

同期電動機の過渡安定限界

Transient Stability Limit of Synchronous Motor

野原 哈夫*
Haruo Nohara

奥田 健三**
Kenzo Okuda

高林 乍人**
Hayato Takabayashi

要 旨

送電系に事故が発生した場合、プラントの受電電圧は急激に低下し、プラント内にある同期電動機は脱調しやすくなる。

本稿では、同期電動機の過渡安定限界について、受電電圧の低下と故障継続期間に着目して検討を行ない、次の諸点を明らかにした。

- (1) 電圧低下と許容故障継続期間の関係
- (2) 同期電動機のリアクタンスと安定限界の関係
- (3) 安定限界とプラント負荷の種類の関係

1. 緒 言

プラントには同期電動機、誘導電動機、静止負荷など各種の負荷が存在するが、系統側の事故によりプラントの受電電圧が急変した場合、同期電動機の安定度が問題になることが少なくない。このため、系統側事故に対する同期電動機の安定運転限界を調査し、運転限界に及ぼす各種パラメータの影響を明確にしておくことが肝要である。本稿では、同期機と誘導機または静止負荷からなるプラントにおいて、励磁方式、負荷の様相、同期機リアクタンスなどがプラントの過渡安定度に及ぼす影響を明らかにし、機器の計画に際し指針を与えることを目的とした。なお数値計算には電子計算機HITAC-5020Fを使用した。

2. 計算式の誘導

ここで取り扱う系統は図1(a)に示すように同期電動機と誘導電動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ている場合であり、誘導電動機をインピーダンスで模擬した場合についても検討する。

2.1 初期条件

図1(a)において系統電圧 E_∞ 、同期機電力 P_s 、 Q_s 、誘導機電力 P_l 、 Q_l を与えることにより、端子電圧 E_t 、誘導機すべり S は次式より求められる。

$$\dot{E}_t = \dot{E}_\infty - j(P - jQ)X_e / \bar{E}_t \quad (1)$$

$$P_l + jQ_l = f(E_t, S) \quad (2)$$

$$P + jQ = -(P_l + P_s) - j(Q_l + Q_s) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{E}_t$ は $\dot{E}_t$ の共役値を示している。

次にインピーダンス負荷が接続されている場合については、定常状態で、誘導電動機と同一容量の負荷を有するものとし、有効電力を P_L 、無効電力を Q_L とすると、

$$P + jQ = -(P_s + P_L) - j(Q_s + Q_L) \quad (4)$$

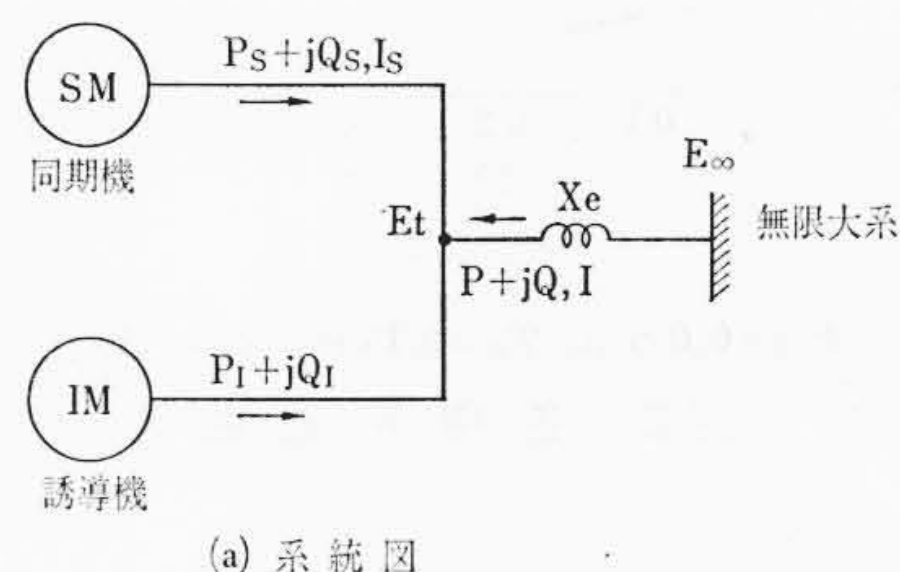
次に同期機横軸リアクタンス背後電圧 E_q は

$$\dot{E}_q = \dot{E}_t - \frac{(P_s - jQ_s)jX_q}{\bar{E}_t} \quad (5)$$

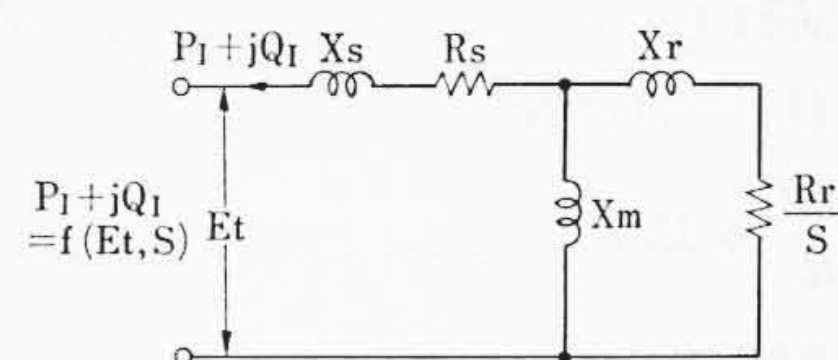
負荷インピーダンスは

$$\dot{Z}_L = -\frac{\dot{E}_t \cdot \bar{E}_t}{P_L - jQ_L} \quad (6)$$

となる。



(a) 系統図



(b) 誘導機等価回路

図1 計算説明図

2.2 過渡状態の計算

誘導機については固定子の過渡現象を無視し、固定子磁束を基準とすると、固定子、回転子に関し次式が成り立つ。

$$\text{固定子: } (R_s + j\omega_1 L_s) \dot{I}_{lm} + j\omega_1 M \dot{I}_r = \dot{E}_t \quad (7)$$

$$\text{回転子: } M(p + jS) \dot{I}_{lm} + [R_r + L_r(p + jS)] \dot{I}_r = 0 \quad (8)$$

ここで、 E_t : 端子電圧 I_{lm} : 固定子電流

I_r : 回転子電流 $R_s, (R_r)$: 固定子(回転子)抵抗

$L_s, (L_r)$: 固定子(回転子)自己インダクタンス

M : 固定子、回転子巻線間相互インダクタンス

$$S = \omega_1 - \omega_2 = p\theta_1 - p\theta_2 \quad (9)$$

ここで、 $\theta_1, (\omega_1)$: 固定子磁束の固定子に対する角度、(角速度)

$\theta_2, (\omega_2)$: 回転子の固定子に対する角度、(角速度)

回転子の磁束鎖交式は

$$\phi_r = M I_{lm} + L_r I_r \quad (10)$$

(7), (8), (10) より I_r を消去して、固定子および回転子に関する式を導くと、

$$\text{固定子: } (R_s + jX') I_{lm} + e' = E_t \quad (11)$$

$$\text{回転子: } e' - j(X - X') I_{lm} + I_r(p + jS)e' = 0 \quad (12)$$

ここで、 $X' = \omega_1 \left(L_s - \frac{M^2}{L_r} \right) = X_s + \frac{X_r \cdot X_m}{X_r + X_m}$ = 過渡リアクタンス

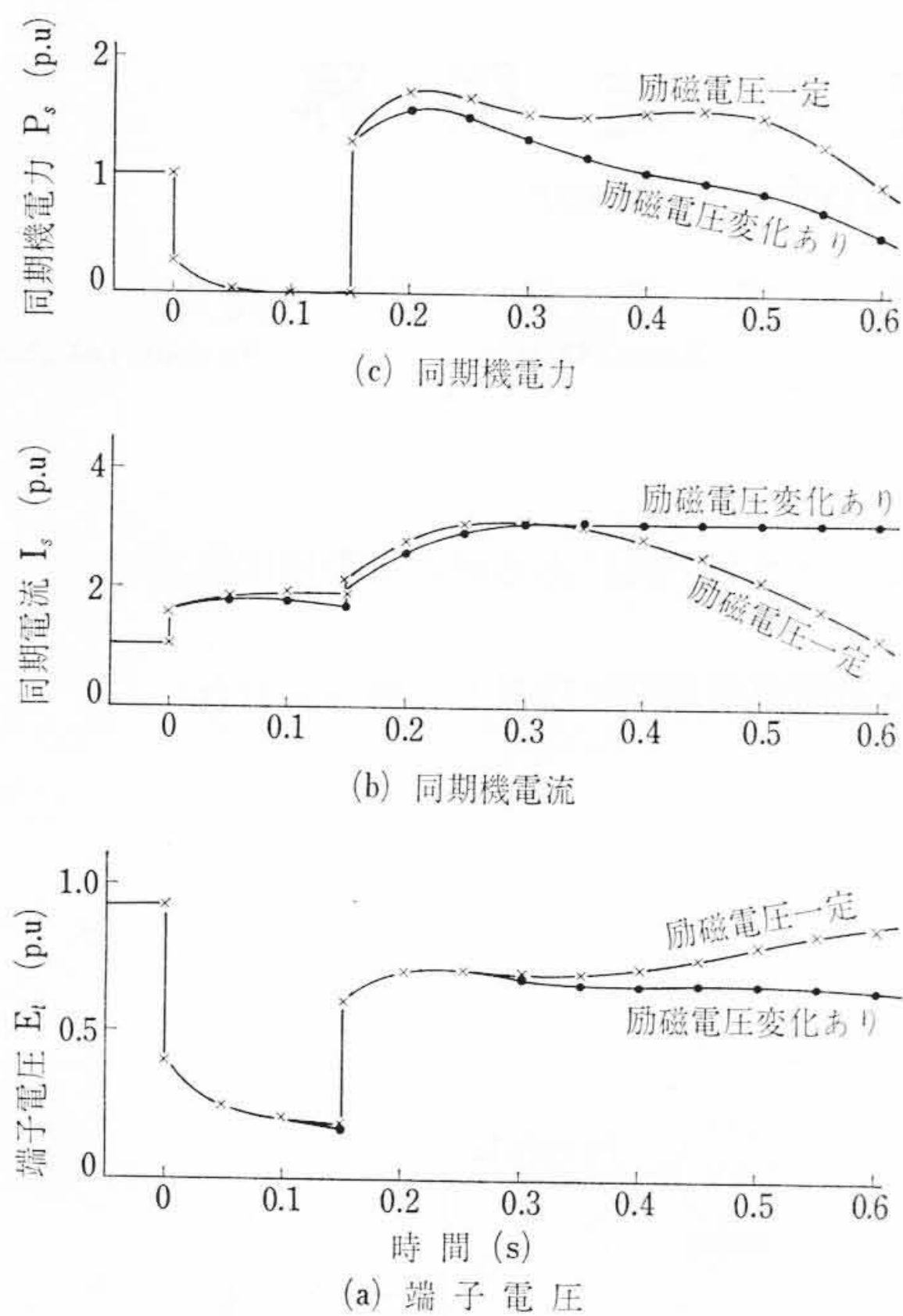
$X = \omega_1 L_s = X_s + X_m$ = 同期リアクタンス

$e' = j\omega_1 \frac{M}{L_r} \phi_r$ = 過渡リアクタンス背後電圧

$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{X_r + X_m}{2\pi f \cdot R_r}$ = 回転子開路時定数

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立研究所 工学博士



($E_{td}=0.0$ p.u., $T_d=0.15$ 秒, $X_e=0.10$ p.u.)

図2 各種変動曲線

次にここで求めた e' を同期機の横軸リアクタンス背後電圧 E_q と同様に考え、同期機横軸リアクタンス背後電圧を求める⁽³⁾。

同期機界磁電圧に関しては次式が成立する。

$$E_x = T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} + E_{fd} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 T_{d0}' : 開路時定数, E_x : 励磁電圧

E_{fd} : 界磁電流に相当する電圧

e_q' : 過渡リアクタンス背後電圧

インピーダンス負荷の場合には初期条件より求めたインピーダンスを用いて計算を進める。

電動機の運動方程式は

$$\frac{M}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + P_d \frac{d\theta}{dt} = P_M - P_E \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 M : ($=2H$) 単位慣性定数, f : 系統周波数 (Hz)

P_M : 機械出力, P_E : 電気入力, P_d : 制動係数

3. 計算条件

図1(a)に示す系統において、系統電圧 E_∞ が単位関数的に E_{td} まで降下し、時間 T_d を経たのち、再び変化前の値に回復するものとする。

同期電動機および誘導電動機は同一容量を有し、それらの機械定数は次の値を有するものとし、これを基準ケースとする。

同期電動機: $X_d=1.00$ p.u., $X_q=0.70$ p.u., $X_d'=0.40$ p.u.

$M=4$ (kW·s/kVA), $T_{d0}'=2.0$ (s)

$P_d=3.0 \times 10^{-2}$ p.u./rad/s

誘導電動機: $X_s=0.10$ p.u., $R_s=0.02$ p.u., $X_m=4.0$ p.u.

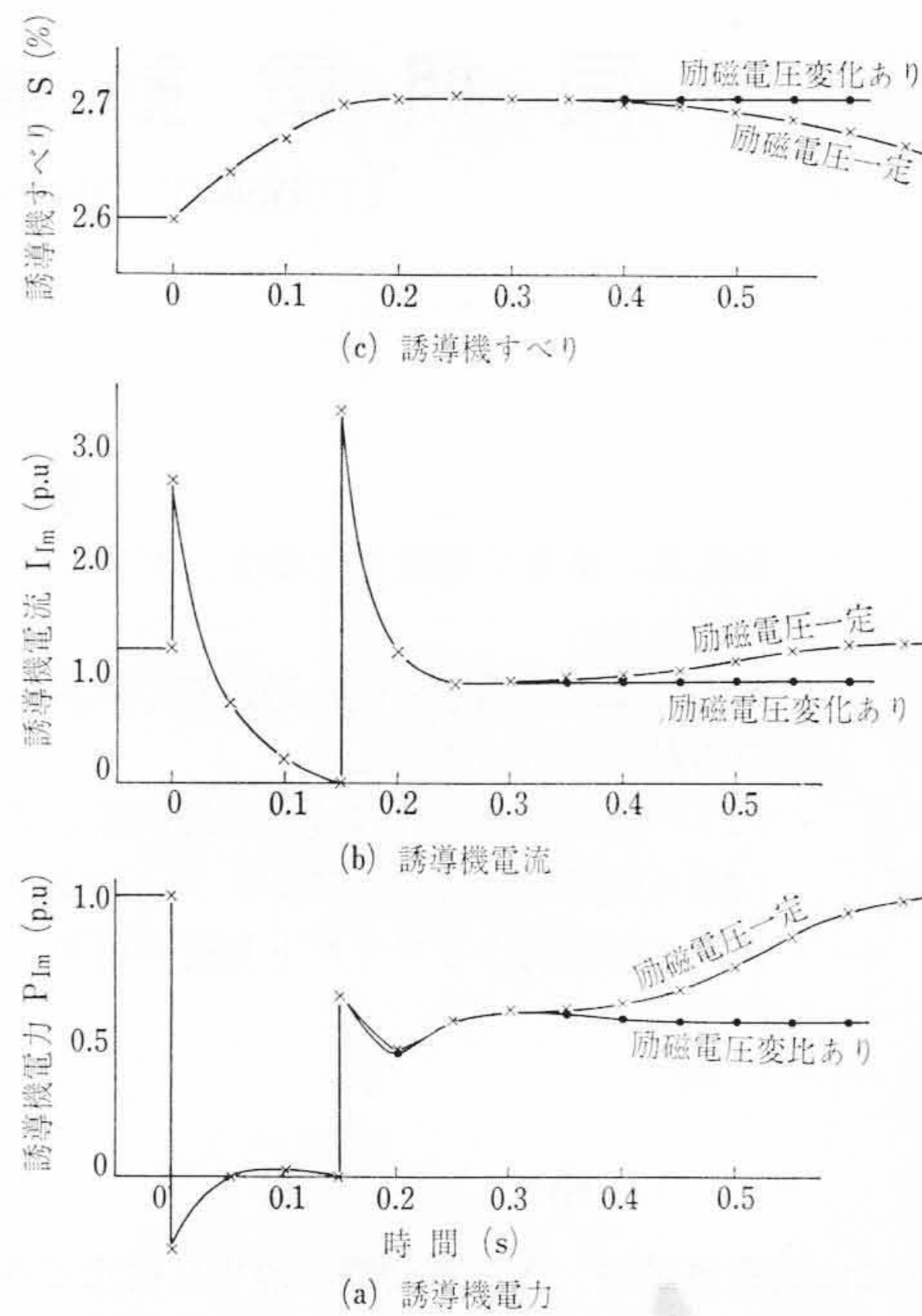
$X_r=0.08$ p.u., $R_r=0.02$ p.u.,

$M=6$ (kW·s/kVA), $P_d=6.5 \times 10^{-2}$ /rad/s

(誘導電動機等価回路については図1(b)参照)

外部リアクタンス: $X_e=0.05$ p.u. (電動機容量基準)

検討項目としては、各種機械定数の影響、誘導電動機とインピーダンス負荷との比較、同期機励磁方式の影響などである。電動機の初期条件は外部リアクタンスの等しいケースでは、いずれの場合も、



($E_{td}=0.0$ p.u., $T_d=0.15$ 秒, $X_e=0.10$ p.u.)

図3 各種変動曲線

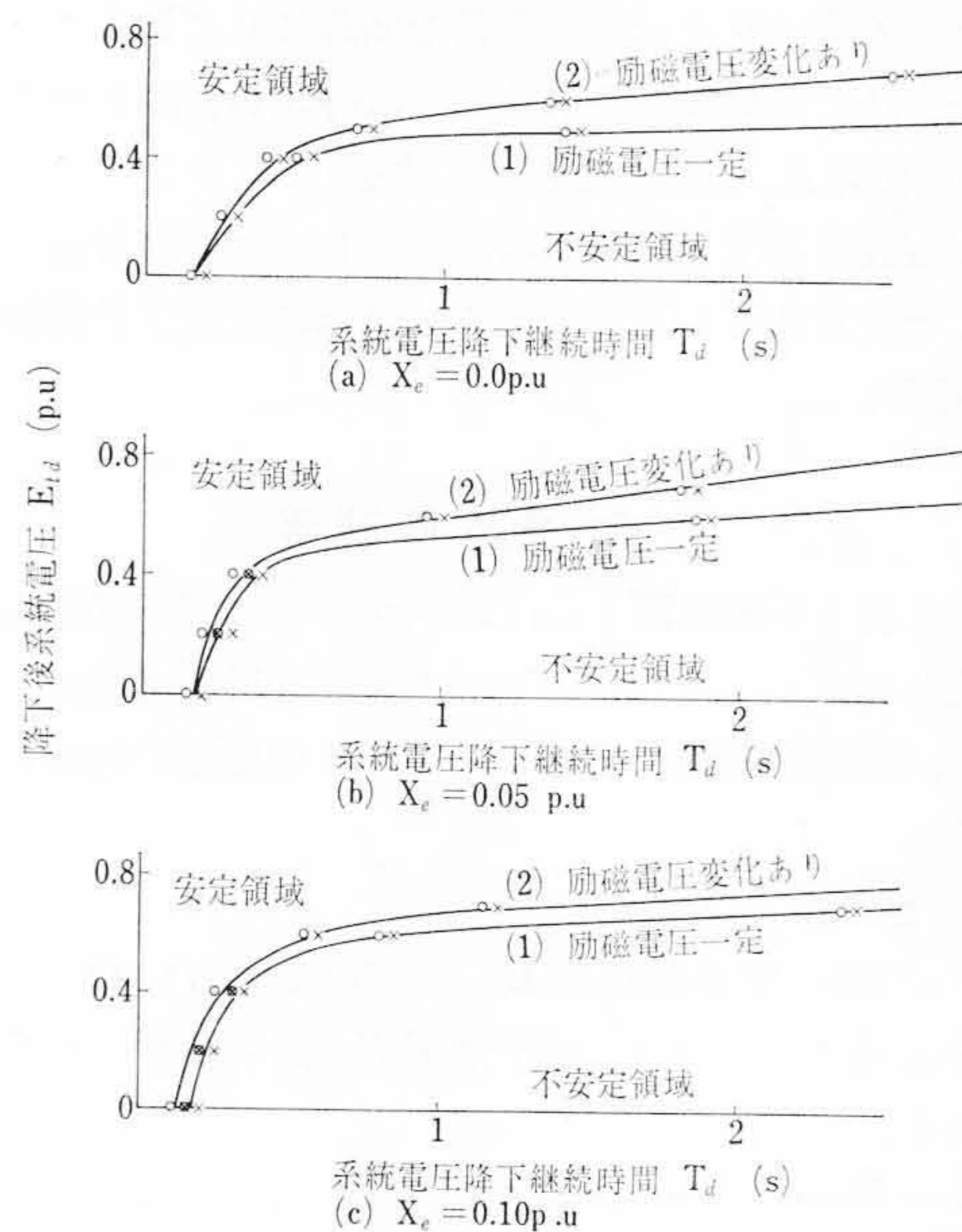


図4 降下後系統電圧対降下継続時間曲線

電動機端子で同一有効電力を消費するものとする。

4. 計算結果ならびに検討

4.1 励磁電圧の影響

図2, 3は外部リアクタンス $X_e=0.1$ p.u. で運転中に系統電圧が1.0 p.u. からゼロへ急減し、かつ降下継続時間 $T_d=0.15$ 秒の場合の結果である。図において、界磁電圧が系統電圧の降下にかかわらず一定の場合と、系統電圧の降下と同じ割合で変化する場合につき比較する。すなわち、励磁電源を別系統から取る場合と同一電源から取る場合に相当する。

端子電圧は、系統電圧降下中では両者間に大差なく、系統電圧回復後は励磁電圧一定の場合には、電圧は上昇し事故前の値に回復していくのに比べ、励磁電圧が変化する場合に回復しておらず、励磁条件により安定な場合と脱調に至る場合が起こりうることを示している。図3はこの場合の誘導機側の諸量であり、系統電圧の降下に

よりすべりが増加しているが、電圧の回復によりこの減速は抑制される。誘導機には、電圧変化瞬時に突入電流が流れる。誘導機電力は電圧降下直後に発電運転となり、回復時には励磁電圧一定方式では徐々に増加し、電圧降下前の値に回復する。

図4は E_{fd} と T_d の関係を、励磁電圧が(1)一定の場合と、(2)系統電圧と同じ割合で変化する場合につき記したものである。この図で、各曲線の左側は同期機が安定に運転できる範囲であり、右側は脱調に至る領域である。すなわち、図4(a)につき一例を示すと、いま想定した条件では、励磁電圧が一定であれば、系統電圧が0.40p.uまで低下した場合0.55秒以内に電圧が回復すれば安定であり、それ以上継続すれば同期はずれを起こすのに対し、励磁電圧が変化する場合には、この限界の値が0.45秒と約0.1秒短くなっていることがわかる。これらの図によれば励磁電源が系統から供給される場合、安定領域は若干せまくなる傾向にあり、また外部リアクタンスが小さいほど安定領域は広がる。励磁電源の取り方による相違は、降下時の電圧が高いほど顕著に現われている。

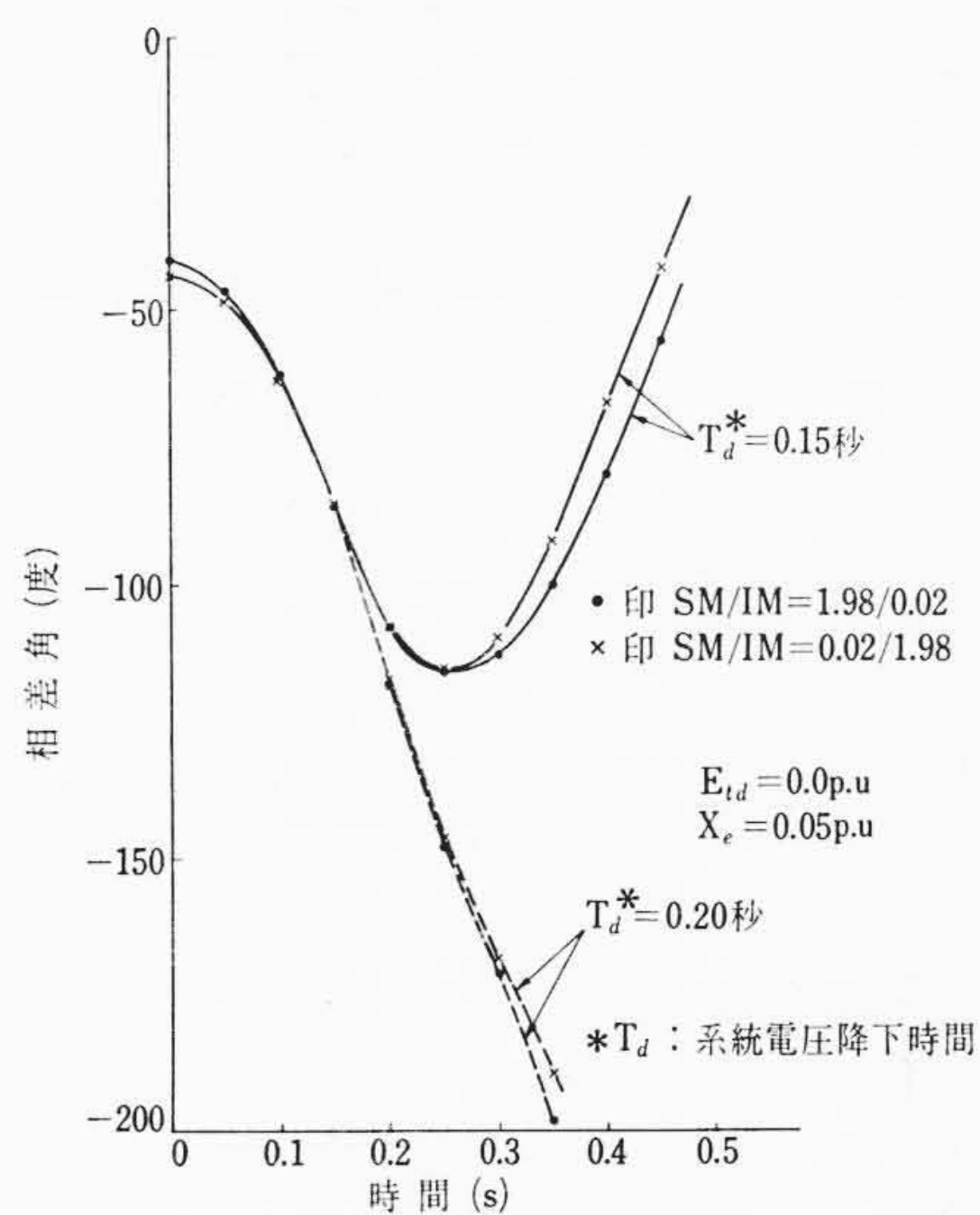


図5 相角度変動曲線

4.2 同期機と誘導機の構成比率による影響

図1(a)の系統で、誘導電動機と同期電動機の容量総和を2.0p.uとし、その構成比較をかえた場合について検討する。機械定数は自己容量ベースで基準ケースの値を有するものとする。

図5は、 $E_{fd}=0$ 場合の結果であり、同期機SMと誘導機IMの容量がそれぞれ1.98, 0.02と、この逆の構成比の場合につき記してある。相差角変動状況をみると、両者とも $T_d=0.15\sim 0.20$ 秒の間に安定限界があり、ほとんど差異がない。

図6は、プラント内にある同期電動機と誘導電動機の容量の和に対する同期機容量を横軸、 T_d を縦軸、 E_{fd} をパラメータとして画いたものである。各曲線の下側が安定運転領域を示している。 $E_{fd}=0$ では、同期機の容量比に無関係に $T_d=0.15\sim 0.20$ 秒の間に安定限界が存在し、 E_{fd} の増大に伴い T_d の安定運転限界は増大し、この傾向は負荷中に占める同期機比率の小さいほど顕著に現われている。すなわち、同期機と誘導機で構成されている系を同期機のみと仮定したときの安定限界は、実際の値よりやや過酷な結果を与えることを示している。

4.3 誘導機負荷とインピーダンス負荷との比較

定常状態において誘導機負荷と同一容量のインピーダンス負荷を有する場合につき比較を行なう。図7はこの場合の相差角の結果であり、両者間にはほとんど差が現われていない。同図には誘導機

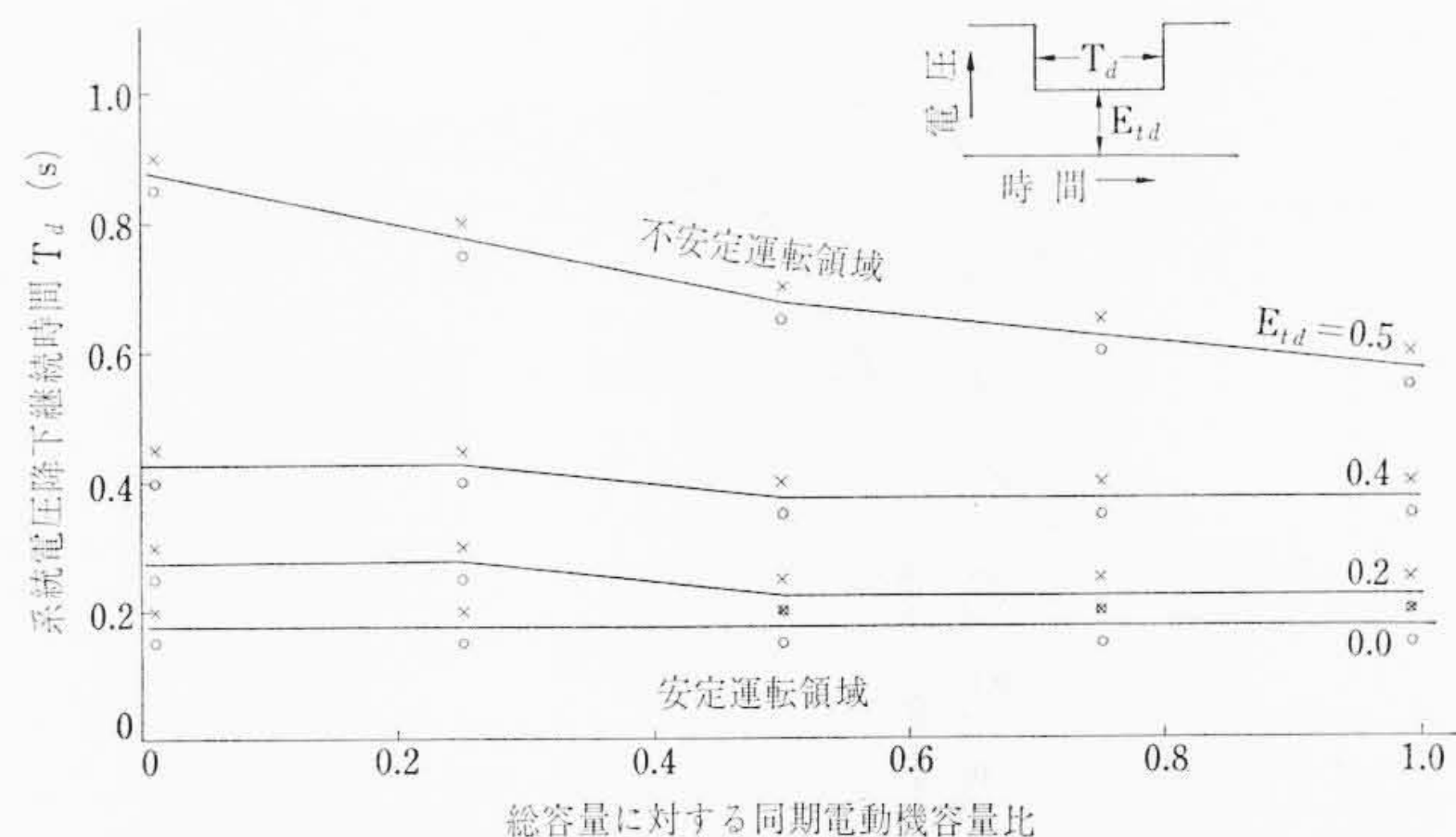


図6 系統電圧降下継続時間対同期電動機容量曲線

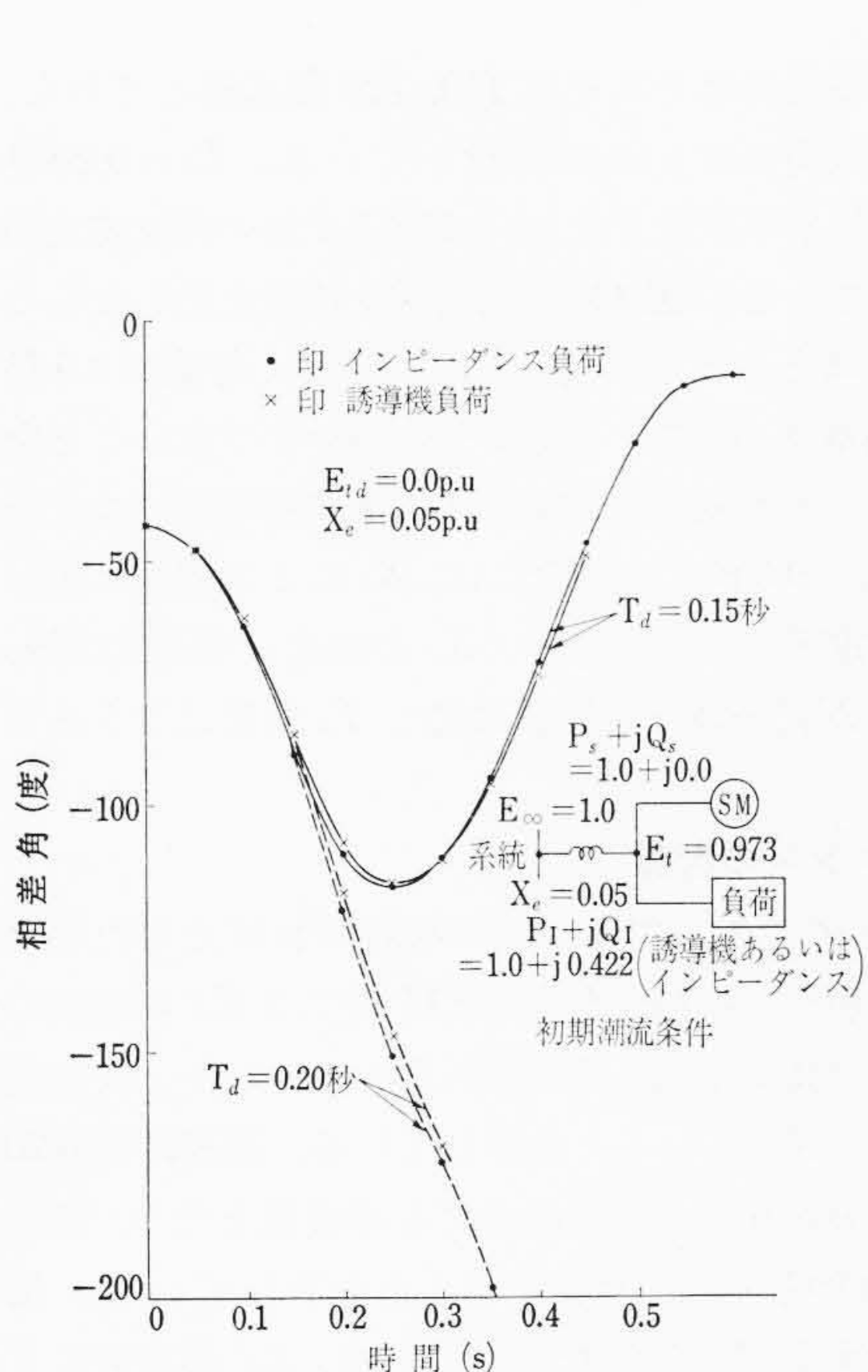


図7 相角度変動曲線

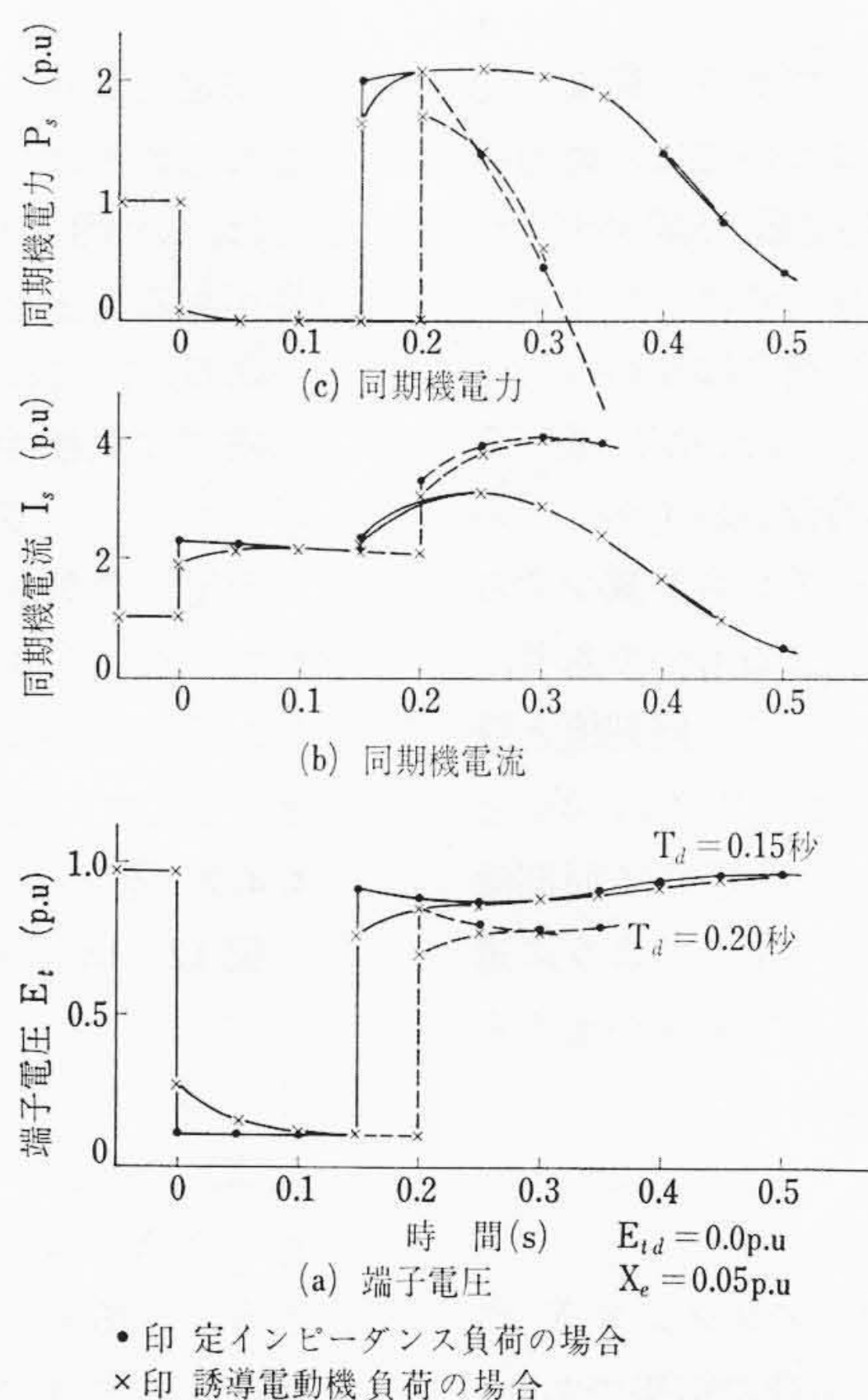


図8 各種変動曲線

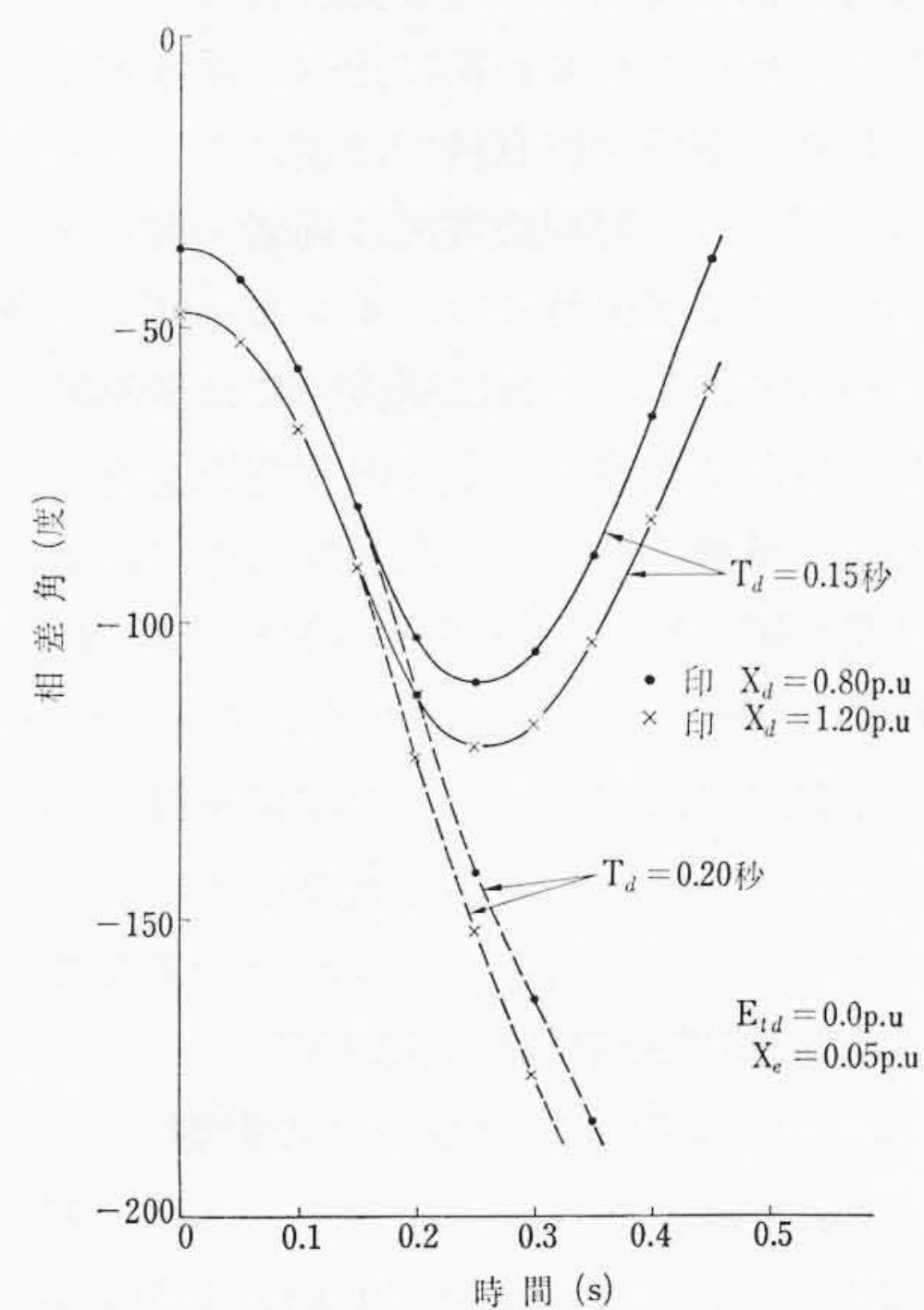


図9 相角度変動曲線

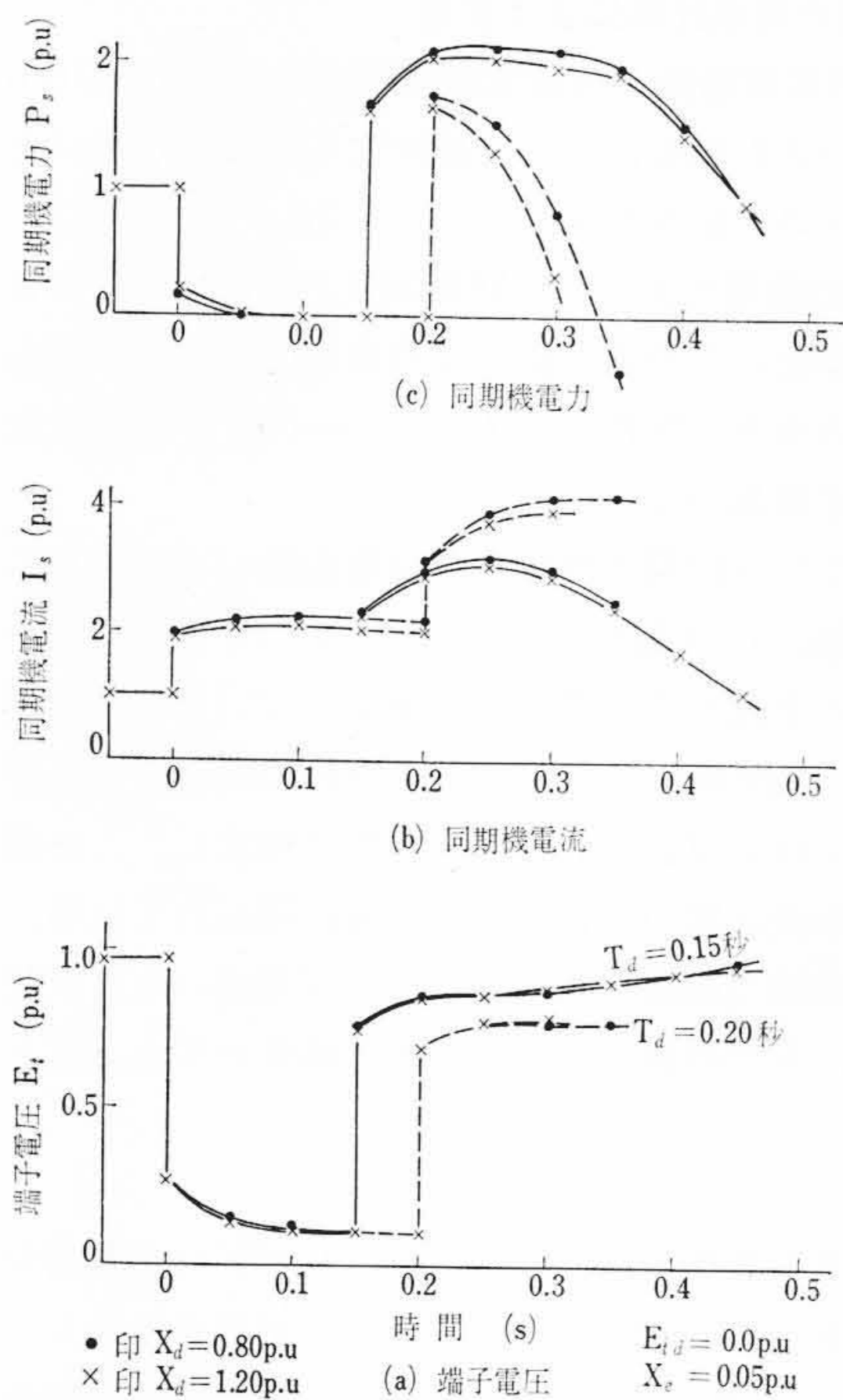


図10 各種変動曲線

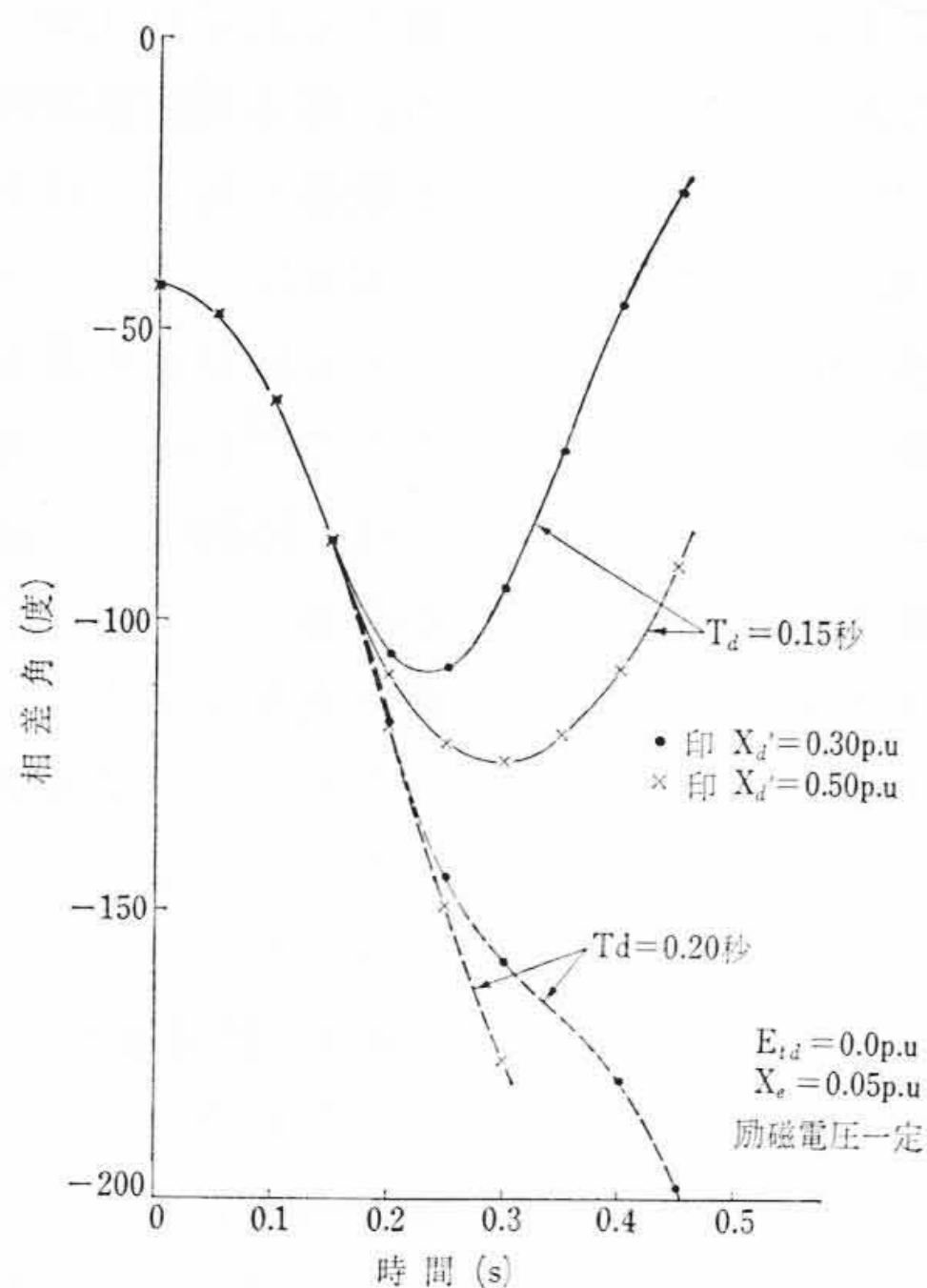


図12 相差角変動曲線

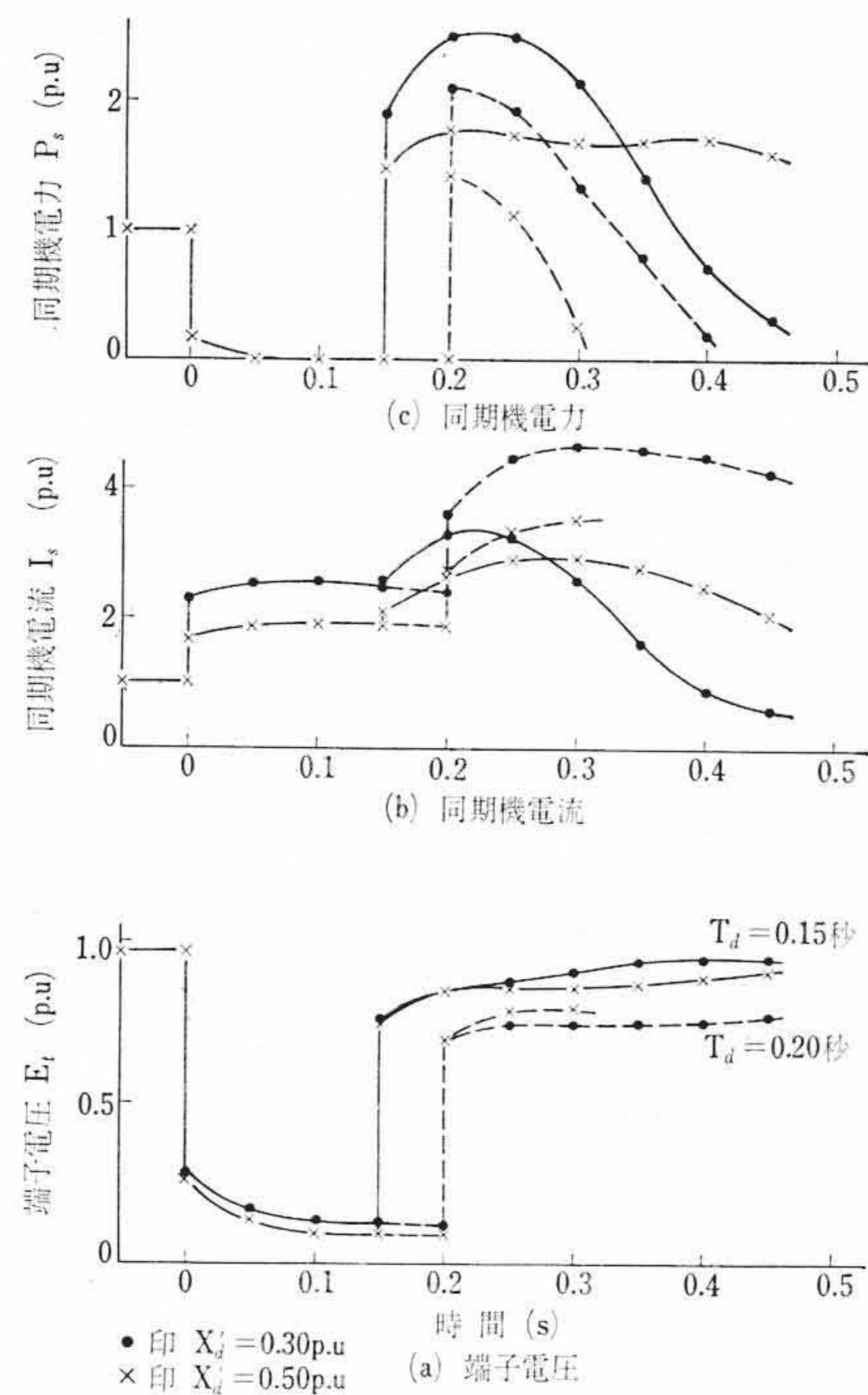
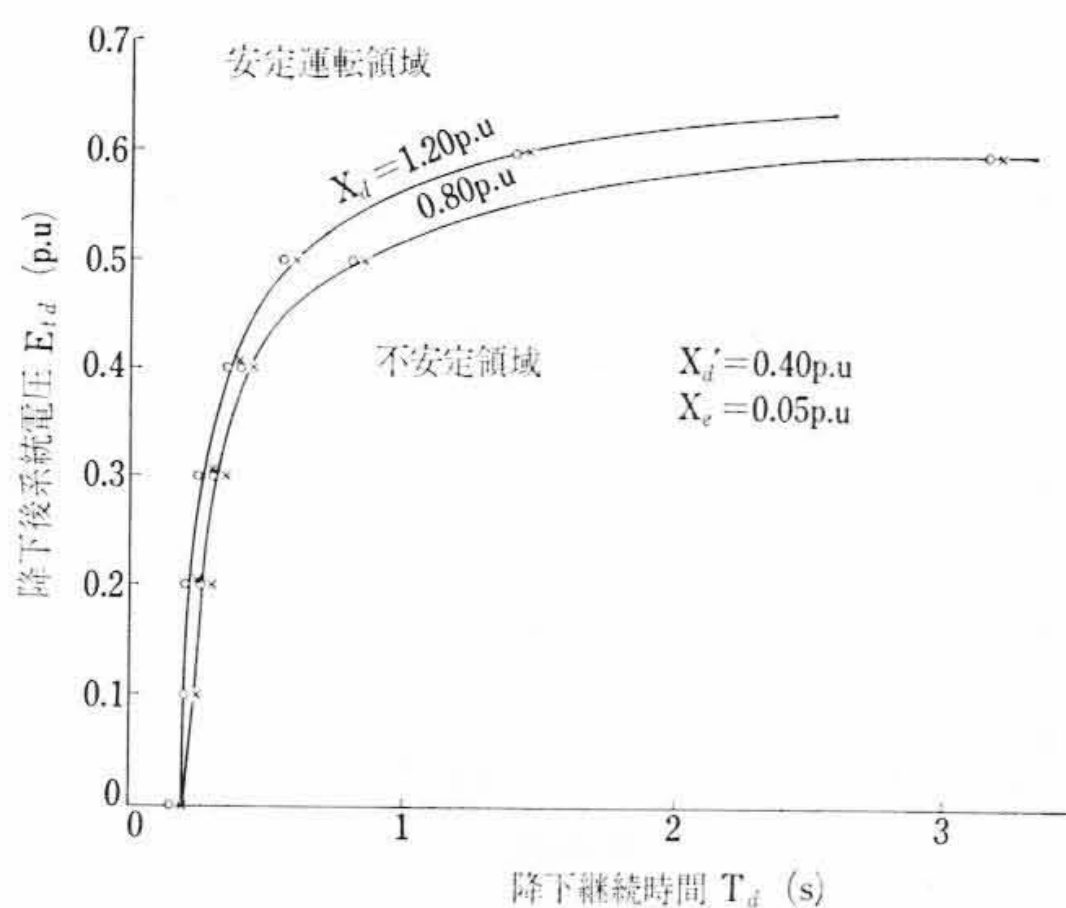
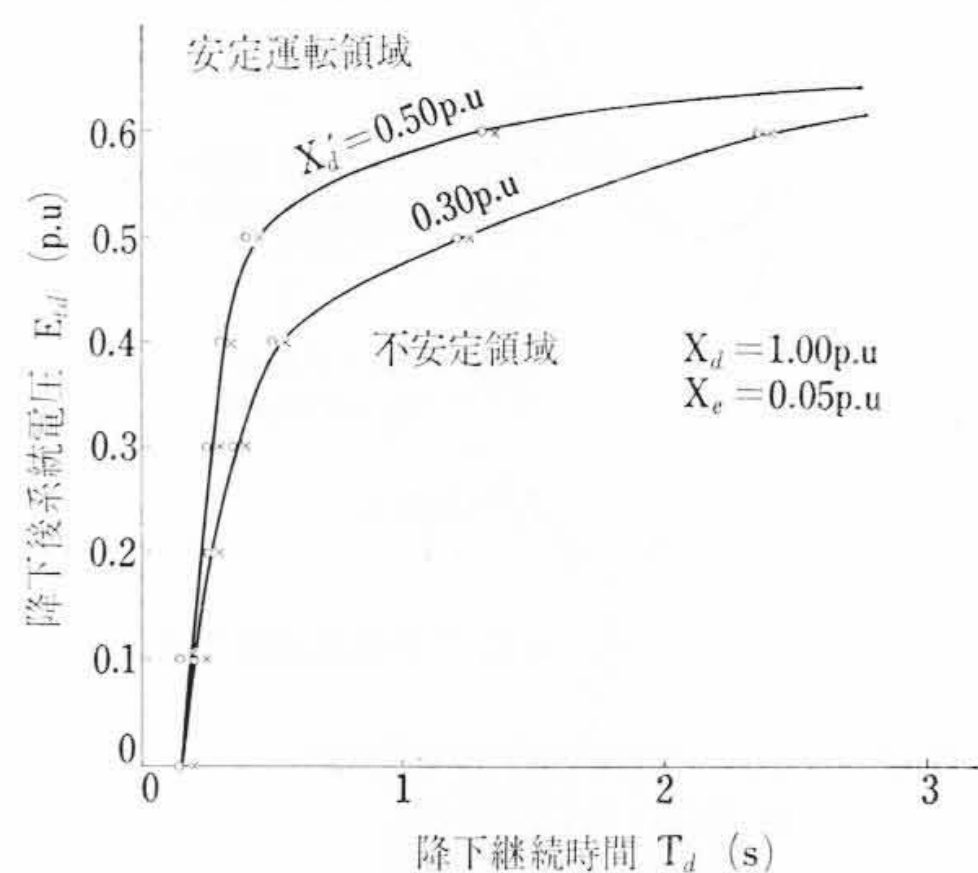


図13 各種変動曲線

図11 E_{td} 対 T_d 曲線 (同期リアクタンスの影響)図14 E_{td} 対 T_d 曲線 (過渡リアクタンスの影響)

またはインピーダンス負荷時の初期潮流も併記してある。図8は同期機側諸量について記したものであり、端子電圧については、誘導機負荷がある場合には誘導機内部電圧が回転子時定数で減少するためインピーダンス負荷に比べ、系統電圧降下直後の値はうわまわっており、電圧回復直後では逆にインピーダンス負荷のほうがうわまわっている。同期機電流は両者の間にはほとんど差がないが、電圧降下時および回復時には、インピーダンス負荷の場合がわずかにうわまわっている。これは過渡時には誘導機インピーダンスが減少することおよび前述のように内部電圧を有することによるものであり、時間の経過にしたがい両者は同様の結果を示している。同期機と誘導機の構成比が1:1の場合につき検討を行なった結果では、 E_{td} と T_d との関係を含めて誘導機負荷とインピーダンス負荷では同期機の安定限界に関して同一の結果を得ており、ここで示したように過渡安定度の計算で誘導電動機をインピーダンス負荷で置きかえることは、計算時間を大幅に短縮できることを示唆している。

4.4 同期機定数による影響

4.4.1 同期リアクタンスの影響

図9は直軸同期リアクタンス X_d 、横軸同期リアクタンス X_q の比を一定とし、 $X_d=0.80$ p.u., 1.20 p.u.とした場合の結果であり、 X_d の変化により初期相差角は変化する。両者とも $T_d=0.15$ 秒で

は安定であり、最大相差角はそれぞれ110, 120度に達しており、これらの差は初期相差角の差とほぼ一致している。 $T_d=0.20$ 秒では、いずれのケースも不安定となり、0.15~0.2秒の間に安定限界があることを示している。図10は同期機の諸量を記したものであるが、これらはほとんど差が現われておらず、時間が0.5秒以内では動揺中の諸量は X_d によりあまり影響をうけないことを示している。図11は降下後の系統電圧と降下継続時間につき記したものであり、 $E_{td}=0.0$ p.u.の場合には、 X_d による相違は現われていないが降下後電圧が大きいほど、 X_d の相違は顕著に現われ、 X_d の小さいほうが同一降下電圧値に対し T_d を延ばしうること示している。

4.4.2 過渡リアクタンスの影響

図12~14は過渡リアクタンス X_d' を0.30, 0.50 p.u.とした場合の結果であり、系統電圧の降下継続時間0.15秒では X_d' の増加に伴い最大相差角は増大し、約16度の差が現われており、安定度上 X_d' の小さいほうが好ましいことを示している。継続時間0.20秒では $X_d'=0.30, 0.50$ p.u.いずれの場合にも不安定となり、安定限界は0.15秒と0.20秒との間に存在することを示している。図13は同期機諸量の変動状況を示したものであり、 X_d' の相違により電圧値にはほとんど差が現われておらず、また、同期機電流

の最大値の差は約 1.5 p. u の値を示し、 X_d' の小さいほうが電流値は大きくなっている。同期機電力は X_d' の小さいほうが最大値で約 0.75 p. u 程度うまわった値を示している。図 14 は降下後の系統電圧値 E_{td} と降下継続時間 T_d の関係を示したものであり、 E_{td} の増大に伴い同期機が安定に運転できる T_d はのびており、 E_{td} の大きいほど X_d' による相違は顕著である。すなわち、電圧降下が少なくかつ T_d が比較的長い系では、同期機の X_d' は小さくすることが望ましいことを示している。

4.4.3 検 討

同期機の新、増設による定数の決定に際しては、以上のように X_d , X_d' とともに小さいほうが有利な結果を示しているが、これらを小さくすることは電動機容量の上昇をまねくため、経済的見地と系統側の保護方式により決まる事故継続時間、事故発生の様相すなわち受電電圧の降下状況ならびに系統条件などを考慮に入れて適切な選定をすることが必要であろう。

5. 結 言

同期電動機と誘導電動機あるいは静止負荷からなるプラントにおいて、受電電圧が系統側の事故により急激に降下したときの同期電動機の安定度の検討を行ない次の諸点を明らかにすることができた。

- (1) 事故継続時間が短い場合は、系統側インピーダンスの影響は比較的少なく、受電電圧がゼロ付近まで降下しても安定

運転が可能であるが、事故継続時間が長い場合には系統側インピーダンス、励磁方式その他の影響が顕著である。

- (2) 負荷中に占める同期機と誘導機との構成比が安定度に及ぼす影響をみると、事故時の電圧が低い場合には電動機の構成比に関係なくほぼ一定であるが、事故時の電圧が比較的高い場合には同期機の構成比率が低いほど電圧降下許容継続時間は増大する。
- (3) 同期リアクタンス、過渡リアクタンスのいずれも小さいほうが電圧降下許容時間はのび、この傾向は降下時の電圧が高いほど顕著である。
- (4) 本稿で取り扱った範囲では、同期機と並列に接続されている誘導機負荷をインピーダンス負荷で模擬した場合、安定限界についてはほぼ同様の結果が得られた。

終わりに当たり、平素ご指導、ご激励を賜わっている日立工場西部長、北野副部長に対し、深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) Shankle, Murphy, Long Harder: Trans. of AIEE 74 (Feb. 1955) p. 1563~1580
- (2) Concordia, Cray, Kron: Trans. of AIEE, 61 (May 1942) p. 286~296
- (3) S. B. Cray: Power System Stability (II), 1947, John Wiley & Sons, Inc.



特 許 の 紹 介



特許第510243号(特公昭42-16010号)

永田 稔・大野 稔

電 界 効 果 形 ト ラ ン ジ ス タ

4極電界効果形トランジスタは、図1に示すように、P型(またはN型)の半導体基板1にN型(またはP型)のチャンネル層4を形成し、このチャンネル層の両端にそれぞれソース電極Sとドレイン電極Dを形成し、チャンネル層4の上に絶縁物層5を介して第1ゲート電極 G_1 を設けるとともに半導体基板1に第2ゲート電極 G_2 を設けた構造の素子であり、この素子は第1ゲート電極 G_1 を入力端子として、たとえば図2に示す回路接続で用いたとき、きわめて高い入力インピーダンスを有する。したがってこのトランジスタは特に微小電流増幅回路にきわめて有効な素子として知られている。

本発明はこの種電界効果形トランジスタの改良に関し、特に入力インピーダンスをさらに高めたトランジスタを提供せんとするもの

で、従来素子では第1ゲート G_1 とドレインDの各ステム引出線が互いに近接した配置となっているため、 G_1 -D間の充てん絶縁物の表面に沿ってリーク抵抗 R_r が存在し、特にこの R_r を介して流れるリーク電流が入力インピーダンスの制限に大きく関与していることに着目してなされたものである。図3は本発明の電界効果形トランジスタを示すもので、第1ゲート電極 G_1 とドレイン電極Dの各引出線 G_{1e} , D_e の間に、充てん絶縁物Mに突出させて導体Zを形成し、この導体Zを一定電位(たとえばアース)に接続することにより、リーク抵抗 R_r の効果を除去したものである。なお、上記突出導体Zは、ソース電極Sまたは第2ゲート電極 G_2 のステム引出線で代用することもできる。(森脇)

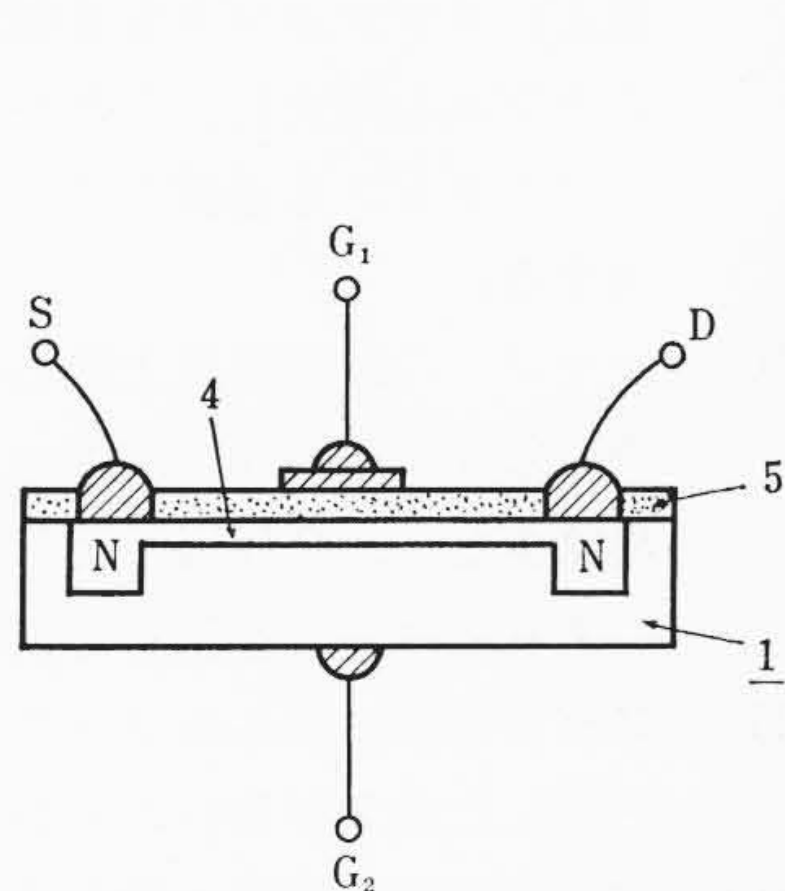


図 1

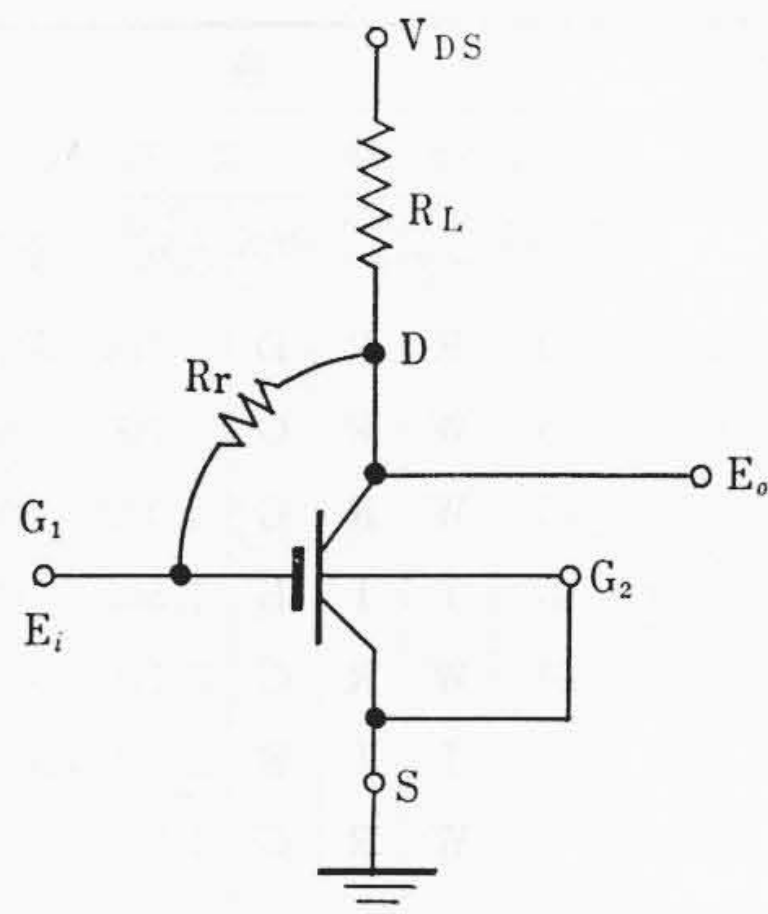


図 2

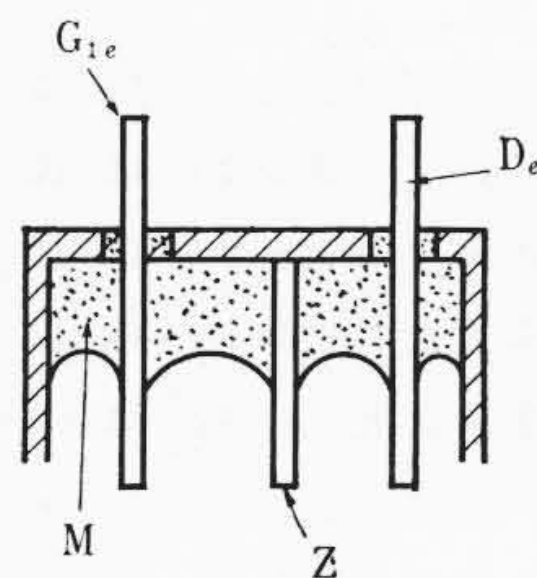


図 3