

同期機の定態安定度

Steady State Stability of Synchronous Machine

田口 武夫*
Takeo Taguchi

高林 乍人**
Hayato Takabayashi

奥田 健三*
Kenzô Okuda

内 容 梗 概

同期機の定態安定度について凸極機、非凸極機の差異を長距離送電や低励磁進相運転などのときについて考察し、また飽和の影響をも検討した。

ついで過渡安定度との比較、あるいは短時間印加される過負荷に対する能力を検討した。

1. 緒 言

同期機の安定度に関する研究の歴史は古く、現在もひきつづき各種安定度の研究が行なわれている。

しかし最近では系統運用上長距離重負荷送電が必要になったり、都市ケーブル系統の増加により深夜時の低励磁進相運転の機会も増しつつある一方、同期発電機の容量が大きくなるにつれて製作費の低減のため短絡比の減少などが図られているので、安定限界に対する余裕を検討することが必要になっている。

ここにおいて、各種安定度の検討を行ない、所要の性能を有し均衡のとれた同期機選定の基礎資料をうることは有意義なことであると考え。

本報ではそのうちまず定態安定度について述べ、つぎに飽和の影響を検討した。さらに過渡安定度の計算を行ない、この二者間の比較をするとともに、同期機の過負荷能力について、負荷印加時間の長短による差異を求めた。

なお動態安定度を中心とする検討は次報にて記述する予定である。

2. 定 態 安 定 度

2.1 同期機の飽和を考慮しない場合

2.1.1 定態安定極限電力

飽和のない凸極同期機が外部リアクタンス x_e を介して無限大母線(その電圧 E)に接続されるとき特性は第1図のベクトル図で表わされ、その有効電力 P は次式で示される。

$$P = \frac{E E_0}{x_d + x_e} \sin \delta + \frac{E^2 (x_d - x_q)}{2(x_d + x_e)(x_q + x_e)} \sin 2\delta \dots (1)$$

ここに、 E_0 : 同期機の公称誘起電圧

x_d, x_q : 同期機の直軸、横軸同期リアクタンス

δ : E_0 と E との相差角 (本報では今後この δ を単に相差角と呼び、同期機端子電圧 E_t と E_0 との相差角を内部相差角と称することとする)

またベクトル図において

E_q : x_q の背後電圧

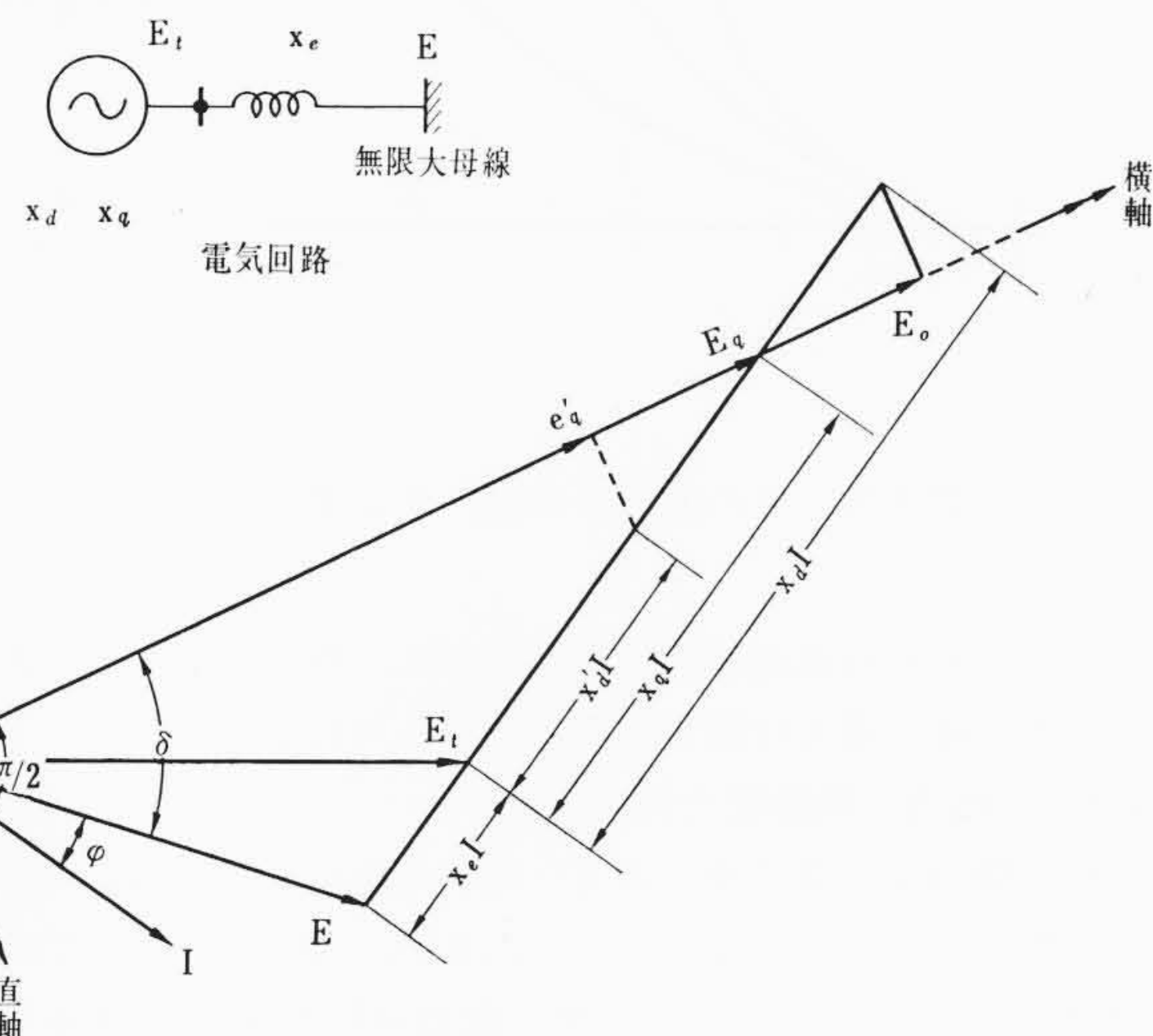
e'_q : 直軸過渡リアクタンス x'_d の背後電圧の横軸分

I : 電機子電流

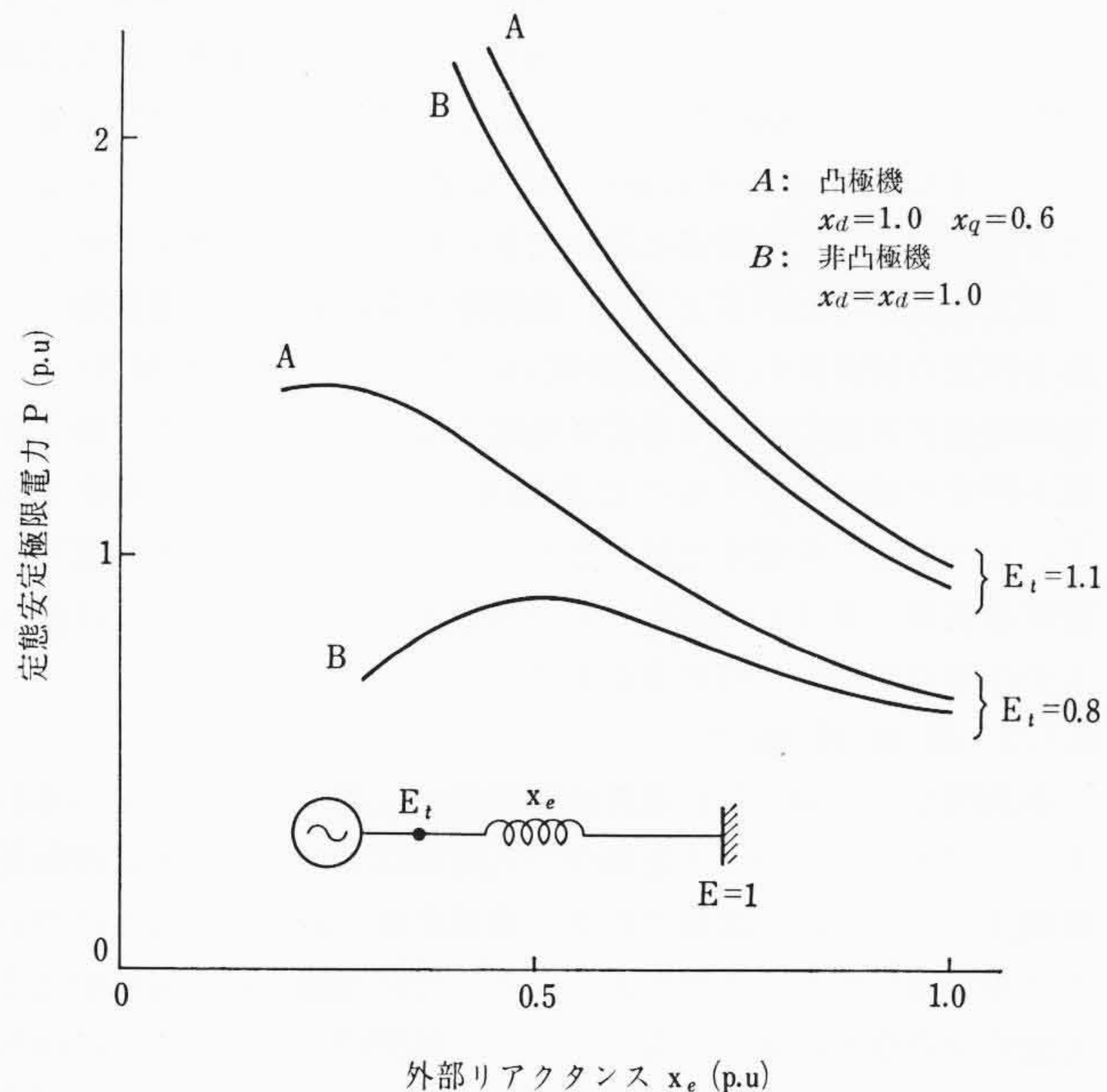
φ : E と I との力率角

非凸極機の場合は $x_d = x_q$ として求められる。

いま端子電圧を指定して各出力に対する界磁電流を上記ベクトル図より算出して E_0 を求め、(1)式より $dP/d\delta = 0$ ならしめる出力を求めると、これが定態安定極限電力であって、その計算値の一例を第2図に示す。



第1図 凸極機のベクトル図



第2図 定態安定極限電力

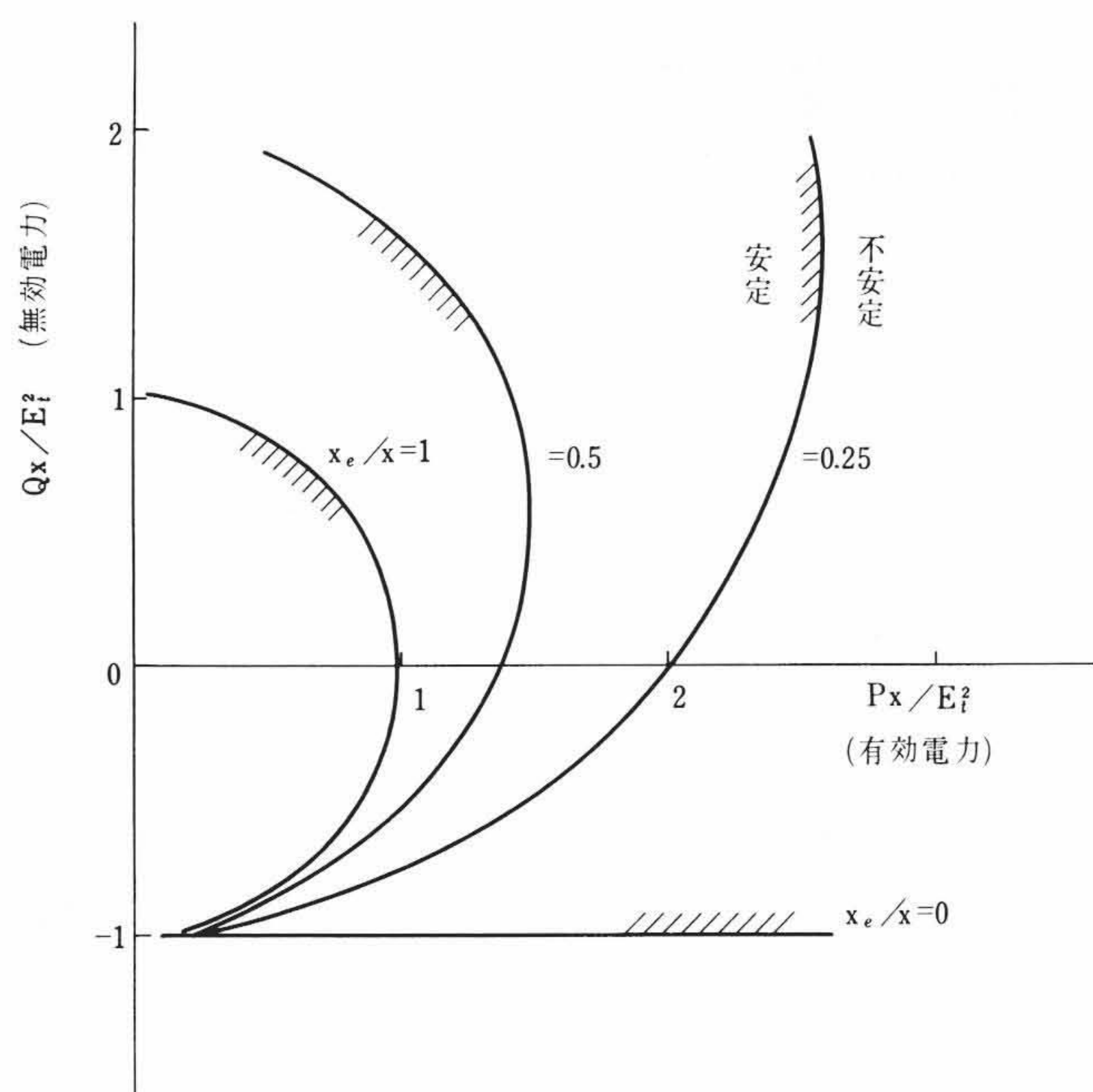
凸極機、非凸極機とも $x_d = 1$ としているが、 x_q の小さい凸極機のほうが非凸極機に比べ極限電力は大きくなっていることがわかる。

また、外部リアクタンスが大きく、端子電圧が母線電圧よりも大きい長距離送電になる領域では端子電圧が高いほど、また外部リアクタンスが小さいほど極限電力が大きくなる。

しかし、外部リアクタンスが小さく、端子電圧が母線電圧より

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立研究所 工博



第3図 非凸極機の出力—無効電力安定限界

小さくなる低励磁進相運転の領域では、外部リアクタンスが小さくなると極限電力は減少することがみられる。

2.1.2 出力—無効電力安定限界

同期機の安定度は通常適当な拘束条件のもとで出さうる最大の有効電力に着目して論ずるのであるが、見方を変えて有効出力(kW)をパラメータにとり、無効電力($kVar$)に注目する場合がある。もちろん安定限界条件は、定態安定度であるから、励磁が一定でかつ $dP/d\delta=0$ であり、有効電力と無効電力との関係で示すものとする。これについては周知のように、非凸極機の場合は第3図のような形で表わされる。このうち問題になるのは第4象限で、 E または E_f のいずれか一つと x , x_e およびパラメータとしての有効電力を与えて安定に運転できる最大の無効電力を求める。

第2,3図からわかるように、長距離送電の場合は発電機端子電圧を所定の値に保ち、かつ極限電力に注目して運転すれば良いが、低励磁進相運転の場合は通常有効電力はほぼ一定であり、端子電圧を所定の値に保持するには励磁を弱めねばならない場合が多く、したがって安定度は悪くなる。このようなときは無効電力安定限界曲線に着目して運転するのが望ましく、両者の間には運転上の注意点にかなりの相違がある。

2.1.3 過負荷能力

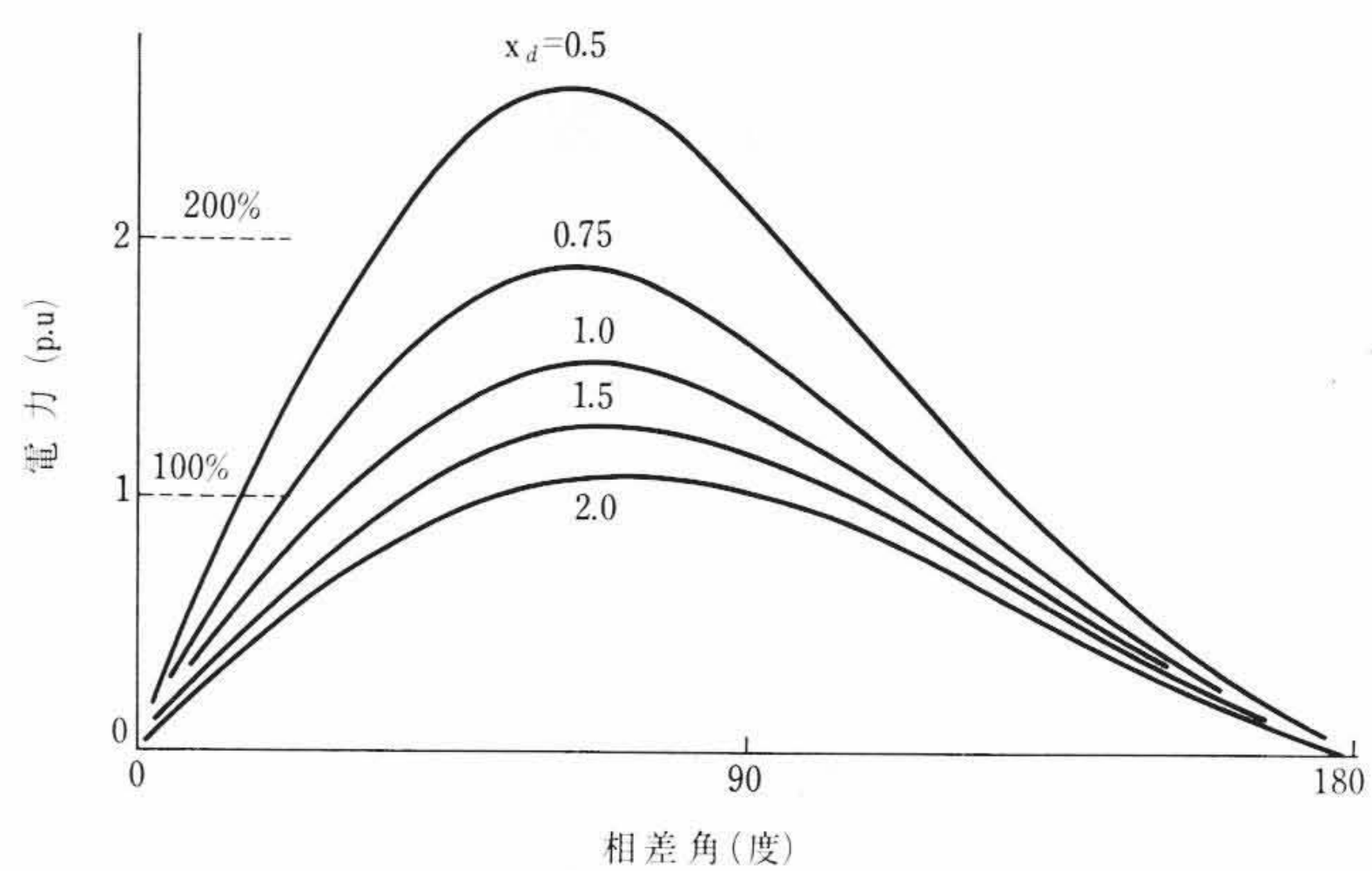
製鉄所などで用いられる同期電動機は、過負荷状態にさらされることが多く、このような場合でも同期はずれせず安定に運転を継続するためには、機械の容量、機械定数、励磁条件などについて十分考慮しておく必要がある。そこで同期機の過負荷に耐える能力を定量的に表わす方法として、同期機の励磁を一定に保ち徐々に負荷を増加して行き、安定に運転できる最大負荷と同期機の定格出力との割合を過負荷能力と名付けることにする。

無限大母線に接続される凸極同期機の出力は $E_f=E$ として(1)式より求められる。

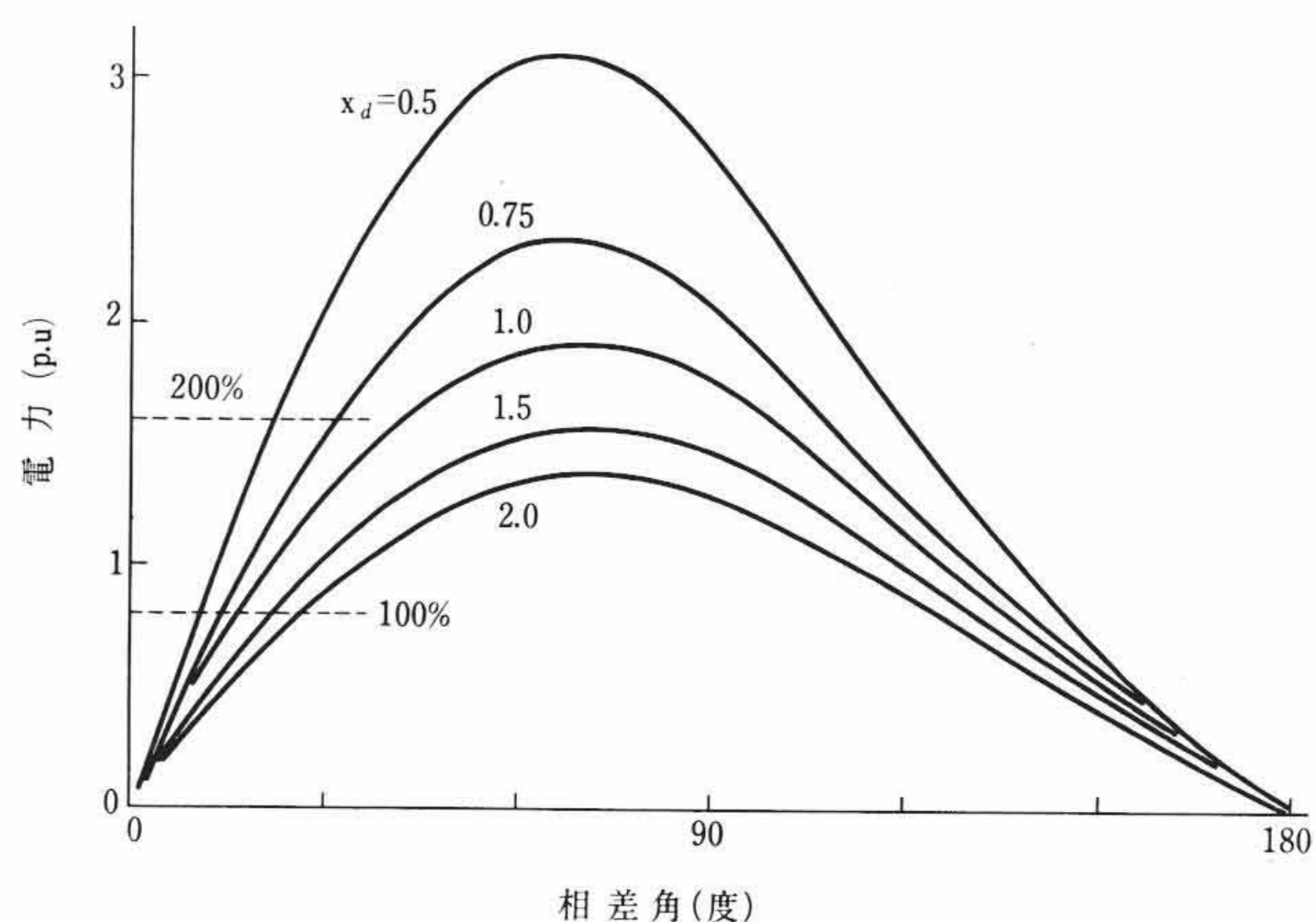
定格負荷時の励磁の強さを示す公称誘起電圧 E_0 を(1)式に代入し $dP/d\delta=0$ の点を求めると、この値から定格負荷時の過負荷能力がわかる。

第4図は $x_q/x_d=0.55$ として求めたもので機器容量を代表する x_d の大きさをパラメータとして示してある。

これより200%の過負荷に耐えるためには、定格負荷を力率1.0



(1) 力率1.0の場合



(2) 力率0.8の場合

第4図 凸極機の界磁電流を定格負荷時の値に一定に保った場合の電力相差角曲線

で運転しているものではおおむね $x_d < 0.7$ 、力率0.8で運転しているものでは $x_d < 1.4$ でなければならない。ここで当然ながら励磁が多くかかっているものほど過負荷能力は大きくなる。

2.2 同期機の飽和を考慮した場合

2.2.1 飽和のある同期機のベクトル図

同期機の無負荷飽和特性が非直線であることはよく知られているが、非凸極機にてこの非直線性を考慮に入れたベクトル図を考察する。いま飽和特性を第5図(1)に示したようにする。

まず電圧そのものを取り出すと、無限大母線電圧 E 、同期機端子電圧 E_f 、外部リアクタンス電圧降下 $x_e I$ 、電機子漏えいリアクタンス降下 $x_l I$ および x_l の背後電圧 E_l であって、そのベクトル関係は第5図(2)のようになる。

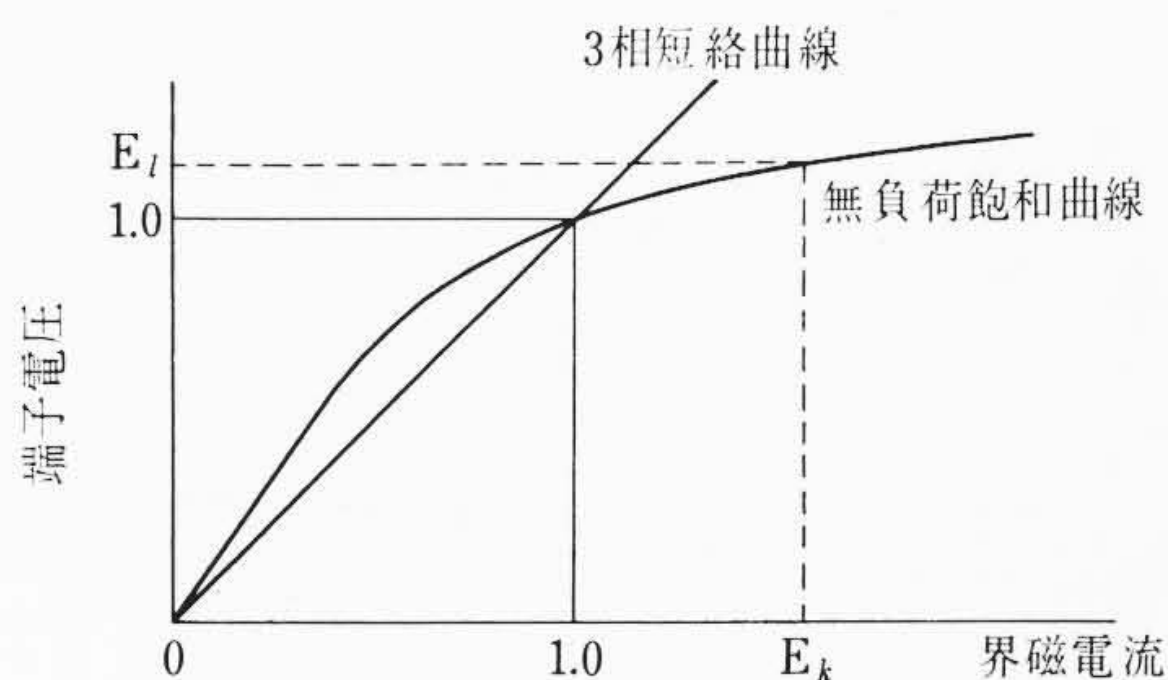
一方界磁電流のアンペアターン（以下ATと略称する）や電機子反作用のATについて考察する。そのベクトル表示は位相角についてはそのATによる磁束で誘起される電圧の位相角をとり、大きさについてはATの大きさをを用いることとする。そしてあたかも電圧のように取り扱ってゆく。

空げきに E_l を発生させる磁束に対応するATを表わす E_k のベクトルの位相角は E_l と同相であり、その大きさは無負荷飽和曲線第5図(1)における E_l を生ぜしめる界磁電流のATである。

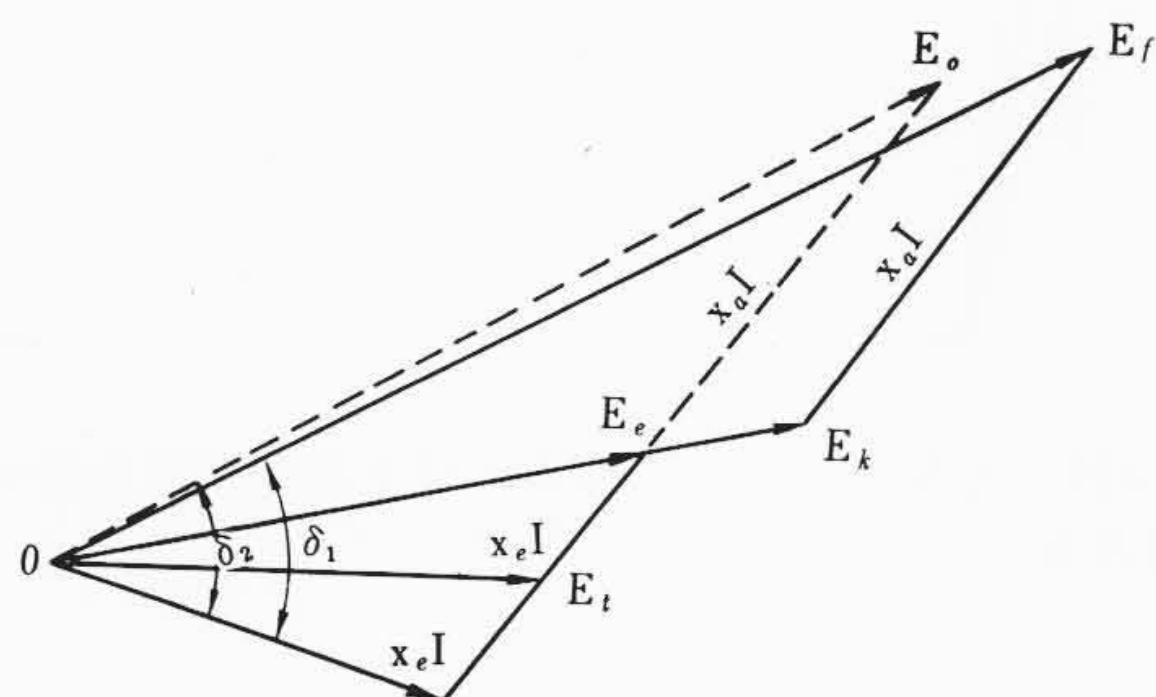
電機子反作用のATは $x_a I$ であり、よって界磁電流のATは E_k と $x_a I$ との合成となり、その合成値を E_f で表示した。

ここにおいて E_l を媒介として、電圧に関するものとATに関するものとを組み合わせ、第5図(2)のようにまとめられる。点線は飽和のないときを示したものである。

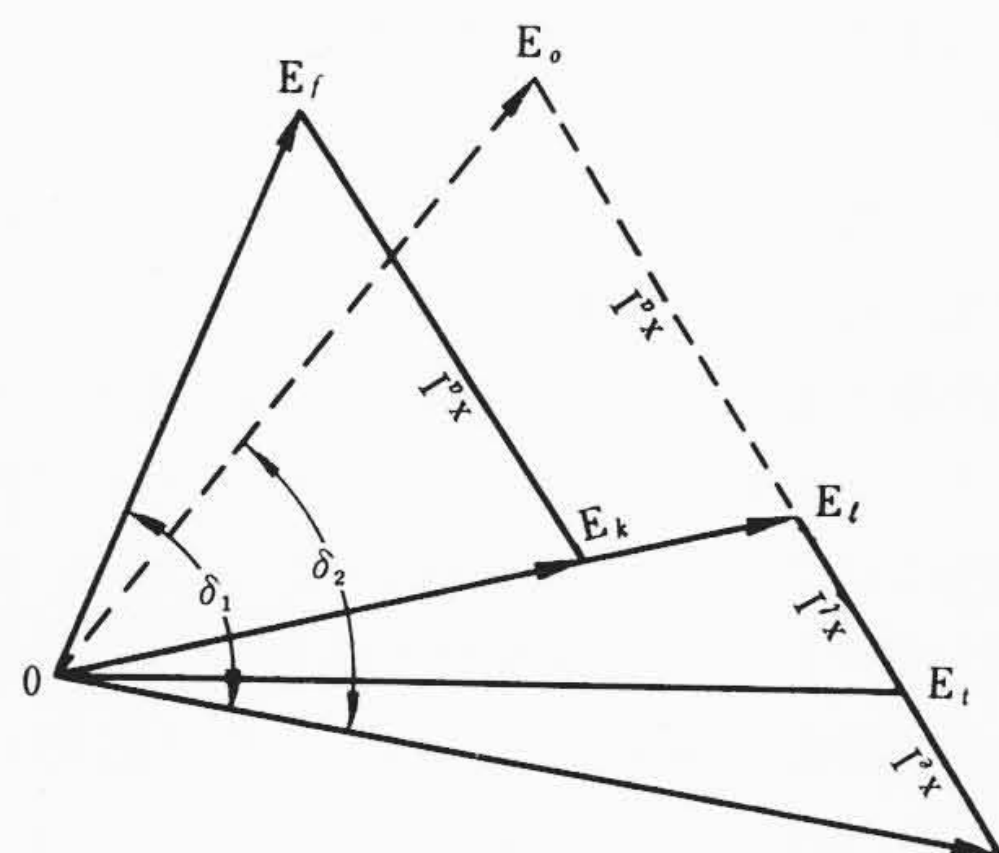
この E_f について若干言及すると界磁アンペアターンをまた簡



(1) 飽和ある同期機特性



(2) 長距離送電のとき 点線は飽和のないときを示す



(3) 低励磁進相運転のとき

第5図 飽和のある非凸極同期機のベクトル図

単に界磁電流をベクトル表示するものであり、横軸に固定されている。飽和がなければ E_t は公称誘起電圧 E_0 に一致する。

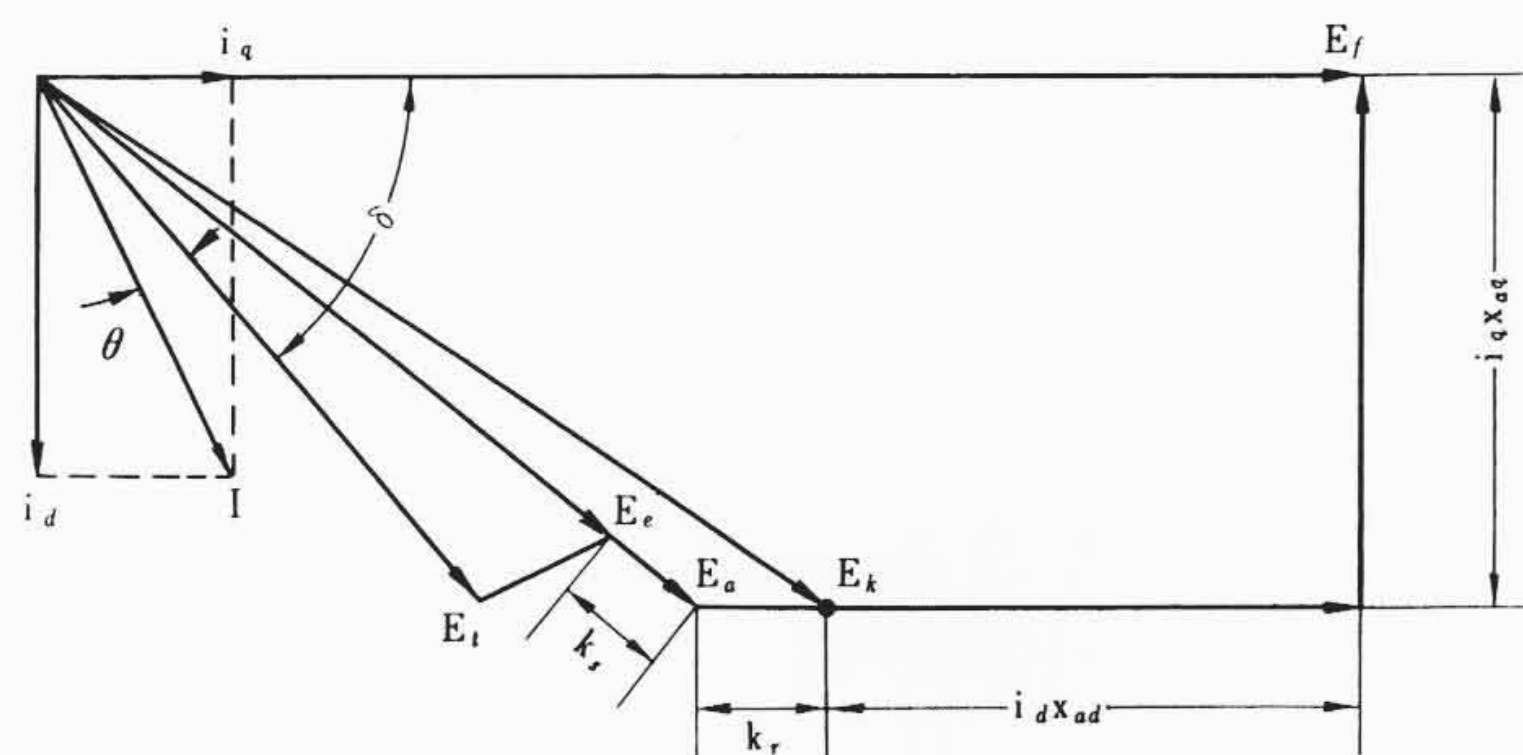
飽和を考慮する場合の同期機の内部相差角、すなわち端子電圧と界磁アンペアターンによって生ずる磁束で誘起される内部電圧との相差角を求めるには E_f と端子電圧 E_t との間より得なければならないことになる。

低励磁進相運転のときは第5図(3)に示してある。

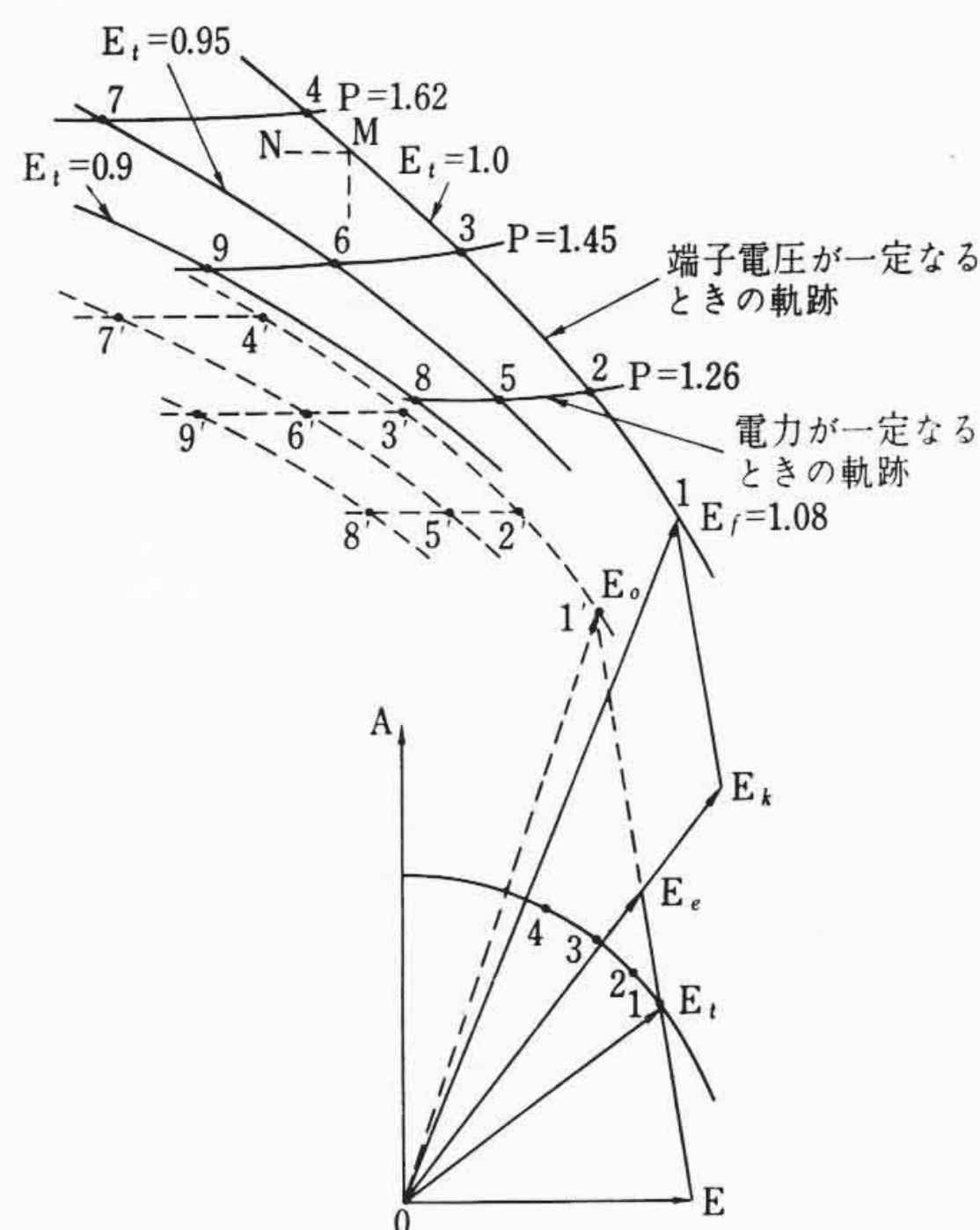
凸極機の場合はやや複雑になる。直軸、横軸にわけて各飽和曲線を与えて求める方法と固定子の飽和特性、回転子の飽和特性とをそれぞれ与えて考える方法とがあるが、ここでは後者について述べる。第6図はそのベクトル図である。 E_k を求めることが要点である。固定子の飽和は直軸、横軸に無関係であるから、 E_t なる電圧を誘起させる磁束が固定子を通るに要する AT の量 k_s を E_t の延長上に加えて E_a を定め、つづいて回転子の飽和は直軸のみが発生するとみなしてこの磁束の回転子を通るに要する AT の量 k_r を横軸に平行に E_a に加えて E_k が求まる。これに電機子反作用の $i_d x_{ad}$, $i_q x_{aq}$ を加えてベクトル図がまとまる。

飽和が存在すると同期機の定数が明確にならないことが生ずるのでやはり基準としては JEC で定められた方式を使用する。すなわち定格値の無負荷端子電圧を出す界磁電流と定格値の三相短絡電流を生ぜしめる界磁電流の比を短絡比とし、その逆数が単位法での直軸同期リアクタンスである。

また電機子反作用リアクタンスは漏えいリアクタンス降下が無負荷飽和曲線の直線部にあるとき求められた値とする。



第6図 飽和のある凸極機のベクトル図

第7図 飽和がある非凸極機の長距離送電時の界磁電流をベクトル表示する E_f の軌跡と定態安定境界

2.2.2 飽和を考慮に入れた定態安定極限電力

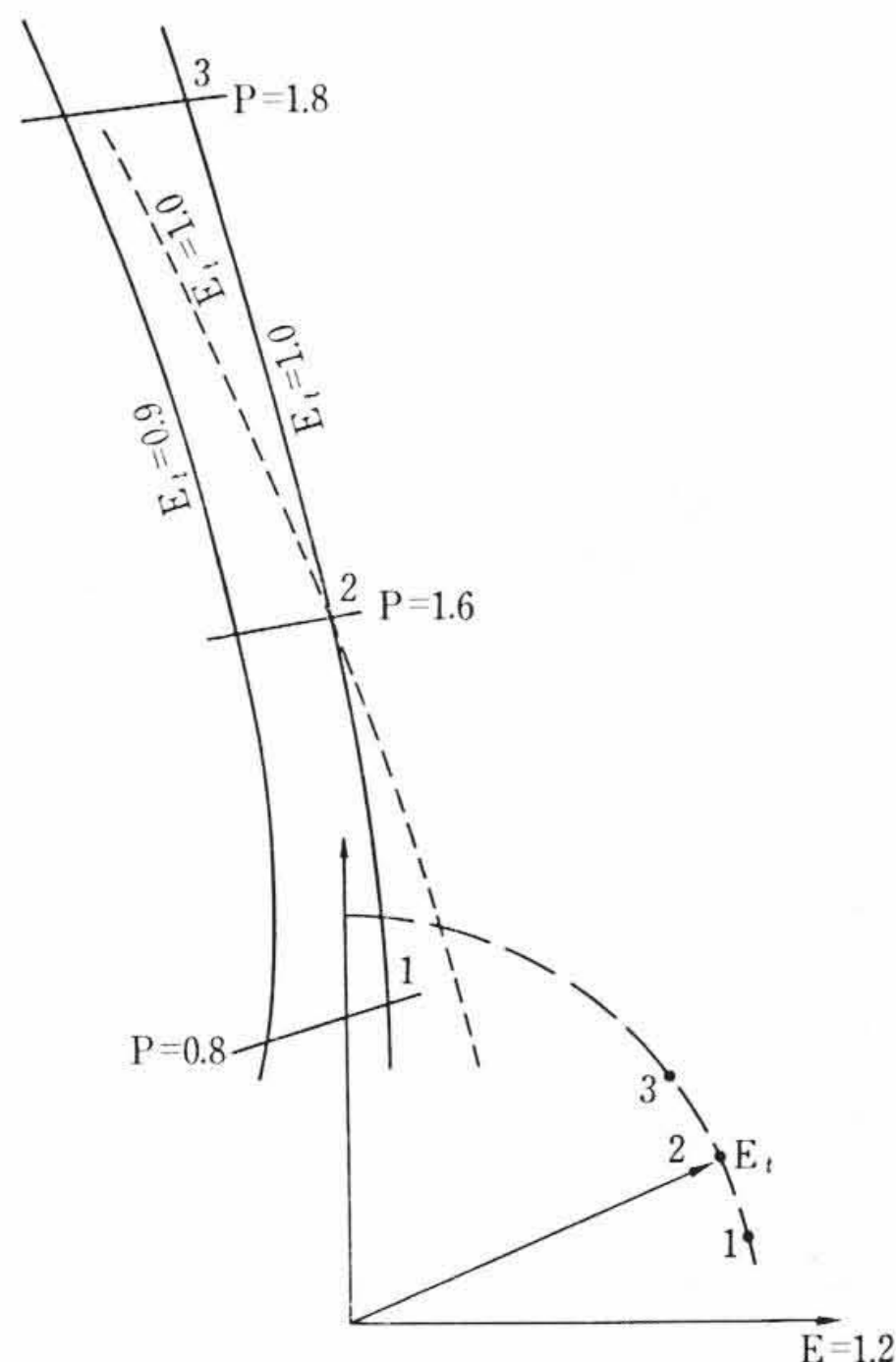
(1) 図式計算

定態安定度は界磁電流が一定であるという条件にて解くものであり、ここに飽和のある同期機について前述のベクトル図を用いて図式計算をする。

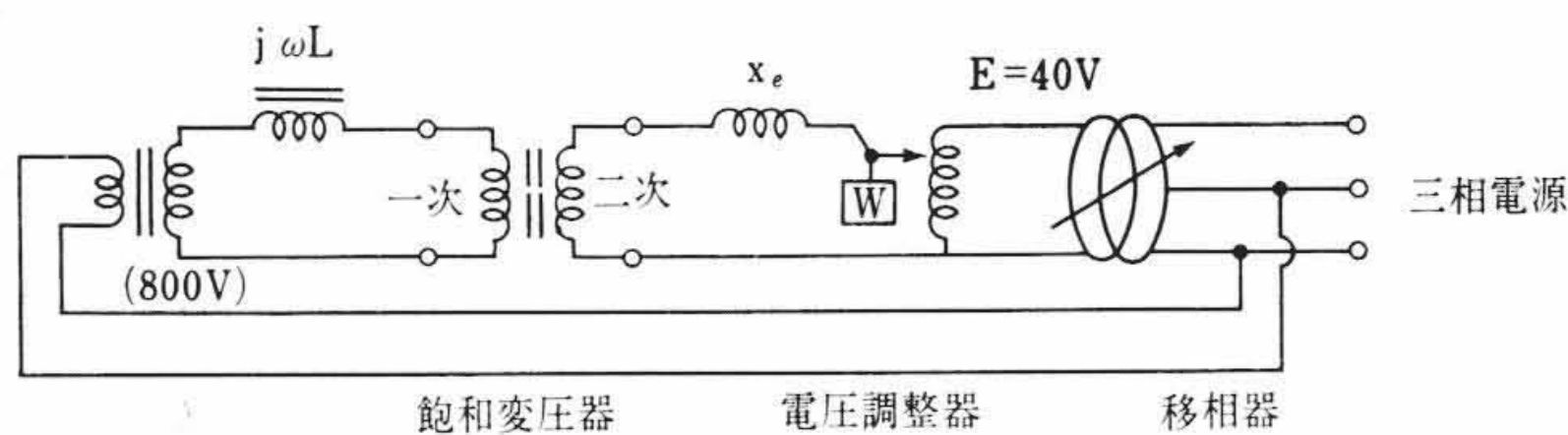
まず長距離送電領域について述べる。第7図は短絡比 1.0 で漏えいリアクタンス $x_l=0.3$, 電機子反作用リアクタンス $x_a=0.7$, 無負荷飽和特性が $0.6+0.4 I_f$ なる折線で示される非凸極同期機が、外部リアクタンス $x_e=0.5$ を通して電圧が 0.9 なる無限大母線に接続された場合の E_f の軌跡である。なお無限大母線電圧 E を基準ベクトルとしている。OA は OE と直角なる直線で単なる補助線である。

E_f の軌跡は端子電圧をパラメータにとり有効電流を変化した場合について求めたもので、曲線 1234 が端子電圧 $E_t=1.0$ の場合であり、曲線 567 が $E_t=0.95$ また曲線 89 が $E_t=0.9$ なるときの軌跡である。有効電力が一定なるときの軌跡は 258, 369 および 47 などの曲線となる。

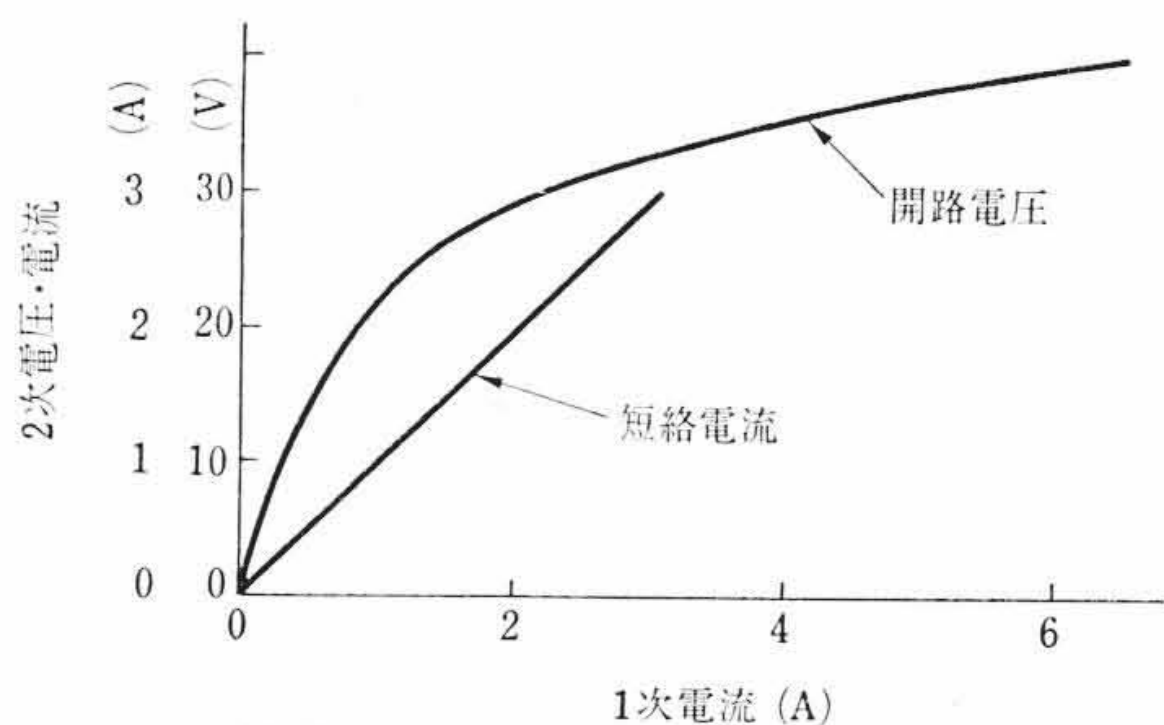
点線は短絡比 1.0 で $x_l=0.3$, $x_a=0.7$ の飽和のない同期機の場合を描いたものである。さて、これより上記系統で $E_t=1.0$ なるときの定態安定限界を考えるとこれは界磁電流が一定で、位相角が増加したとき有効電力 P が減少しない限界を求めることである。 $E_t=1$ なるときの軌跡 1234 なる曲線上のある点 M をとり、O を中心とし OM を半径とする円が、電力一定なる曲線群のうちの M を通過する MN と接する場合は、この M 点が安定運転限界点となる。



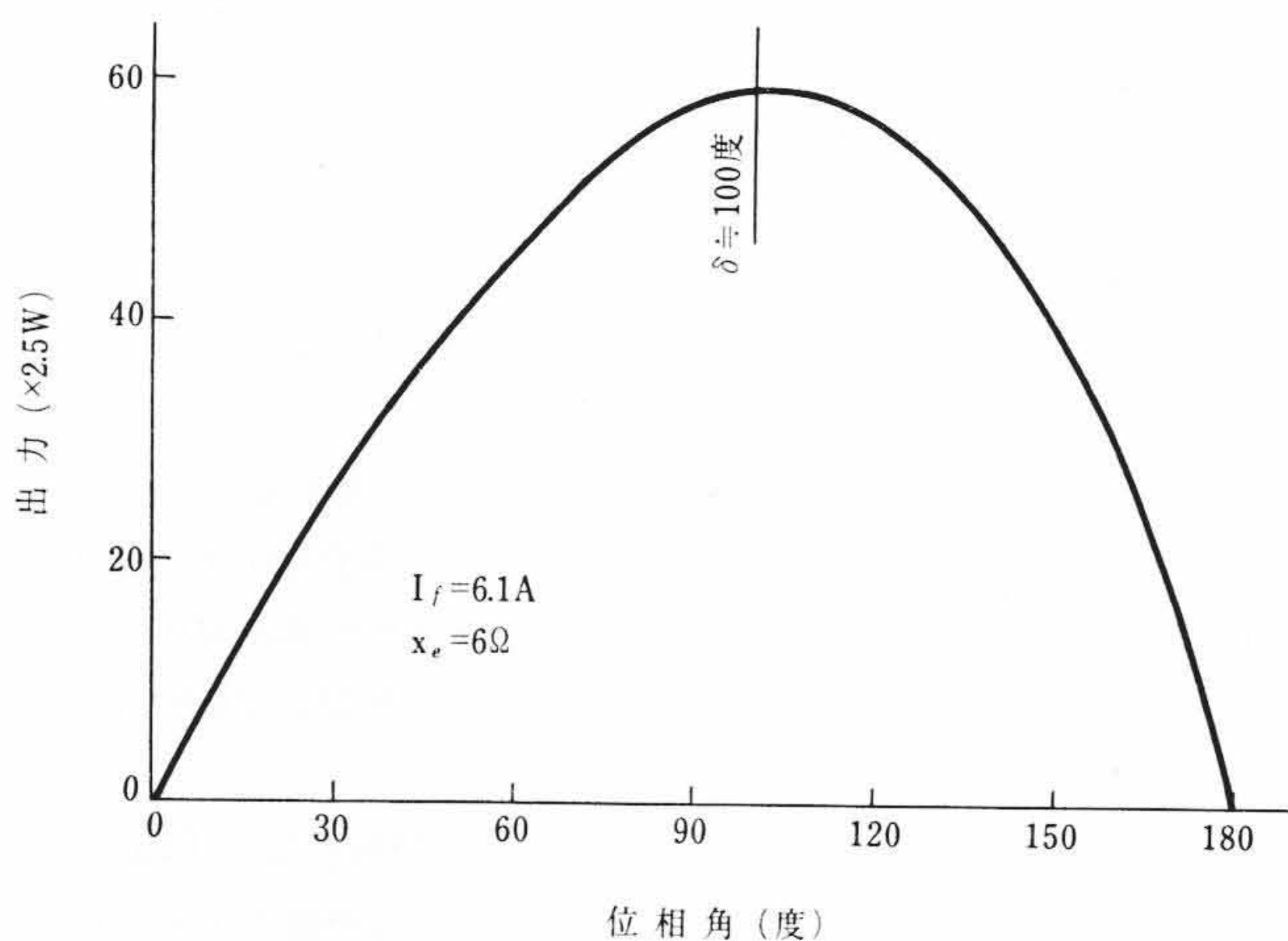
第 8 図 飽和がある非凸極機の短距離送電時の界磁電流をベクトル表示する E_f の軌跡



(1) 模擬回路



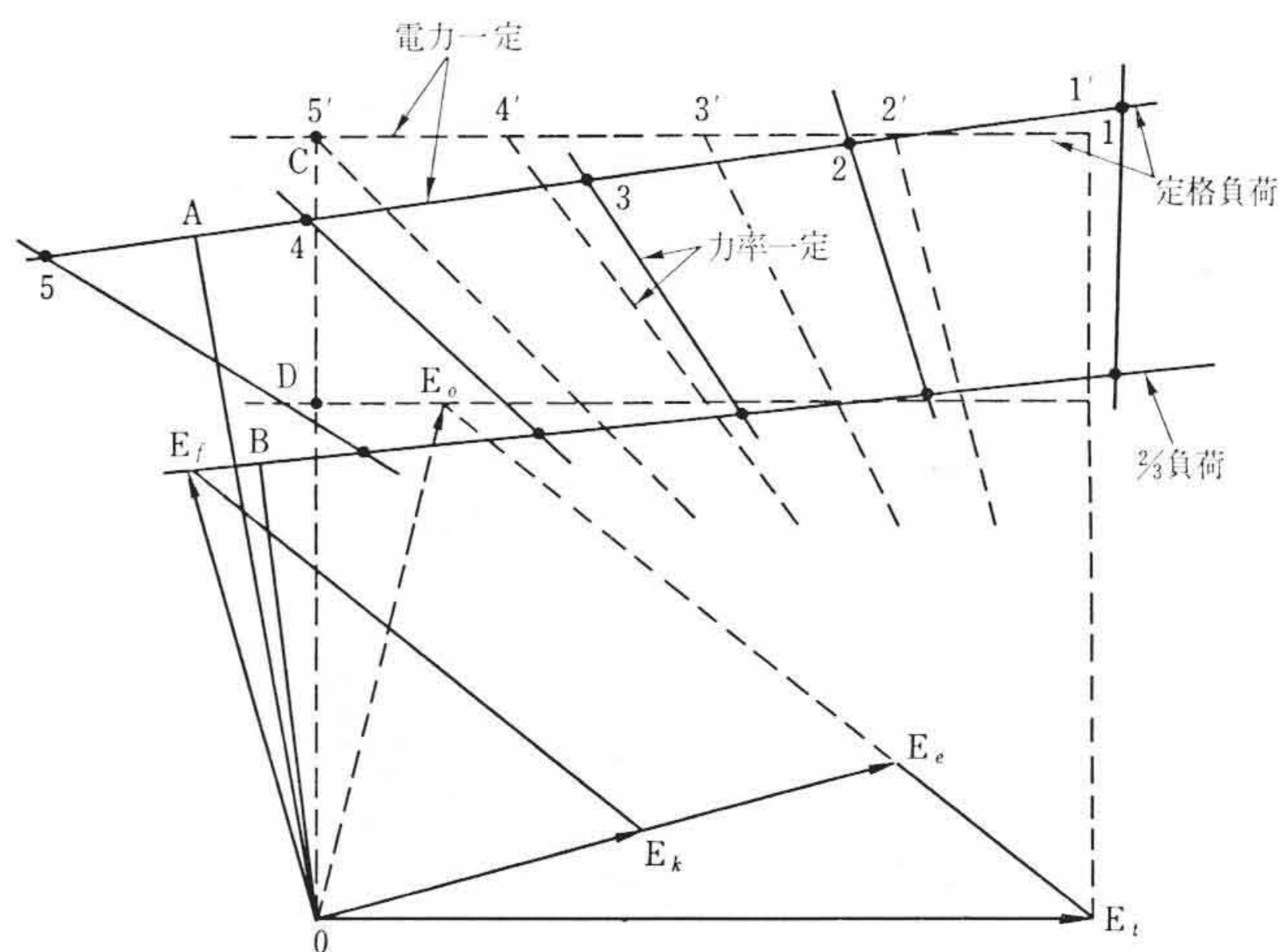
(2) 飽和変圧器特性



(3) 出力位相角特性

第 9 図 飽和のある非凸極機の模擬回路とその実験結果

もし、この円が MN を右下より左上へ交さして通るならば位相角が増加すると MN の示す電力よりもっと大きな電力をもちうることになるし、もし MN を右上より左下に交さして通過するなら



第 10 図 飽和のある非凸極機の低励磁進相運転時の界磁電流をベクトル表示する E_f のベクトル軌跡

位相角が増加すると MN の示す電力より減少するので不安定となる。したがって接するときが最大値を与えることとなる。

曲線 47, 36 などが OE と約 3 度傾いているから、OM の位相角は約 93 度となる。

出力をみると飽和のないとき $P=1.45$ であるのが飽和があると $P=1.55$ 程度、約 7% の増加となっている。

つぎに短距離送電で無限大母線電圧が端子電圧より高く、また外部リアクタンスもあまり大きくない場合について計算する。無負荷飽和特性は同様に $E_t=0.6+0.4 I_f$ で、 $x_t=0.3$, $x_a=0.7$, $x_e=0.3$, $E=1.2$, $E_t=1.0$ および 0.9 なる場合が第 8 図である。

このときの定態安定極限電力は $E_t=1.0$ で飽和のないとき約 1.6 であるのが、飽和があると約 1.8 ぐらいになり約 12% 増加している。このときの位相角は約 97 度となる。

当然ではあるが外部リアクタンスが大きいときは飽和の影響は小さく、外部リアクタンスが小さくなると飽和の影響は大きくでてくるのがわかる。

(2) 模擬回路による実験

交流計算盤で移相器、電圧調整器およびリアクトルで発電機単位を構成させるに準じ、飽和のある非凸極機の送電回路を第 9 図 (1) のように組んだ。

飽和変圧器は第 9 図の (2) のような特性をもつもので、高電圧を大きなリアクトルを介して一次に印加し、その電流は二次出力の影響をほとんど受けないようにする。すなわち同期機の界磁直流電流と同じ役割を演じさせるようにする。

第 9 図 (1) の回路で模擬同期機の出力を位相角を変えて測定して第 9 図 (3) のような結果を得た。

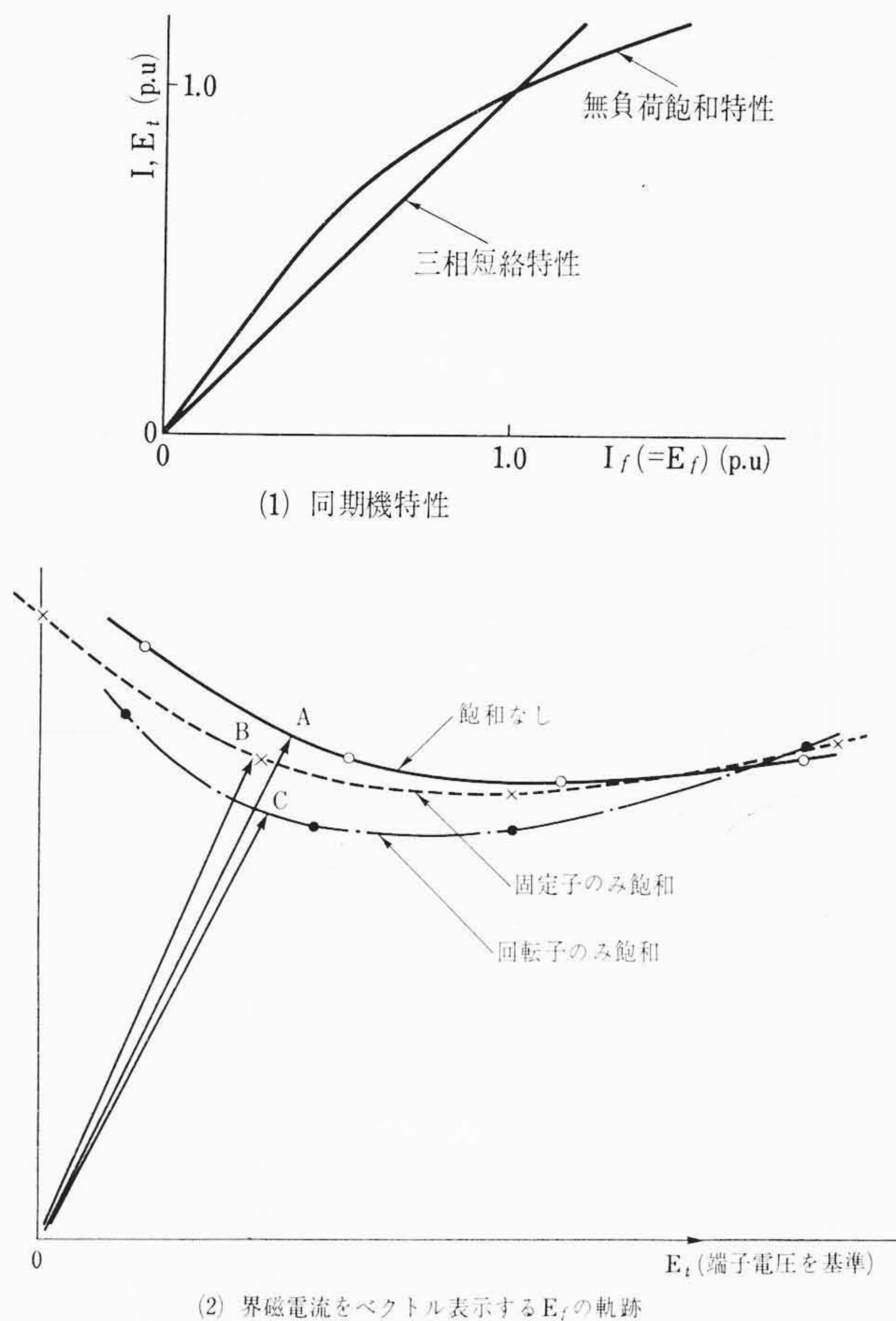
最大出力を出す位相角は 90 度を越えて 100 度付近となるのがみられる。

飽和変圧器を飽和させて利用しているので高調波を生ずるが、電力計の位置を送電端または受電端と変えてもほとんど変化がなく、影響を受けていないことを示している。

2.2.3 飽和を考慮に入れた出力—無効電力安定限界

これはさきに述べたように低励磁進相運転領域にて出力をパラメータとしどれほど進相無効電力をとりうるかを求めることになり、飽和がある場合はそのベクトル図によって検討を進める。

いま非凸極機において、短絡比 1.0, $x_t=0.3$, $x_a=0.7$, $x_e=0$ および無負荷飽和特性を $E_t=0.6+0.4 I_f$ とし、有効出力 (kW) が一定で進相容量 (kVar) が変化したときの界磁電流をベクトル表示する E_f の軌跡を図式計算し第 10 図が得られる。同図にはまた点



第11図 凸極機の無効電力変化による界磁電流をベクトル表示する E_f のベクトル軌跡

線にて飽和のないときをかけた、1と1', 2と2'などそれぞれ同期機出力の等しい場合の E_f を対比させてある。

定態安定度をみると、すでに明らかなように原点0より電力一定なる曲線へ垂線を引いたとき、その足のA, B点が極限値を与える。飽和がないときは同様な意味での点線上のC, D点が極限値を与える。

A, B点とC, D点とを比較すると前者は位相角は約100度近くになっているが、進相容量でみるとその点の位置より20%近く減少することがわかる。

凸極機の場合は第11図で、 $x_d=1.0$, $x_q=0.6$, $x_l=0.3$, その無負荷飽和曲線は第11図(1)のように一般のものよりやや飽和度を強くしたものを選定してある。

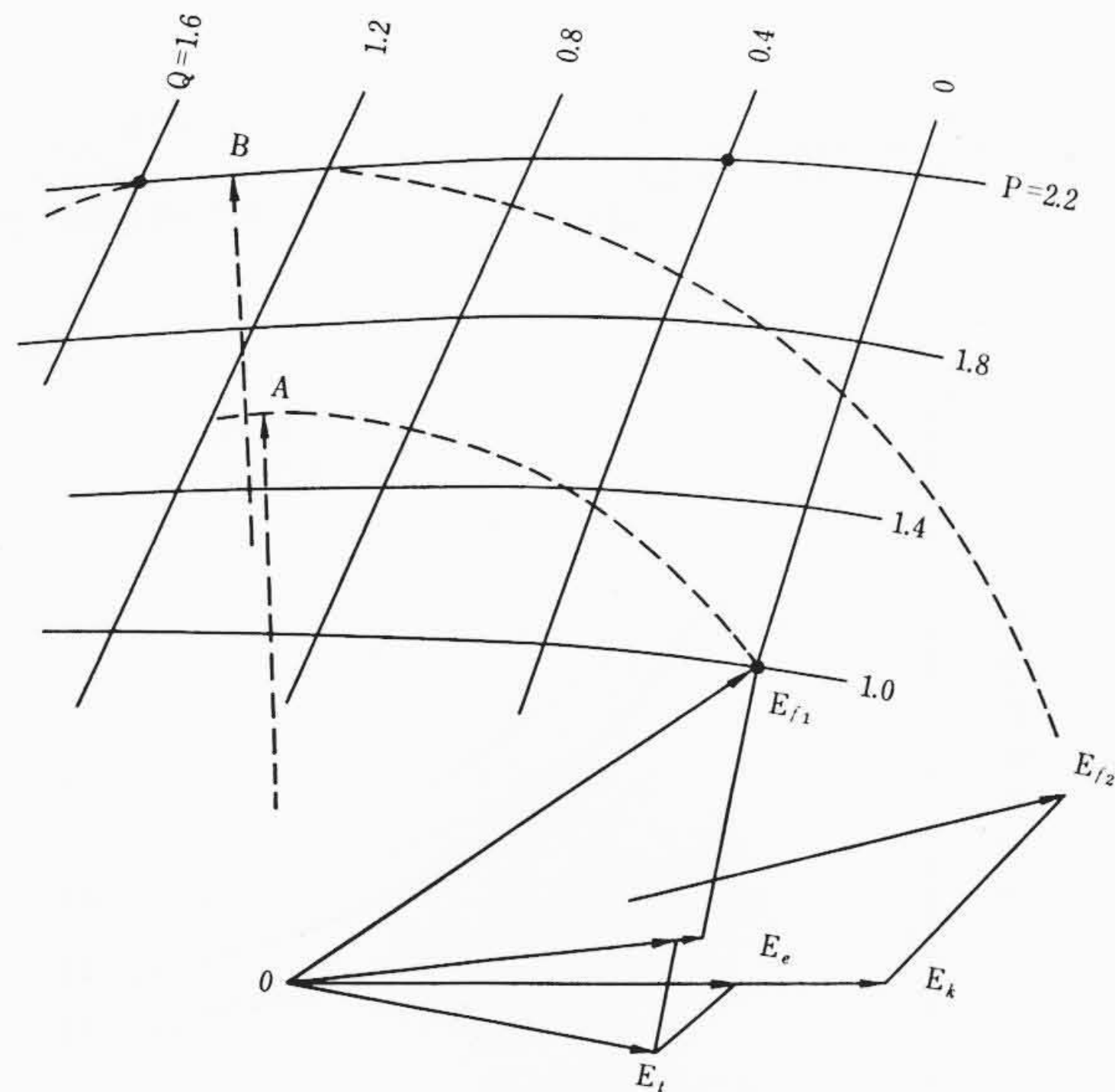
端子電圧が1.0で有効電力も1.0なるときの無効電力の極限値を飽和のない場合、飽和があってそれが固定子側のみにある場合、および回転子側のみにある場合を比較した。限界点のA, BおよびCについてみると、

	有効電力	無効電力	位相角(度)
飽和なし A	1.0	1.15	63
固定子のみ飽和 B	1.0	1.05	62
回転子のみ飽和 C	1.0	1.10	67

飽和が存在すると進相無効電力の最大値は低下し、また凸極機と非凸極機とを比較すると、回転子の飽和より固定子の飽和の影響のほうが大きいという点より、非凸極機のほうが飽和の影響を大きくうけると考えられる。

2.2.4 飽和を考慮に入れた場合の過負荷能力

飽和のある場合の過負荷能力は今までと同様に界磁電流を表わ



第12図 飽和のある非凸極機の過負荷能力計算図

す E_f のベクトル軌跡より求められる。

第12図はさきの例と同じく無負荷飽和特性が $0.6+0.4I_f$ なる折線で示される非凸極機について、有効電力、または無効電力を一定として求めた曲線群である。

力率が1.0なる定格負荷時の界磁電流をベクトル表示する値は E_{f1} , 0.8 なるとき E_{f2} であって、この界磁電流のときの最大負荷はOを原点とし E_{f1} , E_{f2} を半径とする円と、有効電力一定なる曲線群と接する点A, Bより与えられる。

飽和がないときの最大負荷はそれぞれ1.5, 2.0であるのが、飽和があるときには約1.6, 2.2に上昇するのがみられ、またそのときの位相角は90度を越えている。

飽和があると過負荷能力は増大し、かつその増加量は考慮に値するといえる。

3. 定態安定度と過渡安定度との比較

以上同期機の定常状態につき飽和のないときおよび飽和があるときの極限電力の状況を述べてきたが、これと過渡時の安定極限電力とどんな関係にあるかを代表的な場合について記述する。ここでは飽和はないとする。

3.1 過渡および定態安定度の比較

過渡安定度の計算の概要を述べる。例題は外部リアクタンスを介して無限大母線に接続されるときである。

さて、回転部の運動方程式は、

$$\frac{M}{\omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega} \cdot \frac{d\delta}{dt} + P(\delta) = T_M$$

ここに、 M : 単位慣性定数

D : 制動トルク係数

$P(\delta)$: 同期機の電氣的トルク

T_M : 機械的軸トルク

ω : 角速度

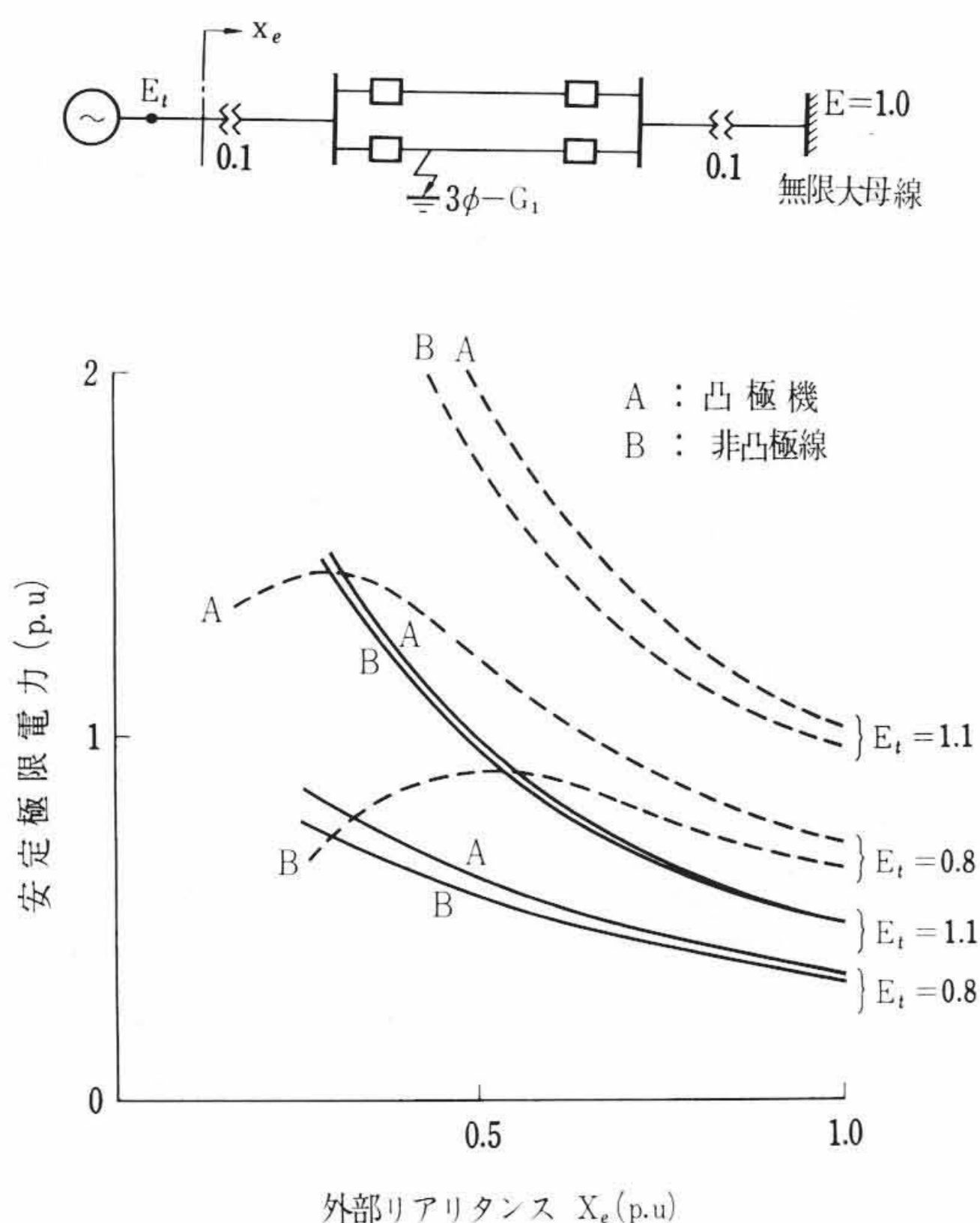
t : 時間

同期機の電氣的な諸量の関係は第1図のベクトル図のとおりであって有効電力は、

$$P = E_q \cdot i_q$$

である。

また過渡時には、過渡より定常への過程を連続的に考察する要があり、界磁磁束の変化を考慮すれば、



第13図 過渡安定極限電力(実線)と定態安定極限電力(点線)との比較

$$E_x = T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} + E_0$$

ここに、 E_x : 界磁端子電圧

T_{d0}' : 開路時定数

E_0 : 公称内部誘起電圧

これらの計算をデジタル計算機によって進めた。

従来過渡安定度の計算はその困難さのため $x_d' = x_q$ として、等価リアクタンスとして x_d' を用い、また界磁磁束の減衰を無視してすすめていたがここでの計算はこれらの仮定をおかず求めた。

計算結果は第13図に示される。

2回線送電線にて、送電端に三相短絡が発生し、0.1秒後に故障回線が遮断された場合の過渡安定極限電力を縦軸にとり、横軸には故障回線が除去されるまでの送電回路のリアクタンスを外部リアクタンスとして用いている。

また同図には点線にて、その外部リアクタンスをもつ場合の定態安定極限電力をかかげてある。

この図より次のようなことがわかる。

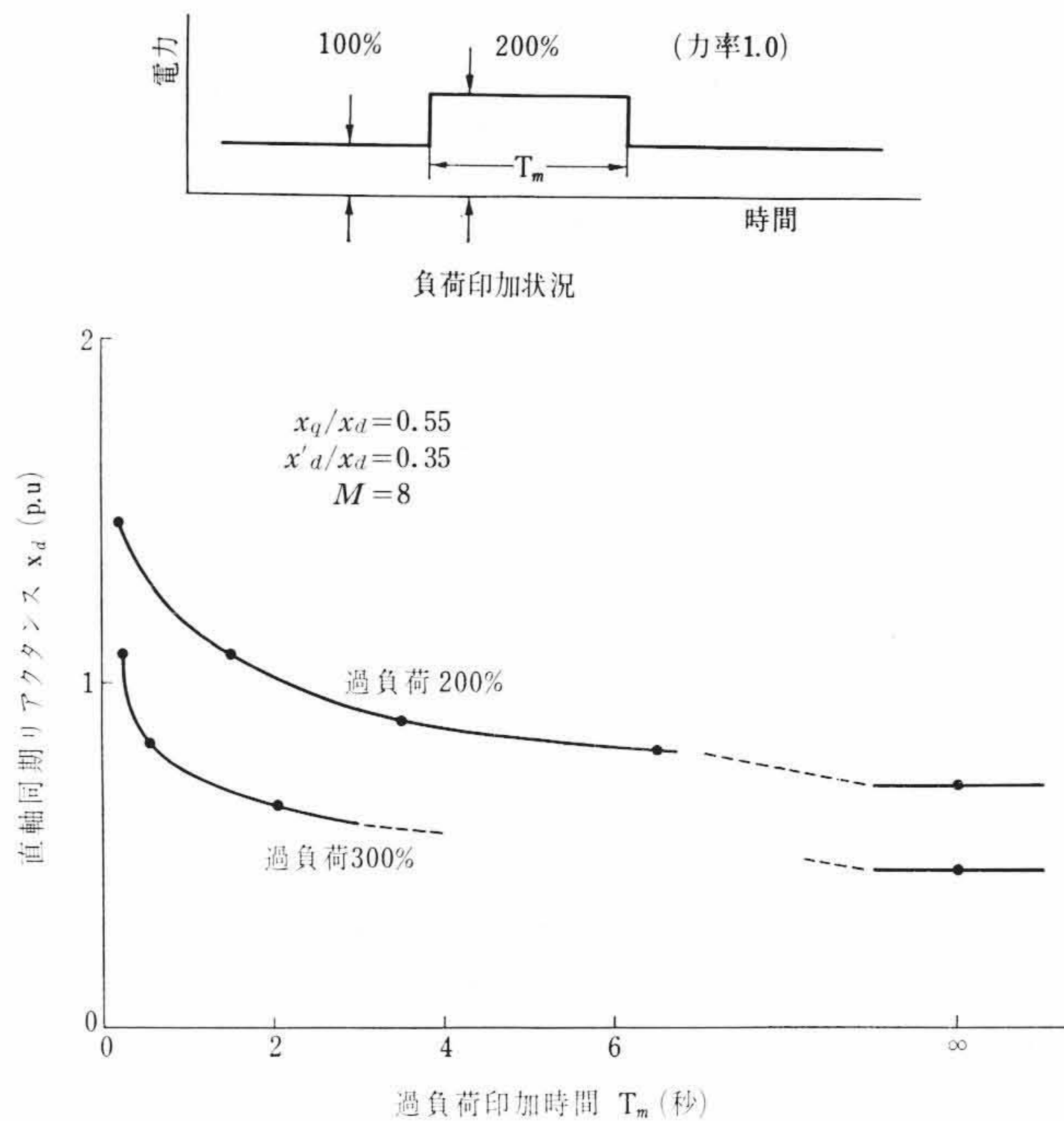
過渡安定度は凸極機が非凸極機よりやや良好である。しかしこれは同じ電力を送る場合の初期位相角が前者の場合が後者よりやや小さいためという程度とみられる。しかし過渡安定度を定態安定度と比較してみると大きな差がある。すなわち低励磁進相運転になってきても、定態安定度のように減少するようなことがなく、外部リアクタンスが減少すれば増加する傾向になる。そして定態安定度を上まわることがみられる。

同期機の運転限界はいずれかの安定限界より定められるとすれば、低励磁進相運転では定態安定度により左右されることになり、しかもこれは飽和の影響で図示よりさらに減少して考えなければならない。

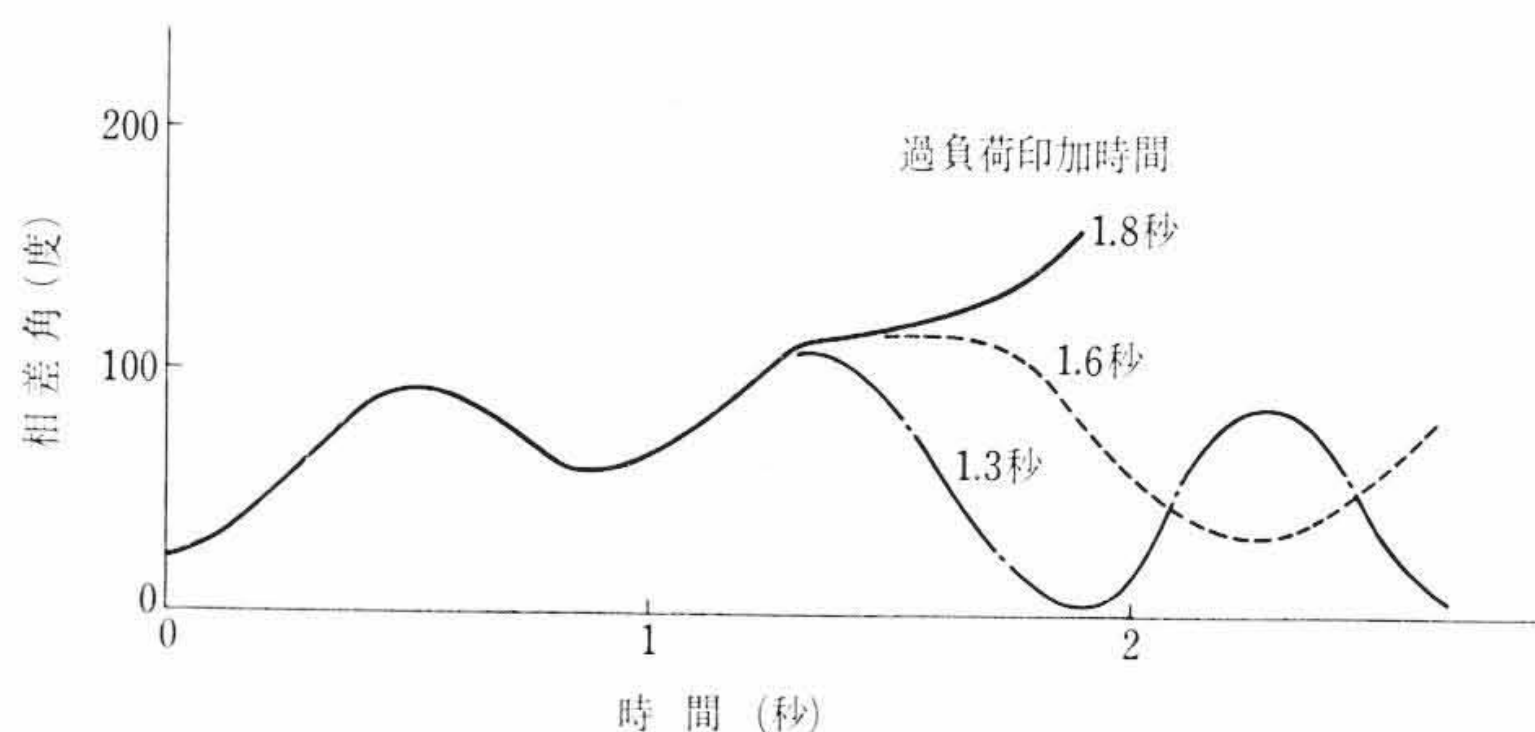
ここにおいて AVR の効果を活用し定常状態の運転を容易にさせるいわゆる動態安定度の研究はきわめて有意義となる。その詳細については次報に記することとする。

3.2 短時間過負荷特性

前項で述べたように、過渡的には安定であるが定態的には不安定



第14図 同期リアクタンスと短時間過負荷能力



第15図 短時間過負荷時の相角変化

な現象が同期機には生じうる。これは過渡リアクタンスは十分小さいが、同期リアクタンスは相当に大きい機械を想定すれば低励磁以外でも発生しうる可能性がある。

しかし、ここでは過負荷ということよりみて過負荷の印加される時間によりどうなるかを定態時の過負荷特性と比較して検討する。計算式は前項と同様に進め、結果をデジタル計算機によって求めた。

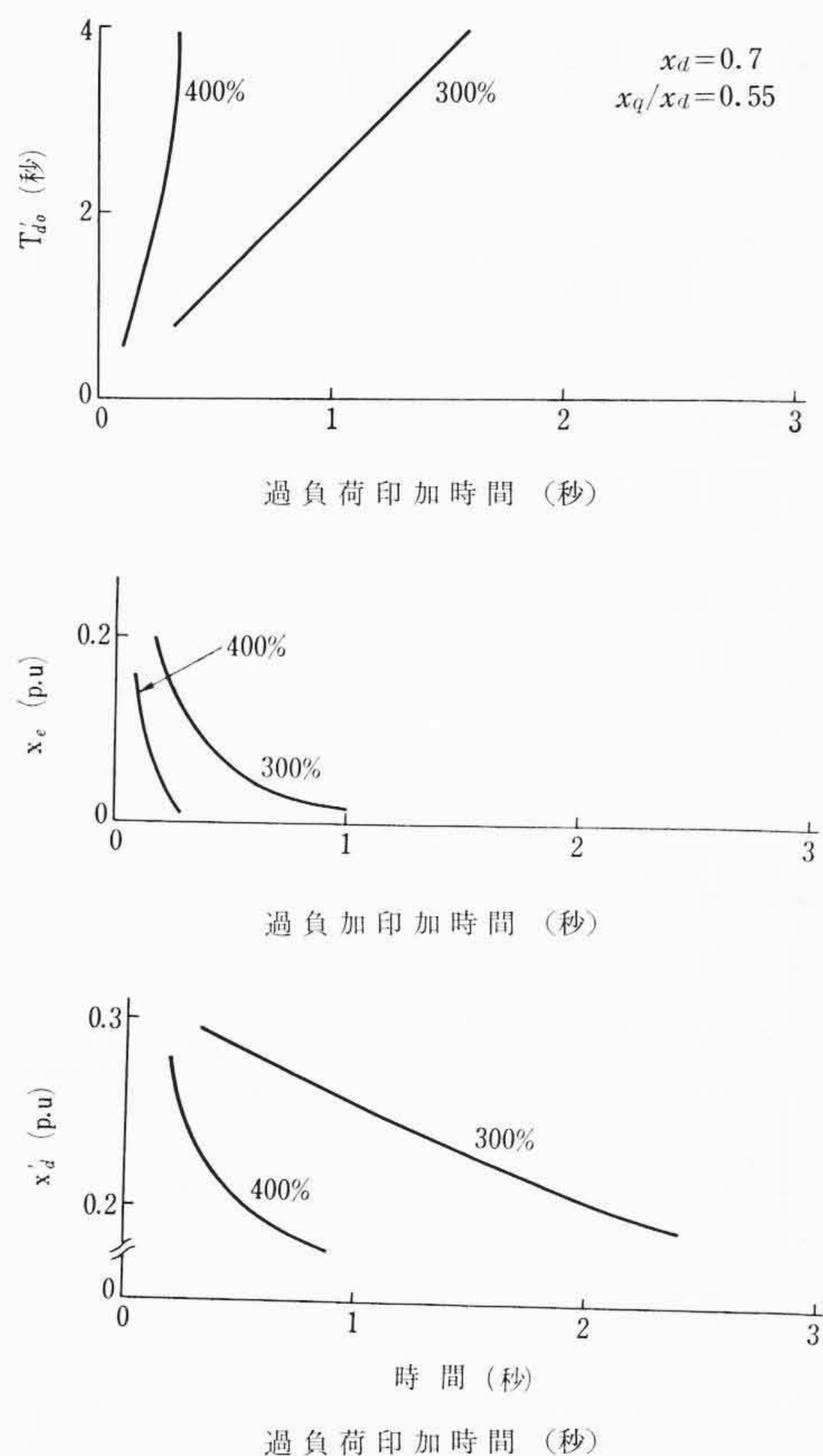
第14図は凸極機において力率1.0なる定格負荷がかかっているとき200%, 300%の過負荷が短時間印加された場合の安定限界を同期機の容量を代表する同期リアクタンスとの関係で示す。

無限大母線に直接つながれる同期機の界磁の時定数はいわゆる閉路時定数 T_d' であって、過渡リアクタンスの影響はその3倍くらいの時間経過後にはほとんど無くなるとみられる。しかるにこの計算結果をみると過負荷が $3 \times T_d' \approx 3$ 秒以上印加されても、過渡値の影響が残っていて定常時の安定限界を上まわっている。

同期はずれが生ずる有様を第15図にかかげる。振動が生ずるが、その中心線がしだいに上向きとなり、第3波以降で同期はずれになっている。

ついでに細部の様子を T_{d0}' や x_e および x_d' の影響について調べて第16図をえた。

以上をまとめると当然ながら短時間であれば定態安定限界を越す過負荷に耐えることができ、同期機容量の選定に考慮すべきことになる。



第16図 短時間過負荷安定限界

4. 結 言

定態安定度を中心にして考えると、同一短絡比においては凸極機が非凸極機より良く、とくに短距離の低励磁運転領域になるとその差は大きい。

飽和の影響は長距離送電ではあまり大きくはないが、安定方向に働き、短距離送電では効果は目立ってくる。

しかし出力無効電力安定限界の進相無効電力の能力という点よりみると飽和の影響は悪い方向に働き、無視することはできない。そして凸極機より非凸極機にその影響が大きい。

同期電動機などで問題になることの多い過負荷能力については飽和はよいほうに効くことがわかった。

次に過渡安定度と定態安定度を比較すると、長距離送電では前者が悪いが、短距離低励磁運転となるとかえって良くなることがわかる。この点低励磁進相運転には特異性があるといえる。

過負荷能力に対する印加時間長短の影響は相当あり、 $3 \times T_{d'}$ でもまだ若干は残っていることが計算により確かめられた。

参 考 文 献

- (1) S. B. Crary: Power System Stability (1947)



特 許 の 紹 介



特許第419977号(特公昭38-18199号)

東海竜男・田内省二・伴野正美
上田浩・渡辺宏

電 子 線 加 工 法

この発明はまず弱い電子線により被電子線加工材料中の着目する特性を持った位置を見だし、その位置またはそこを基準にして所望の距離だけ離れた位置で電子線の強度を強めて切断、加工などを行なう電子線加工法に関するものである。

この発明の方法をたとえば引上法で作った PnP あるいは nPn 接合シリコン単結晶板から多数の成長接合形シリコントランジスタ素子を製作する場合について図によって説明する。

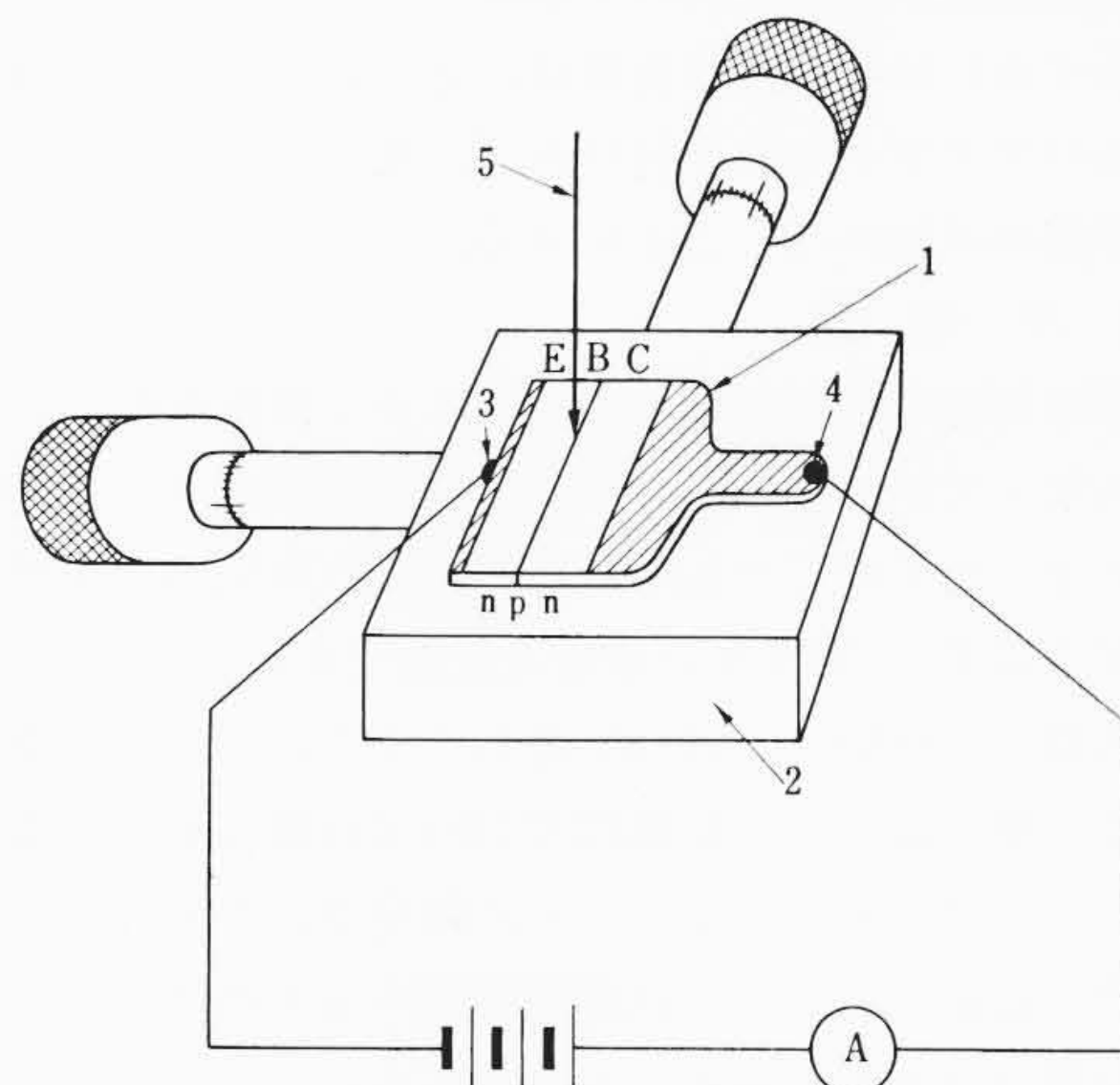
まず1で示される nPn 接合のシリコン単結晶板を電子線加工用試料台2に載置し、ついで単結晶板の3、4の位置にリード線をハンダ付し、外部から電流計を介して定電圧を印加する。この状態において単結晶板上に電子線 ($10 \mu\text{A}$, $10 \mu\phi$) を垂直方向から走査する。電子線照射位置がトランジスタのエミッタ、コレクタ領域内にある場合には、電流計の電流は少ないが、電子線がいったんベース領域に照射されると電流計の電流は急激に上昇するので、ベース層を検知することができる。次にこのベース層を基準として、コレクタ側に1 mm、エミッタ側に1.5 mmの寸法だけ電子線の位置を変え、電子線の強度を $500 \mu\text{A}$ 、スポット径 $50 \mu\phi$ にし、電子線をベース領域に平行に走査させて切断する。さらに電子線をベース領域に垂直にたとえば0.3 mm 間隔で照射、溶断すれば多数のトランジスタ素子を作ることができる。

この発明のおもな利点は試料加工位置の検出とその位置における加工とを連続して同一手段によって行なうことができる点および任

意形状の加工が可能な点、その際の破損および消耗が少ない点にある。

この発明は半導体の加工に限らず金属一般にも適用し得る。

(志村)



第1図