の部分に磁気増幅器または回転増幅機が用いられる。なお実際の装置では一部の増幅器を省略したり、乱調防止回路の位置が多少変更される場合があるが、一般性をもたせるためにデジタル計算プログラムは同図の構成に基づいて作成した。このほか増幅器には飽和が存在するが、前述のようにじょう乱を微小量としているので飽和を無視する。

2.2.2 電圧変化率を加味した AVR

大容量同期発電機用 AVR として、わが国でもっとも広く採用されている標準的な方式は前項で述べたようなものであり、検出量は整定電圧に対する発電機端子電圧の偏差分である。ここで述べる AVR は、前項の形式の AVR に微分変圧器などを用いて電圧の変化率を加味したもので、第3図(2)のような構成となる。この図で破線で囲んだ部分以外は前項の AVR を簡略化して表現したもので、実用的な周波数範囲において等価性は良好である。第3図(1)は検出量として電圧変化率を加味した AVR と省略した AVR とを用いたときの無負荷時の閉ループインディシャル応答を示したもので、電圧変化率を加味すると過渡応答が良好になることが明らかである。

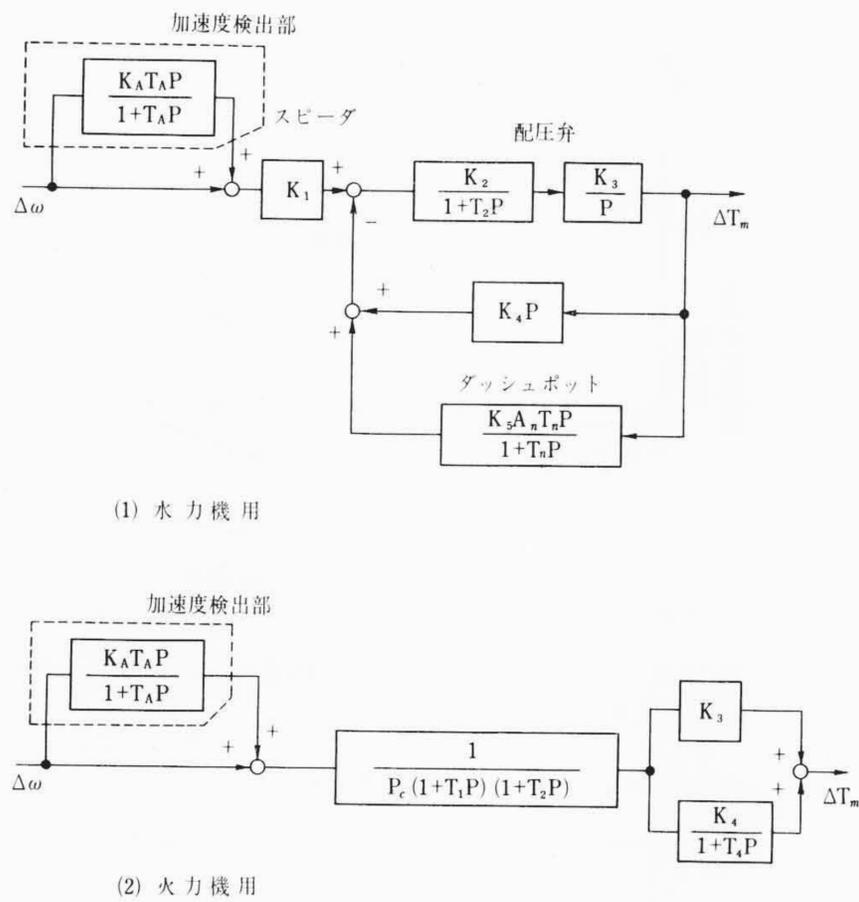
2.2.3 制御整流器形 AVR

近年半導体整流器の開発にともない、励磁装置に回転部分をもたない半導体制御整流器形がすでに1,000kVA 程度の中形発電機用には数多く製作されており、今後整流器の大容量化にともない大形同期発電機にも近い将来適用されることが予想される。ここでは第4図(1)で述べるような分巻励磁方式について考察することとし、複巻式励磁方式は対象外とする。

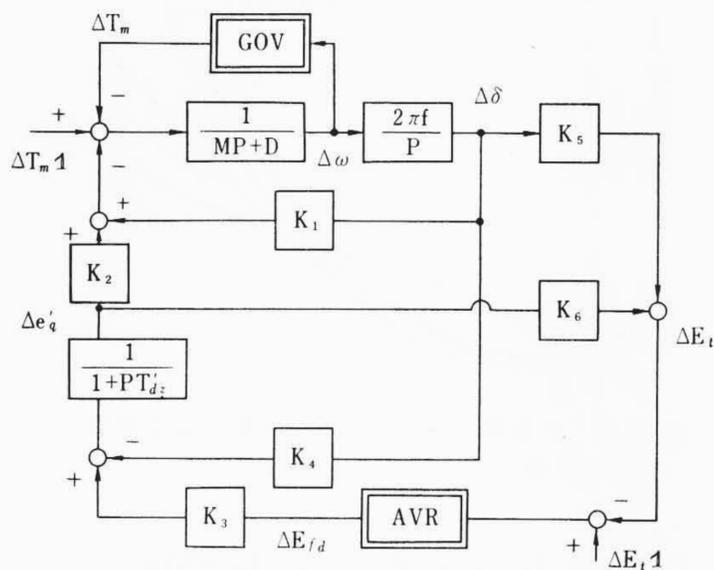
この励磁装置の AVR 部分は半導体素子で構成されているため、時間遅れが短く数十 ms 程度にすぎない。したがって、前項までに述べたような乱調防止回路は不要であり、第4図(2)のブロック線図で表わすことができる。

2.3 调速機に関する計算式

调速機(以下 GOV と略記する)は発電機を所望の値に保つように原動機入力を加減する装置である。



第5図 调速機のブロック線図



第6図 全系のブロック線図

第5図はそれぞれ水力機、火力機用调速機のブロック線図である。両図において入力端子付近にある不完全微分要素は、検出量として速度のほかに加速度を加味したもので、加速度検出部と名づけることにする。なお调速機の入力は速度、または周波数の変化分、出力はガイド弁開度または原動機出力(発電機入力)の変化分であって次式で表わされる。

$$\Delta T_m = G_{GOV} \cdot \Delta \omega \quad (8)$$

ただし、 G_{GOV} は调速機の伝達関数

$\Delta \omega$: 角速度の変化分 (p.u.)

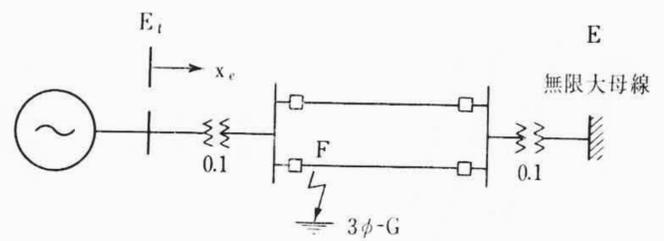
2.4 全系の特性式

前節までに述べてきたものを総合すれば、系全体の特性式ができあがる。これをブロック線図で示せば第6図のようになる。動態安定限界の判別は、AVRの入力側における電圧じょう乱または機械的トルクによる外乱を与えたときの位相角変動 $\Delta \delta$ の振動状況を検討して行なった。

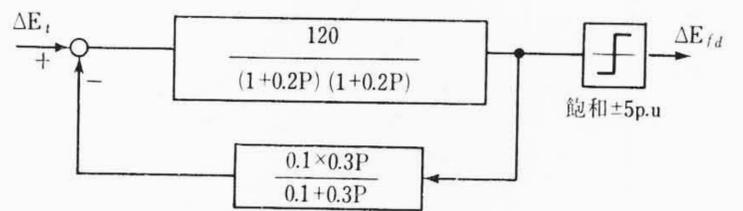
3. 解析結果ならびに検討

3.1 一般的考察

励磁系、同期機の諸特性が動態安定度に及ぼす影響を解析するに

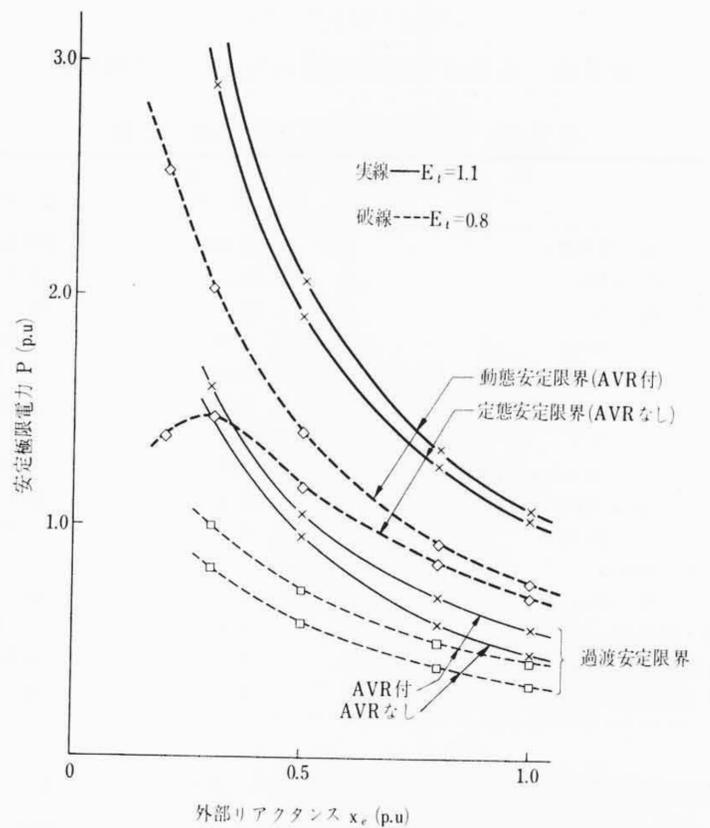


(1) 系統図



(2) AVRブロック線図

第7図 各種安定度をみた系統ならびにその AVR



第8図 各種安定極限電力の比較 (凸極機)

先だって、一部既述したが⁽⁷⁾定態、動態、過渡の各安定度が系統条件によってどのように変化するかを第7図(1)の系統において調べ、外部リアクタンス x_e を変えた場合の各安定極限電力を求めた。ここで過渡安定度の計算条件としては、送電端出口のF点で3線地絡が発生し、0.1秒後に両端の遮断器を開放し、以後1回線送電を継続するものとする。発電機定数は

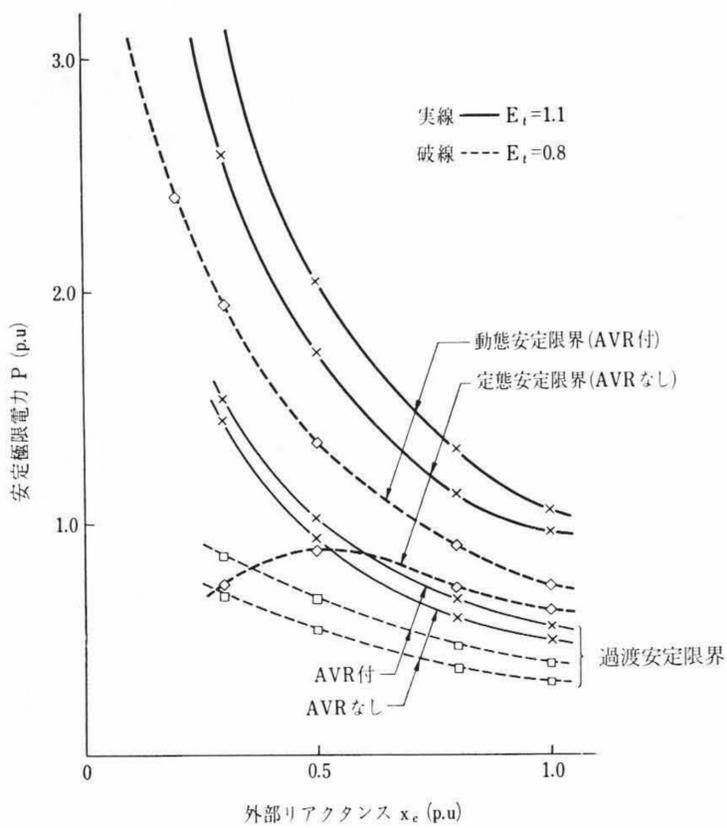
$$x_d = 1, x_d' = 0.3, M = 7 \text{ kW s/kVA}, T_{d0}' = 6 \text{ s}$$

$$D = 10 \text{ p.u. torque/rad/rad time}, f = 50 \text{ c/s}$$

$$x_q = 1 \text{ (非凸極機)}, x_q = 0.6 \text{ (凸極機)}$$

であって、AVR定数は第7図(2)のとおりである。

第8,9図はこの計算結果であって、外部リアクタンスと安定極限電力との関係を凸極機および非凸極機について記した。この図で過渡安定度計算は過渡凸極性および界磁磁束の変化を考慮しており、 x_e は3線地絡発生前の2回線送電時の値である。これらから明らかのように、長距離送電領域では発電機端子電圧 E_t が大きいほど安定極限電力は増加し、外部リアクタンス x_e の増加とともに減少する。安定極限電力の大きさを比較すると、動態、定態、過渡(AVR付)、過渡(AVRなし)の順に小さくなる。しかし低励磁進相運転の領域



第9図 各種安定限界電力の比較 (非凸極機)

第1表 代表的な水力機、火力機の定数

	水力機 (凸極機)	火力機 (非凸極機)
容量 (kVA)	60,000	160,000
電圧 (kV)	13.2	15.0
周波数 (Hz)	50	50
x_d (p.u.)	0.92	1.25
x_q (p.u.)	0.54	1.15
x'_d (p.u.)	0.36	0.22
$T_{d'0}$ (s)	5.4	9.1
M (p.u. torque·s)	7.7	6.6
D (p.u. torque/rad/rad time)	10.0	10.0
x_e (p.u.)	0.2	0.2
自動電圧調整器 利得 G	190	160
等価一次遅れ (s)	0.41	1.56
第1乱調防止回路利得 G_{D1}	0.0255	0.051
第1乱調防止回路時定数 T_{D1} (s)	0.3	0.5

では動態安定度の重要性をかなり明確に表明しているものといえる。すなわち、発電機端子電圧 $E_t=0.8$ というように比較的励磁低運転で、かつ x_e がいちじるしく大きくない場合には、過渡安定極限電力より定態安定極限電力のほうが小さくなっている。ここで過渡安定極限電力は第1次動揺に着目しているから、このような条件のもとでは過渡時の安定度は維持されるが定常状態は不安定になることを意味しており、したがってかかる運転状態は存在しえない。これに対し、動態安定限界はつねに過渡安定限界を上回っているため、運転は理論的に可能なことを示している。このような状況は非凸極機の場合とくに顕著であるから、以下この点に重点をおいて考察を進めていくこととする。

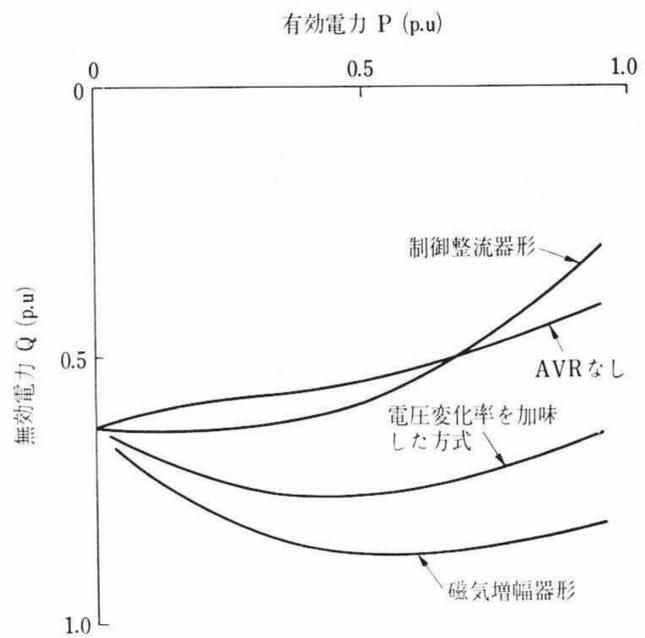
3.2 各種 AVR の比較

前節で述べたように低励磁運転時に励磁系の特性が重要になるから、この条件について考察を進める。AVR の種類としては、第2.2項の3種とする。なお磁気増幅器形 AVR は第3図(2)の破線部分を除いたように簡略化した表現を用いることとし、第4図の構成による場合は後述する。

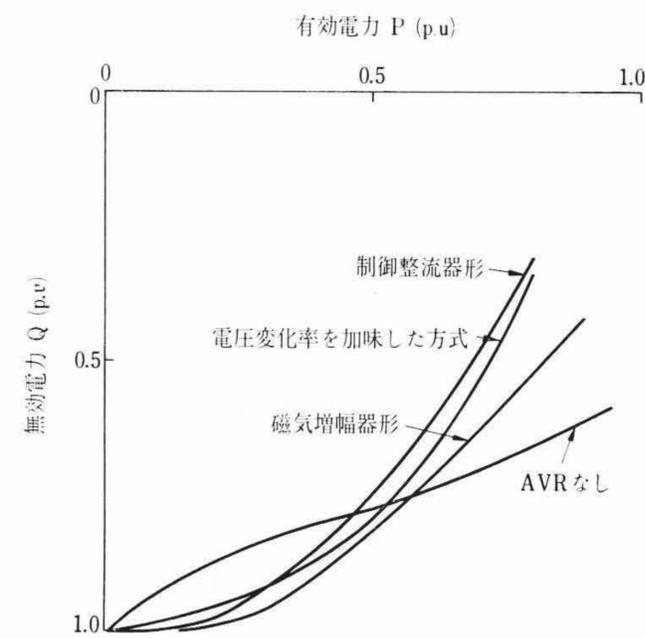
計算条件：第1図において無限大系電圧 $E=1$ 、外部リアクタンス $x_e=0.2$ とし、第1表に示す代表的な凸極機(水力機)、非凸極機(火力機)を用いる。

凸極機の場合の AVR 定数は、

磁気あるいは回転増幅器形 AVR.....第3図において、 $K=174$



第10図 非凸極機における各種 AVR による動態安定限界の比較



第11図 凸極機における各種 AVR による動態安定限界の比較

$T_1=0.2$ s, $T_2=0.2$ s, $K_D=0.01$, $T_D=0.5$ s

電圧変化率を加味した AVR.....上記のほか、 $K_V=10$, $T_V=0.1$ s
制御整流器形 AVR.....第4図において、 $K_S=174$, $T_S=0.05$ s
火力機の場合の AVR 定数は、

磁気あるいは回転増幅器形 AVR.....第3図において、 $K=160$

$T_1=0.78$ s, $T_2=0.78$ s, $K_D=0.07$, $T_D=0.5$ s

電圧変化を加味した AVR.....上記のほか、 $K_V=10$, $T_V=0.1$ s
制御整流器形 AVR.....第4図において、 $K_S=160$, $T_S=0.05$ s

第10,11図はそれぞれ非凸極機、凸極機について出力—無効電力の関係を与える動態の安定限界を求めたもので、これによれば AVR が無い場合に比べ AVR がある場合には安定限界が広がっている。なお第11図の非凸極機において、50%出力以上で AVR 付のほうが安定限界が狭くなっているが、この点については後述する。

次に AVR の形式による相違を比較すると、磁気あるいは回転増幅器形のほうが電圧変化率を加味したものや制御整流器形に比べ安定限界は広がっている。しかし磁気あるいは回転増幅器形以外のものでも励磁系に適切な補償回路を付加することにより、この動態安定限界の拡大をはかることは可能である。

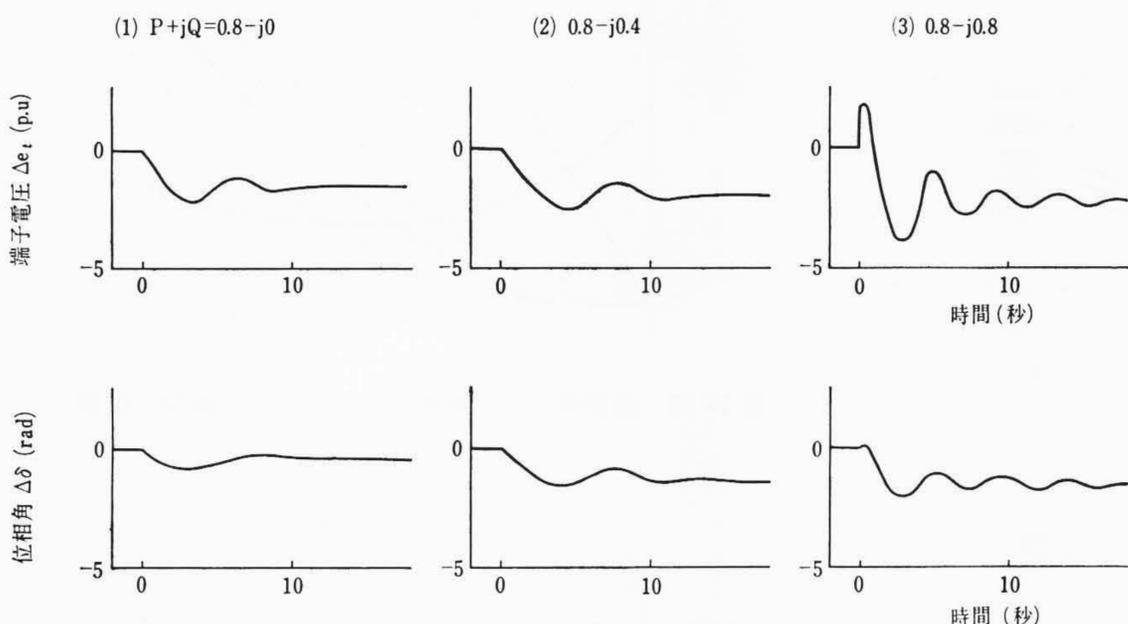
3.3 磁気増幅器あるいは回転増幅器形 AVR を用いた場合の各種パラメータの影響

3.3.1 計算条件

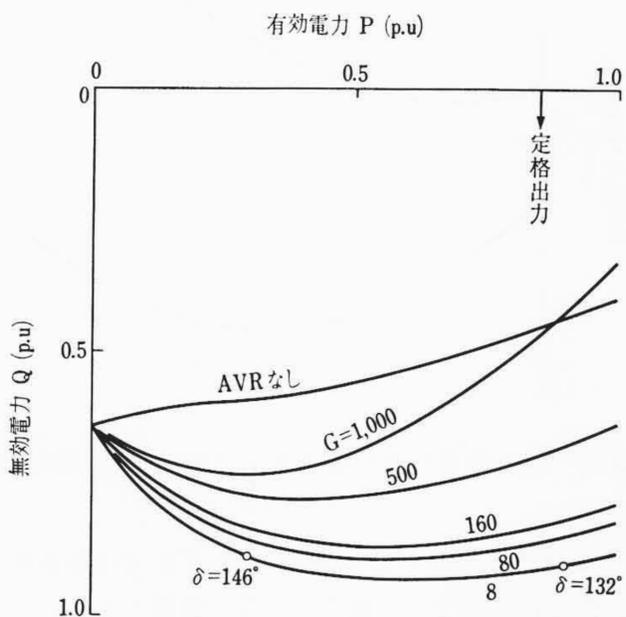
第1図の系統で $E=1.0$ とし、この代表的な非凸極機と凸極機

について同期機や AVR の諸定数を変え、それらの影響を調べた。すべて第 1 表に示す基準条件により進め、同時に 2 個以上のパラメータは変えていない。なお無効電力の限界値の精度は計算プログラムの入力データで任意に選定することができ、ここでは 0.02 p.u. として安定限界を求めた。これに先だち過渡時の発電機端子電圧、位相角の変動状況を第 6 図のブロック線図によりアナコム

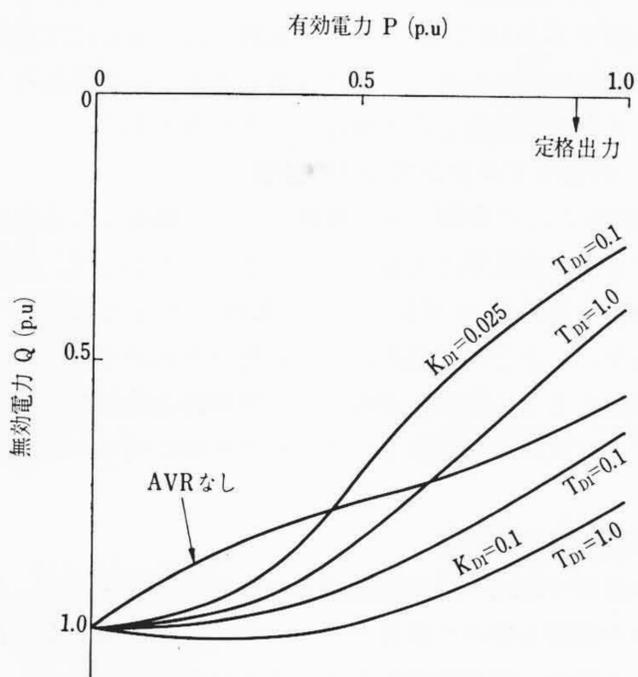
で求めた結果の例を第 12 図に示す。この図は GOV を省略しかつ $D=1$ のほかは第 1 表の火力機の基準条件において、AVR の入力側に約 1.5% の電圧じょう乱を加えた場合で、定格出力付近で無効電力を種々変えて調べたものである。これより発電機の運転条件により振動周期は異なり、安定限界に近づくにつれて振動の減衰特性はわるくなるのがみられる。



第 12 図 非凸極機にこの電圧位相角の変動曲線



第 13 図 非凸極機における AVR 利得 G の影響



第 14 図 凸極機における AVR 第一乱調防止回路の影響

3.3.2 AVR 諸定数の影響

(1) AVR 利得 (G) の影響

非凸極機について AVR の利得を変えた場合の安定限界曲線を第 13 図に示す。AVR なしの場合に比べ安定限界がいちじるしく広がっており、利得が小さいほど顕著である。たとえば利得 $G=8$ の場合位相角 δ は 130° 以上にも達している。この傾向は凸極機の場合も同様である。

(2) 乱調防止回路特性 (K_{D1}, T_{D1}) の影響

乱調防止回路は第 2 図に示すように通常 2 個設けてあるが、このうち効果の大きい第 1 乱調防止回路定数の影響を調べた。第 14 図は凸極機について検討したもので、利得 K_{D1} 、時定数 T_{D1} とともにやや大きめのほうが安定限界の拡大に有効である。なおこの傾向は非凸極機の場合も同様である。

さきの第 11 図の計算例において定格出力付近で AVR なしの場合の安定限界のほうが広がったが、その理由をここでみるに、無負荷時のインディシャル応答に着目して選定した乱調防止回路特性では不十分な場合があり、進相運転時には K_{D1}, T_{D1} とともにやや大きめの値に変更することにより、安定領域を十分広くしうることを示している。

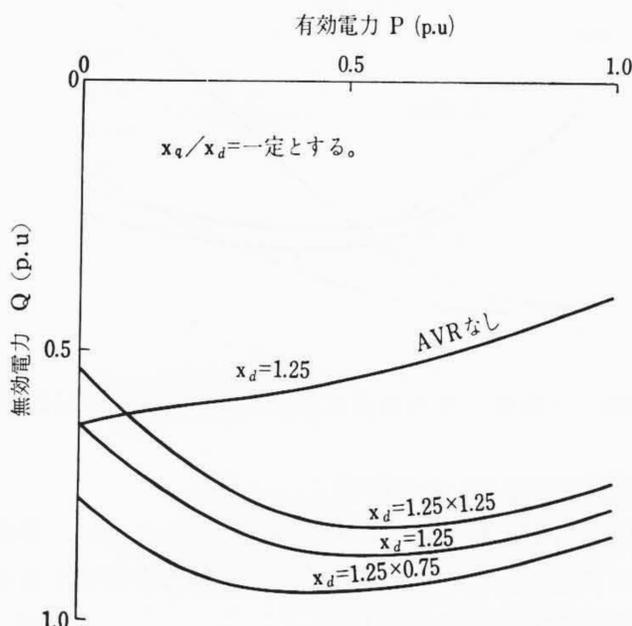
3.3.3 発電機諸定数の影響

(1) 直軸同期リアクタンス (x_a) の影響

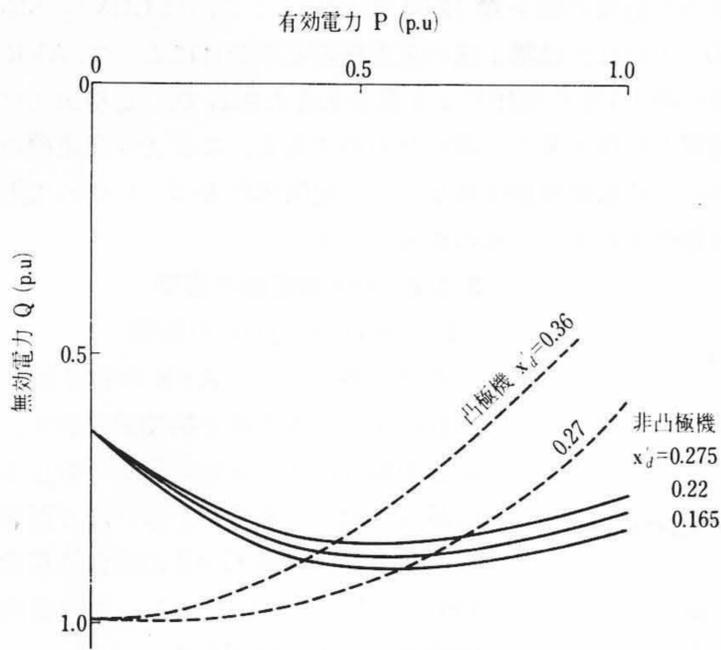
第 15 図は非凸極機について x_a を基準条件に対し 25% 増減した結果で、 x_a の増加にともない安定限界は狭くなるが、AVR なしの場合に比べればはるかに広いことがわかる。換言すれば、低励磁運転の見地からすれば短絡比を小さくしうる余地があることを意味している。

(2) 直軸過渡リアクタンス (x'_a) の影響

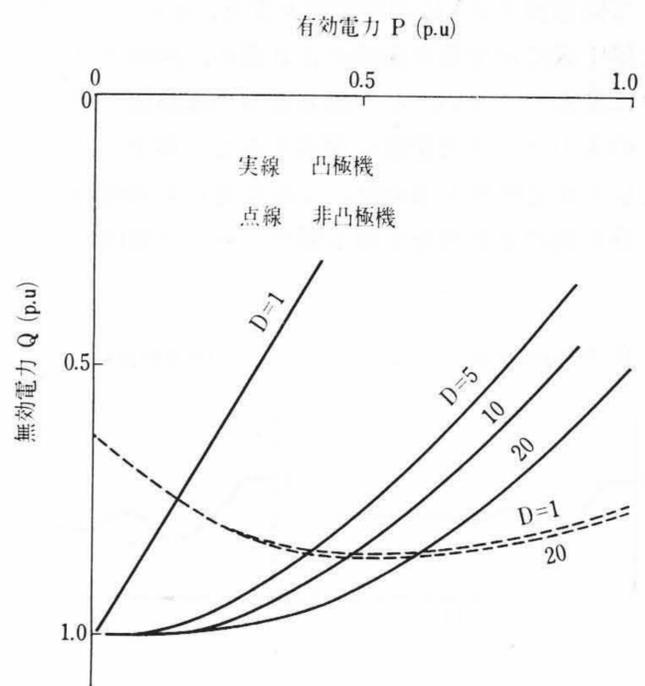
第 16 図は凸極機、非凸極機について x'_a の影響をみたものである。 x'_a の増加とともに安定限界は若干狭くなるが、その変化量は比較的少ない。



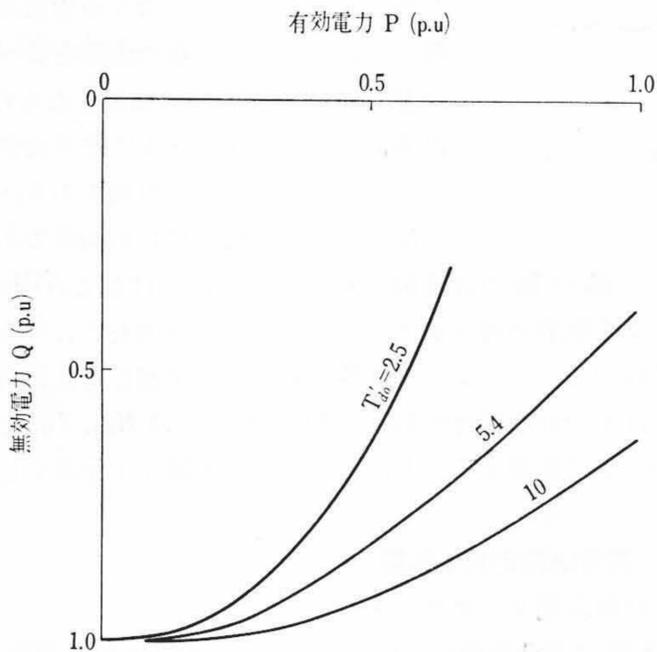
第 15 図 非凸極機における同期リアクタンスの影響



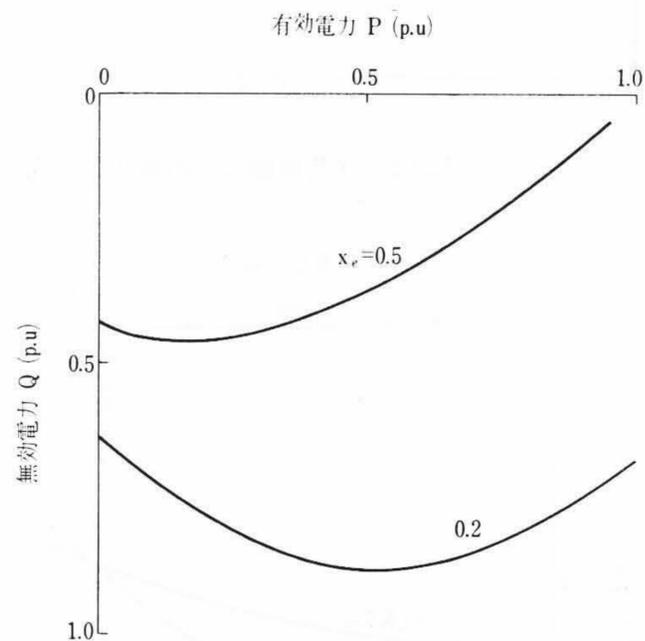
第16図 非凸極機, 凸極機における直軸過渡リアクタンス x'_d の影響



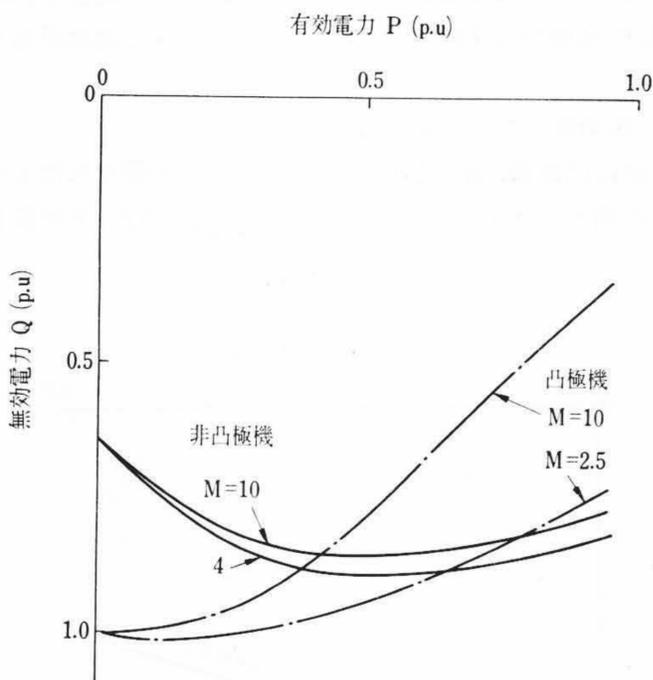
第19図 凸極機, 非凸極機における制動係数 D の影響



第17図 凸極機における開路時定数 T'_{d0} の影響



第20図 非凸極機における外部リアクタンス X_e の影響



第18図 凸極機, 非凸極機における単位慣性定数 M の影響

(3) 開路時定数 (T'_{d0}) の影響

第17図は凸極機について T'_{d0} の影響をあらわし、界磁時定数が短いほど安定限界がせまくなる。非凸極機も同様である。

(4) 単位慣性定数 (M) の影響

第18図は凸極機, 非凸極機について M の影響を調べた結果で、

M が小さいほうがむしろ安定限界はわずかではあるが広がっており、凸極機の場合この傾向はかなり顕著である。

(5) 制動係数 (D) の影響

第19図には凸極機, 非凸極機について D の影響を計算したものをかかげる。凸極機では D の効果がきわめて顕著であった。通常水力系統で $D > 10$ であるが、 D が異常に低い場合には安定運転範囲が極端にせまられることは注意しておく必要がある。これに対し火力機ではほとんど無視しうる程度である。

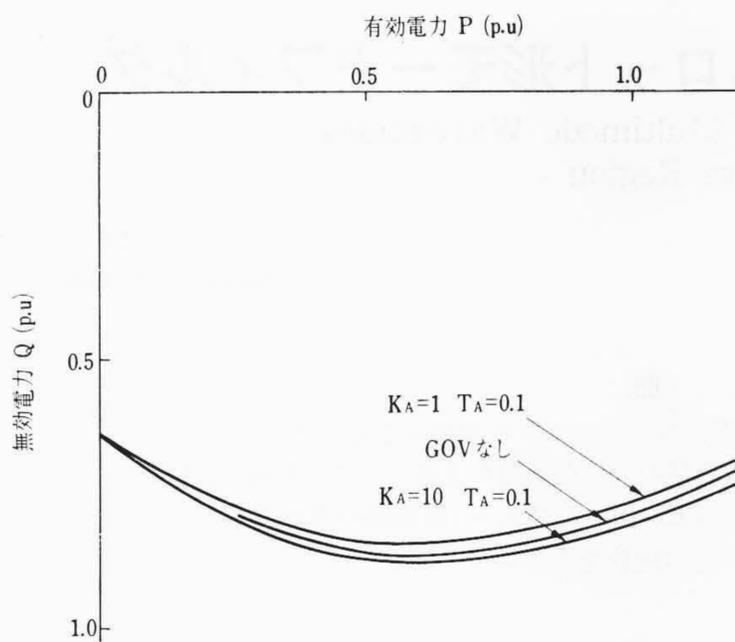
3.3.4 外部リアクタンス (x_e) の影響

第20図は x_e の影響を非凸極機について調査したもので、 x_e が増加すると安定限界は大幅に狭くなる。したがって、進相運転限界を決定する場合 x_e が最大になる条件について検討しておかねばならない。ところで実際の電力系統はきわめて複雑で、第1図の系統図のように簡単に表現できる等価的な外部リアクタンスを決定する方式が十分解明されておらず今後に残された課題といえよう。

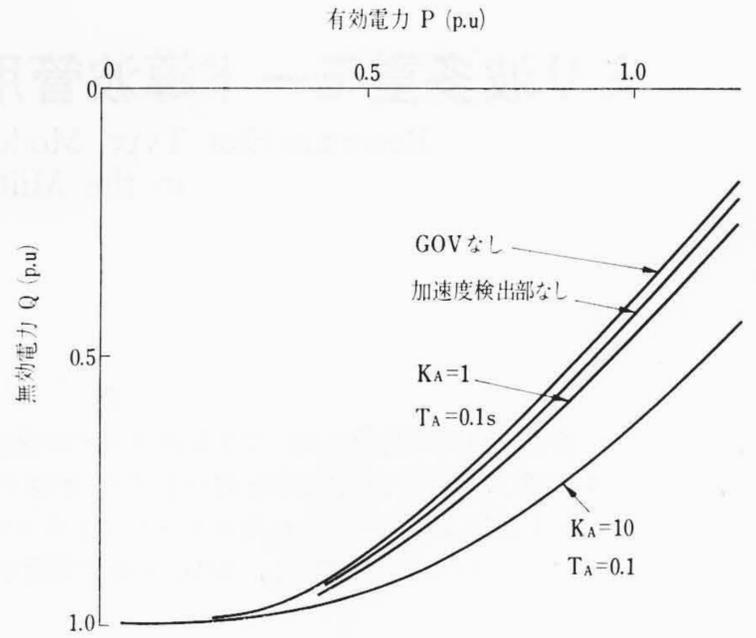
3.4 调速機の影響

以上の解析ではすべて励磁制御だけを考慮してきたが、さらに调速機動作の影響も含めて検討を行なった。計算は第3.3項第1表の基準条件のほか、调速機特性を次のように仮定した。

凸極である水力機用调速機.....第5図(1)において、 $K_1=95$,



第21図 火力機(非凸極機)におけるGOV定数の影響



第22図 水力機(凸極機)におけるGOV定数の影響

$K_2=6.35, T_2=0.03\text{ s}, K_3=0.02, K_4=0.95, K_5=0.95,$
 $P_c=3(\%), K_s=0.95, A_n=10, T_n=5\text{ s}$

加速度検出を行なう場合は上記のほかに,

$K_A=1.0, 10 \quad T_A=0.1\text{ s}$

非凸極なる火力機用調速機.....第5図(2)において, $T_1=0.1\text{ s},$

$T_2=0.25\text{ s}, P_c=0.03, K_3=0.3, K_4=0.7, T_4=7\text{ s}$

加速度検出を行なう場合は上記のほかに,

$K_A=1, 10 \quad T_A=0.1\text{ s}$

計算結果は第21, 22図である。両図から明らかのように調速機の効果は必ずしも顕著ではないが、第22図の水力機において加速度検出部の利得 $K_A=10$ にした場合にかなりはっきりした効果が認められた。

4. 結 言

同期機の動態安定度を解明するにあたり、1機—無限大系を用い、じょう乱量が微細で線形関係が成立するものとして進め、二反作用理論を採用して、各種パラメータの影響を検討した。

その結果、試算された範囲内において次のようなことを明らかにすることができた。

- (1) まず代表的な各種安定度を比較し、AVRが有効に働くときの動態安定度は定態ならびに過渡の安定度より安定限界が一般に広く、低励磁進相運転時にその値が大きいとみられる。

またAVRは過渡安定度に対しても、長距離送電のときなどにやや効果がみとめられる。

- (2) 低励磁進相運転の動態安定度をよくするためのAVRに要求される特性をかなり明らかにすることができた。そしてこの点のみに関しては磁気増幅器または回転増幅機形のものの方がほかの形のものよりすぐれているといえる。
- (3) 動態安定度に対し同期機特性の影響が凸極機と非凸極機で同様な傾向をもつとはいえず、単位慣性定数や制動係数の影響ではかなりな差があるといわねばなるまい。
- (4) 調速機に動態安定度の改善の効果を期待するのは無理のようである。しかし検出量として加速度を付加すれば有効な場合もある。

なお今後の課題としては線形関係が成立しない場合、複雑な系統における外部リアクタンスの決定法、あるいは多機系における解析などの問題がある。

参 考 文 献

- (1) H. K. Messerle: CIGRE No. 315 (1958)
- (2) W. G. Heffron, R. A. Phillips: TAIEE 71, Part III, 692~696 (1952)
- (3) 田中: 電学誌 83, 901 1755~1764 (昭 38)
- (4) 奥田, 高林: 電気学会東京支部大会 No. 239 (昭 39)
- (5) 高林, 奥田: 電気学会連合大会: No. 1016 (昭 40)
- (6) C. Concordia: Synchronous Machines 1951 (John Wiley)
- (7) 田口, 高林, 奥田: 日立評論 47, 1753 (昭 40-11)